

表面质量控制及检测

基于响应曲面法的 Ar-N₂ 等离子射流特性研究杨振凯¹, 王海军¹, 刘明¹, 王晶晨^{1,2}(1. 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072;
2. 河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300130)

摘要: 目的 研究等离子射流特性, 提高射流品质, 为工程实践提供支撑。方法 通过响应曲面法, 以粒子速度和温度为指标反映射流特性的变化, 采用 Box-Behnken-Design (BBD) 设计分析电流(I)、主气流量(Q)以及次级气比例(C)对于射流特性的影响规律及其相互作用关系。结果 对粒子速度的影响因素排序为 $Q_{Ar} > I > C$, 对粒子温度的影响因素排序为 $I > Q_{Ar} > C$ 。该喷嘴下实现最佳加热效应的参数为: 主气流量 80 L/min、电流 450 A、次级气比例 22.5%。实现射流最佳加速效应的离子气及电参数为: 主气流量 140 L/min、次级气比例 15%、电流 400 A。在射流最佳加速效应对应参数下制备的 AT40 涂层均匀致密、孔隙少。结论 运用响应曲面法分析和解决等离子射流特性影响问题具有科学性和可操作性, 能够有效指导涂层制备。

关键词: 超音速等离子喷涂; AT40; 射流特性; 响应曲面法

中图分类号: TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)01-0148-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.01.024

Characteristics of the Ar-N₂ Plasma Jet by Response Surface MethodologyYANG Zhen-kai¹, WANG Hai-jun¹, LIU Ming¹, WANG Jing-chen^{1,2}(1. National Key Lab for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the characteristics of the plasma jet, improve the quality of the jet, and provide support for engineering practice. **Methods** Using the response surface methodology, the particle velocity and temperature were used as indexes to reflect changes in the jet characteristics. Box-Behnken design (BBD) was used to analyze the influencing law of electric current, main gas flux and secondary gas proportion on the jet characteristics and the parameter interactions. **Results** The results indicated that the particle velocity had the greatest effect on argon flow rate, followed by electric current and secondary gas ratio. To achieve optimal heating effects of plasma jet, the gas and electrical parameters matching scheme under the nozzle were: main gas flux 80

收稿日期: 2015-09-20; 修订日期: 2015-10-22

Received: 2015-09-20; Revised: 2015-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175513)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51175513)

作者简介: 杨振凯(1990—), 男, 浙江人, 硕士研究生, 主要研究等离子喷涂工艺优化。

Biography: YANG Zhen-kai(1990—), Male, from Zhejiang, Master graduate student, Research focus: plasma spraying process optimization.

通讯作者: 王海军(1956—), 男, 河北人, 高级工程师, 主要从事热喷涂技术设备及工艺研究。

Corresponding author: WANG Hai-jun(1956—), Male, from Hebei, Senior engineer, Research focus: thermal spraying equipment and technology research.

L/min, current 450 A, secondary gas ratio 22.5%, whereas the parameters for optimal acceleration effect were; main gas flux 140 L/min, current 400 A, secondary gas ratio 15%. The AT40 coating prepared under the corresponding parameters of the optimal jet acceleration effect was uniform and compact, with low porosity. **Conclusion** It is scientific and reliable to use response surface methodology to study the characteristics of the plasma jet, and it can provide effective guidance in coating preparation.

KEY WORDS: supersonic plasma spraying; AT40 coating; plasma jet characteristics; response surface methodology

在等离子喷涂中,粉末从等离子射流中获取热能与动能,经加热熔化后,高速撞击到工件表面上形成致密涂层^[1]。显然,等离子射流是连接材料粒子和涂层之间的桥梁,好的射流品质是得到高性能涂层的前提和保证。因此,充分了解等离子射流特性,能够避免繁琐的工艺优化过程,并直接利用射流特性制备出高质量的涂层^[2]。射流最重要的性质是射流的温度和速度的变化规律,然而超音速等离子喷涂射流速度最高可达 3000 m/s,温度可达 10000 ℃^[3],目前还缺乏有效的手段对射流温度、速度进行准确测量。刘丹等^[4]利用光谱辐射谱线强度法,研究了 4 种氩氮混合比下等离子射流的温度场分布。高阳等^[5]采用焓探针,对小功率(5 kW)等离子体射流的焓、温度和速度进行了测量和计算。这些工作都为等离子射流特性研究和等离子喷涂中次级气的使用提供了参考。响应面优化法(Response Surface Methodology, RSM)是一种高效的试验设计和统计分析的方法^[6-7],适于解决非线性数据处理的相关问题,本文采用响应曲面法对射流特性中相关实验进行设计和分析。

