DOI：10.11883/bzycj-2016-0271　　文章编号：1001-1455(2018)02-0309-07

可识别微层裂前界面的阶跃信号电探针测试技术*

文雪峰，王晓燕，王　健，洪仁楷，胡　杨，陈永涛
（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川　绵阳　621999）

摘要：受微喷射物质干扰，现常用的测试技术难以对复杂结构金属样品微层裂前界面进行准确识别，针对该问题提出阶跃信号电探针测试技术。对传统电探针受微喷射物质干扰出现不正常放电现象的原理进行分析，设计阶跃信号形成电路。开展锡金属样品爆轰实验，对比传统电探针和阶跃信号电探针的放电波形，分析阶跃信号电探针数据解读方法，联合 X 光测试技术，对阶跃信号电探针放电波形阶跃信号高电平出现时刻进行检定。实验结果表明：阶跃信号电探针测试技术能够识别微喷射物质的干扰，可用于爆轰加载下金属样品微层裂前界面的识别。

关键词：信息处理技术；微层裂；电探针；阶跃信号
中图分类号：O384　　**国标学科代码：**13035　　**文献标志码：**A

当冲击波到达金属表面并发生反射，可能会导致金属表面发生物质喷射、破碎、熔化等现象，金属表面出现物质颗粒大小、密度、速度等状态分层的现象[1-2]，最典型的分层状态为金属表面呈现微喷射、微层裂、基体三层结构，如图 1 所示。对冲击作用下金属表面状态的研究是冲击物理、材料科学以及微细观结构建模的热门研究领域。在大多数基础科学研究中，主要通过平面波加载实验[3]对金属表面状态进行研究，在该类实验中，金属样品结构相对简单，容易实施各种测试技术，主要测试技术为 Asay 窗[4]和 X 光照相[5]，而在复杂结构装置实验中，常规的测试装置大都难以适用。电探针测试技术[6-7]是目前测试金属样品表面随时间运动的过程、研究冲击动力学特性及校验数值模拟程序的重要手段，具有时间测试精度高、工程适用性好和用于狭小空腔结构金属样品易布局等优点[8]。但是，在爆轰冲击加载条件下金属样品前界面会发生微喷射现象的实验中，若金属前界面微喷量很小，基本保持平整密实状态，脉冲信号电探针放电波形会呈现很好的单脉冲形状；如果金属前界面出现大量微喷物质，电探针将提前放电，由于不同的爆轰加载强度、金属表面加工质量以及金属材料特性，前界面喷射状态差异很大，将导致脉冲信号电探针会出现多种不正常放电现象，因而难以获取准确的时间信息。电探针放电状态与爆轰加载下金属表面物质密度状态、气体电离以及电探针系统回路均存在关系。唐敬友等[9]针对冲击波加热的氦气和氩气对电探针导通的影响进行了研究，给出电探针测试环境的保护气体选择方案。胡杨等[10-11]针对分布参数和绝缘性对电探针脉冲形成电路的影响进行了研究，相关机理认识较成熟，通过电路工艺控制相关问题也得到较好解决。王为等[12]、王翔等[13]针对轻气炮实验中电探针提前导通的现象开展了研究，认为微喷射物质接触电探针产生的压力低于 20 GPa 而导致电探针出现驰豫现象，并提出了宽脉冲网络信号源技术。总的来说，对微喷射物质导通电探针产生不正常放电的机理认识还不够清楚，对微喷射物质干扰下电探针无法进行时间测量的问题也没有得到解决。本文中，针对微喷射物质作用下电探针放电机理开展研究，提出阶跃信号电探针测试技术用以解决前述问题，使用阶跃信号电探针测试技术实现对金属表面微层裂前界面的识别。

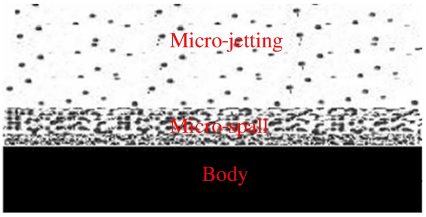


图 1　金属表面三层结构
Fig. 1　Three-layer structure of metal surface

* **收稿日期：**2016-09-09；**修回日期：**2017-02-22
基金项目：国家自然科学基金项目(11502253)；中国工程物理研究院科学技术发展基金项目(2015B0201002)
第一作者：文雪峰(1988—　)，男，硕士，助理研究员；**通信作者：**王晓燕，wangxy101s@163.com。

