

熔化前后 Pb 样品表面微喷射现象研究*

陈永涛[†] 任国武 汤铁钢 李庆忠 王德田 胡海波

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2012 年 3 月 9 日收到; 2012 年 4 月 17 日收到修改稿)

利用设计的大量程 Asay-F 窗技术, 从实验上准确诊断了不同加载状态下金属 Pb 样品表面微喷射质量和密度-速度分布信息, 重点阐释了熔化前后金属样品表面微喷射特性的异同, 并从理论分析的角度解释了该现象产生的物理原因, 为研究熔化对金属样品表面微喷射的影响机制奠定了重要基础.

关键词: Pb, 微喷, 熔化, Asay-F 窗

PACS: 62.20.M-, 62.50.Ef

1 引言

微喷射是指冲击波从材料自由表面反射时, 部分物质脱离金属基体向外喷射的动力学现象, 该现象的研究对认识材料在高速碰撞或冲击等极端条件下的力学响应和破坏行为具有重要意义. 在实际加载和样品状态等因素作用下, 微喷射的产生机制是多样性的, 相应的喷射量和喷射物颗粒状态也有数量级的差别^[1-17]. 如: 对于冲击加载压力低于卸载熔化阈值的情况, 微喷射主要由金属材料或表面几何非均匀性引发, 相应的喷射数量一般与表面粗糙度相对应^[1-4]; 而当加载强度超过一定阈值, 金属材料在冲击加卸载过程中处于熔化或部分熔化状态后, 金属表面的微喷射将被强化和衍生, 在稀疏拉伸成孔、破碎断裂等行为作用下形成大面积的破碎区, 导致微喷射质量成倍甚至出现量级增加, 速度及空间分布特征亦将发生明显改变^[4,5,11,12].

由于现有测试技术(如压电石英计、高速摄影和激光全息等)可靠诊断喷射量阈值较低, 无法可靠诊断质量和密度较大喷射物的相关信息, 因此,

目前实验研究主要集中在冲击加载压力低于材料熔化阈值, 即喷射量较小的情况, 而对于与熔化相关且质量和密度较大的微喷射现象的研究存在明显不足. 如果能发展一种大量程微喷射测试技术, 从实验上准确给出与熔化相关的大质量和高密度微喷射物的特征信息, 对比熔化前金属样品表面喷射物的特性, 阐释熔化前后金属样品表面微喷射特性的异同, 对于认识熔化对金属样品表面微喷射的影响机制, 构建相应的物理模型无疑具有重要意义.

本文拟在传统 Asay 窗技术基础上, 设计发展一种可诊断金属样品表面高密度熔化破碎微喷射特征信息的大量程 Asay-F 窗技术, 从实验上给出熔化前后不同加载状态下金属样品表面微喷射的特征信息, 并重点分析其异同, 为研究熔化对金属样品表面微喷射的影响机制奠定基础.

2 实验方法及测试技术

实验加载方式选用平面爆轰加载, 实验装置结构及诊断技术示意图 1. 具体结构为: $\Phi 100$ mm 平面波发生器 + $\Phi 100$ mm $\times$ 20 mm JOB-9003 +

* 国家自然科学基金(批准号: 10902102)、中国工程物理研究院重点基金(批准号: 2010A0201008, 2012B0201017) 和中国工程物理研究院双百人才基金(批准号: 2009R0101) 资助的课题.

[†] E-mail: zhongli4909@163.com

$\Phi 100$ mm Pb. 为在 Pb 样品近自由面位置处获得不同加载压力, Pb 样品厚度设计为两种, 分别为 2 和 15 mm. Pb 样品经车削加工后, 表面经研磨处理, 表面粗糙度为 $0.8\ \mu\text{m}$.

诊断手段主要选用本文设计的 Asay-F 窗和压电石英计, 其中压电石英计用于校验 Asay-F 窗诊断结果的可靠性, 两种技术具体测试原理见 2.1 和 2.2. 为保证测试结果准确可靠, 在测试探头的安装上要求 Asay-F 窗和压电石英计测试探头轴向与样品自由表面严格垂直, 测量端面与样品自由表面距离精确控制 (本文为 $5.0\ \text{mm}$). 另外, 选用激光多普勒位移干涉仪 DPS 直接测量 Pb 样品自由面速度, 用于准确给出冲击波到达 Pb 样品的自由面, 即微喷射发生的时间 (文中将其定义为所有测试技术的零时). 同时, 为减少空气对微喷射的影响, 实验装置加载部分和测试探头放置于真空度约 $500\ \text{Pa}$ 的爆炸容器内.