影响等离子射流特性因素有很多,诸如电功率(P)、氩气流量(Q)、次级气比例(C)等。电功率是电压和电流的乘积,决定外部输入的总能量;在其他参数相同的情况下,功率越高,喷嘴中的能量密度就越大,在一定范围内离子气的电离就越充分,射流的温度和速度越高,相应射流对粉末的加热加速能力也更大。电压一定时电功率主要受电流影响。另一个显著影响射流特性的工艺参数为等离子喷涂的工作气,具体包括用于引弧并提供初级热焓的主气流量,用于产生电压并提供主要热焓的次级气比例(即占主气的百分比)。电流、主气和次级气比例不同的搭配方式,可以使射流产生不同的特性,从而满足不同粉末的喷涂需求^[8]。基于以上对影响射流特性影响因素的基本分析,本文选定电流、主气流量和次级气比例作为输入因子,将射流距喷嘴出口 90 mm 处的粒子飞行速度及表面温度作为输出响应,设计相关实验研究电流、氩气流量 Q_{Ar} 、次级气占主气的比例 $C(C = Q_{N_2}/Q_{Ar})$ 对等离子射流的影响规律,以期对射流品质研究和喷涂工程实践提供新的参考。

1 实验设计

对北京桑饶公司的 AT40 粉末进行测温测速,粉末形貌如图 1 所示,粉末直径为 40 ~ 50 μm,流动性较好,能够满足超音速等离子喷涂要求。材料粒子的温度、速度能在大功率、大主气梯度范围被 Spray watch 捕捉,符合实验要求。喷涂过程采用氩气为主气, N₂ 为次级气,研究 Ar-N₂ 等离子射流特性^[9]。

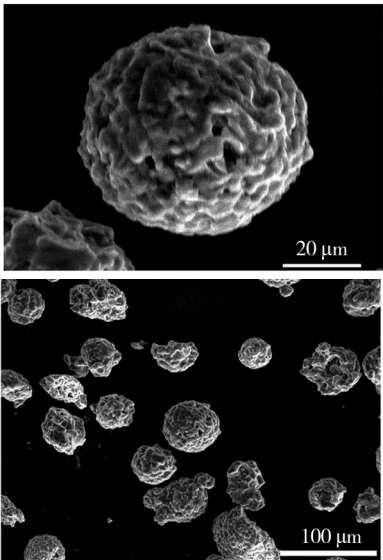


图 1 喷涂粉末形貌
Fig. 1 SEM image of spray powder

采用先进的 SprayWatch-2i CCD 在线监测系统对超音速等离子射流中的粒子速度、温度及流量分布进行在线监控^[3],由此作为反馈来调控和优化喷涂工艺。

采用 Design-Expert 进行设计,共 17 组实验,其中 X_1 为喷涂电流、 X_2 为主气流量、 X_3 为次级气比例,具体实验因素及水平选取见表 1。

表 1 射流特性影响因子及取值水平
Tab.1 The influencing factors of the jet characteristics and their numeric values

编码值及水平	X_1	X_2	X_3
-1	450	80	5
0	400	120	12.5
1	350	160	20

2 结果与讨论

2.1 响应方程的建立与显著性分析

采用 Design-Expert 对实验数据进行分析^[10-11], 分别得到粒子速度、温度和输入因子之间的关系方程式分别为:

$$v = 542.82 + 6.13 \times I + 21.00 \times Q_{Ar} + 2.3 \times C + 3.50 \times I \times Q_{Ar} + 12.25 \times I \times C - 11.50 \times Q_{Ar} \times C$$
$$t = 2379.40 + 55.25 \times I - 53.00 \times Q_{Ar} - 23.50 \times C - 32.25 \times I \times Q_{Ar} + 9.25 \times I \times C + 39.00 \times Q_{Ar} \times C + 46.80 \times I \times I - 62.45 \times Q_{Ar} \times Q_{Ar} - 0.45 \times C \times C + 96.25 \times I \times I \times C - 25.75 \times I \times I \times Q_{Ar} - 15.00 \times I \times Q_{Ar} \times Q_{Ar}$$

对粒子速度的影响因素排序为 $Q_{Ar} > I > C$, 对粒子温度的影响因素排序为 $I > Q_{Ar} > C$, 三者的影响程度相近且都比较大。粒子速度的 2FI 预测模型的方差分析见表 2, 可以看到, 模型的 F 值为 8.28, $P = 0.0021 \leq 0.05$, 说明因子和自变量之间所建立的回归方程的关系显著; 同时, 失拟度 F 值为 5.09, $P = 0.0686 > 0.05$, 说明不显著。从表中分析还可知, 在 3 个因子中 Q_{Ar} 的 P 值 < 0.0001 , 说明主气流量的大小与粒子速度高度显著, I 和 C 两个因子的 P 值分别为 0.0047 和 0.0011, 与粒子速度影响相关, 在交互影响项中 $I \times Q_{Ar}$ 和 $Q_{Ar} \times C$ 的 P 值 < 0.05 , 交互影响关系显著。这也和粒子速度回归方程中的系数分析结果相同^[12]。

表 2 粒子速度的 2FI 模型方差分析

Tab.2 The variance analysis of particle velocity using 2FI regression model

变异源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
2FI 模型	5061.5	6	843.58	8.28	<0.0001
I	55.13	1	55.13	0.54	0.0047
Q_{Ar}	3528	1	3528	34.62	<0.0001
C	300.13	1	300.13	2.95	0.0011
$I \times Q_{Ar}$	49	1	49	0.48	0.5038
$I \times C$	600.25	1	600.25	5.89	0.0356
$Q_{Ar} \times C$	529	1	529	5.19	0.0459
残差	1018.97	10	101.9		
失拟度	900.97	6	150.15	5.09	0.0686
误差	118	4	29.5		

