

丝电爆过程的电流导入机理*

毕学松¹⁾ 朱亮^{1)†} 杨富龙²⁾

1) (兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050)

2) (兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

(2011年7月6日收到; 2011年8月20日收到修改稿)

丝电爆制备纳米粉时, 电流从电极导入金属丝的过程直接影响电极烧损和粉末中微米级大颗粒产生. 分别通过接触和气体放电两种方式导入电流进行电爆试验. 结果表明, 光测量装置检测到的丝端部光电流几乎与回路放电电流同时产生, 而中间位置的光电流则要滞后一段时间; 由探针收集的产物确定, 金属丝端部主要形成熔融粒子, 中间部分主要形成气相粒子. 分析可知, 接触方式导入电流时, 丝端部也存在气体放电现象, 大电流主要通过气体放电形成的等离子体导入. 等离子体对电流的旁路作用会阻碍能量向金属丝沉积, 这是产生微米级大颗粒和“积瘤”主要原因. 通过气体放电方式导入电流时, 电极烧损明显减轻, 并可以避免“积瘤”产生.

关键词: 丝电爆, 气体放电, 光照度, 能量密度

PACS: 81.20.-n, 52.80.-s, 81.20.Ev

1 引言

丝电爆方法在制备金属纳米粉末方面具有独特的优势^[1,2]. 通常用的丝电爆方法都是首先将金属丝与电极接触, 然后施加脉冲高电压, 大电流通过接触的方式从电极导入金属丝而实现电爆^[3-5]. 这种接触式丝电爆方法会烧损电极, 电极材料容易污染粉末纯度, 并且金属丝与电极接触的部分不能够电爆, 形成“积瘤”残留在电极上, 影响后续金属丝的顺利进给^[6]. 近年来, 又出现了一种不需要将金属丝与电极接触的丝电爆方法, 即气体放电式丝电爆方法^[7]. 它是将金属丝落入电极间的高压电场中, 大电流通过丝端部与电极之间的气体放电导入金属丝而实现电爆. 这种方法可以明显减轻对电极的烧损, 并且由于不需要事先将金属丝与电极接触, 更利于工程上的连续实施. 显然, 电流从电极导入到金属丝的过程对电极烧损有重要影响.

接触式丝电爆方法在制备纳米粉时, 粉末中总包含一些微米级的大颗粒, 要得到粒径分布均匀的纳米粉, 必须对粉末进行分级处理^[8,9]. 在制备 Al 和 Al₂O₃ 粉末时, 即使选用在最优的工艺参数电爆, 也只能使微米级大颗粒的比例减小到 5 wt%—

7 wt.%^[10], 并不能完全避免. 对于这些微米级大颗粒的产生, 大部分研究都认为是在金属丝与电极接触的部分形成的, 但并没有通过实验直接验证^[9,11,12]. 只是从高速摄像获得的照片中看出, 金属丝与电极接触的部分会首先出现光, 随后光才会扩展到整根金属丝上^[13,14]. 结合同步测量的回路放电电流波形发现, 接触部分出现光的同时, 电流波形上会相应的出现峰值^[15]. 这种现象在早期研究中就有发现, 被称为“端部效应”^[16]. 由以上研究可见, 大电流从电极导入到金属丝的过程对“端部效应”有重要影响, 进而影响微米级大颗粒的形成.

本文通过接触和气体放电两种方式导入电流进行丝电爆试验, 同步测量丝电爆过程光照度和回路放电电流波形, 分析电极烧蚀情况及爆炸产物特征, 系统认识丝电爆过程的大电流从电极导入到金属丝的机理.

2 试验方法

图 1 为电爆试验方法示意图. 高压发生器直接向储能电容 *C* 充电, 电容通过高压开关 *S* 与两电极相连, 金属丝布置在电极之间, *S* 闭合后, 大电流导

* 国家自然科学基金 (批准号: 51061011) 资助的课题.

