

# 管约束 WC 粉末电爆喷涂涂层的形成

朱 亮, 石茂虎, 王 永

(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, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 采用压敏胶载送粉末连续电爆喷涂方法, 进行 WC 粉末电爆喷涂, 分析初始电压与喷射腔横截面积对涂层形成的影响。结果表明: 在 3~7 mm 喷涂范围内, 可形成表层为液相喷涂层和底层为气相沉积层的复合涂层。在较小的喷射腔横截面积下升高初始电压, 能提高爆炸的区域温度和产物速度, 增加气相份额。分析认为: 气相优先形成气相沉积层, 且气相沉积层与基体结合致密; 残留的液相滞后喷射, 并覆盖在气相沉积层上形成液相喷涂层。

**关键词:** 管约束; 电爆; 液相喷涂层; 气相沉积层

**中图分类号:** TG146.4<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2014)04-0968-05

电热爆炸喷涂 (Electro-Thermal Explosion Spray, 简称电热爆) 是在一定气体介质环境下对金属导体瞬间施加直流高电压, 以强大的脉冲电流使金属导体熔化、气化、膨胀, 发生爆炸, 产生冲击波, 从而使熔融的金属液滴高速喷射到工件表面形成涂层的方法<sup>[1]</sup>。电爆技术在材料加工领域的应用一直受到广泛的关注<sup>[2]</sup>, 尤其是喷涂高熔点材料<sup>[3]</sup>具有一定优势, 如 W<sup>[4]</sup>, WC<sup>[5]</sup>, Mo<sup>[6]</sup>, Ni<sup>[7]</sup>等, 且喷涂材料的形态可以是金属丝、箔、粉末等。

电爆喷涂过程中, 依据能量密度的大小, 可形成具有不同特性的涂层。当采用的能量密度较低时, 如使用沉积能量密度分别为 0.752 和 1.536 kJ/g 的 TaC 和 ZrB<sub>2</sub> 粉末柱, 进行轴向一侧定向电爆喷涂<sup>[8]</sup>, 喷涂材料以熔滴的形式形成涂层; 当能量密度提高时, 如在 Cu 丝上加载能量密度为 6.337 kJ/g 且是其气化热的 1.34 倍的电能, Cu 以气相的形式形成气相沉积涂层<sup>[9]</sup>; 当能量密度增大到一定程度时, 如在钽圆柱管内电爆 Al 箔<sup>[10]</sup>, 沉积能量密度为 28.488 kJ/g 且是其气化热的 2.6 倍, 俄歇分析基体中存在 20 nm 的 Al 离子渗入。可见, 不同的能量密度使涂层具有不同的特性。

本工作提出了一种压敏胶载送粉末连续电爆喷涂方法, 研究电爆喷涂过程中涂层的形成, 及初始电压和喷射腔横截面积对涂层形成的影响。

## 1 实 验

图 1 是压敏胶载送粉末连续电爆喷涂的过程原理。高压发生器 H.V. 向储能电容器 C 充电, 在两电极

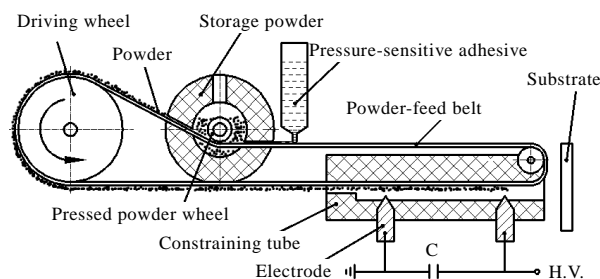


图 1 压敏胶载送粉末连续电爆喷涂过程

Fig.1 Schematic of the process of electrical explosion spraying of continuously carrying powder by pressure-sensitive adhesive

之间建立起高压电场。在驱动轮的带动下, 压敏胶均匀附着于送粉带表面进入储粉器, 借助压敏胶的粘接力和压粉轮的挤压力可使粉末均匀铺展并粘接在送粉带上进入约束管, 当到达一定位置时粉末与电极发生气体放电, 将大电流导入粉末, 粉末瞬间产生大量焦耳热引发爆炸, 爆炸射流经喷射腔口喷射到基体上, 形成涂层, 完成一次喷涂过程。以上过程随粉末的连续进入, 可继续进行。值得说明的是, 这种电流由电极进入粉末的导入方式有别于其他的电爆喷涂, 常规的粉末电爆喷涂<sup>[11,12]</sup>采用电极与粉末直接接触将大电流导入, 容易引起电极烧蚀, 且一次填装只能电爆一次。利用气体放电导入电流机制<sup>[13]</sup>有利于减轻电极烧蚀。

