

环境试验与评价

熵值法在涂层老化指标权重确定中的应用

罗来正¹, 肖勇¹, 王宝瑞², 苏艳¹, 朱玉琴¹, 黎小锋³, 柏遇合¹

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.中国兵器装备集团公司, 北京 100089;

3.重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

摘要: **目的** 从防护涂层力学性能和外观评级两方面综合评价涂层老化程度。**方法** 选取失光、变色、粉化、起泡、长霉、生锈、剥落、开裂、附着力等 9 项涂层老化指标, 运用熵值法原理对涂层 9 项老化指标进行权重计算与分析。**结果** 运用熵值法计算的 TB06-9+TS70-60 和 TB06-9+TS96-71 两种防护涂层海洋大气户外环境暴露 5 年的老化综合评价价值均为 3.88 级, 表明两种防护涂层的抗老化性能基本一致。**结论** 采用熵值法可以有效确定失光、变色、粉化、起泡、长霉、生锈、剥落、开裂、附着力等涂层老化指标之间的权重关系, 为多指标综合评价防护涂层老化结果提供了一种客观、真实、有效、科学的评价方法。

关键词: 涂层; 熵值法; 权重; 老化; 多指标

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.07.014

中图分类号: TJ02

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)07-0070-04

Application of Entropy Method in Weight Determining of Coating Aging Index

LUO Lai-zheng¹, XIAO Yong¹, WANG Bao-rui², SU Yan¹, ZHU Yu-qin¹, LI Xiao-feng³, BAI Yu-he¹

(1.Southwest Research Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China;

2.China South Industries Group Corporation, Beijing 100089, China;

3.Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

ABSTRACT: Objective To evaluate the aging degree of protective coating comprehensively from mechanical property and appearance rating. **Methods** Nine coating degradation indexes of loss of gloss, color change, pulverization, foaming, mildew, rust, peeling, cracking, adhesion were selected to calculate and analyze the weight with the entropy value method. **Results** The comprehensive evaluation values of two kinds of protective coatings of TB06-9 + TS70-60 and TB06-9 + TS96-71 after marine atmospheric outdoor environment exposure for 5 years by the entropy method were 3.88. The anti-aging performance of the two protective coatings was almost the same. **Conclusion** The coating degradation index weight of loss of gloss, color change, pulverization, foaming, mildew, rust, peeling, cracking, adhesion was effectively identified by the entropy method, which provides an objective, real, effective and scientific evaluation method for multi index comprehensive evaluation of protective coating aging.

KEY WORDS: coating; entropy method; weight; aging; multi index

有机涂层因其经济、方便等优点已成为装备防腐蚀保护中应用最广泛的技术手段之一^[1-4], 但涂层在实际应用过程中, 本身受紫外线、潮湿空气、雨水、腐蚀介质、干湿交替等多环境因素的综合影响, 会出

现失光、变色、粉花、附着力下降、起泡、开裂等多种老化现象, 丧失对基材的保护, 导致涂层使用寿命大大缩短^[5-11], 这对防护涂层使用和维护提出了严峻考验。为了合理评价涂层老化现象, 提前预测涂层使

收稿日期: 2017-04-15; 修订日期: 2016-05-27

作者简介: 罗来正 (1983—), 男, 江西玉山人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为环境试验与环境适应性评价。

使用寿命, 研究人员先后开展了大量研究工作^[12-14], 其中, GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评价方法》从变色、粉化、开裂、起泡、长霉、生锈、剥落等 7 个方面较为权威地给出了防护涂层老化等级的评定。GB/T 1766—2008 在评定涂层老化时未考虑力学性能(附着力)对涂层的影响, 而力学性能往往是防护涂层使用时需要考虑的一个非常关键的因素, 也是评价涂层老化失效的一个非常重要指标。目前, 现有的涂层老化评价标准和文献中, 关于变色、粉化、开裂、起泡、长霉、生锈、剥落等老化指标之间的权重关系未明确定义, 且如何通过外观老化指标与附着力性能综合考核涂层老化失效也未见相关报道, 这些均给涂层老化失效评价带来很大困难。因此, 如何将防护涂层的外观评级和力学性能结合起来, 采用合适的数据方法确定不同老化指标相互之间的权重关系, 并根据权重关系对防护涂层建立更科学、合理、有效的老化性能综合评价体系, 已成为涂层综合优选和预测涂层寿命急需解决的关键问题。

