

DOI: 10.11973/jxgccl202308008

基于响应曲面法优化大气等离子喷涂 Y_2O_3 涂层工艺

秦 松,周建桥,杨佳霖,李 勇,周 奥,夏光明

(湖南省冶金材料研究院有限公司,湖南省先进涂层工程技术研究中心,长沙 410129)

摘要:以自制的高纯 Y_2O_3 粉为原料,借助大气等离子喷涂工艺在 A6061 铝合金表面制备 Y_2O_3 涂层,基于响应曲面法构筑了相应的响应曲面图,分析了喷涂电压(60~80 V)、喷涂电流(500~600 A)和喷涂距离(100~120 mm)的交互作用对涂层硬度和孔隙率的影响,优化了等离子喷涂工艺。结果表明:基于响应曲面法建立了涂层显微硬度和孔隙率的二次数学模型;模型预测 Y_2O_3 涂层的优化工艺参数为喷涂电压 78 V、喷涂电流 500 A、喷涂距离 120 mm,涂层的显微硬度和孔隙率分别为 633.28 HV 和 3.22%,与试验值的相对误差分别为 1.92%和 1.26%,验证了模型的准确性。优化工艺下制备的涂层表面粗糙度为 5.733 μm ,结合强度为 25.6 MPa。

关键词: 大气等离子喷涂; Y_2O_3 涂层; 响应曲面法; 显微硬度; 孔隙率

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)08-0045-07

Process Optimization of Y_2O_3 Coating Prepared by Atmospheric Plasma Spraying Based on Response Surface Methodology

QIN Song, ZHOU Jianqiao, YANG Jialin, LI Yong, ZHOU Ao, XIA Guangming

(Hunan Advanced Coating Engineering Technology Research Center, Hunan Research Institute of Metallurgy and Materials Co., Ltd., Changsha 410129, China)

Abstract: With self-made high-purity Y_2O_3 powder as raw material, Y_2O_3 coating was prepared on the surface of A6061 aluminum alloy substrate by atmospheric plasma spraying. Based on the response surface methodology, the corresponding response surface maps were constructed, and the influence of the interaction of spraying voltage (60—80 V), spraying current (500—600 A) and spraying distance (100—120 mm) on the microhardness and porosity of the coating was analyzed. The plasma spraying process was optimized. The results show that a quadratic mathematical model of the microhardness and porosity of coating was established by response surface methodology. The optimal process parameters of the Y_2O_3 coating predicted by the model were listed as follows: spraying voltage of 78 V, spraying current of 500 A and spraying distance of 120 mm. The corresponding microhardness and porosity were 633.28 HV and 3.22%, and the relative errors of the predicted value and the test value were 1.92% and 1.26%, respectively, verifying the accuracy of the model. Under the optimal process, the surface roughness of the prepared coating was 5.733 μm , and the bonding strength was 25.6 MPa.

Key words: atmospheric plasma spraying; Y_2O_3 coating; response surface methodology; microhardness; porosity

0 引 言

目前,集成电路正朝着高度集成化方向发展,半导体逻辑器件的技术节点的尺寸将达到 10 nm 以

下^[1]。半导体行业广泛采用含氯、氟等的化学活性物质,如 CF_4 、 CCl_2 来进行等离子蚀刻硅片以及清洗处理室。然而,这些化学活性物质形成的等离子体会与 SiO_2 和 Al_2O_3 反应,对蚀刻机工艺腔的内壁、喷头、聚焦环和基座造成轰击与腐蚀,产生的粒子会污染晶圆,缩短设备的使用寿命^[2-5]。等离子刻蚀设备内部陶瓷元件产生的颗粒污染已严重阻碍集成电路的快

收稿日期:2022-05-23;修订日期:2023-06-01

作者简介:秦松(1988—),男,安徽合肥人,工程师,硕士

速小型化,成为生产效率低下的一个主要因素^[6]。

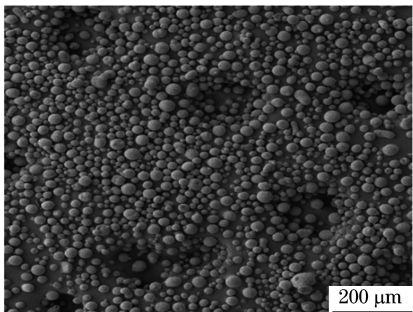
Y_2O_3 的化学稳定性高,耐火性好,具有很好的耐卤素族等离子体腐蚀的能力,与 CF_4 等离子体生成的氟化物(YF_3)具有较低的蒸气压,且颗粒不易飞散,因此 Y_2O_3 成为一种新型干法刻蚀设备的关键材料。近年来,日本和美国等国家都开展了刻蚀机工艺腔耐腐蚀性能研究,并对高纯致密 Y_2O_3 涂层制备工艺进行了探索与初试,也对涂层的热稳定性、抗热震性和耐等离子体腐蚀性等进行了测试^[7-9]。国内在高纯 Y_2O_3 涂层的制备方面也有了初步研究^[10-12],但所采用的 Y_2O_3 粉体多为进口。尽管近年来相继研制了悬浮液等离子喷涂和气溶胶沉积技术来制备高纯 Y_2O_3 涂层,但这些技术成本太高,且无法改善涂层表面粗糙度大的问题,同时也不利于规模化生产^[13-15]。

