

# 低气压环境综合加速试验技术在聚氨酯 涂层快速评价中的应用

向江涛<sup>1</sup>, 杨小奎<sup>1</sup>, 杨晓然<sup>1</sup>, 李迪凡<sup>1</sup>, 张世艳<sup>1</sup>, 吴帅<sup>1,2</sup>

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039;

2.西藏拉萨大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 拉萨 850100)

**摘要:** **目的** 研究低气压环境综合加速试验技术在聚氨酯涂层的低气压环境适应性评价中的加速性。**方法** 开展聚氨酯涂层低气压环境综合加速试验和低气压自然环境试验, 分析聚氨酯涂层在两种试验环境中的老化机理、色差和光泽度变化规律, 采用加速转换因子 (ASF) 法处理试验数据, 分析低气压环境综合加速试验技术的加速性。**结果** 与低气压自然环境试验 12 个月相比, 在低气压环境综合加速试验 60 d 内, 聚氨酯涂层的老化机理、色差和光泽度变化规律基本不变。低气压环境综合加速试验的加速倍率随试验时间延长而逐渐降低, 最高为 24 倍, 最低为 10 倍。**结论** 低气压环境综合加速试验技术综合模拟了低气压自然环境的太阳辐射、气压、温度和湿度等条件, 具有很好的模拟性和加速性, 适用于快速评价聚氨酯涂层在低气压环境下的适应性。

**关键词:** 低气压; 综合; 加速转换因子; 聚氨酯; 加速性

中图分类号: TJ01; TQ31 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)12-0128-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.12.019

## Application of Comprehensive Accelerated Test Technology in Rapid Evaluation of Polyurethane Coating in Low Pressure Environment

XIANG Jiang-tao<sup>1</sup>, YANG Xiao-kui<sup>1</sup>, YANG Xiao-ran<sup>1</sup>, LI Di-fan<sup>1</sup>, ZHANG Shi-yan<sup>1</sup>, WU Shuai<sup>1,2</sup>

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Lhasa Tibet, Materials Corrosion in Atmospheric Environment, National Observation & Research Station, Lhasa 850100, China)

**ABSTRACT:** To study the acceleration of adaptable evaluation for comprehensive accelerated test technology in Polyurethane Coating in low pressure environment, the comprehensive accelerated test in low pressure environment and natural environment test in low pressure environment of polyurethane coating were carried out to analyze the aging mechanism, color difference and glossiness change rule of polyurethane coating in the two environmental tests, and the process of test data with the method of acceleration switchover factor (ASF) was conducted to analyze the acceleration of comprehensive accelerated test technology in

收稿日期: 2021-04-19; 修订日期: 2021-06-17

Received: 2021-04-19; Revised: 2021-06-17

作者简介: 向江涛 (1972—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为装备环境适应性研究。

**Biography:** XIANG Jiang-tao (1972—), Male, Senior engineer, Research focus: equipment environmental adaptability.

通讯作者: 杨小奎 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为装备环境适应性研究。

**Corresponding author:** YANG Xiao-kui (1982—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: equipment environmental adaptability.

引文格式: 向江涛, 杨小奎, 杨晓然, 等. 低气压环境综合加速试验技术在聚氨酯涂层快速评价中的应用[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 128-133.

XIANG Jiang-tao, YANG Xiao-kui, YANG Xiao-ran, et al. Application of comprehensive accelerated test technology in rapid evaluation of polyurethane coating in low pressure environment[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(12): 128-133.

low pressure environment. The aging mechanism, color difference and glossiness of polyurethane coating in comprehensive accelerated test in low pressure environment after 60 days were basically the same as those of natural environment test in low pressure after 12 months. Accelerated ratio of comprehensive accelerated test in the low pressure environment decreased as the test time prolonged, and the highest accelerated ratio was 24 times and the lowest was 10 times. The comprehensive accelerated test technology in low pressure environment comprehensively not only simulates the conditions of solar radiation, air pressure, temperature and humidity in natural environment, but also can acquire great acceleration, which is suitable for rapid adaptable evaluation of polyurethane coating in low pressure environment.

