

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.04.005

基于孔隙率的 Cr_2O_3 涂层工艺优化及回归分析*

毛杰, 邓畅光, 邓春明, 宋进兵, 欧献

(广州有色金属研究院 新材料研究所, 广州 510651)

摘要: 孔隙率是评价 Cr_2O_3 涂层质量的重要指标之一。根据 Box-Behnken 二阶响应曲面法设计了 3 因素 3 水平的回归分析试验, 采用大气等离子喷涂技术在 TC4 钛合金表面制备了 Cr_2O_3 涂层, 以不同工艺条件下的涂层孔隙率作为响应值, 建立了喷涂电流、等离子气体和喷距影响因子与响应输出之间的数学模型, 讨论了 3 种影响因子的显著性及交互作用影响, 得到涂层孔隙率的连续变量响应曲面和等高曲线。模型可以用于大气等离子喷涂 Cr_2O_3 涂层的工艺优化和性能预测, 最小孔隙率的预测参数是电流 $I=500\text{ A}$, 氩气流量 $Q_{Ar}=40\text{ L/min}$ 和喷距 $d=80\text{ mm}$, 能获得的最小孔隙率为 1.5%。

关键词: 大气等离子喷涂; Cr_2O_3 涂层; 孔隙率; 响应曲面法

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)04-0038-06

Process Optimization and Regression Analysis of Cr_2O_3 Coating Based on Porosity

MAO Jie, DENG Chang-guang, DENG Chun-ming, SONG Jin-bing, OU Xian

(Institute of New Materials, Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510651)

Abstract: Porosity is one of the important indexes to evaluate the property of Cr_2O_3 coating. According to Box-Behnken second-order response surface methodology, a regression analysis experiment with three factors and three levels was designed. Cr_2O_3 coating on TC4 titanium alloy was prepared by atmospheric plasma spraying, and porosity under different process conditions was measured as the response value. The mathematical model was established between influence factors (spraying current, plasma gas, spray distance, and the response value). The significance of separate factor and interaction effects were also discussed. Response surfaces and contour curves of continuous variables about coating porosity were obtained for process optimization and performance prediction of Cr_2O_3 coating sprayed by atmospheric plasma spraying. These predicted parameters, which can obtain the minimum porosity of 1.5%, are the current $I=500\text{ A}$, flow of argon, $Q_{Ar}=40\text{ L/min}$ and spray distance $d=80\text{ mm}$.

Key words: atmospheric plasma spraying; Cr_2O_3 coating; porosity; response surface methodology

0 引言

Cr_2O_3 是应用最为广泛的耐磨耐蚀涂层材料之一, 具有高硬度、高温化学稳定性、低摩擦因数和优异的耐磨耐蚀性能等^[1-2]。这类氧化物陶瓷涂层属于覆盖型保护涂层, 其致密度直接关系到耐磨耐蚀性能和最终的失效寿命问题, 涂层孔隙太多、致密度不够会造成零部件性能下降, 寿命缩

短, 甚至出现质量事故。随着现代工业发展, 零部件在实际使用过程中还可能面临着更为复杂的多环境因素的综合作用, 耐磨涂层性能要求更加严苛^[3]。因此, 作为一种传统的耐磨耐蚀涂层材料, Cr_2O_3 涂层也在不断发展。孔隙率是评价 Cr_2O_3 涂层质量的重要指标之一, 通过工艺优化降低孔隙率对提高耐磨性能具有重要意义。

收稿日期: 2013-04-07; **修回日期:** 2013-06-08; **基金项目:** * 国际科技合作项目(2011DFB50030); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2012CB625101)

作者简介: 毛杰(1979-), 男(汉), 湖南常德人, 工程师, 博士; **研究方向:** 热喷涂技术及涂层应用

网络出版日期: 2013-07-01 13:21; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130701.1321.002.html>

引文格式: 毛杰, 邓畅光, 邓春明, 等. 基于孔隙率的 Cr_2O_3 涂层工艺优化及回归分析 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(4): 38-43.

