

钛-铝双丝超音速电弧喷涂过程中熔滴粒子几何特性研究

李平^{1,2}, 乔生儒², 王汉功¹

(1. 第二炮兵工程学院 501 教研室, 陕西 西安 710025, 2. 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072)

[摘要] 为了研究工艺参数对钛-铝双丝超音速电弧喷涂熔滴粒子尺寸的影响规律, 通过对喷枪出口处气流速度、气体质量流率和金属熔滴质量流率的分析测定, 以 Nukiyama-Tanasawa 模型为基础, 建立了喷涂粒子的平均直径与喷涂电压和电流间的解析关系, 并对喷涂电压和电流对熔滴粒子平均直径的影响进行了计算机模拟仿真。结果表明: 在喷枪结构和雾化气体压力一定时, 雾化粒子的平均直径随喷涂电流的增大而增大, 随喷涂电压的升高而减小, 但总的变化幅度却较小。利用激光粒度分析仪对一定喷涂工艺条件下所得的粒子平均直径进行实验分析, 结果与计算值之间的相对误差为 9.52%, 扫描电镜观察表明粒子形态以球形颗粒为主。

[关键词] 钛铝; 超音速电弧喷涂; 工艺参数; 熔滴尺寸; 雾化

[中图分类号] TG174.442; TQ639.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2007)01-0084-03

Study on Geometry Character of Molten Droplet Atomizing during Titanium-aluminum Twin Wires Supersonic Arc Spraying

LI Ping^{1,2}, QIAO Sheng-ru², WANG Han-gong¹

(1. The Second Artillery Engineering Institute, Xian 710025, China;

2. Material College of North-western Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

[Abstract] The influence of arc spraying parameters on the droplet size of titanium and aluminum was studied. The outlet velocity and mass flow ratio of gases and molten droplet mass flow ratio were determined firstly for supersonic wires arc spray (SWAS). On the basis of Nukiyama-Tanasawa's model about liquid droplet atomization average diameter, the analytic expressions of the molten droplet mean diameter between spray voltage and current in titanium and aluminum supersonic wires arc spray was derived, the correlation with arc spray parameters (voltage and current) droplet mean diameters were simulated by computer. The results show that the mean diameter of droplet increases with adding of spray current, and decreases with rising of spray voltage, but the extent of mean diameter changing is very finites at the certain gas pressure and spray nozzle structure. The particle size of spray droplet atomized determining by laser granularity analyzer, the relative error between calculation value and measure result is 9.52%. The shape of the majority of particles sprayed is sphericity by scanning electron microscopy observing.

[Key words] Ti-Al; Supersonic arc spraying; Technological parameter; Droplet size; Atomization

0 引言

钛铝合金以其密度、刚度、高温强度和阻燃性等方面的优势而被认为是最有应用潜力的新一代航空、航天结构材料,但其室温塑性较差,成了影响其广泛使用的制约因素^[1]。因此,采用热喷涂方法在金属基体表面形成 TiAl 基金属涂层的方法倍受人们关注。Cantor B^[2] 和 Tsunekawa Y^[3] 分别采用真空等离子和低压等离子喷涂方法,用 Ti、Al 粉末在低碳钢基体上形成了 TiAl 基金属涂层,并研究了喷涂工艺对涂层的成分、组织与性能的影响。超音速电弧喷涂 (Supersonic Wires Arc Spray, 简称 SWAS) 是利用气体动力学原理,通过特殊设计的喷管将雾化气

体加速,形成的高速雾化气流来雾化和加速熔融金属,使雾化粒子以较高速度喷射到工件表面形成涂层的一种电弧喷涂方法^[4],它以高质量、低成本已引起国内外的广泛关注。对 Ti、Al 双丝 SWAS 涂层的研究发现,该涂层不仅具有较高的硬度、致密度和结合强度,还具有较好的耐滑动摩擦磨损性能^[5-9]。熔滴粒子雾化特性是衡量电弧喷涂工艺优劣的重要特征参数,并直接影响涂层的组织结构和性能。本文通过对喷枪出口处气流速度、气体质量流率及熔滴质量流率的测算,分析了钛-铝超音速电弧喷涂中喷涂电压和电流对熔滴粒子尺寸的影响规律,对正确理解钛铝 SWAS 涂层的组织结构与性能、制订合理的喷涂工艺、改善和控制涂层质量具有重要意义。

