文章编号:1000-5773(2013)03-0398-05

脉冲X光照相在微物质喷射诊断中的应用*

叶　雁,李　军,朱鹏飞,钱伟新,刘振清,王　晓,
李欣竹,李作友,李泽仁,钟　杰

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳　621900)

摘要:脉冲X光照相是诊断强冲击载荷下金属材料微物质喷射的重要方法,金属材料的表面结构对微物质喷射的影响一直是数值模拟和实验研究主要方向。为此组建了由商用脉冲X光机、X光照相接收系统和时序控制同步系统组成的测试系统,研究了真空条件下和0.1 MPa下锡样品表面不同刻槽深度对微物质喷射量的影响。动态实验结果表明,真空条件下锡样品刻槽类微物质喷射具有前端密度小、后端密度大的特点,微物质喷射量和区域宽度随刻槽深度的增加而增加,而在0.1 MPa下微物质喷射出现前端慢化和喷射区域明显变狭窄的物理图像。

关键词:微射流;微物质喷射;脉冲X光照相;沟槽结构

中图分类号:TB877.1;O384　　**文献标识码**:A

1　引　言

强冲击载荷下金属材料的微物质喷射机理非常复杂,一直受到冲击加载下材料特性研究者的广泛关注。由于其复杂性导致研究难度偏大,通常采用理论和实验相结合的方式进行研究。理论上,常以微射流[1]进行建模分析,并利用不同的加载方式和表面结构特征[2-4]进行实验验证。常用的实验诊断方法有照相类测试技术,如脉冲同轴全息[5-6]、高速摄影[7]和脉冲X光照相[3-4,8],该类测试方法以其直观和获得信息量大一直是研究金属材料微物质微喷射的重要诊断方法,还有以Asay膜和石英计[8]为代表的探针类测试技术。

由于脉冲X光照相是以X光穿透性能对可见光照相类技术(即同轴全息和高速摄影)不能穿透的区域进行诊断,并且利用图像灰度所表征的穿透厚度使其能对微物质喷射的密度分布进行诊断,所以脉冲X光照相常与可见光照相类技术联合诊断微物质喷射,并与探针类测试技术相互比对数据,而被广泛应用[3-4,8]。

为了研究不同表面构型对微喷的影响,本工作利用商用脉冲X光机、X光照相接收系统和时序控制同步系统组成的测试系统,采用冲击加载对表面不同刻槽的锡样品在真空条件下和0.1 MPa下的微喷现象进行了实验研究。动态实验结果表明,真空条件下锡样品刻槽类微物质喷射具有前端密度小、后端密度大的特点,微物质喷射量和区域宽度随刻槽深度的增加而增加,并且在0.1 MPa下微物质喷射出现前端慢化和喷射区域明显变狭窄的物理图像。研究结果对脉冲X光照相应用于金属材料的微物质喷射研究提供相关物理图像参考,并对测试系统优化提供依据。

2　测试系统和实验装置

脉冲X光照相诊断微物质喷射测试系统和实验装置如图1所示,由传爆药柱接触爆轰驱动加载金

* **收稿日期**:2011-08-12;**修回日期**:2012-02-15

基金项目:国家空间碎片专题研究基金(KJSP09203)

作者简介:叶　雁(1978—),女,硕士,副研究员,主要从事全息照相、X光成像研究. E-mail:shelly_yezi@sina.com

属锡样品,将该强冲击载荷下微物质喷射产生装置放置于可抽真空的小型安全爆炸容器内;采用 3 mm 厚度的铝板作为防护窗口;测试系统由脉冲 X 光机、X 光 CCD 照相接收系统和数据采集系统组成;利用时序控制系统对测试系统和爆轰加载起爆台[9]进行同步控制,以期获得所需时刻的物理图像。

飞片样品材料为锡,加载区域厚度为 2 mm,样品表面先进行普通车削加工,其粗糙度 R_a 为 1.6,再将样品一半沿直径进行规则铣削加工,获得不同槽深和宽度的表面结构,飞片样品表面放大图如图 2 所示。由于进行了车削和铣削加工,样品表面存在机械加工细微损伤并有微小碎屑,所以通过超声波清洗处理飞片,以获得清洁表面。