1 传统电探针不正常放电的机理

1.1 电探针测试技术原理

典型的电探针测试电路如图 2(a)所示，主要由 4 部分组成：电探针、长距离电缆、信号形成电路和信号记录存储示波器。忽略长距离电缆的寄生电感、电容、电阻参数，电探针测试电路可简化如图 2(b)所示。图 2 中 R_E 为电源的电阻，R_p 为匹配电阻，R_s 为信号电阻，U_{R_s} 为信号电阻上的电压。电路工作测试原理：金属样品与电探针测试系统相连接，电探针安装至所需测点，不与金属样品接触，电探针测试回路处于开路状态，此状态下电源 E 向电容 C 充电；金属样品被爆轰加载后运动，直至撞击电探针末端，电探针测试回路短路，电容 C 开始放电，电阻 R_s 两端产生电压脉冲信号，在传统正常测试应用中，脉冲信号的前沿起跳时刻则为被测金属样品表面到达电探针端部位置的时刻。

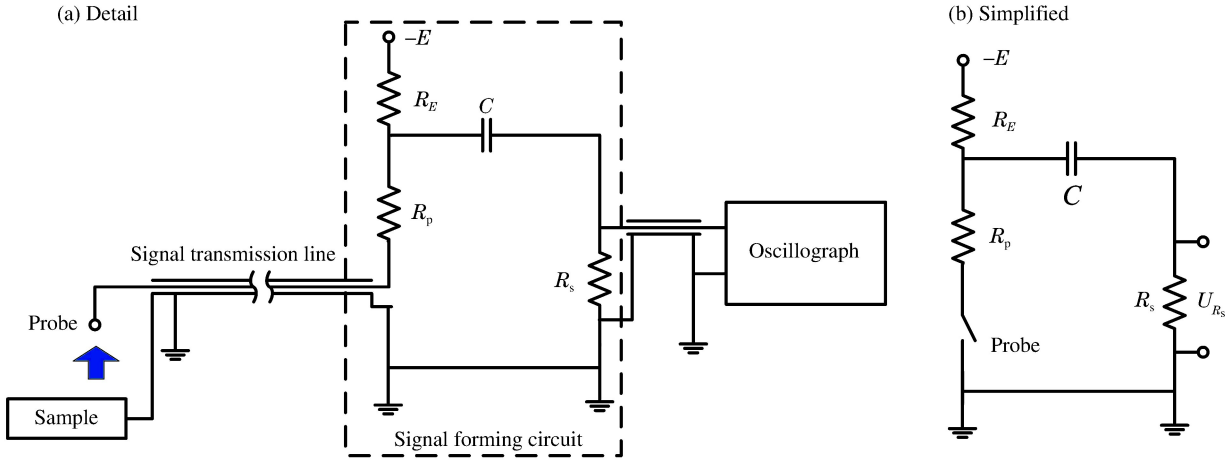


图 2 电探针测试技术电路原理图

Fig. 2 Principle of electric probe measuring technology circuit

1.2 不正常放电机理

在常规的测试应用中，电探针测试系统产生的脉冲信号如图 3(a)所示，后文将传统电探针统称为脉冲信号电探针。然而，在具有微喷射现象的测试应用中，电探针出现不正常放电波形，如图 3(b)所示，其主要特征有多次放电、信号波形畸变。