试验采用的 2 个约束管均由具有消融作用的聚乙烯<sup>[14]</sup>压铸成型, 其喷射腔横截面积分别为 24 及 30

收稿日期: 2013-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51061011)

作者简介: 朱 亮, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050, E-mail: zhul@lut.cn

mm<sup>2</sup>。两电极间距为 55 mm。储能电容器的电容量 C 为 8.88 μF。基体为不锈钢，试验前用砂纸打磨掉油污。采用 43~106 μm 的碳化钨粉末作为喷涂材料，喷涂距离为 3~9 mm，初始电压为 10、11、12、13、14 kV。使用 SEM 观察涂层表面及截面形貌，EDS 分析涂层成分分布。

## 2 结果与讨论

采用 3~9 mm 的喷涂距离，改变初始电压与喷射腔横截面积，进行喷涂试验并制备了 40 个涂层试样，使用 SEM 对其表面和截面进行分析，可以得出，喷涂距离、初始电压及喷射腔横截面积这些喷涂过程参数对涂层的特性都有一定影响。

对于刚喷涂完且不做任何处理的试样，从宏观表面上看无明显区别，其典型特征如图 2a 所示，中心 C 区域为亮灰色涂层，其外围覆盖着易脱落的黑色颗粒。在高倍 SEM 下对试样表面进行观察，可以看出，中心 C 区域的涂层呈 μm 级熔滴凝固的形态，如图 3a 所示，将这种类型的涂层称为液相喷涂层；其外围区域呈现出纳米粒子的堆积形态，粒子粒径均匀，平均为 100 nm，如图 3b 所示。将涂层经超声波清洗后，可以清楚看到，外围区域的黑色颗粒脱落后暴露出表面光滑的黑色涂层，并呈现出金属光泽，如图 2b 所示，且这种典型特征只有在喷涂距离为 7 mm 范围以内时才出现；中心液相喷涂层无明显变化。值得注意的是，黑色涂层的面积与喷涂距离、初始电压及喷射腔横截面积有关，当喷涂距离大于 7 mm 时，该区域裸露出基体，无法形成黑色涂层；在较小的喷射腔横截面积及较高的初始电压下，黑色涂层的面积较大。

对外围黑色涂层的表面形态进行分析，图 3c 是其高倍 SEM 照片，可以看出，涂层呈现出气相沉积的形态。将试样剖开，对截面进行观察，图 3d 是其高倍 SEM 照片，可以看出，气相沉积层与基体结合致密且无明显界面，平均厚度为 1 μm；结合 EDS 能谱分析，

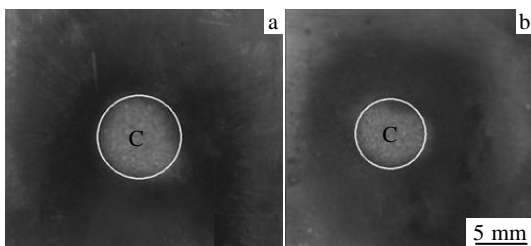


图 2 涂层宏观形貌

Fig.2 Macro-morphology of the coating: (a) the sample of just finishing spraying with any processing and (b) the sample of ultrasonic cleaning

