

基于数据分析的大气腐蚀等级细化研究

吴超, 付冬梅, 李晓刚

(北京科技大学, 北京 100083)

摘要: **目的** 提出一种基于数据分析的方法对大气腐蚀等级进行细化。**方法** 以碳钢为例, 采用有序样本聚类方法, 对国内大气腐蚀试验站多年积累的腐蚀速率进行分析, 将大气腐蚀等级细化为10级。在此基础上, 根据腐蚀速率以及相应大气环境中的二氧化硫浓度、氯离子浓度、润湿时间的数据, 采用反距离加权插值法, 并结合ISO 9223—2012标准获取等级细化后的碳钢大气腐蚀性等级估计表。**结果** 经过细化之后的大气腐蚀等级10级分级结果为0~8 $\mu\text{m/a}$ (C1), 8~25 $\mu\text{m/a}$ (C2), 25~40 $\mu\text{m/a}$ (C3), 40~50 $\mu\text{m/a}$ (C4), 50~60 $\mu\text{m/a}$ (C5), 60~75 $\mu\text{m/a}$ (C6), 75~90 $\mu\text{m/a}$ (C7), 90~100 $\mu\text{m/a}$ (C8), 100~200 $\mu\text{m/a}$ (C9), 200~700 $\mu\text{m/a}$ (C10)。**结论** 该10级分级法将大气腐蚀等级划分得更为细化。

关键词: 大气腐蚀; 等级细化; 有序样本聚类; 反距离加权插值

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.004

中图分类号: TJ01; TG172.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0016-06

Refinement Research of Atmospheric Corrosion Categories Based on Data Analysis

WU Chao, FU Dong-mei, LI Xiao-gang

(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

ABSTRACT: Objective To propose a new method based on data analysis to refine the atmospheric corrosion categories. **Methods** The method of ordered sample clustering was used in this paper to analyze the data of carbon steel corrosion rate accumulated in atmospheric corrosion test stations in China during the past years. As a result, the atmospheric corrosion degree of carbon steel was divided into 10 categories. On this basis, the inverse distance weighted interpolation method combined with ISO 9223—2012 standard was used to obtain the estimation table of atmospheric corrosivity categories according to the concentration of sulfur dioxide, concentration of chlorine ion, time of wetness

收稿日期: 2015-04-18; 修订日期: 2015-06-28

Received: 2015-04-18; Revised: 2015-06-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51131005); 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB643300); 北京市重点学科共建项目(XK100080537)

Fund: Supported by Key Project of the National Natural Science Foundation of China(51131005); The National Basic Research Program of China(2014CB643300); Construction Project of Key Subject in Beijing(XK100080537)

作者简介: 吴超(1989—), 男, 河北, 硕士研究生, 主要研究方向为大气腐蚀数据挖掘。

Biography: WU Chao(1989—), Male, from Hebei, Master graduate student, Research focus: atmospheric corrosion data mining.

通讯作者: 付冬梅(1963—), 女, 北京人, 博士, 教授, 主要研究方向为智能数据分析。

Corresponding author: FU Dong-mei(1963—), Female, from Beijing, Doctor, Professor, Research focus: intelligent data analysis.

data and the corrosion rate data of carbon steel in the corresponding atmospheric environment. **Results** The result of refined 10 categorized was 0~8 $\mu\text{m/a}$ (C1), 8~25 $\mu\text{m/a}$ (C2), 25~40 $\mu\text{m/a}$ (C3), 40~50 $\mu\text{m/a}$ (C4), 50~60 $\mu\text{m/a}$ (C5), 60~75 $\mu\text{m/a}$ (C6), 75~90 $\mu\text{m/a}$ (C7), 90~100 $\mu\text{m/a}$ (C8), 100~200 $\mu\text{m/a}$ (C9), and 200~700 $\mu\text{m/a}$ (C10). **Conclusion** This 10-category method is more refined in describing atmospheric corrosion.

