

自然环境因素对铝合金大气腐蚀的影响性研究

张志豪, 舒畅, 王竞成*

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究铝合金大气腐蚀受自然环境因素的影响性, 探索环境因素对铝合金腐蚀的影响规律。**方法** 采用多层感知器神经网络分析环境因素对 7 种铝合金平均腐蚀速率的影响。**结果** 确定了影响铝合金腐蚀损伤的重要因素为 SO_2 沉积率、 Cl^- 沉积率、 NO_x 沉积率; 辅要因素为年降雨量、年雾露时数、相对湿度、年日照时数、温度、铝合金成分; 次要因素为年累积降水时数、雨水 pH 值。**结论** 基于多层感知器神经网络分析有效展现了环境因素对平均腐蚀速率的影响性。

关键词: 铝合金; 环境因素; 大气腐蚀; 神经网络; 多层感知器; 平均腐蚀速率

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)12-0156-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.12.020

Effect of Natural Environmental Factors on Atmospheric Corrosion of Aluminum Alloys

ZHANG Zhi-hao, SHU Chang, WANG Jing-cheng*

(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of natural environmental factors on corrosion of aluminum alloys, and explore the effect law of environmental factors on corrosion of aluminum alloys. The effect of environmental factors on the average corrosion rate of seven aluminum alloys was analyzed by multi-layer perceptron neural network. The important factors affecting the corrosion damage of aluminum alloy were Cl^- deposition rate, SO_2 deposition rate, NO_x deposition rate. The auxiliary factors were annual rainfall, annual fog and dew hours, relative humidity, annual sunshine hours, temperature, and chemical composition. The secondary factors were annual precipitation hours and PH of rain. The analysis based on the multi-layer perceptron neural network effectively demonstrates the effect of environmental factors on the average corrosion rate of aluminum alloys.

KEY WORDS: aluminum alloy; environmental factor; atmospheric corrosion; neural network; multi-layer perceptron; average corrosion rate

金属材料的大气腐蚀行为及机理的研究一直受到人们的关注, 同时探索和总结金属腐蚀受环境因素的影响规律也至关重要。铝合金的大气腐蚀与环境

之间的相关性研究一直是腐蚀科学研究的重要方向, 也是发展防护和预测腐蚀速率的基础^[1-3]。铝合金大气腐蚀受各环境因素的影响可为室内加速试验

收稿日期: 2023-06-15; 修订日期: 2023-09-11

Received: 2023-06-15; Revised: 2023-09-11

基金项目: 博士后出站留(来)渝资助(渝人社办[2023]70号)

Fund: Supported by the postdoctoral fellows to stay(come) in ChongQing (YuRenSheBan[2023]No.70)

引文格式: 张志豪, 舒畅, 王竞成. 自然环境因素对铝合金大气腐蚀的影响性研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 156-162.

ZHANG Zhi-hao, SHU Chang, WANG Jing-cheng. Effect of Natural Environmental Factors on Atmospheric Corrosion of Aluminum Alloys[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 156-162.

*通信作者 (Corresponding author)

研究与大气腐蚀研究提供理论依据, 具有极为重要的意义^[4-5]。

气象因素、污染介质因素及材质因素等均影响金属材料大气腐蚀^[6-7]。由于铝合金大气腐蚀受到多种环境因素的影响, 而且作用复杂, 利用线性回归等方法对铝合金大气腐蚀与影响因素的作用进行分析难以得到令满意的结果。目前, 已有一些金属材料大气腐蚀环境因子灰色关联分析的研究。王瑞峰等^[8]利用灰色关联分析了影响 LY12CZ 铝合金腐蚀环境因子的关联度会随着暴露年限而变化, 而气象环境因子却均未发生变化, 通过考虑时间的累积作用, 研究了铝合金大气腐蚀影响因素随时间的变化规律, 但只针对了 LY12CZ 这 1 种铝合金进行分析, 其他铝合金受大气腐蚀环境因子的关联性还有待研究。此外, 郑弃非等^[9]和刘治国等^[10]分别采用灰色关联方法分析了气象因素和污染物对金属材料大气腐蚀速率的影响, 给出了环境因素对金属材料大气腐蚀的影响顺序。其中, 污染物因素 SO₂ 对铝及铝合金大气腐蚀的影响最大, 影响较大的气象因素之一是平均湿度。但由于多种环境因素会综合影响铝合金的大气腐蚀, 难以通过环境因素重要性前后排序的方式来表示自然环境因素对铝合金大气腐蚀的影响性。徐安桃等^[11]利用神经网络模型对车辆装备冷却系金属腐蚀预测, 预测结果平均误差仅为 0.43%, 具有较高的精度, 为车辆装备冷却系定期维护保养提供理论支撑。然而, 对于神经网络在轻质金属材料铝合金腐蚀中的分析却不多, 采用神经网络不需确定各因素之间存在的非线性关系, 能处理复杂的多输入、多输出的非线性系统。这一特性给环境因素对金属腐蚀影响性的建模和分析带来极大