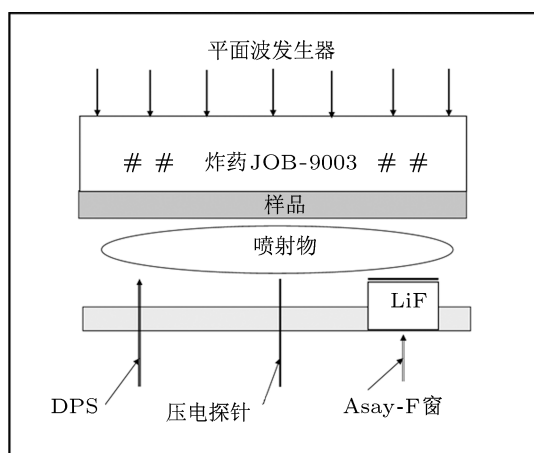


图1 实验装置及诊断技术布局示意图

2.1 Asay-F 窗

为诊断动载下金属样品表面高密度微喷物质的特征信息, 本文在传统 Asay 窗 (图 2(a), 激光测速系统选用速度干涉仪 (VISAR)) 基础上^[18,19], 设计发展了一种大量程 Asay-F 窗技术, 其基本结构见图 2(b), 即在透明窗口 (LiF) 与微喷颗粒的撞击端面用极少量环氧树脂胶粘贴了一层薄铝膜 (厚度为 $130\ \mu\text{m}$), 以确保激光干涉测速系统 (选用 DPS,) 正常回光, 获得高质量的实验信号, 进而利用激光干涉测速系统记录的窗口-喷射颗粒间的界面速度推测微喷物质的质量、密度、速度等信息. 另外, 为保证 DPS 测量界面速度剖面能反映真实的物理信息并具有较好的重复性和可靠性, 本文选用 DPS 测试技术激光焦斑直径为 $0.4\ \text{mm}$, 远大于微喷颗粒尺度 (微喷颗粒尺度通常为几微米, 最大为几十微米), 确保其测试满足统计测试要求, 避免因喷射颗粒尺度与测试焦斑面积相当时带来测量结果的随机性和不确定性.

利用 Asay-F 窗测量的界面速度计算喷射物质质量-速度的分布时, 用到几点基本假设: 1) 当冲击波在自由面反射时, 全部喷射质量是在足够短的时间内产生的, 从而可以近似地认为这种喷射是瞬时的; 2) 喷射物质横向分布均匀; 3) 喷射物质与覆膜窗口的碰撞是完全非弹性的, 在撞击过程中没有飞溅; 4) 在有效测量时间内冲击波尚没有在 LiF 窗口自由面反射; 5) 在喷射颗粒与覆膜窗口撞击过程中, LiF 窗口始终保持透明并没有发生任何相变; 6) 由于窗口粘贴铝膜的冲击阻抗与 LiF 窗口接近, 且厚度极薄, 数据处理过程中忽略铝膜的影响.

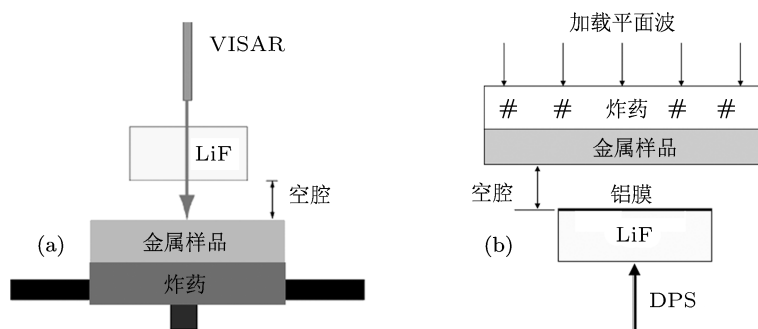


图2 诊断技术结构示意图 (a) Asay 窗; (b) Asay-F 窗

在上述假设下, 根据质量和动量守恒条件, 任意时刻达到覆膜窗口单位面积喷射粒子质量增量 $dm_{e/A}$ 可由下式得到:

