

专题——装备服役腐蚀性大气环境模拟与应用

基于航空金属材料腐蚀的我国大气环境分区

张腾, 张胜, 何宇廷, 马斌麟, 张天宇

(空军工程大学, 西安 710038)

摘要: **目的** 针对我国服役飞机的腐蚀问题, 实现飞机结构日历寿命的分区预测与精细化管理。**方法** 收集我国大气环境 17 个典型地区的气象环境数据, 编制各地区的气候、化学环境总谱, 并根据腐蚀电荷当量原理, 使用铝合金、合金钢两种材料的折算系数, 将各地区的大气环境向标准潮湿空气作用时间进行折算。基于系统聚类的方法, 根据大气腐蚀的差异性, 将 17 个典型地区进行分类, 确定各分区的划分标准和我国大气腐蚀分区个数, 并综合考虑当前文献中可查的其他地区数据资料与我国气候、降水、大气污染的分布情况, 对我国大气环境进行腐蚀分区。**结果** 根据铝合金、合金钢的腐蚀特征量, 可将我国大气环境划为 5 个分区。绘制了我国大气环境腐蚀分区图, 给出了各分区的环境特点、地理位置分布和代表城市。**结论** 应用我国大气环境分区结果, 可以直观掌握我国飞机不同服役环境的腐蚀严酷程度, 为编制加速腐蚀环境谱、评定飞机结构日历寿命、制定针对性的维护计划和飞行计划奠定基础。

关键词: 铝合金; 合金钢; 腐蚀; 大气环境分区; 标准潮湿空气; 系统聚类

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.001

中图分类号: TG172.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0001-09

Atmospheric Environment Demarcation of China Based on Corrosion of Aeronautic Metallic Materials

ZHANG Teng, ZHANG Sheng, HE Yu-ting, MA Bin-lin, ZHANG Tian-yu

(Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

ABSTRACT: Aiming at the corrosion problem of aircraft in service in China, the paper aims to release regional prediction and refined management of the aircraft structure calendar life. Meteorological environment data for 17 typical regions of China's atmospheric environment were collected. Climate and chemical environment spectra were compiled for each region. According to the principle of corrosion charge equivalence, the atmospheric environment in each region was converted to the standard humid air action time with the conversion coefficient of aluminum alloy and alloy steel. According to the differences in atmospheric corrosion, 17 typical regions were classified based on the systematic clustering method. The demarcation criteria of each subregion and then the number of atmospheric corrosion demarcations were determined. Additionally, the data of other regions available in the current literature and the distribution of climate, precipitation and air pollution in China were taken into account in the atmospheric environment corrosion demarcation of China. According to the corrosion characteristics of aluminum alloy and alloy steel, the atmospheric environment in China can be demarcated into five regions. The map of China's atmospheric en-

收稿日期: 2020-03-21; 修订日期: 2020-04-15

Received: 2020-03-21; Revised: 2020-04-15

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2018JQ5012); 中国博士后科学基金(2017M623418)

Fund: Supported by the Basic Research Project of Natural Science in Shaanxi Province(2018JQ5012) and the China Postdoctoral Science Foundation(2017M623418)

作者简介: 张腾(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为结构完整性。

Biography: ZHANG Teng(1987—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: structural integrity.

vironment corrosion demarcation was drawn, in which the environmental characteristics, geographical distribution and representative cities of each region were given. By applying the demarcation result of China's atmospheric environment regions, the severity of corrosion in different service environments of aircraft in China can be directly grasped, which lays a foundation for establishment of accelerated corrosion environment spectrum, assessment of aircraft structure calendar life, and formulation of targeted maintenance plan and flight plan.