方便的同时, 又克服了选择适当模型函数形式的困难及传统分析过程的复杂性^[12-13]。

目前为止, 针对铝合金在我国大气中的腐蚀行为与其环境因素的影响性研究分析依然很少。本文突破了通过影响因素单一的前后排序来表示对金属大气腐蚀影响性的传统方法, 提出对影响因素重要性分类的方式, 将整个腐蚀过程中影响铝合金腐蚀损伤因素分为重要、辅要、次要因素三大类。同时, 采用 IBM SPSS Statistics 20.0 多层感知器神经网络模型对大量数据高效分析。其中, 以我国大气腐蚀试验网站积累的气象环境因素、大气污染介质因素和合金成分作为影响因素样本数据, 作为大气腐蚀样本数据的 7 种铝合金在我国大气环境中的平均腐蚀速率通过在我国湿热海洋大气环境的万宁试验站、亚湿热工业环境的江津试验站、寒冷乡村环境的漠河试验站 3 个典型大气环境暴露试验 1、3、5 a 得到, 采用多层感知器神经网络就环境因素对铝合金大气腐蚀的影响性进行初步分析。

1 试验

1.1 试样

选取装备常用的 7 种铝合金 2B06-T4、2D12-T4、3A21-H24、5A05-O、7A09-T6、7B04-T6、5A90-T3 进行户外大气暴露试验, 其中用于平板试样尺寸为 100 mm×50 mm×(2~3) mm。各种铝合金的牌号、热处理状态及主要化学成分见表 1。每种铝合金 3 件平行样, 用于测试铝合金的平均腐蚀速率。

表 1 7 种铝合金的热处理状态和化学成分 (质量分数, %)
Tab.1 Heat treatment state and chemical composition of seven aluminum alloys (mass fraction, %)

材料及热处理状态	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Li	Zn	Ti	Al
2B06-T4	<0.2	<0.3	4.05	0.6	2.0	—	0.1	≤0.05	余量
2D12-T4	0.20	0.30	4.35	0.7	1.5	—	0.10	0.10	余量
3A21-H24	0.6	0.7	0.2	0.5	0.05	—	0.10	0.15	余量
5A05-O	0.50	0.50	0.10	0.4	5.15	—	0.20	—	余量
7A09-T6	0.5	0.5	1.6	0.15	2.5	—	5.6	0.10	余量
7B04-T6	<0.10	0.05~0.25	1.7	0.3	2.3	—	5.75	≤0.05	余量
5A90-T3	<0.15	≤0.20	0.05	—	5.25	1.75	—	≤0.1	余量

1.2 暴露试验

铝合金试样投试前用丙酮除油, 在经过去离子水冲洗、乙醇脱水、干燥后, 称量, 测量长宽高尺寸。为使铝合金试样直接经受户外大气环境的综合作用, 将铝合金试样受试面与水平面呈 45°角固定在暴露架, 投试在万宁、江津、漠河 3 个典型大气环境试验站。在户外暴露 1、3、5 a 后取回试样, 去除腐蚀产物后, 按 GB/T 16545, 通过失重法来评定铝合金的

平均腐蚀速率。

1.3 神经网络的结构确定

本文采用基于 IBMSPSSStatistics20.0 软件中多层感知器 (MLP) 神经网络完成分析。为防止过度拟合, 在神经网络分析中将样本分成 2 部分, 即按照 7: 3 的比例形成训练集和测试集, 神经网络结构的确定通过训练数据集训练神经网络来完成, 神经网络模型效果的验证通过测试数据集完成。

我国万宁、江津、漠河典型环境试验站主要环境参数的量值见表 2，包含湿热海洋大气环境、寒冷乡村环境、亚湿热工业环境各 10 项，将对铝合金环境腐蚀损伤影响较大的气象环境因素和大气污染介质因素作为多层感知器神经网络输入参量。其中，气象环境因素包含温度、湿度、降水、雾和露以及太阳辐射引起的干湿交替；大气污染介质中硫化物、盐雾、氮化物、雨水 pH 值。同时，金属材料的环境腐蚀损伤与材料本身的化学成分和热处理状态息息相关^[14]。通过分析表 1 中 7 种铝合金的化学成分可以看出，7 种铝合金中主要在 Cu、Mg、Li、Zn 等 4 种元素的含量上存在较大差异，因此在本文中同时引入这 4 种元

