

# 等离子喷涂 $\text{TiO}_2$ 基涂层工艺参数优化研究

路广明, 乌日开西·艾依提

(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** **目的** 对  $\text{TiO}_2$  基涂层的等离子喷涂工艺参数进行优化。**方法** 采用正交实验、基材温度采集并结合涂层微观形貌分析、能谱分析、结合强度试验、显微硬度测试等方法, 研究了喷涂电流、喷涂距离、主气流量对涂层组织及性能的影响规律, 并获得了优化的喷涂工艺参数。**结果** 涂层分熔融区和部分熔融区, 呈现双模结构的混合微观结构特征, 截面形貌凹凸不平, 并以机械结合为主。拉断后, 涂层断裂面呈韧窝状, 由陶瓷层到粘结层呈台阶状过渡, 陶瓷层整体的内聚结合强度优于陶瓷层与粘结层结合界面的结合强度。涂层条带状夹杂随着粉末流到达基板的温度的增加而减少, 对结合强度影响不显著, 但对硬度影响较显著。等离子喷涂过程中, 粉末流到达基板的温度在一定范围内时, 涂层性能随着粉末流到达基板的温度的增加而增加, 但粉末流到达基板的温度过大, 涂层性能降低。**结论** 获得最优涂层必须采用最优工艺参数, 工艺参数对涂层综合性能的影响主次顺序为喷涂电流、喷涂距离、主气流量, 得到的优化工艺参数为: 喷涂电流 350 A, 喷涂距离 110 mm, 主气流量 2100 L/h。

**关键词:**  $\text{TiO}_2$ ; 正交试验; 参数优化; 等离子喷涂; 基材温度; 综合性能

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)04-0073-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.04.011

## Process Parameter Optimization of Plasma Sprayed $\text{TiO}_2$ -based Coatings

LU Guang-ming, Wurikaixi · Aiyiti

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**ABSTRACT:** The work aims to optimize plasma spraying parameters for  $\text{TiO}_2$ -based coatings. Law of influence of spraying current, spraying distance and main air flow rate on microstructure and properties of coatings was studied in the methods of orthogonal experiment, substrate temperature collection, coating microstructure analysis, energy spectrum analysis, combined strength test and hardness test, and optimized spraying process parameters were obtained. The sprayed coatings exhibited mixed microstructure characteristic which featured in dual-mode structure in molten zone and partially molten zone. Cross-sectional morphology of the coatings was uneven, and was mainly mechanically bonded. After the samples were pulled apart in tensile test, fracture surfaces of the coatings were dimple-shaped, step transition occurred from ceramic layer to adhesive layer, and overall cohesive bonding strength of ceramic layer outperformed bonding strength of bonding interface between the ceramic layer and bonding layer. The coated stripes reduced as the temperature at which powder flow came to the substrate increased, which had significant effects on hardness instead of bonding strength. In the process of plasma spraying, when the temperature at which

收稿日期: 2017-11-21; 修订日期: 2018-03-03

Received: 2017-11-21; Revised: 2018-03-03

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2015211C269)

Fund: Supported by the Xinjiang Uygur Autonomous Region Natural Science Foundation (2015211C269)

作者简介: 路广明 (1992—), 男, 硕士, 主要研究方向为等离子喷涂工艺。

Biography: LU Guang-ming (1992—), Male, Master, Research focus: plasma spraying process.

通讯作者: 乌日开西·艾依提 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向 3D 打印与再制造技术。

Corresponding author: Wurikaixi · Aiyiti (1972—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: 3D printing and manufacturing technology.

powder flow came to the substrate fell in certain range, the coating performance increased with the increase of the temperature at which powder flow came to the substrate. However, the coating propermance degraded if the temperature at which powder flow came to the substrate was too high. The optimal process parameters must be used to obtain optimal coatings, main parameters affecting overall performance of coatings are in the order as follows: spraying current, spraying distance and main air flow rate. The obtained optimal process parameters are: spraying current of 350 A, spraying distance of 110 mm, and main air flow rate of 2100 L/h.

**KEY WORDS:** TiO<sub>2</sub>; orthogonal test; parameter optimization; plasma spraying; substrate temperature; overall performance

等离子喷涂技术常用于制备耐磨、耐高温、耐腐蚀的涂层,应用于机械零部件表面的强化修复,可提高工业机械零部件的使用寿命<sup>[1-6]</sup>。等离子喷涂陶瓷材料中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 系列粉末应用最为广泛,针对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 系列涂层的研究,主要集中于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基涂层,如 AT8、AT13、AT40<sup>[7-12]</sup>。TiO<sub>2</sub> 基涂层沉积效率高,形成的涂层致密、与基体金属结合润湿性好。Jia S k 等<sup>[7]</sup>研究发现喷涂原料中 TiO<sub>2</sub> 的含量增加,涂层孔隙减少,致密性增加,涂层耐腐蚀性增加,但隔热性能减少,TiO<sub>2</sub> 涂层比 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层有更高的热导率、更小的脆性,可以释放应力,减少裂纹。

