

熔化状态下金属样品表面的微喷射问题

陈永涛 洪仁楷 陈浩玉 任国武

Experimental investigation of ejecta on melted Sn sample under shock loading

Chen Yong-Tao Hong Ren-Kai Chen Hao-Yu Ren Guo-Wu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 026201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.026201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.026201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高纯铜初始层裂的微损伤特性研究

[Micro-damage characteristics of incipient spall in high-purity copper](#)

物理学报.2015, 64(21): 216201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.216201>

平面冲击下铜的拉伸应变率相关特性研究

[Rate-dependent characteristics of copper under plate impact](#)

物理学报.2014, 63(19): 196202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.196202>

动态损伤演化的空间不连续性实验研究

[Experimental study of the spatial discontinuity of dynamic damage evolution](#)

物理学报.2013, 62(22): 226201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.226201>

TiN 薄膜在纳米压痕和纳米划痕下的断裂行为

[Fracture behavior of TiN coating under nanoindentation and nanoscratch test](#)

物理学报.2013, 62(13): 136201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.136201>

三角波加载下金属铝动态破坏现象的微观模拟

[Microscopic simulation on the dynamic failure of metal Al under triangular wave loading](#)

物理学报.2013, 62(7): 076201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.076201>

熔化状态下金属样品表面的微喷射问题*

陈永涛 洪仁楷 陈浩玉 任国武†

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2015年6月29日收到; 2015年8月27日收到修改稿)

熔化状态下金属样品表面微喷物质的时空演化规律是目前国内外研究关注的热点问题, 不过, 由于压电石英计等传统诊断技术能力的限制, 导致目前对该问题的认识仍存在明显不足. 本文采用作者前期发展的大量程 Asay-F 窗技术, 结合传统压电石英计, 通过将其布置在距受载 Sn 样品自由面不同高度位置处的方法, 系统研究了熔化 Sn 样品表面微喷物质的运动演化规律, 给出了特定时刻微喷物质的密度-空间分布图像. 本文研究结果从实验上确认了微喷物质时空演化过程中的“自相似膨胀”规律, 成功避免了传统压电石英计由于测量量程偏低导致其获取物理认识不够全面的问题, 为认识动载下金属材料的微喷运动演化规律提供了重要实验支撑.

关键词: 微喷, 熔化, 自相似膨胀, Asay-F 窗

PACS: 62.20.mm, 62.50.Ef

DOI: 10.7498/aps.65.026201

1 引言

表面微喷是指当材料自由表面受到强动载荷作用时, 将有一些物质微粒以比自由表面整体运动速度更大的速度从自由表面喷射出来的动力学现象. 表面微喷是一种典型的复杂多机理动力学问题, 其受材料性能、样品表面状态、加载状态(加载压力和加载波形等)等多种因素影响, 形成机理复杂多样. 从1953年Walsh实验上观察到微喷现象以来, 研究人员一直在持续研究该问题^[1-15], 且重点集中在喷射总量、速度特征、颗粒尺度等方面. 在微喷物质时空演化规律方面的研究相对较少, 最典型的代表是2008年Zeller等^[9], 他们采用传统压电石英计(或称为压电探针)测试方法, 研究了动载下金属样品表面微喷物质在时空演化过程中的“自相似膨胀”规律. 不过, 非常遗憾的是, 由于Zeller等在实验中采用的压电石英计技术测量量程偏低, 其仅诊断了部分高速低密度微喷物质的信息, 得到的结论也不够全面.

本文正是针对文献^[9]研究中存在的不足, 利用本文作者前期研制的大量程微喷测试技术 Asay-F 窗, 实验研究了爆轰加载下 Sn 样品表面微喷物质的时空演化规律, 确认了表面微喷物质在时空演化过程中的“自相似膨胀”这一重要物理规律, 成功避免了传统压电石英计测量量程偏低导致物理认识不够全面的问题.