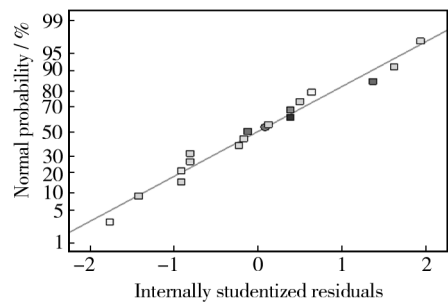
粒子温度的 Cubic 预测模型的方差分析见表 3 (采用三次多项式进行拟合的原因是模型的非线性比较强, 线性拟合及 2FI 拟合均不能获得较好的拟合效

果), 模型的 F 值为 16.27, P 值 < 0.0001 , 说明因子和自变量之间所建立的回归方程的关系是高度显著的; 在 3 个因子中 I 的 P 值 < 0.0001 , 说明粒子温度的大小与电流 I 高度显著, Q_{Ar} 和 C 的 P 值分别为 0.0023 和 0.0251, 与输出响应影响显著, 在交互影响项中 $I \times Q_{Ar}$ 和 $Q_{Ar} \times C$ 以及 $I \times I$ 和 $I \times I \times C$ 的 P 值 < 0.05 , 交互影响关系显著。这也和回归方程的系数分析结果相同。响应的内部生化残差分别如图 2 所示, 可以看到, 无

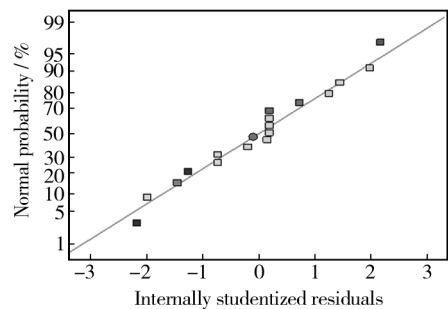
表 3 粒子温度的 Cubic 模型方差分析

Tab.3 The variance analysis of particle velocity using Cubic regression model

变异源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
Cubic 模型	80869.21	6	6747.44	16.27	<0.0001
I	110.25	1	110.25	0.27	<0.0001
Q_{Ar}	11236.00	1	11236.00	27.09	0.0023
C	7569.00	1	7569.00	18.25	0.0251
$I \times Q_{Ar}$	4160.25	1	4160.25	10.03	0.0034
$I \times C$	342.25	1	342.25	0.83	0.4151
$Q_{Ar} \times C$	6084.00	1	6084.00	14.67	0.0186
$I \times I$	9222.06	1	9222.06	22.23	0.0092
$Q_{Ar} \times Q_{Ar}$	16421.06	1	16421.06	39.59	0.0033
$C \times C$	0.85	1	0.85	2.0665E-003	0.9660
$I \times I \times C$	18528.13	1	18528.13	44.67	0.0026
$I \times I \times Q_{Ar}$	1326.13	1	1326.13	3.20	0.1483
$I \times Q_{Ar} \times Q_{Ar}$	450	1	450	1.08	0.3564
误差	1659.2	4	414.8		



a 粒子速度



b 粒子温度

图 2 粒子速度和温度预测模型残差正态概率分布

Fig.2 Normal plot of predicted model residuals of particle velocity and temperature

论是粒子速度还是温度,其模型残差的正态分布都在一条直线上,说明对于粒子速度和温度的模型的预测值和实际值非常接近,综合分析以上数据,说明建立的模型能很好地对粒子速度和温度进行分析预测^[13]。

