

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.01.003

# FeCrBSiNb 粉芯丝材电弧喷涂的弧区动态行为<sup>\*</sup>

陈永雄<sup>a</sup>, 胡尧强<sup>b</sup>, 梁秀兵<sup>a</sup>, 徐滨士<sup>b</sup>

(装甲兵工程学院 a. 机械产品再制造国家工程研究中心, b. 再制造技术重点实验室, 北京 100072)

**摘 要:** 电弧喷涂粉芯丝材是由金属外皮包覆金属或非金属的复合粉末组成, 喷涂过程中在弧区发生冶金反应并雾化形成熔滴, 大量熔滴沉积在基体表面最终形成涂层。粉芯丝材的电弧喷涂是一个高度动态的传热传质过程, 采用高速摄像技术研究了喷涂过程中两根粉芯丝材交汇处的电弧、丝材熔化与熔滴形成等行为。另外, 通过高速摄像试验分析了喷涂电流和电压对电弧形态及丝材熔化的影响规律。结果表明: 喷涂时间歇出现燃弧、熄弧、再燃弧的循环变化; 不同于实心丝材, 粉芯丝材在阴阳极上的电弧都发散, 这有利于丝材外皮和粉芯间的冶金反应; 阴极丝材主要表现为抽吸作用下以细小熔滴或片状挤出物等形式形成熔滴, 阳极丝材主要以片状液带的形式脱离并雾化成小熔滴。

**关键词:** 电弧喷涂; 粉芯丝材; 高速摄像; 丝材熔化; 熔滴雾化

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)01-0015-06

## Dynamic Behaviors in Arc Zone of FeCrBSiNb Cored Wire Arc Spraying

CHEN Yong-xiong<sup>a</sup>, HU Yao-qiang<sup>b</sup>, LIANG Xiu-bing<sup>a</sup>, XU Bin-shi<sup>b</sup>

(a. National Engineering Research Center for Mechanical Product Remanufacturing, b. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

**Abstract:** The arc sprayed cored wire is composed of metal strip and the coated metal or nonmetal composite powders. During the arc spraying, metallurgical actions happens in the arc zone for the cored wires, atomized droplets are generated and the coating is formed consequently. Considering the highly dynamic heat and mass transfer feature for the cored wire arc spraying process, this paper investigates the behaviors such as the arc formed between the two cored wires, material melting and atomization use a high speed camera method. Additionally, the effect of spraying current and voltage on the arc profile and wire melting behavior was investigated using the high speed camera. The results show that the spraying process is featured with a circulation of arc burning, extinguish and burning again. The arc attached on the cathode and the the anode is divergent, which is quite different from the solid wire spraying. More importantly, the divergent arc distribution is useful for the metallurgical actions between the strip and composite powders. For the cathode cored wire, the formation of droplets is mainly featured with little droplets and splats aspiration, while for the anode, the droplets are mainly formed by the melted material gathering and detachment.

**Keywords:** arc spraying; cored wire; high speed camera; wire melting; droplet atomization

## 0 引 言

电弧喷涂作为热喷涂技术的重要分支, 在耐磨及防腐等工业领域应用广泛。可用于电弧喷

涂的金属丝材种类通常包括实心金属丝和粉芯丝材。其中电弧喷涂粉芯丝材主要通过金属外皮包覆金属或非金属的复合粉末制备而成, 基于

收稿日期: 2014-09-13; 修回日期: 2014-12-08; 基金项目: \* 国家自然科学基金(511105377, 51375492); 北京市优秀博士论文指导老师科研项目(20129003401)

通讯作者: 陈永雄(1978-), 男(汉), 助理研究员, 博士; 研究方向: 热喷涂技术、再制造工程; Tel: (010) 6671 7351; E-mail: famon1599@163.com

网络出版日期: 2015-01-05 17:00; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150105.1700.001.html>

引文格式: 陈永雄, 胡尧强, 梁秀兵, 等. FeCrBSiNb 粉芯丝材电弧喷涂的弧区动态行为 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(1): 15-20. Chen Y X, Hu Y Q, Liang X B, et al. Dynamic behaviors in arc zone of FeCrBSiNb cored wire arc spraying [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(1): 15-20.