KEY WORDS: atmospheric corrosion; categories refinement; ordered sample clustering; inverse distance weighted interpolation

金属大气腐蚀等级的划分,对工程应用中设备选材与腐蚀防护有重要的意义。通常可以依据 ISO 9223—1992,利用大气环境中的二氧化硫浓度、氯离子浓度、润湿时间来判别金属大气的腐蚀等级,该标准将大气腐蚀性分为5个等级:很低(C1)、低(C2)、中等(C3)、高(C4)、很高(C5)。随着工业的加速发展以及环境污染的加剧,部分地区的大气腐蚀性已经超过 ISO 9223—1992 标准的最高级^[1],所以该标准亟需改进。2012年,国际标准化组织颁布 ISO 9223—2012 标准,新标准在旧标准基础上增加了一个更高级——极端(CX),解决了超出最高级范围的问题。

近些年来,国内外对 ISO 9223—1992 进行了深入研究,发现它仍存在以下不足之处。

1) 有些等级上下限不是很合理,如 C2 级碳钢的腐蚀速率为 1.3~25 $\mu\text{m/a}$,下限 1.3 $\mu\text{m/a}$ 仅在沙漠或南极洲的一些地区存在,而上限 25 $\mu\text{m/a}$ 则在温带气候区中分布广泛^[2]。

2) 有些等级范围比较宽泛,使得我国处于不同气候区的大气腐蚀试验站,按该标准却属于相同的等级。以碳钢腐蚀速率为例,热带的西双版纳、寒温带的漠河都属于 C2 级;亚湿热带的广州、湿热带的万宁都属于 C4 级;暖温带的青岛站、湿热带的江津站都属于 C5 级,这也有一定程度的不合理性^[3]。

由于 ISO 9223—2012 标准的 C1—C5 级腐蚀速率范围与 ISO 9223—1992 标准的 C1—C5 级腐蚀速率范围是完全一致的,故 ISO 9223—2012 标准同样存在以上两点不足,仍需进一步完善。

文中根据中国腐蚀与防护网提供的碳钢腐蚀速率数据,采用有序样本聚类法对其进行聚类分析,进而将大气腐蚀等级细化到 10 级。在此基础上,根据大气环境中的二氧化硫浓度、氯离子浓度、润湿时间及碳钢的腐蚀速率,采用反距离加权插值法,并结合 ISO 9223—2012 标准得到了 10 级分级法对应的等级估计表。

1 有序样本聚类

一般的聚类过程中,样本是彼此独立的,不考虑

它们的先后次序。在某些情况下,样本的次序是不能被打乱的,这样就需要进行有序样本聚类。有序样本聚类又称 Fisher 最优分割^[4-5],其思想是:找到一些分割点,将样本分割为几段,每段即为一类,目标是使同一类中的样本差异最小,不同类中的样本差异最大。

设 $X_1, X_2, \dots, X_l$ 是 l 个有序样本, $X_i (i=1, 2, \dots, l)$ 是 n 维向量。有序样本聚类步骤如下^[6]。

1) 计算所有可能类的直径。设某一类 G 包含的样本为 $\{X_i, X_{i+1}, \dots, X_j\}, i < j$ 。该类的直径定义为:

$$D(i, j) = \sum_{t=i}^j (X_t - \bar{X})^T (X_t - \bar{X}) \quad (1)$$

$$\bar{X} = (\sum_{t=i}^j X_t) / (j - i + 1) \quad (2)$$

式中: $\bar{X}$ 为该类的均值向量。类直径表示的是样本的离差平方和。

2) 计算损失函数。用 $b_{l,c}$ 表示将 l 个有序样本分为 c 类的一种分法,这种分法的损失函数定义为:

$$L(b_{l,c}) = \sum_{k=1}^c D(i_k, j_k) \quad (3)$$

因为 $D(i_k, j_k)$ 表示第 k 类的离差平方和,所以损失函数可以认为是某种分类的样本总离差平方和^[7]。然后计算出所有前 $p (p=1, 2, \dots, l)$ 个有序样本分为 $q (q=1, 2, \dots, p)$ 类的损失函数的最小值,得到的即为最小损失函数表。有序样本聚类就是从最小损失函数表中寻找一种使样本总离差平方和最小的划分,这便是最优的分割。

3) 损失函数的递推公式。设 Fisher 最优分割的损失函数为 $L(b_{l,c}^*)$ 。如果将 l 个有序样本分为 2 类,则有:

$$L(b_{l,2}^*) = \min \left(\sum_{k=1}^2 D(i_k, j_k) \right) = \min_{1 \leq j \leq l} (D(1, j-1) + D(j, l)) \quad (4)$$

