

X 射线烧蚀泡沫 – 固体靶增压机理研究

张璐^{1)2)†} 杨家敏¹⁾

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2011 年 1 月 5 日收到; 2011 年 4 月 26 日收到修改稿)

X 射线烧蚀泡沫 – 固体靶时界面失配会使得泡沫与固体靶中压力增加, 这一现象可用于研究高压下物质的状态方程. 本文以 CH 泡沫 – Al 固体靶为例, 研究了 X 射线烧蚀双层靶时的增压现象. 提出仅当泡沫中有冲击波产生时, 在固体靶中才会有增压现象出现. 文中基于冲击波强波近似, 理论分析了冲击波过界面情况与冲击波、稀疏波作用过程, 得到增压倍数与材料密度, 多方气体指数的近似表达式. 同时表明固体靶中增压产生的冲击波为高压脉冲, 会被紧跟热波的稀疏波追赶并稀疏. MULTI 一维计算结果验证了该结论.

关键词: 泡沫, 冲击波, 界面失配, 增压

PACS: 52.35.Tc

1 引言

低密度多孔材料, 即泡沫, 被广泛应用在惯性约束聚变 (ICF) 实验中. 在直接驱动实验中, 利用泡沫能够均匀激光能量沉积^[1], 从而降低对入射激光均匀性的要求. 间接驱动实验中, 黑腔腔壁等离子体向内运动^[2], 低 Z 气体填充能够限制其运动, 而用泡沫来代替气体可能会使得阻止高 Z 腔壁等离子体运动的效果更加明显. 此外, 将低密度泡沫材料加到固体靶上, 当激光或 X 射线烧蚀这种靶时, 靶内冲击波的压力增加^[3]. 利用这种现象, 可以研究高压条件下物质的状态方程, 这对于天体物理及 ICF 研究都有重要意义^[4]. 同时, 在聚变靶设计中引入这种增压体制, 能够提高靶丸中的烧蚀压, 从而降低对驱动源的要求.

研究泡沫 – 固体靶中增压产生的机理, 对于理解物理图像和设计实验都有指导意义. Temporal 等人基于冲击波弱波近似研究了激光驱动的泡沫 – 固体靶增压机理, 得到了增压倍数与泡沫密度、厚度, 固体密度及激光参数的关系^[5]. 然而烧蚀产生的冲击波大多为强波, 本文基于强波近似, 研究 X 射线烧蚀泡沫 – 固体靶的增压机理, 分析了增压出现的条件, 得出压力放大倍数与密度的依赖关系, 并首

次发现增压产生的高压为短脉冲形式. 本文工作有助于理解增压现象的物理图像, 对实验设计亦有参考价值.

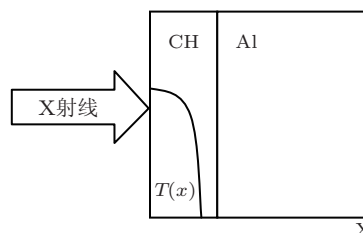


图1 泡沫 – 固体靶示意图

2 理论分析

以 CH 泡沫及 Al 材料为例, X 射线作用在泡沫上, 如图 1 所示. 辐射热波先以超声速传播, 物质保持不动; 一段时间后, 热波速度降低至亚声速传播, 边界稀疏波波头以超声速传播, 它赶上热波; 同时在热波波前产生冲击波. 辐射烧蚀产生冲击波的条件为^[6]

$$Q = \sigma_B T_r^4 / (\rho_0 c_T^3) < 4. \quad (1)$$

代入数值可得 $Q = 0.065 T_r^{2.5} / \rho_0 < 4$. 即当给定辐射温度, 烧蚀能否产生冲击波与初始密度有关. 初

† E-mail: l-z03@163.com

始密度大于临界值时, 物质中有冲击波产生, 此时热波为亚声速烧蚀波 (有冲击波), 冲击波的压力等于烧蚀压. 假设相同的驱动源, Al 和 CH 的烧蚀压相等 [2], 当 CH 密度满足烧蚀热波传播的状态时, 才有可能由于界面失配使得 Al 的冲击波压力高于烧蚀压, 即 CH 内有冲击波是增压现象的必要条件.

