

内爆过程的流体力学不稳定性

(受控热核聚变导论·第十二章)

郑 坚

中国科学技术大学核科学技术学院

2023–2024第二学期

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结

- 1 概述
- 2 印迹阶段的不稳定性简介
- 3 Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性
- 4 不稳定性的实验研究与抑制
- 5 小结

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

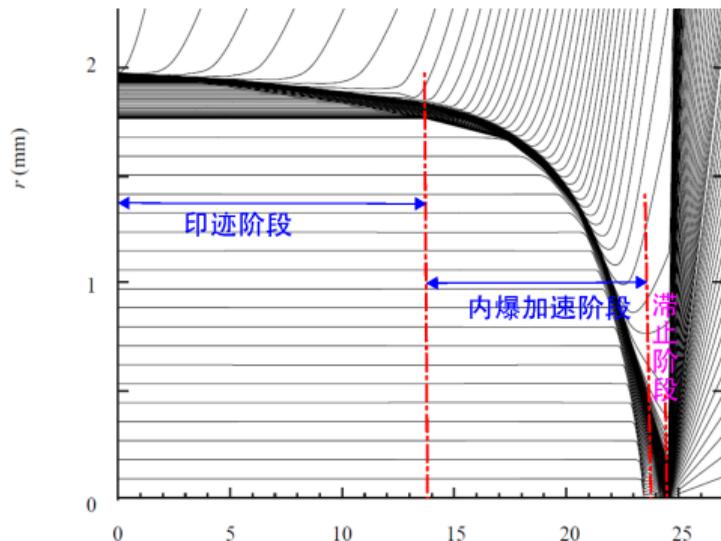
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



内爆过程的流线轨迹。摘自 S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn, *The Physics of Inertial Fusion*。

以中心点火方案为例，靶丸内爆过程可分为三个阶段：

- 印迹阶段：烧蚀驱动的激波尚未到达燃料壳的内界面，燃料壳尚未发生整体加速；
- 内爆加速阶段：燃料壳层整体向心加速，烧蚀面附近流体的密度梯度与等效重力加速度反平行；
- 滞止阶段：燃料壳层整体减速，将动能转换为热斑的内能，燃料壳与热斑界面的密度梯度与等效重力加速度反平行。

摘要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

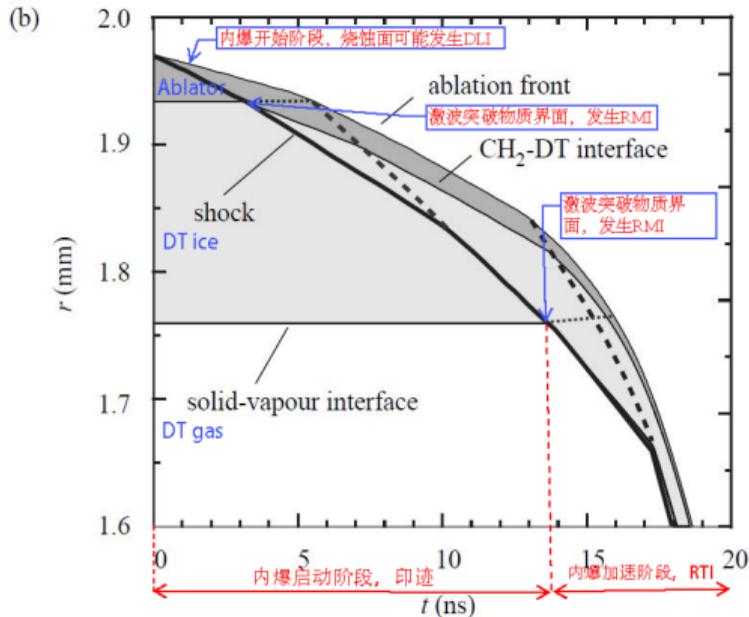
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



内爆靶丸的界面和轨迹。在界面附近常常会出现不稳定性。摘自 S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn, *The Physics of Inertial Fusion*。

内爆过程的主要不稳定性

- 印迹阶段：在烧蚀面附近会出现 **Darrieus-Landau 不稳定性 (DLI)**；激波通过烧蚀层/冷冻氘氦燃料以冷冻氘氦燃料/气体氘氦燃料的分界面，会出现 **Richtmyer-Meshkov 不稳定性 (RMI)**；激波面在物质中传播本身可能发生 **D'yakov-Kontorovich 不稳定性 (DKI)**。
- 内爆加速阶段：在烧蚀面发生 **Rayleigh-Taylor 不稳定性 (RTI)**；当 RTI 进入高度非线性阶段，会出现 **Kelvin-Helmholtz 不稳定性 (KHI)**；
- 滞止阶段：在燃料/热斑界面发生 **Rayleigh-Taylor 不稳定性**；当 RTI 高度发展，出现 KHI。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

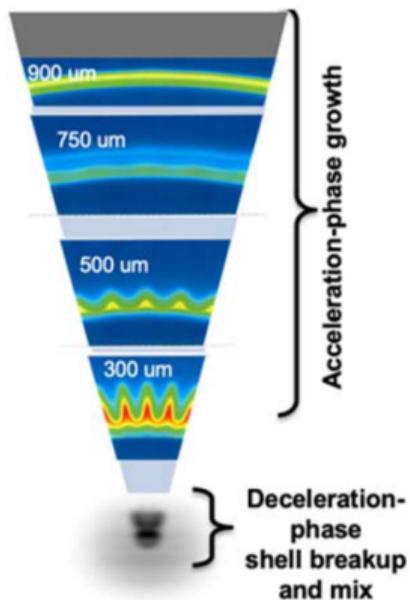
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

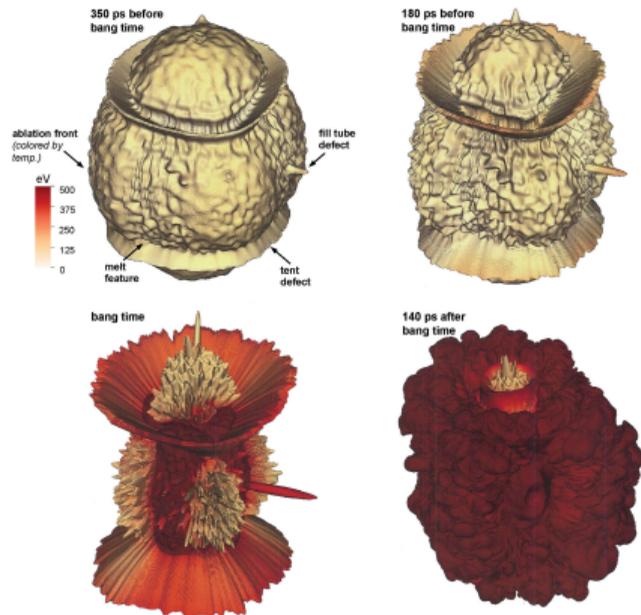
不稳定性的实验研究与抑制

小结

内爆阶段不稳定性发展示意图^a。

RTI 是实现惯性约束聚变点火的主要障碍：

- 降低内爆动能转化为热斑内能的效率；
- 燃料发生混合，降低热斑温度；
- 主燃料壳层破裂，降低能量约束时间。

燃料聚心前后的参数轮廓^b。

^a V. A. Smalyuk et al., Plasma Phys. Control. Fusion **62**, 104007 (2020).

^b D. S. Clark et al., Phys. Plasmas **23**, 056302 (2016).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

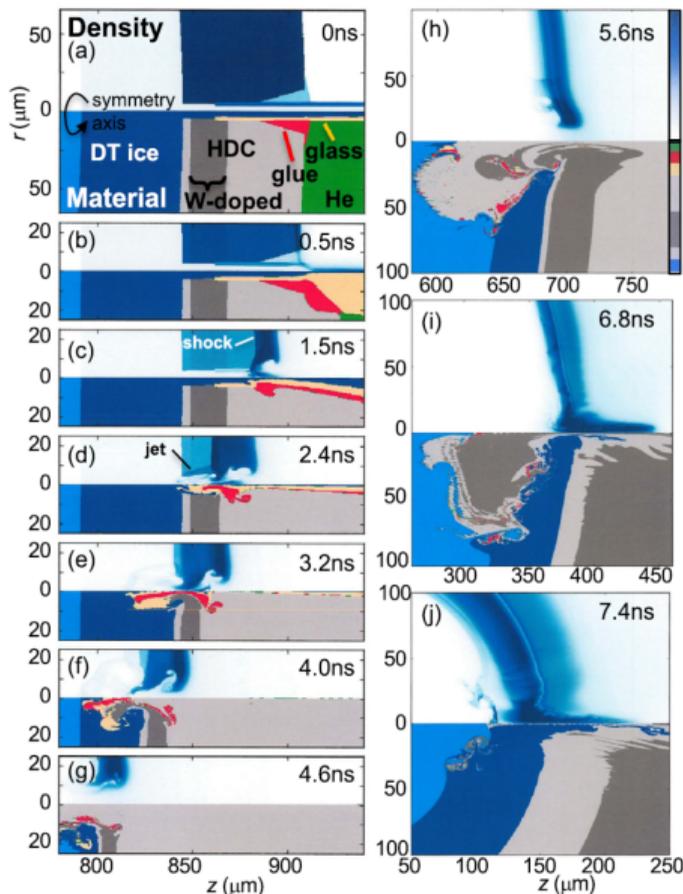
不稳定性的实验研究与抑制

小结



ICF 的靶丸有很多工程结构，这些结构使靶丸偏离球对称，给内爆产生不良影响，如冷冻靶丸的充气管。数值模拟显示，充气管结构在内爆过程中呈现复杂的流体行为，严重影响内爆品质^a。

^a C. W. Weber et al., Phys. Plasmas **27**, 032703 (2020)



提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

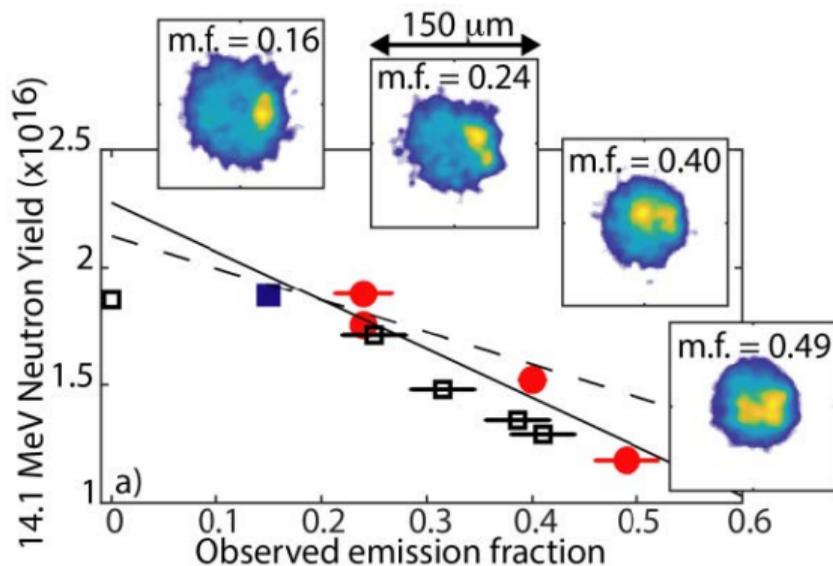
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