2 实验方法及诊断技术

本文实验设计为平面爆轰加载方式, 结构见示意图1. 具体为: $\Phi 100$ mm 平面波发生器 + $\Phi 100$ mm $\times$ 20 mm (JB-9014) + $\Phi 100$ mm $\times$ 2 mm Al + $\Phi 100$ mm $\times$ 3 mm Sn. Sn 样品表面作研磨处理, 表面粗糙度为 1.6 μ m. 实验诊断手段主要选用 Asay-F 窗、压电石英计和多普勒位移干涉仪(DPS)联合测试技术. DPS 测量 Sn/LiF 窗口界面速度, 利用阻抗匹配的基本原理, 给出冲击波到达样品自由表面的时间和样品内的压力. Asay-F 窗主要利用 DPS 测速系统记录的窗口-喷射颗粒间的界面速

* 国家自然科学基金(批准号: 11472254, 11272006)、国防科技重点实验室基金(批准号: 9140C670301130C67238)和中物院发展基金(批准号: 2013A0201009)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gwren@fudan.edu.cn

度, 在一些基本假定基础上, 给出样品表面微喷物质的质量、密度和速度等信息. 通过调整 Asay-F 窗距 Sn 样品自由面的距离实现对微喷物质时空演化特征及规律的诊断, 具体空腔距离设计为 3 种: 5.0, 10 和 15 mm. Asay-F 窗的具体结构组成及测量原理详见文献 [10]. 压电石英计主要用于标定 Asay-F 窗诊断数据的可靠性. 本文选用的压电石英计由美国 Dynasen 公司购买, 是利用石英晶体的压电效应制成的一种高时间分辨率的应力剖面传感器, 晶体材料为铌酸锂 (lithium niobate, LN). 该石英计在 0—0.6 GPa 压力范围内具有良好的线性响应特性, 为其有效工作范围; 压力大于 0.6 GPa 时, 其不再满足线性响应关系, 石英计失效, 数据无法处理. 本文正是利用石英计在 0—0.6 GPa 范围内的线性响应特性, 当其受到喷射物的撞击时, 通过高速示波器记录其压力历史, 然后依据一定的假设来获得喷射物到达其所在位置的动量历史和速度历史, 据此获得喷射物的质量和速度等信息. 压电石英计测量原理及参数详见文献 [3, 6]. 另外, 整个实验装置加载部分和测试探头放于真空度约 500 Pa 的爆炸容器内, 排除气体对微喷物质运动演化的影响.

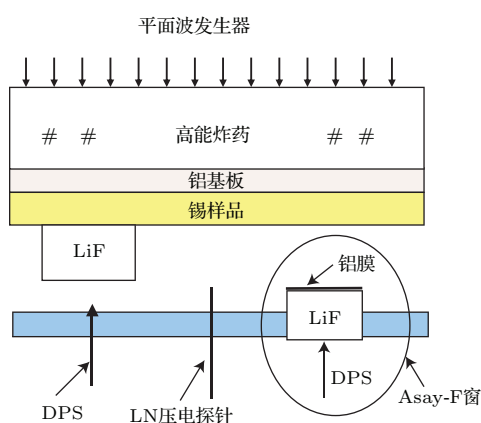


图 1 实验装置及诊断技术布局示意图

Fig. 1. Experimental and diagnostic geometry.

3 实验结果与分析

3.1 受载 Sn 样品的应力状态

DPS 测量 Sn/LiF 界面速度剖面见图 2(a). 鉴于 Sn 材料与 LiF 窗口冲击阻抗不相同, 图 2(a) 所示的 Sn/LiF 界面速度并非 Sn 样品初始 (即 Sn 样品中冲击波与 Sn/LiF 界面作用前) 粒子速度. 因此, 为判断 Sn 样品所处应力状态, 依据阻抗匹配法, 将

Sn/LiF 界面速度和界面压力换算成了样品与窗口作用前的粒子速度和压力. 具体关系式如下:

$$\sigma_s = \frac{1}{2}[\sigma_w + (\rho_0 D)_s u_w], \quad (1)$$

$$u_s = \frac{1}{2}[u_w + \sigma_w / (\rho_0 D)_s], \quad (2)$$

(1) 和 (2) 式中, σ_s , u_s 为 Sn 样品与 LiF 窗口作用前样品内的压力和粒子速度, σ_w , u_w 为样品中冲击波与窗口作用后窗口内的压力和粒子速度, $(\rho_0 D)_s$ 为 Sn 样品冲击阻抗. 其中 σ_w 可由下式得到:

$$\sigma_w = \rho_{0w}(\rho_0 D)_w u_w, \quad (3)$$

式中, ρ_{0w} , $(\rho_0 D)_w$ 为 LiF 窗口初始密度和冲击阻抗.

