

汽车高装饰性涂层在国内典型气候中的耐候性表现及分析

王纳新, 廖大政, 李博雅, 张馨月

(中国第一汽车股份有限公司技术中心, 长春 130011)

摘要: **目的** 选择合适的试验条件和方法提高汽车涂层的耐候性。**方法** 对比世界公认的汽车环境试验基准站的气候条件, 分析国内环境试验站进行自然曝晒试验的条件, 进一步分析人工加速老化试验和户外自然曝晒试验之间的规律性和相关性, 分析不同底材相同涂层的耐候性表现, 提出了对汽车高装饰性清漆及涂层的耐候性质量控制的建议。**结果** 在失光率方面, 人工加速老化试验 3000 h 与琼海(湿热)和敦煌(干热)地带自然曝晒 12 及 15 个月的结果的相关性较差(均小于 0.8), 与江津(酸雨)和漠河(寒冷)地带自然曝晒 12 及 15 个月的结果均出现负相关性, 数据波动较大。**结论** 对于考核汽车高装饰性涂层的清漆, 人工老化试验建议 3000~5000 h。自然曝晒试验至少应选择干热和湿热两个地域, 时间至少为 2 年。由于汽车产品的特殊性, 进行人工加速老化试验时需重点关注: ①试验条件的选择; ②试验过程要强化水分子对涂层的渗透作用; ③试验要模拟昼夜温差变化。

关键词: 高装饰性清漆; 耐候性; 相关性; 质量控制; 人工加速老化试验; 户外自然曝晒试验

中图分类号: TG174.46 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)04-0132-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.04.022

Weather Resistance and Analysis of Automobile Decorative Coating in Typical Domestic Climate

WANG Na-xin, LIAO Da-zheng, LI Bo-ya, ZHANG Xin-yue

(China Faw Co., Ltd, R & D Center, Changchun 130011, China)

ABSTRACT: The work aims to improve weather resistance of automobile coatings by selecting appropriate test conditions and methods. Universally accepted environmental benchmark test stand conditions were compared, natural exposure test conditions of domestic environment experimental station were analyzed, regularity and correlation between artificial accelerated aging test and natural outdoor exposure test were further analyzed, weather resistance of same coating with different substrates, and suggestions on quality control of high automobile decorative varnish and coating were proposed. In terms of light lost rate, 3000 h artificial accelerated aging test had poor correlation with 12 & 15 months natural exposure in Qionghai (damp and hot) and Dunhuang (dry and hot) (both < 0.8), and negative correlation with 12 and 15 months natural exposure in Jiangjin (acid) and Mohe (cold) with great fluctuation data. 3000~5000 hours artificial aging test is recommended to inspect automobile decorative coating varnish. At least two damp and hot as well as dry and hot zones are selected for natural exposure test to be conducted for at least 2 years. Due to particularity of automobile products, the artificial accelerated aging test shall focus on: (1) selection of test conditions; (2) strengthening permeation of water molecules to coating, humidity control and guarantee the moisture content

收稿日期: 2016-09-20; 修订日期: 2017-01-21

Received: 2016-09-20; Revised: 2017-01-21

作者简介: 王纳新(1969—), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为汽车涂装工程。

Biography: WANG Na-xin (1969—), Female, Master, Chief senior engineer, Research focus: automobile coating engineering.

in the coating in the coating during the test; (3) simulating day and night temperature difference change.

KEY WORDS: high decorative varnish; weather resistance; correlation; quality control; QUV test; natural outdoor exposure test

近年来，随着我国汽车工业飞速发展，国产车的出口份额也日益增加。所以，掌握汽车在各种服役环境下（包括极端恶劣运输环境）的涂层耐候性表现及可能出现的破坏现象，及时提出汽车涂装材料和工艺的应对措施，对提升自主品牌汽车的形象尤其重要。