文中选用 TiO<sub>2</sub> 复合粉末 (TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数分别约为 80%、20%),设计正交实验,制备耐磨涂层。通过拉伸试验、硬度测量、基材温度变化采集试验,分析涂层结合强度、硬度以及涂层拉断前后的微观组织结构,并综合评分确定合适的工艺参数,探讨喷涂工艺参数和涂层性能之间的关系。

## 1 实验

采用 DH-2080 型等离子喷涂系统,所选基体为 Q235 圆钢 (φ18 mm×5 mm),基体端面经喷砂预处理后进行喷涂。粘结层选用喷涂粉末为 NiCrAl,陶瓷层为 TiO<sub>2</sub> 基复合粉末,其元素成分 (质量分数) 如表 1 所示。

表 1 TiO<sub>2</sub> 基粉末成分

Tab.1 The composition of TiO<sub>2</sub> based powder

Element	O	Ti	Al	Margin(Mg Fe Si Ca Cr)
Weight percentage/%	50.56	33.34	13.51	2.59

基体放置于夹具上,待喷涂面垂直于喷枪移动方向,喷涂过程如图 1 所示。喷枪移动循环 3 次,喷涂涂层 6 层。每一层喷涂完成,喷枪起始点与折返点完全远离喷涂面后,开始喷涂下一层。主气、辅气分别为氩气、氢气,保持喷涂速度 20 mm/s,辅气流量不变,粘结层 NiCrAl 的喷涂参数如表 2 所示。

根据前期单因素试验分析的结果,陶瓷层喷涂参数取喷涂电流、喷涂距离、主气流量 3 个因素,每个

因素取 3 个水平,选择 L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>)正交表,正交试验的因素水平表如表 3 所示。

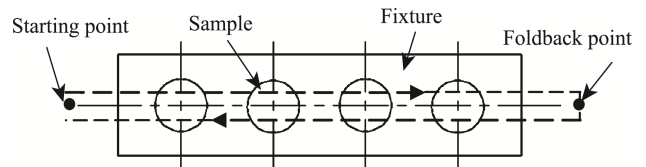


图 1 喷涂过程示意图

Fig.1 The diagram of the spraying process

表 2 粘结层参数

Tab.2 The parameters of adhesive layer

Spraying current/A	Spraying distance/mm	Main air flow rate/(L·h <sup>-1</sup> )
350	130	2400

表 3 陶瓷层喷涂参数因素水平表

Tab.3 The parameters of ceramic layer

Level	Spraying current (A)/A	Spraying distance (B)/mm	Main air flow rate (C)/(L·h <sup>-1</sup> )
1	300	90	1800
2	350	110	2100
3	400	130	2400

采用金相切割机垂直于涂层方向切割取样,如图 2 所示。切割后试样经砂纸打磨,抛光机抛光后,用无水乙醇清洗吹干。采用扫描电子显微镜观察涂层拉断前后的表面及截面、断面的微观结构。采用维氏显微硬度仪测量涂层的显微硬度,加载载荷为 200 g,加载时间为 15 s。采用胶结拉伸法测量涂层结合强度,拉伸速度为 1 mm/min。利用 E-7 胶,与试样、对偶件粘结后,压紧且保持同心如图 3a 所示,对偶件由 V 形块定位,并通过螺栓固定,避免粘结过程中试样与对偶件错位,干涉试验结果。粘结后试样放

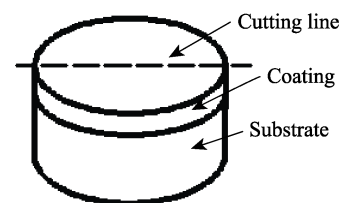


图 2 涂层切割示意图

Fig.2 The diagram of coating cutting



图 3 结合强度测试

Fig.3 The test of bonding strength: a) bonding structure,b) the samples to be tested, c) the tensile structure

入烘箱加热到 100 ℃，保温 3 h 固化得到待测试样，如图 3b。实验拉伸结构如图 3c，拉杆与对偶件之间螺纹连接，螺母防止对偶件松动，拉块与拉杆之间为半球面与内锥面接触，具备 3 个方向的旋转自由度，可保证拉伸过程中拉块、试样在同一条中心线上，避免偏心加载。涂层断裂时的载荷与试样截面积的比值为结合强度，取同一参数 5 个试样测得的平均值为各个参数对应的结合强度。

2 涂层力学性能分析

2.1 涂层性能测试结果

涂层的力学性能与涂层的服役寿命紧密相关，主要包括涂层的结合强度、硬度<sup>[13]</sup>。涂层力学性能检测结果如表 4 所示。直观分析需要计算测量结果的算术平均值以及极差，通过极差的大小来判断因素的影响主次，分析结果如表 5 所示，方差分析可以定量分析

各个因素对涂层质量的影响程度，弥补直观分析的不足，分析结果如表 6 所示。

表 4 涂层性能测试结果  
Tab.4 The test results of coating performance

Group	Factor			Hardness (HV <sub>0.2</sub> )	Bonding strength/ MPa	Overall rating
	A/A	B/ mm	C/ (L·h <sup>-1</sup> )			
1	300	90	1800	753	17.5	300.405
2	300	110	2100	780	19.6	320.327
3	300	130	2400	732	17.0	291.947
4	350	90	2100	840	24.2	366.301
5	350	110	2400	861	24.5	373.182
6	350	130	1800	846	21.3	348.431
7	400	90	2400	890	20.1	351.167
8	400	110	1800	937	19.3	357.301
9	400	130	2100	880	18.0	334.726