如果将 l 个有序样本分为 $c (c > 2)$ 类,则有以下递推公式:

$$L(b_{l,c}^*) = \min \left(\sum_{k=1}^c D(i_k, j_k) \right) = \min_{c \leq j \leq l} (L(b_{j-1,c-1}^*) + D(i, l)) \quad (5)$$

该递推公式表明,若要寻找 l 个有序样本分为 c 类

的最优分割,要建立在前 $j-1$ 个有序样本分为 $c-1$ 类的最优分割基础上。

4) 求取最优分割的解。使损失函数达到最小的最优分割的求法如下^[8]:

首先找到分割点 j_c ,使 $L(b_{l,c}^*) = \min_{c \leq j \leq l} (L(b_{j-1,c-1}^*) + D(j_c, l))$ 成立,于是得到第 c 类,即 $G_c = \{X_{j_c}, X_{j_c+1}, \dots, X_l\}$ 。然后找到分割点 j_{c-1} ,使 $L(b_{j_{c-1},c-1}^*) = \min_{c-1 \leq j \leq j_c-1} (L(b_{j,c-2}^*) + D(j_{c-1}, j_c - 1))$ 成立,于是得到第 $c-1$ 类,即 $G_{c-1} = \{X_{j_{c-1}}, X_{j_{c-1}+1}, \dots, X_{j_c-1}\}$ 。依次类推,就可以得到最优分割 $G_1, G_2, \dots, G_c$ 。

2 大气腐蚀等级细化

文中所研究的腐蚀速率数据来源于“中国腐蚀与防护网”,从中选取ISO 9223—2012标准中涉及到的碳钢第一年的腐蚀速率作为聚类样本点。这些数据本身并不是有序的,在聚类之前需对数据按照数值从小到大进行排序并编号使之成为有序数据,排序结果如图1所示。

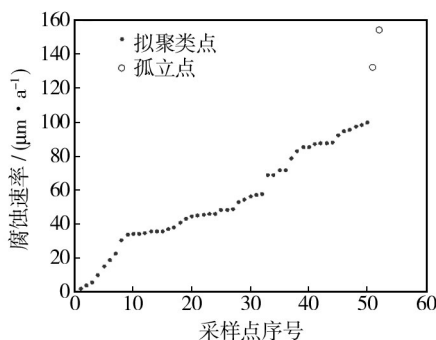


图1 碳钢腐蚀速率

Fig.1 Corrosion rate of carbon steel

由图1可看出,“中国腐蚀与防护网”提供的碳钢腐蚀速率数据是不均匀分布的,其中绝大部分数据腐蚀速率是小于等于 $100 \mu\text{m/a}$ 的(图1中的实心圆点),仅有两条数据腐蚀速率大于 $100 \mu\text{m/a}$ (图1中的空心圆点),并且这两条数据与其他数据距离较远,可以认为是孤立点,在聚类时会对结果产生不利影响。故在聚类分析时未考虑孤立点数据,仅对图1中的腐蚀速率小于 $100 \mu\text{m/a}$ 的数据进行了聚类分析。

对以上腐蚀速率数据进行有序样本聚类分析后,得到最小损失函数表,进而作出最小损失函数和类别数关系图,见图2。由图2可以得出:最小损失函数值随着类别数的递增呈现递减趋势,即类别数越大聚类

后样本信息损失越小。当类别数 $k < 8$ 时,最小损失函数值递减趋势快;当 $k \geq 8$ 时,最小损失函数值递减趋势慢。选择递减趋势快与慢的转折点,能够同时满足样本信息损失小和类别数不是太大的要求,由此确定将图1中腐蚀速率小于 $100 \mu\text{m/a}$ 的数据聚为8类。

