

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2012.01.013

超音速等离子喷涂工艺参数对 AlSi-20%Al/Ni 涂层结合强度的影响

范文超^a, 谭俊^{a,b}, 王海军^a, 刘明^a, 李绪强^b

(装甲兵工程学院 a. 再制造技术重点实验室, 北京 100072 b. 全军装备表面工程重点实验室, 北京 100072)

摘要: 为使 AlSi-20%Al/Ni 超音速等离子喷涂涂层获得优良的结合性能, 采用正交实验法研究了喷涂距离、喷涂电压、喷涂电流等喷涂工艺参数对结合强度的影响。利用 X 射线衍射、扫描电镜等手段对涂层的相组成和断面形貌进行分析, 利用 WDW-E100D 微机控制式万能拉伸试验机对涂层结合强度进行测试。结果表明: 涂层由 AlSi 和 AlNi 两相组成, 影响 AlSi-20%Al/Ni 涂层结合强度工艺参数的主次顺序为喷涂距离、喷涂电压、喷涂电流, 优化后的工艺参数为主气流量 3.2 m³/h, 喷涂电流为 380 A, 喷涂电压为 130 V, 喷涂距离为 90 mm, 在此参数下制备的涂层组织致密, 其结合强度为 65.5 MPa。

关键词: 超音速等离子喷涂; AlSi-20%Al/Ni 涂层; 工艺参数; 结合强度; 正交实验

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)01-0071-05

Influence of Supersonic Plasma Spraying Process on Bonding Strength of AlSi-20%Al/Ni Coating

FAN Wen-chao^a, TAN Jun^{a,b}, WANG Hai-jun^a, LIU Ming^a, LI Xu-qiang^b

(a. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory b. Key Laboratory for Surface Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

Abstract: In order to get a supersonic plasma sprayed AlSi-20%Al/Ni coating with good properties, the effect of supersonic plasma spraying process parameters on the bonding strength of the coatings was investigated by orthogonal experiment. The fracture of the coating and morphology of the sprayed layer were investigated by X-ray diffraction(XRD) and scanning electron microscopy(SEM), and the bonding strength of the coatings was tested by WDW-E100D. The result shows that the coating is composed by AlSi and AlNi, the primary and secondary gradation of process parameters which are effect on the bonding strength of the coating are spraying distance, spraying voltage and spraying electric current. The optimized process parameters of the supersonic plasma spraying AlSi-20%Al/Ni coating is primary gas flux 3.2 m³/h, spray current 380 A, spray voltage 130 V and spray distance 90 mm. With the optimized process parameters, the coating is compact and the bonding strength of the coating reaches to 65.5 MPa.

Key words: supersonic plasma spraying; AlSi-20%Al/Ni coating; process parameters; bonding strength; orthogonal experiment

0 引言

超音速等离子喷涂是利用能量密度非常高的超音速等离子射流加热、加速喷涂材料而获得

高质量喷涂的工艺过程^[1]。与其它热喷涂工艺相似, 为了提高涂层的结合强度, 常在工作涂层和基体之间插入一层具有良好结合性能的渡层或打底层。目前, 火焰喷涂和普通等离子喷涂常

收稿日期: 2011-08-18; 修回日期: 2011-11-10

作者简介: 范文超(1987-), 男(汉), 山西晋中人, 硕士生; 研究方向: 等离子喷涂

引文格式: 范文超, 谭俊, 王海军, 等. 超音速离子喷涂工艺参数对 AlSi-20%Al/Ni 涂层结合强度的影响 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(1): 71-75.

用的打底层材料为自粘性喷涂金属粉末,如 Al/Ni 和 NiCrAl 等^[2-3]。在热喷涂火焰中被加热至一定温度时,该粉末组分之间发生化学反应,生成金属间化合物,并放出大量热量,对基体材料表面或已形成的涂层表面进行充分加热,甚至实现微观上的冶金结合^[4]。同时,这两种粉末的放热反应会导致打底层存在较大的热应力。

超音速等离子喷涂热源温度高,粒子速度大,因此对于打底粉末自身的放热反应要求不像火焰喷涂和普通等离子喷涂那样高,用低熔点的金属(合金)粉末替代自粘性喷涂金属粉末,既可以保证涂层与基体的结合强度,又可以降低由于打底粉自身的放热反应带来的热应力。