在 NIF 装置上的实验显示，充气管会导致热斑燃料发生混合，产生强烈的硬X射线辐射，降低中子产额^a。

^a A. Pak et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 145001 (2020).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

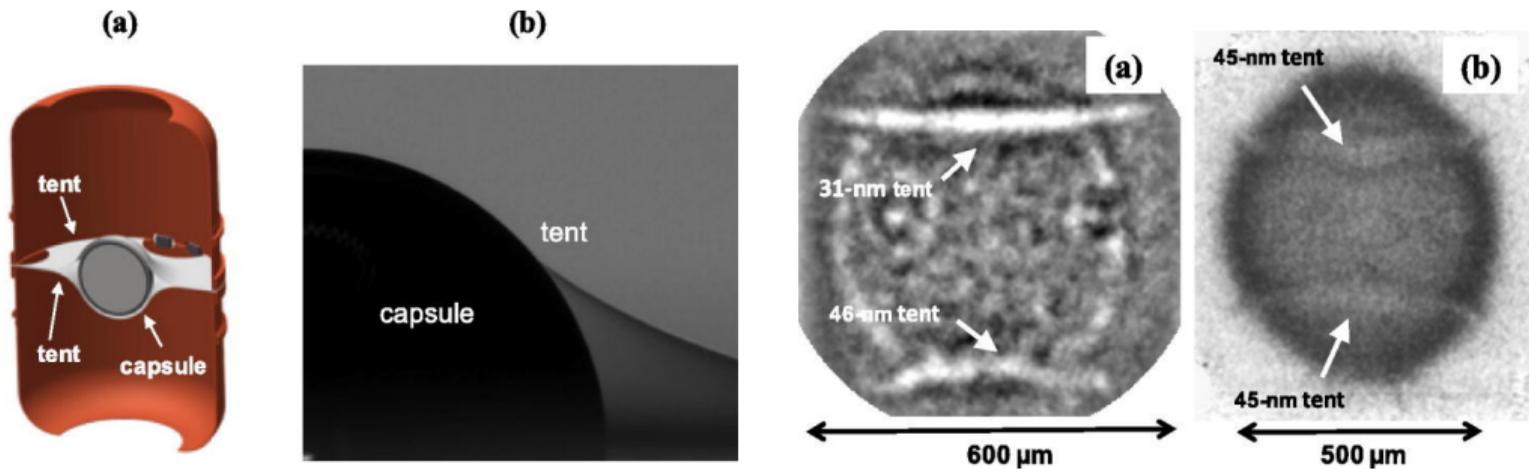
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



支撑冷冻靶丸的夹持膜对内爆品质同样也会产生不利影响^a。

^a V. A. Smalyuk et al., Phys. Plasmas **25**, 072705 (2018).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

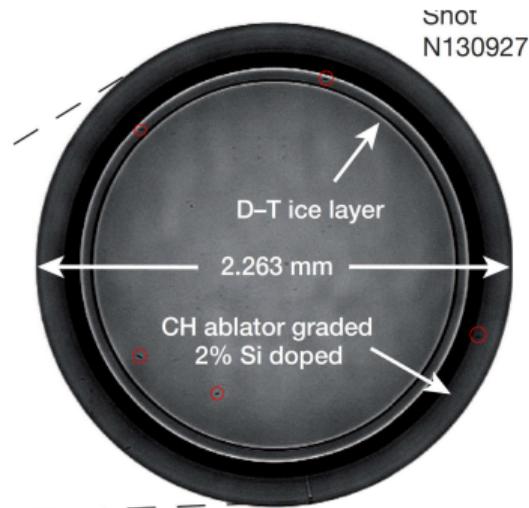
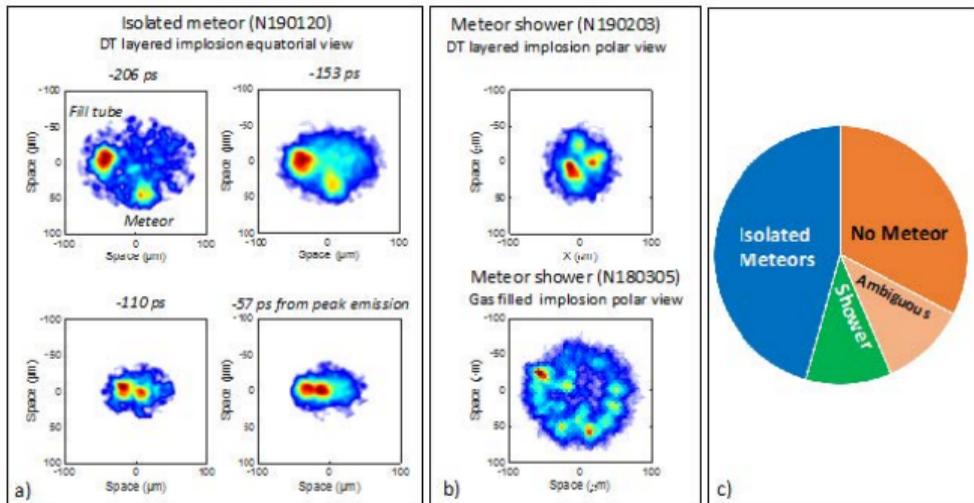
Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



制靶过程难免产生缺陷，这些缺陷将严重降低靶丸内爆品质。NIF 装置上的内爆实验中，热斑的硬X射线图像中有散布的亮点，被认为是靶丸缺陷导致^a。

^a Laser Indirect Drive input to NNSA 2020 Report, LLNL-TR-810573, May 20, 2020

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

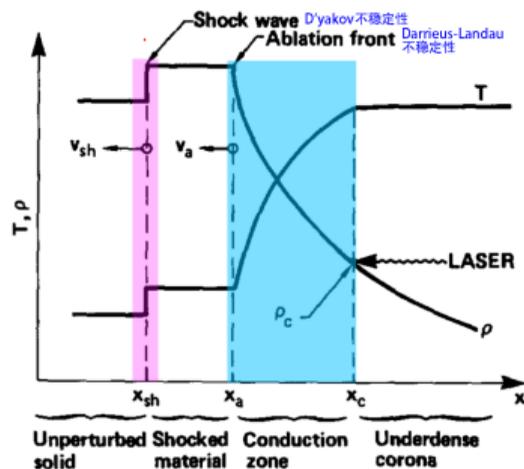
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



一维亚声速烧蚀流场分布示意图。摘自 R. Fabbro et al., Phys. Fluids **28**, 1463 (1985)。

烧蚀驱动的不稳定性

激光聚变通过亚声速的激光/辐射烧蚀产生内爆所需要的烧蚀压。然而，烧蚀面以及烧蚀驱动起来的激波面都有可能出现不稳定性：烧蚀面发生 Darrieus-Landau 不稳定性，激波面发生 D'yakov-Kontorovich 不稳定性。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

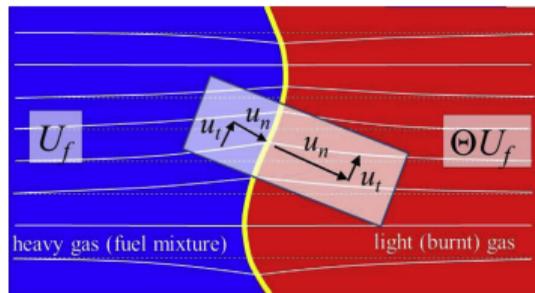
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结

缓慢燃烧波两侧的流线分布示意图^a。

Darrieus-Landau不稳定性

Darrieus-Landau 不稳定性是缓慢燃烧过程中出现的不稳定性。将燃烧波简化为间断面，沿着间断面的法向，质量流连续 $\rho_1 u_{1n} = \rho_2 u_{2n}$ ；沿着间断面切向，流速切向分量连续 $u_{1t} = u_{2t}$ ；燃烧缓慢，意味着界面两侧压强连续，且流体近似不可压缩。若界面向高密度区扭曲，流线变得稀疏，法向流速更缓慢，导致界面进一步向高密度区扭曲；若界面向低密度区扭曲，流线变得密集，法向流速更快，界面进一步向低密度区扭曲。这个正反馈机制导致不稳定性发生^b。

^a V. Bychkov et al., Progress in Energy and Combustion Science **47**, 32 (2015);

^b G. Darrieus, La Technique Moderne **30**, 18 (1938); L. D. Landau, Acta Phys.-chim. URSS **19**, 77 (1944).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

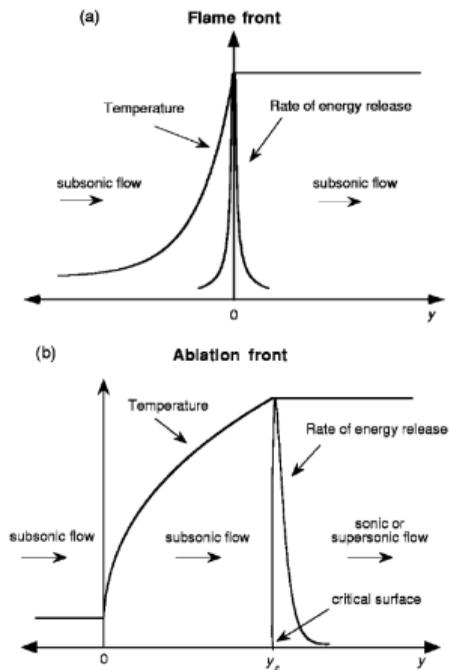
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



(a) 燃烧波与 (b) 烧蚀波的流场结构示意图^a。

^a A. R. Piriz and R. F. Portugues, Phys. Plasmas **10**, 2449 (2003).