文中在 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评价方法》防护涂层老化评价的基础上, 将变色、粉化、开裂、起泡、长霉、生锈、剥落等 7 项老化评价指标拓展为包括附着力、失光率在内的 9 项老化评价指标, 并采用熵值法确定这 9 项老化指标的权重关系, 首次从防护涂层力学性能和外观老化评级两方面综合评价涂层老化程度。旨在建立更为科学、实用的防护涂层老化性能综合评价指标体系。

1 熵值法原理

目前, 由于现行涂层老化评价方法中存在一定问题, 若要更为科学、精确地研究涂层老化程度, 涂层老化指标权重确定已成为研究的关键, 它的取值直接影响评价结果。权重确定通常有主观赋权法和客观权重确定法, 主观权重确定法有赖于专家知识、经验积累和关注焦点, 具有非常大的主观性, 而客观权重确定法按数学计算准则得出各指标权重, 可避免主观权重确定法的缺陷, 充分挖掘原始数据本身蕴涵的信息。为了避免在涂层老化指标权重确定中受到人为的干扰, 文中采用客观权重确定法——熵值法确定涂层老化权重系数。

熵是由德国物理学家克劳修斯于 1865 年提出的一个热力学概念, 用于描述热力学系统的无序或混乱程度。最先由 Shannon 引入信息论, 用于表征信息源中信号的不确定性, 称为信息熵(简称熵), 现已在工程技术、社会经济等领域得到广泛应用^[15-18]。熵值法是一种基于熵原理的客观评价方法, 能够避免人为因素带来的偏差。熵值法评价中的评价指标的熵越

小, 表示该指标提供的信息量越大, 在综合评价中所起的作用就越大, 权重就越高。熵值法反映出在各种评价指标值确定的情况下, 各指标在竞争意义上的相对激烈程度, 它能将一些边界不清、不易定量的因素定量化, 进而实现综合评价。

1) 构建评价矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: r_{ij} 为第 j 个指标第 i 个样本的数值 ($j=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m$)。

2) 计算评价指标的熵。按式(2) — (4) 计算第 j 个评价指标的熵:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}, j=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}, j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$k = \frac{1}{\ln m} \quad (4)$$

式中: H_j 为第 j 个指标的熵值; f_{ij} 为第 j 个指标第 i 个样本所占的比重; k 为熵值系数;

当 $f_{ij}=0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij}=0$ 。若某一列的 r_{ij} 全部相等, 那么 $f_{ij}=1/m$ 。

3) 计算评价指标的权重。按式(5) 计算第 j 个评价指标的权重:

$$\beta_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}, j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: β_j 为第 j 个评价指标的权重。

4) 模糊综合评价。将各评价指标的权重值和指标数字等级代入式(6), 计算得到涂层防护性能的综合评价价值:

$$F = \sum_{j=1}^n X_j W_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中: F 为综合评价价值; X_j 为第 j 个评价指标值; W_j 为第 j 个评价指标的权重。

2 案例分析

2.1 数据采集

以 30CrMnSiNi2A 为基材, 选取 TB06-9 锌黄聚氨酯底漆+TS70-60 聚氨酯面漆和 TB06-9 锌黄聚氨酯底漆+TS96-71 氟聚氨酯面漆两种防护体系在海南万宁试验站开展自然环境试验, 试样朝南并与水平成 45°倾角, 大气暴露试验方法参照 GB/T 9276—1996《涂层自然气候暴露试验方法》执行。试验暴露时间为 5 年, 取样周期为 1, 2, 3, 4, 5 年, 每组平行试样为 3 个, 采集的试样性能数据为外观评级和附着力, 其中, 外观评价执行标准为 GB/T 1766—2008《色

漆和清漆 涂层老化的评级方法》，附着力执行标准为 GB/T 9286—1998《色漆和清漆 漆膜的划格试验》。针对防护涂层暴露试验，按检测周期分别对涂层的失

光、变色、粉化、附着力、起泡、长霉、生锈、剥落、开裂等 9 项性能进行检测，两种防护涂层海洋大气环境下暴露 5 年的环境老化数据见表 1。

表 1 两种涂层暴露 5 年试验数据

涂层体系	试验时间/a	老化等级								
		失光	变色	粉化	附着力	起泡	长霉	生锈	剥落	开裂
30CrMnSiNi2A + TB06-9+TS70-60 (A)	1	3	2	0	0	0	0	0	0	0
	2	5	3	5	1	0	0	0	0	0
	3	5	3	5	3	0	0	0	0	0
	4	5	3	5	3	0	0	0	0	0
	5	5	3	5	3	0	0	0	0	0
30CrMnSiNi2A + TB06-9+TS96-71 (B)	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	5	2	5	3	0	0	0	0	0
	3	5	2	5	2	0	0	0	0	0
	4	5	2	5	2	0	0	0	0	0
	5	5	2	5	3	0	0	0	0	0

