

环境效应与防护

几种表面防护体系耐盐雾性能研究

李超

(中航通飞华南飞机工业有限公司, 广东 珠海 519040)

摘要: **目的** 通过对比实验室加速腐蚀试验结果, 获得耐盐雾腐蚀性能最佳的表面防护体系。**方法** 选用2024铝合金的几种不同表面防护体系, 进行盐雾腐蚀试验。通过宏观腐蚀形貌和涂层失光率变化来分析判定表面防护体系耐腐蚀性能, 获得抗腐蚀性能优异的表面防护体系。**结果** 综合内外部防护体系宏观腐蚀形貌和失光率情况来看, 阿洛丁氧化和所配套的三套涂层系统的盐雾适应性较差。**结论** 内部防护体系推荐采用铬酸阳极化+10P4-X底漆防护体系; 外部防护体系推荐采用铬酸阳极化+10P20-X底漆+ECL面漆防护体系。

关键词: 腐蚀; 表面防护; 盐雾试验; 铝合金

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.11.016

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)11-0103-05

Salt Spray Corrosion Resistance of Several Surface Protection Systems

LI Chao

(AVIC General Huanan Aircraft Industry Co. Ltd., Zhuhai 519040, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain a surface protection system with the best salt spray corrosion resistance by comparing the results of accelerated corrosion tests in the laboratory. Salt spray corrosion test was carried out by several different surface protection systems of 2024 aluminum alloy. The corrosion resistance of the surface protection system was analyzed and determined by the macroscopic corrosion morphology and the change in the loss rate of the coating to obtain a surface protection system with excellent corrosion resistance. According to the macroscopic corrosion morphology and gloss loss rate of the internal and external protection systems, the salt spray adaptability of alodine oxidation and three matching coating systems was poor. Chromic anodization + 10P4-X primer protection system is recommended to be used as the internal protection system and chromic anodization + 10P20-X primer + ECL topcoat protection system is recommended to be used as the external protection system.

KEY WORDS: corrosion; surface protection; salt spray test; Al alloy

表面防护技术是利用化学/电化学的方法或者物理方法, 在结构材料表面形成金属或非金属防护层, 使结构材料表面获得本体材料不具备的优异性能, 具备比本体材料更优的耐腐蚀能力、抗高温氧化能力、耐磨损能力, 或赋予结构材料表面特种功能或更好的装饰特性等。结构的破坏往往从材料的表面损伤开

始, 如腐蚀、磨损、高温氧化直至疲劳断裂。采用适当的表面防护技术, 可按需改善结构材料的表面性能, 从而有效地延长结构使用寿命^[1], 节约资源, 保护环境。水陆两栖飞机由于使用环境恶劣, 需要采用先进的表面防护技术, 在结构材料表面形成防护屏障, 最大限度地减少环境的危害, 提高水陆两栖飞机

收稿日期: 2020-05-12; 修订日期: 2020-06-03

Received: 2020-05-12; Revised: 2020-06-03

作者简介: 李超(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞机结构腐蚀防护与控制。

Biography: LI Chao (1984—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: corrosion protection and control of aircraft structure.

的结构完整性、使用寿命和可靠性。

文中通过分析某水陆两栖飞机的工作环境及其防护体系失效的特点^[2-3]，以涂层防护体系失效的试验方法^[4-9]为基础，选取腐蚀环境中较为苛刻的因素——盐雾，选用飞机结构最常用的 2024 铝合金为基材，开展用于飞机结构内外表面的不同防护体系的耐盐雾对比试验，获得耐盐雾腐蚀性能最优的表面防护体系。

1 试验

1.1 材料

试验选用 2024-T351 铝合金涂层平板试件 9 组（共 27 件），规格为 200 mm×100 mm×1.5 mm。其中内部防护体系 5 组，详见表 1；外部防护体系 4 组，详见表 2。试验前，在所有试件正反面预制相互垂直、穿透涂层的“十”字划痕。

表 1 2024 铝合金内部防护体系试件清单
Tab.1 List of internal protection system test pieces for 2024 aluminum alloy

