DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0887-06

微喷射物质作用下脉冲信号电探针的放电机理*

文雪峰,王 健,王晓燕,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: 针对脉冲信号电探针在微喷射物质作用下出现的“非正常”放电现象,提出了微喷射物质 K+R_x 等效电路模型,用以解释微喷射物质导通电探针放电机理。开展爆轰实验,联合 X 射线测试技术,确定了电探针放电区域处于微喷射区与微层裂区的过渡地带,并发现电探针的 3 类“非正常”放电现象。建立电路仿真模型,将微喷射物质等效成 K+R_x 电路,调节 K+R_x 等效电路模型参数,模拟电探针的 3 类“非正常”放电现象。仿真结果表明,K+R_x 等效电路模型很好地解释了微喷射物质作用下脉冲信号电探针的放电机理。

关键词: 信息处理技术;微喷射;电探针;电路仿真;放电
中图分类号: O384 **国标学科代码**: 1303599 **文献标志码**: A

基于强烈的武器物理和基础科学研究需求,爆轰加载下金属表面运动速度和物质疏密状态成为研究热点之一。电探针技术[1-2]是目前测试金属样品表面运动速度、研究冲击动力学特性及校验数值模拟程序的重要手段,相比其他测试技术,具有时间测试精度高、工程适用性好、适用于具有狭小空腔结构的金属样品等优点[3]。目前,常用的电探针测试技术从本质上讲是一种“行程开关”[1],其放电波形为脉冲信号,为此本文中将其称为脉冲信号电探针测试技术。

爆轰加载后,若金属表面保持较平整且密实的状态,则脉冲信号电探针放电波形将呈现出理想的单脉冲形状;但是,在一定条件下某些金属样品表面会发生微喷射现象[4-5],如图 1 所示,若此时测量金属样品表面到达时间,则脉冲信号电探针会出现多种“非正常”放电现象,从而无法获取准确的时间信息。

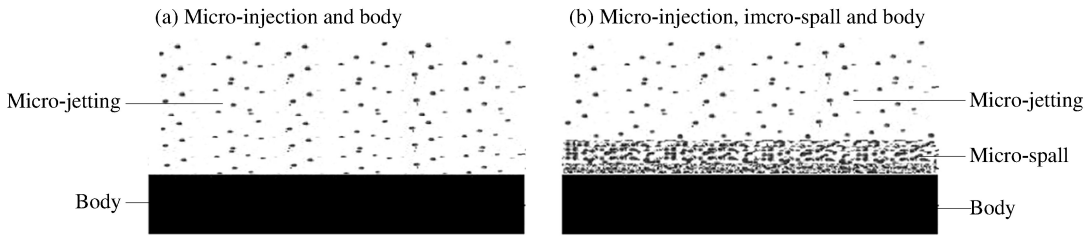

图 1 金属样品表面状态

Fig. 1 Surface conditions of the metal samples

电探针放电状态与爆轰加载下金属表面的物质疏密状态、空气电离、电探针系统回路有关,掌握电探针的放电机理对于正确解读电探针测试数据十分重要。唐敬友等[6]研究了冲击波加热的氦气与氩气对电探针导通的影响;胡杨等[7-8]探讨了分布参数和绝缘性对电探针脉冲形成电路的影响;王翔等[9-10]对轻气炮实验中电探针提前导通现象进行了分析,认为微喷射物质接触电探针压力低于 20 GPa 将导致电探针出现弛豫现象。探索电探针对金属表面微喷射物质的响应特性,不但有助于解决脉冲信号电探针测试技术受微喷射物质干扰而出现的“非正常”放电问题,而且有助于研发更有效的微喷射物质诊断技术,具有重要的科学与工程意义。然而,到目前为止相关的认识还较欠缺,因此本文中将针对微喷射物质作用下电探针的放电机理展开探讨。

* **收稿日期**: 2016-03-09; **修回日期**: 2016-05-30
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 健,wj19660606@sina.cn。

