

**激光加载下金属锡材料微喷颗粒与低密度泡沫混合实验研究**

税敏 于明海 储根柏 席涛 范伟 赵永强 辛建婷 何卫华 谷渝秋

Observation of ejecta tin particles into polymer foam through high-energy X-ray radiography using high-intensity short-pulse laser

Shui Min Yu Ming-Hai Chu Gen-Bai Xi Tao Fan Wei Zhao Yong-Qiang Xin Jian-Ting He Wei-Hua Gu Yu-Qiu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 076201 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182280

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182280>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

[强激光加载下锡材料微喷颗粒与气体混合回收实验研究及颗粒度分析](#)

Experimental investigation of tin fragments mixing with gas subjected to laser driven shock

物理学报. 2017, 74(18): 186201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.186201>

[低密度泡沫金提升黑腔腔壁再发射率的实验研究](#)

Experimental study on improving hohlraum wall reemission ratio by low density gold foam

物理学报. 2016, 73(1): 015202 <https://doi.org/10.7498/aps.65.015202>

[用于惯性约束核聚变激光驱动器的激光二极管抽运Nd,Y:CaF<sub>2</sub>激光放大器的实验研究](#)

Experimental study of diode-pumped Nd, Y:CaF<sub>2</sub> amplifier for inertial confinement fusion laser driver

物理学报. 2016, 73(20): 204206 <https://doi.org/10.7498/aps.65.204206>

[冲击波作用下微米尺度金属颗粒群的动力学行为](#)

Dynamical behaviors of Sn micro-sphere particles under shock wave action

物理学报. 2017, 74(10): 104701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.104701>

[熔化状态下金属样品表面的微喷射问题](#)

Experimental investigation of ejecta on melted Sn sample under shock loading

物理学报. 2016, 73(2): 026201 <https://doi.org/10.7498/aps.65.026201>

# 激光加载下金属锡材料微喷颗粒与 低密度泡沫混合实验研究

税敏<sup>†</sup> 于明海 储根柏 席涛 范伟 赵永强  
辛建婷 何卫华<sup>‡</sup> 谷渝秋

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

(2018年12月27日收到; 2019年2月18日收到修改稿)

金属材料的微喷是冲击加载下金属表面发生的一种动态破碎现象, 微喷研究在很多领域都具有重要意义, 包括惯性约束聚变 (ICF) 和烟火制造等. 由于激光实验特有的优势, 近几年国内外开展了很多利用强激光驱动冲击加载研究材料微喷过程的实验. 利用泡沫材料对微喷颗粒进行静态软回收虽然可以获得颗粒的形态分布、颗粒尺寸及颗粒质量等定量结果, 但不能反演微喷颗粒从进入泡沫到停滞过程中的动态混合过程. 为此, 在神光 II 升级装置上利用皮秒脉冲激光照射金丝产生高能 X 射线, 实现了对锡微喷颗粒与低密度泡沫混合过程的高时间分辨和高空间分辨背光照相. 背光图像面密度结果证实微喷颗粒在泡沫中并没有发生二次破碎. 静态回收结果表明, 在锡材料与泡沫紧贴放置的情况下, 微喷颗粒在泡沫中的穿透深度随着加载压强升高呈现先增大后减小的规律, 与非紧贴放置的实验结果有明显的差别.

**关键词:** 微喷, 惯性约束聚变, 回收, 混合

**PACS:** 62.20.M-, 47.85.Dh, 87.59.B-, 47.20.Ma

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182280

## 1 引言

强激光脉冲辐照金属材料, 会在金属中形成冲击波, 当冲击波在金属自由面卸载时, 表面会发生破坏或破碎, 产生高速颗粒态物质脱离基体并向外喷射, 这一动力学现象称为微喷射 (微喷)<sup>[1,2]</sup>. 产生微喷有两种主导机制: 一是冲击波与表面微结构缺陷相互作用形成的微射流<sup>[3,4]</sup>, 二是衰减冲击波加载下近表面熔化物质的动态拉伸破坏引起的微层裂<sup>[5-7]</sup>. 微喷过程的机理复杂, 影响因素较多, 与材料的状态方程, 冲击波波形、强度及材料表面形态都有关系. 研究微喷过程既有重要的科学价值, 也有很强的工程应用背景, 包括烟火制造、装甲设计、航空航天及惯性约束聚变 (ICF) 等<sup>[7]</sup>. 对于微

喷过程的研究, 早期主要采用炸药爆轰<sup>[8,9]</sup> 和高速飞片碰撞<sup>[10]</sup> 等加载方法, 随着激光技术的发展和其特有的优势, 利用强激光驱动冲击加载逐渐成为微喷过程研究的一种重要手段<sup>[11-13]</sup>.

采用低密度泡沫对强激光驱动冲击加载下的微喷颗粒进行软回收, 再对回收到的微喷颗粒进行 X 光 CT (computed tomography) 分析和图像重建, 进一步通过图像分析技术, 获取微喷颗粒尺寸和微喷颗粒质量等重要的参数信息, 是近几年发展起来的唯一一种能够对微喷颗粒进行直接全景观测的研究方法<sup>[14]</sup>, 引起了相关研究人员的广泛关注.

近年来, 基于神光 III 原型激光装置, 激光聚变研究中心相关研究团队开展了一系列激光加载的微喷实验研究, 建立了强激光驱动冲击加载低密

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [shuimin123@163.com](mailto:shuimin123@163.com)

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: [564869181@qq.com](mailto:564869181@qq.com)

度材料对微喷颗粒进行回收分析的实验技术, 获取了在真空和充气环境序列化加载压强条件下, 锡材料微喷颗粒形态变化规律, 并给出了颗粒度分析结果<sup>[15-18]</sup>. 由于回收实验得到的只是终态颗粒分布, 对于微喷动态过程的观测和研究, 需要借助于其他具有时间分辨能力的方法, 比较常见的方法有多幅可见光阴影成像<sup>[12]</sup>、X 光背光照相<sup>[18]</sup>和光子多普勒测速等方法<sup>[2]</sup>. 在这几种方法中, 因为 X 光背光照相可以穿透微喷区域并探测其内部结构, 所以在微喷动态实验研究中具有举足轻重的作用. 为此, 我们利用神光 II 升级装置的高能量皮秒 (ps) 脉冲激光辐照金丝 (直径 10  $\mu\text{m}$ ), 获得了短脉宽 (约几十 ps)、高能量的 X 光, 该高能 X 光背光照相技术同时具有高的时间分辨和空间分辨, 成为了研究微喷动态过程的重要手段<sup>[19]</sup>.

