

强激光加载下金属材料微喷回收诊断*

辛建婷[†] 谷渝秋 李平 罗炫 蒋柏斌 谭放 韩丹 巫殷忠
赵宗清 栗敬钦 张保汉

(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)

(2012年5月24日收到; 2012年6月15日收到修改稿)

金属材料在冲击载荷下的动态响应在许多民用工程、航空航天等领域都有重要的应用背景. 而金属材料在冲击载荷下的微喷形成过程, 包括微射流、碎裂以及微层裂的物理过程的研究中尚存在许多空白. 介绍了国内首次在神光III原型激光装置上开展的金属材料微喷回收实验, 实现了激光加载下低密度泡沫材料对微喷颗粒的回收, 对回收样品进行了X光CT分析, 通过图像重建, 获得了回收微喷颗粒的三维图像, 以及颗粒不同形态分布、颗粒尺寸、颗粒质量等定量结果.

关键词: 强激光, 微喷, 回收, CT重建

PACS: 62.20.M-, 62.50.Ef, 64.70.D-

1 引言

冲击载荷下金属材料微喷现象是材料的多种状态因素与动力学条件相互耦合多机理复杂动力学过程的结果. 形成微喷的原因非常复杂, 在冲击波作用下, 材料表面的微槽、微坑等会形成微射流, 材料内部的微孔洞、杂质等也会形成微喷; 而当冲击压强较高, 造成材料的冲击熔化或卸载熔化时, 冲击波在材料自由面反射后与稀疏波相互作用, 会在熔化状态的材料中形成很强的拉应力, 当这个拉应力高于材料的层裂强度, 就会造成材料的断裂(微层裂), 也会形成液体微滴从自由面喷出.

材料在冲击载荷作用下形成微喷的各种机理是非常重要的基础物理问题, 也是非常重要的工程技术问题, 如工程材料高压下的动态损伤、爆炸容器的设计、激光惯性约束聚变中黑腔碎片的防护设计等. 早在20世纪50年代, 多个国家就相继开始了对微喷现象的研究^[1-16], 发展了石英计法、阴影成像、质子照相、X光照相等多种微喷过程的测试诊断方法. 但是由于微喷过程的动态检测难

度较大, 到目前为止, 所获得的材料微喷量、微喷颗粒尺寸以及微喷射速度等定量数据非常少, 对于材料在冲击载荷作用下形成微喷的各种机理的物理图像仍不是十分清晰.

采用强激光驱动冲击加载是开展材料微喷过程研究的一种新方法, 与传统的炸药爆炸或飞片碰撞等实验加载方法相比有其特有的优势, 比如靶样品尺寸小、实验精密度高、易于开展与加载激光精确同步的诊断测试、可以开展微喷颗粒的回收分析等. 我们在国内首次开展了强激光驱动冲击加载下锡材料的微喷回收实验, 并对回收微喷颗粒样品进行了三维X光CT分析, 获得了微喷颗粒的分布图像, 以及微喷颗粒的定量参数.

2 实验

实验在中国工程物理研究院激光聚变研究中心神光III原型激光装置上开展, 采用两束激光对平面锡靶直接进行加载, 锡靶后装配低密度泡沫回收筒, 回收筒与锡靶后表面的间距为1 mm. 实验中锡靶厚度为106和260 μm , 回收筒材料

* 国家自然科学基金(批准号: 10902101)资助的课题.

