

## 保护气氛中丝电爆喷射沉积工艺

白学虎<sup>1</sup>, 朱亮<sup>1,2</sup>, 韩峰<sup>1</sup>, 王旭东<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 开发了在保护气氛中丝电爆喷射沉积装置, 在小直径圆柱体上选用纯铝丝进行电爆喷射沉积试验。分析沉积层形成过程中的影响因素与显微硬度。结果表明: 在试验沉积距离下, 宽度为 3 mm 的约束槽中发生电爆获得约 4 mm 宽的沉积层。整个圆柱面搭接沉积后, 沉积层的厚度趋于均匀。当电容充电电压为 9 kV, 铝丝直径为  $\phi 0.3$  mm 时, 获得的沉积层的孔洞率最小、硬度值最高。沉积层中晶粒尺寸约为 4  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 丝电爆; 喷射沉积; 孔洞率; 硬度

**中图分类号:** TG174.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2020)03-0158-05

## Spray deposition process of wire electrical explosion in protective atmosphere

Bai Xuehu<sup>1</sup>, Zhu Liang<sup>1,2</sup>, Han Feng<sup>1</sup>, Wang Xudong<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

**Abstract:** A wire electrical explosion spray deposition device was developed with a protective atmosphere, and a pure aluminum wire was used for the electrical explosion spray deposition test on a small diameter cylinder. The influencing factors and the micro-hardness were analyzed. The results show that under the test deposition distance, an electrical explosion is occurred in the constrained groove with a width of 3 mm and a deposition layer with width of about 4 mm is obtained. After the entire cylindrical surface is lapped, the thickness of the deposition layer is tended to be uniform. When the charging voltage of the capacitor is 9 kV and the diameter of the aluminum wire is  $\phi 0.3$  mm, the obtained deposition layer has the smallest void ratio and the highest micro-hardness. The grain size in the deposited layer is about 4  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** wire electrical explosion; spray deposition; void ratio; hardness

随着表面改性技术的发展与创新,为了在金属材料表面获得较好的耐磨、抗腐蚀等特殊性能<sup>[1-3]</sup>。电爆喷射沉积技术是在瞬时的高压脉冲放电过程中产生的大电流而使沉积材料发生爆炸,爆炸产物在冲击波的作用下在基体上形成沉积层的过程<sup>[4]</sup>。电爆喷射沉积因为具有形成的沉积层结合强度高、基体受热影响较小和爆炸产物速度快等特点,使得电爆喷射沉积在各种生产应用中逐渐被使用<sup>[5-6]</sup>。目前,许多电爆试验在大气中进行,使易氧化材料在电爆过程中极易氧化,限制了沉积层的生产与应用。在丝电爆过程中,许多试验过程是将金属丝直接固定在两高压电极之间,两电极与金属丝在电爆过程中要保证可靠接触<sup>[7-8]</sup>。但是,这样不能实现多次的连续电爆炸,致使

电爆沉积的效率降低。同时,这种接触方式使电极极易烧蚀,几次喷射沉积后则需要更换新的电极。

本文针对电爆时的以上问题,在气体放电<sup>[9]</sup>的方式导入电流的基础上,开发用于小直径圆柱面上进行丝电爆喷射沉积的装置。在保护气氛的爆炸腔室中,将铝丝送入电极两端,实现连续丝电爆定向喷射沉积。

### 1 试验材料及方法

图1为保护气氛中丝电爆喷射沉积设备,该设备主要由传动机构、进丝机构、基体传动机构、载丝轂、高压电路等组成。载丝轂上均布6个压丝杆将金属丝固定于载丝轂约束槽中。由电机带动载丝轂转动,金属丝不断缠绕于载丝轂约束槽中,当端头金属丝转动到电极发生电爆位置时,高压电路通过电极与金属丝之间的气体放电使金属丝发生爆炸。同时,压丝杆转动至挡板时,在挡板作用下压丝杆被抬起,不断旋转越过挡板后,恢复到原状将金属丝压进载丝轂约束槽中。上述过程不断进行,金属丝缠绕一圈后比电极提前进入下一层约束槽中缠绕。当该层6段金属都发生电爆

收稿日期: 2019-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(51765038)

作者简介: 白学虎(1989—)男,硕士研究生,主要从事电爆喷射沉积方法及设备研究, E-mail: 502915748@qq.com。通讯作者: 朱亮, 博士生导师, 主要从事焊接工艺及设备、电爆喷涂工艺及设备研究, E-mail: zhul@lut.cn

