

爆轰加载下金属样品的熔化破碎现象诊断*

陈永涛[†] 任国武 汤铁钢 胡海波

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2012年9月7日收到; 2013年1月30日收到修改稿)

本文在传统 Asay 窗技术基础上设计发展了一种用于诊断熔化状态下金属样品表面附近一定厚度区域内熔化破碎现象的 Asay-F 窗技术, 较准确给出了该区域熔化破碎物质的质量和密度分布信息, 并与表面微喷和固体层裂片的特征进行了比对分析, 为熔化破碎现象的形成机理认识和物理建模提供了重要实验数据. 而且研究表明 Asay-F 窗技术可在一定程度上弥补目前熔化破碎现象主要依靠高成本质子照相技术诊断的不足.

关键词: 爆轰加载, 熔化破碎, Asay-F 窗

PACS: 62.20.M-, 62.50.Ef

DOI: 10.7498/aps.62.116202

1 引言

自 1914 年, Hopkinson 利用硝化棉炸药和一定厚度的软钢板进行接触爆轰, 在钢板的背面首次观察到高速飞出的裂片, 人们对于层裂破坏现象的认识和科学研究已持续了很长时间. 经过近一个世纪的研究, 对于冲击加载后金属样品保持固体状态的层裂损伤破坏现象目前认识相对比较清楚^[1,2]. 而当冲击加载压力较大, 受载金属样品处于熔化或部分熔化状态时, 金属样品的层裂损伤破坏现象和形成物理机理将变得极其复杂, 即随着材料质点间抗拉伸能力的降低和丧失, 由于微尺度不均性的存在, 在熔化金属样品不同位置处将形成大量空穴(空化核), 在稀疏波的拉伸作用下空化核开始长大, 最终受载金属样品可能呈现表现连续实则为离散破碎状态的“膨胀变厚”现象(典型图像见图 1 所示部分熔化状态下 Sn 样品的熔化破碎现象^[3]). 该现象与固态层裂极典型的微空洞在特定位置层上的成核、增长、汇聚并最终形成断裂面而其余部分保持完好固体状态的特征图像存在明显差异.

对于与熔化(或部分熔化)相关破碎现象最早由 Andriot 等于 1983 年发现^[4], 近年来针对武器物理的研究需求, 该问题不断得到关注. 相关研究进

展主要有 Holtkamp 等采用质子照相和 Asay 窗诊断测试技术开展的 Pb, Sn 材料熔化断裂破碎行为研究^[3,5]; Signor 等采用 Asay 窗、软回收和 VISAR 等诊断技术开展的 Sn 材料的熔化破碎现象研究^[6-8]. 不过必须指出, 由于熔化状态下金属样品破碎颗粒质量密度较大、破碎颗粒之间速度梯度较小, 且表面存在微物质喷射, 给实验准确诊断其现象特征带来很大困难. 虽然, 目前国外发展了高能质子照相^[3]、Asay 窗^[5]等诊断技术, 但由于利用质子照相开展研究成本极高, 且目前只有美国等极少数西方国家拥有该技术(中国目前不掌握质子照相技术), 严重影响了熔化破碎现象的研究进展; 另外, 由于金属样品表面微物质喷射的存在^[9-18], 导致 Asay 窗测量信号较差, 且缺乏测量信号的解读方法, 目前该研究仍处于探索阶段. 因此, 如何改进发展相应的诊断技术, 较准确诊断强冲击加载状态下金属样品的熔化破碎现象是目前亟待解决的问题.

本文拟对传统 Asay 窗技术进行改进完善, 避免金属样品表面微喷对测试信号的影响, 获得爆轰加载金属样品熔化破碎现象的高质量诊断信号, 制定实验数据解读方法, 从实验上诊断熔化(或部分熔化)状态下金属样品破碎物质的质量、密度及其分布等信息, 弥补目前该研究主要依靠质子照相技

* 国家自然科学基金(批准号: 11272006, 10902102)和中物院发展基金(批准号: 2010A0201008, 2012B0201017)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhongli4909@163.com

术的不足, 加深对该物理现象的认识.