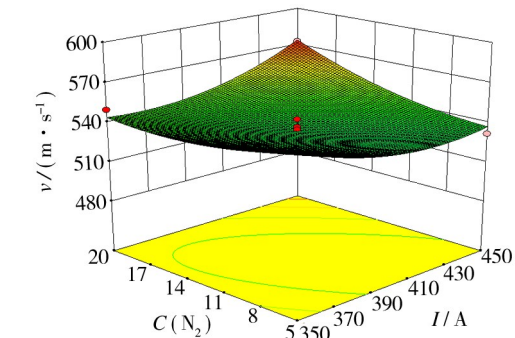
2.2 射流特性的响应面分析

响应曲面法中的 3D 曲面图和等高线图能很好地表达出两个因素对于系统响应变量的交互影响情况。

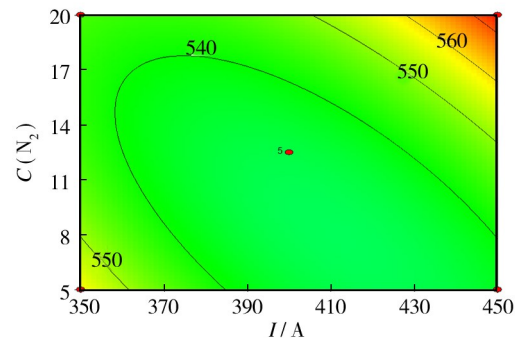
2.2.1 粒子速度的响应面分析

从图 3 可以看到,当主气流量一定的时候,曲面图呈现三角低一边高的特点,最大的速度在较大电流和大次级气比例下获得。从图 4 可以看到:当电流为 450 A 时,小主气和小次级气比例难以获得较高粒子速度,且主气对于速度的影响更大^[14]。从图 5 可以看到,当次级气比例固定,得到最大粒子速度的方式是采用大电流和较大主气。在前面的分析中已经知道对于粒子速度而言,3 个因素的排序是 $I > Q_{Ar} > C$,所以重点考察电流和主气对于粒子速度的交互影响。从图 5 可以看到粒子速度随主气增大而增大,但是当主气增大到 130 L/min 的时候,粒子速度增加速度放缓,主要原因是在不考虑对射流热焓的前提下,主气流量的增大增加了气体流速,相应对弧柱的压缩作用也增强了,因此射流的刚性增强,但是如果持续不断增大主气流量,则次级气的浓度不断减小,其电离度也会越来越小,从而降低射流的热焓,热压缩效应降低影响了射流速度。在相同的喷嘴条件和电参数条件下,一定范围内主气增大粒子速度增大,但同时也应该看到电流对主气和次级气比例的交互关系,即当电流较大时(如图 4),要想获得较大的速度,主气可以在 110 ~ 160 L/min 范围变化,次级气比例也可以较大范围内进行匹配;而当电流较小时(如图 5),要想获得较大的粒子速度,图 5 中最靠近左上角的部分区域,必须在系统最大主气流量下获得,通过大气体流量氩气的气动力效应来给粒子加速。因为电流直接决定了电流密度的大小,当电流密度增大时,弧柱的温度升高,离子气的热电离就更加充分,因此在电流较大,功率较高时候能将离子气充分电离,使得等离子弧能充分压缩,从而提高射流的温度速度^[15],而在小电流情形下必须通过加大气流量的方式获得较好的加速。因此,要想获得比较好的加速效应,可以通过合适的主气大小匹配较大的电流和相对较小的次级气比例获得;也可以通过不断增大主气和次级气

获得,但是考虑控制喷涂的成本,显然前者的匹配方式更加经济合理^[16]。

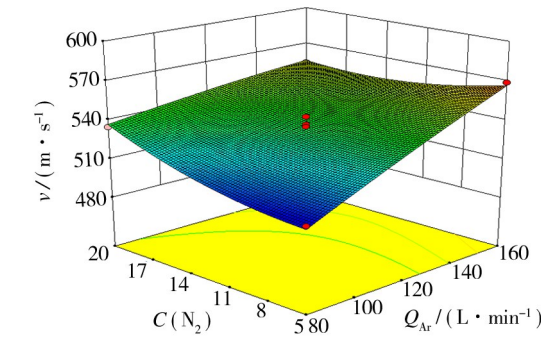


a 3D 曲面图

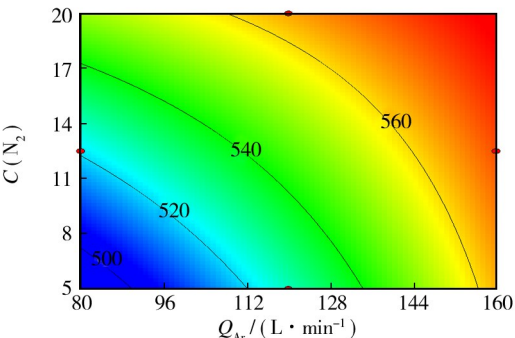


b 等高线图

图 3 次级气比例和电流对粒子速度的交互影响关系
Fig. 3 The interactive influence of C and I on particle velocity



a 3D 曲面图



b 等高线图

图 4 氩气流量和次级气比例对粒子速度的交互影响关系
Fig. 4 The interactive influence of C and Q_{Ar} on particle velocity