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2020.03.030

炸后,电极自动进入下一层进行电爆。该过程不断上下往复进行,避免了载丝毂在同一位置不断电爆的烧损。电爆3次后,通过旋转基体传动机构,实现沉积层在基体上的连续沉积。

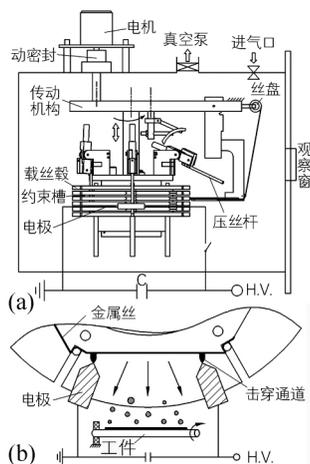


图1 丝电爆喷射沉积设备  
(a) 试验装置; (b) 电爆示意图

Fig. 1 The device of wire electrical explosion spray deposition  
(a) testing apparatus; (b) schematic diagram of electrical explosion

试验选用氩气为保护气。使用真空系统将电爆腔室抽到  $10^{-2}$  Pa 以下,再将氩气充入电爆腔室至大气压状态,最后启动电爆装置,向高压电路充电后,将金属丝送至电极两端发生电爆。基体材料为圆柱形 Q235 钢,直径为  $\phi 5$  mm,长度为 40 mm。基体在试验前利用丙酮对表面的油污等进行清洗,然后在基体表面进行喷砂处理。

试验选取直径分别为  $\phi 0.3$ 、 $\phi 0.4$  和  $\phi 0.5$  mm 的铝丝作为沉积材料;电容器 C 的电容量为  $8.88 \mu\text{F}$ ,电容器的初始充电电压分别为 8、9 和 10 kV;电极间距为 70 mm;基体沉积距离为 35 mm。将试样进行电火花线切割并对试样截面抛光处理,利用扫描电镜对沉积层表面与已抛光的截面进行观察。利用 HXD-1000TMC 型数字显微硬度仪对沉积层显微硬度进行测量。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 圆柱体上截面形貌

以直径为  $\phi 0.3$  mm,电容充电电压为 8 kV 为参数进行喷射沉积,在扫描电镜下观察到一层沉积层的微观截面形貌,如图 2(a) 所示。通过 2(a) 宏观表面形貌发现,沉积层在 3 mm 的约束槽作用下最终得到宽度约为 4 mm 的沉积层。沉积层的厚度值在中心轴处最高,逐渐向两侧均匀递减。图 2(b) 为 3 层沉积层截面图。从图 2(b) 中可看出,沉积层的厚度在圆柱体表

面上沉积 3 层后已经趋于均匀。

当基体圆弧面弧度最高点与约束槽中心正对时,此时电爆后的熔融粒子以垂直于基体的速度与基体相撞击。当远离圆弧面最高点后,熔融粒子与基体的相互撞击便形成了一定的角度,此时对圆弧面中心相撞击的粒子而言,它运动的轨迹较长,粒子在运动时温度的降低,以及熔融液滴本身的冷凝。同时,熔融粒子在与基体相撞时,必有部份粒子会沿着圆弧面与基体发生弹性碰撞,沉积于该部份的粒子数减少,从而导致较圆弧中心面上厚度的减小。当远离圆弧面中心越远时,在圆弧面上厚度的减小的趋势越明显,从而得到如图 2(a) 所示的沉积层。对沉积层进行 3 层沉积形成第 1 个沉积层,然后对基体进行旋转,再进行 3 层沉积形成第 2 个沉积层,依次对基体旋转形成第 3 个沉积层,每 2 个沉积层互相搭接,得到如图 2(b) 所示的均匀分布的沉积层。