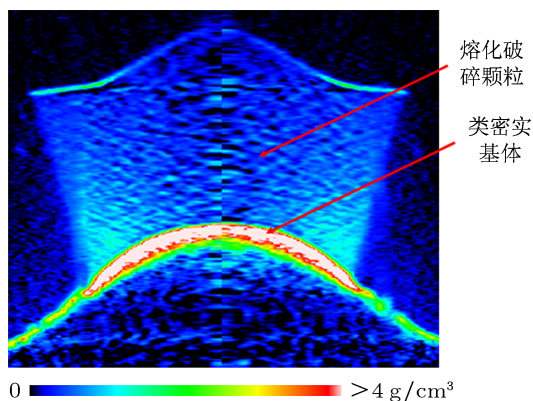


图1 部分熔化状态下 Sn 样品的熔化破碎图像

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见示意图 2. 具体结构为: $\Phi 100\text{ mm}$ 平面波发生器 + $\Phi 100\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ HE (high explosive 高能炸药) + $\Phi 100\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ Pb. Pb 样品经车削加工后, 表面经研磨处理, 表面粗糙度为 $0.8\ \mu\text{m}$. 诊断手段主要选用在 Asay 窗基础上改进设计的 Asay-F 窗技术和激光多普勒位移干涉仪 Doppler Pin System (DPS). 其中, DPS 用于给出冲击波到达 Pb 样品自由面的时间, 近似代表 Pb 样品表面熔化破碎物质的形成时刻 (文中将其定义为所有测试技术的零时); 改进设计发展的 Asay-F 窗技术主要用于诊断金属样品熔化破碎物质的质量、密度等特征信息, LiF 窗口覆膜端面距 Pb 样品表面距离精确控制, 分别为 5.0 mm , 10.0 mm , 15.0 mm , Asay-F 窗具体测量原理及数据处理方法如下. 同时, 为减少空气对微喷射和熔化破碎颗粒的影响, 实验装置加载部分和测试探头放置于真空度约 500 Pa 的爆炸容器内.

本文在传统 Asay 窗 (图 3(a), 激光测速系统选用 Velocity Interferometry System for Any Reflector (VISAR)) 基础上设计发展的 Asay-F 窗基本结构见图 3(b), 即在透明窗口 (LiF 晶体, 尺寸为 $\Phi 30\text{ mm} \times 15\text{ mm}$, 可确保在有效测试时间内测试结果没有受到窗口边侧稀疏影响) 与熔化破碎颗粒的撞击端面用极少量环氧树脂胶粘贴了一层薄铝膜 (文中厚度为 $130\ \mu\text{m}$), 以确保激光干涉测速系统 (文中选用 DPS, 测试技术激光焦版直径 0.4 mm) 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—熔化破碎颗粒间的界面速度推测熔化破碎物质的质量、密度和速度等信息.

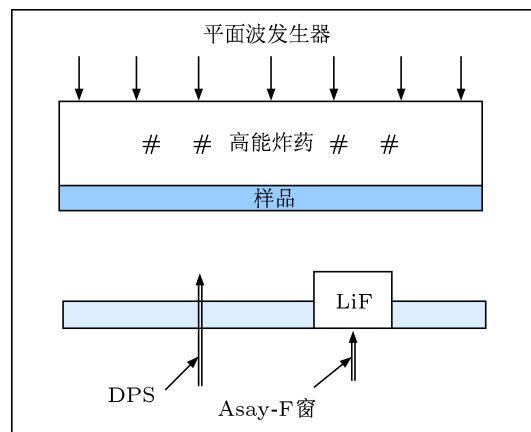


图2 实验装置及诊断技术布局示意图

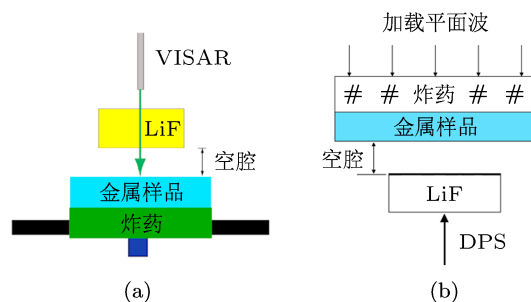


图3 诊断技术结构示意图 (a) Asay 窗; (b) Asay-F 窗

利用 Asay-F 窗记录的界面速度计算熔化破碎物质的质量—速度分布时, 用到几点基本假设: 1) 对于处于熔化状态金属样品, 当冲击波在自由面反射时, 样品表面层熔化破碎颗粒瞬时形成; 2) 熔化破碎颗粒横向分布均匀; 3) 熔化破碎颗粒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) 在熔化破碎颗粒与覆膜 LiF 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 LiF 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.

