

三维柱腔内辐射输运的一维模拟

宋天明[†] 杨家敏

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2012 年 5 月 27 日收到; 2012 年 7 月 16 日收到修改稿)

在惯性约束聚变实验中, 使用一维辐射流体力学程序模拟辐射在管壁约束的介质中的传输, 因为无法考虑管壁辐射漏失等二维或三维边缘效应而引入了较大的误差. 通过解析的视角因子公式和反照率定标公式来模拟 X 射线在管壁中的损失以及腔壁开口的漏失等边缘效应, 对一维辐射流体力学程序 MULTI 的辐射输运计算进行了修改, 成功模拟了 X 射线辐照下金等离子体的界面运动轨迹, 比不考虑边缘漏失更接近实验测量结果, 证明了该方法的有效性.

关键词: 辐射输运, 辐射流体力学, 一维模拟, 视角因子

PACS: 52.25.Fi, 52.38.Ph, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.62.015210

1 引言

在惯性约束聚变、辐射输运、辐射流体力学等物理实验中, 使用强激光产生的 X 射线辐射源对柱腔约束下的样品进行加热, 以研究 X 射线辐射在不同介质中传输的特性以及对辐射能谱的改造^[1-6]. 为了对这一物理过程进行模拟, 国内外开发了很多辐射流体力学模拟程序, 包括一维模拟程序如 MULTI^[7]、RDMG^[8] 等, 二维程序如 LARED^[9]、LASNEX^[10] 等, 三维程序如 Hydra^[11] 等. 一维模拟程序一般模型简单, 运行时间较短. 而二维和三维程序往往需要耗费较多的计算资源并且需要运行较长时间. 因此, 经常将实验相关的物理问题简化为一维模型进行理论分析. 而辐射在柱腔中输运的过程中, 腔壁被烧蚀, 损失了辐射能量; 或者由于管壁上的诊断口造成了辐射的直接漏失. 由于涉及辐射与管壁作用的物理过程或靶的三维空间结构, 无法直接使用一维模拟程序进行模拟. 由于没有考虑二维或三维因素的影响, 一维模拟会给计算结果带来较大误差^[1].

本文首先介绍了针对一维模拟无法处理的边缘漏失对一维辐射流体力学程序 MULTI 的修正; 然后, 用修正后的程序对管壁等离子体运动实验

中 X 射线辐照产生的金等离子体的界面运动轨迹进行了模拟; 最后对程序修正的效果进行了总结和讨论.

2 辐射输运计算的修正

MULTI^[7] 是一维拉格朗日辐射流体力学模拟, 程序能够进行多群辐射输运的计算. 程序使用的不透明度数据用 SNOP 计算, 状态方程则使用 MPQeos 程序的 QEOS 模型^[12] 计算, 数据存储在 SESAME 格式的数据表格中, 计算时可实时调用.

在一维辐射输运的数值模拟中, 一个网格单元中的辐射输运如图 1 所示.

辐射流从左侧进入界面 1, 与网格内物质相互作用后从界面 2 流出, 进入下一个网格. 在三维空间中, 定义 F_{12} 为从界面 1 输运到界面 2 的辐射流份额, 它由视角因子决定. 对柱腔来说, 从圆柱体一个圆面到另一个圆面的视角因子有解析解. 假设圆柱腔半径为 r , 网格宽度为 a , 定义 $X = 2 + a^2/r^2$, 那么两个端面间的视角因子为 $F_{12} = (X - \sqrt{X^2 - 4})/2$. 假设在一个网格内物质是光学薄的, 那么从界面 1 进入网格并与管壁作用的辐射流份额为 $(1 - F_{12})$. 定义反照率 α 为再发射辐射流与入射辐射流的比值, 那么将有份额 $f_{\text{lost}} = (1 - F_{12})(1 - \alpha)$ 的辐射能

[†] 通讯作者. E-mail: tianming.song@gmail.com

流会在与管壁的相互作用中损失. 部分靶型为了完成测量而在输运管壁上开了诊断口, 输运管内的部分辐射通过诊断口完全漏失到管外, 定义这个份额为 f , 损失辐射的总份额为

$$f_{\text{lost}} = (1 - F_{12})(1 - (1 - f)\alpha), \quad (1)$$

那么除去管壁和诊断口带来的辐射能量损失, 剩余的 $1 - f_{\text{lost}}$ 将参与到与介质的相互作用并进入到一个网格中, 继续辐射输运过程. (1) 式中, 反照率 α 可以使用定标率公式来模拟计算, 诊断口引起的辐射能量损失份额 f 根据诊断口所占管壁的面积比来计算.