材料耐候性常用的试验方法有：户外自然曝晒试验和人工加速老化试验。虽然人工加速老化试验条件可控，但因为引起涂层老化的因素很多，环境与材料的相互作用非常复杂，它只在一定程度上模拟和强化了自然界中影响材料老化的主要因素，如太阳辐射、温度和湿度等^[1]，所以不同的人工加速老化试验都有局限性和特殊性。

本文通过对不同底材上的高装饰性涂层进行户外自然曝晒试验和人工加速老化试验，分析两者之间的规律性和相关性，并分析不同气候条件下（如干热沙漠、湿热带、亚湿热带、热带雨林、丘陵地带及极地等气候）涂层可能出现的问题，为进一步提出涂装材料控制标准和服役不同地域的涂层标准做支撑。

1 试验

1.1 人工加速老化试验条件

采用美国 ATLAS 公司生产的 Ci5000 型氙灯耐候老化箱，辐照度（波长 340 nm）为 0.51 W/m²，日光滤光器用于老化试验的光源，箱体内空气温度为 (38±3) °C，黑标准温度为 (65±2) °C。采用连续运行的曝露方式，湿润周期/干燥周期为 18 min/102 min，干燥期间的相对湿度为 40%~60%。试验时间为 2000 h 和 3000 h。

1.2 户外自然曝晒试验条件

目前，世界范围内公认的汽车环境试验基准站有：美国迈阿密湿热环境基准站和美国凤凰城干热环境基准站。这两个试验站为 ASTM、SAE 等标准的制定和氙灯加速老化试验的设计提供基准数据。中国幅员辽阔，疆土跨越寒冷、寒温 I、寒温 II、暖温、湿热、亚湿热等多个气候带，服役车辆可以经历干热沙漠、湿热带、亚湿热带、热带雨林、丘陵地带及极地等多个气候条件。我国设有万宁、江津、拉萨、敦煌、漠河及海南琼海等典型气候环境试验站。其中，海南琼海站是与美国迈阿密条件较为相当的湿热环境站，新疆吐鲁番和甘肃敦煌站是与美国凤凰城条件较为

相当的干热环境站。试验站的条件比对见表 1^[2—4]。

表 1 国内外干热/湿热环境试验站的条件对比表
Tab.1 Comparing the condition of hot/humid environment experimental station both at domestic and overseas

试验站名称	迈阿密	海南琼海	凤凰城	新疆吐鲁番	甘肃敦煌站
环境类型	湿热	湿热	干热	干热	干热
地理位置	西经	东经	西经	东经	东经
	80°27'	110°28'	112°08'	89°12'	92°13'
	北纬	北纬	北纬	北纬	北纬
	25°52'	19°14'	33°54'	42°56'	39°53'
海拔高度/m	3	10	610	61.5	1139
平均温度/°C	23	24.5	22	17.4	10.8
平均最高温度/°C	32	40.2	39	42.4	24.9
平均最低温度/°C	15	9.1	8	-8.2	-9.3
平均降雨量/mm	1685	2077	255	16.4	35
平均相对湿度/%	78	87	37	27.9	41
平均辐照总量/(MJ·m ⁻²)	6588	5191	8004	7000	6560

本次户外自然曝晒试验主要考虑汽车服役所在气候环境特点，在国内典型气候环境试验站中，选择对汽车涂层老化有明显强化作用的试验站。具体所选择的试验站及其气候特征参数见表 2。

表 2 国内典型气候环境试验站的气候特征参数
Tab.2 Domestic climate characteristic parameters of typical climate environment experimental station

试验站	海拔高度/m	年平均温度/°C	年平均湿度/%	日照时数	辐射总量/(MJ·m ⁻²)	年降雨量/mm	雨水 pH 值
万宁站	12.3	24.6	86	2154	4826	1942	5.4
江津站	208.6	18.5	81	1392	2975	1203	4.6
拉萨站	3685.0	4.5	55	3100	7598	581	7.1
敦煌站	1139.0	10.8	41	3057	6560	35	7.3
漠河站	613.0	-1.8	66	1942	3385	491	6.5
海南站	10	24.5	87	2058	5191	2077	6.0

1.3 试验标准^[5—8]