**KEY WORDS:** low pressure; synthesis; acceleration switchover factor; polyurethane; acceleration

低气压环境综合加速试验是一种新的环境模拟试验技术,是模拟低气压自然环境中的太阳辐射、气压、温度、湿度和风速等条件<sup>[1-3]</sup>的试验箱及其相应的低气压自然环境模拟加速试验方法。模拟低气压环境的试验方法是采用低温—低压—高湿度的方法<sup>[4]</sup>,但这种方法没有综合太阳辐射和风速等重要环境因素,导致试验数据与低气压自然环境试验数据的相关性较差。

随着科技的不断进步,新材料、新工艺不断应用于各种产品中。这些新材料、新工艺在应用到低气压环境地区之前,必须对其低气压环境适应性进行系统的考核和筛选,从而使产品在低气压环境中的故障和损伤降到最低<sup>[5-9]</sup>。新材料、新工艺的筛选可以采用低气压自然环境方法和实验室环境试验方法,为了加快速度和效率,一般采用实验室环境试验方法<sup>[10-13]</sup>。充分考虑和再现低气压环境下的多因素综合气候环境试验技术,可以进一步提高筛选的正确率和速率<sup>[14-15]</sup>。因此,在产品环境适应性试验中推广低气压环境综合加速试验技术,能更好地满足材料和防护工艺筛选的需求。文中选择汽车、飞机常用的聚氨酯类涂层为试验对象,检测其颜色、光泽度在试验前后的变化,验证低气压环境综合加速试验技术的模拟性和加速性<sup>[16-17]</sup>。

## 1 试验

### 1.1 材料与试样

样品基材为 150 mm×75 mm×1 mm 的阳极氧化铝合金板。铝合金板表面喷涂淡驼灰色的改性聚氨酯涂层,喷涂厚度为 120 μm。设置 3 件平行样品。试验前检测样品的颜色值、60°镜面光泽度值、傅里叶红外光谱,以便对比试验后涂层的变化情况。

### 1.2 试验条件

在拉萨开展户外暴露试验,按照 GB/T 9276—1996《涂层自然气候曝露试验方法》<sup>[18]</sup>、WJ 2155—1993《兵器产品自然环境方法大气暴露试验》<sup>[19]</sup>的要求进行试验。户外朝南 45°,无背板暴露,试验时间为 12 个月。

低气压环境综合加速试验采用“多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验箱”,设备利用试验箱内的温度、湿度、气压和辐照度传感器等将箱体内环境参数值传输给 PLC,并与程序设定值进行比较,进一步控制各电气系统的工作,最终实现光照、气压、温度、湿度和风等因素同时作用。试验条件综合考虑了模拟性和加速性,主要试验条件是根据我国高原高寒地区实测试验样品的表面极值设定,如设计最高温、最低温和最大温差等。另外,由于高原地区的紫外辐射比例高于其它地区,且紫外辐射一般在聚氨酯涂层的光化学老化中起主要作用,因此,在光辐射条件中增加了紫外辐射。试验谱如图 1 所示。试验进行 360 周期,每周 4 h,总共 60 d。

试验过程中,在每个检测周期检测改性聚氨酯涂层的颜色值和 60°镜面光泽度值;试验结束后,测试改性聚氨酯涂层的傅里叶红外光谱。

## 2 结果与讨论

### 2.1 傅里叶红外检测

试验结束后,改性聚氨酯的傅里叶红外光谱变化如图 2 所示。由原始红外光谱可以看出,1728 cm<sup>-1</sup>、1519 cm<sup>-1</sup>、1455 cm<sup>-1</sup> 附近峰为特征吸收峰;低气压环境综合加速试验后,涂层特征峰 1728 cm<sup>-1</sup> 和 1519 cm<sup>-1</sup> 的强度下降甚至消失,这与低气压自然环境后特征峰的变化规律基本一致。