[†] E-mail: Jane_xjt@126.com

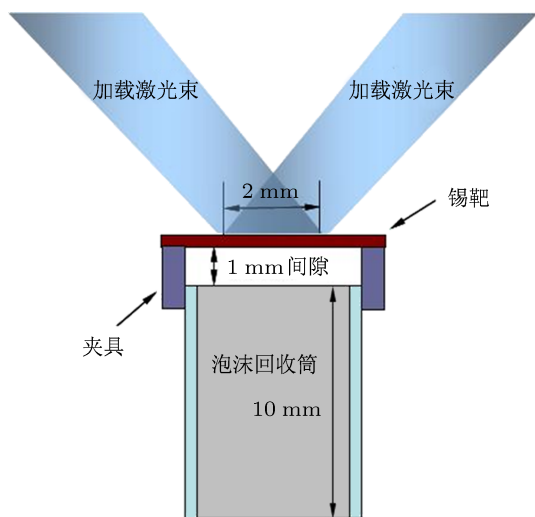


图1 实验布局图

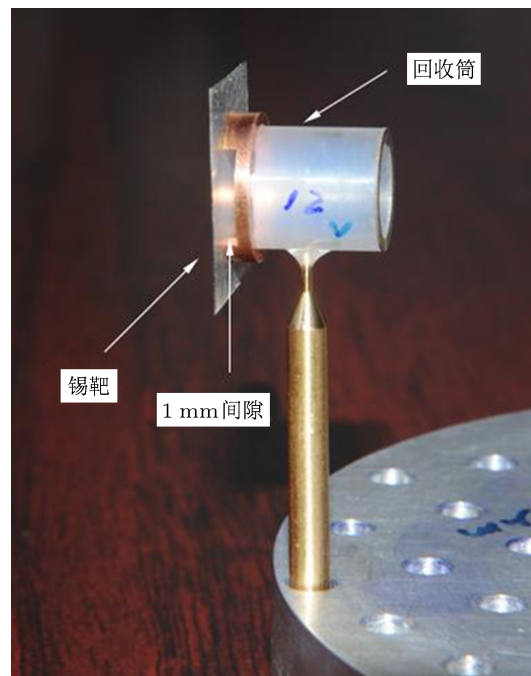


图2 微喷回收靶结构

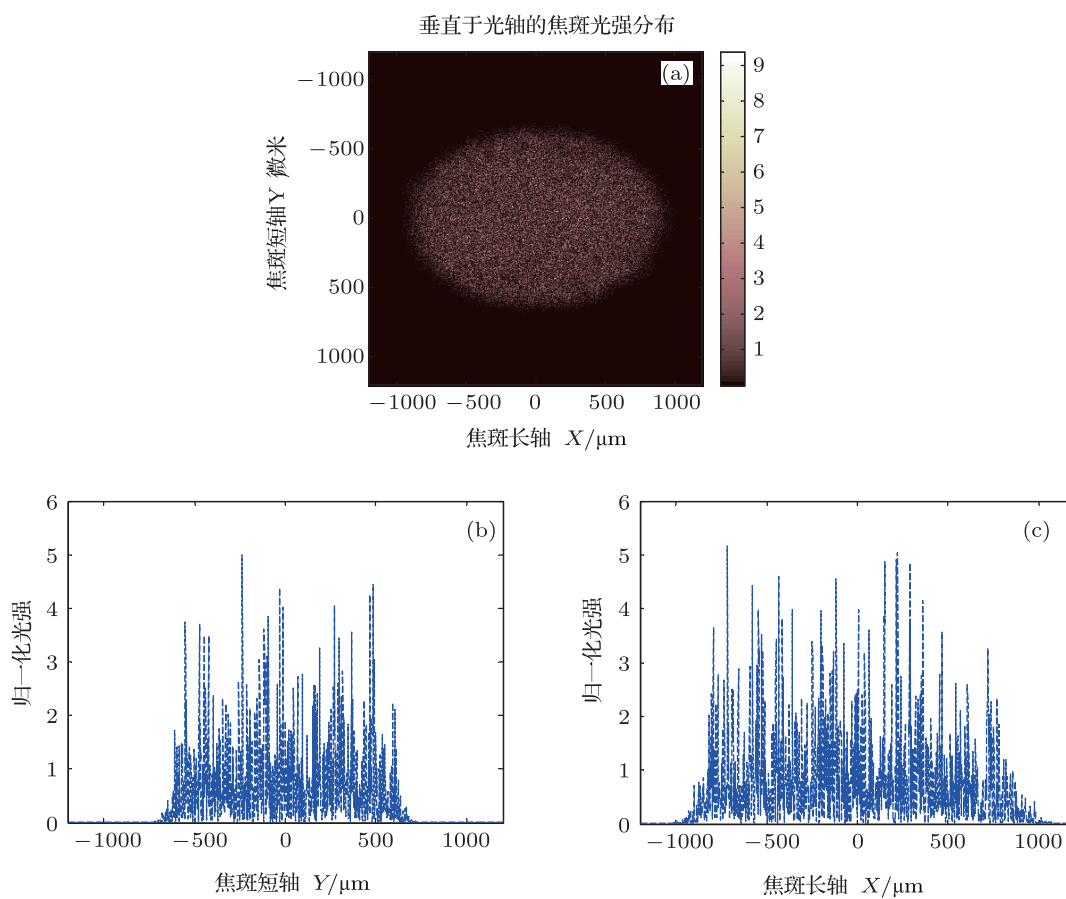


图3 经过 cpp 板束匀化后, 光斑区激光能量分布结果

为 PVC 泡沫, 密度 200 mg/cm^3 , 回收筒直径 8 mm , 筒高 10 mm . 图 1 所示为实验布局图, 图 2 为实验靶照片.