† E-mail: zhul@lut.cn

入金属丝发生电爆. 为分别实现气体放电方式和接触方式导入电流, 金属丝端部与电极采用两种形式布置. 一种形式是金属丝端部与电极不接触, 如图 1 中局部放大图 I 所示. 这种情况下, 电流通过气体放电方式导入金属丝, 即气体放电式丝电爆. 另一种形式是金属丝端部与电极可靠接触, 如图 1 中局部放大图 II 所示. 此时, 大电流通过接触方式导入金属丝, 即接触式丝电爆. 电爆过程中, 采用三套光测量装置, 分别采集靠近电极位置和中间位置光照度变化. 利用罗氏线圈同步测量电爆回路放电电流. 石英探针平行放置在距金属丝 8 mm 的位置上, 直接收集金属丝各个对应位置形成的产物, 并通过扫描电镜 (SEM) 进行显微分析. 观察电爆后的电极烧损程度和“积瘤”产生情况.

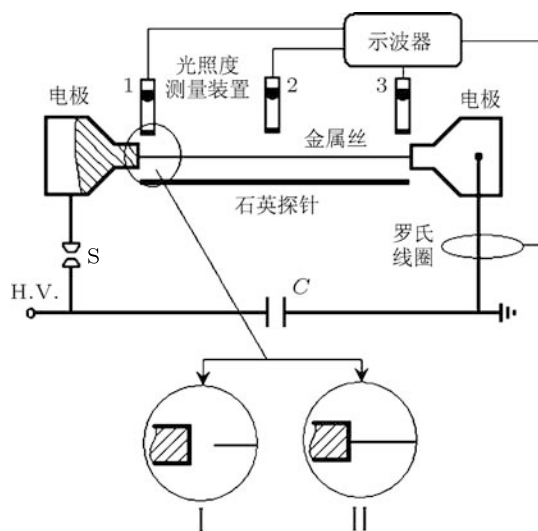


图 1 丝电爆试验装置图

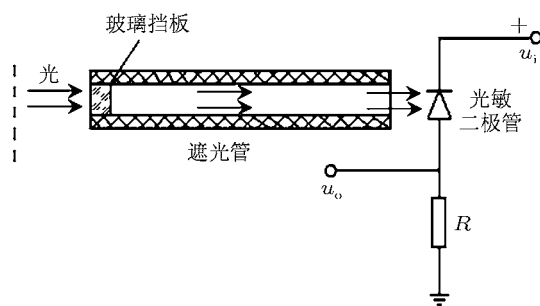


图 2 光照度测量装置图

光照度测量装置原理如图 2 所示. 对光敏二极管施加反向电压, 当有光照时, 其反向电阻显著减小, 反向电流 (光电流) 显著增加. 光电流的大小与光照度成正比 [17], 那么通过采样电阻就能得到随着光照度而变化的电信号. 为提高其位置分辨率, 将光敏二极管安装在一个内径为 2 mm, 长度

为 50 mm 的遮光管一端, 遮光管另一端距电爆金属丝轴线 5 mm 放置. 这样光敏二极管就可以检测到遮光管前方正对的直径 2.4 mm 的圆形范围内的光. 光敏二极管型号为 2CU2 型, 响应时间为 10^{-7} s. 采样电阻 R 阻值为 125 Ω .

试验中, 储能电容 C 为 8.88 μF , 初始充电电压 U 为 8 kV, 电极间距 D 为 60 mm. 采用的金属丝为直径 0.33 mm 的铜丝, 其长度有两种, 一种为 54 mm, 丝端部与电极之间气隙均为 3 mm; 另一种为 60 mm, 丝端部与电极可靠接触.

3 试验结果

3.1 光电流和回路放电电流

图 3(a) 为气体放电式丝电爆过程中三个位置的光电流变化和回路放电电流波形. 可以看出, 在靠近电极的位置, 检测到的光电流几乎与回路放电电流同时产生, 并且会迅速增加到最大值. 而在中间位置, 检测到的光电流明显滞后于回路放电电流, 开始阶段光电流缓慢增大, 约 3 μs 后才会迅速增加, 其峰值小于靠近电极位置光电流的峰值.

