

## 低密度泡沫金激光—X 射线转换特性模拟研究\*

董云松<sup>1)2)</sup> 杨家敏<sup>1)†</sup> 张璐<sup>1)</sup> 尚万里<sup>1)</sup>

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)

(2012 年 8 月 14 日收到; 2012 年 11 月 10 日收到修改稿)

在激光间接驱动惯性约束聚变中, 激光首先与黑腔壁高  $Z$  等离子体相互作用转换成强 X 射线辐射, 再通过高  $Z$  腔壁的 X 射线再辐射而在靶丸表面产生对称辐射以驱动其内爆, 改善腔中激光—X 射线转换特性非常重要. 利用一维辐射流体程序模拟研究了低密度泡沫金对激光—X 射线转换特性的影响, 结果表明: 在固定激光参数条件下, 随着 Au 材料密度降低, 激光—X 射线转换效率提高, 当泡沫 Au 密度为  $0.1 \text{ g/cm}^3$  时, 转换效率相对提高 19%; 同时, 金 M 带辐射份额随之减少; 对于发光区运动, 存在合适的泡沫 Au 密度使其得到有效抑制. 从能量平衡的角度分析了转换效率提高的原因: 在激光与低密度泡沫 Au 作用时, 转换为流体力学动能损耗的能量份额与固体 Au 相比有所降低, 因而相应的辐射能份额增加. 低密度泡沫 Au 改善激光—X 射线转换特性是实现黑腔腔壁优化的一种途径, 模拟结果为进一步开展相应实验研究提供了依据.

关键词: 泡沫金, 激光—X 射线转换, 辐射谱, 等离子体运动

PACS: 52.50.Jm, 52.38.Ph

DOI: 10.7498/aps.62.075203

## 1 引言

惯性约束聚变 (ICF) 是未来人类获取清洁、可控、高效能源的重要可能途径之一. 由于直接驱动 ICF 对激光器的光束辐照均匀性和一致性有较高要求, 目前激光 ICF 研究主要采用间接驱动方式<sup>[1]</sup>. 在间接驱动黑腔物理中, 激光注入高  $Z$  黑腔后转换为 X 射线辐射辐照靶丸, X 射线辐射流的强度和品质是实现聚变点火燃烧的基础, 因此对激光—X 射线转换特性的研究具有重要意义. 激光—X 射线转换特性包括激光—X 射线转换效率、辐射谱分布以及等离子体发光区运动三个方面. 激光—X 射线转换效率是入射激光能量转换成 X 射线辐射能量的份额, 是决定黑腔辐射流强度的重要参数之一, 提高转换效率能够降低对激光器的输出能量要求; 腔内高  $Z$  金等离子体产生的高能区 (2—5 keV) 金 M 带 X 射线会预热靶丸燃料使其不能得到有效压缩, 因此降低辐射谱 M 带份额可以改善内爆压缩效

率; 另外, 黑腔中等离子体运动可能造成堵腔和发光面的移动, 降低靶丸的辐照对称性, 也需要采取有效抑制措施.

从上世纪 80 年代起国内外学者在相关领域开展了大量的理论、模拟和实验研究<sup>[2–13]</sup>, 其中以美国利弗莫尔国家实验室以及德国 Max-Planck 量子研究所的工作最具代表性, 它们分别利用辐射流体程序 LASNEX 和 Multi 进行模拟研究并开展实验验证<sup>[2–6]</sup>, 建立了激光烧蚀高  $Z$  固体靶的基本物理模型; 国内张钧等人利用自相似解方法获得激光烧蚀平面靶的数值定标规律, 与国外发表数据基本一致<sup>[7]</sup>; 近几年, 国内外学者在 Au-M 带的测量<sup>[8]</sup>、黑腔腔壁等离子体运动<sup>[9]</sup> 以及激光—X 射线转换效率<sup>[10]</sup> 方面开展了进一步的模拟与实验研究工作. 激光—X 射线转换效率与激光束参数、靶参数等因素强烈相关, 通常的激光固体靶相互作用研究发现, 在激光功率密度大于  $10^{13} \text{ W/cm}^2$  的范围内, 激光功率密度越大, 波长越长, 转换效率越低; 脉冲宽度越大, 转换效率越高<sup>[11]</sup>. 黑腔壁一般选用金材

\* 中国工程物理研究院重点发展基金 (批准号: 2011A0102005) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yjm70018@sina.cn

