

· 研究论文 ·

基于实验设计的卷材涂料耐候性研究

郭光彩¹ 陈强¹ 牛欠欠^{2*}

(¹贝科工业涂料(上海)有限公司 上海 201613)

(²东华大学材料科学与工程学院 先进纤维材料全国重点实验室 上海 201620)

摘要 为了解决卷材涂料耐候性配方优化依赖经验试错及多因素交互作用不明确等行业痛点,采用实验设计(DOE)方法,借助Minitab统计分析软件,通过紫外荧光老化试验进行加速老化测试,表征漆膜老化前后的色差和保光率,系统考察了颜基比和高耐候树脂混拼比例这两个关键因子对涂料老化性能的影响.结果表明,颜基比、高耐候树脂混拼比例及其交互作用是涂层老化性能的极显著影响因素;在此基础上,模型进一步揭示了上述因子和老化性能之间的响应规律.本工作量化了颜基比与混拼高耐候树脂比例之间的协同作用效果,证实了DOE方法在卷材涂料配方研发中的可行性与有效性,为该类材料的性能优化提供了新思路.

关键词 卷材涂料; 耐候性; 实验设计; Minitab; 紫外荧光老化试验

引用: 郭光彩, 陈强, 牛欠欠. 基于实验设计的卷材涂料耐候性研究. 高分子学报, doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26057.

Citation: Guo, G. C.; Chen, Q.; Niu, Q. Q. Study on durability of coil coatings based on design of experiments. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26057.

卷材涂料作为建筑外墙、家电等领域的关键防护材料,其耐候性直接决定涂层的使用寿命.目前行业内提升卷材涂料耐候性的核心技术途径主要包括:优化颜基比(P/B)以调控漆膜致密性^[1]、筛选高耐候颜料^[2,3]、调整涂层膜厚保障防护完整性^[4]、选用高耐候树脂作为基料^[5,6]等.其中,P/B与高耐候树脂的选择是配方优化中最具调控价值的两大关键因素.现有研究已表明,P/B与耐候性能之间存在正相关关系^[1],同时高耐候聚酯树脂的引入亦可显著增强涂层的抗老化能力^[5].然而,已有研究尚未深入解决两个关键问题:首先,缺乏对上述两因素影响程度的定量表征;其次,两者在提升耐候性方面可能存在的协同效应及其交互作用仍不明确.

当前卷材涂料配方优化仍以单因素轮换和经验试错为主,存在实验批次多、周期长、无法量

化多因素交互作用等短板.实验设计(DOE)作为一种系统性的实验优化方法,已成功应用于配方优化^[7]、工艺选择^[8]、性能改善^[9,10]和产品缺陷分析^[11]等领域,其核心优势在于通过合理设计实验方案,在大幅减少实验次数的同时,精准解析多因素及交互作用对目标性能的影响.

本工作以卷材普通聚酯涂料常用色系铁青灰为研究对象,采用响应曲面法设计DOE实验,聚焦P/B和高耐候树脂混拼比例两大因子,系统研究其对卷材涂料经过紫外荧光老化试验(QUVB)后保光率(GR)与色差(ΔE)的影响规律.

1 实验部分

1.1 实验原料与设备

底漆(聚氨酯无铬底漆)、色浆、聚酯树脂A(普通耐候级别,固含量65%)和聚酯树脂B(高耐

2026-02-28收稿, 2026-04-21录用, 网络出版.

* 通信联系人, E-mail: nqq@dhu.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26057; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7606

候级别, 固含量 65%) 来自贝科工业涂料(上海)有限公司; 氨基树脂(三聚氰胺, 固含量 98%) 来自湛新树脂(中国)有限公司; 酸催化剂(二壬基萘磺酸) 来自美国金氏工业公司; 钛白粉(金红石型二氧化钛) 来自四川龙蟒集团有限公司; 铁黑来自国泰颜料(中国)有限公司; 分散助剂(聚氨酯分散剂和高分子量共聚物分散剂) 来自毕克助剂(上海)有限公司; 流平助剂(聚丙烯酸酯) 来自上海锦联日化科技有限公司; 消光粉(二氧化硅消光粉) 来自广州凌玮科技股份有限公司; 溶剂(S100 溶剂油、丙二醇甲醚醋酸酯、DBE 二元酸二甲酯) 来自江苏华伦化工有限公司。