素含量作为输入参量，如表 3 所示。其中，对于某种元素含量为范围的，则取含量范围的中值，而对于不含某种元素的，则规定为 0.001。

金属材料的环境损伤主要体现在宏观腐蚀方面，其中宏观腐蚀程度以平均腐蚀速率大小表示^[15-16]。因此，本文主要采用平均腐蚀速率表示铝合金的环境损伤，作为多层感知器神经网络参量。7 种铝合金在万宁、江津、漠河 3 个典型大气环境试验站通过 1、3、5 a 为暴露周期的大气平均腐蚀速率见表 4。通过多层感知器神经网络对铝合金腐蚀试验数据进行学习训练，研究环境因素对铝合金大气腐蚀损伤的影响性关系。

表 2 万宁、江津、漠河典型环境试验站主要环境参数的量值

Tab.2 Quantitative values of main environmental parameters of Wanning, Jiangjin and Mohe typical environmental test stations

试验站	平均 温度/℃	平均相 对湿度/%	年日照 时数/h	年降水 时数/h	年降 雨量/mm	雾和 露/h	氯离子 质量浓度/ (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	二氧化硫 质量浓度/ (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	氮氧化 物质量浓度/ (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	雨水 pH 值
万宁站	24.6	86	2 154	389	2 269	785	348.99	16.16	1.64	5.4
江津站	18.5	78	1 487	461	1 203	1 220	0.71	76.96	4.01	4.6
漠河站	-1.5	64	1 942	259	491	50	0.21	3.11	0.32	6.5

表 3 7 种铝合金中 Cu、Mg、Li、Zn 含量 (质量分数, %)
Tab.3 Content of Cu, Mg, Li and Zn in seven aluminum alloys
(mass fraction, %)

材料及热处理状态	Cu	Mg	Li	Zn
2B06-T4	4.05	2.00	0.001	0.10
2D12-T4	4.35	1.50	0.001	0.10
3A21-H24	0.20	0.05	0.001	0.10
5A05-O	0.10	5.15	0.001	0.20
7A09-T6	1.60	2.50	0.001	5.60
7B04-T6	1.70	2.30	0.001	5.75
5A90-T3	0.05	5.25	1.75	0.001

气污染介质因素、化学成分对铝合金平均腐蚀速率的影响性，将铝合金平均腐蚀速率选定为因变量，温度、相对湿度、年累计降水、年雾露时数、年降雨量、年日照时数、雨水 pH 值、SO₂ 沉积率、NO_x 沉积率、Cl⁻ 沉积率、Cu 含量、Mg 含量、Zn 含量、Li 含量选定为因子。以铝合金大气暴露 1、3、5 a 的平均腐蚀速率为环境损伤指标的多层感知器神经网络模型相对误差结果：训练相对误差分别为 5.8%、1.2%、4.8%，测试相对误差分别为 3.1%、0.6%、13.8%。总体来看，多层感知器神经网络模型的训练集和测试集的相对误差均在 15%以内，说明通过 IBMSPSSStatistics20.0 多层感知器神经网络完成的分析具有较好精度。

以铝合金大气暴露 1、3、5 a 的平均腐蚀速率为环境损伤指标的多层感知器神经网络模型残差分析结果如图 1 所示。由图 1 可以看出，绝大部分数据点

2 结果及讨论

利用多层感知器神经网络分析气象环境因素、大

表 4 7 种铝合金的大气平均腐蚀速率

Tab.4 Atmospheric average corrosion rate of seven aluminum alloys

		μm/a						
试验站	试验时间/a	2B06-T4	2D12-T4	3A21-H24	5A05-O	7A09-T6	7B04-T6	5A90-T3S
万宁	1	2.075	2.737	2.251	0.861	15.417	3.208	1.250
	3	1.620	1.137	1.491	0.696	5.034	1.970	1.030
	5	1.449	1.347	1.561	0.750	5.667	1.509	0.670
江津	1	0.508	0.967	0.522	0.479	2.115	0.295	0.099
	3	0.389	0.416	0.646	0.414	0.389	0.176	0.112
	5	0.220	0.208	0.453	0.223	0.508	0.073	0.142
漠河	1	0.001	0.141	0.041	0.118	0.126	0.090	0.001
	3	0.061	0.029	0.034	0.181	0.045	0.025	0.064
	5	0.084	0.105	0.026	0.088	0.050	0.050	0.044