表 5 涂层性能直观分析结果  
Tab.5 Intuitive analysis results of coating performance

Coating performance	R			Primary and secondary of factor	Best plan
	Factor A	Factor B	Factor C		
Hardness	147.333	40	17.666	A>B>C	A3B2C1
Bonding strength	5.300	2.366	1.233	A>B>C	A2B2C2
Overall rating	58.192	25.459	5.294	A>B>C	A2B2C2

表 6 涂层性能方差分析结果  
Tab.6 Variance analysis results of coating performance

Coating performance	Factor	Deviation squared sum ( SS )	Degrees of freedom ( df )	Mean square ( MS )	F-value	Significant
Hardness	Spraying current ( A )	33 387.556	2	16 693.778	396.422	0.003
	Spraying distance ( B )	2672.222	2	1336.111	31.728	0.031
	Main air flow rate ( C )	488.222	2	244.111	5.797	0.147
	Error	84.222	2	42.111		
Bonding strength	Spraying current ( A )	46.940	2	23.2470	281.640	0.004
	Spraying distance ( B )	9.247	2	4.623	55.480	0.018
	Main air flow rate ( C )	2.887	2	1.443	17.320	0.055
	Error	0.167	2	0.083		
Overall rating	Spraying current ( A )	5481.957	2	2740.978	216.112	0.005
	Spraying distance ( B )	976.928	2	488.464	38.513	0.025
	Main air flow rate ( C )	43.144	2	21.572	1.701	0.370
	Error	25.306	2	12.683		



## 2.2 结合强度

### 2.2.1 喷涂后涂层表征

涂层的结合强度与涂层微观结构紧密相关,涂层均呈现为变形粒子相互搭接,呈典型的层状堆叠结构,如图4所示(实验组2涂层500、5000倍表面微观形貌)。涂层成形过程中, $\text{TiO}_2$ 粉末发生少量失氧,涂层颜色较深。喷涂粉末成分的熔点不同, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的熔点比 $\text{TiO}_2$ 高,涂层分熔融区(FM)和部分熔融区(PM),呈现出双模结构的混合微观结构特征。达到完全熔融状态的粉末颗粒铺展到基体表面形成熔融区,变形不够充分的颗粒则形成部分熔融区。颗粒撞击基体冷凝收缩,涂层产生内应力,形成裂纹,粒子变形不充分与周边颗粒存在孔隙,造成涂层凹凸不平。能谱分析(图5a、表7)表明,如图5a中点1为 $\text{TiO}_2$ 聚集区,颗粒完全铺展;点2为完全熔融铺展的球状颗粒,为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 聚集区,颜色较深;点3为 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 混合区。

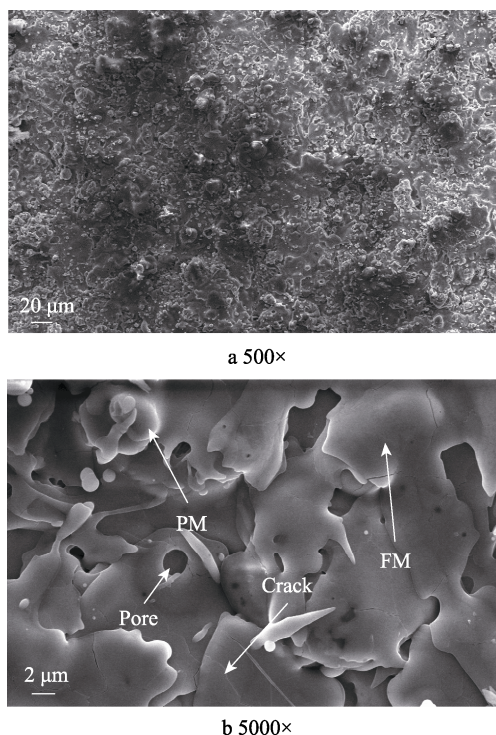


图4 涂层表面微观形貌

Fig.4 Surface morphology of the coating

涂层截面形貌均凹凸不平,图6为试验组2、7涂层截面微观形貌。陶瓷层与粘结层、粘结层与基体之间相互嵌合、渗透,且以机械结合为主。由于各喷涂参数差异,实验组2相对于实验组7,层状结构的界面区域条带状杂质含量较多。有研究表明,随着喷涂颗粒温度的提高,层状结构表面出现氧化现象,涂层内部氧化物含量增加<sup>[14]</sup>。对涂层内部的黑色夹杂条