料, 1992年 Nishimura 等研究发现混合高  $Z$  材料能够提高其不透明度而增加 X 射线发射<sup>[12]</sup>; 2005年, Rosen 等模拟研究了低密度泡沫 Au 对辐射再发射率的影响, 发现与固体金相比, 泡沫金腔壁的 X 射线辐射能量损失可降低 17%<sup>[13]</sup>; 2008年, Young 等利用低密度的替代材料  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  泡沫对 Rosen 的模拟结果进行了实验验证<sup>[14]</sup>; 2011年, Zhang 等模拟发现密度梯度泡沫材料能够降低腔壁能量损失达 40%<sup>[15]</sup>. 这些研究为改善腔中辐射特性提供了思路, 高  $Z$  混合材料和低密度泡沫材料是其中两种重要的途径, 混合材料改善腔中辐射的可行性已经得到验证<sup>[16]</sup>. 低密度泡沫 Au 材料提高辐射再发射率原因之一在于低密度泡沫材料能减少辐射流体力学能量损失, 基于同样机理, 泡沫高  $Z$  材料在提高激光—X 射线转换效率、降低 M 带份额及抑制发光区运动方面也存在可能性, 但是金属材料密度对激光—X 射线转换的影响目前还未见详细研究. 本文利用一维辐射流体力学程序模拟研究了低密度泡沫 Au 材料对激光—X 射线转换特性的改善效应.

## 2 激光烧蚀泡沫金的辐射流体力学模拟

利用辐射流体程序 Multi-1D<sup>[17]</sup> 对激光烧蚀 Au 平面靶与泡沫 Au 平面靶过程进行模拟研究. Multi-1D 采用稳态近似模型, 考虑了激光烧蚀高  $Z$  靶的主要物理机理, 激光能量通过逆韧致过程被吸收, 忽略散射, 能量的输运包括 X 射线辐射输运和限流的电子热传导, 在一维情形下能给出物质状态以及能流分布相对精确的结果. 在文献 [3] 中, Eidmann 利用 Multi-1D 程序建立了激光烧蚀高  $Z$  材料的基本物理模型, 并与理论分析结果一致<sup>[2]</sup>, 表明 Multi-1D 程序在表征基本物理规律的角度上是可靠的.

模拟计算中, 材料基本参数以表格的形式载入程序, Au 状态参数取自 SESAME 数据库, 分群的吸收系数和发射系数取自 SNOP 计算结果, 谱共分 20 群, 因此能得到低分辨率的 X 射线辐射谱分布. 通常电子热传导的限流因子在 0.03—0.08 之间取值<sup>[17]</sup>, 模拟中取典型值 0.03 与 0.08 作为比较. 这些参数的选择与文献 [6] 一致.

选择三倍频 ( $\lambda = 0.351 \mu\text{m}$ )、功率密度为  $6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  的 1 ns 方波脉冲激光作为入射源, 在焦斑大小为  $450 \mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$  时对应激光能量

1200 J.

在 Multi-1D 模拟的平面一维情形下, 为保证网格划分的一致性, 通常固定平面靶的面密度, 即改变 Au 材料密度时其厚度随密度呈反比变化. 选取固体 Au 靶参数为密度  $19.2 \text{ g/cm}^3$ 、厚度  $10.4 \mu\text{m}$ , 则相应泡沫 Au 靶参数为: 密度  $10 \text{ g/cm}^3$ 、厚度  $20 \mu\text{m}$ ; 密度  $5 \text{ g/cm}^3$ 、厚度  $40 \mu\text{m}$ ; 依次类推, 取材料最低密度为  $0.05 \text{ g/cm}^3$ .

## 3 模拟计算结果与讨论

### 3.1 不同密度金平面靶激光—X 射线转换效率

图 1 给出了在给定参数激光辐照条件下, 激光—X 射线转换效率  $\eta$  随 Au 材料初始密度变化的关系. 从图 1 可见, 在考察的 Au 材料密度范围内, 随着 Au 初始密度的降低得到单调升高的  $\eta$ , 在激光条件相同时意味着更高的辐射流强度, 且  $f = 0.08$  时激光—X 射线转换效率高于  $f = 0.03$  的情况. 定义低密度泡沫 Au 激光—X 射线转换效率  $\eta^f$  与固体 Au 激光—X 射线转换效率  $\eta^s$  之比为相对增长因子  $a = \eta^f / \eta^s$ , 其表征不同密度泡沫材料对激光—X 射线转换效率的相对提升倍数, 密度越低相对提升倍数越高, 且限流因子为 0.03 时提升更明显. 特别地, 当  $f = 0.08$ ,  $\rho = 0.1 \text{ g/cm}^3$  时, 泡沫 Au 与固体 Au 相比转换效率相对提高 19%. 前面提到, 泡沫 Au 能够提升 X 射线再发射率<sup>[12–15]</sup>, 再结合泡沫 Au 对提高激光—X 射线转换效率的作用, 有可能实现泡沫 Au 更加显著提高黑腔辐射流的效果.