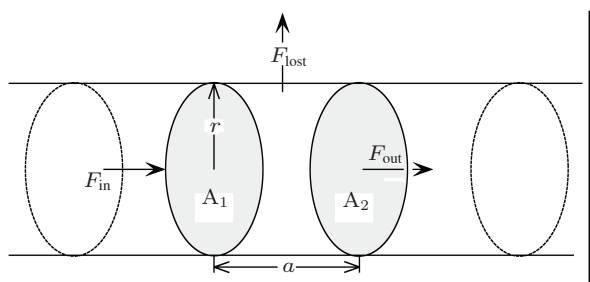


图1 模拟网格示意图

3 模拟算例

下面用一个实验算例来对计算程序的修正进行检验. Yang 等^[1]在神光 II 激光装置上进行了研究金壁等离子体运动的实验, 如图 2 所示. 实验中利用 1 ns 方波激光脉冲单端注入半黑腔产生的强 X 射线作为辐射源, X 射线从半腔靶底部进入输运柱腔. 半腔靶底部为防止散射激光直接加热样品, 安装了 $0.1 \mu\text{m}$ 的金膜和 $1 \mu\text{m}$ 的 CH 膜. 安装在半腔靶底部的金柱腔中填充 CH 泡沫, 在柱腔的底部有金平面靶, X 射线辐射输运到金平面靶后对其进行烧蚀, 产生向泡沫中运动的金等离子体. 通过在柱腔上开诊断口的方式, 使用 Ti 盘靶产生的 He- α 线发射作为背光源, 用 X 射线条纹相机对金等离子体的运动轨迹进行记录.

实验中还使用软 X 光能谱仪从激光注入口与黑腔对称轴呈 30° 方向观测半黑腔内的辐射温度, 测量的辐射温度如图 3. 数值模拟中以软 X 光能谱仪测量的辐射温度时间演化过程为输入条件, 直接模拟辐射在泡沫填充的输运管中的传输和与金平面靶的相互作用.

通过背光照相, 用条纹相机测得了金等离子体运动的轨迹, 实验数据如图 4. 去掉初始加速阶段,

对线性运动阶段的界面数据进行线性拟合, 得到等离子体界面运动速度约为 37.5 m/s.

