文章编号:1000-5773(2013)06-0897-04

用于微层裂现象诊断的 Asay-F 窗技术*

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冲击波物理与爆轰物理实验室,四川绵阳 621999)

摘要:针对现有测试技术在诊断强动载下金属样品表面"微层裂"现象存在明显不足的现状,设计发展了一种 Asay-F 窗技术,较准确地给出了金属样品表面"微层裂"物质的质量-速度分布信息,并通过与压电探针传统微喷测试技术诊断结果的对比,评估了其诊断能力及可靠性。

关键词:Asay-F 窗;微喷;微层裂;熔化

中图分类号:O521.3 **文献标识码**:A

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,对该现象的研究,对于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[1]。在实际加载和样品状态等因素的影响下,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的状态也有数量级的差别[1-15],如:对于冲击加载后样品表面仍保持为固体的情况,微喷射主要由金属材料或表面几何非均匀性引发,相应的喷射数量则一般与表面粗糙度相对应[1-5];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,则金属表面的微喷射将被强化和衍生,在稀疏拉伸成孔、破碎断裂等行为的作用下,形成大面积的"微层裂"破碎区(即熔化导致的低速高密度微喷物质)[4-5,11-12]。

对于冲击加载后样品表面仍保持为固体的情况,微喷射物质的密度-速度分布、颗粒大小等重点关注的物理量,基本可以利用压电探针、Asay 膜、激光全息等现有技术进行诊断[7-9,14-15]。对于冲击加载后样品表面处于熔化或部分熔化的情况,由于微层裂物质层的密度较大,超出了现有实验技术的诊断能力,给实验诊断造成了极大困难。如果能发展某种诊断技术,从实验上准确诊断微层裂物质的质量和速度等特征信息,对于认识熔化状态下样品表面的微喷机制,构建物理模型,无疑具有重要意义。

本研究在传统 Asay 窗技术的基础上,设计发展一种用于"微层裂"现象诊断的 Asay-F 窗技术,并通过与压电探针等传统微喷测试技术诊断结果的对比,评估其诊断能力及可靠性。

2 Asay-F 窗诊断技术

为诊断强动载下金属样品表面高密度"微层裂"散碎物质的特征信息,对传统 Asay 窗技术(如图 1(a)所示)进行了改进[12],设计发展了一种 Asay-F 窗技术,其基本结构见图 1(b),即在透明窗口(LiF)与微层裂颗粒的撞击端面,用极少量的环氧树脂胶粘贴一层薄铝膜(厚度为 130 μm),以确保激光干涉测速系统(选用 DPS 系统)正常回光,从而获得高质量的有效信号;进而利用激光干涉测速系统记

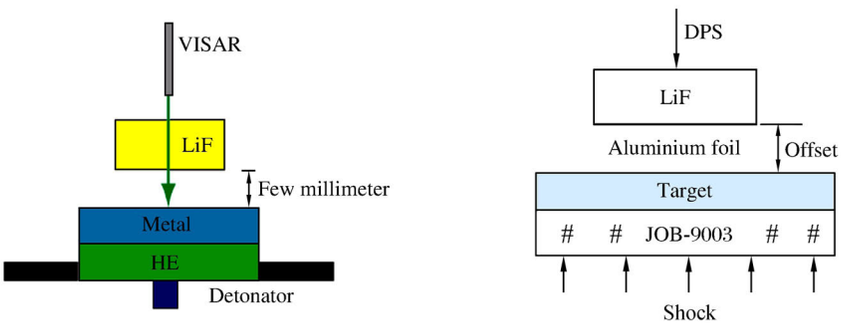
* **收稿日期**:2012-02-28;**修回日期**:2012-05-10

基金项目:国家自然科学基金(11272006);中国工程物理研究院重点基金(2010A0201008);双百人才基金(2009R0101)

