

文章编号 1004-924X(2017)增-0007-05

激光加载下材料微层裂破碎过程的超高速摄影

赵新才, 李英华, 冉茂杰, 李 剑, 刘宁文*, 张 林, 叶 雁, 彭其先
(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:材料在强冲击波加载下发生的微层裂破碎是冲击波物理研究的一个热点问题,在国防领域有着重要的应用。本文以高纯铝、高纯锡以及含氦泡铝等材料为研究对象,采用超高速光电分幅相机搭建了实验平台,建立了精密诊断实验技术,针对高能激光加载下材料的微层裂破碎过程进行了研究,获得了 $10^7 \sim 10^8/s$ 超高应变率下材料的破碎过程的实验图像,并对实验现象进行了分析讨论。实验表明,本文开发的测量技术可应用于材料的破碎特性研究,为进一步开展材料微层裂破碎规律研究提供了有效实验数据。

关键词:光电成像;高速摄影;微裂层;动态破碎;破碎过程

中图分类号:O381;TN29 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0007

Analyzing microfiltration process of material under laser loading by ultrahigh-speed framing photography

ZHAO Xin-cai, LI Ying-hua, RAN Mao-jie, LI Jian, LIU Ning-wen*,
ZHANG Lin, YE Yan, PENG Qi-xian

(*Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

* *Corresponding author, E-mail: liuningwen@163.com*

Abstract: As a research focus, the micro-capsule fracture of the material under strong shock wave loading plays an important role in the field of defense. Herein, selecting high purity aluminum, high purity tin and helium bubble aluminum as the research object, an experimental platform was built by using self developed ultra high-speed photoelectric framing camera and a sophisticated diagnostic test technique of high speed photograph was established. The micro-filtration process of the material under high energy laser loading was studied, and a clear image of the broken process in $10^7 \sim 10^8/s$ was captured for analyzing the experimental phenomena. The results show that the measurement technique established in this paper can be employed to study crushing characteristics of the material, which provides effective experimental data for the further study of micro fracture of the material.

Key words: photoelectronic imaging; high speed photography; microfiltration; dynamic fragmentation; microfiltration process

收稿日期:2017-05-09;修订日期:2017-06-12.

基金项目:中国工程物理研究院发展基金资助项目(No. 2014B0401080)

1 引言

在强冲击波加载下,材料会发生一种极端的破坏现象。此时材料在冲击压缩过程中经历冲击相变,出现部分甚至完全熔化,致使材料几乎丧失了抗拉强度,当冲击波在材料的自由面反射时,反射稀疏波与追赶稀疏波相互作用,导致材料连续破碎为大量细小的液滴,以云雾状形态向外高速喷射出去,这就是“微层裂”^[1-3]。材料微层裂过程完成的时间一般在亚纳秒至微秒尺度,属于极端高温高压和超快响应问题,在航空航天以及其它国防领域有着重要应用。微层裂破碎具有超高的拉伸应变率,破碎产生的粒子极其细微,尺寸分布在几微米到几十微米的范围。破碎产物形貌、演化过程、破碎粒子尺寸、数目等数据,对材料微层裂破坏特性研究具有重要意义,但目前相关数据特别是高质量数据的研究报道非常少见^[4-7]。

本文选取高纯铝、高纯锡、氦泡铝等作为研究对象材料,采用自研的超高速光电分幅相机搭建精密实验诊断平台,针对高能激光加载下材料的微层裂破碎过程进行了研究,并对实验现象进行了分析讨论。

2 超高速光电分幅相机

超高速光电分幅相机为中国工程物理研究院流体物理研究所自主研制的超高速摄影设备。在该相机的研制中,我们解决了大角度宽光谱分光均匀性及复杂的光瞳匹配问题,避免了棱锥型光电分幅相机由于分光孔径的不一致造成在准直光路中对视场分割带来的技术限制,研制了国内首台 8 幅纹影超高速光电分幅相机;并且还提出了采用超短激光脉冲光纤传输延时实现像增强器门宽高精度直接测量的方法,建立了确定门控型像增强器曝光时间的测量系统,实现了 ns 级曝光时间的绝对测量,与快高压脉冲半高宽表征(目前国外的系统均采用此方法)的传统方法相比,曝光时间的测量精度得到了大幅提升,达到亚纳秒。

