

CNIC-01322

CAEP-0010

低 Z 材料辐射烧蚀与能量传输研究

杨家敏 丁耀南 繆文勇 孙可煦 易荣清 陈正林 王红斌
李三伟 王耀梅 温树槐 郑志坚 张文海 于燕宁

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

在星光装置上, 对 $0.35\ \mu\text{m}$ 波长激光辐照金箔靶产生的 X 光辐射进行了研究。通过选择辐照激光参数, 从金箔背侧获得了干净的强 X 光辐射源。以金箔背侧 X 光辐射作为辐射烧蚀源, 系统地研究了低 Z 的 C_8H_8 , $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 和 C_8H_8 发泡样品的辐射烧蚀和能量传输特性。实验结果表明: 由于样品材料 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 与烧蚀源能谱匹配较好, $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 材料的辐射烧蚀速率和烧蚀深度大于 C_8H_8 的值。

Study of Radiative Ablation to Low-Z Material and energy transport

(In chinese)

YANG Jiamin DING Yaonan MIAO Wenyong SUN Kexu YI Rongqing
CHEN Zhenglin WANG Hongbin LI Sanwei WANG Yaomei
WEN Shuhuai ZHENG Zhijian ZHANG Wenhai YU Yanning
(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

X-ray emissions from the gold foil target, irradiated by 0.35 μm laser on the Xingguang facility, have been studied. A clean and intense X-ray source has been obtained from the rear of gold foil target by selection of irradiating laser parameters. Then, characteristics of radiation ablation to low-Z material C_8H_8 and $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ and energy transport have been investigated comprehensively. Experimental results show that mass ablative rate of $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ are greater than those of C_8H_8 due to its better match with the ablative source spectra.

引言

间接驱动惯性约束聚变是通过激光与高 Z 材料相互作用产生的高温 X 光辐射场烧蚀靶丸的低 Z 烧蚀层, 形成冲击波压缩靶丸内的热核燃料达到热核燃烧。因此, 研究低 Z 材料的辐射烧蚀特性, 能为提高惯性约束聚变间接驱动内爆流体力学效率、优化靶设计提供参考及实验依据; 同时, 也为研究辐射能量在低 Z 材料中的传输及辐射不透明度等基础物理问题提供丰富的物理信息。

从 80 年代起, 国外逐步开展了一些辐射烧蚀的实验研究和探索, 观察到金、铝等高、中 Z 材料背侧具有一定时间延迟的辐射热波信号; 同时, 也观察到中、低 Z 材料的离化烧穿。英国卢瑟福实验室还采用背光 X 光空间分辨成像技术, 测得了低 Z 发泡材料的烧蚀速度。但国际上对低 Z 材料的辐射烧蚀特性尚缺乏系统的研究。从 1995 年开始我们在星光装置上探索金箔靶 X 光源及相应的辐射烧蚀实验方法, 进而提出低 Z 材料辐射烧蚀中材料与源能谱匹配的新思想, 在星光激光装置上通过打靶实验研究金箔靶 X 光源辐射特性的基础上, 系统研究了 C_8H_8 和 $C_{10}H_{16}O_5$ 两种样品的辐射烧蚀过程及 X 光辐射能量传输机制, 研究结果验证了辐射烧蚀材料与源能谱匹配的思想。