AlSi 粉末是一种常用的喷涂合金粉末,自身不存在放热反应,其熔点低于 Al/Ni,加热到较低的温度下就可以获得熔化状态较好的 AlSi 粉末,涂层冷却后热应力较小。因此,实验在纯 AlSi 粉中机械混合质量分数为 20% 的 Al/Ni,研究了不同的喷涂工艺参数对超音速等离子喷涂 AlSi-20% Al/Ni 涂层结合强度的影响,以寻求高结合强度的超音速等离子喷涂工艺参数,为获得优质涂层提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及设备

喷涂粉末为 AlSi-20% Al/Ni,由 AlSi 粉末和 Al/Ni 粉末机械混合制备,粒度为 -140+325 目,粉末形貌如图 1 所示。由图 1 可知,粉末粒度比较均匀,其中,扁平状的粉末为 AlSi 粉末,球状的粉末为 Al/Ni 粉末。试验基体选用 316 不

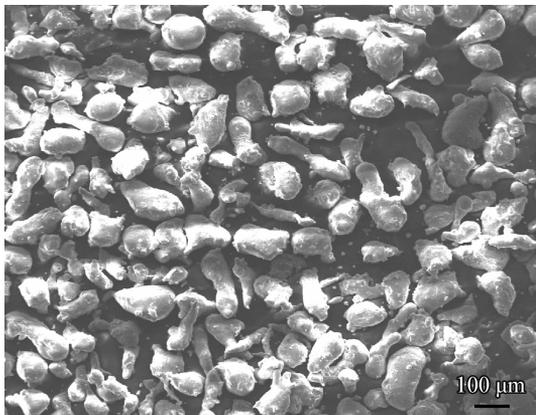


图 1 AlSi-20% Al/Ni 粉末形貌

Fig. 1 Morphology of AlSi-20% Al/Ni powder

锈钢,表面进行喷砂处理。喷涂设备采用 HEP-Jet 100 型超音速等离子喷涂系统。

1.2 喷涂方法

固定喷涂主气 Ar 流量为 3.2 m³/h,次气为 H₂。送粉量为 28 g/min;送粉气为 N₂。喷枪移动速度 40 m/min。采用正交设计原理选择 AlSi-20% Al/Ni 涂层的喷涂工艺参数,包括喷涂电流、喷涂电压和喷涂距离。每个工艺参数分别选取 3 个水平,根据 L₉(3⁴) 正交表,建立正交设计方案如表 1 所示。每组参数喷涂 4 个试样,涂层厚度在 0.3 mm 左右。

表 1 因素水平表

Table 1 Factors and levels

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
Spray current/A	360	380	400
Spray voltage/V	125	130	135
Spray distance/mm	80	90	100

1.3 涂层结合强度测试

在经过预处理的圆柱端面上喷涂涂层,同经过喷砂处理的对偶件用 FM1000 胶进行对心粘接,250 °C 保温 3 h 完全固化后在 WDW-E100D 微机控制式万能拉伸试验机上进行拉伸试验。每组涂层采用 4 对试样进行测试,取其平均值作为其结合强度值。

2 试验结果及分析

2.1 涂层结合强度

表 2 为三因素三水平正交实验结果,实验结果表明工艺参数对超音速等离子喷涂涂层结合强度影响的主次顺序为:喷涂距离>喷涂电压>喷涂电流。由表 2 可知获得最优的工艺参数的组合是电流为 380 A,电压为 130 V,喷涂距离为 90 mm,为 2 号工艺参数,而 2 号工艺参数的结合强度也是最大的。计算正交结果获得趋势线如图 2 所示。

由表 2 和图 2 可得知,各工艺参数对涂层结合强度都会有影响。喷涂距离过大或过小都会对涂层性能有较大的影响,较大的喷涂距离会降低粒子的碰撞速度,从而大大降低粒子的动能,同时粒子到达基体时温度较低,熔融粒子表面张力大,粒子撞击基体后与基体的浸润性不好,流