该相机具有摄影频率高且可调、动态范围大和弱光探测能力强等优点,在爆轰波与冲击波物理、等离子体物理、加速器物理、惯性约束聚变(ICF)、高温等离子体和真空放电、激光与物质相互作用、高电压等研究领域已有相关应用^[8-9]。相机是由物镜、分光系统、门控型微通道板像增强器、耦合器、CCD 相机、工控机、同步控制单元、快脉冲电源、光纤收发器等组成,其工作原理如图 1 所示。拍摄目标通过物镜、分光系统成像在门控型

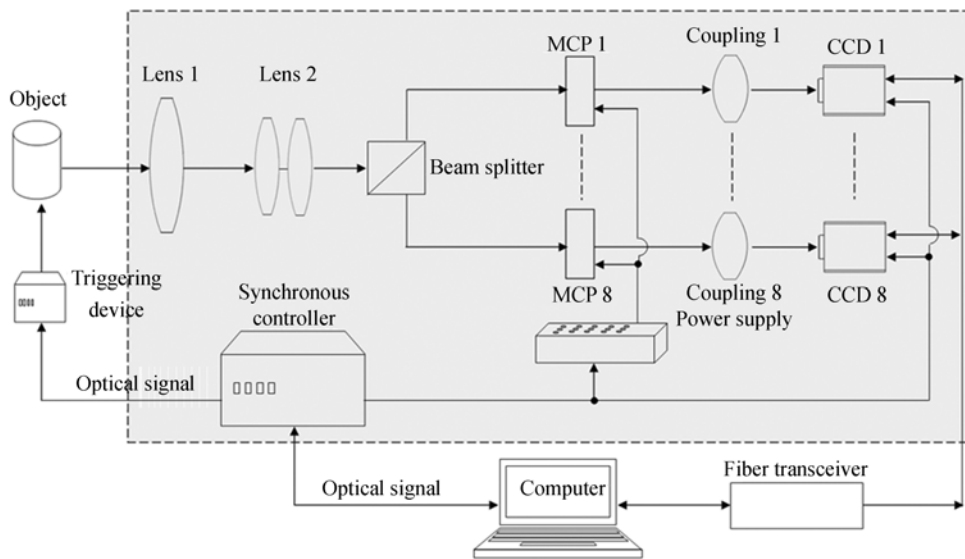


图 1 超高速光电分幅相机原理图

Fig. 1 Schematic diagram of high speed frame camera

微通道板上的阴极面,目标像经像增强器放大耦合到 CCD 芯片上,CCD 相机输出图像通过光纤传输在计算机上显示并进行图像处理。拍摄频率和单幅曝光时间由精确同步控制和 MCP 专用脉冲电源所设定。超高速光电分幅相机的主要指标如下:

- (1)光谱响应为 380~850 nm;
- (2)画幅数为 8 幅;
- (3)最高摄影频率为 2×10^8 幅/s;
- (4)记录总长度 10 ms,幅间隔 1 ns~1 ms 分档可调;
- (5)输出图像画面像素为 1 360 pixel \times 1 024 pixel;
- (6)空间分辨率 ≥ 38 lp/mm。

3 实验设计及布局

材料微层裂破碎过程超高速分幅摄影布局如图 2 所示。实验在神光(SG) II 装置上进行,SG II 中的第 9 路激光经三倍频和束匀滑后对物理靶目标进行烧蚀加载,物理靶破碎的产物由另一自

由面向外喷射,喷射方向与靶平面垂直。诊断技术包括全息测量和超高速光电分幅摄影,全息测量完成材料超高应变拉伸破碎粒子的尺度测量,超高速光电分幅摄影对物理靶微层裂产物的运动过程进行照相,实现对微层裂产物的形貌演化。估算喷射物前端的平均速度是本文主要的研究目标。由于目标有较强的自发光,实验中在光路中加装了窄带滤光片以滤除强自发光,照明光源采用连续 532 nm 激光照明,最终图像由 CCD 接收,传输至工控机终端。实验拍摄视场直径为 30 mm,相机曝光时间选择为 20 ns,幅间距根据物理靶材料不同单独设置,每发实验可获得 8 幅图像,实验时靶室真空度保持在 10^{-3} Pa。靶室中照明窗口和图像接收窗口采用 K9 光学玻璃窗口,并镀增透膜,以消除反射光对观测的影响。