1 物理思想及实验研究方法

强 X 光辐射烧蚀低 Z 材料时, 由于低 Z 材料对 X 光辐射的质量吸收系数曲线存在明显的 K 吸收边结构, 而金等离子体发射的 X 光辐射也具有带谱结构。因此, 在低 Z 材料的辐射烧蚀过程中可能存在烧蚀材料与强 X 光辐射源能谱的匹配问题。为了研究材料辐射烧蚀及材料与源能谱的匹配问题, 在星光装置上利用 $0.35\ \mu\text{m}$ 波长的激光辐照金箔靶, 在金箔背侧获得干净的强 X 光辐射源。由于金箔背侧 X 光辐射源具有明显的带谱结构, 其中, 位于 $200\sim 300\ \text{eV}$ 和 $500\sim 800\ \text{eV}$ 能区的带谱分别来源于金等离子体的 O 带和 N 带辐射, 为此, 选用具有同样密度的 C_8H_8 和掺氧的 $C_{10}H_{16}O_5$ 材料作为样品 (碳和氧元素的 K 吸收边分别为 $270\ \text{eV}$ 和 $510\ \text{eV}$) 进行辐射烧蚀的对比测量, 研究烧蚀材料与源能谱的匹配问题, 通过改变样品的厚度, 测量不同厚度的低 Z 样品质量烧蚀速率变化, 研究低 Z 材料中的辐射烧蚀过程; 测量每一薄层烧蚀样品质量吸收系数曲线与常温样品的理论结果比较, 研究两种样品的辐射烧蚀深度范围并作比较; 测量不同厚度样品背侧的 X 光能谱变化, 研究 X 光辐射能量在低 Z 材料中的传输机制。为避免激光与靶相互作用产生的冲击波对辐射烧蚀样品的影响, 将烧蚀样品 X 光辐射源隔开 $100\ \mu\text{m}$ 间距, 上述靶称为辐射烧蚀 I 型靶。

2 实验安排与测量

2.1 诊断设备布置

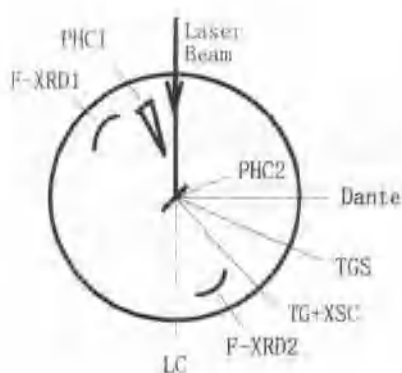


图1 诊断设备排布

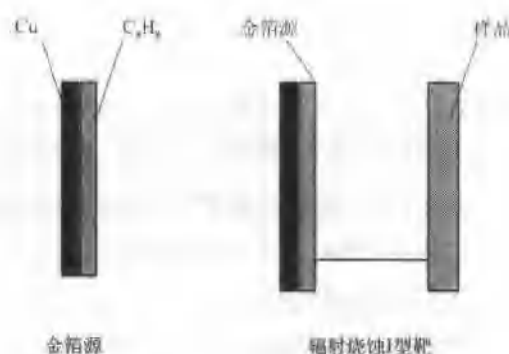


图2 实验用靶结构示意图

诊断设备排布如图 1 所示。激光束以 45 度角斜入射打靶，在靶前用针孔相机（空间分辨约 20 μm ）监测激光焦斑；用平响应 XRD 阵列（F-XRDA1）监测靶前向 X 光角分布；在靶后向用亚千能谱仪（DANTE）、透射光栅谱仪（TGS，谱分辨约 0.4 nm）、透射光栅配 X 光条纹相机系统（TG+XSC，谱分辨约 0.8 nm，时间分辨约 14 ps）、平响应 XRD 阵列（F-XRDA2）和激光能量卡计（LC）分别测量靶后的 X 光能谱、时间积分 X 光能谱、时间分辨 X 光能谱、X 光角分布及透过激光能量。在靶前向还用平响应 XRD 测量前向 X 光的信号分成九路作为后面亚千能谱仪九个能道的时标信号。

2.2 激光打靶条件

激光波长：0.35 μm ；激光能量：20~80 J；激光脉宽：600~800 ps；定等效激光焦斑直径：200~300 μm 。

2.3 实验用靶结构及参数

实验用靶分为金箔源靶和辐射烧蚀 I 型靶，靶结构如图 2 所示，金箔靶由 $(0.17 \pm 0.01) \mu\text{m}$ 厚的金箔和 $(0.17 \pm 0.01) \mu\text{m}$ 厚的 C_8H_8 底衬组成；辐射烧蚀 I 型靶的样品密度为 1.0 g/cm^3 的 C_8H_8 和 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 两类，每一类样品有几种不同厚度，详见表 1。

表1 辐射烧蚀样品参数

样品	C_8H_8					$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$			
样品厚度/ μm	1.0	2.0	4.0	6.0	15.0	1.0	2.0	4.0	8.0