### 2.2 涂层颜色检测

按 GB/T 11186.2—1989《涂膜颜色的测量方法 第二部分 颜色测量》<sup>[20]</sup>测量改性聚氨酯涂层的颜色,按 GB/T 11186.3—1989《涂膜颜色的测量方法 第三部分 色差计算》<sup>[21]</sup>计算改性聚氨酯涂层的色差,色差计算公式见式(1)。

$$E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

式中:ΔL\*为试验后 L 值与原始 L 值的差值;Δa\*为试验后 a 值与原始 a 值的差值;Δb\*为试验后 b 值与原始 b 值的差值。

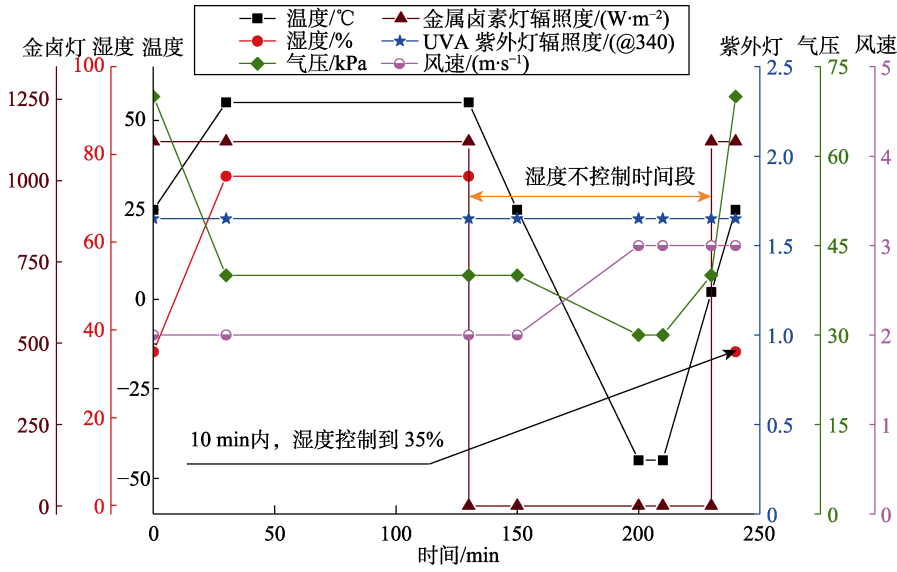


图1 低气压环境综合加速试验谱

Fig.1 Comprehensive accelerated test spectrum in low pressure environment

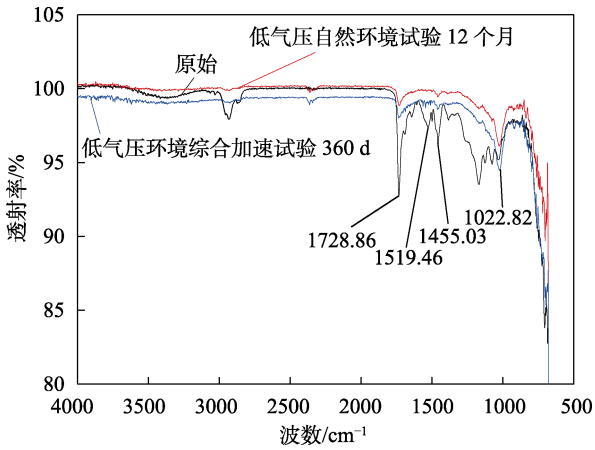


图2 改性聚氨酯涂层两种环境试验后的红外光谱

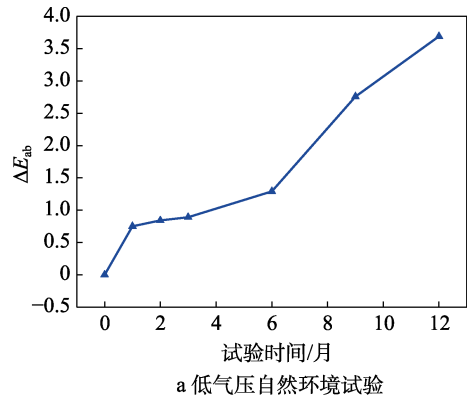
Fig.2 Infrared spectra of modified polyurethane coating after two environmental tests

