

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.021

基于汽车外饰材料老化规律的多目标优化

闵全钊, 张万鑫, 杨勇

(广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 广州 511434)

摘要: 目前,对汽车外饰高分子材料老化性能研究集中在使用理论模型和经验公式来预测寿命,而围绕老化性能多目标优化的研究文献仍较为匮乏。选取常用的改性聚丙烯材料,进行了自然大气暴晒试验和湿热氙灯加速老化试验,并对老化后的色差、失光率、拉伸强度保持率、弯曲模量保持率和微观形貌进行对比分析。结果表明,自然老化的色差和失光率均随着老化时间呈上升趋势,而加速老化过程中,由于老化初期非晶区分子链重排导致的后结晶现象,其色差和失光率都随着老化时间呈现双峰波动、总体上升趋势。拉伸强度保持率在两种老化模式下均呈下降趋势,加速老化的下降速率较自然老化快,弯曲模量保持率在两种模式下呈现先上升再下降的趋势。同时基于外观性能和力学性能的试验数据和多目标约束条件,通过加权法评价方法和响应面分析,拟合加速老化数学模型,最后采用遗传算法 NSGA-II,获得了老化周期的 Pareto 最优前沿解集。最后通过 3 个汽车外饰产品的验证试验,发现老化数学模型预测精度达到 80% 以上,表明该模型能很好地预测产品的老化衰退性能。

关键词: 加速试验;老化性能;汽车外饰;NSGA-II遗传算法;多目标优化

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0146-07

Multi-objective optimization based on the aging laws of automotive exterior materials

MIN Quanzhao, ZHANG Wanxin, YANG yong

(Institute of Automotive Engineering, Guangzhou Automotive Group Co., Ltd., Guangzhou 511434, China)

Abstract : Currently, research on the aging performance of automotive exterior polymer materials has primarily focused on developing theoretical models and empirical formulas for lifespan prediction, while studies exploring multi-objective optimization of aging performance remain comparatively limited. In this study, natural atmospheric exposure tests and damp-heat xenon lamp accelerated aging tests were conducted on the widely used modified polypropylene. A comparative analysis was performed on post-aging indicators, including color difference, gloss loss rate, tensile strength retention, flexural modulus retention, and microscopic morphology. The results indicate that under natural aging conditions, both color difference and gloss loss rate increase progressively with extended aging time. In contrast, during accelerated aging, the initial stage is characterized by post-crystallization effects arising from molecular chain rearrangement in the amorphous region. This leads to a bimodal fluctuation pattern in both color difference and gloss loss rate over time, albeit with an overall upward trend throughout the aging process. For tensile strength retention rate, a decreasing trend is observed under both aging modes; however, the rate of decline is more rapid in accelerated aging compared to natural aging. Regarding flexural modulus retention rate, both aging modes exhibit a similar trend of initial increase followed by a subsequent decrease. Based on experimental data regarding appearance and mechanical properties, combined with multi-objective constraints, an accelerated aging mathematical model was developed via fitting using a weighted evaluation method and response surface analysis. Finally, the NSGA-II genetic algorithm was utilized to obtain the optimal Pareto front solution set for untested aging cycles. Validation of the aging mathematical model was conducted using three automotive exterior products, yielding the prediction accuracy exceeding 80%. This confirms the model's excellent capability to predict the aging degradation performance of such products.

Keywords : accelerated test ; aging performance ; exterior trim ; NSGA-II genetic algorithm ; multi-objective optimization

通信作者: 闵全钊, 硕士, 汽车外饰工程师, 主要从事汽车外饰件设计、模具设计、外饰可靠性试验

收稿日期: 2025-05-17

引用格式: 闵全钊, 张万鑫, 杨勇. 基于汽车外饰材料老化规律的多目标优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 146-152.

MIN Quanzhao, ZHANG Wanxin, YANG yong. Multi-objective optimization based on the aging laws of automotive exterior materials[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 146-152.