由 (1), (2) 和 (3) 式得冲击波与 Sn/LiF 界面作用前 Sn 样品自由面附近的压力历程, 如图 2(b) 所示. 由图 2(b) 得, 受载 Sn 样品自由面附近经历最高冲击压力接近 40 GPa, 远大于文献 [4] 给出的 Sn 材料卸载熔化压力 22.5 GPa. 受载 Sn 样品自由面附近处于卸载熔化状态.

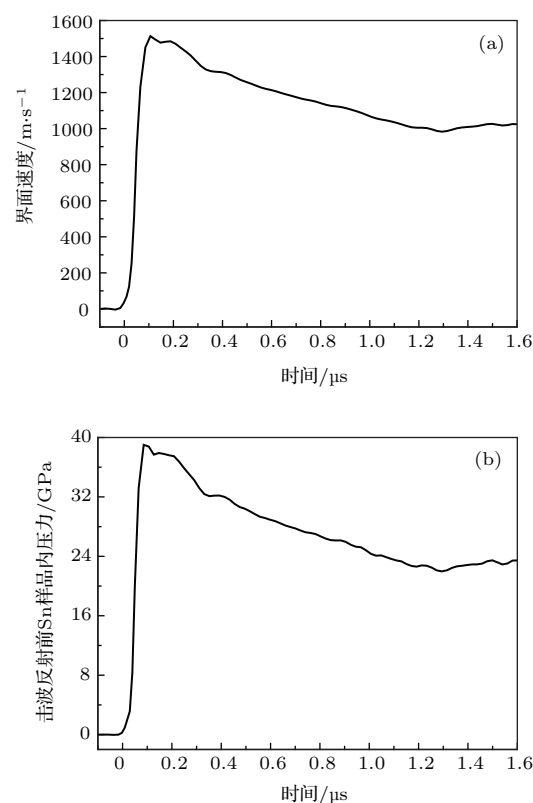


图 2 Sn/LiF 界面速度和冲击波在 Sn/LiF 界面反射前 Sn 样品内压力 (a) 界面速度; (b) 冲击波在 Sn/LiF 界面反射前 Sn 样品内压力

Fig. 2. Interface velocity and pressure: (a) Interface velocity of Sn/LiF; (b) pressure of Sn before wave reflection at Sn/LiF interface.

3.2 Sn 样品表面微喷物质时空演化特征

压电石英计测试 Sn 样品自由表面喷射物质原始信号见图 3(a). 图 3(a) 给出了两个重要时间特征量: 1) 测试信号启动时间, 即速度最大喷射粒子撞击石英计测试探头时刻; 2) 压电石英计失效时刻, 即压电石英计承受冲击压力达到约 0.6 GPa 的时刻. 两个特征时刻之间的信号为反映微喷信息的有效信号, 利用文献 [3, 6] 中给出的石英计测量原理及相关参数对原始信号进行处理得微喷研究重点关注两个物理量: 单位面积累积喷射质量 $m_{e/A}$ 和动态体密度 ρ_e , 分别见图 3(b) 和 (c). 具体数据详见表 1.

Asay-F 窗诊断技术中, DPS 测量给出的喷射

物质-覆膜 LiF 窗口界面速度如图 3(a) 所示, 其同样给出了两个重要时间特征量: 1) 界面速度启动时刻, 即快速喷射粒子撞击覆膜窗口时刻; 2) 界面速度快速上升时刻, 即对应样品自由面撞击 LiF 窗口时刻. 利用本文作者在文献 [13] 中给出的 Asay-F 窗技术的数据处理方法对图 3(a) 所示界面速度进行处理得单位面积喷射质量 $m_{e/A}$ 和动态体密度 ρ_e , 结果分别见图 3(b) 和 (c). 另外, 由图 3(a) 所示 Sn 样品自由面撞击 LiF 窗口的时间得 Sn 样品自由面速度约 2.5 km/s, 利用 Sn 材料的冲击雨贡纽关系及参数计算的 Sn 样品自由表面附近经历最大冲击压力约 40 GPa, 与 3.1 节给出结果符合, 证明 LiF 窗口界面速度快速上升特征确实为 Sn 样品自由面撞击 LiF 产生.

