

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.04.011

基于响应面实验设计的电泳工艺研究

陈龙富, 罗立善, 罗竹青, 冯 鹏, 龙 浪, 袁正军, 吕尚君

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 利用响应面实验设计方法研究了电泳工艺对漆膜厚度与附着力的影响。首先, 通过实验分析, 确定电泳电压、时间和固体物质量分数为关键工艺参数, 并利用中心复合实验方法设计了3因子工艺实验, 研究了不同工艺组合对漆膜性能的影响。然后通过 minitab 软件分析测量所得漆膜厚度与附着力, 得知其 P 值小于 0.05, R^2 值大于 98%, 证明拟合曲线有效, 并得出了各因子与漆膜厚度、附着力的函数关系。拟合优化后得知, 当固体物质量分数为 21.9%、电压为 283.4 V、时间为 279 s 时, 所得漆膜的综合性能最佳, 膜厚约 26.45 μm , 附着力约 6.12 MPa。最后, 通过实验确认, 得知该工艺条件下的漆膜性能与理论值误差为 2% 左右, 且经批量生产验证, 该工艺条件下的漆膜质量稳定, 综合性能较佳。

关键词: 响应面实验设计; 电泳工艺; 漆膜厚度; 附着力

中图分类号: U466

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)04-0059-07

引文格式: 陈龙富, 罗立善, 罗竹青, 等. 基于响应面实验设计的电泳工艺研究[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(4): 59-65.

Study on Electrophoresis Technology Based on Response Surface Analysis Design

CHEN Longfu, LUO Lishan, LUO Zhuqing, FENG Peng, LONG Lang, YUAN Zhengjun, LÜ Shangjun
(CRRC Times Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A research has been conducted on the effect of electrophoretic technology on the thickness and adhesion of electrophoretic paint film by using the response surface method. The electrophoretic voltage, time and solid mass fraction have been determined as the key parameters based on experimental analysis. By adopting the central composite experiment method, a three-factor process experiment has thus been designed, followed by a study on the effects of different process combinations on the properties of paint film. Then the film thickness and adhesion can be measured by a minitab analysis, with a P value being less than 0.05 and R^2 value more than 98%, thus verifying the validity of the fitting curve, with the functional relationship between each factor and film thickness and adhesion finally obtained. The results show that, with the solid fraction being 21.9%, the voltage 283.4 V and the time 279 s, the film, with a thickness of about 26.45 μm , and an adhesion of about 6.12 MPa, exhibits the best comprehensive performance. Finally, the experiment confirms that the error between the film performance and theoretical value is about 2%, and the stability of the film quality with its optimized comprehensive performance can be verified by the batch production.

Keywords: response surface methodology; electrophoretic technology; paint thickness; adhesion

收稿日期: 2019-02-20

作者简介: 陈龙富(1981-), 男, 湖南浏阳人, 中车时代电动汽车股份有限公司经济师, MBA, 主要从事汽车制造与企业管理方面的研究, E-mail: chenglif@csrzc.com

通信作者: 罗立善(1985-), 男, 湖南娄底人, 中车时代电动汽车股份有限公司工程师, 硕士, 主要从事汽车制造与精益方面的研究, E-mail: 281667046@qq.com

1 研究背景

响应面实验设计(response surface methodology, RSM)是由统计学家 Box 和 Wilson 在 19 世纪 50 年代提出的,其通过实验拟合因子(自变量)与响应值(因变量)之间的函数关系,并通过绘制响应面图分析两者之间的关系。该方法适用于解决非线性数据模型,与正交法相比,响应面设计获得的模型是连续的,可对实验范围内的所有水平进行分析,而正交法是不连续的。响应面设计的因子数为 2~7 个,但因所有因素均为计量值数据,且实验区域接近最优区域,因此,响应面设计法不适用于影响因子较多的因子筛选实验,且如果工艺范围或实验点选取不合适,可能无法得出预期结果。

较多科研工作者将响应面实验设计方法应用于配方、工艺研究中,如王国建等^[1]将响应面实验设计方法应用于涂料配方研究中,通过设计实验与建模分析,绘制了响应面与等高线图,直观地分析了各组分对材料性能的影响及其相互作用,得出了最佳配比组合,并通过实验确认,提高了涂料的性能。姚晓蕾等^[2]采用响应面实验设计与中心组合设计的方法,对超氧化物歧化酶提取工艺进行了优化设计,通过建模,分析了各因素与性能的关系与影响规律,得出了最佳的工艺组合方案。