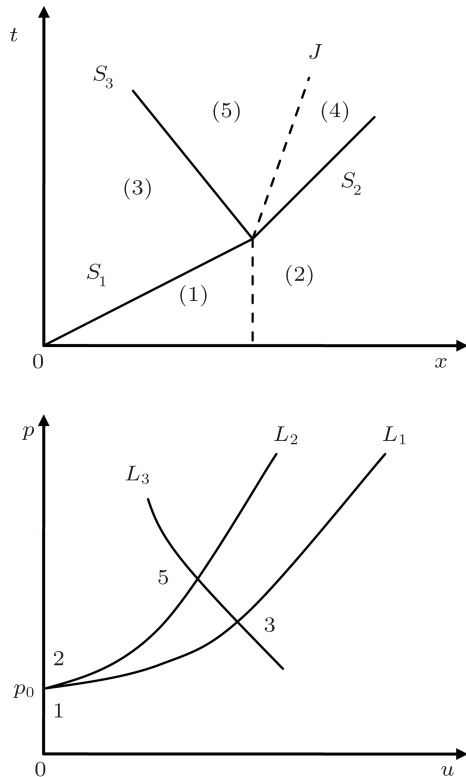


图 2 冲击波过界面向后反射冲击波, 并透射冲击波

2.1 冲击波过界面

我们假定 CH 泡沫密度满足产生冲击波的条件, 研究该冲击波达到稳态, 经过 CH-Al 界面的情况. 冲击波由一种介质进入另一种介质, 在交界面会发生相互作用. 如图 2 所示, 当 CH 烧蚀产生的冲击波 S_1 经过 CH-Al 界面时, 反射冲击波 S_3 , 并有透射冲击波 S_2 进入 Al 介质中 [7]. 烧蚀产生的冲击波为强冲击波 [5] ($P \gg P_0$), 假设两种介质为多方气体, 这些冲击波对应的 p - u 曲线 L_1 , L_2 及 L_3 可近似表达为

$$L_1 \quad u = \sqrt{\frac{2p}{\rho_1(\gamma_1 + 1)}}, \quad (2)$$

$$L_2 \quad u = \sqrt{\frac{2p}{\rho_2(\gamma_2 + 1)}}, \quad (3)$$

$$L_3 \quad u = u_3 - \sqrt{\frac{2p}{\rho_3(\gamma_1 + 1)}}. \quad (4)$$

u_3, ρ_3 为 S_1 的波后状态, 即 L_1 与 L_3 的交点. 由以上关系求得 p_5 , 即反射波与透射波的压强.

由 (1), (2) 式可得

$$u_3 = \sqrt{\frac{2p_3}{\rho_1(\gamma_1 + 1)}}, \quad u_5 = \sqrt{\frac{2p_5}{\rho_2(\gamma_2 + 1)}},$$

代入 (3) 式中, 可得

$$u_5 = u_3 / \left(1 + \sqrt{\frac{\rho_2(\gamma_2 + 1)}{\rho_3(\gamma_1 + 1)}} \right).$$

将 u 用 p 替代, 可得

$$\frac{p_5}{p_3} = \frac{(\gamma_2 + 1) \rho_2}{(\gamma_1 + 1) \rho_1} \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\rho_2(\gamma_2 + 1)}{\rho_3(\gamma_1 + 1)}} \right)^2}. \quad (5)$$

若 $\gamma_1 = \gamma_2$, 且强冲击波 S_1 波后密度与波前的比为 $\frac{\rho_3}{\rho_1} = \frac{(\gamma + 1)}{(\gamma - 1)}$, 取 $\gamma = 5/3$ 的理想气体参数, 上式可简化为 $\frac{p_5}{p_3} = \frac{4\rho_2}{(2\sqrt{\rho_1} + \sqrt{\rho_2})^2}$, 即反射冲击波及透射冲击波的压强与入射冲击波的压强之比. 当 $\rho_1 \ll \rho_2$, 可求得其最大极限为 4.

可见, 当泡沫中产生冲击波时, 由于泡沫-固体靶的界面失配现象, 冲击波进入固体靶后, 压力增加, 增压效果与两种物质的多方指数, 初始密度相关, 随着第一层密度的减小而增加.

