

1 材料的力学性能

1-1 一圆杆的直径为 2.5 mm、长度为 25cm 并受到 4500N 的轴向拉力，若直径拉细至 2.4mm，且拉伸变形后圆杆的体积不变，求在此拉力下的真应力、真应变、名义应力和名义应变，并比较讨论这些计算结果。

解：根据题意可得下表

拉伸前后圆杆相关参数表

	体积 V/mm^3	直径 d/mm	圆面积 S/mm^2
拉伸前	1227.2	2.5	4.909
拉伸后	1227.2	2.4	4.524

$$\text{真应力 } \sigma_T = \frac{F}{A} = \frac{4500}{4.524 \times 10^{-6}} = 995 (\text{MPa})$$

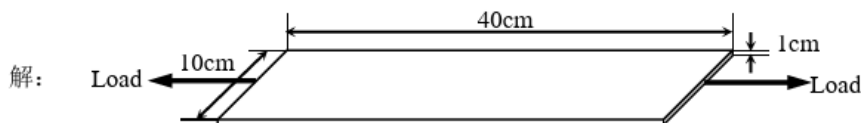
$$\text{真应变 } \varepsilon_T = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A} = \ln \frac{2.5^2}{2.4^2} = 0.0816$$

$$\text{名义应力 } \sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{4500}{4.909 \times 10^{-6}} = 917 (\text{MPa})$$

$$\text{名义应变 } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{A_0}{A} - 1 = 0.0851$$

由计算结果可知：真应力大于名义应力，真应变小于名义应变。

1-2 一试样长 40cm，宽 10cm，厚 1cm，受到应力为 1000N 拉力，其杨氏模量为 $3.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ，能伸长多少厘米？



$$\Delta l = \varepsilon \cdot l_0 = \frac{\sigma}{E} \cdot l_0 = \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot E} = \frac{1000 \times 40}{1 \times 10 \times 10^{-4} \times 3.5 \times 10^9} = 0.0114 (\text{cm})$$

1-3 一材料在室温时的杨氏模量为 $3.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, 泊松比为 0.35, 计算其剪切模量和体积模量。

解: 根据 $E = 2G(1 + \mu) = 3B(1 - 2\mu)$ 可知:

$$\text{剪切模量 } G = \frac{E}{2(1 + \mu)} = \frac{3.5 \times 10^8}{2(1 + 0.35)} = 1.3 \times 10^8 \text{ (Pa)} \approx 130 \text{ (MPa)}$$

$$\text{体积模量 } B = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} = \frac{3.5 \times 10^8}{3(1 - 0.7)} = 3.9 \times 10^8 \text{ (Pa)} \approx 390 \text{ (MPa)}$$

1-4 试证明应力-应变曲线下的面积正比于拉伸试样所做的功。

证: 面积 $S = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma d\varepsilon = \int_{l_1}^{l_2} \frac{F}{A} \frac{dl}{l} = \frac{1}{V} \int_{l_1}^{l_2} F dl = \frac{1}{V} W$, 亦即 $S \propto W$.

或者:

$$\text{做功 } W = \int_{l_1}^{l_2} F dl = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} A \sigma d\varepsilon = V \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma d\varepsilon = VS, \text{ 亦即 } W \propto S.$$

1-5 一陶瓷含体积百分比为 95% 的 Al_2O_3 ($E = 380 \text{ GPa}$) 和 5% 的玻璃相 ($E = 84 \text{ GPa}$), 试计算其上限和下限弹性模量。若该陶瓷含有 5% 的气孔, 再估算其上限和下限弹性模量。

解: 令 $E_1 = 380 \text{ GPa}$, $E_2 = 84 \text{ GPa}$, $V_1 = 0.95$, $V_2 = 0.05$ 。则有

$$\text{上限弹性模量 } E_H = E_1 V_1 + E_2 V_2 = 380 \times 0.95 + 84 \times 0.05 = 365.2 \text{ (GPa)}$$

$$\text{下限弹性模量 } E_L = \left(\frac{V_1}{E_1} + \frac{V_2}{E_2} \right)^{-1} = \left(\frac{0.95}{380} + \frac{0.05}{84} \right)^{-1} = 323.1 \text{ (GPa)}$$

当该陶瓷含有 5% 的气孔时, 将 $P = 0.05$ 代入经验计算公式 $E = E_0(1 - 1.9P + 0.9P^2)$ 可得, 其上、下限弹性模量分别变为 331.3 GPa 和 293.1 GPa 。

1-6 试分别画出应力松弛和应变蠕变与时间的关系示意图, 并算出 $t = 0$, $t = \infty$ 和 $t = \tau$ 时的纵坐标表达式。

解: Maxwell 模型可以较好地模拟应力松弛过程:

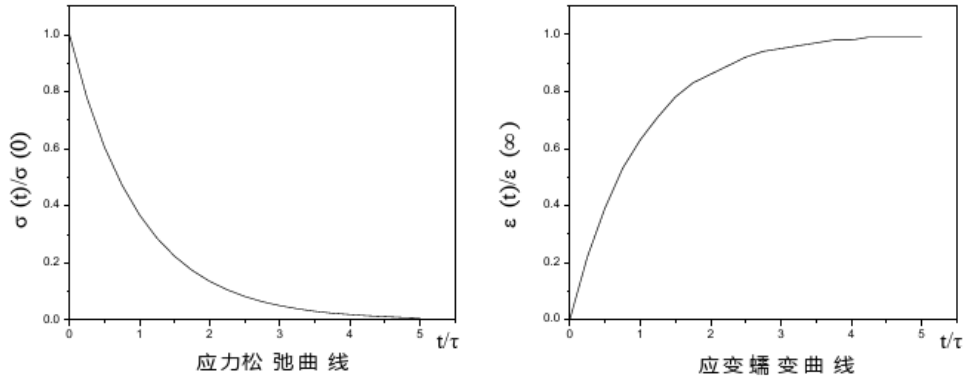
$$\text{其应力松弛曲线方程为 } \sigma(t) = \sigma(0)e^{-t/\tau}$$

$$\text{则有: } \sigma(0) = \sigma(0); \sigma(\infty) = 0; \sigma(\tau) = \sigma(0)/e.$$

Voigt 模型可以较好地模拟应变蠕变过程:

$$\text{其蠕变曲线方程为: } \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E}(1 - e^{-t/\tau}) = \varepsilon(\infty)(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\text{则有: } \varepsilon(0) = 0; \varepsilon(\infty) = \frac{\sigma_0}{E}; \varepsilon(\tau) = \frac{\sigma_0}{E}(1 - e^{-1}).$$



以上两种模型所描述的是最简单的情况，事实上由于材料力学性能的复杂性，我们会用到用多个弹簧和多个黏壶通过串并联组合而成的复杂模型。如采用四元件模型来表示线性高聚物的蠕变过程等。

1-7 试述温度和外力作用频率对聚合物力学损耗角正切的影响并画出相应的温度谱和频率谱。

解：（详见书本）。

1-8 一试样受到拉应力为 $1.0 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ ，10 秒种后试样长度为原始长度的 1.15 倍，移去外力后试样的长度为原始长度的 1.10 倍，若可用单一 Maxwell 模型来描述，求其松弛时间 τ 值。

解：根据 Maxwell 模型有：

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} t \end{cases}$$

\downarrow 可恢复 \swarrow 不可恢复

依题意得：

$$\begin{cases} E = \frac{\sigma}{\varepsilon_1} = \frac{1.0 \times 10^3}{0.05} = 2 \times 10^4 \text{ (Pa)} \\ \eta = \frac{\sigma}{\varepsilon_2} = \frac{1.0 \times 10^3 \times 10}{0.1} = 1 \times 10^5 \text{ (Pa} \cdot \text{s)} \end{cases}$$

所以松弛时间 $\tau = \eta / E = 1.0 \times 10^5 / 2 \times 10^4 = 5 \text{ (s)}$ 。

1-9 一非晶高聚物的蠕变行为可用一个Maxwell模型和一个Voigt模型串联描述，若 $t=0$ 时施以拉伸应力为 $1.0 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 至 10 小时，应变为 0.05，移去应力后的回复应变可描述为 $\varepsilon = (3 + e^{10-t})/100$ ， t 为小时，请估算该力学模型的四个参数值。

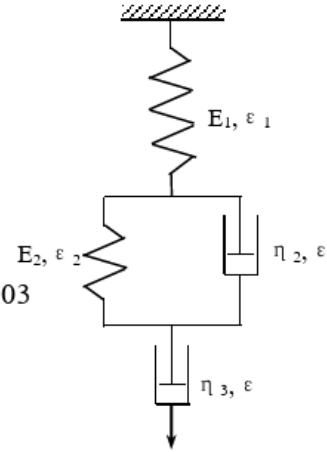
解：据题即求如图 E_1, E_2, η_2 和 η_3 四参数。如图所示有

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-t/\tau}) + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t$$

其中 ε_1 立即回复， ε_2 逐渐回复， ε_3 不能回复。

$$\Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_1} = 0.05 - (3 + e^{10-10})/100 = 0.01 \\ \varepsilon_3 = \frac{\sigma_0}{\eta_3} t = \frac{1.0 \times 10^4}{\eta_3} \cdot 36000 = (3 + e^{10-\infty})/100 = 0.03 \\ \varepsilon_2 = 0.05 - 0.03 - 0.01 = 0.01 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} E_1 = \frac{1.0 \times 10^4}{0.01} = 1.0 \times 10^6 \text{ (Pa)} \\ \eta_3 = \frac{1.0 \times 10^4 \times 36000}{0.03} = 1.2 \times 10^{10} \text{ (Pa} \cdot \text{s)} \end{cases}$$



Voigt 的回复方程为： $\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_0 \exp(-t/\tau)$ ，这里 t 为从回复时算起，而题目的 t 为从开始拉

伸时算起，所以此题的回复方程为： $\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_0 \exp(\frac{10-t}{\tau})$

排除立即恢复后的应变，应变的回复方程就可写成

$$\varepsilon_{(t)} = (0.05 - 0.01 - 0.03) \exp(\frac{10-t}{\tau}) + 0.03, \text{ 得出 } \tau = 3600\text{s}, \text{ (与 } \varepsilon = (3 + e^{10-t})/100 \text{ 相比)}$$

$$\therefore \varepsilon_2 = \frac{1.0 \times 10^4}{E_2} (1 - e^{-10}) = 0.01, \therefore E_2 = 1.0 \times 10^6 \text{ Pa}, \eta_2 = E_2 \tau = 3.6 \times 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

1-10 当取 T_g 为参考温度时 $\log \alpha_T = \frac{-c_1(T - T_s)}{c_2 + (T - T_s)}$ 中的 $C_1=17.44, C_2=51.6$ ，求以

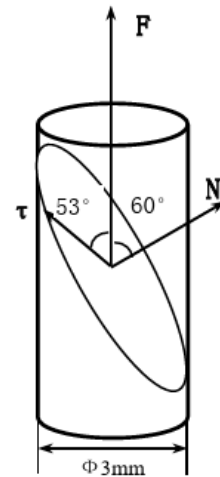
$T_g+50^\circ\text{C}$ 为参考温度时 WLF 方程中的常数 C_1 和 C_2 。

$$\text{解:} \begin{cases} C_1 = \frac{B}{2.303f_g} = 17.44 (B \text{ 是常数, } f_g \text{ 是 } T_g \text{ 时的自由体积百分数}) \\ C_2 = \frac{f_g}{B_f} = 51.6 (B_f \text{ 是自由体积在 } T_g \text{ 以上的热膨胀系数}) \end{cases}$$

$$\text{又有 } f = f_g + B_f(T - T_g) \Rightarrow f_{g+50} = f_g + 50B_f = \frac{101.6}{51.6} f_g$$

$$\therefore \text{以 } T_g + 50^\circ\text{C} \text{ 为参考时有 } \begin{cases} C_1 = \frac{17.44}{101.6/51.6} = 8.86 \\ C_2 = \frac{101.6}{51.6} \times 51.6 = 101.6 \end{cases}$$

1-11 一圆柱形 Al_2O_3 晶体受轴向拉力 F , 若其临界抗剪强度 τ_f 为 135 MPa, 求沿图中所示之方向的滑移系统产生滑移时需要的最小拉力值, 并求滑移面的法向应力。



解: 由题意得图示方向滑移系统的剪切强度可表示为:

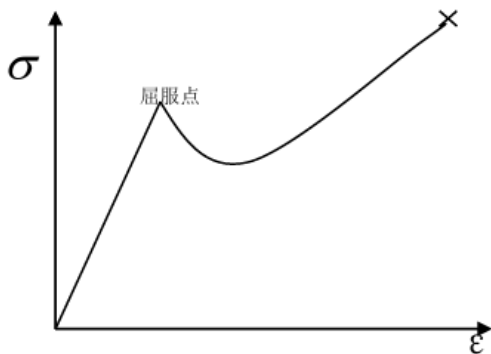
$$\tau = \frac{F \cos 53^\circ}{0.0015^2 \pi} \times \cos 60^\circ$$

$$\Rightarrow F_{\min} = \frac{\tau_f \times 0.0015^2 \pi}{\cos 53^\circ \times \cos 60^\circ} = 3.17 \times 10^3 (N)$$

$$\text{此拉力下的法向应力为 } \sigma = \frac{3.17 \times 10^3 \times \cos 60^\circ}{0.0015^2 \pi / \cos 60^\circ} = 1.12 \times 10^8 (Pa) = 112 (MPa)$$

1-12 拉伸某试样得到如下表的数据, 试作 $\sigma - \epsilon$ 曲线图, 并估算杨氏模量、屈服应力和屈服时的伸长率以及抗张强度。

$\epsilon \times 10^3$	5	10	20	30	40	50	60
$\sigma \times 10^4 Pa$	250	500	950	1250	1470	1565	1690
$\epsilon \times 10^3$	70	80	90	100	120	150	
$\sigma \times 10^4 Pa$	1660	1500	1400	1380	1380 (断)		



扬氏模量 $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, 由图中未达屈服点时线段的斜率可求出。 $\sigma = \sigma_{\text{屈服点}}$ (图中可以读出), 屈服时伸长率即为屈服点的应变, 断裂时对应的即是抗张强度。

1-13 氢原子的动能是 $E = \frac{3}{2}kT$ (式中波尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K), 求 $T = 1$ K 时氢原子的物质波的波长。

解: 根据
$$\begin{cases} E = \frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}mv^2 \\ P = mv = h/\lambda \end{cases}$$

$$\Rightarrow \lambda = h/P = \frac{h}{\sqrt{3mkT}} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{\sqrt{3 \times \frac{4 \times 10^{-31}}{6.02 \times 10^{23}} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 1}} = 1.26 \times 10^{-9} (\text{m}) = 12.6 (\text{nm})$$

1-14 利用 Sommerfeld 的量子化条件, 求一维谐振子的能量。

解: \because 一维谐振子的能量 $E = \frac{P^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 \Rightarrow \frac{P^2}{2mE} + \frac{x^2}{2E/m\omega^2} = 1$ 相当于一个椭圆

\therefore 根据 Sommerfeld 量子化条件有:

$$\oint P_x dx = \pi \sqrt{2mE \cdot 2E/m\omega^2} = \frac{2E\pi}{\omega} = nh \quad (\text{这时} \oint P_x dx \text{ 相当于椭圆的面积})$$

$$\Rightarrow E = n\hbar\omega (n = 1, 2, 3, \dots)$$

1-15 波函数的几率流密度 $\mathbf{J} = \frac{i\hbar}{2m} (\psi \nabla \psi^* - \psi^* \nabla \psi)$, 取球面坐标时, 算符

$$\nabla = \mathbf{i}_r \frac{\partial}{\partial r} + \mathbf{j}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \mathbf{k}_\phi \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi}, \text{ 求定态波函数 } \psi = \frac{1}{r} e^{ikr} \text{ 的几率流密度。}$$

解: $\because \psi = \frac{1}{r} e^{ikr}, \psi^* = \frac{1}{r} e^{-ikr}$

且 $\nabla \psi = \mathbf{i}_r \frac{ikr-1}{r^2} \cdot e^{ikr}, \nabla \psi^* = \mathbf{i}_r \frac{-ikr-1}{r^2} \cdot e^{-ikr}$

$\therefore \mathbf{J} = \frac{i\hbar}{2m} (\psi \nabla \psi^* - \psi^* \nabla \psi) = \frac{i\hbar}{2m} \frac{\mathbf{i}_r (-2ikr)}{r^3} = \frac{\hbar k}{mr^2} \mathbf{i}_r$

1-16 一粒子在一维势阱中运动, 势阱为

$$U(x) = \begin{cases} U_0 > 0, |x| > a \\ 0, |x| \leq a \end{cases} \quad \text{求束缚态 } (0 < E < U_0) \text{ 的能级所满足的方程。}$$

解: 因为

$$\varphi(x) = A e^{kx} + A' e^{-kx}$$

对于 $x \leq -a$ 时, $\varphi(x)$ 不能无穷大, $\therefore A' = 0$

同理, $x \geq a$ 时, $A = 0$

根据题意可得波函数:

$$\begin{cases} \psi_1(x) = A \exp[i\sqrt{2m(E-U_0)} \frac{x}{\hbar}] \cdots \cdots x \leq -a \\ \psi_2(x) = B_1 \cos(\frac{8\pi^2 mE}{h^2})^{1/2} x + B_2 \sin(\frac{8\pi^2 mE}{h^2})^{1/2} x \cdots \cdots |x| \leq a \\ \psi_3(x) = C \exp[-i\sqrt{2m(E-U_0)} \frac{x}{\hbar}] \cdots \cdots x \geq a \end{cases}$$

令 $k_1 = \frac{i\sqrt{2m(E-U_0)}}{\hbar}$, $k_2 = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$, 则上述波函数可简化为

$$\begin{cases} \psi_1(x) = A \exp(k_1 x) \cdots \cdots x \leq -a \\ \psi_2(x) = B_1 \cos(k_2 x) + B_2 \sin(k_2 x) \cdots \cdots |x| \leq a \\ \psi_3(x) = C \exp(-k_1 x) \cdots \cdots x \geq a \end{cases}$$

由“连续性”可得 $\psi_1(-a) = \psi_2(-a)$, $\psi_1'(-a) = \psi_2'(-a)$; $\psi_2(a) = \psi_3(a)$, $\psi_2'(a) = \psi_3'(a)$

$$\Rightarrow \begin{cases} A \exp(-k_1 a) = B_1 \cos(k_2 a) - B_2 \sin(k_2 a) \cdots \cdots (1) \\ A k_1 \exp(-k_1 a) = k_2 B_1 \sin(k_2 a) + k_2 B_2 \cos(k_2 a) \cdots \cdots (2) \\ C \exp(-k_1 a) = B_1 \cos(k_2 a) + B_2 \sin(k_2 a) \cdots \cdots (3) \\ -C k_1 \exp(-k_1 a) = -k_2 B_1 \sin(k_2 a) + k_2 B_2 \cos(k_2 a) \cdots \cdots (4) \end{cases}$$

由(1)+(2)得: $(A+C) \exp(-k_1 a) = 2B_1 \cos(k_2 a) \cdots \cdots (5)$

(2)-(4): $k_1(A+C) \exp(-k_1 a) = 2k_2 B_1 \sin(k_2 a) \cdots \cdots (6)$

由(6)/(5): $k_1 = k_2 \tan(k_2 a) \cdots \cdots (A) \cdots \cdots$ 其成立条件为: $A+C \neq 0$ 且 $B_1 \neq 0$

由(3)-(1)得到公式 (7), (4)+(2)得到公式(8)

(8)/(7): $-k_1 = k_2 \cot(k_2 a) \cdots \cdots (B) \cdots \cdots$ 其成立条件为: $A-C \neq 0$ 且 $B_2 \neq 0$

第一类(A)成立, 由 $A-C=0, B_2=0$ 得出相应的 $\varphi(x)$

第二类(B)成立, 由 $A+C=0, B_1=0$ 得出相应的 $\varphi(x)$

1-17 求熔融石英的结合强度，设估计的表面能力为 1.75J/m^2 ；Si-O 的平衡原子间距为 $1.6 \times 10^{-8}\text{cm}$ ；弹性模量从 60 到 75Gpa

$$\sigma_{th} = \sqrt{\frac{E\gamma}{a}} = \sqrt{\frac{(60 \sim 75) \times 10^9 \times 1.75}{1.6 \times 10^{-10}}} = 25.62 \sim 28.64\text{GPa}$$

1-18 熔融石英玻璃的性能参数为：E=73 Gpa； $\gamma = 1.56\text{J/m}^2$ ；理论强度 $\sigma_{th} = 28\text{Gpa}$ 。如材料中存在最大长度为 $2\mu\text{m}$ 的内裂，且此内裂垂直于作用力方向，计算由此导致的强度折减系数。

$$2c = 2\mu\text{m} \quad c = 1 \times 10^{-6}\text{m}$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}} = \sqrt{\frac{2 \times 73 \times 10^9 \times 1.56}{3.14 \times 1 \times 10^{-6}}} = 0.269\text{GPa}$$

$$\text{强度折减系数} = 1 - 0.269/28 = 0.99$$

1-19 证明测定材料断裂韧性的单边切口、三点弯曲梁法的计算公式：

$$K_{IC} = \frac{6M_c c^{1/2}}{BW^2} [1.93 - 3.07(c/w) + 14.5(c/w)^2 - 25.07(c/W)^3 + 25.8(c/w)^5]$$

$$K_{IC} = \frac{P_c S}{BW^{3/2}} [2.9(c/W)^{1/2} - 4.6(c/W)^{3/2} + 21.8(c/W)^{5/2} - 37.6(c/W)^{7/2} + 38.7(c/W)^{9/2}]$$

是一回事。

$$\text{证明：} \quad Mc = 1/4PcS$$

$$K_{IC} = \frac{6M_c c^{1/2}}{BW^2} [1.93 - 3.07(c/w) + 14.5(c/w)^2 - 25.07(c/W)^3 + 25.8(c/w)^5]$$

$$K_{IC} = \frac{6 \times 1/4 \times P_c \times S \times c^{1/2}}{BW^2} [1.93 - 3.07(c/w) + 14.5(c/w)^2 - 25.07(c/W)^3 + 25.8(c/w)^5]$$

$$K_{IC} = \frac{P_c S}{BW^{3/2}} [2.9(c/W)^{1/2} - 4.6(c/W)^{3/2} + 21.8(c/W)^{5/2} - 37.6(c/W)^{7/2} + 38.7(c/W)^{9/2}]$$

1-20 一陶瓷三点弯曲试件，在受拉面上于跨度中间有一竖向切口如图。如果 E=380 Gpa， $\mu = 0.24$ ，求 K_{Ic} 值，设极限荷载达 50Kg。计算此材料的断裂表面能。