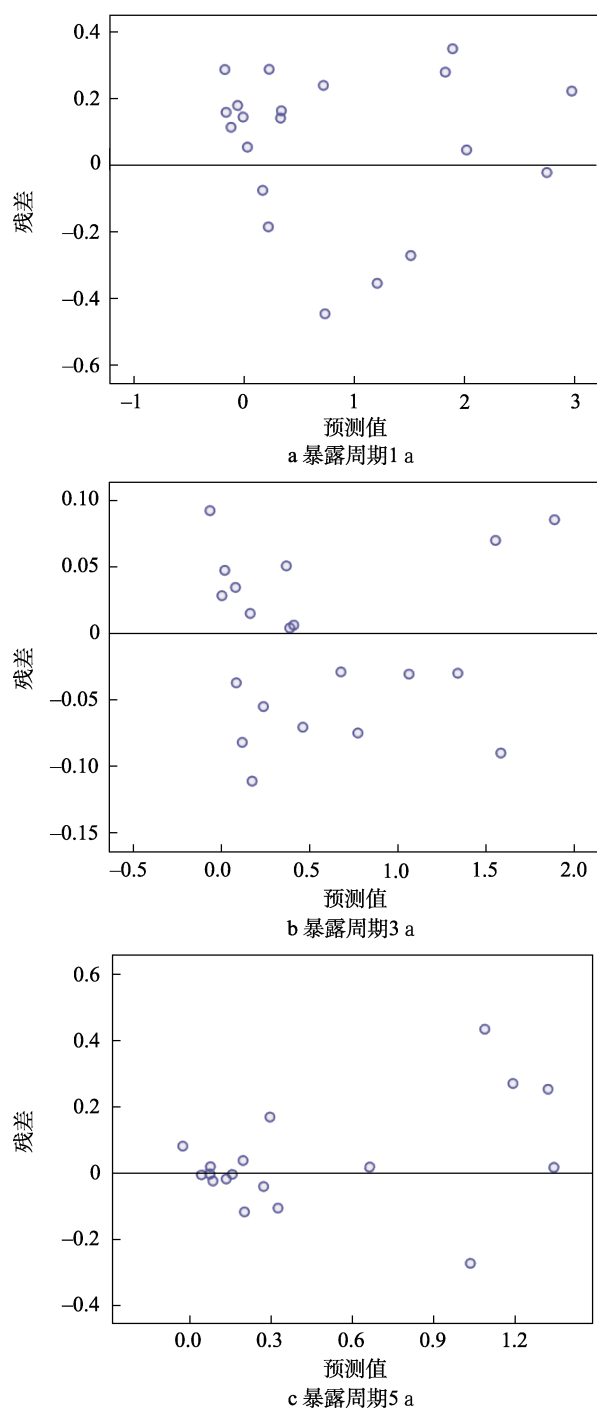


图1 平均腐蚀速率为环境损伤指标的神经网络模型残差分析结果

Fig.1 Residual analysis diagram of neural network model with average corrosion rate as environmental damage index:

a) exposure period of 1 year; b) exposure period of 3 years; c) exposure period of 5 years

分别随机均匀分布在相对较窄的 $(-0.6, 0.4)$ 、 $(-0.15, 0.1)$ 、 $(-0.4, 0.6)$ 的水平带状区间中。由此可知,以平均腐蚀速率为环境损伤指标建立多层感知器神经网络模型的准确度较高。