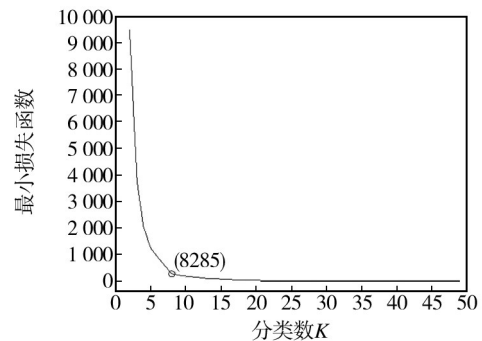


图2 最小损失函数和类别数的关系

Fig.2 The relationship between minimum loss function and classification number

确定类别数之后,通过在最小损失函数表中查找(按上节步骤4查找)可以得到腐蚀速率的聚类结果,见表1。

表1 聚类结果

Table 1 Results of clustering

等级	样本点序号	腐蚀速率/ $(\mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$
1	1—4	<8
2	5—7	8 ~ 25
3	8—17	25 ~ 40
4	18—27	40 ~ 50
5	28—32	50 ~ 60
6	33—36	60 ~ 75
7	37—44	75 ~ 90
8	45—50	90 ~ 100

腐蚀速率小于等于 $100 \mu\text{m/a}$ 的数据分为8级之后,将大于 $100 \mu\text{m/a}$ 的情况按照原ISO 9223—2012标准进行划分,即将大于 $100 \mu\text{m/a}$ 的情况分为2类($100 \sim 200 \mu\text{m/a}$ 为第9级, $200 \sim 700 \mu\text{m/a}$ 为第10级),最终得到了大气腐蚀性等级的10级分法。

表2是ISO 9223—2012标准分法和采用有序样本聚类得到的10级分法的对比。结果分析:文中的10级分法相当于将ISO 9223—2012标准中的C3级细分为C3, C4两个等级,将C4级细分为C5, C6, C7三个等级,将C5级细分为C7, C8, C9三个等级,达到了细化ISO 9223—2012标准分法的目的。

表2 不同划分方法的分级对比
Table 2 Comparison of category dividing methods

ISO 分法		10级分法	
腐蚀速率/($\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)	等级	腐蚀速率/($\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)	等级
<1.3	C1	<8	C1
1.3~25	C2	8~25	C2
25~50	C3	25~40	C3
50~80	C4	40~50	C4
80~200	C5	50~60	C5
200~700	CX	60~75	C6
		75~90	C7
		90~100	C8
		100~200	C9
		200~700	C10

表3是国内大气腐蚀站点在ISO 9223—2012标准分法和10级分法下的腐蚀等级对比。由表3可知,按照ISO 9223—2012的等级分法,气候不同的西双版纳与漠河、拉萨、敦煌腐蚀等级都是C2级,广州与万宁都是C4级;青岛与江津都是C5级。按照10级分法则能够很好地区分不同气候区的腐蚀等级:寒冷或干旱地区的漠河、拉萨、敦煌是C1级;湿润温暖的西双版纳是C2级;亚热带季风气候的广州是C5级;热带季风气候的万宁是C6级;温带季风海洋性气候的青岛是C7级;亚热带季风性湿润气候的江津是C9级。由此可见,采用有序样本聚类得到的10级分法的确达到了细化ISO 9223—2012标准的目的。

表3 大气腐蚀站点等级对比
Table 3 Comparison of categories in atmospheric corrosion stations

大气腐蚀站点	所属气候区	ISO 分级	文中分级
漠河	寒温带大陆性季风气候	C2	C1
拉萨	高原温带半干旱季风气候	C2	C1
敦煌	暖温带干旱性气候	C2	C1
库尔勒	暖温带干旱性气候	C2	C2
西双版纳	热带雨林气候	C2	C2
武汉	亚热带季风性湿润气候区	C3	C3
琼海	热带季风及海洋湿润气候	C3	C3
沈阳	温带季风气候	C3	C3
北京	温带季风气候	C3	C4
广州	亚热带季风气候	C4	C5
万宁	热带季风气候	C4	C6
青岛	温带季风海洋性气候	C5	C7
江津	亚热带季风性湿润气候	C5	C9

3 大气腐蚀等级估计表

由于金属材料的腐蚀速率获取难度比较大,实际应用时常常根据ISO 9223—2012标准中的大气腐蚀性等级估计表,见表4。利用大气环境中的二氧化硫浓度、氯离子浓度以及润湿时间三者的分类等级估计出腐蚀等级。上节已经得到等级细化后的大气腐蚀10级分法,本节将采用反距离加权插值法得到等级细化后的大气腐蚀等级估计表。

表4 ISO 9223—2012标准中的碳钢大气腐蚀性等级估计表
Table 4 The estimation table of atmospheric corrosivity categories of carbon steel in ISO 9223—2012 standard