电泳是汽车行业优先选择的底涂方案,与其它涂装工艺相比,其存在如下优点:内腔、焊缝、死角等处均能够形成附着良好的涂膜,产品耐盐雾实验高达 1 000 h 以上^[3-5]。电泳漆是由胺改性的环氧树脂、被封闭的异氰酸酯和助剂等组成的水性涂料,电泳过程中伴随着电解、电泳、电沉积、电渗等 4 种电化学、物理现象。电泳涂层经过高温烘烤,环氧树脂的羟基会与异氰酸酯发生交联反应,形成致密的漆膜。随着生产的进行,电泳槽液中有效成份的比例逐渐下降,工艺参数均会随之变动,对产品质量有着明显的影响。因此,需要对电泳的关键工艺参数设定合理的控制范围,并定期进行检测,当电泳槽液中有效成份到达下限时及时进行调整^[6-7]。

为了得到电泳工艺与漆膜性能之间的关系,刘宏涛^[8]研究了电泳工艺对车身漆膜防腐性能的影响。随着生产的进行,得出了各种参数的变化趋势以及各参数对漆膜的影响规律。其还研究了对漆膜性能的评价参数,并且进行了仿真研究,直观地了解漆膜性能,通过对车身的解剖研究,得知了各种缺陷漆膜产生的原因。

张佳朋等^[9]采用正交试验法研究了电泳时间、

固体物质量分数、温度、电压等工艺参数对泳透力与漆膜厚度的影响,寻找其影响规律,得出了最佳的工艺参数组合。

李再峰等^[10]研究了电泳电压、时间、温度、电流密度和溶液 pH 值对漆膜性能的影响,得出了各工艺参数对漆膜性能影响的规律,并得到了最佳的工艺组合,且验证了在最佳工艺组合条件下制备的漆膜性能较为理想。

以上研究虽然均得出了工艺参数对性能的影响规律,但是未充分考虑随机误差,无法建立连续的模型,工艺设计人员无法直观地发现其影响规律,而利用响应面试验方法研究电泳工艺对漆膜性能的影响方面的报道尚未发现。因此,本文拟利用响应面实验设计方法研究电泳工艺对漆膜性能的影响,以期得出最佳的电泳工艺参数,从而指导生产,制订合理的工艺参数与性能指标。

本研究首先通过选择合适的响应面实验设计方法,分析电泳工艺中的关键影响因素,进而选择其工艺参数,并且确定各因素相应的高低水平。根据各因素的重要程度选择主要的评价指标,并以其进行实验设计和安排。然后利用 minitab 软件进行响应回归分析,以多元二次回归方程拟合电泳工艺参数与漆膜性能的函数关系,并且分析模型的有效性,观察其影响规律。通过优化分析,得出最佳的工艺组合。最后,通过实验与批量生产,验证最佳工艺组合条件下生产的漆膜性能的稳定性与可靠性。

2 实验设计

2.1 原料与设备

主要原料:环氧树脂电泳漆,上海金力泰化工股份有限公司。

主要设备:阴极电泳槽,河南平原智能装备股份有限公司;漆膜测厚仪,QNix;电子拉力实验仪,DeFelsko。

2.2 试样制备与性能测试

1) 试样的制备。首先,将 2 mm 厚的镀锌板裁剪成尺寸为 90 mm × 45 mm 的方板;然后,将镀锌板进行脱脂、磷化、电泳处理,并将处理后的镀锌板在 180 ℃ 条件下烘烤 50 min;接下来,测量在室温下静置 24 h 后的钢板漆膜厚度。最后,将 20 mm 试柱与样板用结构胶粘接,放置 24 h 以上备用。

2) 性能测试。本研究中选用漆膜测厚仪,按照 GB/T 13452.2—2008 5.5(磁性法)中的相关要求测量镀锌板漆膜厚度;用电子拉力实验仪,按照 GB/T 5210—2006 中 9.4.3(试柱法)的相关要求测试镀锌