$$\frac{dm_{e/A}}{dt} = \frac{P(t)}{u_e - u_w}, \quad (1)$$

式中 $P(t)$ 为喷射颗粒撞击覆膜窗口的应力, u_w 为 DPS 给出的覆膜窗口界面速度 (经折射率修正处理), u_e 为喷射颗粒运动速度, 由其到达覆膜窗口的时间除覆膜窗口到样品自由面距离 d_0 得到.

(1) 式中喷射颗粒撞击覆膜窗口产生的应力 $P(t)$ 由 (2) 式得

$$P(t) = \int_0^{u_w} \rho_w [c_w + \lambda u_w(t)] du_w(t), \quad (2)$$

式中 $\rho_w = 2.64 \text{ g/cm}^3$ 为 LiF 窗口初始密度, $c_w = 5.148 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 为 LiF 窗口 Lagrangian 声速, $\lambda = 1.358$ 为 LiF 窗口冲击 Hugoniot 系数 [20].

2.2 压电石英计

压电石英计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, 其在一定压力范围内具有良好的线性响应特性. 压电石英计微喷测试技术即是利用石英计的这种特性, 当石英计受到喷射物的撞击时, 通过高速示波器记录石英计的压力历史, 然后依据一定的假设来获得喷射物到达石英计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. 本文选用的压电石英计购于美国 Dynasen 公司, 探针相关参数及制作过程见文献 [5—10].

如上所述压电石英计测量原理, 压电石英计受到喷射物撞击后的应力 $\sigma(t)$ 可由 (3) 式得

$$\sigma(t) \approx \frac{1}{d_{ii}} \frac{1}{A} \int_{t_0}^t \frac{V(t)}{R} dt, \quad (3)$$

式中 d_{ii} , A , R 分别为石英计的压电系数、有效测量面积和有效电流测量电阻, $V(t)$ 为示波器记录石英计的电压历史.

利用以下两点基本假设, 可得压电石英计受到的压力 $\sigma(t)$ 、喷射物密度 $\rho_e(t)$ 和速度 $u_e(t)$ 的关系: 1) 喷射物在冲击波到达样品自由面时刻瞬时喷出, 且喷出后匀速轴向运动; 2) 压电石英计与喷射物的碰撞是完全非弹性的, 且对喷射物的响应为瞬

时线性响应.

$$\sigma(t) = \rho_e(t) u_e^2(t), \quad (4)$$

式中喷射物运动速度 $u_e(t)$ 由喷射物到达压电石英计测试端面的时间除压电石英计到样品自由面距离 d_0 得到.

单位面积累计喷射质量 $m_{e/A}$ 可由下式得

$$m_{e/A} = \int \rho_e(t) u_e(t) dt. \quad (5)$$

3 实验结果与分析

3.1 Asay-F 窗诊断结果

DPS 给出喷射物质-覆膜 LiF 窗口界面速度见图 3, 其中图 3(a) 对应 Pb 样品厚度为 15 mm, 图 3(b) 对应 Pb 样品厚度为 2 mm. 图 3 给出两个重要特征量: 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, 即样品自由面撞击 LiF 窗口时刻. 两个特征量之间的信息为关注的微喷有效信息, 由于喷射物质体密度随速度存在不均匀分布, 导致 DPS 记录喷射颗粒-窗口界面速度剖面呈现明显不规则振荡. 不过, 鉴于本文选用 DPS 测试技术激光焦版直径远大于喷射颗粒尺寸, 其诊断结果重复性和可靠度可保证. 因此, 利用第 2 节给出的 Asay-F 窗的数据处理方法对图 3 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 随速度的分布信息, 分别见图 3(c) 和 (d).