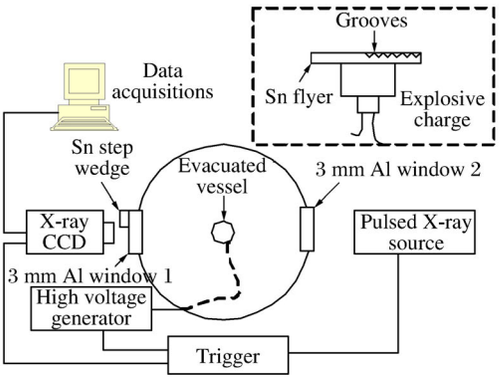


图 1　脉冲 X 光诊断微物质喷射实验布局图

Fig. 1　Schematic of the experimental setup for pulsed X-ray radiography

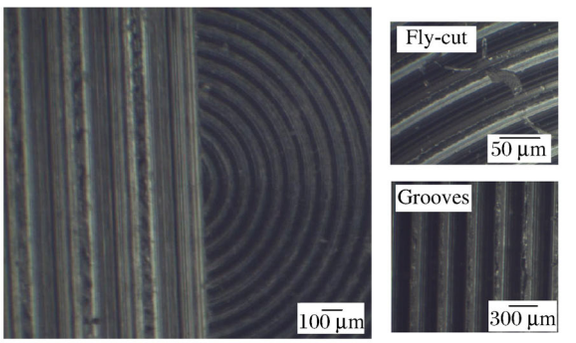


图 2　锡样品表面结构放大图

Fig. 2　Optical micrograms of the Sn target

由于脉冲 X 光光源输出的 X 光具有一定能谱范围,使成像过程的理论计算成为一个很复杂的问题。通常采用“等效单能”模型简化理论计算过程。X 光通过物质时符合指数衰减规律,不考虑散射形成的照射量,那么到达 CCD 光敏面的 X 光照射量 R 可以用 (1)式表示

$$R = R_0 \exp(-\mu_{eq}\rho d) \tag{1}$$

式中:R 为到达探测器上的 X 光照射量,R_0 为穿透样品前的 X 光照射量,μ_{eq} 为光路中材料的等效质量吸收系数,ρ 为样品物质的密度,d 为穿透样品的厚度。

在等效单能条件和未饱和响应条件下,X 光 CCD 照相接收系统可视为线性响应系统[10-11],不考虑转换屏散射和环境散射噪声,并且 CCD 的暗电流及其它读出噪声在温度一定的情况下本底灰度可视为常数 G_0,那么灰度 G 和到达 CCD 光敏面的 X 光照射量 R 之间存在如下关系

$$G = G_0 + KR \tag{2}$$

式中:R 为到达探测器上的 X 光照射量,G_0 为本底灰度常数,K 为 X 光 CCD 照相接收系统综合耦合系数。可见,通过(1)式和(2)式可以建立图像灰度与穿透样品厚度之间的简化关系,进一步采用对比台阶[12]的方法,可以处理出对应的面密度。

3　实验结果

在小型安全爆炸容器内进行抽真空,真空条件 40～25 Pa,通过爆轰加载获得锡样品相同刻槽宽度不同刻槽深度的微物质喷射 X 光图像,如图 3、图 4 和图 5 所示。锡样品的刻槽宽度为 0.3 mm,刻槽深度分别为 0.3、0.2、0.1 mm,对比锡台阶的厚度范围为 0.065～1.200 mm,照相时刻为冲击波达到自由面后 7 μs。

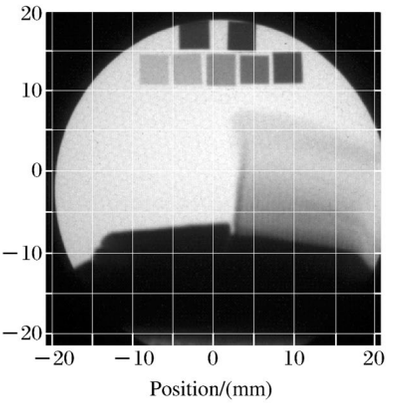


图 3 真空条件下锡样品表面刻槽深度 0.3 mm 的动态 X 光图像

Fig. 3 The X-ray image of ejecta from the Sn target with 0.3 mm depth of grooves in vacuum