板漆膜的附着力。

2.3 电泳实验方案设计

2.3.1 试验模型的确定

电泳工艺实验符合响应面设计的基本条件,该方法也正好满足寻找最佳工艺组合的要求。为了实现实验的序贯性,本文采用响应面经典方法——中心复合实验设计(central composite design, CCD)进行3因子试验,其试验模型如图1所示,图中1号圆圈代表中心点,2号圆圈代表立方点,3号圆圈代表轴向点, $\alpha=2^{k/4}$, k 为因子数。

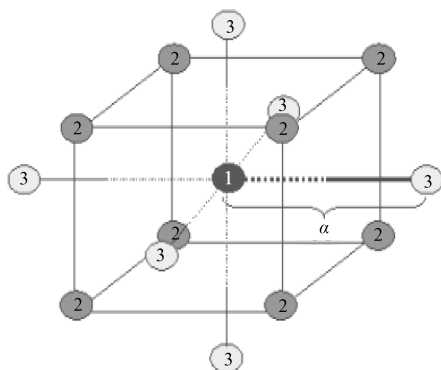


图1 3因子试验模型示意图

Fig. 1 Three-factor test model schematic diagram

图1所示3因子试验模型中,以 x 轴、 y 轴、 z 轴分别代表3个因子的不同水平,正方向表示该因子的高水平,负方向代表该因子的低水平,原点为中心水平,轴向点代表 α 水平, α 的值按照 $\alpha=2^{k/4}$ 公式进行确定。

2.3.2 工艺参数的选择

影响电泳涂层质量的工艺参数较多,主要有固体物质量分数、pH值、MEQ (milli-equivalents per liter) 值、电导率、时间、电压等。固体物质量分数反映了电泳漆及槽液等溶液中成膜物质和部分高沸点助剂等组份的量,它是相对溶液质量的百分比。阴极电泳漆树脂分子上带有胺碱性基团,通过与有机酸或无机酸中和形成盐,具有一定的水溶性。pH值和MEQ值这两个参数从不同角度反映了酸量的多少。pH值反映的是游离酸量,控制适量的游离酸可保证体系的稳定,MEQ值反映的是总酸量,它表明了树脂的中和程度,是相对成膜物质或树脂的量。电导率反映电泳漆的泳透力,时间为电压施加时间,电压是指施加电压的大小。

为了研究各参数对电泳效果的影响,对车身施加稳定的280 V电压,其它按电泳漆厂家提供的参数进行电泳,观察电泳电流随时间变化的趋势,所得结果如图2所示。

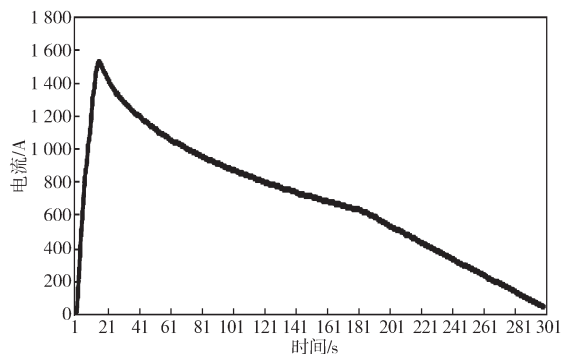


图2 电泳电流与时间关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between electrophoretic currents and time

从图2可以看出,在恒定电泳电压不变,且认定其它参数在短时间内均无变化的情况下,随着时间的推移,通电后的电流迅速增加,达到峰值后又逐渐降低,说明车身电阻越来越大。出现这一现象的原因,可能是漆膜涂层越来越厚,形成了绝缘层,导致其电阻增加,电流逐渐降低。根据以上分析,确认电压与时间是电泳的关键因素,且因固体物质量分数是电泳液中的有效成份比例,是材料的关键指标,因此,本文选取电压、时间、固体物质量分数3个因子为电泳实验参数^[8]。

2.3.3 工艺水平的确定

正负极间的电压即为电泳电压。电泳电压过高时,会出现漆膜针孔、粗糙、脱落,甚至击穿等问题;电压过低时,会导致漆膜厚度偏低,泳透力下降等问题。根据行业经验与厂家建议,电泳电压一般应控制在230~300 V,故本研究确定电泳电压的低水平为240 V,中心水平为260 V,高水平为280 V, $-\alpha$ 、 $+\alpha$ 分别为227.3 V和292.7 V。