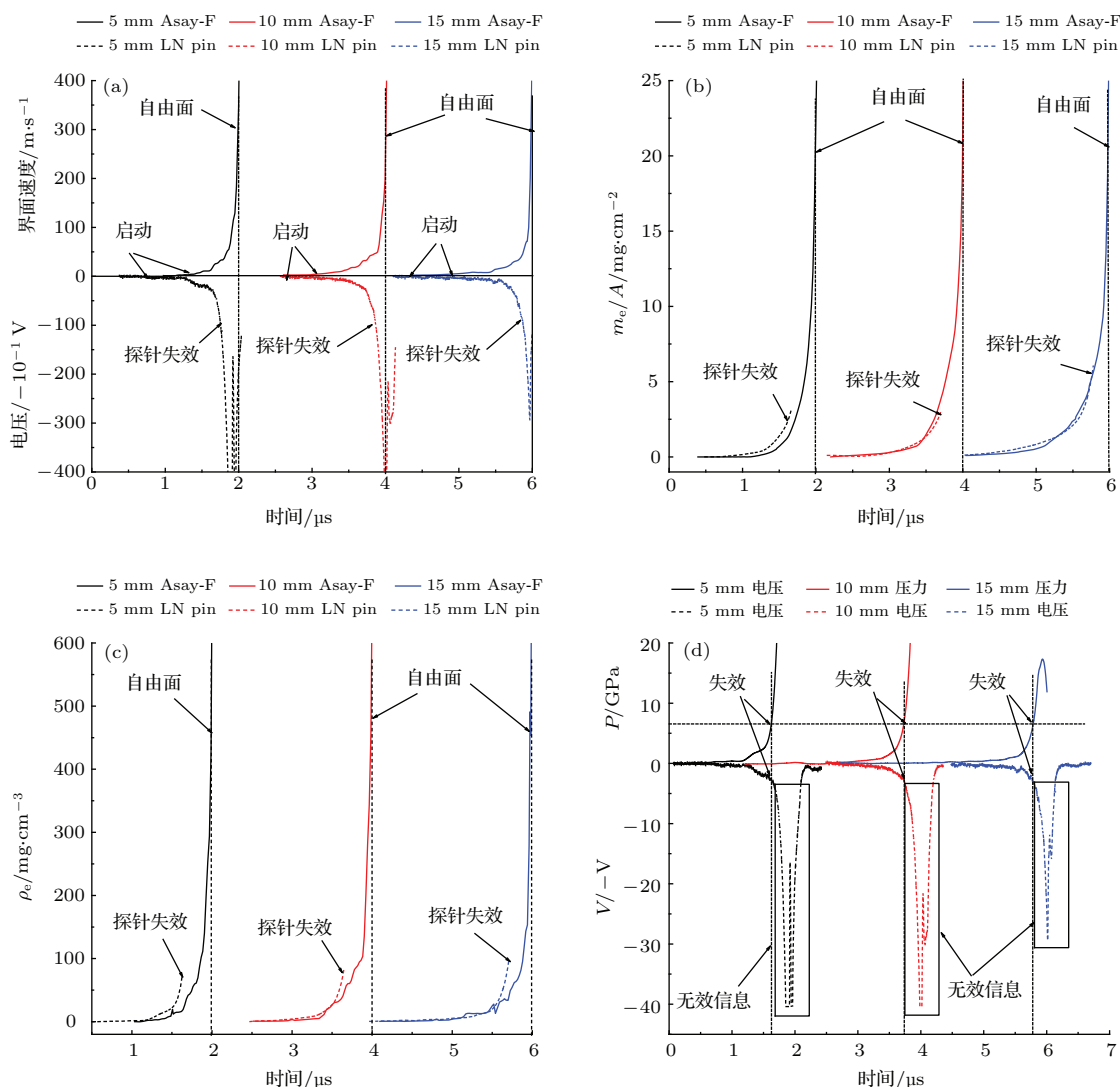


图3 (网刊彩色) 压电石英计和 Asay-F 窗诊断微喷结果 (a) 原始信号-时间 t 关系; (b) 单位面积喷射质量 $m_{e/A}$ - t 关系; (c) 动态体密度 ρ_e - t 关系; (d) 压电石英计原始信号及压力失效信号

Fig. 3. (color online) The diagnostic results of LN pin and Asay-F window: (a) Original signal vs. time; (b) areal density vs. time; (c) dynamic volume density vs. time; (d) original voltage and pressure signal of LN pin.

表1 不同测试界面给出微喷物质特征量: 累计质量、最大体密度、空间厚度和平均密度

Table 1. The ejecta parameters at different offset: areal mass, max volume density, layer's thickness and average volume density.