烧蚀波与燃烧波

惯性约束聚变中，驱动靶丸内爆的亚声速烧蚀波与缓慢燃烧波的流场结构高度相似，因而烧蚀面同样可以发生 DLI。

压声速烧蚀波与缓慢燃烧波的细致结构有区别：

- 亚声速烧蚀波的出流与声速相当，不可压缩假定失效；
- 烧蚀过程温度变化剧烈，物质的热传导系数显著依赖于温度，烧蚀波前与燃烧波前的温度轮廓有显著不同；

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结

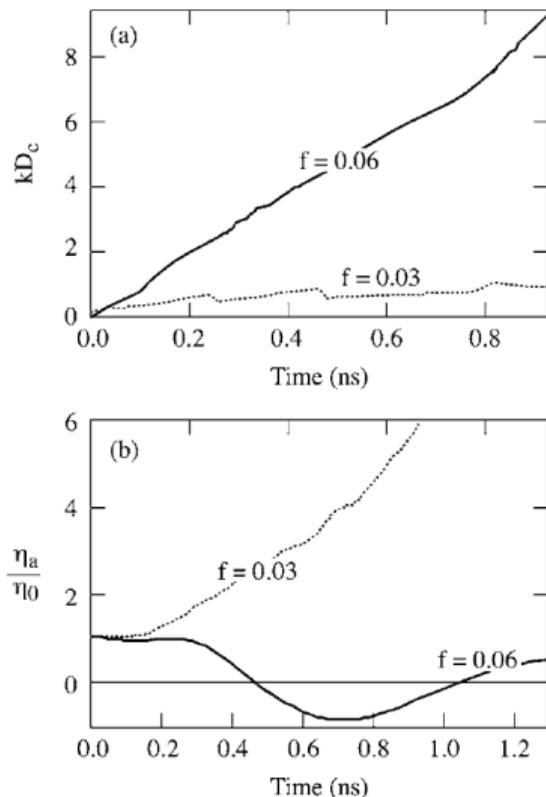


FIG. 19. Conduction-zone size (a) and ablation-front amplitude (b) calculated for a D₂ foil driven at $I=4 \times 10^{14}$ W/cm² using different flux-limiter values.

V. N. Gocharov 等人在数值模拟内爆早期阶段时发现，若热传导区比较窄，界面扰动会随时间增长。这是直接驱动中 DLI 可能发展的一个数值验证^a。

V. N. Goncharov et al., Phys. Plasmas **13**, 012702 (2006)。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

简介

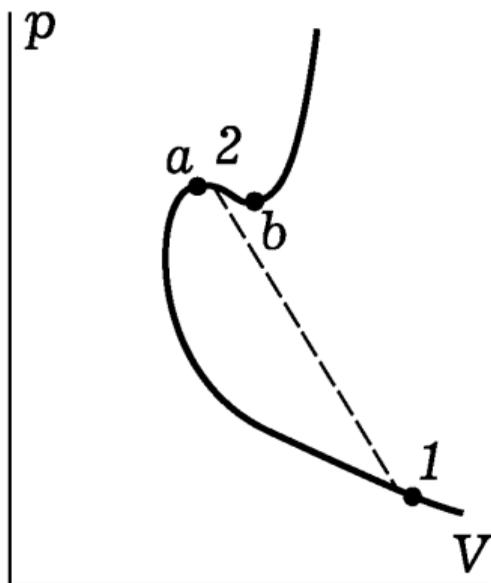
经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

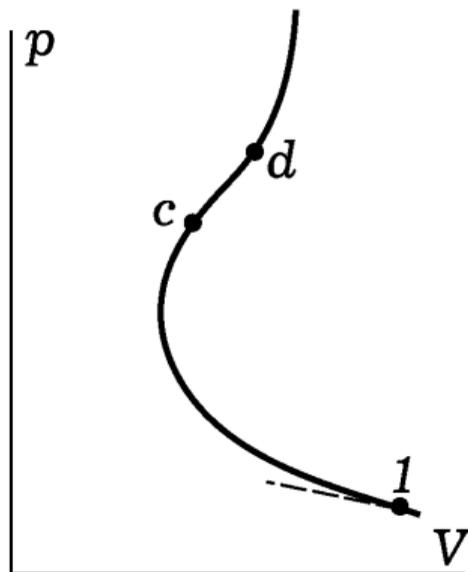
不稳定性的实验研究与抑制

小结

研究发现，激波面出现 DKI 与 Hugoniot 曲线特征密切相关。



不稳定性可出现在 a 或者 b 附近曲线斜率为正的地方。



不稳定性可出现在雨贡纽曲线的 cd 段。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor

不稳定性与

Kelvin-Helmholtz

不稳定性

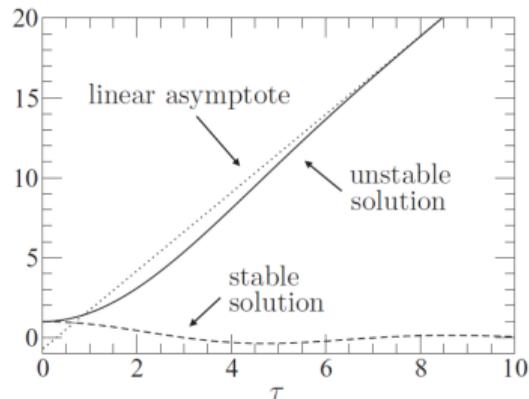
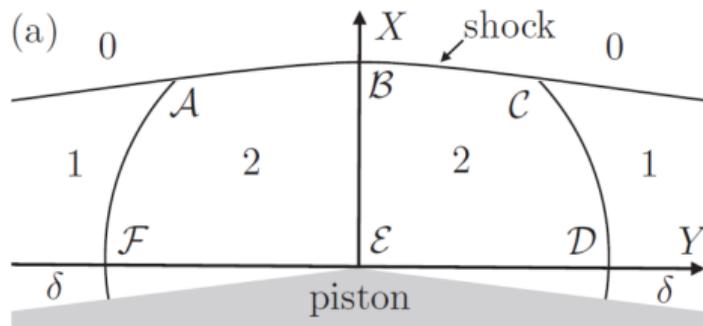
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



J. W. Bates 研究了楔形活塞推动激波面的演化。在线性情况下，因 D'yakov-Kontorovich 不稳定性导致的波面扰动渐近地按照时间线性增长 a 。

J. W. Bates, Phys. Rev. E **91**, 013014 (2015).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

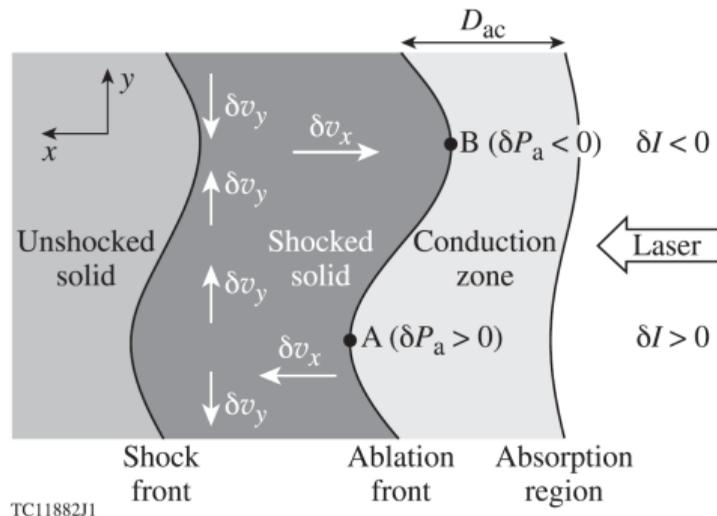
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



激光印迹过程各界面的扰动示意图。摘自 R. S. Craxton, Phys. Plasmas **22**, 110501 (2015).

激光印迹 (laser imprint)

若烧蚀面和激波都是稳定的，但激光光斑不均匀，烧蚀面的压强会发生扰动，相应地激波面也将出现扰动，这就是所谓的激光印迹，这一过程持续至激波在燃料壳内界面卸载。激光印迹过程产生的扰动成为 RMI 以及 RTI 发展的种子。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

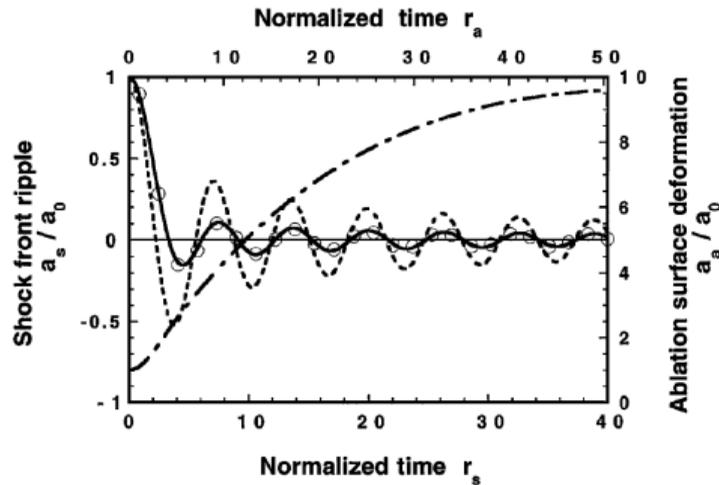
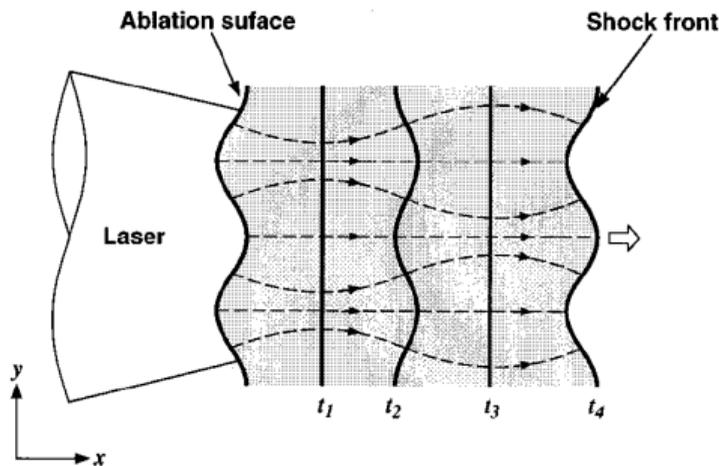
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



印迹阶段不同时刻的激波面示意图^a。当烧蚀面和激波都是稳定的，烧蚀面扰动导致激波面扰动，扰动振幅将在激波传播过程中振荡衰减^b。

^a R. Ishizaki and K. Nishihara, Phys. Rev. E **58**, 3744 (1998).

^b R. Ishizaki and K. Nishihara, Phys. Rev. Lett. **78**, 1920 (1997).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer–Meshkov 不稳定性

Rayleigh–Taylor 不稳定性与

Kelvin–Helmholtz 不稳定性

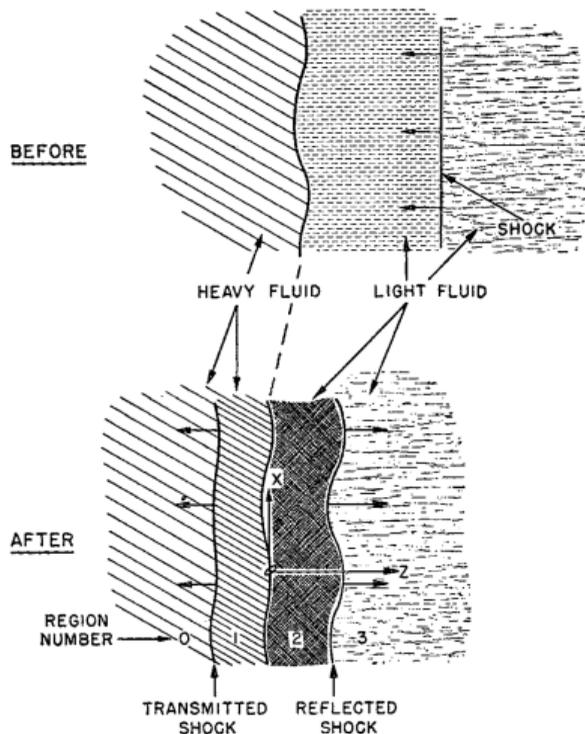
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



入射激波从低密度区向高密度区运动，与接触间断面相互作用后会产生透射激波和反射激波。若初始时刻接触间断面有扰动，透射激波面和反射激波面将发生扰动，接触间断面的扰动振幅将随时间而增大。这一不稳定性首先由 R. Richtmyer 从线性化流体方程出发予以定量计算^a，后为 E. E. Meshkov 的实验观测所证实^b。

^aR. Richtmyer, Commun. Pure Appl. Math. **13**, 297 (1960).

