

介质环境对铜丝电爆炸制备纳米粉体的影响

彭楚才 王金相 刘林林

Effect of medium on nanopowders prepared by Cu wire electrical explosion

Peng Chu-Cai Wang Jin-Xiang Liu Lin-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 075203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.075203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.075203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双绞铝丝纳秒电爆炸实验研究

Nanosecond electrical explosion of twisted aluminum wires

物理学报.2014, 63(20): 205203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.205203>

并联金属丝提高电爆炸丝沉积能量的数值模拟

Numerical simulation of energy deposition improvement in electrical wire explosion using a parallel wire

物理学报.2014, 63(14): 145206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.145206>

高压击穿铜丝物相研究

Study on phase analysis of nanoparticles by high-voltage electrical explosion method of copper wire

物理学报.2012, 61(22): 225206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.225206>

磁控溅射辉光放电特性的模拟研究

Computer simulation of the glow discharge characteristics in magnetron sputtering

物理学报.2012, 61(16): 165101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.165101>

外磁场对介质表面次级电子倍增效应的影响

Effects of an external magnetic field on multipactor on a dielectric surface

物理学报.2012, 61(7): 075101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.075101>

介质环境对铜丝电爆炸制备纳米粉体的影响*

彭楚才 王金相[†] 刘林林

(南京理工大学瞬态物理重点实验室, 南京 210094)

(2014年9月8日收到; 2014年10月22日收到修改稿)

为了探究介质环境对电爆炸制备纳米粉体的影响, 搭建了相应的电爆炸实验平台, 以铜丝为例分别在水和不同空气压力下开展了电爆炸制备纳米粉体实验. 通过 Rogoswki 线圈和高压探头分别测试了电爆炸过程中的电流和电压波形图. 通过电压、电流及能量沉积特征分析了电爆炸的基本过程以及介质环境在电爆炸过程中的作用. 运用透射电子显微镜对爆炸产物进行了粒度分析. 研究发现, 介质环境对于电爆炸过程的影响主要表现在汽化阶段以后, 包括介质对蒸汽膨胀的抑制作用, 介质的电离对于铜丝表面击穿的影响以及其对高温金属蒸汽及等离子体的冷却作用. 水中铜丝电爆炸能够制备局部均匀的小尺寸纳米粉体, 粒度多数集中在 10—20 nm 之间, 但粉体易积聚, 且整体粒度跨越较大. 空气中制备的粉体分散良好, 符合对数正态分布, 基本上分布于 20—100 nm 之间, 平均粒度约为 40 nm.

关键词: 电爆炸, 介质环境, 纳米粉体

PACS: 52.80.Qj, 51.50.+v, 81.07.Wx, 81.20.-n

DOI: 10.7498/aps.64.075203

1 引言

电爆炸制备纳米粉体是指通过脉冲放电技术将能量迅速沉积在导体丝中, 使其在极短的时间内完成固态—液态—气态—等离子体四态的相转变, 最终冷凝结晶为纳米颗粒. 与传统的物理和化学制备方法相比, 电爆炸法具有: 能量转换效率高, 粒度分布均匀、纯度高, 工艺参数调整方便, 方法的通用性强等特点, 是一种非常具有应用前景的纳米粉体制备技术. 目前, 国内外电爆炸技术在纳米材料的制备方面取得了一定的进展^[1-4], 对纳米粉体的种类及尺寸的影响因素进行了初步探索^[5], 并借助于光学, 高速摄影等测试方法对电爆炸机理进行了初步分析等^[6-8]. Lee 先后从气体的种类和气体压力方面展开了研究^[9,10], 周庆等研究了水和空气对能量沉积的影响^[11]. 但是, 对于电爆炸过程中更深层的机理, 特别是爆炸发生之后介质所发挥的作用研究仍处于起步阶段.

一直以来电爆炸技术的研究重心主要集中于

缩短脉冲时间, 提高能量的沉积速率, 并取得了不错的进展. 但是, 适当的放宽脉冲时间, 减小趋肤效应^[12]的影响, 使能量沉积更均匀, 这对于更全面地认识介质环境在电爆炸过程中的作用机理具有重要意义.

本文将以最常见的铜丝为例, 通过增加电路电感, 适当的放宽脉冲时间, 同时对水和不同的气压环境进行实验研究. 结合不同介质环境的特性, 通过电爆炸过程中的电流、电压及能量沉积变化关系, 更好地分析环境介质在纳米粉体制备过程中所起到的作用.