2.4 测量过程

通过改变打靶激光能量、脉宽及焦斑大小，首先测量和研究金箔背侧 X 光辐射源特性，选定激光打靶条件，使得在金箔背侧获得干净的强 X 光辐射源。在选定的激光打靶条件下换上辐射烧蚀靶进行低 Z 样品的辐射烧蚀测量研究。在测量的同时，对靶前向的 X 光角分布、激光能量、脉宽和焦斑进行动态监测，以保证金箔 X 光辐射源的重复性。

3 实验结果

3.1 金箔靶背 X 光辐射源特性

激光辐照金箔靶时, 首先发生激光烧蚀过程形成激光烧蚀区, 同时, 随着高温高 Z 等离子体的形成将产生大量 X 光辐射。由于 X 光辐射能量比激光能量能输运到金材料更高密度区, 在激光烧蚀区前随即形成辐射烧蚀区。以金箔靶作为干净的强 X 光辐射源靶, 最理想的情况是金箔发生辐射烧穿而未发生激光烧穿, 由于金箔激光烧穿深度与激光波长、脉宽和辐照功率密度有关, 因此根据简化理论预估公式选定金箔厚度后, 在星光 II 装置上进行 $0.35\ \mu\text{m}$ 激光波长激光打靶, 测量了不同激光辐照功率密度下该金箔源靶的特性。

用激光能量卡计在金箔靶背侧测得的金箔靶透过激光能量份额与激光辐照功率密度的关系如图 3 所示, 随着激光辐照功率密度升高, 透过激光能量份额增加; 按透过激光能量份额为 10% 时定义激光烧穿深度, 对 $0.17\ \mu\text{m}$ 厚的金箔发生激光烧穿的 $0.35\ \mu\text{m}$ 波长, 激光辐照功率密度约为 $(2.4 \pm 1.2) \times 10^{14}\ \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 在激光辐照功率密度低于 $(1.2 \pm 0.6) \times 10^{14}\ \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 透过激光能量份额不超过 1.0 %。

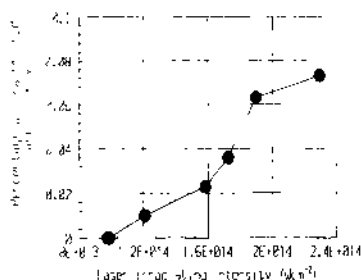


图3 透过激光能量份额与激光辐照功率密度关系

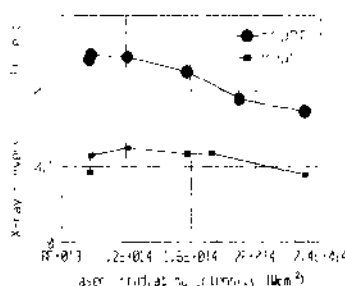


图4 金箔靶前后激光X光转换效率与激光辐照功率密度的关系

平响应 XRD 阵列测得的金箔靶前向和后向激光 X 光转换效率与激光辐照功率密度的关系如图 4 所示, 金箔靶前向 X 光转换效率随激光辐照功率密度升高而下降; 金箔靶后向 X 光转换效率随激光辐照功率密度的升高, 开始略有上升, 辐照功率密度达到 $(1.2 \pm 0.6) \times 10^{14}\ \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 后又开始略有下降; 而且金箔靶前向 X 光转换效率变化比后向 X 光转换效率的变化随激光辐照功率密度的改变更敏感, 所以通过对金箔靶前向 X 光角分布和激光能量、脉宽及焦斑的监测, 能较好的保证金箔靶后向 X 光辐射强度的重复性。同时从测量结果得到: 选定激光打靶条件为激光能量 $E = (50.0 \pm 5.0)\ \text{J}$, 激光脉宽为 (650 ± 30)

ps、离焦为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 时, 激光辐照功率密度控制为 $(1.2\pm 0.6)\times 10^{14}\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, 在金箔背侧获得了干净的强 X 光辐射源。

在选定的激光打靶条件下, 用透射光栅谱仪测得金箔靶后向 X 光能谱如图 5 所示。从图 5 中看到: 金箔背侧 X 光能谱存在明显的带谱结构, 其中金等离子体 O 带辐射峰位于约 240 eV 处, N 带辐射峰位于 600 eV 处。