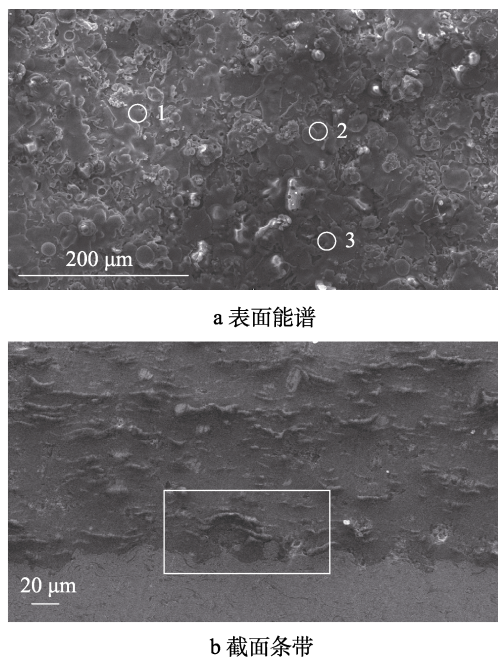


图5 涂层微观形貌能谱分析

Fig.5 Analysis of microscopic morphology of coatings: a) spectrum of surface, b) section strip

表7 能谱分析结果

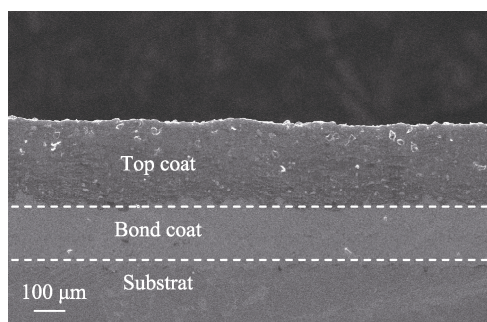
Tab.7 The analysis results of spectrum

Element	Weight percentage/%			
	Surface			Section
	No. 1	No.2	No.3	
O	40.34	46.92	44.10	50.27
Al	2.22	51.76	30.54	41.14
Ti	57.43	1.32	25.36	2.83
Margin	0.01			5.76
Total amount		100		100

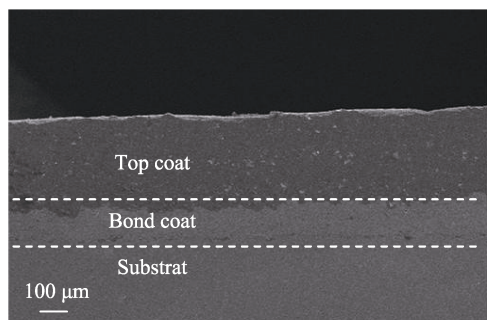
带状区域进行能谱分析,如图5b、表7所示,发现条带夹杂内氧元素的含量增多,且以 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 居多,但存在少量其他氧化物。造成涂层夹杂增多主要是由于温度太低, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末未完全熔融所致。

### 2.2.2 拉伸实验后的涂层表征

涂层结合强度包括涂层颗粒之间的内聚强度和涂层与基体材料之间的结合强度。结合强度采用拉伸测试的方法,可直观定量得出涂层的结合强度。实验组2涂层拉断后,试样断面微观形貌如图7a所示,断面呈韧窝波浪状,如箭头所示,从陶瓷层到粘结层截面形貌如台阶状过渡。断面截面形貌如图7b所示,涂层内部为层间断裂,层间结构区别明显。统计分析发现,多数试样是粘结层与陶瓷层之间的断裂,陶瓷层的内聚结合强度、涂层粘结层与基体之间的结合强度优于陶瓷层和粘结层的界面结合强度。



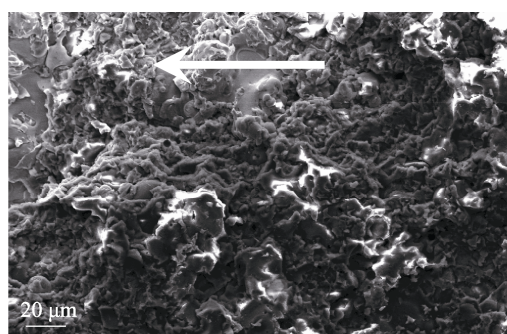
a 实验组2



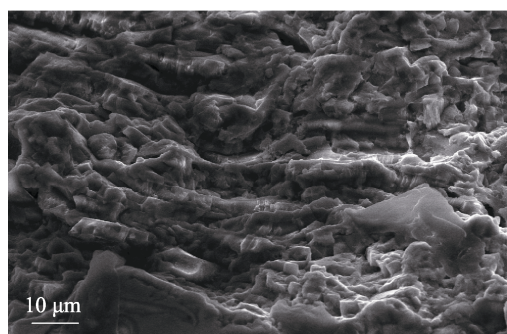
b 实验组7

图 6 涂层截面微观形貌

Fig.6 Micromorphology of the cross section: a) cross-sectional micromorphology of group 2, b) cross-sectional micromorphology of group 7



a 拉断后涂层表面微观形貌



b 拉断后涂层截面微观形貌

图 7 断面形貌

Fig.7 Cross-sectional morphology: a) surface micromorphology of the coating after tensile, b) cross-sectional micromorphology of the coating after tensile