2 实验设备

2.1 实验原理及装置

图 1(a) 为电爆炸实验的电路原理图, 首先利用交直流转换器及高压变压器通过充电回路将电网中的电能充到电容器中. 充电完成后断开充电回路, 接通放电回路开关, 形成一个 RLC 脉冲放电回

* 国家自然科学基金 (批准号: 11272158) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wjx@njust.edu.cn

路. 电容器中的能量通过脉冲放电迅速沉积到爆炸腔体内的金属丝中, 使得其在短时间内经过固态、液态、气态、等离子体四个状态的转变, 最终发生爆炸.

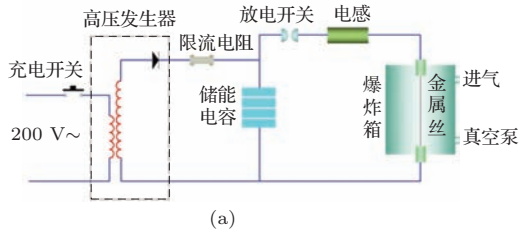


图1 电爆炸 (a) 电路原理图; (b) 实验平台

2.2 实验参数及材料选取

本实验选用铜丝作为实验材料, 为了探究介质环境的影响, 使用统一的电路和材料参数. 充电电容 C 为 $10 \mu\text{F}$, 充电电压 U_0 为 5 kV , 电路电感 L 为 $10 \mu\text{H}$, 所选铜丝半径 0.075 mm , 长度为 80 mm , 爆炸箱体中的环境设置如表 1 所示. 利用真空泵及真空表控制箱体中的气压, 使用脉冲高压探头(泰克 P6015A 型) 和自积分 Rogowski 线圈分别记录爆炸过程中金属丝两极间的电压和回路电流, 并通过示波器记录, 如图 1(b) 所示.

表1 实验介质环境表

序号	1	2	3	4
环境	水	1 bar 空气 ¹⁾	0.1 bar 空气	0.01 bar 空气

1) $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$.

3 实验结果及分析

3.1 电爆炸基本过程分析

在铜丝的电爆炸过程中, 能量沉积起到一个非常重要的作用. 实验中铜丝沉积的能量通过 (1) 式来计算. 而理论上铜丝熔化及汽化所需要的能量可根据简化 (2), (3) 式得到.

$$E_R(t) = \int_0^t u_R(t) \cdot i_R(t) dt, \quad (1)$$

$$e = c_s \cdot \Delta T_s + h_f + c_l \cdot \Delta T_l + h_b. \quad (2)$$

铜丝消耗的总能量为

$$E = \pi r^2 l \rho e. \quad (3)$$

其中 u_R 和 i_R 分别为铜丝两端的电压和电流, E_R 为实验中铜丝上沉积的能量. e 为单位体积铜丝完全蒸发所需总能量, c_s 和 c_l 分别是铜丝固态和液态的平均比热容, ΔT_s 和 ΔT_l 分别为铜丝固态和液态加热的温度变化, h_f 是熔化热, h_b 为汽化热, E 为整根丝由固态加热到气态所需总能量, r 是铜丝半径, l 是铜丝长度, ρ 为铜丝的密度.

表2 各阶段理论与实际的沉积能量

	E_s/J	E_f/J	E_l/J	E_e/J	E_{end}/J
理论	5.7	8.3	23.0	82.5	—
实际	8.6	12.9	31.7	56.2	94.9