人工加速老化试验满足 GB/T 1865—2009《色漆和清漆 人工气候老化和人工辐射暴露》。无背板式直接暴露于大气中的自然曝晒试验标准为 GB/T 9276—1996(IDT ISO2810)《涂层自然气候曝露试验方法》。两种试验的评价标准为 GB/T 1766—2008《色漆和清

漆 涂层老化的评级方法》和 GB/T 32088—2015《汽车非金属部件及材料氙灯加速老化试验方法》。

1.4 样品准备

试验样品为成熟度高的汽车用高端装饰性金属漆 7 种,其中基色漆颜色均为黑色,罩光漆不同。分别采用两种工艺制成试验样板,样板编号 1[#]—10[#]。其中,1[#]—7[#]试验样板在冷轧钢板上制备,涂装工艺按“底漆层—中涂层—基色漆层—罩光漆层”结构,主要施工工艺为:冷轧板—磷化—阴极电泳—烘干—中涂—烘干—面漆(基色漆—闪干—罩光漆)—烘干。8[#]—10[#]试验

样板在碳纤维复合材料(CFRP)上制备,涂装工艺按“底漆层—基色漆层—罩光漆层”,主要施工工艺为:CFRP 板—底漆—烘干—打磨—底漆—烘干—打磨—面漆(基色漆—闪干—罩光漆)—烘干。

2 结果与分析

2.1 试验结果

样板(1[#]—10[#])人工加速老化 2000 h 和 3000 h 的试验结果见表 3,在不同地域自然曝晒 12 个月和 15 个月的试验结果见表 4 和表 5。

表 3 2000 h 和 3000 h 人工加速老化试验结果
Tab.3 QUV experimental results of 2000 h and 3000 h

编号	底材	20°失光率/%				45°色差(ΔE)			
		2000 h	评级	3000 h	评级	2000 h	评级	3000 h	评级
1 [#]	Fe 板	1.4	0	2.72	0	0.72	0	12.96	5
2 [#]	Fe 板	2.4	0	2.69	0	0.71	0	4.12	2
3 [#]	Fe 板	3.6	1	4.93	1	0.20	0	11.79	4
4 [#]	Fe 板	0.2	0	7.01	1	0.58	0	8.16	3
5 [#]	Fe 板	3.1	1	6.13	1	0.76	0	12.37	5
6 [#]	Fe 板	2.0	0	2.5	0	0.20	0	5.73	2
7 [#]	Fe 板	2.8	0	6.57	1	0.20	0	6.34	3
8 [#]	CFRP 板	4.2	1	5.02	1	0.34	0	14.67	5
9 [#]	CFRP 板	4.0	1	8.03	1	0.64	0	4.42	2
10 [#]	CFRP 板	9.9	1	34.5	3	0.42	0	23.70	5

表 4 国内试验场自然暴晒 12 个月的试验结果
Tab.4 Domestic natural exposure test results of 12 months

编号	万宁		江津		拉萨		敦煌		漠河		琼海	
	失光率/%	ΔE*	失光率/%	ΔE*	失光率/%	ΔE*	失光率/%	ΔE*	失光率/%	ΔE*	失光率/%	ΔE*
1 [#]	0.77	0.3	2.3	1.2	3.23	1.37	3.73	1.03	10.3	1.73	2.3	0.4
2 [#]	0	0.6	1.2	0.8	4.3	1.27	5.37	1.2	13.4	1.33	5.13	0.87
3 [#]	-1.13	0.5	3.37	0.8	3.37	1	3.07	0.77	10.67	1.1	4.43	0.79
4 [#]	-0.5	0.7	2.57	1.23	2.23	1.07	3.5	1.23	4.53	1.1	2.13	1.1
5 [#]	-0.76	0.4	5.23	1.03	5.33	1.4	8.97	2.3	9.6	2.2	6.53	0.56
6 [#]	-2.23	0.4	0.37	0.63	3.23	1.23	3.47	1.07	9.43	1.03	2.6	0.43
7 [#]	-0.83	0.4	1.8	0.53	3.63	1.07	5.37	1.27	11.83	1.43	4.83	0.52
8 [#]							9.7	2.67	8.07	1.93	5.93	0.76
9 [#]							3.77	1.8	21.1	3.53	3.73	0.63
10 [#]							5.8	2.2	14.4	2	5.17	0.8

