

自然曝晒与加速老化试验下航空涂层失光率的当量关系研究

王德¹, 张泰峰¹, 杨晓华¹, 郅有柱²

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 海军 92853 部队, 辽宁 葫芦岛 125100)

摘要: **目的** 研究航空涂层失光率的当量加速关系。**方法** 针对飞机结构涂覆的航空涂层光泽度失效问题, 开展自然曝晒试验和实验室加速老化试验, 基于失光率的失效标准, 分析涂层老化行为规律。**结果** 建立了飞机涂层自然曝晒条件与实验室加速条件下的当量加速关系。**结论** 同类涂层试验件在自然曝晒试验与加速老化试验下的失光率变化趋势基本保持一致, 得到的两类涂层试样的加速老化当量关系函数可为建立实验室加速老化试验和自然曝晒试验之间的当量加速关系提供一定参考。

关键词: 当量关系; 失光率; 航空涂层

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.013

中图分类号: V255.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0082-05

Equivalent Relationship of Aviation Coatings Gloss Loss between Natural Exposure and Accelerated Aging Test

WANG De¹, ZHANG Tai-feng¹, YANG Xiao-hua¹, KUAI You-zhu²

(1. Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China; 2. Unit 92853 of Navy, Huludao 125100, China)

ABSTRACT: The paper aims to study on equivalent acceleration relation of gloss loss of aviation coatings. Aiming at the gloss failure of aviation coatings on aircraft structures, natural exposure test and laboratory accelerated aging test were carried out to analyze the aging behavior law of coatings based on the failure criterion of gloss loss. Equivalent acceleration relationship between natural exposure conditions and laboratory acceleration conditions of aircraft coatings was established. The general trend of gloss loss of similar coatings under natural exposure test and accelerated aging test is basically the same. The accelerated aging equivalence function of two kinds of coatings can provide some reference for establishing the equivalent accelerated relationship between laboratory accelerated aging test and natural exposure test.

KEY WORDS: equivalent relationship; gloss loss; aviation coatings

在飞机结构表面涂覆相应的涂层, 以保护金属免受服役环境的影响, 已经成为腐蚀防护与控制的有效手段^[1-4]。随着飞机服役年限的增长, 在环境因素特别是海洋环境因素的影响下, 飞机结构上广泛采用的有机类航空涂层不可避免地会发生多种理化

失效以及其他力学性能下降的现象, 进而丧失对金属的防护功能。涂层失效后, 腐蚀介质直接侵蚀金属表面, 引起飞机结构件腐蚀, 使得结构件使用寿命显著降低^[5-7]。

在实验室条件下开展飞机结构航空涂层的老化

收稿日期: 2020-01-02; 修订日期: 2020-02-21

Received: 2020-01-02; Revised: 2020-02-21

作者简介: 王德 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为装备的腐蚀与防护。

Biography: WANG De (1986—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: corrosion and protection of equipment.

失效行为研究已经成为一种常用的有效手段^[8-9]，实验室加速老化试验和自然曝晒试验是考验航空涂层防护性能的两种不同的试验方法，在二者之间建立可靠的当量加速关系，对于涂层防护性能评价、维修周期以及寿命预测具有重要意义^[10-13]。文中针对飞机结构表面的航空涂层，基于失光率的失效标准，建立飞机涂层自然曝晒与实验室加速老化条件下的当量加速关系。并通过试验验证其合理性。

1 试验

1.1 试验件制备

为考察航空涂层光泽度的失效性能，以某型飞机

主要受力构件所用的铝合金及合金钢材料为基材加工试验件，并在表面涂覆不同体系的涂层，试验件规格如图 1 所示。试验件类型及数量见表 1，并对两类涂层试验件进行编号。

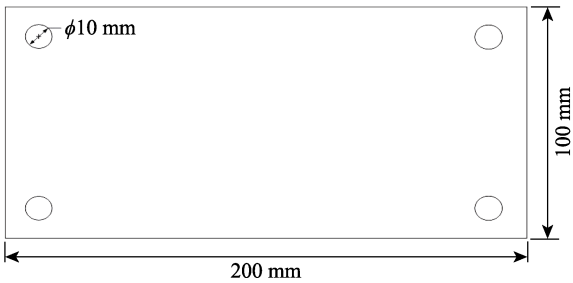


图 1 涂层试样
Fig.1 Coating sample

表 1 涂层试验件类型及数量
Tab.1 Type and quantity of coating test pieces

试验件类型	数量	材料	防护体系	试验件编号
第 I 类	12 件	铝合金	锌黄底漆+亚光面漆	LM01—LM12
第 II 类	12 件	合金钢	环氧底漆+亚光面漆	GM01—GM12