等离子喷涂是目前广泛使用的热喷涂技术之一,具有焰流温度高、速度快及气氛可控等优点,也是目前制备Cr₂O₃陶瓷涂层的主要方法^[4]。但热喷涂工艺研究的试验设计及数据分析大多采用传统的单变量试验和全因子试验^[5-8],前者未能综合考虑各影响因子之间的交互作用,后者整体试验点较多,费时费力。响应曲面法(Response surface methodology, RSM)是一种新发展的试验设计和统计分析的方法^[9-10],特点是试验次数较少,可以同时讨论多个因子和因子间交互作用,并获得拟合函数和直观的三维曲面图。响应曲面法在医药、生物、食品与化学工业等诸多领域的应用非常广泛,但在热喷涂技术领域的应用非常少^[11-14]。

文中根据Box-Behnken响应曲面法,设计了3因素3水平的回归分析试验,采用大气等离子喷涂技术在不同工艺条件下制备了Cr₂O₃涂层,建立了喷涂电流、等离子气体和喷距等影响因子与涂层孔隙率之间的高精度数学模型,讨论了3种影响因子的显著性及交互作用影响。

1 试样制备与试验方法

1.1 响应曲面法试验设计

响应曲面方法是数学方法和统计技术相结合的产物,用来对所感兴趣的问题进行建模和分析,目的是寻找到众多因素耦合影响的响应最优值。近年来,响应曲面法成为试验设计的核心方法之一。设计中控制变量 x_1, x_2, \dots, x_k 称为因子(factor),因子不同取值称为水平。 y_1, y_2, \dots, y_k 是产品、过程或者系统的响应变量(response variables)。响应变量 y 关于因子的基本统计模型是:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \epsilon \quad (1)$$

式中 ϵ 包括了各种影响,如响应的测量误差,其它变量的作用等。如果响应适用于线性函数建模,则是一阶模型:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2)$$

如果响应系统有弯曲,则必须用二阶模型如式(3),或更高阶的多项式。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon \quad (3)$$

文中采用大气等离子喷涂工艺,常见工艺过程参数包括功率、等离子气体成分和流量、喷涂距离、粉末物理性能、送粉方式、送粉率、送粉载气流量、基体温度和喷枪结构等,对如此众多的参数进行系统分析的工作量非常大,设计和数据处理非常复杂。试验中根据单变量或全因子优化设计中的喷涂工艺变量进行了筛选,选定电流 I ,氩气流量 Q_{Ar} 和喷距 d 为影响因子,Cr₂O₃涂层的截面孔隙率 P 为响应值,根据Box-Behnken响应曲面法的设计原理,设计了3因素3水平的分析试验。本设计共15个试验点,而相应全因子试验的试验点是 $3^3=27$ 个,可见响应曲面法确实能明显有效地减少降低试验次数,节省时间和资源。实际喷涂参数中等离子气体组成和流量设计为3种水平,Ar/H₂分别是48/4、44/8和40/12 L/min,试验设计中选用氩气流量 Q_{Ar} 作为影响因子进行分析,数值简单,有助于简化模型和曲面。试验影响因子和水平选值如表1所示。

表1 试验影响因子及取值水平

Table 1 Experiment factors and numeric value

| Factor | Value level | | |
|------------------------------|-------------|-----|-----|
| | -1 | 0 | 1 |
| I/A | 500 | 600 | 700 |
| $Q_{Ar}/(L \cdot \min^{-1})$ | 40 | 44 | 48 |
| d/mm | 80 | 100 | 120 |

1.2 涂层制备

喷涂基体材料选用TC4钛合金板,试样尺寸为40 mm×30 mm×5 mm。待喷涂表面在进行汽油除油和超声波清洗后,采用46 锆刚玉进行喷砂粗化,喷砂压力0.3 MPa,随后用压缩空气和超声清除试样表面吸附的刚玉砂粒。钛合金基体表面直接喷涂Cr₂O₃粉末,粒径10~45 μm。涂层制备采用德国GTV公司的MF-P-1500型大气等离子喷涂设备和F6喷枪。采用JL-SM5910型扫描电镜(SEM)对涂层样品截面形貌进行观察,采用图像分析技术定量确定不同视场内Cr₂O₃涂层的孔隙率。每组样品在不同位置测试3次以上,取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 响应方程的建立与显著性分析