材料制备与成形一体化的思路,在喷涂过程中使丝材的金属外皮和粉末间发生熔合反应后生成新的合金熔滴,大量熔滴沉积在基体表面最终形成高性能的合金涂层。因此,除了粉芯丝材的成分设计外,直接影响粉芯丝材电弧喷涂层性能好坏的因素还包括粉芯丝材在电弧区发生熔化、合金反应及形成熔滴这些行为特征,由于这些工艺过程具备高度的动态性,关于这方面的研究报道极少,多数将这一过程当成一个黑匣子处理。N. Hussary 和张甲英等<sup>[1-4]</sup>曾利用高速摄像的技术观察实心丝材电弧喷涂弧区的动态行为,发现了实心丝材电弧喷涂阴阳极电弧的非对称分布及喷涂时燃弧-断弧-再燃弧循环变化等重要规律。朱子新<sup>[5]</sup>曾利用基于红色激光照射的高速摄像技术对自行开发的 Fe-Al 粉芯丝材电弧喷涂弧区的动态行为展开了研究,除了发现该粉芯丝材阴阳极电弧的非对称分布外,还认为阴阳极丝材的粉芯和外皮存在非平衡熔化行为。粉芯丝材在材料结构和成分配比上与实心丝材相比有很大的不同,其燃弧特性必定和实心丝材喷涂存在差异,不同成分的粉芯丝材之间的电弧特性也有待深入研究,如何揭示粉芯丝材电弧喷涂弧区的动态行为,对于开展粉芯丝材的设计、工艺优化及涂层组织性能研究等方面具有重要意义。为此,文中首先采用高速摄像的方法对 FeCrBSiNb 粉芯丝材电弧喷涂弧区的动态行为进行了试验研究,并与常规的碳钢实心丝材喷涂进行对比,而后深入分析粉芯丝材电弧喷涂的燃弧-断弧-再燃弧的动态过程,以及材料熔化与熔滴过渡的机理。

## 1 材料和方法

### 1.1 粉芯丝材的制备

选用自行开发的 FeCrBSiNb 粉芯丝材进行喷涂试验,粉芯丝材的外皮采用 08F 优质低碳钢带,丝材中粉芯是由不同含量的 Fe-B、Fe-Si、Nb-Fe 以及 Cr 合金粉末通过机械混合而成。通过粉芯丝材生产线,采用连续轧制成形和多道拔丝减径方法制造成直径为 2.0 mm 的丝材。文献 [6-8] 详细介绍了关于该系列粉芯丝材制备工艺及其涂层性能的情况。

### 1.2 高速摄像试验

使用自行开发的自动化高速电弧喷涂系统进行喷涂试验,包括 HAS-02 型喷枪、CMD

AS3000 型喷涂电源和送丝机构,使用 MOTO-AMN-HP20 型机器人通过专用夹具与高速电弧喷涂枪相连,并将送丝机固定在机器人手臂上,采用集成的中央控制系统实现喷枪的运动控制和喷涂控制。使用压缩空气作雾化气体。喷涂时空气压力固定在 0.6 MPa,结合实际喷涂经验将喷涂电流和电压分别控制在 120~200 A、28~36 V 范围内调节。

使用 Fastec 公司 Hispec 5 型高速摄像机观测高速电弧喷涂过程的弧区动态形为。高速摄像机距离喷枪约 160 mm,将 9 号电焊玻璃片置于摄像机 Zoom7000 变焦近摄镜头的前端以滤除弧光,外加 1.5 kW 射灯光源照射以增加拍摄清晰度,拍摄速率设定为 1 500 fps。通过 HiSpec 2 Director 摄像机控制软件实时记录喷涂过程的图像数据。