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熔化破碎颗粒质量增量 $dm_{e/A}$ 可由下式得:

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

(1) 式中 $P(t)$ 为熔化破碎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 为熔化破碎颗粒运动速度, 其具体数值主要通过两种方法得到: 1) 金属样品表面层熔化破碎颗粒速度, 即冲击波在金属样品自由面反射时刻形成破碎颗粒速度, 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; 2) 根据 Asay-F 窗诊断技术给出的熔化破碎颗粒与覆膜窗口完全非弹性碰撞的基本假定, 在样品内部某一位置破碎颗粒撞击到 LiF 窗口时, LiF 窗口撞击端面已被其前面破碎颗粒物质覆盖, 而覆盖层破碎颗粒物质的厚度及状态方程参数均不清楚 (无法计算给出覆盖层物质的冲击波速度), 导致无法从 DPS 记录到的 LiF 窗口界面速度响应时间推断给出该破碎颗粒撞击 LiF 窗口测试界面的准确时间, 进而导致无法采用第 1) 条中速度计算方法给出样品内部熔化破碎颗粒物质的速度. 鉴于此, 对于样品内部熔化破碎颗粒物质的速度, 本文拟通过该速度与样品表面层熔化破碎颗粒速度的相对比较近似给出, 具体方法和数据将在第 3 节中给出.

(1) 式中喷射颗粒撞击覆膜窗口产生的应力 $P(t)$ 为

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

(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.

3 实验结果与分析

Asay-F 窗诊断给出熔化破碎颗粒 -LiF 窗口界面速度见图 4, 其主要给出三个重要时间特征量: 1) 界面速度启动时刻 t_1 , 即样品表面快速微喷射粒子撞击覆膜窗口的时刻; 2) 界面速度第一次快速上升时刻 t_2 , 即样品表面层熔化破碎颗粒撞击 LiF 窗口时刻; 3) 界面速度第二次快速上升时刻 t_3 , 即样品密实基体撞击 LiF 窗口时刻或 Asay-F 窗失效时刻.

对于本文高能炸药 (HE) 加载 Pb 样品的实验, 由于 Pb 样品可能处于熔化或部分熔化状态, 样品抗拉强度极低, 熔化破碎颗粒的形成需要时间和能量较小, 因此, 可以认为冲击波在样品自由面反射时刻表面层熔化破碎颗粒将瞬间形成, 此时, 表面层熔化破碎颗粒速度即可近似代表冲击波在样品表面反射时刻金属样品的实际自由面速度. 另外,

由图 4 给出 LiF 窗口界面速度第一次快速上升时间 t_2 , 即 Pb 样品表面层熔化破碎颗粒撞击 LiF 窗口时间除 LiF 窗口到自由面的精确距离得样品表面层熔化破碎颗粒速度约为 2.0 km/s , 进而得冲击波在样品表面反射时刻样品自由面速度 $u_{fs} \approx 2.0 \text{ km/s}$. 因此, 利用 Pb 材料冲击两贡组关系及参数计算得 Pb 样品自由表面附近冲击压力约 40 GPa , 大于其卸载熔化压力 (Pb 的卸载熔化压力约 25 GPa ^[19]), 即冲击加卸载后样品自由表面附近确实处于卸载熔化或部分卸载熔化状态, 证明上述分析正确可靠. 另外, 对于本文高能炸药 (HE) 加载金属样品的情况, 由于炸药本身具有三角波的加载特性, 导致样品内部压力将略大于自由表面附近压力, 因此当样品自由表面附近处于卸载熔化状态时, 样品内部也将最终处于卸载熔化状态, 即本文研究的 Pb 样品整体处于卸载熔化或部分熔化状态, 在稀疏波的拉伸作用下将发生熔化破碎现象.

