文章编号：1000-5773(2004)02-0188-05

微喷加载装置中爆轰波阵面的测量*

郑贤旭，刘振清，王荣波，李作友，叶 雁，钟 杰，李泽仁

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

摘要：根据金属材料微喷射激光全息诊断技术的要求，提出了一种测量微喷加载装置中爆轰波波前形状的实验方法，利用快响应光纤探针阵列来测量传爆药柱加载飞片的冲击波波前形状，并根据所得的实验数据用计算机模拟出爆轰波波前的形状，给出冲击波到达飞片上表面的时间分散性曲线。

关键词：高压物理；微喷射；波前测量；光纤探针；数值模拟

中图分类号：O521.3 **文献标识码**：A

1 引 言

金属材料在冲击压缩下，由于其表面结构缺陷等方面的原因，会有微粒子从表面喷射出来，这种微喷射现象对研究材料在高压加载下的流体动力学特性有重要的意义，目前学术界对微喷射现象形成的机理还没有一个公认的物理模型，因而通过实验来研究微喷射现象是一个重要的手段。激光全息技术是诊断材料微喷射现象的主要方法之一，利用激光全息照相技术能够获得材料微喷射粒子尺寸及空间分布，同时也能够给出一定的速度信息[1,2]，但是微喷射粒子的特征与实验中样品状态和加载状态有很大的关系，在选定同一加工标准的样品后，材料的加载状态就成为主要考虑的因素，加载状态主要包括加载压力和加载爆轰波的波前形状，由于微喷加载装置提供的不是理想的平面波，因此测量爆轰波波前的形状对分析微喷射粒子场的图像特征有很好的参考价值，同时对估算粒子的最高运动速度也提供了较准确的时间基点。本研究针对目前实验室所使用的加载装置中没有平面波透镜的特点，介绍一种在接触爆轰的情况下，用快响应光纤探针阵列测量加载爆轰波波面形状的方法，并对实验结果进行分析讨论。

2 测量原理

石英晶体在冲击压缩下会产生很高的冲击温度，同时产生光辐射[3]，快响应的光纤探针测量技术就是基于这一原理而发展起来的。将光纤端面进行抛光处理后压紧于待测飞片的上表面，当炸药产生的爆轰波传播到飞片上表面时，压缩光纤端面产生很高的冲击温度并有光辐射，将光纤中的高温石英假定为绝对黑体，则光纤探针的光信号的功率可由下式进行估算

$$I=\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} L^0(\lambda,T)\cdot\Delta\Omega\cdot S\mathrm{d}\lambda \tag{1}$$

式中：$L^0(\lambda,T)$为黑体光谱辐射亮度；(λ_0,λ_1)为光电倍增管的阴极响应波长范围；$\Delta\Omega$ 为光纤接收立体角；S 为光纤截面积。

由普朗克黑体辐射公式可知

$$L^0(\lambda,T)=\frac{c_1}{\pi}\lambda^{-5}\left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)-1\right]^{-1} \tag{2}$$

* **收稿日期**：2003-08-20；**修回日期**：2003-11-12

基金项目：中国工程物理研究院科学技术基金(20030434)

作者简介：郑贤旭(1977—)，男，硕士研究生.

式中:$c_1=2\pi hc^2$,$c_2=hc/k$,其中 c 为光速,h 为普朗克常数,k 为玻尔兹曼常数。

通过光纤的数值孔径估计光接收临界角,所用的光纤的数值孔径为 0.19,最大接收角为 0.19,则

$$\Delta\Omega=4\pi\sin^2(u/2)=0.113 \tag{3}$$

式中:u 为最大孔径角,单位是弧度。压力在 50 GPa 以上时,融凝石英的冲击雨贡纽压力与温度的关系[4]可由下式近似给出

$$T=-2\,000+97p-0.044p^2 \tag{4}$$

式中:T 的单位为 K,p 的单位为 GPa。光纤芯径为 60 μm,受光面积 $S=2.83\times10^{-9}$ m^2。光电倍增管的阴极响应波长范围为 0.38～0.85 μm。