## 2 结果与讨论

### 2.1 粉芯丝材喷涂电弧基本特征

图 1 为电弧喷涂 FeCrBSiNb 粉芯丝材某一瞬间的电弧形貌特征,可见电弧基本呈现不规则的椭圆形轮廓,在气流速度方向上电弧被拉长,但是这一椭圆形电弧是不断跳动的,有时甚至熄灭。图 2 是连续拍摄电弧燃弧、熄灭再燃弧的循环变化过程。电弧喷涂的这种燃弧与熄弧循环变化的动态特征通常很难通过肉眼分辨出来。

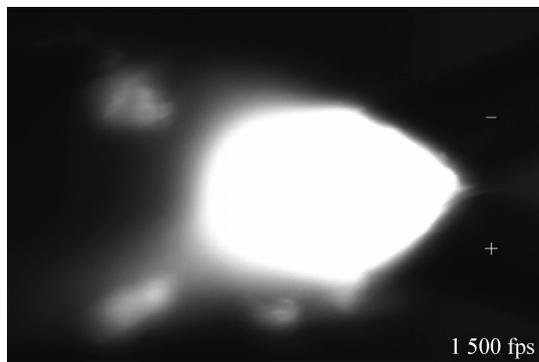


图 1 粉芯丝材喷涂的电弧轮廓

Fig. 1 Arc profile during the cored wire arc spraying

结合图 1 和图 2,可见阴阳极丝材在电弧的加热作用下,阴阳极基本呈现对称熔化的轮廓特征,且附着在阴阳极根部的电弧都比较发散,这一特征与碳钢实心丝材喷涂时差别显著<sup>[1]</sup>。实心丝材电弧喷涂时阴阳极丝材基本是非对称熔化,且附着阴极根部的电弧集中,而阳极根部的

电弧发散。分析认为,这一差别主要是由于粉芯丝材的结构和组成与实心丝明显不同,FeCrB-SiNb 粉芯丝材主要由低碳钢外皮包覆合金粉末组成,且合金粉末是由不同金属成分的粉末混合而成,这些不同成分的材料性质势必不一致。根据电弧形成理论<sup>[5]</sup>,阴极斑点有自动跳向温度高、热电子发射性能强物质上的性能,阳极斑点有自动寻找温度低、热电子发射性能弱物质的性能。表 1 列出了 FeCrBSiNb 粉芯丝材中各填充粉末及碳钢带外皮的熔点,可见 SiFe 粉的熔点最低,Cr 粉的熔点最高,二者熔点相差超过 500 ℃。

表 2 列出了粉芯丝材中各元素成分的逸出功,逸出功越小,同等条件下该成分的热电子发射性能越强。由表 2 可见,粉芯丝材中含有 C 和 Si 的成分热电子发射性能最弱,而含有 Nb 的成分热电子发射性能最强。由于粉芯丝材的各粉末成分通过机械混合法均匀混合在一起,结合表 1 和表 2 分析认为,粉芯丝材这种不同成分组合的材料特点为阴、阳极斑点的不断变化提供了条件,使得电弧更发散,进而在总体上使阴、阳极丝材的熔化相对均匀一些。限于文中研究条件,关于粉芯丝材电弧形成更深层次的机理研究还有待深入。