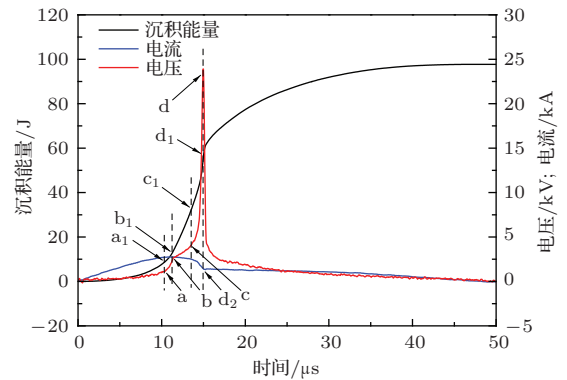


图2 铜丝电爆炸的电流、电压和沉积能量图

图 2 为 $l = 80 \text{ mm}$, $r = 0.075 \text{ mm}$ 的铜丝在 $U_0 = 5 \text{ kV}$, $C = 10 \mu\text{F}$, $L = 10 \mu\text{H}$ 以及介质环境为 1 bar 空气下实验的电流、电压及沉积能量图. 根据 (2) 和 (3) 式计算得到电爆炸各阶段所需的能量如表 2 所示. 图 2 中, a, b, c, d 分别是电压曲线上的四个明显的转折点, 其对应的沉积能量分别为 E_s , E_f , E_l , E_e , E_{end} 为最终的总沉积能量. a 点之前为金属丝固态加热阶段, 此阶段电阻小, 电压上升比较缓慢, 能量沉积速度较慢. a—b 段铜丝从固态熔化为液态, 物态的转变过程中, 电阻明显迅速上升, 随之电压迅速上升. b 点之后进入液态加热阶段, 此过程中电阻变化不大, 电压平稳上升. c 点之后铜丝进入汽化阶段, 随着外层汽化的进行, 导电的过热液态铜的直径减小, 温度升高, 电阻率急剧

增大, 电流随之下降, 电路中的感生电动势将减缓电流的下降, 使得爆炸丝的电阻电压持续上升, 与此同时金属丝自身的电感也能产生一个正向的电感电压, 两部分电压共同构成d点的远高于电容充电电压的峰值. 在汽化之前的各阶段, 金属丝加热过程中温度的上升速率较快, 由于惯性作用, 环境介质对铜丝热膨胀的抑制作用以及电磁箍缩效应对导电粒子的影响, 使得金属内部压强比较大, 金属呈现为过热状态(如表2所示), 基本上可以认为此前各阶段整根金属丝处于相对均匀的物态转变过程中. 然而, 当达到d点, 铜丝开始进入相爆炸阶段, 此时沉积的能量为56.2 J, 还达不到铜丝完全汽化所需要的能量82.5 J, 说明在电流的趋肤效应下, 只有外层的部分铜丝被汽化. 同样由于外部环境的压力、铜蒸汽本身的惯性以及电磁箍缩效应等限制了其向外扩张, 而内层新产生的铜蒸汽又不断压缩外层的蒸汽, 使得蒸汽内部压强和温度同时上升, 直致过热蒸汽及等离子体的形成, 同时也引起表面介质电离现象的出现. 结合d和d₂点分析, 在强电场作用下, 丝表面等离子体被击穿, 丝内过热液态铜和丝表面等离子体通道并联放电, 电流出现一个明显的转折, 同时导体丝的击穿以及丝中的能量随着爆炸瞬间释放导致铜丝两端电压大幅下降. 随着铜蒸汽的喷发以及等离子体的持续加热, 过饱和的铜蒸汽开始凝核生长.

3.2 介质环境对电爆炸过程的影响

图3是铜丝在相同材料及外电路参数, 不同环境条件下电爆炸的电流电压及沉积能量波形图. 从(a)和(b)可以看出, 不同介质环境中, 在汽化前的阶段, 其电压变化基本一致. 而水中电爆炸在汽化阶段的电压上升速率相对缓慢一些, 能量沉积的时间更长, 同时爆炸前所达到的峰值电压也更高, 这说明环境介质对电爆炸的影响主要体现在汽化阶段以后. 水中的电流随着汽化的进行一直降低, 并随着第一次爆炸喷发, 电流出现了中断, 电爆炸结束后, 两极间存在残余电压. 而在不同气压环境的空气中, 电流在下降的过程中都会出现一个转折, 并最终随着电压一起降为零, 电容中的能量完全释放. 可见, 气体和液体介质环境对电爆炸过程的影响是非常明显的.

从三个方面来分析介质的这一影响: 首先, 是介质压强对金属蒸汽膨胀的抑制作用. 从图3(b)

可以看出, 随着介质压强的增加, 其爆炸的起点有所延迟, 沉积下来的能量增加, 金属丝的内部温度压强及电阻变化幅度增大, 达到的峰值电压也明显增高. 如表3中所示, 其中 U_e 和 E_e 分别代表电爆炸的峰值电压和其对应时刻的沉积能量. 由于水的密度大, 可压缩性远不如气体, 这将比气体介质更大程度上抑制金属蒸汽的膨胀, 延长金属的汽化过

