

高温烧蚀初始印记及其瑞利-泰勒 不稳定性发展的研究*

方智恒^{1)†} 王 伟¹⁾ 贾 果¹⁾ 董佳钦¹⁾ 熊 俊¹⁾ 郑无敌²⁾ 李永升²⁾
罗平庆²⁾ 傅思祖¹⁾ 顾 援¹⁾ 王世绩¹⁾

1) 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

2) 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2009 年 6 月 3 日收到, 2009 年 6 月 11 日收到修改稿)

直接驱动惯性约束聚变中, 高温烧蚀初始印记在压缩过程的不稳定性发展中起着重要作用. 利用 X 射线针孔辅助点投影成像法, 研究了不同波形激光脉冲驱动下 CH 平面靶及其瑞利-泰勒不稳定性发展的情况. 结果表明, 在相同驱动激光能量作用下, 初始阶段激光强度越低, 上升越缓慢, 高温烧蚀初始印记引起的密度调制幅度越大. 提高预脉冲强度能显著抑制高温烧蚀初始印记效应.

关键词: 高温烧蚀初始印记, 激光脉冲形状, 瑞利-泰勒不稳定性, 针孔辅助点投影

PACC: 4720

1. 引 言

惯性约束聚变(ICF)中, 聚变燃料被对称压缩到高密度、高温^[1,2]状态才能实现点火. 在直接驱动(DD)惯性约束聚变中, 激光辐照强度空间不均匀性必须优于 1% rms^[1,2], 否则, 高温烧蚀初始印记产生的密度调制, 将在燃料壳的加速阶段经过瑞利-泰勒(RT)不稳定性发展得到放大, 破坏对称压缩, 降低聚变增益, 甚至导致点火失败.

国外学者对激光高温烧蚀初始印记进行了大量的研究. Bodner^[3]给出了最早的分析处理方法, 模型预示了由于热匀滑效应, 传导区的压力不均匀性将按指数减小. Sanz 等^[4]报道的模型中增加了弱磁场的作用. Goncharov 等^[5]的模型中包含了动力学过压效应, 是处理高温烧蚀初始印记的一个比较完整的模型. 实验研究表明, 降低激光强度的不均匀性可以抑制激光高温烧蚀初始印记. 目前发展了多种技术, 如采用随机相位板^[6](RPP)、空间光谱色散^[7](SSD)、诱导非相干^[8](ISI)等对光束进行匀滑. RPP 有效地使不均匀谱向短波方向转移, SSD 和 ISI 在空间与时间上显著提高了焦斑的均匀性. 尽管这些方

式提高了靶面激光辐照的均匀性, 但是激光高温烧蚀初始印记还是显著降低了低焓内爆性能^[9]. 在激光辐照靶面的初始阶段(激光辐照强度 1×10^{12} W/cm² < $I < 5 \times 10^{13}$ W/cm² 时), 激光焦斑空间不均匀性将对靶产生“印记”, 引起靶面初始密度调制, 密度调制幅度将经过 RT 不稳定性发展而放大. Knauer 等^[10]利用一高强度的激光预脉冲对靶预热, 有效抑制了短波长激光高温烧蚀初始印记.

RT 不稳定性增长率 γ 与 $k^{1/2}$ ^[11] (k 为调制波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为调制波长)大致成正比, 且当调制幅度超过 $\lambda/10$ 时, 达到饱和^[8]. 波长 λ 介于 40—160 μm 之间的模较易突破靶壳^[9], 对 ICF 危害最大. 波长更长的模由于增长速度慢, 波长更短的模很快达到饱和, 对聚变的影响都比较小.