1 试验设备和方法

采用 SAS-II 型超音速电弧喷涂设备及标称直径为 $\phi 2\text{mm}$

[收稿日期] 2006-09-05

[作者简介] 李平 (1965-), 男, 陕西岐山人, 副教授, 博士, 研究方向为材料表面工程。

的钛丝(TA2)和铝丝(L1),其中钛丝与电源的负极相连。铝丝与电源的正极相连,喷涂所用压缩空气的压力为0.8MPa。通过测定单位时间内丝材的进给量,即送丝速度,确定金属熔滴的质量流率。

将电弧喷涂射流喷向直径550mm的水桶中收集金属粉末,为避免气流造成的液体飞溅,喷枪距液面高度为750mm,选择较大直径收集容器的目的在于使电弧喷涂的射流全部落于水面。收集后的粉末待其完全沉积后,滤掉多余水分,分别用酒精、丙酮洗涤,最后经干燥后,用Mastersizer-2000型激光衍射法粒度分析仪进行粒度分析,用JSM-5800型扫描电镜进行粒子形貌观察。

2 雾化熔滴几何特性的表征

2.1 雾化熔滴的平均直径

雾化是指液体在气体的冲击作用下破碎成为雾滴的过程,是由于液体和气体相互作用引起液体表面不稳定波的增长而导致的破碎。因此,如何描述有关雾化液滴直径的大小、分布及散射角等问题,成为人们关注的焦点,其中液滴直径更加引人注目。如Bradley D^[10]、Mathur P^[11]等分别提出了计算雾化液滴直径的经验公式,马峥和周哲玮^[12]通过能量分析方法也得到了雾化液滴最小等效直径的判断准则。由于雾化微滴的尺寸(直径)服从统计分布规律,很难精确描述。最小等效直径法只给出雾化熔滴等效直径的下限,经验公式又各有各的适用范围,而Nukiyama-Tanasawa的模型是空气中雾化液滴平均直径的经验表达式,与钛铝SWAS的条件比较接近,因此,采用已被广泛使用的Nukiyama-Tanasawa公式表示雾化熔滴的平均直径^[13]:

$$d_m = \frac{585}{V_r} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_m}} + 579 \left(\frac{\mu_r^2}{\sigma \rho_m} \right)^{0.225} \left(\frac{10^3 Q_m}{Q_g} \right)^{1.5} \quad (1)$$

式(1)中, d_m 为液滴平均直径, μm ; V_r 为液滴与气流的相对速度, m/s ; σ_m 为熔滴的表面张力, N/m ; ρ_m 为熔滴的密度, kg/m^3 ; μ_r 为熔滴的黏度系数, $(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2$; Q_m 、 Q_g 分别为熔滴和空气的体积流量, m^3/s 。

由式(1)可见,要得到熔滴的平均直径,不仅与熔滴金属本身的物性参数有关,而且与受喷涂设备和工艺条件所决定的雾化气流在喷嘴出口处的速度和质量流率大小、初始熔滴速度和质量流率大小密切相关。由于缺少温度等与熔滴金属密度、表面张力和黏度系数间关系的文献资料,本文暂不考虑工艺因素对它们的影响,一律将其按常数处理。

2.2 雾化气体出口速度和质量流率

由于超音速电弧喷涂(SWAS)采用的是拉瓦尔喷管,实现对气流的加速,两根丝材的交汇点位于拉瓦尔喷嘴的出口处。以出口处的气流速度和质量流率进行熔滴直径的计算。在假定气体的流动过程是一维定常和等熵(即无粘性、绝热和无化学反应)的理想流动、视熔滴为球状、并忽略熔滴自重作用等情况下,喷管出口处气流速度 V_g 和气体的质量流率 J_g 可表示为^[14-15]:

$$V_g = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{P_0}{\rho_0}} \quad (2)$$

$$J_g = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/(\gamma-1)} \cdot A_a \cdot \sqrt{\frac{2\gamma P_0 \rho_0}{\gamma+1}} \quad (3)$$

式中, γ 为气体的绝热指数; P_0 为雾化气体的压力,Pa; ρ_0 是压力为 P_0 时的气体密度, kg/m^3 ; A_a 为喷嘴出口处的截面积, m^2 。

$\gamma = 1.4$, $P_0 = 0.8\text{MPa}$, ρ_0 可由储气罐的温度 $T_0 = 323.15\text{K}$ 和气体状态方程确定,根据SAS-II喷枪结构知 $A_a = 452.89\text{mm}^2$,代入式(2)、(3)可得喷嘴出口处气流速度和质量流率分别为: $V_g = 538\text{m/s}$, $J_g = 0.3869\text{kg/s}$ 。

