

# 基于层次分析法的储罐外涂层老化评价研究

娄亮杰<sup>1</sup>, 林竹<sup>1</sup>, 刘苒<sup>1</sup>, 杨恒<sup>2</sup>, 王磊<sup>3</sup>, 王志涛<sup>1</sup>, 张彦军<sup>1</sup>

(1.中国石油集团工程技术研究有限公司, 天津 300451; 2.国家海洋博物馆筹建办公室, 天津 300450; 3.中国石油西北销售广西分公司, 南宁 530007)

**摘要:** **目的** 结合涂层老化评价标准, 利用层次分析法, 量化评价储罐外涂层的老化状态。**方法** 通过研究涂层老化评级方法的标准, 并引入层次分析法, 计算得到单项老化性能指标占综合指标的权重, 进一步构建涂层老化的数学模型以量化评价涂层状态。**结果** 利用层次分析法计算得到生锈、剥落、开裂、气泡和粉化 5 项指标所占权重分别为 0.508、0.292、0.107、0.061 和 0.032, 其中生锈所占权重最高。对南宁某油库外涂层防腐老化性能进行检测评价, 检测结果显示, 罐壁 8 层罐圈板仅有 3 层涂层老化状态得分处于 45~50 分之间, 其余 5 层罐圈板以及罐顶、附件涂层老化状态均小于 44 分, 综合老化情况及经济效益, 建议对该罐外涂层整体进行重涂。**结论** 目前的涂层老化评价标准仅对涂层老化的评价方法以及评级进行了规定, 但存在量化不足、未给出维修建议等缺点, 引入层次分析法, 可量化外涂层的老化状态, 并可以根据量化评价结果给出维修建议。

**关键词:** 储罐; 涂层老化; 量化评价; 层次分析法; 判断矩阵; 权重

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)12-0305-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.12.036

## Aging Evaluation of Outer Coating for Storage Tank Based on Analytic Hierarchy Process

LOU Liang-jie<sup>1</sup>, LIN Zhu<sup>1</sup>, LIU Ran<sup>1</sup>, YANG Heng<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>, WANG Zhi-tao<sup>1</sup>, ZHANG Yan-jun<sup>1</sup>

(1.CNPC Engineering Technology Research Co., Ltd, Tianjin 300451, China; 2.National Maritime Museum of China, Tianjin 300450, China; 3.Guangxi Branch, Northwest Marketing Company, PetroChina, Nanning 530007, China)

**ABSTRACT:** The work aims to quantitatively evaluate the aging state of the outer coating for storage tank through evaluation criteria for coating aging and analytic hierarchy process. By studying and comparing the standard of coating aging rating method and introducing the analytic hierarchy process, the weight of a single aging performance index respected to the total index was calculated to establish the mathematical model of coating aging to quantitatively evaluate the coating state. The weight of rust, flaking, cracking, blistering and powdering calculated by analytic hierarchy process was 0.0508, 0.0292, 0.107, 0.061 and 0.032, respectively, among which rust had the highest weight. The anti-corrosion aging performance of an oil depot in Nanning was tested and evaluated. The test results showed that the aging state scores of only 3 layers among 8 layers of ring plates on the tank wall were between 45 and 50, and the aging state scores of the other 5 layers of ring plates, tank top and accessories were all less than 44. Considering the aging situation and economic benefits, it was recommended to re-coat the whole outer coating of the

收稿日期: 2019-09-27; 修订日期: 2020-02-28

Received: 2019-09-27; Revised: 2020-02-28

作者简介: 娄亮杰 (1987—), 男, 硕士, 研究方向为金属腐蚀与防护。邮箱: louliangjie@cnpc.com.cn

**Biography:** LOU Liang-jie (1987—), Male, Master, Research focus: metal corrosion and protection. E-mail: louliangjie@cnpc.com.cn

**引文格式:** 娄亮杰, 林竹, 刘苒, 等. 基于层次分析法的储罐外涂层老化评价研究[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 305-310.

LOU Liang-jie, LIN Zhu, LIU Ran, et al. Aging evaluation of outer coating for storage tank based on analytic hierarchy process [J]. Surface technology, 2020, 49(12): 305-310.

tank. The current evaluation standard for coating aging only has a stipulation scales on the evaluation method and rating of coating aging and has some shortcomings such as insufficient quantization and missing maintenance suggestions. By introducing the method of analytic hierarchy process (AHP), the aging state of outer coating can be quantified. Based on the quantitative evaluation results, appropriate maintenance suggestions can be given directly.