按照Box-Behnken统计学设计要求,等离子

喷涂影响因子的编码矩阵和实测响应值见表2。多种模型分析结果见表3,可见随着方程阶数的提高,模型的系数 r^2 逐渐增大,拟合程度提高。但模型P值越来越大,模型在二次模型开始变得不显著。拟合成3次及以上模型时失拟程度太高,不能形成适合的响应面。因此线性模型和2FI模型的模型F值较大,概率P值($>F$)非常小,且都满足失拟度小的要求,可以采用这两种模型进行拟合,但为了讨论因子间交互作用的影响,试验选用系数 r^2 较大的2FI模型。2FI模型即2因素交互关系模型,该模型是介于式(2)和式(3)之间的二次多项式方程,包含二因素乘积相而不包括二次方相。最终拟合方程如式(4):

$$P = -109.36833 + 0.2345I + 1.85Q_{Ar} - 0.1575d - 0.0043125I \cdot Q_{Ar} - 0.0006125I \cdot d + 0.013437Q_{Ar} \cdot d \quad (4)$$

2FI模型的方差分析如表4。文中2FI模型的F值为8.25,P值仅为0.0044,模型显著;同时失拟度F值为1.32,P值仅为0.4918,不显著。方程的拟合优度系数 $r^2 = 0.8609$,信噪比

表2 试验设计矩阵及响应值结果

Table 2 Experiment design matrix and response results

| No. | I/A | $Q_{Ar}/(L \cdot \min^{-1})$ | d/mm | Response P/% |
|-----|-----|------------------------------|------|--------------|
| 1 | -1 | -1 | 0 | 3.4 |
| 2 | 1 | -1 | 0 | 2.8 |
| 3 | -1 | 1 | 0 | 12.6 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 5.1 |
| 5 | -1 | 0 | -1 | 5.2 |
| 6 | 1 | 0 | -1 | 5.1 |
| 7 | -1 | 0 | 1 | 8.2 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 3.2 |
| 9 | 0 | -1 | -1 | 2.3 |
| 10 | 0 | 1 | -1 | 4.1 |
| 11 | 0 | -1 | 1 | 4.9 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 11.0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 4.7 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 3.7 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 6.3 |

表3 多种模型分析

Table 3 Analysis of different models

| Model | F | P | r^2 | Lack of fit analysis | | | | |
|-----------|------|--------|--------|----------------------|-------|-------------|------|----------|
| | | | | Sum of squares | d_f | Mean square | F | P prob>F |
| Linear | 7.68 | 0.0048 | 0.6769 | 36.12 | 9 | 4.01 | 2.33 | 0.3359 |
| 2FI | 8.25 | 0.0044 | 0.8609 | 13.69 | 6 | 2.27 | 1.32 | 0.4918 |
| Quadratic | 3.98 | 0.0713 | 0.8774 | 11.56 | 3 | 3.85 | 2.24 | 0.3233 |
| Cubic | 5.76 | 0.1572 | 0.9719 | 0 | 0 | | | |

精度值为8.503。总体说明2FI模型可以比较准确的分析和预测 Cr_2O_3 涂层的孔隙率。

在响应曲面法拟合中,一般来说拟合方程系数的 $P < 0.05$ 代表该因子的影响效果是显著的, $P > 0.1$ 代表不显著,且数值越大说明该因子的影响效果越不明显。试验中选取的3个因子电流I,氩气流量 Q_{Ar} 和喷距d的2FI模型的P值分别为0.0126、0.0015和0.0332,见表4,说明电流I,氩气流量 Q_{Ar} ,喷距d的单因素反应均显著。对于交互影响而言,电流I和氩气流量 Q_{Ar} 的交互因子系数的 $F = 5.59$ 最大,且P值为 $0.0456 < 0.1$,影响比较显著。而其它交互因子系数的F