表 5 国内试验场自然暴晒 15 个月的试验结果
Tab.5 Domestic experimental stations natural exposure test results of 15 months

编号	万宁		江津		拉萨		敦煌		漠河		琼海	
	失光率/%	ΔE*	失光率/%	ΔE*	失光率/%	ΔE*	失光率/%	ΔE*	失光率/%	ΔE*	失光率/%	ΔE*
1 [#]	-1.1	0.77	1.6	0.87	2.9	1.6	3.3	1.2	3.43	1.33	2.6	0.57
2 [#]	3.37	1.17	1.67	0.77	4.73	1.13	3.43	1	3.06	0.67	6.6	1.1
3 [#]	1.5	1.53	2.43	0.27	2.6	0.97	3.96	1.67	4.03	1.53	6.13	0.92
4 [#]	-1	1.07	1.3	1.17	1.87	1.33	3.2	1.2	5.7	1.86	2.93	0.62
5 [#]	3	1.26	4.3	1.07	2.9	1.2	8.9	2.33	8.53	2.6	8.57	0.9
6 [#]	1.1	0.63	0.23	0.5	1.83	0.8	2.93	0.77	2.57	1.2	3.9	0.59
7 [#]	3.1	1	1.3	0.57	2.9	1.2	3.67	0.77	5.9	1.67	5.7	0.61
8 [#]							5.6	1.57	11.4	2.97	8.93	0.79
9 [#]							2.93	0.87	3.3	1.23	5.9	1.01
10 [#]							4.53	0.87	5.17	1.33	7.6	0.85

2.2 相关性分析方法

采用统计学中的斯皮尔曼等级相关系数原理，来估计两个变量 X 、 Y 之间的相关性^[9-10]，其计算方式为：

$$\rho=1-6\sum d_i^2/[n(n^2-1)] \tag{1}$$

式中： ρ 为两个变量 X 、 Y 之间的相关系数； n 为两个变量 X 、 Y 的元素个数，即试验所取样品的个数，本文取 7； d_i 为对两个变量 X 、 Y 每一个元素按升幂排序后 X_i 、 Y_i 的排位之间的差值。

本文以此原理分析人工加速老化试验和户外自然曝晒试验之间的相关性。根据表 3—4，相关性分析首先确定以下原则：（1）在选择变量时，对于试验结果差距不明显，或结果为负值的情况，不适合做相关性分析的变量；（2）对于几个相近的试验结果，排序可做并列处理。对原则（2）举例：1、2 试验结果相近，那么对 2 个结果对应的排序都记作 1.5；如果 1、2、3 试验结果都相近，那么 3 个结果的排序都记作 2。

根据上述原则选定 5 个变量，分别是江津 12/15 个月、敦煌 12/15 个月、漠河 12/15 个月、海南琼海 12/15 个月以及人工老化 3000 h，讨论两两之间的相关性。样品 1[#]—7[#]以 5 个变量按失光率结果的排序见表 6。

表 6 国内试验站 12/15 个月样品失光率排序
Tab.6 Ranking according to the rate of loss of light in domestic experimental stations for 12/15 months

编号	变量 1 (江津 12/ 15 个月)	变量 2 (敦煌 12/ 15 个月)	变量 3 (漠河 12/ 15 个月)	变量 4 (琼海 12/ 15 个月)	变量 5 (人工老化 3000 h)
1 [#]	4.5/4.5	3/3	4.5/1.5	2/1.5	2
2 [#]	2.5/4.5	5.5/3	7/1.5	5.5/5.5	2
3 [#]	6/6	1/6	4.5/4	4/5.5	4
4 [#]	4.5/1.5	3/3	1/5.5	2/1.5	6
5 [#]	7/7	7/7	2.5/7	7/4	6
6 [#]	1/1	3/1	2.5/1	2/3	2
7 [#]	2.5/1.5	5.5/5	6/5.5	5.5/4	6