高分子材料被广泛应用于汽车外饰,长期暴露于复杂外部环境下,不可避免会出现老化现象^[1-4],老化严重程度很大归结于辐照、温度与湿度三大气候因素的协同作用^[5-7]。在过往市场反馈的问题中,汽车外饰在老化过程中不仅会经历外观性能的退化还会伴随力学性能的衰退^[8]。显然,这种性能的差异化衰退不是单一变化,而是多样的,这使得在研究汽车外饰材料的老化性能时,产生了多目标的性能需求。目前,针对高分子材料老化性能研究主要集中在将理论模型和经验公式^[9]结合起来预测老化性能,如吴昆等^[10]人采用热老化和热失重法建立了聚四氟乙烯(PTFE)材料的两种老化寿命预测模型,试验结果表明热失重法能极好预测PTFE的使用寿命。王剑等^[11]人采用灰色关联分析方法研究汽车产品和环境因素老化关联程度问题,验证了灰色预测模型和改进预测模型在光泽度和色差预测中的可靠性。但高分子材料的多目标优化问题,当前主要聚焦于工艺与配方层面的研究,针对材料老化性能开展的多目标优化及预测相关研究文献,至今仍相对匮乏^[12]。

遗传算法(NSGA)^[13]是一种模拟基因自然选择和遗传的搜索算法,通过非支配分层的方法,使优秀个体遗传至下一代,并通过适应度共享策略使得到的最优解在 Pareto 前沿上分布较均匀。NSGA-II^[14]是在 NSGA 的基础上,采用了快速非支配排序算法,减少计算量,引入了拥挤度和拥挤度比较算子与精英策略,使最优解扩展到整个 Pareto 前沿,保证了种群的多样性,并防止最佳个体的丢失,提高了运算速度与效率。由于 NSGA-II 的运行速度快,解集的收敛性好,成为最流行的多目标优化算法之一。

在过往问题上,外饰件外观性能的退化最为明显体现在色差和光泽度上,而力学性能衰减,主要体现在拆装的断裂、变形、异响等,其很大程度上取决于材料的拉伸强度、弯曲模量、撕裂强度等参数。基于过往市场通过产品结构进行优化收效甚微的问题,优先探索外饰材料老化的色差、光泽度、拉伸强度、弯曲模量4个参数,同时选取常用改性聚丙烯[质量分数20%滑石粉填充聚丙烯/三元乙丙橡胶共混物(PP+EPDM-TD20)]^[15]材料进行海南大气暴晒试验和湿热氙灯加速老化试验,研究其老化后外观和力学性能变化规律并对微观形貌进行研究。并

基于外观性能和力学性能的多目标约束条件,利用响应面分析,拟合加速老化数学模型。实验证明,该方法可快速准确评价汽车零件在不同老化阶段的外观和力学性能的表现,并为后续开发具有优良耐老化性能的新材料提供参考依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP+EPDM-TD20:广州金发科技股份有限公司,其初始性能参数见表1。

表1 PP+EPDM-TD20性能参数

Tab. 1 Performance parameters of PP+EPDM-TD20

Item	Color difference	Gloss	Tensile strength/MPa	Flexural modulus/MPa
PP+EPDM-TD20	0	25	28	2 650

1.2 主要仪器与设备

氙灯老化箱: Ci4000, 瑞典ATLAS公司;

电子万能试验机: Zwick/Roell BT2-FR020TEW-A50, 德国ZWICK ROELL公司;

色差仪: CM-2500d, 日本柯尼卡美能达公司;

光泽度仪: MG6-SA, 泉州科仕佳公司;

扫描电子显微镜(SEM): GeminiSEM 360, 德国蔡司公司;

注塑机: Systec80/420-200, 奥地利恩格尔有限公司;

万能制样机: WZY-240, 河北承德大华试验机有限公司。

1.3 试样制备

将PP+EPDM-TD20颗粒料放置于注塑机料斗中,经注塑后得拉伸标准试样(170 mm×20 mm×3.2 mm)和外观性能测试的样板(100 mm×100 mm×3.2 mm,选取表面无损伤的样板),再将部分拉伸标准试样通过万能制样机裁切出弯曲所用标准试样(80 mm×10 mm×3.2 mm)。成型工艺参数为:模温控制在80℃,注射装置料温控制在230℃,冷却时间为20 s。

1.4 老化试验设计

1.4.1 自然大气暴晒试验(自然老化)

试样以朝南45°倾斜角固定于开放式暴露架上,并在琼海试验场暴晒,暴露周期为2021年12月20日-2022年12月20日,为期一年,分别于第0,2,4,6,8,10,12个月进行取样,共7个时间节点。

1.4.2 湿热氙灯加速老化试验(加速老化)