**KEY WORDS:** storage tank; coating aging; quantitative evaluation; analytic hierarchy process; comparison matrix; weight

广西南宁市某油库, 由于地处低纬度地区, 全年受海洋暖湿气流和北方季节性冷气团的交替影响。此地区处于湿润的亚热带季风气候带, 特点是炎热潮湿, 紫外线、热和温度、水和湿气等环境因素引起高分子涂层老化<sup>[1]</sup>, 老化的形式包括粉化、起泡、开裂、

剥落等<sup>[2,3]</sup>。另外, 据统计显示, 南宁酸雨污染较为严重, 2007—2013 年, 年平均 pH 值小于 5.6, 酸雨率为 53.9%<sup>[4]</sup>。该气候条件下, 储罐及管道等设备设施易发生锈蚀腐蚀。目前, 该库内储罐外涂层出现严重老化, 同时罐体局部区域也出了锈蚀现象, 如图 1 所示。



a 涂层老化



b 局部锈蚀

图 1 储罐涂层失效及储罐壁板腐蚀情况

Fig.1 Failure of tank coating and corrosion of tank wall plate: a) coating ageing; b) local rust

目前, 对储罐外涂层老化的评价, 主要参考的国内标准为 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》<sup>[5]</sup>, 国外为 ISO 4628《色漆和清漆涂层老化的评定》系列标准。标准中规定了不同的老化状态及对应的级别, 但给出的分级不能涵盖所有老化情况, 同时也未给出更具体的量化指标, 无法指导涂层的维修和维护。本次工作创新地引入了层次分析法 (AHP), 结合标准中的评级, 可计算不同指标在涂层老化状态中所占的权重, 并建立数学模型, 结合对涂层的评价结果及等级, 进一步计算得到涂层综合老化状态指数, 可量化涂层的老化状态, 按照量化的结果可进一步给出维修建议。

## 1 涂层老化评价数学模型建立

### 1.1 涂层老化评价指标及老化性能分级

依据 GB/T 1766—2008, 从生锈、剥落、开裂、起泡、粉化等 5 项指标对涂层老化进行定性评价, 如表 1 所示。老化性能检测中, 均匀破坏采用单一数字进行分级, 分散破坏则需要表示破坏的数量以及破坏大小等级, 破坏大小等级在括号内注明, 并在等级前加上字母“S”。

标准中对综合老化性能进行了分级, 但未包括所有老化情况, 如生锈项目等级达到 3(S3)时, 综合等

表 1 保护性涂层综合老化性能等级的评定

Tab.1 Evaluation of comprehensive degradation performance of protective coating

Comprehensive rating	Single rating				
	Rusting	Flaking	cracking	Blistering	Powdering
0	0	0	0	0	0
1	1(S1)	0	1(S1)	1(S1)	1
2	1(S2)	1(S1)	3(S1) or 2(S2)	5(S1) or 2(S2) or 1(S3)	2
3	2(S2) or 1(S3)	2(S2)	3(S2) or 2(S3)	3(S2) or 2(S3)	3
4	3(S2) or 2(S3)	3(S3)	3(S3) or 2(S4)	4(S3) or 3(S4)	4
5	3(S3) or 2(S4)	4(S4)	3(S4)	5(S3) or 4(S4)	5

级已达到最高级别 5 级,若生锈等级达更高级别 4(S4)或 5(S5)时,则不能进一步进行分级。另外,标准中仅给出了综合评价等级,没有进一步量化,并且未给出对应的维修建议。因此,本工作需要涂对涂层老化的指标进行分级定性检测后,通过统计分析对检测结果进行量化,才可涵盖标准中规定的全部老化因子的所有级别,并根据量化结果给出对应的维修建议。