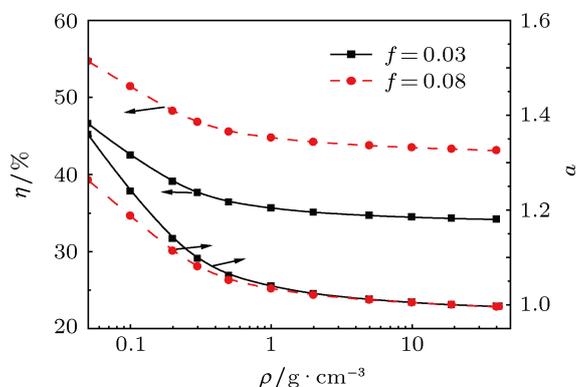


图 1 激光—X 射线转换效率随 Au 密度变化关系

首先分析限流因子的影响. 除了直接的 X 射线辐射输运, 电子是激光能量传输到超临界密度

区域的重要载体,特别是在密度梯度很大的临界面附近,电子热传导起主导作用<sup>[18]</sup>.限流因子表征对电子热传导的限制,取值越小意味着抑制作用越明显.图2是激光烧蚀0.5 ns时等离子体状态的空间分布,横坐标为Lagrange空间位置.根据温度密度分布可将等离子体分为两个区域,图2中小于 $2.5 \times 10^{-4} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的区域称为转换层,具有温度高、密度低特点;大于 $2.5 \times 10^{-4} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的区域温度低、密度高,称为再发射层,具有光性厚特点,是X射线的主要发射区域<sup>[2,3]</sup>.对于 $0.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 泡沫Au,  $f = 0.08$ 时再发射区的温度大于 $f = 0.03$ 的情况,表明电子向内层输运能量更多,而再发射区光性厚等离子体具有近黑体辐射的性质,辐射强度只与温度 $T$ 有关且正比于 $T^4$ ,同等激光条件下 $f = 0.08$ 的X射线辐射流强度更高,因此图1中 $f = 0.08$ 时激光—X射线转换效率大于 $f = 0.03$ ,更大的限流因子有利于能量输运而增加辐射;另外,图1中 $f = 0.03$ 时随着泡沫Au密度降低相对增长倍数更大也是因为其作为归一化因子的固体Au激光—X射线转换效率为34.3%,小于 $f = 0.03$ 时的43.3%.

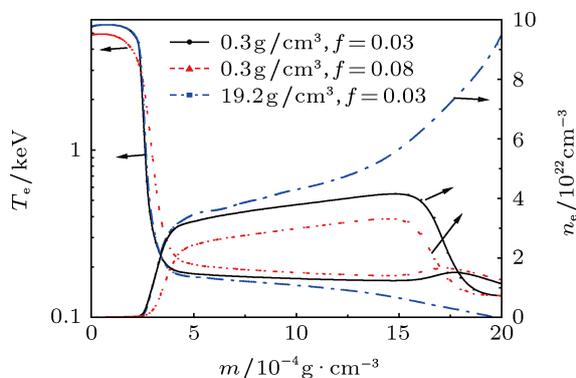


图2 0.5 ns时等离子体温度密度空间分布

从能量平衡角度来理解激光—X射线转换效率提高的原因.激光能量的分配包括粒子内能、粒子动能与辐射能三类.同一网格内离子和电子定向移动速度一致,但由于离子质量远大于电子质量,因此电子动能与离子动能相比可忽略.从图3中激光烧蚀 $0.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 泡沫Au靶的等离子体临界面粒子温度和密度随时间演化过程可以看出,电子温度 $T_e$ 、离子温度 $T_i$ 与电子密度 $n_e$ 、离子密度 $n_i$ 在较宽的时间尺度内满足: $T_e > 2T_i$ ,  $n_e > 50n_i$ ,而内能正比于 $n_e \cdot k_B T_e$ ,因此离子内能小于电子内能的1%而

可忽略,此结论可扩充至总电子内能和总离子内能的关系,总能量份额分配结果验证了这一点.

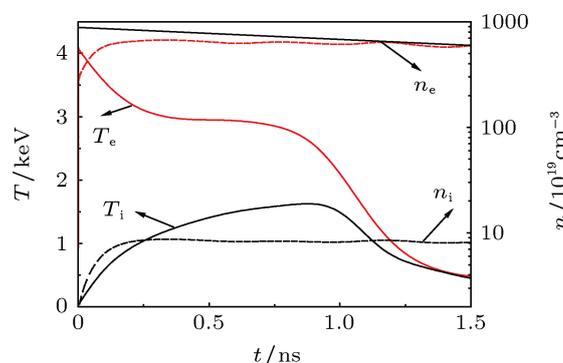


图3 临界面位置粒子温度与密度随时间演化过程

因此,参与激光烧蚀高Z靶过程中能量平衡的物理量只需考虑:作为能量入射源的激光能量以及作为能量损耗项的电子内能、离子动能和辐射能.

$$E_{\text{Laser}} = E_{\text{IE}} + E_{\text{II}} + E_{\text{KE}} + E_{\text{KI}} + E_{\text{RAD}} \approx E_{\text{IE}} + E_{\text{KI}} + E_{\text{RAD}}, \quad (1)$$

其中, $E_{\text{Laser}}$ 是入射激光能量, $E_{\text{IE}}$ , $E_{\text{II}}$ 分别为总电子内能和总离子内能, $E_{\text{KE}}$ , $E_{\text{KI}}$ 分别为总电子动能和总离子动能, $E_{\text{RAD}}$ 表示总辐射能.