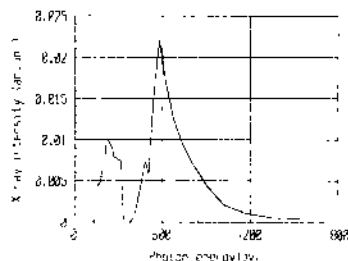


图5 金箔背侧X光能谱分布

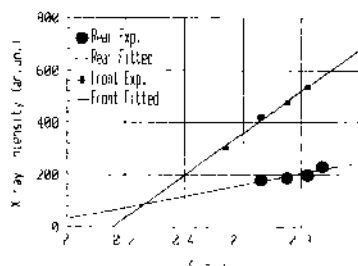


图6 金箔靶前向和后向X光角分布

用平响应 XRD 阵列测得的 X 光辐射角分布如图 6 所示。从图 6 中看到: 金箔靶前向和后向 X 光角分布都按角度余弦线性分布。对金箔后向 X 光角分布积分, 得到平响应 XRD 测得的金箔后向 X 光辐射总量为 $(6.3\pm 1.6)\text{ J}$ 。

亚千能谱仪测得金箔靶后向 X 光辐射时间积分能谱, 按角度余弦线性分布进行角度、能谱积分, 得到亚千能谱仪测得的金箔靶后向 X 光辐射总量为 $(6.8\pm 1.4)\text{ J}$, 所得结果与平响应 XRD 阵列测量结果在实验误差范围内符合。

透射光栅配 X 光条纹相机系统测得金箔靶背侧 X 光辐射能谱时间过程如图 7 所示。从图 7 中看到: 不同波长的 X 光辐射时间宽度略有不同, 按波长积分后得到金箔背侧 X 光辐射时间半高宽为: $(750\pm 50)\text{ ps}$ 。

由上述测量研究结果, 并考虑辐射烧蚀样品距金箔源 $100\text{ }\mu\text{m}$ 引起的强度几何衰减得到: 辐射烧蚀样品上 X 光辐射辐照功率密度为 $(6.8\pm 4.3)\times 10^{12}\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

3.2 C_8H_8 和 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 材料辐射烧蚀特性与能量传输研究

3.2.1 透射光栅配 X 光条纹相机测量结果

由透射光栅配 X 光条纹相机系统测得的两种低 Z 样品后的时间分辨 X 光辐射能谱典型结果如图 8 所示。从图 8 中看到: 对同样厚度和密度的 C_8H_8 和 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 两种低 Z 样品, C_8H_8 样品后面的低能区 X 光辐射相对高能区 X 光辐射的时间延迟比 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 样品的长。



图7 金箔靶背侧 X 光辐射
能谱时间过程



C_8H_8 样品



$C_{10}H_{16}O_5$ 样品

图8 4.0 μm 厚的两种低 Z 样品的 X 光辐射能谱时间过程

在现有实验条件下, 由于低 Z 样品材料对高能区 X 光辐射的质量吸收系数较小且基本保持不变, 对低能区 X 光辐射的质量吸收系数较大且随着烧蚀样品温度升高显著下降, 因此, 采用高能 X 光辐射时间波形上升沿的 1/10 峰值处作为辐射烧蚀时间起点, 由低 Z 烧蚀样品对低能区 X 光辐射的透过率时间过程, 得到各种样品辐射烧穿时间如图 9 所示。由样品厚度和测得的辐射烧穿时间计算得到各个厚度样品的质量烧蚀速率结果见表 2。

表2 两种低 Z 样品的质量烧蚀速率测量结果			$\times 10^5 g/(cm^2 \cdot s)$
样品厚度/ μm	1.0	2.0	4.0
C_8H_8	3.3 ± 0.5	4.0 ± 0.4	3.7 ± 0.2
$C_{10}H_{16}O_5$	4.0 ± 0.8	4.8 ± 0.6	5.5 ± 0.4