高速搅拌机: 上海现代环境工程技术股份有限公司; 高温烘箱: 韩国太成有限公司; 线棒: 翁开尔(上海)国际贸易有限公司; 色差仪: ERX31, 爱色丽(上海)色彩科技有限公司; 紫外荧光老化试验箱(QUVB): 美国 Q-Lab 公司; BYK 光泽仪: 毕克助剂(上海)有限公司。

1.2 实验方法

在 1 L 铁罐中按配方比例加入部分聚酯树脂、铁黑、钛白粉、分散剂及适量溶剂, 搅拌均匀后, 加入直径为 1~1.2 mm 的玻璃珠(加入量为浆料体系质量的 1 倍), 转移至振荡机中研磨, 直至浆料细度小于 10 μm 。过滤除去玻璃珠, 得到砂磨浆。向其中加入剩余聚酯树脂、氨基树脂、催化剂、流平剂及适量溶剂, 搅拌均匀, 最后用色浆调色, 制得铁青灰湿油面漆。

选用 0.5 mm 厚的宝钢高铝锌铝镁基材, 采用双涂层工艺进行涂装。首先使用 10# 线棒将底漆均匀刮涂于基材表面, 在板温 224~232 $^{\circ}\text{C}$ 下烘烤 24 s 使其固化, 干膜厚度为 5 μm ; 随后采用相同方法, 用 24# 线棒在固化后的底漆上涂布面漆, 制得干膜厚度为 15 μm 的面漆。

1.3 测试方法

QUVB 老化实验、光泽度、色差均按照 GB/T 13448—2019 《彩色涂层钢板及钢带试验方法》测试。其中 QUVB 实验条件选择 2 号测试周期, 保光率 GR 按式(1)计算, 色差 ΔE 按式(2)计算。

$$\text{GR} = \frac{G_1}{G_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中 G_1 为老化测试后的光泽, G_0 为初始光泽。

$$\Delta E = \sqrt{[(\Delta L)^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2]} \quad (2)$$

式(2)中 ΔL 为老化测试前后的亮度差, Δa 为老化

测试前后的红绿差, Δb 为老化测试前后的黄蓝差。

1.4 DOE 设计

以 P/B (颜料质量/基料质量) 和高耐候树脂混拼比例(聚酯树脂 A 的质量/聚酯树脂 B 的质量) 为自变量, 依据经验确定因子水平(表 1)。考虑到因子与响应变量之间可能存在非线性关系, 本研究采用基于表面中心复合设计的响应曲面法进行建模分析。共设置 13 组实验, 其中包括 5 组中心点重复实验以评估实验过程的稳定性。

Table 1 High level, low level and center point value of the factor.

Level	P/B	Blending ratio
Low level	0.2	1.0
High level	0.8	4.0
Center point	0.5	2.5

2 结果与分析

2.1 DOE 实验结果

13 组实验的耐候性测试结果如表 2 所示。其中, 中心点实验(序号 9~13) 的 GR 和 ΔE 差异均较小, 表明实验重复性良好, 数据具有较高的可靠性。将实验数据导入 Minitab 软件, 采用完全二次多项式模型进行拟合, 并通过 Box-Cox 变换选择 $\lambda=0$, 同时利用逐步回归法剔除模型中不显著的项, 以优化拟合效果。

2.2 GR 的 DOE 实验结果分析

GR 的方差分析和模型汇总结果见表 3, 从表中可系统评估模型的可靠性及各因子的显著性: 模型 P 值 < 0.05 , 表明模型整体有效; 失拟项 P 值 $= 0.091$ (即 > 0.05), 说明模型不存在失拟现象, 且残差图(图 1) 显示数据服从正态分布, 进一步验证了模型的有效性与实用性。 R -sq 和 R -sq(调整) (R -sq(adjusted)) < 0.05 , 表明二者对 GR 均有显著影响。此外, 混拼比例的二次项 ($P < 0.05$) 以及交互作用项 P/B 与混拼比例 ($P < 0.05$) 也都是 GR 的显著项。从柏拉图(图 2) 中亦可直观看出各因子对 GR 影响的显著程度, 影响从大到小依次为: 混拼比例 $>$ P/B $>$ 混拼比例的二次项 $>$ 混拼比例和 P/B 的交互作用。

由 GR 的主效应图(图 3) 可知, P/B 与 GR 整体呈现线性负相关, 即 P/B 越高, 耐候越差。究其原因, 高 P/B 增加了粉料与基料之间的两相界

Table 2 DOE experimental design and weatherability test results.