		$d = 5 \text{ mm}$	$d = 10 \text{ mm}$	$d = 15 \text{ mm}$
累计质量	LN pin	3 mg/cm ²	3.8 mg/cm ²	5.4 mg/cm ²
	Asay-F-window	17.5 mg/cm ²	18.0 mg/cm ²	17.0 mg/cm ²
最大体密度	LN pin	70 mg/cm ³	85 mg/cm ³	100 mg/cm ³
	Asay-F-window	~ 400 mg/cm ³	~ 450 mg/cm ³	~ 450 mg/cm ³
空间厚度	Asay-F-window	$t = 2.0 \text{ } \mu\text{s}, \sim 1.5 \text{ mm}$	$t = 4.0 \text{ } \mu\text{s}, \sim 3.0 \text{ mm}$	$t = 6.0 \text{ } \mu\text{s}, \sim 4.0 \text{ mm}$
平均密度	Asay-F-window	~ 117 mg/cm ³	~ 60 mg/cm ³	~ 43 mg/cm ³

对比图 3 (a) 所示的压电石英计和 Asay 窗的诊断原始信号发现, 由于压电石英计失效阈值偏低 (约 0.6 GPa), 当其受到一定密度微喷物质撞击时便处于失效状态, 见图 3 (d). 由图 3 (d) 得失效前压电石英计诊断信号可以较准确反映对应微喷物质的信息, 但失效后的信号则无法反映微喷物质的相关信息. 即压电探针仅能反映部分高速、低密度微喷物质的相关信息, 无法反映密度较高微喷物质的相关信息, 更无法给出样品自由面到达的确切数据. Asay-F 窗有效测量阈值较大, 较准确诊断了高密度微喷物质的质量、速度及自由面位置的确切信息, 基本实现了样品自由面前所有微喷物质信息的诊断, 但对于密度较低的高速微喷颗粒的响应没有压电石英计灵敏. 分析图 3 (b), (c) 和表 1 所示数据得, 距 Sn 样品自由面 5 mm, 10 mm 和 15 mm 的压电探针失效时刻测得单位面积喷射物质累计质量分别约为 3, 3.8 和 5.4 mg/cm², 喷射物质最大密度分别约为 70, 85 和 100 mg/cm³, 呈现随着空腔测试距离增加诊断结果逐渐增大的趋势. 压电石英计诊断的该特征现象与 Sn 样品表面微喷物质在空间的自相似膨胀有关, 即由于微喷物质颗粒之间存在一定速度梯度, 压电测试探头距离样品自由面越远, 微喷颗粒在空间运动演化时间越长, 其空间体密度将逐渐降低, 一定程度降低了对压电石英计的冲击压力, 导致压电石英计失效时刻延后, 因而可以诊断给出更多微喷物质的信息. 不过, 鉴于压电石英计的测量量程偏低, 其仅诊断了部分高速、低密度微喷物质的信息, 且不同测试界面压电探针诊断微喷物质非严格同一对象, 因此, 文献 [9] 中 Zeller 等利用不同测试界面压电探针诊断结果分析研究微喷物质的演化规律的方法存在一定不合理性. 对于 Asay-F 窗, 截至自由面撞击 LiF 窗口时刻, 距 Sn 样

品自由面 5 mm, 10 mm 和 15 mm 三个测试界面测量给出单位面积喷射物质累计质量分别约为 17.5, 18 和 17.0 mg/cm², 呈现不同测量界面诊断给出最大喷射量基本相同的特征. 如前所述, 鉴于 Asay-F 窗实现了金属样品自由面前所有微喷物质的诊断, 不同测试界面 Asay-F 窗测量微喷物质质量基本相同的结果说明在空间运动演化过程中没有新的微喷物质形成. 另外, 对比相同时刻压电石英计测量给出喷射物质量与 Asay-F 窗测量结果发现, 压电石英计诊断微喷质量略大于 Asay-F 窗诊断结果, 与图 3 (a) 所示 Asay-F 窗对密度较低的高速微喷颗粒的响应灵敏度略低于压电石英计的结论符合, 但两者差别较小, 说明本文采用的 Asay-F 窗诊断结果基本可靠.