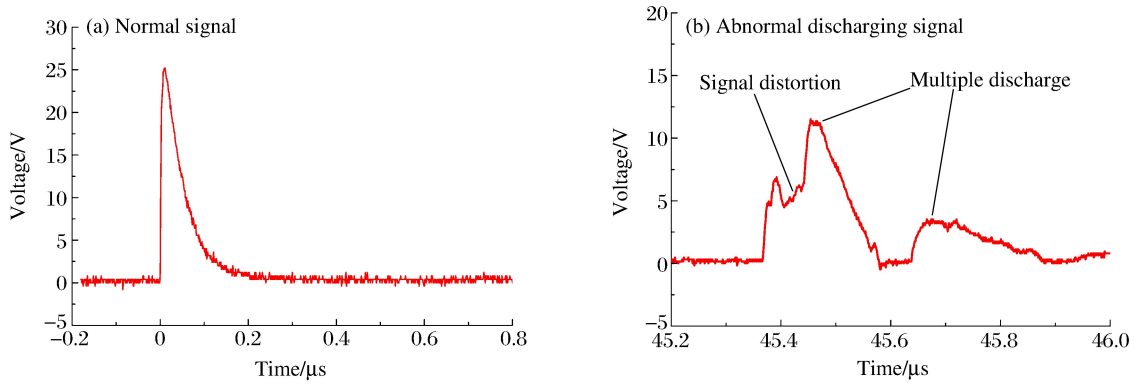


图 3 电探针信号

Fig. 3 Signals of electric probes

爆轰加载下，若金属样品表面出现微喷射现象，喷射出的微小颗粒物质提前接触到电探针末端，其仍具有使电探针测试回路导通的能力，导致电探针提前放电，但相较于金属样品密实物质界面其导通特

性差。微喷射物质的状态不同，其导致电探针的导通状态也不同。从图 3(b)的信号多次起跳得出微喷射物质多次开关电探针的特性，电压信号幅值阶梯上升的特征反映出微喷射物质导通电阻由大逐渐变小的特性。那么当金属样品密实物质界面到达电探针末端，电阻达到最小，电探针保持持续接通状态。因此，微喷射物质在电探针导通回路中可采用一个开关 K 和一个可变电阻 R_x 串联的机理模型(后称该模型为 K＋R_x 模型)进行模拟，如图 4(a)所示。

脉冲信号电探针测试技术的信号形成电路的蓄电电容 C 取值较小，几乎只能够存储满足形成一次正常脉冲信号的电能，脉冲信号宽度约为 100 ns，而微喷射物质影响电探针时间可长达 2 μs。电探针在探测到金属样品密实物质界面前，蓄电电容 C 电压下降，甚至可能已经将存储的电能释放完毕，脉冲信号电探针就无法很好地响应金属样品密实物质界面，更难以从中解读被测物的电阻变化信息。