对于球形靶, RT 不稳定性增长率^[12-15]

$$\gamma = \sqrt{\frac{kg}{1 + kL}} - \tilde{\beta} \frac{\dot{m}}{\rho} k, \quad (1)$$

其中 L 是烧蚀前沿的密度标长, g 是靶壳的加速度, $\tilde{\beta}$ 是大于 1 的系数(对于 DT 靶, $\tilde{\beta} \approx 2.7$; 对于 CH 靶, $\tilde{\beta} \approx 1.5$), \dot{m} 是单位面积上的质量烧蚀率, ρ 是靶壳最高密度. 靶面烧蚀速度 $V_a = \frac{\dot{m}}{\rho}$, 当绝热指

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2008AA8041804)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(批准号: 2008B0102010)资助的课题.

† E-mail: smallfang2000@yahoo.com.cn

数取 $5/3$ 时,它与靶壳的绝热系数 α_{out} (α 通常被用来表征壳的熵增) 激光强度 I_L 有如下关系^[12,13]:

$$V_a \sim \alpha_{out}^{3/5} I_L^{-1/15}. \quad (2)$$

因此,我们可以通过提高靶面烧蚀速度,减小 RT 不稳定性增长率 γ ,抑制激光高温烧蚀初始印记效应.由于激光高温烧蚀初始印记引起的调制主要在激光辐照初始阶段产生,因此可以通过提高激光辐照初始阶段的功率密度,来降低激光高温烧蚀初始印记引起的初始密度调制,并在靶的加速阶段降低 RT 不稳定性的增长率来减弱激光高温烧蚀初始印记的影响.

国外文献中对高温烧蚀初始印记的研究大都采用较薄的靶型,即驱动激光结束时,靶背已开始运动,且激光强度空间不均匀性 $\leq 5\%$. 本文从实验上研究了调制深度约为 $1/5$ 的正弦调制激光作用厚 CH 靶(驱动激光结束时刻,靶背未开始移动)时的高温烧蚀初始印记及 RT 不稳定性发展情况,并进行了初步的模拟计算分析.

2. 实 验

实验在高功率激光物理联合实验室神光-II 激光装置上进行,排布如图 1. 神光-II 装置的 5#、6#、7#、8# 四束激光(波长 $0.351 \mu\text{m}$ 、脉冲宽度约 80 ps 、单束能量约 30 J) 聚焦形成一直径约 $200 \mu\text{m}$ 的焦斑辐照平面 Ti 靶,在靶背出射 4.7 keV 的 Ti 的 He- α 线辐射,以此作为背光源,利用针孔辅助点投影(PAPP)背光成像方法^[16],对主靶投影成像,并由 X 射线 CCD 接收. 实验采用直径 $10 \mu\text{m}$ 的针孔,由于点投影诊断系统的空间分辨率 σ 主要取决于针孔的口径^[17],所以诊断系统的空间分辨率约为 $10 \mu\text{m}$; 诊断系统的时间分辨率决定于背光源的持续时间,

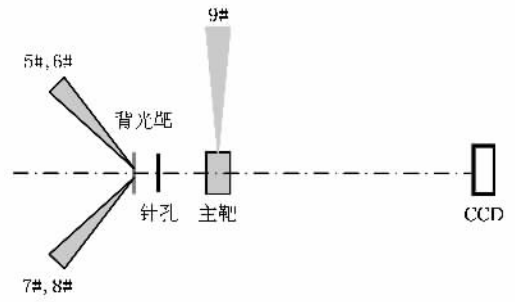


图 1 实验排布示意图

采用 80 ps 激光驱动时,背光发光持续时间约为 120 ps ,即系统的时间分辨率约为 120 ps .