实验中加载激光波长 $0.35 \mu\text{m}$, 脉冲宽度 3 ns , 靶面激光光斑直径为 2 mm . 为了满足激光驱动冲击波的平面性要求, 采用连续相位板 (continuous phase plates, cpp) 对两束加载激光进行了束匀化, 使得激光能量在靶面光斑区域内均匀分布. 图 3 所示为经过 cpp 板后, 靶面光斑区激光能量的分布结果.

为了对不同加载能量的激光脉冲在锡材料中驱动冲击波的传播过程及相关参数进行预估, 采用一维流体力学程序 Hyades 进行建模, 并计算了波长 $0.35 \mu\text{m}$, 上升前沿 0.1 ns , 下降沿 0.1 ns , 脉冲宽度 3 ns , $50\text{--}400 \text{ J}$ 激光能量辐照下, 在锡材料中驱

动冲击波的过程, 根据锡材料的冲击熔化点及卸载熔化点的压强参数, 确定冲击波达到锡靶自由面附近压强 $15\text{--}50 \text{ GPa}$ 范围的加载激光参数.

3 实验结果

激光加载实验中采用动态回收技术, 对泡沫筒样品进行了回收, 共得到 8 发次实验回收样品结果. 根据数值计算结果, 其激光加载参数分别对应靶自由面附近冲击压强 $12\text{--}50 \text{ GPa}$. 采用 X 射线 CT 技术对实验回收的泡沫筒进行了分析, 获得了回收微喷颗粒的分布图像. 图 4 所示为不同激光加载条件下泡沫筒中微喷颗粒的二维 CT 图像, 冲击波加载方向为自上而下, 空间分辨好于 $10 \mu\text{m}$.

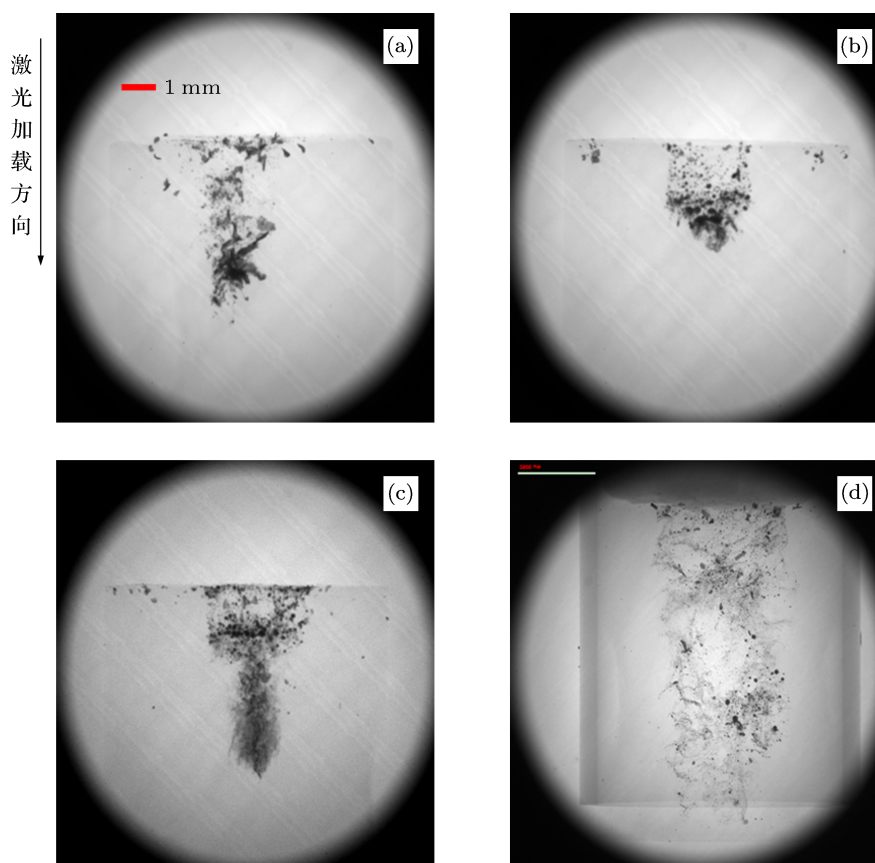


图 4 不同自由面压强条件下回收微喷颗粒的图像 (a) 锡靶厚度 $260 \mu\text{m}$, 激光功率密度为 $1.45 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$, 自由面压强为 12 GPa ; (b) 锡靶厚度 $106 \mu\text{m}$, 激光功率密度 $6.36 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, 自由面压强 27 GPa ; (c) 锡靶厚度 $106 \mu\text{m}$, 激光功率密度 $1.29 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$, 自由面压强 42 GPa ; (d) 锡靶厚度 $260 \mu\text{m}$, 激光功率密度 $1.08 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$, 自由面压强 50 GPa