1.2 试验过程

为了模拟飞机在自然条件下地面停放时其表面涂层的光泽度失效过程，选择青岛地区某机场进行自然曝晒试验。每类试样各 6 件，用粗漆包线分别绑于试验支架上，将支架置于建筑物楼顶，并固定，曝晒角约为 45°。每 4 个月进行取样，进行失光率测量。

王鹏^[14]编制了青岛地区聚氨酯涂层加速试验谱，该谱能够比较真实地模拟青岛地区的气候特征。文中根据该加速老化试验谱进行老化加速试验，试验共开展 8 个周期。加速老化试验涂层试样与自然曝晒试验的涂层试样保持一致，每类试样各 6 件。在每周周期循环试验结束后，将试验件取出，清洗烘干，然后进行数据测量。

2 结果与讨论

2.1 基于失光率的涂层老化行为规律分析

测量仪器使用 XGP60 光泽度计，参考 GB/T 1766—2008^[15]对涂层表面 60°光泽度进行测量。在每个试样表面选择 3 处测试，并取平均值，失光率的计算为：

$$G = (A - B) / A \times 100\% \tag{1}$$

式中：G 为涂层的失光率；A、B 分别为老化前、后的光泽度。

自然曝晒试验与加速老化试验的涂层试样失光率测量结果见表 2，两类涂层试样的失光率曲线如图 2 所示。

表 2 自然曝晒与加速老化试验涂层试样失光率变化
Tab.2 Change of light loss rate of coating sample in natural exposure and accelerated aging test

自然曝晒/月	4	8	12	16	20	24	28	32
LM 失光率/%	3.1	15.75	25.7	35.3	40.7	60.2	68.6	74.2
GM 失光率/%	5.1	7.8	20.4	28.2	45.1	55.2	63.4	69.5
加速老化/周期	1	2	3	4	5	6	7	8
LM 失光率/%	5.3	13.1	14.5	16.2	30.9	35.8	59.2	79.5
GM 失光率/%	4.8	11.3	15.4	24.5	34.9	46.5	57.9	68.7

从图 2 中可以看出，两种试验下，I 类、II 类涂层试验件的失光率的变化趋势均属于先慢后快。同类涂层试验件在自然曝晒试验与老化加速试验下的失光率变化趋势基本保持一致，可以认为自然曝晒试验与加速老化试验之间具有一定相关性。

2.2 基于失光率的加速老化当量关系

通过三次函数对数据进行拟合后，拟合曲线比较符合失光率变化的趋势，说明拟合曲线能够较为真实地模拟失光率在试验周期内的总体变化情况，如图 3

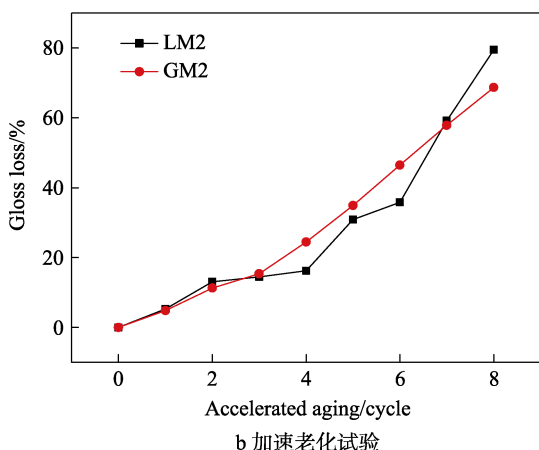
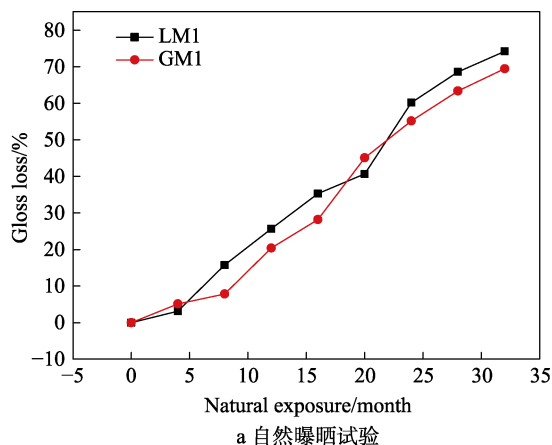