以平均腐蚀速率为环境损伤指标的多层感知器神经网络模型中影响因素的重要性如图2所示。本文对多层感知器神经网络分析得出的全部影响因素中,

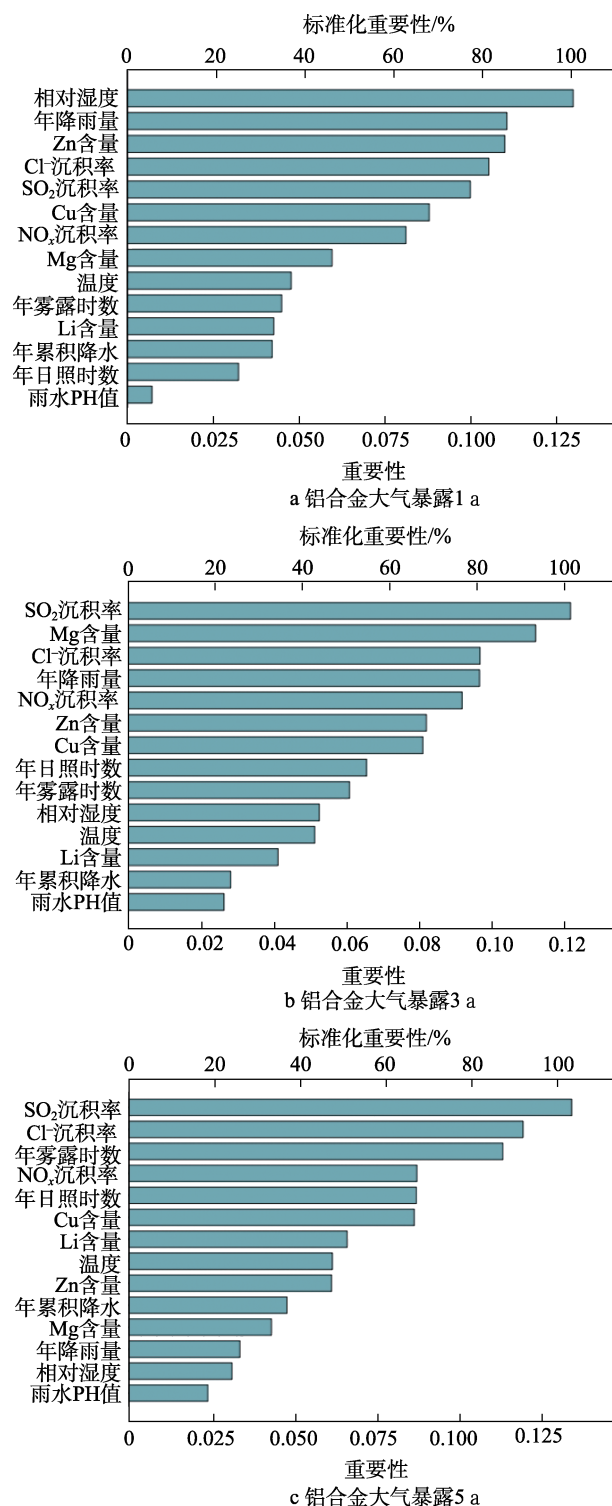


图2 平均腐蚀速率为环境损伤指标的神经网络模型影响因素的相对重要性

Fig.2 Relative importance diagram of the affecting factor in neural network model with the average corrosion rate as the environmental damage index: a) aluminum alloys exposed to the atmospheric environment for 1 year; b) aluminum alloys exposed to the atmospheric environment for 3 years; c) aluminum alloys exposed to the atmospheric environment for 5 years

将最重要因子的重要性换算成100%的相对重要性,为将所有因子的重要性进行标准化处理,与其相比下

其余影响因素的重要性换算成 0~100% 的比例。

随着铝合金在大气暴露年限的增加,铝合金长期大气暴露过程中经历了点蚀、晶间腐蚀、剥蚀,在不同腐蚀阶段,腐蚀影响因素的显著性各有不同^[17-19]。由图 2a 可知,相对湿度对铝合金暴露 1 a 的平均腐蚀速率的影响性最大,Cl⁻和 SO₂ 沉积率的相对重要性分别为 81.10% 和 76.90%,且 Cl⁻沉积率大于 SO₂ 沉积率的重要性。这主要因为此阶段的腐蚀是高相对湿度与 Cl⁻共同作用,铝合金表面长期形成含有 Cl⁻的电解质薄液膜,且干湿交替。由于 Cl⁻有较强的活化作用,离子半径小,具有很强的穿透能力和侵蚀性,容易在铝合金腐蚀开始阶段透过氧化膜内极小的孔隙,导致铝合金氧化性保护膜的局部减薄和破裂,从而开始并加速点蚀的发展。因此,经多层感知器神经网络分析得出的结果,相对湿度、Cl⁻和 SO₂ 沉积率是影响铝合金大气腐蚀的重要因素,这也与 Elola 等^[20]和 Oesch 等^[21]认为 Cl⁻、SO₂ 和金属表面润湿时间是铝合金大气腐蚀的决定性因素的结论是一致的。同时,由图 2 可以看出,年累积降水、年日照时数、雨水 pH 值等因素对铝合金大气暴露 1 a 的平均腐蚀速率的影响较小。