前面已经提到, 虽然回收实验的结果能够对微喷物理过程分析提供重要的参考, 但其只是终态结果, 对微喷颗粒在泡沫中的运动过程, 甚至二次破碎等问题并不清楚, 对此, 目前还没有相关研究报告. 而微喷颗粒与低密度介质 (气体) 的混合是 ICF 研究中的关键物理问题, 也是武器物理中的重要过程, 因此具有很强的研究需求. 基于在神光 II 升级装置上建立的高能 X 光背光照相技术, 我们开展了锡平面靶与低密度泡沫混合的动态诊断探索实验, 获取混合过程的背光图像及面密度, 结合静态回收实验结果, 研究微喷颗粒与泡沫的混合过程. 在靶的设计上, 采用了两种构型: 一种是锡材料与泡沫紧贴放置; 另一种是锡材料与泡沫之间有一段真空间隙.

## 2 实验

### 2.1 激光参数和靶参数

实验在神光 II 升级装置上开展, 基本原理如图 1 所示, 两束纳秒 (ns) 激光分别经过连续相位板 (CPP) 空间束匀化后辐照在主靶 (锡) 上表面, 加载光斑直径等于 CPP 直径 2 mm, 激光烧蚀在锡样品中驱动冲击波并形成微喷过程, 微喷颗粒进入泡沫筒中并与泡沫发生相互作用. 锡样品厚度为 500  $\mu\text{m}$ , 宽厚比为 4:1, 表面粗糙度优于 0.4  $\mu\text{m}$ . ns 激光波长为 351 nm, 脉宽为 3 ns. ps 激光波长为 1064 nm, 脉宽为 10 ps, 经抛物面镜聚焦到光斑直径约为 50  $\mu\text{m}$ . 聚焦后的 ps 激光辐照金丝产

生高能 X 射线并对微喷颗粒与泡沫混合过程进行动态背光成像, 成像板 (IP) 作为记录介质记录背光图像. 低密度聚-4-甲基-1-戊烯 (PMP) 泡沫为 CH 聚合物, 密度约为 0.2  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 与锡靶自由面紧贴, 截面尺寸为 12 mm  $\times$  12 mm, 外面用厚度 0.5 mm 的有机玻璃 (PMMA) 包裹. 金丝直径为 10  $\mu\text{m}$ , 置于 CH 基底上.

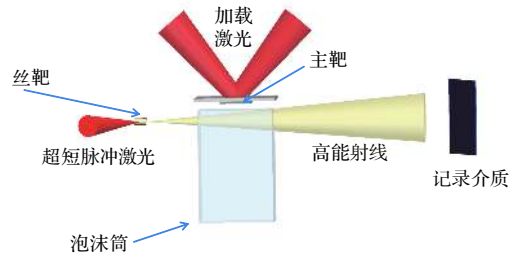


图 1 神光 II 升级微喷泡沫混合实验原理示意图  
Fig. 1. Schematic of the experiment.

### 2.2 实验诊断排布

实验的诊断排布图如图 2 所示, 主要的诊断设备是高能 X 射线相机 (HXI), 用来获取混合区域的背光图像. 伽马射线滤片堆栈谱仪 (FSS) 和电子磁谱仪 (EMS, 2000GS) 属于监测设备, 前者对 X 射线的能谱进行监测, 后者可以给出 ps 激光打靶产生的超热电子温度. 两台针孔相机 (PHC) 分别监测 ns 和 ps 激光打靶情况.

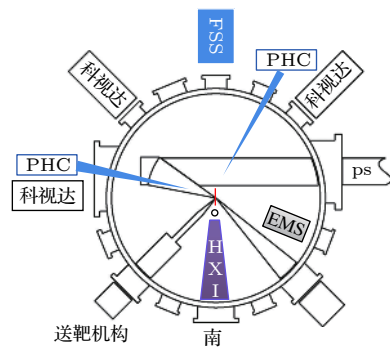


图 2 实验诊断排布图 (俯视图)  
Fig. 2. Schematic of experimental diagnosis (top view).

### 2.3 加载参数预估

根据锡材料的相图<sup>[2]</sup>, 实验选取锡材料发生层裂或者卸载熔化的压强点 (发生微层裂), 研究微喷混合过程. 为了确定 ns 加载激光的能量, 并且预估锡样品所处的冲击加载状态, 使用一维流体力学程序 Multi-1D 进行模拟计算, 可以获得冲击波到达

自由面之前的压力波形, 界面粒子速度及流线图等数据.

## 2.4 背光源参数

由于锡材料原子序数高, 密度大 ( $7.29 \text{ g/cm}^3$ ), 需要能量较高的 X 射线才能穿透, 本实验选择金 (Au, 原子序数 79) 作为背光靶材料, 一是因为金的 X 射线转换效率高, 二是其高能 X 射线的能谱为韧致辐射能谱, 最高约能到 1 MeV. 我们利用不同厚度的锡台阶样品 (图 3) 标定 ps 激光作用金丝产生的高能 X 射线成像所能诊断的面密度范围.

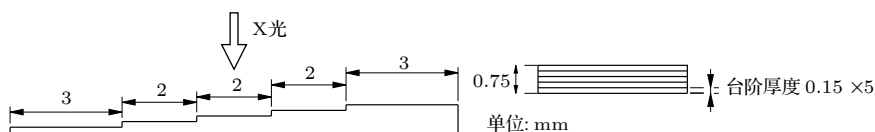


图 3 标定面密度的锡台阶参数

Fig. 3. Tin step wedge for areal density calibrating.