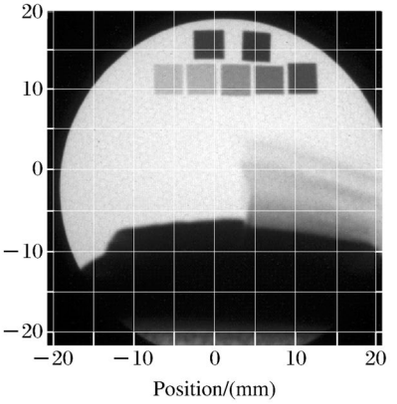


图 4 真空条件下锡样品表面刻槽深度 0.2 mm 的动态 X 光图像

Fig. 4 The X-ray image of ejecta from the Sn target with 0.2 mm depth of grooves in vacuum

为了对比真空和 0.1 MPa 下刻槽微喷的实验图像，小型安全爆炸容器内未抽真空，采用同样的实验装置，通过爆轰加载获得刻槽宽度为 0.3 mm、刻槽深度为 0.2 mm 的锡样品在冲击波到达自由面后 7 μs 的微物质喷射 X 光图像，如图 6 所示。

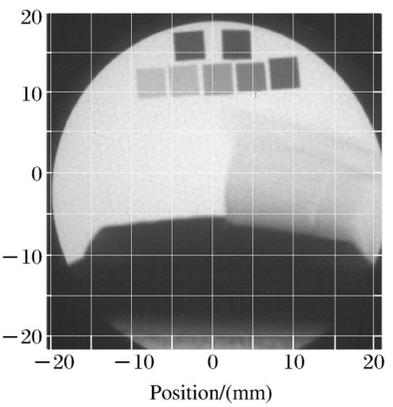


图 5 真空条件下锡样品表面刻槽深度 0.1 mm 的动态 X 光图像

Fig. 5 The X-ray image of ejecta from the Sn target with 0.1 mm depth of grooves in vacuum

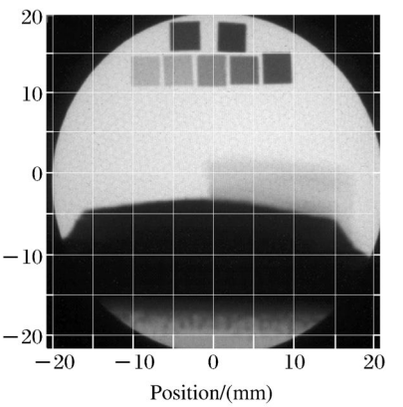


图 6 0.1 MPa 下锡样品表面刻槽深度 0.2 mm 的动态 X 光图像

Fig. 6 The X-ray image of ejecta from the Sn target with 0.1 mm depth of grooves at 0.1 MPa

4 分析和讨论

从图 3、图 4 和图 5 可以直观分析出真空条件下喷射的特点：第一，刻槽表面喷射远高于普通机械加工表面喷射，由于采用的加载装置[9]产生的爆轰波近似球面波，所以喷射前端形貌为中心高边缘低；第二，刻槽表面的喷射图像具有前端密度小、后端密度大的特点，前端存在速度快、面密度小的一层微喷物，其面密度接近系统分辨下限[11]，紧贴样品表面存在速度较慢但快于样品基底速度、面密度较大的一层微喷物；第三，对喷射区域进行分段增强图像处理，结果如图 7 所示，可见随着刻槽深度的变化，喷射区域的宽度发生明显变化，特别是增强图像上呈绿色的区域，即对应的 1.24～2.20 kg/m^2 面密度范围，区域宽度随刻槽深度的增加而增加。