图4表示1 ns方波激光烧蚀 $0.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 泡沫Au平面靶的入射激光能量分配时间过程,纵坐标 $S_{\text{int}}$ 为累计能流强度.可以看出,入射激光与高Z靶作用时首先将大部分能量转移给电子,被加热的电子通过碰撞将能量转移给原子和离子使之电离、激发并辐射X射线.同时,靶表层等离子体由于巨大的压力梯度向外飞散而驱动产生稀疏波,作为流体力学动能损耗不利于激光—X射线转换.随着时间推移,电子内能、离子动能与辐射能逐步增加,但占入射激光能量的份额相对固定,电子内能是激光能量被吸收后的主要载体,占50%左右的能量份额.当1 ns激光脉冲停止后,等离子体失去能量来源逐步冷却,电子内能降低并转换为辐射能与离子动能.

考虑能量分配随Au密度的关系,图5是各种总能量占入射激光能量份额P的分配情况.先关注电子内能,随着Au初始密度的降低,电子内能占总入射能量的份额缓慢增长,增长量小于3%,表明在选定的Au参数条件下,泡沫Au密度对电子内能的影响很小.根据(1)式,电子内能随Au密度变化很小,则离子动能与辐射能之和占总能量份额也

相对固定,因此离子动能和辐射能是相互竞争、此消彼长的物理量. 可以看到,取限流因子为 0.03,当 Au 密度从  $19.2 \text{ g/cm}^3$  降低到泡沫 Au 的  $0.1 \text{ g/cm}^3$  时,离子动能占总能量份额从 51%降低到 39%,相应辐射能占总能量的份额增加了 8%左右. 图 2 中包含材料初始密度对等离子体温度、密度分布的影响,与固体 Au 相比,低密度  $0.3 \text{ g/cm}^3$  泡沫 Au 的再发射区有更高的电子温度,因而有更多的辐射能份额. 图 4 中考虑了限流因子对能量分配的影响, $f = 0.03$  时的电子内能份额较高,这是因为电子内能正比于密度  $n_e$ 、温度  $T_e$  的乘积  $n_e \cdot T_e$ ,结合图 2,虽然  $f = 0.03$  时再发射区温度  $T$  稍低,但其密度  $n$  比  $f = 0.08$  高且使  $n_e \cdot T_e$  更大;另外,前面提到限流因子大有利于能量运输而增加辐射,图 4 中同样密度条件下  $f = 0.08$  时辐射能比例要高 5%左右,相应离子动能降低 5%.

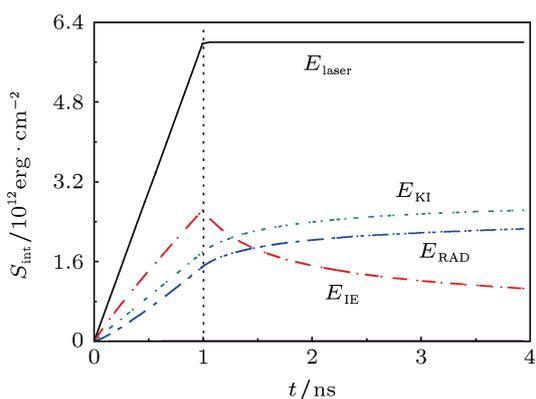


图 4 入射激光能量分配时间过程

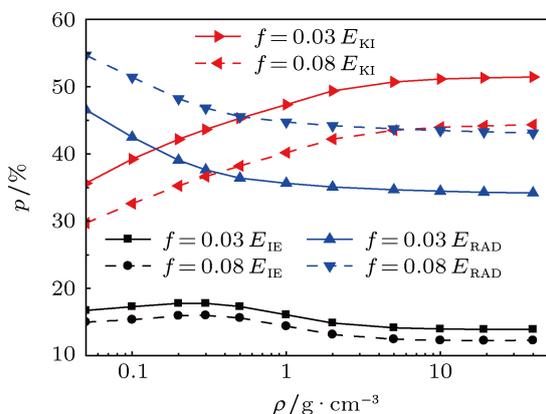


图 5 时间积分总能量分配随 Au 密度关系

通过能量平衡随时间以及密度演化的过程可以发现:在激光脉宽时间 (1 ns) 内,电子内能、离子动能、辐射能按固定比例分配入射激光能量,且激

光能量主要转换为电子内能,离子动能与辐射能是相互竞争的物理量,它们的相对大小与泡沫密度有关,泡沫密度越低辐射能份额越高;激光脉冲结束后,体系无能量来源,电子内能逐步转换为辐射能和离子动能.随着泡沫密度的降低,电子内能增长缓慢,但离子动能份额降低,相应辐射能更多,离子动能的减少量基本等于辐射能的增加量,表明低密度泡沫 Au 能够降低入射激光能量转换为等离子体流体力学动能的损耗,这是泡沫 Au 能够提高激光—X 射线转换效率的主要原因.理论上,对于低初始密度的 Au 材料,其驱动稀疏波的等离子体梯度较固体 Au 而言要小,图 2 中电子密度分布可以验证这一点,因此稀疏波所携带的能量相应减少,这是泡沫材料降低流体力学动能损耗的根本原因.