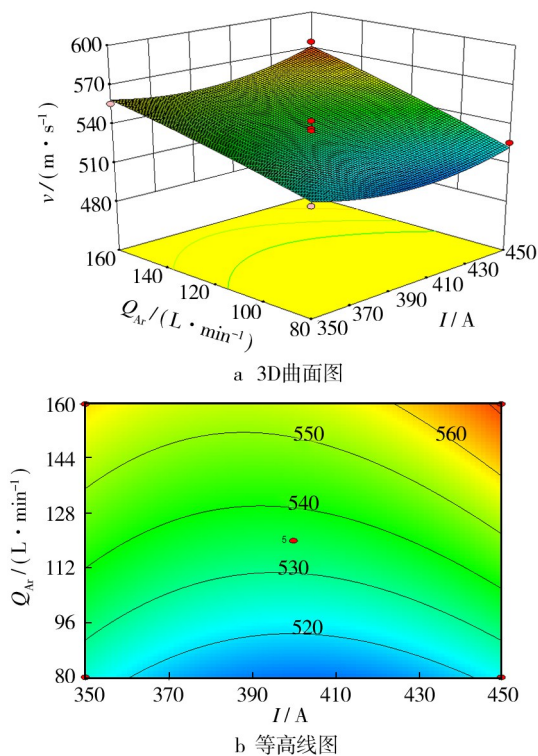


图5 氩气流量和电流对粒子速度的交互影响关系

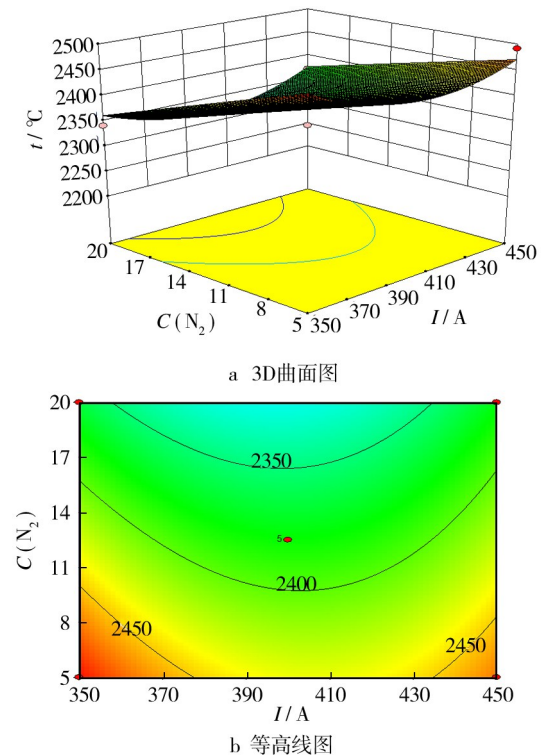
Fig. 5 The interactive influence of I and Q_{Ar} on particle velocity

图6 次级气比例和电流对粒子温度的交互影响关系

Fig. 6 The interactive influence of C and I on particle temperature

2.2.2 粒子温度的响应面分析

结合图6可以看到,要想获得较高的粒子温度,可以在 I 和 Q_{Ar} 均较小的时候获得,也可以在较小 Q_{Ar} 和较大的 I 下获得。主气一定时,随着 I 增加粒子温度上升,随着 C 上升,粒子温度下降;因为在一定的主气流量下,次级气浓度也有一个阈值,不断加大次级气的比例会使过量的 N_2 冷却射流,从而降低射流热焓。结合图7可以看出,在电流一定时,在 $Q_{Ar}=80\sim 140\text{ L/min}$ 时,粒子温度均可以和 C 搭配使得粒子温度达到最大。随着 Q_{Ar} 继续增加,粒子温度下降,因为主气的不断加入使射流速度不断加快从而导致粒子的加热时间减少,所以粒子温度开始下降。在对于粒子温度的影响中 $I>Q_{Ar}>C$ 。从图8可以看到,当次级气比例一定的时候,可以看到在 I 和 Q_{Ar} 较小,而 Q_{Ar} 和 I 较大的时候,粒子温度均能达到最大,约为 2450°C ,可能的原因是在电流小而主气较大的时候,次级气比例一定,此时次级气的总量非常大,这就为电流小、电流密度不足对于射流温度的影响提供了补偿;当 I 较大时,电流密度增加,等离子弧弧柱的热压缩效应很剧烈,射流热焓值很高;而当 Q_{Ar} 较小,小比例的次级气都被充分电离,因此射流的温度也比较高,从而也能给予粒子足够的加热,粒子温度也能达到最大值。