	τ 1				τ 2				τ 3				τ 4				τ 5			
	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
P0	1	1	1	1or2	1	1	2	3or4	2or3	2or3	3or4	4	3	3	4	5	3or4	3or4	5	5
P1	1	1	1	1or2	1	1	2	3or4	2or3	2or3	3or4	4	3	3	4	5	3or4	3or4	5	5
P2	1	1	1	1or2	1or2	1or2	2or3	3or4	3or4	3or4	3or4	4or5	4	4	4	5	3or4	4or5	5	5
P3	1or2	1or2	1or2	2	2	2	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5

注:P0—P3表示二氧化硫浓度等级,S0—S3表示氯离子浓度等级, τ 1— τ 5表示润湿时间等级,1—5表示腐蚀速率等级C1—C5,1or2表示腐蚀速率等级C1或C2,该表未给出如何估计CX级。

反距离加权插值是一种空间插值方法,它利用已知的部分样本信息,可以估计未知点的信息^[9],广泛应用于气象^[10—11]、地质^[12—13]参数预测等领域。反距离加权法认为与未知点距离最近的若干已知样本点对未知点值贡献最大,其贡献与距离成反比^[9—14]。可用式(6)表示:

$$z = \left(\sum_{j=1}^n \frac{z_j}{d_j^p} \right) / \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j^p} \right)$$
 (6)

式中: z 是未知点的估计值; n 是已知样本点的数目; z_j 是第 j 个已知点的值; d_j 是已知点到未知点的距离; p 是距离的幂,文中 p 取2。

由原ISO 9223—2012标准中的等级估计表可知,

二氧化硫和氯离子浓度等级的取值都是0,1,2,3,润湿时间的取值是1,2,3,4,5,由此可将等级估计表视为一个 $4 \times 4 \times 5$ 的矩阵空间,再进行以下处理。

将二氧化硫浓度等级、氯离子浓度等级、润湿时间等级的任意一种组合看作一个类别的环境,那么等级估计表中共有 $4 \times 4 \times 5$ 个不同类别的环境。由于国内的大气腐蚀试验站总数量比较少,再加上有的试验站可能位于相同类别的环境中,相对于等级估计表中的 $4 \times 4 \times 5$ 个不同类别的环境而言,国内试验站的环境类别数据是比较少的,需要引入国外的试验站的数据来获得完整的等级估计表。故文中不仅采用了中

国腐蚀与防护网上提供的数据,而且从文献[15]与文献[16]中摘录了部分国外试验站的二氧化硫浓度、氯离子浓度、润湿时间及相应环境下第一年的碳钢腐蚀速率数据加以利用。以上这些数据对应的环境类型相对于等级估计表中 $4 \times 4 \times 5$ 个环境类型来说数量仍然比较少,将其对应到等级估计表(表5)中,发现存在很多未知点,需采用反距离加权插值法对未知点进行填补。另外,表5中样本点的分布是不均匀的,已知数据的润湿时间等级都分布在 $\tau 3$ 级及以上区域,在 $\tau 1, \tau 2$ 级区域无数据分布。

反距离加权插值法填补步骤如下:

表5 已知样本点在等级估计表中的分布

Table 5 Distribution of known sample points in the category estimation table

	$\tau 1$				$\tau 2$				$\tau 3$				$\tau 4$				$\tau 5$			
	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
P0									2				3			7	4or5			
P1									3or4								4or5	6or7		9or 10
P2																				
P3													6					8or9		10

1) 因为反距离加权插值算法是对具体数值进行处理,所以需要表5中已知样本点的等级转换成具体数值。如表5中(P0,S0, $\tau 3$)的腐蚀等级是C2,那么(P0,S0, $\tau 3$)点对应的值就设为2.0,而(P1,S1, $\tau 3$)的腐蚀等级是C3或C4,那么它对应的值设为3.5,其他已知样本点的值同理。

2) 根据公式(6)计算出未知点的值填补到表5中。

3) 反距离加权插值法得到的结果是具体的数值,还需要将数值根据式(7)反推出腐蚀等级,进而得到等级细化后的大气腐蚀性等级表,见表6。

$$Z = \begin{cases} n, & n \leq z < n + 0.4 \\ n \text{ 或 } n + 1, & n + 0.4 \leq z < n + 0.8 \\ n + 1, & n + 0.8 \leq z < n + 1.0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:Z表示腐蚀等级;n为整数,取值范围为1~