2.3 钛和铝金属熔滴质量流率的确定

表1为不同喷涂工艺参数下所得两极丝材进给速度的试验结果,对其进行处理后可得丝材的送进速度与喷涂电压和喷涂电流的关系如下:

$$v_{Ti} = 15.3366 - 0.46475U + 0.45093I \quad (4)$$

$$v_{Al} = 15.7927 - 0.48608U + 0.44315I \quad (5)$$

式中, v_{Ti} 、 v_{Al} 分别为钛丝和铝丝的进给速度, mm/s ; U 为喷涂电压,V; I 为喷涂电流,A。

由式(4)、(5)可得,电弧喷涂时熔融钛、铝金属的质量流率为:

$$J_{Ti} = v_{Ti} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot b_{Ti}^2 \cdot \rho_{Ti} \quad (6)$$

$$J_{Al} = v_{Al} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot b_{Al}^2 \cdot \rho_{Al} \quad (7)$$

式中, J_{Ti} 、 J_{Al} 分别为金属钛和铝的质量流率, kg/s ; v_{Ti} 、 v_{Al} , m/s ; $b_{Ti} (= 2.08 \times 10^{-3}\text{m})$ 、 $b_{Al} (= 1.96 \times 10^{-3}\text{m})$ 分别为钛、铝金属丝材的直径,m; ρ_{Ti} 、 ρ_{Al} 分别为钛和铝的密度, kg/m^3 。

表1 钛和铝丝进给速度测量结果

Table 1 The experiment results of feeding velocity of titanium and aluminum wires

喷涂电压 /V	喷涂电流 /A	钛丝速度 /(mm·s ⁻¹)	铝丝速度 /(mm·s ⁻¹)
38	80	33.9	32.7
26	80	39.4	38.5
32	120	55.6	54.7
32	40	18.5	18.1
32	80	34.6	33.8
32	20	10.2	9.8

2.4 雾化熔滴平均直径的计算结果与分析

图1是利用Matlab软件和文献[16]、[17]中的有关数据针对喷涂电压和喷涂电流对熔滴平均直径影响进行仿真计算的结果。由图可见,喷涂电压和电流对雾化微滴平均直径的绝对值影响程度不是很大。但从影响趋势看:随喷涂电流的增大,粒子的平均直径增大;而随喷涂电压的升高,粒子平均直径略有下降,但增幅较小。这是因为随喷涂电流的增大,送丝速度增大,熔滴粒子的质量流率增大;而喷涂电压对送丝速度影响较小的缘故。结合式(1)和图1可以看出,雾化气流与熔滴的相对速度对熔滴的平均直径起决定性作用,其次是熔滴的表面张力、密度、黏度系数及熔滴与气流体积之比。在喷枪结构、雾化气流压力一定的情况下,由于熔滴速度(送丝速度)与气流速度相比较小,气流速度、熔滴表面张力等对熔滴雾化的贡献较大,而由送

丝速度决定的熔滴体积率则影响较小。

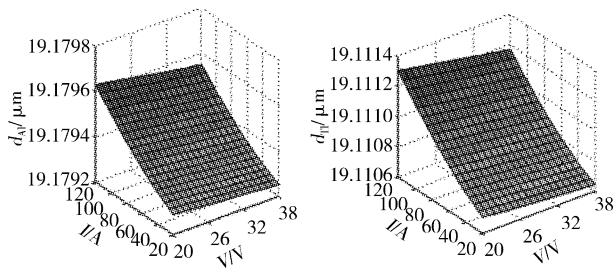


图1 钛、铝金属熔滴雾化粒子平均直径与喷涂电压和电流的关系

Figure 1 The dependences of mean diameters of titanium and aluminum droplets with spray voltage and current

2.5 雾化熔滴的粒度分析与形态观察

图2是喷涂电压为29V、喷涂电流为100A、喷枪出口处距离水面高度0.75m时,将雾化后的金属熔滴射流喷向水中,所收集粉末的粒度分析结果。其平均粒径 $d = 17.291\mu\text{m}$,位于颗粒分布曲线的中间位置,说明粒子的分布具有正态或高斯分布特点。此外,计算结果与实际测量结果也比较接近,相对误差小于10%。图3为粉末的SEM观察结果,由图3可见,经雾化后金属熔滴的形态大部分呈球形,且粒子的尺寸及分布与粒度分析结果一致。