Standard order	Running order	Plot type	Grouping	P/B	Blending ratio	GR (%)	ΔE
1	1	1	1	0.2	1.0	20.17	8.26
2	2	1	1	0.8	1.0	20.65	8.98
3	3	1	1	0.2	4.0	10.22	9.43
4	4	1	1	0.8	4.0	3.20	12.32
5	5	-1	1	0.2	2.5	12.69	9.32
6	6	-1	1	0.8	2.5	5.08	11.23
7	7	-1	1	0.5	1.0	25.64	7.28
8	8	-1	1	0.5	4.0	6.57	9.72
9	9	0	1	0.5	2.5	6.45	9.79
10	10	0	1	0.5	2.5	7.34	9.32
11	11	0	1	0.5	2.5	7.55	9.43
12	12	0	1	0.5	2.5	6.89	9.48
13	13	0	1	0.5	2.5	7.84	9.92

Table 3 Analysis of variance and model results about GR.

	Degree of freedom	Adj SS ^a	Adj MS ^b	F-value ^c	P-value ^d
Model	4	4.21004	1.05251	65.36	0
Linear	2	3.24552	1.62276	100.77	0
P/B	1	0.70176	0.70176	43.58	0
Blending ratio	1	2.54376	2.54376	157.97	0
Quadratic	1	0.61369	0.61369	38.11	0
Blending ratio * Blending ratio	1	0.61369	0.61369	38.11	0
Two-way interaction	1	0.35083	0.35083	21.79	0.002
P/B * Blending ratio	1	0.35083	0.35083	21.79	0.002
Error	8	0.12882	0.01610		
Lack-of-fit	4	0.10489	0.02622	4.38	0.091
Pure error	4	0.02394	0.00598		
Total	12	4.33886			
Model summary		R-sq=97.03%, R-sq(adjusted)=95.55%, R-sq(predicted)=84.80%			

^a Adj SS: adjusted sum of squares; ^b Adj MS: adjusted mean square; ^c F-value: ratio of effect variance to error variance; ^d P-value: probability value.

面,使得水汽和氧气更易侵入漆膜内部,加速基料的降解过程^[12-14].混拼比例与GR呈现二次函数负相关关系(混拼比例*混拼比例项 P 值 <0.05),表明随着混拼比例的增加,GR呈下降趋势,但下降幅度逐渐趋缓.该结果为配方优化提供了重要参考:在普通聚酯涂料体系中,仅通过提高高耐候树脂比例来实现耐候性提升存在一定临界效应,低添加量对整体耐候性能改善有限,只有将高耐候树脂比例增至某一阈值后,才能对耐候性产生显著提升效果.

2.3 ΔE 的DOE实验结果分析

ΔE 的方差分析和模型汇总结果如表4所示.由表4可知,模型的 P 值 <0.05 ,表明模型整体有效;失拟项的 P 值 $=0.217$ (即 >0.05),说明模型无失拟,且从残差图(图4)中也可看出模型整体服从正态分布,因此模型拟合效果可靠. R -sq和 R -sq(调整)值接近,表明模型拟合度良好; R -sq(预测)(R -sq(predicted)) $=78.2\%$,说明模型预测基本满足实际需求.另外从因子和因子交互作用可以看出P/B和混拼比例的 P 值 <0.05 ,说明这两个因