实验采用的物理靶为高纯锡箔、高纯铝箔和氦泡铝,第 9 路加载激光脉宽约为 3 ns,靶面烧蚀焦斑约为 $2 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 。SG II 第 9 路激光到达铝靶后,冲击波传播几十纳秒出物理靶自由面,样品熔化破碎,高速摄影系统启动,拍摄多幅破碎产物的喷射形貌图像。

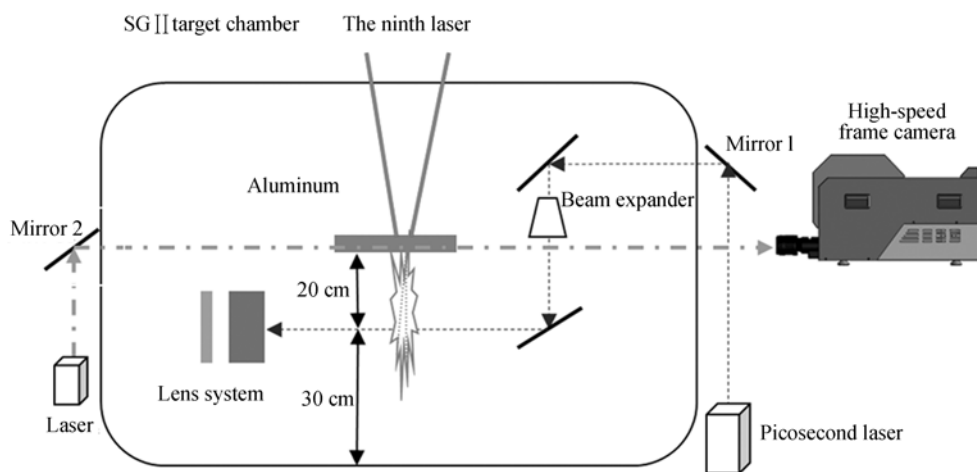


图 2 超高速摄影装置布局图

Fig. 2 Layout of ultra high-speed photography equipment

4 实验结果及分析

超高速光电分幅相机拍摄的激光加载下高纯铝箔破碎过程的实验图像如图 3 所示。铝靶厚度为 $258 \mu\text{m}$,第 9 路激光从上面加载,实际能量为

255.8 J,破碎产物自上向下喷射,每幅图像的曝光时间为 20 ns,以九路到靶心(即目标动作)前 100 ns 拍摄第一幅图像,画幅时间间隔为 800 ns。从图 3 可以看出,第二幅图像开始出现破碎产物的喷射,随着时间推移,喷射物运动距离越来越远,能够拍摄到清晰的喷射产物运动过程。图 3

中,标定杆为其它测试手段的标定靶杆,由于是透射式阴影照相,在前四幅图像中标定杆对喷射物前端的产物有一定影响。经估算产物前端粒子的平均速度约为 2.69 km/s,这是一个非常重要的参数。根据冲击波关系式可以计算出冲击波出靶自由面时的压力,然后按照靶材料的冲击熔化压力和卸载熔化压力范围,就可以判断出靶材料破碎前的状态。