KEY WORDS: aluminum alloy; alloy steel; corrosion; atmospheric environment demarcation; standard humid air; systematic clustering

飞机结构的使用寿命与其服役地区的环境腐蚀性密切相关。确定飞机各服役地区的环境腐蚀表征量,是编制飞机结构加速环境谱,继而进行结构日历寿命评定的基础^[1];也是在实际服役过程中对飞机进行针对性维护和对机群开展使用计划调整的重要依据^[2]。

我国机场数量多,不同地区的机场环境差异性大,如果根据各个机场的实际大气数据编制不同的加速环境谱开展飞机的日历寿命研究,工作量巨大。本着环境研究“宜粗不宜细”的原则,通过典型地区的大气环境数据分析,把环境腐蚀性相近的地区划为一类,将我国划分为几个大气腐蚀分区则是一种较为合理、可行的方法。

飞机结构中易受腐蚀环境影响的主要是铝合金结构和合金钢结构,其在现代飞机上的用量分别超过50%以上和10%以上。此外,军用飞机有95%的时间处于地面停放状态^[3],停放环境对飞机结构的腐蚀影响占主导地位。因此,对飞机的大气服役环境进行分区时,可以将铝合金和合金钢大气腐蚀特征量的区别作为分区依据。

国内外学者在大气环境分区方面开展了较多的研究。从气象学的角度上,环境分区主要有基于温度、降水等气候因素的柯本(Koppen)气候分类法和基于气候动力学的斯查勒(Strahler)分类法^[4]。根据不同的研究需要,我国学者对全国的大气环境分区也开展了深入的研究。周希沅^[5]在金属腐蚀电流的测量及153个站点环境数据收集的基础上,将我国划分成不同的腐蚀级及腐蚀区域。陈跃良等^[6]根据电荷等效原理^[7]给出了实际大气环境与多种加速腐蚀介质的腐蚀当量折算关系。刘庭耀^[8]将聚类分析的方法引入了环境分区研究,提出了按照飞机具体的服役地区进行相似环境合并的思想。吴德权等^[9]根据三元乙丙橡胶老化的关键气候因子,绘制了三元乙丙橡胶在我国的老化分布图。张福泽^[10]提出了根据大区环境确定飞机结构日历寿命的区域定寿法思想。

上述分区研究工作对我国飞机的日历寿命评定与管理作出了重要贡献。文中在上述工作的基础上,统计分析了我 国 17 个地区的大气环境数据,综合考虑航空铝合金和合金钢的腐蚀特征量,根据系统聚类分析结果和相关文献中提供的数据,将全国大气环境

分为五个区,并绘制了我国大气腐蚀环境分区图。

1 编制气候、化学环境总谱

1.1 气象环境数据的收集

影响飞机金属结构大气腐蚀的主要因素有:温度、湿度、雨、雾、凝露、固体沉降物、大气污染物、盐雾等^[11-13]。针对上述影响因素,对我国大气环境典型地区的气象环境数据进行了收集,得到了北京、山东青岛、湖北武昌、福建厦门、安徽芜湖、河北张家口、湖南长沙、广东遂溪、海南三亚、陕西西安、新疆库尔勒、西藏日喀则、西藏贡嘎、西藏阿里共计17个地区的气象环境数据。各地区的地理位置分布如图1所示。



图1 气象环境数据收集地区

Fig.1 Areas where meteorologic environmental data were collected

1.2 气象环境要素的简化处理

大气环境是实时变化的,在工程应用中,应把握住影响结构腐蚀的主要因素,去繁化简,在合理的范围内对气象环境要素进行简化。

1) 温湿度的简化处理方法。在潮湿大气中,金属结构表面会形成一层水膜,构成电解液,这主要与相对湿度值的大小和临界值有关。对于飞机金属结构,其对应的相对湿度临界值为65%^[13]。温度值的大小影响了腐蚀的反应速率以及结构表面水膜的停留

时间, 温度越高, 反应速率越快, 现一般取 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为临界温度值^[13]。温度在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 且相对湿度大于 65% 时, 同种腐蚀介质在不同湿度和温度下对结构腐蚀的影响是不同的。温度在 $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 腐蚀介质对结构腐蚀的影响差别相对较小。因此, 温湿度的简化处理方法如下: 只考虑相对湿度大于 65% 且温度大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况; 从偏于安全的角度出发, 将 $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的温度统一按 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 纳入统计; 将温度划分为 $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上四个区间, 四个区间的温度分别以 20、25、30、 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 代表; 将相对湿度划分为 65%~70%、70%~80% 和 80%~100% 三个区间, 三个区间的湿度分别以 70%、80% 和 90% 代表。