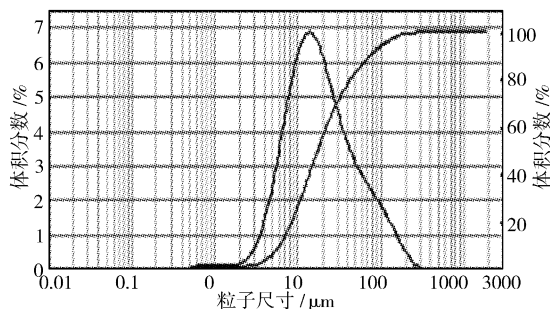


图2 金属熔滴粒子的粒度分布(29V, 100A)

Figure 2 The plot of spraying droplet particles size distribution (29V, 100A)

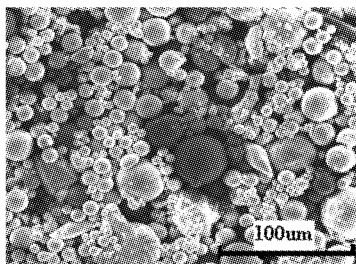


图3 金属熔滴粒子的SEM照片(29V, 100A)

Figure 3 The SEM photograph of droplet particles (29V, 100A)

3 结论

1) 喷涂电压和喷涂电流对钛、铝SWAS熔滴粒子有一定影响,但影响幅度不大。在一定范围内,随喷涂电压的升高,钛、铝熔滴粒子的平均直径呈下降趋势;而随喷涂电流的增大,熔滴粒子的平均直径呈上升趋势。

2) 计算所得钛、铝SWAS熔滴粒子的平均直径与实际测量

的粒子平均直径之间的相对误差小于10%。

3) 粒子直径具有正态分布的特点,其几何形态主要以球形为主。

[参考文献]

- [1] 黄伯云. 钛铝金属间化合物[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1998. 1-57
- [2] Cantor B, Giant P S. Spray formed TiAl [P]. GR Pat: GR/K0098, 1993-08-31.
- [3] Tsunekawa Y, Gotoh K, Okumiya M, Mohri N. Synthesis and high-temperature stability of titanium aluminize matrix in situ composites [J]. JTST, 1992, 1(3):223-229
- [4] 王汉功. 超音速电弧喷涂技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1999. 1-10
- [5] Wang Hangong, Li Ping, Guo Qin. Study of microstructure and properties of TiAl alloy coatings ultrasonic arc sprayed [A]. Proceedings of the First International Conference on Mechanical Engineering [C]. Beijing: Mechanical industry publishing house, 2000. 319-320
- [6] Wang Hangong, Li Ping, Guo Qin, et al. Study of slide-wear resistance of ultrasonic arc sprayed TiAl alloy coatings [A]. Proceedings of International Thermal Spraying Conference [C]. Ohio, USA: ASM International, 2001. 1111-1113
- [7] 李平, 王汉功. 钛铝极性对超音速电弧喷涂层组织与性能影响 [J]. 表面技术, 2002, 31(6):20-23
- [8] 李平, 王汉功. 铝合金表面 Ti-Al 双丝超音速电弧喷涂涂层的组织与性能研究 [J]. 材料工程, 2003, (3):17-20
- [9] 李平, 王汉功. Ti-Al 双丝超音速电弧喷涂涂层的滑动磨损特性研究 [J]. 材料工程, 2004, (11):11-14, 17
- [10] Bradley D. On the atomization of liquid by high-velocity gases (I) & (II) [J]. Phys. Fluids, 1973, 6(6):1724-2267
- [11] Mathur P, Annavarapu S, Apelian D, et al. Spray casting: on inter-regnal model for process understanding and control [J]. Materials Science and Engineering A, 1991, 142(2):261-276
- [12] 马峥, 周哲玮. 喷射雾化最小等效直径的能量判断准则 [J]. 应用数学和力学, 1999, 20(8):771-775
- [13] Luhanslo H. Correlation of spraying data for gas atomization of liquid metals [J]. J. Metals, 1970, 22(2):45
- [14] 沈军, 崔成松, 蒋祖龄, 等. 气体雾化过程几个重要参数的计算 [J]. 粉末冶金技术, 1994, 12(4):255-257
- [15] 陈振华. 金属液体雾化问题 [J]. 粉末冶金技术, 1998, 16(4):284-291
- [16] 叶大伦. 实用无机物热力学数据手册 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1981. 56-946
- [17] Robert C West. CRC Handbook of Chemistry and Physics [M]. Ohio: CRC Press Inc., 1978. F-25-37

《表面技术》 双月刊
欢迎订阅

邮发代号:78-31 订价:8.00元/册
全年订价:48.00元,共6期
电话/传真:023-68793154