2.3 分析

2.3.1 高装饰性涂层的耐候性分析

对于 Fe 板上涂装的 1[#]—7[#]样板，人工加速老化试验 2000 h 后，涂层失光率和色差均变化不大，综合等级均为 0 级。人工加速老化试验 3000 h 后，涂层色差变化明显，评级为 2—5 级；失光率层次分化较大，失光现象较明显，评级为 0—1 级，但未见涂层其他破坏现象。对比图见图 1 和图 2。

户外自然曝晒试验 12 个月至 15 个月是涂层失光率和色差波动较大的时期。曝晒 12 个月分不出顺序

的样品，但试验到 15 个月，其结果明显分开了。所以，这段时间不适合结束试验。数据显示，不同地域自然曝晒的 7 种样品经过 15 个月的试验后，样品优劣已经可以排序。

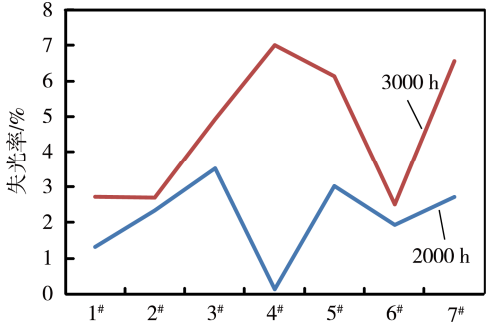


图 1 2000 h 和 3000 h 失光率曲线
Fig.1 Curve of rate of loss of light of 2000 h and 3000 h

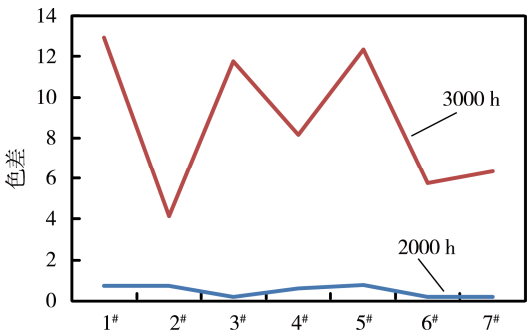


图 2 2000 h 和 3000 h 色差曲线
Fig.2 Curve of rate of aberration of 2000 h and 3000 h

2.3.2 不同底材采用相同涂料的耐候性分析

同一种清漆在 Fe 板和 CFRP 板上涂装，其涂层耐候性差别很大。5[#]—7[#]样品涂装在 Fe 板和 CFRP 板，进行人工加速老化试验 2000 h 和 3000 h 的失光率和色差见图 3—4。进行户外自然曝晒试验，敦煌、漠河和海南琼海 1 年的失光率和色差见图 5—6。

CFRP 本身为多空隙结构高分子材料，具有“高温下，高分子链的热运动加剧，分子间作用力减弱，自由体积增大，有利于水分进入”的特点^[11]。5[#]—7[#]样品涂装在 CFRP 板，受光照、温度和湿度的影响，

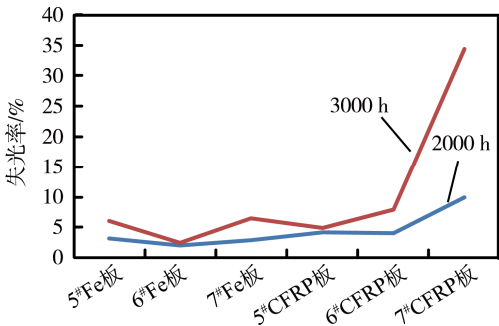


图 3 样品在不同基材上 2000 h 和 3000 h 失光率对比
Fig.3 Comparison of the rate of loss of light in 2000 h/3000 h of samples at different substrate