采用对比台阶法[12]处理图 3、图 4 和图 5 中距离样品中心附近的纵向喷射，获得的对应面密度分布曲线如图 8 所示，相同面密度区域位置存在较明显差异。

在 0.1 MPa 下，刻槽表面的喷射如图 6 所示，喷射前端形成了较平的分布，分析原因是 0.1 MPa 的

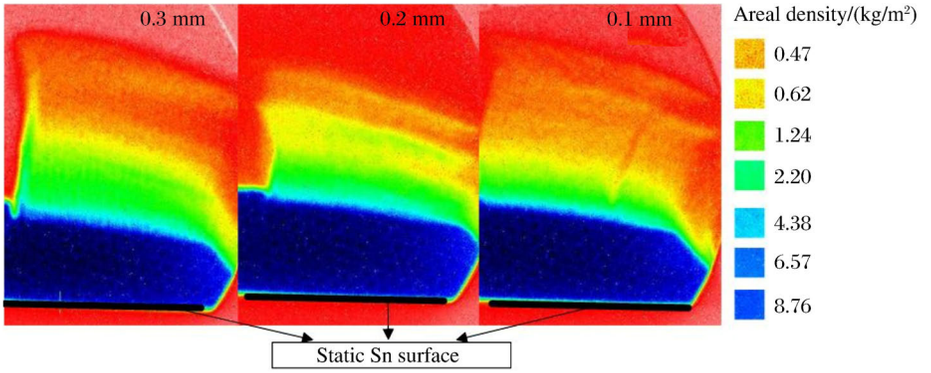


图 7　真空条件下不同刻槽深度锡样品表面喷射局部增强图

Fig. 7　The X-ray enhanced image of ejecta from the Sn target with different depths of grooves in vacuum

空气对样品中心冲击波先达到之处的喷射减速导致,由于图 6 与图 4 的的锡样品表面刻槽条件相同,具有可比性,图像局部增强图及面密度分布图如图 9所示。

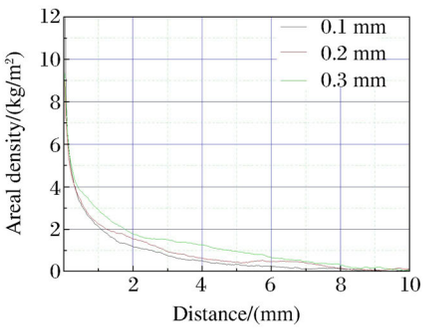


图 8　真空条件下不同刻槽深度锡样品喷射面密度曲线

Fig. 8　The areal density curve of ejecta from the Sn target with different depths of grooves in vacuum

首先,从以上研究结果和分析可以看出,真空条件下表面刻槽喷射形成了一定空间和密度分布的喷射区,组建的脉冲 X 光照相测试系统可清晰记录其图像,面密度分辨从数十毫克每平方厘米到数百毫克每平方厘米;0.1 MPa 下表面刻槽喷射减速,前端形貌发生变化并且喷射区域明显变狭窄。其次,对于未刻槽表面的微物质喷射,在实验研究设置的时刻用脉冲 X 光照相测试喷射现象不明显,分析其原因:一是未刻槽表面的微物质喷射稀少,未形成测试系统分辨下限的面密度,导致无法分辨;二是脉冲 X 光机焦斑较大造成边缘模糊,并且由于散射的影响对较小区域成像形成模糊,从而无法分辨。最后,实验加载冲击波是非平面的,导致反演密度存在难度。

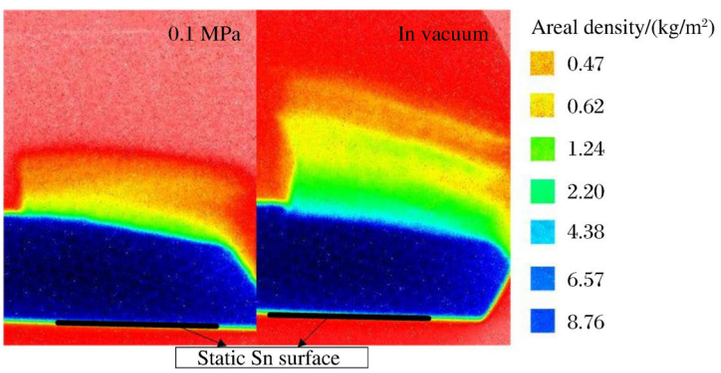


图 9　真空条件下和 0.1 MPa 下锡样品表面喷射局部增强图

Fig. 9　The X-ray enhanced image of ejecta from the Sn target in vacuum and at 0.1 MPa

5　结 束 语

实验研究结果和分析表明,脉冲 X 光照相应用于金属材料的微物质喷射研究须合理设计物理装置,并优化光源系统和照相接收系统,如光源的光子能量、焦斑尺寸和测试系统的面密度分辨能力等,还须加强数据可视化和反演处理能力。

References:

[1] Wang P, Qin C S, Zhang S D, et al. Simulated microjet from free surface of aluminum using smoothed particle hydrodynamics [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(2): 149-156. (in Chinese)
王 裴, 秦承森, 张树道, 等. SPH 方法对金属表面微射流的数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(2): 149-156.