1 微喷射物质作用下电探针响应实验

1.1 实验设计

爆轰加载实验装置见图 2。对 Sn 金属样品进行爆轰加载实验,使其发生微喷射现象。Sn 样品的尺寸为∅25 mm×4 mm,表面粗糙度为 0.8 μm。高能炸药型号为 JOB-9003,尺寸为∅25 mm×30 mm。采用脉冲信号电探针测试技术对金属表面状态进行测试,观察脉冲信号电探针系统的响应特性。电探针与 Sn 金属靶的距离 D 有 4 种,分别为 25、30、35 和 40 mm,与 Sn 金属靶中心轴线的距离 r 有 3 种,分别为 4.0、7.5、11.0 mm,相同的 D 和 r 处布置2～4 根电探针,具体的分布参数列于表 1。联合 X 射线照相技术,获取金属表面物质分层图像,确定电探针的放电区域。

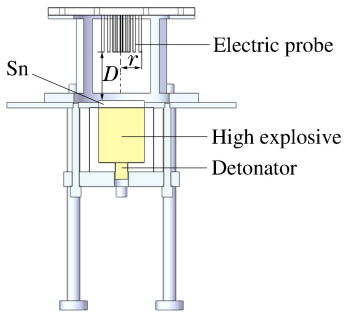

图 2 爆轰加载实验装置

Fig. 2 Explosive loading experiment setup

表 1 电探针信号起跳时间

Table 1 Jump time of electric probe signal

D/mm	第 1 圈(r=4.0 mm)		第 2 圈(r=7.5 mm)		第 3 圈(r=11.0 mm)	
	测点数	平均起跳时间/μs	测点数	平均起跳时间/μs	测点数	平均起跳时间/μs
25	2	13.45	2	13.60	2	12.12
30	4	16.15	2	16.15	2	16.80
35	2	18.62	4	18.83	4	18.12
40	2	21.14	2	21.70	2	22.10

1.2 实验结果

利用 X 射线照相技术,获得了 Sn 金属样品运动后 22.5 μs 时的状态,经过密度反演计算,得到相对密度(相对 Sn 样品主体密度)分布图像,如图 3 所示。表 1 列出了电探针出现放电现象的时刻,其中零时刻修正为金属样品运动的起始时刻。D=40 mm 处的 6 根电探针的放电时刻平均值为 21.65 μs,电探针测得的物质运动速度约为 1.86 km/s。将电探针测试时间与 X 射线照相时间相比较,得出电探针界面需向后移动 1.86 km/s×(22.5－21.65) μs＝1.58 mm。对比图 3 可知,电探针开始放电的区域大概对应图中点线位置,即微喷射区向微层裂区过渡的区域。

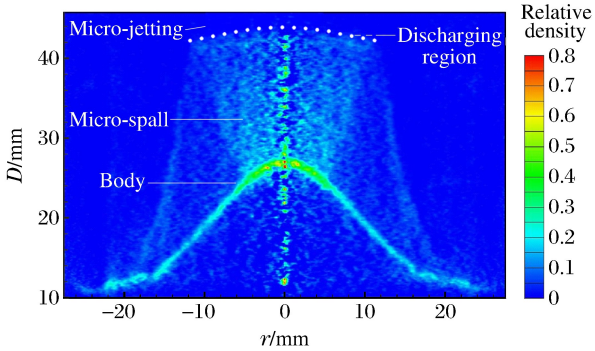

图 3 通过 X 射线图像反演得到的相对密度分布

Fig. 3 Relative density obtained by X-ray photograph inversion

相比于常规测试中电探针产生的正常脉冲信号(如图 4(a)所示),在微喷射实验中,电探针放电波形发生畸变,出现 3 类“非正常”放电波形:(1) 多次放电,见图 4(b);(2) 信号前沿阶梯上升,见图 4(c);(3) 信号下降沿再次起跳,见图 4(d)。