将(2)式～(4)式及已知量代入(1)式得出光纤探针光信号功率随压力的变化关系。通过数值积分可得出该关系曲线,如图 1 所示。从图 1 的曲线来看,在低压部分曲线较平缓,所以即使飞片上表面的压力达不到 50 GPa 以上,光纤端面在压力下也有一定的光辐射功率,只要光电倍增管的灵敏度足够高,仍然能够通过光纤探针技术来测量爆轰波波面到达飞片上表面的时间分散性[5]。在微喷加载的实验装置中,用特屈儿传爆药柱采取接触爆轰的方式来加载锡飞片,传爆药柱的爆压约为 27 GPa,匹配到锡飞片中的压力在 39.1 GPa 左右[6],在这一压力状态下光纤探针能够正常工作。

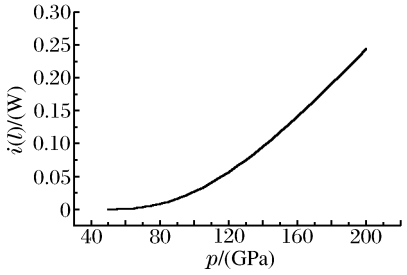


图 1　光纤探针光信号功率随压力的变化

Fig. 1　Calculated curve of optic power varied with shock pressure in quartz optic fiber

3　实验装置

在满足一定的压力状态时,金属材料表面一般都有微喷射现象产生,因此在实验中用如图 2 所示的加载装置来进行微喷实验。从加载装置的侧视图来看,传爆药柱(∅32 mm)上面有一层 3 mm 厚的聚乙烯,聚乙烯上面是锡飞片,在锡飞片的上表面安装光纤探针。如装置的俯视图所示,从飞片的中心开始,光纤探针沿锡飞片的半径相互间隔 5 mm 排列,因为传爆药柱的有效作用面积为直径 32 mm 的圆域,所以靠近飞片边缘的两根探针实际上是装在炸药的有效作用面积之外,图示的狭缝用来控制喷射粒子的空间密度。

从安装在装置正中心的光纤开始将探针依次编号为 1、2、3、4、5、6,光纤探针的光信号通过多路光电转换器转换为电信号用示波器检测,探针信号与示波器按如图 3 所示的方式连接。

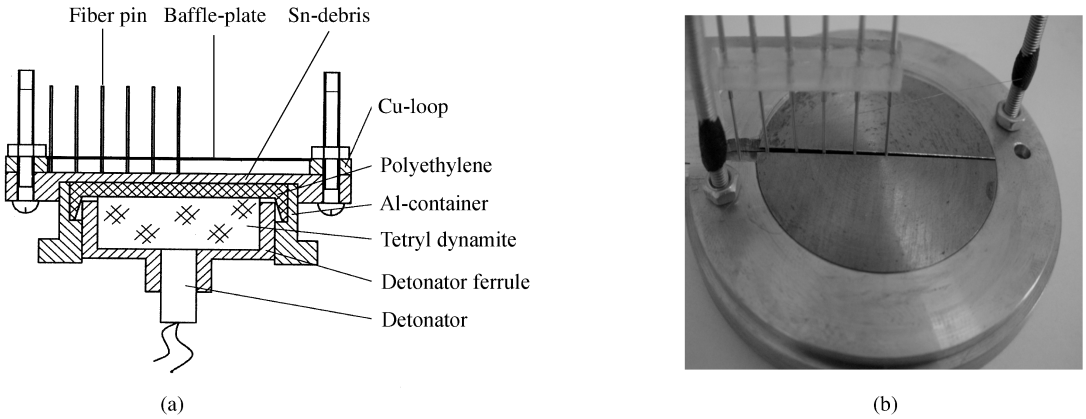


图 2　加载装置的侧视图(a)和俯视图(b)

Fig. 2　The side elevation (a) and planform (b) of the loading device

按图 3 所示的方式连接好测试系统后，用脉冲同步控制器 DG535 来控制爆轰装置起爆以及触发示波器，DG535 产生两路同步脉冲，其中一路用来起爆雷管，另一路作为示波器 1、示波器 2 的外触发信号，因此几乎是在雷管起爆的同一时刻，示波器 1、示波器 2 开始处于等待状态，当冲击波传播到飞片的上表面时，因为冲击波的波前不是理想的平面波，所以在飞片上不同的位置冲击波到达的时间不同，这种时间分散性可通过监测光纤探针的光信号来分析。