试验参数设置见表2,试样按图1所示排布方向固定于老化箱内,并将标记好外观测试表面朝向氙灯,取样间隔设计在0,300,600,900,1200,1600,1900,2200,2500,2800,3200 h共11组时间节点。试样取出后常温静置24 h,再进行测试。

表2 湿热氙灯加速老化试验参数

Tab. 2 Parameters of damp-heat xenon lamp accelerated aging test

Parameters	Conditions
Filter combination	PyrexS/PyrexS
Black standard temperature/°C	65±2
Chamber temperature/°C	35~45
Relative humidity/%	60~80
Spray cycle	108 min dry cycle followed by 12 min spray cycle
Irradiance intensity(340 nm)/(W·m ⁻²)	0.5
Irradiance energy(340 nm)/(kJ·m ⁻²)	≈ 2 900
Exposure time/h	3 200



图1 湿热氙灯加速老化试验的样品排布

Fig. 1 Arrangement of samples in damp-heat xenon lamp accelerated aging test

1.5 性能测试

(1)外观性能测试:老化前后试样的可见区域按照 ASTM D2244-16,在老化前后试样的可见区域通过色差仪得到的色度坐标(L, a^*, b^*),然后计算老化前后两个试样之间的色差,同时按 GB/T 9754-2007 使用光泽度仪在 60°下测定试样老化前后的光泽度,计算失光率。

(2)力学性能测试:按 GB/T 1040.1-2018,在拉伸速率为 5 mm/min 条件下测量标准试样老化前后的拉伸强度;按 GB/T9341-2008,采用三点弯曲法,在加载速率为 2 mm/min 条件下测量试样老化前后的弯曲模量。

(3)表面和横截面微观形貌分析:按 JY/T 0584-2020,采用 SEM 对老化后试样表面和横截面微观形貌进行分析。

2 结果与讨论

加速和自然老化后的色差和失光率变化分别如图2、图3所示。PP+EPDM-TD20在自然老化中

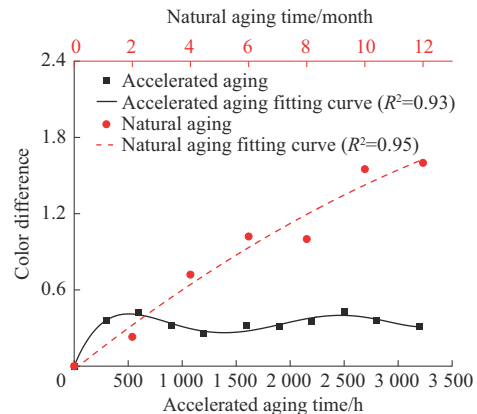


图2 加速和自然老化后色差

Fig. 2 Color difference of accelerated aging and natural aging

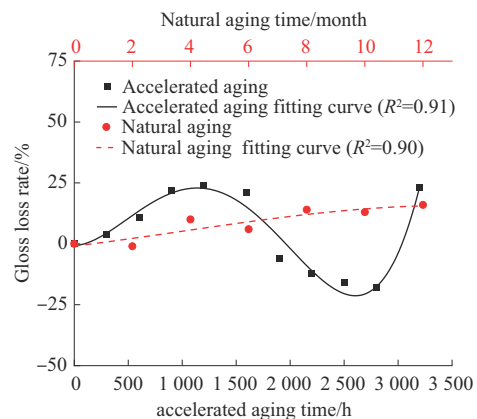


图3 加速和自然老化后失光率

Fig. 3 Gloss loss rate of accelerated aging and natural aging

色差和失光率均随着老化时间增加呈上升趋势,12个月后分别达1.6和16%,而在加速老化中的色差和失光率都随着老化时间增加总体呈现上升趋势,色差在老化周期内呈现双峰波动,最高值为0.43,次高值为0.42,两峰之间最低值为0.26,失光率也呈现双峰波动,最高值为24%,次高值为23%,两峰之间最低值为-18%。图4和5分别为加速和自然老化后拉伸强度保持率和弯曲模量保持率,拉伸强度保持率在两种模式下均呈下降趋势,但加速老化下降速率较自然老化慢,弯曲模量保持率随着老化时间呈现上升再下降趋势,其峰值分别为107.8%和108%。综合以上内容可以看出,加速老化与自然老化在色差和失光率方面的结果差异较大,相关性较差,但在力学性能方面的结果差异相对较小,相关性较好。