从图 2b、c 可以看出,Cl⁻、SO₂ 对铝合金暴露 3、5 a 的平均腐蚀速率的影响性变大,主要是因为大气中腐蚀介质不断溶于金属表面水膜中,一定程度上提高了电导和酸度,加速了铝合金腐蚀。与暴露 1 a 相比,SO₂ 沉积率对铝合金暴露 3、5 a 的平均腐蚀速率的影响超过了 Cl⁻沉积率。这主要是因为,当 Cl⁻和 SO₂ 环境因素共同存在时,暴露过程中 Cl⁻在铝合金产生腐蚀的起始阶段作用比较明显,但随着暴露时间的延长,Cl⁻被大量消耗导致作用减弱,此时 SO₂ 作用凸显增强,并由于一系列反应的共同作用,随着暴露周期的延长,导致腐蚀的不断发生。另一方面,由于我国酸雨污染相对严重,SO₂ 对铝合金的腐蚀作用也相对突出^[22]。SO₂ 影响铝合金大气腐蚀主要是通过 SO₂ 溶入铝合金表面液膜,形成 SO₄²⁻,使得液膜酸化,使铝合金蚀坑中溶液的 pH 值显著降低,导致腐蚀明显加快,SO₂ 的影响变得显著。因此,Cl⁻沉积率在对铝合金腐蚀初期影响很大,随着腐蚀的发展,SO₂ 沉积率的影响性占据了主导地位。

总体来看,NO_x 沉积率一直低于 SO₂ 和 Cl⁻沉积率对铝合金的影响性。这主要是因为,NO_x 会在表面液膜中生成 NO₃⁻,NO₃⁻会参与到腐蚀反应的去极化过程中,它们对铝合金腐蚀过程的影响不大,NO_x 主要通过 Cl⁻等协同作用从而加速铝合金的腐蚀。根据图 2c 可以看出,Cu 含量对铝合金 5 a 平均腐蚀速率影响的相对重要性为 64.5%,Zn 含量对铝合金 5 a 平均腐蚀速率影响的相对重要性为 35.8%。由此可知,在铝合金中加入 Cu 和 Zn,虽提高合金的力学性能、切削性能和强度,但也降低了合金的耐蚀性。

由于多种环境因素会综合影响铝合金的大气腐蚀,通过图 2 不同暴露周期的影响因素重要性可知,暴露周期腐蚀阶段的不同腐蚀影响因素重要性也各有不同,难以通过环境因素重要性前后排序来表示自然环境因素对铝合金大气暴露全周期的影响性^[23-26]。因此,本文采用对影响因素重要性分类的方式,将整个腐蚀过程中影响铝合金腐蚀损伤因素分为重要、辅要、次要因素三大类。根据多层感知器神经网络输出铝合金大气暴露 1、3、5 a 影响因素的重要性累积得出,其中影响铝合金大气腐蚀损伤的重要因素为 SO₂ 沉积率、Cl⁻沉积率、NO_x 沉积率;辅要因素为年降雨量、年雾露时数、相对湿度、年日照时数、温度、铝合金成分;次要因素为年累积降水时数、雨水 pH 值。其中,由于温度和相对湿度受年降雨量、年雾露时数、年日照时数的密切影响,共同促进腐蚀效应,因此本文将年降雨量、年雾露时数与年日照时数共同列为辅要因素,而年累积降水时数与雨水 pH 值的影响显著性均较低,因此被列为影响铝合金大气腐蚀的次要因素。

铝合金不同腐蚀阶段的腐蚀影响因素显著性各有不同,且不同环境因素之间也存在复杂的相互影响,本文中依靠多层感知器神经网络初步分析得出的环境因素影响性也需通过更多的铝合金大气暴露试验数据进一步来证实。

3 结论

本文采用基于 IBMSPSSStatistics20.0 软件多层感知器神经网络分析了自然环境因素对铝合金大气腐蚀的影响显著性,以平均腐蚀速率为铝合金腐蚀损伤指标,输入了影响铝合金腐蚀损伤的主要气象环境因素(温度、相对湿度、降水、雾露、日照)、主要污染介质环境因素(Cl⁻沉积率、SO₂ 沉积率、NO_x 沉积率、雨水 pH 值)以及化学成分。

1) 根据多层感知器神经网络输出铝合金大气腐蚀影响因素的重要性累积得出,影响铝合金腐蚀损伤的因素分为重要、辅要、次要因素三大类:重要影响因素为 SO₂ 沉积率、Cl⁻沉积率、NO_x 沉积率;辅要影响因素为年降雨量、年雾露时数、相对湿度、年日照时数、温度、铝合金成分;次要影响因素为年累积降水时数、雨水 pH 值。