由 3 给出的 Pb 样品自由面撞击窗口时间除 LiF 窗口到自由面的精确距离得样品自由面速度 u_{fs} : 15 mm 厚 Pb 样品自由面速度约 1.3 km/s, 2 mm 厚 Pb 样品自由面速度约 2.1 km/s. 利用 Pb 材料冲击雨贡纽关系及参数计算得 Pb 样品自由表面附近冲击压力: 15 mm 厚 Pb 样品约 21 GPa, 低于 (或接近) Pb 材料卸载熔化压力 [4], 冲击加卸载后样品表面基本保持为固态; 2 mm 厚 Pb 样品约 40 GPa, 大于其卸载熔化压力, 冲击加卸载后样品自由表面处于卸载熔化或部分卸载熔化状态.

由图 3(c) 得, 利用本文发展的 Asay-F 窗准确实现了大质量和高密度喷射物的测量, 在低于熔化阈值 (21 GPa, 15 mm) 和高于熔化阈值 (40 GPa, 2 mm) 两种加载状态下, Pb 样品表面喷射质量分别

为 9 和 25 mg/cm², 对应速度区间分别为 (1—1.2) u_{fs} 和 (1—1.5) u_{fs} . 而先前由于诊断技术测量阈值的限制, 对于靠近自由面且密度较高微喷物的特征信息无法有效诊断, 因此, 导致先前文献中微喷测量值明显偏小, 如在文献 [4] 中, 与本文样品表面和加载压力几乎完全相同的状态下, 传统 Asay 膜测量技术给出喷射量分别小于 5 和 15 mg/cm².

由图 3(d) 得, Asay-F 窗诊断给出的低于熔化阈值 (21 GPa, 15 mm) 和高于熔化阈值 (40 GPa, 2 mm) 两种加载状态下 Pb 样品表面喷射物的最大密度均已接近 1000 mg/cm³, 而先前的诊断技术测量喷射物密度最大值一般在 100 mg/cm³ 以下, 再次证明了 Asay-F 窗在大质量和高密度喷射物测量方面的优势.