^bE. E. Meshkov, Sov. Fluid Dyn. **4**, 101 (1969).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结

RMI 演化的模拟结果。来自

<http://silver.neep.wisc.edu/shock/rmintro.html>。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

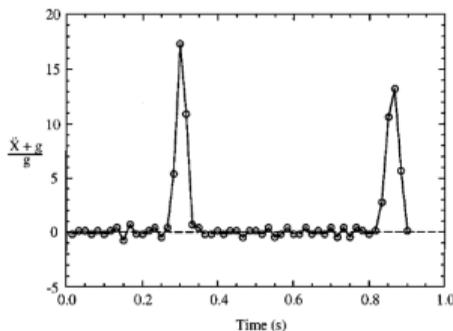
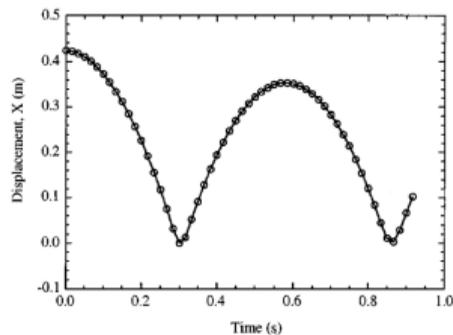
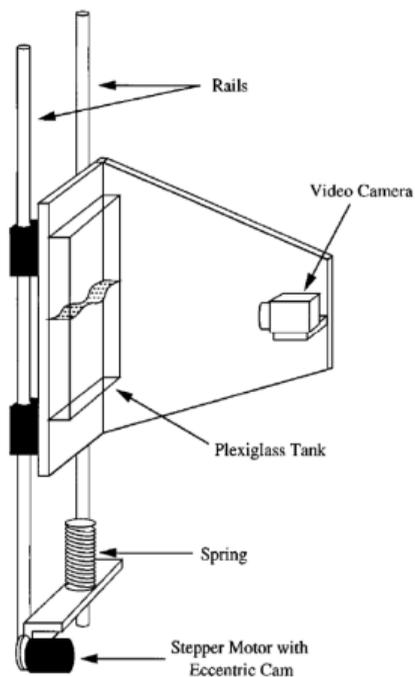
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



J. W. Jacobs and J. M. Sheely 采用盐溶液和水，研究不可压缩流体中的 RMI¹。

¹J. W. Jacobs and J. M. Sheely, Phys. Fluids **8**, 405 (1996)

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性

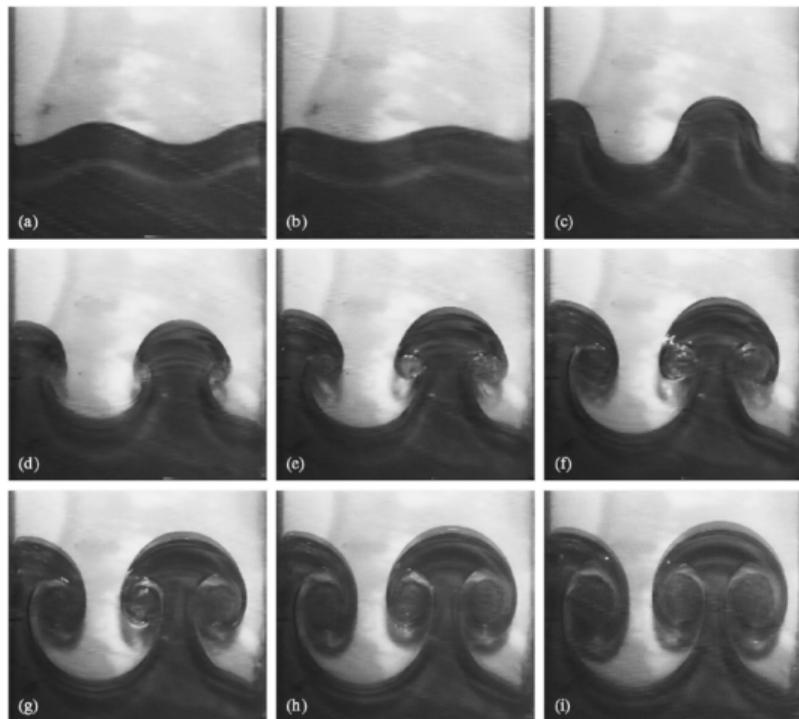
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



观测结果生动地展示了 RMI 的发展²。

²J. W. Jacobs and J. M. Sheely, Phys. Fluids **8**, 405 (1996).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

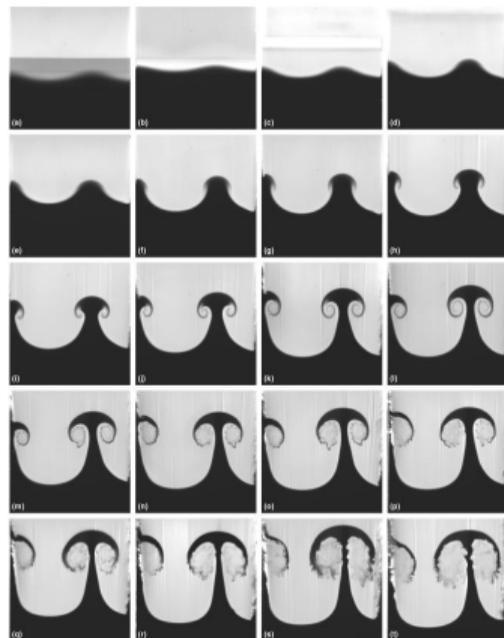
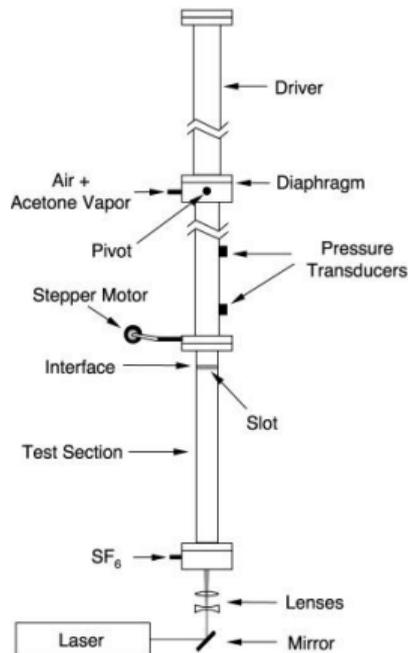
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



采用激光诱导荧光作为关键诊断手段，J. W. Jacobs 和 V. V. Krivets 以空气和 SF_6 为工作介质，观测了可压缩流体中 RMI 的演化，为理论模拟提供了定量对比^a。

^a J. W. Jacobs and V. V. Krivets, Phys. Fluids 17, 034105 (2005).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrius-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

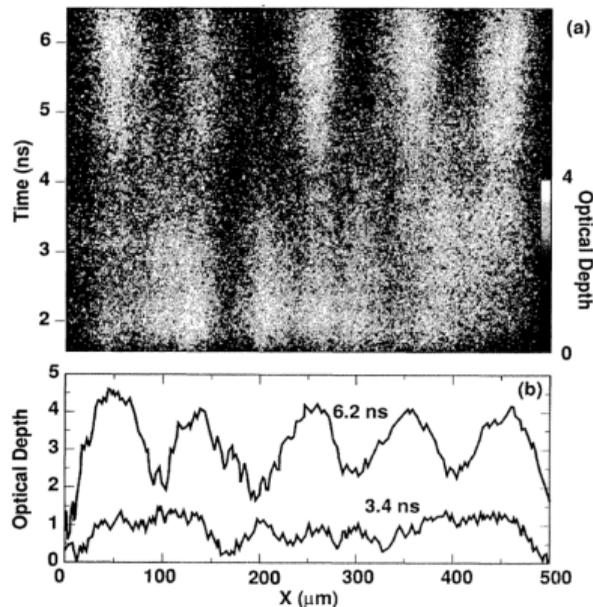
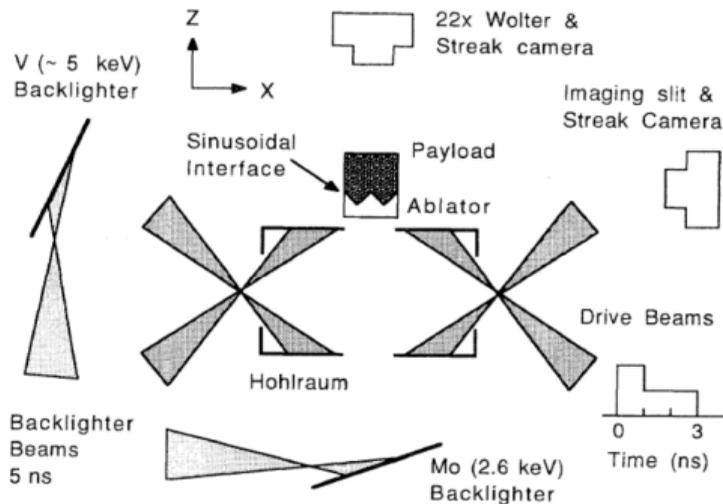
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



G. Dimonte 和 B. Reminton 在二十世纪九十年代初就在激光聚变装置 NOVA 上开展了 RMI 实验研究。高能量密度流体力学不稳定性实验研究的最大挑战是数据的信噪一般比较低^a。

^a G. Dimonte and B. Reminton, Phys. Rev. Lett. **70**, 1806 (1993).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