为了方便量化分析,对 GB/T 1766—2008 中保护性漆膜综合老化性能等级评定表中的各指标等级结果赋以数值,分别用 0—5 表示,保护性漆膜综合老化性能等级评定表转化为表 2<sup>[6]</sup>。其中,单项分值合计数值越小,对涂层综合老化评级影响越大,按照分值由小到大进行排名,结果列于表 2 中,从表 2 中可以看出生锈对综合等级影响最大,剥落次之,开裂(这里指穿透整个漆膜体系的开裂,可见底材)相较于起

表 2 涂层单项等级分值统计 Tab.2 Statistics of single grade score of coatings					
Comprehens ive rating	Powdering	Cracking	Blistering	Rusting	Flaking
0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0
2	2	2	2	1.5	1
3	3	2.5	2.5	1.75	2
4	4	3	3.5	2.5	3
5	5	3.5	4	3	4
Comprehen sivescores	15	12	13	9.75	10
The rankings	5	3	4	1	2

## 1.2 层次分析法

美国著名运筹学家 T. L. Saaty 于 20 世纪 70 年代初提出了层次权重决策分析方法<sup>[7]</sup>。该方法从系统观点出发,把复杂的问题分解为各组成因素,通过对因素两两比较判断的方式,确定因素的相对重要性,以得到决策因素相对于目标重要性的总顺序,其特点是利用较少的定量信息使决策的思维过程数学化<sup>[8,9]</sup>。层次分析法近年来已在采矿、经济、农业及安全等领域得到了广泛应用<sup>[10-14]</sup>。层次分析法的基本步骤如下。

1) 建立层次结构模型。确定影响目标的元素,如涂层综合老化指标由粉化、开裂、起泡、生锈及剥落等 5 个元素的指标所决定。

2) 构造两两比较判断矩阵。确定各元素与目标的隶属关系后,对各元素进行两两比较,构造出比较判断矩阵。为了使矩阵中各要素的重要性能够进行定量表示,引入 9 标度法<sup>[15-17]</sup>,如表 3 所示。

按照定义,构造出的两两比较判断矩阵为:

表 3 判断标度  
Tab.3 Judgment scale

Matrix assignment	Level of importance
1	The two elements are equally important
3	Element <i>i</i> is little more important than element <i>j</i>
5	Element <i>i</i> is obviously more important than element <i>j</i>
7	Element <i>i</i> is highly more important than element <i>j</i>
9	Element <i>i</i> is absolutely more important than element <i>j</i>
2,4,6,8	The median of the above adjacent judgments

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

该矩阵为正互反矩阵,满足的特征: $a_{ij}>0$ ;  
 $a_{ij}=1/a_{ji}$ ;  $a_{ii}=1$

3) 计算影响目标值各元素的相对权重。对于得到的矩阵  $A$ ,解特征根问题: $AW=\lambda_{\max}W$ ,解出的  $W$  经正规化后作为因素的排列权重。计算最大特征根  $\lambda_{\max}$  和其对应的特征向量  $W$  的计算步骤如下。

矩阵每一列归一化,如式(1)所示:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \tag{1}$$

对按列归一化的矩阵,再按行求和,得到向量  $\bar{W}$ ,如式(2)所示:

$$\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \cdots, \bar{W}_n] \tag{2}$$

将向量归一化得到特征向量  $W$ ,如式(3)所示:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} \tag{3}$$

计算最大特征根  $\lambda_{\max}$ ,如式(4)所示:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \tag{4}$$

其中: $(AW)_i$ 表示  $AW$  的第  $i$  个元素。

4) 一致性检验。在计算出判断矩阵最大特征根  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量,还需对判断矩阵进行一致性检验,一致性指标  $CI$  和一致性比率  $CR$ <sup>[18]</sup>计算如式(5)、(6)所示,当  $CI$  与  $CR$  均小于 0.1 时,认为该互反判断矩阵有:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{5}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{6}$$

式中:  $RI$  为随机一致性指标,取值仅与互反判断矩阵的阶数有关,如表 4 所示。

表 4 平均随机一致性指标<sup>[19,20]</sup>  
Tab.4 Average consistency random index<sup>[19,20]</sup>

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

### 1.3 层次分析法在涂层老化评价中的应用

通过采用层次分析法对涂层老化的 5 个指标进行评价,根据对表 1 中单项的排序,按照 9 标度法对各老化指标进行两两比较,形成涂层老化指标的判断矩阵,见表 5。由判断矩阵计算被比较的各指标的相