图2 I、II类试验件自然曝晒试验和加速老化试验下的失光率曲线

Fig.2 Light loss curve of class I and II test pieces under (a) natural exposure test and (b) accelerated aging test

所示。对比同类涂层在两种试验环境下的失光率变化曲线,自然曝晒试验中涂层试样的光泽度下降较快,失光率增长速率略微快于加速老化试验。自然曝晒试验失光率曲线比加速老化试验失光率曲线更“凸”,说明根据失光率这一指标来看,自然环境下涂层老化速率比实验室条件下老化速率更快。这也说明实验室条件的模拟自然条件的还原度同真实自然条件相比还存在一定的误差。

为分析其加速老化当量关系,将加速老化试验(周期)和自然曝晒试验的单位(月)统一划归为单位时间(h)。通过多次取样,计算达到同一失光率时,两种试验方法所需要的不同时间之间的比例关系,得到含有多个样本的当量关系点。再对当量加速关系点进行数据拟合,得到加速老化当量关系曲线,如图4所示。

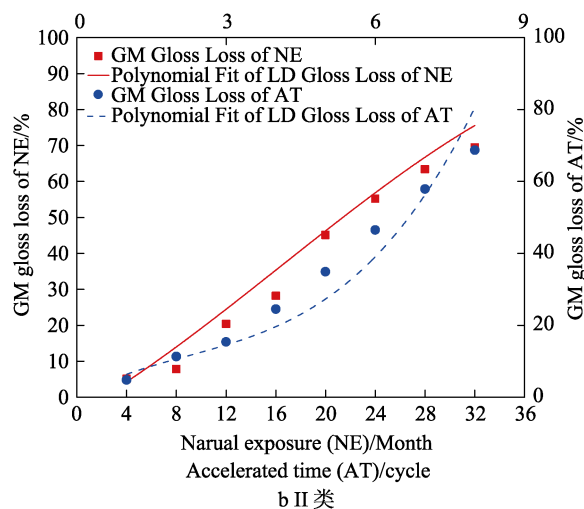
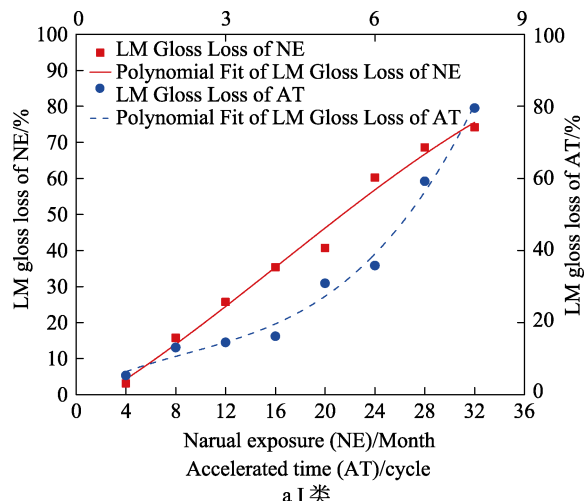


图3 两类涂层试样失光率拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of light loss rate of two kinds of coating samples: a) class I; b) class II

对数据进行处理后,通过对比各函数的拟合程度,发现通过 Fourier 的一阶函数进行拟合的程度较好, R-square 在 0.985 以上,因此选用该函数进行拟合。两类涂层试样采用的 Fourier 拟合函数形式为 $y=f(x)=a_0+a_1\cos x^w+b_1\sin x^w$,其中各类涂层试样的拟合函数系数见表3。

对 $f(x)$ 在时间上进行积分, x 为加速老化试验的试验小时数,当量于自然曝晒的时间为 t ,则 $t=\int_0^x f(x) dx$ 。即可据此通过加速试验时间来反向推算出当量的自然曝晒时间,可以为实际的涂层寿命评估提供事前的理论支撑,节省工作时间,提高评估效率。