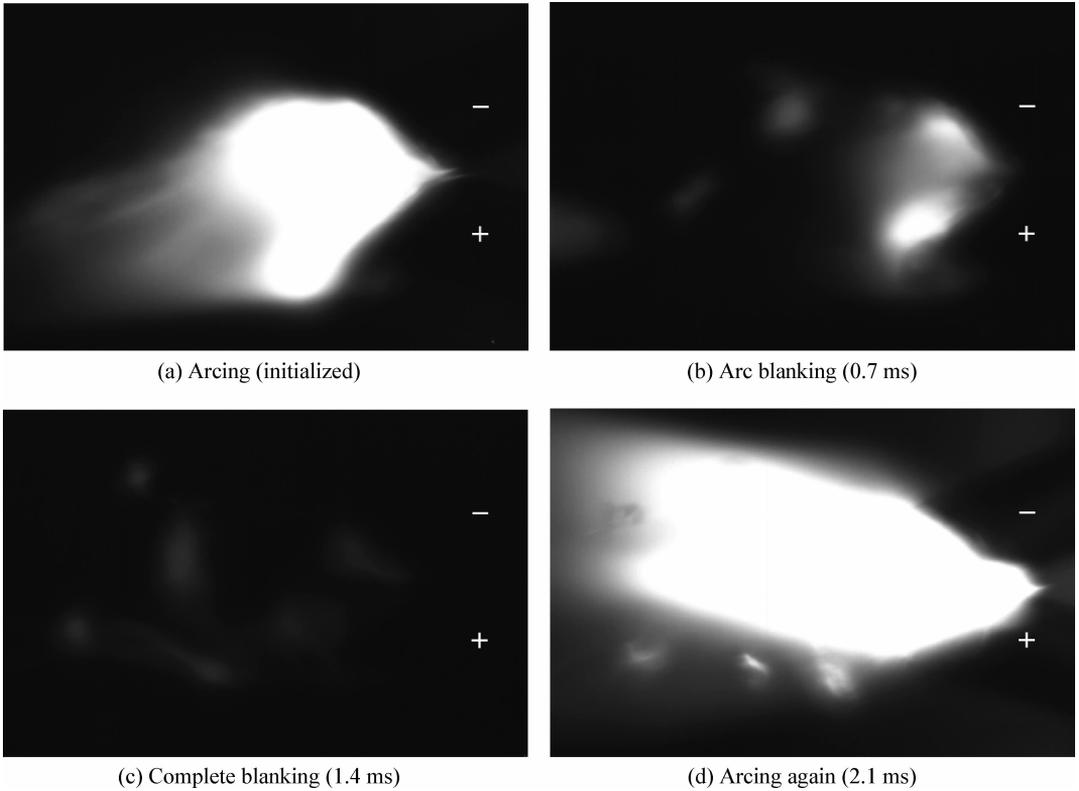


图 2 粉芯丝材喷涂电弧的动态变化特征

Fig. 2 Dynamic charge characteristic during the cored wire spraying

表 1 粉芯丝材中各成分熔点

Table 1 Composition melting point of the cored wire (℃)

| Material      | Fe-B  | NbFe            | SiFe  | Cr    | Steel strip     |
|---------------|-------|-----------------|-------|-------|-----------------|
| Melting point | 1 650 | 1 580-<br>1 630 | 1 300 | 1 857 | 1 400-<br>1 500 |

表 2 粉芯丝材中各元素逸出功

Table 2 Element work function of the cored wire (eV)

| Element       | Fe  | Nb  | Si   | Cr  | B    | C |
|---------------|-----|-----|------|-----|------|---|
| Work function | 4.5 | 4.3 | 4.85 | 4.5 | 4.45 | 5 |

## 2.2 阴阳极丝材融化与熔滴过渡行为

结合高速摄像试验,还可以观察阴阳极丝材在电弧和气流等作用下受热融化并脱离丝尖端形成熔滴这一过程的动态行为,结果发现丝材融化与熔滴过渡的形式受多重因素影响,熔滴过渡形貌特征也较多样,典型结果如图 3 和图 4 所示。

从图 3 来看,阴极粉芯丝材主要表现为抽吸作用下形成的细小熔滴(如图 3(a)(b)箭头所指)或片状挤出物(如图 3(c)(d)箭头所指)等形式脱离,这种抽吸作用仍然来自于电弧和自身磁场的

