双丝电弧喷涂中粒子交叉飞行行为的在线测量及分析

李占明,朱有利,叶雄林,杜晓坤

(装甲兵工程学院 装备再制造工程系, 北京 100072)

摘 要:采用两根具有不同熔点的材料分别作为双丝电弧喷涂的阳极和阴极丝材,采用 SprayWatch-2i 热喷涂监测 系统,通过对融熔粒子飞行中温度的在线测量分析,直接验证了粒子的"交叉飞行"现象。利用能谱仪(EDS)定量研 究了两极的材料和氧化物在喷涂沉积丘中的分布,并分析了这些分布特征在不同喷涂距离上的变化规律,结果发现, 沿喷涂丘的横截面,来自阴极和阳极的扁平化粒子以接近反对称的方式分布。在所测量的两个喷涂距离上,各种成 分(包括氧化物)的含量随喷涂距离变化不大。而且电弧喷涂涂层中具有约 10 %左右的氧化物含量。 关键词:电弧喷涂;交叉飞行;粒子;温度

中图分类号:TG174.442 文献标识码:A 文章编号:1007-9289(2005)05-0012-04

On Line Measurement and Analysis of Cross Flying Behavior in Twin Wire Arc Spray

LI Zhan-ming , ZHU You-li , YE Xiong-lin , DU Xiao-kun

(Faculty of Remanufacture Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Using two consumable wires of different melting point as anode and cathode in high velocity arc spraying process, the 'cross flying' behavior of particles from the twin wires was demonstrated directly by on line measurement and analysis of particles average temperature distribution by a Spray Watch-2i thermal spray monitoring device. The distribution of oxides and materials from the twin wires in the spray deposit was measured quantitatively by energy dispersive spectrum analysis. The results showed that, across the deposit, the flattened particles from the anode and cathode distributed unsymmetrically around the spray jet center. In the investigated spray distance, the content of various composition (including oxides) varied insignificantly with spray distance. In the electric arc spray coating the oxide content was about 10 %.

Key words: arc spray; cross flying; particle; temperature

0 引 言

作为一种经济高效的热喷涂技术,电弧喷涂 技术已经在防腐和耐磨领域中得到了广泛应用。 近年来,为深刻认识电弧喷涂过程的基本原理和 基本现象,推动该技术在设备、工艺和应用上的 发展,国际热喷涂领域开展了大量的研究。比如 利用高速成像系统观察了丝材尖端的电弧和金属 液滴的形成以及液滴的脱离和雾化过程^[1]。利用 Schlieren光学测量系统研究了喷嘴出口处的雾化 气射流和激波的形成^[2]。采用激光散射、直接照 相等高速摄像技术测量了喷涂熔融粒子的速度、 温度和粒度分布等特征^[3-5]。通过这些对形成喷涂

收稿日期:2005-06-20;修回日期:2005-07-07 作者简介:李占明(1976-),男(满),河北隆化县人,硕士生。 射流的液滴或粒子的初始和中间行为的研究发现,电弧喷涂的电弧形态因受气流的影响而不同 于常规电弧,并且喷涂中阴极和阳极线材以非对称的方式熔化,焰流中的粒子速度、温度和尺寸 沿轴向和径向都呈非均匀分布的规律。最近,文 献[6,7]采用两根具有不同铁磁性能的材料分别作 为双丝电弧喷涂的阳极和阴极丝材,研究了粒子 的雾化行为和扁平化粒子的断面分布特性,发现 了来自单丝的粒子尺寸分布的"双峰"现象和粒 子的"交叉飞行"现象。

文中采用两根具有不同熔点的材料分别作为 双丝电弧喷涂的阳极和阴极丝材,采用 Spray Watch-2i 热喷涂监测系统,通过对融熔粒子飞行 中温度的在线测量分析,直接验证了粒子的"交 叉飞行"现象;利用扫描电子显微镜(SEM)和 能谱仪(EDS)定量研究了两极的材料和氧化物 在喷涂沉积丘中的分布,并分析了这些分布特征 在不同喷涂距离上的变化规律;从而进一步了揭 示涂层显微组织结构与飞行粒子之间的联系。

1 试验方法

1.1 喷涂设备和材料

试验所使用的喷涂设备为 CMD-AS-3000 型电弧喷涂系统和 HAS-02 型高速电弧喷涂枪。 用直径 3 mm 熔点为 1 083 ℃的铜丝和熔点为 1 395 ℃的 3Cr13 不锈钢丝分别作为阳极和阴极 丝材。喷涂电弧电压为 34 V、电流为 160 A。基 体材料为 45#钢,喷涂前基体表面经喷砂预处 理。