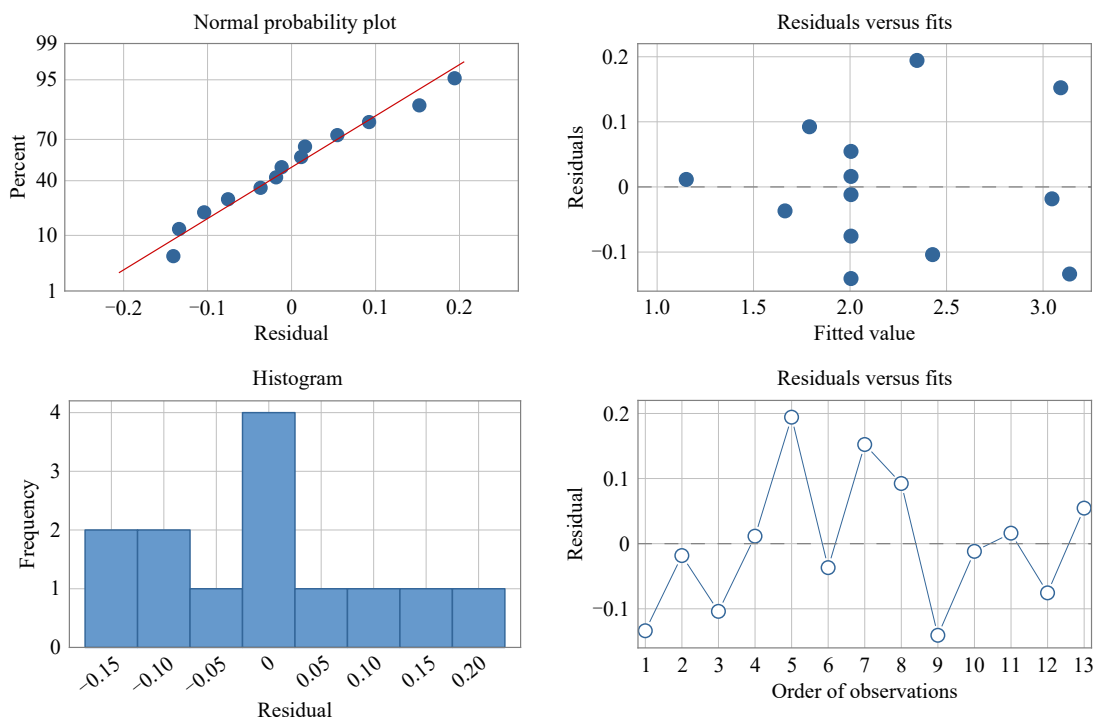


Fig. 1 Residual plots of GR.

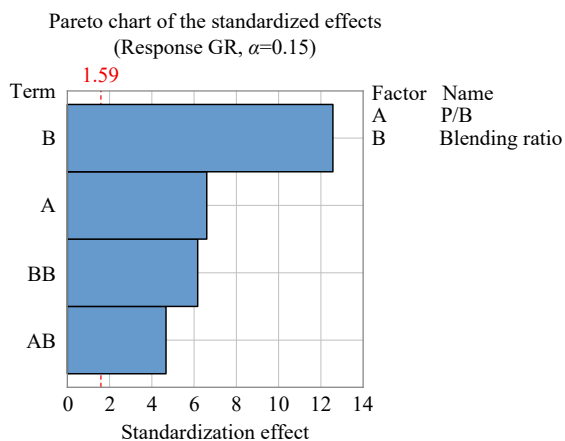


Fig. 2 Pareto chart of GR.

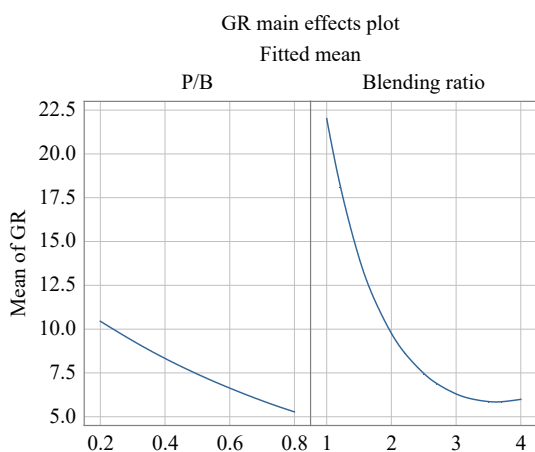


Fig. 3 Main effects plot of GR.