2.2 稀疏波追赶冲击波

CH 泡沫里反射的冲击波 S_3 与热波及稀疏波 R_1 相碰, 产生向前的稀疏波 R_2 及向后的冲击波 S_4 [7], 相互作用后产生的稀疏波 R_2 速度增加, 超过热波波阵面并追赶透射的冲击波 S_2 . 相对两波之间的介质而言, 冲击波 S_2 的速度是亚声速, 而稀疏波 R_2 波头的速度是声速, 所以 R_2 将赶上 S_2 . 下面我们分析两者作用后的结果.

在不引起混淆的情况下, 我们省略下标. 如图 3(a) 所示, 冲击波 S 将 Al 介质的初始状态 (0) 变为 (1), 随后传来的稀疏波 R 又把状态 (1) 稀疏为状态 (2). R 赶上 S 发生相互作用后产生一透射波和反射波, 它们的波后状态为同一状态 (m). 波系作用见图 3(b).

不论冲击波 S 与稀疏波 R 的强度如何, 总有

$$\begin{aligned} p_2 &< p_1, & p_0 &< p_1, \\ u_2 &< u_1, & u_0 &< u_1. \end{aligned}$$

在 (u, p) 平面上, 代表状态 (1) 的是曲线 L_1 下半支的起点, 状态 (2) 在该曲线上; 状态 (0) 时曲线 L_0 上半支的起点, 状态 (1) 在这支曲线上. 两曲线在 1 处两阶相切. 后面将证明, 随着绝热指数 γ 的不同, L_0 有可能在 L_1 的右边 (实线), 也有可能在左边 (虚线). 相互作用后得到的状态为 (m) , 为过 2 点的向后曲线 L_2 与曲线 L_0 的交点. 由图 3 看到, 由于 L_0 相对位置的不同, 交点 m 可能位于 L_2 的上半支或下半支. 即稀疏波追赶上冲击波后, 向后反射的波, 有可能是冲击波, 也有可能是稀疏波.

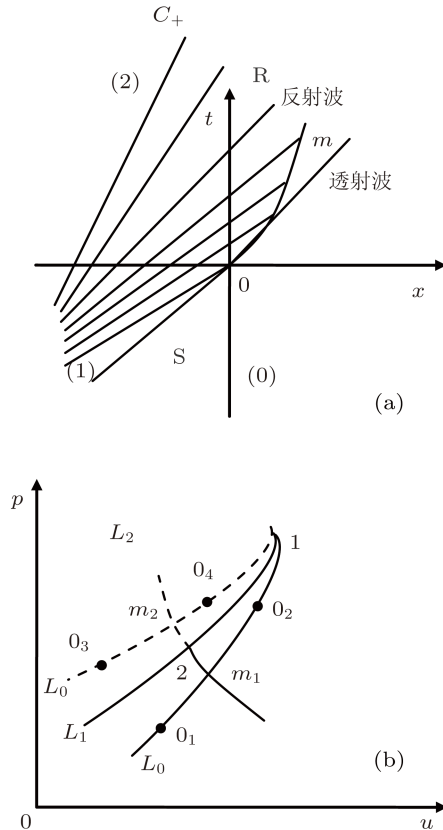


图 3 稀疏波追赶冲击波

另外, 随 R 强度不同, 状态 (2) 的压力 p_2 可能高于被压缩之前的压力 p_0 , 也可能低于 p_0 . 这表明, 在 (u, p) 平面上交点 m 可能在 L_0 的上半支, 也可能位于 L_0 的下半支. 因此, 向前透射的波可能是冲击波, 也可能是稀疏波.

根据以上讨论, 稀疏波 R 追赶冲击波 S , 可能有四种不同的结果. 为了分析方便, 我们固定状态 (2) 不变, 这样, 在 (u, p) 平面上, 相对于状态 (2), 状态 (0) 有四种可能的情况, 在图中分别记作 $0_1, 0_2, 0_3$ 和 0_4 . 点 0_1 及 0_3 的纵坐标低于点 2, 说明冲击波较强 (或稀疏波较弱); 点 0_2 及 0_4 的纵坐标高于

点 2, 代表冲击波较弱 (或稀疏波较强). 由图中可以看出, 有四种相互作用的结果, 是

RJS (交点 m_1 , 初状态为 0_1)

RJR (交点 m_1 , 初状态为 0_2)

SJS (交点 m_2 , 初状态为 0_3)

SJR (交点 m_2 , 初状态为 0_4)