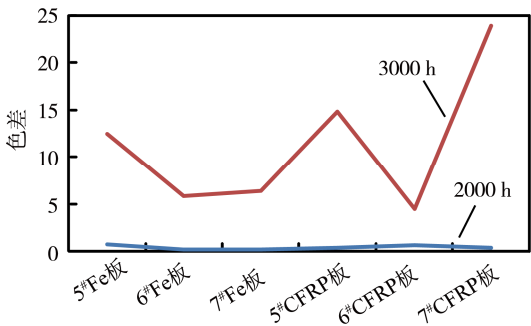


图 4 样品在不同基材上 2000 h 和 3000 h 色差对比
Fig.4 Comparison of the aberration in 2000 h/3000 h of samples at different substrate

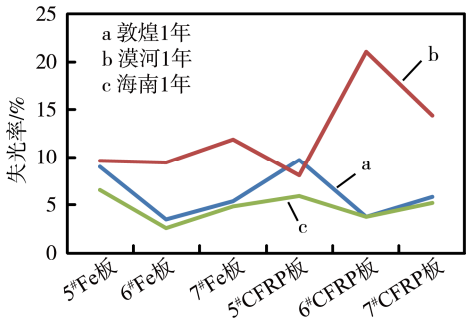


图 5 样品在不同基材上国内试验站失光率对比
Fig.5 Comparison of the rate of loss of light in domestic experimental stations of samples at different substrate

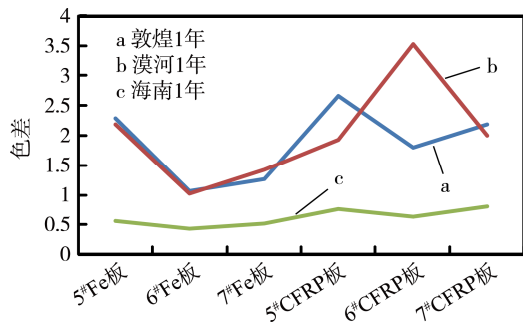


图 6 样品在不同基材上国内试验站色差对比
Fig.6 Comparison of the aberration in domestic experimental stations of samples at different substrate

水蒸气通过涂层向材料内部扩散的能力也加大, CFRP 底材会随着涂料一起老化, 底材树脂分子链的断裂和迁移, 最终导致涂层失光率和色差变化明显。根据图 5—6, 刚刚涂装完的 CFRP 试板表面平整光滑, 具有较好的光泽度和丰满度, 但随着其遭受光照、温度和湿度, 尤其骤冷骤热导致复合材料的热胀冷缩, CFRP 试板的涂层在 1~2 年后老化现象明显, 主要表现为涂层出现失光、色差, 显现碳纤维纹理, 表面不平整。所以, 建议目前 CFRP 主要应用于汽车的结构件, 最好不要应用于不易更换的装饰性部件。

2.3.3 人工加速试验与自然曝晒试验之间的相关性

以 3000 h 人工加速失光率结果排序为变量 X, 以江津等自然曝晒站的 12 个月及 15 个月排序结果为变

量 Y, 通过相关系数计算, 相关性结果见表 7。

表 7 人工加速试验与自然曝晒试验的相关性
Tab.7 Correlation between artificial accelerated test and natural exposure test

变量 Y	相关系数 ρ	
	12 个月	15 个月
江津	0.52	-0.05
琼海	0.47	0.21
敦煌	0.40	0.68
漠河	-0.23	-0.95

由表 7 可知, 在失光率方面, 人工加速老化试验 3000 h 与海南琼海 (湿热) 和敦煌 (干热) 地带自然曝晒 12 个月及 15 个月的结果的相关性较差 (均小于 0.8), 与江津 (酸雨) 和漠河 (寒冷) 地带自然曝晒 12 个月及 15 个月的结果均出现负相关性, 数据波动较大。因为国内汽车老化标准的缺失, 业内有些供应商和主机厂常采用其他行业 (如油漆、塑料和纺织等) 的标准, 而这些标准中规定的测试条件不一定适用于汽车行业^[12]。GB/T 1865 是适用于色漆和清漆材料曝露在氙灯装置及水、水蒸气下人工加速老化试验方法。其中温度设置和涂层接触水和水蒸气的周期设置与汽车产品的实际服役条件有很大差距, 所以, 为了模拟汽车涂层在户外各地服役期间的耐候性表现, 进行加速的人工老化试验, 除了选择合适的试验设备外, 选定合适的试验方法和试验条件更重要^[13]。适合汽车零部件和材料的人工加速老化试验方法和试验条件仍需要进一步开发和验证。