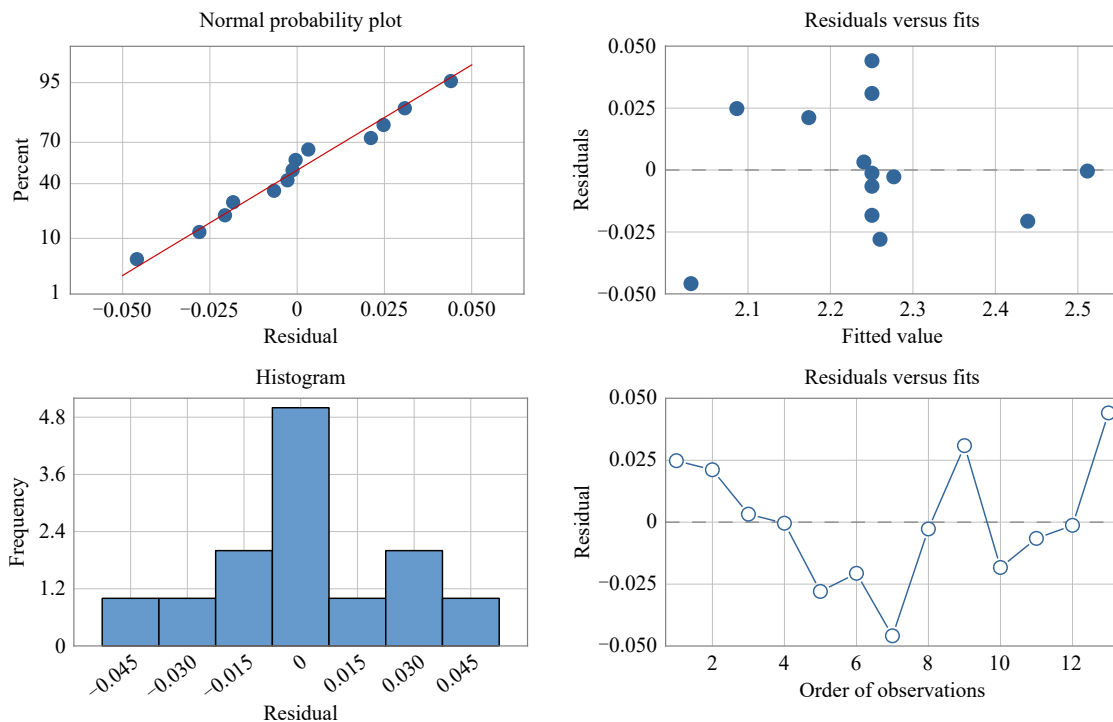
子均为 ΔE 的显著项. 此外, 平方项 $P/B * P/B$ 、混拼比例 * 混拼比例和交互作用项 $P/B * 混拼比例$ 的 P 值均 <0.05 , 说明这些均为 ΔE 的显著项. 从柏拉图(图5)中也可直观看出各因子对 ΔE 影响的显著程度, 影响从大到小依次为: 混拼比例 $> P/B > P/B$ 的二次项 $> 混拼比例$ 的二次项 $> 混拼比例$ 和 P/B 的交互作用.

从 ΔE 的主效应图(图6)可以看出: 随 P/B 增大, ΔE 呈先减小后增大的趋势, 呈现出明显的抛物线型变化规律($P/B * P/B$ 的 P 值=0.001). 这一现象可解释为: 当涂料中颜料含量较低时, 颜料能够有效吸收和散射紫外线, 从而减缓涂料的氧化降解, 此时适当提高颜料添加量有助于增强颜色稳定性; 而当颜料添加量超过临界值后, 过量颜料反而增加了粉料与基料之间的两相界面, 使紫外线更易渗透至涂料内部, 加速树脂降解, 导致耐候性下降、色差增大^[15,16]. 混拼比例与 ΔE 之间则呈二次曲线正相关关系($混拼比例 * 混拼比例$ 项的 P 值=0.001), 该趋势与GR的分析结果一致, 进一步证实了在普通聚酯涂料体系中, 高耐候树脂的混拼存在临界值. 即当添加量较低时, 其对体系整体耐候性的改善作用不明显; 只有当高耐候树脂添加量超过一定阈值后, 涂料的耐候性才能获得显著提升.