2.2 确定涂层老化指标评价矩阵

根据上述分析得知，该次评价共选取失光、变色、粉化、附着力、起泡、长霉、生锈、剥落、开裂等 9 项评价指标，每个评价指标有 5 个样本（5 年的试验数据），按式（1）建立两种涂层多指标评价矩阵如下：

$$R_A = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 3 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 3 & 5 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 3 & 5 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 3 & 5 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_B = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 2 & 5 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 2 & 5 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 2 & 5 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 2 & 5 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.3 计算评价指标的熵

按式（2）—（4）计算 30CrMnSiNi2A +TB06-9+TS70-60（A）防护涂层各老化指标的熵值：失光 $H_1=0.9896$ ；变色 $H_2=0.9931$ ；粉化 $H_3=0.8163$ ；附着力 $H_4=0.8144$ 。

由试验数据得知，起泡、长霉、生锈、剥落和开

$$\left\{ \frac{0.0028}{0.0933}, \frac{0.0019}{0.0933}, \frac{0.0379}{0.0933}, \frac{0.0507}{0.0933}, \frac{0}{0.0933}, \frac{0}{0.0933}, \frac{0}{0.0933}, \frac{0}{0.0933}, \frac{0}{0.0933} \right\} = \{0.031, 0.020, 0.408, 0.541, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

30CrMnSiNi2A+TB06-9+TS96-71（B）防护涂层各老化指标的权重为：失光权重 $\beta_1=0.0020$ ；变色权重 $\beta_2=0.0033$ ；粉化权重 $\beta_3=0.0261$ ；附着力权重 $\beta_4=0.0284$ ；起泡权重 $\beta_5=0$ ；长霉权重 $\beta_6=0$ ；生锈权

裂等 5 项性能试验 5 年的评级均为 0 级，均未发生变化，且被评价涂层的性能指标值完全相同，熵值达到最大，属于无用信息，可以从评价体系中直接去除。

30CrMnSiNi2A+TB06-9+TS96-71（B）防护涂层各老化指标的熵值计算结果：失光 $H_1=0.9896$ ；变色 $H_2=0.9824$ ；粉化 $H_3=0.8614$ ；附着力 $H_4=0.8488$ 。

同理，30CrMnSiNi2A+TB06-9+TS96-71（B）防护涂层的起泡、长霉、生锈、剥落和开裂等 5 项性能试验 5 年的评级均为 0 级，均未发生变化，且被评价涂层的性能指标值完全相同，熵值达到最大，属于无用信息，可以从评价体系中直接去除。

2.4 计算评价指标的权重

对每个评价指标都按式（5）计算权重，获取两种涂层 9 项老化指标之间的权重值。其中，30CrMnSiNi2A+TB06-9+TS70-60（A）防护涂层各老化指标的权重为：失光权重 $\beta_1=0.0028$ ；变色权重 $\beta_2=0.0019$ ；粉化权重 $\beta_3=0.0379$ ；附着力权重 $\beta_4=0.0512$ ；起泡权重 $\beta_5=0$ ；长霉权重 $\beta_6=0$ ；生锈权重 $\beta_7=0$ ；剥落权重 $\beta_8=0$ ；开裂权重 $\beta_9=0$ 。

为了把不同的对象放在同一起跑线上比较，一般应进行归一化处理，即：

$$\beta_1+\dots+\beta_9=0.0933$$

重 $\beta_7=0$ ；剥落权重 $\beta_8=0$ ；开裂权重 $\beta_9=0$ 。

为了把不同的对象放在公平起跑线上比较，一般应进行归一化处理，即：

$$\beta_1+\dots+\beta_9=0.0598$$

$$\left\{ \frac{0.0020}{0.0598}, \frac{0.0033}{0.0598}, \frac{0.0261}{0.0598}, \frac{0.0284}{0.0598}, \frac{0}{0.0598}, \frac{0}{0.0598}, \frac{0}{0.0598}, \frac{0}{0.0598}, \frac{0}{0.0598} \right\} = \{0.033, 0.055, 0.436, 0.476, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

通过以上计算得知, 两种防护涂层 9 项老化指标的权重见表 2。

表 2 涂层体系老化指标权重值

涂层体系	失光	变色	粉化	附着力	起泡	长霉	生锈	剥落	开裂
30CrMnSiNi2A+TB06-9+TS70-60(A)	0.031	0.020	0.408	0.541	0	0	0	0	0
30CrMnSiNi2A+TB06-9+TS96-71(B)	0.033	0.055	0.436	0.476	0	0	0	0	0