施加电压的时间太短,则得到的漆膜太薄;时间过长,虽然漆膜厚度基本不再增加,但漆膜会变粗。电泳时间一般取3~5 min,从图2可以看出,5 min以后,电泳电流基本降低为0。故本文确定电泳时间的低水平为200 s,中心水平为230 s,高水平为260 s, $-\alpha$ 、 $+\alpha$ 分别为181.0 s和279.0 s。

若固体物质量分数偏低,则会出现漆膜厚度偏低、桔皮、泳透力偏低等问题;而固体物质量分数偏高,则会出现二次流痕、回收率下降等问题,根据行业经验和电泳漆厂家建议,一般应将其控制在15%~25%。因此,本实验选择固体物质量分数的低水平为17%,中心水平为20%,高水平为23%, $-\alpha$ 、 $+\alpha$ 分别为15.1%和24.9%^[9]。

2.3.4 评价参数的选择

电泳漆膜的主要作用是防腐,一般用其耐盐雾性

能进行评价,而漆膜的厚度与附着力是影响其耐盐雾性能的关键参数,且与工艺参数的关联较大。因此,本实验选择漆膜厚度、附着力作为评价漆膜质量的参数^[8,11]。

2.4 响应面工艺实验设计

本研究通过 minitab 软件进行 3 因子实验设计,选择中心复合试验方法,实施的电泳工艺设计情况见表 1。

表 1 电泳工艺实验设计表
Table 1 Design table of electrophoresis technology experiments

序号	电压 /V	时间 /s	固体物质量分数 /%
1	260	230	20
2	240	260	23
3	240	200	17
4	280	260	17
5	260	230	20
6	260	230	20
7	240	200	23
8	280	200	17
9	260	230	20
10	240	260	17
11	280	200	23
12	280	260	23
13	260	279	20
14	260	230	25
15	260	230	20
16	227	230	20
17	293	230	20
18	260	181	20
19	260	230	15
20	260	230	20

表 1 中分别选择了电压、时间、固体物质量分数为工艺参数,按照设计,确定了 $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$ 共 5 个水平,确定了 8 个立方点,6 个轴向点。为了降低随机误差,设计的 6 个中心点均匀分布实施,共 20 个实验,按照表中的实施顺序和设计的电压、时间、固体物质量分数分别进行实验。

3 结果分析与讨论

通过前文的实验设计,按照国标中的相关要求进行检测,检测到的 20 个实验漆膜的厚度和附着力数据列于表 2。

由表 2 所示的漆膜厚度和附着力数据可以得知,不同工艺条件下,漆膜厚度和附着力数据差异较大,说明工艺参数对漆膜厚度与附着力的影响较为显著。为了得到具体的工艺参数对漆膜厚度与附着力影响关系,需要对数据进行建模,并进行方差分析,以研究模型的有效性。模型有效时,再进行响应面分析,

确定工艺参数与产品性能间的关系,综合分析得出其优化图。

表 2 漆膜厚度与附着力检测数据
Table 2 Date of paint thickness and adhesion

序号	漆膜厚度 / μm	附着力 / MPa	序号	漆膜厚度 / μm	附着力 / MPa
1	24.0	5.5	11	21.0	5.5
2	22.5	4.8	12	26.0	5.9
3	18.2	4.6	13	24.1	5.6
4	24.5	5.8	14	23.5	5.2
5	24.0	5.4	15	23.5	5.4
6	24.0	5.4	16	18.0	4.5
7	18.6	4.7	17	24.5	6.0
8	21.0	5.4	18	19.5	5.4
9	24.0	5.5	19	20.9	5.2
10	19.3	4.7	20	24.0	5.5

3.1 漆膜厚度分析

3.1.1 回归方程模型

以漆膜厚度为响应值,利用 minitab 软件进行响应面回归分析,经拟合后的二次多项式回归方程为

$$Y=23.921\ 5+1.838\ 6X_1+1.575\ 9X_2+0.700\ 9X_3-1.021\ 1X_1^2-0.814\ 9X_2^2-0.664\ 9X_3^2+0.437\ 5X_1X_2-0.262\ 5X_2X_3+0.537\ 5X_1X_3\quad (1)$$