9;z为反距离加权插值结果数值。

表6存在着明显的错误,当润湿时间为 $\tau 1, \tau 2$ 级时,可以看出插值得到的腐蚀等级明显与表4不符,这是由于已知样本点数据分布不均造成的,如表5所示。反距离加权插值的特点是样本点越密集插值结果越准确,所以采用表5中的样本点进行插值,得到的 $\tau 3, \tau 4, \tau 5$ 级区域的结果是与实际情况相符的,而 $\tau 1, \tau 2$ 级区域的结果将与实际情况存在很大偏差。

为解决这个问题,考虑将表4中的 $\tau 1, \tau 2$ 级区域替换表6中的 $\tau 1, \tau 2$ 级区域。因为从表4中可以得出, $\tau 1, \tau 2$ 级区域的腐蚀等级基本上是C1,C2级,而从表2中又可以得出,ISO 9223—2012标准中C1,C2级的腐蚀速率和10级分法的C1,C2级的腐蚀速率范围基本一致,所以可以认为10级分法的等级估计表的

表6 反距离加权法插值得到的等级估计表

Table 6 The category estimation table with inverse distance weighted interpolation method

	$\tau 1$				$\tau 2$				$\tau 3$				$\tau 4$				$\tau 5$			
	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
P0	3or4	4	5	6	2or3	3or4	5	6	2	2or3	4or5	5	3	3or4	5or6	7	4or5	4or5	6or7	7or 8
P1	4	4or5	5or6	6	3or4	4	5or6	6or7	2or3	3or4	4or5	5or6	3or4	3or4	6	7or8	4or5	6or7	7or8	9or 10
P2	5	5or6	6	6or7	5	5or6	6	7	4or5	4or5	5or6	7	5or6	6	6or7	8	6	7or8	8or9	10
P3	5or6	6	6	6or7	6	6	6or7	7	5	5or6	6or7	7or8	6	7or8	8	8or9	7or8	8or9	9	10

$\tau 1$, $\tau 2$ 级区域与 ISO 9223—2012 等级估计表的 $\tau 1$, $\tau 2$ 级区域基本是一样的。最终将表 4 中的 $\tau 1$, $\tau 2$ 级区域与表 6 中的 $\tau 3$, $\tau 4$, $\tau 5$ 级区域融合得到完整的碳钢大气腐蚀性等级估计表,见表 7。

表 7 碳钢大气腐蚀性等级估计表
Table 7 The estimation table of atmospheric corrosivity categories of carbon steel

	$\tau 1$				$\tau 2$				$\tau 3$				$\tau 4$				$\tau 5$			
	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
P0	1	1	1	1or2	1	1	2	3or4	2	2or3	4or5	5	3	3or4	5or6	7	4or5	4or5	6or7	7or 8
P1	1	1	1	1or2	1	1	2	3or4	2or3	3or4	4or5	5or6	3or4	3or4	6	7or8	4or5	6or7	7or8	9or 10
P2	1	1	1	1or2	1or2	1or2	2or3	3or4	4or5	4or5	5or6	7	5or6	6	6or7	8	6	7or8	8or9	10
P3	1or2	1or2	1or2	2	2	2	3	4	5	5or6	6or7	7or8	6	7or8	8	8or9	7or8	8or9	9	10

文中的碳钢大气腐蚀性等级估计表与 ISO 9223—2012 中的等级估计表对比:

1) 文中的等级估计表估计出的腐蚀速率范围比原等级估计表估计出的腐蚀速率范围更加精细,如 (P0,S0, $\tau 5$) 由原等级估计表估计的结果是 C3 或 C4 级(腐蚀速率范围是 25 ~ 80 $\mu\text{m/a}$),由文中等级估计表估计出的结果是 C4 或 C5 级(腐蚀速率范围是 40 ~ 60 $\mu\text{m/a}$),即分级结果更加细化。

2) 原等级估计表能估计出的最高等级是 C5 级(腐蚀速率范围是 80 ~ 200 $\mu\text{m/a}$),而文中的等级估计表能估计出的最高等级是 C10 级(腐蚀速率范围是 200 ~ 700 $\mu\text{m/a}$),比原最高等级的腐蚀速率范围要大。