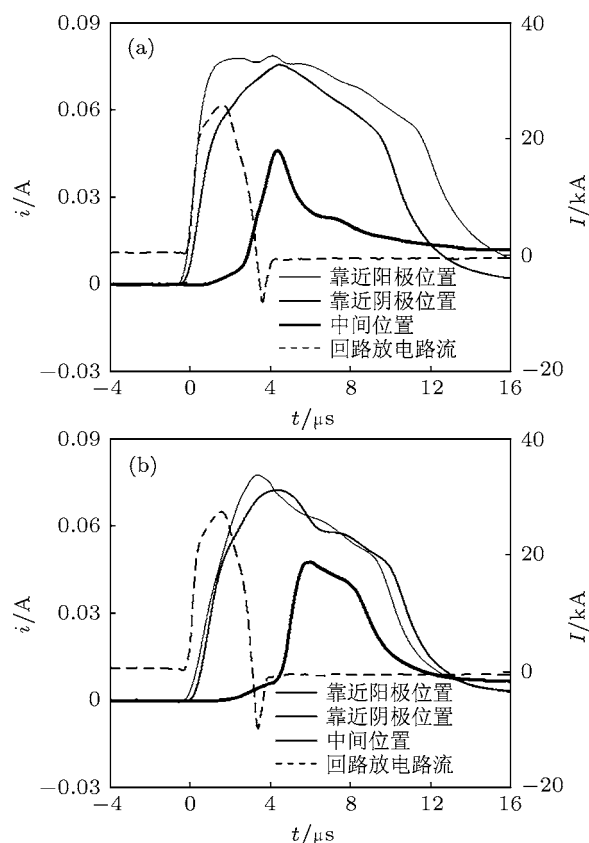


图 3 电爆过程中光电流和回路放电电流

丝端部与电极之间存在气隙, 在靠近电极位置,

光是由气体放电辐射出的. 气体放电过程中, 带电质点与气体中原子相碰撞, 使它们跃迁到较高能级, 并随后自发的跃迁到基态或较低能级, 相应的辐射出光, 属于“非热发光”^[18]. 这种光几乎在气体放电发生的同时就会辐射出来, 检测到的光电流会迅速增加到最大. 而在中间位置, 光是由金属丝爆炸辐射出的. 金属丝爆炸要经过固态加热、熔化、气化和金属蒸气击穿放电的过程. 在开始阶段, 光是由高温金属原子热运动改变其能量状态而辐射出的, 属于“热发光”, 其光照度的大小由温度直接决定, 温度越高, 光照度越大^[19]. 因此检测到的光电流要明显滞后回路放电电流, 并且开始阶段会缓慢增大. 由以上分析可知, 气体放电过程辐射出光的特征是: 几乎与回路放电电流同时产生, 并且光电流会迅速增加到最大. 而金属丝爆炸过程辐射出光的特征是: 明显滞后回路放电电流产生, 并且在开始阶段光电流缓慢增加.

接触式丝电爆三个位置的光电流变化和回路放电电流波形如图 3(b) 所示. 可以看出, 在靠近电极位置, 光电流仍具有气体放电辐射出光的特征, 可以确定, 在靠近电极位置也存在气体放电现象. 只是在这种情况下, 光电流要稍微滞后回路放电电流约 $0.5 \mu\text{s}$, 这是由于金属丝与电极接触, 大电流首先通过接触的方式导入, 随后才在接触点附近出现气体放电现象. 在中间位置, 光电流明显滞后于回路放电电流产生, 并且开始阶段光电流缓慢增大, 与金属丝爆炸辐射出光的特征相同. 可见, 这个位置的光仍然是金属丝爆炸辐射出的. 通过以上试验可知, 接触式丝电爆过程与气体放电式丝电爆过程相似, 丝端部也存在气体放电现象, 只是此时的气体放电发生时间要稍微滞后于回路放电电流.