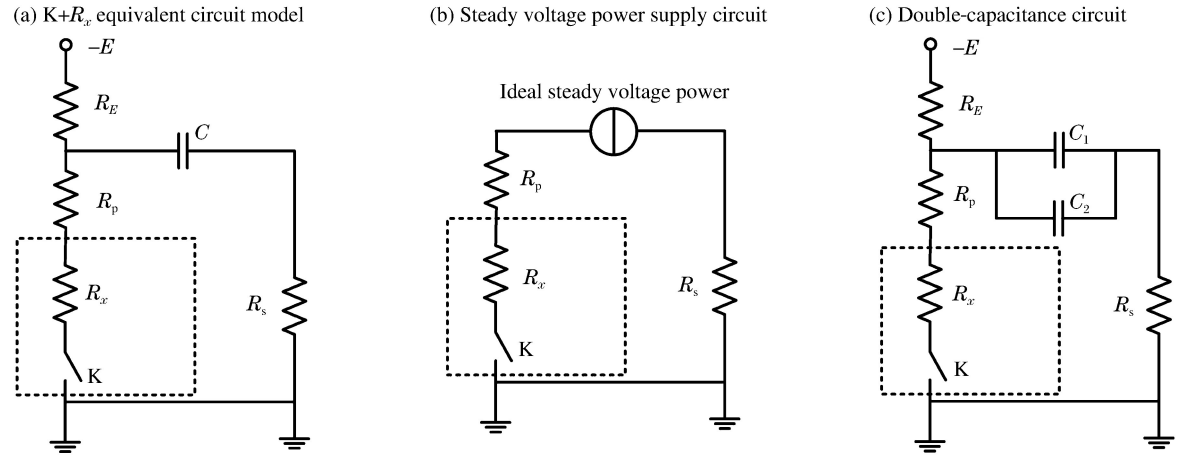


图 4　阶跃信号电探针原理

Fig. 4　Principle of step-signal electric probe

2　阶跃信号电探针测试技术

2.1　阶跃信号电探针测试技术原理

为了使电探针能够克服微喷射物质的影响，提出采用恒压源代替传统信号形成电路中小电容的改进方案，电路如图 4(b)所示：一方面，使电探针具有长时间放电能力，具备深入微喷射物质层并用以识别金属样品密实物质界面的测试能力；另一方面，使电探针的放电电压恒定，从而可从电探针放电电压信号的幅值 U_{R_s} 变化观察被测物质的电阻 R_x 变化。采用恒压源设计思路后，在受到密实金属界面撞击时，电探针的信号为阶跃信号。因此，将改进后的电探针测试技术称为阶跃信号电探针测试技术。

2.2　阶跃信号电探针测试技术电路设计

设计难点：由于爆轰加载下金属样品撞击电探针的速度很快，时间测量精度需要达到纳秒量级，微喷射物质的状态变化时间也在亚微秒量级，因此需要设计具有高频响应特性的恒压源。电容具有高速的放电能力，但是存储能量有限，若电容选取过大，受工艺限制，电容自身的寄生电感将增大，会降低其高频特性。

解决方案：提出大小双电容并联电路设计方案，如图 4(c)所示，大电容用于保证充足的电荷容量，小电容用于保证放电回路良好的高频特性。大电容 C_1 容值计算方法：电探针不正常放电时间大都在亚微秒时间内，保证一定裕量，选取蓄电电容所需的恒压时间 T_c 为 2 μs，在恒压时间内电压下降在 1% 以内，根据公式：

$$C_1 = -\frac{T_c}{(R_p + R_s + R_x)\ln(1 - \Delta V_C / V_{C0})} \tag{1}$$

则可算出 C_1 为 2 μF，式中 R_p 和 R_s 取值 50 Ω，R_x 取其可能小值为 0 Ω，电容电压的变化与电容初始电压的比值 $\Delta V_C / V_{C0}$ 为 0.01。小电容 C_2 容值选取与脉冲信号电探针所使用电容一样，一般为 510 pF。

3 实 验

3.1 实验方案

锡属于低强度、低熔点材料，在一般爆轰加载条件下，其前界面会产生微喷射、微层裂现象，因而选择锡金属作为实验样品材料开展爆轰实验。同时采用脉冲信号电探针测试技术和阶跃信号电探针测试技术对金属表面状态进行测试，对比2类电探针系统的响应特性。爆轰加载实验装置如图5所示，使用外形尺寸为∅25 mm×30 mm的JOB-9003高能炸药加载锡金属样品，锡金属样品表面粗糙度为0.8 μm，样品尺寸为∅25 mm×4 mm。脉冲信号电探针和阶跃信号电探针轴对称布局，实验中联合使用X光获取锡材料前界面物质状态分布，标定考核阶跃信号电探针的响应特性。

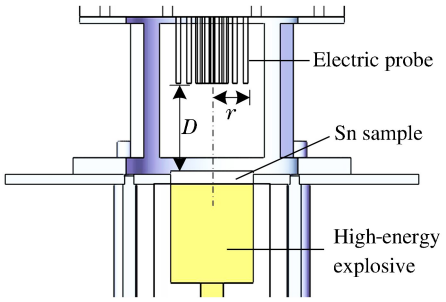


图5 爆轰加载锡金属样品实验装置

Fig. 5 The experimental device for detonation driving Sn sample

3.2 实验结果

实验中获得的理想脉冲信号电探针波形和阶跃信号电探针波形对比如图6(a)所示，可见阶跃信号电探针波形的前沿上升速度与脉冲信号电探针波形的前沿上升速度一致，阶跃信号电探针测试技术仍具有高频响应的优点。