2) 降雨、雾露的简化处理方法。当雨、雾、凝露作用时, 金属结构表面所形成的水膜较厚, 与高湿度大气下的情况类似。因此, 降雨、雾露的简化处理方法如下: 当折算降雨和雾露作用小时数时, 相对湿度统一按照 90% 处理, 只考虑温度大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况; 将温度划分为 $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上四个区间, 各区间的温度分别以 20、25、30、 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 代表。

3) 气候环境总谱的编制方法。四个温度区间和三个相对湿度区间将所有的温湿度情况划分成了 12 个温湿度范围, 使用 Excel 软件中的多条件统计功能 (countifs 命令) 统计出各地区、各范围内的温湿度环境在一年中的总时间, 进而得到对应地区的初始温湿度谱。使用 Excel 软件中的单条件统计功能 (countif 命令) 统计出各地区各温度区间内雨、雾、露在 1 年内的作用总时间和次数, 进而得到对应地区的雨谱和雾露谱。气候环境总谱反映了湿度、降雨、雾露这些气象要素在不同温度下的作用时间, 但在编制初始温湿度谱时, 并没有将降雨和雾露作用的时间排除, 得到的结果会过于严重。因此, 初始温湿度谱还需排除降雨、雾露作用时间的影响, 方法是将初始温湿度谱

中每一区间的作用时间均乘以比例因子:

$$c=1-a/b \quad (1)$$

式中: a 为降雨和雾露作用的总时间; b 为初始温湿度谱作用的总时间。

1.3 气候、化学环境总谱的编制方法

化学环境总谱反映了大气中腐蚀性介质的含量。大气污染物主要有: SO_2 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_x 等。它们一般与水结合参与结构的腐蚀, 其影响主要体现在降雨、雾露的 pH 值上。因此, 化学环境总谱主要包括以下要素: 降雨、雾露、潮湿空气的作用时间、作用次数以及在一年中所占的时间比例 (可以由气候环境总谱计算得到); 降雨和雾露的 pH 值; SO_2 (mg/m^3)、 NO_x (mg/m^3)、降尘 ($\text{吨}/\text{km}^2\cdot\text{月}$)、 CO (mg/m^3) 等大气污染物的含量。

其中, 固体沉降物被潮湿的机体表面吸附, 会形成局部腐蚀环境, 其在研究大气腐蚀性时一般不予考虑, 但要由它来决定对飞机进行清洗的时间间隔与清洗方法。盐雾主要出现在沿海、盐湖地区, 其作用效果与风向密切相关。

1.4 典型地区气候、化学环境总谱示例

以北京地区为例, 按照 1.2 小节建立的处理方法和气候、化学环境总谱编制方法, 编制得到的气候、化学环境总谱分别见表 1 和表 2。

表 1 北京地区的气候环境总谱
Tab.1 Climatic environment spectrum of Beijing

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	20	25	30	35
Rainfall time/h	71.30	67.40	25.60	1.00
Brume & dew time/h	56.50	122.50	46.50	1.80
Humid air time/h	70%	482.87	120.70	60.35
	80%	543.22	301.83	90.57
	90%	241.39	422.53	362.18

表 2 北京地区的化学环境总谱
Tab.2 Chemich environment spectrum of Beijing

Type	Proportion/%	Time/h	Frequency	pH	$c(\text{SO}_2)/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c(\text{NO}_x)/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$
Brume & dew	2.6	227.3	136	5.0		
Rainfall	1.9	165.3	65	5.0	0.010	0.022
Moisture	31.0	2716.2				

2 各地区环境腐蚀性的当量化折算

2.1 当量化折算方法

影响大气腐蚀性的因素很多, 单凭某一方面的特征很难判断出大气整体的腐蚀性。因此, 应对各地区的气象环境进行当量折算, 从而统一到相同对比指标下。现有研究通常将大气环境等效折算到标准潮湿空