对权重,计算结果列于表 5 最后一列,按照式(4)、(5)计算得到最大特征值  $\lambda_{\max}=5.233$ ,一致性指标  $CI=0.058$ ,5 阶判断矩阵平均随机一致性指标  $RI=1.12$ ,通过式(6)计算得到一致性比率  $CR=0.052$ ,至此, $CI$ 和  $CR$  均小于 0.1,通过一致性检验。

表 5 涂层老化各项指标权重  
Tab.5 Coating aging index weight

Aging project	Rusting	Flaking	Cracking	Blistering	Powdering	Weighting ( $W_i$ )
Rusting	1	2	5	7	9	0.508
Flaking	1/2	1	3	5	8	0.292
Cracking	1/5	1/3	1	2	5	0.107
Blistering	1/7	1/5	1/2	1	4	0.061
Powdering	1/9	1/8	1/5	1/4	1	0.032

### 1.4 涂层老化指数

涂层老化的 5 项指标粉化、开裂、起泡、生锈以及剥落,参考 GB/T 1766—2008,对每项按 5 级、100 分值进行分级扣分,在两个等级之间的可根据情况进行扣分,如表 6 所示。

现场涂层老化评价时,根据标准的要求对各指标进行分级,依据表 3 给出指标得分值,按照公式(7)计算得到涂层综合老化状态指数,涂层老化指数等级划分及对应的维修建议见表 7。

表 6 涂层老化分级扣分表  
Tab.6 Deduction point of coating aging rating

Coating aging	1(S1)	2(S2)	3(S3)	4(S4)	5(S5)
Deduction score	20	40	60	80	100

$$CAI = 100 - \sum_i (DP_i \times \omega_i) \quad (7)$$

式中:  $DP_i$  表示老化指标  $i$  的扣分值;  $\omega_i$  是老化指标  $i$  的权重;  $CAI$  表示涂层综合老化状态指数。

表 7 涂层综合老化状态指数及维修建议  
Tab.7 Coating comprehensive aging status index and maintenance recommendations

Aging status	Very mild	Mild	Obvious	Little serious	Serious
CAI	$\geq 85$	75~84	60~74	45~59	$\leq 44$
Maintenance advice	Local applied	Repair areas where cracks in the coating peel off exposed substrate or where rust spots appear; the more severely powdered areas should be coated again		Repaint the whole area	Repaint the whole

## 2 储罐外涂层老化检测评价

### 2.1 检测区域的划分及抽样

储罐外涂层总体划分为罐顶、罐壁及附件三大区域。以 5000 m<sup>3</sup> 储罐为例,罐顶由中间的顶板及四周的瓜皮板构成,顶板作为独立检测区域,每一块瓜皮板作为一个检测区域;罐壁主要是由每层 10 块表面积相同的罐圈板焊接而成,总共 8 层,自下而上最底层为第一层,以第一层为例进行编号,见图 2。图 2 中标识 1-1 为第 1 层罐圈板正南方的第 1 块板,顺时

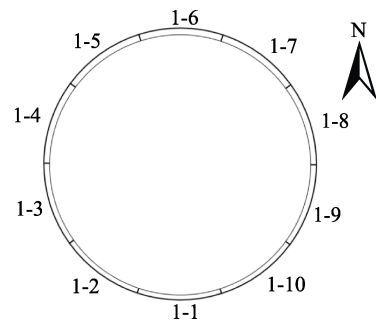


图 2 罐壁板编号方法  
Fig.2 Tank wall plate numbering method

针进行编号，单块罐壁板作为一个检测区域。

涂层的老化与光照、降雨等因素有关，因此抽样检测的原则应至少覆盖东、西、南、北四个方向。罐顶顶板作为一个必检的区域，瓜皮板按照低于 20% 的比例进行抽测，抽测的区域均匀覆盖四个方向。一层罐壁应至少抽查 4 块，同样覆盖四个方向，图 2 中，选取 1-1、1-4、1-6、1-9 四块作为第一层罐圈板的抽测对象，这四块涂层的综合老化状态指数平均值代表这一层的情况，以此类推，其余七层以同样的方式进行抽样检测。