相互作用,熔化的金属在高速雾化气流的推动下,这种抽吸出射物有时还未来得及进一步铺展成薄片就碎化了。

有时抽吸出射物发射集结,并被气流推向丝

材的外缘,最终以大熔滴形式脱离(如图4(a)阴极区箭头所指)。对于阳极粉芯丝材,材料的脱离主要基于一种形式,即以片状液带(液滴)的形式脱离并雾化。

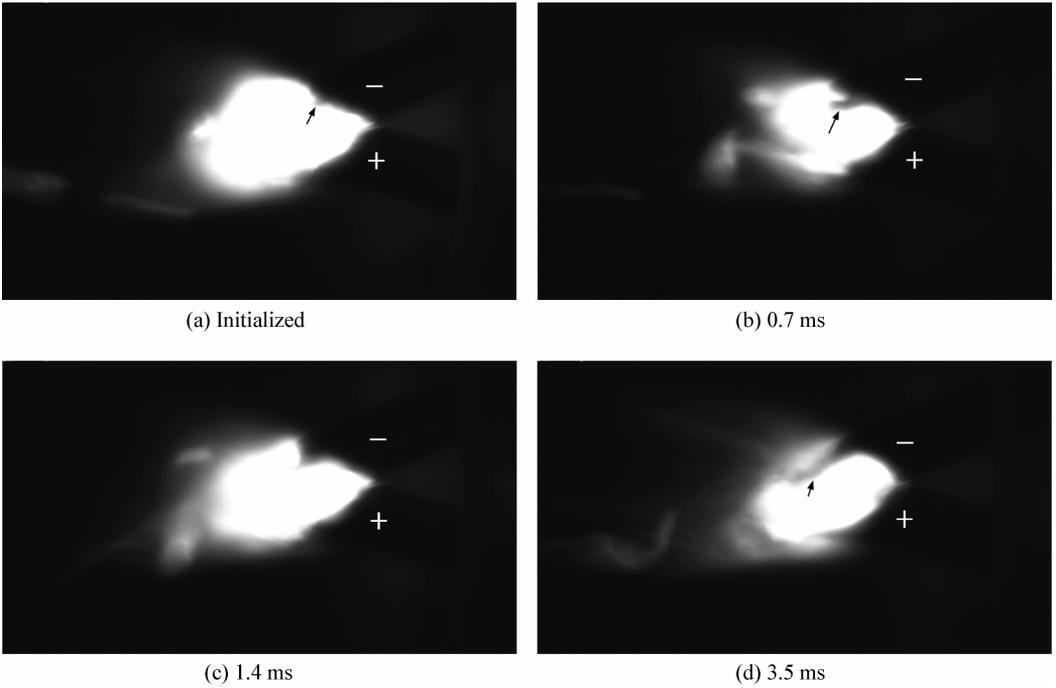


图3 喷涂粉芯丝材阴阳极粉芯丝材的连续过渡行为

Fig. 3 Material transfer for the sprayed cathode and anode cored wires

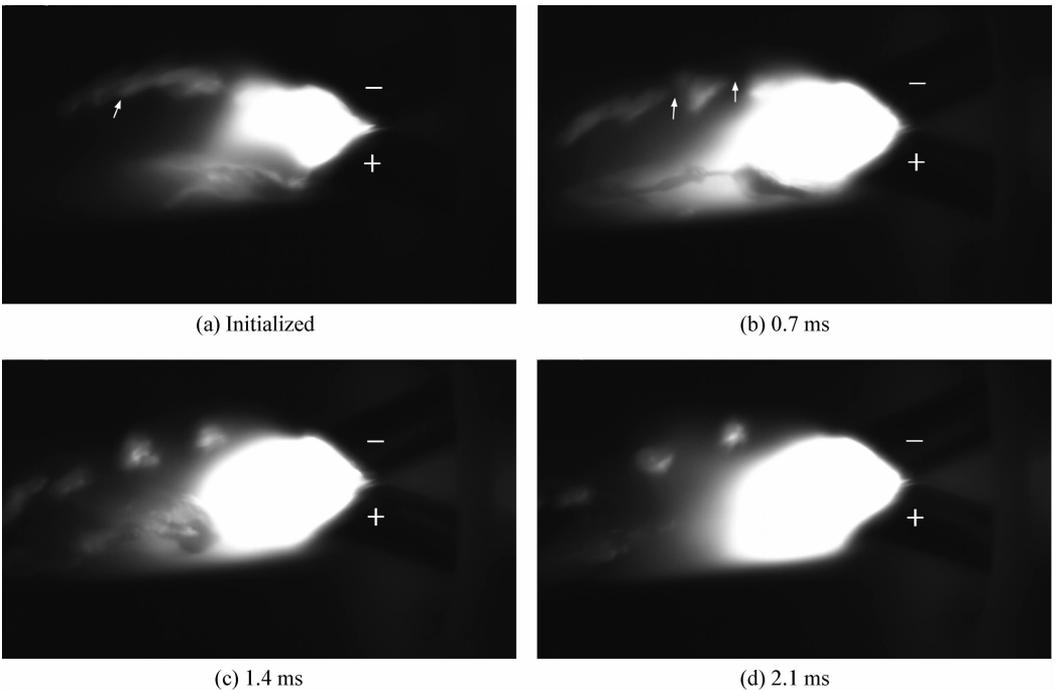


图4 喷涂粉芯丝材熔滴形成及二次雾化行为

Fig. 4 Droplets formation and second atomization for the cored wire spraying process

另外,综合阴阳极电弧形貌可知,由于附着在阴阳极表面的电弧都较发散,电弧加热了丝材大部分表面,使得粉芯丝材的带皮和粉末几乎同时受热熔化,随后相互之间在气流力和电磁力等作用下发生掺混并合金化反应,最终以合金熔滴的形式脱离丝尖端,进而同步完成了粉芯丝材的合金化反应及雾化过程,同时粉芯丝材的合金成分还会因过热而产生金属蒸气或与雾化空气作用而发生氧化等反应。当然,熔滴脱离丝尖端之后,在单个熔滴内部因外界扰动还可能继续发生合金化反应并二次雾化成更细小的熔滴。