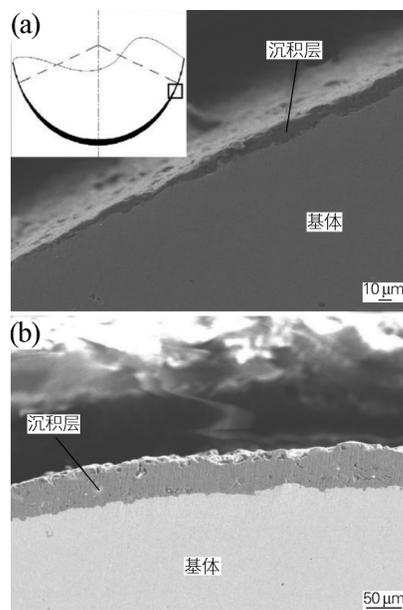


图2 沉积层截面形貌

(a) 1 层沉积层; (b) 3 层沉积层

Fig. 2 Cross-section morphologies of the deposition layer  
(a) one deposition layer; (b) three deposition layers

### 2.2 过程参数对沉积层的影响

为了研究铝丝直径对沉积层的影响,选取直径分别为  $\phi 0.3$ 、 $\phi 0.4$  和  $\phi 0.5$  mm 的铝丝在充电电压为 9 kV 时进行电爆试验。图 3(a) 为铝丝直径为  $\phi 0.3$  mm 时的沉积层表面形貌。从图 3(a) 中可以看出,沉积层表面光滑,电爆后产物相互搭接紧密,没有明显的粒子堆积的现象。通过分析认为,形成该沉积层的过程主要是铝丝在发生电爆时电流对铝丝的加热作用较充分,使铝丝完全爆炸为液态熔滴粒子,爆炸后的粒子在冲

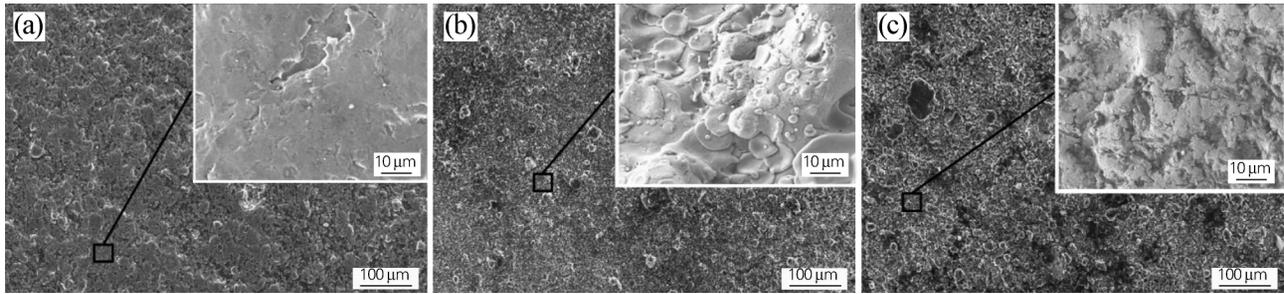


图 3 不同丝径下的沉积层表面形貌

Fig. 3 Surface morphologies of the deposition layer with different wire diameters  
(a)  $\phi 0.3$  mm; (b)  $\phi 0.4$  mm; (c)  $\phi 0.5$  mm

击波的作用下以很快的速度撞击于基体,在基体上发生扁平化,最后液态粒子在基体上铺展充分并凝固,表面形成的沉积层中粒子结合较紧密。

图 3 (b) 为铝丝直径为  $\phi 0.4$  mm 时的表面形貌图。该沉积层中明显存在未完全相互搭接的扁平粒子。电爆后的液态粒子与基体碰撞,发生很少的液滴的铺展,使得沉积层表面不光滑。通过分析认为,主要是电爆炸后粒子的颗粒度变大,和基体撞击时不能很好的铺展便已经凝固,最终粒子间的搭接程度变弱。图 3 (c) 为铝丝直径为  $\phi 0.5$  mm 时的表面形貌图,从沉积层表面形貌分析认为,在该沉积层的形成过程中,对铝丝的加热很不充分,致使在发生爆炸后形成的粒子尺寸较大,粒子运行时具有的初速度减小。在相同的沉积距离下,粒子运行时间变长,粒子到达基体熔融粒子便已经部分凝固。同时,粒子到达基体时动能较小,在基体上来不及铺展便已经凝固。随着粒子的不断累积,在已到达的粒子的地方存在粒子的叠加,各叠加的粒子之间未形成良好的连接,从而导致了在未铺展的粒子中间存在较大的间隙。

对铝丝直径为  $\phi 0.4$  mm,分别在铝丝两端加载 8、9 和 10 kV 的电压进行试验,利用扫描电镜对剖切并且抛光的试样截面进行观察分析,如图 4 所示,了解沉