2.2 检测结果与数据处理

以罐壁第一层为例，对抽取的 4 块罐壁板表面外涂层进行检测，并记录每一单项等级，见表 8。根据表 6，将表 8 每一单项的等级转化为扣分值，见表 9，通过公式（7）计算得到老化状态指数，结果列于表 9 最后一列。

从表 9 可见，该 5000 m<sup>3</sup> 储罐第一层抽取的四块罐圈板的外涂层老化状态指数均小于 44，属于表 7 中的严重，因此建议第一层涂层进行整体重涂。将每一层抽取的四块罐壁板外涂层的老化状态得分平均值，作为该层整体的得分。如第一层，根据表 9 计算

其老化指数为 22.523，以同样的方式对罐壁其他层、附件及罐顶进行评价，通过计算得到涂层老化状态指数，见表 10。

表 8 储罐第一层涂层老化分级  
Tab.8 Coating aging rating of tank first layer

Tank siding number	Rusting	Flaking	Cracking	Blistening	Powdering
1-1	3(S3)	3(S4)	2(S4)	4(S5)	3
1-4	5(S5)	4(S5)	2(S3)	3(S5)	3
1-6	4(S4)	4(S5)	2(S3)	3(S5)	3
1-9	5(S4)	3(S4)	2(S3)	3(S5)	3

表 9 储罐第一层涂层综合老化状态指数  
Tab.9 Coating comprehensive aging status index of tank first layer

Tank siding number	Rusting	Flaking	Cracking	Blistening	Powdering	CAI
1-1	60	70	55	90	60	35.785
1-4	100	90	50	75	60	11.075
1-6	80	90	50	75	60	21.235
1-9	90	70	50	75	60	21.995

表 10 储罐不同区域涂层综合老化状态指数  
Tab.10 Coating comprehensive aging status index in different areas of storage tank

Different areas of storage tank	Tank wall								Tank top	Tank attachment
	1st floor	2nd floor	3rd floor	4th floor	5th floor	6th floor	7th floor	8th floor		
CAI	22.523	27.325	48.652	44.387	46.436	5.822	21.120	11.833	21.854	2.960

从表 10 的结果可以看到，罐壁外涂层整体老化较为严重。生锈、涂层剥落主要分布在焊缝处，罐壁不同层有明显差异，其中 3、4、5 层的涂层老化情况略好，这主要是由于这三层结构相对单一，附件与罐壁的焊缝较少，罐壁锈点、涂层剥落情况相对较轻。最为严重的是第 6 层，加强圈与罐壁焊缝处涂层已全部脱落，并且焊缝处出现了明显的锈蚀，此处既是涂层施工难度较大区域，也是易积水的部位。第 8 层罐壁与罐顶边缘处涂层脱落严重，并且生锈严重。罐顶及附件外涂层老化总体较为严重，CAI 整体低于 44，其中附件整体涂层剥落、生锈最为严重，涂层剥落面积超过 50%。根据检测的结果，建议对该储罐整体进行重涂。

3 结论

1) GB/T 1766—2008 是评定涂层耐老化性的基础标准，对涂层老化的评价方法以及综合评级进行了规定，但存在量化不足、综合等级未涵盖所有老化情况、未给出维修建议等缺点。

2) 本文在涂层老化评级方法标准的基础上，采

用分层分析法，建立了涂层老化评价的数学模型。对储罐不同部位的涂层进行了区域的划分，评价不同区域的外涂层老化等级，利用数学模型对检测的老化等级进行计算，得到老化状态指数，实现了对储罐外涂层老化状态的量化评价，进一步综合量化评价储罐外涂层的整体老化情况，并给出了对该储罐整体重涂的维修建议。

参考文献：

[1] 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.  
PAN Ying, ZHANG San-ping, ZHOU Jian-long, et al. Mechanisms and influencing factors involved in ageing of organic coatings in atmospheric environment[J]. Paint & coatings industry, 2010, 40(4): 68-72.

[2] JACQUES L F E. Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings[J]. Progress in polymer science, 2000, 25(9): 1337-1362.