如图 4(a) 所示, 通过 e 指数拟合, 在透过率 50% 的地方, 高能 X 射线成像具有最佳的面密度分辨, 此时锡样品厚度为 0.46 mm, 面密度为  $0.34 \text{ g/cm}^2$ , 对应的能点约为 90 keV. 背光图像如果需要进行面密度分辨, 透过率需要在 10%—90%, 对应的 X 射线能谱范围为 60—200 keV, 如图 4(b) 所示. 因此, 适合对锡材料微喷照相的 X 射线能谱范围是 60—200 keV, 等效单能点约为 90 keV. 该能点 X 射线成像可以分辨的面密度范围是  $0.05\text{—}1.02 \text{ g/cm}^2$ , 对应锡样品厚度为 0.07—1.4 mm, 透过率为 10%—90%.

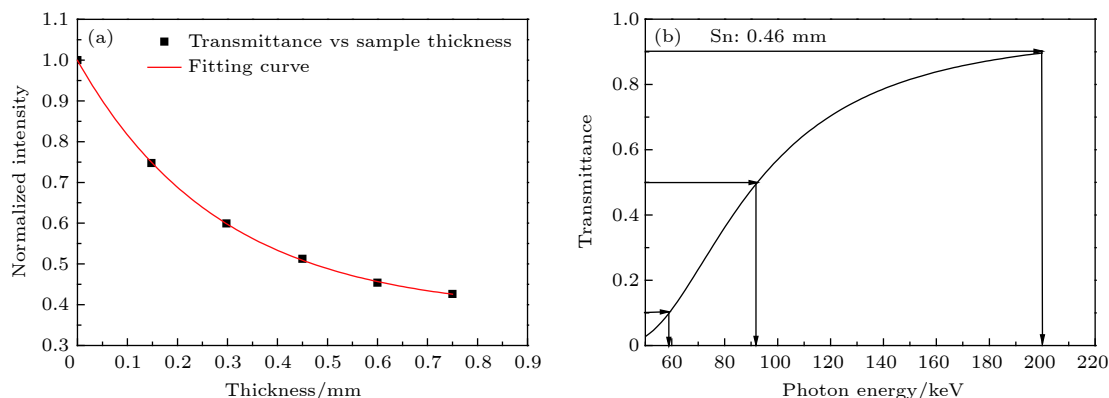


图 4 面密度标定曲线

Fig. 4. Calibrated curves of areal density.

## 2.5 背光照相参数

实验采用科视达显微镜对主靶和背光靶进行瞄准. 由于背光源尺寸约为  $10 \mu\text{m}$ , IP 的本征分辨约为  $50 \mu\text{m}$ , 为了获得良好的客体 (微喷区域) 分辨, 假设探测器上 5 个有效分辨单元对应客体上 1 个分辨单元, 则放大倍率至少需要达到 25 倍 ( $5 \times 50/10$ ). 考虑到送靶结构的限制和离轴抛物面镜的调节限位, 背光靶的物距设计为 12 mm; 受到诊断设备自身尺寸和送靶机构的限制, 诊断的像距设计为 450 mm, 放大倍率为 37.5 倍, IP 板大小为  $120 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 此时, 背光照相的视场范围约为  $3.2 \text{ mm}$ (横向)  $\times$   $2.6 \text{ mm}$ (纵向).

实验中, 高能 X 射线成像的能段选择主要有两种方式: 第一, 不同厚度的滤片用于截止低能 X 射线, 将对成像无贡献的低能 X 射线滤除掉; 第二, 通过调节 IP 的响应范围, 控制韧致辐射成像的 X 射线范围, 将过高能段的 X 射线滤除掉. 通过这两种方式, 降低图像本底噪声, 提高信噪比和面密度分辨能力.

## 2.6 泡沫和泡沫筒对成像的影响

在实验中, 还需要简单地评估泡沫及泡沫筒对照相的影响. PMP 泡沫的主要成分是 C 和 H, 密度为  $0.2 \text{ g/cm}^3$ , 厚度为 12 mm; 泡沫筒材料为

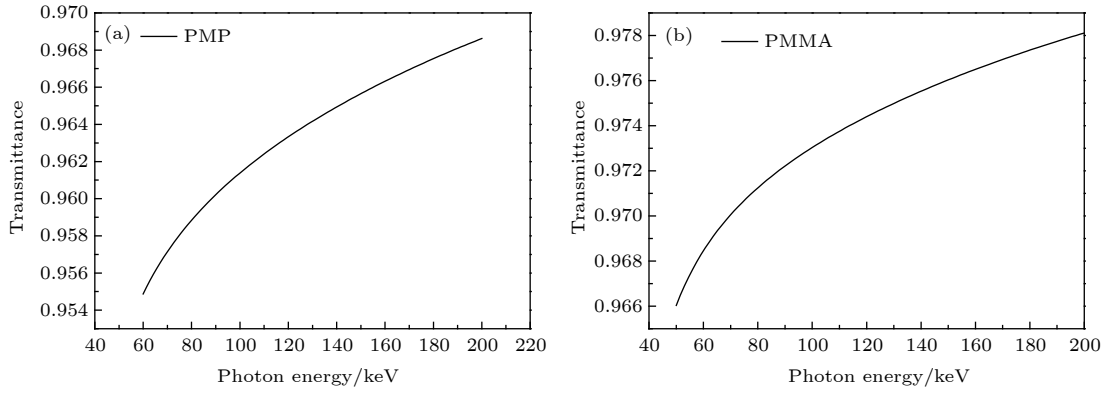


图 5 PMP 泡沫 (a) 和有机玻璃 (b) 对 X 射线的透过率  
Fig. 5. X-ray transmittance of PMP foam (a) and PMMA (b).

PMMA, 厚度为 1.4 mm(前后两个表层厚度之和), 透过率曲线如图 5 所示. 可以看出, 泡沫和泡沫筒在整个光谱区间的透过率均高于 96%, 对 X 射线的强度衰减很小 (约 7%). 值得注意的是, 虽然泡沫的面密度 (约 0.24 g/cm<sup>2</sup>) 有可能和混合头部的微喷颗粒面密度相当, 但由于泡沫和泡沫筒都是均匀的本底噪声, 其透过率波动才是影响实验结果的关键因素, 考虑到材料本身的均匀性, 这个影响很小. 另外, 本实验重点关注头部区域混合发展过程, 并不要求对所有区域同时有良好的面密度分辨.