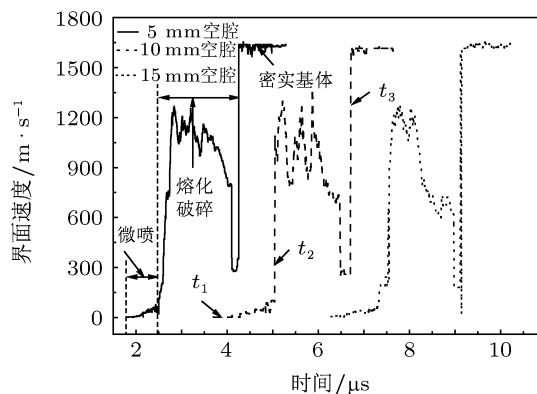


图 4 Asay-F 窗诊断熔化破碎颗粒与 LiF 窗口界面速度

深入分析图 4 得, 第一个和第二个时间特征量 (t_1-t_2) 之间信号对应 Pb 样品表面微喷射物质, 其颗粒尺度约几 μm , 速度介于 $2-2.8 \text{ km/s}$ 之间, 均大于冲击波在样品自由面反射时刻样品自由面速度, 总体来看, 该部分物质主要由样品表面几何缺陷引发, 形成物理机理和现象特征相对比较清楚, 本文不做详细讨论; 第二个和第三个时间特征量 (t_2-t_3) 之间信号对应样品表面附近一定厚度区域内熔化破碎物质, 其颗粒尺度可能约在几十 μm , 最大约百 μm , 速度接近或略小于冲击波在样品自由面反射时刻样品自由面速度, 该部分物质主要由处于熔化或半熔化状态的金属样品在稀疏波的拉伸作用下形成, 形成机理类似固体层裂但又不同于固体层裂, 该部分物质特性是本文研究关注重点. 另外, 比较图 4 中 5 mm , 10 mm 和 15 mm 三个不同

测试空腔处 Asay-F 窗诊断界面速度剖面发现, 随着测试空腔增大, t_1-t_2 的时间间隔, 即样品表面快速微喷物质和表面层熔化破碎颗粒撞击 LiF 窗口的时间间隔不断增大 (5 mm 测试空腔处约 0.67 μs , 10 mm 测试空腔处约 0.95 μs , 15 mm 测试空腔处约 1.23 μs), 说明样品表面微喷物质间存在明显速度梯度, 随着测试空腔距离增大, 微喷物质颗粒在空间尺度内不断分散展宽; 而 3 个不同测试空腔下 t_2-t_3 的时间间隔, 即样品表面层熔化破碎颗粒和样品密实基体撞击 LiF 窗口的时间间隔近似相等 (约 1.5 μs), 表明样品内部熔化破碎颗粒物质速度与表面层破碎物质速度差极小, 近似相同 (如果样品表面层熔化破碎颗粒速度大于样品内部熔化破碎物质速度, 将会呈现与样品表面微喷物质空间分散演化类似的特征信号, 即随着破碎颗粒物质在空间内的运动演化分散, 在大空腔处 Asay-F 窗诊断给出样品表面层熔化破碎颗粒和样品密实基体撞击 LiF 窗口的时间间隔 (t_2-t_3) 将大于小空腔处诊断结果). 不过, 在此必须指出, 对于本文实验结果中呈现的样品表面附近一定厚度区域内熔化破碎颗粒物质速度近似相等的现象与本实验特定的加载状态 (驱动炸药层较厚, 约 20 mm, 加载波后跟稀疏波强度较小) 有关, 当加载炸药厚度较薄, 加载波后跟稀疏波强度较大时情况可能会明显不同.

另外, 利用第 2 节给出的 Asay-F 窗的数据处理方法对图 4 所示界面速度进行处理得单位面积熔化破碎物质累积质量-时间 ($m_{s/A}-t$) 关系见图 5. 分析图 5 所示熔化破碎颗粒累积质量-时间关系发现, 利用本文发展的 Asay-F 窗技术初步实现了爆裂加载下金属样品表面附近一定厚度区域内熔化破碎颗粒物质的诊断, 如 5 mm, 10 mm 和 15 mm 三个测试界面出诊断给出熔化破碎颗粒质量分别为 1386 mg/cm^2 , 1145 mg/cm^2 和 895 mg/cm^2 , 最大质量相差约 35%. 从严格理论判断, 由于三个测试界面处 Asay-F 窗诊断物质几乎为同一物质, 诊断结果应近似相等, 不应出现结果中呈现的 35% 的差异. 对于该问题目前可主要由以下三方面得到解释: 1) 由于熔化破碎现象复杂, 诊断难度极大, 导致 Asay-F 窗技术诊断精度受限, 这也正是目前破碎颗粒诊断共同的难点, 如用于诊断金属样品表面微喷射且技术相对成熟的 Asay 膜的测量不确定度就高达 50%; 2) 上述理论判断和 Asay-F 窗数据处理中均假定熔化破碎物质在空间横向分布均匀, 该假定具有一定近似性, 不同测点处诊断结果必然会有

一定分散性; 3) 随着熔化破碎颗粒在测试空腔内的运动演化, 颗粒尺度和空间分布特征将会发生改变, 也将导致不同测试空腔诊断结果存在差异. 总体来看, Asay-F 窗技术具备初步诊断金属样品熔化破碎颗粒物质的能力, 但仍有改进提高空间.