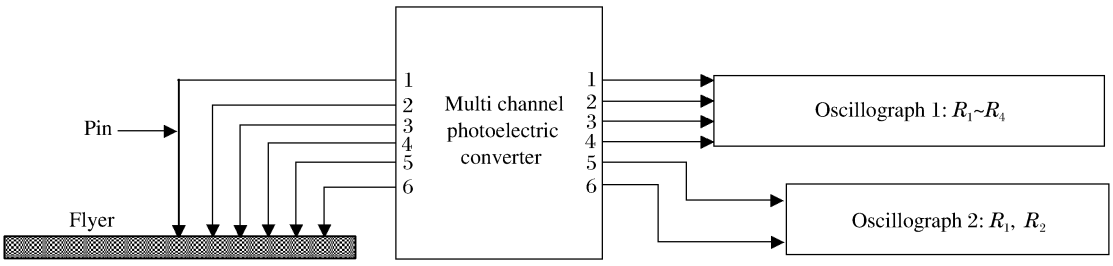


图 3 探针与示波器的连接示意图

Fig. 3 The sketch of fiber pin linking to oscillograph

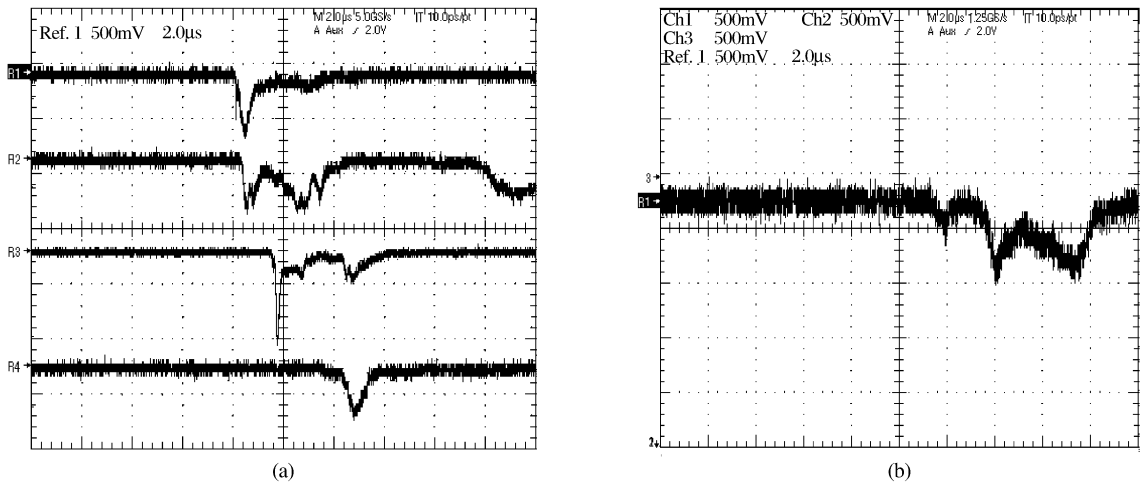
4 实验结果及分析

在实验中发现，当雷管被引爆后，装置中心对应处的冲击波最先到达，并且越远离装置的中心冲击波到达飞片上表面的时间越晚，实验中测到的光纤探针信号如图 4 所示，图 4(a)是示波器 1 检测到的信号，图 4(b)是示波器 2 检测到的信号。从示波器的波形来看，探针 5 对应的信号很弱，而探针 6 的信号幅度为零，这是由光纤探针的安装情况决定的，探针 5、探针 6 实际上是安装在传爆药柱的有效作用面积之外，由于探针 5 离传爆药柱的边缘较近，稀疏冲击波的作用使得光纤探针有微弱的信号，探针 6 则因为压力过小而完全没有信号。以示波器的触发时刻为起点，各光纤探针信号的起跳时刻如表 1 所示。

表 1 光纤探针信号的起跳时刻

Table 1 The rise time of signal arrived at fiber pin

Serial number of fiber pin	1	2	3	4	5
Signal rise time/(μs)	9.502	9.548	9.786	10.202	12.531



(a) (b)