2.5 涂层老化综合评价

由表 2 得知, 在起泡、长霉、生锈、剥落和开裂性能未发生变化前, 粉化和附着力在防护涂层老化评价中占非常重要比例。将各评价指标的权重值和指标数字等级代入式(6), 计算得到两种防护涂层的综合评价值: $F_A=3.878$, $F_B=3.883$

采用熵值法求得的 30CrMnSiNi2A+TB06-9+TS70-60(A)和 30CrMnSiNi2A+TB06-9+TS96-71(B)两种防护涂层海洋大气户外暴露 5 年的老化综合评价值均为 3.88 级, 约为 4 级, 这表明两种防护涂层的环境抗老化性能基本一致。装备防护涂层进行抗老化优选时, 由于两种防护涂层抗老化性能基本相当, 因此, 两种防护涂层均可以选择。

3 结语

文中介绍了一种基于熵值法的涂层老化指标权重确定的方法。这是一种客观的评价方法, 克服了主观权重的随意性, 评价结果客观合理。这种方法可对涂层多项老化指标进行权重评价, 评价老化指标不仅仅局限于 GB/T 1766 中变色、粉化、开裂、起泡、长霉、生锈和剥落等 7 项指标, 还可以拓展为失光、附着力、厚度等影响涂层老化失效的其它关键指标, 从而弥补现有标准涂层老化评价的不足, 从涂层外观、力学等多方面更为客观、科学、实用地综合评价涂层老化程度。

参考文献:

- [1] NGUYEN T N, HUBBARD J B, MCFADDEN G B. A Mathematical Model for the Cathodic Blistering of Organic Coating on Steel Immersed in Electrolytes[J]. J Coat Tech, 1991, 63(794): 43—52.
- [2] 何森, 张鑫柱, 刘伟, 等. 天然气井油管有机涂层的失效分析[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 17—21.
- [3] 刘斌, 李瑛, 林海潮, 等. 防腐蚀涂层失效行为研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(5): 305—307.

- [4] 罗来正, 肖勇, 苏艳, 等. 东南沿海气候条件对聚氨酯涂层老化行为影响研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6): 42—47.
- [5] 刘丹, 宋影伟, 单大勇, 等. 镁合金自修复涂层研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 28—35.
- [6] 张涛, 李军念, 张燕. 钢结构防腐涂层面漆可剥离现象的原因分析及处理措施[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 82—86.
- [7] 陈东, 李忠盛, 吴护林, 等. 冷喷涂纯铝涂层耐腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 174—179.
- [8] 徐永祥, 严川伟, 高延敏, 等. 大气环境中涂层下金属的腐蚀和涂层的失效[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(4): 249—256.
- [9] 王铀. 热喷涂纳米涂层 20 年回顾与展望[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 1—9.
- [10] 潘莹, 张三平, 周建龙, 等. 大气环境中有机涂层的老化机理及影响因素[J]. 涂料工业, 2010, 40(4): 68—72.
- [11] 刘峰, 宋弘清, 黄政然, 等. 沿海地区输电电塔防护涂层耐腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 76—81.
- [12] IRIGOYEN M, BARTOLOMEO P, PERRIN F X. UV Ageing Characterisation of Organic Anticorrosion Coatings by Dynamic Mechanical Analysis, Vickers Microhardness and Infrared[J]. Polymer Degradation and Stability, 2001, 74: 59—67.
- [13] NGUYEN T, HUBBARD J B, POMMERSHEI J M. Unified Model for the Degradation of Organic Coatings on Steel in a Neutral Electrolyte[J]. J C T, 1996, 68(855): 45.
- [14] YANG X F, VANG C, TALLMAN D E, et al. Weathering Degradation of a Polyurethane Coating Evaluation[J]. Polymer Degradation and Stability, 2001, 74: 341—351.
- [15] 陆添超, 康凯. 熵值法和层次分析法在权重确定中的应用[J]. 软件开发与设计, 2009(11): 19—20.
- [16] 罗绍伟. 基于熵权和层次分析法的学科馆员服务质量模糊综合评价[J]. 现代情报, 2009, 29(8): 43—47.
- [17] 毛太田, 蒋知义. 熵权评价图书馆读者满意度的改进模型[J]. 情报杂志, 2008(9): 86—90.
- [18] 施晓清, 赵景柱, 欧阳志云. 城市生态安全及其动态安全评价方法[J]. 生态学杂志, 2008, 28(7): 1249—1254.