图6和图7分别为加速老化后材料表面和横截面的微观形貌。对加速老化材料的微观形貌和性能进行综合分析可知,在加速老化过程中出现阶段性的性能提升主要原因是老化初期PP非晶区分子链

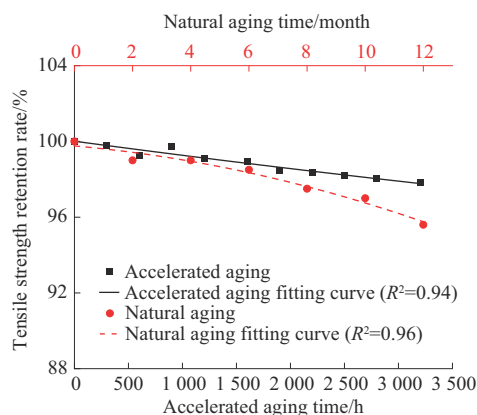


图4 加速和自然老化后拉伸强度保持率

Fig. 4 Tensile strength retention of accelerated aging and natural aging

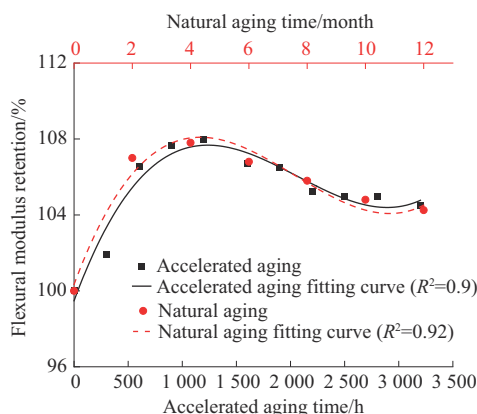


图5 加速和自然老化后弯曲模量保持率

Fig. 5 Flexural modulus retention of accelerated aging and natural aging

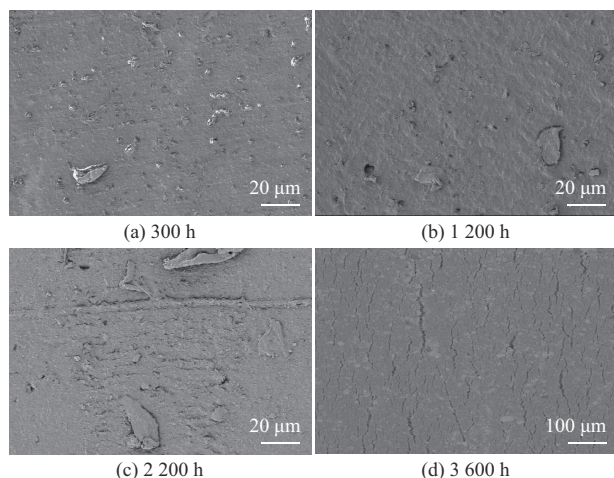


图6 不同加速老化时长试样的表面微观形貌图

Fig. 6 Microscopic morphology of sample surfaces with different accelerated aging durations

重排导致后的结晶现象,晶区比例增加,宏观表现为表面颜色和光泽度短暂恢复及力学性能小幅提升。后期因老化降解加剧,材料内部银纹扩展及微裂纹^[16]生成而析出许多颗粒状物,引发外观性能的衰退。在老化初期出现的微裂纹扩展以及滑石粉

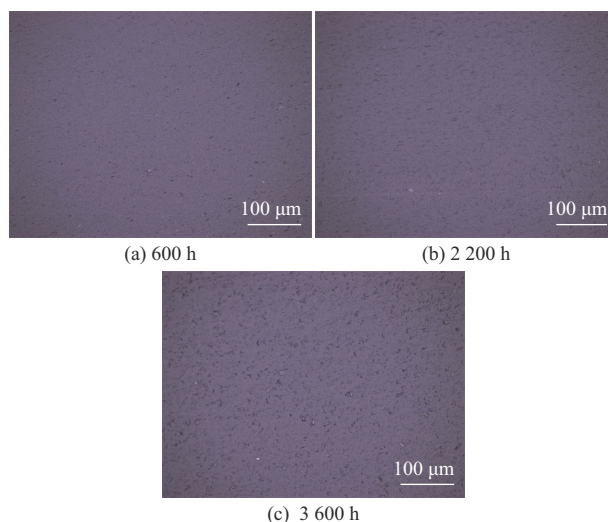


图7 不同老化时长试样的横截面微观形貌图

Fig. 7 Microscopic morphology of cross-sections of samples with different aging durations