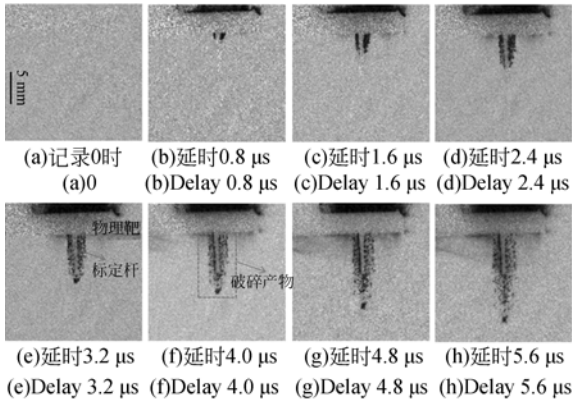


图 3 铝靶破碎产物喷射图像

Fig. 3 Images of broken product jetting of Al target

图 4 为超高速光电分幅相机拍摄的激光加载下氦泡铝箔破碎过程的实验图像。此发实验为上一发实验的对比实验,超高速光电分幅相机的设置与上发实验完全一致,铝靶厚度为 259 μm ,第 9 路激光的实际能量为 290.1 J。从图 4 可以看到,第 5 幅开始,除了破碎喷射产物,前端还观测到微喷产物,二者之间边界十分清晰,经估算产物前端粒子的平均速度约为 3.07 km/s,微喷产物

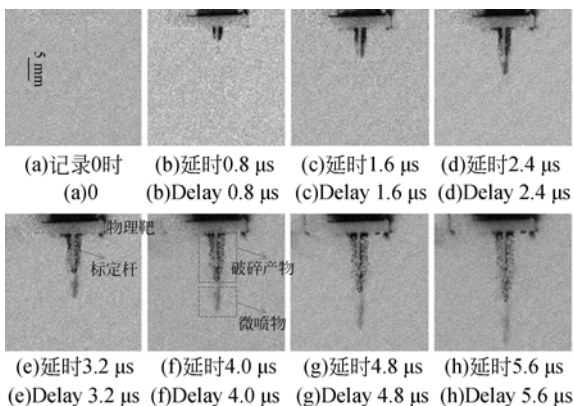


图 4 氦泡铝靶破碎产物喷射图像

Fig. 4 Images of broken product jetting of Helium bubble aluminum

前端的平均速度约为 4.70 km/s。整体来看,两次实验中产物的运动规律基本一致,靶材料为氦泡铝时,观测到微喷产物。

图 5 为超高速光电分幅相机拍摄的激光加载下高纯锡箔破碎过程的实验图像,光电相机的曝光时间为 20 ns,画幅间隔为 600 ns,锡靶厚度为 271 μm ,第 9 路激光的实际能量为 1 207 J。可以看到,喷射物整体类似于子弹弹头形状,随着喷射距离的增加,头部高速粒子与后部慢速粒子的距离逐渐拉大,同时在侧向稀疏作用的影响下,喷射物头部逐渐尖细,弹体也逐渐加宽。经估算产物前端粒子的平均速度约为 4.33 km/s。

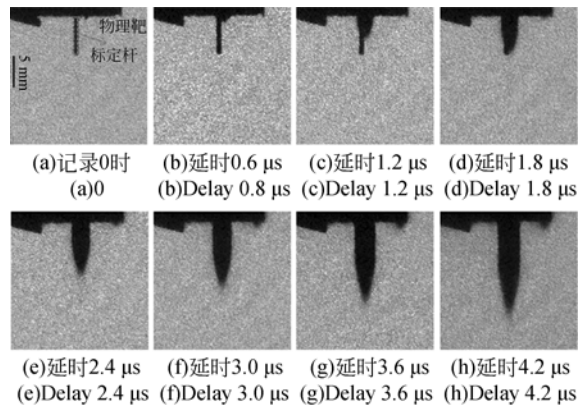


图 5 锡靶破碎产物喷射图像

Fig. 5 Images of broken product jetting of tin target

对比拍摄的 3 种不同材料的微层裂破碎过程的图像,可以看出,高纯铝和氦泡铝的喷射产物比较接近,但氦泡铝有微喷物产生,高纯锡的喷射产物颗粒相对细腻,喷射物前端的粒子速度也比高纯铝的速度低。实验中,激光散斑等原因导致拍摄的图像背景出现很多干涉环,这是目前采用激光照明中困扰同行的一个难题,严重影响对物理信息的判读,这里采用独特的微透镜阵列以及光纤匀化等综合技术措施,对照明激光进行光束匀化处理,并对图像进行了高斯滤波、降噪等精细处理,最终获得的图像背景干净,物理界面清晰,真正解决了激光散斑的问题,这也为后续激光照明技术研究提供了借鉴。