[2] Sorenson D S, Minich R W, RomeroJ L, et al. Ejecta particle size distribution for shock loaded Sn and Al metals [J]. J Appl Phys, 2002, 92(10): 5830-5836.

[3] Zellner 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.

[4] Zellner 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.

[5] Mcmillan C, Whispky R. Holographic measurement of ejecta from shocked metal surface [J]. SPIE High Speed Photography and Photonics, 1988, 1032: 553-557.

[6] Ye Y, Zheng X X, Li Z Y, et al. Microjet measurement using the pulsed in-line holography [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 18(2): 159-162. (in Chinese)
叶 雁, 郑贤旭, 李作友, 等. 用脉冲激光同轴全息技术测量微射流 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 18(2): 159-162.

[7] Wang W, Li Z Y, Li X Z, et al. Study on microjet on ultra-high speed shadow photography [J]. J Appl Optics, 2008, 29(4): 526-529. (in Chinese)
汪 伟, 李作友, 李欣竹, 等. 用超高速阴影摄影技术研究微喷射现象 [J]. 应用光学, 2008, 29(4): 526-529.

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

[9] Zheng X X, Liu Z Q, Wang R B, et al. Measurement of shock wavefront produced by ejecta loading drive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(2): 187-192. (in Chinese)
郑贤旭, 刘振清, 王荣波, 等. 微喷加载装置中爆轰波阵面的测量 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(2): 187-192.

[10] Jiang X G, Wang W, Wang W L. Conversion efficiency of the CsI: Tl crystal excitated by X-ray [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(2): 203-205. (in Chinese)
江孝国, 王 伟, 王婉丽. X 光作用下 CsI: Tl 晶体的转换效率研究 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(2): 203-205.

[11] Ye Y, Qi S X, Li Z R, et al. Areal density resolution capability in hard X-ray digital image system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(10): 1467-1470. (in Chinese)
叶 雁, 祁双喜, 李泽仁, 等. 硬 X 光光电成像系统面密度分辨能力研究 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1467-1470.

[12] Mizusako F, Ogasawara K, Kondo K, et al. Flash X-ray radiography using imaging plates for the observation of hypervelocity objects [J]. Rev Sci Instrum, 2005, 76(2): 025102.

[13] Elias P, Chaperon P, Mondot M. Experimental study of the slowing down of shock-induced matter ejection into argon gas [C]//Schmidt S C, Johnson J N, Davison L W. Shock Compression of Condensed Matter-1989. Amsterdam: North-Holland, 1990.

Flash X-Ray Radiography for Diagnosing the Ejecta from Shocked Metal Surface

YE Yan, LI Jun, ZHU Peng-Fei, QIAN Wei-Xin, LIU Zhen-Qing, WANG Xiao, LI Xin-Zhu, LI Zuo-You, LI Ze-Ren, ZHONG Jie

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The flash X-ray radiography is an important diagnostic tool for the ejecta from shocked metal surface. The influence of metal surface characteristics on the ejecta is a main aspect of numerical simulations and experiments on ejecta phenomena from shocked metal surface. A commercial flash X-ray tube, a X-ray camera and high accuracy synchronization timing system were used to establish a system of ejecta diagnosis. The radiographs of ejecta from the tin targets with different depths of grooves were captured and analyzed. The experimental results showed that (1) the mass ejection of tin targets with grooves presented the quasi-multilayer in vacuum; (2) the zone width and ejecta mass increased with the depth of target grooves in vacuum; (3) the region width and ejecta mass decreased as in gas pressure of 0.1 MPa.

Key words: microjet; ejecta; flash X-ray radiography; grooves characteristics