### 2.2.3 结合强度结果分析

由表 5—6 可知，喷涂电流对涂层结合强度的影响最显著，其次为喷涂距离、主气流量。优化后，喷

涂电流为 350 A，喷涂距离为 110 mm，主气流量为 2100 L/h。结合强度直观分析如图 8 所示，喷涂电流、喷涂距离增加，涂层结合强度先增加后减少；主气流量增加，涂层结合强度变化不显著。对比各实验组截面形貌及涂层结合强度，发现涂层内夹杂过多影响涂层结合强度，但影响不显著。

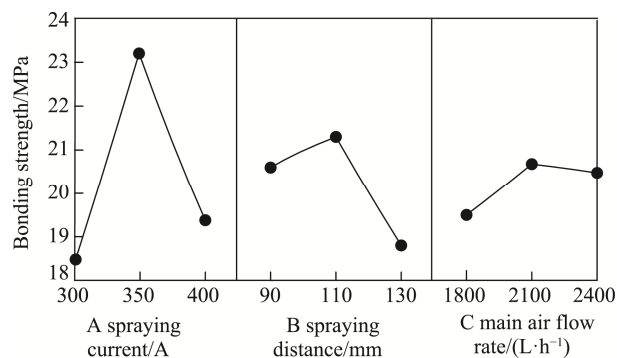


图 8 结合强度直观分析图

Fig.8 The bonding strength of intuitive analysis

## 2.3 硬度

由表 5—6 得出影响涂层硬度的主次顺序为喷涂电流、喷涂距离、主气流量。优化后，喷涂电流为 400 A，喷涂距离为 110 mm，主气流量为 1800 L/h。硬度直观分析如图 9 所示，喷涂电流增加，涂层硬度增加；喷涂距离增加，涂层硬度先增加后减少；主气流量增加，涂层硬度降低。对比各实验组截面形貌及硬度值，发现涂层内夹杂多对硬度影响较显著，主要是由于涂层疏松，致密性低。

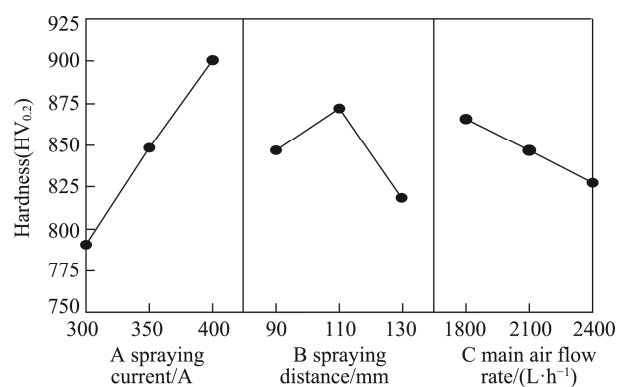


图 9 硬度直观分析图

Fig.9 The hardness of intuitive analysis

## 2.4 涂层综合性能分析

为更好地综合涂层硬度及结合强度，获得最优涂层，对涂层综合性能用综合加权评分的方式进行评价，综合加权评分的公式如下<sup>[12]</sup>：

$$Y_i = a_{i1}b_{i1} + a_{i2}b_{i2} + \cdots + a_{ij}b_{ij} \quad (1)$$

式中： $a$  为加权系数，表示各项指标在加权评分中所占的权重； $b$  为试验指标； $i$  为第  $i$  号试验； $j$  为



第  $j$  号试验指标。

各个试验指标的变化范围为  $K$ , 如下:

$$K_1=937-732=205 \quad (2)$$

$$K_2=24.5-17.0=7.5 \quad (3)$$

取综合评分为 100 分, 其中显微硬度、结合强度各为 50, 则加权系数为:

$$a_{i1}=50/205=0.244 \quad (4)$$

$$a_{i2}=50/7.5=6.667 \quad (5)$$

由以上各式得各组试验的综合性能评分  $Y$  的公式为:

$$Y=0.244b_{i1}+6.667b_{i2} \quad (6)$$

由表 5—6 得出影响涂层综合性能的主次顺序为喷涂电流、喷涂距离、主气流量。最佳喷涂参数为: 喷涂电流 350 A, 喷涂距离 110 mm, 主气流量 2100 L/h。综合评分直观分析如图 10 所示, 喷涂电流、喷涂距离增加, 涂层综合性能先增加后减少; 主气流量增加, 涂层性能变化不显著, 类同于结合强度变化趋势。对比各组涂层综合性能评分, 实验组 5 涂层综合评分最高, 性能最优。