在泡沫材料提高再发射率的研究中,研究者发现随着 Au 材料密度降低存在密度最优解使腔壁上的能量损耗最小 [12];而泡沫 Au 密度降低时,激光—X 射线转换效率单调增加.造成这种区别的主要原因在于 Au 状态参数的影响,文献 12 中状态方程选择的是  $e = e_0 T^{1.6} / \rho^{0.14}$ ,随着密度降低,等离子体比内能增加,在低密度时相应电子内能的份额增加,抵消密度减小对流体力学能量损失的降低效应,而图 3 则表明这里选定的 Au 状态参数对电子内能的影响很小.

### 3.2 不同密度金平面靶 Au-M 带份额

模拟中选择多群的 Au 不透明度参数 (100—5000 eV, 20 群),可得到简化的发射谱及 M 带份额,图 6 表示泡沫金密度对 1 ns 时间积分发射谱 M 带份额  $P_M$  的影响.随着泡沫密度的降低, $P_M$  也随之单调减小,表明泡沫 Au 能够改善辐射品质.特别地, $f = 0.03$  时  $0.1 \text{ g/cm}^3$  泡沫 Au 与固体 Au 相比,M 带份额从 19%降低到 16%.

考虑限流因子的影响,在大于  $0.1 \text{ g/cm}^3$  的密度范围内, $f = 0.03$  时 M 带份额要大于  $f = 0.08$ ,即限流更明显时 M 带份额高.这是比较容易理解的,限流作用显著则电子输运到内层的能量较低,转换为软 X 射线的强度也就相应减小,图 7 可以验证这一点.同样的密度条件下, $f = 0.03$  与  $f = 0.08$  相比 M 带谱强度有一定差别,但前者软 X 射线发射少得更多,因而在大于  $0.1 \text{ g/cm}^3$  的密度范围内前者 M 带份额更高.另外,虽然  $f = 0.08$  的 M 带份额较低,但 M 带的绝对强度却更高,这是由于此时电子密度梯度不如  $f = 0.03$  时那么陡峭,图 2 中  $f = 0.08$  时

冕区的电子密度稍高,在发射率相同时意味着更高的辐射流.

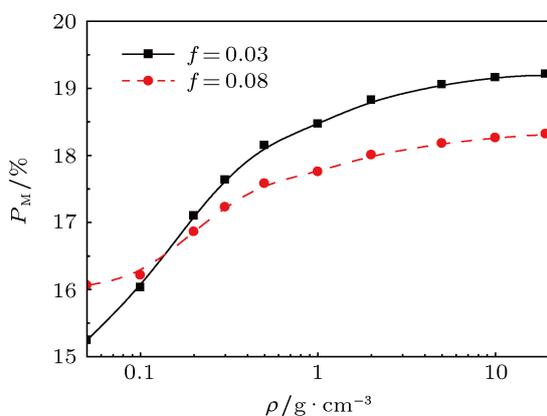


图6 Au-M带份额随Au密度关系

实际上, M带份额  $P_M$  是辐射谱中 M带能区的总能量与辐射谱总能量之比,其降低包含有两种可能性:一是 M带能区谱绝对强度的降低;二是辐射谱总能量的提高而使 M带份额相对降低.这两种情况有一定区别,前者是从根本上减小 M带强度,抑制其对靶丸的预热而提高靶丸内爆压缩效率;后者则提高了黑腔温度,但不能降低对靶丸的预热效应.

图7表示 1 ns 时间积分辐射强度  $I_\nu$  的谱分布情况,可以看出泡沫 Au 降低 M带份额属于第二种情况.同样的限流因子,泡沫 Au 与固体 Au 相比 M带强度的绝对量基本不变,这可以从图2中两种情形下冕区的温度、密度截面一致得到验证,是由于软 X射线发射的加强才使得 M带在总能流中相对比例的下降.因此,有必要寻找更合适的抑制 M带绝对强度的途径.2008年, Dewald 实验验证混合材料能够降低 M带份额<sup>[19]</sup>,将此结果结合泡沫高 Z材料降低流体力学动能损耗的思想,可以预期低密度泡沫混合材料具有重要的研究前景.