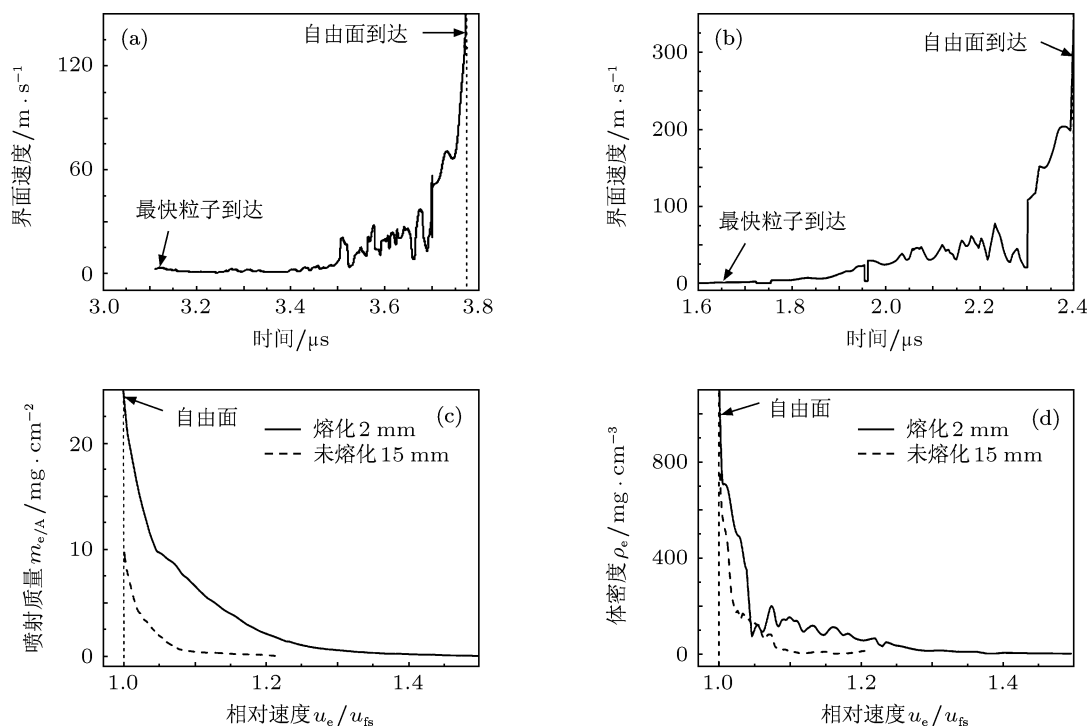


图 3 Asay-F 窗诊断结果 (a) 界面速度-时间 t 关系, Pb 样品厚为 15 mm; (b) 界面速度-时间 t 关系, Pb 样品厚为 2 mm; (c) 单位面积喷射质量 $m_{e/A}$ - u_e/u_{fs} 关系; (d) 动态体密度 ρ_e - u_e/u_{fs} 关系

3.2 Asay-F 窗与压电石英计诊断结果比较

由于 Asay-F 窗为本文新发展微喷测试技术, 为考核其诊断能力和可靠性, 本文在 40 GPa 加载压力下 2 mm 厚 Pb 样品自由表面喷射实验中利用压电石英计开展了同步测试. 压电石英计测量的 40 GPa 加载压力下 2 mm 厚 Pb 样品自由表面喷射原始信号见图 4(a), 其给出两个重要特征量: 1) 测试信号启动时间, 即最快喷射粒子撞击压电石英计时间; 2) 压电石英计失效时间. 不过, 由于压电石英计失效阈值较低 (约为 0.6 GPa), 该时间可能对应一定密度微喷物质撞击压电石英计时间, 而非样品自由面撞击时间, 样品自由面到达该测试界面时间由大量程 Asay-F 窗给出. 两个特征时间之间的

信号为关注的有效信息, 利用文献 [5—10] 中给出的压电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的三个物理量: 撞击压力 p , 单位面积喷射质量 $m_{e/A}$ 和动态体密度 ρ_e . 这三个物理量与 u_e/u_{fs} (喷射粒子速度 u_e 与自由面速度 u_{fs} 比值) 的关系分别见图 4(b)—(d).

Asay-F 窗与压电石英计测试结果具体比较见图 5 (Pb 样品厚度为 2 mm). 图 5(a) 为原始信号, 图 5(b) 为质量-速度分布. 如图 5 所示, 由于压电石英计失效阈值较低 (约 0.6 GPa), 当受到一定密度微喷物质撞击时便处于失效状态, 因此, 其无法诊断靠近样品自由面密度较高微喷物质的相关信息, 其可靠诊断给出喷射物质量约 5 mg/cm², 对应速度区间 (1.15—1.6) u_{fs} . Asay-F 窗有效测量阈值较

大,可准确诊断密度较高微喷物的质量、速度信息和自由面的确切位置,但对密度较低的高速喷射颗粒的响应没有压电石英计灵敏,其诊断给出喷射物质量约为 25 mg/cm^2 ,对应速度区间为 $(1-1.5)u_{fs}$. 两种测试技术诊断给出的相同速度区间 $(1.15-1.5)u_{fs}$ 内微喷物质量-速度分布趋势,Asay-F 窗与压电石英计诊断给出的结果基本符

合,Asay-F 窗诊断绝对质量略小于压电石英计,与前面所述 Asay-F 窗对低密度微喷颗粒响应没有压电石英计灵敏符合. 总体来看,Asay-F 窗与压电石英计诊断结果基本符合,说明本文给出的 Asay-F 窗诊断结果基本可靠,且在大质量和高密度微喷物质及密实自由面诊断方面优势尤其明显.