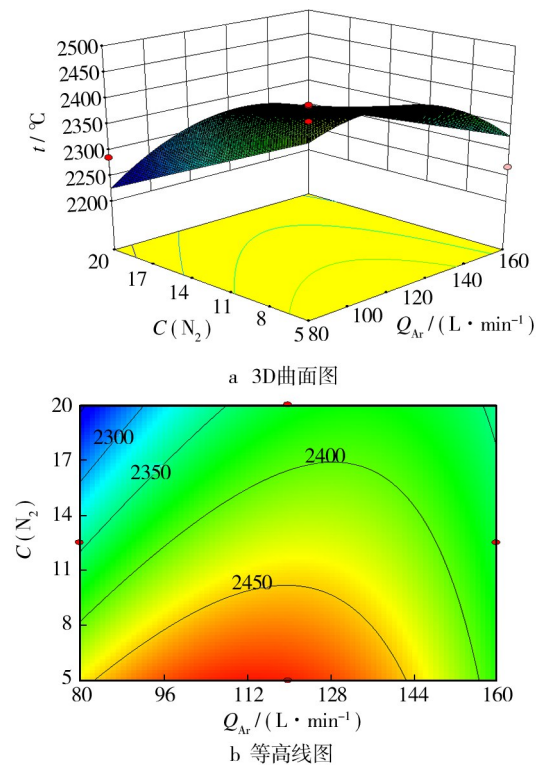


图7 氩气流量和次级气比例对粒子温度的交互影响关系

Fig. 7 The interactive influence of C and Q_{Ar} on particle temperature

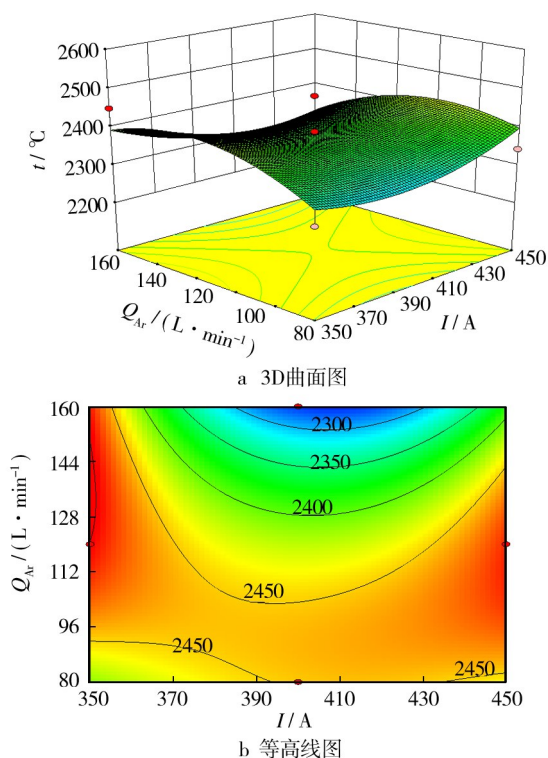


图8 氩气流量和电流对粒子温度的交互影响关系

Fig. 8 The interactive influence of I and Q_{Ar} on particle temperature

2.3 实现射流最佳加速、加热效应的工艺参数预测

从牛顿第二定律可知,物体所受合力为其质量与加速度的乘积,即 $F=ma$ 。因此粒子在等离子射流中所受的射流给予的合力与其速度的关系为:

$$F = m_p \frac{dv_p}{dt} \quad (1)$$

式中: F 是粒子受到的射流给予的合力,当射流速度超过粒子速度时,射流对粒子起加速作用,当射流速度小于粒子速度的时候,射流的合力为阻力,起减速效应; m_p 是球形粉末粒子的质量; v_p 是粉末粒子的速度。

$$m_p = (4/3) \pi r_p^3 \rho_p \quad (2)$$

式中: r_p 是粉末粒子的半径, ρ_p 是粉末粒子的密度。轴向飞行的粉末粒子所受的拖动力可用非向量式表示:

$$F = \frac{1}{2} \rho_g A_p C_D |v_g - v_p| (v_g - v_p) \quad (3)$$

式中: ρ_g 为射流的密度, A_p 为粉末粒子的截面积, C_D 为拖动系数, v_g 为射流的速度, v_p 为粉末粒子的速度。材料粒子在等离子射流中的速度与等离子射流的速度成正比,相同条件下,等离子射流速度越

大,给予材料粒子的拖动力 F 越大,对粒子的加速效应越强,相应粒子的速度就越大。借助响应曲面法的参数优化和预测功能,分别将响应值粒子速度和粒子温度的优化标准设置为最大,借助拟合出的方程进行求解获得实现最优值的实验参数,得到射流最佳加速效应即粒子速度达到最大时的参数为:主气 140 L/min、次级气比例 15%、电流 400 A。得到射流最佳加热效应即粒子温度达到最大时的参数为:主气 80 L/min、电流 450 A、次级气比例 22.5%。

2.4 模型检验

粒子撞击基体时候的飞行速度以及表面温度直接影响粒子的扁平化和堆垛,对涂层质量具有决定性作用^[17]。因此借助响应曲面法对于射流特性的研究,对响应曲面法给出的粒子在喷涂距离处(距离喷嘴出口 9 cm)射流实现最佳加速效应的工艺参数进行验证。测得粒子温度为 2455 $^\circ\text{C}$,速度为 578 m/s,与预测值相比误差分别为 0.2% 和 0.5%,说明所得响应曲面能够较好地模拟粒子速度温度的大小。以最佳加速效应下相关喷涂工艺参数在 45# 钢基体上制备 AT40 涂层,具体参数为:主气流量 140 L/min,电流 400 A,次级气比例 15%,喷涂电压 144 V,喷涂功率 60 kW,喷涂距离 9 cm。涂层截面和表面形貌如图 9 所示,可以看到涂层均匀致密、孔隙少。