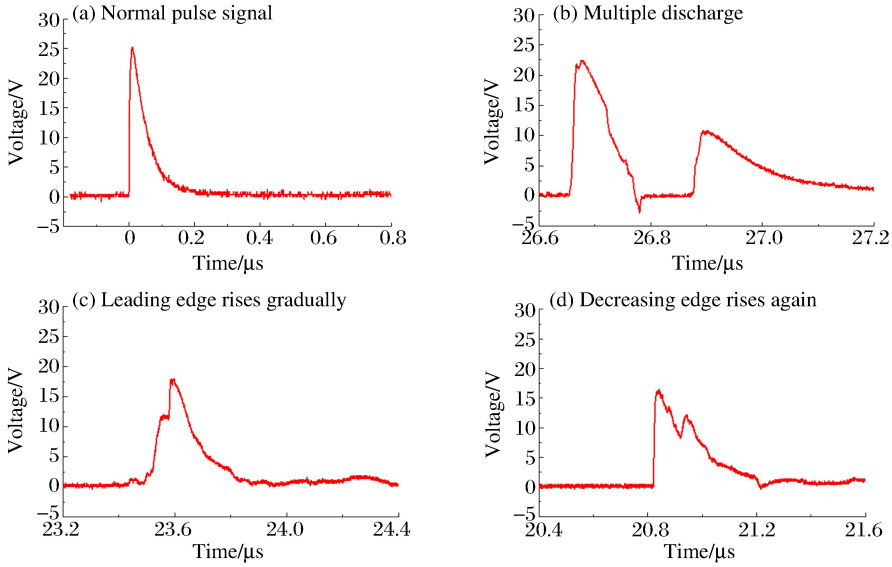

图 4　电探针放电波形

Fig. 4　Discharging waveforms of the electric probe

2　放电现象机理分析及电路仿真

2.1　电探针测试技术原理

如图 5(a)所示，典型的电探针测试电路主要由 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、电容和电阻，可对电探针测试电路进行简化，如图 5(b)所示。简化电路的工作原理为：金属样品与电探针测试系统相连接，将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，在此状态下电源 $-E$ 向电容 C 充电；金属样品在冲击加载作用下开始运动，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，脉冲信号前沿的起跳时间即为被测金属样品表面到达电探针端部位置的时间。

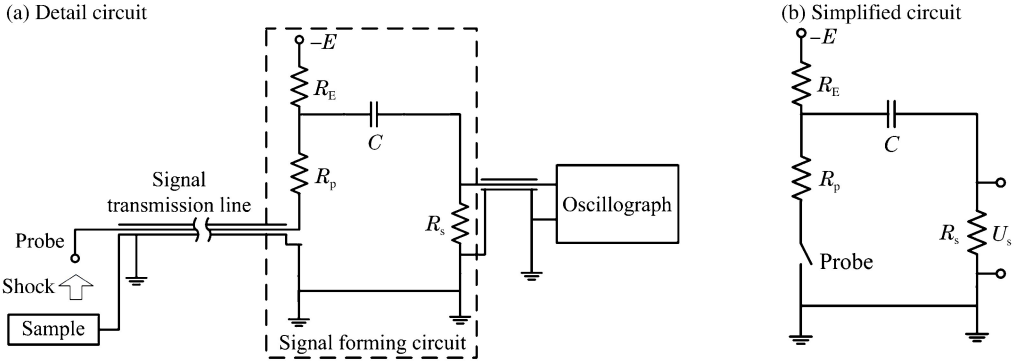

图 5　电探针测试电路

Fig. 5　Test circuit of the electric probe

2.2　建立微喷射物质 K+R_x 等效电路模型

爆轰加载下，若金属样品表面仍保持密实状态，则金属表面撞击电探针过程就像理想的开关关断一样，电探针产生正常的脉冲信号；若金属样品表面出现微喷射现象，则喷射出的微小颗粒物质将提前接触电探针端部，使电探针测试回路导通，电探针提前放电，只是相较于金属样品密实物质界面，该导通性能较差，并且微喷射物质的状态不同，电探针的导通状态也不同。

基于以上分析，在本文中提出将微喷射物质等效成一个开关 K 与一个可变电阻 R_x 串联的机理模型（简称 K+R_x 等效电路模型）接入电探针回路中，如图 6 所示。由图 4(b)显示的信号多次起跳现象可知，微喷射物质具有多次开关电探针的特性；而图 4(c)所示的电压信号幅值阶梯上升现象则反映出微喷射物质导通电阻 R_x 具有由大逐渐变小的特点，当金属样品密实物质界面到达电探针末端时，R_x 最小，电探针保持持续接通状态。