大气等离子喷涂技术具有成本低、所制备涂层表面粗糙度低、利于规模化推广应用的优点,可以用于制备 Y_2O_3 涂层。大气等离子喷涂技术中的电压、电流、喷涂距离、送粉率和喷枪相对运动速度等工艺参数均与涂层的质量和性能有着密不可分的关系。在传统的试验设计和数据处理中,单变量和全因子试验是常用方法,但是这些方法试验次数多且程序繁琐^[16-17]。响应曲面法(response surface

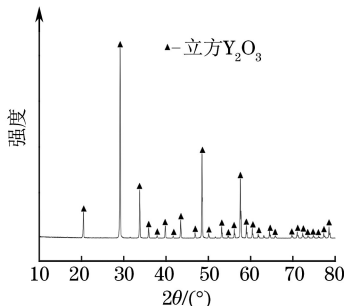
methodology, RSM)正好弥补了这些不足,该方法包含了一整套数学和统计的工具,用于设计试验及构建数学模型^[18-19],可以通过较少的试验次数获得试验因素和响应之间的关系,以获得最佳工艺参数^[20-21]。为解决芯片设计制造领域卡脖子技术问题,提高刻蚀机工艺腔耐等离子体腐蚀性能,作者采用自制的高纯 Y_2O_3 粉体,通过大气等离子喷涂技术在 A6061 合金表面制备 Y_2O_3 涂层,基于响应曲面法构筑了相应的响应曲面图,分析了喷涂电压、电流、喷涂距离的交互作用对涂层硬度和孔隙率的影响,并获得了优化的等离子喷涂工艺,以期对刻蚀机工艺腔用刻蚀涂层的国产化替代提供有力支撑。

1 试样制备与试验方法

试验用喷涂原料为采用雾化法自制的 Y_2O_3 粉体,纯度为 99.95%,颗粒的球形度高,结构为立方结构,其微观形貌及 X 射线衍射(XRD)谱如图 1 所示;采用 Malvern Mastersizer 3000 型激光粒度分析仪得到其粒径为 15~60 μm ,中值粒径为 30.44 μm ; Y_2O_3 粉体的松装密度为 1.68 $g \cdot cm^{-3}$,振实密度为 2.5 $g \cdot cm^{-3}$,卡尔指数为 21.63。基体为 A6061 铝合金,尺寸为 50 mm×50 mm×5 mm,用丙酮清洗基体表面,随后进行表面喷砂预处理。



(a) 微观形貌



(b) XRD谱

图 1 Y_2O_3 粉体的微观形貌与 XRD 谱

Fig.1 Micromorpholgy (a) and XRD pattern (b) of Y_2O_3 powder

采用 Praxair 3710 型等离子喷涂系统制备 Y_2O_3 涂层,喷涂过程中采用机械手进行程序化控制,确保制备的涂层厚度均匀。为降低涂层与基体因热膨胀系数差异产生的热应力,在喷涂过程中采用适当的冷却手段对基体进行冷却,必要时采取多次停枪间歇式喷涂。大气等离子喷涂主要工艺参数包括电压、电流、喷涂距离、送粉率、主气与辅气流量等,经过对工艺参数与涂层性能初步探索和综合考量,优选电压 U 、电流 I 和喷涂距离 d 这 3 个参数作为试验因素,相应的显微硬度和孔隙率作为响应。

因此,设计三因素三水平(见表1)的响应曲面试验对工艺参数进行优化。使用 Design-Expert 软件设计试验,设计试验数为 15 组。大气等离子喷涂时其

表 1 响应曲面试验因素及水平

Table 1 Response surface experiment factor and level

编码值	因素		
	电压/V	电流/A	喷涂距离/mm
-1	60	500	100
0	70	550	110
1	80	600	120

他参数如下:送粉率 $45\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$,氩气流量 $42\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,氮气流量 $30\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

利用 FEI Sirion 200 型场发射扫描电镜(SEM)观察涂层的微观形貌,电压为 25 kV 。基于灰度法,借用 Image J 软件测定涂层的孔隙率。利用 TMVS-1 型显微硬度计测涂层的截面硬度,载荷为 3 N ,保载时间为 10 s ,测 5 个点取平均值,测试间距为 3 mm 。用 Rigaku D/MAX-2550 VB 型 X 射线衍射仪分析涂层的物相组成,采用铜靶 K_α 射线,工作电压为 40 kV ,工作电流为 100 mA ,扫描范围为 $0^\circ\sim90^\circ$,扫描速率为 $10\text{ (}^\circ\text{)}\cdot\text{min}^{-1}$ 。采用 TR200 型表面粗糙度仪对涂层的表面粗糙度进行测定。借用 WAW-600 型微机伺服万能试验机在室温下对涂层的结合强度进行测定,拉伸速度为 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,涂层试样的直径为 25 mm 。试验前用 E-7 胶将对偶件黏结在试样上,放入 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 保温箱中保温 3 h 使其固化。