1.2 粒子温度的在线测量

采用 SprayWatch-2i 型热喷涂监测系统测量 飞行粒子的温度、速度和流量分布等参数(图 1)。SprayWatch-2i®型热喷涂监测系统系采用高 速摄像的方法测量飞行的粒子,系统不需要外部 光源,直接利用飞行粒子发出的光线成像,用带 有光谱分辨光学镜的 CCD 相机便可实时测量喷 涂粒子的粒子温度、飞行速度、测量区中的粒子 数量,以及粒子流的亮度、宽度和喷涂角度等参 数。为了测量到喷涂焰流中心处的粒子状态,测 试时喷枪的位置固定不变,移动 SprayWatch-2i 系统的相机,并确保相机的测试中心点落在焰流 中轴线上,相机镜头与喷涂粒子流的轴线保持 90°不变,相机的测试焦距都固定为 185 mm, 曝光时间约为6 ms。在距引弧点距离的 d 为 50 mm~300 mm 的范围内,每间隔 50 mm 进行测 试,每一个测量距离测量 5 次,测量的时间为 30 s.

1.3 涂层显微组织和组分含量分析

将喷枪的位置保持不变并指向基体表面的一 个固定位置、成 90° 交角喷涂制备出喷涂沉积丘 (图 1)。试验时分别选择 200 mm 和 300 mm 两 种喷涂距离进行比较。为避免试件升温过高,喷 涂时分多次进行,每次之间的冷却时间约为 1 min,总喷涂时间约为 3 min。

制备完涂层后,对试样的横断面进行金相抛 光处理,然后用 Quanta 200 型扫描电子显微镜



Fig.1 Schematic of the arc spraying experimental setup

(SEM)观察涂层的显微形貌,用 TRACOR Northern 型能谱仪(EDAX)测定涂层中 3Cr13、 Cu和O的成分含量。对每个试件沿沉积丘横断 面的中分线(图1)等间距地提取了约90个测量 结果。

2 结果与分析

2.1 雾化粒子的在线温度分布与交叉飞行现象

图 2 为 Cu 作为阳极、3Cr13 作为阴极,分 别在 100、150、250 mm 的断面位置上测得的粒 子沿射流水平方向直径的温度分布图。其中,每 个温度分布图是在该位置上测量 5 次后的平均结 果。由图可以明显看出,当 Cu 和 3Cr13 分别作 为阳极和阴极时,沿水平方向左侧粒子温度较高, 右侧粒子温度较低。考虑到 3Cr13 的熔点为 1 395 ℃, 而 Cu 的熔点仅为 1 083 ℃, 由此可以推测, 射流中右侧 Cu 粒子较多, 3Cr13 粒子较少, 而左 侧 3Cr13 粒子较多, Cu 粒子较少, 呈现出两种粒 子密度反对称分布的趋势。但实际上在喷抢中, Cu 丝材处于左侧, 而 3Cr13 丝材处于右侧。这表 明粒子经过熔化、雾化和加速后出现了"交叉飞 行"现象,即左侧的粒子多数飞到了右边,而右 侧的粒子多数飞到了左边。这一结果和文献[6]通 过涂层断面显微分析得出的结论是吻合的。图 3 为两根丝材交换位置后,即Cu作为阴极(右侧)、 3Cr13 作为阳极 (左侧) 时, 分别在 200、 250、 300 mm 断面位置上测得的粒子沿射流水平方向直径 的温度分布图。可以看出,温度分布的趋势和图 2 正好相反, 表明处于丝材尖端右侧的 Cu 粒子多 数飞向左边, 而处于丝材尖端左侧的 3Cr13 粒子

多数飞向了右边,再次证明了粒子的"交叉飞行"现象。造成熔融粒子交叉飞行现象的原因目前尚 不十分清楚,但这一现象与丝材尖端在起弧时作 用于粒子上的电磁力,以及由于丝材夹角所带来 的空气动力学不对称性有直接的关系。

2.2 涂层断面的元素面分布

图 4 为喷涂距离为 200 mm 时高速电弧喷涂 沉积丘断面上左、中、右 3 点(见图 1)的显微 组织形貌。图中颜色较深的区域富含原子序数较 低的元素,颜色较浅的区域富含原子序数较高的 元素。可以看出来自阴极和阳极的扁平粒子以近 似反对称的形式分布在射流中心的两侧。由左至 右,富含Cu的面积逐渐增加,含Fe和Cr的面积逐 渐减小。但喷涂中铜丝处于对称轴的左侧而不锈 钢丝处在对称轴的右侧。这种扁平化粒子的反对 称分布形式和前面关于粒子在线温度测量的结果 是相对应的,和文献^[6]关于沉积丘断面金相分析 的结果也是完全一致的。