对这些图像结果进行初步的分析, 在 13 GPa 的低压强点, 回收筒中的颗粒主要为片状, 尺寸在亚毫米到毫米量级, 应该是由于材料发生层裂而形成

的层裂碎片. 在 27 GPa 压强条件下, 微喷颗粒为圆形, 在这个压强范围锡材料发生卸载熔化, 在熔化材料中形成微层裂, 造成液体的材料颗粒喷溅. 而

在 42 GPa 条件下, 回收的微喷颗粒形态较为复杂, 不仅包含几微米到十几微米量级的圆形颗粒 (分布在回收微喷颗粒的前端), 几百微米量级的片状颗粒 (分布在回收微喷颗粒的中段), 还包含几十微米量级的圆形颗粒 (分布在回收微喷颗粒的后端), 说明在这个压强条件下, 形成材料微喷的情况较为复杂, 应该包括材料表面微槽等形成的微射流、碎裂以及微层裂等多种机理. 在 50 GPa 以上压强下, 材料微喷速度明显较高, 将回收筒完全贯穿, 根据数值计算结果, 微喷颗粒的最高速度可达到 6 km/s.

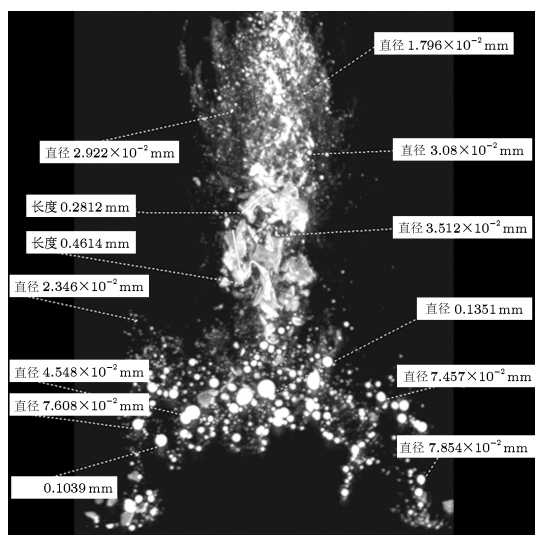


图 5 激光功率密度 1.29×10^{12} W/cm², 自由面压强 42 GPa, 锡材料微喷颗粒三维重建结果

通过对微喷颗粒图像的 CT 重建, 可以对回收颗粒的形态以及颗粒的尺寸进行定量观测, 并根据统计结果对微喷颗粒的质量进行定量计算. 图 5 所示为激光能量 85 J, 激光功率密度

1.29×10^{12} W/cm², 自由面压强为 42 GPa 实验回收的微喷颗粒三维重建结果. 回收的微喷颗粒明显可以分为三个区域, 头部区域分布为直径几微米到十几微米圆形颗粒, 速度较高, 是由于材料表面微槽、微孔等形成的微射流颗粒; 中部区域为尺寸在几百微米量级的片状颗粒, 其形态与头部圆形颗粒完全不同, 并出现在射流区之后, 应为微射流槽之间形成断裂后的材料碎片; 微喷颗粒的后部分布为直径几十微米到百微米的圆形颗粒, 并且空间区域分布较大, 应是由于冲击波与稀疏波相互作用的在熔化材料中形成拉应力, 造成材料微层裂而形成的颗粒喷溅. 微喷颗粒的不同形态反映了形成微喷的不同机理, 这与微喷形成的物理图像较为符合. 回收的微喷颗粒可以进行定量的尺寸测量, 经过统计计算, 回收的微喷颗粒总质量为 3.43 mg.

4 结论

在神光 III 原型激光装置上开展了激光加载下锡材料的微喷过程及微喷颗粒回收实验方法研究. 采用 cpp 技术, 对加载激光束能量进行了束匀滑, 获得了直径 2 mm, 能量分布较为均匀的激光焦斑. 通过不同激光能量加载, 在靶材料内驱动冲击波, 获得了锡材料不同压强条件下的微喷颗粒回收样品, 通过对回收低密度泡沫的 X 光 CT 分析和图像重建, 获得了不同实验条件下的微喷射颗粒的三维空间分布及颗粒尺寸等定量结果. 实验结果表明, 这种实验技术对开展金属材料的微喷射研究是非常有前景的.