表 2 正交实验结果

Table 2 Orthogonal test results

Number of the sample	Factor			
	Current/A	Voltage/V	Spray distance/mm	Bond strength/MPa
1	1(360)	1(125)	1(80)	39.75
2	2(380)	2(130)	2(90)	65.50
3	3(400)	3(135)	3(100)	55.25
4	1(360)	2(130)	3(100)	45.00
5	2(380)	3(135)	1(80)	35.50
6	3(400)	1(125)	2(90)	27.00
7	1(360)	3(135)	2(90)	53.75
8	2(380)	1(125)	3(100)	52.25
9	3(400)	2(130)	1(80)	37.75
K1	138.5	119.0	113.0	
K2	153.25	148.25	152.5	
K3	120.0	144.5	146.25	
Range	33.25	29.25	39.50	
Order of the factors	Spray distance	Spray current	Spray voltage	
The optimal solution	A ₂ B ₂ C ₂			

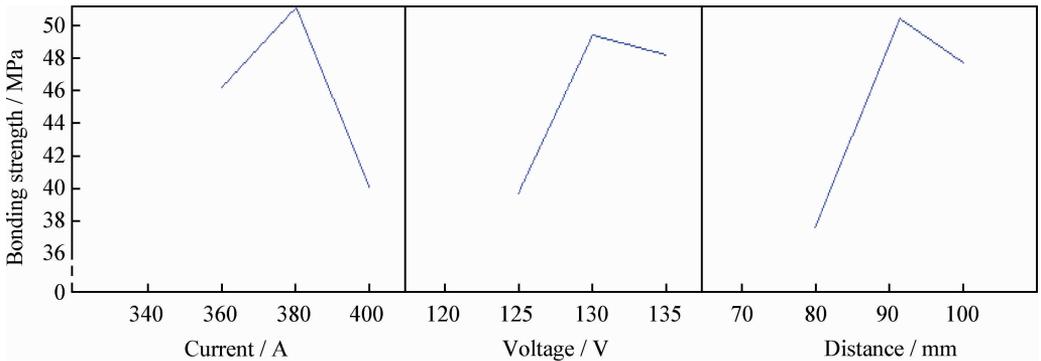


图 2 喷涂工艺参数对涂层结合强度的影响

Fig. 2 The effect of supersonic plasma spraying process parameters on the bonding strength of the coating

动性不好,难以形成致密的涂层,造成孔隙率增加^[5]。而当喷涂距离较小时,由于喷涂距离较近的缘故,等离子高温弧必然会加大对涂层的加热,导致涂层过热甚至熔化(在实验过程中,1号、5号和9号试样的涂层表面都有不同程度的熔化),涂层内应力增加。加之粒子在短距离之内动能也没有达到最大值,也会影响涂层的结合质量。

喷涂电流对结合强度的影响也是呈现先上

升后下降的趋势。当喷涂电流较低时,喷涂粒子冷却过快,造成粒子加热不完全、粒子粗大等现象,导致其与涂层结合不好。随着电流的增加,喷涂粉末的熔化越来越完全,粒子所含的热焓高,当熔融金属粒子高速飞行陆续撞击基体表面形成涂层时,由于撞击基体表面后变形增大,有利于粒子铺展,涂层的致密性提高,粒子之间的内聚力增强,涂层结合强度增高^[6]。但是随着电流的进一

步增加,导致了熔点较低的 AlSi-20%Al/Ni 粉末产生过熔现象,影响结合强度。

喷涂电压对结合强度的影响也是呈现先上升后下降的趋势。本实验所用到的等离子喷涂设备的电压是通过调节辅气流量(H_2)来调节的。辅气流量的增加,会促进等离子焰流温度的增加,有利于粉末的充分熔化,从而提高涂层的致密性和结合强度^[7]。但是过高的辅气流量会增加涂层中氢的含量,导致涂层变脆;同时也会使等离子焰流的温度过高导致喷涂粉末过熔,从而降低涂层结合强度。

2.2 涂层的物相分析

图3为涂层的XRD图谱。图谱中存在 AlSi 合金相和 Ni 单质相,同时 AlNi 合金相与 AlSi 合金相的衍射峰重叠,但是由于图谱中没有 Al 单质相的存在,证明包覆在 Ni 球表面的 Al 与 Ni 发生放热反应,生成了他们间的金属化合物。而 AlSi 部分在喷涂过程中没有发生相变,AlSi 粉是一种稳定的粉末。综上所述,涂层是由 AlSi 合金相、AlNi 合金相和 Ni 单质相组成的。