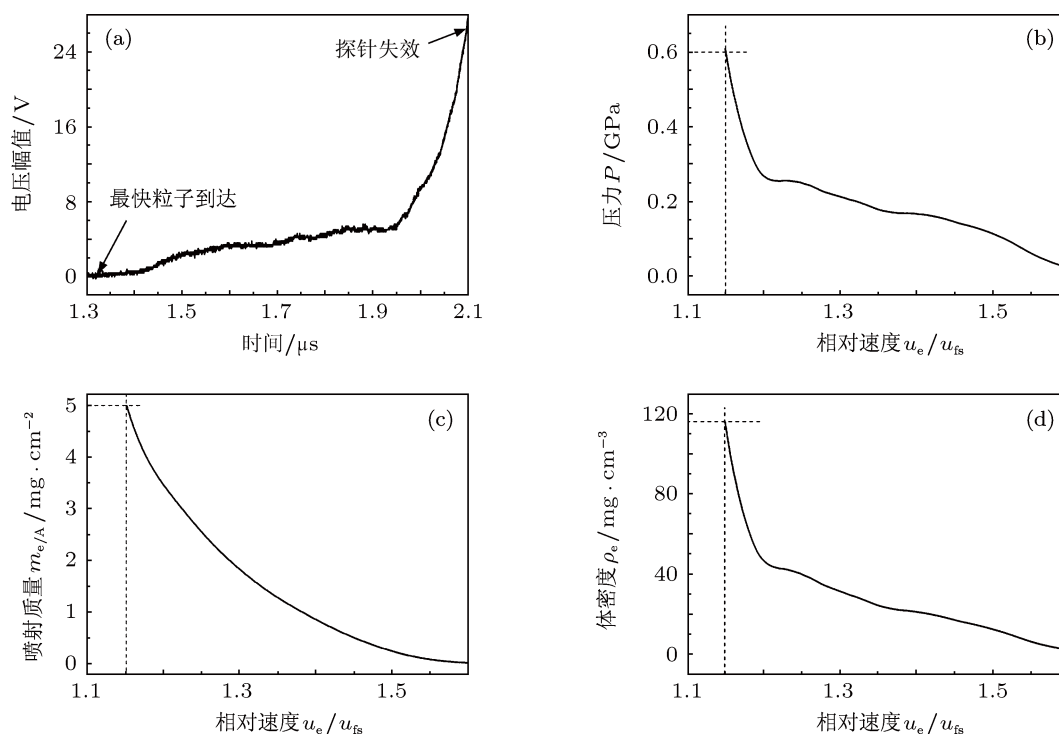


图4 石英计诊断微喷结果 (a) 原始信号电压-时间 t 关系; (b) 撞击应力 p - u_e/u_{fs} 关系; (c) 单位面积喷射质量 m_e/A - u_e/u_{fs} 关系; (d) 动态体密度 ρ_e - u_e/u_{fs} 关系

3.3 不同加载状态下 Pb 样品表面微喷特性比较

为阐释熔化前后金属样品表面微喷物质特性的异同,分析其中包含的物理机制,本文对熔化前后 Pb 样品表面微喷物质的相关信息进行了分析比较. 由图 3(c) 所示喷射物质量-速度分布得以下两点认识: 1) 熔化前后 Pb 样品表面喷射质量存在较大差异,熔化前且当 Pb 样品表面附近冲击压力约为 21 GPa 时最大喷射量约 9 mg/cm^2 ,卸载熔化后且当 Pb 样品表面附近冲击压力约为 40 GPa 时喷射量已达 25 mg/cm^2 ,卸载熔化后与熔化前相比喷射量明显增加,熔化后喷射量约为熔化前的 3 倍; 2) 熔化前后 Pb 样品表面喷射物质量-速度分布

特征也存在较大差异,熔化前喷射物质量主要集中在 $(1-1.1)u_{fs}$ 速度区间内; 卸载熔化后喷射物质量在速度区间上呈现明显的展宽趋势,主要覆盖 $(1-1.4)u_{fs}$ 速度区间. 上述图 3(c) 所示卸载熔化前后 Pb 样品表面喷射质量及其随速度分布特性差异与目前理论认识符合: 卸载熔化后材料抗拉强度明显降低,在相同能量驱动下,相比于未熔化状态,势必将产生更多质量的喷射物,而且喷射相对速度 (u_e/u_{fs}) 自然也会呈现增大趋势.