4 结语

根据样本分布不均的环境数据及对应的碳钢腐蚀速率,首先采用有序样本聚类法将碳钢的大气腐蚀等级分级由 ISO 9223—2012 标准下的 6 级细化到 10 级。然后采用反距离加权插值法并结合 ISO 9223—2012 标准得到了碳钢大气腐蚀 10 级分级下的等级估计表。该方法为大气腐蚀等级分类分级提供了一种新的解决方案。

参考文献:

[1] 李家柱. 大气环境及腐蚀性[J]. 装备环境工程,2005,2(2): 56—62.
LI Jia-zhu. Atmospheric Environments and Their Corrosivity [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(2): 56—62.

[2] 王玲,牟献良,朱蕾,等. 大气环境腐蚀性分类分级研究综述[J]. 装备环境工程,2010,7(6):24—27.
WANG Ling, MU Xian-liang, ZHU Lei, et al. Review of At-

mospheric Corrosivity Classification[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 24—27.

[3] 张伦武. 国防大气环境试验站网建设及试验与评价技术研究[D]. 天津:天津大学,2008.
ZHANG Lun-wu. The Study for Construction of National Defense Atmospheric Environmental Test Network and Technology of Environmental Test and Worthiness Evaluation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.

[4] 肖聪,顾圣平,崔巍,等. Fisher 最优分割法在李仙江流域汛期分期中的应用[J]. 水电能源科学,2014, (3): 70—74.
XIAO Cong, GU Sheng-ping, CUI Wei, et al. Application of Fisher Optimal Partition Method in Division of Flood Season in Lixianjiang Basin[J]. Water Resources and Power, 2014, (3): 70—74.

[5] 潘映默,王菲凤,张江山. Fisher 法在土壤污染综合评价优化布点中的应用[J]. 安全与环境学报,2012, 12(2): 134—137.
PAN Ying-mo, WANG Fei-feng, ZHANG Jiang-shan. Application of Fisher Method to the Optimal Selection of Monitoring Sites in Comprehensive Assessment of the Soil Pollution[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(2): 134—137.

[6] 高峰,刘江,杨新刚,等. 基于 Fisher 最优分割法的机床热关键点优化研究[J]. 仪器仪表学报,2013, 34(5): 1070—1075.
GAO Feng, LIU Jiang, YANG Xin-gang, et al. Study on Optimization of Thermal Key Points for Machine Tools Based on Fisher Optimal Segmentation Method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1070—1075.

[7] WANG Ming-wu, WEI Dong-fang, LI Jian, et al. A Novel Clustering Model Based on Set Pair Analysis for the Energy Consumption Forecast in China[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 21(3): 166—183.

[8] 王秋平,刘婷婷,张琦,等. 有序样本聚类法在 SLP 物流强度等级划分中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2012, 44(2): 231—237.