裸露,这些微观失效模式直接导致材料弯曲模量保持率上升,但随着老化时间的增加,试样的内部银纹和微孔继续扩展和增加,弯曲模量保持率又出现下降。

综合上述分析可看出加速老化与自然老化之间的相关性不能用简单相关系数或者变换关系来表述,但是加速老化试验不仅不受外界环境的影响,而且因其重复性可以持续地接近自然老化,在试验中可以重复积累有效数据。也可以通过加速老化新材料与已知材料的外观及力学性能的对比,为新材料和新产品的评定提供参考和判断依据。

3 多目标优化

基于改性 PP+EPDM-TD20 加速老化的试验数据,探索性提出一种综合选取老化材料的评价方法,通过加权法把同种材料老化后的不同外观和力学性能,通过加权比例形成单一指标,形成综合老化评价指标。

笔者将加速老化后材料的外观和力学性能作为选取材料性能的两个优化目标。

(1)外观性能优化目标:以色差和失光率按加权比例累加计算,其值越小,表明产品的外观性越好,其表达式见式(1)。

$$O_1 = k_1 \cdot y_1(t_1) + (1 - k_1) \cdot y_2(t_2) \quad (1)$$

式中: $y_1(t_1)$ 、 $y_2(t_2)$ 分别为加速老化的色差、失光率的拟合方程; t_1 和 t_2 分别为色差、失光率对应的加速老化时间; k_1 为外观性能加权系数; O_1 为基于加速老化的外观性能综合指标。

(2)力学性能优化目标:以拉伸强度保持率和弯曲模量保持率按加权比例累加计算,其值越大,表明产品的力学性能越好,其表达见式(2)。

$$O_2 = k_2 \cdot y_3(t_3) + (1 - k_2) \cdot y_4(t_4) \quad (2)$$

式中: $y_3(t_3), y_4(t_4)$ 分别为加速老化的拉伸强度保持率、弯曲模量保持率的拟合方程; t_3 和 t_4 分别为拉伸强度保持率、弯曲模量保持率对应的加速老化时间; k_2 为力学性能加权系数; O_2 为基于加速老化的力学性能综合指标。

对老化时间的外观和力学性能数据进行分析以获取两个优化目标函数。

满足汽车材料使用要求色差 ≤ 1.5 ,失光率 ≤ 15 ,力学性能保持率 ≥ 80 ,因此优化约束条件关系见式(3),加权系数见式(4),加速老化时间取值范围见式(5)。

$$\begin{cases} y_1(t_1) \leq 1.5 \\ y_2(t_2) \leq 15 \\ 80 \leq y_3(t_3) \\ 80 \leq y_4(t_4) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} 0 \leq k_1 \leq 1 \\ 0 \leq k_2 \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$0 \leq t_i \leq 3\,200 (i = 1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

响应面模型^[17]是一种用于研究多个输入变量与一个或多个输出变量之间的关系,并通过构建近似模型来优化响应变量的方法。为了能够更加直观地了解老化时间对外观性能和力学性能的影响,根据式(1)–式(5)做出响应面,并用三维响应面来表达不同加权系数在外观性能和力学性能中与老化时间之间的关系。图8所示外观性能响应面呈现双峰波动,老化初期($< 2\,000$ h)和后期($\geq 3\,100$ h)随着 k_1 值增大,相同老化时间下材料的外观性能值减少,

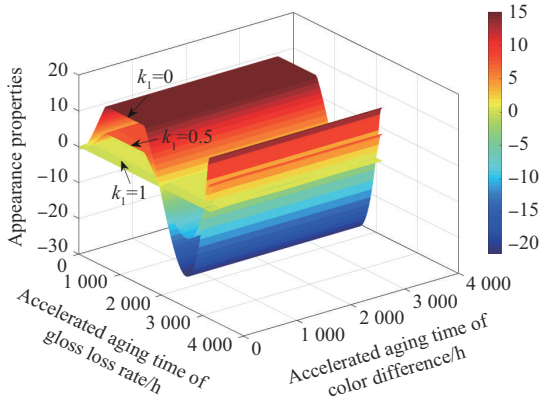


图8 外观性能响应面

Fig. 8 Response surface of appearance properties

在老化中期,随着 k_1 值增大,相同老化时间下材料的外观性能值增大。图9为力学性能响应面,在 k_2 值 < 1 时,力学性能响应面呈现双峰波动,在 $k_2=1$ 时随着老化时间增加,力学性能总体上呈现下降趋势。且随着 k_2 值增加,相同老化时间下力学性能值也减少。