- [1] Asay J R 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 6173
- [2] Sigon L, Roy G, Chanal P Y, Hérelil P L, Buy F, Voltz C, Llorca F, de Ressaiguier T, Dragon A 2009 *Shock Compression of Condensed Matter: Proceeding of the American Physical Society Topic Group on Shock Compression of Condensed Matter* Nashville, Tennessee, 28 June–3 July, *AIP Conf. Proc.* **1195** p1065
- [3] Sigonr L, Dragon A, de Ressaiguier T, Roy G, Llorca F 2008 *Insittue of Fundamental Technological Research* **60** 323
- [4] Andriot P, Chapron P, Olive F 1982 *AIP Conf. Proc.* **78** 505
- [5] de Ressaiguier T, Sigonr L, Dragon A, Boustie M, Roy G, Llorca F 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 013506
- [6] Sigonr L, Lescoute E, Loison D, de Ressaiguier T, Dragon A, Roy G 2010 *EPJ Web of Conferences* **6** 39012
- [7] Signor L, de Ressaiguier T, Roy G, Dragon A, Liorca F 2007 *Shock*

Compression of Condensed Matter-2007: Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter Walkoloa, Hawaii AIP Conference Proceedings June 24–29, 2007 **955** 593

- [8] Sigonr L, de Ressaiguier T, Dragon A, Roy G, Fanget A, Faessel M 2010 *International Journal of Impact Engineering* **37** 887
- [9] de Ressaiguier T, Sigonr L, Dragon A, Boustie M, Berthe L 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 131910
- [10] Lescoute E, de Ressaiguier T, Chevalier J M, Boustie M, Berthe L, Cuq-Lelandais J P 2009 *Shock Compression of Condensed Matter: Proceeding of the American Physical Society Topic Group on Shock Compression of Condensed Matter* Nashville, Tennessee, 28 June–3 July, *AIP Conf. Proc.* **1195** 1043
- [11] Liu Z Q, Ye Y, Zheng X X, Li Z Y, Li Z R, Zhong J, Luo Z X, Li

- J 2004 *High Energy Density Phys.* **3** 113 (in Chinese) [刘振清, 叶雁, 郑贤旭, 李作有, 李泽人, 钟杰, 罗振雄, 李军 2006 高能密度物理 **3** 113]
- [12] Zheng X X, Liu Z Q, Wang R B, Li Z Y, Ye Y, Zhong J, Li Z R 2004 *Chin. J. High Pressure Physics* **18** 188 (in Chinese) [郑贤旭, 刘振清, 王荣波, 李作友, 叶雁, 钟杰, 李泽人 2004 高压物理学报 **18** 188]
- [13] Wang W, Li Z Y, Li X Z, Li J, Shang C S 2008 *J. Appl. Opt.* **29** 526 (in Chinese) [汪伟, 李作友, 李欣竹, 李剑, 尚长水 2008 应用光学 **29** 526]
- [14] Ye Y, Wang W, Li Z Y, Li J, Liu Z Q, Zhong J 2009 *Chin. J. High Pressure Phys.* **23** 472 (in Chinese) [叶雁, 汪伟, 李作友, 李剑, 刘振清, 钟杰 2009 高压物理学报 **23** 472]
- [15] Wang G Z, Feng S, Wang Z R, Wang S Y, Liu S L, Yan Q, Wang J G 1995 *Optical Technology* **5** 24 (in Chinese) [王国志, 丰善, 王正荣, 王淑岩, 刘书龙, 晏迁, 王建刚 1995 光学技术 **5** 24]
- [16] Ye Y, Zheng X X, Li Z Y, Li Z R, Zhong J, Liu Z Q, Luo Z X 2004 *High Power Laser and Particel Beams* **16** 160 (in Chinese) [叶雁, 郑贤旭, 李作友, 李泽人, 钟杰, 刘振清, 罗振雄 2004 强激光与粒子束 **16** 160]

Study on metal ejection under laser shock loading*

Xin Jian-Ting[†] Gu Yu-Qiu Li Ping Luo Xuan Jiang Bai-Bin Tan Fang Han Dan
Wu Yin-Zhong Zhao Zong-Qing Shu Jing-Qin Zhang Bao-Han

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P.O.Box 919-986, Mianyang 621900, China)

(Received 24 May 2012; revised manuscript received 15 June 2012)

Abstract

Dynamic response of metal to shock loading plays an important role in the fields of civil engineering, aeronautics, etc. The forming process of ejection of metal under shock loading, including micro-jet, fragmentation and micro-spall remain to be studied. The present work is devoted to laser-shock experiments in metal ejection on the SGIII laser facility. And the fragment recovery and post-test evaluation of the fragment-size distribution are achieved.

Keywords: intense laser, ejection, recovery, CT image reconstruction

PACS: 62.20.M-, 62.50.Ef, 64.70.D-

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10902101).

[†] E-mail: Jane_xjt@126.com