积层与充电电压的相关性。试验结果发现,在不同的电压下,沉积层截面形貌具呈现了一定的变化规律。当加载于铝丝两端的电压为 8 kV 时,沉积层中孔洞较多,且孔洞的尺寸约为  $10 \mu\text{m}$ ,如图 4 (a) 所示。当加载于铝丝两端的电压为 9 kV 时,沉积层中孔洞尺寸减小,数目也相对减少,如图 4 (b) 所示。当加载于铝丝两端的电压为 10 kV 时,沉积层中孔洞的数目明显减小,孔洞的尺寸也约为  $3 \mu\text{m}$ ,如图 4 (c) 所示。

通过以上分析,利用能量密度分析沉积层与试验参数之间的关联性。加载于铝丝上的能量密度的大小对铝丝爆炸产物到达基体时的温度、运行速度以及产物粒径大小具有很大的影响。当沉积于铝丝中的能量密度较小时,爆炸产生的液态粒子中大颗粒比较多,在冲击波的作用下,爆炸产物的起始运行速度小,在相同的位移下,爆炸产物运行时间较长,运行时散发的热量较多。同时,由于爆炸产物能量的减少,使对基体的相对作用力较小,也导致了液滴粒子的表面张力较大,与基体接触后不能更好的润湿,熔融液滴不能更好的铺展,液滴之间不能很好的搭接,从而形成的沉积层中孔洞较多。当铝丝中能量密度增加时,爆炸产物中熔融粒子的颗粒度逐渐减小,在冲击波的作用下这些小尺寸的液态粒子在较高的速度下与基体相撞。这些粒子

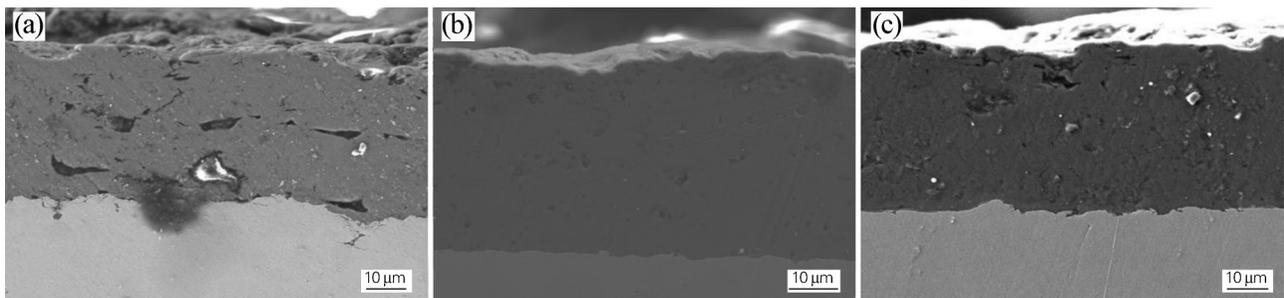


图 4 不同电压下的沉积层截面形貌

Fig. 4 Cross-section morphologies of the deposition layer at different voltages  
(a) 8 kV; (b) 9 kV; (c) 10 kV

在运行中散失的热量较少,对基体的作用力更大,能在基体上更好的铺展。在多次的沉积后,沉积层中每层良好的搭接使沉积层中孔隙率明显减小,沉积层致密度较高。当铝丝中能量密度超过一定值时,在铝丝表面发生沿面放电现象<sup>[10]</sup>,导致铝丝内沉积能量减少,爆炸后熔融粒子中大颗粒产物的数量增多。粒子在基体上的铺展减弱,沉积层中孔洞数目增加。当铝丝中能量密度最高时,即铝丝直径为 $\phi 0.3$  mm,电容充电电压为10 kV时,在铝丝表面发生了沿面放电,从而使获得的沉积层与同直径、电容充电电压为9 kV下的沉积层相比,沉积层中孔洞的数目却具有明显的增加。

### 2.3 沉积层显微组织与硬度

当铝丝在真空中发生电爆炸时,爆炸过程中产生的铝蒸汽、熔融铝粒子以及气体,在真空中运行的速度较高,对基体的相对作用力较大。随着在铝丝中沉积能量<sup>[11]</sup>不断增加,所得到的沉积层的孔隙率逐渐减小,沉积层越致密。同时,电爆过程产生的沉积层中粒子尺寸较小,使得获得的沉积层具有较高的硬度。