### 3.3 不同密度金平面靶等离子体发光区运动

激光烧蚀靶时等离子体是 X射线辐射的来源,软 X射线辐射来自超临界密度区等离子体的发射, M带 X射线辐射来自冕区等离子体的发射<sup>[20]</sup>,因此在黑腔中等离子体的运动除了可能造成堵腔外,还表征发光区的运动.事实上,黑腔中软 X射线有两部分来源,分别是激光烧蚀区域转换的软 X射线

以及黑腔内壁其他位置辐射再发射的软 X射线,因此激光烧蚀区域软 X射线发光区运动对靶丸辐照对称性的影响只占软 X射线发光区运动对辐照对称性总体影响的一部分.然而,激光烧蚀区是 M带 X射线的主要来源, M带辐射对靶丸辐照对称性的影响主要来自此区域,在讨论激光烧蚀平面靶的等离子体发光区时,抑制 M带发光区的运动显得尤为重要.

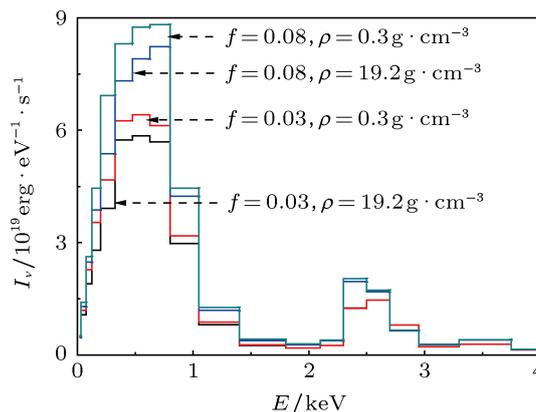


图7 不同密度下激光转换 X射线辐射谱分布

首先要确定可以表征发光区运动的空间位置.图8是激光烧蚀  $0.3 \text{ g/cm}^3$  泡沫 Au 平面靶 0.5 ns 时的发光区状态,  $\partial S / \partial m$  是空间微分的辐射比强度,体现了不同空间位置对总辐射强度的贡献大小,其取最大值的位置发光最强.实际上,此发光最强的位置处于临界面(电子密度为等离子体临界密度  $n_c$  的界面)附近,是再发射区的边界,内层密度高、温度低等离子体产生的软 X射线均从这里发射,因而  $\partial S / \partial m$  最大值的时间演化过程可以用来表征软 X射线发光区的运动.冕区等离子体的辐射比强度  $\partial S / \partial m$  随空间位置单调增加,这与电子密度空间分布一致,冕区电子密度越高 X射线发射越强.为了表征 M带发光区的运动,可以选择冕区  $\partial S / \partial m$  取值高但电子温度  $T$  尚未明显下降的位置,  $0.2n_c$  是个不错的选择.

图9(a)表示材料初始密度对软 X射线发光区运动的影响.激光初始时刻从负方向入射到 0 位置,纵坐标为 Euler 空间位置  $X$ .可以看出,固体 Au 时软 X射线发光区空间位置运动较小,随着 Au 材料密度降低,发光区的向外膨胀运动得到抑制,但在密度进一步降低时等离子体形成向内层的收缩运动而影响辐照对称性,因此存在合适密度使得软 X射线发光区位置运动最小.另外,由于激光只能在

低于临界密度的区域传播, 而处于临界面附近的软 X 射线发光区能够体现激光烧蚀深度, 可以认为激光在与低密度 Au 靶作用时有更大的烧蚀深度. 图 9(b) 是不同材料密度时  $0.2n_c$  等离子体界面的时间演化情况, 表征 M 带发光区的运动. 可以看到, 区别于软 X 射线发光区情况, 固体 Au 时 M 带发光区存在明显的向外膨胀, 如果是在黑腔中将会堵腔并影响靶丸的辐照对称性, 而低密度泡沫 Au 材料对抑制 M 带发光区向外膨胀有显著效果,  $0.3 \text{ g/cm}^3$  泡沫密度时 M 带发光区向外最大移动小于  $50 \mu\text{m}$ , 不足固体 Au 运动距离的一半, 但密度进一步降低时冕区也存在明显的收缩运动而影响辐照对称性, 因此对于低密度泡沫 Au 材料, 也存在合适密度能够有效抑制 M 带发光区的运动. 需要注意的是, 有效抑制 M 带发光区运动的泡沫 Au 密度与有效抑制软 X 射线运动的泡沫 Au 密度并不一致,  $0.3 \text{ g/cm}^3$  泡沫密度时 M 带发光区得到有效抑制但软 X 射线发光区却有明显的收缩运动. 对于激光烧蚀靶情况, 抑制 M 带发光区运动显得更为重要, 因此在选择泡沫 Au 密度时以有效抑制 M 带发光区运动为主要依据.