2) 铝合金腐蚀初始阶段暴露时间 1 a,在相对湿度作用下,Cl⁻沉积率对铝合金大气腐蚀的影响性大于 SO₂ 沉积率。随着暴露时间延长至 3、5 a,Cl⁻的作用相对减弱,SO₂ 的作用增强,SO₂ 沉积率的影响性大于 Cl⁻沉积率,但 Cl⁻沉积率仍是影响腐蚀的重要因素。

参考文献:

- [1] 吴护林,张伦武,苏艳,等.轻质材料环境适应性数据

- 手册: 铝合金、钛合金及防护工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 152-159.
- WU H L, ZHANG L W, SU Y. Environmental Worthiness Data Handbook of Light Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020: 152-159.
- [2] 侯悦, 田原, 赵志鹏, 等. 海洋工程用铝合金的腐蚀与防护研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(5): 1-14.
- HOU Y, TIAN Y, ZHAO Z P, et al. Corrosion and Protection of Aluminum Alloy for Marine Engineering[J]. Surface Technology, 2022, 51(5): 1-14.
- [3] 赵全成, 罗来正, 黎小锋, 等. 两种典型大气环境下 7A85 铝合金的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 70-75.
- ZHAO Q C, LUO L Z, LI X F, et al. Corrosion Behavior of 7A85 Aluminum Alloy in Two Typical Atmospheric Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(7): 70-75.
- [4] 彭文山, 段体岗, 马力, 等. 热带海洋环境中 5083 铝合金腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 77-83.
- PENG W S, DUAN T G, MA L, et al. Corrosion Behaviors of 5083 Aluminum Alloy in Tropical Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 77-83.
- [5] 马腾, 王振尧, 韩薇. 铝和铝合金的大气腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(3): 155-161.
- MA T, WANG Z Y, HAN W. A Review of Atmospheric Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys[J]. Corrosion Science and Technology Protection, 2004, 16(3): 155-161.
- [6] 钟勇, 苏艳, 罗来正, 等. 四种典型大气环境下 7B50 铝合金的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 143-150.
- ZHONG Y, SU Y, LUO L Z, et al. Corrosion Behavior of 7B50 Aluminum Alloy in Four Typical Atmospheric Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 143-150.
- [7] 杨小奎, 张伦武, 胡滨, 等. 7475 高强铝合金在海洋和乡村大气环境中的腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 262-267.
- YANG X K, ZHANG L W, HU B, et al. Corrosion Behavior of 7475 High-Strength Aluminium Alloy in Marine and Rural Atmosphere Environments[J]. Surface Technology, 2019, 48(1): 262-267.
- [8] 王瑞峰, 王国才, 苏维国, 等. 航空铝合金材料大气腐蚀环境因子灰色关联分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 26-31.
- WANG R F, WANG G C, SU W G, et al. Application of Grey Relational Analysis to Environmental Factors of Atmospheric Corrosion of Aerospace Aluminum Alloys[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 26-31.
- [9] 郑弃非, 孙霜青, 温军国. 铝及铝合金在我国的大气腐蚀及其影响因素分析[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(6): 359-363.
- ZHENG Q F, SUN S Q, WEN J G. Atmospheric Corrosion and Its Influencing Factors of Aluminum and Aluminum Alloys[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(6): 359-363.
- [10] 刘治国, 边若鹏, 蔡增杰. 机场环境下飞机 LY¹²CZ 结构腐蚀损伤预测方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 35-38.
- LIU Z G, BIAN R P, CAI Z J. Forecasting Method of Aircraft LY¹²CZ Structure Corrosion Damage in Airport Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 35-38.
- [11] 徐安桃, 李锡栋, 周慧, 等. 基于灰色补偿 BP 神经网络优化组合模型的车辆装备冷却系腐蚀预测[J]. 装备环境工程, 2018, 15(11): 123-128.
- XU A T, LI X D, ZHOU H, et al. Corrosion Prediction of Vehicle Equipment Cooling System Based on Grey Compensation BP Neural Network Combined Model[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(11): 123-128.
- [12] 吕晓丹, 刘斌, 刘岩, 等. 铝合金在海洋环境中的腐蚀行为研究进展[J]. 中国材料进展, 2022, 41(6): 477-486.
- LV X D, LIU B, LIU Y, et al. Research Progress on the Corrosion Behavior of Aluminum Alloys under Marine Environment[J]. Materials China, 2022, 41(6): 477-486.
- [13] 马良涛, 董海防, 朱刚, 等. 神经网络预测海洋环境下金属腐蚀速率的应用及研究[J]. 材料保护, 2018, 51(9): 35-39.
- MA L T, DONG H F, ZHU G, et al. Application and Research of Neural Network in Predicting Metal Corrosion Rate in Marine Environment[J]. Materials Protection, 2018, 51(9): 35-39.
- [14] 蒋大鸣, 张雨平. 微量元素在铝合金中的作用[J]. 轻合金加工技术, 2001, 29(3): 1-5.
- JIANG D M, ZHANG Y P. Effect of Trace Elements on Structures and Properties of Aluminium Alloys[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2001, 29(3): 1-5.
- [15] 段体岗, 李祯, 彭文山, 等. 深海环境 5A06 铝合金腐蚀行为与表面特性[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(2): 352-358.
- DUAN T G, LI Z, PENG W S, et al. Corrosion Characteristics of 5A06 Al-Alloy Exposed in Natural Deep-Sea Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(2): 352-358.
- [16] 王晨光, 陈跃良, 张勇, 等. 7B04 铝合金在模拟海洋大气环境下的腐蚀行为[J]. 航空材料学报, 2017, 37(1): 59-64.
- WANG C G, CHEN Y L, ZHANG Y, et al. Corrosion Behavior of 7B04 Al-Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(1): 59-64.
- [17] 万晔, 金雨楠, 申轩宇. 浅述铝合金点蚀的研究进展[J]. 材料保护, 2020, 53(8): 133-144.
- WAN Y, JIN Y N, SHEN X Y. Research Progress on Pitting Corrosion of Aluminum Alloy[J]. Materials Protec-

