

基于模糊评价的结构涂层腐蚀综合评定

刘学君¹, 杨晓华¹, 马广婷², 赵晨¹

(1. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 将模糊评价理论应用于涂层腐蚀的综合评定, 分析了影响涂层腐蚀的主要因素, 建立了基于模糊评价的涂层腐蚀分析模型, 对涂层腐蚀进行了二级综合评价。通过试验验证, 该方法与工程实际符合程度较好, 能更好地考虑全部指标信息, 具有更加准确的优点。

关键词: 模糊评价; 涂层; 腐蚀; 两两对比法

中图分类号: V216.5⁺7; TG174.46 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)06-0104-05

Comprehensive Evaluation of Structure Coating Corrosion Based on Fuzzy Evaluation

LIU Xue-jun¹, YANG Xiao-hua¹, MA Guang-ting², ZHAO Chen¹

(1. Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China;

2. Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract: Fuzzy assessment theory was applied to comprehensive evaluation of corrosion of structure coating. The major influencing factors of corrosion of structure coating were analyzed; analysis model of corrosion of structure coating based on fuzzy assessment was established; and corrosion of structure coating was evaluated by two-grade fuzzy comprehensive evaluation. The method was verified through experiments. The results showed that this method is suitable to practical projects; the information of evaluation indexes is better considered; and this method has the advantages of higher accuracy.

Key words: fuzzy assessment; coating; corrosion; comparative method between two factors

涂层腐蚀是影响飞机日历寿命的重要因素之一^[1-3]。在大气环境下, 涂层往往会先发生腐蚀, 进而发生基体腐蚀^[4-5]。因此对涂层腐蚀的程度进行评价, 或者对几种涂层的抗腐蚀能力进行比较分析, 显得尤为重要。涂层腐蚀评价的指标较多, 通常采用 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方

法》进行评价。此方法取各指标中最大的等级作为综合评定等级, 将其他指标的影响予以忽略, 有一定的局限性^[6-7]。

现将模糊评价的方法引入涂层腐蚀评定中, 建立了涂层腐蚀分析模型。为了尽量减少人为因素, 依据 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级

收稿日期: 2012-08-07

作者简介: 刘学君(1989—), 男, 山东昌乐人, 硕士研究生, 主要从事飞机结构寿命评定。

方法》,采用两两对比法来确定其权重集^[8-11]。通过试验对具体问题进行了综合评定,与实际结果相符。

1 模糊评价

1.1 建立因素集、评价集及权重集

1) 因素集。因素即为能够反映所评价对象好坏属性或性能的指标,可对这些因素如涂层的色差、剥落程度等进行分析。所谓的因素集,就是这些因素所组成的集合,即 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。这些因素一般具有模糊性,也可为非模糊性。

2) 评价集。评价者基于评价因素对评价对象会做出多种评价,这些评价所组成的集合,即为评价集 $V, V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$,各元素 v_i 代表各种可能的总评价结果。模糊综合评价的目的,就是在考虑因素集内所有因素的基础上,得到集中评价的一个科学合理的评价结果。

3) 权重集。因素集对于评价的重要程度不同,所以需要确定一个矩阵来科学地反映因素集中各个因素的重要程度,该重要程度所组成的集合即为权重集。权重集可表示为 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$,其中 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为对应元素 u_i 所赋予的权数。

通常各权数 a_i 应满足归一性和非负性条件,见式(1)。

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad a_i \geq 0 \quad (1)$$

1.2 模糊综合评价

1) 单因素模糊评价。单因素模糊评价定义为单独从一个因素出发进行评价,以确定评价对象对评价集元素的隶属度。通过建立一个因素集 U 到 $F(V)$ 的模糊映射,得到 V 的一个模糊子集 $r_i=\{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}\}$,则由 i 个模糊子集作为行所组成的矩阵即为单因素评价矩阵。

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2) 模糊综合评价。单因素模糊评价反映了因素集中单一元素对于评价对象的影响程度,为综合