利用显微硬度仪对沉积层显微硬度进行测量。金刚石压头载荷为0.98 N,静载时间为10 s,金刚石压头最边缘距离基体边缘约 $3 \mu\text{m}$ 处进行测量,然后将抛光截面在放大500倍下观察压痕,并测得沉积层的维氏硬度值并取平均值,如表1所示。

表1 不同参数下沉积层的硬度值  
Table 1 Hardness values of the deposition layer with different parameters

编号	丝径 $\phi$ /mm	电压/kV	平均硬度/HV0.1
1	0.3	8	160.8
2	0.3	9	171.6
3	0.3	10	169.3
4	0.4	8	148.9
5	0.4	9	152.6
6	0.4	10	155.4
7	0.5	8	133.7
8	0.5	9	140.8
9	0.5	10	146.5

试验得到沉积层硬度值最大的是以直径 $\phi 0.3$  mm,电压为9 kV为参数下形成的,硬度值为171.6 HV0.1。当加载于铝丝中的能量增加时,发生沿面放电,使沉积的能量降低,沉积层孔洞数增加,硬度降低。同时对所有试样的纯铝沉积层腐蚀后进行观察,发现晶粒平均尺寸为 $4 \mu\text{m}$ ,如图5所示。沉积层中晶粒尺寸较小,硬度值也较高。试验结果与材料硬度和晶粒尺寸关系霍尔-佩奇公式<sup>[12]</sup>相符合。

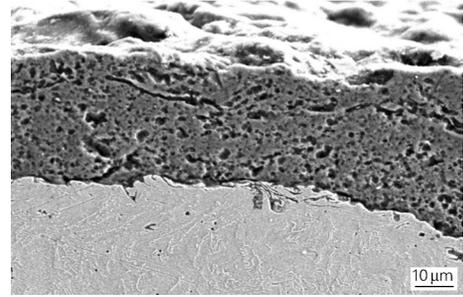


图5 截面腐蚀形貌

Fig. 5 Corrosion morphologies of cross section

## 3 结论

1) 开发了一套保护气氛中丝电爆喷射沉积装置,载线毂将金属丝送入电极两端,通过电极与空气的气体放电方式实现电爆,实现在不断旋转的工件上连续喷射沉积。

2) 随着铝丝中能量密度的增加,沉积层中孔隙率明显减小,沉积层致密度较高。当铝丝中能量密度超过一定值时,在铝丝表面发生沿面放电,沉积层中孔洞数目增加。电容充电电压为9 kV,铝丝直径为 $\phi 0.3$  mm时,沉积层的孔洞率最小。

3) 晶粒度越小时,材料具有更高的硬度值。本试验沉积层的最大硬度值是在直径 $\phi 0.3$  mm,电压为9 kV的参数下形成的,硬度值为171.6 HV0.1。各参数下沉积层中晶粒平均尺寸为 $4 \mu\text{m}$ 。

### 参考文献:

- [1] 王海斗,何鹏飞,陈书赢,等. 内孔热喷涂技术的研究现状与展望[J]. 中国表面工程,2018,31(5): 20-44.  
Wang Haidou, He Pengfei, Chen Shuying, et al. Research and prospect on internal thermal spraying techniques [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 20-44.
- [2] 金红. 医用钛合金及其表面改性技术的研究现状[J]. 稀有金属,2016,27(6): 795-798.  
Jin Hong. Research status of biomedical titanium alloys and its surface modification [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2016, 27(6): 795-798.
- [3] Samareh B, Dolatabadi A. A three-dimensional analysis of the cold spray process: The effects of substrate location and shape [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(5/6): 634-642.
- [4] 朱亮,张周伍. 电爆技术用于超细粉制备和表面喷涂的研究进展[J]. 材料导报,2005,19(12): 76-79.  
Zhu Liang, Zhang Zhouwu. Progress in ultra-fine powders preparation and spray coating using electrical explosion method [J]. Materials Review, 2005, 19(12): 76-79.
- [5] 刘宗德,安江英,杨昆,等. 电爆炸高速喷涂新技术研究[J]. 爆炸与冲击,2001,21(1): 17-20.