值非常小且 $P > 0.1$,说明影响不显著。2FI模型的残差正态概率分布如图1所示,数据基本上分布在一条直线上,说明该模型试验值和预测值误差较小。

2.2 涂层孔隙率的响应曲面分析

通过2FI模型的拟合方程式(4)可以看出单因子对响应的影响比较复杂,既有一次项又有交叉乘积相,例如包含电流I的项是 $+0.2345I$ 、 $-0.0043125I \cdot Q_{Ar}$ 、 $-0.0006125I \cdot d$,其中 Q_{Ar} 和d的取值存在一定的范围,仅根据拟合方程分析比较困难。响应曲面法可以根据拟合方程做出涂层孔隙率P的响应曲面图及其等高线图,综

表 4 2FI 回归模型方差分析

Table 4 Variance analysis of 2FI regression model

| | Sum of squares | <i>d_f</i> | Mean square | F | <i>P</i> prob> F |
|----------------------------------|----------------|----------------------|-------------|-------|------------------|
| 2FI model | 105.40 | 6 | 17.57 | 8.25 | 0.004 4 |
| <i>I</i> | 21.78 | 1 | 21.78 | 10.23 | 0.012 6 |
| <i>Q_{Ar}</i> | 47.05 | 1 | 47.05 | 22.10 | 0.001 5 |
| <i>d</i> | 14.05 | 1 | 14.05 | 6.60 | 0.033 2 |
| <i>I</i> · <i>Q_{Ar}</i> | 11.90 | 1 | 11.90 | 5.59 | 0.045 6 |
| <i>I</i> · <i>d</i> | 6.00 | 1 | 6.00 | 2.82 | 0.131 6 |
| <i>Q_{Ar}</i> · <i>d</i> | 4.62 | 1 | 4.62 | 2.17 | 0.178 8 |
| Residual | 17.03 | 8 | 2.13 | | |
| Lack of fit | 13.59 | 6 | 2.27 | 1.32 | 0.491 8 |
| Pure Error | 3.44 | 2 | 1.72 | | |
| Total | 122.43 | 14 | | | |
| <i>r</i> ² | | | | | 0.860 9 |
| Adeq Precisor | | | | | 8.503 |