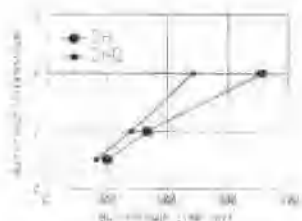


图9 两种低 Z 样品的厚度与
烧穿时间的关系

从表 2 中结果看到: 对同样厚度的样品材料, 金箔背侧 X 光辐射对 $C_{10}H_{16}O_5$ 材料的质量烧蚀速率明显大于 C_8H_8 样品材料的值。这主要是由于掺氧的 $C_{10}H_{16}O_5$ 样品材料中氧元素的 K 吸收边 (510 eV 能点处) 正好位于金箔靶 X 光辐射源的金等离子体 N 带辐射强度峰值附近, 能更有效利用 N 带 X 光辐射能量, 因此 $C_{10}H_{16}O_5$ 样品材料与金箔背侧 X 光辐射能谱匹配比 C_8H_8 样品材料要好; 对 $C_{10}H_{16}O_5$ 样品材料, 随样品厚度增加质量烧蚀速率增大, 这是由于辐射烧蚀源

随时间增加其强度增加所致; 对 C_8H_8 样品材料, 随样品厚度增加, 开始质量烧蚀速率增加, 而后又有所降低, 这是由于对较厚样品材料, C_8H_8 样品的烧穿时间比 $C_{10}H_{16}O_5$ 样品的长得多, 烧蚀源强度随时间增长先升高而后又下降所致。

3.2.2 带时标亚千能谱仪测量结果

带时标亚千能谱仪测得的金箔源靶和 $4.0\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 C_8H_8 和 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 两种样品背侧的高能区 (约 1200 eV) 和低能区 (约 250 eV) X 光辐射时间波形典型结果如图 10 (a), (b) 所示。

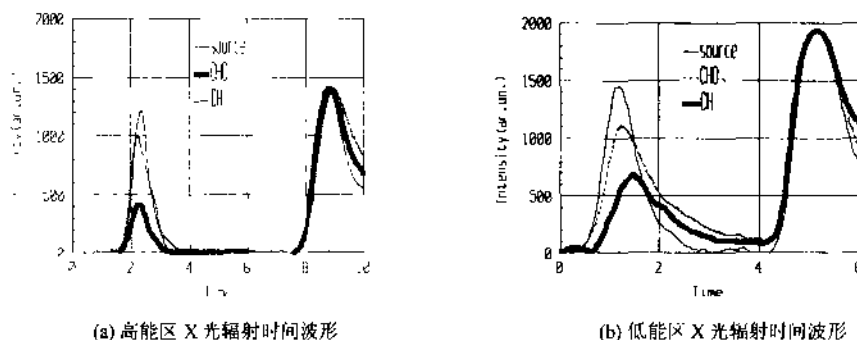


图 10 金箔源和两种样品背侧高能区与低能区 X 光辐射时间波形比较

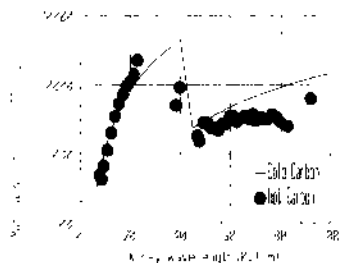
从图 10 中看到: 对高能区 X 光辐射, 两种样品背侧的信号相对金箔靶背侧的信号基本无时间延迟, 只有强度衰减; 而对低能区 X 光辐射, 两种样品背侧的信号相对金箔靶背侧的信号都有一定的时间延迟, 并且 C_8H_8 样品背侧信号的时间延迟大于 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 样品背侧信号的时间延迟, 表明金箔靶背侧 X 光辐射对 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 样品材料的质量烧蚀速率大于对 C_8H_8 样品材料的, 这与透射光栅配 X 光条纹相机系统测量结果定性一致。

同时, 从图 10 中还可以看到: 对高能区 X 光辐射, 在整个时间过程中两种样品背侧的信号低于金箔源靶背侧的信号; 而对低能区 X 光辐射, 在初始阶段两种样品背侧的信号低于金箔靶背侧的信号, 随着时间增长, 两种样品背侧的信号逐渐超过金箔源靶信号, 并维持较长的时间。由此可知: 样品背侧的高能 X 光辐射主要为直穿透过成分, 而低能 X 光辐射在初始阶段主要为直穿透过成分, 随着样品温度升高, 样品自发辐射成分增大, 并逐步超过直穿透过成分, 维持较长时间; 这也说明低 Z 材料样品的自发辐射 X 光主要处于低能区。