解 $c/W = 0.1$, $P_c = 50 \times 9.8\text{N}$, $B = 10$, $W = 10$, $S = 40$ 代入下式：

$$K_{IC} = \frac{P_c S}{BW^{3/2}} [2.9(c/W)^{1/2} - 4.6(c/W)^{3/2} + 21.8(c/W)^{5/2} - 37.6(c/W)^{7/2} + 38.7(c/W)^{9/2}] = \frac{50 \times 9.8 \times 40}{10 \times 0.010^{3/2}} [2.9 \times 0.1^{1/2} - 4.6 \times 0.1^{3/2} + 21.8 \times 0.1^{5/2} - 37.6 \times 0.1^{7/2} + 38.7 \times 0.1^{9/2}] = 62 \times$$

$$(0.917-0.145+0.069-0.012+0.0012)$$

$$=1.96*0.83=1.63\text{Pam}^{1/2}$$

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{1-\mu^2}}$$

$$\gamma = \frac{K_{IC}^2(1-\mu^2)}{2E} = (1.63 * 10^6)^2 * 0.94 / (2 * 380 * 10^9) = 3.28 \text{ J/m}^2$$

1-21 一钢板受有长向拉应力 350MPa，如在材料中有一垂直于拉应力方向的中心穿透缺陷，长 8mm(=2c)。此钢材的屈服强度为 1400 MPa，计算塑性区尺寸 r_0 及其裂缝半长 c 的比值。讨论用此试件来求 K_{IC} 值的可能性。

$$K_I = Y\sigma\sqrt{c} = \sqrt{\pi}\sigma\sqrt{c} = 39.23\text{Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

$$r_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 = 0.125\text{mm}$$

$$r_0 / c = 0.125 / 4 = 0.031 > \frac{1}{15\pi} = > 0.021$$

用此试件来求 K_{IC} 值的不可能。

1-22 一陶瓷零件上有一垂直于拉应力的边裂，如边裂长度为：(1) 2mm; (2) 0.049mm; (3) 2 μm ，分别求上述三种情况下的临界应力。设此材料的断裂韧性为 1.62MPa·m^{1/2}。讨论讲结果。

$$K_I = Y\sigma\sqrt{c}$$

$$Y = 1.12\sqrt{\pi} = 1.98$$

$$\sigma = \frac{K_I}{1.98\sqrt{c}} = 0.818c^{-1/2}$$

$$(1) c=2\text{mm}, \quad \sigma_c = 0.818 / \sqrt{2 * 10^{-3}} = 18.25\text{MPa}$$

$$(2) c=0.049\text{mm}, \quad \sigma_c = 0.818 / \sqrt{0.049 * 10^{-3}} = 116.58\text{MPa}$$

$$c=2\mu\text{m}, \quad \sigma_c = 0.818 / \sqrt{2 * 10^{-6}} = 577.04\text{MPa}$$

2 材料的热学性能

2-1 计算室温 (298K) 及高温 (1273K) 时莫来石瓷的摩尔热容值, 并请和按杜龙-伯蒂规律计算的结果比较。

$$\begin{aligned} (1) \text{ 当 } T=298\text{K}, C_p &= a+bT+cT^{-2} = 87.55 + 14.96 \times 10^{-3} \times 298 - 26.68 \times 10^5 / 298^2 \\ &= 87.55 + 4.46 - 30.04 \\ &= 61.97 \times 4.18 \text{ J/mol.K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (2) \text{ 当 } T=1273\text{K}, C_p &= a+bT+cT^{-2} = 87.55 + 14.96 \times 10^{-3} \times 1273 - 26.68 \times 10^5 / 1273^2 \\ &= 87.55 + 19.34 - 1.65 \\ &= 105.24 \times 4.18 \text{ J/mol.K} = 438.9 \text{ J/mol.K} \end{aligned}$$

据杜隆-珀替定律: $(3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_4)$

$$C_p = 21 \times 24 \times 94 = 523.74 \text{ J/mol.K}$$

可见, 随着温度的升高, $C_{p,m}$ 趋近按 *Dulong - Petit* 定律所得的计算值。

2-2 康宁 1723 玻璃 (硅酸铝玻璃) 具有下列性能参数: $\lambda = 0.021 \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$; $\alpha = 4.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$; $\sigma_p = 7.0 \text{ Kg}/\text{mm}^2$. $E = 6700 \text{ Kg}/\text{mm}^2$, $\mu = 0.25$. 求第一及第二热冲击断裂抵抗因子。

$$\begin{aligned} \text{第一冲击断裂抵抗因子: } R &= \frac{\sigma_f(1-\mu)}{\alpha E} \\ &= \frac{7 \times 9.8 \times 10^6 \times 0.75}{4.6 \times 10^{-6} \times 6700 \times 9.8 \times 10^6} \\ &= 170^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{第二冲击断裂抵抗因子: } R' &= \frac{\lambda \sigma_f(1-\mu)}{\alpha E} \\ &= 170 \times 0.021 = 3.57 \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

2-3 一热机部件由反应烧结氮化硅制成, 其热导率 $\lambda = 0.184 \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$, 最大厚度 = 120mm. 如果表面热传递系数 $h = 0.05 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$, 假定形状因子 $S = 1$, 估算可兹应用的热冲击最大允许温差。

$$\Delta T_m = R'S \times \frac{1}{0.31 r_m h}$$

$$= 226 * 0.184 \frac{1}{0.31 * 6 * 0.05}$$

$$= 447^{\circ}\text{C}$$

2-4、系统自由能的增加量 $\Delta F = \Delta E - TS$ ，又有 $\ln N = \ln \frac{N!}{(N-n)!n!}$ 。若在肖特基缺陷

中将一个原子从晶格内移到晶体表面的能量 $E_s = 0.48\text{eV}$ ，求在 0°C 产生的缺陷比例

(即 $\frac{n}{N}$) 是多少？

$$\text{解: } \Delta S = K \ln W = K \ln \left[\frac{N!}{(N-n)!n!} \right]$$

$$\Delta F = \Delta E - T\Delta S = \Delta E - KT[\ln N! - \ln(N-n)! - \ln n!]$$

根据 *Stirling* 公式：当 N 很大时， $\ln N! = N \ln N - N$ ，将上式整理得

$$\Delta F = \Delta E - KT[N \ln N - (N-n) \ln(N-n) - n \ln n]$$

平衡时，自由能具有最小值，由于热缺陷 n 引起的自由焓的变化 $\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial n}\right)_{T,P} = 0$

$$\Rightarrow E_s - KT \ln \frac{N-n}{n} = 0 \Rightarrow \frac{n}{N-n} = \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)$$

$$\text{当 } n \text{ 不大时, } N-n \approx N, \text{ 则 } \frac{n}{N} = \exp\left(-\frac{0.48 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 273.15}\right) = 1.42 \times 10^{-9}$$

2-5 在室温中 $kT=0.024\text{eV}$ ，有一比费米能级高 0.24eV 的状态，采用玻尔兹曼统计分布函数计算时，相对于费米-狄拉克统计分布函数计算的误差有多少？

$$\text{解: 根据 Boltzman 分布有 } f = A \cdot e^{-E/kT} = \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT}}$$

$$\text{同时费米-狄拉克统计分布函数为 } f = \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT} + 1}$$

$$\text{因而相对误差为 } \frac{\left| \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT}} - \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT} + 1} \right|}{\frac{1}{e^{(E-E_f)/kT} + 1}}$$

$$= \frac{\left| 6.738 \times 10^{-3} - 6.693 \times 10^{-3} \right|}{6.693 \times 10^{-3}} = 0.0067 = 0.67\%$$

2-6 NaCl 和 KCl 具有相同的晶体结构，它们在低温下的 Debye 温度 θ_D 分别为 310K 和 230K ，KCl 在 5K 的定容摩尔热容为 $3.8 \times 10^{-2}\text{J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$ ，试计算 NaCl 在 5K 和 KCl 在 2K 的定容摩尔热容。

根据德拜模型的热容量理论，当温度很低 ($T \rightarrow 0$) 时有

$$C_V^h \approx \frac{12}{5} \pi^4 Nk \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3$$

$$\text{对于 } KCl \text{ 有, } C_V^h(2K) = \frac{2^3}{5^3} \times 3.8 \times 10^{-2} = 2.43 \times 10^{-3} J \cdot \text{mol}^{-1} \cdot K^{-1}$$

$$\text{对于 } NaCl \text{ 有, } C_V^h(5K) = \frac{230^3}{310^3} \times 3.8 \times 10^{-2} = 1.55 \times 10^{-2} J \cdot \text{mol}^{-1} \cdot K^{-1}$$

2-7 证明固体材料的热膨胀系数不因为含均匀分散的气孔而改变。

$$\text{对于复合材料有 } \bar{\alpha}_V = \frac{\sum \alpha_i K_i W_i / \rho_i}{\sum K_i W_i / \rho_i}$$

由于空气组分的质量分数 $W_i \approx 0$ ，所以气孔不影响 $\bar{\alpha}_V$ ，也不影响 $\bar{\alpha}_l$ 。

2-8 在一维双原子的点阵中：

(1) 若 $m_1/m_2 > 1$ ，求证存在关系？

(2) 证明在 $L = \pi/a$ ，声频支中所有轻原子 m_2 静止，而光频支中所有重原子 m_1 静止，并画出此时原子的振动图像。

(3) 若 $m_1 \approx m_2$ ，请证明此时只有声频支而无光频支。

解:

$$(1) \omega_{\pm} = \sqrt{k_e \left[\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)^2 - \frac{4 \sin^2 La}{m_1 m_2}} \right]}$$

$$\Rightarrow \omega_{\pm} = \sqrt{k_e \left[\left(\frac{\frac{m_2}{m_1} + 1}{m_2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\frac{m_2}{m_1} + 1}{m_2} \right)^2 - \frac{4 \sin^2 La}{m_1 m_2}} \right]} \text{ 由 } m_2 / m_1 \ll 1 \Rightarrow$$

$$\omega_{\pm} = \sqrt{k_e \left[\frac{1}{m_2} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{m_2} \right)^2 - \frac{4 \sin^2 La}{m_1 m_2}} \right]} = \sqrt{k_e \left[\frac{1}{m_2} \pm \frac{1}{m_2} \sqrt{1 - 4 \frac{m_2}{m_1} \sin^2 La} \right]}$$

由于对于 $y = x^{1/2}$, $y' = \frac{1}{2} x^{-1/2}$, 有 $y(1 + \Delta x) = y(1) + y'(1) \Delta x = 1 + \frac{1}{2} \Delta x$

$$\Rightarrow \omega_{\pm} = \sqrt{k_e \left[\frac{1}{m_2} \pm \frac{1}{m_2} (1 - 4 \frac{m_2}{m_1} \sin^2 La) \right]}$$

$$\text{则有 } \omega_{+} = \sqrt{\frac{2k_e}{m_2} (1 - \frac{m_2}{m_1} \sin^2 La)} = \sqrt{\frac{2k_e}{m_2} \left[1 - \frac{m_2}{m_1} + \frac{m_2}{m_1} \cos^2 La \right]}$$

$$= \sqrt{\frac{2k_e}{m_2} \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \cos^2 La \right) + \frac{m_2^2}{4m_1^2} \cos^4 La}$$

$$= \sqrt{\frac{2k_e}{m_2} \left(1 + \frac{m_2}{2m_1} \cos^2 La \right)} \therefore \omega_{-} = \sqrt{\frac{2k_e}{m_1} \sin^2 La} = \sqrt{\frac{2k_e}{m_2}} |\sin La|$$

得证。

(2):

$$\omega_{\pm} = \sqrt{k_e \left[\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)^2 - \frac{4 \sin^2 La}{m_1 m_2}} \right]}$$

$$\text{当 } L = \pm \frac{\pi}{2a} \text{ 时, } \omega_{\pm}^2 = k_e \left[\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \pm \left| \frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_2} \right| \right] \xrightarrow{m_2 \ll m_1} \begin{cases} \omega_{+}^2 = \frac{2k_e}{m_2} \\ \omega_{-}^2 = \frac{2k_e}{m_1} \end{cases}$$

$$\text{又根据 } \begin{cases} (m_1 \omega^2 - 2k_e)A + (2k_e \cos La)B = 0 \\ (m_2 \omega^2 - 2k_e)B + (2k_e \cos La)A = 0 \end{cases} \Rightarrow \left(\frac{A}{B} \right)^2 = \frac{m_2 \omega^2 - 2k_e}{m_1 \omega^2 - 2k_e}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{声学支中: } L = \pm \frac{\pi}{2a} \text{ 时, } \left(\frac{B}{A} \right)^2 = \frac{0}{\frac{m_2}{m_1} - 1} \Rightarrow B = 0, m_2 \text{ 静止;} \\ \text{光学支中: } L = \pm \frac{\pi}{2a} \text{ 时, } \left(\frac{A}{B} \right)^2 = \frac{0}{\frac{m_1}{m_2} - 1} \Rightarrow A = 0, m_1 \text{ 静止。} \end{cases}$$

(3):

$$\text{若 } m_1 \approx m_2, \omega_{\pm} = \sqrt{k_{\epsilon} \left[\frac{2}{m_1} \pm \sqrt{\frac{4}{m_1^2} - \frac{4 \sin^2 La}{m_1^2}} \right]} = \left[\frac{2k_{\epsilon}}{m_1} (1 \pm \cos La) \right]^{1/2}$$

$$\text{当 } L = \pm \frac{\pi}{a} \text{ 时, } \cos La = -1 \Rightarrow \begin{cases} \omega_+ = 0, \text{ 光学支振动频率为 } 0, \text{ 无光学支;} \\ \omega_+ \neq 0, \text{ 光学支振动频率不为 } 0, \text{ 有光学支。} \end{cases}$$

2-9 试计算一条合成刚玉晶体 Al_2O_3 棒在 1K 的热导率, 它的分子量为 102, 直径为 3mm, 声速 500m/s, 密度为 4000kg/m^3 , 德拜温度为 1000K。

解

$$\text{一个 } \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 分子的体积为 } V = \frac{102/4000 \times 10^3}{6.02 \times 10^{23}} = 4.24 \times 10^{-29}$$

$$\text{假设分子为球形, 则 } \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = 4.24 \times 10^{-29} \therefore d = 4.33 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$\text{分子数密度 } n = \frac{6.02 \times 10^{23} \times 4000 \times 10^3}{10^2} = 2.36 \times 10^{28}$$

$$\lambda_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi} d^2 n} = 5.09 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$C_v^h = \frac{12}{5} \pi^4 N k \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 = 9.7 \text{ J/K} \cdot \text{mol} (N = 5N_A)$$

$$k_i^h = \frac{1}{3} C_v^h V_s \lambda_s = \frac{1}{3} \times 9.7 \times 500 \times 5.09 \times 10^{-11} = 8.23 \times 10^{-8} \text{ J/m.s.k}$$

2-10 一样品在 300K 的热导率为 $320\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$, 电阻率为 $10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$, 求其电子热导热的比值。(Lorentz 常量 $L = 2.45 \times 10^{-8} (\text{V/K})^2$)

解:

$$\text{电子热导率 } k_i^e = L \cdot \sigma \cdot T = 2.45 \times 10^{-8} \times (10^{-2})^{-1} \times 300 = 7.35 \times 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\frac{k_i^e}{k_i^h} = \frac{k_i^e}{k_i - k_i^e} = \frac{7.35 \times 10^{-4}}{320 - 7.35 \times 10^{-4}} = 2.30 \times 10^{-6}$$

4 材料的电导性能

4-1 实验测出离子型导体的电导率与温度的相关数据,经数学回归分析得出关系式为:

$$\lg \sigma = A + B \frac{1}{T}$$

(1) 试求在测量温度范围内的电导活化能表达式。

(2) 若给定 $T_1=500\text{K}$, $\sigma_1=10^{-9} (\Omega\cdot\text{cm})^{-1}$

$$T_2=1000\text{K}, \sigma_2=10^{-6} (\Omega\cdot\text{cm})^{-1}$$

计算电导活化能的值。

解: (1) $\sigma = 10^{(A+B/T)}$

$$\ln \sigma = (A + B/T) \ln 10$$

$$\sigma = e^{(A+B/T)\ln 10} = e^{\ln 10 A} e^{(\ln 10 B/T)} = A_1 e^{(-W/kT)}$$

$$W = -\ln 10 \cdot B \cdot k$$

$$\text{式中 } k = 0.84 \cdot 10^{-4} (\text{eV} / \text{K})$$

$$(2) \lg 10^{-9} = A + B/500$$

$$\lg 10^{-6} = A + B/1000$$

$$B = -3000$$

$$W = -\ln 10 \cdot (-3) \cdot 0.86 \cdot 10^{-4} \cdot 500 = 5.94 \cdot 10^{-4} \cdot 500 = 0.594 \text{eV}$$

4-2. 根据缺陷化学原理推导

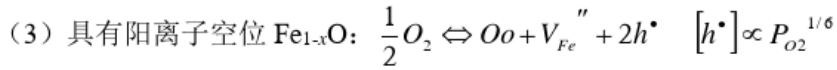
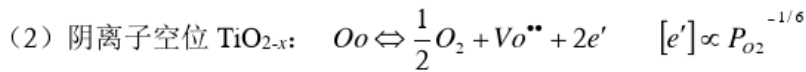
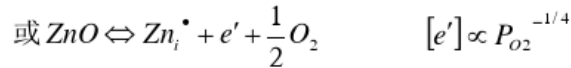
(1) ZnO 电导率与氧分压的关系。

(2) 在具有阴离子空位 TiO_{2-x} 非化学计量化合物中,其电导率与氧分压的关系。

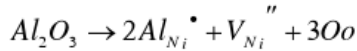
(3) 在具有阳离子空位 Fe_{1-x}O 非化学计量化合物中,其电导率与氧分压的关系。

(4) 讨论添加 Al_2O_3 对 NiO 电导率的影响。

解: (1) 间隙离子型: $\text{ZnO} \Leftrightarrow \text{Zn}_i^{\bullet\bullet} + 2e' + \frac{1}{2}\text{O}_2$ $[e'] \propto P_{\text{O}_2}^{-1/6}$



(4) 添加 Al_2O_3 对 NiO :



添加 Al_2O_3 对 NiO 后形成阳离子空位多，提高了电导率。

4-3 本征半导体中，从价带激发至导带的电子和价带产生的空穴参与导电。激发的电子数 n 可近似表示为：

$$n = N \exp(-E_g / 2kT)$$

式中 N 为状态密度， k 为波尔兹曼常数， T 为绝对温度。试回答以下问题：

(1) 设 $N=10^{23} \text{cm}^{-3}$, $k=8.6 \times 10^{-5} \text{eV}\cdot\text{K}^{-1}$ 时， $\text{Si}(E_g=1.1\text{eV})$, $\text{TiO}_2(E_g=3.0\text{eV})$ 在室温 (20°C) 和 500°C 时所激发的电子数 (cm^{-3}) 各是多少：

(2) 半导体的电导率 σ ($\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$) 可表示为

$$\sigma = ne\mu$$

式中 n 为载流子浓度 (cm^{-3})， e 为载流子电荷 (电荷 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$)， μ 为迁移率 ($\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) 当电子 (e) 和空穴 (h) 同时为载流子时，

$$\sigma = n_e e \mu_e + n_h e \mu_h$$

假定 Si 的迁移率 $\mu_e=1450$ ($\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)， $\mu_h=500$ ($\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)，且不随温度变化。求 Si 在室温 (20°C) 和 500°C 时的电导率

解：(1) Si

$$20^\circ\text{C} \quad n = 10^{23} \exp(-1.1/(2 \cdot 8.6 \cdot 10^{-5} \cdot 298))$$

$$= 10^{23} \cdot e^{-21.83} = 3.32 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$$

$$500^\circ\text{C} \quad n = 10^{23} \exp(-1.1/(2 \cdot 8.6 \cdot 10^{-5} \cdot 773))$$

$$= 10^{23} \cdot e^{-8} = 2.55 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$$

TiO_2

$$20^\circ\text{C} \quad n = 10^{23} \exp(-3.0/(2 \cdot 8.6 \cdot 10^{-5} \cdot 298))$$

$$=1.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$$

$$500^\circ\text{C} \quad n = 10^{23} \exp(-3.0 / (2 * 8.6 * 10^{-5} * 773))$$

$$=1.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$(2) 20^\circ\text{C} \quad \sigma = n_e e \mu_e + n_h e \mu_h$$

$$=3.32 \times 10^{13} * 1.6 * 10^{-19} (1450 + 500)$$

$$=1.03 * 10^{-2} (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$$

$$500^\circ\text{C} \quad \sigma = n_e e \mu_e + n_h e \mu_h$$

$$=2.55 * 10^{19} * 1.6 * 10^{-19} (1450 + 500)$$

$$=7956 (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$$

4-5 一块 n 型硅半导体, 其施主浓度 $N_D = 10^{15} / \text{cm}^3$, 本征费米能级 E_i 在禁带正中, 费米能级 E_F 在 E_i 之上 0.29eV 处, 设施主电离能 $\Delta E_D = 0.05\text{eV}$. 试计算在 $T=300\text{K}$ 时施主能级上的电子浓度

解:

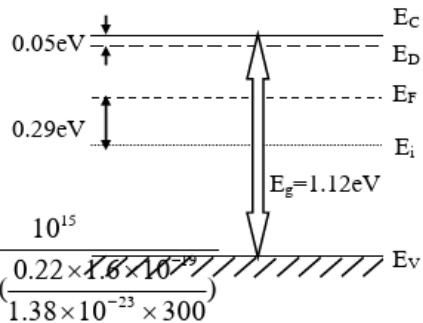
$$\text{查Si的 } E_g = 1.12\text{eV}, \Delta E_D = E_C - E_D$$

$$E_D - E_F = E_C - E_i - \Delta E_D - (E_F - E_i)$$

$$\therefore E_D - E_F = \frac{1.12}{2} 0.29 - 0.05 = 0.22\text{eV}$$

$$n_D = N_D \cdot f(E_D) = \frac{N_D}{1 + \frac{1}{2} e^{(E_D - E_F)/kT}} = \frac{10^{15}}{1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{0.22 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300}\right)}$$

$$= 4.06 \times 10^{11} / \text{cm}^3$$



4-6 一块 n 型硅材料, 掺有施主浓度 $N_D = 1.5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$, 在室温 ($T=300\text{K}$) 时本征载流子浓度 $n_i = 1.3 \times 10^{12} / \text{cm}^3$, 求此时该块半导体的多数载流子浓度和少数载流子浓度。