以多方气体为例, 分析 L_0 和 L_1 的相对位置. 这里涉及的是 L_0 的上半支和 L_1 的下半支, 它们的方程分别是

$$L_0 \quad u = u_0 + \sqrt{\frac{2}{\rho_0}} \frac{p - p_0}{\sqrt{(\gamma + 1)p + (\gamma - 1)p_0}}, \quad (p > p_0), \quad (6)$$

强冲击波近似下

$$u = u_0 + \sqrt{\frac{2}{\rho_0}} \sqrt{\frac{p}{\gamma + 1}}, \quad (7)$$

$$L_1 \quad u = u_1 + \frac{2c_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - 1 \right], \quad (p \leq p_1). \quad (8)$$

在相同压力下, 两曲线相同压力下的速度之差记作 $f(p) = u(L_1) - u(L_0)$, 由 (6), (7) 式可得

$$f(p) = \sqrt{\frac{2}{\rho_0}} \sqrt{\frac{p_1}{\gamma + 1}} + \frac{2c_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - 1 \right] - \sqrt{\frac{2}{\rho_0}} \sqrt{\frac{p}{\gamma + 1}}. \quad (9)$$

当 $p \rightarrow \infty, f(p) \rightarrow \infty$. 且

$$f(p_1) = 0,$$

$$f'(p_1) = \frac{1}{\sqrt{\rho_0(\gamma + 1)p_1}} \left(\sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - \sqrt{\frac{1}{2}} \right),$$

$$f''(p_1) = \frac{1}{\sqrt{\rho_0(\gamma + 1)p_1^3}} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2}} - \frac{1 + \gamma}{2\gamma} \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right).$$

由此可得

当 $\gamma > 2$ 时, $f'(p_1) > 0$, 交点为 m_2 , 反射冲击波;

当 $\gamma = 2$ 时, $f'(p_1) = 0, f''(p_1) < 0$, 交点为 m_1 , 反射稀疏波;

当 $\gamma < 2$ 时, $f'(p_1) < 0$, 交点为 m_1 , 反射稀疏波.

在我们讨论的问题中, 冲击波相对稀疏波较强, 对应点 0_1 及 0_3 的情况, 透射波为冲击波. 在理想气体情况下, 稀疏波追赶强冲击波, 将反射稀疏波, 透射冲击波. 由于稀疏波的追赶, A_1 中传播的透射波 S_2 压力与速度逐渐减小, 最终透射的冲击波强度降低.

总的说来, 对于任意 X 射线辐射源, 当泡沫的初始密度满足 $Q = 0.065T_r^{2.5}/\rho_0 < 4$, 泡沫中就会有冲击波产生. 当该冲击波经过泡沫 - 固体界面, 由于界面失配, 会使得两种介质中烧蚀产生的冲击波强度增加, 有增压的效果. 而随着稀疏波 R_2 赶上, 冲击波的压力降低为无泡沫层时的烧蚀压 [8]. Al 固体中出现一个高压的短脉冲.

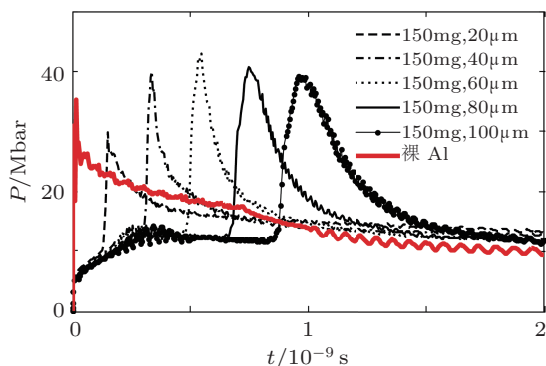


图 4 泡沫 - 固体靶中向前冲击波压强随时间变化曲线

3 模拟结果

利用辐射流体程序 MULTI^[9] 一维模拟, 本文计算了恒温 120 eV, 2 ns 辐射源作用在靶上的情况. 由公式 (1) 可知, 此时当 CH 初始密度大于 83 mg/cm³ 时, 泡沫层中才会有稳态的强冲击波产生, 从而由于界面失配在 Al 中产生高于 Al 自身烧蚀压的压力.