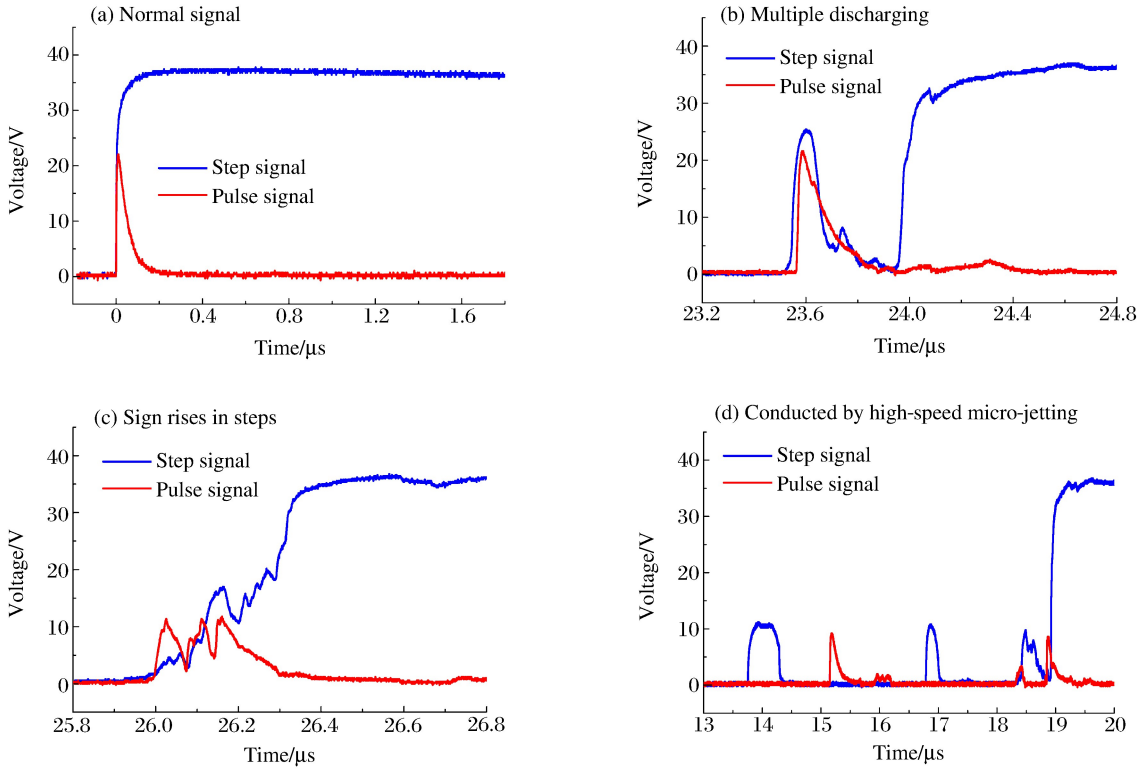


图6 典型阶跃信号电探针和脉冲信号电探针信号数据对比

Fig. 6 Comparison between the step-signal electric probe and the impulse-signal ones

在爆轰实验中，2类电探针信号均受到微喷射物质的影响。绝大多数脉冲信号电探针出现不正常放电波形，难以识别金属样品密实物质界面的到达。相比来说，阶跃电探针信号存在高电平阶跃信号特征，可识别微喷物质对信号的影响部分和密实物质界面的到达。典型的脉冲信号电探针和阶跃信号电探针对比测试波形有如下3类。(1)多次放电波形，如图6(b)所示：阶跃信号电探针出现2次放电，第2次放电出现完整的阶跃信号，表示金属样品密实物质界面的到达；而脉冲信号电探针出现1次脉冲信

号，在金属样品密实物质界面到达后，脉冲信号电探针放电基本完毕而不能再次产生脉冲信号，采用脉冲信号电探针则会误判金属样品的密实物质界面到达时间。(2)电信号阶梯上升，如图 6(c)所示：阶跃信号电探针信号的电压呈现阶梯上升，并最后达到最高电平，表征金属样品密实物质界面的到达；而脉冲信号电探针则出现多次放电现象，无法有效识别金属样品密实物质界面的到达。(3)高速微喷射物质导通，如图 6(d)所示：阶跃信号电探针和脉冲信号电探针均出现了多次放电现象；阶跃信号电探针最后出现了明显区别于前段瞬间放电脉冲信号的阶跃信号，表征金属样品密实物质界面的到达；而脉冲信号电探针出现多次相似的脉冲信号，无法识别金属样品密实物质界面的到达。