[3] YANG X F, LI J, CROLL S G, et al. Degradation of low gloss polyurethane aircraft coatings under UV and pro-

- hesion alternating exposures[J]. Polymer degradation and stability, 2003, 80(1): 51-58.
- [4] 黄磊, 王庆国. 广西南宁市酸雨特征及影响因素分析[J]. 贵州气象, 2011, 38(6): 52-54.  
HUANG Lei, WANG Qing-guo. Analysis on the characteristics and influencing factors of acid rain in Nanning, Guangxi[J]. Journal of Guizhou meteorology, 2011, 38(6): 52-54.
- [5] GB/T 1766—2008, 色漆和清漆涂层老化评级方法[S].  
GB/T 1766—2008, Paints and varnishes-rating schemes of degradation of coats[S].
- [6] 牟献良, 张伦武, 袁艺, 等. 涂层老化评级方法标准中的问题探讨[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 190-192.  
MU Xian-liang, ZHANG Lun-wu, YUAN Yi, et al. On problems of coating aging rating standard[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(6): 190-192.
- [7] 陈军斌, 杨锐. 最优化方法[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011.  
CHEN Jun-bin, YANG Rui. Optimization method[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011.
- [8] DELBARI S A, NG S I, AZIZ Y A, et al. An investigation of key competitiveness indicators and drivers of full-service airlines using delphi and AHP techniques[J]. Journal of air transport management, 2016, 52: 23-24.
- [9] CAO J, SONG W. Risk assessment of co-creating value with customers: A rough group analytic network process approach[J]. Expert systems with applications, 2016, 55: 145-156.
- [10] MARQUESDESA J P. 模式识别—原理、方法及应用[M]. 吴逸飞译. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
MARQUESDESA J P. Pattern recognition—Concepts, methods and applications[M]. WU Yi-fei, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [11] SIVAKUMAR R, KANNAN D, MURUGESAN P. Green vendor evaluation and selection using AHP and taguchi loss functions in production outsourcing in mining industry[J]. Resources policy, 2015, 46: 64-75.
- [12] LUTHRA S, MANGLA S K, XU L, et al. Using AHP to evaluate barriers in adopting sustainable consumption initiatives in a supply chain[J]. International journal of production economics, 2016(4): 1-8.
- [13] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.  
GUO Jin-yu, ZHANG Zhong-bin, SUN Qing-yun. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. China safety science journal, 2008, 18(5): 148-153.
- [14] 刘朝亮. 层次分析法在农业系统中的应用研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(13): 228-232.  
LIU Zhao-liang. Study on application of AHP in agricultural system[J]. Guangdong agricultural sciences, 2013, 40(13): 228-232.
- [15] 杜存山. 涂层性能状态评价数学模型[J]. 涂料工业, 2016, 43(4): 5-8.  
DU Cun-shan. Mathematical model for assessment of coating performance condition[J]. Paint & coatings industry, 2016, 43(4): 5-8.
- [16] 叶义成, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.  
YE Yi-cheng, KE Li-hua, HUANG De-yu. System comprehensive evaluation technology and its application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.  
朱玉琴, 宣卫芳, 王一临. 涂层自然环境试验模糊综合评价研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 16-20.
- [17] ZHU Yu-qin, XUAN Wei-fang, WANG Yi-lin. Research on fuzzy integrated evaluation of natural environmental test of coating[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(6): 16-20.
- [18] 李立云, 刘政, 王兆辉. 基于灰色关联模型的改进型层次分析法与基坑风险评价[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(6): 889-896.  
LI Li-yun, LIU Zheng, WANG Zhao-hui. Improved analytic hierarchy process based on gray correlation model and its application in pit engineering[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(6): 889-896.
- [19] CHAUDGARY P, CHETRI S K, JOSHI K M, et al. Application of an analytic hierarchy process (AHP) in the GIS interface for suitable fire site selection: A case study from Kathmandu metropolitan city, Nepal[J]. Socio-economic planning sciences, 2016, 53: 60-71.
- [20] HADIDI L A, KHATER M A. Loss prevention in turnaround maintenance projects by selecting contractors based on safety criteria using the analytic hierarchy process (AHP)[J]. Journal of loss prevention in industries, 2015, 34: 115-126.