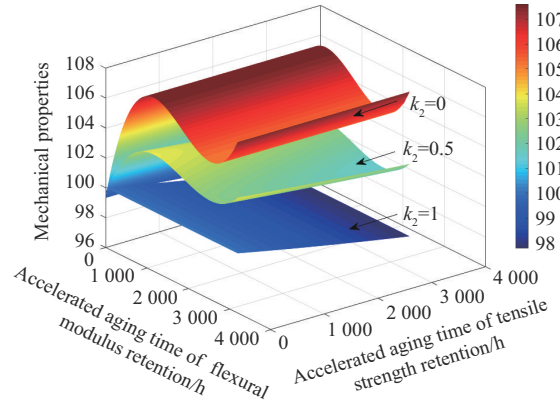


图9 力学性能响应面

Fig. 9 Response surface of mechanical properties

加权系数可根据工程经验或用户需求选取,笔者选取 $k_1=k_2=0.5$,加速老化时间应满足汽车外饰件的老化时间 $\geq 1\,600$ h,其拟合方程见式(6)、式(7)。

$$\begin{aligned} O_1 = & -0.357\,238\,588\,5 + 0.001\,03t_1 + 0.001\,11t_2 - \\ & 0.000\,001\,758\,225t_1^2 + 0.000\,032\,569\,8t_2^2 + \\ & 0.000\,000\,001\,194\,045t_1^3 - \\ & 0.000\,000\,027\,834\,45t_2^3 - \\ & 0.000\,000\,000\,000\,349\,376\,5t_1^4 + \\ & 0.000\,000\,000\,005\,599\,1t_2^4 + \\ & 0.000\,000\,000\,000\,000\,036\,848\,05t_1^5 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} O_2 = & 99.665\,695 - 0.000\,381\,605\,5t_3 + \\ & 0.008\,385t_4 + 0.000\,000\,010\,140\,65t_3^2 - \\ & 0.000\,005\,234\,85t_4^2 + 0.000\,000\,000\,941\,065t_4^3 \end{aligned} \quad (7)$$

通过遗传算法NSGA-II将拟合方程 O_1 和 O_2 作为目标函数,设置种群数目为200、交叉概率为0.9、变异概率为0.05和进化代数初值为300。

NSGA-II算法迭代到300代时,获得了目标外观性能 O_1 和力学性能 O_2 的Pareto最优前沿解集,如图10所示,具体的多目标优化结果见表3。在Pareto解集中,获得既有良好的外观性能又有较佳的力学性能的解集,该解集可以为选取材料提供一种量化直观的有效手段。通过拟合方程和Pareto解集的相关性研究与分析,可快速准确评价汽车零部件材料在不同老化阶段的外观和力学性能的表现,

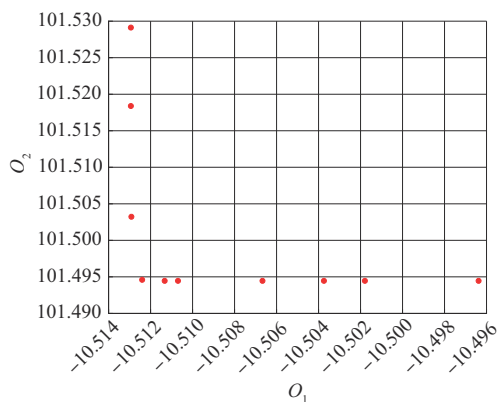


图10 遗传300代的Pareto最优前沿解集

Fig. 10 Pareto optimal front solution set after 300 generations

表3 多目标优化结果

Tab. 3 Result of multi-Objective Optimization

No	O_1	O_2	t_1/h	t_2/h	t_3/h	t_4/h
1	-10.51	101.53	1 685.24	2 604.30	3 144.09	2 630.03
2	-10.51	101.52	1 685.29	2 604.29	3 158.71	2 612.19
3	-10.50	101.49	1 798.62	2 591.39	3 200.00	2 538.43
4	-10.51	101.49	1 730.37	2 596.32	3 200.00	2 538.52
5	-10.51	101.50	1 685.43	2 603.99	3 178.13	2 569.40
6	-10.50	101.49	1 751.06	2 594.73	3 200.00	2 538.43
7	-10.51	101.49	1 691.15	2 599.10	3 200.00	2 543.90
8	-10.51	101.49	1 690.49	2 602.51	3 199.77	2 544.72
9	-10.51	101.49	1 694.52	2 598.34	3 200.00	2 538.64
10	-10.50	101.49	1 759.38	2 593.32	3 200.00	2 538.43