# 热处理工艺对 AuCuAgZn17-7-1 合金组织和硬度的影响

唐丽娜, 任伟, 王永松, 张天德, 吴国华

(上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

**摘要:** 采用光学显微镜和显微硬度计对电刷用 AuCuAgZn17-7-1 合金在不同固溶和时效工艺下的显微组织、显微硬度进行测试和分析。结果表明: 随着固溶温度的提高, 晶粒度增大, 670 °C 固溶保温 30 min 的试验合金的硬度显著低于原始材料, 硬度均匀性提高, 消除了触头零件边缘与心部硬度的差异性。合金在时效过程中析出第二相, 随着时效温度的升高和保温时间的延长, 第二相逐渐增大, 硬度先上升后下降, 存在明显的时效硬化现象。经 670 °C 保温 30 min 固溶处理和 250 °C 保温 60 min 时效后, 合金达到峰值硬度, 为 311.5 HV0.2。

**关键词:** AuCuAgZn17-7-1 合金; 热处理工艺; 显微组织; 显微硬度

**中图分类号:** TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2020)03-0162-04

## Effect of heat treatment process on microstructure and hardness of AuCuAgZn17-7-1 alloy

Tang Lina, Ren Wei, Wang Yongsong, Zhang Tiande, Wu Guohua

(Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200245)

**Abstract:** Microstructure and microhardness of AuCuAgZn17-7-1 alloy for brush under different solution and aging processes were tested and analyzed by means of optical microscope, scanning electron microscope and microhardness tester. The results show that with the increase of solution temperature, the grain size is increased. The microhardness of the tested alloy after solution at 670 °C for 30 min is significantly lower than that of the original material, and the microhardness uniformity is increased, which leads to elimination of the microhardness difference between the edge and the core of contact parts. The second phase is precipitated during aging process, and is gradually increased with the increase of aging temperature. The microhardness is increased first and then decreased, and there is obvious aging hardening effect. The peak-aging microhardness of the alloy is reached at 311.5 HV0.2 after solution treatment at 670 °C for 30 min and aging treatment at 250 °C for 60 min.

**Keywords:** AuCuAgZn17-7-1 alloy; heat treatment process; microstructure; microhardness

收稿日期: 2019-09-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51601117); 中国航天科技集团有限公司重大工艺研究项目

作者简介: 唐丽娜(1984—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事先进热处理技术研发与航天领域应用研究, E-mail: linatang149@163.com

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2020.03.031

AuCuAgZn17-7-1 合金是新型电刷材料, 主要用于各类导电滑环、换向片、电位计等材料的制造, 具有耐磨、抗腐蚀、接触电阻低而稳定等特点, 能与电位器、导电环获得较好的匹配。导电滑环是实现两个相对旋转机构间能量、信号传递的输出装置<sup>[1-2]</sup>, 是卫星上太阳

Liu Zongde, An Jiangying, Yang Kun, et al. Studies on rapid spraying by electrical explosion method[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 17-20.

[6] Vlastos, Antonios E. Restrike channel resistance of thin exploding wires[J]. Journal of Applied Physics, 1969, 40(12): 4752-4760.

[7] Tamura H, Wei F G, Kodama T. TiN-TiB<sub>2</sub> composite coatings reactively produced by electrothermally exploded powder spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2002, 11(1): 100-106.

[8] 刘加健, 樊新民. 铝合金基体电热爆炸喷涂钼涂层的制备工艺与性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(9): 135-139.

Liu Jiajian, Fan Xinmin. Process and properties of molybdenum coatings prepared by electro-thermal explosion spraying on aluminum alloy surface[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(9): 135-139.

[9] 毕学松, 朱亮. 丝段式电热爆过程中的气隙击穿特性[J]. 高电

压技术, 2010, 36(15): 1264-1268.

Bi Xuesong, Zhu Liang. Gas discharge of segmented metal wire electrical explosion[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(15): 1264-1268.

[10] Mao Z, Zou X, Wang X, et al. Evolution of the electrically exploding wire observed with a Mach-Zehnder interferometer[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(18): 181501.

[11] 朱亮, 朱锦, 毕雪松. 电爆过程中能量密度与爆炸产物变化的关系[J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 65-69.

Zhu Liang, Zhu Jin, Bi Xuesong. Correlation between energy density and variation of products in wire explosion[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(4): 65-69.

[12] Liu Tongyu, Li Yingmin, Ren Yuyan. Effect of Pr inoculation and crystal size on the Hall-Petch relationship for Al-30wt% Mg<sub>2</sub>Si composites[J]. Materials Letters, 2018, 214: 6-9.