图 4 示波器检测到的信号

Fig. 4 The signal captured by oscillograph

根据表 1 的数据,以飞片的中心为坐标原点,得到沿飞片径向不同坐标处冲击波达到飞片上表面的时间曲线如图 5(a)所示。

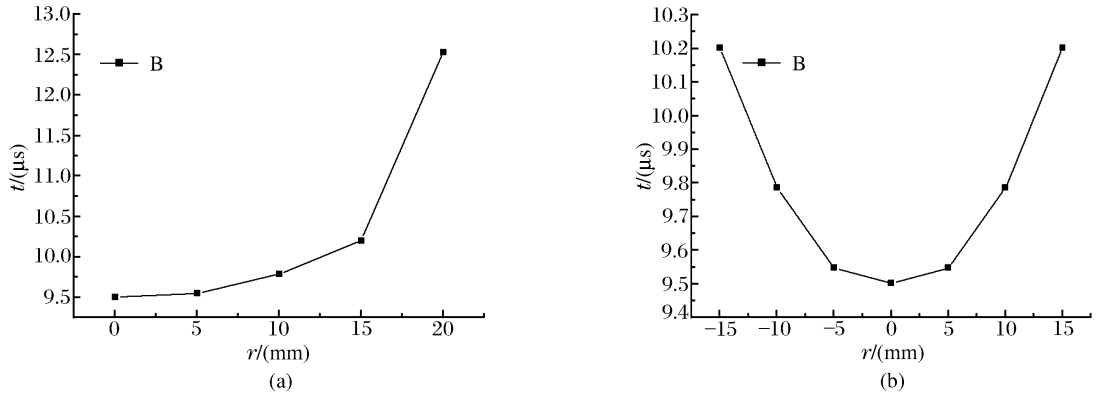


图 5　冲击波到达的时间曲线

Fig. 5　The arrival time of shock wavefront in different place of the debris

因为探针 5 的信号是由于稀疏波的作用而产生的,因此它并不能真实反映出加载冲击波的波面形状,去掉探针 5 的信号,同时考虑加载装置是对称的,以探针 1、探针 2、探针 3、探针 4 的信号为有效信号,作出冲击波到达飞片表面的时间曲线如图 5(b)所示。由于冲击波在飞片中的传播速度基本上是不变的,因此冲击波到达飞片上表面的时间曲线能够反映冲击波波前的相对空间位置,通过计算可知冲击波在锡飞片中的传播速度 $u=4.44$ km/s[6],以冲击波波前到达探针 1 处的时刻为观察点,将表 1 中各测试点信号起跳的时间差变为各点的相对位移,其数据如表 2 所示。

表 2　测试点波前的相对位移

Table 2　The relative displacement of each testing point

Serial number of fiber pin	1	2	3	4
Location of fiber pin/(mm)	0	5	10	15
Time difference Δt/(μs)	0	−0.046	−0.284	−0.700
Relative displacement/(mm)	0	−0.20	−1.26	−3.11

表 2 的数据说明,当装置正中心的冲击波到达飞片上表面时,其它地方的冲击波波前还在飞片中,因此根据表 2 的数据,考虑到装置的对称性,可以画出冲击波波前曲面的剖线,同时根据表 2 的数据可以用一个三阶多项式拟合出剖线所对应的曲线方程,设相对位移为 h,径向坐标为 r,则拟合的曲线方程为

$$h = 0.1181 + 0r - 0.01424r^2 \quad (5)$$

将实验曲线与拟合曲线画在同一坐标系中如图 6 所示。从图 6 可以看出,实验加载装置产生的爆轰波波面形状可近似用一个二次曲线来表示,此曲线说明,用此实验加载装置进行微喷实验时,飞片上表面的喷射粒子不是在同一时刻喷射出来的,这对分析粒子的速度分布有重要意义。