同时,由图 3(d) 所示喷射物密度-速度分布可得以下三点认识: 1) 熔化前后 Pb 样品表面喷射物密度-速度分布呈现明显差别,几乎在所有相对速度 (u_e/u_{fs}) 分布区间内熔化后喷射物的密度均大于熔化前喷射物密度; 2) Pb 样品表面喷射物密度-速

度曲线, 熔化后较熔化前振荡更加剧烈; 3) 熔化前喷射物密度-速度分布曲线在密度大于 200 mg/cm^3 后呈现快速增加趋势, 而熔化后喷射物密度-速度分布曲线所示的该密度增加过程相对较缓. 图 3(d) 所示卸载熔化前后 Pb 样品表面喷射物密度-速度分布特性差异与目前理论认识也基本符合: 第 1) 点差异出现的原因与上述图 3(c) 所示差异基本一致, 即卸载熔化后材料抗拉强度明显降低, 微喷物质更易产生, 从而呈现出在相同速度区间内熔化后喷射物密度大于熔化前的特征; 对于第 2) 点可采用如下解释, 样品熔化前喷射颗粒主要来源与样品表

面缺陷, 根据文献 [4] 的描述, 该状态下喷射颗粒尺寸一般较小, 而样品发生卸载熔化后, 相当数量的喷射颗粒来源于稀疏波拉伸形成的破碎颗粒, 其颗粒尺寸势必要偏大, 因此导致喷射物密度-速度曲线振荡较大; 第 3) 点形成原因可能是, 卸载熔化后由于样品抗拉强度较熔化前明显降低, 在稀疏波的拉伸作用下在样品近自由面将形成大面积膨胀破碎区, 出现一个密度缓慢增加区, 导致样品严格意义上的自由面消失, 而熔化前该膨胀破碎区极小, 从而出现了第 3) 点描述的实验现象.

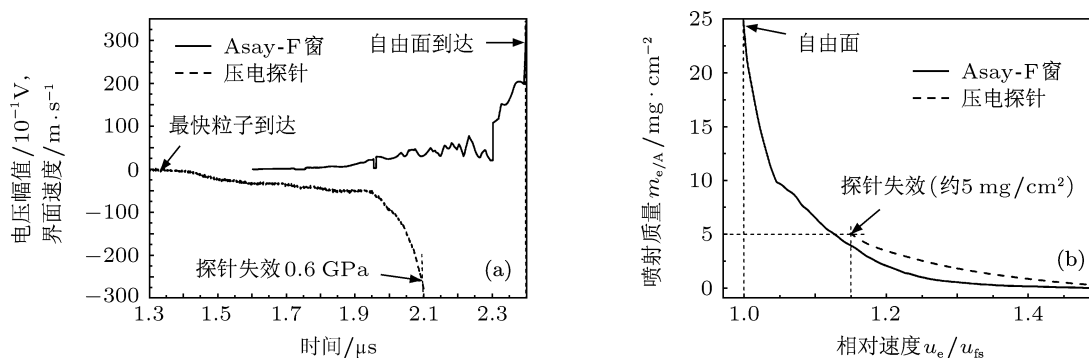


图 5 压电石英计与 Asay-F 窗诊断结果对比 (a) 实验记录原始信号; (b) 单位面积喷射质量 m_e/A - u_e/u_{fs} 关系

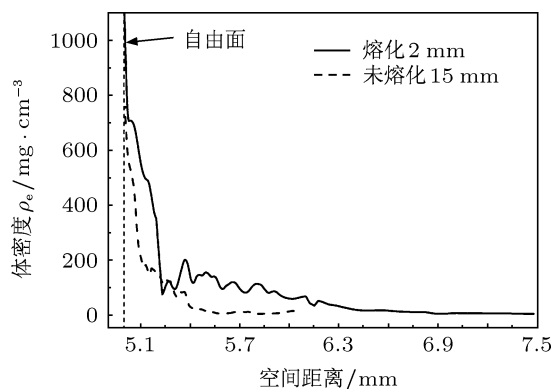


图 6 Pb 样品自由面撞击窗口时刻微喷物质密度空间分布

另外, 利用文献 [12] 中给出的将微喷物质的动态体密度转化为固定时刻密度空间分布图像的方法, 由图 3(d) 所示的密度-速度关系近似给出了 Pb 样品自由面撞击 5 mm 测试界面处诊断探头时刻微喷物质的总体空间密度分布图像, 见图 6. 由图 6 得, 熔化前 Pb 样品表面密度从 200 mg/cm^3 过渡到

初始密度对应空间尺度小于 0.1 mm , 而熔化后该密度区间对应空间尺度明显增大 (大于 0.2 mm), 再次直观地说明, 与熔化前相比, 熔化后金属样品表面将明显出现一个密度“缓慢”增加区, 与上述第 3) 点的理论解释符合.