表3 各涂层试样对应的拟合函数系数
Tab.3 Fitting function coefficients of each coating sample

涂层试样类型	a_0	a_1	b_1	w
I类涂层试样 LM	24.46	-0.05173	-4.725	0.5373
II类涂层试样 GM	15 550 000	-15 550 000	-16 030	0.000 249 3

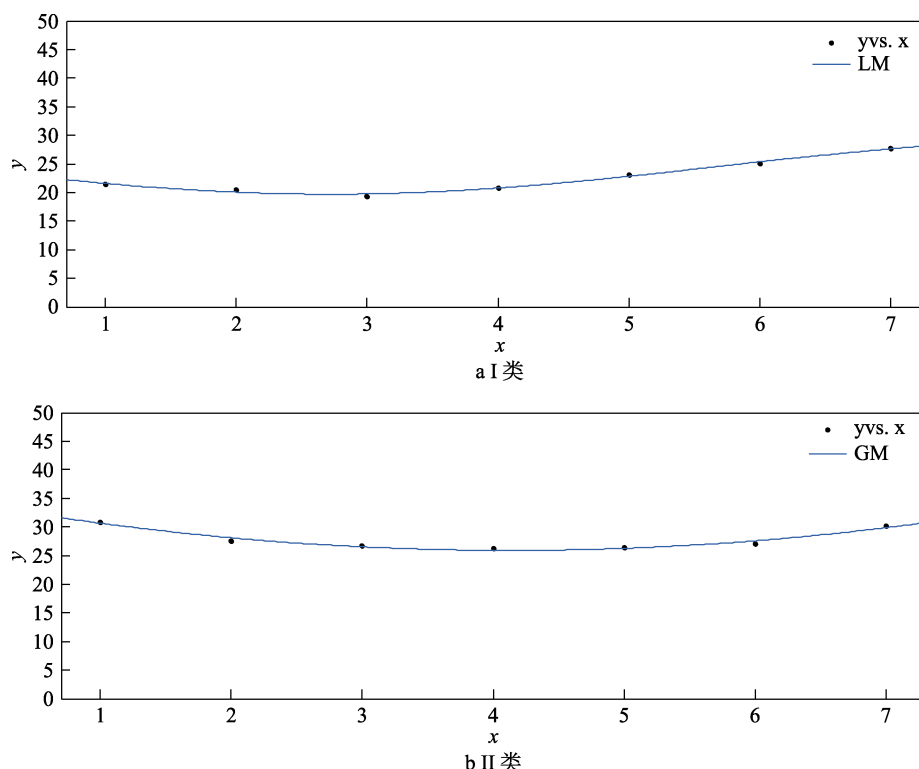


图 4 两类涂层试样失光率当量加速关系拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of equivalent acceleration relationship of two kinds of coating samples: a) class I; b) class II

3 结论

1) 通过开展自然曝晒试验和加速老化试验, 对不同老化周期下航空涂层的失光率进行了测量, 较为直观地观察两类涂层试样失光率的变化情况。根据失光率这一指标来看, 自然环境下涂层老化速率比实验室条件下老化速率更快。

2) 同类涂层试验件在自然曝晒试验与老化加速试验下的失光率变化总体趋势基本一致, 可以认为自然曝晒试验与加速老化试验之间具有相关性。通过取样拟合得到了两类涂层试验件在自然曝晒试验与实验室加速老化试验之间的当量关系函数, 据此可在实验室加速老化试验时间下当量得到自然曝晒试验的时间, 为研究实验室加速老化试验和自然曝晒试验之间的当量加速关系打下了基础。

参考文献:

- [1] 钱昂, 王鹏, 谭晓明, 等. 有机涂层老化失效研究及关键技术问题[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(S): 84-90.
- QIAN Ang, WANG Peng, TAN Xiao-ming, et al. Current Status and Key Technology of Research on Aging Failure of Organic Coating[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(S): 84-90.
- [2] 苏景新, 邹阳, 陈康敏, 等. 民航客机 7075-T6 铝合金壁板的腐蚀特征与机制[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 91-96.