5 结 论

本文选取高纯铝、高纯锡以及氦泡铝等材料,在超高应变率拉伸破碎条件下,采用超高速光电

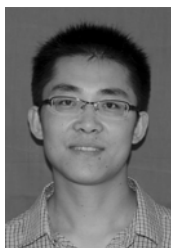
分幅摄影技术,结合自研设备超高速光电分幅相机,成功开展了激光加载下材料的熔化破碎照相实验,获取了破碎过程的清晰实验图像,并根据每幅图像中喷射物前端粒子的运动距离和图像画幅间隔,精确计算出了喷射物前端的平均速度。实

验结果表明,本文建立的测量技术可应用于超高应变率下材料的破碎特性研究,结合 X 光照相、全息在位测量以及激光干涉测速等多种测量手段,为进一步研究材料微层裂破碎规律提供了有效的实验数据。

参考文献:

- [1] ANDRIOT P, CHAPRON P, LAMBERT V, *et al.*. Influence of melting on shocked free surface behavior using Doppler laser interferometry and X ray densitometry[C]. *Shock Waves in Condensed Matter*, 1983;227-230.
- [2] 唐修检,刘谦,田欣利,等.切向载荷作用下氮化硅陶瓷崩碎损伤规律与机理[J].*光学精密工程*, 2015,23(7):2023-2030.
- TANG X J, LIU Q, TIAN X L. Regulation and mechanism of edge chipping for Si_3N_4 ceramics worked by sliding loads[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(7):2023-2030. (in Chinese)
- [3] 张林,李英华,程晋明.激光驱动 X 光背光照相技术在金属靶微层裂研究中的应用探索[J].*强激光与粒子束*, 2016,28(4):041003
- ZHANG L, LI Y H, CHENG J M. Exploration of laser-driven X-ray backlighting applied in research of micro-spalls of metal target[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016,28(4):041003. (in Chinese)
- [4] 李英华,张林,赵宇.超高应变率拉伸破碎铝的粒子尺寸测量[J].*强激光与粒子束*, 2016,28(8):122-125.
- LI Y H, ZHANG L, ZHAO Y. Measurement of the particle size from dynamic fragmentation of aluminum at higher strain rate[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016,28(8):122-125. (in Chinese)
- [5] 陈永涛,胡海波,汤铁钢.强冲击加载下铅样品表面微层裂现象诊断[J].*中国科学*, 2012(10):1076-1085.
- CHEN Y T, HU H B, TANG T G. Diagnosis of surface microfiltration of lead sample under strong shock loading[J]. *Science China Press*, 2012(10):1076-1085. (in Chinese)
- [6] 辛建婷,谷渝秋,李平.强激光加载下金属材料微喷回收诊断[J].*物理学报*, 2012,61(23):236201.
- XIN J T, GU Y Q, LI P. Study on metal ejection under laser shock loading[J]. *Acta Physics Sinica*, 2012,61(23):236201. (in Chinese)
- [7] 陈永涛,洪仁楷,陈浩玉.爆轰加载下金属材料的微层裂现象[J].*爆炸与冲击*, 2017,37(1):61-67.
- CHEN Y T, HONG R K, CHEN H Y. Micro-spalling of metal under explosive loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017,37(1):61-67. (in Chinese)
- [8] 刘宁文,李剑,赵新才.超高速光电分幅相机及应用[J].*高压物理学报*, 2016,30(1):37-41.
- LIU N W, LI J, ZHAO X C. Ultra high-speed photoelectric framing camera and its application[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016,30(1):37-41. (in Chinese)
- [9] 赵新才,李剑,肖正飞.爆轰加载下柱壳膨胀断裂的超高速光电摄影实验研究[J].*高压物理学报*, 2016,30(2):89-93.
- ZHAO X C, LI J, XIAO ZH F. Applied study of ultra high-speed photo-electric framing camera in experiments of detonation physics [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016,30(2):89-93. (in Chinese)

作者简介:



赵新才(1985—),男,甘肃张掖人,助理研究员,博士研究生,2011年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事瞬态光学测试方面的研究。E-mail: zxceric@163.com

通讯作者:



刘宁文(1967—),女,四川宜宾人,学士,研究员,1989年毕业于北京理工大学,主要从事高速摄影技术及应用方面的研究。E-mail: liuningwen@163.com