气 (温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 90% 的空气), 以等效于某地 1 年大气腐蚀的标准潮湿空气作用时间 (SHAT, Standard Humid Air Time) 作为统一的指标。根据电化学腐蚀过程中电荷量等效的原理, 可以以式 (2) 进行环境腐蚀性的当量化折算:

$$t' = \frac{I_c}{I'_c} t = at \quad (2)$$

式中： t' 和 I_c' 分别为标准潮湿空气作用下材料发生腐蚀的时间和电流； t 和 I_c 分别为实际大气环境下材料发生腐蚀的时间和电流； α 为折算系数。

文献[7]给出了航空铝合金和合金钢在不同环境下相对于标准潮湿空气的折算系数，见表3和表4。

表3 潮湿空气相对于标准潮湿空气的折算系数
Tab.3 Conversion factor from humid air to standard humid air

Material	Humidity/%	Temperature/°C			
		20	25	30	35
Aluminum alloy	70	0.163 80	0.244 40	0.325 00	0.625 26
	80	0.167 07	0.290 53	0.426 00	0.731 77
	90	0.110 45	0.207 00	0.299 95	0.649 97
Alloy steel	70	0.098 36	0.014 54	0.170 77	0.241 43
	80	0.089 34	0.100 57	0.316 08	0.423 64
	90	0.058 37	0.229 19	0.406 47	0.709 59

表4 不同浓度酸相对于标准潮湿空气的折算系数
Tab.4 Conversion factor of different concentrations of acid to standard humid air

Material	Acid concentration/(mg·L ⁻¹)	HNO ₃	HCl	H ₂ SO ₄
Aluminum alloy	0.1	3.745	2.203	1.575
	1.0	3.145	4.255	2.874
	2.0	2.833	9.091	3.311
Alloy steel	0.1	1.751		
	1.0	2.141	2.717	2.141
	2.0	4.292	3.425	3.497

2.2 典型地区环境腐蚀性的当量化折算示例

以北京地区铝合金材料为例，示出大气环境相对于标准潮湿空气的折算方法。

1) 大气中潮湿空气作用相对于标准潮湿空气的折算。根据表1，北京大气中相对湿度为70%的潮湿空气在不同温度下的作用时间分别为482.87 h (20 °C)、120.70 h (25 °C)、60.35 h (30 °C)和48.31 h (35 °C)。根据表3，铝合金材料在不同温度下70%的潮湿空气向标准潮湿空气折算系数分别为0.163 80、0.244 40、0.325 00和0.625 26，则70%的潮湿空气等效于158.41 h的标准潮湿空气作用时间。同理，80%的潮湿空气等效于239.14 h的标准潮湿空气作用时间；90%的潮湿空气等效于230.59 h的标准潮湿空气作用时间。对北京地区铝合金材料，大气中1年的潮湿空气等效于628.14 h的标准潮湿空气作用时间。

2) 降雨、雾露作用向标准潮湿空气的折算。降雨和雾露作用均按照90%的潮湿空气处理，因此，根据表1和表3，对于铝合金材料，北京地区1年中不同温度下的降雨作用等效于30.16 h的标准潮湿空气

作用时间；同理，1年中不同温度下的雾露作用等效于46.72 h的标准潮湿空气作用时间。

3) 化学腐蚀介质向标准潮湿空气的折算。根据北京地区的化学环境总谱，SO₂的质量密度为0.010 mg/m³。根据文献[14]中的计算方法，以SO₂向SO₃的转化率为5%，SO₃全部转化成H₂SO₄计算，在北京大气中生成的H₂SO₄最高质量浓度只有7.65×10⁻⁷ mg/L，可以忽略不计。北京大气中NO_x的质量密度为0.022 mg/m³。假设NO_x均能生成腐蚀性较强的HNO₃和NO，根据文献[14]中的计算方法，0.022 mg/m³的NO_x可以生成的HNO₃质量浓度最大为2.678×10⁻⁵ mg/L，可以忽略不计。北京地区降雨和雾露作用时的pH为5.0，则H⁺浓度为10⁻⁵ mol/L，对应成H₂SO₄即可计算得到H₂SO₄的质量浓度为0.49 mg/L。由表4可知，0.1 mg/L和1 mg/L的H₂SO₄折算系数分别为1.575和2.874，线性插值计算可得到质量浓度为0.49 mg/L的硫酸的折算系数为2.138。因此，将第2)步得到的降雨、雾露作用时间与折算系数相乘，得到降雨、雾露作用相当于标准潮湿空气作用时间为164.37 h。