序号	试件编号	防护体系	数量
1	G 1-3	阿洛丁+TB-X 底漆	3
2	H 1-3	铬酸阳极化+TB-X 底漆	3
3	J 1-3	硫酸阳极化+TB-X 底漆	3
4	K 1-3	微弧氧化+TB-X 底漆	3
5	Q 1-3	铬酸阳极化+10P4-X 底漆	3

表 2 2024 铝合金外部防护体系试件清单
Tab.2 List of external protection system test pieces for 2024 aluminum alloy

序号	试件编号	防护体系	数量
1	A 1-3	阿洛丁+10P20-X 底漆+ECL 面漆	3
2	B 1-3	铬酸阳极化+10P20-X 底漆+ECL 面漆	3
3	I 1-3	铬酸阳极化+ TB-X 底漆+ TS-X 面漆	3
4	L 1-3	微弧氧化+TB-X 底漆+TS-X 面漆	3

1.2 目的和内容

试验的目的为优选出飞机结构内、外部耐盐雾腐蚀性能优异的防护体系，能区分出各防护体系的性能

优劣即停止试验。试验采用逐步加重腐蚀环境的加速腐蚀试验方法，依次选用 3 周期中性盐雾+3 周期酸性盐雾+4 周期模拟海水盐雾，进行共计 10 周期的逐步严苛的加速腐蚀试验，优选获得飞机结构内、外部抗腐蚀性能更优的表面防护体系。

1.3 盐雾试验条件

盐雾试验条件见表 3，模拟海水成分见表 4。

表 3 盐雾试验条件
Tab.3 Conditions of salt spray test

序号	项目	要求
1	温湿度	30~40 °C, 98%±1%
2	盐雾条件	中性 5% NaCl 盐雾 酸性 5% NaCl (pH=3.5~4.5) 盐雾 模拟海水盐雾
3	盐雾沉降量	(1~2) mL/(80 cm ² ·h)
4	循环暴露周期	7 d
5	试验周期	3 周期中性盐雾+3 周期酸性盐雾+ 4 周期模拟海水盐雾
6	试验方法	ASTM B117

表 4 模拟海水成分
Tab.4 Composition of simulated seawater

组分	成分	含量
A	MgCl ₂ ·6H ₂ O	3889 g
A	CaCl ₂	405.6 g
A	SrCl ₂ ·6H ₂ O	14.8 g
A	蒸馏水/去离子水	稀释 A 组分盐至 7L-A 溶液
B	KCl	486.2 g
B	NaHCO ₃	140.7 g
B	KBr	70.4 g
B	H ₂ BO ₃	19.0 g
B	NaF	2.1 g
B	蒸馏水/去离子水	稀释 B 组分盐至 7L-B 溶液

注：人工海水三组分配制体积比例为：5 L 5%NaCl 溶液+200 mL A 溶液；100 mL B 溶液+ 100 mL HAc +9.8 L 去离子水；10 L 5%NaCl 溶液

1.4 试验流程

盐雾加速腐蚀试验流程如图 1 所示。

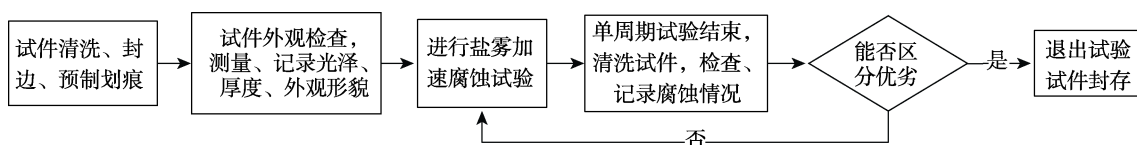


图 1 盐雾加速腐蚀试验流程
Fig.1 Process of accelerated corrosion test of salt spray

2 试验结果

为了最大限度地压缩试验周期，尽快优选出耐盐雾性能更优的飞机结构内、外部防护体系，试验选用依次严苛的中性-酸性-模拟海水盐雾。9 组防护体系同步启动试验，采用周期循环盐雾试验-淘汰模式，耐盐雾性能较差体系在失效后提前退出试验，各防护体系耐盐雾性能由劣到优分出优劣即停止试验。各防护体系经过 10 周期（依次使用 3 周期中性盐雾+3 周期酸性盐雾+4 周期模拟海水盐雾）的循环盐雾试验后，根据防护体系的宏观腐蚀形貌和腐蚀