激光辐照靶面强度调制是由列阵透镜与主透镜的组合聚焦作用形成的.具有脉冲整形能力的神光-II 第九路激光经过倍频后变成波长为 $0.53 \mu\text{m}$ 、脉冲宽度约为 2.2 ns 、最大输出能量为 1400 J 的激光,这束激光经列阵透镜与主透镜组合聚焦,在靶面产生如图 2 所示的辐照焦斑,焦斑总面积约为 0.00755 cm^2 ,沿针孔点投影的垂直方向(投影图空间分辨方向,图 2(b)中的 x 方向),靶面激光强度分布大致可由下式表征:

$$I(x, t) = I_0(t) + \frac{1}{5} I_0(t) \sin\left(\frac{2\pi}{27}x\right), \quad (3)$$

其中 $I_0(t)$ 是空间平均激光辐照强度, x 的单位为 μm ,激光空间调制周期为 $27 \mu\text{m}$. 由于投影图沿投影方向(图 2(b)中约 y 向)不具备空间分辨能力,所以(3)式中未包含投影光传播方向的激光强度分布. 实验采用 CH 平面靶,密度 1.08 g/cm^3 ,靶长 l 约为 $1000 \mu\text{m}$,宽 w 约为 $300 \mu\text{m}$,厚 h 约为 $140 \mu\text{m}$,靶表面粗糙度(R_a)为 90 nm ,相对于激光引起的靶面调制度,这种靶面初始起伏的影响可以忽略.

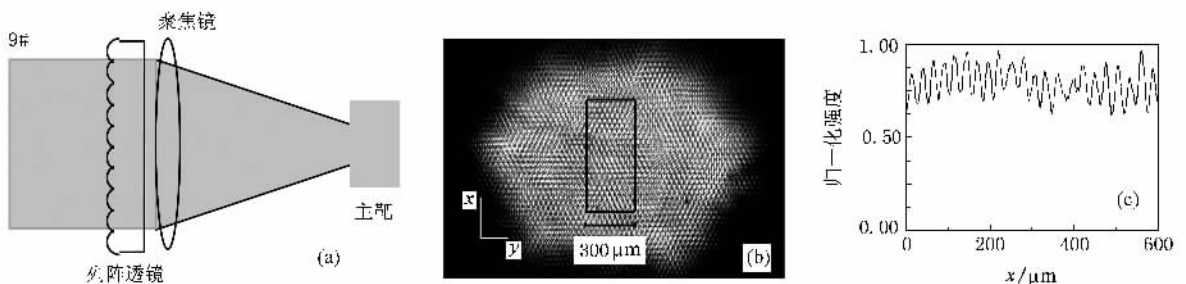


图 2 周期性激光强度调制 (a) 激光调制产生示意图 (b) 焦斑形貌(黑框选择区域为辐照到主靶上的激光) (c) 图中黑框选择区 x 方向激光强度分布(y 方向取平均)

3. 实验结果与分析

实验对于不同形状激光脉冲辐照 CH 靶情况 (图 3(a) 为实验发次 1204, 1303 和 1401 的结果), 拍摄了脉冲下降沿半高处 (图 3(a) 中诊断时刻) 针孔辅助点投影成像图 (图 3(b)). 图 3 中三种驱动激光的能量大致相等, 约为 750 J, 脉冲持续时间约为 2.2

ns. 图 3(b) 中密度调制的周期是 $27 \mu\text{m}$, 与激光的空间调制周期一致, 因此我们确定这是由激光的初始调制产生的高温烧蚀初始印记. 如图 3(a) 所示, 梯形波 (实验发次 1204) 驱动时, 密度调制峰谷差 a 最小, $a = (5 \pm 1) \mu\text{m}$; 激光强度缓慢上升且不加预脉冲 (实验发次 1303) 时, 密度调制幅度最大, 峰谷差 $a = (18 \pm 1) \mu\text{m}$, 加上强预脉冲 (预脉冲峰值与主脉冲峰值之比约为 80%) 时, 峰谷差 $a = (9 \pm 1) \mu\text{m}$.