2 试验结果与讨论

2.1 响应曲面分析结果

响应曲面试验结果如表 2 所示,对应的模型分析结果如表 3 所示,分别采用线性模型、两因素交互关系模型(2FI 模型)、二次和三次多项式等 4 种数学模型对试验数据进行了拟合。由表 3 可知:随着

拟合方程阶数的增加,模型确定系数 r^2 增大,表明模型拟合精度增大,但拟合方程阶数为 3 阶及以上时,由于失拟度的 p 值太高,无合适响应面生成;在线性模型、2FI 模型、二次模型中,二次模型失拟度的 p 值相对较大, r^2 较大,模型显著,故采用二次模型分析试验结果。

表 2 响应曲面试验结果

Table 2 Response surface experiment results					
序号	编码值			显微硬度/	孔隙率/
	电压	电流	喷涂距离	HV	%
1	-1	-1	0	541.1	4.32
2	1	-1	0	625.4	3.25
3	-1	1	0	488.6	5.11
4	1	1	0	476.2	5.15
5	-1	0	-1	519.8	4.73
6	1	0	-1	526.3	4.69
7	-1	0	1	425.5	5.83
8	1	0	1	540.2	4.43
9	0	-1	-1	608.6	3.56
10	0	1	-1	571.2	4.05
11	0	-1	1	595.3	3.78
12	0	1	1	509.5	4.93
13	0	0	0	532.1	4.56
14	0	0	0	548.6	4.35
15	0	0	0	512.4	4.88

表 3 试验数据的模型分析结果

Table 3 Model analysis results of test data

响应	拟合模型	r^2	失拟度参数				
			平方和	自由度	均方	F 值	p 值
显微硬度	线性模型	0.551 4	16 328.96	9	1 814.33	5.52	0.162 6
	2FI 模型	0.705 9	10 478.79	6	1 746.46	5.32	0.166 7
	二次模型	0.954 2	1 077.74	3	359.25	1.09	0.510 3
	三次模型	0.982 6	0	0			
孔隙率	线性模型	0.575 8	2.49	9	0.28	3.89	0.221 3
	2FI 模型	0.717 4	1.61	6	0.27	3.77	0.224 3
	二次模型	0.950 1	0.17	3	0.06	0.78	0.603 1
	三次模型	0.977 1	0	0			

通过对二次模型方程进行分析,最终获得显微硬度 H 和孔隙率 P 的拟合方程分别为

$$H = 3\,787.54 + 46.29U - 12.65I - 20.88d - 0.048UI + 0.27Ud - 0.33U^2 + 0.014I^2 \quad (1)$$

$$P = -69.78 - 0.15U + 0.23I + 0.26d - 0.003\,4Ud + 0.003\,5U^2 - 0.000\,2I^2 \quad (2)$$

由表 4 可知:显微硬度拟合模型的 F 值为

14.66, p 值仅为 0.001 1,模型的显著性高;模型失拟度的 F 值为 1.07, p 值仅为 0.547 5,依然不显著。由表 5 可知:孔隙率拟合模型的 F 值为 11.02, p 值仅为 0.002 3,模型的显著性高;模型失拟度的 F 值为 1.37, p 值为 0.479 0,依然不显著。由图 2 可以看出, Y_2O_3 涂层的显微硬度和孔隙率的残差分布都表现为线性特征。由图 3 可以发现,显微硬度和

孔隙率的响应数据点分布杂乱无章,无规律可循,未有明显模式和异常结构的出现,由此进一步表明模型可靠。

表 4 显微硬度拟合模型的方差分析结果

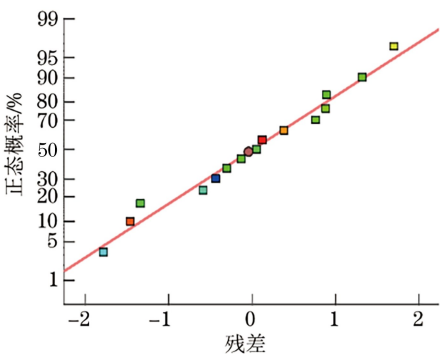
Table 4 Variance analysis results for microhardness fitted model					
变异源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值
二次模型	35 443.36	7	5 063.34	14.66	0.001 1
U	4 660.95	1	4 660.95	13.50	0.007 9
I	13 195.00	1	13 195.00	38.21	0.000 5
d	3 018.64	1	3 018.64	8.74	0.021 2
UI	2 337.72	1	2 337.72	6.77	0.005 3
Ud	2 926.81	1	2 926.81	8.48	0.022 6
U ²	4 192.80	1	4 192.80	12.14	0.010 2
I ²	4 447.09	1	4 447.09	12.88	0.008 9
残差	2 417.13	7	345.30	—	—
失拟度	1 760.20	5	352.04	1.07	0.547 5
纯误差	656.93	2	328.46	—	—
统计	37 860.48	14	—	—	—
r ²	0.936 2	调整后 r ²		0.872 3	
信噪比精度	14.653	预测 r ²		0.679 7	