- tion, 2020, 53(8): 133-144.
- [18] 李斌, 董丽虹, 王海斗, 等. 航空航天铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 106-118.
LI B, DONG L H, WANG H D, et al. Research Progress on Corrosion Fatigue of Aerospace Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 106-118.
- [19] 邓培昌, 钟杰, 王坤, 等. 海洋工程装备高空腐蚀重要影响因素 Cl⁻沉降速率研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(5): 474-478.
DENG P C, ZHONG J, WANG K, et al. Important Influential Factor for Corrosion of High-Altitude Marine Engineering Equipment in Atmosphere-Chloride Ion Deposition Rate[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(5): 474-478.
- [20] ELOLA A S, OTERO T F, PORRO A. Evolution of the Pitting of Aluminum Exposed to the Atmosphere[J]. Corrosion, 1992, 48(10): 854-863.
- [21] OESCH S, FALLER M. Environmental Effects on Materials: The Effect of the Air Pollutants SO₂, NO₂, NO and O₃ on the Corrosion of Copper, Zinc and Aluminium. A Short Literature Survey and Results of Laboratory Exposures[J]. Corrosion Science, 1997, 39(9): 1505-1530.
- [22] 王丽媛, 王秀通, 孙好芬, 等. 大气环境中 SO₂ 影响金属腐蚀的研究进展[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 62-66.
WANG L Y, WANG X T, SUN H F, et al. Study of SO₂ Influence on Metal Corrosion in Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 62-66.
- [23] 周和荣, 姚望, 刘鹏洋, 等. 周期凝露和二氧化硫环境对 7A04 铝合金腐蚀行为的影响[J]. 材料研究学报, 2017, 31(5): 359-368.
ZHOU H R, YAO W, LIU P Y, et al. Effect of Cyclic Condensation and Sulfur Dioxide on Corrosion Behavior of 7A04 Aluminum Alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(5): 359-368.
- [24] 杨博均, 魏木孟, 邓玉, 等. 铝及铝合金在自然水环境中的腐蚀行为对比研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 106-116.
YANG B J, WEI M M, DENG Y, et al. Comparative Study on Corrosion Behavior of Aluminum and Aluminum Alloy in Natural Water Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 106-116.
- [25] 李涛, 董超芳, 李晓刚, 等. 环境因素对铝合金大气腐蚀的影响及其动态变化规律研究[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(4): 215-219.
LI T, DONG C F, LI X G, et al. Influence of Environmental Factors on Atmospheric Corrosion of Aluminum Alloys and Its Dynamic Time Dependence[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(4): 215-219.
- [26] 胡晓黎, 韩方运, 牛林, 等. 海洋和沿海环境铝大气腐蚀特征及影响因素[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(11): 849-853.
HU X L, HAN F Y, NIU L, et al. Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Corrosion of Aluminum in Marine and Coastal Environments[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(11): 849-853.

责任编辑: 刘世忠