3.2 丝电爆过程的电极烧损和“积瘤”

接触式丝电爆过程和气体放电式丝电爆过程对电极的烧损程度和“积瘤”产生情况明显不同. 图 4(a) 为接触式丝电爆后的电极典型照片. 可以看出, 电极上有明显烧损产生的弧坑, 弧坑直径大小约 2 mm , 并且总有一段长度约 $0.5\text{--}2 \text{ mm}$ 小断丝不能爆炸残留下来, 有时会直接熔焊在烧损弧坑的中心处, 形成“积瘤”残留在电极上.

图 4(b) 为气体放电式丝电爆后电极的典型照片. 这种情况下, 电极上没有出现明显烧损而形成的弧坑, 也没有发现不能电爆的小断丝形成“积瘤”残留. 可见, 电流从电极导入到金属丝的方式对电极烧损程度和“积瘤”产生有重要影响. 气体放电式

丝电爆过程对电极烧损要轻微得多, 并且可以避免电极上“积瘤”的产生.

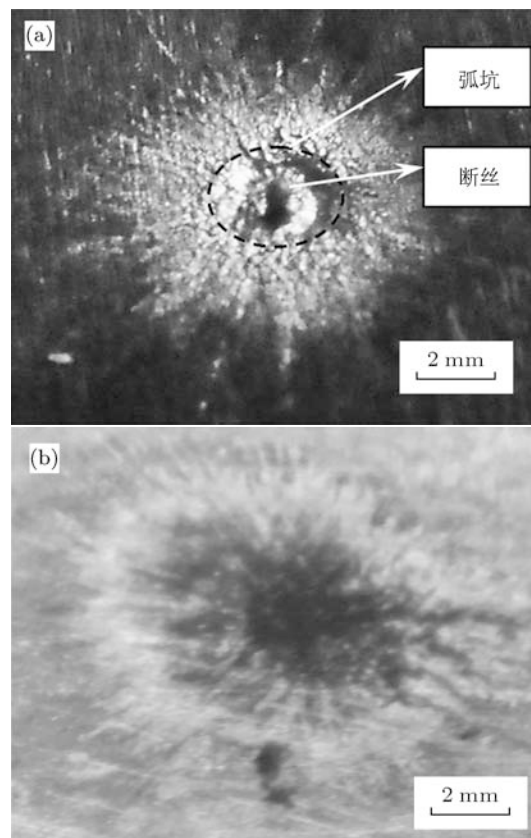


图 4 丝电爆过程电极烧损特征

3.3 电爆产物显微观察

图 5 为石英探针收集的电爆产物的扫描电镜典型照片. 金属丝端部的爆炸产物为液滴状大颗粒, 尺寸大概在 $2 \mu\text{m}$ 到 $30 \mu\text{m}$ 之间, 如图 5(a) 所示. 这种形貌的产物, 一般是由金属熔滴直接溅射到基体表面, 迅速冷凝后形成^[20]. 因此, 金属丝端部主要形成了熔融粒子. 中间大部分金属丝形成的产物与丝端部的产物明显不同, 主要为近似球形的小颗粒 (粒径 100 nm 左右) 和少量 $1 \mu\text{m}$ 左右的大颗粒组成, 如图 5(b) 所示. 形成这种产物的过程与电爆制粉过程很相似, 电爆过程中的金属气相粒子在膨胀过程中冷凝成微小颗粒, 然后吸附堆积在探针表面. 因此, 金属丝中间部分主要形成气相粒子. 丝电爆过程中, 金属丝两端部主要形成熔融粒子, 而中间部分主要形成气相粒子的现象, 在接触式丝电爆方法和气体放电式丝电爆方法中都不同程度的存在.

电爆产物所处的相态与沉积在金属丝上的能量密度有关. 能量密度越大, 金属丝气化越充分, 形

成的气相粒子越多, 熔融金属粒子越少, 而能量密度越小, 爆炸产物中熔融金属粒子就越多^[21]. 所以, 沉积在金属丝端部的能量密度要小于沉积在金属丝中间部分的能量密度.