作者简介:陈永涛(1980—),男,硕士,副研究员,主要从事冲击动力学研究. E-mail:zhongli4909@163.com

录的窗口-喷射颗粒间界面的速度，推测微喷、微层裂物质的密度和速度等信息。

在利用 Asay-F 窗记录的界面速度对喷射物质质量-速度的分布进行计算时，用到以下几点基本假设：(1) 当冲击波在自由面反射时，全部喷射质量在足够短的时间内产生，从而可以近似地认为喷射是瞬时的；(2) 喷射物质在横向均匀分布；(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 窗口的自由面发生反射；(5) 在喷射颗粒与覆膜 LiF 窗口的撞击过程中，LiF 窗口始终保持透明，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，因此数据处理过程中忽略铝膜的影响。



(a) Asay-Window (b) Asay-F-Window

图 1 诊断技术结构示意图

Fig. 1 Schematic of diagnostic experiments

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的增量 $\mathrm{d}m_\mathrm{e}$ 可由(1)式计算得到

$$\frac{\mathrm{d}m_\mathrm{e}}{\mathrm{d}t}=\frac{p(t)}{u_\mathrm{e}-u_\mathrm{w}} \tag{1}$$

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的距离 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)式得到

$$p(t)=\int_0^{u_\mathrm{w}}\rho_\mathrm{w}[c_\mathrm{w}+\lambda u_\mathrm{w}(t)]\mathrm{d}u_\mathrm{w}(t) \tag{2}$$

式中：$\rho_\mathrm{w}=2.64\ \mathrm{g/cm^3}$ 为 LiF 窗口的初始密度，$c_\mathrm{w}=5.148\ \mathrm{km/s}$ 为 LiF 窗口的 Lagrangian 声速，$\lambda=1.358$ 为 LiF 窗口的冲击 Hugoniot 系数[16]。

3 诊断结果与分析

为校验 Asay-F 窗技术的诊断能力，设计了平面爆轰加载实验，结构如图 2 所示，具体为∅100 mm 平面波发生器＋∅100 mm×20 mm JOB-9003＋∅100 mm×2 mm Fe＋∅100 mm×2 mm Pb，其中 Pb 样品为待研究样品。对待测 Pb 样品表面进行研磨处理，粗糙度约为 0.8 μm。测试技术选用 Asay-F 窗、压电探针和 DPS。Asay-F 窗用于测量 Pb 样品表面微喷和微层裂的相关信息，是需要考核验证的测试技术；压电探针用于校验 Asay-F 窗诊断结果的可靠性，本研究压电石英计由铌酸锂晶体制成(Lithium Niobate)，探针相关参数及制做过程见文献[5-9]；DPS 用于测定冲击波到达 Pb 样品自由面及微喷发生的时间，文中将其定义为零时。为保证测

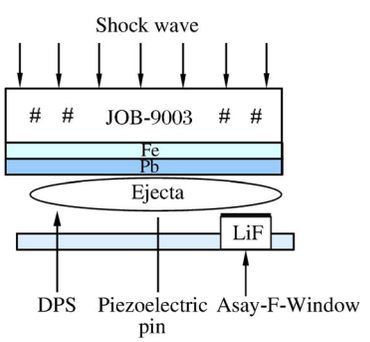


图 2 实验装置及测试系统布局示意图

Fig. 2 Experimental set-up and diagnostic technologies

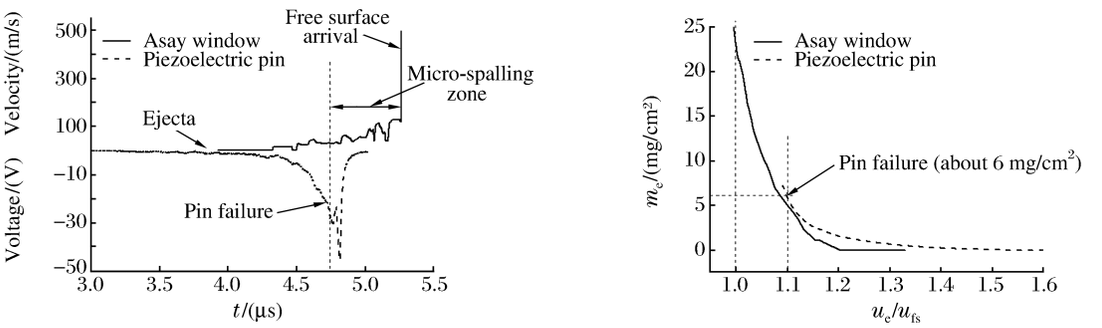
试结果的可靠性,实验设计上要求 Asay-F 窗和压电探针测试探头的轴向与样品自由表面严格垂直,精确控制测量端面与样品自由表面的距离为 10 mm。