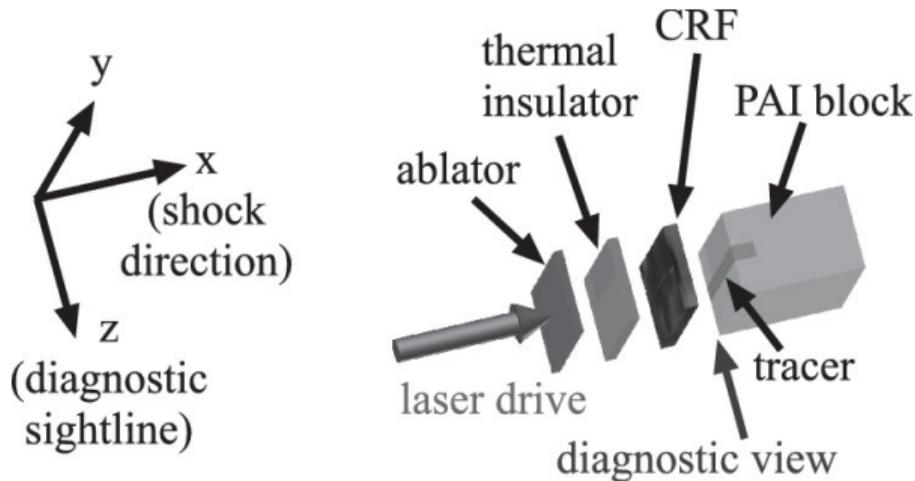
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

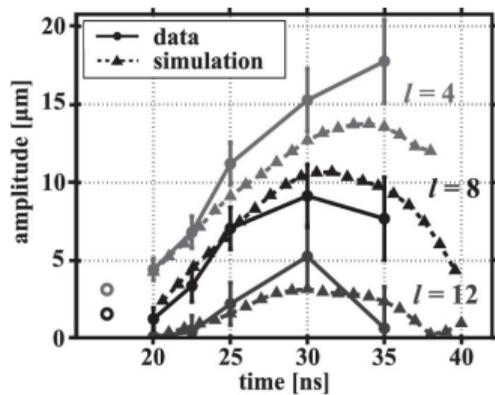
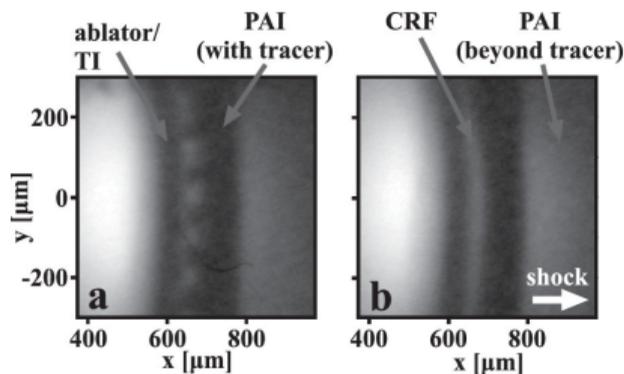
不稳定性的实验研究与抑制

小结



在 OMEGA-EP 装置上开展的实验观测表明，尽管实验的不确定度较大，但实验与模拟之间有显著的差距依然可见^a

^a C. A. Di Stefano et al., Appl. Phys. Lett. **106**, 114103 (2015)。



提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

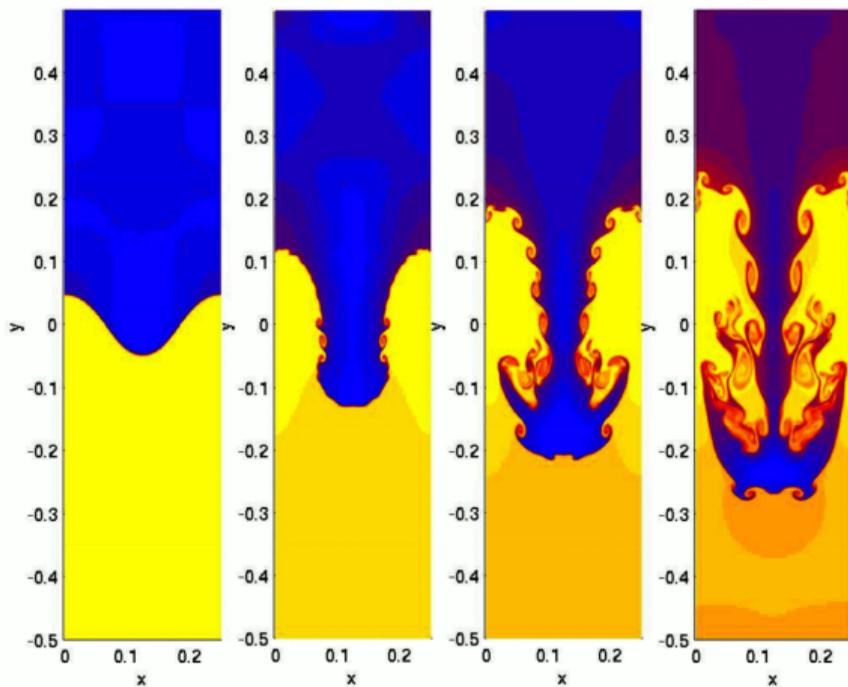
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



密度不同且处于重力场中的两种流体，当高密度流体位于低密度流体的上方，若界面发生扰动，由于浮力不平衡，高密度流体向下流动，低密度流体向上流动，扰动幅度进一步增长，发生 Rayleigh-Taylor 不稳定性。不稳定性发展到非线性阶段，界面两侧流体切向速度不同，出现 Kelvin-Helmholtz 不稳定性。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结

界面两侧存在流速剪切时，会发生 Kelvin-Helmholtz 不稳定性。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结

我们首先讨论经典 RTI 和 KHI，即不考虑烧蚀所带来的影响。假定流体运动是无旋的，即

$$\nabla \times \mathbf{u} = 0.$$

于是可以采用势函数来刻画流速，

$$\mathbf{u} = \nabla \phi. \quad (1)$$

再进一步假定流体不可压缩，由连续性方程有 $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ ，那么势函数 ϕ 满足拉普拉斯方程，

$$\nabla^2 \phi = 0. \quad (2)$$

重力场中，流体的动量方程为

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p - \rho g \mathbf{e}_z,$$

利用势函数 ϕ ，动量方程可改写为

$$\rho \nabla \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{u^2}{2} + gz \right) + \nabla p = 0.$$

对方程积分，有

$$\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{u^2}{2} + gz \right) + p = \rho C(t). \quad (3)$$

这里 $C(t)$ 是一个依赖于边界条件的函数。

假定平衡界面位于 $z = 0$ 的平面，且

$$\mathbf{U}(z) = \begin{cases} U_2 \mathbf{e}_x \\ U_1 \mathbf{e}_x \end{cases}, \quad \rho(z) = \begin{cases} \rho_2, & \text{when } z > 0, \\ \rho_1, & \text{when } z < 0. \end{cases}$$

出现扰动后，界面方程为

$$z = \zeta(x, y, t). \quad (4)$$

在界面两侧，势函数 ϕ 分别为

$$\phi = \begin{cases} \phi_2, & \text{when } z > \zeta, \\ \phi_1, & \text{when } z < \zeta. \end{cases}$$

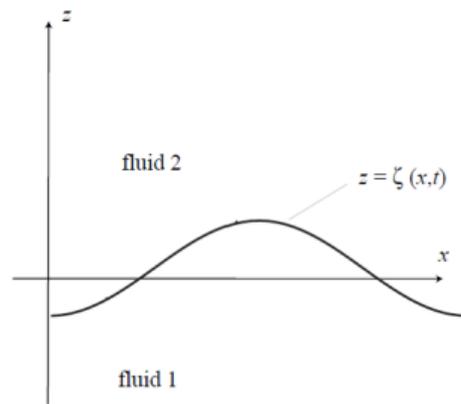
$\phi_{1,2}$ 满足拉普拉斯方程(2),

$$\nabla^2 \phi_2 = 0, \quad \text{when } z > \zeta,$$

$$\nabla^2 \phi_1 = 0, \quad \text{when } z < \zeta.$$

扰动局限在界面附近，那么有关于势函数的边界条件，

$$\nabla \phi_1(z \rightarrow -\infty) = U_1 \mathbf{e}_x, \quad \nabla \phi_2(z \rightarrow +\infty) = U_2 \mathbf{e}_x. \quad (5)$$



界面两侧，流体沿界面法向的速度等于界面速度，即

$$\frac{\partial \phi_{1,2}}{\partial z} = \frac{d\zeta}{dt}, \text{ at } z = \zeta.$$

于是我们得到势函数在界面的边界条件，

$$\frac{\partial \phi_{1,2}}{\partial z} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \phi_{1,2}}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \phi_{1,2}}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \text{ at } z = \zeta. \quad (6)$$

在界面两侧，压力沿界面的法向是连续的。我们就得到关于势函数与界面运动的另一个方程，

$$\rho_1 \left[C_1 - \frac{1}{2} (\nabla \phi_1)^2 - \frac{\partial \phi_1}{\partial t} - gz \right] = \rho_2 \left[C_2 - \frac{1}{2} (\nabla \phi_2)^2 - \frac{\partial \phi_2}{\partial t} - gz \right] \text{ at } z = \zeta. \quad (7)$$

这个方程在平衡时当然也成立，即

$$\rho_1 \left(C_1 - \frac{1}{2} U_1^2 \right) = \rho_2 \left(C_2 - \frac{1}{2} U_2^2 \right).$$

将流速势表示为

$$\phi_2 = U_2 x + \phi_2' \text{ when } z > \zeta,$$

$$\phi_1 = U_1 x + \phi_1' \text{ when } z < \zeta.$$

为了求解扰动的线性稳定性，我们要求

$$\left| \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right|, \left| \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right| \ll 1, \text{ and } |a\zeta| \ll \max(U_1^2, U_2^2).$$

在界面处的势函数可以在 $z = 0$ 附近作 Taylor 展开，

$$\phi'_{1,2}(z = \zeta) = \phi'_{1,2}(z = 0) + \zeta \left(\frac{\partial \phi'_{1,2}}{\partial z} \right)_{z=0} + \dots$$

于是线性化流体方程和边界条件为

$$\nabla^2 \phi'_2 = 0, \text{ when } z > 0, \quad (8a)$$

$$\nabla^2 \phi'_1 = 0, \text{ when } z < 0, \quad (8b)$$

$$\nabla \phi'_2 \rightarrow 0 \text{ when } z \rightarrow +\infty, \text{ and } \nabla \phi'_1 \rightarrow 0 \text{ when } z \rightarrow -\infty, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi'_{1,2}}{\partial z} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + U_{1,2} \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \text{ at } z = 0, \quad (10)$$

$$\rho_1 \left(U_1 \frac{\partial \phi'_1}{\partial x} + \frac{\partial \phi'_1}{\partial t} + g\zeta \right) = \rho_2 \left(U_2 \frac{\partial \phi'_2}{\partial x} + \frac{\partial \phi'_2}{\partial t} + g\zeta \right) \text{ at } z = 0. \quad (11)$$

将扰动量表示为如下形式,

$$(\zeta, \phi'_1, \phi'_2) = (\hat{\zeta}, \hat{\phi}_1(z), \hat{\phi}_2(z))e^{ik_x x + ik_y y - i\omega t}. \quad (12)$$

代入方程(8), 有

$$\nabla^2 \phi'_1 = e^{ik_x x + ik_y y - i\omega t} \left(-k^2 + \frac{d^2}{dz^2} \right) \hat{\phi}_1(z) = 0,$$

$$\nabla^2 \phi'_2 = e^{ik_x x + ik_y y - i\omega t} \left(-k^2 + \frac{d^2}{dz^2} \right) \hat{\phi}_2(z) = 0,$$