例如,图 4(a)~(d)为连续拍摄的 4 幅照片,图 4(a)中阴极区首先形成了大熔滴,图 4(b)箭头处表明该大熔滴开始破碎,至图 4(c)(d),熔滴已分离成 4 个小熔滴向前飞行,由此说明喷涂过程中熔滴存在明显的二次雾化行为。

### 2.3 喷涂工艺对弧区特征的影响

喷涂电流和电压与电弧的能量紧密相关,为此,文中专门研究了不同喷涂电流和电压下的弧区特征。图 5 为燃弧稳定时喷涂电流按 120、

140、160 和 200 A 变化的高速拍摄结果(电压固定 32 V)。可知,当电流逐渐增大至 160 A 附近时,电弧轮廓存在增大趋势,两丝尖端截面夹角变化幅度不大,但当电流达 200 A 时,电弧轮廓显著减小,且两丝尖端截面也变得最小。分析认为,喷涂电流和送丝速度存在一定匹配关系,电源的设计使得电流增大时送丝速度也相应的增大,同时电流增大势必使得电弧获得能量增加,激发的电弧体积增大,但是当送丝速度增加过快时,电弧能量和送丝速度失去了先前的平衡,电弧熔化石材的速度较丝材进给的速度要低,使得丝材尖端截面夹角变小,丝材前伸,反过来又影响了弧柱的形态。

图 6 给出了燃弧稳定时喷涂电流固定为 160 A,电压为 28 V 和 36 V 的弧区形貌,结合图 5(c)可以看出,当喷涂电压增大时,电弧的轮廓随之变大,且两丝尖端截面夹角也在变大。这主要是因为送丝速度不受喷涂电压的影响,电流不变时丝材进给速度也不变,电压的增大使得电弧能量提高,丝材熔化速度加快,丝尖端后缩。