Table 4 Analysis of variance and model results about ΔE .

	Degree of freedom	Adj SS ^a	Adj MS ^b	F-value ^c	P-value ^d
Model	5	0.185596	0.037119	33.86	0
Linear	2	0.138833	0.069417	63.33	0
P/B	1	0.048120	0.048120	43.90	0
Blending ratio	1	0.090713	0.090713	82.76	0
Quadratic	2	0.038322	0.019161	17.48	0.002
P/B * P/B	1	0.027189	0.027189	24.80	0.002
Blending ratio * Blending ratio	1	0.025719	0.025719	23.46	0.002
Two-way interaction	1	0.008441	0.008441	7.70	0.027
P/B * Blending ratio	1	0.008441	0.008441	7.70	0.027
Error	7	0.007673	0.001096		
Lack-of-fit	3	0.004872	0.001624	2.32	0.217
Pure error	4	0.002801	0.000700		
Total	12	0.193269			
Model summary	R-sq=96.03%, R-sq(adjusted)=93.19%, R-sq(predicted)=78.20%				

^a Adj SS: adjusted sum of squares; ^b Adj MS: adjusted mean square; ^c F-value: ratio of effect variance to error variance; ^d P-value: probability value.

**Fig. 4** Residual plots of ΔE .

3 模型验证

为验证模型的预测可靠性，随机选取两组未参与建模的工艺条件进行验证实验，模型拟合值与实测结果对比如表5所示。由表可

知，在2组条件下，GR与 ΔE 的实测值与模型拟合值误差均较小，且所有实测值均落在95%置信区间内。结果表明，所建模型具有良好的预测精度与可靠性，可用于后续配方优化研究。

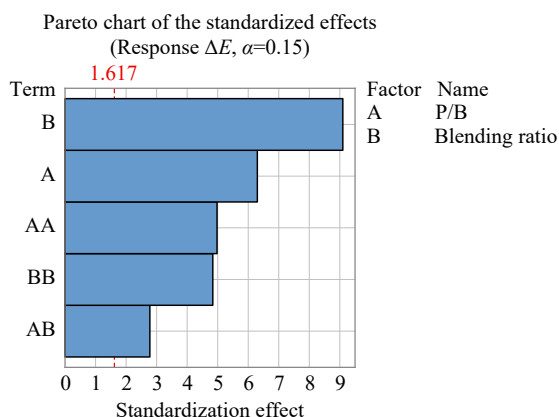
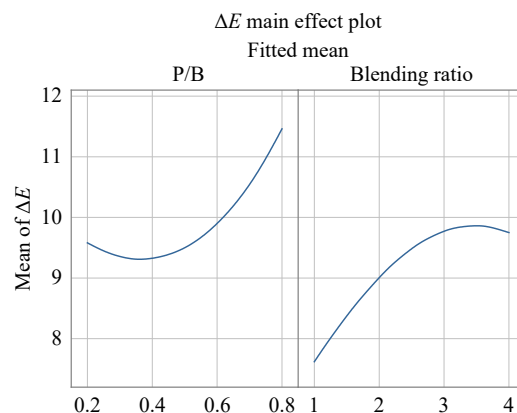
Fig. 5 Pareto chart of ΔE .Fig. 6 Main effects plot of ΔE .

Table 5 Comparison of predicted and measured values.

			Fitted value	95% Confidence interval	95% Prediction interval	Actual value
Condition 1	P/B=0.4	GR (%)	10.50	(9.36, 11.79)	(7.67, 14.38)	11.35
	Blending ratio=2	ΔE	8.89	(8.61, 9.18)	(8.17, 9.68)	8.65
Condition 2	P/B=0.6	GR (%)	4.84	(4.04, 5.80)	(3.43, 6.83)	4.36
	Blending ratio=4	ΔE	10.31	(9.76, 10.89)	(9.37, 11.34)	9.95

4 结论

采用 DOE 方法, 系统考察了 P/B 与高耐候树脂混拼比例对卷材涂层耐候性能的影响. 结果表明: P/B 与 GR 呈线性负相关, 即 GR 随 P/B 增大而均匀下降; 高耐候树脂混拼比例与 GR 呈二次曲线负相关, GR 随着混拼比例的增加逐渐降低, 且下降趋势趋于平缓. P/B 与 ΔE 呈开口向上的抛物线关系, ΔE 随着 P/B 的增加先减小后增大; 高耐候树脂混拼比例与 ΔE 呈二次曲线正相关, ΔE 随着混拼比例的增大逐渐变大, 且上升趋势趋于平缓.