合地直观分析多个因子的影响趋势。图 2 是不同喷距 *d* 条件下电流 *I* 和氩气流量 *Q_{Ar}* 对涂层孔隙率 *P* 的影响。

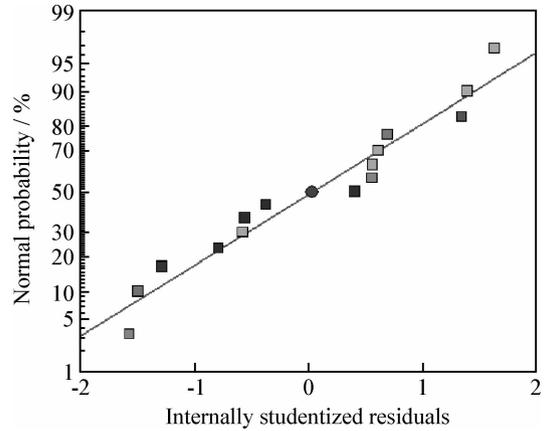


图 1 残差正态概率分布图

Fig. 1 Normal plot of residuals

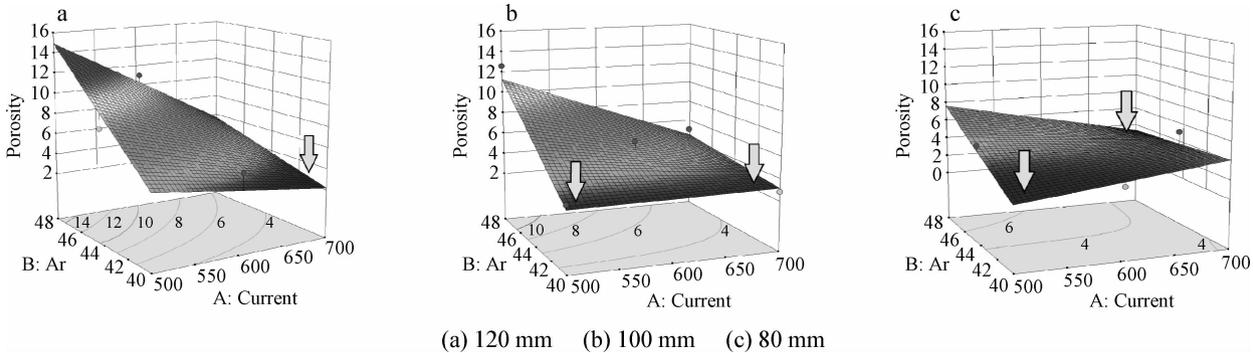


图 2 不同喷距条件下电流和 Ar 流量对孔隙率影响的 3D 曲面图

Fig. 2 3D response surface of porosity about *I* and *Q_{Ar}* with different *d*

从图 2 的曲面形状和变化可以直观地看出电流 *I*, 氩气流量 *Q_{Ar}* 和喷距 *d* 三种因素对涂层孔隙率的影响比较显著而且复杂。当喷距较大时(如图 2(a)), 随着氩气流量 *Q_{Ar}* 的减少和电流 *I* 的增大, 涂层孔隙率 *P* 逐渐降低。涂层孔隙率 *P* 最低的区域在氩气流量较小和电流较大的区域, 如图 2(a) 中箭头所指区域。相对应的涂层孔隙率 *P* 最高的区域在大氩气流量和小电流区域, *P* 最大值接近 15%。大氩气流量意味着等离子气体中氢气含量较少, 加上电流小, 导致焰流热焓值急剧降低, 因此此区域工艺参数制备的涂层由于粉末颗粒融化不充分, 颗粒沉积时层间结合不致密, 从而涂层堆积疏松, 孔隙率大。在中等喷距的情况下(如图 2(b)), 随着氩气流量 *Q_{Ar}* 的减少和电流 *I* 的增大, 涂层孔隙率 *P* 逐渐降低。总体变化

的趋势和图 2(a) 是类似的, 但整体孔隙率在降低。较低的涂层孔隙率 *P* 可以在氩气流量较小的区域内获得, 此区域内电流 *I* 对孔隙率 *P* 几乎没有影响, 如图 2(a) 中箭头所指区域。当喷距较小时(如图 2(c)), 整体孔隙率进一步降低。涂层孔隙率 *P* 最低的区域于氩气流量较大、电流较大和氩气流量较小、电流较小两种区域, 如图 2(c) 中箭头所指。这主要是由于适当的电流增大或是 Ar 流量减少(H₂ 增加)都会增加等离子射流的温度和焓值, 保证 Cr₂O₃ 陶瓷颗粒的良好熔化, 进而使得涂层内孔洞、微裂纹数量及尺寸均有所减少, 涂层的致密度增加, 孔隙率降低。而电流过大或是 Ar 过少(H₂ 过多)都导致等离子射流的温度和焓值过高, Cr₂O₃ 陶瓷颗粒发生过熔, 沉积时飞溅严重, 影响涂层致密度。因此, 涂层孔隙率 *P*

最低的区域实际是各种工艺参数的平衡,保证 Cr_2O_3 陶瓷颗粒获得最好的熔化和在基体上的铺展。李剑锋等^[15]采用均匀设计法以3次回归方程为数学模型,对 Cr_2O_3 涂层的显微硬度进行工艺优化,指出喷涂距离越近,喷枪电流和送粉率越大,喷涂涂层的显微硬度越高。孙永兴等^[16]探讨了等离子喷涂工艺稳定性对 Cr_2O_3 涂层结合强度的影响,指出采用较大的电弧电流可以减少涂层内的孔隙率。这些定性分析和图2反映的规律是一致的,说明通过响应曲面法中2FI模型拟合的 Cr_2O_3 涂层孔隙率方程式(4)是比较准确的,值得注意的是,其3D曲面图可以同时分析和讨论多个独立变量和变量间交互作用对响应对象的影响,获得的影响规律更加全面,工艺条件分析和优化更加直观简单。