### 3 实验结果

#### 3.1 实验结果统计

我们一共开展了两轮实验, 锡材料与泡沫紧贴的实验一共完成 10 发次, 其中, 有 ns 激光加载的动态实验 9 发, 没有 ns 激光加载的静态实验 1 发. 实验基本参数统计如表 1 所示, 时间延迟指的是 ns 激光前沿提前 ps 激光的时间. 锡材料与泡沫之间有真空间隙的实验一共开展了 5 发次, 如表 2 所示.

表 1 神光 II 升级装置紧贴条件下 (微) 层裂实验数据参数统计

Table 1. Experimental parameter statistics of (micro-) spall without vacuum gap conducted at the SGII-U facility.

序号	发次号	ns激光能量/J	ps激光能量/J	计算峰值压强/Ga	时间延迟/ns	备注
1	71		501.38			静态实验
2	72	106.7	486.28	2	2500	ns能量偏低
3	73	406	57.81	20	800	ps能量过低
4	74	547	529.6	24	800	
5	76	588	556.7	25	1000	
6	75	663	562.8	28	800	
7	77	809	560.2	31	600	
8	78	847	588	32	600	
9	80	1231	621	39	900	
10	79	352	592	41	600	

表 2 神光 II 升级装置非紧贴条件下 (微) 层裂实验数据参数统计

Table 2. Experimental parameter statistics of (micro-) spall with vacuum gap conducted at the SGII-U facility.

序号	发次号	ns激光能量/J	ps激光能量/J	计算峰值压强/GPa	时间延迟/ns
1	64	115.30	456.80	3	900
2	66	285.56	520.93	15	1500
3	55	644.07	556.10	27	900
4	56	763.46	576.95	30	600
5	62	1310.00	515.25	40	600

### 3.2 静态回收结果

在锡材料与泡沫紧贴的所有动态实验中对微喷颗粒进行了静态回收, 将回收到的泡沫进行侧向二维 CT 扫描分析, 可以研究泡沫中的微喷颗粒形态分布, 如图 6 所示. 由图 6 可以很直观地看到, 随着加载压强的变化, 微喷颗粒形态发生了变化, 对这个问题将在后面结合背光图像的面密度结果一起分析; 另外, 随着加载压强的变化, 颗粒穿透深度也不同. 如图 7 所示, 本次实验中锡样品与泡沫紧贴, 而之前开展的回收实验中, 两者之间有一段真空隙 (约几 mm), 属于非紧贴情况<sup>[14]</sup>. 可以看到, 非紧贴情况下, 当压强超过 22 GPa, 也就是达到卸载熔化压强后, 穿透深度随着压强的增大而增加. 然而, 在紧贴情况下, 压强超过 25 GPa 后, 穿透深度反而明显变小了.

另外, 基于微喷动态背光图像, 根据理论计算的冲击波到达界面时间 ( $t_0$ ) 及照相时间 ( $t_1$ ), 可以知道头部颗粒的运动时间 ( $t_1 - t_0$ ), 从而可以直接获得头部颗粒的平均运动速度, 如图 8 所示. 可以看到, 在泡沫与锡靶紧贴的情况下, 当压强超过 31 GPa 后, 颗粒运动速度反而降低了, 这与微喷颗粒在泡沫中的穿透深度规律基本一致. 我们知道, 微喷颗粒在泡沫中的穿透深度与微喷颗粒的动能和泡沫的阻滞作用有关, 而动能与喷射颗粒的质量 (大小) 和速度有关. 与非紧贴情况不同的是, 在紧贴

情况下, 当冲击波到达界面时, 由于泡沫的阻抗 (密度与声速的乘积) 较低, 冲击波会迅速发生卸载, 往锡材料中返回一束稀疏波, 同时往泡沫中传入一束冲击波, 由于冲击波速度比粒子速度高, 会先于喷射颗粒传入泡沫中, 从而改变泡沫的初始状态. 实验中使用的是 PMP 泡沫 (成分 CH), 是一种线性高分子链构成的聚合物, 内部孔洞尺寸大约在数百纳米至数微米. 低温时 ( $< 100\text{ }^\circ\text{C}$ ) PMP 泡沫呈玻璃态 (硬, 强度高), 继续升温 ( $< 150\text{ }^\circ\text{C}$ ) 超过玻璃化温度后变为弹性体, 继续升高温度 (约  $180\text{ }^\circ\text{C}$ ) 至流变温度后变为流体 (液体状态, 一般可以忽略其剪切强度), 再升温 ( $> 390\text{ }^\circ\text{C}$ ) 会发生分子链断裂、降解、变黑、炭化. 当冲击波压强增大到一定程度后, 波阵面的温度也会很高, 从而导致泡沫发生分解碳化, 局部密度变大, 强度提高, 对微喷颗粒的阻滞作用 ( $F$ ) 增强. 根据 Multi-1D 流体程序计算 (800J, 自由面附近压强为 31 GPa) 结果, 在冲击波到达界面之前, 锡样品中的温度已达到约 1200 K, 这是一个很高的温度, 这个值也与锡的冲击雨贡纽曲线基本吻合<sup>[2]</sup>. 同时, 由于压强增加, 锡样品从部分卸载熔化逐渐过渡到完全卸载熔化 ( $> 33\text{ GPa}$ ), 越来越多的片状颗粒变成了尺寸和质量更小的球形颗粒. 根据文献<sup>[14]</sup>, 可以假设片状颗粒长宽各为  $L$  (百微米), 厚度为  $L/10$ , 球形颗粒的直径与片状颗粒厚度相当 (十微米), 暂且认