研究证实, DOE 方法能够有效揭示多因素对

涂层性能的协同作用规律, 显著缩短卷材涂料配方研发周期, 为复杂体系下的多因素协同优化提供科学依据, 对卷材涂料配方研发具有重要指导意义.

需要指出的是, 本工作仅以耐候性作为评价指标, 考察了 P/B 和高耐候树脂混拼比例对涂层耐候性能的影响. 实际上, 配方变量的调整亦可能同时影响光泽、柔韧性、铅笔硬度等其他性能, 这些性能的综合平衡决定了涂料的实际应用价值. 本工作旨在提供一种基于 DOE 的配方优化方法, 该方法同样可拓展至涂料其他性能的研究中. 后续工作将结合多响应优化方法, 系统考察配方变量对多项性能的协同影响, 以进一步提升配方的综合性能.

REFERENCES

- 1 袁浩, 常霞俊, 濮靖, 华涛, 甘崇宁. 预涂卷材用铁青灰面漆 QUV 抗老化性能改进. 涂层与防护, **2019**, 40(8), 17-20.
- 2 杨光, 邓安仲. 复合无机颜料在涂料中的应用. 合成材料老化与应用, **2016**, 45(5), 77-82.
- 3 李瑞瑞, 许冉. 钛白粉对户外用粉末涂料耐候性能的影响研究. 山西化工, **2023**, 43(10), 78-79.
- 4 徐承明, 陈义庆, 肖宇, 徐小连, 翟博. 彩涂卷钢涂层厚度对耐老化性能的影响. 涂料工业, **2008**, 38(5), 50-52.
- 5 杨森, 史汇锋, 蒋张军, 刘兰芬. 卷钢面漆用饱和聚酯树脂的耐候性研究. 中国涂料, **2025**, 40(4), 56-60.
- 6 Heinrich, L. A.; Goux-Henry, C.; Paoli, J. D.; Cogordan, F.; Andrioletti, B. Weatherability of different monomers in melamine-crosslinked polyester binders: towards increasing renewable content in coil coatings. *Prog. Org. Coat.*, **2022**, 162, 106536.
- 7 李文凯, 王李军, 高大海, 唐雪涛, 张树诚, 陆文明, 孔德成. 消光效率和表面耐沾污性协同提升的面漆配方改进设计. 涂层与防护, **2025**, 46, 12.