反映所有因素对于评价结果的影响,需要进行模糊综合评价。单因素评价矩阵中的第 i 行反映了第 i 个因素对于评价对象取评价集中对应元素的程度;第 j 列则反映了因素集中的元素取评价集中对应的第 j 个元素的程度。将单因素矩阵乘以权重集,则能合理反映出所有因素的综合影响。模糊综合评价的过程见式(3)。

$$\tilde{B} = \tilde{A} \cdot \tilde{R} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = \{b_1, b_2, \dots, b_m\} \quad (3)$$

式中: b_j 称为模糊综合评价指标,简称评价指标,其含义为综合考虑所有因素的影响时,评价对象对评价集第 j 个元素的隶属度。

1.3 评价指标的评分处理

得到评价指标后,可以根据评分原则、最小代价原则、最大隶属原则、置信度原则等原则来对评价指标进行处理。文中采用评分原则对评价指标进行处理。

设 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 为一个有序评价类。由于评价类 v_i 之间有强弱关系,可以用分数表示评价类的强弱关系,强类的分数比弱类的分数大。设 v_i 的分数为 e_i ,当 $v_1 < v_2 < \dots < v_m$ 时, $e_1 < e_2 < \dots < e_m$;反之亦然。定义 P_x 为 x 的分数,见式(4)。

$$P_x = \sum_{i=1}^m q_i e_i \quad (4)$$

如果:

$$P_{x_1} > P_{x_2} \quad (5)$$

则认为 x_1 比 x_2 强,记为:

$$x_1 > x_2 \quad (6)$$

2 基于模糊评价的涂层腐蚀分析模型

2.1 建立因素集及评价集

参照 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》中“保护性漆膜综合老化性能等级的评定”,按涂层的起泡、开裂、剥落、基体腐蚀、失光/色差和粉化等 6 项评价指标,对涂层腐蚀损伤情况进

行观测;按老化试验过程中出现的单项破坏等级评定漆膜老化的综合等级,分0,1,2,3,4,5共计6个等级,分别代表漆膜老化性能的优、良、中、可、差、劣。因此确定腐蚀评价因素集合为:

$U=\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7\}=\{\text{变色, 失光, 粉化, 开裂, 起泡, 生锈, 剥落}\},$

评价集合为:

$V=\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}=\{\text{优, 良, 中, 可, 差, 劣}\}.$

2.2 建立权重集

各权重集中的权数一般由人们根据实际问题的需要主观确定,没有统一的格式可以遵循。总体上采用对比评分法确定,其中德尔菲法、专家评分法等是依靠专家经验为主的定性方法,而两两对比法、连环比率法是定性与定量相结合的方法,定量对比评分法的程序如图1所示。文中采用两两对比法进行计算。

确定评分标准是采用两两对比法的首要环节,通常采用一级、四级和九级评分标准。文中采用四级评分标准(04评分法),见表1。

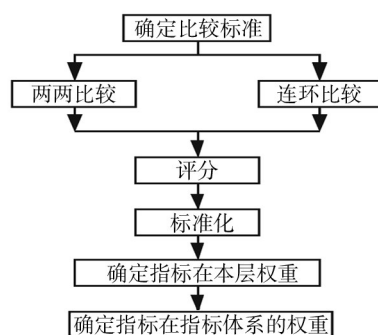


图1 确定指标在指标体系中权重的程序

Fig. 1 Program to determine index weight of the index system

表1 四级评分标准

Table 1 The standard of four grades scores

指标重要程度	评分
很重要	4
重要	3
比较重要	2

依据GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》对各指标的重要程度进行判断,见表2。

表2 保护性漆膜综合老化性能等级的评定

Table 2 The comprehensive evaluation of aging performance grade of protective paint film

综合等级	单项等级						
	变色	粉化	开裂	起泡	失光	生锈	剥落
0	2	0	0	0	2	0	0
1	3	1	1(S1)	1(S1)	3	1(S1)	0
2	4	2	3(S1)或2(S2)	5(S1)或2(S2)或1(S3)	4	1(S2)	1(S1)
3	5	3	3(S2)或2(S3)	3(S2)或2(S3)	5	2(S2)或1(S3)	2(S2)
4	5	4	3(S3)或2(S4)	4(S3)或3(S4)	5	3(S2)或2(S3)	3(S3)
5	5	5	3(S4)	5(S3)或4(S4)	5	3(S3)或2(S4)	4(S4)