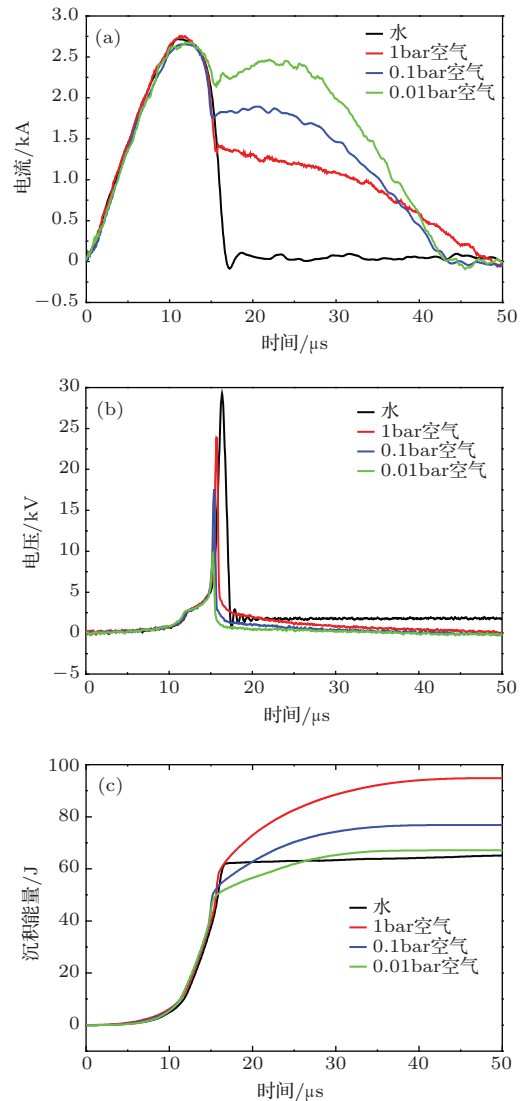


图3 不同介质环境下铜丝电爆炸的 (a) 电流图; (b) 电压图; (c) 沉积能量图

表3 电爆炸沉积能量及峰值电压

爆炸环境	E_e /J	E_{end} /J	U_e /kV
水	62.3	64.5	29.3
1 bar 空气	56.2	94.9	23.9
0.1 bar 空气	48.3	78.9	17.6
0.01 bar 空气	44.2	69.3	9.8

程, 爆炸前沉积下的能量也更高. 其次, 环境介质的电离作用. 清华大学的毛志国等通过纹影法观察电爆炸的过程中发现金属蒸汽喷发前, 表面气体先被击穿^[13]. 燕文宇等也在以氩气为环境介质的电爆炸实验中检测到较强氩的等离子体谱线^[14], 证明气体的电离是存在的. 金属丝表面的高能电子以及高温的金属蒸汽会以碰撞电离以及热电离等方式使得表面的环境介质被部分电离. 气压增高, 减小了电子的平均自由程, 能阻碍撞击电离的发展^[15]. 分析图 3(a) 和 (b) 可以发现, 气压越高, 其击穿后残余电压越高, 而电流反而越低, 即在更高气压下导电粒子的密度更小, 电阻更大. 同时, 水分子的平均自由程远比空气分子的小, 其分子更难被加热电离, 因此水介质中, 后续的击穿没有发生. 所以, 这也印证了气体介质的电离对于后续的击穿放电起到关键的作用. 最后, 介质环境对高温等离子体的冷却作用. 在爆炸发生后等离子体及高温气体分子向四周喷发, 与周围的介质分子发生碰撞, 并迅速冷却下来. 液体介质的密度远大于气体, 其冷却作用远大于气体, 因此水中爆炸发生后, 铜蒸汽及其等离子体被迅速冷却, 没有形成进一步的击穿. 同时, 气体压强越大, 密度越大, 粒子间相互碰撞的概率越高, 冷却速率越快, 金属及气体等离子体的密度越低. 因此, 图 3(a) 中, 气压越高, 击穿后产生的电流越低.

3.3 粉体的透射电镜分析

电爆炸法属于一种自上而下与自下而上相结合的纳米粉体制备技术, 纳米粉体合成过程包括: 超饱和状态的形成, 成核及后续生长^[16]. 图 4(a) 和 (b) 分别为铜丝在水中电爆炸所制备纳米粉体局部和整体的透射电子显微镜 (TEM) 照片, 图 4(c) 和 (d) 为在 1 bar 的空气中制备的纳米粉体. 根据均匀成核理论, 高初始浓度有助于形成大量晶核, 由表 3 和图 3 可知, 在爆炸发生之前, 水中铜丝沉积的能量更高, 而爆炸发生之后水中铜蒸汽扩张的速度更缓慢, 这使得爆炸后水中铜蒸汽和等离子体的浓度更高, 形成更高的晶核密度. 同时与水接触部分的铜蒸汽冷却速率更快, 高浓度的晶核及过快的冷却速率将抑制纳米粉体的后续生长, 形成局部均匀的小尺寸 (10—20 nm) 纳米粉体, 容易积聚, 如图 4(a) 所示. 相比之下, 空气中制备的大部分粉体呈球形或多面体, 且分散良好, 如图 4(c) 和 (d) 所示. 通过对图 4(d) 中粉体粒度进行统计, 发