表 5 孔隙率拟合模型的方差分析结果

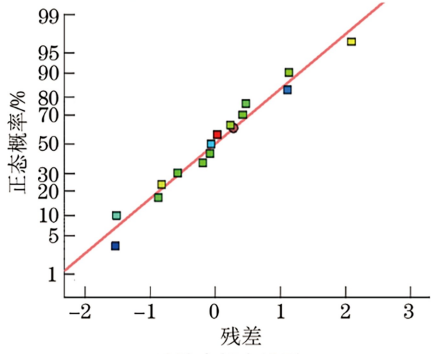
Table 5 Variance analysis results for porosity fitted model					
变异源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值
二次模型	5.48	6	0.91	11.02	0.002 3
U	0.76	1	0.76	8.36	0.020 1
I	2.34	1	2.34	25.71	0.001 0
d	0.47	1	0.47	5.16	0.042 8
Ud	0.46	1	0.46	5.07	0.034 4
U ²	0.46	1	0.46	5.06	0.034 6
I ²	0.88	1	0.88	9.63	0.014 4
残差	0.73	8	0.091	—	—
失拟度	0.59	6	0.098	1.37	0.479 0
纯误差	0.14	2	0.071	—	—
统计	6.21	14	—	—	—
r ²	0.882 6	调整后 r ²		0.794 5	
信噪比精度	13.193	预测 r ²		0.639 5	

2.2 试验模型的响应曲面图

由显微硬度拟合模型的方差分析结果可知,在显微硬度模型的两因素交互作用中,以电压和电流的 p 值最小, r^2 非常显著,因而其交互作用将显著影响涂层的显微硬度。利用式(1)绘制相应的响应曲面图。由图 4 可以看出:在喷涂距离相同的条件下,当电流较小(如 525 A)时,随着电压的增加,涂层的显微硬度呈增大趋势,当喷涂电流较大(如 575 A)时,呈先



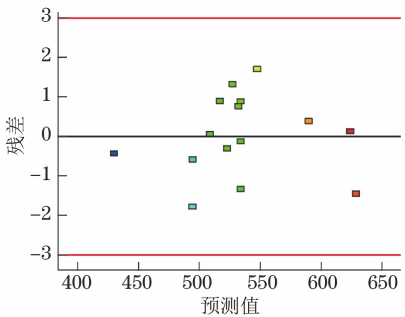
(a) 显微硬度拟合模型



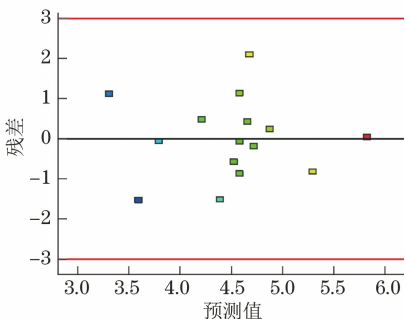
(b) 孔隙率拟合模型

图 2 显微硬度和孔隙率拟合模型的残差正态概率分布

Fig.2 Normal probability distribution of residual of microhardness (a) and porosity (b) fitted models



(a) 显微硬度拟合模型



(b) 孔隙率拟合模型

图 3 显微硬度和孔隙率拟合模型的残差与预测值的关系

Fig.3 Relationship between residuals and predicted values of microhardness (a) and porosity (b) fitted models

递增后递减的趋势;当喷涂电压较小(如 65 V)时,随着喷涂电流的增加,显微硬度呈先递减后递增的趋

势,当喷涂电压较大(如 75 V)时,呈递减趋势。由此可知,电压和电流的交互作用对涂层的显微硬度有着显著且复杂的影响。当采用大电压和小电流喷涂工艺时,制备的 Y_2O_3 涂层显微硬度高,且随喷涂距离的增加而增大,这与大气等离子喷涂的原理有关。在大气等离子喷涂时,粉末粒子的速度受喷涂电压的影响,而喷涂电流则与粉末粒子的熔融程度密切相关。当喷涂电压较大时,粉末粒子能充分加速,动能较大,因此在焰流中的停留时间较短,粒子得不到充分熔化,这导致较多未熔或半熔融粉末粒子在高动能的作

用下,以极快的速度撞击到基体表面,使得涂层内部产生较大的内应力,从而对涂层产生加工硬化效果。当喷涂电流较小时,等离子焰流中的粉末粒子熔化程度较低,同样会增加焰流中未熔和半熔融粒子的数量;当这些粒子在基体或涂层表面撞击沉积后,也会在涂层内部形成较大的内应力,从而对涂层产生加工硬化效果。随着喷涂距离的增加,经焰流加速后的粒子动能增大,加工硬化效果更趋显著,因此所制备的涂层具有更高的显微硬度^[22-24],这与文献[25-26]中的研究结果相一致。