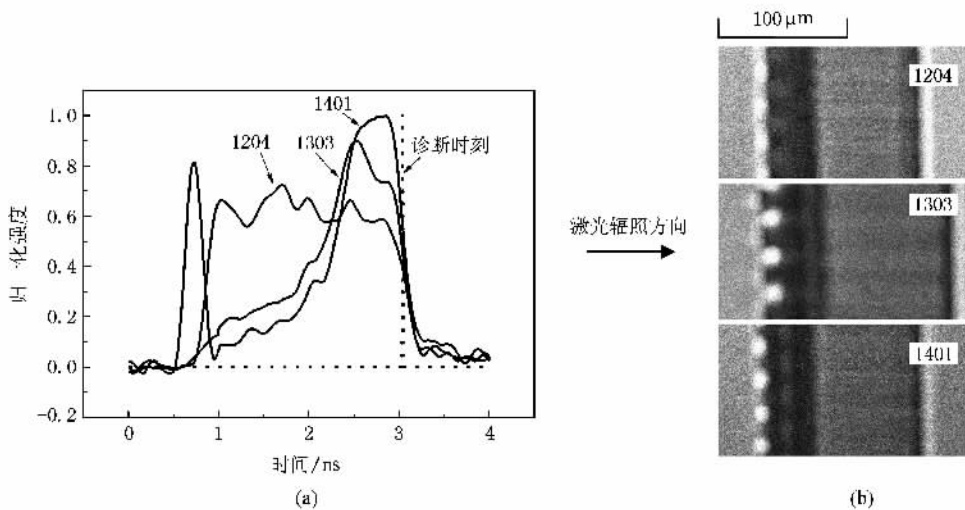


图 3 激光波形对高温烧蚀初始印记及其发展的影响 (a) 驱动激光波形 (b) 激光辐照不均匀性发展后点投影图

我们用 XRL2D 程序^[18], 采用与实验相同的条件进行了模拟计算. XRL2D 程序是一套二维非平衡辐射流体力学程序, 采用了任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 方法, 其中电子、离子能量输运采用限流热传导近似, 辐射输运采用多群扩散近似, 原子动力学采用平均原子模型, 激光吸收仅考虑了逆韧致吸收和共振吸收. 图 3(a) 所示波形对应的靶面烧蚀量随时间的变化关系如图 4 所示. 在 1.0—3.0 ns 时间段内, 梯形波作用时的靶面烧蚀速率 (图 4 中实验发次 1204) 高于其他两种波形. 根据 (1) 式, 烧蚀速率越大, RT 增长率越小, 如图 3(b) 中实验发次 1204, 初始激光高温烧蚀初始印记引起的密度调制幅度最小. 理论与实验研究均表明, 预脉冲会改变靶内的熵的分布^[10], 使得烧蚀靶面附近的熵增加, 这使得靶面烧蚀速率提高. 图 4 中 0.5—1.5 ns 时间段, 1401 的烧蚀速率高于 1303 的烧蚀速率; 同时, 预脉冲在靶表面迅速产生等离子体, 后续低强度脉冲的“印记”效应被减弱^[19], 因此增加预脉冲抑制了激光高温烧蚀初始印记效应.

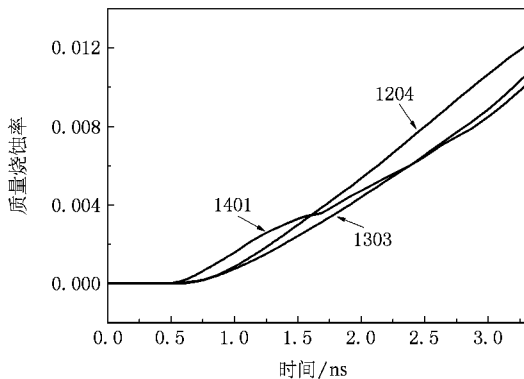


图 4 烧蚀量随时间的变化图

当改变预脉冲强度时, 密度调制幅度发生了显著变化, 如图 5 所示. 驱动激光都是缓慢上升波形, 驱动总能量相同 (约 750 J), 但预脉冲强度不同 (见图 3(a) 实验发次 1303, 1401 和 1402 的结果), 诊断时刻依旧为下降沿半高处, 驱动激光主脉冲最大功率密度为 $8 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$, 随着预脉冲强度的提高, 初始激光高温烧蚀初始印记引起的密度调制幅度从