在 Asay-F 窗测试技术中,DPS 用于记录喷射物质/LiF 窗口的界面速度(见图 3(a)),给出 2 个重要特征量:(1) 界面速度的启动时刻,即快速喷射粒子撞击覆膜窗口的时刻;(2) 界面速度快速上升时刻,即样品自由面撞击 LiF 窗口的时刻。由图 3(a)所示的 Pb 样品自由面撞击 LiF 窗口的时间除窗口到样品自由面的距离,得到 Pb 样品的自由面速度(u_{fs})约为 1.9 km/s。利用 Pb 材料冲击雨贡纽关系及参数,计算得到 Pb 样品自由表面附近的冲击压力约 38 GPa,大于其卸载熔化压力,样品处于部分熔化状态,表面发生了与熔化相关的微层裂现象。

利用第 2 节给出的 Asay-F 窗技术的数据处理方法对图 3(a)进行处理,得到单位面积喷射质量 m_e 随速度的分布信息,见图 3(b)。图 3 中同时示出了用于校验 Asay-F 窗诊断可靠性及优、缺点的压电探针的测试结果。为了便于结果分析,将压电探针失效时(0.6 GPa)对应的 1.1 倍自由面速度定义为微层裂散碎颗粒的最高速度,即将速度大于 1.1 倍自由面速度的喷射物质定义为传统高速微喷物质,将速度介于(1.0～1.1)倍自由面速度之间的散碎颗粒定义为微层裂(高速低密度微喷)物质。

由图 3 可以看出,压电探针失效前诊断给出的单位面积累积喷射物质的量约 6 mg/cm^2,对应速度范围为 (1.10～1.58)u_{fs}。Asay-F 窗诊断给出的单位面积累积微喷及微层裂物质的量约 25 mg/cm^2,对应速度范围为 (1.00～1.22)u_{fs}。Asay-F 窗诊断给出的微喷、微层裂物质的总量明显大于压电探针,给出的最快喷射物的速度明显小于压电探针技术,在诊断的相同速度范围区域,两者基本吻合(压电探针测试结果略大于 Asay-F 窗结果)。

通过上述分析,说明本研究设计的 Asay-F 窗技术具备诊断强动载下金属样品表面的微喷和微层裂物质的能力,其可靠额定诊断范围明显大于压电探针等传统微喷测试技术,尤其在诊断密度较高“与熔化相关微层裂”物质方面优势明显,但也必须指出,其对密度极小微喷物质的响应灵敏度低于压电探针。在后续 Asay-F 窗技术改进的研究中,应在确保高密度微层裂物质可靠诊断的前提下,尽量减少粘贴在 LiF 窗口上铝膜的厚度,提高其对低密度传统物质的诊断灵敏度,而且需研究其与压电探针、Asay 膜、高速摄影和 X 光等传统微喷测试技术的联合应用,通过关联不同测试技术获得的信息,综合分析强动载下金属样品表面的微喷和微层裂现象,为相关的数值模拟计算和物理模型的构建提供更多有价值的信息和数据。



(a) Original signals (b) m_e-u_e/u_{fs}

图 3 压电探针与 Asay-F 窗诊断结果对比

Fig. 3 Comparison results from piezoelectric pin and Asay-F-Window

4 结 束 语

在传统 Asay 窗技术的基础上,设计发展了一种用于诊断强动载下金属样品表面高密度“微层裂”物质信息的 Asay-F 窗技术。通过平面爆轰加载实验,评估了 Asay-F 窗技术在诊断金属样品表面微喷和微层裂特征信息方面的优、缺点及可靠性,并提出了后续研究的改进思路。

References:

[1] Wang P, ShaoJ L, Qing C S. Effect of loading-wave-front width on micro-jet from aluminum surface [J]. Acta Phys Sin, 2009, 58(2): 1064-1070. (in Chinese)
王 裴, 邵建立, 秦承森. 加载波前沿宽度对铝表面微射流的影响 [J]. 物理学报, 2009, 58(2): 1064-1070.