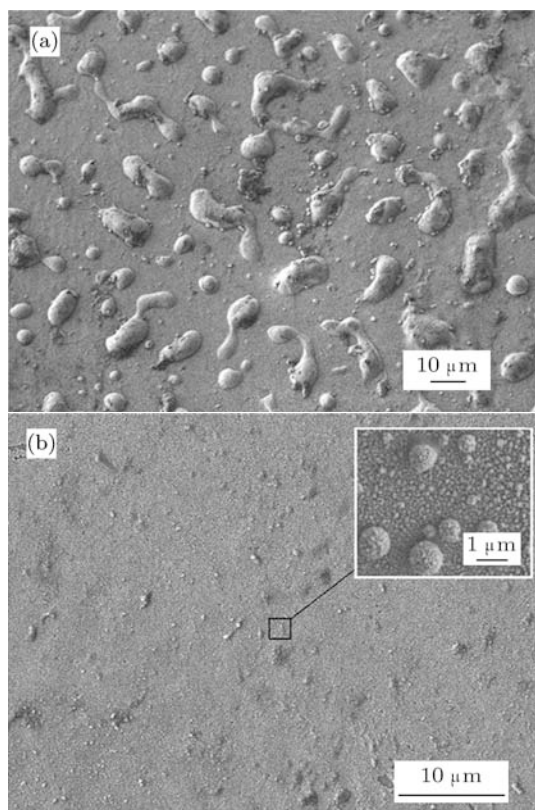


图5 丝端部和中间部分形成产物的典型照片

4 结果讨论

综合以上结果, 通过接触和气体放电这两种方式导入电流电爆时, 在丝端部都存在气体放电现象; 沉积在金属丝端部的能量密度要小于沉积在金属丝中间部分的能量密度; 通过气体放电方式导入电流电爆时, 对电极的烧损明显轻微, 并且可以避免在电极上产生“积瘤”. 根据以上实验事实, 分别对气体放电导入电流和接触导入电流的机制进行如下分析.

气体放电导入电流的机制如图 6(a) 所示, 金属丝端部与电极之间的空隙首先被击穿形成等离子体, 等离子体沿着金属丝表面攀升, 湮没其端部. 如果丝表面产生等离子体, 一部分电流就会通过等离子体流过^[15,22,23]. 在这种情况下, 会有一部分电流不经过丝端部, 而是直接通过等离子体从金属丝表面导入. 等离子体对电流的这种旁路作用会阻碍能量向丝端部沉积, 使金属丝端部的能量密度小于金

属丝中间部分的能量密度. 因此, 中间部分形成气相粒子, 端部形成熔融粒子.