并为后续开发耐老化新材料提供参考依据。

如图11所示,进行实物验证试验,进一步验证材料老化拟合数学模型的精度。选取由PP+EPDM-TD20材料制备的某车型的雨刮盖板、轮眉、侧门外饰件3个产品,并分别在同一个产品截取3个不同位置的样片进行1 600 h的加速老化试验。表4试验结果表明,色差预测值为0.27,实测值平均值为0.28,其色差预测精度为81%~92%。失光率预测值为13.9,实测值平均值为13.1,其失光率预测精度为82%~91%。由此可见预测精度都在80%以上,说明拟合方程能够较好预测产品的老化性能。

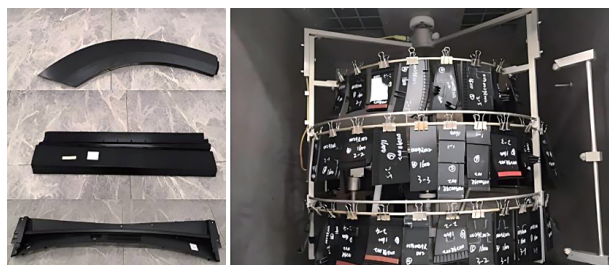


图11 实物验证

Fig. 11 Physical validation

表4 实测结果

Tab. 4 Result of physical testing

Items	Door exterior trim panel	Wheel brow	Cover plate	Average	Predicted value
Color difference	0.32	0.27	0.25	0.28	0.27
Gloss loss rate/%	11.5	12.6	15.2	13.1	13.9

4 结论

(1)通过对比改性聚丙烯(PP+EPDM-TD20)氙灯加速老化试验与海南自然曝晒试验的外观与力学性能变化情况,发现加速老化与自然老化在色差和失光率方面的相关性较差,但在拉伸强度保持率和弯曲模量保持率方面的相关性较好。虽然加速老化与自然老化的相关性不能用简单的相关系数或者变换关系来表述,但加速老化预测结果仍具有指导意义。

(2)通过试验数据和经验公式推导,建立综合评价数学模型,将不同老化指标进行加权综合评价,得到改性PP+EPDM-TD20加速老化数学模型,并利用遗传算法NSGA-II获得最优Pareto解集。同时通过拟合方程预测未试验产品在一定老化周期的老化值,显著节约了加速试验成本,获得的数据具有参考价值,整体操作具有可行性。

(3)上述实验仅考虑湿热氙灯加速老化试验的老化时间的影响,因此后续的研究可尝试温度、湿度等更多的影响因素,进一步提高数学模型精度。

参考文献

- [1] 刁帅,董婧晗,杨文轩,等.不同车用环境下聚丙烯材料老化性能对比[J].塑料,2025,54(2):80-84.
DIAO Shuai, DONG Jinghan, YANG Wenxuan, et al. Comparison of aging properties of polypropylene materials in different automotive environments[J]. Plastics, 2025, 54(2):80-84.
- [2] 闵全钊,杨明,钱银超,等.基于冷热循环改进试验的汽车外饰件老化行为[J].工程塑料应用,2023,51(6):103-108.
MIN Quanzhao, YANG Ming, QIAN Yinchao, et al. Aging behavior of automobile exterior trim based on improved thermocycling test[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(6):103-108.
- [3] 王源,张志松,马欣桐,等.高分子材料老化性能综合评价方法及全周期预测[J].材料导报,2024,38(增刊1):600-605.
WANG Yuan, ZHANG Zhisong, MA Xintong, et al. Comprehensive evaluation method and full-cycle prediction of aging properties of polymer materials[J]. Materials Reports, 2024, 38(Suppl 1): 600-605.
- [4] 孔令光,陈赵文,霍伟智.耐老化聚丙烯的研究进展[J].广东化工,2020,47(16):81-82.
KONG Lingguang, CHEN Zhaowen, HUO Weizhi. Research prog-