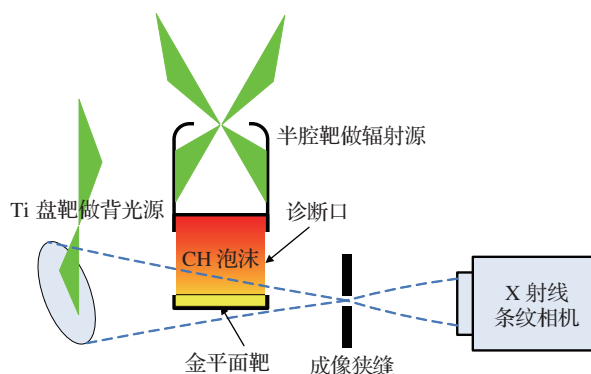


图2 管壁等离子体运动实验示意图

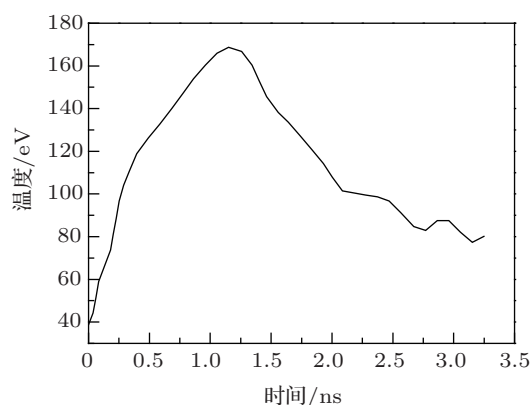


图3 黑腔内辐射温度随时间的演化

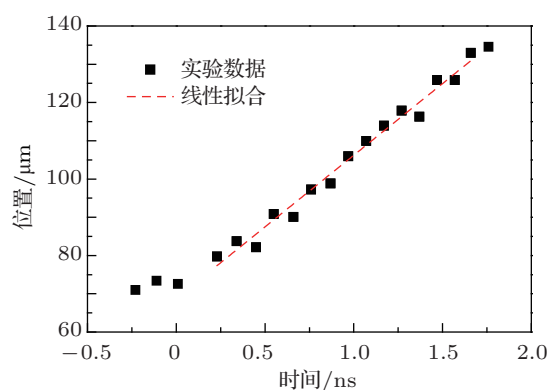


图4 实验测量的等离子体界面位置和拟合曲线

Yang 等使用一维辐射流体力学模拟程序 RTMG 以及二维辐射输运模拟程序 LARED-R 进行了模拟计算. 结果显示, 一维程序由于没有考虑管壁漏失等边缘效应, 模拟结果与实际不符, 而二维辐射输运模拟结果更接近实测结果^[1]. 我们使

用一维 MULTI 程序对管壁运动进行模拟, 考虑金和 CH 膜以及柱腔中填充的泡沫和金平面靶四层材料, 用软 X 光能谱仪测得的辐射流作为辐射源. 不考虑管壁反照和漏失, 那么金等离子体向上运动的速度约为 58.6 km/s. 这个数值与实验结果相差较大, 因此必须考虑管壁反照和漏失的影响. 实验中使用的靶型除了存在管壁吸收带来的辐射能量损失外, 管壁上还开有两个诊断口, 这使得管靶不是轴对称, 而是三维的. 使用本文介绍的方法, 金壁的反照率使用 $\alpha = (1 + 0.32T^{-0.7}t^{-0.38})^{-1}$ [13], 根据诊断口在管壁上所占空间比例计算经过柱腔壁上的开口的漏失约为 15.6%. 通过模拟计算得到的金等离子体界面运动速度约为 38 km/s. 数值模拟和实验测量得到的金等离子体界面运动轨迹见图 5. 可见, 通过添加辐射能量损失等边缘效应对输运计算进行修正, 模拟得到的金等离子体界面运动轨迹和实验测量的结果符合较好; 图中还给出了 LARED-R 二维程序模拟的结果.

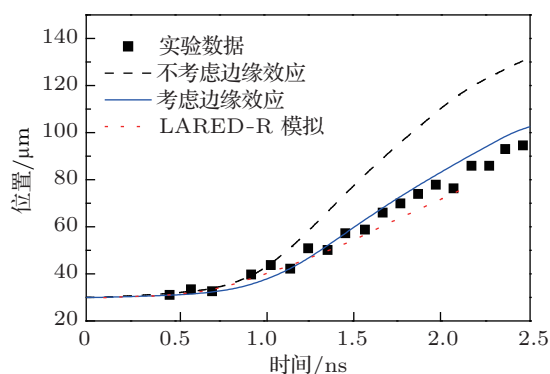


图 5 MULTI 修正前后的模拟结果

从图 5 中还可以看到, 模拟结果和实验测量结果仍有一些差异. 除了程序数值模拟受网格划分、不透明度等参数误差的影响之外, 二者的误差还包括: 上述模型中只考虑了辐射的漏失和损失, 没有考虑流体运动受管壁的影响所产生的二维效应 (本算例中管子的长径比较小, 这一项影响较小); 另外实验测量中金等离子膨胀时存在密度变化, 实验数据处理时界面的提取也存在误差, 等等.

4 结论

通过对一维辐射流体力学程序的改进, 使用视角因子和反照率定标公式将管壁上的辐射能量损失等边缘效应考虑到一维辐射输运模拟中, 使一维程序能够对二维或三维柱腔辐射的漏失进行模拟计算. 对管壁等离子体运动实验中一个有诊断口的柱腔靶的模拟, 成功将诊断口漏失和管壁吸收的辐射能损失考虑进来, 得到了和实验测量结果相近的金等离子体界面运动轨迹.

数值实验证明, 通过视角因子和反照率定标公式将管壁漏失添加到辐射输运中能够在一维模拟程序中反映简单二维或三维空间中的一些物理现象, 因而可以快速实现对某些三维辐射输运问题的近似模拟. 用快捷的一维模拟计算确定了关键参数范围后再使用需要较多计算资源和计算时间的二维、三维等更复杂模拟程序进行更深入准确的计算, 可以有效节约计算资源, 方便我们对这些物理现象的研究.