解:

$$\therefore n_i \ll N_D \therefore \begin{cases} n_0 = N_D = 1.5 \times 10^{15} / \text{cm}^3 (\text{多子}); \\ p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = 1.13 \times 10^9 / \text{cm}^3 (\text{少子}). \end{cases}$$

4-7 一硅半导体含有施主杂质浓度 $N_D = 9 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ ，和受主杂质浓度 $N_A = 1.1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ ，求在 $T=300\text{K}$ 时 ($n_i = 1.3 \times 10^{10} / \text{cm}^3$) 的电子空穴浓度以及费米载流子浓度。

解：

$\because N_D < N_A, \therefore$ 补偿后 P 型半导体

又 $\because N$ 较少且 T 在室温, \therefore 杂质几乎完全电离

$$\Rightarrow \begin{cases} p = N_A - N_D = 1.1 \times 10^{16} - 9 \times 10^{15} = 2 \times 10^{15} / \text{cm}^3 \\ n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(1.3 \times 10^{10})^2}{2 \times 10^{15}} = 8.45 \times 10^4 / \text{cm}^3 \end{cases}$$

对于 P 型半导体, 有 $E_F - E_V = kT \ln \frac{N_V}{N_A}$

N_V 取 $1.0 \times 10^{19} / \text{cm}^3$, N_A 取 $2 \times 10^{15} / \text{cm}^3$

代入可得 $E_F - E_V = 3.53 \times 10^{-20} \text{J} = 0.22 \text{eV}$

4-8 设锗中施主杂质的电离能 $\Delta E_D = 0.01 \text{eV}$ ，在室温下导带底有效状态密度 $N_C = 1.04 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ，若以施主杂质电离 90% 作为电离的标准，试计算在室温 ($T=300\text{K}$) 时保持杂质饱和电离的施主杂质浓度范围。

解：

低温区, 忽略本征激发 仅考虑杂质电离有 $n_0 = n_D^+ = \frac{2N_D}{1 + \left(\frac{8N_D}{N_C} \cdot e^{\Delta E_D / kT}\right)^{1/2}}$

令 $n_D^+ \geq 0.9N_D \Rightarrow N_D < 1.32 \times 10^{18} / \text{cm}^3$

则有 $N_D < 1.32 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 时可保持强电离。

4-9 设硅中施主杂质电离能 $\Delta E_D = 0.04 \text{eV}$ ，施主杂质浓度 $N_D = 10^{16} / \text{cm}^3$ ，以施主杂质电离 90% 作为达到强电离的最低标准，试计算保持饱和杂质电离的温度范围。

解:

$$n_D = \frac{N_D}{1 + \frac{1}{2} \exp(-\frac{E_D - E_F}{k_0 T})}, \text{当 } \exp(-\frac{E_D - E_F}{k_0 T}) \gg 1 \text{ 时}$$

$$n_D = 2N_D \exp(-\frac{E_D - E_F}{k_0 T})$$

杂质饱和电离: $E_F = E_c + k_0 T \ln \frac{N_D}{N_c}$ 代入上式

$$\therefore n_D \approx 2N_D \left(\frac{N_D}{N_c}\right) \exp(\Delta E_D / k_0 T), \text{令 } D_- = 2\left(\frac{N_D}{N_c}\right) \exp(\Delta E_D / k_0 T)$$

$\therefore n_D \approx D_- N_D$, D_- 为未电离的施主杂质占总数的百分比

将 $N_c = 2(2\pi m_{dn} kT)^{3/2} / \hbar^3$ 代入

$$\left(\frac{\Delta E_D}{k_0}\right) \left(\frac{1}{T}\right) = (3/2) \ln T + \ln\left(\frac{D_-}{N_D}\right) \frac{(2\pi k_0 m_{dn})^{3/2}}{\hbar^3} \therefore T \approx 125K$$

4-10 300K 时, 锗的本征电阻率为 $47\Omega \cdot \text{cm}$, 如电子空穴本征锗的载流子浓度分别为 $3900 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 和 $1900 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$. 求本征锗的载流子浓度.

解:

$$\therefore \sigma_i = \frac{1}{\rho_i} = n_i q (\mu_n + \mu_p)$$

$$\therefore n_i = \frac{1}{\rho_i q (\mu_n + \mu_p)} = \frac{1}{47 \times 1.6 \times 10^{-19} \times (3900 + 1900)} = 2.29 \times 10^{13} / \text{cm}^3$$

4-11 本征硅在室温时电子和空穴迁移分别为 $1350 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 和 $500 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$, 当掺入百万分之一的 As 后, 设杂质全部电离, 试计算其电导率. 比本征硅的电导率增大了多少倍?

解:

$$\therefore 300K \text{ 时 } Si \text{ 的 } n_i = 1.3 \times 10^{10} / \text{cm}^3$$

$$\sigma_i = n_i q (\mu_n + \mu_p) = 1.3 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{-19} \times (1350 + 500) = 3.85 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

又 \therefore 本征 Si 的密度 $N_i = 5 \times 10^{22} / \text{cm}^3$, 则 $n_D = 5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$

$$\sigma_n \approx n_D q \mu_n = 5 \times 10^{16} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1350 = 10.8 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

$$\therefore \frac{\sigma_n}{\sigma_i} = 10.8 / 3.85 \times 10^{-6} = 2.8 \times 10^6$$

4-12 在 500g 的硅单晶中掺有 $4.5 \times 10^{-5} \text{g}$ 的硼, 设杂质全部电离, 求该材料的电阻率(设 $\mu_p = 400 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$), 硅单密度为 $2.33 \text{ g} / \text{cm}^3$, 硼的原子量为 10.8).

解:

$$\therefore p \approx N_A = \frac{4.5 \times 10^{-5}}{10.8} \times 6.02 \times 10^{23} / \left(\frac{500}{2.33}\right) = 1.17 \times 10^{16} / \text{cm}^3$$

$$\therefore \rho = \frac{1}{pq\mu_p} = \frac{1}{1.17 \times 10^{16} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 400} = 1.34 \Omega \cdot \text{cm}$$

4-13 设电子迁移率为 $0.1 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$, 硅的电子有效质量 $m_{cn} = 0.26 m_0$, 如加以强度为 10^4 V/m 的电场, 试求平均自由时间和平均自由程.

解:

$$\therefore \mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n^*} \therefore \tau_n = \frac{\mu_n m_n^*}{q} = \frac{0.1 \times 0.26 \times 9.1 \times 10^{-31}}{1.6 \times 10^{-19}} = 1.48 \times 10^{-13} \text{ s}$$

$$\lambda_s = \bar{v}_d \cdot \tau_n = \mu_n \cdot E \cdot \tau_n = 0.1 \times 10^4 \times 1.48 \times 10^{-13} = 1.48 \times 10^{-10} \text{ m}$$

4-14 一截面为 0.6 cm^2 , 长为 1 cm 的 n 型 GaAs 样品, 设 $\mu_n = 8000 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$, $n = 10^{15} \text{ cm}^3$, 试求该样品的电阻.

解:

$$\therefore \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{nq\mu_n} = \frac{1}{10^{15} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 8000} = 0.781 \Omega \cdot \text{cm}$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0.781 \times \frac{1}{0.6} = 1.3 \Omega$$

4-15 一截在为 10^{-3} cm^2 , 掺有杂质浓度 $N_A = 10^{13} / \text{cm}^3$ 的 P 型硅样品, 在样品内加有强度为 10^3 V/cm 的电场, 求:

- (1) 室温时样品的电导率及流过样品的电流密度.
- (2) 400K 时样品的电导率及流过样品的电流密度.

解:

对Si, m_{dn} (电子有效质量) $= 0.26m_0 = 0.26 \times 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

$$(1) \because \sigma = nq\mu, \mu = \frac{V}{E}, V = \sqrt{\frac{3kT}{m_{dn}}} \therefore \sigma = N_A \cdot q \cdot \sqrt{\frac{3kT}{m_{dn}}} / E$$
$$= 10^{19} \times 1.6 \times 10^{-19} \sqrt{\frac{3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}{0.26 \times 9.1 \times 10^{-31}}} / (10^3 \cdot 10^2) = 3.65 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$i = \sigma E = N_A q \sqrt{\frac{3kT}{m_{dn}}} = 3.65 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} = 36.5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$$

(2)同理,400K时, $\sigma = 4.12 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

$$i = 4.23 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} = 42.3 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$$

4-16 分别计算 有下列杂质的硅, 在室温时的载流子浓度和电阻率;

(1) 3×10^{15} 硼原子/cm³

(2) 1.3×10^{16} 硼原子/cm³+ 1.0×10^{16} 磷原子/cm³

(3) 1.3×10^{16} 磷原子/cm³+ 1.0×10^{16} 硼原子/cm³+ 1.0×10^{17} 砷原子/cm³

解:

(1) $\because n_i \ll n_A, \therefore p \approx N_A = 3 \times 10^{15} / \text{cm}^3$

又查得 $\mu_p = 480 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

$$\therefore \rho = (pq\mu)^{-1} = (3 \times 10^{15} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 480)^{-1} = 4.34 \Omega \cdot \text{cm}$$

(2) $p = N_A - N_D = 1.3 \times 10^{16} - 1.0 \times 10^{16} = 0.3 \times 10^{16} / \text{cm}^3$

$$\therefore \rho = (pq\mu)^{-1} = (0.3 \times 10^{16} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 480)^{-1} = 4.34 \Omega \cdot \text{cm}$$

(3) $n = 1.3 \times 10^{16} + 1 \times 10^{17} - 1.0 \times 10^{16} = 10.3 \times 10^{16} / \text{cm}^3$

又 $\because \mu_n = 1350 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

$$\therefore \rho = (pq\mu)^{-1} = (10.3 \times 10^{16} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1350)^{-1} = 0.045 \Omega \cdot \text{cm}$$

4-17 (1) 证明 $\mu_n \neq \mu_p$, 且电子浓度 $n = ni\sqrt{\mu_p / \mu_n}$, 空穴浓度 $p = ni\sqrt{\mu_p / \mu_n}$ 时, 材料的电导率 σ 最小, 并求出 σ_{\min} 的表达式。

(2) 试求 300K 时, InSb 的最小电导率和最大电导率, 什么导电类型的材料电阻率可达最大? (T=300K 时, InSb 的 $\mu_n = 7.8 \text{ m}^2 / \text{V} \cdot \text{s}, \mu_p = 780 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}, n_i = 1.6 \times 10^{16} / \text{cm}^3$)。

解:

(1)证: $\because n_i^2 = np$ (由题中 $n = n_i \sqrt{\mu_p / \mu_n}$, $p = n_i \sqrt{\mu_n / \mu_p}$ 可知)

$$\therefore \sigma = nq\mu_n + pq\mu_p = nq\mu_n + \frac{n_i^2}{n}q\mu_p = \frac{n_i^2}{p}q\mu_n + pq\mu_p$$

$$\text{令 } \frac{d\sigma}{dn} = 0 \Rightarrow q\mu_n - \frac{n_i^2}{n^2}q\mu_p = 0 \Rightarrow n = n_i \sqrt{\mu_p / \mu_n}$$

$$\text{令 } \frac{d\sigma}{dp} = 0 \Rightarrow p = n_i \sqrt{\mu_n / \mu_p}$$

又 $\because \frac{d^2\sigma}{dn^2} > 0, \frac{d^2\sigma}{dp^2} > 0$. \therefore 当 $n = n_i \sqrt{\mu_p / \mu_n}$ 及 $p = n_i \sqrt{\mu_n / \mu_p}$ 时, σ 有最小值。

$$\text{且 } \sigma_{\min} = 2n_i q \sqrt{\mu_p \mu_n}$$

$$(2) \sigma_{\min} = 2 \times 1.6 \times 10^{16} \times 1.6 \times 10^{-19} \times \sqrt{78000 \times 780} = 39.94 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

$$\rho_{\max} = \frac{1}{\sigma_{\min}} = 0.025 \Omega \cdot \text{cm}$$

又 $\because \mu_n > \mu_p$ \therefore P型半导体的 ρ_{\max} 为最大。

4-18 假定硅中电子的平均动能为 $\frac{3}{2}k_0T$, 试求室外温时电子热运动的均方根速度,

如将硅置于 10V/cm 的电场中, 证明电子的平均漂移速度小于热运动速度, 设电子迁移率为 $1500\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 如仍设迁移率为上述数值, 计算电场为 10^4V/cm 时的平均漂移速度, 并与热运动速度作一比较, 这时电子的实际平均漂移速度和迁移率为多少?

解:

$$\because \frac{1}{2}m^*v_{\text{热}}^2 = \frac{3}{2}k_0T$$

$$\bar{v}_{\text{热}} = \sqrt{\frac{3k_0T}{m^*}} = \sqrt{\frac{3 \times 1.381 \times 10^{-23} \times 300}{0.26 \times 9.1 \times 10^{-31}}} = 2.29 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 2.29 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$E = 10\text{V/cm} \text{ 时, } \bar{v}_{d(\text{漂})} = \mu_n \cdot E = 1500 \times 10 = 1.5 \times 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} \therefore \bar{v}_d \ll \bar{v}_{\text{热}}$$

$$E = 10^4\text{V/cm} \text{ 时, } \bar{v}_{d(\text{漂})}' = 1500 \times 10^4 = 1.5 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}, \bar{v}_d \approx \bar{v}_{\text{热}}$$

$$\text{强场时 } \because \mu = \frac{4q\bar{l}}{3\sqrt{2\pi n_n^* kT}} = \frac{4q(\tau\mu E)}{3\sqrt{2\pi n_n^* kT}} \Rightarrow \tau = \frac{3\sqrt{2\pi n_n^* kT}}{4qE}$$

$$\mu = \frac{q\tau}{m_n^*} = \frac{3}{4E} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m_n^*}} = \frac{3}{4 \times 10^4 \times 10^2} \sqrt{\frac{2\pi \times 1.381 \times 10^{-23} \times 300}{0.26 \times 9.1 \times 10^{-31}}}$$

$$= 0.2488 \text{ m}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 2488 \text{ cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\bar{v}_d = \mu_n E = 2488 \times 10^4 = 2.488 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

4-19 轻掺杂的硅样品在室外温下，外加电压使电子的漂移速度是它的热运动速度的十分之一，一个电子由于漂移而通过 $1\mu\text{m}$ 区域中的平均碰撞次数和此时加在这个区域的电压为多少？

解：

$$\bar{v}_d = \frac{1}{10} v_{\text{热}} = \frac{1}{10} \sqrt{\frac{3kT}{m_n^*}} = \frac{1}{10} \sqrt{\frac{3 \times 1.381 \times 10^{-23} \times 300}{0.26 \times 9.1 \times 10^{-31}}} \times 10^2 = 2.29 \times 10^6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{平均自由程 } \bar{l} = 1\mu\text{m} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\text{平均自由时间 } \tau = \frac{\bar{l}}{\bar{v}_d} = \frac{1.0 \times 10^{-4}}{2.29 \times 10^6} = 4.363 \times 10^{-11} \text{ s}$$

$$\text{平均碰撞次数 } P = \frac{1}{\tau} = 2.29 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{电场强度 } E = \frac{\bar{v}_d}{\mu} = \frac{\bar{v}_d \cdot m_n^*}{q\tau} \Rightarrow$$

$$\text{电压 } U = E \cdot l = \frac{\bar{v}_d \cdot m_n^* \cdot l}{q\tau} = \frac{2.29 \times 10^4 \times 0.26 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 10^{-6}}{1.6 \times 10^{-19} \times 4.363 \times 10^{-11}} = 7.761 \times 10^{-4} \text{ V}$$

5 材料的磁学性能

5-1. 垂直板面方向磁化的大薄片性磁性材料, 去掉磁化场后的磁极化强度是 $J = \mu_0 M = 1 \text{Wb} / \text{m}^2$, 试计算板中心的退磁场大小。

解: 垂直于板面方向磁化, 则为垂直于磁场方向

$$J = -\mu_0 M = 1 \text{Wb} / \text{m}^2$$

退磁场 $H_d = -NM$

大薄片材料, 退磁因子 $N_a = N_b = 0, N_c = 1$

$$\text{所以 } H_d = -M = -\frac{J}{\mu_0} = -\frac{1 \text{Wb} / \text{m}^2}{4\pi \times 10^{-7} \text{H} / \text{m}} = -7.96 \times 10^5 \text{A} / \text{m}$$

5-2 试证明拉莫进动频率 $\omega_L = \frac{e\mu_0}{2m_e} H_0$

证明: 由于逆磁体中自旋磁矩相互抵消, 只须考虑在磁场 H 中电子轨道运动的变化, 按照动量矩定理, 电子轨道动量 l 的变化等于作用在磁矩 μ_l 的力矩, 即:

$$\frac{dl}{dt} = \mu_l \times (\mu_0 H) = \mu_l \times B_0, \text{ 式中 } B_0 = \mu_0 H \text{ 为磁场在真空中的磁感应强度.}$$

$$\text{而 } \mu_l = -\frac{e}{2m} l$$

$$\text{上式改写成: } \frac{dl}{dt} = \frac{e}{2m} B_0 \times l, \text{ 又因为 } \frac{dl}{dt} = V_{\text{线}} \times \vec{l} = \vec{\omega} \times \vec{l}$$

所以, 在磁场 B_0 电子的轨道角动量 l 和轨道磁矩均绕磁场旋转, 这种旋转运动称为拉莫运动, 拉莫运动的频率为 $\omega_L = \frac{eB_0}{2m} = \frac{\mu_0 e}{2m} H_0$

5-3 退磁因子与哪些因素有关? 试计算下列情况的 N 值:

- (1) 被磁化的球形磁体;
- (2) 垂直于轴线方向磁化的细长圆形磁棒;
- (3) 平行平面磁化的无限大薄圆形磁片。

解: 退磁因子, 无量纲, 与磁体的几何形状有关。

对于旋转椭圆体的三个主轴方向退磁因子之和, 存在下面简单的关系:

$$N_a + N_b + N_c = 1$$

(a, b, c 分别是旋转椭圆体的三个半主轴, 它们分别与坐标轴 x, y, z 方向一致)

根据上式, 很容易求得其三种极限情况下的退磁因子:

- 1) 球形: 因为其三个等轴, $N_a = N_b = N_c \quad \therefore N = \frac{1}{3}$
- 2) 细长圆柱体: 其为 a, b 等轴, 而 $c \gg a, b$
 $\therefore N_a = N_b$ 而 $N_c = 0$
 $\therefore N_a + N_b + N_c = 1 \therefore N_a = N_b = \frac{1}{2}$
- 3) 薄圆板体: $b = a \gg c \therefore N_a = 0 \quad N_b = 0$
 $\therefore N_a + N_b + N_c = 1$
 $\therefore N_c = 1$

5-4 何谓轨道角动量猝灭现象?

由于晶体场导致简并能级分裂, 可能出现最低轨道能级单态. 当单态是最低能级轨道时, 总轨道角动量的绝对值 L^2 虽然保持不变, 但轨道角动量的分量 L_z 不再是常量. 当 L_z 的平均值为 0, 即 $\int \varphi^* L_z \varphi d\tau = 0$ 时, 称其为轨道角动量猝灭.

5-5 推导居里-外斯定律 $\chi = \frac{C}{T - T_c}$, 说明磁化率与温度的关系。

证明: 铁磁体中作用于本征磁矩的有效磁感应场 $B_{eff} = B_0 + \lambda M$

其中 M 为磁化强度, 则 λM 为内场, 顺磁体磁化强度表达式:

$$M = Ng\mu_B J B_J \left(\frac{g\mu_B J B_0}{k_B T} \right) \quad \text{把 } B_0 \text{ 用 } B_{eff} \text{ 代替, 则得到铁磁体磁化强度:}$$

$$M_{(B_0)} = Ng\mu_B J B_J \left[\frac{g\mu_B J (B_0 + \lambda M)}{k_B T} \right] \dots \dots \dots (1)$$

当 $T > T_c$ 时, 自发磁化强度消失, 只有在外磁场 B_0 作用下产生磁化强度

当 $T \gg T_c$ 时, 可令 $\frac{g\mu_B J (B_0 + \lambda M)}{k_B T} \ll 1$, 则(1)式变为:

$$M = \frac{Ng^2 \mu_B^2 J(J+1)}{3k_B T} (B_0 + \lambda M) \dots \dots \dots (2)$$

又 $\therefore T_c = Ng^2 \mu_B^2 J(J+1) \lambda / 3k_B$ 代入(2)式

$$\text{有 } M = \frac{T_c (B_0 + \lambda M)}{\lambda T}$$

$$\text{解得 } M = \frac{T_c B_0}{(T - T_c) \lambda} \quad \text{令 } C' = \frac{T_c}{\lambda}$$

$$M = \frac{C' B_0}{T - T_c} = \frac{\mu_0 C'}{T - T_c} H = \chi H$$

则得

$$\therefore \chi = \frac{\mu_0 C'}{T - T_c} = \frac{C}{T - T_c}$$

当 $T \leq T_c$ 时, $\chi < 0$ 为铁磁性

当 $T > T_c$ 时, $\chi > 0$ 为顺磁性

5-6 自发磁化的物理本质是什么?材料具有铁磁性的充要条件是什么?

答: 铁磁体自发磁化的本质是电子间的静电交换相互作用

材料具有铁磁性的充要条件为:

- 1) 必要条件: 材料原子中具有未充满的电子壳层, 即原子磁矩
- 2) 充分条件: 交换积分 $A > 0$

5-7 超交换作用有哪些类型? 为什么 A-B 型的作用最强?

答: 具有三种超交换类型: A-A, B-B 和 A-B

因为金属分布在 A 位和 B 位, 且 A 位和 B 位上的离子磁矩取向是反平行排列的.

超交换作用的强弱取决于两个主要的因素: 1) 两离子之间的距离以及金属离子之间通过氧离子所组成的键角 ψ_i 2) 金属离子 3d 电子数目及轨道组态.

A-B 型 $\psi_1 = 125^\circ 9'$; $\psi_2 = 150^\circ 34'$

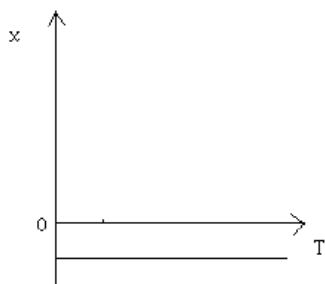
A-A 型 $\psi_3 = 79^\circ 38'$

B-B 型 $\psi_4 = 90^\circ$; $\psi_5 = 125^\circ 2'$

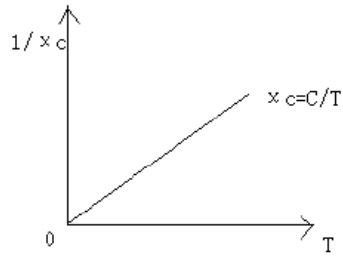
因为 ψ_i 越大, 超交换作用就越强, 所以 A-B 型的交换作用最强.