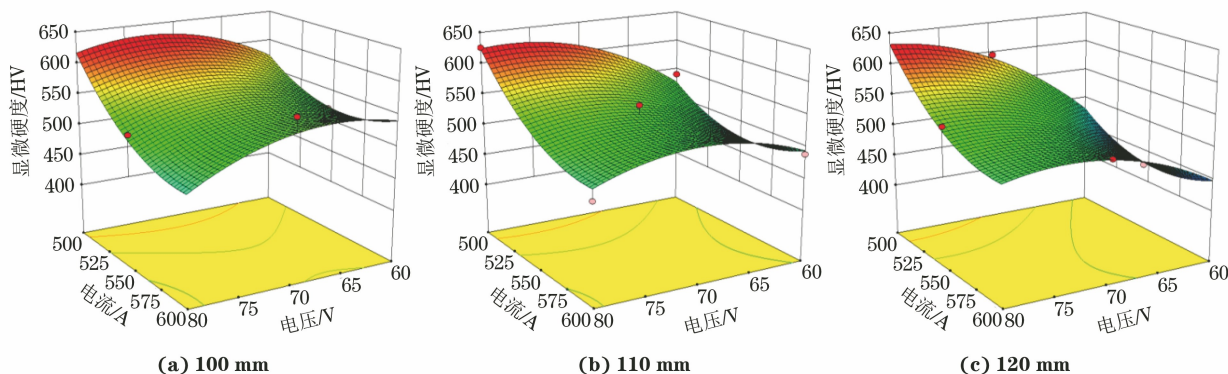


图 4 不同喷涂距离下电压、电流与涂层显微硬度之间的响应曲面图

Fig. 4 Response surface maps between voltage, current and microhardness of coating under different spraying distances

由孔隙率拟合模型的方差分析结果可知,电流的 p 值最小,说明其对涂层孔隙率的影响非常显著,而电压和喷涂距离二者乘积项的 p 值也较小,表明其交互作用也将显著影响 Y_2O_3 涂层的孔隙率。利用式(2)绘制相应的响应曲面图。由图 5 可以看出,在喷涂电流相同的条件下,电压和喷涂距离二者的交互作用对涂层的孔隙率作用显著。当喷涂距离较大(如 115 mm)时,涂层孔隙率随着电压的增加而降低,当喷涂距离较小(如 105 mm)时,则呈先减小后增大的趋势。当电压较小(如 65 V)时,涂层孔隙率随喷涂距离的减小而降低的幅度较大;当

电压较大(如 75 V)时,孔隙率随喷涂距离的减小而降低的幅度较小;当采用中等喷涂电压时,孔隙率先增后减的趋势。涂层的孔隙率随电流的增加而增大。可知,当采取中等喷涂电压和小喷涂距离工艺时,孔隙率较低。适当的喷涂电压可使等离子射流中的粉末粒子获取足够的动能,一定数量的充分熔化的粉末粒子在高动能的作用下,快速撞击基体或涂层表面,并能够较为充分地在其表面铺展,从而形成致密、孔隙率较低的涂层^[27-30]。

2.3 试验验证与工艺优化

经预测,优化工艺为喷涂电压 78 V、喷涂电流

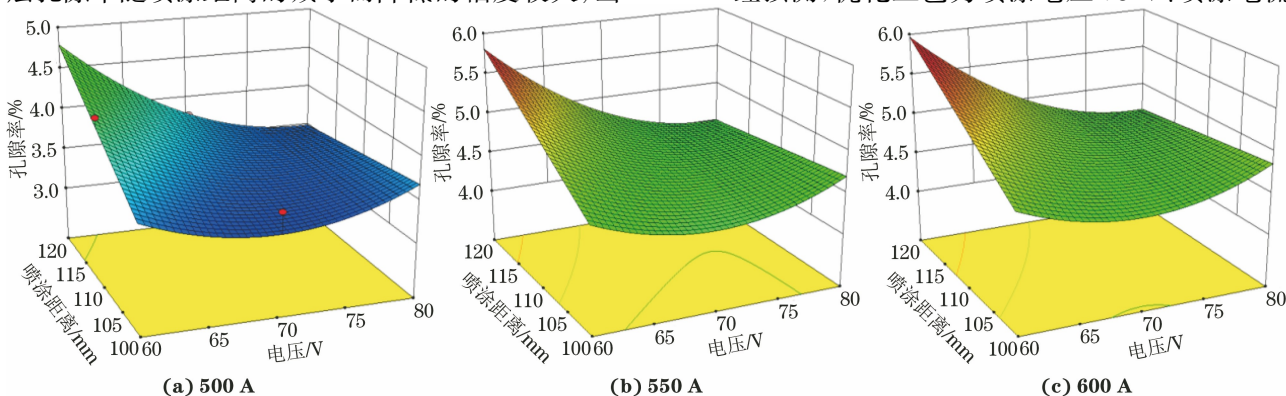


图 5 不同电流下电压、喷涂距离与涂层孔隙率之间的响应曲面图

Fig. 5 Response surfaces maps between voltage, spraying distance and porosity of coating under different currents

500 A、喷涂距离 120 mm,此时所制备的 Y_2O_3 涂层的显微硬度最高,孔隙率最低,分别为 633.28 HV 和 3.22%。试验测得采用优化工艺制备涂层的显微硬度为 645.68 HV,孔隙率为 3.18%。显微硬度和孔隙率预测结果与试验结果之间的相对误差分别为 1.92%和 1.26%,表明该优化模型可靠。