色差数据见表1, 色差变化规律如图3所示。可以看出两种试验环境中, 改性聚氨酯涂层的颜色变化规律基本相同。

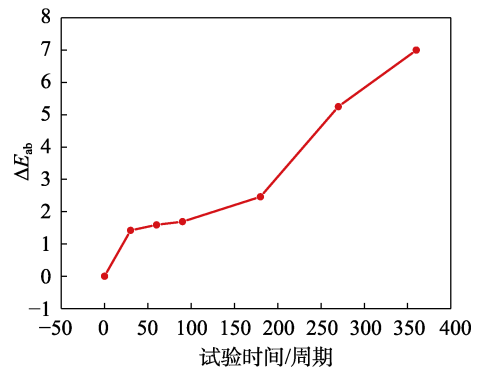
表1 改性聚氨酯涂层两种环境试验后色差

Tab.1 Color difference of modified polyurethane coating after two kinds of environmental test

低气压自然环境试验时间/月	$\Delta E_{ab}$	低气压环境综合加速试验时间/d	$\Delta E_{ab}$
0	0	0	0
1	0.75	30	1.42
2	0.84	60	1.59
3	0.89	90	1.69
6	1.29	180	2.46
9	2.76	270	5.25
12	3.69	360	7



a 低气压自然环境试验



b 低气压环境综合加速试验

图3 改性聚氨酯涂层两种环境试验后色差变化规律

Fig.3 Changing rule of Color difference of modified polyurethane coating after two kinds of environmental test: a) low pressure natural environment test; b) comprehensive acceleration test in low pressure environment

### 2.3 镜面光泽检测

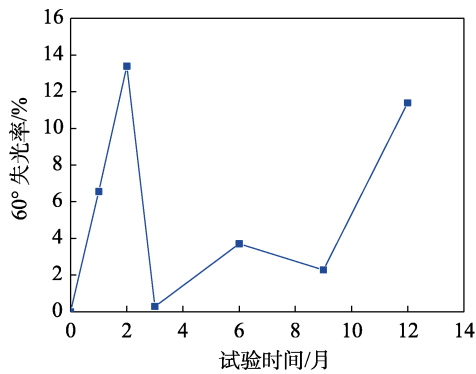
按 GB/T 9754—2007《色漆和清漆 不含金属颜料的色漆漆膜的 20°、60°和 85°镜面光泽的测定》<sup>[22]</sup>测定 60°镜面光泽。按 GB/T 9754—2007《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》<sup>[23]</sup>计算改性聚氨酯涂层的

失光率，数据见表 2，失光率变化规律如图 4 所示。可以看出低气压自然环境中，改性聚氨酯涂层在试验前期，光泽度下降较大，随后光泽度增加，这是该涂层后固化造成的。在低气压综合环境试验中，该涂层在试验前期，光泽度下降较大，随后光泽度下降变缓，这也是该涂层后固化造成的。

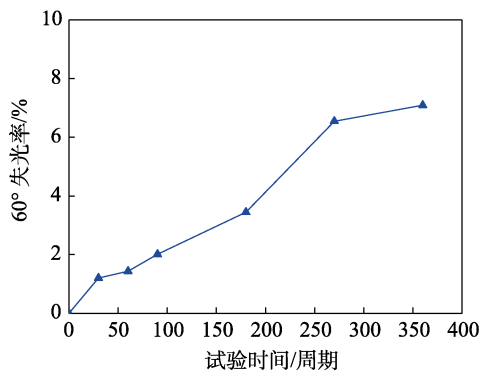
表 2 改性聚氨酯涂层两种环境试验后失光率

Tab.2 gloss Los rate of modified polyurethane coat after two kinds of test

低气压自然环境试验时间/月	失光率/%	低气压环境综合加速试验时间/周期	失光率/%
0	0	0	0
1	6.6	30	1.2
2	13.4	60	1.4
3	0.3	90	2.0
6	3.7	180	3.4
9	2.3	270	6.5
12	11.4	360	7.1



a 低气压自然环境试验



b 低气压环境综合加速试验

图 4 改性聚氨酯涂层经两种试验后失光率变化规律

Fig.4 Changing rule of gloss loss rate of modified polyurethane coat after two kinds of test: a) low pressure natural environment test; b) comprehensive acceleration test in low pressure environment