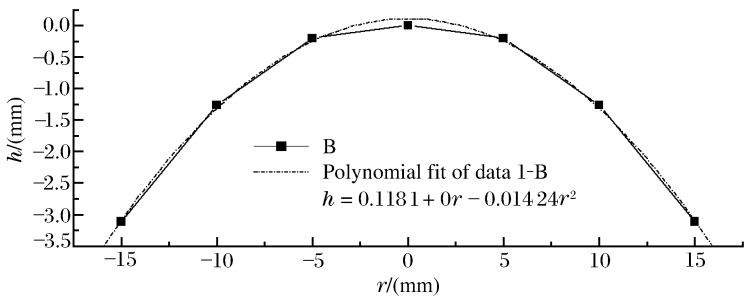


图 6　冲击波波面形状示意图

Fig. 6　The profile of the shock wavefront

5 结 论

实验结果表明:实验加载装置在起爆时近似于点起爆,因此产生的爆轰波近似于球面波,在这种情况下分析微喷射的全息再现图时,需要考虑飞片上不同点的起喷时刻是不同的,所以在分析粒子运动速度时需要选取不同的时间基点。此外,实验测得的加载爆轰波波前形状对解释微喷粒子的空间分布提供了重要依据。

References:

[1] Mcmillan C, Whipkey R. Holographic Measurement of Ejecta from Shocked Metal Surface [J]. SPIE High Speed Photography and Photonics, 1988, 1032: 553－557.

[2] Soyoung S C. Holographic Technique for Three-Dimensional Three-Component Particle Fields [J]. Optics Letters, 1994, 19(19): 1577－1579.

[3] Schmitt D R, Ahrens T J. Shock Temperatures in Silica Glass [J]. J Geophys Res, 1989, 94(85): 5851－5871.

[4] George M J, Menikoff R, Vesser L R. The Use of Optical Fibers for Shock Pressure and Timing Measurements at High Pressures [R]. Los Alamos National Laboratory Report, LA-11148-MS, 1988. 1－33.

[5] Wang R B, Wu T L. A Fast Rise-Time Fiber-Optical Pin for Shock Wave Measurement [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 375－379. (in Chinese)
王荣波,吴廷烈. 冲击作用下快响应光纤探针研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(4): 375－379.

[6] Dong H S, Zhou F F. High Explosive and the Relevant Properties [M]. Beijing: Science Press, 1989. 30－79. (in Chinese)
董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物性能 [M]. 北京:科学出版社, 1989. 30－79.

Measurement of Shock Wavefront Produced by Ejecta Loading Device

ZHENG Xian-Xu, LIU Zhen-Qing, WANG Rong-Bo,
LI Zuo-You, YE Yan, ZHONG Jie, LI Ze-Ren

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

Abstract: The shock wavefront produced by ejecta loading device was measured by fiber-pin, and the profile of shock wavefront was acquired by numerical simulation. According to the shape of shock wavefront, the eject time at different point of debris was calculated, and some distribution characteristics of particles ejected from debris surface can be explained by the results.

Key words: high pressure physics; ejecta; measurement of shock wavefront; fiber pin; numerical simulation

《高压物理学报》征订启事

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物,在国内外公开发行。《高压物理学报》力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果,读者对象为国内外科技工作者。《高压物理学报》刊载内容为动态及静态高压技术,人工合成新材料,高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究,动态及静态高压研究中的测试技术,高温高压下的相变,高温高压物态方程等。

自1987年创刊以来,《高压物理学报》取得了较大的成就。2001年,《高压物理学报》被科技部和国家新闻出版总署评为"中国期刊方阵"双效期刊。国际主要检索系统"EI Compendex"和"CA"一直收录《高压物理学报》文章。由北京高校图书馆期刊工作研究会和北京大学图书馆编著的《中文核心期刊要目总览》连续四版把《高压物理学报》列为物理学类核心期刊(北京大学出版社,1992年、1996年、2000年、2004年)。据中国科学引文数据库公布的"2000年影响因子最高的中国科技期刊300名排行榜"显示,《高压物理学报》影响因子为0.3627,全国排名第94名,列物理类期刊第3名。

《高压物理学报》为季刊,国际16开本(A4),每年3、6、9、12月5日出版。国内读者可直接在当地邮局订阅,邮发代号:62－132;或随时向编辑部订阅。

地　　址:四川省绵阳市919信箱110分箱《高压物理学报》编辑部,邮政编码:621900

电子邮件:gaoya@caep.ac.cn; gywl@chinajournal.net.cn (征订、投稿、咨询)

电　　话:(0816)2490042;传真:(0816)2282695

邮发代号:62－132;价格:10元/本, 40元/年。

《高压物理学报》编辑部