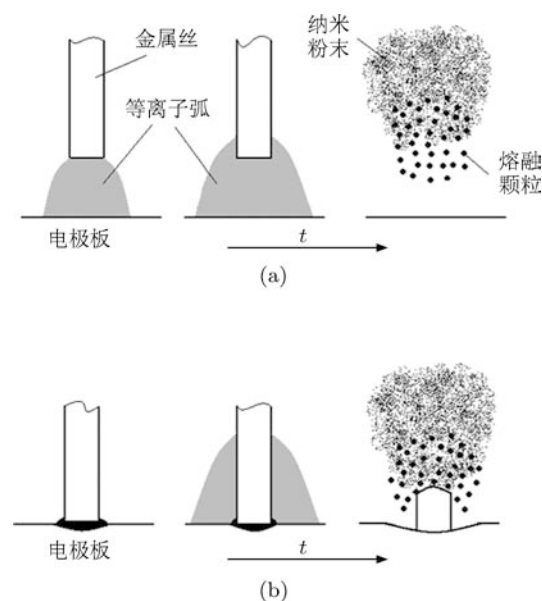


图6 电流导入机理示意图

金属丝与电极接触导入电流的机制如图 6(b) 所示. 由于金属丝与电极的接触点上存在接触电阻, 大电流通过时, 接触点附近的丝端部和电极表面首先熔化. 同时接触点上产生很高的电压, 迅速击穿周围气体形成等离子体并向四周扩散, 进而将金属丝端部湮没. 此时, 大电流主要通过等离子体流过, 从金属丝表面导入. 因而金属丝端部的能量密度会明显减小, 只能形成熔融粒子和没有熔化的小断丝. 需要注意的是, 金属丝端部与电极接触, 电爆过程中会向电极导热, 这似乎也是丝端部形成熔融粒子和小断丝的主要原因之一. 据傅里叶定律, 按照一维导热问题可估算整个过程中向电极导入的热量. 丝电爆时间一般为几个微秒, 接触面积仅为 0.085 mm^2 左右 (金属丝横截面积), 在这种情况下, 计算可知向电极导入的热量仅为几个毫焦. 可见, 导热作用十分有限, 丝端部形成熔融粒子和小断丝主要原因是沉积的能量密度较小. 金属熔融粒子高速运动到探针表面冷却形成微米级大颗粒, 而还没有熔化的断丝则会在电极上形成“积瘤”, 这是接触式丝电爆方法产生大颗粒和“积瘤”的主要原因.

接触导入电流对电极的烧损程度要比气体放电导入时严重得多. 金属丝与电极接触的情况下, 接触点附近的金属丝和电极表面会首先熔化, 电爆过程中, 冲击波作用下熔化的材料脱离电极表面, 引起电极烧损. 而通过气体放电导入电流时, 等离

子体存在时间极短, 电极表面不会出现熔化的现象, 因此, 电极的烧损程度较小.

5 结论

通过气体放电和接触两种方式导入电流电爆时, 在丝端部检测到的光电流都几乎与回路放电电流同时产生, 而在中间位置, 光电流明显滞后. 分析

可知, 在接触导入电流的情况下, 丝端部也存在气体放电现象, 大电流主要通过气体放电产生的等离子体导入金属丝. 等离子体对电流的旁路作用, 会阻碍能量向金属丝端部沉积, 使丝端部的能量密度明显减小. 这是丝电爆方法制备纳米粉过程中产生大颗粒和“积瘤”主要原因. 气体放电方式导入电流时, 电极烧损明显减轻, 并且在电极上可以避免“积瘤”产生.