根据表2,可以看到对于同一综合等级,例如综合等级0,变色与失光评分为2,而其它指标为1,说明其它指标对于失光与变色来说要更加重要;综合等级3,变色与失光均为5,粉化、开裂、起泡为3,生锈与剥落为2,说明在上述重要程度的基础上,生锈与剥落较粉化、开裂、起泡更重要。以此类推,综合考虑可得各指标相对其它指标的重要程度,04评分法确定权重见表3。

通过04评分法确定了各因素的权重值:

$\tilde{A}=(0.053\ 957, 0.053\ 957, 0.134\ 293, 0.170\ 264, 0.134\ 293, 0.165\ 468, 0.287\ 77).$

2.3 模糊综合评价

权重矩阵与单因素评价在合成时,可以选用以下几类评价模型。

1) $M(\cdot, V)$, 见式(7)。

$$b_j = \bigvee_{i=1}^m (a_i \cdot r_{ij}) \quad (7)$$

表3 04评分法确定权重

Table 3 04 scoring method to determine weight

指标	变色	失光	粉化	开裂	起泡	生锈	剥落	评分小计	权重
变色	1	1	1/3	1/3	1/3	1/2	1/4	3.75	0.053 957
失光	1	1	1/3	1/3	1/3	1/2	1/4	3.75	0.053 957
粉化	3	3	1	1/2	1	1/2	1/3	9.333 333	0.134 293
开裂	3	3	2	1	2	1/2	1/3	11.833 33	0.170 264
起泡	3	3	1	1/2	1	1/2	1/3	9.333 333	0.134 293
生锈	2	2	2	2	2	1	1/2	11.5	0.165 468
剥落	4	4	3	3	3	2	1	20	0.287 77
								69.5	1

该模型 a_i 和 r_{ij} 为普通乘法运算,不会丢失任何信息,但取大运算仍将丢失大量有用信息。

2) $M(\wedge, \oplus)$, 见式(8)。

$$b_j = \sum_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij}) \quad (8)$$

该模型累积为普通的加法运算,但 a_i 和 r_{ij} 为取小运算,会丢失部分有用信息。

3) $M(\cdot, \oplus)$, 见式(9)。

$$b_j = \sum_{i=1}^m a_i \cdot r_{ij} \quad (9)$$

该模型不仅考虑了所有因素的影响,而且保留了单因素评价的全部信息,适用于需要全面考虑各因素影响和单因素评价结果的情况,是一种加权平均模型。

在实际应用中,单独适用上述模型中的一种,可能具有片面性。因此,采用模型1,2,3加权平均的方式进行二级指标评判。

设二级评价集为:

$$\tilde{M} = \{B_1, B_2, B_3\}^T$$

对应的二级权重集为:

$$\tilde{W} = \{w_1, w_2, w_3\}$$

式中: $w_i \geq 0$, 且 $\sum_{i=1}^3 w_i = 0$ 。则得出总的(二级)综合评判指标结果,见式(10)。

$$\tilde{Q} = \tilde{M} \cdot \tilde{W} = (q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (10)$$

2.4 评价指标的评分处理

参照 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》中“保护性漆膜综合老化性能等级的评

定”,综合评分见表4。

表4 综合评分

Table 4 Comprehensive score

等级	优	良	中	可	差	劣
分数	0	1	2	3	4	5

3 实例分析

针对某型飞机两种结构涂层分别进行了2,6,8,10,12 a的加速腐蚀试验,根据表3中各指标的相应评语,统计结果见表5、表6。

表5 典型外部结构涂层(铝合金基体)加速腐蚀不同周期评级情况

Table 5 Rating of typical external structure coating (aluminum alloy matrix) after accelerated corrosion of different periods

当量 年限/a	评价指标							综合评级
	变色	失光	粉化	开裂	起泡	生锈	剥落	
2	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	1	0	0	1
6	1	2	1	0	1	0	0	1
8	1	2	1	0	1	0	0	1
10	2	2	2	0	2	0	0	2
12	2	3	2	1	2	0	0	2

以典型外部结构涂层为例,首先建立 U 到 V 的模糊关系,即求评价矩阵。各元素定义为12 a中各指标获得相应评语的百分比,如指标 u_1 (变色)在12 a中获得“优”的指标评语的年份只有2 a和4 a,所以 $r_{11}=2/6=1/3$,同理可得:

表6 典型外部结构涂层(合金钢基体)加速腐蚀不同周期评级情况

Table 6 Rating of typical external structure coating (alloy steel matrix) after accelerated corrosion of different periods

当量 年限/a	变色	失光	粉化	开裂	起泡	生锈	剥落	综合评级
2	0	1	0	0	0	0	0	0
4	1	2	1	0	1	0	0	1
6	1	2	1	0	1	0	0	1
8	2	2	2	0	2	0	0	2
10	2	3	2	1	2	1	0	2
12	3	3	3	1	2	3	4(S4)	5

$$R_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{5}{6} & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

则根据 $\tilde{B}_1 = \tilde{A}_1 \cdot \tilde{R}_1$, 通过模型 1, 2, 3 得到的一级模糊评价指标为:

$$B_{11} = (0.2878, 0.0671, 0.0448, 0, 0, 0)$$

$$B_{12} = (0.9460, 0.5432, 0.3765, 0, 0, 0)$$

$$B_{13} = (0.6803, 0.1763, 0.1435, 0, 0, 0)$$

令二级权重集为 $(1/3, 1/3, 1/3)$, 则二级评价指标为:

$$\tilde{Q}_1 = \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3} \right) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 0.2878 & 0.0671 & 0.0448 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9460 & 0.5432 & 0.3765 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6803 & 0.1763 & 0.1435 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.6380, 0.2622, 0.1883, 0, 0, 0)$$

根据表 3 中各指标的分级, 对二级评价指标进行评分处理, 得到外部结构涂层(铝合金基体)的评分值为:

$$P_1 = \tilde{Q}_1 \cdot \tilde{W} = (0.6380, 0.2622, 0.1883, 0, 0, 0) \cdot$$

$$(0, 1, 2, 3, 4, 5)^T = 0.6388$$

同理, 可求得外部结构涂层(合金钢基体)的评分值为: $P_2 = 1.5862$

可见 $P_2 > P_1$ 。根据式(5)、式(6)可知, 相同环境下, 外部结构涂层(合金钢基体)要比外部结构涂层(铝合金基体)更易腐蚀, 即外部结构涂层(铝合金基体)的抗腐蚀能力要强于外部结构涂层(合金钢基体)。与 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》评定结果相同。

4 分析与讨论

1) 该评定方法与 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》相比, 结果基本相同。后者是取各指标中的最高等级作为综合评定的结果, 对于其它指标的作用予以忽略, 而前者能更好地考虑全局, 能够将全部的指标信息反映出来, 其评定结果更加公平合理。

2) 通过综合评定可知, 外部结构涂层(铝合金基体)的抗腐蚀能力要强于外部结构涂层(合金钢基体)。

参考文献:

- [1] 刘文琰, 李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- [2] 陈群志. 腐蚀环境下飞机结构日历寿命技术体系研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999.
- [3] 陈跃良, 张勇. 军用飞机结构日历寿命相关问题的思考[J]. 航空工程进展, 2010, 1(4): 311—316.
- [4] 孙志华. 金属/有机涂层体系环境失效的电化学研究方法[J]. 装备环境工程, 2007, 4(4): 1—4.
- [5] ROMANO A P, OLIVIER M G, VANDERMIERS C. Influence of the Curing Temperature of a Cathaphoretic Coating on the Development of Filiform Corrosion of Aluminium[J]. Progress in Organic Coatings, 2006, 57(4): 400—407.
- [6] 尹磊, 冯圣玉, 吴苏友, 等. 耐候防腐涂层的动态力学行为研究[J]. 表面技术, 2007, 36(1): 25—27.
- [7] 王俊芳, 杨晓然. 军用防腐涂料涂装的发展探讨[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 45—47.
- [8] 陈彬, 刘阁, 张贤明, 等. 高速电弧喷涂工艺的模糊综合评判[J]. 表面技术, 2011, 40(1): 100—106.
- [9] 汪学华, 张伦武. 涂层大气腐蚀的模糊综合评定[J]. 环境技术, 2001(6): 35—38, 46.
- [10] 吴祈宗. 系统工程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.
- [11] 董肇君. 系统工程与运筹学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.