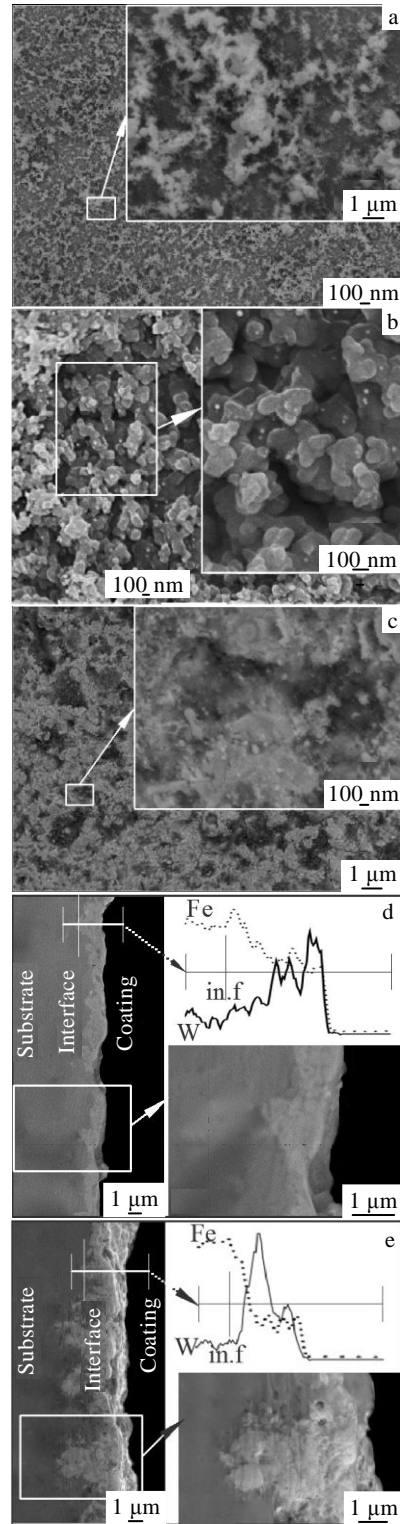


图 3 涂层微观形貌

Fig.3 Micro-morphology of the coating: (a) surface morphology of liquid spraying coating, (b) surface morphology of nanoparticles accumulated, (c) surface morphology of vapor deposition coating, (d) cross-section morphology of vapor deposition coating, and (e) cross-section morphology of liquid spraying coating

可以看到 W 与 Fe 原子出现相互扩散现象。根据以上特征，将这种类型的涂层称为气相沉积层。

通过前面对中心 C 区域的表面分析可知，涂层由液相形成。对中心 C 区域的截面进行观察，图 3e 是其高倍 SEM 照片，可以看出，液相喷涂层与基体结合致密且无明显界面，平均厚度为 4 μm；结合 EDS 能谱分析，同样可以看到 W 与 Fe 原子出现相互扩散现象。从涂层的截面形貌上看，液相喷涂层和气相沉积层与基体均致密结合，液相喷涂层与基体结合的部分与气相沉积层具有完全相同的形态，根据试验结果可以看出：在与基体结合的复合涂层中，第 1 层为气相沉积层，第 2 层为液相喷涂层。电爆喷涂过程中的非平衡相变使 WC 相变时不平衡，从图 4 的 XRD 结果可以看出，涂层中出现了 WC<sub>x</sub> 和 WC<sub>1-x</sub> 相。

综合以上试验结果可以看出，液相喷涂层和气相沉积层的面积因喷涂过程参数的变化而有所不同，尤其是初始电压和喷射腔横截面积。图 5 是初始电压和喷射腔横截面积与涂层面积的关系，通过测量涂层的面积，可以看出：喷射腔横截面积较大时，液相喷涂层和气相沉积层的面积变化不大；喷射腔横截面积较小，初始电压较大时，气相沉积层的面积增大。