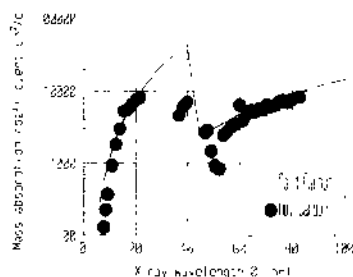
3.2.3 透射光栅谱仪测量结果

透射光栅谱仪测得的厚 C_8H_8 样品的 $2.0\sim 4.0\text{ }\mu\text{m}$ 层和 $4.0\sim 6.0\text{ }\mu\text{m}$ 层样品对 X 光辐射的质量吸收系数曲线如图 11(a), (b) 所示。从图 11 中看到: 对高能区 X 光辐射, 两层样品的质量吸收系数都与常温 C_8H_8 样品的质量吸收系数曲线一致, 表明这两层样品中的碳离子的离化度都小于 4; 而对低能区 X 光辐射, $2.0\sim 4.0\text{ }\mu\text{m}$ 层样品的质量吸收系数曲线明显低于常温 C_8H_8 的值, 表明 $4.0\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 C_8H_8 样品发生了离化辐射烧穿; 而 $4.0\sim 6.0\text{ }\mu\text{m}$ 层样品的质量吸收系数只略小于常温 C_8H_8 样品的值, 表明该层样品的平均温度已接近常温。因此, 上述金箔背侧 X 光辐射辐照下, C_8H_8 的辐射烧蚀深度略大于 $4.0\text{ }\mu\text{m}$ 。这与

透射光栅配 X 光条纹相机测得的 $4.0\ \mu\text{m}$ 厚 C_8H_8 样品的辐射烧穿时间已接近金箔 X 光辐射源时间全宽的结果相符合。



(a) $2.0\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 层样品吸收系数曲线



(b) $4.0\sim 6.0\ \mu\text{m}$ 层样品吸收系数曲线

图 11 厚 C_8H_8 材料的薄层样品对 X 光辐射的质量吸收系数曲线

透射光栅谱仪测得的厚 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 材料的 $2.0\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 层样品对 X 光辐射的质量吸收系数曲线如图 12 所示。从图 12 中看到：对高能区 X 光辐射，薄层样品的质量吸收系数曲线都与常温 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 样品的结果比较一致，说明薄层样品中碳离子离化度小于 4，氧离子离化度小于 6；对低能区 X 光辐射，薄层样品的质量吸收系数都明显低于常温 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 样品的经典理论结果，因此可得到 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 样品材料的辐射烧穿深度范围大于 $4.0\ \mu\text{m}$ 。

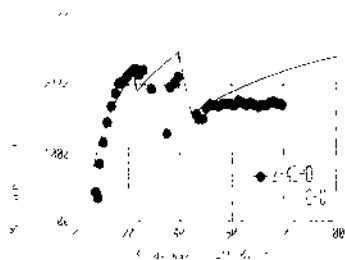


图 12 厚 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 材料的薄层样品对 X 光辐射的质量吸收系数曲线

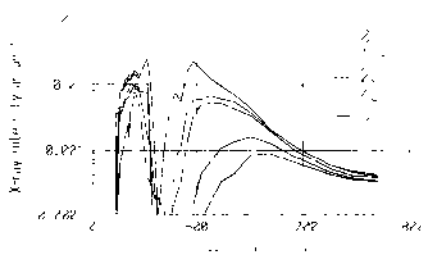


图 13 金箔靶及几种厚度 C_8H_8 样品背侧 X 光辐射能谱分布

透射光栅谱仪测得的金箔靶 及几种厚度 C_8H_8 烧蚀样品材料背侧的 X 光能谱如图 13 所示。从图 13 中看到：样品背侧的高能区 X 光辐射基本由外源 X 光辐射经烧蚀样品材料吸收衰减后的直穿透过成分组成；而低能区 X 光辐射则明显高于外源的直穿透过成分，这一方面是由于样品被加热后对低能 X 光辐射的质量吸收系数显著降低，另一方面，从