4) 总时间的折算。将大气环境中潮湿空气的等效时间(628.14 h)加上考虑pH值影响的降雨、雾露等效时间(164.37 h)，即可得到北京地区1年的大气环境谱相当于标准潮湿空气的作用时间为792.51 h。

2.3 各地区环境腐蚀性的当量化折算结果

根据各地区的气候环境总谱和化学环境总谱，以及航空铝合金材料和合金钢材料的腐蚀特征，各地区大气环境折算为标准潮湿空气的作用时间见表5。需要说明的是，表5中的大气潮湿空气作用剔除了降雨和雾露时间，降雨、雾露作用是考虑了pH影响系数后得到的折算时间。

表 5 各地区环境总谱相对于标准潮湿空气作用时间的折算结果
Fig.5 Conversion results of environmental spectrum to SHAT by region

h/a

Area	Aluminum alloy			Alloy steel		
	Humid air time	Rainfall, brume & dew time	Total time	Humid air time	Rainfall, brume & dew time	Total time
Beijing	628.14	164.37	792.51	458.22	128.26	586.48
Qingdao	727.79	657.82	1385.61	407.90	838.14	1246.04
Wuchang	753.50	697.71	1451.21	576.05	438.24	1014.29
Xiamen	1036.64	784.97	1821.61	828.01	646.85	1474.86
Wuhu	1022.45	330.88	1353.33	763.28	248.17	1011.45
Zhangjiakou	188.53	94.66	283.19	93.77	50.44	144.21
Changsha	908.96	1112.06	2021.02	676.90	1166.21	1843.11
Suixi	1410.31	669.14	2079.45	1357.57	555.80	1913.37
Sanya	1478.35	441.55	1919.90	1222.22	342.49	1564.71
Xi'an	424.82	127.47	552.29	230.28	107.72	338.00
Jiangjin	1105.76	746.04	1851.80	676.71	755.64	1432.35
Kunming	581.50	170.72	752.22	290.71	101.97	392.68
Xining	262.37	69.01	331.38	141.49	37.39	178.88
Korla	90.96	11.38	102.34	48.26	6.02	54.28
Shigatse	117.39	66.85	184.24	64.04	33.17	97.21
Gongga	170.43	58.19	228.62	93.31	29.17	122.48
Ali	20.70	14.29	34.99	11.45	7.07	18.52

3 大气腐蚀环境分区数与区间范围

3.1 聚类分析结果

以每个地区作为一个样本，每个样本中选取标准潮湿空气对铝合金的等效作用时间和对合金钢的等效作用时间两个指标(即表 5 的第 4 列和第 7 列)，利用 SPSS 软件的“系统聚类分析”功能对所搜集的 17 个地区的大气腐蚀当量时间进行初步分类。聚类分析方法采用“组间联接法”，由于两部分数据的单位一致，数据不需要进行标准化处理，选用“Euclidean 距离”作为度量标准^[15]。为了探讨将我国气象环境分为几类更为合理，将 17 个地区依次分为 3 类、4 类、5 类、6 类进行分析，聚类分析如图 2 所示，聚类分析结果见表 6。

3.2 大气腐蚀分区个数的讨论

从表 6 可以看出，随着分类个数的增加，下一级分类实际上是将上一级分类的某一类进行了细分：分为 4 类时，是将西安、昆明、北京从 3-I 类中分离出来作为新的一类；分为 5 类时是将长沙、遂溪从 4-IV 类中分离出来作为新的一类；分为 6 类时是将西安从 5-II 类中分离出来作为新的一类。