式中: X_1 为电压; X_2 为时间; X_3 为固体物质量分数。

对式(1)所示的漆膜厚度回归方程模型进行方差分析,所得结果见表 3。表 3 中,Seq SS 为顺序偏差平方和,Adj SS 为调整后的偏差平方和,Adj MS 为调整后的均方, F 值是统计量, P 值为显著性概率, S 为方差,PRESS 为预测误差平方和, R -Sq 为测定系数。

表 3 漆膜厚度模型方差分析结果表

Table 3 Variance analysis results of paint thickness model

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
回归项	9	114.131	114.131 1	12.680 0	116.69	0.000
线性	3	84.735	84.734 7	28.240 0	259.90	0.000
平方	3	25.003	25.002 6	8.330 0	76.69	0.000
交互作用	3	4.394	4.393 8	1.464 6	13.48	0.001
残差误差	9	0.978	0.978 1	0.108 7		
失拟	5	0.853	0.853 1	0.170 6	5.46	0.063
纯误差	4	0.125	0.125 0	0.031 3		

合计 9 115.110

$S=0.329\ 661$ PRESS=8.745 58

R -Sq = 99.15% R -Sq(预测) = 92.40% R -Sq(调整) = 98.21%

从表 3 中可以看出,回归项、线性、平方、交互作用的 P 值均小于 0.01,说明各项均显著有效。失拟 P 值为 0.063,大于 0.05,说明给出的二次多项式回归模型正确,调整后的 R -Sq 为 98.21%,说明其回归效果很好。通过残差分析,可以得知数据随机分布,基本呈正态分布,无异常,因此可判定得到的回归模

型是有效的。

3.1.2 曲面图

图3所示为分别保持电压为260 V、固体物质量分数为20%、电泳时间为230 min条件下, 所得到的漆膜厚度曲面图。

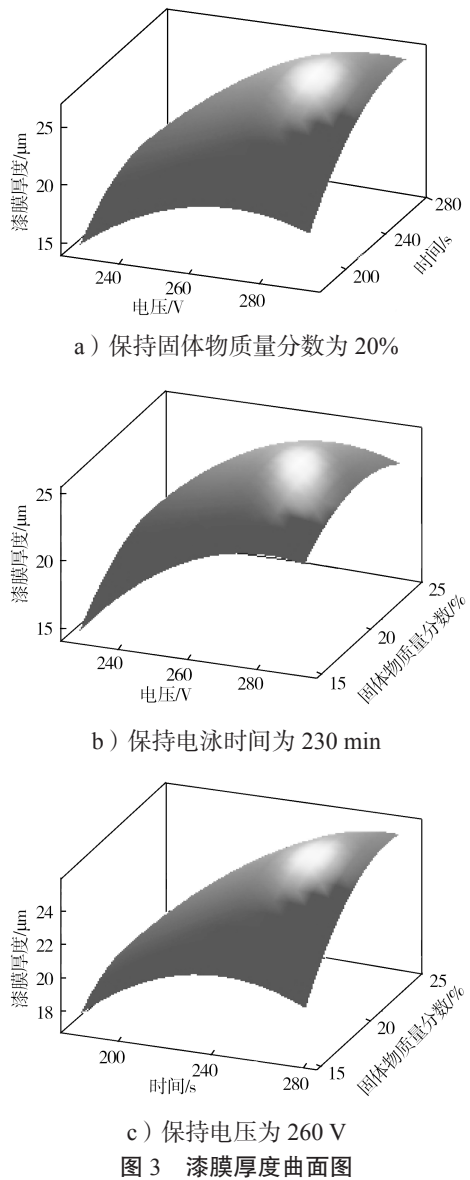


Fig. 3 Surface diagram of paint thickness

从式(1)所示的漆膜厚度回归方程与图3所示的漆膜厚度曲面图可以得知: 随着电泳电压、时间和固体物质量分数的增加, 得到的漆膜厚度均增加; 但达一定程度后, 其增加幅度变缓; 此后继续增加时, 漆膜厚度基本无变化。