扩展情况，优选出耐盐雾腐蚀性能最佳的表面防护体系。

内部防护体系加速腐蚀 10 周期后宏观腐蚀情况见表 5，内部防护体系耐盐雾性能最优的 Q 体系 10 周期循环盐雾试验后的宏观腐蚀形貌如图 2 所示。其中，耐盐雾性能较差的 G 和 K 体系分别在完成前 4 个和 5 个周期的循环盐雾试验后，涂层就发生大面积鼓泡，完全丧失防护能力。确认其耐盐雾腐蚀性能低劣，即提前退出试验，优先淘汰 G 和 K 体系。其余 3 个体系在同步完成 10 个周期的试验分出优劣后停止试验。

表 5 内部防护体系试件加速腐蚀 10 个周期后试验结果

Tab.5 Test results of test pieces used for internal protection systems after 10 cycles of accelerated corrosion test

编号	防护体系	试验周期	试验结果	结论
G 1-3	阿洛丁+ TB-X 底漆	4	正反面密集鼓泡，正面直径 $d \leq 2$ mm，反面 $d \leq 5$ mm。 封边漆剥落，局部鼓泡破裂露出基材	涂层已失效， 退出试验
H 1-3	铬酸阳极化+ TB-X 底漆	10	正面“十”字线出密集鼓泡（ $d \leq 1$ mm），正反面密布 多处小鼓泡（ $n > 20$ 个， $d \leq 0.5$ mm）	涂层开始失效，基材 未见腐蚀发生
J 1-3	硫酸阳极化+ TB-X 底漆	10	正、反面密集鼓泡（ $d \leq 0.5$ mm），局部鼓泡较大 （6 个， $d \leq 1$ mm）	涂层开始失效，基材 未受腐蚀
K 1-3	微弧氧化+ TB-X 底漆	5	正反两面均密布小鼓泡（ $d \leq 0.5$ mm），K2、K3 反面密集 鼓泡（ $d \leq 6$ mm），部分鼓泡破裂并露底，分化明显，可见 微量颜料粒子	涂层失效，基体未腐 蚀，退出试验
Q 1-3	铬酸阳极化+ 10P4-X 底漆	10	正面局部出现极小鼓泡（ $d \leq 0.2$ mm），其余区域未见异常	涂层局部出现腐蚀 迹象，基体未受腐蚀

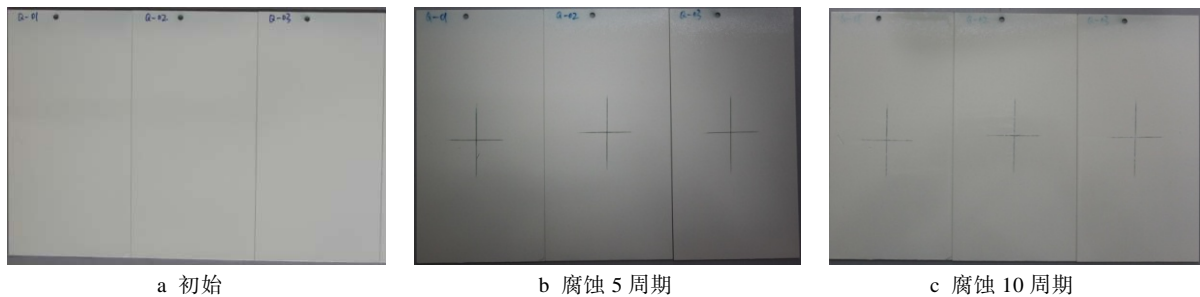


图 2 Q1—3 试件加速腐蚀 10 周期照片

Fig.2 Photos of test pieces Q1—3 after 10 cycles of accelerated corrosion test:
a) original; b) after 5 cycles of corrosion; c) after 10 cycles of corrosion