## 2.4 低气压环境综合加速试验加速性

低气压环境综合加速试验采用加速转换因子 (ASF) 法<sup>[24]</sup>评估加速性。文中以改性聚氨酯涂层的

色差变化为例计算加速倍率。分别对改性聚氨酯涂层低气压自然环境试验和低气压环境综合加速试验后的色差数据进行拟合，以试验时间为横坐标，色差为纵坐标，结果见式 (2)、式 (3)。

$$y_{\text{户外}} = -0.396 + 0.9286 \times e^{t/7.9908}, R^2 = 0.96 \quad (2)$$

$$y_{\text{加速}} = -0.816 + 1.8182 \times e^{t/243.5029}, R^2 = 0.96 \quad (3)$$

式中： $y_{\text{户外}}$  为低气压自然环境试验的色差； $y_{\text{加速}}$  为低气压环境综合加速试验的色差； $t_1$  为低气压自然环境试验时间， $d$ ； $t$  为低气压环境综合加速试验时间， $d$ 。

根据式 (2)、式 (3)，计算两种试验达到相同色差的时间。为便于比较，将两种试验时间均换算成天数，试验时间见表 3。

表 3 两试验方法中改性聚氨酯涂层达到相同色差的时间  
Tab.3 Time for modified polyurethane coating to achieve the same color difference in two test method

试验方法	改性聚氨酯涂层色差					
	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9	3.3
低气压自然环境试验时间 $t_1/d$	144	195	237	270	303	330
低气压环境综合加速试验时间 $t/d$	6	13	19	25	29	33
$t_1/t$	24.0	15.0	12.5	10.8	10.4	10.0

以低气压环境综合加速试验时间  $t$  为横坐标，以达到相同色差时低气压自然环境试验和低气压环境综合加速试验时间的比值  $t_1/t$  为纵坐标，作 ASF 随时间变化的曲线图，并进行回归分析，如图 5 所示。

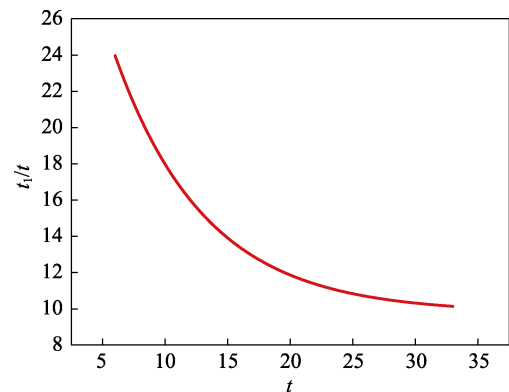


图 5 改性聚氨酯涂层色差 ASF 随时间变化曲线

Fig.5 Change curve of color difference ASF of modified polyurethane coating with times

图 5 的回归方程为：

$$ASF_{\text{户外-加速}} = 32.3104 \times e^{-t/7.2804} + 9.7940, R^2 = 0.99 \quad (4)$$

式中： $ASF_{\text{户外-加速}}$  为色差加速倍率； $t$  为低气压环境综合加速试验时间， $d$ ； $R^2$  为相关系数。

由计算结果可知，改性聚氨酯涂层的色差加速倍

率不是固定的,加速倍率随时间的延长逐渐减小。改性聚氨酯涂层样品按加速转换因子(A SF)法计算的低气压环境综合加速试验相对于低气压自然环境试验的加速性计算结果见表4。

表4 改性聚氨酯涂层低气压环境综合加速试验的加速性结果

Tab.4 Acceleration property of modified polyurethane coating in low pressure environment

样品性能	加速转换因子法 $ASF_{\text{户外-加速}}$	计算结果
改性聚氨酯涂层色差	$ASF_{\text{户外-加速}} = 32.3104 \times e^{-t/7.2804} + 9.7940, R^2 = 0.99$	加速倍率随试验时间延长逐渐降低,最高24倍,最低10倍。