- [1] Dash P K, Balta Y 2011 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **1** 25
- [2] Lee S B, Jung J H, Bae G N, Lee D J 2010 *Aerosol Sci. Tech.* **44** 1131
- [3] Gao B, Zhang H H, Zhang C 2003 *Acta. Phys. Sin.* **52** 1714 (in Chinese) [高波, 张寒虹, 张弛 2003 物理学报 **52** 1714]
- [4] Wu Y C, Deng J J, Hao S R, Wang M H, Han W H, Zhang N C, Yang Y 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1753 (in Chinese) [伍友成, 邓建军, 郝世荣, 王敏华, 韩文辉, 张南川, 杨宇 2005 强激光与粒子束 **17** 1753]
- [5] ZHANG H H, CHEN Z F 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 748 (in Chinese) [张寒虹, 陈志福 2001 物理学报 **50** 748]
- [6] Roussikh A G, Baksht R B, Labetski A Y, Oreshkin I V I, Shishlov A V, Chaikovskii S A 2004 *Plasma. Phys. Rep.* **30** 944
- [7] Zhu L, Luo R K, Bi X S 2008 *High Voltage Engineering* **34** 2177 (in Chinese) [朱亮, 罗仁昆, 毕学松 2008 高电压技术 **34** 2177]
- [8] Kotov Y A 2003 *J. Nanopart. Res.* **5** 539
- [9] Kwon Y S, Jung Y H, Yavorovsky N A, Illyin A P, Kim J S 2001 *Scripta. Mater.* **44** 2247
- [10] Kotov Y A, Azarkevich E I, Beketov I B, Demina T M, Murzakaev A M, Samatov O M 1997 *Key. Eng. Mater.* **132-136** 173
- [11] Kotov Y A 2009 *Nanotechnol. Rus.* **7-8** 415
- [12] Kwon Y S, An V V, Illyin A P, Tikhonov D V 2007 *Mater. Lett.* **61** 3247
- [13] Kinemuchi Y, Ikeuch T, Suzuki t, Suematsu H, Jiang W H, Yatsui K 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1858
- [14] Giesselmann M, Heeren T, Neuber A, Walter J, Kristiansen M 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 100
- [15] Michael J T 2002 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35** 700
- [16] Volkov V M, Shaykevich I A 1975 *Izv vuzov Fizika* **7** 138
- [17] Wang J D, Wu Z H, Zhang B, Wei Z J, Liao C J, Liu S H 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 5620 (in Chinese) [王金东, 吴祖恒, 张兵, 魏正军, 廖常俊, 刘颂豪 2008 物理学报 **57** 5620] [18] Zhang Z M, Shen Y H,
- [18] Cheng H F 2000 *Optics* (Beijing: Higher Education Press) p67 (in Chinese) [章志鸣, 沈元华, 陈惠芬 2000 光学 (北京: 高等教育出版社) 第 67 页]
- [19] Zheng S B, Zhao Q 2009 *Fundamental of physical optics* (first published) (Changsha: National Defence Industrial Press) p87 [郑少波, 赵清 2009 物理光学基础 (第 1 版) (长沙: 国防工业出版社) 第 87 页]
- [20] Niu E W, Yan D R, He J N, Dong Y C, Li X Z, Feng W R, Zhang J X, Zhang G L, Yang S Z 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 5535 (in Chinese) [牛二武, 阎殿然, 何继宁, 董艳春, 李香芝, 冯文然, 张建新, 张古令, 杨思泽 2006 物理学报 **55** 5535]
- [21] Zhu L, Zhu J, Bi X S 2010 *China Surf. Eng.* **23** 65 (in Chinese) [朱亮, 朱锦, 毕学松 2010 中国表面工程 **23** 65]
- [22] Tkachenko S I, Mingaleev A R, Romanova V M, Ter-Oganes'yan A E, Shelkovenko T A, Pikuz S A 2009 *Plasma Phys. Rep.* **35** 734
- [23] Clinton E H, John D P, Michael J K, Charles R H 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 4992

Mechanism of current injection in the process of wire electrical explosion*

Bi Xue-Song¹⁾ Zhu Liang^{1)†} Yang Fu-Long²⁾

1) (State Key Laboratory of Gansu Advanced Nonferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

2) (College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(Received 6 July 2011; revised manuscript received 20 August 2011)

Abstract

In the process of nanopowder production by the wire electrical explosion, the ablation of electrodes and the formation of micron-size particles are directly influenced by the way the current is injected into the metal wire from the electrodes. Through the channels which are provided by the "contact" between the electrodes and the wire ends, as well as the "breakdown" between them, a series of experiments of electrical explosion is carried out. Results show that the photocurrent detected by photodiodes at the wire ends almost occurs simultaneously with the circuit discharge current, however it at the central section lags behind the circuit discharge current obviously. The initial explosion product of the wire ends is liquid, and that of the other parts of wire is gas. Those results indicate that when the current follows into the "contact", the phenomenon of gas discharge also occurs at the wire ends. Because the plasma provides another current path, the energy density of the wire ends is decreased. Hence, the wire ends cannot explode and form remainder on the electrodes. When the current flows into the "breakdown", the electrodes ablated is slightly obvious, and there was no remainder on the electrodes.

Keywords: wire electrical explosion (wee), gas discharge, illumination intensity, energy density

PACS: 81.20.-n, 52.80.-s, 81.20.Ev

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51061011).

† E-mail: zhul@lut.cn