由此有

$$\hat{\phi}_1(z) = A_1 e^{kz} + B_1 e^{-kz},$$

$$\hat{\phi}_2(z) = A_2 e^{kz} + B_2 e^{-kz},$$

再利用边界条件(9)，有

$$\hat{\phi}_1(z) = A_1 e^{kz}, \quad (13a)$$

$$\hat{\phi}_2(z) = B_2 e^{-kz}, \quad (13b)$$

将(13)代入方程(10)，有

$$kA_1 = -i\omega\hat{\zeta} + ik_x U_1 \hat{\zeta}, \quad (14a)$$

$$-kB_2 = -i\omega\hat{\zeta} + ik_x U_2 \hat{\zeta}. \quad (14b)$$

将(13)代入方程(11)，有

$$\rho_1 \left(ik_x U_1 A_1 - i\omega A_1 + g\hat{\zeta} \right) = \rho_2 \left(ik_x U_2 B_2 - i\omega B_2 + g\hat{\zeta} \right). \quad (15)$$

由方程(14)，我们有

$$A_1 = -i \frac{(\omega - k_x U_1)}{k} \hat{\zeta},$$

$$B_1 = i \frac{(\omega - k_x U_2)}{k} \hat{\zeta},$$

将之代入方程(15)，有

$$\rho_1 \left[-\frac{(\omega - k_x U_1)^2}{k} + g \right] \hat{\zeta} = \rho_2 \left[\frac{(\omega - k_x U_2)^2}{k} + g \right] \hat{\zeta}.$$

因为扰动 $\hat{\zeta} \neq 0$ ，我们得

$$\rho_1 \left[-\frac{(\omega - k_x U_1)^2}{k} + g \right] = \rho_2 \left[\frac{(\omega - k_x U_2)^2}{k} + g \right].$$

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结

色散关系

由此解得扰动的色散关系

$$\omega = k_x \frac{\rho_1 U_1 + \rho_2 U_2}{\rho_1 + \rho_2} \pm \left[\frac{kg(\rho_1^2 - \rho_2^2) - k_x^2 \rho_1 \rho_2 (U_1 - U_2)^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} \right]^{1/2}. \quad (16)$$

当

$$kg(\rho_1^2 - \rho_2^2) > k_x^2 \rho_1 \rho_2 (U_1 - U_2)^2,$$

扰动是稳定的；当

$$kg(\rho_1^2 - \rho_2^2) < k_x^2 \rho_1 \rho_2 (U_1 - U_2)^2,$$

扰动将呈指数增长。

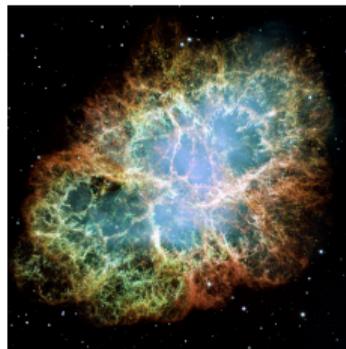
Rayleigh-Taylor不稳定性

当 $U_1 = U_2 = 0$, $\rho_2 > \rho_1$, 扰动是不稳定的,

$$\omega = \pm i \sqrt{ka \frac{|\rho_1 - \rho_2|}{\rho_1 + \rho_2}}. \quad (17)$$



卷云(cirrus cloud), 由于RTI发展所形成。



蟹状星云, 超新星爆发时由于RTI发展所形成。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结

Kelvin-Helmholtz不稳定性

当 $\rho_1 = \rho_2$, $U_1 \neq U_2$, 扰动不稳定,

$$\omega = \frac{k_x}{2}(U_1 + U_2) \pm \frac{i}{2}k_x |U_1 - U_2|. \quad (18)$$



由于KHI形成的波浪形云朵。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

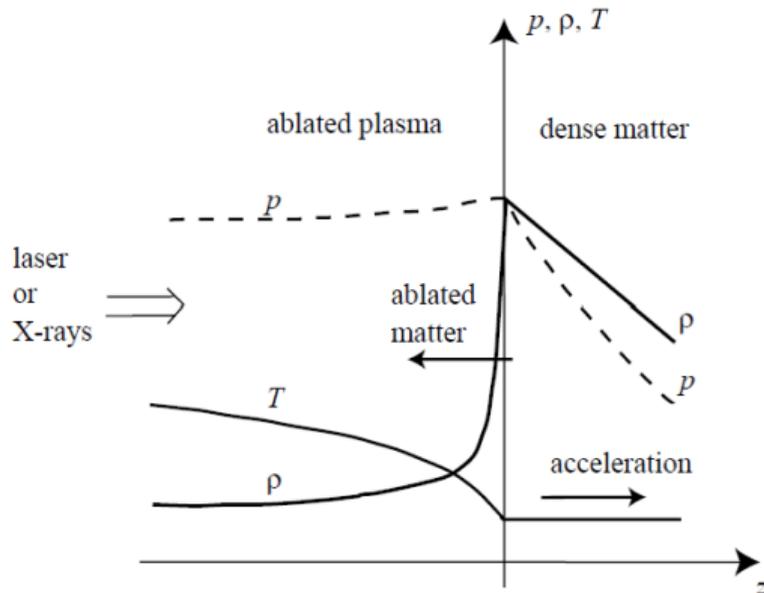
不稳定性的实验研究与抑制

小结

烧蚀型 RTI

在惯性约束聚变中，烧蚀压驱动剩余物质加速。在加速阶段，烧蚀面附近将产生 RTI。烧蚀将使 RTI 的增长率降低，乃至稳定化 RTI^a。烧蚀型 RTI 的线性增长率为与烧蚀结构密切相关。

S. E. Bonder, Phys. Rev. Lett. **33**, 761 (1974).



提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

Kelvin-Helmholtz 不稳定性

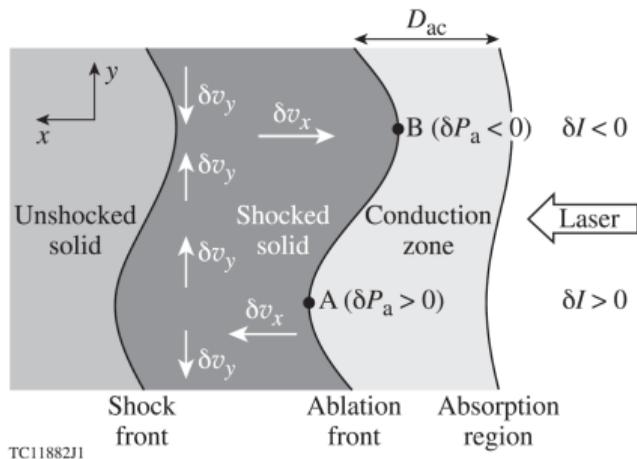
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



烧蚀致稳的物理原因:

- 烧蚀压的作用: 在燃烧面附近的扰动, 与扰动的谷相比, 扰动的峰与激光能量沉积区更接近, 当地的温度梯度更大, 热流更高, 烧蚀速度增加, 导致扰动的峰被更快地烧蚀掉(fire-polishing);
- 烧蚀速度的作用: RTI 在空间的发展为 $\exp(-k|z|)$ 。在一段时间 Δt 内, 由于 RTI, 扰动增长了一个因子 $\exp(\gamma\Delta t)$, 但在这个时间内, 由于烧蚀, 不稳定界面运动了一段距离 $\Delta z = u_a\Delta t$, 因此扰动增长实际上为 $\exp[(\gamma - ku_a)\Delta t]$;
- 数值计算表明, 不稳定性增长率可以表示为 $\gamma = \alpha\sqrt{kg} - \beta kV_a$, 其中 V_a 是烧蚀速度, $\alpha = 0.9$, $\beta = 3 \sim 4$ 。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor

不稳定性与

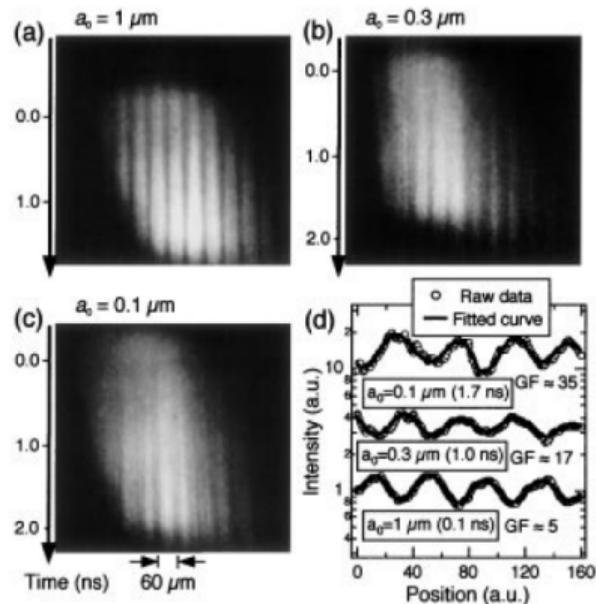
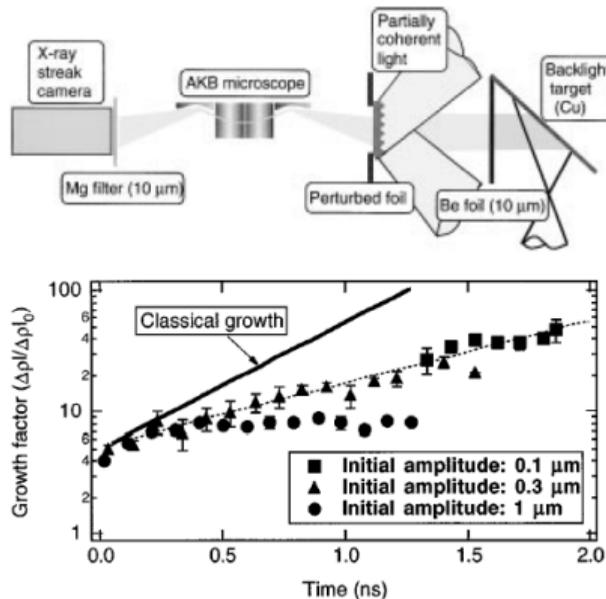
Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



激光烧蚀驱动的 RTI 实验安排和测量结果。摘自 Shigemori et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 250 (1997)。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记 Richtmyer-Meshkov 不稳定性