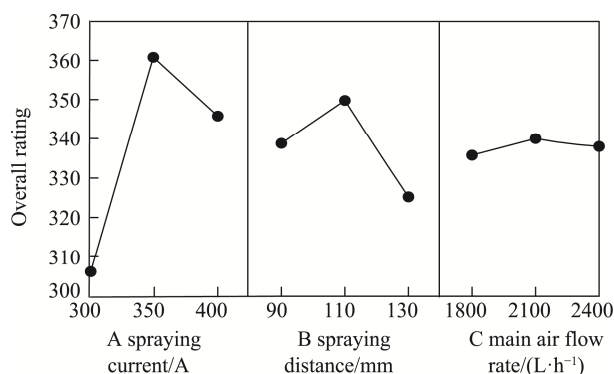


图 10 综合评分直观分析图

Fig.10 The comprehensive scoring of intuitive analysis

### 3 喷涂过程基材温度变化对比分析

涂层的质量与粉末的熔融程度紧密相关, 而粉末的熔融程度受喷涂参数的影响<sup>[15]</sup>。等离子焰流中, 粉末到达基体温度的大小可反应粉末的熔融程度, 因此针对正交试验 9 组参数设计基材温度变化采集试验。测量温度常用的方法有热电偶测温法和红外线测温法, 等离子喷涂室内的环境不适合红外测温设备, 因此采用热电偶测温法。温度采集系统主要有热电偶、温度数据采集系统、数据采集计算机, 如图 11 所示。为了避免热电偶在测温过程中损坏, 热电偶焊于基板试样背面。基板太厚时, 热量损失多, 影响测量精度, 因此采用薄钢板。根据前期试验经验, 基板试样采用长 200 mm、宽 60 mm、厚 2 mm 的 Q235 钢板。如图 11 所示, A、B、C 点为温度采集点, A 点在热源中心线上, B 点距热源中心线距离为 6.0 mm, C 点距热源中心线距离为 12.0 mm。

测温过程中, 喷枪移动循环 3 次, 涂层喷涂 6 层, 与涂层制备过程一致。基板背面在喷枪接近测温点时温度升高, 喷枪远离时温度降低, 喷枪扫描 6 次, 由此温度增高、降低各 6 次。如图 12 所示, 基板温度均呈现中间高两边低的趋势, 基板各点的温度呈 6 个波峰状堆叠上升。

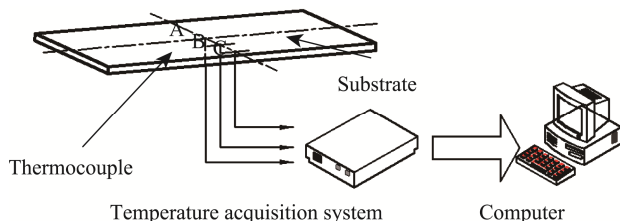


图 11 试样热电偶焊接示意图

Fig.11 The welding diagram of thermocouple

由图 12 得出各实验组温度由低到高依次是实验组 3、9、6、1、2、8、5、4、7。实验组 7 的温度最高, 但此时涂层硬度、结合强度并不是最高的, 综合性能评分次于实验组 4、5、8。实验组 5 的涂层综合性能评分最高, 但温度次于第 4、7 组, 这说明温度达到一定程度时, 涂层的综合性能降低。

等离子焰流覆盖基板的范围, 即涂层的宽度, 由各点温度大小可间接比较。对比基板温度与涂层宽度, 发现各实验组基板的背面温度随时间变化的值越高, 则基板涂层越宽。

## 4 分析与讨论

### 4.1 喷涂电流

正交试验结果由直观分析与方差分析显示: 喷涂电流对涂层性能的影响最显著, 喷涂电流改变时, 影响颗粒飞行过程中焰流的温度, 进而影响颗粒的熔融状态。喷涂电流增加时, 温度采集试验的结果表明基板的温度增高 (图 12 所示), 说明粉末在到达基板时的温度是随喷涂电流的增加而增高, 涂层平整性增加, 硬度、结合强度上升, 涂层的综合性能增加; 但当温度过高时, 粉末颗粒处于过熔融状态, 能谱测试表明涂层氧化物增加, 扫描电镜表明涂层裂纹增多, 如图 13 所示实验组 7 温度高于实验组 5, 裂纹相对较多, 拉伸试验也表明涂层结合强度降低。

### 4.2 喷涂距离

喷涂距离对涂层性能的影响仅次于喷涂电流, 喷涂距离影响喷涂过程中粉末颗粒在等离子焰流中飞行时间的长短。对比各试验参数对应的温度, 如图 12 所示, 喷涂距离增加时, 粉末流到达基板的温度显著降低。从图 8—9 中看出, 随着喷涂距离的增加, 涂层的结合强度、硬度呈现先增加后减少的趋势。由