由图 6 可知,优化工艺下粉末粒子熔化较为完全,与基体接触后能够充分铺展,使涂层表面呈现出光滑平面,同时表面还存在部分小颗粒,这可能是由于粉末粒子熔化后,在与基体接触之前发生凝固并沉积到涂层中。经测定,涂层表面粗糙度 R_a 为

5.733 μm 。涂层与基体之间无明显间隙,二者呈机械嵌合,致密度高,这有利于提高涂层与基体间的结合性能;涂层中有少许孔隙,部分呈现扁平状,且分布较均匀。一定数量孔隙的存在可以释放涂层内部残余应力,提高涂层韧性,改善其综合性能。经测定,涂层的结合强度可达 25.6 MPa。涂层中的 Y_2O_3 晶型结构基本未发生变化,以立方结构为主,同时含有极少量的单斜结构,这是由于粉末粒子经高温加热熔化后,少量粒子由立方相转变为单斜相。 Y_2O_3 涂层硬度分布较均匀,其平均值为 645.68 HV。

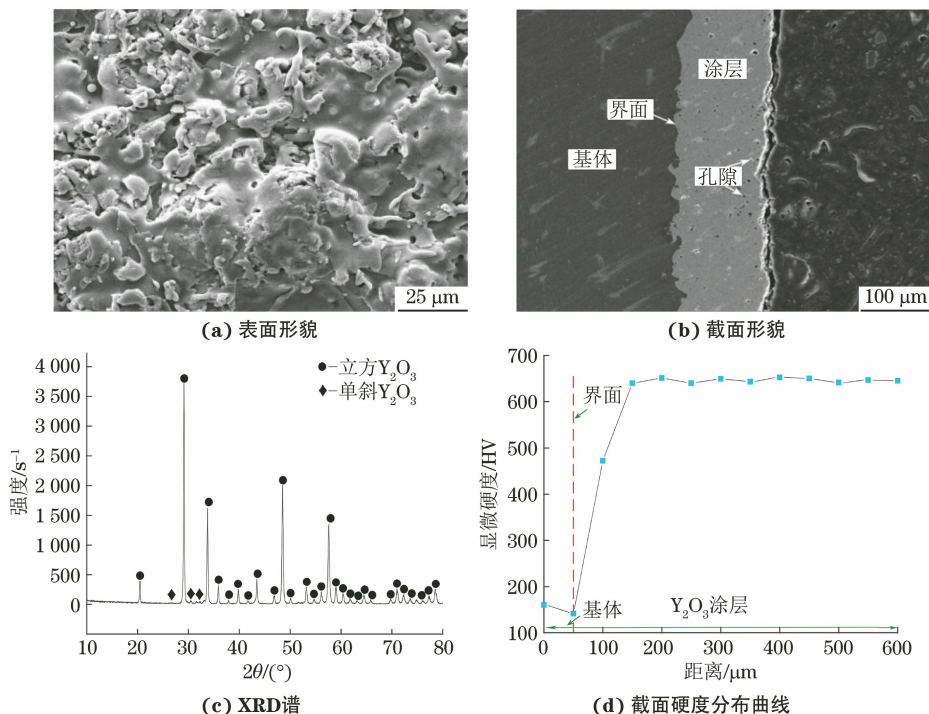


图 6 优化工艺制备涂层的微观形貌、XRD 谱与截面硬度分布曲线

Fig.6 Micromorphology (a—b), XRD pattern (c) and section hardness distribution curve (d) of coating prepared under optimal process:

(a) surface morphology and (b) section morphology

3 结论

(1) 以自制的高纯 Y_2O_3 粉末为原料,采用大气等离子喷涂技术制备 Y_2O_3 涂层,基于响应曲面法建立了涂层显微硬度和孔隙率的二次数学模型;通过建立响应曲面图,得出喷涂电压、电流与喷涂距离及其交互作用均对涂层的显微硬度与孔隙率具有显著的影响。当采用大电压和小电流喷涂工艺时,涂层显微硬度较高,且随喷涂距离的增加而增大;当采取中等喷涂电压和小喷涂距离工艺时,孔隙率较低。

(2) 预测得到优化工艺为喷涂电压 78 V、喷涂电流 500 A、喷涂距离 120 mm,预测得到的涂层显微硬度和孔隙率分别为 633.28 HV 和 3.22%,试

验结果分别为 645.68 HV 和 3.18%,预测结果与试验结果的相对误差分别为 1.92%和 1.26%,这验证了模型的可靠性。优化工艺下涂层的表面粗糙度 R_a 为 5.733 μm ,与基体间为机械嵌合,结合强度可达 25.6 MPa, Y_2O_3 晶型结构基本未发生变化,仍以立方结构为主,还含有少量单斜结构。

参考文献:

- [1] ORJI N G, OBENG Y S, BEITIA C, et al. International roadmap for devices and systems 2017 edition executive summary[M]. New Jersey: Wiley IEEE Press, 2018.
- [2] VAN ROOSMALEN A J, BAGGERMAN J A G, BRADER S J H. Dry etching for VLSI[M]. New York: Plenum Press, 1991.