模拟中 CH, Al 采用理想气体参数, 计算了 CH 泡沫密度为 150 mg/cm³, 厚度从 20 μm 到 100 μm 的双层靶以及 Al 靶的情况, 模拟结果如图 4 所示. 图 4 横轴为时间, 纵轴为向前冲击波的压强, 由图中可见, 当泡沫厚度增加到 40 μm 以上时, 泡沫中才有稳态的冲击波, 使得 Al 中的压强增大. 同时, 高压的持续时间随着泡沫厚度的增加而增加, 这是由于稀疏波赶上冲击波的时间增加, 与 2.2 中我们理论分析的结果一致.

4 结论

本文提出当初始密度和辐射源满足 $Q = 0.065T_r^{2.5}/\rho_0 < 4$ 时, 泡沫中有强冲击波产生, 稳定的冲击波是增压产生的必要条件. 冲击波过界面的理论分析采用强波近似, 由强冲击波的解析关系, 得到固体靶中透射冲击波的压力与泡沫、固体密度, 泡沫中冲击波的压力的近似表达关系. 并由稀疏波和冲击波的作用关系, 分析了固体中的高压为短脉冲的原因. 模拟计算的结果验证了理论分析的结论.

进一步可设计实验来检验本文结论, 若得到实验验证, 对于利用增压现象展开的实验研究有参考价值, 为此类实验中源, 泡沫、固体的密度和厚度等参数提供设计依据. 高压脉冲的出现对实验方法和诊断^[10] 提出要求, 由于形成的高压不稳定, 传统的由平均速度反推冲击波压力的方法需要改进.

- [1] Dunne D, Borghesi M, Iwase A, Jones M W, Taylor R, Willi O 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 3858
- [2] Lindl J 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [3] Willi O, Barringer L, Bell A, Borghesi M, Davies J, Gaillard R, Iwase A, MacKinnon A, Malka G, Meyer C, Nuruzzaman S, Taylor R, Vickers C, Hoarty D, Gobby P, Johnson R, Watt R G, Blanchot N, Canaud B, Croso H, Meyer B, Miquel J L, Reverdin C, Pukhov A, Meyer-ter-Vehn J 2000 *Nucl. Fusion* **40** 537
- [4] Hall T, Batani D, Nazarov W, Koenig M, Benuzzi A 2002 *Laser Part. Beams* **20** 303
- [5] Temporal M, Atzeni S, Batani D, Koenig M 2000 *Eur. Phys. J. D* **12** 509
- [6] Atzeni S, Meyer-ter-Vehn J 2004 *The physics of inertial fusion*

(Oxford: Clarendon Press) p220

- [7] Li W X 2003 *One-Dimensional Nonsteady Flow and Shock Waves* p270 (in Chinese) [李维新 2003 一维不定常流与冲击波 (北京: 国防工业出版社) 第 270 页]
- [8] Zhang Y, Zheng Z Y, Li Y T, Liu F, Li H M, Lu X, Zhang J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5931 (in Chinese) [张翼, 郑志远, 李玉同, 刘峰, 李汉明, 鲁欣, 张杰 2007 物理学报 **56** 5931]
- [9] Ramis R, Schmalz R, Meyer-Ter-Vehn J 1988 *Comput. Phys. Commun.* **49** 475
- [10] Wang F, Peng X S, Liu S Y, Li Y S, Jiang X H, Ding Y K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 025202 (in Chinese) [王峰, 彭晓世, 刘慎业, 李永升, 蒋小华, 丁永坤 2011 物理学报 **60** 025202]

Pressure increase in foam-solid target from X-ray driven shock waves

Zhang Lu^{1)2)†} Yang Jia-Min¹⁾

1) (*Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(Received 5 January 2011; revised manuscript received 26 April 2011)

Abstract

A strong pressure increase is produced by X-ray heating a foam-solid target in comparison with heating directly the solid target, due to impedance mismatch at the foam-solid interface. We study the pressure increase of CH foam-aluminum target, and find that only by shock present in foam can the ablative pressure in aluminum increase. In this paper an analytical model based on strong wave assumption is developed to study the shock impedance mismatching crossing the interface and the interaction of rarefaction with shock. We evaluate the shock pressure amplified in the aluminum layer as a function of density and adiabatic exponent, and show that the amplified pressure is a short high pressure pulse which is destroyed by rarefactions. This is in agreement with simulation results by MULTI code.

Keywords: foam, shock wave, impedance mismatching, pressure increase

PACS: 52.35.Tc

† E-mail: l-z03@163.com