5-8 论述各类磁性 $\chi - T$ 的相互关系

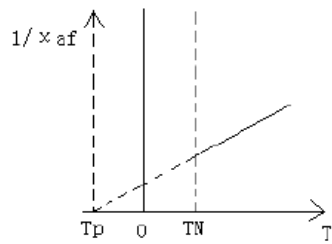
- 1) 抗磁性. χ_d 与温度无关, $\chi_d < 0$



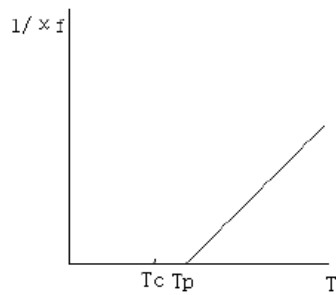
- 2) 顺磁性: $\chi = \frac{C}{T - T_c}$, T_c 为临界温度, 成为顺磁居里温度, $T > T_c$ 时显顺磁性



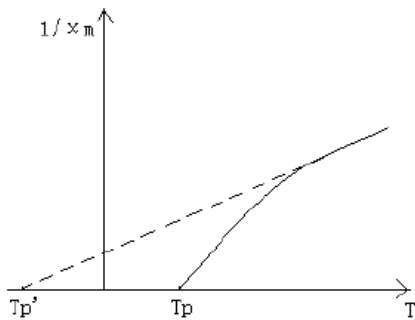
3) 反铁磁性:当温度达到某个临界值 T_N 以上,服从居里-外斯定律



4) 铁磁性: $\chi_f > 0, T < T_c$, 否则将转变为顺磁性,并服从居里-外斯定律



5) 亚铁磁性: 是未抵消的反铁磁性结构的铁磁性



5-9 比较铁磁体中五种能量的下列关系:

- (1) 数学表达式;
- (2) 来源和物理意义
- (3) 对磁矩取向的作用。

答:铁磁材料的五种相互作用能分别为: 交换能 F_{ex} ,磁晶各向异性能 F_x ,磁弹性能 F_e , 退磁场能 F_d 和外磁场能 F_H
相邻原子电子自旋的单位体积内的交换能

$$F_{ex} = \frac{E_{ex}}{V} = \frac{\epsilon AS^2}{a} [(\nabla\alpha_1)^2 + (\nabla\alpha_2)^2 + (\nabla\alpha_3)^2]$$

$A>0$ 时, 电子自旋不平行, 则会引起系统交换能的增加, $F_{ex}>0$, 只有当不考虑自旋轨道耦合时, 交换能 F_{ex} 是各向同性的.

磁晶各向异性能 F_x , 是饱和磁化强度矢量在铁磁材料中取不同方向时随时间而改变的能量, 仅与磁化强度矢量在晶体中的相对晶轴的取向有关

$$F_x = \frac{1}{V} \left(\int_{0[111]}^{M_s} HdM - \int_{0[100]}^{M_s} HdM \right)$$

磁晶各向异性来源于电子自旋与轨道的相互耦合作用以及晶体电场效应. 这种原子或离子的自旋与轨道的耦合作用, 会导致铁磁体的长度和体积的大小发生变化, 出现所谓的磁致伸缩

铁磁体在受到应力作用时会发生相应的应变, 从而引起磁弹性能 F_e , 包括由于自发形变而引起的磁应力能, 包括外加应力和内应力

铁磁体在外磁场中具有位能成为外磁场能 F_H , 外磁场能是铁磁体磁化的动力

$$F_H = -\mu_0 HM_s = -\mu_0 M_s H \cos\theta$$

有限尺寸的铁磁体材料, 受到外加磁场 H 的变化, 会在两端面上分别出现正负磁荷, 从而产生减弱外磁场的退磁场 H_d , 均匀磁化材料的退磁场能 F_d 为:

$$F_d = -\mu_0 \int_0^M H_d dM = \mu_0 \int_0^M NM dM = \frac{1}{2} \mu_0 NM^2$$

5-10 用能量的观点说明铁磁体内形成磁畴的原因

答: 根据热力学定律, 稳定的磁状态一定是对应于铁磁材料内总自由能极小值的状态. 磁畴的形成和稳定的结构状态, 也是对应于满足总的自由能为极小值的条件. 对于铁材料来说, 分成磁畴后比分成磁畴前能量缩小, 故铁磁材料自发磁化后必然分成小区域的磁畴, 使总自由能为最低, 从而满足能量最低原理. 可见, 退磁场能是形成磁畴的原因

5-11 设立方晶体铁磁材料的 $M_s = 1.71 \times 10^6 A/m$, $A = 2.16 \times 10^{-21} J$, $a = 2.26 \times 10^{-10} m$, $K_1 = 4.2 \times 10^4 J/m^3$, 计算其单畴的临界尺寸。

解: 单位面积的畴壁能量 $\gamma = 2\pi S \sqrt{\frac{k_1 A}{a}} = 3.98 \times 10^{-3} J/m^2$ S 为自旋量子数=1

$$\text{磁畴宽度 } D = \frac{10^4}{M_s} \sqrt{\frac{\gamma L}{17.0}} = 8.95 \times 10^{-6} m \quad L=10^{-2} m$$

5-12 设铁磁材料的内应力分布为 $\sigma = \sigma_0 \sin \frac{2\pi x}{l}$, 试计算弱磁场下材料的磁导率。

解: 此题通过内应力分布为 $\sigma = \sigma_0 \sin \frac{2\pi x}{l}$, 可见为 90° 畴壁位移, 其为位移磁

程为 $\mu_0 M_s H = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma$, 当外磁场变化 ΔH , 畴壁位移 Δx

$$\begin{aligned} \mu_0 M_s \nabla H &= \frac{3}{2} \lambda_s \frac{\partial \sigma}{\partial x} \Delta x \\ \text{平衡时} \quad \therefore \Delta x &= \frac{\mu_0 M_s}{\frac{3}{2} \lambda_s \frac{\partial \sigma}{\partial x}} \Delta H \end{aligned}$$

此时沿外磁场方向上磁矩将增加 $\Delta \mu_H = M_s S_\perp \Delta x$ (S_\perp 为单位体积 90° 畴壁的面积)

$$\chi_{i-90} = \frac{\mu_0 M_s^2}{\frac{3}{2} \lambda_s \frac{\partial \sigma}{\partial x}} S_\perp \dots \dots \dots (1)$$

$$\begin{aligned} \therefore \sigma_{(x)} &= \sigma_0 \sin \frac{2\pi x}{l} \\ \therefore \frac{\partial \sigma}{\partial x} &= \frac{2\pi \sigma_0}{l} \cos \frac{2\pi}{l} x \\ \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x}\right)_{x=0} &= \frac{2\pi \sigma_0}{l} \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

设磁畴宽度 $D = \frac{l}{2}$, 在单位体积内将有 $2/D$ 个畴和畴壁数目, 因而单位体积内

$$\begin{aligned} \text{畴壁面积应为} \quad (1 \times 1) \times \frac{2}{D} &= \frac{4}{l} \\ \therefore S_\perp &= \frac{4}{l} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{将(2)(3)代入(1), 可得: } \chi_{i-90} &= \frac{4}{3\pi} \frac{\mu_0 M_s^2}{\lambda_s \sigma_0} \\ \therefore \chi_{i-90} &= \mu_r - 1 \\ \therefore \mu_r &= \chi_{i-90} + 1 = \frac{4}{3\pi} \frac{\mu_0 M_s^2}{\lambda_s \sigma_0} + 1 = \mu / \mu_0 \\ \therefore \mu &= \frac{4\mu_0^2 M_s^2 + 3\pi \mu_0 \lambda_s \sigma_0}{3\pi \lambda_s \sigma_0} \end{aligned}$$

5-13. 证明复数磁导率 $\bar{\mu} = \mu' - i\mu''$ 中, μ' 和 μ'' 与频率 ω 的关系为半圆形。

证明: 用单弛豫来描述, 磁场为交变磁场强度 $H = H_m e^{i\omega t}$ 作用下

磁感应强度为 $B = B_m e^{i(\omega t - \delta)}$

$$\therefore \frac{dB}{dt} = \frac{1}{\tau} (B_m - B) = i\omega B$$

$$\therefore (i\omega + \frac{1}{\tau})B = \frac{B_m}{\tau}$$

$$\because B_m = \mu_0 \mu_i H = \mu_0 \mu_i H_m e^{i\omega t}$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu_i H_m e^{i\omega t}}{1 + i\omega\tau} = \frac{\mu_0 \mu_i (1 - i\omega\tau) H_m e^{i\omega t}}{1 + (\omega\tau)^2}$$

由 $B = \mu_0 \mu H = \mu_0 (\mu' - i\mu'') H_m e^{i\omega t}$

$$\therefore \mu' = \frac{\mu_i}{1 + (\omega\tau)^2} = \frac{\mu_i}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2}$$

$$\mu'' = \frac{\mu_i}{1 + (\omega\tau)^2} = \frac{\mu_i \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2}$$

$$\therefore \mu'^2 + \mu''^2 = \frac{\mu_i^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2}$$

$$\mu'' > 0$$

所以为半圆形

5-14. 比较静态磁化与动态磁化的特点

	材料受磁场作用	磁滞回归线包围面积	磁损耗
静态磁化	静态磁场	大	静态磁滞损耗
动态磁化	动态磁场	小	磁滞损耗, 涡流损耗, 剩余损耗

5-15. 讨论动态磁化过程中, 磁损耗与频率的关系。

1) 低频区域 ($f < 10^4 \text{Hz}$) μ' 和 μ'' 随频率 f 的变化较小, 引起损耗 μ'' 的机理主要

是由于不可逆磁化过程产生的磁滞和磁化状态滞后于磁场变化的磁后效；

- 2) 中频区域 ($f = 10^4 \sim 10^6 \text{Hz}$) ,损耗 μ'' 会出现峰值；
- 3) 高频区域 ($f = 10^6 \sim 10^8 \text{Hz}$) , μ' 急剧下降, 损耗 μ'' 迅速增加。交变磁场的频率与畴壁振动的本征频率或弛豫频率相同时, 发生畴壁共振或畴壁弛豫而吸收大量引起损耗增大
- 4) 超高频区域 ($f = 10^8 \sim 10^{10} \text{Hz}$) μ' 继续下降, $\mu'-1$ 可能出现负值, 而 μ'' 出现自然共振引起的峰值, 这是由于外加磁场频率与磁矩进动固有频率相等时产生共振现象引起的；
- 5) 极高频区域 ($f > 10^{10} \text{Hz}$) 对应为自然交换共振区域。

材料物理习题集

第一章 固体中电子能量结构和状态 (量子力学基础)

1. 一电子通过 5400V 电位差的电场, (1) 计算它的德布罗意波长; (2) 计算它的波数; (3) 计算它对 Ni 晶体 (111) 面 (面间距 $d=2.04 \times 10^{-10}\text{m}$) 的布拉格衍射角。 (P5)

$$\begin{aligned} \text{解: (1) } \lambda &= \frac{h}{p} = \frac{h}{(2mE)^{1/2}} \\ &= \frac{6.6 \times 10^{-34}}{(2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 5400 \times 1.6 \times 10^{-19})^{1/2}} \\ &= 1.67 \times 10^{-11} \text{m} \end{aligned}$$

$$(2) \text{ 波数 } K = \frac{2\pi}{\lambda} = 3.76 \times 10^{11}$$

$$(3) 2d \sin \theta = \lambda$$

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2d} \Rightarrow \theta = 2^{\circ}18'$$

2. 有两种原子, 基态电子壳层是这样填充的

$$(1) 1s^2, 2s^2 2p^6, 3s^2 3p^3;$$

$$(2) 1s^2, 2s^2 2p^6, 3s^2 3p^6 3d^{10}, 4s^2 4p^6 4d^{10};$$

请分别写出 $n=3$ 的所有电子的四个量子数的可能组态。(非书上内容)

n	l	m	s
3	0	0	$1/2$
3	0	0	$-1/2$
3	1	0	$1/2$
3	1	1	$1/2$
3	1	-1	$1/2$

n	l	m	s
3	0	0	1/2
3	0	0	-1/2
3	1	0	1/2
3	1	0	-1/2
3	1	1	1/2
3	1	1	-1/2
3	1	-1	1/2
3	1	-1	-1/2
3	2	0	1/2
3	2	0	-1/2
3	2	1	1/2
3	2	1	-1/2
3	2	-1	1/2
3	2	-1	-1/2
3	2	2	1/2
3	2	2	-1/2
3	2	-2	1/2
3	2	-2	-1/2

3. 如电子占据某一能级的几率是 $1/4$ ，另一能级被占据的几率为 $3/4$ ，分别计算两个能级的能量比费米能级高出多少 kT ? (P15)

解：由 $f(E) = \frac{1}{\exp[\frac{E - E_F}{kT}] + 1}$

$\Rightarrow E - E_F = kT \ln[\frac{1}{f(E)} - 1]$

将 $f(E) = 1/4$ 代入得 $E - E_F = \ln 3 \cdot kT$

将 $f(E) = 3/4$ 代入得 $E - E_F = -\ln 3 \cdot kT$

4. 已知 Cu 的密度为 $8.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，计算其 E_F^0 (P16)

解：

$$\begin{aligned} \text{由 } E_F^0 &= \frac{h^2}{2m} (3n/8\pi)^{\frac{2}{3}} \\ &= \frac{(6.63 \times 10^{-34})^2}{2 \times 9 \times 10^{-31}} (3 \times \frac{8.5 \times 10^6}{63.5} \times 6.02 \times 10^{23} / 8\pi)^{\frac{2}{3}} \\ &= 1.09 \times 10^{-18} \text{ J} = 6.83 \text{ eV} \end{aligned}$$

5. 计算 Na 在 0K 时自由电子的平均动能。(Na 的摩尔质量 $M=22.99$, $\rho=1.013 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) (P16)

解：由 $E_F^0 = \frac{h^2}{2m} (3n/8\pi)^{2/3}$

$$= \frac{(6.63 \times 10^{-34})^2}{2 \times 9 \times 10^{-31}} \left(3 \times \frac{1.013 \times 10^6}{22.99} \times 6.02 \times 10^{23} / 8\pi \right)^{2/3}$$

$$= 5.21 \times 10^{-19} \text{ J} = 3.25 \text{ eV}$$

由 $\bar{E}_0 = \frac{3}{5} E_F^0 = 1.08 \text{ eV}$

6. 若自由电子矢量 \mathbf{K} 满足以为晶格周期性边界条件 $\Psi(\mathbf{x}) = \Psi(\mathbf{x} + \mathbf{L})$ 和定态薛定谔方程。试证明下式成立： $e^{i\mathbf{K}\mathbf{L}} = 1$

解：由于满足薛定谔定态方程

$$\therefore \Psi(\mathbf{x}) = A e^{i\mathbf{K}\mathbf{x}}$$

又 Ψ 满足周期性边界条件

$$\therefore \Psi(\mathbf{x} + \mathbf{L}) = A e^{i\mathbf{K}(\mathbf{x} + \mathbf{L})} = A e^{i\mathbf{K}\mathbf{x}} [e^{i\mathbf{K}\mathbf{L}}] = \Psi(\mathbf{x}) = A e^{i\mathbf{K}\mathbf{x}}$$

$$\Rightarrow e^{i\mathbf{K}\mathbf{L}} = 1$$

7.

已知晶面间距为 d ，晶面指数为 (hkl) 的平行晶面的倒易矢量为 \mathbf{r}_{hkl}^* ，一电子波与该晶面系成 θ 角入射，试证明产生布拉格反射的临界波矢量 \mathbf{K} 的轨迹满足方程 $|\mathbf{K}| \cos\theta = |\mathbf{r}_{hkl}^*|/2$ 。

8. 试用布拉格反射定律说明晶体电子能谱中禁带产生的原因。
(P20)
9. 试用晶体能带理论说明元素的导体、半导体、绝缘体的导电性质。
答：（画出典型的能带结构图，然后分别说明）
10. 过渡族金属物理性质的特殊性与电子能带结构有何联系？（P28）
答：过渡族金属的 d 带不满，且能级低而密，可容纳较多的电子，夺取较高的 s 带中的电子，降低费米能级。

补充习题

1. 为什么镜子颠倒了左右而没有颠倒上下？
2. 只考虑牛顿力学，试计算在不损害人体安全的情况下，加速到光速需要多少时间？
3. 已知下列条件，试计算空间两个电子的电斥力和万有引力的比值

万有引力常数	$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{N}[\text{m}^2]\text{kg}^{-2}$
电子质量	$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$
电子电量	$q_e = 1.60 \times 10^{-19} \text{C}$
介电常数	$\epsilon = 8.99 \times 10^9 \text{N}[\text{m}^2]\text{C}^{-2}$

解: $F_{\text{引}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$

$F_{\text{斥}} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$

$$\Rightarrow F_{\text{引}} / F_{\text{斥}} = \frac{G m_1 m_2}{k q_1 q_2} = \frac{5.5 \times 10^{-71}}{2.3 \times 10^{-28}} = 2.41 \times 10^{-43}$$

- 画出原子间引力、斥力、能量随原子间距变化的关系图。
- 面心立方晶体，晶格常数 $a=0.5\text{nm}$ ，求其原子体密度。

解：由于每个面心立方晶胞含 4 个原子，所以原子体密度为：

$$\frac{4 \text{原子}}{(0.5 \times 10^{-7} \text{cm})^3} = 3.2 \times 10^{22} \text{原子} / \text{cm}^3$$

- 简单立方的原子体密度是 $3 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 。假定原子是钢球并与最近的相邻原子相切。确定晶格常数和原子半径。

解：每个简单立方晶胞含有一个原子：

$$\frac{1}{a^3} = 3 \times 10^{22} \text{cm}^{-3} \Rightarrow a = 0.322 \text{nm}$$

$$r = \frac{1}{2} a = 0.161 \text{nm}$$

第二章 材料的电性能

1. 铂线 300K 时电阻率为 $1 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$, 假设铂线成分为理想纯。试求 1000K 时的电阻率。(P38)

解:

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha T)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1 + \alpha T_2}{1 + \alpha T_1} \Rightarrow \rho_2 = \rho_1 \frac{1 + \alpha T_2}{1 + \alpha T_1} = 1 \times 10^{-7} \times \frac{5}{2.2} = 2.27 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$$

2. 镍铬丝电阻率 (300K) 为 $1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$, 加热到 4000K 时电阻率增加 5%, 假定在此温度区间内马西森定则成立。试计算由于晶格缺陷和杂质引起的电阻率。(P38)

3. 为什么金属的电阻温度系数为正的? (P37-38)

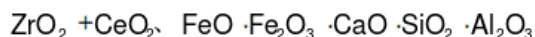
答: 当电子波通过一个理想晶体点阵时 (0K), 它将不受散射; 只有在晶体点阵完整性遭到破坏的地方, 电子波才受到散射 (不相干散射), 这就是金属产生电阻的根本原因, 因此随着温度升高, 电阻增大, 所以金属的电阻温度系数为正。

4. 试说明接触电阻产生的原因和减小这个电阻的措施。(P86)

接触电阻产生的原因有两个: 一是因为接触面不平, 真正接触面比看到的要小, 电流通过小的截面必然产生电阻, 称为会聚电阻。二是无论金属表面怎样干净, 总是有异物形成的膜, 可能是周围气体、水分的吸附层。因此, 一般情况下, 接触金属时首先接触到的是异物薄膜, 这种由于膜的存在而引起的电阻称为过渡电阻。

5. 镍铬薄膜电阻沉积在玻璃基片上其形状为矩形 $1\text{mm} \times 5\text{mm}$, 镍铬薄膜电阻率为 $1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$, 两电极间的电阻为 $1\text{K} \Omega$, 计算表面电阻和估计膜厚。

6. 表 2.1 中哪些化合物具有混合导电方式? 为什么? (P35)



7. 说明一下温度对过渡族金属氧化物混合导电的影响。

8. 表征超导体的三个主要指标是什么? 目前氧化物超导体的主要弱点是什么?

(P76) 临界转变温度、临界磁场强度、临界电流密度。

主要弱点是临界电流密度低。

9. 已知镍合金中加入一定含量铝, 可以使合金由统计均匀状态转变为不均匀固溶体 (K 状态)。试问, 从合金相对电阻变化同形变量关系曲线图 (见图 2.70) 中能否确定镍铁铝合金由均匀状态转变为 K 状态的铝含量极限, 为什么?

10. 试评述下列建议，因为银具有良好的导电性能而且能够在铝中固溶一定的数量，为何不用银使其固溶强化，以供高压输电线使用？

(a) 这个意见是否基本正确 (b) 能否提供另一种达到上述目的的方法； (c) 阐述你所提供方案的优越性。

答：不对。在铝中固溶银，会进一步提高材料的电阻率，降低导电性能。

11. 试说明用电阻法研究金属的晶体缺陷（冷加工或高温淬火）时为什么电阻测量要在低温下进行？

答：根据马西森定则，晶体缺陷所带来的电阻和温度升高带来的电阻是相互独立的，在低温下测量电阻，则温度带来的电阻变化很小，所测量的电阻能够反映晶体缺陷的情况。

12.

实验测出离子型导体的电导率与温度的相关数据，经数学回归分析得出关系为

$$\lg \sigma = A + B \frac{1}{T}$$

(1) 试求在测量温度范围内的电导激活能表达式；

(2) 若给出 $T_1=500\text{K}$ 时， $\sigma_1=10^9(\Omega\text{m})^{-1}$ ，

$T_2=1000\text{K}$ 时， $\sigma_2=10^6(\Omega\text{m})^{-1}$

计算电导激活能的值。

(P52)

解：

$$(1) \sigma = 10^{(A+B/T)}$$

$$\ln \sigma = (A + B/T) \ln 10$$

$$\sigma = e^{(A+B/T)\ln 10} = e^{\ln 10 A} e^{(\ln 10 \cdot B/T)} = A1e^{(-W/KT)}$$

$$W = -\ln 10 \cdot B \cdot k$$

式中 $k=0.84 \times 10^{-4}(\text{eV} / \text{K})$

$$(2) \left. \begin{array}{l} \lg 10^{-9} = A + B / 500 \\ \lg 10^{-6} = A + B / 1000 \end{array} \right\} \Rightarrow B = -3000$$

$$W = 0.594\text{eV}$$

13.