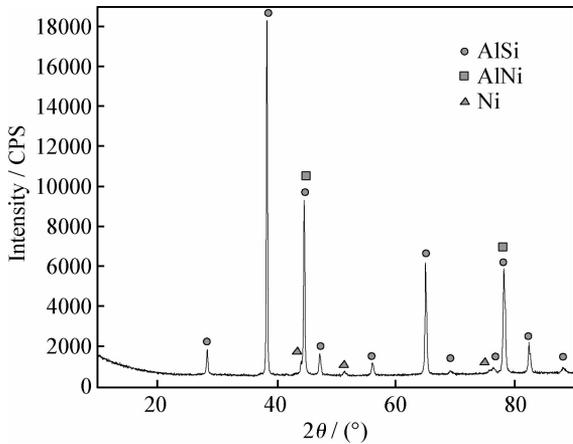


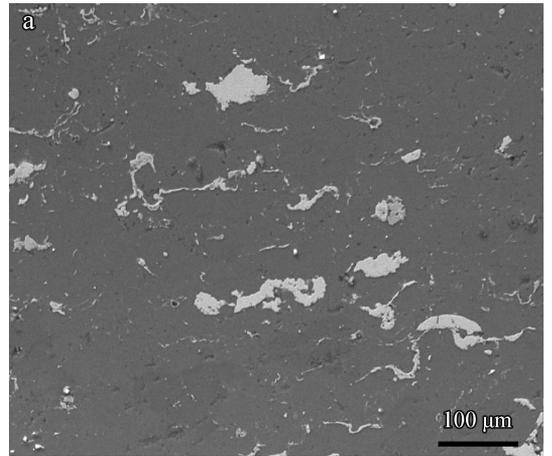
图3 AlSi-20%Al/Ni涂层的XRD图谱

Fig. 3 XRD of the AlSi-20%Al/Ni coating

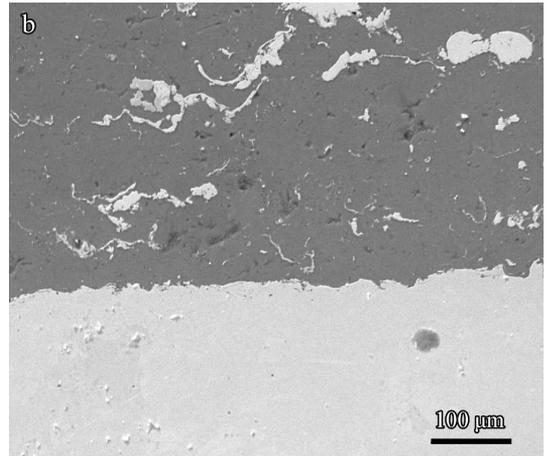
2.3 涂层的微观形貌

图4为2号试样涂层截面的扫描电镜照片。由图4(a)可知,涂层内部很致密,只有少量的孔隙。涂层形成明显的两相,浅色区是 AlNi 金属间化合物,深色区是 AlSi 合金涂层。涂层内几乎看不出层状结构,说明大多数 AlSi-20%Al/Ni 粒子变形充分,使得熔融的粒子在到达基体后得以完全的铺展开,使得层与层之间结合相当好,而层与层之间的界限不明显。由图4(b)可知,被

撞成扁平状并随基体表面起伏的熔融粒子通过与凹凸不平的基体表面互相嵌合,形成了机械键,所以涂层与基体的结合是以机械结合为主。涂层与基体结合紧密,有少许波浪形状,结合处无孔隙以及其他缺陷。Al/Ni 在喷涂过程发生放热反应,产生的热量对基体和粒子能进行充分的加热,使熔融状喷涂粒子与基体表面的薄层之间形成微冶金结合,产生“自粘结”效应,提高涂层与基体之间的结合;同时,分布于 AlSi 涂层间的 AlNi 合金还能够提高涂层的内聚强度。