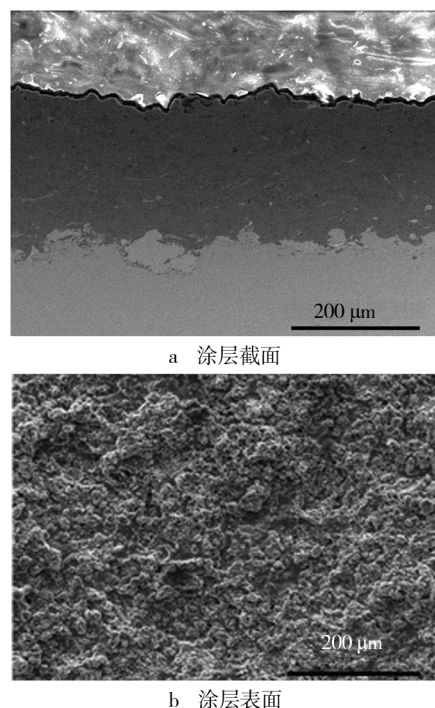


图9 涂层截面和表面情况

Fig. 9 Micro-structural and cross-sectional images of AT40

3 结论与展望

1) 响应曲面法作为一种解决非线性问题的有力工具,有效地避免了单因素法的大实验量,通过得到的二维和三维响应曲面图能直观地看到变量和变量之间的交互作用。

2) 利用响应曲面法建立了等离子射流中 AT40 粒子温度、速度和电流、主气流量及次级气比例之间的二次回归模型。经检验,模型准确,可信度高。

3) 影响射流特性最主要的 3 个核心因素,对粒子速度的影响因素排序为 $Q_{Ar} > I > C$,对粒子温度的影响因素排序为 $I > Q_{Ar} > C$; 3 个因素对于粒子温度速度的影响具有交互性;在主气 140 L/min、电流 400 A、次级气比例为 15% 和主气 80 L/min、电流 450 A、次级气比例为 22.5% 的时候,射流分别达到最佳加速效应和最佳加热效应。

4) 打破了传统的通过参数优化制备高质量涂层的研究思路,利用粒子温度速度作为指标反映射流特性变化,采用响应曲面法下最佳加速效应对应的离子气及电参数匹配制备,发现涂层均匀致密、孔隙较少,涂层质量高。

参考文献

- [1] 王海军,谢兆钱,郭永明,等. 高效能超音速等离子喷涂粒子特性及涂层特点[J]. 中国表面工程,2010,23(3): 84—88.
WANG Hai-jun, XIE Zhao-qian, GUO Yong-ming, et al. Characteristic of High Efficiency Supersonic Plasma Particles and Coatings[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(3): 84—88.
- [2] 刘明,王海军,姜伟,等. 响应曲面法优化超音速等离子喷涂 Al_2O_3 -40% TiO_2 涂层工艺[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(2): 12—16.
LIU Ming, WANG Hai-jun, JIANG Yi, et al. Optimization of Supersonic Plasma Sprayed Al_2O_3 -40% TiO_2 Coatings by Response Surface Methodology[J]. Materials Science and Technology, 2014, 22(2): 12—16.
- [3] BOX G E P, BEHNKEN D W. Some New Three-level Designs for the Study of Quantitative Variables[J]. Technometrics, 1960(2): 455—475.
- [4] 刘丹. 氩氮气体混合比对等离子射流温度和涂层特性的影响[J]. 材料工程, 2003, 11(2): 45—48.
LIU Dan. Effect of the Ar- N_2 Mixture Ratios on Temperature of the Plasma Jet and Properties of the Coating[J]. Materials Engineering, 2003, 11(2): 45—48.
- [5] 高阳. 小功率等离子体射流的流特性[J]. 核聚变与等离子体物理, 2004, 24(1): 182—192.
GAO Yang. Flow Characteristic of a Low Power Plasma Jet[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2004, 24(1): 182—192.
- [6] TROCZYNSKI T, PLAMONDON M. Response Surface Methodology for Optimization of Plasma Spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1992(1): 293—300.
- [7] LIN B T, JEAN M D, CHOU J H. Using Response Surface Methodology for Optimizing Deposited Partially Stabilized Zirconia in Plasma Spraying[J]. Applied Surface Science, 2007(253): 3254—3262.
- [8] 韩志海,王海军,王斌利,等. 超音速等离子喷涂制备先进陶瓷涂层的特点[J]. 有色金属(冶炼部分), 2008(S1): 61—66.
HAN Zhi-hai, WANG Hai-jun, WANG Bin-li, et al. Characteristics of Advanced Ceramic Coatings by Supersonic Plasma Sprayed[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2008(S1): 61—66.
- [9] MEAD R, PIKE D J. A Review of Response Surface Methodology from a Biometrics Viewpoint[J]. Biometrics, 1975, 31(12): 803—851.
- [10] RAYMOND H M, ANDRE I K, WALTER H C. Response Surface Methodology: 1966—1988[J]. Technometrics, 1989, 31(2): 77—98.
- [11] CARTER W H, WAMPLER G L, STABLEIN D M. Review of the Application of Response Surface Methodology in the Combination Therapy of Cancer[J]. Cancer Treatment Reports, 1983, 70: 133—140.
- [12] HENIKA R G, PALMER G M. Response Surface Methodology Revisited[J]. Cereal Food Science, 1976, 21: 432—445.
- [13] HENIKA R G. Use of Response Surface Methodology in Sensory Evaluation[J]. Food Technology, 1982, 36: 96—101.
- [14] 毛杰,邓春明,邓畅光. 响应曲面法在大气等离子喷涂工艺研究中的应用[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 65—69.
MAO Jie, DENG Chun-ming, DENG Chang-guang. Application of Response Surface Methodology to the Process Study of Atmospheric Plasma Spraying[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 65—69.
- [15] 王海军,韩志海,王建,等. 超音速等离子喷涂 WC-Co 涂层性能研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2006, 20(1): 85—89.