现其尺寸符合对数正态分布规律, 基本上分布于 20—100 nm 之间, 平均粒度为 40 nm, 如图 5 所示. 但是, 由图 3(c) 可以发现爆炸发生后水中由于放电的中断, 能量不再沉积到铜丝中, 内部未完全蒸发的铜丝将以小液滴的形式往外喷发, 冷凝下来形成较大的粉体颗粒, 如图 4(b) 所示. 而气体环境中仍有继续的等离子体放电, 通过适当地调整气压, 可使总沉积能量 E_{end} 大于整根丝完全汽化所需要的能量, 如表 3 所示. 有利于铜丝更充分汽化及扩散, 形成尺寸更为均匀的纳米粉体.

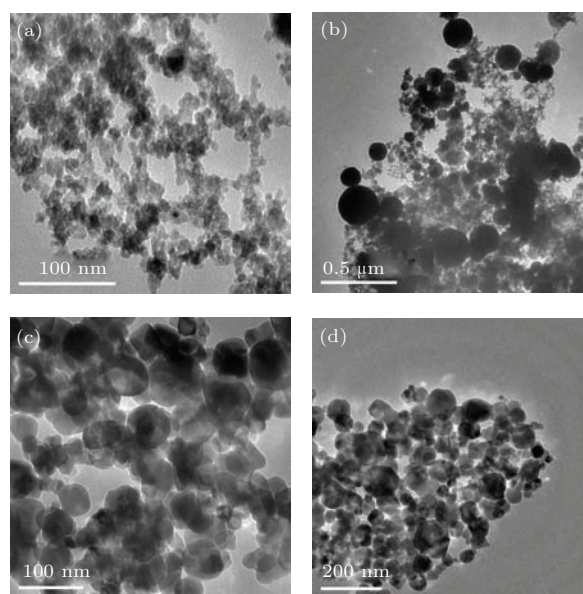


图 4 (网刊彩色) 不同介质环境下铜丝电爆炸产物 TEM 图 (a) 水中局部图; (b) 水中整体图; (c) 空气中局部图; (d) 空气中整体图

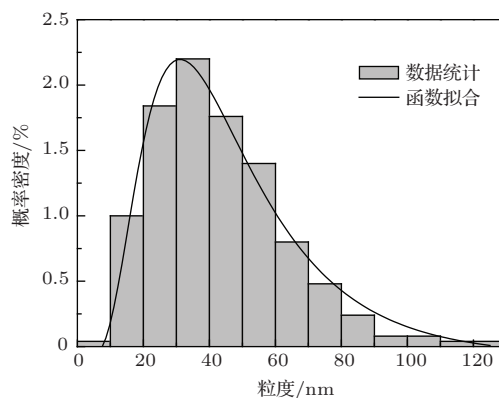


图 5 (网刊彩色) 空气中铜丝电爆炸粉体的粒度分布

4 结 论

本文通过不同介质环境下铜丝的电爆炸实验, 结合电爆炸过程中的电压、电流和沉积能量的计算

分析了电爆炸各阶段的变化特性. 并分析了不同相态的介质对纳米粉体形态和尺寸的影响. 研究表明:

1) 介质环境对于电爆炸过程的影响主要表现在汽化阶段以后, 气体介质密度越大, 爆炸开始时间越靠后, 爆炸之前所沉积的能量越高.

2) 介质在电爆炸过程中起到的作用包括: 介质压强对金属蒸汽膨胀的抑制; 环境介质的电离对于铜丝表面击穿的影响; 爆炸发生后, 介质环境对高温金属蒸汽及等离子体的冷却.

3) 水中铜丝电爆炸能够制备局部均匀的小尺寸纳米粉体, 粒度多数集中在10—20 nm之间, 但粉体易积聚, 且整体粒度跨越较大. 空气中制备的粉体分散良好, 符合对数正态分布, 基本上分布于20—100 nm之间, 平均粒度约为40 nm.