薄样品背侧 X 光能谱中低能区 X 光辐射强度大于金箔源 X 光辐射强度, 说明在低能区, 存在明显的烧蚀样品自发辐射贡献, 这与亚千能谱仪测量结果一致。

从以上分析可以得到: X 光辐射能量在低 Z 材料中的传输有两部分贡献: 一部分是外源的直穿 X 光辐射成分; 另一部分是低能区的热样品的自发辐射贡献。X 光辐射能量在低 Z 材料中的传输, 当样品厚度较小或外源 X 光辐射的光子能量较高时, 将主要通过外源 X 光的直穿透过进行; 而当外源 X 光辐射的光子能量较低或样品厚度较大时, 外源的直穿透过 X 光辐射成分贡献减少, X 光辐射能量的传输将主要通过外源加热样品表面层, 再由表面层热样品通过自发辐射低能区 X 光辐射的方式, 向较深层样品进行能量输运。由于热样品的自发辐射具有近各向同性的特点, 因此对较厚低 Z 样品深层的 X 光辐射能量的输运问题, 在理论上可以采用扩散近似的方法处理。

4 结 论

利用 $0.35\ \mu\text{m}$ 波长激光辐照金箔靶, 在激光 ($E=50\pm 5\ \text{J}$, $\tau=650\pm 30\ \text{ps}$, 离焦 $400\ \mu\text{m}$ 打靶) 辐照功率密度为 $(1.2\pm 0.6)\times 10^{14}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 从金箔背侧获得了干净的强 X 光辐射源。辐射源能量为 $(6.8\pm 1.4)\ \text{J}$, 时间半高宽为 $(750\pm 50)\ \text{ps}$, 透过的激光份额小于 1.0% , 源能谱具有明显的金等离子体 N 带和 O 带辐射结构。

多种诊断设备测量得到的不同厚度两种材料的一系列辐射烧蚀速率及 X 光能谱数据结果表明: 以金箔靶背侧 X 光辐射作辐射烧蚀源, $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 样品的质量烧蚀速率明显大于 C_8H_8 样品的值, 从而验证了 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 样品材料比 C_8H_8 样品材料与金箔源 X 光辐射源能谱匹配更好的思想。

从不同厚度的同种样品测量得到的质量烧蚀速率的变化看到: 低 Z 材料的辐射烧蚀速率随辐照辐射功率密度的增加而增大。

以金箔靶背侧 X 光辐射作烧蚀源, 在 X 光辐射平均辐照功率密度为 $(6.8\pm 4.3)\times 10^{12}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、源辐射强度时间半高宽为 $(750\pm 50)\ \text{ps}$ 条件下, C_8H_8 和 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$ 材料的辐射烧蚀深度都大于 $4.0\ \mu\text{m}$ 。

X 光辐射能量在低 Z 样品材料中的传输由两部分组成: 一部分是各向异性的外源透过成分; 另一部分就是样品加热后各向同性的自发辐射成分, 而且自发辐射成分主要位于 X 光低能区。

本工作得到了制靶和星光激光装置运行人员的大力支持, 在此对他们制作的实验靶和提供的良好打靶实验条件表示感谢。

参 考 文 献

1. Sigel R, Tsakiris GD, et al. Phys. Rev. Lett., 1990, 65(5): 587
2. Afshar-rad J, Desselberger M, et al. Phys. Lett., 1994, 73(1): 74
3. Schwanda W, Heidman K. Phys. Rev. Lett., 1992, 69(24): 3507
4. W Kaiser N, Meyer-Thr-Vehn J. Laser and particle beams, 1991, 9(3): 759
5. Mochizuki I, Mima K, et al. Phys. Rev., 1987, 36(7): 3279
6. Edwards J, Dunne M, et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 67(27): 3780
7. Edwards J, Barrow V, et al. Europhys. Lett., 1990, 11(7): 631
8. Edwards J, Dunne M, et al. Phys. Rev. Lett., 1993, 71(21): 3477
9. Fabbro R, Faral B, et al. Laser and particle beams, 1990, 8(1, 2): 73
10. 丁耀南等, 强激光与粒子束, 1996, 8(1)