- WANG Chuan, WANG Zhen-yao, KE Wei. Characterisation of Initial Rust Formed on Q235 Steel in the Wet Environment with SO₂ Pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(23):2833—2838.
- [7] 曲庆, 严川伟, 张蕾, 等. NaCl 和 SO₂ 在 A3 钢初期大气腐蚀中的协同效应[J]. 金属学报, 2002, 38(10):1062—1066.
- QU Qing, YAN Chuan-wei, ZHANG Lei, et al. Synergism of NaCl and SO₂ in the Initial Atmospheric Corrosion of A3 Steel[J]. ACTA Metallurgica Sinica, 2002, 38(10):1062—1066.
- [8] 万晔, 严川伟, 曹楚南. 可溶盐沉积对碳钢大气腐蚀的影响[J]. 物理化学学报, 2004, 20(6):659—663.
- WAN Ye, YAN Chuan-wei, CAO Chu-nan. Atmospheric Corrosion of Q235 Steel Deposited with Different Salts[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2004, 20(6):659—663.
- [9] MANSFELD F, TSAI S. Laboratory Studies of Atmospheric Corrosion—I. Weight Loss and Electrochemical Measurements[J]. Corrosion Science, 1980, 20:853—872.
- [10] 蔡健平, 郑逸苹, 刘寿荣. 氯化物、硫污染物对碳钢大气腐蚀的协同作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1996, 16(4):303—306.
- CAI Jian-ping, ZHENG Yi-ping, LIU Shou-rong. Synergistic Effect of Chloride and Sulphur-bearing Pollutant in Atmospheric Corrosion of Mild Steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and protection, 1996, 16(4):303—306.
- [11] 王振尧, 郑逸苹, 刘寿荣. A3 钢在人造污染介质中的大气腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1994, 14(3):240—246.
- WANG Zhen-yao, ZHENG Yi-ping, LIU Shou-rong. Behaviour of Atmospheric Corrosion of Carbon Steel in Artificially Polluted Media[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1994, 14(3):240—246.
- [12] ISHIKAWA T, KONDO Y, YASUKAWA A, et al. Formation of Magnetite in the Presence of Ferric Oxyhydroxides[J]. Corrosion Science, 1998, 40:1239—1251.
- [13] REMAZEILLES C, REFAIT Ph. On the Formation of β -FeOOH (akaganeite) in Chloride-containing Environments[J]. Corrosion Science, 2007, 49:844—857.
- [14] KAMIMURA T, HARA S, MIYUKI H, et al. Composition and Protective Ability of Rust Layer Formed on Weathering Steel Exposed to Various Environments[J]. Corrosion Science, 2006, 48:2799—2812.
- [15] OH S J, COOK D C, TOWNSEND H E. Atmospheric Corrosion of Different Steels in Marine, Rural and Industrial Environments[J]. Corrosion Science, 1999, 41:1687—1702.
- [16] YAMASHITA M, KONISHI H, KOZAKURA T, et al. In Situ Observation of Initial Rust Formation Process on Carbon Steel under Na₂SO₄ and NaCl Solution Films with Wet/Dry Cycles Using Synchrotron Radiation X-rays[J]. Corrosion Science, 2005, 47:2492—2498.
- [17] ALLAM I M, ARLOW J S, SARICIMEN H. Initial Stages of Atmospheric Corrosion of Steel in the Arabian Gulf[J]. Corrosion Science, 1991, 32:417—432.

(上接第 21 页)

- WANG Qiu-ping, LIU Ting-ting, ZHANG Qi, et al. Application of Ordered Sample Clustering Method in Systematic Layout Planning Classification of Logistics Strength[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2012, 44(2):231—237.
- [9] 何立恒, 鲍其胜, 王庆. 基于反距离夹角加权算法的地理信息空间内插方法[J]. 测绘通报, 2014, (1):33—36.
- HE Li-heng, BAO Qi-sheng, WANG Qi. Geographic Information Spatial Interpolation Methods Using the Weighted Algorithm of Inverse Distance and Angle[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014, (1):33—36.
- [10] 段平, 盛业华, 李佳, 等. 自适应的 IDW 插值方法及其在气温场中的应用[J]. 地理研究, 2014, 33(8):1417—1426.
- DUAN Ping, SHENG Ye-hua, LI Jia, et al. Adaptive IDW Interpolation Method and Its Application in the Temperature Field[J]. Geographical Research, 2014, 33(8):1417—1426.
- [11] CHEN Feng-wen, LIU Chen-wu. Estimation of the Spatial Rainfall Distribution Using Inverse Distance Weighting (IDW) in the Middle of Taiwan[J]. Paddy & Water Environ-
- ment, 2012, 10(3):209—222.
- [12] WANG Yi-yi, KOCKELMAN K M, DAMIEN P. A Spatial Autoregressive Multinomial Probit Model for Anticipating Land-use Change in Austin, Texas[J]. Annals of Regional Science, 2014, 52(1):251—278.
- [13] VAROUCHAKIS E A, HRISTOPULOS D T. Comparison of Stochastic and Deterministic Methods for Mapping Groundwater Level Spatial Variability in Sparsely Monitored Basins[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2013, 185(1):1—19.
- [14] BABAK O. Inverse Distance Interpolation for Facies Modeling[J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2014, 28(6):1373—1382.
- [15] MARIACA R L, ALMEIDA E, BO A D, et al. Marine Atmospheric Corrosion of Reference Metals in Tropical Climates of Latin-America[J]. Astm Special Technical Publication, 2000 (1399):3—17.
- [16] COOK D, ORDEN A V, REYES J, et al. Atmospheric Corrosion in Marine Environments along the Gulf of Mexico[J]. ASTM Special Technical Publication, 2000 (1399):18—32.