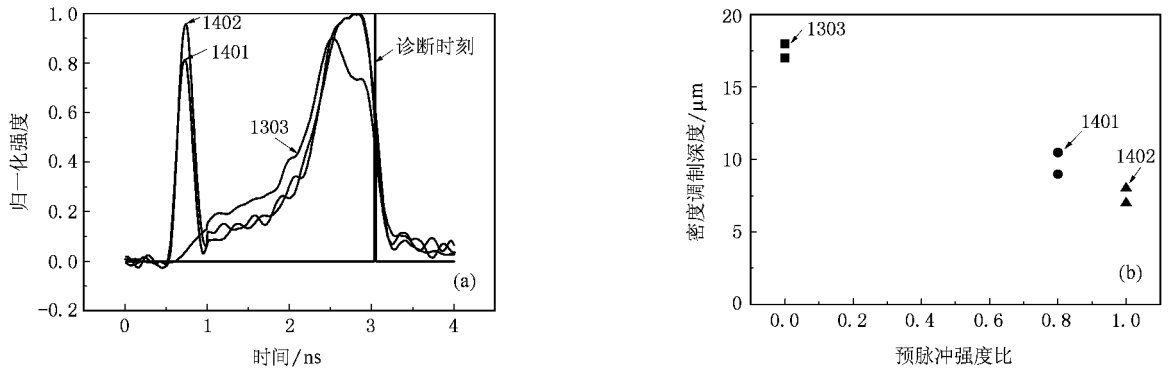


图5 预脉冲强度对高温烧蚀初始印记及其发展的影响 (a)驱动激光波形 (b)密度调制幅度与预脉冲关系图(随着预脉冲强度增加,密度调制深度从 $18 \mu\text{m}$ 下降到 $7 \mu\text{m}$)

$18 \mu\text{m}$ 下降到 $7 \mu\text{m}$ 。理论分析与数值模拟表明,绝热系数 $\alpha \sim I^{2/3}$,提高预脉冲强度,靶壳内熵的分布将发生改变,烧蚀靶面附近的熵相应地增大,电子热传导、对流、辐射热传导等对 RT 不稳定性发展起抑制作用的效应增强,因此激光高温烧蚀初始印记引起的初始调制发展趋缓。

4. 结 论

本文利用针孔辅助点投影成像法对高温烧蚀初始印记及其发展情况进行了实验研究。驱动激光能量相同时,梯形波作用下,密度调制幅度最小(调制峰谷差 $a = (5 \pm 1) \mu\text{m}$),无预脉冲的缓慢上升波形

驱动时,密度调制幅度最大($a = (18 \pm 1) \mu\text{m}$)。预脉冲强度对激光高温烧蚀初始印记引起的调制抑制作用很明显。实验中,激光强度的初始调制深度为 $1/5$,采用 100% 强度预脉冲时,激光高温烧蚀初始印记引起的密度调制从 $a = (18 \pm 1) \mu\text{m}$ (未加预脉冲)下降到 $a = (7 \pm 1) \mu\text{m}$ 。ICF 中激光辐照不均匀性可以利用 SSD, DPP, ISI 等方式得到明显改善,如果配合合适的激光脉冲波形,激光高温烧蚀初始印记对 ICF 的影响将更趋微弱。因此对驱动激光波形的研究是 ICF 实现点火的重要研究课题。