参考文献

- [1] Wu C Y, 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]
- [2] Bac L H, Kim J S, Kim J C 2010 *Res Chem Intermed* **36** 795
- [3] Li S W, Feng G Y, Li W, Han J H, Zhou C Y, Yin J J, Yang C, Zhou S H 2012 *Acta Phy. Sin.* **61** 225206 (in Chinese) [李世文, 冯国英, 李玮, 韩敬华, 周晟阳, 殷家家, 杨超, 周寿桓 2012 物理学报 **61** 225206]
- [4] Ishihara S, Koishi T, Orikiawa T, Suematsu H, Nakayama T, Suzuki T, Niihara K 2012 *Intermetallics* **23** 134
- [5] Zou X B, Mao Z G, Wang X X, Jiang W H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 045206
- [6] Antony J K, Vasa N J, Chakravarthy S R, Sarathi R 2010 *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **111** 2509
- [7] Ishihara S, Shikoda Y, Tokoi Y, Nakayama T, Suematsu H, Suzuki T, Jiang W H, Niihara K 2011 *Scripta Materialia* **64** 110
- [8] Zhao J P, Zhang Q G, Zhou Q, Yan W Y, Qiu A C 2012 *High Power Laser And Particle Beams* **24** 544 (in Chinese) [赵军平, 张乔根, 周庆, 燕文宇 2012 强激光与离子束 **24** 544]
- [9] Lee Y S, Bora B, Yap S L, Wong C S, Bhuyan H, Favre M 2012 *Powder Technology* **222** 95
- [10] Bora B, Wong C S, Bhuyan H, Lee Y S, Yap S L, Favre M 2013 *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **117** 1
- [11] Zhou Q, Zhang Q G, Zhang J, Zhao J P, Ren B Z, Pang L 2011 *High Voltage Engineering* **37** 369 (in Chinese) [周庆, 张乔根, 张俊, 赵军平, 任保忠, 庞磊 2011 高电压技术 **37** 369]
- [12] Wall D P, Allen J E, Molokov S 2005 *Applied Physics* **98** 023304
- [13] Mao Z G 2009 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [毛志国 2009 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [14] Yan W Y, Zhang Q G, Zhao J P, Liu L C 2014 *High Power Laser And Particle Beams* **26** 259 (in Chinese) [燕文宇, 张乔根, 赵军平, 刘隆晨 2014 强激光与离子束 **26** 259]
- [15] Shen Q G, Fang Y, Zhou Z C, Wang D Z 2012 *High Voltage Engineering*(Beijing: China Electric Power Press) p66–68 (in Chinese) [沈其工, 方瑜, 周泽存, 王大忠 2012 高电压技术都 (北京: 中国电力出版社) 第66—68页]
- [16] Cao G Z, Wang Y (translated by Dong X L) 2012 *Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications 2nd Edition* (Beijing: Higher Education Press) p41–49 (in Chinese) [曹国忠, 王颖著 (董星龙译) 2012 纳米结构与纳米材料: 合成, 性能及应用: 第2版 (北京: 高等教育出版社) 第41—49页]

Effect of medium on nanopowders prepared by Cu wire electrical explosion*

Peng Chu-Cai Wang Jin-Xiang[†] Liu Lin-Lin

(Science and Technology on Transient Physics Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(Received 8 September 2014; revised manuscript received 22 October 2014)

Abstract

To analyze the influence of environmental media on nanopowders prepared by electrical explosion method, electrical explosion experiment is carried out using copper wire under water and different air pressures. Voltage and current waveforms are measured by Rogowski coil and high-voltage probe. The basic process of electrical explosion and the function of environmental media in the course of electrical explosion are analyzed by combined characters of the voltage, current, and energy deposition. The particle size of explosive products is analyzed by transmission electron microscopy. Results show that it is mainly after the vaporization stage of the copper wires that the medium may affect the formation of the products. Effects of the medium on the electric explosion of metal wires include the restriction of the medium on the expansion of the metal vapor, the influence of the medium ionization on breakdown of the copper surface as well as the cooling of the copper vapor and the plasma. For the water medium, the diameter of the products distributes in a wide range but is mainly in the range about 10 to 20 nm, while in the air medium, the average particle size is about 40 nm, basically ranging from 20 to 100 nm.

Keywords: electrical explosion, medium, nanopowders

PACS: 52.80.Qj, 51.50.+v, 81.07.Wx, 81.20.-n

DOI: [10.7498/aps.64.075203](https://doi.org/10.7498/aps.64.075203)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11272158).

[†] Corresponding author. E-mail: wjx@njjust.edu.cn