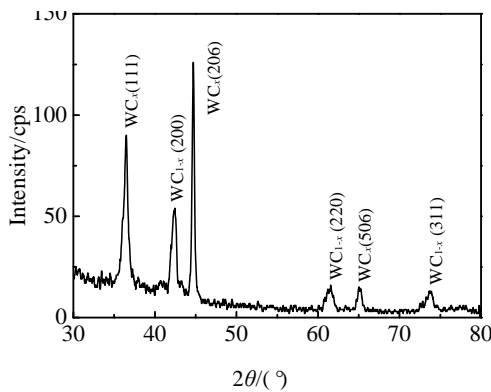


图 4 涂层的 XRD 图谱

Fig.4 XRD pattern results of coating

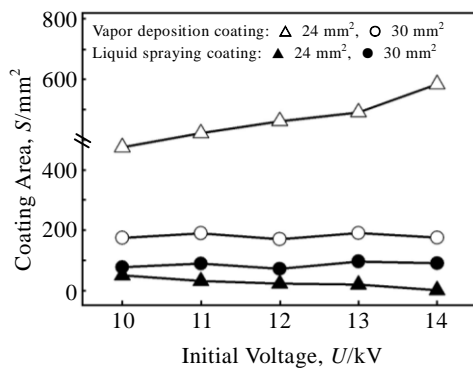


图 5 涂层面积与初始电压的关系

Fig.5 Relation between the coating area and the initial voltage

根据上述试验结果，对涂层的形成机理及初始电压和喷射腔横截面积对涂层形成的影响进行分析。

图 6 是 0 到 3~7 mm 的喷涂距离范围内，爆炸产物运动及涂层形成的模型图。当粉末处于两电极一定位置时，通过气体放电将大电流导入粉末，粉末瞬间获得相当大的能量，产生焦耳热，使其熔融，之后继续受热，当温度升至沸点附近，大量气体分子飞出液面，发生气化膨胀，使得喷射腔内外形成较大的压力差，在压力差的作用下，气相产物和熔融液滴向喷射口飞行。在约束管内的飞行过程中，气相速度超前于液相速度，较大的相对速度使得气相产物和熔滴在喷射腔内完全分离。在 3~7 mm 的喷涂距离范围内，气相产物优先沉积，形成气相沉积层，被基体反弹的气相分子冷凝为纳米粒子且悬浮在空中，部分黑色纳米粒子吸附并堆积在气相沉积层上，随后，熔滴喷射在气相沉积层的表面，形成液相喷涂层。在约束管内出现了气相和液相产物分离的现象，正是由于这种现象才形成了复合涂层。关于分离现象的研究，据文献[15]报道，在群体动力学方法的基础上，提出了描述合金雾化液滴凝固过程动力学的数学模型，模拟金属液滴的运动行为，模拟得出在雾化开始阶段，液滴的速度远远小于气体的速度且相差 2 个数量级，这与本试验的结果相吻合。

从试验结果看出，使用喷射腔横截面积分别为 24、30 mm<sup>2</sup> 的约束管进行电爆喷涂过程中，气相优先沉积，液相滞后喷射，完成气液相的完全分离，且较小管径的约束管产生较高份额的气相。据文献[16]报道，在较大内径为 6.5 mm 的约束管中，采用 WC 粉末

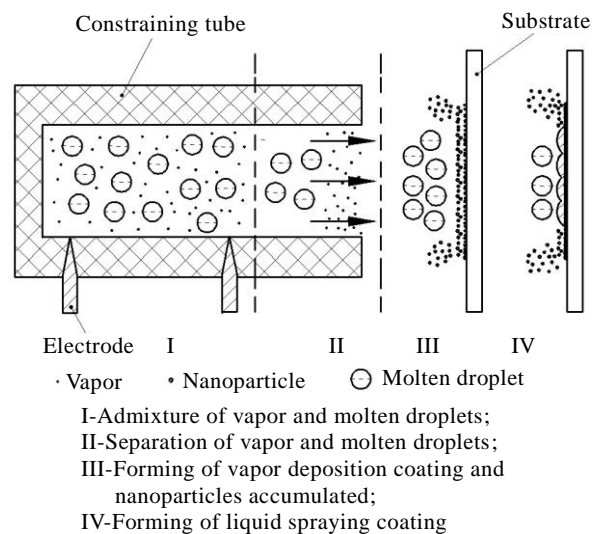


图 6 爆炸产物运动及涂层形成的模型图

Fig.6 Model diagram of the explosion product movement and the forming of coatings

进行电爆喷涂,喷涂过程中没有出现气液相完全分离的现象,且气相产物的份额较少。可见,较小内径的约束管影响爆炸产物的速度及份额。E. Ya. Shkolnikov等<sup>[17,18]</sup>也研究了管径对爆炸的约束效果,采用高速等离子体气流在毛细管中加速粉末,使沉积能量密度为20 kJ/g的金属间化合物粉末以熔融形式在钢表面喷涂;利用光学摄谱仪和阴影摄像术,分别探测爆炸区域的温度和爆炸产物的速度,当初始电压为10 kV,毛细管内径分别为6、4、3 mm时,探测爆炸区域的温度为42、50、55 kK,爆炸产物的速度为3.3、3.8、3.9 km/s。虽然约束管电爆喷涂和上述的毛细管等离子体喷涂原理上是有区别的,但管径对爆炸的约束效果是相同的。结合电爆喷涂和毛细管等离子体喷涂的试验结果可知,较小的喷射腔横截面积能提高爆炸区域的温度,加速液体分子的无规则运动和碰撞,当分子的动能大于分子间引力所需的功时,分子脱离液体而飞出;较小的喷射口横截面积能提高爆炸产物的飞行速率,使得气体飞出液体的几率大于碰回液体的几率,进而气体分子不断积累达到过饱和状态,气相份额逐渐增大。因此,较小的喷射腔横截面积能增大气相产物的份额,对涂层的形成有较大的影响。

较高的初始电压使沉积在粉末上的能量密度较大,当能量密度增大到21.756 kJ/g时,爆炸产物能获得更多的内能。但初始电压只有在喷射腔管径合适时才对气相份额起作用,可见初始电压对涂层形成的影响要小于喷射腔管径。