3.3　阶跃信号界面信息解读与时间提取

电探针放电回路如图 7 所示，包含金属样品物质主体部分，表明电探针出现放电信号的时刻所接触的物质，必然是通过其后方物质保持连接或部分连接的状态，一直到主体部分，那么电平信号的出现，表征电探针此刻响应的物质与主体相连。

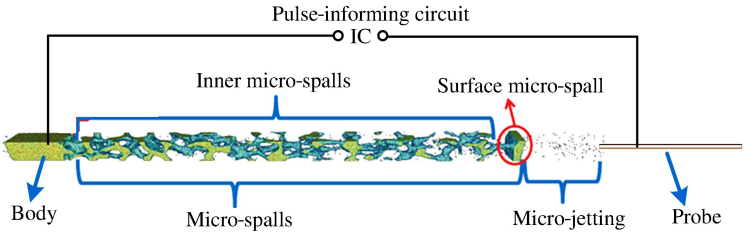


图 7　电探针放电回路

Fig. 7　Discharging circuit of electric probe

选取 2 个异常放电信号，可提取出 2 个具有明确物理意义的界面信息，如图 8 所示。界面 1 为出现电平信号的时刻，是与主体连通保持一定接触的物质前界面，可作为喷射物质后界面；界面 2 为高电平稳定开始时刻，是密实物质界面，可作为微层裂前界面。那么界面 1 与界面 2 之间的区域就是一个微喷射与微层裂过渡的区域，也就是微喷射物质增长但尚未完全脱离或正在脱离微层裂前界面的关键区域。

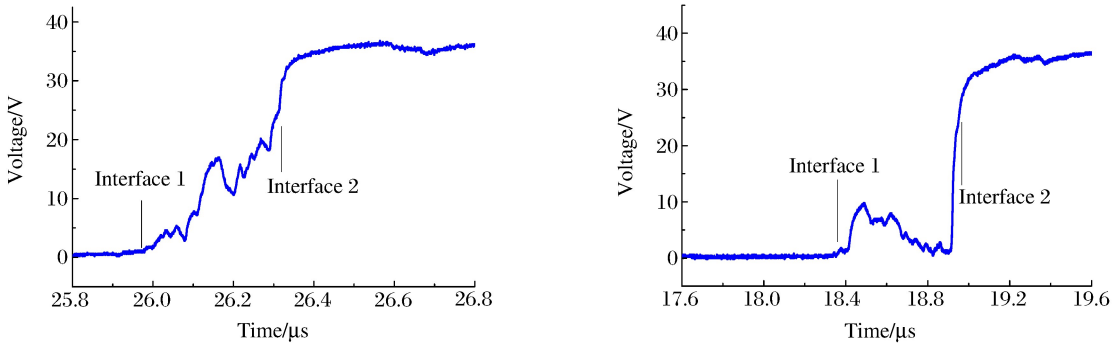


图 8　阶跃信号界面提取

Fig. 8　Intersurface information extracted from the step signal

考虑到长距离电缆给信号带来的前沿变缓影响，先通过理想实验获得密实物质撞击电探针时电探针响应的标准波形；然后，将实验测试中获得的阶跃波形与标准阶跃波形的高电平稳定的起始时刻进行重合，对标准阶跃波形的突变时间进行判读，读数即为阶跃信号高电平表征的密实物质界面到达时间信息，如图 9 所示，依照此方法，读取界面到达时间为 26.31 μs。按照此解读方法对所有测点阶跃信号时间信息进行判读，并修正初始时刻，得到锡金属样品从起跳到到达探针端面的时间信息测试结果，如表 1 所示。

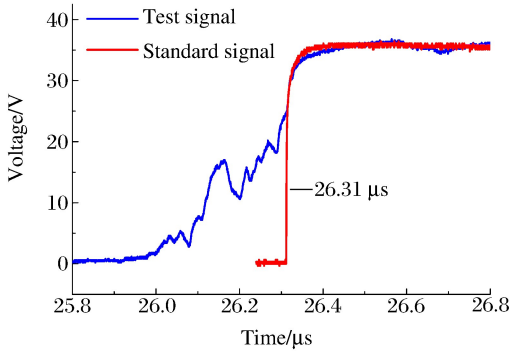


图 9　时间判读

Fig. 9　Time reading

表 1 阶跃信号电探针时间测量结果

Table 1 Time measuring results of step signal electric probe

D/mm	第 1 圈(r=4 mm)		第 2 圈(r=7.5 mm)		第 3 圈(r=11 mm)	
	测点数	均值/μs	测点数	均值/μs	测点数	均值/μs
25	2	13.24	2	13.76	2	14.06
30	4	16.13	2	16.42	2	16.66
35	2	18.62	4	19.05	4	19.11
40	2	21.43	2	21.84	2	21.80