作者衷心感谢神光-II 装置所有工作人员对于本研究工作的支持、帮助,感谢课题组其他成员的协作,感谢北京应用物理与计算数学研究所理论、计算方面提供的帮助。

- [1] Lindl J D 1998 *Inertial Confinement Fusion* (New York :Springer) p1
- [2] Bodner S E, Colombant D G, Gardner J H, Lehberg R H, Obenschain S P, Phillips L, Schmitt A J, Sethian J D 1998 *Phys. Plasmas* **5** 1901
- [3] Bodner S E 1981 *J. Fusion Energy* **1** 221
- [4] Sanz J, Nicolas J A, Sanmartin J R, Hilario J 1988 *Phys. Fluids* **31** 2320
- [5] Goncharov V N, Skupsky S, Boehly T R, Knauer J P, Mckenty P, Smalyuk V A, Town P R J, Gotchev O V, Betti R, Meyerhofer D D 2000 *Phys. Plasmas* **7** 2062
- [6] Kato Y, Mima K, Miyanaga N, Arinaga S, Kitagawa Y, Nakatsuka M, Yamanaka C 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 1057
- [7] Skupsky S, Short R W, Kessler T, Cranton R S, Letzing S, Soures J M 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3456
- [8] Lehberg R H, Schmitt A J, Bodner S E 1987 *J. Appl. Phys.* **62** 2680
- [9] Mckenty P W, Goncharov V N, Town R P J, Skupsky S, Betti R, McCrory R L 2001 *Phys. Plasmas* **8** 2315
- [10] Knauer J P, Anderson K, Betti R, Collins T J B, Goncharov V N, Mckenty P W, Meyerhofer D D, Radha P B, Regan S P, Sangster T C, Smalyuk V A 2005 *Phys. Plasmas* **12** 056306
- [11] Takabe H, Mima K, Montiher L, Morse R L 1985 *Phys. Fluids* **28** 3676
- [12] Sharp D H 1984 *Physica D* **12** 1
- [13] Emery M H, Gardner J H, Boris J P 1982 *Appl. Phys. Lett.* **41** 808
- [14] Betti R, Goncharov V N, McCrory R L, Verdon C P 1998 *Phys. Plasmas* **5** 1446
- [15] Wang T, Bai J S, Li P, Zhong M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1127
- [16] Landen O L, Farley D R, Glendinning S G, Lofory L M, Bell P M, Koch J A, Lee F D, Bradley D K, Kalantar D H, Back C A, Turner R E 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 627
- [17] Koch J A, Landen O L, Barbee T W, Celliers P, Silva L B D, Glendinning S G, Hammel B A, Kalantar D H, Brown C, Seely J, Bennett C B, Hsing W 1998 *Appl. Opt.* **37** 1784
- [18] Zheng W D, Zhang G P 2007 *Chin. Phys.* **16** 2439
- [19] Boehly T R, Goncharov V N, Gotchev O, Knauer J P, Meyerhofer D D, Oron D, Regan S P, Srebro Y, Seka W, Shvarts D, Skupsky S, Smalyuk V A 2001 *Phys. Plasmas* **8** 2331

Imprinting and consequent Rayleigh-Taylor growth ^{*}

Fang Zhi-Heng^{1)†} Wang Wei¹⁾ Jia Guo¹⁾ Dong Jia-Qin¹⁾ Xiong Jun¹⁾ Zheng Wu-Di²⁾ Li Yong-Sheng²⁾
Luo Ping-Qing²⁾ Fu Si-Zu¹⁾ Gu Yuan¹⁾ Wang Shi-Ji¹⁾

¹⁾ *Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China*

²⁾ *Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*

(Received 3 June 2009 ; revised manuscript received 11 June 2009)

Abstract

In direct drive inertial confinement fusion, surface perturbations seeded by imprint from laser intensity variations play an important role in Rayleigh-Taylor (RT) growth. Laser imprinting and consequent RT growth in planar CH targets driven by different pulse shapes have been investigated. The experimental results reveal that the range of density modulation induced by laser imprinting is larger when the driving laser has lower foot intensity and rises more slowly. Enhancing the pre-pulse intensity can restrain the effect of laser imprinting notably.

Keywords : imprinting, shaping pulse, Rayleigh-Taylor (RT) instability, pinhole assisted projection

PACC : 4720

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA8041804) and the Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2008B0102010).

[†] E-mail : smallfang2000@yahoo.com.cn