### 3 结 论

1) 采用压敏胶载送粉末连续电爆喷涂方法,可形成表层为液相喷涂层和底层为气相沉积层的复合涂层。

2) 较小的喷射腔横截面积能提高爆炸的区域温度和产物速度,显著提高气相份额。较高的初始电压沉积较大的能量密度,但只有在合适的喷射腔横截面积时才能提高气相份额。可见初始电压对涂层形成的影响要小于喷射腔横截面积。

3) 在3~7 mm的喷涂距离范围内,气相产物优先形成气相沉积层,且气相沉积层与基体结合致密;残留的液相滞后喷射,并覆盖在气相沉积层上形成液相喷涂层。

#### 参考文献 References

[1] Zhu Liang(朱亮), Zhang Youguo(张有国), Bi Xuesong(毕学

松). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2012, 33(2): 77

[2] Zhu Liang(朱亮), Zhang Zhouwu(张周伍). *Materials Review*(材料导报)[J], 2005, 19(12): 76

[3] Yang Jiazhi(杨家志), Liu Zhongyang(刘钟阳). *Materials Review*(材料导报)[J], 2008, 22(2): 82

[4] Alexander G Roussikh, Rina B Baksht, Stanislav A Chaikovskiy et al. *IEEE Transactions on Plasma Science*[J], 2006, 34(5): 2232

[5] Liu Zongde(刘宗德), Yang Kun(杨昆), Duan Peng(段鹏) et al. *Explosion and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 2003, 23(2): 116

[6] Pu Zelin(蒲泽林), Liu Zongde(刘宗德), Yang Kun(杨昆) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(4): 670

[7] Nakamura R, Fukuzumi K, Umakoshi M. *Journal of Japan Thermal Spraying Society*[J], 2001, 38(3): 127

[8] Kodama T, Ikeda Y, Tamura H. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 1999, 8(4): 537

[9] Zhu Liang(朱亮), Yang Qi(杨奇), Bi Xuesong(毕学松) et al. *High Voltage Engineering*(高电压技术)[J], 2009, 35(9): 2232

[10] Ordal Demokan. *IEEE Transactions on Plasma Science*[J], 2000, 28(5): 1720

[11] Hideki Tamura. *Appl Phys*[J], 1994, 75(9): 4695

[12] Tamura H, Konoue M, Sawaoka A B. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 1997, 6(4): 463

[13] Bi Xuesong(毕学松), Zhu Liang(朱亮), Yang Fulong(杨富龙). *Acta Phys Sin*(物理学报)[J], 2012, 61(7): 078 105

[14] Cheng Jian(成剑), Li Baoming(栗保明). *Acta Armamentarii*(兵工学报)[J], 2003, 24(3): 304

[15] Liu Dongming(刘东明), Zhao Jiuzhou(赵九洲), Ye Hengqiang(叶恒强). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2003, 39(4): 375

[16] Zhu Liang(朱亮), Zhang Pengfei(张鹏飞), Qiao Hetao(乔河涛) et al. *High Voltage Engineering*(高电压技术)[J], 2012, 38(5): 1039

[17] Shkolnikov E Ya, Guzeev M Yu, Maslennikov S P et al. *Instruments and Experimental Techniques*[J], 2000, 43(6): 846

[18] Shkolnikov E Ya, Maslennikov S P, Netchaev N N et al. *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 2003, 39(1): 314

## Coating Forming by Electrical Explosion Spraying of WC Powder in the Constraining Tube

Zhu Liang, Shi Maohu, Wang Yong

(State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** By means of powder electrical explosion spraying of continuously carrying powder with pressure-sensitive adhesive, WC coating was prepared. The effects of initial voltage and the cross-sectional area of jet chamber on the forming of coating were analyzed. The result shows that in the distance of 3~7 mm, hybrid coating is formed which consists of a surface for liquid spraying coating and a bottom for vapor deposition coating. When raising the initial voltage within minor cross-sectional area of jet chamber, the temperature and the velocity of the blast area can be increased to raise vapor share. It is thought that vapor deposition coating is formed preferentially and combined with substrate densely. Residual droplets spurt is lagged, and liquid spraying coating is formed which covers the vapor deposition coating.

**Key words:** the constraining tube; electrical explosion; liquid spraying coating; vapor deposition coating

---

Corresponding author: Zhu Liang, Ph. D., Professor, School of Material Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, E-mail: zhul@lut.cn