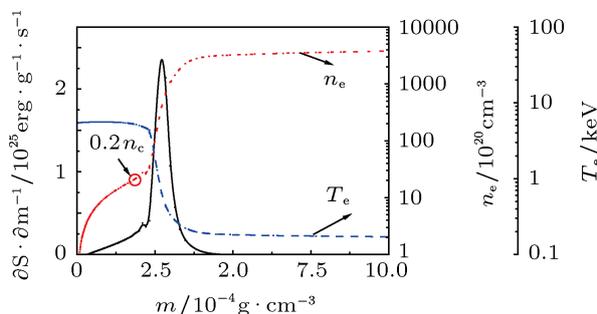


图 8 0.5 ns 时等离子体发光区状态

对于低密度泡沫 Au 材料, 存在合适的密度使得等离子体发光区运动得到有效抑制, 其原因与泡沫 Au 提高激光—X 射线转换效率的原因是一致的. 考虑能量平衡, 离子动能与辐射能是相互竞争的物理量, 随着泡沫密度的降低, 辐射能份额增加, 转换为等离子体流体力学动能的份额降低, 其驱动稀疏波的等离子体梯度减小, 等离子体运动得到抑制. 需要注意的是, 虽然趋势一致, 但腔靶情况不同于平面靶, 前者对辐射有束缚作用, 腔靶情况下低密度泡沫 Au 对等离子体运动的影响有待进一步研究. 另外, 在讨论发光区运动时, 不同能区辐射对靶丸辐照对称性的影响是不同的, 分能区研究辐射对

靶丸辐照对称性的影响有重要意义.

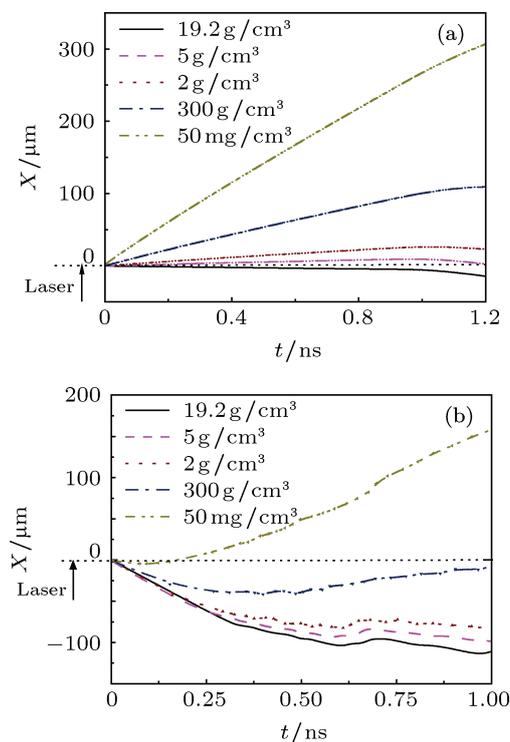


图 9 不同密度泡沫 Au 发光区运动情况 (a) 软 X 射线发光区; (b) M 带发光区 ( $0.2n_c$  界面)

辐射流体模拟结果验证了低密度泡沫 Au 材料改善激光—X 射线转换特性的预期, 激光—X 射线转换效率提高、等离子体发光区运动得到有效抑制, 原因在于低密度时入射激光能量转换为流体力学动能损耗的份额降低. 虽然辐射谱 M 带份额随着材料密度降低也相应减小, 但 M 带辐射的绝对强度并没有降低, M 带份额减小是由于软能区 X 射线的增强, 不能避免其对靶丸的预热效应, 利用低密度混合材料减少 M 带绝对强度是下一步的主要工作之一.

## 4 结论

利用一维辐射流体程序模拟研究了低密度泡沫金对激光—X 射线转换特性的影响, 目前国内外未见详细研究. 在固定激光参数条件下, 随着 Au 材料初始密度降低, 激光—X 射线转换效率提高, 当泡沫 Au 密度为  $0.1 \text{ g/cm}^3$  时, 转换效率相对提升 19%; 同时, 对于发光区运动, 存在合适的泡沫 Au 密度使其得到有效抑制. 从能量平衡的角度分析, 离子动能与辐射能是相互竞争的物理量, 激光与低密度泡沫 Au 作用时, 由于驱动稀疏波的表层等离

子体梯度小于固体 Au 而降低了流体力学能量损耗, 相应的辐射能份额增加, 激光—X 射线转换效率得到提升并抑制了发光区的运动. 虽然辐射谱 M 带份额随着材料密度降低也相应减小, 但 M 带辐射的绝对强度并没有降低, M 带份额减小是由于软能区 X 射线的增强, 因此不能避免其对靶丸的预热效应, 低密度混合材料具有重要的研究前景. 另外,

在讨论发光区运动时, 分别讨论不同能区对辐照对称性的影响是有意义的. 本工作局限于平面一维模拟, 腔靶情形下低密度泡沫 Au 的影响有待进一步研究. 低密度泡沫 Au 改善激光—X 射线转换特性是实现黑腔腔壁优化的一种途径, 模拟结果为开展相应实验提供了依据.