如果实验室考核汽车高装饰性清漆的耐候性, 建议试验时间为 5000 h, 至少 3000 h。采用户外自然曝晒试验至少应选择在干热和湿热两个地域^[14—16], 建议试验时间为 2 年以上, 至少为 2 年。

2.3.4 不同地域自然曝晒试验之间的相关性

以江津、敦煌等自然曝晒站的 12 个月及 15 个月失光率排序结果为变量 X 和变量 Y, 计算相关性结果见表 8。因为汽车产品为全天候各地域服役的产品, 受各种气候条件的影响, 耐候性的表现差异很大, 涂层对太阳光辐照度、降水量、温度、酸雨、灰尘等都很敏感。我国的万宁站代表了湿热海洋环境, 江津站代表了亚湿热酸雨环境, 拉萨站代表了高原低气压环境, 敦煌站代表了干热沙漠环境, 漠河站代表了寒冷低温环境, 海南琼海站代表了湿热乡村环境, 沈阳站代表了温带工业环境。对于汽车涂层的耐候性要求, 仅仅规定一地的自然曝晒试验是不全面的, 各个典型气候试验站的自然曝晒结果是不可替代的。如果受限于汽车试验周期和经费, 应该至少进行干热和湿热两个地域自然曝晒试验。对于特殊地区使用的车辆, 出

口到干冷、酸雨环境使用的车辆，一定要增加其特定地域自然曝晒试验。

表 8 不同地域自然曝晒试验站间的相关性
Tab.8 The correlation among the different regional natural exposure test

时间	相关系数 ρ					
	敦煌/ 江津	漠河/ 江津	漠河/ 敦煌	琼海/ 江津	琼海/ 敦煌	琼海/ 漠河
12个月	0.08	-0.24	0.26	0.37	0.79	0.46
15个月	0.66	0.29	0.73	0.47	0.55	0.12

3 结论

试验中发现，采用的人工老化试验方法与国内 6 个气候试验站的曝晒结果的相关性都不理想，不足以反映自然曝晒试验的老化现象。涂料好、底材好，但实际产品的耐候性结果不一定会好。一方面，对于考核汽车高装饰性涂层的清漆，人工老化试验建议 3000 h 或 5000 h。自然曝晒试验至少应选择在干热和湿热两个地域，时间至少为 2 年。

另一方面，对于汽车产品的特殊性，在进行人工加速老化试验时，在试验方法和试验条件的选择方面需重点关注：①干热和湿热两个试验条件的试验分别进行，这样模拟干热和湿热两个地域条件下的曝晒情况较为理想；②强化水分子对涂层的渗透作用，湿度可控且保证潮湿周期水分在涂层表面的停留时间；③模拟昼夜温差变化。

关于进一步延长试验时间的试验结果，笔者仍会继续分析，同时关于不同颜色的汽车涂层的讨论，还有待于进一步研究。

参考文献：

[1] 王纳新, 周胜蓝, 廖大政. 车身涂层的自然曝晒和人工加速老化试验[J]. 汽车工艺与材料, 2008(1): 12—16.
WANG Na-xin, ZHOU Sheng-lan, LIAO Da-zheng. Natural Exposure and Artificial Accelerated Aging Test of Automobile Coating[J]. Automobile Technology & Material, 2008(1): 12—16.

[2] 庄奕玲. 汽车涂层耐老化性能的研究[J]. 汽车技术, 2004(7): 26—30.
ZHUANG Yi-ling. Research of Automobile Coating Aging Resistance[J]. Automobile Technology, 2004(7): 26—30.