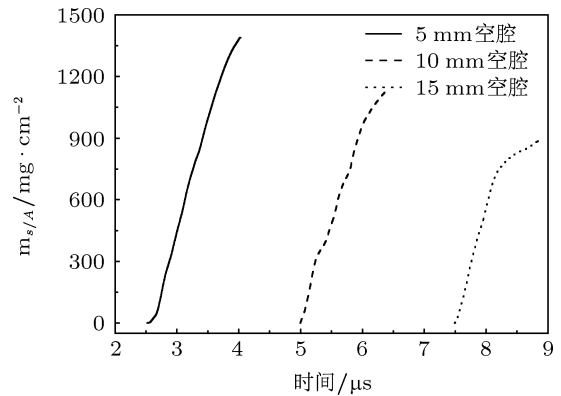


图 5 熔化破碎颗粒累积质量-时间 ($m_{s/A}-t$) 关系

同样, 利用第 2 节给出的 Asay-F 窗的数据处理方法对图 4 所示界面速度进行处理得熔化破碎颗粒动态体密度 ρ_s (ρ_s/ρ_0)-时间 t 关系见图 6 ($\rho_0 = 11.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 为 Pb 材料初始密度). 进而利用文献 [14] 中给出的将熔化破碎颗粒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 6 所示的动态体密度-时间关系近似给出了 Pb 样品自由面 (表面层熔化破碎颗粒) 撞击 5 mm ($t = 2.5 \mu\text{s}$), 10 mm ($t = 5.0 \mu\text{s}$) 和 15 mm ($t = 7.5 \mu\text{s}$) 测试界面处诊断探头时刻熔化破碎颗粒物质的总体空间密度分布图像, 见图 7. 由图 6 和图 7 所示熔化破碎颗粒动态相对体密度-时间 (ρ_s/ρ_0-t) 和熔化破碎颗粒动态相对密度-空间 (ρ_s/ρ_0-d) 的关系得, 由于熔化破碎颗粒速度接近, 5 mm, 10 mm 和 15 mm 三个不同测试空腔下, 熔化破碎颗粒空间分散展宽不明显, 空间分布均约为 3.0 mm, 相对密度约分布在 0.2—0.8 区间 (绝对体密度大约分布在 $2.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ — $8.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ 区间), 且熔化破碎颗粒之间存在明显分层特征, 该结果与图 1 所示质子照相诊断给出熔化 Sn 破碎图像类似. 另外, 细致分析发现, 图 6 和图 7 所示的熔化破碎颗粒的分层现象, 与固体层裂中多次层裂现象有一定相似性, 定性说明熔化破碎颗粒形成物理机理与固体层裂有一定相似性, 均为材料在稀疏波的拉伸作用下形成, 但也存在明显不同, 如层内熔化破碎颗粒的空间体密度明显小于材料初始密度, 而固体层裂中层裂片的密度几乎就为材料初始密度, 说明熔化破碎颗粒层为速

度接近颗粒群,而非一密实层裂片.