(a) Internal of the coating



(b) Interface of the coating

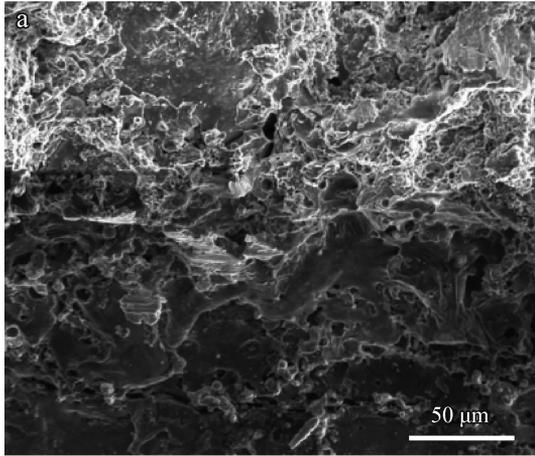
图4 涂层截面的扫描电镜照片

Fig. 4 SEM images of the coating in section

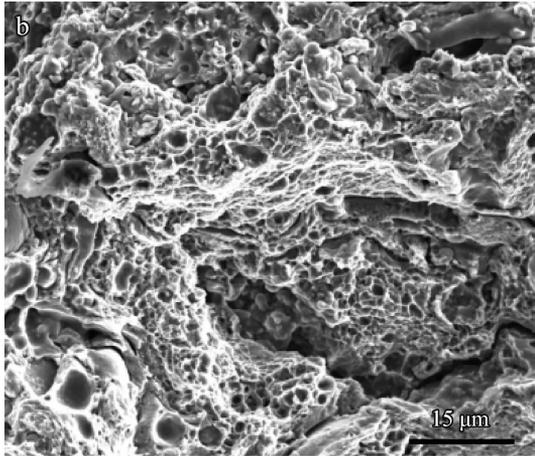
2.4 涂层的断口形貌

断口试样通过将基体用线切割切去一部分,然后再将涂层掰断的方法制备得到。图5为2号试样涂层断口的扫描电镜照片。由图5(a)可知,在涂层与基体的结合处不存在明显的裂纹和

孔隙等缺陷,有些许波浪形状,涂层与基体结合紧密。由图 5(b)可知,涂层断口内部呈明显的韧窝状,说明涂层本身塑性很好。涂层良好的塑性有利于提高涂层与基体的结合强度和涂层后期的机械加工。



(a) Interface of the coating



(b) Internal of the coating

图 5 涂层断口的扫描电镜照片

Fig. 5 Fracture morphology of the coating

3 结 论

文中以非放热型 AlSi 合金粉末为主,添加 20%放热型自粘结 Al/Ni 金属粉末,采用不同超

音速等离子喷涂工艺参数制备了 AlSi-20%Al/Ni 涂层,可得到以下结论:

(1)超音速等离子喷涂 AlSi-20%Al/Ni 涂层均匀致密,界面上没有孔隙和夹杂,具有良好的塑性,是一种结合性能良好的打底层。

(2)超音速等离子喷涂 AlSi-20%Al/Ni 涂层由 AlSi 合金相和 AlNi 合金相组成。在喷涂过程中,Al/Ni 混合粉末发生放热反应形成 AlNi 之间的合金相,有利于提高涂层的结合强度。

(3)影响 AlSi-20%Al/Ni 涂层等离子喷涂工艺参数的主次顺序为:喷涂距离>喷涂电流>喷涂电压,涂层具有最好的结合强度的喷涂工艺参数为主气流量 3.2 m³/h,喷涂电流为 380 A,喷涂电压为 130 V,喷涂距离为 90 mm。其结合强度可达到 65.5 MPa。

参考文献

- [1] 徐滨士,朱绍华,等. 表面工程的理论与技术 [M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [2] 张平,等. 热喷涂材料 [M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [3] 刘明,王海军,韩志海,等. 内孔等离子喷涂 Ni45-15%Mo 涂层与 38CrMoAl 渗氮层耐磨性研究 [J]. 中国表面工程,2002,20(2): 47-50.
- [4] 郭永明,王海军,谢兆钱,等. 超音速等离子制备 Al/Ni 涂层的性能特点 [J]. 装甲兵工程学院学报,2010,24(4): 69-72.
- [5] 邹慧,王志平,纪朝辉. Ni-Cr-Al 合金电弧喷涂工艺对涂层结合强度的影响 [J]. 金属热处理报,2010,35(2): 51-54.
- [6] 徐滨士,王海军,朱胜,等. 高效能超音速等离子喷涂技术的研究与开发应用 [J]. 制造技术与机床,2003,16(1): 16-18.
- [7] 王海军. 热喷涂实用技术 [M]. 北京:国防工业出版社,2006.

作者地址:北京市丰台区杜家坎 21 号

100072

装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室

Tel: (010) 6671 7880

E-mail: fanwenchao3549@163.com