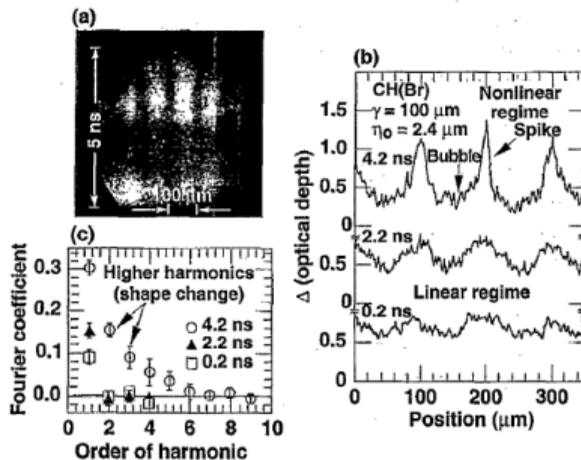
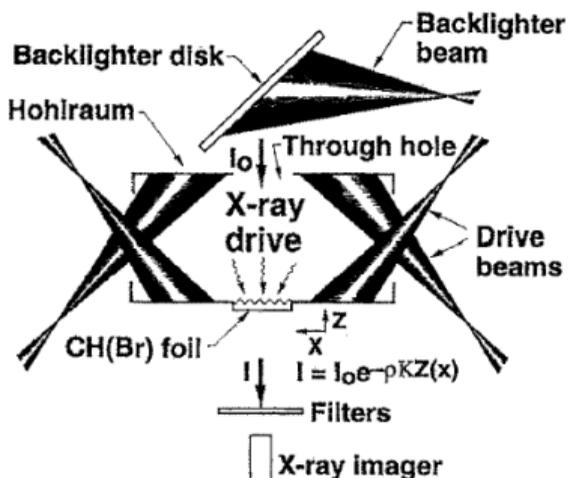
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性

简介 经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



辐射烧蚀驱动的 RTI 实验安排和测量结果。摘自 Remington et al., Phys. Plasmas 2, 241 (1995)。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

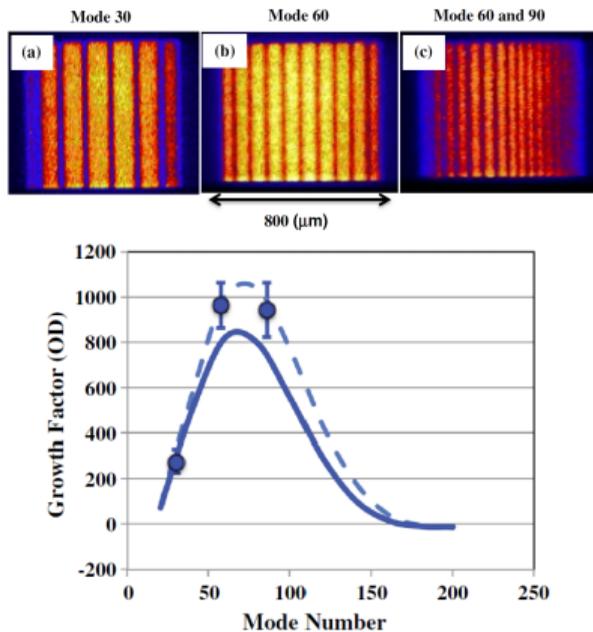
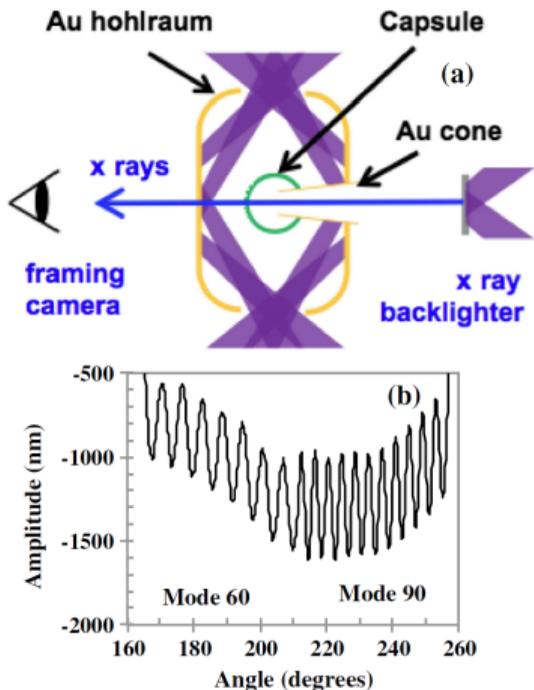
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



间接驱动内爆过程的 RTI 实验观测。摘自 Smalyuk, et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 185003 (2014).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

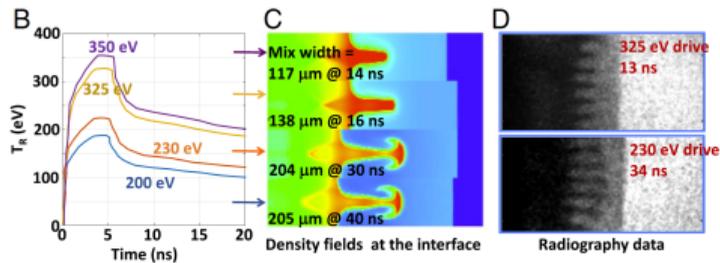
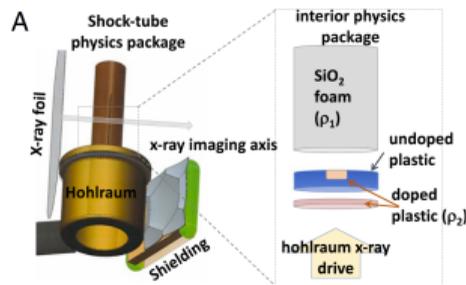
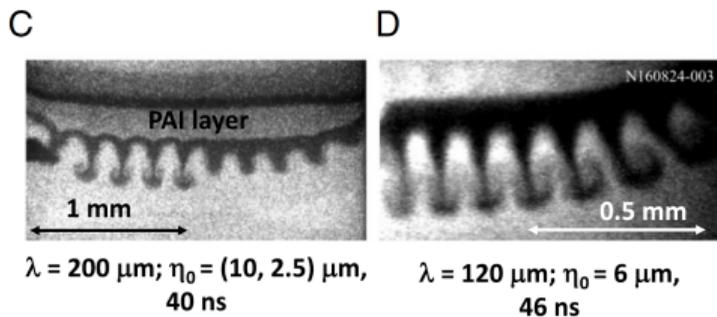
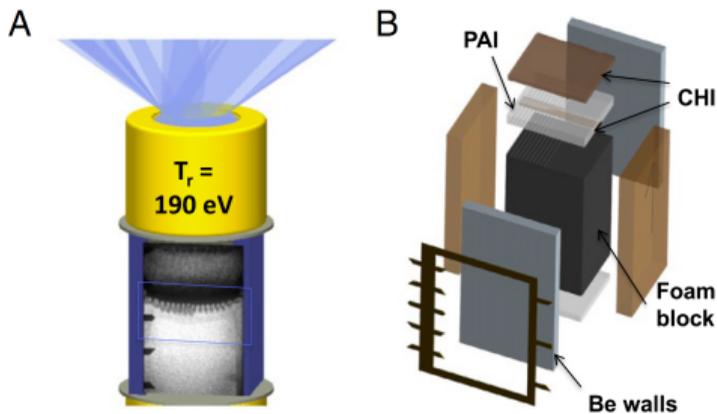
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



美国在 NIF 装置上进行的一系列实验，对烧蚀 RTI 有了更透彻的认识。摘自 B. Remington et al., PNAS 116, 18233-18238 (2019).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性

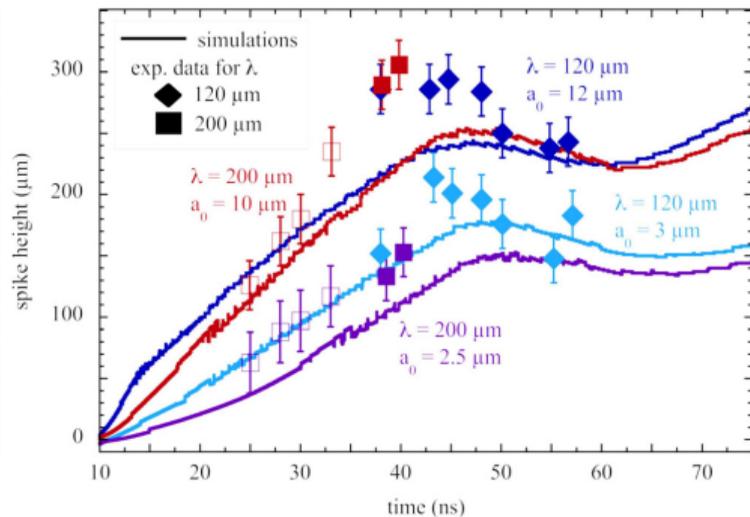
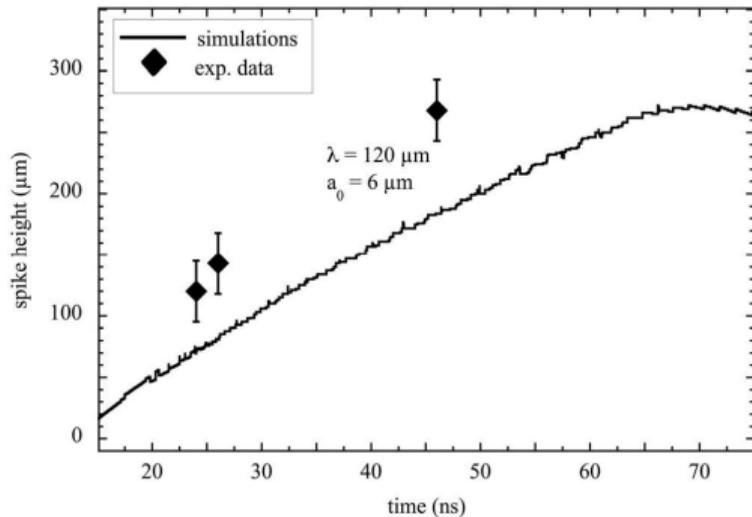
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



在 NIF 装置上的 RTI 以及 RMI 实验观测结果与流体模拟存在显著的差异，这表明当时人们对高能量密度流体中的不稳定性存在科学认识上的偏差。摘自 S. R. Nagel et al., Phys. Plasmas **24**, 072704 (2017).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

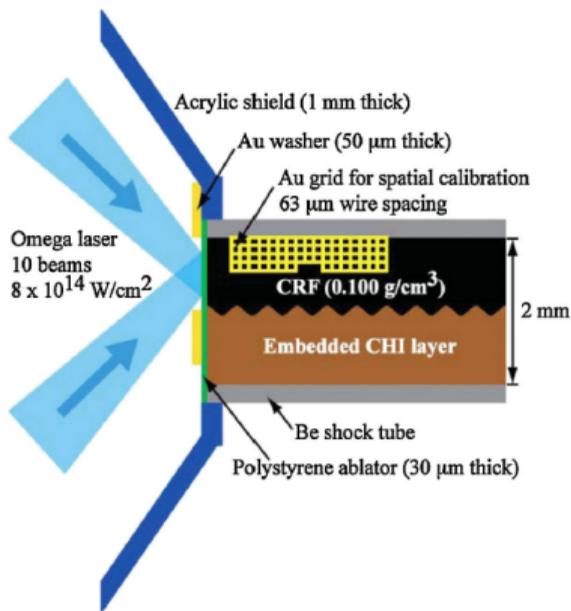
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