- ress of aging resistant polypropylene[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(16):81-82.
- [5] 慕仙莲, 时宇, 祁黎, 等. 聚苯乙烯材料的氙灯与海南自然老化的相关性和加速性研究[J]. 环境技术, 2023, 41(1):39-43.
MU Xianlian, SHI Yu, QI Li, et al. Correlation and acceleration study of natural and xenon lamp weathering tests of polystyrene in Hainan[J]. Environmental Technology, 2023, 41(1):39-43.
- [6] 马坚. 汽车气候老化应用技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2013.
MA Jian. Automotive weathering application technology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2013.
- [7] 陆启凯. 汽车气候老化试验技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2010.
LU Qikai. Automotive weathering test technology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2010.
- [8] 马凯军, 薛凤颖, 张志友, 等. 溶剂型与水性聚氨酯面漆室内加速试验和现场试验性能对比研究[J]. 材料保护, 2024, 57(2): 154-161.
MA Kaijun, XUE Fengying, ZHANG Zhiyou, et al. Comparative study on the performance of solvent-based and waterborne polyurethane top-coats in laboratory accelerated test and field test[J]. Materials Protection, 2024, 57(2):154-161.
- [9] 杨雪梅, 朱子旻, 尹文华. 飞机用膨化聚四氟乙烯材料加速老化试验及寿命评估研究[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(5):1-3.
YANG Xuemei, ZHU Zimin, YIN Wenhua. Accelerated aging test and life prediction of e-PTFE for aircraft[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2023, 52(5):1-3.
- [10] 吴昆, 樊亚勤, 沈倩, 等. 核电用聚四氟乙烯密封件老化状态研究及使用寿命预测[J]. 中国塑料, 2022, 36(10):98-103.
WU Kun, FAN Yaqin, SHEN Qian, et al. Study on aging state and life prediction of PTFE seals for nuclear power stations[J]. China Plastics, 2022, 36(10):98-103.
- [11] 王剑. 汽车产品在典型自然环境下的老化行为与服役寿命预测研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
WANG Jian. Study on aging behavior and service life prediction of automotive products under typical natural environment[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [12] 宫祥瑞, 蒋滢. 机器学习在高分子材料基因组研究中的进展与挑战[J]. 高分子学报, 2022, 53(11):1 287-1 300.
GONG Xiangrui, JIANG Ying. Advances and challenges of machine learning in polymer material genomes[J]. Acta Polymerica Sinica, 2022, 53(11):1 287-1 300.
- [13] 杨丽荣, 刘洋, 周俊. 基于非支配排序遗传算法的多目标轨迹优化方法[J]. 实验室研究与探索, 2025, 44(2):31-36.
YANG Lirong, LIU Yang, ZHOU Jun. A multi-objective trajectory optimization method based on the NSGA-III algorithm[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2025, 44(2):31-36.
- [14] 赵亮, 彭琳. 汽车中立柱内板冲压的新型选择NSGA-II多目标优化[J]. 机械设计与制造, 2025(2):280-284, 288.
ZHAO Liang, PENG Lin. Inner plate of automobile middle column stamping multi-object optimization based on new choosing strategy NSGA-II algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2025(2):280-284, 288.
- [15] 杨洋, 赵强, 朱琦, 等. 聚丙烯改性及其抗老化性能的研究进展[J]. 合成纤维, 2021, 50(2):7-9.
YANG Yang, ZHAO Qiang, ZHU Qi, et al. Research progress of polypropylene modification and its anti-aging properties[J]. Synthetic Fiber in China, 2021, 50(2):7-9.
- [16] 刘金鑫, 张海峰, 张星, 等. 多级拉伸与热定型对聚乙烯/聚丙烯双组分纤维结构和性能的影响[J]. 纺织学报, 2019, 40(5):24-29.
LIU Jinxin, ZHANG Haifeng, ZHANG Xing, et al. Influence of multistage drawing and heat setting on structure and properties of polyethylene/polypropylene bicomponent fibers[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(5):24-29.
- [17] 李华雄, 王晖, 刘璇. 响应面法优化PLA材料3D打印试件力学性能[J]. 塑料科技, 2024, 52(10):130-135.
LI Huaxiong, WANG Hui, LIU Xuan. Response surface methodology to optimize mechanical properties of 3D printed specimens made of PLA materials[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(10):130-135.