SU Jing-xin, ZOU Yang, CHEN Kang-min, et al. Corrosion Mechanism and Characteristic of 7075-T6 Aluminum Alloy Panel on Airline Aircraft[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 91-96.

- [3] GHASEMI A, SHAHRABI T, OSKUIE A, et al. Effect of Heat Treatment on Corrosion Properties of Sol-gel/titania-cerita Nanocomposite Coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 30(504): 237-242.
- [4] 刘曼卿, 徐元铭, 刘新灵. 载荷与腐蚀环境耦合作用下防护涂层的寿命预测模型研究[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(3): 151-155.
- LIU Man-qing, XU Yuan-ming, LIU Xin-ling, et al. Research on Service Life Prediction Models of Coatings under Coupled Effect of Load and Corrosion Environment[J]. Failure Analysis and Prevention, 2015, 10(3): 151-155.
- [5] 卢琳, 胡建文, 李晓刚, 等. 光老化对丙烯酸聚氨酯/钢板界面附着力的影响[J]. 复合材料学报, 2011, 28(2): 94-99.
- LU Lin, HU Jian-wen, LI Xiao-gang, et al. Effect of Photo Degradation on the Adhesion at Acrylic Polyurethane Varnish/Steel Interface[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2011, 28(2): 94-99.
- [6] GANESAN A, YAMADA M, FUKUMOTO M. The Effect of CFRP Surface Treatment on the Splat Morphology and Coating Adhesion Strength[J]. J. Therm. Spray Technol., 2014, 23(1-2): 236-244.
- [7] 杨小奎, 张涛, 张世艳, 等. 环氧富锌涂层对 AZ91D 镁合金的腐蚀防护能力研究[J]. 装备环境工程, 2014,

- 11(1): 18-23.
- YANG Xiao-kui, ZHANG Tao, ZHANG Shi-yan, et al. Research on the Corrosion Protection Properties of Zn-rich Epoxy Coating Provided for AZ91D Magnesium Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 18-23.
- [8] NI L L, CHEMTOB A, BARGHORN C, et al. Direct-to-Metal UV-cured Hybrid Coating for the Corrosion Protection of Aircraft Aluminium Alloy[J]. Corrosion Science, 2014, 89: 242-249.
- [9] 蔡建平, 刘明, 安英辉. 铝合金防护涂层老化动力学研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(3): 256-261.
- CAI Jian-ping, LIU Ming, AN Ying-hui. Degradation Kinetics of Protective Coating for Aluminum Alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(3): 256-261.
- [10] 谭晓明, 王鹏, 王德, 等. 基于电化学阻抗的航空有机涂层加速老化动力学规律研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 5-8.
- TAN Xiao-ming, WANG Peng, WANG De, et al. Accelerated Aging Dynamic Rules of Aeronautic Organic Coating Based on Electrochemical Impedance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(1): 5-8.
- [11] 王晶晶, 董士刚, 叶美琪, 等. 环氧涂层室外暴晒和室内加速老化试验相关性研究[J]. 表面技术, 2006, 35(1): 36-39.
- WANG Jing-jing, DONG Shi-gang, YE Mei-qi, et al. Correlation between Outdoor-exposure and Indoor-accelerated Ageing Test for Epoxy Coating[J]. Surface Technology, 2006, 35(1): 36-39.
- [12] EVANS M. A Statistical Degradation Model for the Service Life Prediction of Aircraft Coatings: With a Comparison to an Existing Methodology[J]. Polymer Testing, 2012, 31(1): 46-55.
- [13] 周立建, 穆志韬, 邢玮, 等. 基于灰色神经网络的有机涂层寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 62-65.
- ZHOU Li-jian, MU Zhi-tao, XING Wei, et al. Study of Service Life Prediction of Organic Coatings Based on Grey Neural Network[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 62-65.
- [14] 王鹏, 金平, 谭晓明, 等. 基于失光率的飞机涂层自然曝晒与室内加速老化试验当量加速关系[J]. 航空材料学报, 2015, 35(6): 77-82.
- WANG Peng, JIN Ping, TAN Xiao-ming, et al. Accelerated Equivalent Relationship between Natural Exposure and Accelerated Experiments of Aircraft Coating Based on Gloss Loss[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(6): 77-82.
- [15] 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].