如果根据腐蚀特性，将我国大气环境分为 3 类，则 3-I 类的分区显得过于粗略，同类分区中的北京地区大气环境腐蚀性是阿里地区的 23~32 倍，差异过大。将我国大气环境分为 4 类比 3 类更为合理，但此

种分区方式中 4-IV 区的划分还不够细致，长沙和遂溪地区的铝合金材料标准潮湿空气作用时间已超过 2000 h/a，与其他城市相比明显存在阶差，把长沙和遂溪地区单独分为一类更加合适。实际上，这是由于本文统计的地区数据有限，没有分析更多的南海地区环境所导致的。将我国大气环境分为 6 类，将西安地

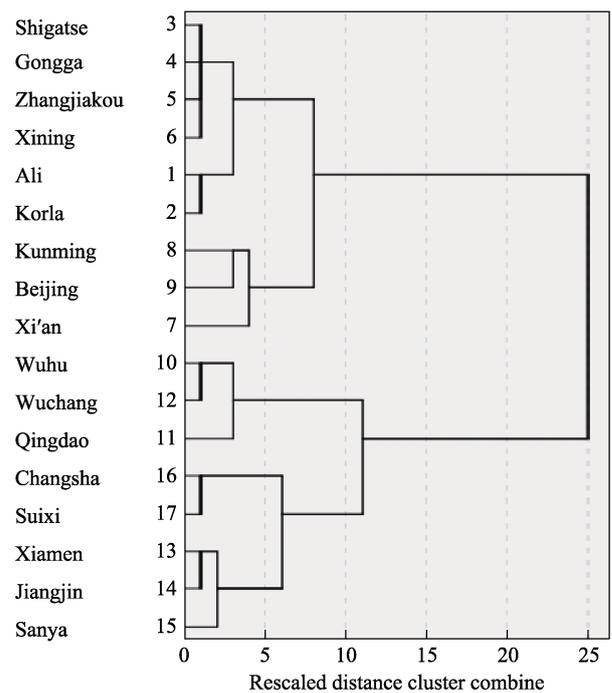


图 2 大气环境聚类分析

Fig.2 Cluster analysis graph of atmospheric environment

表6 大气环境聚类分析结果
Tab.6 Cluster analysis results of atmospheric environment

SN	Area	SHAT/(h·a ⁻¹)		3 types	4 types	5 types	6 types
		Aluminum alloy	Alloy steel				
1	Ali	34.99	18.52	3-I	4-I	5-I	6-I
2	Korla	102.34	54.28	3-I	4-I	5-I	6-I
3	Shigatse	184.24	97.21	3-I	4-I	5-I	6-I
4	Gongga	228.62	122.48	3-I	4-I	5-I	6-I
5	Zhangjiakou	283.19	144.21	3-I	4-I	5-I	6-I
6	Xining	331.38	178.88	3-I	4-I	5-I	6-I
7	Xi'an	552.29	338.00	3-I	4-II	5-II	6-II
8	Kuming	752.22	392.68	3-I	4-II	5-II	6-III
9	Beijing	792.51	586.48	3-I	4-II	5-II	6-III
10	Wuhu	1353.33	1011.45	3-II	4-III	5-III	6-IV
11	Qingdao	1385.61	1246.04	3-II	4-III	5-III	6-IV
12	Wuchang	1451.21	1014.29	3-II	4-III	5-III	6-IV
13	Xiamen	1821.61	1474.86	3-III	4-IV	5-IV	6-V
14	Jiangjin	1851.80	1432.35	3-III	4-IV	5-IV	6-V
15	Sanya	1919.90	1564.71	3-III	4-IV	5-IV	6-V
16	Changsha	2021.02	1843.11	3-III	4-IV	5-V	6-VI
17	Suixi	2079.45	1913.37	3-III	4-IV	5-V	6-VI

区环境单独拿出则显得过于细致。综上所述,根据航空金属材料的腐蚀差异,建议将我国大气环境分为5类较为合适。

3.3 各分区的区间范围划分

从表6可以看出,若根据航空材料腐蚀特征将我国大气环境分为5个分区,各区的标准潮湿空气作用时间基本可按照500 h作为一个区间(除5-I区的合金钢标准潮湿空气作用时间范围是0~300 h),区间范围见表7。