利用 X 光机获取爆轰加载后金属样品在 13.2 和 22.5 μs 时刻的运动状态，经过密度反演计算获得物质体密度分布图像如图 10 所示。电探针界面距 Sn 样品上界面 25 mm 的 6 根阶跃信号电探针出现阶跃信号的响应时间与 X 光机响应时间一致，得出阶跃信号响应位置如图 10(a)所示。电探针界面距 Sn 样品上界面 40 mm 的 6 根阶跃信号电探针出现阶跃信号的响应时间平均值为 21.2 μs，探针测试物质的运动速度约为 1.86 mm/μs，将电探针测试时间与 X 光照片时间对齐，探针界面需要向后移动 1.86 mm/μs×(22.5−21.70) μs=1.49 mm，得出阶跃信号响应位置如图 10(b)所示。实验结果表明，电探针信号中的阶跃信号高电平响应时刻对应于微层裂前界面。

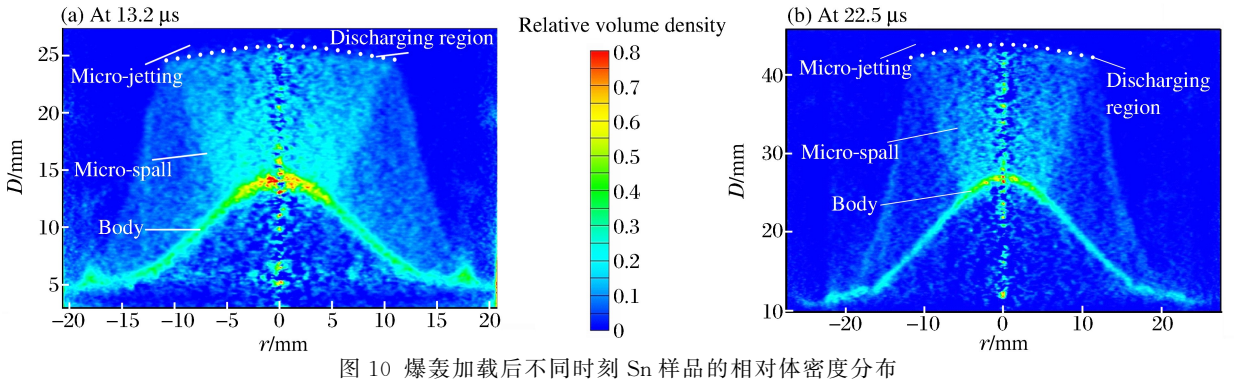


图 10 爆轰加载后不同时刻 Sn 样品的相对体密度分布

Fig. 10 Relative volume density distribution of Sn sample driven by detonation at different times

4 总 结

提出了基于双电容恒压源设计的阶跃信号电探针测试技术，开展爆轰实验验证了阶跃信号电探针测试技术能够识别微喷射物质的干扰和金属样品微层裂前界面，解决了脉冲信号电探针受微喷射物质干扰无法进行时间测量的问题；制定了阶跃信号电探针信号解读方法，爆轰实验中联合 X 光测试技术，验证了阶跃信号电探针阶跃信号的出现时刻对应于金属样品微层裂前界面的达到时刻。阶跃信号电探针测试技术具有小型、低廉和用于复杂结构金属样品易布局的优点。

参考文献：

[1] CHEN Yongtao, HU Haibo, TANG Tiegang, et al. Experimental study of ejecta from shock melted lead[J]. Journal of Applied Physics, 2012,111:053509.

[2] DURAND O, SOULARD L. Power law and exponential ejecta size distributions from the dynamic fragmentation of shock-loaded cu and sn metals under melt conditions[J]. Journal of Applied Physics, 2013,114:194902.