4 结论

在 Asay 窗诊断技术基础上, 设计了一种适用于高密度大质量微喷物质测量的 Asay-F 窗技术, 并通过与压电石英计测试结果的比较, 分析了其诊断可靠性和优缺点; 利用本文发展的 Asay-F 窗较准确地诊断给出了金属 Pb 样品不同加载状态下喷射物的质量-速度分布, 指出了熔化前后喷射特性的差异, 并从理论分析的角度阐释了该差异产生的物理原因.

- [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] Asay J R, Bertholf L D 1978 *Sandia National Laboratory Report* No. SAND-78-1256
- [4] Asay J R 1976 *Sandia National Laboratory Report* No. SAND-76-0542
- [5] Zeller M B, Vogan McNeil 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
- [6] Zeller M B, Vogan McNeil W, Gray III 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Buttler W T, Hixson R S, King N S P, Olson R T, Rigg P A, Rimmer A, Zellner M B 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 151921
- [10] 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, Buttler W T 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 113508
- [11] Sorenson D S, Minich R W, Romero J L, Tunnell T W, Malone R M 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 5830
- [12] Zeller M B, Buttler W T 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 114102
- [13] Chen J, Jing F Q, Zhang J L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2386 (in Chinese) [陈军, 经福谦, 张景琳 2002 物理学报 **51** 2386]
- [14] Wang P, Shao J L, Qin C S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1064 (in Chinese) [王裴, 邵建立, 秦承森 2009 物理学报 **58** 1064]
- [15] Wang P, Qin C S, Zhang S D, Liu C 2004 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **18** 149 (in Chinese) [王裴, 秦承森, 张树道, 刘超 2004 高压物理学报 **18** 149]
- [16] Ye Y, Wang W, Li Z Y, Li J, Liu Z Q, Zhong J, Li J, Shang C S, Luo Z X, Li X Z, Li Z R 2009 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **23** 471 (in Chinese) [叶雁, 汪伟, 李作友, 李剑, 刘振清, 钟杰, 李军, 尚长水, 罗振雄, 李欣竹, 李泽仁 2009 高压物理学报 **23** 471]
- [17] Ma Y, Wang X S, Li X Z, Zhang H Z, Hu S L, Li J B, Chen H, Weng J D 2006 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **20** 207 (in Chinese) [马云, 汪小松, 李欣竹, 张汉钊, 胡绍楼, 李加波, 陈宏, 翁继东 2006 高压物理学报 **20** 207]
- [18] Holtkamp D B, Clark D A, Crain M D 2003 *Shock Compression of Condensed Matter* Portland, Oregon, July 20–25, 2003 477
- [19] Holtkamp D B, Clark D A, Crain M D 2003 *Shock Compression of Condensed Matter* Portland, Oregon, July 20–25, 2003 473
- [20] Marsh S P 1980 *LASL Shock Hugoniot Data* (Berkeley: University of California Press) p283

Ejecta on Pb surface below and above melting pressure*

Chen Yong-Tao[†] Ren Guo-Wu Tang Tie-Gang Li Qing-Zhong
Wang De-Tian Hu Hai-Bo

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

(Received 9 March 2012; revised manuscript received 17 April 2012)

Abstract

In this paper, Asay-F-window diagnostic technology for high density and large mass ejecta measurement is designed. By Asay-F-window technology, the mass and the density-velocity distribution of ejecta from Pb surface are presented. The difference in ejecta between below and above Pb melting pressure is particularly studied. Moreover, the physical causation inducing the ejecting difference is well explained through theory analysis.

Keywords: Pb, ejecta, melt, Asay-F-window

PACS: 62.20.M-, 62.50.Ef

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10902102), the Science and Technology Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant Nos. 2010A0201008, 2012B0201017), and the Two Hundred Talent Foundation of CAEP (Grant No. 2009R0101).

[†] E-mail: zhongli4909@163.com