曲面变化越陡, 表明影响越显著, 选定3个因素的影响大小依次为电压、时间、固体物质量分数。这是由于电压越大, 产生的电流越大, 带正电荷的涂料粒子更多地沉积在金属表面, 并且随着时间的延长, 漆膜沉积形成的绝缘层导致电阻增加。高电压产生

持久的电流, 时间越长, 沉积的涂层越厚。固体物质量分数与漆膜厚度也呈正相关, 但因槽液在循环, 其能及时得到补充, 因此在实验设置的比例范围内, 基本上不存在有效成份不足的情况, 因而对漆膜厚度的影响较小。

3.2 附着力分析

3.2.1 回归方程模型

以附着力为响应值, 利用minitab软件进行响应面回归分析, 经拟合后的二次多项式回归方程为

$$Y=5.466\ 03+0.468\ 71X_1+0.099\ 49X_2+0.03X_3-0.103\ 85X_1^2-0.010\ 1X_2^2-0.122\ 6X_3^2+0.075X_1X_2-0X_2X_3+0X_1X_3。(2)$$

对漆膜厚度的回归方程模型进行方差分析, 所得结果见表4。

表4 附着力模型方差分析结果表

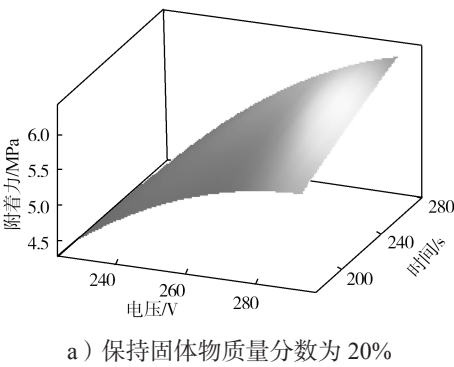
Table 4 Variance analysis results of adhesion model						
来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
回归项	9	3.437 04	3.437 04	0.381 89	69.26	0.000
线性	3	3.073 20	3.073 20	1.024 40	185.80	0.000
平方	3	0.318 85	0.318 85	0.106 28	19.28	0.000
交互作用	3	0.045 00	0.045 00	0.015 00	2.72	0.107
残差误差	9	0.049 62	0.049 62	0.005 51		
失拟	5	0.034 62	0.034 62	0.006 92	1.85	0.286
纯误差	4	0.015 00	0.015 00	0.003 75		
合计	19	0.520 00				

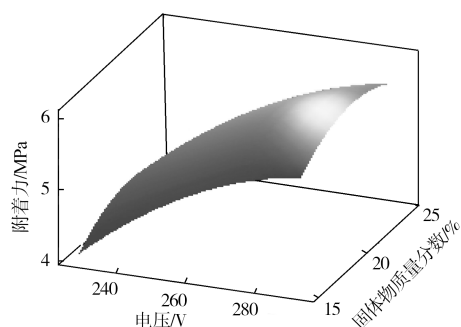
$S=0.074\ 253\ 6$ $PRESS=0.302\ 499$
 $R-Sq=98.59\%$ $R-Sq(\text{预测})=91.41\%$ $R-Sq(\text{调整})=97.02\%$

从表4中可以得出, 回归项、线性、平方的P值均小于0.05, 说明其均显著有效, 失拟P值为0.286, 大于0.05, 说明二次多项式回归模型正确; 调整后的R-Sq为97.02%, 说明其回归效果很好; 通过残差分析, 数据随机呈正态分布, 无异常, 因此可判定该回归模型有效。