表7 各分区标准潮湿空气作用时间范围

Tab.7 Standard humid air action time range of atmospheric divisions

Atmospheric division	SHAT/(h·a ⁻¹)	
	Aluminum alloy	Alloy steel
5-I	0~500	0~300
5-II	500~1000	300~800
5-III	1000~1500	800~1300
5-IV	1500~2000	1300~1800
5-V	>2000	>1800

4 我国大气腐蚀环境分区结果

4.1 环境分区的方法与简化原则

由于收集的气象环境数据有限,为实现基于航空

金属材料腐蚀的我国大气环境详细划分,在17个地区的分析基础上,参考了文献[5]提供的153个地区当量标准潮湿空气作用时间分级数据,见表8。

进行大气环境分区的方法与简化原则如下所述。

1) 以表7确定的各区间范围作为分区依据,根据文中17个地区的分析结果和表8中的数据信息,初步确定各个地区所属的大气分区。在初步分析时,应当注意本文给出的大气分区区间(表7)和表8中间隔的差异。

2) 对于不能明确具体分区的地区,应根据此类地区相邻位置的分区情况进行推断,并综合考虑各地区的地理位置、气候环境差异(根据中国气候类型图确定)、降水量差异(根据中国年降水量分布图确定)和大气污染水平(根据中国空气污染土确定),对具体地区的大气分区归属进行详细分析。

3) 基于简化处理与协调一致的原则,同一省/直辖市/自治区/特别行政区的大气环境划分不超过3个分区。穿过各省的大气环境分区分界线尽量保持连续。大气环境特征处于两个环境分区界限附近的地区,根据分区连续性的需要,可划分到相邻的环境分区。

4) 通过综合权衡分析,最终确定我国的大气环境分区。

4.2 分区结果及各分区的环境特点

通过综合分析,根据航空铝合金与合金钢大气腐蚀的差异,我国大气环境的最终分区如图3所示。

表 8 我国部分地区当量标准潮湿空气作用时间分级数据^[5]
Tab.8 Graded data of equivalent SHAT in some areas of China^[5]

Material	SHAT/(h·a ⁻¹)	Area
Aluminum alloy	<100	Bayanmaodao Erliaohot Dunhuang Yumen Minqin Lenghu Golmud Urumqi Kashi
Alloy steel	<100	Hetian Korla Altai Turpan Hami
Aluminum alloy	100~500	Dongwuzhumuqinqi Hailar Maqinrenxiamu Hohhot Yinchuan Lhasa Shigatse Parry
Alloy steel	100~500	Nagqu Datong Mohe Qiqihar Tahe Yulin Lanzhou Guyuan Xining Yushu Tuojidao Changdu
Aluminum alloy	500~1300	Tianjin Taiyuan Jinzhou Aihui Mudanjiang Fujin Yan'an Ji'nan Ganzi Beijing Yuncheng
Alloy steel	500~1000	Xinjin Benxi Changchun Harbin Shijiazhuang Xingtai Laoting Dalian Yingkou Tonghua Fushun Yanji Rizhao Luoyang Shenyang Jilin Tianshui Zibo Qingdao Weihai Zhengzhou Xichang Xuzhou Dali Dandong Rongcheng Yunxian Chayu Xi'an Chaoliandao Jiujiang Nanyang Xuchang Xianning Kunming
Aluminum alloy	1300~2000	Bengbu Chongqing Xuyi Sheyang Shengsi Nanchang Xinyang Guilin Nanjing Hefei Anqing Guiyang Gaoyou Wuhu Yuhuan Xiangshan Zhoushan Xiamen Yichang Hengyang Zunyi Kaili Wuxian Nantong Ganzhou Fuzhou Taidong Wuhan Enshi Huangshi Tengchong Shanghai Hanzhong Tunxi Hangzhou Chengdu Leshan Luzhou Wanxian Ji'an Hengchun Minjiang Shaoguan Wuzhou Pu'er Jinhua Nanping Longyan Pingtan Changsha Changde Yueyang Liuzhou
Aluminum alloy	>2000	Taizhong Guangzhou Nanning Wenzhou Tapei Heyuan Weizhoudao Huangyan Taishan Shenzhen Shantou Sanya Beihai Zhanjiang Hekou Shanhudao Xisha Haikou Lingshui Qionghai
Alloy steel	>1800	