为便于直观分析 Sn 样品表面微喷物质的时空演化规律, 以及与 X 射线照相等给出的特定时刻微喷物质的空间密度分布信息进行比对, 参考文献 [9] 给出的将微喷物质动态体密度转化为特定时刻空间密度分布的方法, 对 Asay-F 窗诊断微喷信息进行了转化, 结果见图 4. 由于压电探针仅测量给出了部分高速、低密度微喷物质的信息, 且不同测试界面压电探针测量结果非相同物理对象, 用其诊断数据分析微喷物质的时空演化规律存在一定不合理性, 因此, 本文没有对压电石英计测量结果进行动态-静态转化. 在图 4 具体转化过程中用到以下 3 点基本假定: 1) 喷射颗粒在空间运动演化过程中速度保持不变; 2) 喷射物质没有侧向飞散, 仅在喷射方向 (与 Sn 样品自由面垂直方向) 存在运动速度; 3) 在微喷物质横向分布均匀的假定下, 不同测试界面诊断的微喷物质为同一物质对象. 分析图 4 发现, 随着微喷物质颗粒的运动演化, 不同测试时刻, 微喷物质在空间呈现“自相似膨胀”的特征: 占据

空间位置逐渐增大, 空间体密度逐渐减小. 为确认微喷颗粒“自相似膨胀”的物理规律, 本文将图4所示不同时刻微喷颗粒的空间密度分布转化到了同一时刻, 结果见图5. 由图5得, 三个测试界面给出的微喷颗粒的空间密度分布相当, 差别在于较小测试界面可以给更细致的高速低密度微喷颗粒的信息, 说明金属样品表面微喷颗粒满足“自相似膨胀”物理规律.

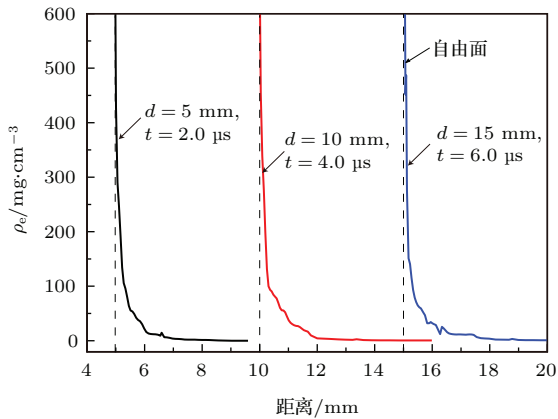


图4 (网刊彩色) 给定时刻微喷物质空间密度分布
Fig. 4. (color online) The ejecta volume density vs. spatial distance distribution at special time.

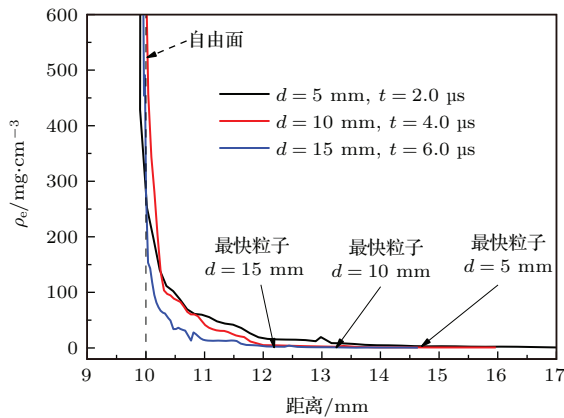


图5 (网刊彩色) $t = 4.0 \mu\text{s}$ 时刻微喷物质空间密度分布
Fig. 5. (color online) The ejecta volume density vs. spatial distance distribution at a special time ($t = 4.0 \mu\text{s}$).

4 结 论

本文针对传统压电探针测量量程偏低, 仅能反映动载下熔化金属样品表面部分高速、低密度微喷物质信息的现状, 系统分析了采用压电石英计诊断数据研究微喷物质时空演化规律存在的问题. 针对该不足, 利用作者前期发展的大量程、高密度微喷物质诊断的Asay-F窗技术, 较准确地诊断给出了

熔化状态下Sn样品表面全部微喷物质的质量、速度、密度的运动演化信息, 给出了特定时刻样品自由面前全部微喷物质密度的空间分布图像, 确认了微喷颗粒的“自相似膨胀”规律, 为认识动载下金属样品表面微喷物质的时空演化规律提供了重要实验依据.