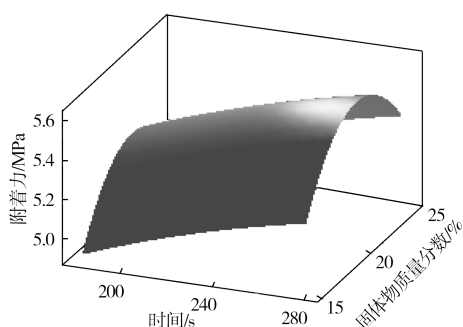
3.2.2 曲面图

图4所示为分别保持电压为260 V、固体物质量分数为20%、电泳时间为230 min条件下, 所得到的漆膜附着力曲面图。





b) 保持电泳时间为 230 min



c) 保持电压为 260 V

图4 漆膜附着力曲面图

Fig. 4 Surface diagram of adhesion

从式(2)所示的漆膜附着力回归方程与图4所示的漆膜附着力曲面图可以得出:随着电泳电压、电泳时间以及固体物质量分数的增加,漆膜的附着力均增大;当漆膜的附着力增加到达一定程度后,其增加幅度变缓或下降。曲面的变化趋势越明显,表明其影响越显著,选定的3个因素对漆膜附着力影响大小依次为电泳电压、电泳时间、固体物质量分数。这是由于电泳电压越大,带正电荷的涂料粒子更容易渗入金属底材或者磷化膜中,部分粒子间可以形成化学键,因而有利于漆膜附着力的提高。并且电泳时间越长,漆膜内部越密实,形成化学键的比例越高,效果越明显。而漆膜中固体物质量分数与漆膜的附着力基本呈正相关,但是影响不大,这是因为槽液中有效成份充足,化学键结合的概率差不多,导致对附着力的影响较小。

3.3 优化图

实际生产过程中,需要同时考虑多个性能参数的影响,因此将漆膜厚度与附着力进行综合考虑,假设二者的权重与重要度一致,且结果越大越好,通过拟合,得到如图5所示的优化图。从图5中可以看出,当电泳电压约为283.4 V,电泳时间为279 s,固体物质量分数为21.9%时,漆膜的综合性能最佳,且此条件下生产的漆膜厚度约为26.45 μm ,附着力约为6.12 MPa。

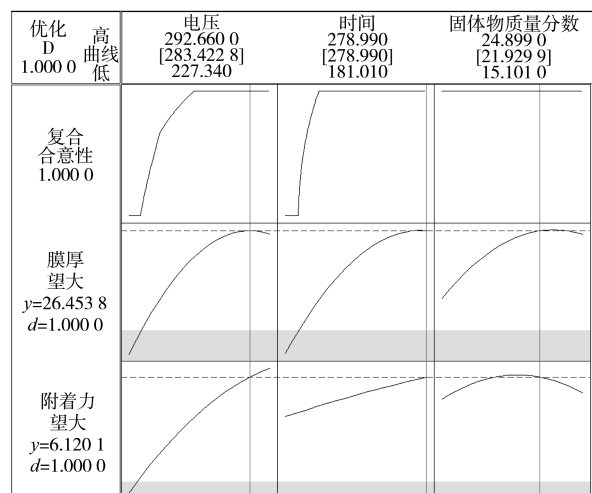


图5 漆膜厚度与附着力优化图

Fig. 5 Optimization chart of paint thickness and adhesion

3.4 实验验证

按拟合的最佳工艺进行实验验证,将得到的实验数据与拟合数据对比,具体的数据见表5。

表5 最佳工艺实验验证结果表

Table 5 Verification results of optimum process experiments

项目	电压 / V	时间 / s	固体物质量分数 / %	漆膜厚度 / μm	附着力 / MPa
拟合数据	283.4	279	21.9	26.45	6.12
实验数据	283.0	279	21.8	25.90	6.24
差异	-0.4	0	-0.1	-0.55	0.12
差异比例	-0.14%	0	-0.45%	-2.08%	1.96%

分析表5中的数据可知,实验数据与拟合数据间的差异较小,说明结论的可靠性较好。

更新工艺参数后,每天随车制作一个样板,进行漆膜附着力测试,共收集了25个数据进行统计分析。统计分析结果表明,样板漆膜的附着力均大于5 MPa,满足技术要求,其过程能力指数 C_{pk} 为1.78,过程控制能力较好。

4 结论

本文通过实验分析电泳的关键影响因素,选择电压、时间、固体物质量分数3个工艺参数,并选择漆膜厚度和附着力2个评价指标进行实验设计和安排。利用minitab软件进行响应面回归分析,采用多元二次回归方程拟合电泳工艺参数与漆膜性能的函数关系,并分析了模型的有效性。最后,通过优化分析,得出了最佳的工艺组合,并以实验与批量生产进行验证,确定最佳工艺组合的性能稳定性与可靠性。可得到如下结论:

1) 漆膜厚度、附着力均与电压、时间、固体物

质量分数呈正相关,其中电泳电压与时间的影响较大,固体物质量分数的影响相对较小。

2) 随着电泳电压、时间的增加,漆膜厚度与附着力迅速增加,达到一定程度后,增加趋势变缓,最后基本不变。

3) 通过响应面优化,得出了最佳的工艺组合。即当电压为 283.4 V,时间为 279 s,固体物质量分数为 21.9% 时,漆膜的综合性能最佳,此条件下漆膜厚度约为 26.45 μm ,附着力约为 6.12 MPa。

4) 通过实验确认,优化工艺条件下的漆膜性能数据与预测数据差异较小。且在该工艺条件下批量生产,所制备漆膜的附着力均大于 5 MPa, C_{pk} 为 1.78,证明该条件下的漆膜性能较好,数据较稳定。

参考文献:

- [1] 王国建,王宜龙. 钢结构防火涂料配方的响应面法优化[J]. 化工学报, 2012, 63(3): 978-984.
WANG Guojian, WANG Yilong. Optimization of Additives of Intumescent Fire Resistant Coating for Steel Structure by Response Surface Methodology[J]. CIESC Journal, 2012, 63(3): 978-984.
- [2] 姚晓蕾,熊双丽,张晓娟. 响应面法优化猪血超氧化物歧化酶的提取工艺[J]. 现代食品科技, 2014, 30(2): 223-227.
YAO Xiaolei, XIONG Shuangli, ZHANG Xiaojuan. Extraction of Superoxide Dismutase from Porcine Blood by Response Surface Methodology[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(2): 223-227.
- [3] 臧昶. 天津一汽夏利涂装前处理及电泳工艺管理[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
ZANG Chang. Managenment of Pretreatment and Electrophoresis Coating in Tianjin Faw Xiali Co. Ltd. [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [4] 王锡春. 我国汽车车身涂装 15 年来的技术进步及其展望[J]. 涂料工业, 2000, 30(4): 23-29.
WANG Xichun. Technological Progress and Perspective of Car Body Painting in the Last 15 Years in China[J]. Paint & Coatings Industry, 2000, 30(4): 23-29.
- [5] 郭晓霞,纪长鑫. 汽车底盘的阴极电泳涂装[J]. 现代汽车零部件, 2010(7): 38-40.
GUO Xiaoxia, JI Changxin. Cathodic Electrophoretic Coating of Automotive Chassis[J]. Modern Components, 2010(7): 38-40.
- [6] 陆刚. 现代汽车涂装防腐技术的应用与发展[J]. 现代涂料与涂装, 2006, 9(4): 32-36.
LU Gang. Application and Development of Anticorrosive Technologies for Modern Automobiles[J]. Modern Paint & Finishing, 2006, 9(4): 32-36.
- [7] 孙玉兵. SE 与车身涂装[J]. 现代涂料与涂装, 2009, 12(11): 57-60.
SUN Yubing. SE and Automotive Finishing[J]. Modern Paint & Finishing, 2009, 12(11): 57-60.
- [8] 刘宏涛. 电泳工艺对车身防腐的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
LIU Hongtao. Study on the Influence of Electrophoretic Process on the Corrosion of the Body[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [9] 张佳朋,郝鹏远,周晶. DOE 在电泳工艺参数设定中的应用[J]. 现代涂料与涂装, 2017, 20(4): 50-52, 55.
ZHANG Jiapeng, HAO Pengyuan, ZHOU Jing. Application of DOE in the Electrophoresis Process Parameter Setting[J]. Modern Paint and Finishing, 2017, 20(4): 50-52, 55.
- [10] 李再峰,袁定凯,孙彦余,等. 阳离子聚氨酯电泳漆电泳工艺的探讨[J]. 青岛科技大学学报, 2003, 24(增刊 1): 1-3.
LI Zaifeng, YUAN Dingkai, SUN Yanyu, et al. Study on the Electrophoretic Process for Cationic Water-Based Polyurethane Paint[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology, 2003, 24(S1): 1-3.
- [11] 聂昕,李奥,许冰,等. 车身内腔电泳膜厚的精确计算及工艺孔的影响研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(1): 144-149.
NIE Xin, LI Ao, XU Bing, et al. Precise Calculation of E-Coating Film Thickness in Vehicle Body Cavities and Research on Influence of E-Coating Holes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(1): 144-149.

(责任编辑:廖友媛)