[2] Asay J R, Mix L P, Perry F C. Ejection of material from shocked surface [J]. Appl Phys Lett, 1976, 29(5): 284-287.

[3] Asay J R. Thick-plate technique for measuring ejecta from shocked surface [J]. J Appl Phys, 1978, 49(12): 6173-6175.

[4] Zeller M B, Vogan McNeil W, Hammerberg J E, et al. Probing the underlying physics of ejecta production from shocked Sn samples [J]. J Appl Phys, 2008, 103(12): 123502.

[5] Zeller M B, Vogan McNeil W, Gray G T Ⅲ, et al. Surface preparation methods to enhance dynamic surface property measurements of shocked metal surfaces [J]. J Appl Phys, 2008, 103(8): 083521.

[6] Zeller M B, Grover M, Hammerberg J E, et al. Effects of shock-breakout pressure on ejection of micron-scale material from shocked tin surfaces [J]. J Appl Phys, 2007, 102(1): 013522.

[7] Vogan W S, Anderson W W, Grover M, et al. Piezoelectric characterization of ejecta from shocked tin surfaces [J]. J Appl Phys, 2005, 98(11): 113508.

[8] Buttler W T, Zeller M B, Olson R T, et al. Dynamic comparisons of piezoelectric ejecta diagnostics [J]. J Appl Phys, 2007, 101(6): 063547.

[9] Buttler W T, Hixson R S, King N S P, et al. Method to separate and determine the amount of ejecta produced in a second-shock material-fragmentation event [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(15): 151921.

[10] Sorenson D S, Minich R W, Romero J L, et al. Ejecta particle size distributions for shock loaded Sn and Al metals [J]. J Appl Phys, 2002, 92(10): 5830.

[11] Holtkamp D B, Clark D A, Crain M D, et al. A survey of high explosive-induced damage and spall in selected metals using proton radiography [C] // Furnish M D, Gupta Y M, Forbes J W. Shock Compression of Condensed Matter-2003. New York: AIP, 2004: 477-480.

[12] Zeller M B, Buttler W T. Exploring richtmyer-meshkov instability phenomena and ejecta cloud physics [J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(11): 114102.

[13] Holtkamp D B, Clark D A, Crain M D, et al. Development of a Non-radiographic Spall and Damage diagnostic [C]// Furnish M D, Gupta Y M, Forbes J W. Shock Compression of Condensed Matter-2003. New York: AIP, 2004: 473-476.

[14] Ye Y, Wang W, Li Z Y. High-speed photography and pulsed in-line holography diagnostics of microjet [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(6) 471-475. (in Chinese)
叶 雁, 汪 伟, 李作友. 用高速摄影和脉冲同轴全息照相联合诊断微射流 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 471-475.

[15] Ma Y, Wang X S, Li X Z. Study of the uncertainty of the ejected mass measured by Asay foil method [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(2) 207-210. (in Chinese)
马 云, 汪小松, 李欣竹. ASAY 膜法测量微物质喷射总质量不确定度的初步实验研究. 高压物理学报, 2006, 20(2): 207-210.

[16] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [Z]. Berkeley, CA: University of California Press, 1980.

Asay-F-Window Applied to Diagnostic of Micro-Spall Phenomena

CHEN Yong-Tao, REN Guo-Wu, TANG Tie-Gang,
LI Qing-Zhong, WANG De-Tian, HU Hai-Bo

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621999, *China*)

Abstract: Quantitative data on micro-spall fragments production from metals melted on shock or release are sparse because of diagnostic limitations. In this study, a new diagnostic technology Asay-F-Window was designed, and the mass-velocity distribution of micro-spall fragments was presented. By comparing the measured results of Asay-F-Window with those of piezoelectric pins, the reliability of Asay-F-Window technique was evaluated.

Key words: Asay-F-Window; micro-jetting; micro-spall; melt