(下转第 160 页)

in a Microchannel by Dielectrophoresis [J]. Electrophoresis, 2011, 32(22): 3147—3156.

- [14] POHL H A. The Behavior of Neutral Matter in Nouniform Electric Field [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1978, 78: 1—4.

- [15] 于乐, 张鹤腾, 韩萍, 等. 介电泳的进展及物理参数对介

电泳的影响 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(6): 176—180.

YU Yue, ZHANG He-teng, HAN Ping, et al. The Development of Dielectrophoresis and Effects of the Physical Parameter on Dielectrophoresis [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(6): 176—180.

(上接第 130 页)

- [18] SOLMAZ R, ŞAHİN E A, DÖNER A, et al. The Investigation of Synergistic Inhibition Effect of Rhodanine and Iodide Ion on the Corrosion of Copper in Sulphuric Acid Solution [J]. Corrosion Science, 2011, 53(10): 3231—3240.

- [19] DHAR H P, CONWAY B E, JOSHI K M. On the Form of Adsorption Isotherms for Substitutional Adsorption of Molecules of Different Sizes [J]. Electrochimica Acta, 1973, 18(11): 789—798.

- [20] HAMDY H H. Inhibition of Mild Steel Corrosion in Hydrochloric Acid Solution by Triazole Derivatives Part II: Time and Temperature Effects and Thermodynamic Treatments [J]. Electrochimica Acta, 2007, 53(4): 1722—1730.

- [21] SINGH A K, QURAISHI M A. Effect of Cefazolin on the Corrosion of Mild Steel in HCl Solution [J]. Corrosion Science, 2010, 52(1): 152—160.

(上接第 147 页)

- [10] 衣守志, 马洪运, 张琴. 螺纹钢水基防锈剂的制备及性能 [J]. 材料保护, 2012, 45(1): 30—32.

YI Shou-zhi, MA Hong-yun, ZHANG Qin. Preparation and Performance of Water-based Rust Inhibitor for Twisted Steel [J]. Materials Protection, 2012, 45(1): 30—32.

- [11] 魏凤玉, 胡芳, 黄登奎. 新型试剂快速冷却螺纹钢的耐蚀性能 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32(12): 151—154

WEI Feng-yu, HU Fang, HUANG Deng-luan. Corrosion Performance of Bebar Quenched in a Novel Agent [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(12): 151—154.

- [12] 陈泽民, 路品, 苏艳丽. 钢铁水基防锈剂的研制及其性能 [J]. 材料保护, 2011, 44(6): 58—60.

CHEN Ze-min, LU Pin, SU Yan-li. Preparation and Performance of Water-based Rust Inhibitor for Steel [J]. Materials Protection, 2011, 44(6): 58—60.

- [13] 朱弘琦, 朱曾涛. 化学剂冷却条件下 20MnSi 材料的耐蚀

性能研究 [J]. 铸造技术, 2015, 36(1): 83—86.

ZHU Hong-qi, ZHU Zeng-tao. Study on Corrosion Resistance of 20MnSi Steel under Chemical Agent Cooling Condition [J]. Foundry Technology, 2015, 36(1): 83—86.

- [14] 朱青, 朱明, 余勇. AZ91D 镁合金 Mo-Mn 无铬转化膜的制备与耐蚀性 [J]. 表面技术, 2015, 44(8): 9—14.

ZHU Qing, ZHU Ming, YU Yong. Preparation and Corrosion Resistance of Mo-Mn Chromium-free Conversion Coating Formed on AZ91D Magnesium Alloys [J]. Surface Technology, 2015, 44(8): 9—14.

- [15] 杨培燕, 顾宝珊, 王岩. 热浸镀锌层在模拟混凝土环境下耐蚀性能研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(4): 68—72.

YANG Pei-yan, GU Bao-shan, WANG Yan. Study on Corrosion Properties of Galvanizing Coating in Simulated Concrete Environment [J]. Total Corrosion Control, 2015, 29(4): 68—72.

(上接第 154 页)

WANG Hai-jun, HAN Zhi-hai, WANG Jian, et al. Study on the Performance of Supersonic Plasma Sprayed WC-12Co Coatings [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2006, 20(1): 85—89.

- [16] 王海斗, 徐滨士, 姜祎, 等. 超音速等离子喷涂层的组织及性能分析 [J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 1—4.

WANG Hai-dou, XU Bin-shi, JIANG Yi, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Supersonic Plasma

Sprayed Coating [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 1—4.

- [17] 邓春明, 周克崧, 刘敏, 等. 大气等离子喷涂 Al_2O_3 -3% TiO_2 涂层的性能 [J]. 中国表面工程, 2011, 23(1): 19—23.

DENG Chun-ming, ZHOU Ke-song, LIU Min, et al. Properties of Air Plasma Sprayed Al_2O_3 -3% TiO_2 Coatings [J]. China Surface Engineering, 2011, 23(1): 19—23.