图 2 粒子沿射流直径的温度分布 (Cu: 阳极, 3Cr13: 阴极, 测量距离: a: 100mm, b: 150mm, c: 250mm) Fig.2 Scheme of particle temperature distribution along the diameter of spray jet (Cu: anode, 3Cr13:cathode, measuring distance: a: 100mm, b: 150mm, c: 250mm)



图 3 粒子沿射流直径的温度分布(Cu: 阴极, 3Cr13 阳极, 测量距离: d: 200mm, e: 250mm, f: 300mm) Fig.3 Scheme of particle temperature distribution along the diameter of spray jet (Cu: cathode、3Cr13: anode, measuring distance: a: 200mm, b: 250mm, c: 300mm)



图 4 相应于图 1 电弧喷涂沉积丘横断面左、中、右 3 点处的 SEM 照片(喷涂距离: 200mm)

Fig. 4 SEM micrographs for fig 1 at points: left (x=-17mm), mid. (x=0mm), right (x=17mm)on the cross section of deposit mound (spraying distance: 200mm)

为了定量分析涂层中各种元素沿断面的相对 含量分布,采用能谱分析技术(EDS)测试了各 元素的质量百分含量。图 5 和图 6 给出了不同喷 涂距离上阴极(包括 Fe、Cr)、阳极(Cu)和氧 化物沿沉积丘断面的分布曲线。可以发现,在断 面的中间处(射流中心)阴、阳极丝材的含量相 差不大,而在两侧差异较明显。而且 Cu和 3Cr13 的含量曲线呈现出明显的"反对称"分布。这和 图 4 的元素面扫描结果完全吻合。在所测量的两 个喷涂距离上,各种成分(包括氧化物)的含量 随喷涂距离变化不大。氧化物的含量则在这两种 喷涂距离上变化不明显。另外,图 5 和图 6 显示 了电弧喷涂涂层中较高的氧化物含量(10 %左 右)。



至沉积丘距离 x /mm

图 5 沉积丘横断面显微组织成分质量分数曲线 (喷 涂距离: 200 mm)

Fig.5 Mass fraction of microstructures of deposit mound sprayed at the distance of 200 mm



图 6 沉积丘横断面显微组织成分质量分数曲线 (喷 涂距离: 300 mm)

Fig. 6 Mass fraction of microstructures of deposit mound sprayed at the distance of 300 mm

3 结 论

(1)采用两根具有不同熔点的材料分别作为 双丝电弧喷涂的阳极和阴极丝材,采用 SprayWatch-2i热喷涂监测系统,通过对融熔粒 子飞行中温度的在线测量分析,直接验证了粒子的"交叉飞行"现象。

(2)利用能谱仪(EDS)定量研究了两极的 材料和氧化物在喷涂沉积丘中的分布,并分析了 这些分布特征在不同喷涂距离上的变化规律,结 果发现,沿喷涂丘的横截面,来自阴极和阳极的 扁平化粒子以接近反对称的方式分布。在所测量 的两个喷涂距离上,各种成分(包括氧化物)的 含量随喷涂距离变化不大,而且电弧喷涂涂层中 具有较高的氧化物含量(约10%左右)。

参考文献:

- [1] Hussary N A, Heberlein J. Investigation of arc behavior and particle formation in wire arc spray process using high-speed photography [C]. In: C C Berndt, ed. Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research. Ohio, USA: ASM International, Materials Park, 2000:737-742.
- [2] Kelkar M, Hussary N, Schein J, et al. Optical diagnostics and modeling of gas and droplet flow in wire arc spraying [C]. In: C Coddet, ed. Thermal Spray: Meeting the Challenges of the 21st Century. OH: ASM International, Materials Park, 1998:329-334.
- [3] Hale D L, Swank W D, Haggard D C. In-flight particle measurements of twin wire electric arc sprayed aluminum [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1998, 1(7):58-63.
- [4] Hussary N, Schein J, Heberlein J. Control of jet convergence in wire arc spray systems [C]. In: E Lugscheider, P A Kammer, ed. Proceedings of Tagunsband Conference. Dusseldorf, Germany: 17-19 Mars, 1999:335-339.
- [5] Sheard J, Heberlein J, Stelson K, et al. Diagnostic development for control of wire-arc spraying [C]. In: C C Berndt, ed. Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances. Ohio, USA: ASM International, Materials Park, 1997:613-618.

(下转第19页)

- [6] 朱有利, 廖翰林,等. 双丝电弧喷涂中的粒子交 叉飞行现象 [J]. 材料工程, 2003, No.9:33-36.
- [7] Liao H L, Zhu Y L, Bolot R, et al. Size distribution of particles from individual wires and the effects of nozzle geometry in twin wire arc spraying [J]. Surface and Coating Technology, 2005, (200) accepted, Article in Press.

作者地址:北京丰台区杜家坎 21 号 100072 Tel: (010) 66717168 13331097926 E-mail: lizhanming1@163.com