参考文献

- [1] Asay J R, Mix L P, Perry F C 1976 *Appl. Phys. Lett.* **29** 284
- [2] Asay J R 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 6173
- [3] Vogan W S, Anderson W W, Grover M, Hammerberg J E, King N S P, Lamoreaux S K, Macrum G, Morley K B, Rigg P A, Stevens G D, Turley W D, Veaser L R, Buttler W T 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 113508
- [4] Zeller M B, Vogan M W, 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
- [5] Zeller M B, Vogan M W, Gray G T, Huerta D C, King N S P, Neal G E, Valentine S J, Payton J R, Rubin J, Stevens G D, Turley W D, Buttler W T 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 083521
- [6] Zeller M B, Grover M, Hammerberg J E, Hixson R S, Iverson A J, Macrum G S, Morley K B, 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 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 013522
- [7] Buttler W T, Zeller M B, Olson R T, Rigg P A, Hixson R S, Hammerberg J E, Obst A W, Payton J R, Iverson A, Young J 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 063547
- [8] Buttler W T, Hixson R S, King N S P, Olson R T, Rigg P A, Zeller M B, Routley N, Rimmer A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 151921
- [9] Zeller M B, Buttler W T 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 114102
- [10] Chen Y T, Ren G W, Tang T G, Li Q Z, Wang D T, Hu H B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 206202 (in Chinese) [陈永涛, 任国武, 汤铁钢, 李庆忠, 王德田, 胡海波 2012 物理学报 **61** 206202]
- [11] Chen Y T, Hu H B, Tang T G, Li Q Z, Wang R B, Wang D T 2012 *Scientia Sinica G* **42** 1076 (in Chinese) [陈永涛, 胡海波, 汤铁钢, 李庆忠, 王荣波, 王德田 2012 中国科学G **42** 1076]
- [12] Chen Y T, Ren G W, Tang T G, Hu H B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 116202 (in Chinese) [陈永涛, 任国武, 汤铁钢, 胡海波 2013 物理学报 **62** 116202]
- [13] Shao J L, Wang P, He A M, Duan S Q, Qin C S 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 153501
- [14] Shao J L, Wang P, He A M 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 073501
- [15] Ren G W, Chen Y T, Tang T G, Li Q Z 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 133507

Experimental investigation of ejecta on melted Sn sample under shock loading^{*}

Chen Yong-Tao Hong Ren-Kai Chen Hao-Yu Ren Guo-Wu[†]

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physical Research, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 29 June 2015; revised manuscript received 27 August 2015)

Abstract

Ejecta production from the metal surface under shock-loading is currently a focused issue both at home and abroad. However, the traditional experimental techniques, such as piezoelectric pin, only diagnose the ejected data for low-density ejecta but not for high-density ones, giving a poor understanding of this process. Particularly, when ejecta production increases significantly as the loaded metal melts on release or shock, the measurement carried out by the traditional piezoelectric pin becomes worse, and brings further missing knowledge in the ejecta evolution.

In this paper, an Asay-F window designed earlier by the authors based on the traditional Asay-window, is employed to investigate the formation process of the ejecta from the melted Sn metal. As indicated by previous experimental findings on shocked Pb sample, the Asay-F window is a reliable and effective tool for measuring the high-density ejecta by comparing the result with those of the piezoelectric pin. The interface velocity within the Asay-F window measured by Doppler pin system, is obtained. On the basis of momentum conservation condition, the physical quantities of ejecta, such as accumulative areal mass, volume density and velocity, are derived from the interface velocity. By analyzing the experimental data diagnosed by the Asay-F window, which is placed at different offsets from the free surface of Sn sample, the expansion evolution of the ejecta is obtained. Through transforming the dynamic volume density to the static one, the picture of the ejecta density distribution changes with the spatial distance at a specific moment, which is explicitly displayed. It is found that the ejecta density distributions gained from the different offsets at the uniform moment are consistent. As a consequence, the self-similar expansion evolution of the ejecta is experimentally confirmed, which successfully avoids the unclear understanding of this process if only examined by the piezoelectric pin. This experiment may lay the foundation of the formation of the ejecta production for the metal sample subjected to high pressure loading.

Keywords: ejecta, melting, self-similar expansion, Asay-F window

PACS: 62.20.mm, 62.50.Ef

DOI: 10.7498/aps.65.026201

^{*} Projected supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11472254, 11272006), the Science Foundation of Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, China (Grant No. 9140C670301130C67238), and the Science and Technology Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2013A0201009).

[†] Corresponding author. E-mail: gwren@fudan.edu.cn