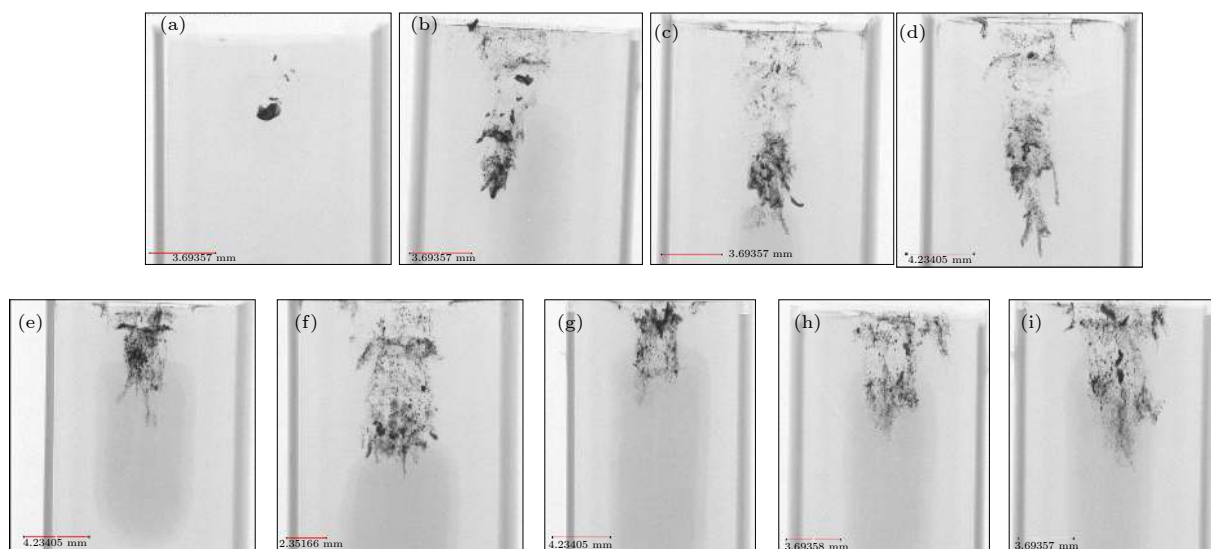


图 6 不同发次回收的微喷颗粒图像 (a) 72 发, 2 GPa; (b) 73 发, 20 GPa; (c) 72 发, 24 GPa; (d) 76 发, 25 GPa; (e) 75 发, 28 GPa; (f) 77 发, 31 GPa; (g) 78 发, 32 GPa; (h) 80 发, 39 GPa; (i) 79 发, 41 GPa

Fig. 6. Recovery image of tin fragments stagnated in the foam by 2-D CT analysis: (a) 72 shot, 2 GPa; (b) 73 shot, 20 GPa; (c) 72 shot, 24 GPa; (d) 76 shot, 25 GPa; (e) 75 shot, 28 GPa; (f) 77 shot, 31 GPa; (g) 78 shot, 32 GPa; (h) 80 shot, 39 GPa; (i) 79 shot, 41 GPa.

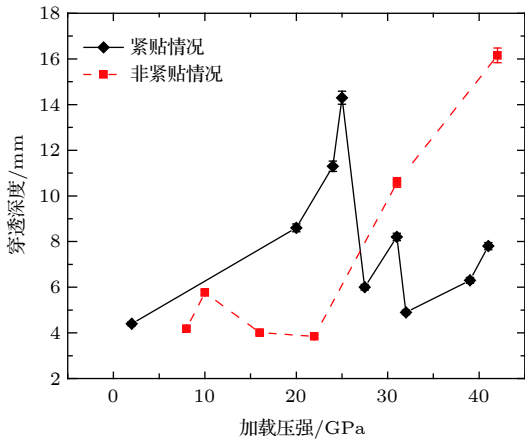


图 7 紧贴条件和非紧贴条件下, 不同压强下微喷颗粒在泡沫中的穿透深度比较  
Fig. 7. Penetration depth of the tin fragments in foam versus pressure, with and without vacuum gap.

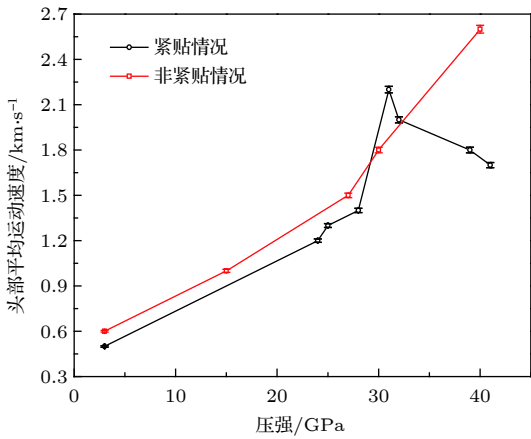


图 8 紧贴条件和非紧贴条件下, 不同压强下微喷头部颗粒的平均速度比较  
Fig. 8. Average velocity of front fragments versus loading pressure, with and without vacuum gap.

为两种颗粒密度相同, 通过简单计算可以得到, 球形颗粒的质量仅为片状颗粒质量的 1/200, 而两者的速度仅有大约 2—3 倍的差别 (按照射流速度和自由面速度对比). 因此, 压强增加后, 微喷颗粒动能  $E$  大大减小 ( $E = mv^2/2$ ,  $m$  为喷颗粒的质量,  $v$  为喷颗粒的速度), 从而导致头部颗粒穿透深度  $P_{\text{depth}}$  ( $P_{\text{depth}} = E/F$ ) 变小.

### 3.3 混合图像分析

通过对 IP 板上粘贴的锡台阶样品进行密度拟合, 可以获得不同动态照相发次的面密度 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ), 利用 Abel 反演, 在假设轴对称的情况下, 还可以获得体密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )<sup>[5]</sup>. 下面根据直接获得的背光图像, 结合面密度和体密度数据, 对一些典型的物

理过程进行分析.

72 发的 ns 激光加载能量只有 100 J, Multi-1D 计算得到的加载压强约为 2 GPa, 接近锡的层裂压强<sup>[20]</sup>, 背光图像如图 9(a) 所示, 激光加载方向为从下往上. 图 9(b) 是压强为 15 GPa 时的典型层裂图像<sup>[5]</sup>, 在  $y$  方向有明显的密度分层, 产生了两个层裂片. 虽然图 6(a) 的回收结果显示最终形成了一块较大的层裂片, 但从图 9(a) 结果来看, 图像边缘仍然是连续的, 并没有发生断裂现象, 其原因是加载压强太低, 在该发次设定的时间延迟内, 还没有发生稀疏波相互拉伸形成层裂片并脱离样品基体.