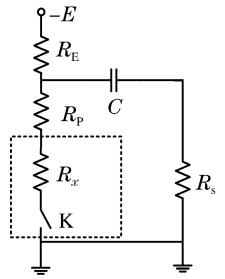

图 6 K+R_x 等效电路模型

Fig. 6 K+R_x equivalent circuit model

2.3 微喷射物质作用下电探针放电现象仿真

在实际的电探针测试系统中，测试设备远离爆炸地点，电探针需要通过长距离电缆与信号形成电路连接，而长距离电缆具有较大的寄生参数，在电路仿真中不可忽略。本文中使用 Matlab-Simulink 建立电探针模型，如图 7 所示；同时参照文献[7]，建立长距离电缆模型，即图 7 虚线框中的信号传输线路模型。电探针主电路参数为：蓄电电容初始电压 U_c=70 V，示波器端采样电阻 R_s=50 Ω，电探针端匹配电阻 R_p=50 Ω，蓄电电容 C=0.5 nF。信号传输线路的分布参数为：线路电阻 R_L=0.05 Ω，线路电容 C_L=0.16 nF，线路电感 L_L=1.6 μH。以下分析示波器端采样电阻 R_s 两端电压 U_s 的波形。

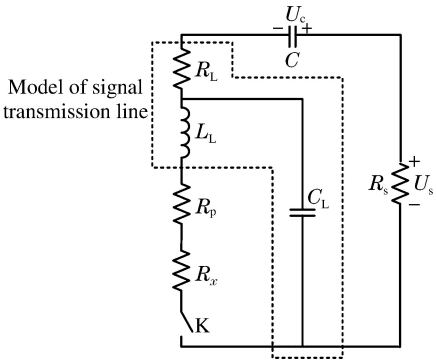

图 7 电探针测试系统仿真电路

Fig. 7 Simulation circuit of the electric probe measuring system

仿真 1：正常放电，即电阻 R_x 取为零，开关 K 直接关断。所得的脉冲信号电探针仿真波形如图 8(a)所示。可见，其与图 4(a)所示的实际波形相似。所表现出的金属样品前界面特征为：保持密实状态，无明显的微喷射现象。

仿真 2：多次放电信号，即电阻 R_x 取为零，开关 K 进行多次开关，最后保持关断状态。仿真结果（见图 8(b)）显示：出现多次脉冲波形，脉冲幅值逐渐下降，与图 4(b)所示的实际波形相似。所表现出的金属样品前界面特征为：出现微喷射现象，且微喷射物质不连续。

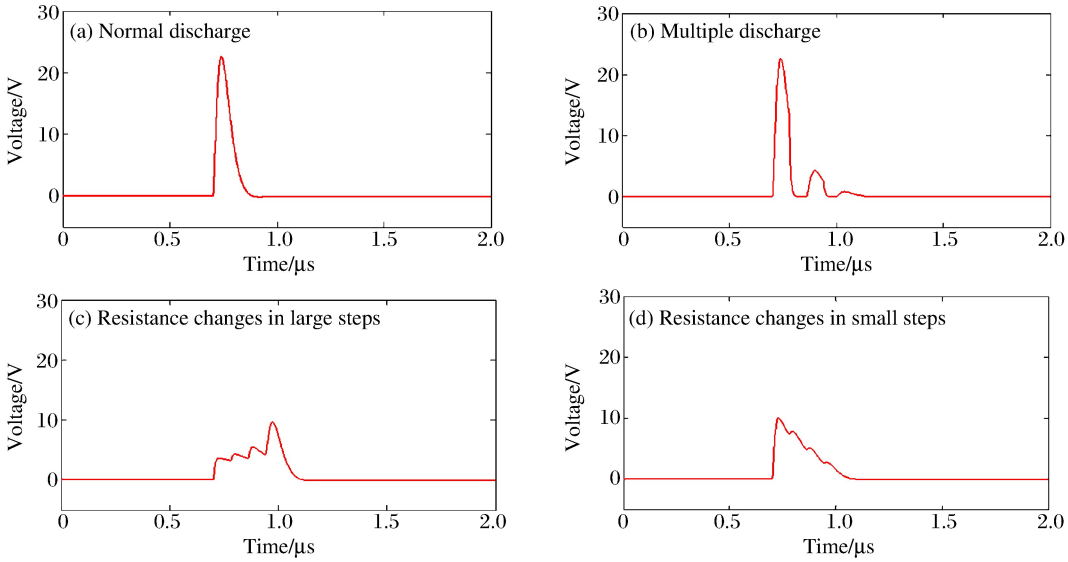

图 8 放电现象仿真结果

Fig. 8 Simulation results of the discharge phenomena

仿真 3：电阻 R_x 大阶梯变化，即开关 K 保持接通，电阻 R_x 分 3 次由 600 Ω 等梯度减小至零。仿真结果（见图 8(c)）显示：脉冲信号电探针信号幅值阶梯上升，与图 4(c)所示的实际波形相似。所表现出的金属样品前界面特征为：出现微喷射现象，微喷射物质较为稀疏，密度呈现出阶梯式增大现象。