通过方程(4),在试验设定的参数范围内对涂层孔隙率最小值进行了预测,结果节选见表5。最优先推荐的能获得最小孔隙率的试验参数是电流 $I=500\text{ A}$,氩气流量 $Q_{\text{Ar}}=40\text{ L/min}$ 和喷距 $d=80\text{ mm}$,此时预测能获得的最小孔隙率达到1.5%,置信度高达0.90。为了表格简洁且能表达更多的信息,将表5中预测工艺参数中非常接近的结果进行了省略。可以看到其次推荐能够获得小孔隙率的试验参数区域是电流 $I=700\text{ A}$,氩气流量 $Q_{\text{Ar}}=40\text{ L/min}$ 和喷距 $d=120\text{ mm}$ 。

值得注意的是,Box-Behnken二阶响应曲面设计是由 2^k 设计与不完全区组设计组合而成^[9],是一种可旋转或近似可旋转的球形设计,并不包含立方体区域的顶点,即各个变量的极值点,如图3。因此设计试验点仅有部分落在孔隙率最小值预测的参数范围内。例如在表2中,试验条件电流 $I=700\text{ A}$,氩气流量 $Q_{\text{Ar}}=40\text{ L/min}$ 和喷距 $d=100\text{ mm}$ 时,获得的孔隙率是2.8%,孔隙率数值和试验条件与表5第25组条件非常接近。另外李福海等^[5]报道的最优的涂层质量(孔隙率、硬度)在电流700 A,喷距110 mm时获得,其试验条件与表5第22、23组很接近。

在Box-Behnken不完全区组和图3立方体顶点之外设计了3组验证试验,工艺参数和孔隙率数据如表6,结果表明模型计算孔隙率和实测孔隙率非常接近。可见拟合方程式(4)作为喷涂电流、等离子气体和喷距等工艺影响因子与孔隙率之间的数学模型,可以为大气等离子喷涂

Cr_2O_3 涂层的工艺优化和性能预测提供参考。

表5 涂层孔隙率的模型预测

Table 5 Model prediction of porosity

| No. | I/A | $Q_{\text{Ar}}/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$ | d/mm | Porosity/% | Desirability |
|-------|-----------------------------|--|---------------|------------|--------------|
| 1 | 500.00 | 40.00 | 80.00 | 1.5 | 0.90 |
| 2~11 | similar parameter to No. 1 | | | 1.6~1.9 | 0.89~0.88 |
| 12 | 699.98 | 40.00 | 120.00 | 2.2 | 0.86 |
| 13~20 | similar parameter to No. 12 | | | 2.2~2.3 | 0.86~0.85 |
| 21 | 500.01 | 40.00 | 92.96 | 2.5 | 0.84 |
| 22 | 699.94 | 40.00 | 113.57 | 2.5 | 0.84 |
| 23 | 700.00 | 40.02 | 113.10 | 2.5 | 0.84 |
| 24 | 635.08 | 40.00 | 120.00 | 2.9 | 0.82 |
| 25 | 699.99 | 40.01 | 102.20 | 3.1 | 0.81 |
| 26 | 700.00 | 48.00 | 80.00 | 3.4 | 0.79 |
| 27 | 700.00 | 48.00 | 82.14 | 3.5 | 0.78 |

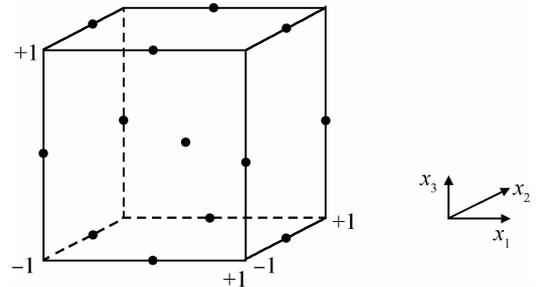


图3 3因子的Box-Behnken设计^[10]

Fig. 3 Box-Behnken design of three-factor^[10]

表6 涂层孔隙率的试验验证

Table 6 Check analysis of porosity

| No. | Current, I/A | Flow of argon $Q_{\text{Ar}}/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$ | Spray distance d/mm | Calculated porosity/% | Actual porosity/% |
|-----|-----------------------|--|------------------------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | 600 | 40 | 110 | 3.2 | 3.6 |
| 2 | 600 | 45 | 110 | 6.9 | 6.3 |
| 3 | 650 | 40 | 110 | 2.9 | 2.6 |