- [3] DOERING R, NISHI Y. Handbook of semiconductor manufacturing technology [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [4] CHOI J H, LEE S M, NAHM S, et al. Effect of Y_2O_3 content on the microstructural characteristics and the mechanical and thermal properties of Yb-doped SiAlON ceramics[J]. Ceramics International, 2022, 48(9): 12161-12169.
- [5] TAN Y C, WANG Y, WU S H, et al. Sputtering resistance and damage mechanism of Y_2O_3 -based ceramics etching by Xe plasma [J]. Materials Today Communications, 2021, 26: 101775.
- [6] MAY G S, SPANOS C J. Fundamentals of semiconductor manufacturing and process control[M]. Piscataway, NJ: IEEE, 2006.
- [7] KATO N, MIZUNO H, IBE H, et al. Ceramic coatings prepared by plasma spraying for semiconductor production equipment [C]//International Thermal Spray Conference, Thermal Spray 2006; Proceedings from the International Thermal Spray Conference. Seattle, Washington, USA: ASM International, 2006.
- [8] KITAMURA J, IBE H, MIZUNO H, et al. Erosion properties of plasma sprayed ceramic coatings against process plasma in semiconductor production equipment [C]//International Thermal Spray Conference, Thermal Spray 2007; Proceedings from the International Thermal Spray Conference. Beijing, China: ASM International, 2007.
- [9] HOLLIS K, BARTRAM B. Plasma spray formed yttrium oxide crucibles[C]//International Thermal Spray Conference, Thermal Spray 2006; Proceedings from the International Thermal Spray Conference. Seattle, Washington, USA: ASM International, 2006.
- [10] 李全, 刘祖铭, 彭凯, 等. 机械球磨 Y_2O_3 粉末的组织结构演变 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(3): 226-231.
LI Q, LIU Z M, PENG K, et al. Microstructure evolution of Y_2O_3 powder during mechanical milling[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2019, 24(3): 226-231.
- [11] JI X J, REN X J, LI Z D, et al. Preparation of high purity yttrium powders and coatings [C]//Proceedings of the ITSC2009. Las Vegas, USA: [s. n.], 2009.
- [12] 罗小晨, 王文东, 刘邦武, 等. 氧化钇陶瓷涂层的制备及结构研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(20): 116-118.
LUO X C, WANG W D, LIU B W, et al. Study on preparation and structure of yttrium oxide ceramic coating [J]. Hot Working Technology, 2011, 40(20): 116-118.
- [13] CTIBOR P, SEDLACEK J, MUSALEK R, et al. Structure and electrical properties of yttrium oxide sprayed by plasma torches from powders and suspensions [J]. Ceramics International, 2022, 48(6): 7464-7474.
- [14] JANG B K, NAGASHIMA N, KIM S, et al. Mechanical properties and microstructure of Yb_2SiO_5 environmental barrier coatings under isothermal heat treatment[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(7): 2667-2673.
- [15] CHUN S M, PARK S M, YANG G W, et al. Improvement of the flowability of fine yttrium oxide powders by microwave oxygen plasma and evaluation of the dense coating layer[J]. Ceramics International, 2021, 47(12): 17476-17486.
- [16] 付倩倩, 通雁鹏. 基于曲面响应法的大气等离子喷涂 $La_2Ce_2O_7$ 涂层粒子特性与微观结构研究[J]. 粉末冶金技术, 2020, 38(5): 332-339.
FU Q Q, TONG Y P. Study on particle characteristics and microstructure of $La_2Ce_2O_7$ coating by atmospheric plasma spraying based on the response surface method[J]. Powder Metallurgy Technology, 2020, 38(5): 332-339.
- [17] 张斌, 张向军, 林丽, 等. 超音速等离子喷涂 Al_2O_3 涂层的绝缘性能[J]. 材料保护, 2019, 52(9): 83-87.
ZHANG B, ZHANG X J, LIN L, et al. Insulation performance of Al_2O_3 coating deposited by supersonic plasma spraying [J]. Materials Protection, 2019, 52(9): 83-87.
- [18] HARIDASAN V P, VELAYUDHAM A, KRISHNAMURTHY R. Response surface modeling and parameter optimization of detonation spraying with enhanced coating performance[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 3474-3481.
- [19] VENKATARAMANAN A R, SUBRAMANIYAN M, KUMAR S L, et al. Application of CCD in RSM to obtain optimize treatment of tribological characteristics of WC-10Co-4Cr nanoceramic thermal spray coating[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 6160-6170.
- [20] SINGH S K, CHATTOPADHYAYA S, PRAMANIK A, et al. Effect of alumina oxide nano-powder on the wear behaviour of CrN coating against cylinder liner using response surface methodology: Processing and characterizations [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 1102-1113.
- [21] SHOZIB I A, AHMAD A, RAHAMAN M S A, et al. Modelling and optimization of microhardness of electroless Ni-P- TiO_2 composite coating based on machine learning approaches and RSM[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12: 1010-1025.
- [22] 孙浩, 董昕远, 任媛, 等. 大气等离子喷涂工艺参数与粉末成分对 NiCrCuB 涂层成分、组织结构及性能的影响[J]. 热喷涂技术, 2021, 13(1): 1-12.
SUN H, DONG X Y, REN Y, et al. Influences of spray parameters and powder composition on the coating composition, microstructure and properties during atmospheric plasma spraying of NiCrCuB[J]. Thermal Spray Technology, 2021, 13(1): 1-12.
- [23] XIAO C. Study on microstructure and property of low pressure plasma sprayed MoB/CoCr gradient coatings by laser remelting[J]. Surface Technology, 2012, 41(2): 23-25.
- [24] WANG M Q, ZHOU Z H, WANG Q J, et al. Box-Behnken design to enhance the corrosion resistance of plasma sprayed Fe-based amorphous coating[J]. Results in Physics, 2019, 15: 102708.