- [1] Yang J, Meng G, Zhu T, Zhang J, Li J, He X, Yi R, Xu Y, Hu Z, Ding Y, Liu S, Ding Y 2010 *Phys. Plasmas* **17** 1
- [2] Back C A, Bauer J D, Hammer J H, Lasinski B F, Turner R E, Rambo P W, Landen O L, Suter L J, Rosen M D, Hsing W W 2000 *Phys. Plasmas* **7** 2126
- [3] Back C A, Bauer J D, Landen O L, Turner R E, Lasinski B F, Hammer J H, Rosen M D, Suter L J, Hsing W W 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 274
- [4] Jiang S E, Xu Y, Ding Y K, Lai D X, Zheng Z J, Sun K X, Huang Y X, Hu X, Yi R Q, Cui Y L 2005 *Sci. China G Physics Mechanics & Astronomy* **35** 473 (in Chinese) [江少恩, 许琰, 丁永坤, 赖东显, 郑志坚, 孙可煦, 黄翼翔, 胡昕, 易荣清, 崔延莉 2005 中国科学 G 辑物理学力学天文学 **35** 473]
- [5] Jiang S E, Sun K X, Huang T X, Cheng J X, Ding Y K, Hu X, Cui Y L, Chen J S, Yu Y N, Zheng Z J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1425 (in Chinese) [江少恩, 孙可煦, 黄天暄, 成金秀, 丁永坤, 胡昕, 崔延莉, 陈久森, 于艳宁, 郑志坚 2004 物理学报 **53** 1425]
- [6] Cheng J X, Miu W Y, Sun K X, Wang H B, Yang J M, Cao L F, Wen T S, Chen Z L, Yang C B, Jiang S E, Cui Y L, Tang X Q, Yu Y N, Chen J S 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 282 (in Chinese) [成金秀, 缪文勇, 孙可煦, 王红斌, 杨家敏, 曹磊峰, 温天舒, 陈正林, 杨存榜, 江少恩, 崔延莉, 汤小青, 于艳宁, 陈久森 2000 物理学报 **49** 282]
- [7] Ramis R, Schmalz R, Meyer-ter-Vehn J 1988 *Comput. Phys. Commun.* **49** 475
- [8] Gu P J, Pei W B, Feng T G, Wa C S 2005 *Sci. China G Physics, Mechanics & Astronomy* **48** 345
- [9] Zhu S P, Zhang W Y 2006 *Journal of the Korean Physical Society* **49** 33
- [10] Harte J A, Alley W E, Bailey D S, Eddleman J L, Zimmerman G B 1997 1996 Lawrence Livermore National Laboratory ICF Annual Report UCRL-LR-105821-96 150
- [11] Marinak M M, Kerbel G D, Gentile N A, Jones O, Munro D, Pollaine S, Dittrich T R, Haan S W 2001 *Phys. Plasmas* **8** 2275
- [12] More R M, Warren K H, Young D A, Zimmerman G B 1988 *Phys. Fluids* **31** 3059
- [13] Lindl J, 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933

One-dimensional simulation of radiation transport in three-dimensional cylinder

Song Tian-Ming[†] Yang Jia-Min

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

(Received 27 May 2012; revised manuscript received 16 July 2012)

Abstract

In indirect driven inertial confinement fusion experiments, one-dimensional radiation hydrodynamics code is used to simulate radiation transport in material confined in a cylinder and large bias is generated due to two- or three-dimensional lateral effects like energy losses into the cylinder wall. Lateral X-ray radiation losses such as cylinder wall loss and direct leak from the detection holes are simulated through analytical view factor equations and albedo power laws. Modifications are made for a one-dimensional radiation hydrodynamics code MULTI which is successfully used in the simulation of measured hydrodynamic trajectory of X-ray-heated gold plasma and better result is obtained than without taking lateral effect into account, which proves that this modification is practical.

Keywords: radiation transport, radiation hydrodynamics, one-dimensional simulation, view factor

PACS: 52.25.Fi, 52.38.Ph, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.62.015210

[†] Corresponding author. E-mail: tianming.song@gmail.com