[3] BUTTLER W T, ORO D M, OLSON R T, et al. Second shock ejecta measurement with an explosive driven two-shockwave drive[J]. Journal of Applied Physics, 2014,116:103519.

[4] HOLTKAMP D B, CLARK D A, FERM E N, et al. A survey of high explosive-induced damage and spall in selected metals using proton radiography[C]// Shock Compression of Condensed Matter, 2003:477-482.

[5] 张崇玉，胡海波，李庆忠，等. 柱面内爆驱动下铅飞层对碰区动载行为实验研究[J]. 高压物理学报，2013,27(6):884-886.

ZHANG Chongyu, HU Haibo, LI Qingzhong, et, al. Experimental study on dynamic behavior of the collision re-

gion of lead tube driven by cylinderical implosion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013,27(6):884-886.

[6] 黄正平.爆炸与冲击电测技术[M].北京:国防工业出版社,2006:71-106.

[7] 金山,陈永涛,汤铁钢,等.多点激光干涉测速系统和电探针技术在飞片速度测量中的应用对比[J].高压物理学报,2012,26(5):571-576.
JIN Shan, CHEN Yongtao, TANG Tiegang, et al. Comparison of multi-channel visar and electric probe technology in measuring free-surface velocity of metal flyer[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012,26(5):571-576.

[8] 孙永强,何智,王珺.一种高精度爆速测量方法[J].含能材料,2012,20(3):329-332.
SUN Yongqiang, HE Zhi, WANG Jun. a precision experiment method of measurement detonation velocity[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012,20(3):329-332.

[9] 唐敬友,伍绍珍,王藩侯,等.冲击波加热的氦气与氩气对电探针导通的影响[J].高压物理学报,2000,14(4):285-290.
TANG Jingyou, WU Shaozhen, WANG Fanhou, et al. The effect of shock heated gaseous helium and argon on pin shorting[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000,14(4):285-290.

[10] 胡杨,胡美娥,张宇红,等.分布参数与绝缘性变化对脉冲形成网络的影响[J].高能量密度物理,2014(2):62-67.

[11] 胡杨,胡美娥,陈永涛,等.分布参数与绝缘性对电探针脉冲形成电路影响浅析[J].测控技术,2015,34(8):5-11.
HU Yang, HU Meie, CHEN Yongtao, et al. Effect of distribution parameter and insulativity on electric probe pulse-generating circuit[J]. Measurement & Control Technology, 2015,34(8):5-11.

[12] 王为,王翔.二级轻气炮发射过程中前冲气体的初步研究[J].高压物理学报,2004,18(1):94-96.
WANG Wei, WANG Xiang. Research on the precursor gas accompanied with the launch of two-stage gas gun[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004,18(1):94-96.

[13] 王翔,贾路峰,傅秋卫,等.宽脉冲网络信号源及应用[J].高压物理学报,2005,19(3):279-283.
WANG Xiang, JIA Lufeng, FU Qiuwei, et al. Broad pulse forming circuit and its application[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005,19(3):279-283.

A step-signal electirc probe technology for recognising the front surface of micro-spall

WEN Xuefeng, WANG Xiaoyan, WANG Jian, HONG Renkai,
HU Yang, CHEN Yongtao
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: Effected by micro-jetting, the usual measuring technologies are hard to recognise the front surface of micro-spall of a metal sample that is of complex structure. In this paper, a step-signal electric-probe measuring technology is proposed to solve this problem. The abnormal discharging phenomenon of the conventional electric probe is analyzed under the effect of micro-jetting and the step-signal producing circuit is designed. Explosive load experiments on Sn metal samples are carried out. The discharging signals of the conventional electric probe and step signal electric probe are compared and the useful information of the step signal is analyzed. Compared to X-ray photograph, we get that the position where the high voltage of step signal responses is the front surface of micro-spall. The results of the experiment show that the step-signal electric probe is able to distinguish the effect of micro-jetting and recognise the front surface of micro-spall of the metal samples under explosive load.

Keywords: information processing technology; micro-spall; electric probe; step signal

(责任编辑　张凌云)