本征半导体中，从价带激发至导带的电子和价带产生的空穴共同导电，
激发的电子数 n 可以近似表示为：

$$n = N \exp(-E_g / 2kT)$$

式中： N 为状态密度， k 为波尔兹曼常数， T 为热力学温度（K），试回答

(1) 设 $N=10^{23} \text{cm}^{-3}$ ， $k=8.6 \times 10^{-5} \text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$ 时，Si ($E_g = 1.1 \text{eV}$)，

TiO_2 ($E_g = 3.0 \text{eV}$) 在 20°C 和 500°C 所激发的电子数 (cm^{-3}) 各是多少？

(2) 半导体的电导率 $\sigma (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ 可表示为

$$\sigma = ne\mu$$

式中： n 为载流子浓度 (cm^{-3})， e 为载流子电荷 (电子电荷 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$)

μ 为迁移率 ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)，当电子 (e) 和空穴 (h) 同时为载流子时，

$$\sigma = n_e e \mu_e + n_h e \mu_h$$

假设 Si 的迁移率 $\mu_e = 1450 (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1})$ ， $\mu_h = 500 (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1})$ ，且不随温度变化。

试求 Si 在 20°C 和 500°C 时的电导率。

解：

(1) Si:

$$\begin{aligned} 20^\circ\text{C}: n &= 10^{23} \exp(-1.1 / (2 \times 8.6 \times 10^{-5} \times 298)) \\ &= 10^{23} \times e^{-21.83} = 3.32 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 500^\circ\text{C}: n &= 10^{23} \exp(-1.1 / (2 \times 8.6 \times 10^{-5} \times 773)) \\ &= 10^{23} \times e^{-8} = 2.25 \times 10^{19} \text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

TiO_2 :

$$\begin{aligned} 20^\circ\text{C}: n &= 10^{23} \exp(-3.0 / (2 \times 8.6 \times 10^{-5} \times 298)) \\ &= 1.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 500^\circ\text{C}: n &= 10^{23} \exp(-3.0 / (2 \times 8.6 \times 10^{-5} \times 773)) \\ &= 1.6 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

(2)

$$\begin{aligned} 20^\circ\text{C}: \sigma &= n_e e \mu_e + n_h e \mu_h \\ &= 3.32 \times 10^{13} \times 1.6 \times 10^{-19} \times (1450 + 500) \\ &= 1.03 \times 10^{-2} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 500^\circ\text{C}: \sigma &= n_e e \mu_e + n_h e \mu_h \\ &= 2.25 \times 10^{19} \times 1.6 \times 10^{-19} \times (1450 + 500) \\ &= 7956 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \end{aligned}$$

14. 根据费米-狄拉克分布函数，半导体中电子占据某一能级 E 的允许状态几率为 $f(E)$ 为

$$f(E) = [1 + \exp((E - E_F) / kT)]^{-1}$$

补充习题:

1. 为什么锗半导体材料最先得到应用, 而现在的半导体材料却大都采用硅半导体?

答: 锗比较容易提纯, 所以最初发明的半导体三极管是锗制成的。但是, 锗的禁带宽度 (0.67 eV) 大约是硅的禁带宽度 (1.11 eV) 的一半, 所以硅的电阻率比锗大, 而且在较宽的能带中能够更加有效的设置杂质能级, 所以后来硅半导体逐渐取代了锗半导体。硅取代锗的另一个原因是硅的表面能够形成一层极薄的二氧化硅绝缘膜, 从而能够制备 MOS 三极管。因此, 现在的半导体材料大都采用硅半导体。

2. 经典自由电子论、量子自由电子论和能带理论分析材料导电性理论的主要特征是什么?

答: 经典自由电子论: 连续能量分布的价电子在均匀势场中的运动; 量子自由电子论:

不连续能量分布的价电子在均匀势场中的运动; 能带理论: 不连续能量分布的价电子在周期性势场中的运动。

根据经典自由电子论, 金属是由原子点阵组成的, 价电子是完全自由的, 可以在整个金属中自由运动, 就好像气体分子能够在容器内自由运动一样, 故可以把价电子看出“电子气”。自由电子的运动遵从经典力学的运动规律, 遵守气体分子运动论。在电场的作用下, 自由电子将沿电场的反方向运动, 从而在金属中形成电流。

量子自由电子论认为, 金属离子形成的势场各处都是均匀的, 价电子是共有化的, 它们可以不属于某个原子, 可以在整个金属内自由运动, 电子之间没有相互作用。电子运动遵从量子力学原理, 即电子能量是不连续的, 只有出于高能级的电子才能够跃迁到低能级, 在外电场的作用下, 电子通过跃迁实现导电。

能带理论认为, 原子在聚集时, 能级变成了能带, 在某些价带内部, 只存在着部分被电子占据的能级, 而在价带中能量较高的处于上方的能级很少有电子占据, 在外场作用下, 电子就能够发生跃迁, 从而实现导电。

3. 简述施主半导体的电导率与温度的关系。

答: 施主的富余价电子的杂质原子的电子能级低于半导体的导带。这个富余价电子并没有被施主束缚的很紧, 只要有一个很小的能量 E_d , 就可以使这个电子进入导带。此时影响电导率的禁带不是 E_g , 而是 E_d , 施主的这个价电子进入导带后, 不会在价带中产生空穴。随着温度的升高, 越来越多的施主电子越过禁带 E_d , 进入导带, 最后所有的施主电子都进入导带, 此时称为施主耗尽。如果温度继续升高, 电导率将维持一个常量, 因为再没有更多的施主电子可用, 而对于产生本征半导体的导电电子和空穴来说, 此时的温度又太低, 不足以使电子跃迁较大的带隙 E_g 。在更高的温度下, 才会出现本征半

导体产生的导电性。

4. 一块 n 性硅材料，掺有施主浓度 $N_D = 1.5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ ，在室温（ $T=300\text{K}$ ）时本征载流子浓度 $n_i = 1.3 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ ，求此时该半导体的多数载流子浓度和少数载流子浓度。

解：

$$\because n_i \ll N_D \therefore \begin{cases} n_0 = N_D = 1.5 \times 10^{15} / \text{cm}^3 (\text{多子}); \\ p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = 1.13 \times 10^9 / \text{cm}^3 (\text{少子})。 \end{cases}$$

5. 非本征半导体的导电性主要取决于添加的杂质的原子数量，_____ 而在一定范围内与温度的关系不大。

【无机非】无机材料物理性能考点总结（期末）

学习 2020-08-28 21:51 805阅读 · 34喜欢 · 5评论

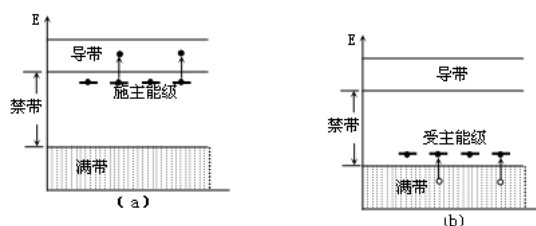


iy-gnohz

粉丝：1251 文章：199

+ 关注

- 1、晶体中的塑性变形有两种基本方式：滑移和孪晶。
- 2、一各向异性材料，弹性模量 $E=109\text{pa}$ ，泊松比 $\nu=0.2$ ，则其剪切模量 $G=45.4\text{ pa}$ 。
- 3、影响弹性模量的因素有晶体结构、温度、复相。
- 4、弹性模量 E 是一个只依赖于材料基本成份的参量，是原子间结合强度的一个标志，在工程中表征材料对弹性变形的抗力，即材料的刚度。
- 5、无机材料的热冲击损坏有两种类型：抗热冲击断裂性和抗热冲击损伤性。
- 6、根据材料在弹性变形过程中应力和应变的响应特点，弹性可以分为理想弹性和非理想弹性两类。
- 7、裂纹有三种扩展方式或类型：掰开型，错开型和撕开型。其中掰开型是低应力断裂的主要原因。
- 8、从对材料的形变及断裂的分析可知，在晶体结构稳定的情况下，控制强度的主要参数有三个：弹性模量，裂纹尺寸和表面能。
- 9、Griffith微裂纹理论从能量的角度来研究裂纹扩展的条件，这个条件是物体内储存的弹性应变能的降低大于等于由于开裂形成两个新表面所需的表面能。
- 10、按照格里菲斯微裂纹理论，材料的断裂强度不是取决于裂纹的数量，而是决定于裂纹的大小，即是由最危险的裂纹尺寸或临界裂纹尺寸决定材料的断裂强度。
- 11、广义虎克定律适用于各向异性的非均匀材料。
- 12、对于中心穿透裂纹的大而薄的板，其几何形状因子 $Y=$ 。
- 13、当温度不太高时，固体材料中的热导形式主要是声子热导。
- 14、杜隆—珀替定律的内容是：恒压下元素的原子热容为 25J/Kmol 。
- 15、热量是依晶格振动的格波来传递的，格波分为声频支和光频支两类。
- 16、固体材料的热膨胀本质是点阵结构中质点间平均距离随温度升高而增大。
- 17、金属材料电导的载流子是自由电子，而无机非金属材料电导的载流子可以是电子、电子空穴，或离子、离子空位。
- 18、晶体的离子电导可以分为离子固有电导 / 或本征电导和杂质电导两大类。
- 19、电导率的一般表达式为，其各参数 n_i 、 q_i 和 m_i 的含义分别是载流子的浓度、载流子的电荷量、载流子的迁移率。
- 20、下两图(a)与(b)中，(a)图是n型半导体的能带结构图，(b)图是p型半导体的能带结构图。



34



6



130



5

- 21、电介质材料中的压电性、铁电性与热释电性是由于相应压电体、铁电体和热释电体都是不具有对称中心的晶体。
- 22、材料磁性的本源是材料内部电子的循轨和自旋运动。
- 23、在垂直入射的情况下，光在界面上的反射的多少取决于两种介质的相对折射率。
- 24、导电材料中载流子是离子、电子和空位。
- 25、电子电导的特征是具有霍尔效应，离子电导的特征是具有电解效应。
- 26、格波间相互作用力愈强，也就是声子间碰撞几率愈大，相应的平均自由程愈小，热导率也就愈低。
- 27、PN结的特性有：单向导电性、击穿特性、电容特性。
- 28、热击穿的本质是介质在电场中极化，介质损耗发热，当热量在材料内积累，材料温度升高，当出现永久性损坏。
- 29、磁性分为：抗磁性、顺磁性、铁磁性、反铁磁性。

名词解释

- 1、塑性——材料的微观结构的相邻部分产生永久性位移，并不引起材料破裂的现象。
- 2、硬度——材料表面上不大体积内抵抗变形或破裂的能力，是材料的一种重要力学性能。
- 3、蠕变——当对粘弹性体施加恒定应力，其应变随时间而增加，弹性模量也随时间而减小。
- 4、压电性——某些晶体材料按所施加的机械应力成比例地产生电荷的能力。
- 5、电介质——在外电场作用下，能产生极化的物质。
- 6、光伏效应——指光照使不均匀半导体或半导体与金属组合的不同部位之间产生电位差的现象。
- 7、应变硬化——材料在应力作用下进入塑性变形阶段后，随着变形量的增大，形变应力不断提高的现象。
- 8、弛豫——施加恒定应变，则应力将随时间而减小，弹性模量也随时间而降低。
- 9、压敏效应——指对电压变化敏感的非线性电阻效应，即在某一临界电压以下，电阻值非常高，几乎无电流通过；超过该临界电压(敏压电压)，电阻迅速降低，让电流通过。
- 10、电介质极化——在外电场作用下，电介质中带质点的弹性位移引起正负电荷中心分离或极性分子按电场方向转动的现象。
- 11、热释电效应——晶体因温度均匀变化而发生极化强度改变的现象。
- 12、磁阻效应——半导体中，在与电流垂直的方向施加磁场后，使电流密度降低，即由于磁场的存在使半导体的电阻增大的现象。

简答题

- 1、试述韧性断裂与脆性断裂的区别，为什么说脆性断裂最危险？（8分）

答：韧性断裂和脆性断裂的区别在于：前者在断裂前及断裂过程中产生明显宏观塑性变形，后者无宏观塑性变形；前者断裂过程缓慢，而后者为快速断裂过程；前者断口呈暗灰色，纤维状，后者齐平光亮，呈放射状或结晶状。（6分）

脆性断裂的危险性在于断裂前不产生明显的宏观塑性变形，无明显前兆。（2分）

- 2、影响塑性形变的因素有哪些？并对其进行说明。

答：晶体结构和键型

本征因素：晶粒内部的滑移系统相互交截、晶界处的应力集中、晶粒大小和分布；

外来因素：晶界作为点缺陷的源和阱，易于富集杂质，沉淀有第二相。特别当含有低熔点物质时，多晶材料的高温塑性滑移首先发生在晶界。（杂质在晶界的弥散、晶界处的

第二相、晶界处的气孔。

3、为什么金属的滑移性能要优于无机非金属材料？

答：主要从金属材料的滑移系要多于无机非金属材料方面来回答。此外，金属材料中的金属键不具有饱和性和方向性，有利于位错的运动；而无机非金属材料中多为离子键或共价键（一般为两者组成的混合键），共价键具有明显的方向性，并且同号离子相互排斥，只有个别滑移系统能满足位错运动的几何条件和静电作用。

4、断裂能包括哪些内容？

答：热力学表面能：固体内部新生单位原子面所吸收的能量。塑性形变能：发生塑变所需的能量。相变弹性能：晶粒弹性各向异性、第二弥散质点的可逆相变等特性，在一定的温度下，引起体内应变和相应的内应力。结果在材料内部储存了弹性应变能。微裂纹形成能：在非立方结构的多晶材料中，由于弹性和热膨胀各向异性，产生失配应变，在晶界处引起内应力。当应变能大于微裂纹形成所需的表面能，在晶粒边界处形成微裂纹。

5、简述提高无机材料强度，改进材料韧性的措施。

答：1、微晶、高密度与高纯度

2、提高抗裂能力与预加应力

3、化学强化

4、相变增韧

5、弥散增韧

6、提高无机材料透光性的措施有哪些？

答：(1)提高原料的纯度

(2)添加外加剂：一方面这些质点将降低材料的透光率，但由于添加这些外加剂将可以降低材料的气孔，从而提高材料的透光率

(3)工艺措施：采用热压法比普通烧结法更容易排除气孔，即降低气孔，将晶粒定向排列将可以提高材料的透光率

7、什么是相变增韧？利用 ZrO_2 由四方转变成单斜相的相变过程可以改善陶瓷材料的断裂韧性，简述其机理。

答：相变增韧是利用多晶多相陶瓷中某些相在不同温度下发生相变从而增韧的效果。

ZrO_2 由四方转变成单斜相的相变过程中，体积增加3-5%，（2分）这体积效应使得材料内部产生应力或者微裂纹。（2分）当材料受到外力作用时，材料内部因为应力集中或者微裂纹可以部分或者全部抵抗外力作用，从而改善材料的断裂韧性。

8、根据抗热冲击断裂因子对热稳定性的影响，分析提高抗热冲击断裂性能的措施。

答：提高抗热冲击断裂性能的措施：

(1)、提高材料强度 σ ，减小弹性模量 E ，使 σ/E 提高-----提高材料的柔韧性，能吸收较多的弹性应变能而不致开裂，提高了热稳定性。

(2)、提高材料的热导率 λ ；

(3)、减小材料的热膨胀系数 α ；

(4)、减小材料的表面热传递系数 h ；

(5)、减小产品的有效厚度。



四道计算题，4选2，背

无机材料物理性能试卷

一. 填空 (1 × 20 = 20 分)

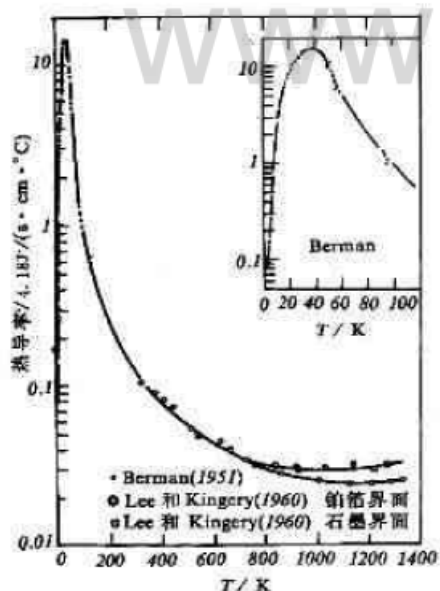
1. CsCl 结构中, Cs⁺与 Cl⁻分别构成_____格子。
2. 影响黏度的因素有_____、_____、_____。
3. 影响蠕变的因素有温度、_____、_____、_____。
4. 在_____、_____的情况下, 室温时绝缘体转化为半导体。
5. 一般材料的_____远大于_____。
6. 裂纹尖端出高度的_____导致了较大的裂纹扩展力。
7. 多组分玻璃中的介质损耗主要包括三个部分: _____、_____、_____。
8. 介电常数显著变化是在_____处。
9. 裂纹有三种扩展方式: _____、_____、_____。
10. 电子电导的特征是具有_____。

二. 名词解释 (4 × 4 分 = 16 分)

1. 电解效应
2. 热膨胀
3. 塑性形变
4. 磁畴

三. 问答题 (3 × 8 分 = 24 分)

1. 简述晶体的结合类型和主要特征:
2. 什么叫晶体的热缺陷? 有几种类型? 写出其浓度表达式? 晶体中离子电导分为哪几类?
3. 无机材料的蠕变曲线分为哪几个阶段, 分析各阶段的特点。
4. 下图为氧化铝单晶的热导率与温度的关系图, 试解释图像先增后减的原因。



四. 计算题 (共 20 分)

1. 求熔融石英的结合强度, 设估计的表面能为 $1.75J/m^2$; Si-O 的平衡原子间距为 $1.6 \times 10^{-8}cm$, 弹性模量值从 60 到 75GPa。(10 分)

2.康宁 1273 玻璃(硅酸铝玻璃)具有下列性能参数： $\lambda=0.021\text{J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ ； $\alpha=4.6 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ； $\sigma_p=7.0\text{kg}/\text{mm}^2$ ， $E=6700\text{kg}/\text{mm}^2$ ， $\nu=0.25$ 。求第一及第二热冲击断裂抵抗因子。(10分)

无机材料物理性能试卷答案

一. 填空。(1 × 20 = 20分)

- 1, 简立方、
- 2, 温度、时间、熔体的结构与组成
- 3, 应力、晶体的组成、显微结构
- 4, 掺杂、组分缺陷
- 5, 抗压强度、抗张强度
- 6, 应力集中
- 7, 电导损耗、松弛损耗、结构损耗、
- 8, 居里点
- 9, 张开型、滑开型、撕开型
- 10, 霍尔效应

二.名词解释

1. 电解效应：离子电导的特征是存在电解效应，离子的前一伴随着一定的质量变化，离子在电极附近发生电子得失，产生新的物质，这就是电解现象。
2. 热膨胀：物体的体积或长度随着温度升高而增长的现象称为热膨胀。
3. 塑性形变：塑性形变是在超过材料的屈服应力作用下，产生性变，外力移去后不能恢复的形变。
4. 磁畴：由于磁铁体具有很强的内部交换作用，铁磁物质的交换能为正值，而且较大，使得相邻原子的磁矩平行取向，发生自磁化，在物质内部形成许多小区域，即磁畴。

三. 问答题

1.

结合类型	结构单元	特征性质
离子晶体	离子	高熔点，硬度大，密堆积
共价晶体（原子晶体）	原子	高硬度，高熔点，几乎不溶于所有溶剂
金属晶体	金属离子	密堆积，具有良好的导电性和导热性，高硬度，高熔点
分子晶体	分子，原子	低熔点，低沸点，易压缩
氢键晶体	含氢分子	低熔点，低沸点，

2. 答：热缺陷是由于晶体中的原子(或离子)的热运动而造成的缺陷。从几何图形上看是一种点缺陷。热缺陷的数量与温度有关，温度愈高，造成缺陷的机会愈多。晶体中热缺陷有两种形态，一种是肖脱基(Schottky)缺陷，另一种是弗伦克尔(Frenkel)缺陷。

弗伦克尔缺陷，空位或填隙离子的浓度：

$$N_f = N \exp(-E_f/2kT)$$

N-----单位体积内离子的格点数。

肖特基缺陷，空位的浓度：

$$N_s = N \exp(-E_s/2kT)$$

N-----单位体积内正负离子对数

本征电导；弗伦克尔缺陷；肖特基缺陷；杂质导电；填隙杂质或置换杂质（溶质）

3. 答：共分为四个阶段：

①.起始阶段，在外力作用下发生瞬时弹性形变。

②.蠕变减速阶段，应变速率随时间递减，持续时间较短，应变速率满足：

$$\dot{\epsilon} = A t^{-n}$$

③.稳定态蠕变，形变与时间呈线性关系：

$$\epsilon = K t$$

④. 加速蠕变阶段, 该阶段是断裂之前的最后一个阶段, 曲线较陡, 蠕变速率随时间的增加而快速增加。

4. 答: 如图, 在很低的温度下, 晶体的热容 C_v 与温度的三次方成正比, 因此随着温度的增加, λ 也近似与 T^3 成比例变化, 图像快速上升。当温度继续增加到德拜时, C_v 不再与 T^3 成比例, 而是趋于常数, 分子平均自由程 l 随温度的增加而减小, 因此 λ 随温度的升高而迅速减小。更高的温度后 C_v 基本不变化, 自由程也趋于晶格常数, 所以图像变得缓和。在高温辐射的影响下, 1600 K 后 λ 又有少许回升。

四. 计算题

1. 解: $E=60\sim 75\text{GPa}=6.0\sim 7.5\times 10^{10}\text{Pa}$, $\gamma =1.75\text{J/m}^2$,

$a=1.6\times 10^{-8}\text{cm}=1.6\times 10^{-10}\text{m}$ 。代入公式可得:

$$\sigma_{th} = \sqrt{\frac{E\gamma}{a}}$$

当 $E=60\text{GPa}$ 时, $\sigma_{th}=25.62\text{GPa}$

当 $E=75\text{GPa}$ 时, $\sigma_{th}=28.64\text{GPa}$

答: 熔融石英的结合强度介于 25.62 GPa~28.64 GPa 之间

$$2. \text{解: } R = \frac{\sigma(1-\mu)}{\alpha E} = 7.0 \times (1-0.25)/(4.6 \times 10^{-6} \times 6700)$$