如图 10 所示, 当加载压强增加到 25 GPa 时, 锡样品已经发生了卸载熔化, 但只是部分熔化, 样品处于固液混合的状态, 因此背光图像同时具有微层裂和层裂的特征. 样品表面微槽、微孔形成的速度高尺寸小的微喷颗粒, 在泡沫的阻滞作用下, 在头部堆积, 导致头部密度较高, 图像透过率较低. 后面紧跟的是由稀疏拉伸造成的尺寸较大、速度较慢的微射流颗粒. 此外, 由于仍然存在强度的影响, 还可以明显地看到稀疏波相互作用造成的边侧拉伸断裂现象 (箭头所指).

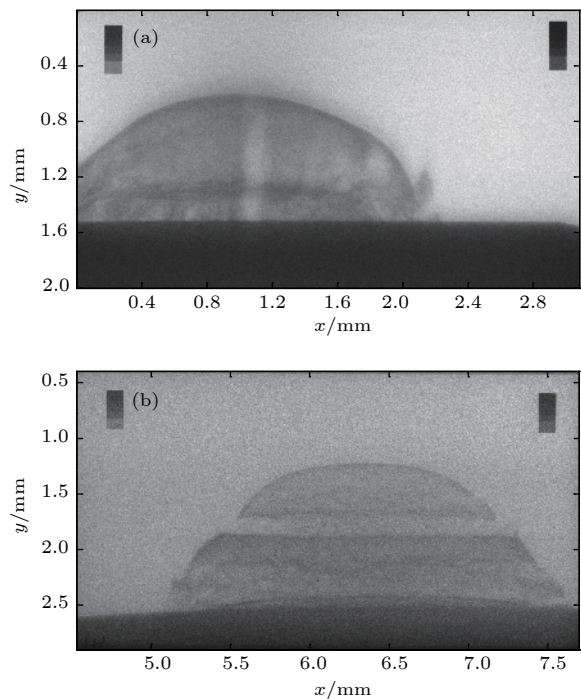


图 9 (a) 72 发背光图像, 压强 2 GPa; (b) 非紧贴条件下典型层裂图像, 66 发, 压强 15 GPa  
Fig. 9. Radiographs of shot 72 at 2 GPa (a); spall image with vacuum gap at 15 GPa, shot 66 (b).

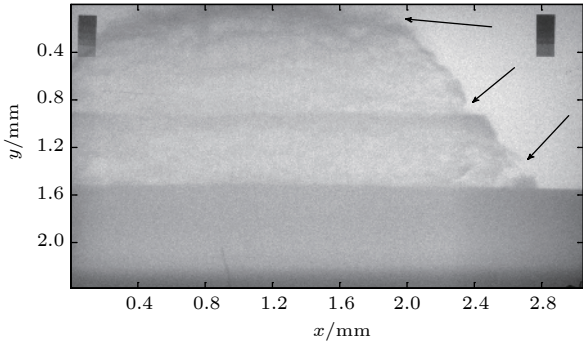


图 10 76 发背光图像, 压强 25 GPa

Fig. 10. Radiograph image of shot 76 at 25 GPa.

随着加载压强的进一步增加, 背光图像如图 11(a) 所示, 压强为 28 GPa, 非紧贴情况 (相当于真空) 下背光图像如图 11(b) 所示, 压强为 30 GPa. 可以看到, 非紧贴与紧贴情况的背光图像非常相似, 由于该压强已经接近完全卸载熔化压强, 稀疏拉伸造成微层裂产生的主要是分布比较连续的液态小颗粒, 因此密度比较均匀, 面密度的结果 (图 12) 也证实了这一点. 但是, 在混合头部区域, 两者有明显差别. 非紧贴情况下, 头部区域光滑连续; 而紧贴情况下, 头部顶端有明显的毛刺状不连续密度分布,

其面密度约为头部弧顶区域的一半. 两种情况下, 头部颗粒的面密度基本相同 ( $0.09 \pm 0.02 \text{ g/cm}^2$ ), 这说明虽然微喷颗粒与泡沫在界面附近发生了混合, 出现了互相侵入的现象, 但微喷颗粒并没有发生二次破碎. 另外, 从图 13 体密度结果来看, 混合界面层的密度比其他区域要高, 像一个硬“壳”, 而且在界面上呈现出周期性的调制结构 (箭头所指), 调制周期约几百  $\mu\text{m}$ , 可以看作是扰动的波长, 这与界面不稳定性发展演化的结果很相似. 我们知道, 当衰减冲击波 (泰勒波) 穿过锡和泡沫界面时, 会有 RM(Richtmyer-Meshkov) 不稳定性 [21-23], 同时, 由于泰勒波的卸载和泡沫的阻滞作用, 界面开始减速, RT(Rayleigh-Taylor) 不稳定性也会发展起来 [24,25]. 虽然锡材料自由面的初始光洁度较高, 扰动振幅小, 但在经过相当长时间的演化发展后, 还是会被放大的比较明显. 两种不稳定性机制共同作用, 使得界面的演化发展过程变得非常复杂. 因为事先没有测量界面的初始状态, 所以没有办法进行定量的分析. 因此, 下一步的工作将重点考虑在锡材料与泡沫界面预制初始扰动, 研究混合及界面不稳定性的发展.

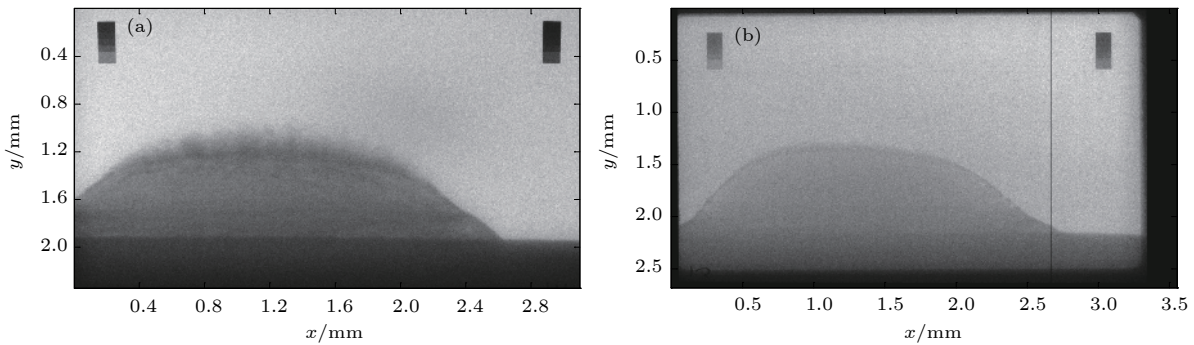


图 11 (a) 75 发背光图像, 压强 28 GPa; (b) 56 发背光图像, 压强 30 GPa

Fig. 11. Radiographs of shot 75 at 28 GPa (a) and shot 56 at 30 GPa (b).