仿真 4：电阻 R_x 小阶梯变化，即开关 K 保持接通，电阻 R_x 分 3 次由 150 Ω 等梯度减小至零。仿真结果（见图 8(d)）显示：脉冲信号电探针信号幅值逐渐下降，脉冲波形在下降沿出现起跳现象，与图 4(d)所示的实际波形相似。所表现出的金属样品前界面特征为：出现微喷射现象，微喷射物质的密度相比图 4(c)较大，同样呈现出密度阶梯式增大现象。

综合以上仿真结果可以得到以下结论：模拟再现了实验中脉冲信号电探针信号出现的 3 类“非正常”放电现象，验证了采用 K+R_x 等效电路模型解释微喷射物质导通电探针放电机理的合理性。不同的微喷射物质状态导致电探针出现两大类“非正常”放电情况：(1) 物质的稀疏程度大，呈现不连续状态，该特征会引起电探针放电回路的多次开断现象；(2) 物质密度很小，在电探针回路中呈现出电阻较大的特性，该状态会引起电探针放电波形出现阶梯式跳变现象。

3　结　论

针对脉冲信号电探针在微喷射物质作用下出现的“非正常”放电现象，开展了实验与电路仿真研究，得到以下结论：

(1) 通过 Sn 金属样品微喷射实验，结合 X 射线照相技术，确定了电探针放电区域处于微喷射区向微层裂区过渡的区域，电探针的“非正常”放电是由微喷射物质导致；

(2) 通过实验获取了 3 类典型的电探针“非正常”放电现象，即多次放电、信号前沿阶梯上升和信号下降沿再次起跳；

(3) 提出 K+R_x 等效电路模型描述微喷射物质，解释了微喷射物质导通电探针放电的机理，通过电路仿真模拟出脉冲信号电探针的 3 类“非正常”放电现象，验证了 K+R_x 等效电路模型的合理性。

参考文献：

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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 experimental method of measurement detonation velocity[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(3): 329-332.

[4] Chen Y, Hu H, Tang T, et al. Experimental study of ejecta from shock melted lead[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(5): 053509.

[5] Buttler W T, Oró D M, Olson R T, et al. Second shock ejecta measurements with an explosively driven two-shock-wave drive[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(10): 103519.

[6] 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 shortening[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(4): 285-290.

[7] 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.

[8] 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)：5-7.
Hu Yang, Hu Mei'e, Chen Yongtao, et al. Effect of distribution parameter and insulativity on electric probe pulse-generating circuit[J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34(8): 5-7.

[9] 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. Measurement of the precursor gas accompanied with the launch of two-stage gas gun[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004,18(1):94-96.

[10] 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.

Discharging mechanism of pulse signal electric probe conducted by micro-jetting

Wen Xuefeng, Wang Jian, Wang Xiaoyan, Hu Yang, Chen Yongtao
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan*, *China*)

Abstract: For the "abnormal discharge" phenomenon of the pulse signal electric probe due to the micro-jetting, we proposed a K+R_x equivalent circuit model of the micro-jetting and conducted the explosive loading experiments to explain the discharging mechanism of the electric probe conducted by the micro-jetting. According to the X-ray testing data, the discharging position of the electric probe obtained was in the transition zone from the micro-jetting to the micro-spall, and the abnormal discharge phenomena of the electric probe were classified into three types. Thus we proposed a circuit simulation model where the micro-jetting is equivalent to a K+R_x circuit. By adjusting the parameters of the K+R_x equivalent circuit model, the three types of the "abnormal discharging" phenomena of the electric probe were simulated. The simulation results show that the K+R_x equivalent circuit model provides an excellent explanation for the discharging of the pulse signal electric probe conducted by the micro-jetting.

Keywords: information processing technology; micro-jetting; electric probe; circuit simulation; discharge

(责任编辑 王 影)