外部防护体系加速腐蚀 10 周期后宏观腐蚀情况见表 6。外部防护体系耐盐雾性能最佳的 B 体系 10 周期循环盐雾试验后的宏观腐蚀形貌如图 3 所示。耐盐雾性能较差的 A 体系经过前 4 个周期的盐雾试验后，涂层鼓泡失效，退出试验，优先淘汰 A 体系。其余 3 个体系同步完成 10 个周期的盐雾试验后停止试验。

3 结果分析

9 组 2024 铝合金平板试件加速腐蚀 10 个周期后，各防护体系呈现出不同的耐盐雾优劣性能。分别对照

各防护体系宏观腐蚀形貌和表征涂层损伤程度的失光率变化曲线，最终得出防腐蚀性能最佳的表面防护体系。内部表面防护体系失光率随试验时间的变化曲线如图 4 所示。外部表面防护体系失光率随试验时间的变化曲线如图 5 所示。

从图 4 中可以看出，内部防护 Q 体系（铬酸阳极化+10P4-X 底漆）10 周期盐雾试验后失光率控制在 10% 以内，呈现出优异的耐盐雾腐蚀性能。H 体系（铬酸阳极化+TB-X 底漆）、J 体系（硫酸阳极化+TB-X 底漆）10 周期失光率分别在 10% 和 30% 左右，H 体系整体偏大一些。这两个体系耐盐雾性能也相对较优。G 体系（阿洛丁氧化+ TB-X 底漆）和 K 体系（微

表6 外部防护体系试件加速腐蚀10个周期后试验结果

Tab.6 Test results of test pieces used for external protection systems after 10 cycles of accelerated corrosion test

编号	防护体系	试验周期	试验结果	结论
A 1-3	阿洛丁+ 10P20-X底漆+ECL面漆	4	正反面密集鼓泡, 正面直径 $d \leq 1$ mm, 反面多处 ($n > 10$) 鼓泡较分散, 反面鼓泡 $d \leq 3$ mm	涂层开始失效, 退出试验
B 1-3	铬酸阳极化+ 10P20-X底漆+ECL面漆	10	试片正面局部鼓泡 ($d \leq 1$ mm), 反面正常	涂层局部鼓泡, 基材未见腐蚀发生
I 1-3	铬酸阳极化+ TB-X底漆+TS-X面漆	10	正、反面密集鼓泡 ($d \leq 0.2$ mm), 正面触摸有颗粒感, 反面有少量 $d \leq 0.5$ mm 较大鼓泡	涂层出现大面积微小鼓泡, 基体未发生腐蚀
L 1-3	微弧氧化+TB-X底漆+ TS-X面漆	10	L1、L2 正面均有较多 (8个) 大鼓泡 ($d \leq 6$ mm), 反面有较多 (10个) 分散分布的超大泡 ($d \leq 17$ mm), L3 正面有多处 (>20个) 大鼓泡 ($d \leq 9$ mm), 反面呈月牙型集中鼓泡 ($d \leq 6$ mm)	涂层出现大面积鼓泡, 基体未受腐蚀

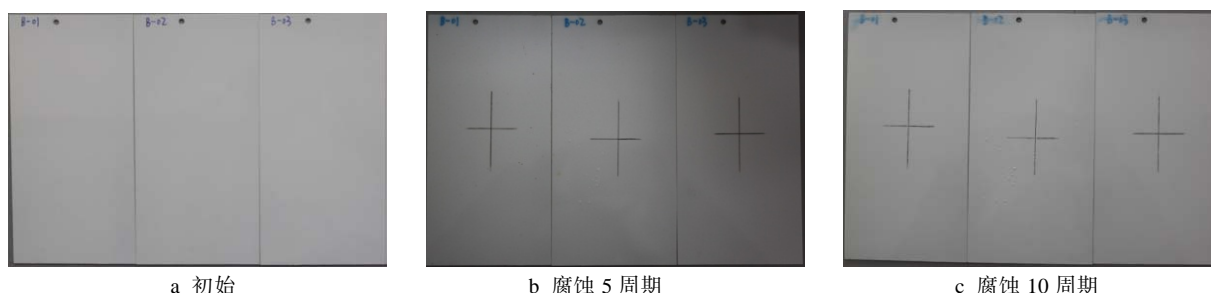


图3 B1—3 试件原始、5、10周期照片

Fig.3 Photos of test pieces B1—3 of original state and after 5 and 10 cycles of corrosion: a) original, b) after 5 cycles of corrosion; c) after 10 cycles of corrosion