3 结论

(1) 响应曲面法作为一种综合的统计分析和

试验设计方法,可以应用于大气等离子喷涂的工艺研究中。大气等离子喷涂Cr₂O₃涂层的孔隙率 P 的2FI模型拟合曲线方程是: $P = -109.36833 + 0.2345I + 1.85Q_{Ar} - 0.1575d - 0.0043125I \cdot Q_{Ar} - 0.0006125I \cdot d + 0.013437Q_{Ar} \cdot d$ 。

(2) Cr₂O₃涂层大气等离子喷涂工艺参数中电流 I ,等离子气体成分(氩气流量 Q_{Ar})和喷距 d 的对涂层孔隙率 P 影响均显著,其中电流 I 和氩气流量 Q_{Ar} 的交互作用对Cr₂O₃涂层孔隙率 P 的影响比较显著,而其它交互影响不明显。

(3) 在试验设定的参数范围内,最优先推荐的最小孔隙率的预测试验参数是电流 $I = 500$ A,氩气流量 $Q_{Ar} = 40$ L/min和喷距 $d = 80$ mm,预测能获得的最小孔隙率为1.5%。

参考文献

- [1] Samsonov G V. The oxide handbook [M]. 2nd ed, New York: IFI/Plenum, 1982: 192-195.
- [2] Richard C S, Lu J, Béranger G, et al. Study of Cr₂O₃ coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1995, 4(4): 342-352.
- [3] 徐滨士,谭俊,陈建敏. 表面工程领域科学技术发展 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 1-12.
- [4] 李福海,刘敏,朱晖朝,等. APS喷涂Cr₂O₃涂层的工程化应用研究 [J]. 材料研究与应用, 2007, 1(1): 47-50.
- [5] 邓春明,张小水,毛杰,等. 等离子喷涂微米和纳米Al₂O₃-13%TiO₂涂层的防护性能 [J]. 材料研究与应用, 2012, 6(4): 236-239.
- [6] 邓春明,周克崧,刘敏,等. 低压等离子喷涂氧化铝涂层的特性 [J]. 无机材料学报, 2009, 24(1): 117-121.
- [7] 范文超,谭俊,王海军,等. 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 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(1): 71-75.
- [8] 陈雄伟,尹登峰,刘敏,等. 大气等离子喷涂工艺参数对

Cr₂O₃涂层磨损性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2008, 32(7): 9-12.

- [9] Box G E P, Wilson K B. On the experimental attainment of optimum conditions [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1951, Series B(13): 1-45.
- [10] Box G E P, Behnken D W. Some new three-level designs for the study of quantitative variables [J]. Technometrics, 1960, 2(4): 455-475.
- [11] Troczynski T, Plamondon M. Response surface methodology for optimization of plasma spraying [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1992, 1(4): 293-300.
- [12] Lin B T, Jean M D, Chou J H. Using response surface methodology with response transformation in optimizing plasma spraying coatings [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(3/4): 307-315.
- [13] Ramachandran C S, Balasubramanian V, Ananthapadmanabhan P V. Multiobjective optimization of atmospheric plasma spray process parameters to deposit Yttria-stabilized Zirconia coatings using response surface methodology [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(3): 590-607.
- [14] Sharma S. Erosive wear study of rare earth-modified HVOF-sprayed coatings using design of experiment [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(1): 49-62.
- [15] 李剑锋,黄静琪,季珩,等. 等离子喷涂Cr₂O₃涂层显微硬度的工艺优化 [J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(1): 497-503.
- [16] 孙永兴,王引真,何艳玲,等. 等离子喷涂工艺稳定性对Cr₂O₃涂层结合强度的影响 [J]. 兵器材料科学与工程, 2001, 24(2): 38-40.

作者地址:广州市天河区长兴路363号

510651

广州有色金属研究院新材料研究所

Tel: (020) 3723 9022

E-mail: jmao0901@163.com