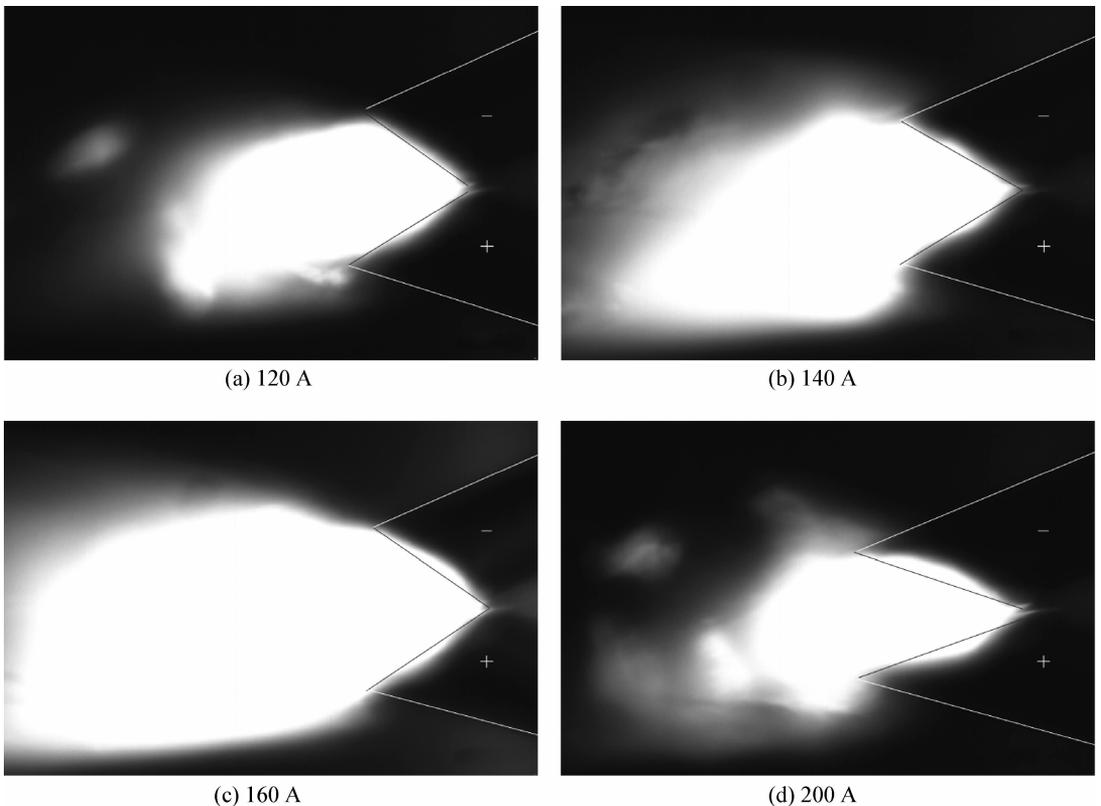


图 5 喷涂电流对电弧的影响(电压 32 V)

Fig. 5 Effects of the spraying current on the arc profile (Arc voltage 32 V)