### 3 结论

1) 改性聚氨酯涂层在低气压环境综合加速试验中的老化机理与低气压自然环境中的老化机理基本相同。

2) 改性聚氨酯涂层在低气压环境综合加速试验中的涂层色差、光泽度变化规律与低气压自然环境中的变化规律基本相同。

3) 在数据变化规律相同的基础上,改性聚氨酯涂层在低气压环境综合加速试验中的老化加速倍率随时间变化,最高为24倍,最低为10倍。

4) 低气压环境综合加速试验技术具有很好的模拟性和加速性,适用于快速评价聚氨酯涂层在低气压环境下的适应性。

#### 参考文献:

- [1] 杨晓然, 彭小明, 杨小奎, 等. 多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验箱研制[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 27-33.  
YANG Xiao-ran, PENG Xiao-ming, YANG Xiao-kui, et al. Development of multifactor integrated frigid plateau climate simulation and acceleration test chamber[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(7): 27-33.
- [2] 许翔, 张众杰, 凤蕴, 等. 汽车环境适应性试验综述[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 61-65.  
XU Xiang, ZHANG Zhong-jie, FENG Yun, et al. Review of automobile environmental worthiness test[J]. Equipment environmental engineering, 2013, 10(1): 61-65.
- [3] 许翔, 刘瑞林, 董素荣, 等. 轮式车辆高原环境适应性评价研究[J]. 装备环境工程, 2014(4): 82-87.  
XU Xiang, LIU Rui-lin, DONG Su-rong, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on plateau environmental adaptability of wheeled vehicles[J]. Equipment environmental engineering, 2014(4): 82-87.
- [4] 郭昕, 杨志军. 航空发动机高、低温起动及高原起动试

- 验技术探讨[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 327-330.  
GUO Xin, YANG Zhi-jun. Study of aeroengine starting tests at high/low temperatures and at plateau[J]. Journal of aerospace power, 2003, 18(3): 327-330.
- [5] 朱强, 陈云翔, 车飞, 等. 高原地区太阳辐射对飞机维修保障的影响[J]. 电光与控制, 2014, 21(11): 88-92.  
ZHU Qiang, CHEN Yun-xiang, CHE Fei, et al. Influence of solar radiation in plateau section on aircraft maintenance support[J]. Electronics optics & control, 2014, 21(11): 88-92.
- [6] 高强, 庞志兵, 魏赫. 高原高寒环境对武器装备的影响研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 118-122.  
GAO Qiang, PANG Zhi-bing, WEI He. Performance of weapon equipment influenced by plateau and high cold environment and its study[J]. Equipment environmental engineering, 2013, 10(6): 118-122.
- [7] 王坚, 王保贵, 张晨, 等. 高原气候环境对装备影响及适应性措施[J]. 环境技术, 2013, 31(6): 25-28.  
WANG Jian, WANG Bao-gui, ZHANG Chen, et al. Countermeasures on influence of plateau climate environment on equipment and its environmental worthiness[J]. Environmental technology, 2013, 31(6): 25-28.
- [8] 刘昆成, 郑佑胜. 高原及湿热环境对橡胶材料劣化影响的对比分析研究[J]. 环境技术, 1997, 15(5): 5-10.  
LIU Kun-cheng, ZHENG You-sheng. The study of effect of plateau, damp and hot conditions on the aging property of the rubber compound. Environmental technology, 1997, 15(5): 5-10.
- [9] 俞一鸣, 赵广彤. 高原环境对防空武器装备的影响及改进措施[J]. 现代防御技术, 2011, 39(2): 172-175.  
YU Yi-ming, ZHAO Guang-tong. Performance of anti-aircraft weapon equipment influenced by plateau environment and its improvement measures[J]. Modern defence technology, 2011, 39(2): 172-175.
- [10] ZIEINIK A F. 老化测试为什么您更加需要它[J]. 环境技术, 2007, 25(4): 39-41.  
ZIEINIK A F. Weathering testing why you need it more the ever[J]. Environmental technology, 2007, 25(4): 39-41.
- [11] 刘树文, 蒋祖华, 祁黎. 汽车非金属材料的实验室加速老化和户外自然老化[J]. 广东塑料, 2005(5): 44-46.  
LIU Shu-wen, JIANG Zu-hua, QI Li. Laboratory accelerated aging and outdoor natural weathering of automobile non-metallic materials[J]. Guangdong plastics, 2005(5): 44-46.
- [12] 王俊, 揭敢新. 高聚物的老化试验[J]. 装备环境工程, 2005, 2(3): 47-53.  
WANG Jun, JIE Gan-xin. Weathering tests of polymer[J]. Metal forming technology, 2005, 2(3): 47-53.
- [13] 李慧连, 王文涛, 李莉, 等. 汽车仪表板材料氙灯老化试验与自然曝晒试验相关性研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 30-33.  
LI Hui-lian, WANG Wen-tao, LI Li, et al. Study on correlation between xenon lamp aging and natural exposure