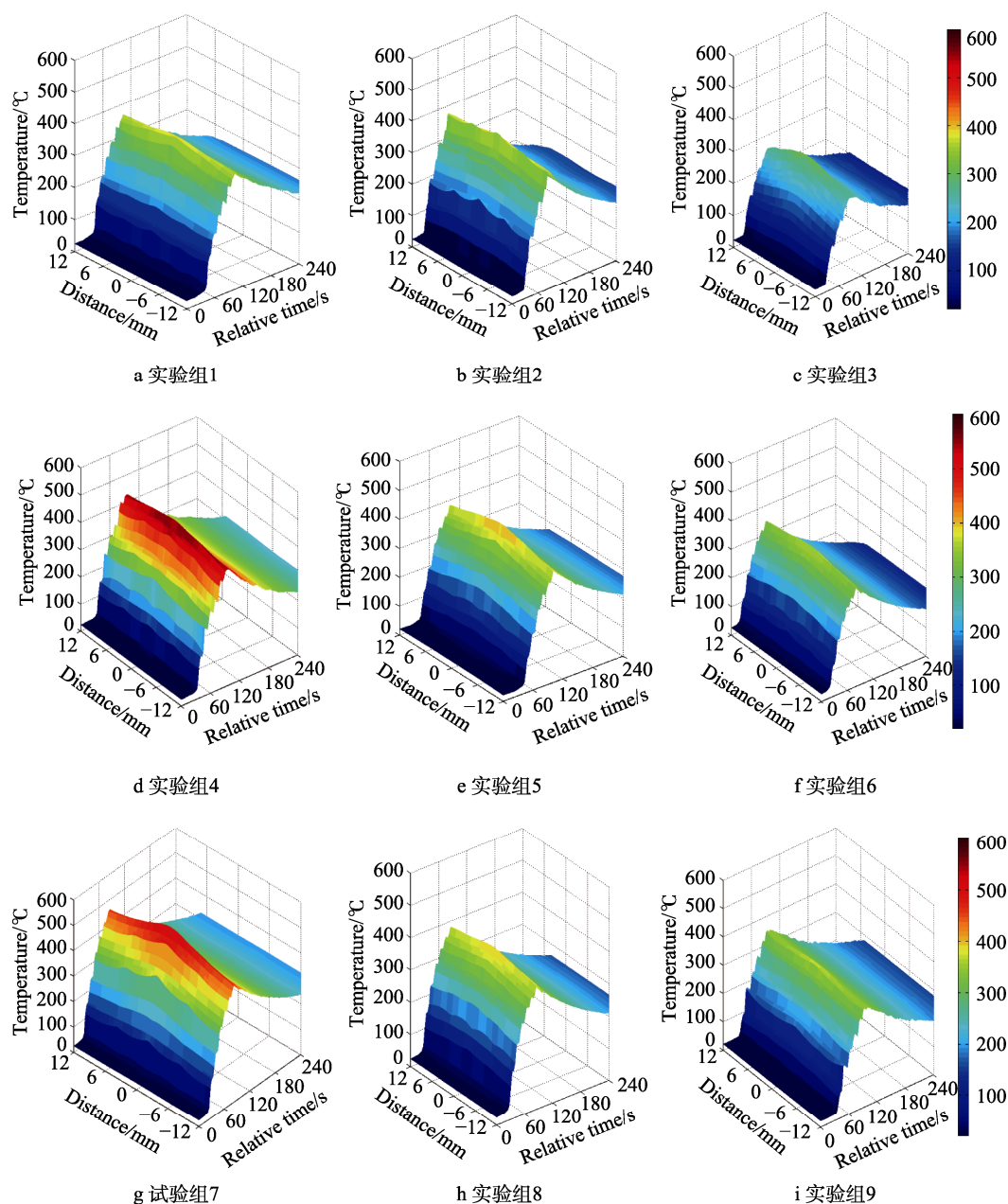


图 12 基板温度变化图

Fig.12 The diagram of Substrate temperature: a) group 1, b) group 2, c) group 3, d) group 4, e) group 5, f) group 6, g) group 7, h) group 8, i) group 9

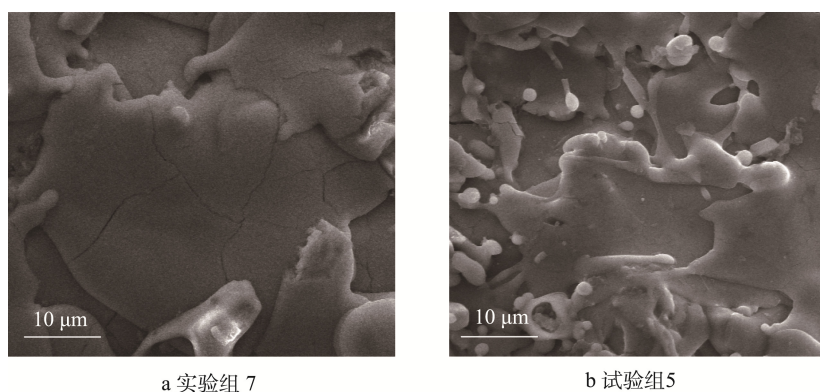


图 13 涂层表面形貌对比

Fig.13 Comparison of surface morphology of coating: a) group 7, b) group 5

表4看出,在喷涂电流相同的情况下,喷涂距离越大,涂层的综合性能越低。喷涂距离短时,随着喷涂距离的增加,显微硬度测试、拉伸试验表明涂层的硬度、结合强度变化不显著;但当喷涂距离太长时,涂层硬度、结合强度显著下降,这主要由于喷涂粉末在等离子焰流中冷却,到达基体时温度降低,显著影响涂层的性能。

### 4.3 主气流量

主气流量对涂层性能的影响不显著。主气流量增大,如图12所示,粉末流到达基板后,基板的温度升高,此外粒子的速度也会增加。如图8—9所示,主气流量增加时,结合强度先增加后减少,涂层硬度降低。主气流量增加时,粒子温度升高,喷涂粉末达到过熔融状态,使得涂层硬度降低。主气流量初始增加时,粒子动能增加,粒子速度对结合强度的影响大于等离子焰流温度,拉伸试验也表明涂层结合强度增加。但当温度增加过大时,等离子焰流温度对结合强度的影响大于粒子速度,涂层结合强度降低。