- 
- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [2] Sigel R, Eidmann K, Lavarenne F, Schmalz R F 1990 *Phys. Fluids B* **2** 199
- [3] Eidmann K, Schmalz R F, Sigel R 1990 *Phys. Fluids B* **2** 208
- [4] Mead W C, Stover E K 1988 *Phys. Rev. A* **38** 5275
- [5] Gabl E F, Failor B H, Busch G E, Schroeder R J, Ress D, Suter J 1990 *Phys. Fluids B* **2** 2437
- [6] Dahmani F 1992 *Phys. Fluids B* **4** 1943
- [7] Zhang J 1990 *High Power Lasers and Particle Beams* **2** 179 (in Chinese) [张钧 1990 强激光与粒子束 **2** 179]
- [8] Li Y S, Huo W Y, Lan K 2011 *Phys. Plasmas* **18** 022701
- [9] Huser G, Courtois C, Monteil M C 2009 *Phys. Plasmas* **16** 032703
- [10] Yang J M, Meng G W, Zhu T, Zhang J Y, Li J H, He X A, Yi R Q, Xu Y, Hu Z M, Ding Y N, Liu S Y, Ding Y K 2010 *Phys. Plasmas* **17** 062702
- [11] Ze F, Kania D R, Langer S H, Kornblum H, Kauffman R, Kilkenny J, Campbell E M, Tietbohl G 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 1935
- [12] Nishimura H, Endo T, Shiraga H, Kato Y, Nakai S 1992 *Appl. Phys. Lett.* **62** 1344
- [13] Rosen M D, Hammer J H 2005 *Phys. Rev. E* **72** 056403
- [14] Young P E, Rosen M D, Hammer J H, Hsing W S, Glendinning S G, Turner R E, Kirkwood R, Schein J, Sorce C, Satcher J H, Hamza A, Reibold R A, Hibbard R, Landen O, Reighard A 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 035001
- [15] Zhang L, Ding Y K, Yang J M, Wu S C, Jiang S E 2011 *Phys. Plasmas* **18** 033301
- [16] Jones O S, Schein J, Rosen M D, Suter L J, Wallace R J, Dewald E L, Glenzer S H, Campbell K M, Gunther J, Hammel B A, Landen O L, Sorce C M, Olson R E, Rochau G A, Wilkens H L, Kaae J L, Kilkenny J D, Nikroo A, Regan S P 2007 *Phys. Plasmas* **14** 056311
- [17] Ramis R, Schmalz R, Meyer-ter-vehn J 1988 *Comput. Phys. Commun.* **49** 475
- [18] Atzeni S, Merer-ter-vehn J 2004 *The Physics of Inertial Fusion* (1st Ed.) (New York: Oxford University Press) p195
- [19] Dewald E L, Rosen M D, Glenzer S H, Suter L J, Girard F, Jadaud J P, Schein J, Constantin C, Wagon C, Huser G, Neumayer P, Landen O L 2008 *Phys. Plasmas* **15** 072706
- [20] Zhang J, Chang T Q 2004 *Fundamentals of the Target Physics for Laser Fusion* (Beijing: National Defense Industry Press) p164 (in Chinese) [张钧, 常铁强 2004 激光核聚变靶物理基础 (北京: 国防工业出版社) 第 164 页]

# Simulation of laser to X-ray conversion features influenced by low density gold foam\*

Dong Yun-Song<sup>1)2)</sup> Yang Jia-Min<sup>1)†</sup> Zhang Lu<sup>1)</sup> Shang Wan-Li<sup>1)</sup>

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 14 August 2012; revised manuscript received 10 November 2012)

## Abstract

In the laser indirect-driven inertial confinement fusion, laser light is converted into X-rays by laser-plasma interactions in the hohlraum, then at the surface of the capsule the re-emission of hohlraum inner wall would drive a symmetrical radiation source to motivate implosion. It is of great importance to improve the features of laser to X-ray conversion in the hohlraum. The influence of low density gold foam on conversion features was investigated numerically with the help of one-dimensional hydrodynamics code. The numerical simulation results show that conversion efficiency increases with the decrease in gold density under the given laser condition. In particular, it can indeed have more than 19% extra conversion efficiency relatively when solid gold is replaced by gold foam of 0.1 g/cm<sup>3</sup> density. In addition, the percentage of M-band decreases. There is an appropriate density of gold foam, at which the movement of plasma are restrained. According to the simulation results of energy balance, we get a higher radiation energy proportion when low density gold foam is selected as the target, and this is due to the decrease of kinetic energy losses compared with solid gold. Anyway, it is an effective approach to optimize the hohlraum by using low density gold foam to improve the features of laser to X-ray conversion, and these simulations would provide a scientific basis for further attempting correlative experiments.

**Keywords:** gold foam, laser to X-ray conversion, radiation spectrum, plasma movement

**PACS:** 52.50.Jm, 52.38.Ph

**DOI:** 10.7498/aps.62.075203

---

\* Project supported by the Key Item of Science and Technology Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2011A0102005).

† Corresponding author. E-mail: yjm70018@sina.cn