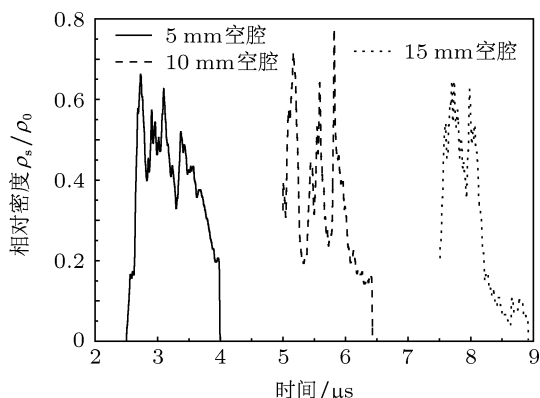


图6 熔化破碎颗粒相对密度-时间(ρ_s/ρ_0-t)关系

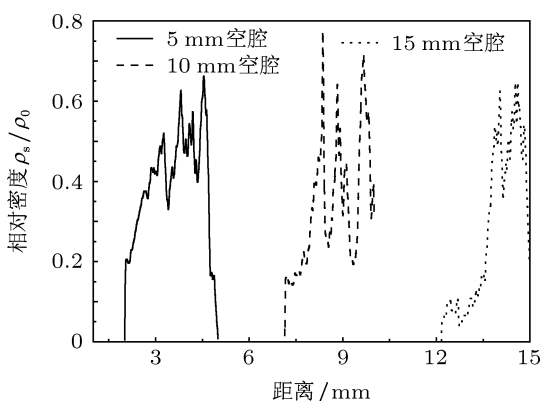


图7 熔化破碎颗粒相对密度-距离(ρ_s/ρ_0-d)关系

总体来看,利用发展的 Asay-F 窗技术,本文比较准确给出了高密度熔化破碎颗粒的质量、密度分布信息,且诊断结果与图 1 所示质子照相诊断给出爆轰加载下 Sn 样品的熔化破碎图像类似,证明本文诊断结果准确可靠,为武器和相关科学研究关心的材料熔化状态下破碎问题的物理建模、机理认识提供了重要的实验信息. 研究结果也说明本文发展的 Asay-F 窗确实具备诊断高密度熔化破碎颗粒的能力,可在一定程度上弥补国内缺乏质子照相该熔化破碎颗粒物质诊断技术的不足,至少可以作为一种有效的补充手段.

4 结论

1. 在 Asay 窗诊断技术基础上,设计了一种适用于熔化状态下金属样品表面附近及一定厚度区域内熔化破碎现象诊断的 Asay-F 窗技术,在一定程度上弥补国内缺乏质子照相该熔化破碎颗粒物质诊断技术的不足;

2. 利用本文发展的 Asay-F 窗技术较准确诊断给出了金属 Pb 样品表面附近及一定厚度区域内熔化破碎物质的质量、密度及其速度空间分布信息,其空间体密度可达样品初始密度的 80%,质量可达 g/cm^2 ,速度梯度分布强烈依赖加载波形状,且与金属样品表面微喷颗粒及固体层裂片行为特征存在明显差异.

- [1] Curran D R, Seaman L, Shockey D A 1987 *Phys. Rep.* **147** 253
- [2] Davison L 1972 *J. Appl. Phys.* **49** 988
- [3] Holtkamp D B, Clark D A, Crain M D 2003 *Shock Compression of Condensed Matter* 477
- [4] Andriot P, Chapron P, Lambert V, Olive F 1983 *Shock waves in condensed matter* 277
- [5] Holtkamp D B, Clark D A, Crain M D 2003 *Shock Compression of Condensed Matter* 473
- [6] Resseguier T de, Signor L, Dragon A 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 013506
- [7] Resseguier T de, Signor L, Dragon A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 131910
- [8] Signor L, Roy G, Chanal P Y 2009 *Shock Compression of Condensed Matter* 1065
- [9] Asay J R, Mix L P, Perry F C 1976 *Appl. Phys. Lett.* **29** 284
- [10] Asay J R 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 6173
- [11] 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, Veesser L, Buttler W T 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 123502
- [12] 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
- [13] 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, Veesser L, Buttler W T 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 013522
- [14] Zeller M B, Buttler W T 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 114102
- [15] Chen J, Jin 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]
- [16] Wang P, Shao J L, Qing 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]
- [17] Wang P, Qing C S, Zhang S D 2004 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **18** 149 (in Chinese) [王裴, 秦承森, 张树道 2004 高压物理学报 18 149]
- [18] Ye Y, Wang W, Li Z Y 2009 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **23** 471 (in Chinese) [叶雁, 汪伟, 李作友 2009 高压物理学报 23 471]
- [19] Marsh S P 1980 *LASL shock Hugoniot Data* (Berkeley: University of California Press)

Experimental diagnostic of melting fragments under explosive loading*

Chen Yong-Tao[†] Ren Guo-Wu Tang Tie-Gang Hu Hai-Bo

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

(Received 7 September 2012; revised manuscript received 30 January 2013)

Abstract

We have conducted experiments to study the melting fragments from explosively shocked melting Pb targets. Based on the traditional Asay-Window technique, Asay-F-window was designed, which is suitable to investigate high-density melting fragments of metal sample. The areal mass and volume density of melting fragments from the Pb target were presented, which is also compared with that of micro-jetting and solid spallation. The results may contribute to the understanding of physical mechanism and construction of dynamic model for melting fragments. Additionally, the Asay-F-Window technique is an effective supply for proton photography technique to study the dynamic fragmentation of melting metal.

Keywords: explosive loading, melt fragmentation, Asay-F-Window

PACS: 62.20.M-, 62.50.Ef

DOI: 10.7498/aps.62.116202

* Projected supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10902102, 11272006), and the Science and Technology Foundation of China Academy of Engineering Physics, China (Grant Nos. 2010A0201008, 2012B0201017).

[†] Corresponding author. E-mail: zhongli4909@163.com