## 5 结论

1) 喷涂后,涂层分熔融区(FM)和部分熔融区(PM),呈现出双模结构的混合微观结构特征。涂层截面形貌凹凸不平,层与层之间以机械结合为主。涂层内条带状夹杂多,涂层致密性降低,对硬度的影响较显著,但对涂层结合强度的影响不显著。

2) 涂层拉断后的微观形貌显示,涂层主要是粘结层和陶瓷层之间的断裂,断裂面呈韧窝状,由陶瓷层到粘结层呈台阶状过渡,陶瓷层整体的内聚结合强度优于陶瓷层与粘结层结合界面的结合强度。

3) 影响 $\text{TiO}_2$ 基涂层综合性能工艺参数的主次顺序为:喷涂电流>喷涂距离>主气流量。综合性能最优的工艺参数为:喷涂电流350 A,主气流量2100 L/h,喷涂距离110 mm。

4) 等离子喷涂过程中,粉末流到达基板的温度在一定范围内时,涂层性能随着粉末流到达基板的温度增加而增加;但粉末流到达基板的温度过大时,喷涂粉末出现过熔化现象,使涂层内氧化物增多,涂层热应力增加,促使裂纹扩散,涂层性能降低。

### 参考文献:

- [1] 张伟,郭永明,陈永雄.热喷涂技术在产品再制造领域的应用及发展趋势[J].中国表面工程,2011,24(6):1-10.  
ZHANG W, GUO Y M, CHEN Y X. Applications and Future Development of Thermal Spraying Technologies for Remanufacturing Engineering [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(6): 1-10.
- [2] XU J, ZOU B, TAO S, et al. Fabrication and properties of

- $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2\text{-TiC/Al}$  Metal Matrix Composite Coatings by Atmospheric Plasma Spraying of SHS Powders[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016, 672: 251-259.
- [3] PIAO Z Y, XU B S, WANG H D, et al. Characterization of Fe-based Alloycoating Deposited by Supersonic Plasma Spraying[J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(11): 2933-2938.
- [4] QIAN J, ZHANG J, LI S, et al. Study on Laser Cladding NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Coating on Magnesium Alloy[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2013, 42(3): 466-469.
- [5] LI C, WANG Y, WANG S, et al. Laser Surface Remelting of Plasma-sprayed Nanostructured  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13wt}\%\text{TiO}_2$  Coatings on Magnesium Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 503(1): 127-32.
- [6] YANG Y Z, ZHU Y L, LIU Z Y, et al. Laser Remelting of Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Ceramic Coatings and Subsequent Wear Resistance[J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 291(1-2): 168-172.
- [7] JIA S K, ZOU Y, XU J Y, et al. Effect of  $\text{TiO}_2$  Content on Properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Thermal Barrier Coatings by Plasma Spraying[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(1): 175-183.
- [8] 邓春明,周克崧,刘敏,等.大气等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-3}\%\text{TiO}_2$ 涂层的性能[J].中国表面工程,2010,23(1):19-23.  
DENG C M, ZHOU K S, LIU M, et al. Properties of Air Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-3}\%\text{TiO}_2$  Coatings[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(1): 19-23.
- [9] LU X C, YAN D R, YANG Y, et al. Bimodal Distribution of Microstructure and Mechanical Properties of Plasma Sprayed Nanostructured  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13wt}\%\text{TiO}_2$  Coatings[J]. Journal of Inorganic Materials, 2011, 26(9): 1003-1008.
- [10] SONG E P, AHN J, LEE S, et al. Effects of Critical Plasma Spray Parameter and Spray Distance on Wear Resistance of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-8wt}\%\text{TiO}_2$  Coatings Plasma Sprayed with Nanopowders[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(15): 3625-3632.
- [11] YAO Y, WANG Z, ZHOU Z, et al. Study on Reactive Atmospheric Plasma Sprayed In-situ Titanium Compound Composite Coating[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2013, 22(4): 509-517.
- [12] KANG J J, XU B S, WANG H D, et al. Influence of Spraying Parameters on the Microstructure and Properties of Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40}\%\text{TiO}_2$  Coating[J]. Physics Procedia, 2013, 50: 169-176.
- [13] 雷阿利,冯拉俊,沈文宁,等.等离子喷涂法制备铁基硬质涂层的力学性能[J].焊接学报,2013,34(4):27-30.  
LEI A L, FENG L J, CHEN W D, et al. Mechanical Properties of Iron-based Hard Coating Prepared by Plasma Spraying[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(4): 27-30.
- [14] SAMPATH S, JIANG X, KULKAMI A, et al. Development of Process Maps for Plasma Spray: Case Study for Molybdenum[J]. Materials Science & Engineering A, 2003, 348(1-2): 54-66.
- [15] 陆欢,王海军,郭永明,等.超音速等离子喷涂参数对粒子速度温度的影响[J].中国表面工程,2008,21(1):19-23.  
LU H, WANG H J, GUO Y M, et al. The Influence of Supersonic Plasma Spray Parameters on Flying Particles Velocity and Temperature[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(1): 19-23.