$=170.3\text{ }^\circ\text{C}$

$R' = \lambda R = 2.1 \times 170.3\text{ }^\circ\text{C}$

$=358\text{ J/m}\cdot\text{s}$

期末复习题参考答案

一、填空

1. 一长 30cm 的圆杆，直径 4mm，承受 5000N 的轴向拉力。如直径拉成 3.8 mm，且体积保持不变，在此拉力下名义应力值为_____，名义应变值为_____。
2. 克劳修斯—莫索蒂方程建立了宏观量介电常数与微观量极化率之间的关系。
3. 固体材料的热膨胀本质是点阵结构中质点间平均距离随温度升高而增大。
4. 格波间相互作用力愈强，也就是声子间碰撞几率愈大，相应的平均自由程愈小，热导率也就愈低。
5. 电介质材料中的压电性、铁电性与热释电性是由于相应压电体、铁电体和热释电体都是不具有对称中心的晶体。
6. 复介电常数由实部和虚部这两部分组成，实部与通常应用的介电常数一致，虚部表示了电介质中能量损耗的大小。
7. 无机非金属材料中的载流子主要是电子和离子。
8. 广义虎克定律适用于各向异性的非均匀材料。
9. 设某一玻璃的光反射损失为 m ，如果连续透过 x 块平板玻璃，则透过部分应为 $I_0 \cdot (1-m)^{2x}$ 。
10. 对于中心穿透裂纹的大而薄的板，其几何形状因子 $Y = \sqrt{\pi}$ 。
11. 设电介质中带电质点的电荷量 q ，在电场作用下极化后，正电荷与负电荷的位移矢量为 l ，则此偶极矩为 ql 。
12. 裂纹扩展的动力是物体内存存的弹性应变能的降低大于等于由于开裂形成两个新表面所需的表面能。
13. Griffith 微裂纹理论认为，断裂并不是两部分晶体同时沿整个界面拉断，而是裂纹扩展的结果。
14. 考虑散热的影响，材料允许承受的最大温度差可用第二热应力因子表示。
15. 当温度不太高时，固体材料中的热导形式主要是声子热导。
16. 在应力分量的表示方法中，应力分量 σ, τ 的下标第一个字母表示方向，第二个字母表示应力作用的方向。
17. 电滞回线的存在是判定晶体为铁电体的重要根据。
18. 原子磁矩的来源是电子的轨道磁矩、自旋磁矩和原子核的磁矩。而物质的磁性主要由电子的自旋磁矩引起。
19. 按照格里菲斯微裂纹理论，材料的断裂强度不是取决于裂纹的数量，而是决定于裂纹的大小，即是由最危险的裂纹尺寸或临界裂纹尺寸决定材料的断裂强度。
20. 复合体中热膨胀滞后现象产生的原因是由于不同相间或晶粒的不同方向上膨胀系数差别很大，产生很大的内应力，使坯体产生微裂纹。
21. 晶体发生塑性变形的方式主要有滑移和孪生。
22. 铁电体是具有自发极化且在外电场作用下具有电滞回线的晶体。
23. 自发磁化的本质是电子间的静电交换相互作用。

二、名词解释

自发极化：极化并非由外电场所引起，而是由极性晶体内部结构特点所引起，使晶体中的每个晶胞内存在固有电偶极矩，这种极化机制为自发极化。

断裂能：是一种结构敏感参数，起着断裂过程的阻力作用，不仅取决于组分、结构，在很大程度上受到微观缺陷、显微结构的影响。包括热力学表面能、塑性形变能、微裂纹形成能、相变弹性能等。

滞弹性：当应力作用于实际固体时，固体形变的产生与消除需要一定的时间，这种与时间有关的弹性称为滞弹性。

格波：处于格点上的原子的热振动可描述成类似于机械波传播的结果，这种波称为格波，格波的一个特点是，其传播介质并非连接介质，而是由原子、离子等形成的晶格。

电介质：指在电场作用下能建立极化的一切物质。

电偶极子：是指相距很近但有一距离的两个符号相反而量值相等的电荷。

蠕变：固体材料在保持应力不变的条件下，应变随时间延长而增加的现象。它与塑性变形不同，塑性变形通常在应力超过弹性极限之后才出现，而蠕变只要应力的作用时间相当长，它在应力小于弹性极限时也能出现。

突发性断裂：断裂源处的裂纹尖端所受的横向拉应力正好等于结合强度时，裂纹产生突发性扩展。一旦扩展，引起周围应力的再分配，导致裂纹的加速扩展，这种断裂称为突发性断裂。

压电效应：不具有对称中心的晶体在沿一定方向上受到外力的作用而变形时，其内部会产生极化现象，同时在它的两个相对表面上出现正负相反的电荷。当外力去掉后，它又会恢复到不带电的状态，这种现象称为正压电效应。当作用力的方向改变时，电荷的极性也随之改变。相反，当对不具有对称中心晶体的极化方向上施加电场，晶体也会发生变形，电场去掉后，晶体的变形随之消失，这种现象称为逆压电效应，或称为电致伸缩现象。

电致伸缩：当在不具有对称中心晶体的极化方向上施加电场时，晶体会发生变形，电场去掉后，晶体的变形随之消失，这种现象称为电致伸缩现象，或称为逆压电效应。

铁电体：具有自发极化且在外电场作用下具有电滞回线的晶体。

三、问答题

1. 简述 K_I 和 K_{Ic} 的区别。

答： K_I 应力场强度因子：反映裂纹尖端应力场强度的参量。

K_{Ic} 断裂韧性：当应力场强度因子增大到一临界值时，带裂纹的材料发生断裂，该临界值称为断裂韧性。

K_I 是力学度量，它不仅随外加应力和裂纹长度的变化而变化，也和裂纹的形状类型，以及加载方式有关，但它和材料本身的固有性能无关。而断裂韧性 K_{Ic} 则是反映材料阻止裂纹扩展的能力，因此是材料的固有性质。

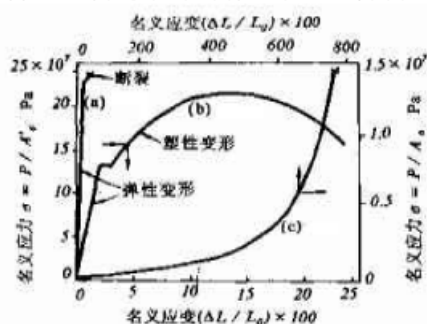
2. 简述位移极化和松弛极化的特点。

答：位移式极化是一种弹性的、瞬时完成的极化，不消耗能量；松弛极化与热运动有关，完成这种极化需要一定的时间，并且是非弹性的，因而消耗一定的能量。

3. 为什么金属材料有较大的热导率，而非金属材料的导热不如金属材料好？

答：固体中导热主要是由晶格振动的格波和自由电子运动来实现的。在金属中由于有大量的自由电子，而且电子的质量很轻，所以能迅速地实现热量的传递。虽然晶格振动对金属导热也有贡献，但只是很次要的。在非金属晶体，如一般离子晶体的晶格中，自由电子是很少的，晶格振动是它们的主要导热机构。因此，金属一般都具有较非金属材料更大的热导率。

4. 说明图中三条应力-应变曲线的特点，并举例说明其对应的材料。



答：受力情况下，绝大多数材料（或塑性形变很小），接着就

所示，即在弹性变形后没有塑性是所有脆性材料的特征，包括离

子晶体和共价晶体等。在短期承受逐渐增加的外力时，有些固体的变形分为两个阶段，在屈服点以前是弹性变形阶段，在屈服点后是塑性变形阶段。包括大多数金属结构材料如图中曲线(b)所示。橡皮这类高分子材料具有极大的弹性形变，如图中曲线(c)所示，是没有残余形变的材料，称为弹性材料。

5. 如果要减少由多块玻璃组成的透镜系统的光反射损失，通常可以采取什么方法？为什么？

答：有多块玻璃组成的透镜系统，常常用折射率和玻璃相近的胶粘起来，这样除了最外和最内的两个表面是玻璃和空气的相对折射率外，内部各界面均是玻璃和胶的较小的相对折射率，从而大大减少了界面的反射损失。

6. 阐述大多数无机晶态固体的热容随温度的变化规律。

答：根据德拜热容理论，在高于德拜温度 θ_D 时，热容趋于常数 ($25\text{J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$)，低于 θ_D 时与 T^3 成正比。因此，不同材料的 θ_D 是不同的。无机材料的热容与材料结构的关系是不大的，绝大多数氧化物、碳化物，热容都是从低温时的一个低的数值增加到 1273K 左右的近似于 $25\text{J}/\text{K}\cdot\text{mol}$ 的数值。温度进一步增加，热容基本上没有什么变化。

7. 有关介质损耗描述的方法有哪些？其本质是否一致？

答：损耗角正切、损耗因子、损耗角正切倒数、损耗功率、等效电导率、复介电常数的复项。多种方法对材料来说都涉及同一现象。即实际电介质的电流位相滞后理想电介质的电流位相。因此它们的本质是一致的。

8. 简述提高陶瓷材料抗热冲击断裂性能的措施。

答：(1) 提高材料的强度 σ_r ，减小弹性模量 E 。(2) 提高材料的热导率。(3) 减小材料的热膨胀系数。(4) 减小表面热传递系数 h 。(5) 减小产品的有效厚度 r_n 。

四、论述题：

1. 何为相变增韧？论述氧化锆增韧陶瓷的机理。

答：利用多晶多相陶瓷中某些成分在不同温度的相变，从而增韧的效果，这统称为相变增韧。

第二相颗粒相变增韧 (transformation toughening) 是指将亚稳的四方 ZrO_2 颗粒引入到陶瓷基体中，当裂纹扩展进入含有 $t\text{-ZrO}_2$ 晶粒的区域时，在裂纹尖端应力场的作用下，将会导致 $t\text{-ZrO}_2$ 发生 $t\rightarrow m$ 相变，因而除了产生新的断裂表面而吸收能量外，还因相变时的体积效应 (膨胀) 而吸收能量，可见，应力诱发的这种组织转变消耗了外加应力。同时由于相变粒子的体积膨胀而对裂纹产生压应力，阻碍裂纹扩展。结果这种相变增韧作用使在该应力水平下在无相变粒子的基体中可以扩展的裂纹在含有氧化锆 $t\rightarrow m$ 相变粒子的复合材料中停止扩展，如要使其继续扩展，必须提高外加应力水平，具体体现在提高了材料的断裂韧性。

2. 说明下图中各个参量，数字及曲线所代表的含义。

答： B_s ——饱和磁感应强度，当外加磁场 H 增加到一定程度时， B 值就不再上升，也就是这块材料磁化的极限。

B_r ——剩余磁感应强度，当外加磁场降为 0 时，材料依然保留着磁性，其强度为 B_r 。

H_c ——矫顽力 (矫顽磁场强度)，表示材料保持磁化、反抗退磁的能力。据此大小可以区分软磁和硬磁。

μ ——磁导率 ($=B/H$)，表示材料能够传导和通过磁力线的能力。

$Oabc$ 段表示材料从宏观无磁性到有磁性的磁化过程； $cdefghc$ 段表示物质在外加磁场中磁化、退磁再磁化的过程，因为退磁的过程滞后于磁化曲线，故又称此曲线为磁滞回线。由该曲线围成的空间有明确的物理意义，即曲线围起的面积越大，矫顽力 (H_c) 越大，要求的矫顽场越强，磁化所需的能量越大，磁性材料就越“硬”；反之，曲线围起的面积越小，磁性材料就越“软”。

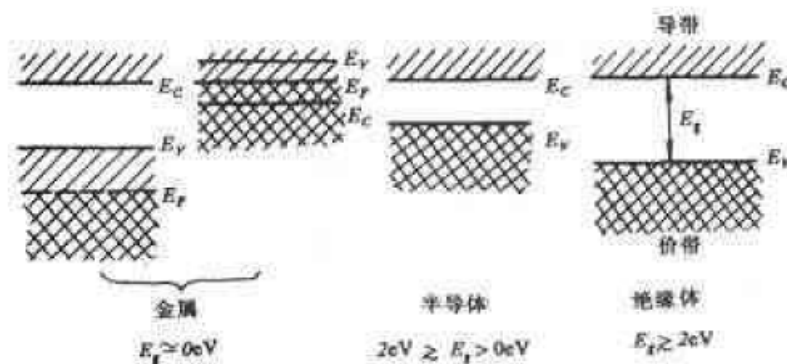


3. 论述大多数无机非金属材料在常温下不能产生塑性形变的原因。

答：无机非金属材料的组成主要是晶体材料，原则上讲可以通过位错的滑移实现塑性变形。但是由于陶瓷晶体多为离子键或共价键，具有明显的方向性。同号离子相遇，斥力极大，只有个别滑移系能满足位错运动的几何条件和静电作用条件。晶体结构愈复杂，满足这种条件就愈困难。另外，陶瓷材料一般呈多晶状态，而且还存在气孔、微裂纹、玻璃相等。其晶粒在空间随机分布，不同方向的晶粒，其滑移面上的剪应力差别很大。即使个别晶粒已达临界剪应力而发生滑移，也会受到周围晶粒的制约，使滑移受到阻碍而终止。所以多晶材料更不容易产生滑移。所以大多数无机非金属材料在常温下不能进行塑性变形。

4. 用固体能带理论说明什么是导体、半导体、绝缘体，并予以图示。

答：根据能带理论，晶体中并非所有电子，也并非所有的价电子都参与导电，只有导带中的电子或价带顶部的空穴才能参与导电。从下图可以看出，导体中导带和价带之间没有禁区，电子进入导带不需要能量，因而导电电子的浓度很大。在绝缘体中价带和导带隔着一个宽的禁带 E_g ，电子由价带到导带需要外界供给能量，使电子激发，实现电子由价带到导带的跃迁，因而通常导带中导电电子浓度很小。



半导体和绝缘体有相类似的能带结构，只是半导体的禁带较窄 (E_g 小)，电子跃迁比较容易。

五、计算题（每题 5 分，共 20 分）

1. 一圆杆的直径为 2.5mm、长度为 25cm 并受到 4500N 的轴向拉力，若直径拉细至 2.4mm，且拉伸变形后圆杆的体积不变，求在此拉力下的真应力、真应变、名义应力和名义应变，并比较讨论这些

#####材料科学与工程专业
《材料物理性能》期末考试试卷（B）
（后附参考答案及评分标准）

考试时间：120 分钟

考试日期：2019 年 12 月

题 号 一 二 三 四 五 总 分

得 分

评卷人

复查人

号
学

得分 一、单项选择题。（请将正确答案填入对应题号处，共 20 分，
每题 2 分）

题号 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

答案

名
姓

线
订
装

- 关于热膨胀，下列说法中不正确的是
 - 各向同性材料的体膨胀系数是线膨胀系数的三倍
 - 各向异性材料的体膨胀系数等于三个晶轴方向热膨胀系数的加和
 - 热膨胀的微观机理是由于温度升高，点缺陷密度增高引起晶格膨胀
 - 由于本质相同，热膨胀与热容随温度变化的趋势相同
- 固体材料的点阵热容，尤其是低温热容，由下列哪个模型给出了较好的解释
 - 德拜模型
 - 爱因斯坦模型
 - 杜隆-珀替模型
 - 汤姆孙模型
- 关于影响材料导电性的因素，下列说法中正确的是
 - 由于晶格振动加剧散射增大，金属和半导体电阻率均随温度上升而升高
 - 冷塑性变形对金属电阻率的影响没有一定规律
 - “热塑性变形+退火态”的电阻率高于“热塑性变形+淬火态”的电阻率
 - 一般情况下，固溶体的电阻率高于纯组元的电阻率

业
专

级
年

4. 下列对于半导体导电性表述正确的有_____。
- A. 杂质浓度越高导电性越好 B. 载流子浓度越低导电性越好
C. 温度越高导电性越好 D. 载流子迁移率越高导电性越好
5. 在评价电介质的主要电学性能指标中，属于导电性性能指标的是_____。
- A. 介电常数 B. 耐电强度
C. 损耗因素 D. 体电阻率与表面电阻率
6. 根据电介质的分类， H_2O 属于_____。
- A. 非极性电介质 B. 极性电介质
C. 铁电体 D. 铁磁体
7. 对于亚铁磁体的磁化率，下面表述正确的是_____。
- A. 与温度无关 B. 从 0K 开始，随温度上升而增大
C. 从 0K 开始，随温度上升而减小 D. 不能确定与温度有何种关系
8. 关于磁畴壁的畴壁厚度与能量之间的关系，下列描述正确的是
- A. 各向异性随畴壁厚度增加而增加
B. 各向异性随畴壁厚度增加而减小
C. 交换能随畴壁厚度增加而增加
D. 交换能不随畴壁厚度增减而变化
9. 云朵为何是白色的？这是因为云朵对太阳光的_____。
- A. 廷德尔散射 B. 瑞利散射
C. 吸收 D. 折射
10. 钻石之所以璀璨夺目，是因为_____，从而切割钻石时，可使进入的光线全反射并经色散后向其顶部射出，因而看起来光彩四射。
- A. 钻石折射率很小，故钻石对空气的临界角很大，可以形成全反射
B. 钻石折射率很大，故钻石对空气的临界角很小，容易形成全反射
C. 钻石具有双折射特性
D. 钻石具有二向色性

得分

二、填空题（本题 10 小题，每空 1 分，共 20 分）

11. 材料的各种热学性能均与 有关。
12. 热量传递的三种基本方式 、、。
13. 马西森定则指出，金属材料的电阻来源于两个部分，其中一个部分对应于声子散射与电子散射，此部分是随温度 的金属基本电阻，另一部分来源于与化学缺陷和物理缺陷而与温度 的残余电阻。
14. 从低温区开始，随着温度的上升，N 型半导体的电阻率随温度的变化规律是先 ，再 、再 。
15. 压电效应可分为正压电效应和 两类。
16. 在电场作用下电介质材料中参与极化的粒子有 、、。
17. 奈尔 (Néel) 点是指 。
18. 磁各向异性一般包括 、、 等。
19. 一般认为 散射是分子振动或点阵振动的光学声子对光波的散射。
20. 晶体结构的各向异性不仅能产生折射率的各向异性，即 现象，也能产生吸收率的各向异性，即 。

得分 三、判断题 (请将正确答案填入表中相应题号处，正确的打“√”，错误的打“×”，本题 10 小题，每小题 1 分，共 10 分)

题号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
答案										

21. 导热系数反映的是温度变化过程中材料各部分温度趋于一致的能力。()
22. 一级相变时，体积和热焓无明显变化，而摩尔定压热焓为无限大。()
23. 自由电子对摩尔定容热容的贡献点阵振动相比微不足道。()
24. 半导体的禁带宽度大于绝缘体的禁带宽度。()
25. 在金属与半导体中掺入杂质，对电阻造成的影响是相同的。()
26. 电子极化所需时间短于空间电荷极化。()

27. 凡是铁电体一定同时具备压电效应和热释电效应。()

28. 反铁磁体的磁化率与温度无关。()

29. 白云之所以是白色，是因为云朵对太阳光的瑞利散射。()

30. 白炽灯的发光是热力学平衡辐射。()

四、名词解释（本题 5 小题，每小题 4 分，共 20 分）

得分

31. 热传导

32. 掺杂半导体

33. 铁电体

34. 铁磁性

35. 双折射

#####材料科学与工程专业
《材料物理性能》期末考试试卷（B）
参考答案及评分标准

一、单项选择题。（请将正确答案填入对应题号处，共 20 分，每题 2 分）

题号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
答案	C	A	B	D	D	B	C	A	A	B

二、填空题（本题 10 小题，每空 1 分，共 20 分）

- 晶格热振动
- 热传导、对流、热辐射。
- 有关、无关
- 减小、增大、减小
- 逆压电效应
- 电子、原子（离子）、极性分子
- 反铁磁性材料的磁性转变温度
- 应力各向异性、形状各向异性、磁晶各向异性
- 拉曼
- 双折射、二向色性

三、判断题（本题 10 小题，每小题 1 分，共 10 分）

题号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
答案	√	×	×	×	×	√	√	×	×	√

四、名词解释（本题 5 小题，每小题 4 分，共 20 分。）

31. 热传导

答：当材料中有温度梯度时，热量将从温度高的一端自动流向温度低的一端，这种现象称为热传导。

32. 掺杂半导体

答：掺杂半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体；在所有结合键都被价电子填满后仍有部分富余价电子或者在所有价电子都成键后仍有些结合键上缺少价电子而出现一些空穴的半导体。

33. 铁电体

答：铁电体是指一些特殊的电介质材料，在没有外加电场的情况下，形成了电偶极子，并且这些电偶极子矢量在远大于原子尺寸的小区域内同行排列，且排列的方向在外电场作用下可以改变。

34. 铁磁性

答：有一些材料的磁化率很大，数值为 $10\sim 10^6$ ，此类材料称为铁磁性材料。

35. 双折射

答：任何非偏振光或者自然光（除了晶体光轴方向）入射晶体后都会分为振动方向相互垂直、传播速度不等的两个波，它们分别构成两条折射光线，这个现象称为双折射。（或者一束光通过各向异型的介质表面时，折射光会分成两束沿不同方向传播，这种一束光折射后分成两束光的现象称为双折射。）

三、简答/计算题（本题 3 小题，每小题 10 分，共 30 分）

36. 金属材料 and 无机非金属材料的导热机制有何不同？

答：固体的导热分为电子导热、声子导热和光子导热。通常在低温和室温条件下不用考虑光子导热，因为光子导热的贡献只是在高温下才比较明显。（1分）

无机非金属材料材料主要依靠声子导热，基本没有电子导热的贡献。（4分）

对于高纯金属，主要依靠自由电子导热；另外声子散射占小部分比例。（3分）

对于合金或者有杂质的金属，其热导率下降，因为杂质或者合金元素作为散射中心妨碍了电子的运动。（2分）

37. 铂线 300K 时电阻率为 $1 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$, 假设铂线成分为理想纯。试求 1000K 时的电阻率。注: 除过度金属外。所有纯金属的电阻温度系数近似 4×10^{-3} , 过渡族铁为 6×10^{-3} , 镍为 6.2×10^{-3} 。过渡族金属的电阻与温度的关系经常出现反常。

解:

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha T)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1 + \alpha T_2}{1 + \alpha T_1} \Rightarrow \rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{1 + \alpha T_2}{1 + \alpha T_1} = 1 \times 10^{-7} \times \frac{5}{2.2} = 2.27 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$$

38. 在不同的交变磁场频段, 主要的磁损耗是什么?