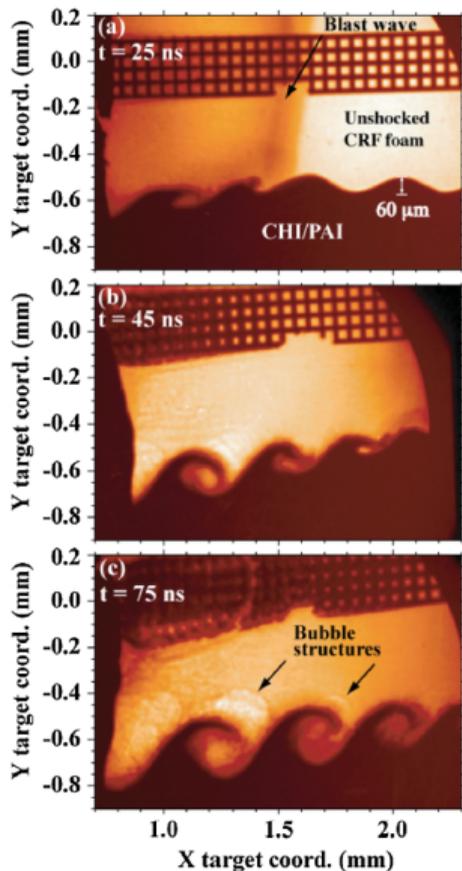
烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



KHI 的实验安排和测量结果。Harding et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 045005 (2009)



提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性

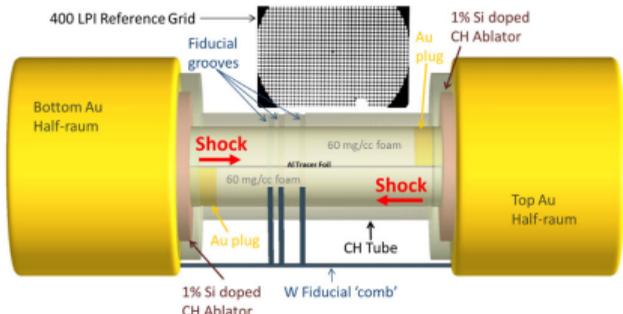
简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

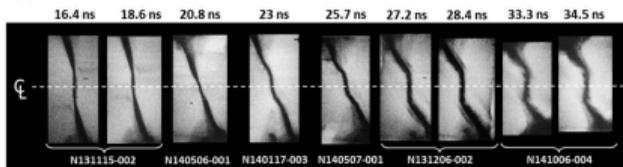
烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

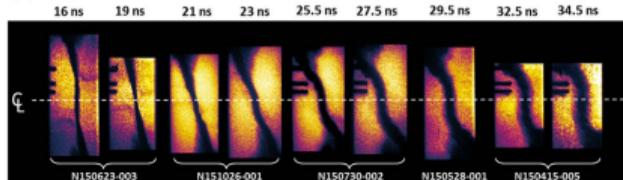
小结



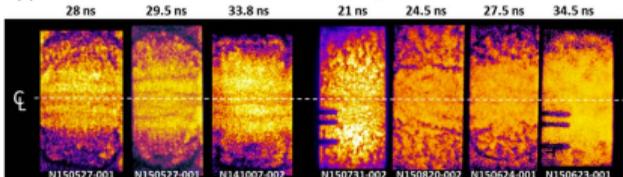
(a) Nominal Al



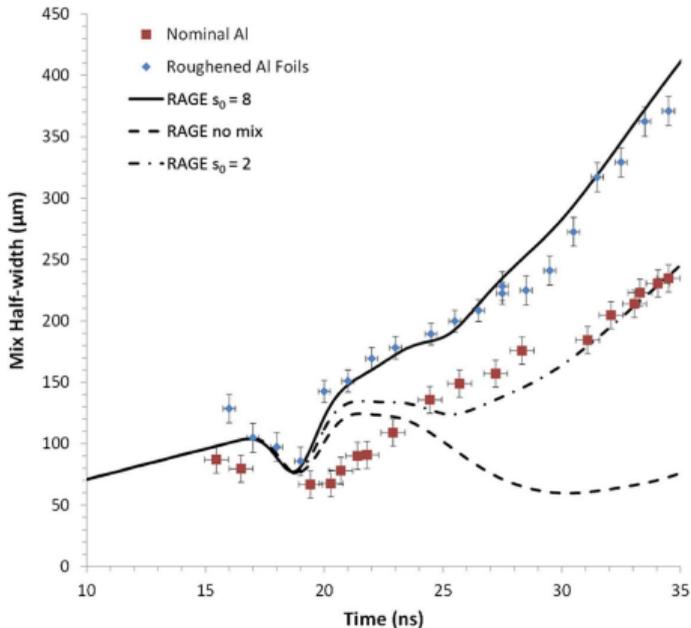
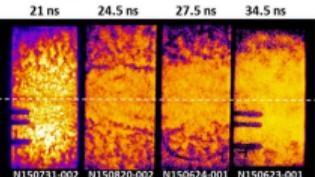
(b) Rough Al



(c) Nominal Al



(d) Rough Al



在 NIF 装置上开展了 KHI 导致混合的实验，对确定混合模型中的参数起了关键作用。摘自 K. A. Flippo et al., Phys. Rev. Lett **117**, 225001 (2016).

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与

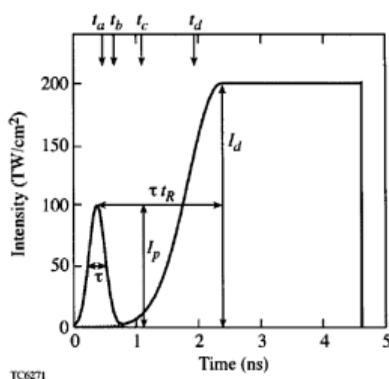
Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

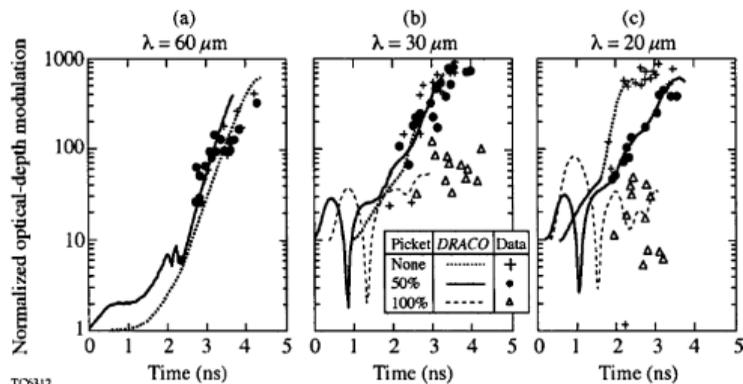
烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



TC0271



TC0312

美国 Rochester 大学提出，在直接驱动中，采用 picket 脉冲产生预等离子体，增加烧蚀速度，从而降低/抑制 RTI^a。

T. J. B. Collins et al., Phys. Plasmas **11**, 1569 (2004)

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

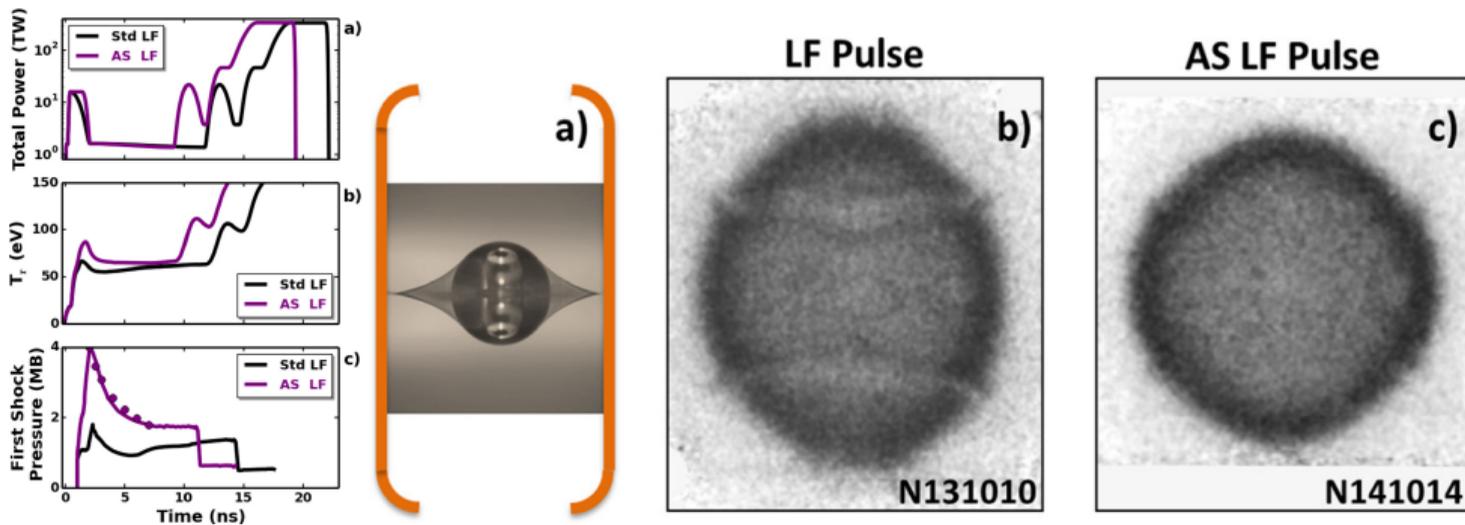
Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结



通过改变烧蚀波形，提高熵增，可有效缓解瑞利-泰勒不稳定性。摘自 J. L. Milovich et al., Phys. Plasmas **22**, 122702 (2015)。

提要

概述

印迹阶段的不稳定性简介

Darrieus-Landau 不稳定性简介

D'yakov-Kontorovich 不稳定性

激光印记

Richtmyer-Meshkov 不稳定性

Rayleigh-Taylor 不稳定性与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性简介

经典 RTI 和 KHI 的线性理论

烧蚀型 RTI

不稳定性的实验研究与抑制

小结

- 内爆压缩的品质直接关系到惯性约束聚变点火成败；
- 内爆过程中的流体力学不稳定性会放大辐照不均匀性或者制靶缺陷，降低内爆品质；
- 内爆过程可能发生的不稳定性：Darrieus-Landau 不稳定性，D'yakov-Kontorovich 不稳定性，Richtmyer-Meshkov 不稳定性，Rayleigh-Taylor 不稳定性，Kelvin-Helmholtz 不稳定性；
- 通过优化激光脉冲波形以及靶丸烧蚀材料，可以避免 DLI 和 DKI，抑制激光印迹；但 RMI 和 RTI 无法回避；
- 通过优化激光脉冲波形以及靶丸烧蚀材料，可以将 RTI 增长控制在可接受的水平，实现点火目标。