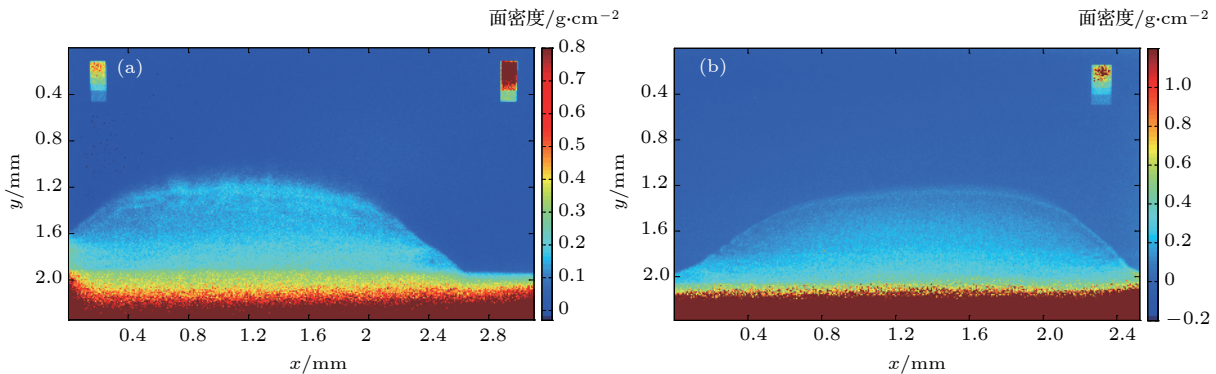


图 12 (a) 75 发的面密度; (b) 56 发的面密度

Fig. 12. Areal densities of shot 75 (a) and shot 56 (b).



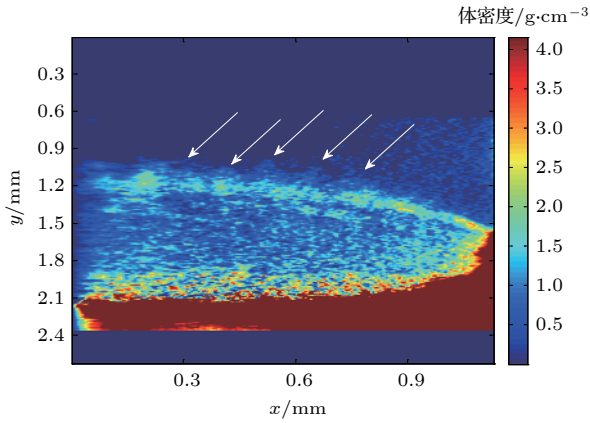


图 13 75 发的体密度

Fig. 13. Bulk density of shot 75.

## 4 结 论

利用 ps 脉冲激光照射金丝产生高能 X 射线, 开展了锡样品与低密度泡沫混合的背光照相实验. 实验获得了几个不同压力点微喷产物在早期与泡沫混合过程的高能 X 射线背光图像. 结果显示, 泡沫对微喷颗粒有一定的减速作用, 冲击波提前与泡沫发生作用, 使泡沫的初始状态 (结构、力学性能) 发生了变化, 导致压强超过 31 GPa 后, 微喷颗粒穿透深度反而减小. 由于泡沫密度低, Atwood 数接近真空条件 (-1), 混合初期的图像整体分布与真空条件下结果差别较小. 背光图像面密度结果显示, 微喷颗粒没有发生明显的二次破碎, 混合头部出现了类似界面不稳定性发展演化形成的周期调制结构. 由于目前的背光成像系统视场较小, 观测时间有限, 只能研究早期的微喷混合发展过程. 下一步实验将考虑设计更大照相视场 (10 mm) 的成像系统, 获取全视场下的混合过程并直接与静态回收结果进行比较, 更加细致地研究微喷混合过程. 另外, 我们考虑在锡样品和泡沫界面预制初始扰动, 研究微射流与低密度介质混合及界面不稳定性的发展演化.

本文所完成的实验得到了神光 II 升级装置运行人员、激光聚变研究中心靶科学与制备部和材料科学与技术部相关同事, 以及所有诊断人员的大力协助, 在此表示衷心的感谢!

## 参考文献

[1] Wang P, He A M, Shao J L, Sun H Q, Chen D W, Liu W B, Liu J 2018 *Sci. China: Physica, Mechanica & Astronomica* **48** 094608 (in Chinese) [王裴, 何安民, 邵建立, 孙海权, 陈大伟, 刘文斌, 刘军 2018 中国科学: 物理学 力学 天文学 **48** 094608]

[2] de Resseguier T, Signor L, Dragon A, Boustie M, Roy G,

Llorca F 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 013506

[3] de Resseguier T, Roland C, Prudhomme G, Lescoute E, Loison D, Mercier P 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 185108

[4] de Resseguier T, Roland C, Lescoute E, Sollier A, Loison D, Berthe L, Prudhomme G, Mercier P 2015 *AIP Conf. Proc.* **1793** 100025

[5] de Resseguier T, Signor L, Dragon A, Severin P, Boustie M 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 073535

[6] de Resseguier T, Signor L, Dragon A, Boustie M, Berthe L 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 131910

[7] de Resseguier D, Signor L, Dragon A, Roy G 2010 *Int. J. Fract.* **163** 109

[8] Zellner M B, McNeil W V, Hammerberg J E, Hixson R S, Obst A W, Olson R T, Payton J R, Rigg P A, Routley N, Stevens G D, Turley W D, Veaser L, Buttler W T 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 123502