答: 根据铁氧体典型的磁谱, 在不同的交变磁场频段的磁损耗如下:

- (1) 在低频段 ($f < 10^4$ Hz), 材料的损耗主要来自涡流损耗、磁滞损耗和剩余损耗。(3 分)
- (2) 在中频段 (10^4 Hz $< f < 1$ MHz), 可能会产生尺寸共振, 可以通过对样品的设计来避免。(2 分)
- (3) 在高频段 (1 MHz $< f < 100$ MHz), 造成损耗的主要原因是自然共振、畴壁共振或弛豫过程。(2 分)
- (4) 在超高频段 (100 MHz $< f < 10$ GHz), 材料会在外加磁场中产生自然共振; 磁性材料的截止频率也出现这个频段。(3 分)

北航版复习提纲

电子质量
 $9 \times 10^{-31} \text{ kg}$

电子电荷量
 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

普朗克常数记
 $6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

第一章

填空题

光具有双重性，分别是波动性和粒子性。

光在传播中的偏振、干涉、衍射现象属于光的波动性。

量子自由电子学说利用薛定谔方程求解自由电子的运动波函数，计算自由电子的能量，也称为Fermi-Sommerfeld电子理论。

能级密度又称状态密度，表示能量E附近单位能量范围内所能容纳的状态数。

根据能带理论，电子在晶体中的能量状态，将在能级的准连续谱上出现能隙，分为禁带和允带。

判断题

- [正确] 定态波函数所描述的状态称为定态。
- [错误] 量子自由电子学说不同意经典自由电子学说认为价电子是完全自由的。（同意经典自由电子学说认为价电子是完全自由的，但认为自由电子的行为不服从M-B定律，而是服从Fermi-Dirac的量子统计规律。）
- [错误] 经典的自由电子学解释了霍尔系数“反常”现象。（经典自由电子学的缺陷：解释不了霍尔系数“反常”现象）
- [正确] 能量有确定值的运动状态称为定态。
- [错误] 0 K时自由电子的平均能量为0。（0 K时自由电子的平均能量不为0，而且具有与数量级相同的能量。）
- [错误] 禁带理论认为在两个能级之间的能量范围是允许的，电子可以取这种运动状态。
- [正确] 即使电子的动能小于势能位垒高度，电子也有一定几率穿过位垒。（隧道效应）

简答题

霍尔效应

将金属导体放在与通过它的电流方向垂直的磁场内，则在横跨样品的两面产生一个与电流和磁场都垂直的电场—霍尔场。

本征值与本征函数

薛定谔方程中只有当能量E具有某些确定值时才有解，这些特定的解为本征值，相应的波函数叫本征函数。

能带理论

用单电子近似法处理晶体中电子能谱的理论，称为能带理论。

k空间

用波矢建立的 k_x, k_y, k_z 的直角坐标系，就称为k空间。

费米球

第一布氏区在三维k空间中，把能量相同的k值连接起来形成等能面。当k值较小时，等能面是个球，能量为费米能的等能面，即为费米球。

计算题

一电子通过5400 V电位差的电场。

1. 计算它的德布罗意波波长 (1.67×10^{-11} m) ；
2. 计算它的波数；
3. 计算它对Ni晶体(111)面(面间距d= 2.04×10^{-10} m)的布喇格衍射角。

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 5400 \times 1.6 \times 10^{-19}}} = 1.67 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2 \times \pi}{1.67 \times 1.67 \times 10^{-11}} = 3.76 \times 10^{11}$$

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2d} = \frac{1.67 \times 10^{-11}}{2 \times 2.04 \times 10^{-10}} \therefore \theta = 2^\circ 20'$$

计算Cu的 E_F^0 (Cu的摩尔质量M=63.5, $\rho = 8.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) 。

$$\begin{aligned} E_F^0 &= \frac{h^2}{2m} \left(\frac{3n}{8\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \\ &= \frac{(6.63 \times 10^{-34})^2}{2 \times 9 \times 10^{-31}} \left(3 \times \frac{8.5 \times 10^6}{63.5} \times 6.02 \times 10^{23} / (8\pi) \right)^{\frac{2}{3}} \\ &= 1.09 \times 10^{-18} \text{ J} = 6.83 \text{ eV} \end{aligned}$$

计算Na在0 K时自由电子的平均动能 (Na的摩尔质量M=22.99, $\rho = 1.013 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) 。

$$\begin{aligned} E_F^0 &= \frac{h^2}{2m} \left(\frac{3n}{8\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \\ &= \frac{(6.63 \times 10^{-34})^2}{2 \times 9 \times 10^{-31}} \left(3 \times \frac{1.013 \times 10^6}{22.99} \times 6.02 \times 10^{23} / (8\pi) \right)^{\frac{2}{3}} \\ &= 5.21 \times 10^{-19} \text{ J} = 3.25 \text{ eV} \end{aligned}$$

$$\bar{E}_0 = \frac{3}{5} E_F^0 = 1.08 \text{ eV}$$

画图

写出费密分布函数的表达式，并画出T=0 K时的费米分布函数图像。

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right] + 1}$$

当 $T=0K$ 时，由 (1.43) 式得

若 $E > E_F$ 则 $f(E) = 0$

若 $E \leq E_F$ 则 $f(E) = 1$

(实线部分)

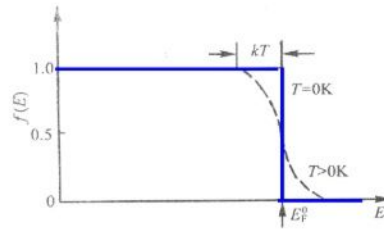
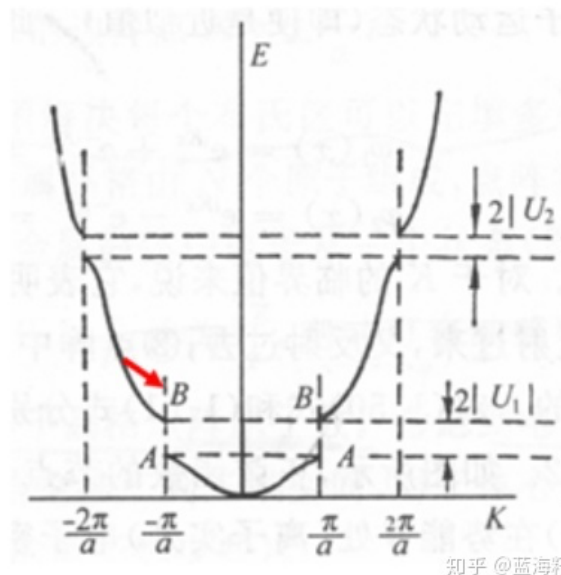


图 1.8 费米分布函数图像

费米分布函数图像

知乎 @蓝海籽

画出 k 空间第一布里渊区和第二第一布里渊区，并简要说明。



知乎 @蓝海籽

布里渊区

K 值从 $-\frac{\pi}{a}$ 到 $+\frac{\pi}{a}$ 的区间成为第一布里渊区，其中能级是准连续谱。

K 值从 $-\frac{2\pi}{a}$ 到 $-\frac{\pi}{a}$ 和从 $+\frac{\pi}{a}$ 到 $+\frac{2\pi}{a}$ 的区间成为第二布里渊区，包含第一和第二间断点之间的所有能级。

第二章

填空题

- 影响金属导电性的因素，主要有：温度、压力、晶体缺陷/冷加工/热处理/电阻率各向异性和几何尺寸效应。
- 载流子迁移率的物理意义：单位电场强度作用下载流子的平均漂移速度。
- 电流的载体称为载流子，半导体中载流子主要有：电子和空穴。
- 金属熔化时，原子的规则排列遭到破坏，增加了对电子的散射，电阻增加。

7. 金属电阻率随温度的升高而增大，这是因为金属电阻率随温度的升高而增大。

5. 小电阻材料电性能的测试方法有 双电桥法、电位差计法、四探针法。

简答题

为什么金属的电阻系数为正的？

因为金属的电阻随着温度的升高而增大，所以系数为正。

阐述一下温度对过渡族金属氧化物混合导电的影响

过渡族金属的电阻与温度经常出现反常现象；铁磁性的金属在发生磁性转变时电阻率出现反常现象。

表征超导体性能的三个主要指标是什么？目前氧化物超导体应用的主要弱点是什么？

主要指标：

1. 临界转变温度 T_c ， T_c 越高越好，最好接近室温；
2. 临界磁场强度 B_c ，不同材料有不同的临界磁场强度；临界温度越高，临界磁场强度也越高；温度越高，临界磁场强度也越低。
3. 临界电流密度，输入电流所产生的磁场与外加磁场之和超过 B_c 时，则超导态被破坏，此时通过的电流为临界电流密度 J_c 。

主要弱点：

1. 超导体材料的氧化物制备困难
2. 材料加工困难
3. 临界温度难以维持

计算题

铂线300 K时，电阻率为 $1 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ ，假设铂线成分为理想纯，计算1000 K时的电阻率？

纯金属的电阻系数 $\alpha = 4 \times 10^{-3}$

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha T)$$

$$\therefore \rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{1 + \alpha T_2}{1 + \alpha T_1} = 1 \times 10^{-7} \times \frac{5}{2.2} = 2.27 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$$

第三章

填空题

1. 电滞回线的存在是判定晶体为铁电体的重要根据。
2. 具有热释电效应的晶体一定是具有自发极化的晶体，在结构上应具有极轴性。
3. 电畴运动是通过新畴出现、发展和畴壁移动来实现的。
4. 电极化是电介质在微观上各种极化机制贡献的结果，主要包括：(1) 电子位移极化；(2) 离子位移极化；(3) 弛豫极化；(4) 取向极化；(5) 空间电荷极化
5. 弛豫极化又可以分为电子弛豫极化、离子弛豫极化和偶极子弛豫极化。
6. 介电损耗的三个影响因素：频率、温度、陶瓷材料的损耗。

0. 介电损耗的影响因素：频率、温度、湿度、电场强度等。

7. 影响无机材料击穿强度的各种因素：介质结构的不均匀性，材料中气泡的作用，材料表面状态和边缘电场。

简答题

德拜方程中 ϵ_{rs} 和 $\epsilon_{r\infty}$ 分别代表什么？

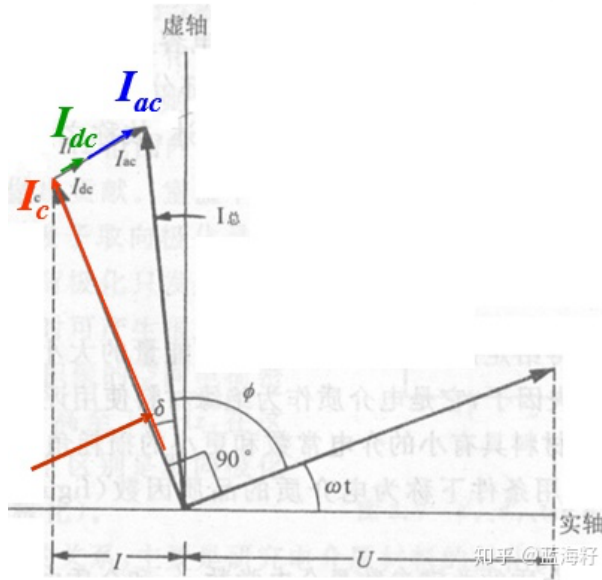
ϵ_{rs} ：静态或低频下的相对介电常数

$\epsilon_{r\infty}$ ：光频下的相对介电常数

陶瓷材料的损耗

1. 电导损耗；
2. 取向极化和弛豫极化损耗；
3. 电介质结构损耗。

真实的电介质平板电容器的总电流，分为哪三部分？



非理想电介质充电、损耗和总电流矢量图

理想电容充电造成的电流 I_c ，电容器真实电介质建立的电流 I_{ac} ，电容器真实电介质漏电流 I_{dc} 。

介电材料

当一种材料插入两平板之间，平板电容器的电容会增加，该材料即称为介电材料。

电介质极化

电介质在电场作用下产生束缚电荷的现象称为电介质极化。

弛豫时间

电介质完成极化所需的时间称为弛豫时间。

电介质的分类（举例说明）

极性分子电介质： H_2O ， CO

非极性分子电介质： CH_4 ， He

简述晶体电介质极化机制（电介质的极化包括哪几种？各种极化是如何产生的？）

电介质的极化包括电子位移极化、离子位移极化和固有电距的转向极化。

在电场的作用下，构成电介质的原子、离子中的电子云发生畸变，使电子云与原子核发生相对位移，在电场和恢复力的作用下，原子具有一定的电偶极矩，这种极化为电子的位移极化。

在离子晶体和玻璃等无机电介质中，正负离子处于平衡状态，其偶极矩的矢量和为零。在电场作用下，正离子沿电场方向移动，负离子沿反电场方向移动，正负离子发生相对位移，形成偶极矩，这种极化就是离子位移极化。

分子具有固有电矩，而在外电场作用下，电矩的转向所产生的电极化称为转向极化。

第四章

填空题

1. 影响折射率的因素：离子半径、材料的结构、晶型、内应力、同质异构体、波长（色散）。
2. 磷光发光机制中，当激发的电子从导带跳回价带时，有两个过程：首先跳到施主能级并被捕获。在它跳回价带时，电子必须先从捕获陷阱内逸出。
3. 发光二极管的特点：能源利用率高、节省能源、长寿命。
4. 激光是在外来光子的激发下诱发电子能态的转变，从而发射出与外来光子的频率、相位、传输方向以及偏振态均相同的相干光波。
5. 激光器的组成—三要素：工作物质、激励能源（泵浦）、光学谐振腔。

选择题

- [正确]根据瑞利散射定律，散射光强与波长的4次方成反比。
- [错误]色散是指折射率随着波长的增加而增加。（折射率随着波长的增加而减小）
- [正确]发磷光的材料往往含有杂质并在能隙附近建立了施主能级。（联想一下某道计算题）
- [错误]材料的折射率 n 随材料的相对介电常数 ϵ_r 的增大而减小（增大而增大）。
- [正确]任何物体在任何温度下都不断向周围空间发射电磁波。

简答题

什么是瑞利散射？

杂质所产生的次级波与主波方向不一致，并合成产生干涉现象，使光偏离原来的折射方向，从而引起散射。这种现象为瑞利散射。

什么是电光效应？

是外加电场所引起的材料折射率变化的效应。

根据发光时间荧光和磷光区别是什么？

1. 发光时间很短、仅为10 ns的光叫荧光。
2. 激发停止后的一段时间内仍能发光的复杂晶体无机物质叫磷光体。

发光辐射的波长由材料中的杂质决定，也就是决定于材料的能带结构。

- 试确定 ZnS 中使电子激发的光子波长 ($E_g=3.6 \text{ eV}$) ;
- ZnS 中杂质形成的陷阱能级为导带下的 1.38 eV ，试计算发光波长及发光类型。

$$\lambda = \frac{h\nu}{E_g} = \frac{(6.6 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8)}{3.6 \times (1.6 \times 10^{-19})} \\ = 3.447 \times 10^{-7} \text{ m} = 344.7 \text{ nm}$$

$$\frac{h\nu}{E_g - E_d} = \frac{(6.6 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8)}{(3.6 - 1.38) \times (1.6 \times 10^{-19})} \\ = 5.574 \times 10^{-7} \text{ m} = 557.4 \text{ nm}$$

发光类型为磷光。

假设X射线源用铝材屏蔽。如果要使95%的X射线能量不能穿透它。试决定铝材的最小厚度。
设线性吸收系数为 0.42 cm^{-1} 。

$$\therefore I = I_0 \exp(-\alpha x)$$

$$\therefore x = \frac{\ln I/I_0}{-\alpha} = \frac{(1 - 0.95)/1}{-0.42} = 7.13 \text{ cm}$$

光信号在芯部折射率为1.50的光纤中传播10 km，其绝对延时是多少？

n_1 为芯部折射率， n_2 为包覆层折射率。

$$\Delta t = \frac{Ln_1}{c} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \\ = \frac{10 \times 10^3 \times 1.5}{3 \times 10^8} \left(\frac{1.5 - 1}{1} \right) \\ = 2.5 \times 10^{-5} \text{ s}$$

一阶跃光纤芯部折射率为1.50，包覆层的折射率为1.40，试求光从空气进入芯部形成波导的入射角。

$$\therefore \sin \theta_{\max} = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \theta_{\max} = \arcsin(1.5^2 - 1.4^2)^{\frac{1}{2}} = 32.58^\circ$$

第五章

填空题

- 固体的导热机制主要包括：电子导热、声子导热和光子导热。
- 物体的体积或长度随温度升高而增大的现象叫做热膨胀。
- 热膨胀和结合能、熔点的关系是：质点间结合力愈强，热膨胀系数愈小。
- 热膨胀是固体材料受热以后晶格振动加剧而引起的容积膨胀，而晶格振动的激化就是热运动能量的增加。升高单位温度时能量的增量又称为热容。
- 晶体中存在的各种缺陷和杂质会导致声子的散射，降低声子的平均自由程，使热导率变小。

简答题

什么是德拜温度？有什么物理意义？对它有哪些测试方法？

$$\Theta_D = \frac{h\nu_{max}}{k} \text{ 反应原子间的结合力大小}$$

1. 通过熔点
2. 通过热容
3. 通过金属中弹性波传播速度

掌握材料热容、热膨胀、热传导的物理本质意义

热容：在无相变或化学变化发生时，热容是物体温度升高1 K所需要增加的能量。

热膨胀：物体的体积或长度随温度升高而增大的现象叫做热膨胀。

热传导：当固体材料一端的温度比另一端高时，热量会从热端自动地传向冷端，这个现象称为热传导。

摩尔热容、线膨胀和体膨胀系数、热导率和热扩散率的物理意义

摩尔热容：

线膨胀系数：即温度升高1 K时，物体的相对伸长。

体膨胀系数：相当于温度升高1K时物体体积相对增长值。

热导率：单位温度梯度下，单位时间内通过单位垂直面积的热量。

热扩散率：也称为导温系数。

简述材料导热机理，金属、陶瓷和透明材料导热机制有什么区别？

电子导热，声子导热，光子导热。

什么是导温系数？（区别导热系数）在工程上有什么意义？

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p} \text{ 在不稳定导热过程中，标志温度变化速率。}$$

工程上是选择保温材料或热交换材料的选择依据参数之一。

第六章

简答题

分析抗磁性，顺磁性，反铁磁性，亚铁磁性的磁化率与温度的关系。

抗磁性：磁化率与温度无关。

顺磁性：磁化率是温度的函数，服从居里定律，也有些服从居里-外斯定律。

反铁磁性：低于奈耳温度时，磁化率随温度增大而增大，高于奈耳温度，磁化率随温度增大而减小。

亚铁磁性：低于居里温度时，磁化率很大，高于居里温度时，磁化率随温度增大而减小。

什么是自发磁化？铁磁体形成的条件是什么？有人说“铁磁性金属没有抗磁性”，对吗，为什么？

1. 组成铁磁性材料的原子或离子有未满壳层的电子，因此有固有原子磁矩。在铁磁性材料中，相邻离子或原子的未满壳层的电子之间有强烈的交换耦合作用，在低于居里温度并且没有外加磁场的情况下，这种作用会使相邻原子或离子的磁矩在一定区域内趋于平行或者反平行排列，处于自行磁化的状态，称为自发磁化。
2. 铁磁性材料具有一个磁性转变温度：居里温度 T_c 。一般自发磁化随环境温度的升高而逐渐减少，超过居里温度 T_c 后全部消失，此时材料表现出顺磁性，材料内部的原子磁矩变为混乱排列。只有当 $T < T_c$ 时，组成铁磁性材料的原子磁矩在磁畴内才平行或反平行排列，材料中有自发磁化。
形成条件是：原子内部要有未填满的电子壳层； $R_{ab}/r > 3$ ，使交换积分为正。
材料内部相邻原子的电子之间存在一种来源于静电的相互交换作用，由于这种交换作用对系统能量的影响，迫使各原子的磁矩平行或反平行排列，形成自发磁化。
3. 不对。材料的磁性来源于电子的轨道运动和电子的自旋运动，所有的材料处于磁场中时，外磁场都会对电子轨道运动回路附加有洛伦兹力，使材料产生一种抗磁性，其磁化强度和磁场方向相反。
抗磁性是电子轨道运动感生的，因此所有物质有抗磁性，但并非所有物质都是抗磁体。这是因为原子往往还存在着轨道磁矩和自旋磁矩所组成的顺磁磁矩。原子系统具有总磁矩时，只有那些抗磁性大于顺磁性的物质才成为抗磁体。

哪些磁性能参数是组织敏感的？哪些是不敏感的？举例说明成分、热处理、冷变形、晶粒取向等因素对磁性的影响。

组织敏感性参量，即组织和结构敏感参量强烈的受组织、结构因素以及应力状态的影响，属于这类参量的有矫顽力H，磁导率 μ 。磁化率 χ ，剩余磁感应强度B等，它们均与技术磁化有关。

组织和结构不敏感参量不受组织和结构的影响或影响很小，属于这类参量的有饱和磁化强度M，饱和磁致伸缩系数 λ ，磁晶各向异性参数K，居里温度 T_c 等，它们与合金的成分和铁磁性质以及数量有关。

成分：如合金元素的含量对铁的磁性有很大影响，绝大多数合金元素都将降低饱和磁化强度。

晶粒：如铁单晶沿立方体棱边方向的磁化功最小，即[110]方向为易磁化方向，沿空间对角线方向磁化功最大，即[111]为难磁化方向。

冷变形：由于冷加工变形的晶体中引起滑移而形成的滑移带和内应力带将不利于金属的磁化和去磁过程。磁导率 μ 随冷加工变形而下降，矫顽力H随压缩率的增大而增大。

热处理：纯金属及部分固溶体在磁场中退火，可以提高其纯度，增加其晶粒，从而减少矫顽力和磁滞损耗，提高其磁导率。

磁化强度

磁化强度：物体在外磁场中被磁化的程度，表示为单位体积内磁矩的数量。

矫顽力

使磁化至技术饱和的永磁体的磁感应强度降低为零所需要的反向磁场强度称为磁感矫顽力。

饱和磁化强度

磁体达到最大磁，度时的磁化强度称为饱和磁化强度。

磁导率

表征磁性介质的物理量， $\mu=B/H$ ，称为磁导率。

磁化率

磁化强度与外加磁场强度的比值称为磁化率， $\chi = M/H$ 。

剩余磁感应强度

将一个铁磁体试样慢慢磁化至饱和，慢慢减少外加磁场强度H，当磁场强度减少到零时，对应的磁化强度M并未同步降低为零，此时磁化强度 M_r 称为剩余磁化强度，其 4π 倍称为剩余磁感应强度 $B_r = 4\pi M_r$ 。

磁滞损耗

磁滞曲线所包围的面积表明磁化一周所消耗的功，称为磁滞损耗。

磁各向异性常数

磁晶各向异性能E是磁化方向的函数， $E_k = k_0 + k_1(\alpha^2\beta^2 + \beta^2\gamma^2 + \gamma^2\alpha^2) + k_2\alpha^2\beta^2\gamma^2$ 。其中， k_1, k_2 与方向有关，称为磁晶各向异性常数。（磁晶各向异性常数：单晶体在不同晶轴方向的磁化难易程度不同称为磁晶各向异性磁晶。各向异性的大小用磁晶各向异性常数k来衡量。对于立方晶体，定义为单位体积的铁磁单晶体沿[111]轴与沿[100]轴饱和磁化所需要的能量差）