- 8 Ribeiro, I. G.; de Lima Barizão, A. C.; Paganoto, G. T.; Guimarães, M. C. C. From synthesis to application: functionalized magnetic nanoparticles as a simple and reliable tool for nucleic acid purification. *ACS Omega*, **2026**, 11(4), 5063–5074.
- 9 张超. DOE在改善核级铸铁合金力学性能中的应用. *热加工工艺*, **2025**, 54, (23), 172–179.
- 10 Gabor, R.; Prymus, T.; Cvrček, L.; Nehasil, V.; Hlinka, J.; Buřil, M.; Tokarčíková, M.; Seidlerová, J. Final surface modification for better wear resistance of ceramic coating on cast AlSi₁₀Mg alloy. *Ceram. Int.*, **2022**, 48(24), 37433–37447.
- 11 宁显润, 郑涛, 黄鹏, 梁迎鑫, 王宣, 杨注, 魏勇. 基于DOE优化的冷芯盒树脂砂铸件粘砂缺陷研究. *铸造*, **2025**, 74, (12), 1616–1619.
- 12 Jero, D.; Wärmheim, A.; Caussé, N.; LeBozec, N.; Pébère, N.; Persson, D.; Thierry, D. Degradation of polyester coil-coated materials by accelerated weathering investigated by FTIR-ATR chemical imaging and impedance analysis. *Prog. Org. Coat.*, **2025**, 199, 108953.
- 13 Wärmheim, A.; Kotov, N.; Dobryden, I.; Telaretti Leggieri, R.; Edvinsson, C.; Heydari, G.; Sundell, P. E.; Deltin, T.; Johnson, C. M.; Persson, D.; Claesson, P. M. Nanomechanical and nano-FTIR analysis of polyester coil coatings before and after artificial weathering experiments. *Prog. Org. Coat.*, **2024**, 190, 108355.
- 14 Castela, A.; Simoes, A.; Davies, G.; Ferreira, M. Weathering of coil-coatings: UV radiation and thermal effects. *Rev. Metal. Madrid*, **2003**, 167–173.
- 15 Lankone, R. S.; Ruggiero, E.; Goodwin, D. G. Jr, Vilsmeier, K.; Mueller, P.; Pulbere, S.; Challis, K.; Bi, Y. Q.; Westerhoff, P.; Ranville, J.; Fairbrother, D. H.; Sung, L. P.; Wohlleben, W. Evaluating performance, degradation, and release behavior of a nanoform pigmented coating after natural and accelerated weathering. *NanoImpact*, **2020**, 17, 100199.
- 16 Pagnin, L.; Calvini, R.; Wiesinger, R.; Weber, J.; Schreiner, M. Photodegradation kinetics of alkyd paints: the influence of varying amounts of inorganic pigments on the stability of the synthetic binder. *Front. Mater.*, **2020**, 7, 600887.

Research Article

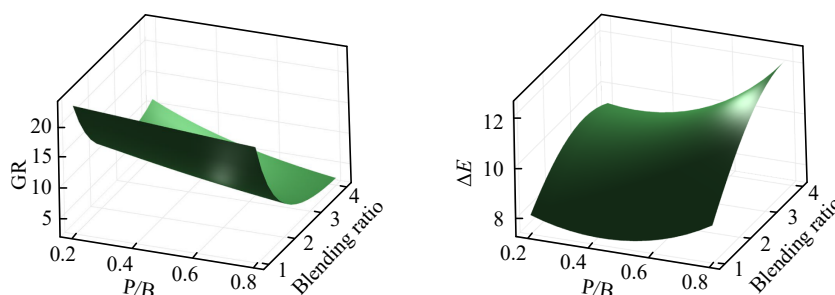
Study on Durability of Coil Coatings Based on Design of Experiments

Guang-cai Guo¹, Qiang Chen¹, Qian-qian Niu^{2*}

(¹Becker Industrial Coatings (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201613)

(²State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620)

Abstract Coil coatings play a pivotal role in safeguarding metal substrates against environmental degradation; however, their durability optimization remains a critical challenge in industrial applications, which are mainly characterized by excessive dependence on empirical methods and intricate interactions among multiple influential factors. Thus, this study aims to address these critical issues. The design of experiments (DOE) methodology was adopted as the core research framework, implemented using Minitab statistical software to ensure rigorous experimental design and data analysis. The key variables investigated included pigment blending (ranging from 0.2 to 0.8 by weight) and the blending ratio of high-durability resins (with weight ratios ranging from 1:1 to 4:1). The color change and gloss retention of coil coating were tested after ultraviolet fluorescent aging test. The effects



* Corresponding author: Qian-qian Niu, E-mail: nqq@dhu.edu.cn

of pigment loading and the blending ratio of high-durability resins on aging resistance were systematically investigated. Statistical analysis of the DOE data revealed that pigment loading, high-durability resin blending, and their interaction effect were statistically significant ($P < 0.05$). Specifically, moderate pigment loading (0.4) provided optimal color stability, while a blending ratio of 1:1 (weight ratio of general to high-durability resin) synergistically enhanced both color stability and gloss retention. Furthermore, the established model elucidated the regularity of the response between the aforementioned factors and the aging resistance of the coating. The synergistic mechanism between pigment loading and high-durability resin blending was quantified, validating the high efficiency and feasibility of the DOE approach in coil coating formulation development. These findings provide a scientific basis for rational formulation design with tailored performance and reduced development costs.

Keywords Coil coatings; Durability; Design of experiments; Minitab; Fluorescent ultraviolet-B accelerated weathering test