[9] Franzkowiak J E, Prudhomme G, Mercier P, Lauriot S, Dubreuil E, Berthe L 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 033901

[10] Asay J R 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 6173

[11] Morard G, de Resseguier T, Vinci T, Benuzzi-Mounaix A, Lescoute E, Brambrink E, Koenig M, Wei H, Diziere A, Occelli F, Fiquet G, Guyot F 2010 *Phys. Rev. B* **82** 174102

[12] de Resseguier T, Lescoute E, Sollier A, Prudhomme G, Mercier P 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 043525

[13] Lescoute E, de Resseguier T, Chevalier J M, Boustie M, Cuq-Lelandais J P, Berthe L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 211905

[14] Xin J T, Gu Y Q, Li P, Luo X, Jiang B B, Tan F, Han D, Wu Y Z, Zhao Z Q, Su J Q, Zhang B H 2012 *Acta Phys. Sin.* **23** 236201 (in Chinese) [辛建婷, 谷渝秋, 李平, 罗炫, 蒋柏斌, 谭放, 韩丹, 巫殷忠, 赵宗清, 粟敬钦, 张保汉 2012 物理学报 **23** 236201]

[15] He W H, Xin J T, Chu G B, Li J, Shao J L, Lu F, Shui M, Qian F, Cao L F, Wang P, Gu Y Q 2014 *Optics Express* **22** 18924

[16] He W H, Xin J T, Zhao Y Q, Chu G B, Xi T, Shui M, Lu F, Gu Y Q 2017 *AIP Advances* **7** 065306

[17] Xin J T, Zhao Y Q, Chu G B, Xi T, Shui M, Fan W, He W H, Gu Y Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **18** 186201 (in Chinese) [辛建婷, 赵永强, 储根柏, 席涛, 税敏, 范伟, 何卫华, 谷渝秋 2017 物理学报 **18** 186201]

[18] Zhang L, Li Y H, Cheng J M, Li X M, Zhang Z G, Ye X P, Cai L C 2016 *High Power Laser and Particle Beams* **28** 041003 (in Chinese) [张林, 李英华, 程晋明, 李雪梅, 张祖根, 叶想平, 蔡灵仓 2016 强激光与粒子束 **28** 041003]

[19] Chu G B, Xi T, Yu M H, Fan W, Zhao Y Q, Shui M, He W H, Zhang T K, Zhang B, Wu Y C, Zhou W M, Cao L F, Xin J T, Gu Y Q 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 115106

[20] Marshall F J, McKenty P W, Delettrez J A, Epstein R, Knauer J P, Smalyuk V A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 185004

[21] Dimonte G, Gore R, and Schneider M 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1212

[22] Buttler W T, Oro D M, Preston D L, Mikaelian K O, Cherne F J, Hixson R S, Mariam F G, Morris C, Stone J B, Terrones G, Tupa D 2012 *J. Fluid Mech.* **703** 60

[23] Dimonte G, Terrones G, Cherne F J, Ramaprabhu P 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 024905

[24] Dimonte G and Remington B 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1806

[25] Kuranz C C, Park H S, Huntington C M, Miles A R, Remington B A, Plewa T, Trantham M R, Robey H F, Shvarts D, Shimony A, Raman K, MacLaren S, Wan W C, Doss F W, Kline J, Flippo K A, Malamud G, Handy T A, Prisbrey S, Krauland C M, Klein S R, Harding E C, Wallace R, Grosskopf M J, Marion D C, Kalantar D, Giraldez E, Drake R P 2018 *Nature Communications* **9** 1564

# Observation of ejecta tin particles into polymer foam through high-energy X-ray radiography using high-intensity short-pulse laser

Shui Min<sup>†</sup> Yu Ming-Hai Chu Gen-Bai Xi Tao Fan Wei Zhao Yong-Qiang  
Xin Jian-Ting He Wei-Hua<sup>‡</sup> Gu Yu-Qiu

(*Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

( Received 27 December 2018; revised manuscript received 18 February 2019 )

## Abstract

Micron-scale fragment ejection of metal is a kind of surface dynamic fragmentation phenomenon upon shock loading. The study of ejecta is crucial in many fields, such as inertial confinement fusion and pyrotechnics. Due to the particular advantages of laser experiments, a lot of studies of ejecta by strong laser-induced shock loading have been conducted in recent years. The shapes, size and mass of particle can be obtained via static soft recovery technique with foam. However, the stagnation and succedent mixing of the ejecta in the foam could not be deduced by this technique. To study the mixing between the ejecta and foam, a radiography experiment is performed by using the X-ray generated through the irradiation of picosecond laser on the golden wire. This radiography technique has not only high spatial resolution but also high temporal resolution. Two kind of experiments are designed and performed. In the first one, the tin sample and the foam are close to each other while a vacuum gap is arranged between them in the other one. The mixing process is analyzed with the determined areal density and volume density, as well as the results of recovery. The areal density of the front mixing area is similar to the scenario in the case with a vacuum gap, suggesting that the ejecta have not underwent a secondary fragmentation due to the collision with foam. Furthermore, the static recovery results show a different characteristic of penetration depth for the ejecta in the foam. When the tin sample is not close to the foam, the penetration depth in the foam increases with the loading pressure increasing. However, the penetration depth begins to decrease at a critical pressure after a brief increase, which is attributed to the interaction between the shock and the foam before the ejecta coming, and also to the ejecta size and composition. The shock pressure is high enough to change the foam performance, thus enhancing the stagnation ability for ejecta penetration. Moreover, the size and composition vary with loading pressure, thereby leading to the momentum change of the ejecta related to the penetration depth. In the future work, we will improve the field of view of the X-ray radiography to achieve a direct comparison between the dynamic results and the recovery results. Moreover, we will arrange perturbations at the interface to study the mixing between the micro-jetting and the foam and the interface instability.

**Keywords:** micron-scale fragment ejecta, inertial confinement fusion, recovery, mixing

**PACS:** 62.20.M-, 47.85.Dh, 87.59.B-, 47.20.Ma

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182280

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [shuimin123@163.com](mailto:shuimin123@163.com)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [564869181@qq.com](mailto:564869181@qq.com)