[3] 唐伦科. 自然曝露试验与加速腐蚀试验的相关性及防蚀设计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
TANG Lun-ke. The Anticorrosive Design and Research of the Correlation of Natural Exposure Test and the Accelerated Corrosion Test[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

[4] 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, et al. Auto Non-metallic Materials Laboratory Accelerated Ageing and Outdoor Natural Aging[J]. Guangdong Plastics,

2005(5): 44—46.

[5] GB/T 1865—2009, 色漆和清漆 人工气候老化和人工辐射暴露[S].
GB/T 1865—2009, Paints and Varnishes—Artificial Weathering and Exposure to Artificial Radiation— Exposure to Filtered Xenon-arc Radiation[S].

[6] 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].

[7] GB/T 1766—2008, 色漆和清漆 涂层老化的评级方法[S].
GB/T 1766—2008, Paints and Varnishes—Rating Schemes of Degradation of Coats[S].

[8] GB/T 32088—2015, 汽车非金属部件及材料氙灯加速老化试验方法[S].
GB/T 32088—2015, Accelerated Weathering Test Methods of Automotive Nonmetal Components and Materials Using a Xenon-arc Apparatus[S].

[9] 袁宏辉, 孙杏蕾, 张恒. 氙灯老化与自然曝晒测试所得颜料耐候性的相关性[J]. 中国涂料, 2009(12): 35—38.
YUAN Hong-hui, SUN Xing-lei, ZHANG Heng. Correlation of Weatherability Tested by Xenon Lamp Aging and Natural Exposure Method[J]. China Coatings, 2009(12): 35—38.

[10] 李慧连. 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(1): 30—33.
LI Hui-lian. Study on Correlation between Xenon Lamp Aging and Natural Exposure Methods of Automobile Instrument Panel Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014(1): 30—33.

[11] 危成英. 不同地区自然环境下 CFRP 复合材料的自然老化性能试验[J]. 华侨大学学报, 2010(31): 557—561.
WEI Cheng-ying. Natural Aging Performance Test of CFRP Composites in Different Natural Environment [J]. Journal of Huaqiao University, 2010(31): 557—561.

[12] 柳立志. 实验室加速老化试验与户外曝晒试验的对比研究[J]. 汽车工艺与材料, 2016(7): 49—52.
LIU Li-zhi. The Comparison of Laboratory Accelerated Aging Test and Outdoor Exposure Test[J]. Automobile Technology & Material, 2016(7): 49—52.

[13] 慕仙莲, 甘志宏, 王广超, 等. 环境因素对硅烷环氧杂化树脂涂层/LY12 铝合金间附着力时效性的影响分析[J]. 装备环境工程, 2015(6): 31—35.
MU Xian-lian, GAN Zhi-hong, WANG Guang-chao, et al. Impact of Environmental Factors on the Adhesion Aging of the Silane Epoxy Hybrid Resin Coating /LY12 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015(6): 31—35.

[14] 张晓东, 王俊, 揭敢新, 等. 干热环境下的汽车耐候性试验结果分析[J]. 汽车工艺与材料, 2015(10): 36—38.
ZHANG Xiao-dong, WANG Jun, JIE Gan-xin, et al. Analysis of the Automobile Weathering Test Results in Dry Environment[J]. Automobile Technology & Material, 2015(10): 36—38.

[15] 张晓东, 王俊, 揭敢新, 等. 乘用车海南湿热环境耐候性失效统计[J]. 汽车工艺与材料, 2015(9): 29—30.
ZHANG Xiao-dong, WANG Jun, JIE Gan-xin, et al. Automobile Weatherability Failure Statistics in Hainan Hot and Humid Environment [J]. Automobile Technology & Material, 2015(9): 29—30.

[16] 张宝正. 汽车零部件耐候性技术要求设定思路[J]. 装备环境工程, 2015(4): 150—153.
ZHANG Bao-zheng. Ideas of Weatherability Technology Requirements with Automobile Parts [J]. Equipment Environmental Engineering, 2015(4): 150—153.