- methods of automobile instrument panel materials[J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(1): 30-33.
- [14] 王玲, 颜景莲, 梁星才. 汽车用材料耐久性试验评价技术[J]. 环境技术, 2003, 21(6): 1-7.  
WANG Ling, YAN Jing-lian, LIANG Xing-cai. Weathering evaluation technology on automobile materials[J]. Environmental technology, 2003, 21(6): 1-7.
- [15] 江鲁, 周修源. 汽车常用的自然暴露试验方法[J]. 中国仪器仪表, 2009(9): 45-50.  
JIANG Lu, ZHOU Xiu-yuan. The natural weathering tests of car[J]. China instrumentation, 2009(9): 45-50.
- [16] 卢言利. 有机涂层高原环境影响参数分析及老化机理研究[J]. 涂料工业, 2012, 42(4): 12-16, 25.  
LU Yan-li. Ageing mechanisms and influencing factors for organic coatings used in plateau environment[J]. Paint & coatings industry, 2012, 42(4): 12-16, 25.
- [17] 卢言利, 潘家亮, 张拴勤, 等. 高原环境因素对涂层自然老化性能的影响[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 37-41.  
LU Yan-li, PAN Jia-liang, ZHANG Shuan-qin, et al. Influence of highland environmental factors on paint weathering[J]. Equipment environmental engineering, 2011, 8(2): 37-41.
- [18] GB/T 9276—1996, 涂层自然气候曝露试验方法[S].  
GB/T 9276—1996, Methods of exposure to natural weathering of coating[S].
- [19] WJ 2155—1993, 兵器产品自然环境试验方法[S].  
WJ 2155—1993, Natural environment test methods of ordnance products atmospheric exposure test[S].
- [20] GB/T 11186.2—1989, 涂膜颜色的测量方法 第二部分: 颜色测量[S].  
GB/T 11186.2—1989, Methods for measuring the colour of paint films Part 2: Colour measurement[S].
- [21] GB/T 11186.3—1989, 涂膜颜色的测量方法 第三部分: 色差计算[S].  
GB/T 11186.3—1989, Methods for measuring the colour of paint films Part 3: Calculation of colour differences[S].
- [22] GB/T 9754—2007, 色漆和清漆 不含金属颜料的色漆漆膜的 20°、60°和 85°镜面光泽的测定[S].  
GB/T 9754—2007, Paints and varnishes—Determination of specular gloss of non-metallic paint films at 20°, 60°and 85°[S].
- [23] GB/T 1766—2008, 色漆和清漆 涂层老化的评级方法[S].  
GB/T 1766—2008, Paint and varnish—Rating schemes of degradation of coats[S].
- [24] 王艳艳, 宣卫芳, 王一临. 实验室光源暴露试验与户外环境试验相关性研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 49-52.  
WANG Yan-yan, XUAN Wei-fang, WANG Yi-lin. Study of the relativity between laboratory light sources exposure test and outdoor exposure test[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(6): 49-52.