- 49.
- HOU J G, AN X W, WU C Q, et al. Research on the impact toughness and strain aging sensitivity of steel[J]. Progress in Steel Building Structures, 2002, 4(1): 41-49.
- [14] 柳曾典. 钢的净化是压力容器安全的重要保证[J]. 机械工程材料, 1994, 18(1): 21-23.
- LIU Z D. The cleaning of steel for pressure vessel is the important guarantee of its safety[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1994, 18(1): 21-23.
- [15] 王威强, 李爱菊, 陈鹭滨, 等. 20 钢高压管脆断分析[J]. 机械强度, 2004, 26(6): 683-690.
- WANG W Q, LI A J, CHEN L B, et al. Brittle fracture analysis of 20 steel high pressure piping [J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(6): 683-690.
- [16] 董雷云, 潘缉悌, 蒋晓东, 等. 螺旋焊管脆性开裂失效分析[J]. 化工机械, 2000, 27(2): 90-94.
- DONG L Y, PAN J T, JIANG X D, et al. Failure analysis of embrittlement cracking of spirally welded tubes[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2000, 27(2): 90-94.
- [17] CUI H X, WANG W Q, LI A J, et al. Failure analysis of the brittle fracture of a thick-walled 20 steel pipe in an ammonia synthesis unit[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(6): 1359-1376.
- [18] LI A J, WANG W Q, WANG X M, et al. Fatigue and brittle fracture of carbon steel process pipeline [J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12(4): 527-536.
- [19] 郑生斌, 熊祥江, 李中平, 等. X90 级管线钢应变时效行为[J]. 金属热处理, 2016, 41(6): 27-30.
- ZHENG S B, XIONG X J, LI Z P, et al. Strain aging behavior of X90 pipeline steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(6): 27-30.
- [20] 崔好选. 临氢碳钢高压管失效分析与风险评估研究[D]. 济南: 山东大学, 2011: 47-51.
- CUI H X. Study on failure analysis and risk assessment of hydrogen-exposed carbon steel high pressure pipe[D]. Jinan: Shandong University, 2011: 47-51.
- [21] 王威强, 李梦丽, 崔好选. 通过标准规避高压钢管应变时效脆化的发生[J]. 压力容器, 2010, 27(11): 45-52.
- WANG W Q, LI M L, CUI H X. Avoiding the occurrence of high-pressure steel pipe strain aging embrittlement through the standards[J]. Pressure Vessel Technology, 2010, 27(11): 45-52.
- (上接第 51 页)
- [25] 张帆, 胡勇, 梁爱民, 等. 电压及电流对等离子喷涂 Mo 涂层微观组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(2): 84-88.
- ZHANG F, HU Y, LIANG A M, et al. Influence of current and voltage on microstructure and performance of plasma sprayed Mo coating [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(2): 84-88.
- [26] 唐万源, 姚李帆, 赵晓兵. 喷涂功率和距离对铁基非晶涂层结构和耐磨防腐性能的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(10): 51-56.
- TANG W Y, YAO L F, ZHAO X B. Effects of spraying power and distance on the microstructure, wear resistance and corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings [J]. Materials Protection, 2020, 53(10): 51-56.
- [27] 刘琛珩. 铁基非晶涂层的制备及性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- LIU C H. Study on preparation and properties of Fe-based amorphous coatings [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [28] 靳子昂, 刘明, 朱丽娜, 等. 超音速等离子转移弧喷涂铝涂层的响应曲面法工艺优化[J]. 中国表面工程, 2020, 33(3): 111-118.
- JIN Z A, LIU M, ZHU L N, et al. Process optimization of supersonic plasma transfer arc spraying aluminum coating by response surface method [J]. China Surface Engineering, 2020, 33(3): 111-118.
- [29] 刘吉磊. 铁基非晶合金涂层等离子喷涂制备工艺及其性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- LIU J L. The study on plasma spraying preparation process of iron-based amorphous alloy coating and its properties [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [30] BOLELLI G, STEDUTO D, KILAKOSKI J, et al. Tribological properties of plasma sprayed Cr_2O_3 , $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ coatings [J]. Wear, 2021, 480/481: 203931.