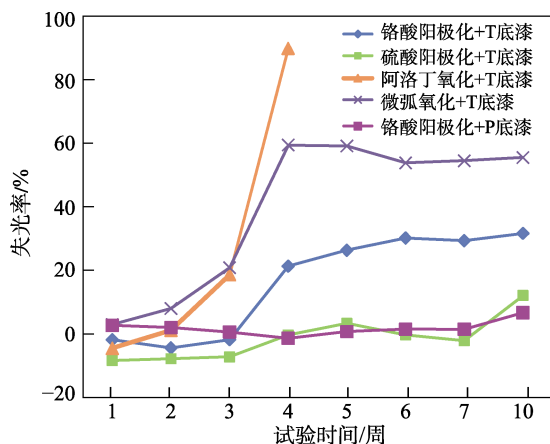


图4 内部防护体系10周期试验失光率变化曲线
Fig.4 Curves of loss rate of internal protection systems in 10 cycles of test

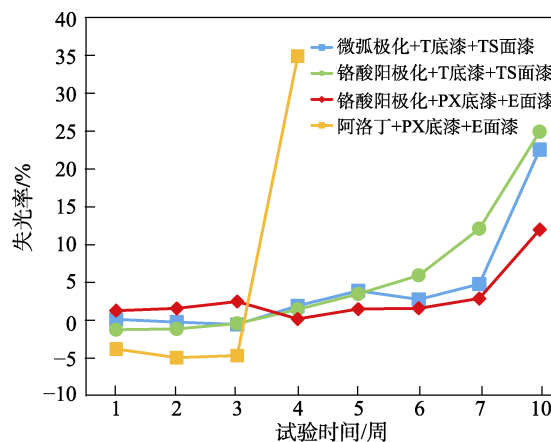


图5 外部防护体系10周期试验失光率变化曲线
Fig.5 Curves of loss rate of external protection systems in 10 cycles of test

弧氧化+TB-X底漆) 仅在3周期盐雾试验后失光率剧增至20%, G体系4周期盐雾试验后失光率高达90%, K体系失光率近60%。参照涂层失光老化判定标准^[10], 其等级分别达到5级(完全失光)和4级(严重失光), H、J两个防护体系失光等级评定均 ≤ 2 级(轻微失光), Q体系失光等级为1级(很轻微失光)。

由图5可知, 外部防护B体系(铬酸阳极化+10P20-X底漆+ECL面漆)10周期盐雾试验后失光率为12%左右, 失光等级为1级(很轻微失光), 该体系耐盐雾腐蚀性能较优。I体系(铬酸阳极化+TB-X

底漆+TS-X面漆)和L体系(微弧氧化+TB-X底漆+TS-X面漆)10周期试验后失光率基本相当, 失光评定等级均为 ≤ 2 级(轻微失光)。而耐盐雾腐蚀性能较差的A体系(阿洛丁+10P20-X底漆+ECL面漆)仅在4个周期试验后失光率就达到了35%, 失光评定等级为3级(明显失光), 其盐雾耐受性能难以令人满意。

结合试件宏观腐蚀形貌, G、K内部防护体系耐盐雾腐蚀性能较差, 仅在中性盐雾腐蚀3周期后, 涂层就呈趋势性大范围鼓泡, 涂层开始失效, 腐蚀损伤甚至延伸至表处层。外部防护A体系经过4周期的

盐雾试验, 涂层也出现明显的鼓泡, 涂层已彻底失去防护能力。综合内外部防护体系宏观腐蚀形貌和失光率情况来看, 阿洛丁氧化和所配套的三套涂层系统的盐雾适应性较差, 对于在工作环境中经常接触到盐雾的水陆两栖飞机而言, 应避免大面积选用阿洛丁处理和与其配套的上述防护体系, 更推荐选用对耐盐雾腐蚀有明显优势的铬酸阳极化配套的涂层防护体系。此外, 随着涂层失光率的增大, 试件表面发生明显的鼓泡、开裂。随着失光率剧烈变化, 涂层鼓泡数量和面积显著增加, 局部剥落露出表处层。不同表面处理防护体系的宏观腐蚀结果和涂层体系失光率随时间变化曲线相吻合。综合考察各涂层体系宏观腐蚀形貌和失光率, 涂层体系宏观腐蚀进程近似正相关于涂层失光率。