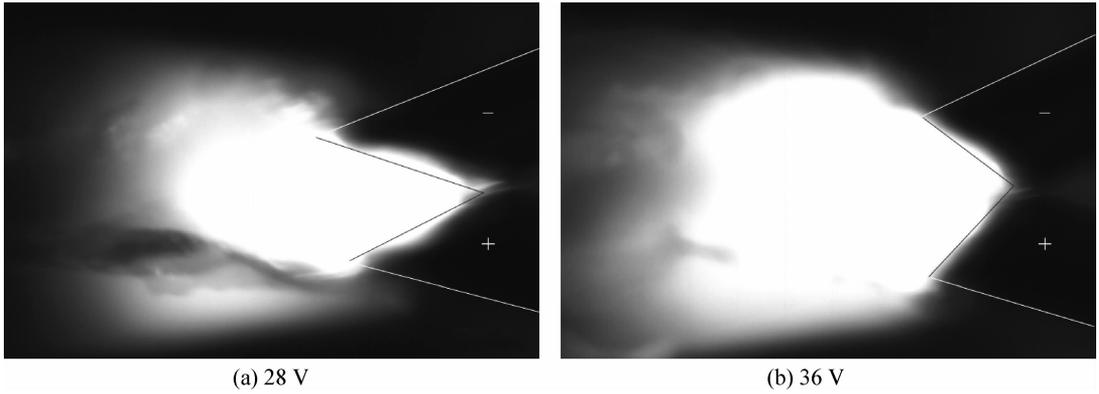


图6 喷涂电压对电弧的影响(电流 160 A)

Fig. 6 Effects of the spraying voltage on the arc profile (Electric current 160 A)

### 3 结论

(1) 粉芯丝材在电弧喷涂气流作用下呈现出近不规则椭圆形轮廓特征的电弧,在喷涂方向上电弧被拉长,同时在喷涂过程中不断地出现燃弧、熄弧、再燃弧的循环变化。

(2) FeCrBSiNb 粉芯丝材电弧喷涂时附着在阴阳极根部的电弧都比较发散,阴阳极丝材呈现出近似对称熔化的特征,这与粉芯丝材由金属外皮包覆混合粉末的结构及其多种成分组合的材料特点有关。

(3) 喷涂电流的改变会影响丝材进给速度和熔化速度间的动态匹配关系,进而改变电弧的形态;喷涂电压主要影响了电弧的轮廓大小和丝材熔化速度,电压的增大使得电弧能量提高,丝材熔化速度加快,丝尖端截面夹角变大。

### 参考文献

- [1] 陈永雄, 梁秀兵, 张志彬, 等. 碳钢高速电弧喷涂的电弧特征及材料过渡行为研究 [J]. 焊接学报, 2013, 34(9): 17-20.  
Chen Y X, Liang X B, Zhang Z B, et al. Investigation of the electric arc and steel wire melting behaviors during the high velocity arc spraying process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(9): 17-20 (in Chinese).
- [2] Hussary N, Heberlein J. Atomization and particle-jet interactions in the wire-arc spraying process [J]. Journal of

Thermal Spray Technology, 2001, 10(4): 604-610.

- [3] Hussary N, Heberlein J. Investigations of arc behavior and particle formation in the wire arc spray process using high-speed photography [C]. Proceedings of the 16th ITSC, Montreal, Canada; 2000, 737-742.
- [4] 张甲英, 徐滨士, 戴连辉. 电弧喷涂电弧燃烧过程分析 [J]. 焊接学报, 2011, 32(6): 17-20.  
Zhang J Y, Xu B S, Dai L H. Arc burning process analysis in wire arc spray process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(6): 17-20 (in Chinese).
- [5] 朱子新. 高速电弧喷涂 Fe-Al/WC 涂层形成机理及高温磨损特性 [D]. 天津: 天津大学, 2002.  
Zhu Z X. Microstructure and high-temperature tribological properties of Fe-Al/WC composite coating by HVAS [D]. Tianjin: Tianjin University, 2002 (in Chinese).
- [6] 梁秀兵, 陈永雄, 程江波, 等. 电弧喷涂亚稳态复合涂层技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2014, 7.  
Liang X B, Chen Y X, Cheng J B, et al. Arc spraying metastable composite coating technology [M]. Beijing: Science Press, 2014, 7 (in Chinese).
- [7] 程江波. 面向再制造的高速电弧喷涂铁基非晶纳米晶涂层制备与表征 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.  
Cheng J B. Synthesis and characterization of wire arc sprayed Fe-based amorphous/nanocrystalline coatings for remanufacturing [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009 (in Chinese).
- [8] Cheng J B, Liang X B, Xu B S, et al. Microstructure and wear behavior of FeBSiNbCr metallic glass coatings [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2009, 25 (5): 687-690.

(责任编辑: 常青)