饱和磁致伸缩系数

铁磁体在磁场中磁化，其形状和尺寸都会发生变化，这种详细称为磁致伸缩。设铁磁体原来的尺寸为 l_0 ，放在磁场中磁化时，该尺寸变为 l ，则磁致伸缩系数 $\lambda = (l - l_0)/l_0$ 。当外磁场 $H = H_s$ 时，磁化强度M达到饱和值，此时 $\lambda = \lambda_s$ ，称为饱和磁致伸缩系数。

从能量角度分析磁畴的大小和结构由哪些条件决定。

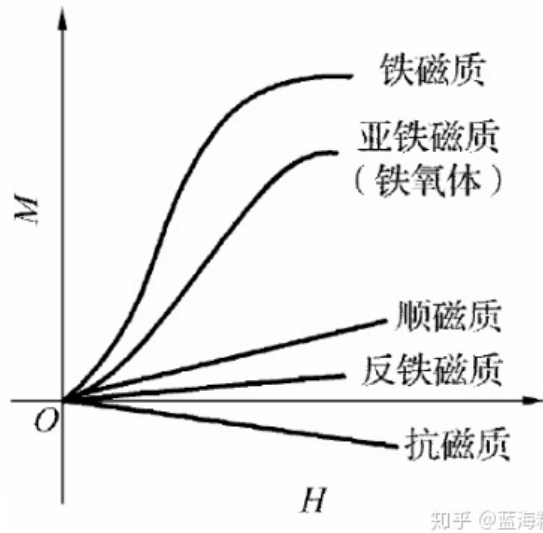
1. 材料的组织结构总是趋向于能量（自由能）降低的方向发展。交换能的降低倾向于产生单畴结构；产生单畴之后，其端面处产生磁极，从而增加退磁场能。交换能与退磁场能两个不同的竞争机制，使单畴分割成小磁畴。
2. 磁畴壁是一个磁矩方向转换过渡区，有一定厚度。原子磁矩之间有一定相互取向，即交换能相对于磁畴内部升高。可以证明，逐渐转向比突然转向的交换能小。所以，畴壁的厚度越大，可降低壁的交换能。原子磁矩的逐渐转向，使原子磁矩偏离易磁化方向，使磁晶各向异性能增加。所以，磁晶各向异性能倾向于使畴壁变薄。交换能于磁晶各向异性能的共同作用确定磁畴壁的厚薄和取向。

试用磁畴模型解释软磁材料的技术磁化过程。

磁体是由很多磁畴组成的。磁化曲线可以分为3个阶段，这对应着3中不同的磁化过程：弱磁场中为起始磁化阶段；中等磁场中为不可逆磁化阶段；较强磁场中为磁化缓慢增加阶段。3个阶段分别对应着不同的磁化机制，为了说明磁化机制，取4个成封闭结构的磁畴。在磁化的起始阶段，磁化矢量与磁场成锐角的磁畴磁位能放低，而与磁场成钝角的磁畴磁位能放高，由于磁畴壁上的自旋磁矩本来就处于高能状态，此时受到磁场的影响很容易发生转动，磁畴壁有一定的厚度，它不受磁场的影响，所以磁畴壁自旋磁矩转动的结果相当于磁畴壁移动，使与磁场成锐角的磁畴扩大，而与磁场成钝角的磁畴缩小，于是磁畴的磁化矢量之和在磁场方向上的投影便大于0，使铁磁体宏观上表现出有微弱的变化。当磁场强度增大并超过一定值时便进入了不可逆转此话阶段，此时磁畴壁随着磁场的增大而快速移动。成为磁畴壁的跃迁，结果使大块的磁畴从磁场夹角较大的难磁化方向转向夹角较小的易磁化方向，因而磁化进行得很强烈。磁化曲线急剧上升。当磁场增加到更强时，所有的自选磁矩通过磁畴壁的跳动，转向了与磁场成最小夹角的易磁化方向，磁场强度再继续增大时，便进入磁化的磁畴转向阶段，这一阶段主要是锐角磁畴进一步转向外磁场方向的过程，由于锐角磁畴的磁矩方向是易磁化方向，而现在要转向的外磁场方向却是非易磁化方向，甚至有可能是最难磁化方向，因此这一转变必须克服磁各项异性能，故磁畴转动很困难，导致磁化强度缓慢上升，并且只有在外加磁场很大时，才能将所有锐角磁畴转向与外磁场一致的方向。如果此时将外磁场减小。磁矩很容易从外磁场方向转回到锐角磁畴的方向，故将磁矩由锐角转向外磁场方向的转动，称为磁畴的可逆转动。

画图

试绘图说明抗磁性、顺磁性、铁磁性物质在外磁场 $B_0 = 0, B_0 > 0$ 的磁行为。比较其磁化率的大小和符号。并表示出 μ, μ_r, χ 之间的关系。



磁介质分类

抗磁性物质：呈抗磁性，或称逆磁性；外磁场 $B_0 = 0$ 时抗磁质分子磁矩为零；外磁场 $B_0 > 0$ ，产生与外磁场相反的弱磁场，M与H方向相反。 $\chi < 0$ 磁化率 χ 很小， $-10^{-5} \sim -10^{-6}$ ，且不随温度变化。

顺磁性物质：呈顺磁性，其特征是组成这些物质的原子具有恒定的与外磁场无关的磁矩；在外磁场 $B_0 = 0$ 时，这些磁矩无规则排列，对外不显示磁性；外磁场 $B_0 > 0$ ，这些磁矩大致沿着磁场排列，显示弱磁性。 $\chi > 0$ 磁化率 χ 很小，M与H方向相同， $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 。

铁磁性物质：呈铁磁性，外磁场 $B_0 = 0$ 时也可以自发磁化，铁磁体的原子磁矩在不加外磁场时，由于一种自身力量的作用而互相平行排列，呈饱和磁化的状态。外磁场 $B_0 > 0$ ，产生很强的通向磁场。 $\chi \gg 0$ ，磁化率 χ 在可达 $10^4 \sim 10^6$ 数量级。

μ_r 相对磁导率， χ 磁化率， μ_0 真空磁导率的关系。

$$\mu_r = \mu / \mu_0, \mu_r = 1 + \chi$$

铁棒中一个铁原子磁矩是 $1.8 \times 10^{-23} A \cdot m^2$ ，铁的密度是 $7.8 \times 10^3 kg/cm^3$ ，相对原子质量55.85，阿伏伽德罗常数 6.023×10^{23} 。①一个达到磁饱和的铁棒（10 cm×1 cm×1 cm），平行于长轴方向磁化，其磁矩是多少？②假设①问中棒中的磁矩方向平行于长轴永久固定，为了保持棒垂直于50000 Gs作用下的磁场所需要的力矩是多少？

铁的质量

$$m_{\text{铁}} = \rho V = 7.8 \times (10 \times 1 \times 1) = 78g$$

铁的原子数

$$N_{\text{铁}} = \frac{m_{\text{铁}}}{M_{\text{铁}}} N_A = \frac{78}{55.85} \times 6.023 \times 10^{23} = 8.412 \times 10^{23}$$

铁的总磁矩

$$m = 1.8 \times 10^{-23} \times 8.412 \times 10^{23} = 15.14 A \cdot m^2$$

所需的力矩

$$\vec{T} = \vec{m} \times \vec{B} = 15.14 \times 50000 \times 10^{-4} = 75.70 N \cdot m$$

铁原子中有2.2个玻儿磁子。试求铁的饱和磁化强度（铁的相对原子量55.9，密度为 $7.87 g/cm^3$ ，阿伏伽德罗常数 6.023×10^{23} ）

总磁矩

$$\sum m_i = 6.023 \times 10^{23} \times 2.2 \times (9.274 \times 10^{-24}) = 12.287 J/T$$

体积

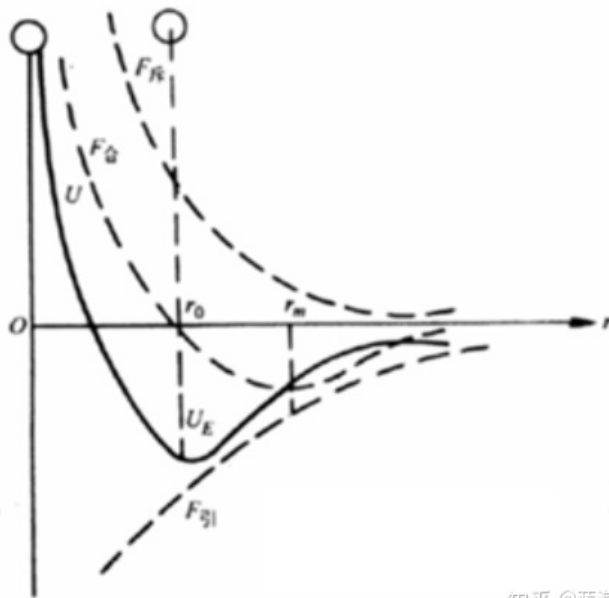
$$V = \frac{55.9}{7.87} = 7.103 cm^3 = 7.103 \times 10^{-6} m^3$$

$$M_s = \frac{\sum m_i}{V} = \frac{12.287}{7.103 \times 10^{-6}} = 1.73 \times 10^6 A/m$$

第七章

简答题

用双原子模型解释材料弹性的本质。



知乎 @蓝海籽

如图，材料在未受外力作用时，原子处于平衡位置，原子间的斥力和引力相平衡，此时原子具有最低的位能。当外力不大时，克服原子间的相互作用力，使原子发生相对位移而改变原子间距，产生弹性应变。外力去除后，原子将恢复到原先的平衡位置，即弹性应变消失，这就是弹性形变的可逆性。弹性的本质是原子间结合力的大小。原子间结合力越大，则弹性越大。

表征材料原子间结合力强弱的常用物理参数有哪些/请说明这些参数之间的关系。

正应力 σ ，正应变 ϵ ，杨氏模量 E ， $\sigma = \epsilon E$

切应力 τ ，切应变 γ ，剪切模量 G ， $\tau = \gamma G$

体积模量 K , $p = K\theta$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad K = \frac{E}{3(1-2\mu)}$$

μ 为泊松比。多数金属的 μ 值约在0.25~0.35之间。

什么是材料的内耗？弛豫型内耗的特征是什么？它同静后滞型内耗有何异同？

1. 材料的内耗：由于固体内部的原因使机械能消耗的现象称为“内耗”。
2. 弛豫型内耗又称为滞弹性内耗，滞弹性的特征是加载或去载时，应变不是瞬时达到其平衡值，而是通过一种弛豫过程来完成其变化。应力去除后应变有一部分发生瞬时回复，剩余一部分则缓慢回到零，由于应变落后于应力，在适当的频率的振动应力作用下就会出现内耗称为弛豫型内耗。特征是：内耗与频率有关，与振幅无关。
3. 在低振动频率下，应力与应变存在多值函数关系，即在加载和去载时同样载荷下具有不同的应变值。完全去掉载荷后有永久变形存在。仅当反向加载时，才能回复零应变。这种原因产生的内耗称为静后滞型内耗。
4. 两者最大的区别在于弛豫型内耗与频率有关，而与振幅无关；相反，静后滞型内耗与频率无关，与振幅有很强的依赖关系。

说明体心立方 α -Fe中间隙原子碳、氮在应力感生下产生内耗的机制，并解释冷加工变形对 α -Fe内耗-温度曲线的影响。

斯诺克研究了碳钢振动衰减和温度的关系，发现在40°C附近出现一个内耗峰，该峰被称为斯诺克峰。如用不含碳(氮)的试样测量，则不出现这个峰。由氮原子引起的内耗峰峰温为20°C，而由碳原子引起的内耗峰峰温为40°C，用内耗法测定该峰对应的激活能，40°C峰为80200 J/mol，20°C峰为76800 J/mol。这个数量恰好等于碳、氮原子在 α -Fe中的扩散激活能。因此这两个峰分别是由碳、氮原子在 α -Fe中产生微扩散所引起的。

体心立方点阵的 α -Fe中，碳(氮)通常是处于晶胞的位置上。当晶体没有受力时，间隙原子均匀分布。如在某一位置上的溶质原子数量大于1/3，我们称这种溶质原子择优分布的现象为有序化。间隙原子在点阵中引起的是不对称畸变，若沿某一方向施加拉力，则沿该方向上的间隙位置能量比其它方向低，因此碳原子便从受压的方向跳到方向的位置上，于是便产生了溶质原子应力感生有序化。显然，溶质原子的有序化是通过微扩散过程来实现的，并由此而产生滞弹性行为，引起内耗。

金属的内耗对冷变形非常敏感，退火状态下的 α -Fe即使受到轻微的形变，由于晶体内部产生了一定数量的位错，可使内耗增加几倍。相反形变后的金属再经退火，使内耗显著降低。

表征材料内耗（阻尼）有哪些物理量？它们之间的关系如何？

振幅对数缩减量（对数缩减率） δ 来度量内耗的大小

$$\delta = \ln(A_n/A_{n+1}), \quad A_n \text{ 表示第} n \text{次振幅}$$

共振峰频率 f

$$Q^{-1} = \frac{\Delta f_{0.5}}{\sqrt{3}f_0} = \frac{\Delta f_{0.7}}{f_0}$$

$\Delta f_{0.5}$ 和 $\Delta f_{0.7}$ 分别为振幅下降至最大值 $\frac{1}{2}$ 和 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 所对应的共振峰宽。

超声波在固体中的衰减系数 α

$$\alpha = [\ln(A_1/A_2)/(x_2-x_1)]$$

阻尼比 S.D.C 或阻尼系数 ψ

$$\psi\% = S.D.C\% = \frac{\Delta W}{W}$$

相互关系

$$\psi = 2\delta = 2\pi Q - 1 = 2\pi \tan \psi = \frac{2\alpha}{\lambda}$$

对于高阻尼合金 ($\psi \geq 40\%$)

$$\psi = S.D.C = 1 - \exp(-2\delta)$$

写出三明治结构双相陶瓷弹性模量计算的 Voigt 模型和 Reuss 模型及其计算公式、意义。

Voigt 模型假定两相应变相同即平行层面拉伸时，复合材料的模量为：

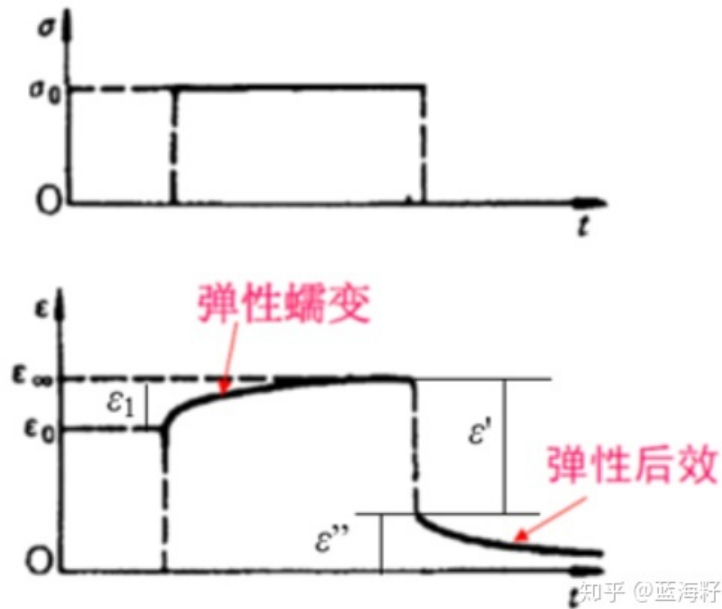
$$E_L = E_1 \phi_1 + E_2 \phi_2$$

Reuss 模型假定各相的应力相同，即垂于层面拉伸时，给出复合材料模量的表达式：

$$E_T = \frac{E_1 E_2}{E_1 \phi_2 + E_2 \phi_1}$$

ϕ 为各相的体积分数； E_L 和 E_T 分别表示复合材料弹性模量的上限和下限值，可以通过在一定范围内调整两相比例来获取所需的弹性模量值。

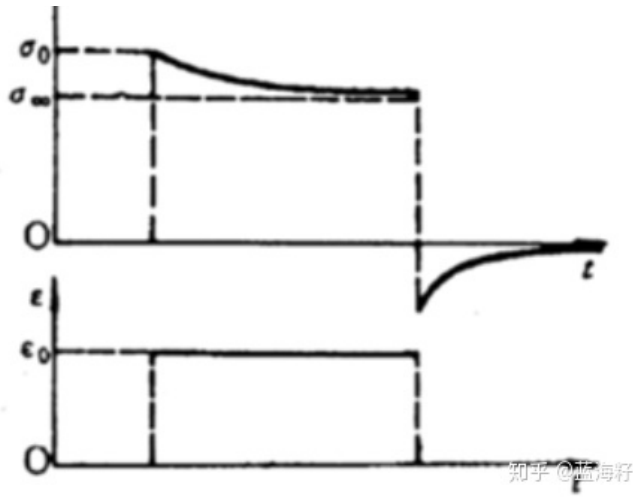
结合示意图说明什么是应变弛豫（弹性后效）。



应变弛豫

如上图，固体材料在恒定荷载下，变形随时间延续而缓慢增加的不平衡过程，或材料受力后内部原子由不平衡到平衡的过程。当外力除去后，徐变变形不能立即消失。

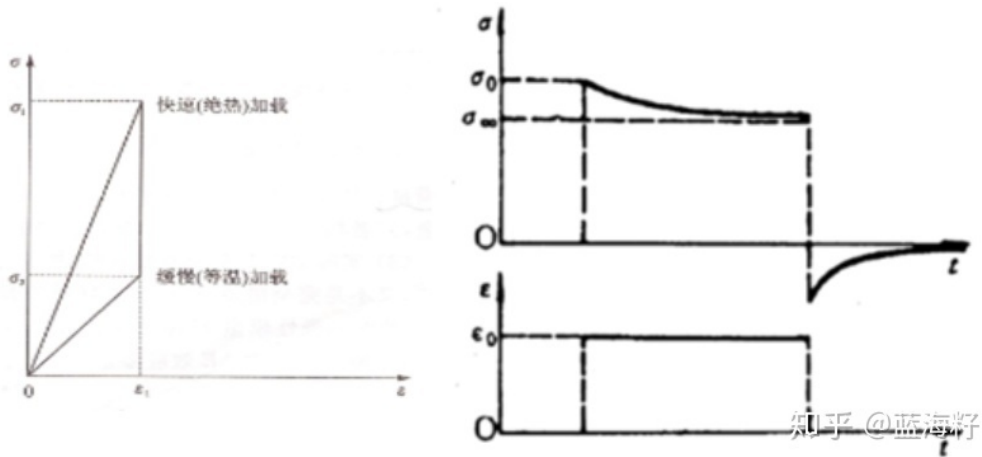
结合示意图说明什么是应力弛豫。



应力弛豫

如上图，实际弹性材料在应变保持不变的情况下，应力随着时间的延长而减小的现象，称为应力弛豫或应力松弛。

结合示意图说明什么是模量亏损。



模量亏损

实际弹性材料总是存在不同程度的滞弹性，形变依时间而变，在 $\sigma = \sigma_0$ 恒定应力下，其弹性模量 $E(t) = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0 + \epsilon_1(t)}$ ，从而导致弹性模量随应力作用时间延长而降低。根据加、卸载方式不同，分为以下三种情况：（1）单向快速加、卸载时，应变弛豫来不及产生，此时弹性模量为 $E = M_u = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$ ， M_u 为恒温弹性模量。（2）单向缓慢加、卸载，应变来得及充分进行，此时 $E = M_R = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0 + \epsilon_1(t)}$ ，称 M_R 为完全弛豫弹性模量，显然 $M_u > M_R$ 。（3）实际测定材料弹性模量时，加载速度常介于（1）和（2）之间，因此实际弹性模量 E 介于 M_u 和 M_R 之间， E 称为动力弹性模量。

为了表征材料因滞弹性而引起的弹性模量的下降，引入模量亏损或 ΔE 效应参数，定义为

$$\frac{M_u - E}{E} = \frac{\Delta E}{E}$$

从材料微观组织的角度简述内耗产生的机制。

材料内部微观组织结构（缺陷）和物理性能（热弹性和磁性）的变化受到阻碍。要消耗能量，因此产生内耗。

缺陷引起的内耗分为三种：

1. 点阵中原子有序排列引起的内耗：溶解在固溶体中的孤立的间隙原子、替代原子，在外加应力作用下，这些原子所处位置的能出现差异，因而原子重新分布，产生有序排列，即应力感生

有序。

2. 位错运动产生的内耗：冷变形可以产生内耗，退火可以显著降低内耗，所以位错是内耗源。包括A背底内耗；B钉扎位错：沉淀粒子强钉扎，点缺陷（如杂质原子、空位等）弱钉扎；C.溶质原子与位错交互作用：如controll气团，位错运动受阻导致弛豫应变产生内耗。
3. 与晶界有关的内耗：晶界具有粘滞行为，在升高温度时，晶界的可动性增大，达到某一温度后，在交变应力的作用下便产生明显的晶界滑动，引起能量损耗，导致动态切变模量显著降低。

编辑于 2021-10-15 09:03

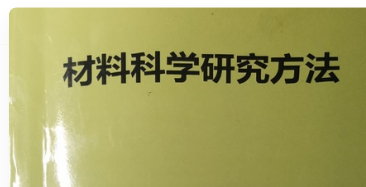
材料物理 材料科学与工程 期末考试

推荐阅读



纤维材料学复习提纲

蓝海籽



材料科学研究方法-显微分析技术作业和复习提纲

蓝海籽

新学期《材料制备科学与技术》预习复习资料：学习重点

据说学霸在开学前期学习能力是非常强的，对于新的知识充满着渴望，学习的效率也随之上升！但是材料制备科学与技术，理论知识枯燥乏味，不但多而且缺乏统一的提纲规划整理，就是学霸学起来...

铭美专业课资料馆



材料科学

蓝海籽

8 条评论

⇌ 切换为时间排序

写下你的评论...



春风虽欲重回首

2021-12-13

老哥nju的嘛

👍 赞

对岸有ta

2021-06-12

同问，有PDF格式的吗🤔

👍 赞

天秤座座花 回复 对岸有ta

2021-06-25

🤔那啥 你有pdf了吗

👍 赞

蓝海籽 (作者) 回复 天秤座座花

2021-06-25

我已经毕业了🤔

👍 赞

蓝海籽 (作者) 回复 天秤座座花

2021-06-25