4 结论

9 组试件经过 10 周期的盐雾加速腐蚀试验, 各防护体系耐盐雾腐蚀性能如下:

1) 内部表面防护体系的防腐性能优劣排序为: Q 体系 (铬酸阳极化+10P4-X 底漆)、J 体系 (硫酸阳极化+TB-X 底漆) > H 体系 (铬酸阳极化+TB-X 底漆) > K 体系 (微弧氧化+TB-X 底漆) > G 体系 (阿洛丁+TB-X 底漆)。综合表面处理层膜层厚度和疲劳性能因素, 内部防护体系推荐采用 Q 体系。

2) 外部表面防护体系的防腐性能优劣排序为: B 体系 (铬酸阳极化+10P20-X 底漆+ECL 面漆) > I 体系 (铬酸阳极化+TB-X 底漆+TS-X 面漆) > L 体系 (微弧氧化+TB-X 底漆+TS-X 面漆) > G 体系 (阿洛丁+10P20-X 底漆+ECL 面漆)。外部防护体系推荐采用 B 体系。

参考文献:

- [1] DALE M. Protective Finishing Systems for Navy Aircraft[J]. *Advanced Materials & Processes*, 1999(4): 31.
- [2] 李金桂. 腐蚀控制系统工程学概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
LI Jin-gui. An Introduction to System Engineering Science for Corrosion Control[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [3] 陈群志, 程宗辉, 席慧智, 等. 飞机铝合金结构连接部位的腐蚀行为[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2007, 27(6): 90-93.
- [4] 刘文斑, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2002, 28(1): 109-112.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai, CHEN Qun-zhi, et al. Accelerated Corrosion Environmental Spectrums for Testing Surface Coatings of Critical Areas of Flight Aircraft Structures[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2002, 28(1): 109-112.
- [5] 张琳, 王振尧, 赵春英, 等. 碳钢和耐候钢在盐雾环境下的腐蚀行为研究[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(1): 1-6.
ZHANG Lin, WANG Zhen-yao, ZHAO Chun-ying, et al. Study on Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Salt Spray Test[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(1): 1-6.
- [6] 李星, 周人歌, 陈津虎, 等. 钢和硬铝的加速腐蚀试验研究[J]. *装备环境工程*, 2013, 10(6): 5-8.
LI Xing, ZHOU Ren-ge, CHEN Jin-hu, et al. Study on Accelerated Corrosion Testing of Steel and Duralumin[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, 10(6): 5-8.
- [7] 陈群志, 孙祚东, 韩恩厚, 等. 典型飞机结构加速腐蚀试验方法研究[J]. *装备环境工程*, 2004, 1(2): 13-17.
CHEN Qun-zhi, SUN Zuo-dong, HAN En-hou, et al. Study on Accelerated Corrosion Test Methods of Typical Aircraft Structure[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2004, 1(2): 13-17.
- [8] 王艳艳, 舒畅, 李超. 自然环境谱转化为加速试验环境谱的方法[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(1): 34-38.
WANG Yan-yan, SHU Chang, LI Chao. Method for Conversion of Natural Environmental Spectra to Accelerated Test Environmental Spectra[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(1): 34-38.
- [9] 郭军科, 于金山, 彭翔, 等. 加速腐蚀实验研究碳钢的大气腐蚀行为[J]. *表面技术*, 2014, 43(4): 68-73.
GUO Jun-ke, YU Jin-shan, PENG Xiang, et al. Study on the Atmospheric Corrosion Behavior of Carbon Steel Using Accelerated Corrosion Test[J]. *Surface Technology*, 2014, 43(4): 68-73.
- [10] GB/T 1766—1995, 色漆和清漆涂层老化的评级方法[S].
GB/T 1766—1995, Paint and Varnish—Rating Schemes of Degradation of Coats[S].