图 3 基于航空金属材料腐蚀的我国大气环境分区结果
Fig.3 Atmospheric environment demarcation result of China based on aviation metallic materials corrosion

各分区的大气腐蚀特点和地理位置如下所述。

1) I 区大气的腐蚀性最轻，主要包括寒温-湿润、中温-亚干旱、暖温-极干旱、高原-干旱等气候环境带，气候干、冷、大气污染水平低。铝合金在此分区腐蚀 1 年相当于受到标准潮湿空气作用 0~500 h 左右，合金钢在此分区腐蚀 1 年相当于受到标准潮湿空气作用 0~300 h 左右。I 区的典型代表城市是张家口。I 区覆盖的国土面积最大，包括西藏自治区、新疆维吾尔自治区、青海、甘肃、宁夏回族自治区、内蒙古自治区的全部区域，以及黑龙江的西北部、河北北部、山西北部、陕西西北部。其中，黑龙江省内的 I-II 区

分界线是由省内 7 个地区环境差异综合确定；河北、山西、陕西省内的 I-II 区分界线是由 9 个地区环境差异，以及我国的中温带-暖温带分界线综合确定。

2) II 区大气的腐蚀性中等偏下，主要包括中温-湿润、暖温-亚湿润、高原温带-湿润等气候环境带，气候温和、湿润、大气污染水平较高。铝合金在此分区腐蚀 1 年相当于受到标准潮湿空气作用 500~1000 h 左右，合金钢在此分区腐蚀 1 年相当于受到标准潮湿空气作用 300~800 h 左右。II 区的典型代表城市是北京。II 区覆盖的省市最多，包括北京、天津、辽宁、吉林的全部区域，以及黑龙江的东南部，云南北部，

河北、山西、山东、河南、陕西、四川的大部分地区。其中，山东省内的 II-III 区分界线是由省内 7 个地区环境差异综合确定；河南、陕西省内的 II-III 区分界线是由 8 个地区环境差异，以及我国的暖温带-北亚热带分界线综合确定；四川省内的 II-IV 区分界线是由省内 5 个地区环境差异，以及我国高原暖温带-中亚热带分界线综合确定；云南省内的 II-IV 区分界线是由省内 4 个地区环境差异，以及我国中亚热带-南亚热带分界线综合确定。

3) III 区大气的腐蚀性属于中等水平，主要包括北亚热带-湿润、暖温-亚湿润-沿海等气候环境带，年平均气温较高、湿度较大、大气污染水平严重。铝合金在此分区腐蚀 1 年相当于受到标准潮湿空气作用 1000~1500 h 左右，合金钢在此分区腐蚀 1 年相当于受到标准潮湿空气作用 800~1300 h 左右。III 区的典型代表城市是青岛。III 区覆盖的省市包括上海、江苏、安徽的全部区域，以及山东东南部，河南、陕西南部，浙江、江西北部，湖南东北部和湖北大部分地区。其中，浙江、江西、湖南、湖北省内的 III-IV 区分界线是由 23 个地区环境差异，以及我国北亚热带-中亚热带分界线综合确定。

4) IV 区大气的腐蚀性属于中等偏上水平，主要包括中亚热带-湿润、南亚热带-湿润-内陆等气候环境带，年平均气温高、湿度大、降雨多、大气污染严重。铝合金在此分区腐蚀 1 年相当于受到标准潮湿空气作用 1500~2000 h 左右，合金钢在此分区腐蚀 1 年相当于受到标准潮湿空气作用 1300~1800 h 左右。IV 区的典型代表城市是厦门。IV 区覆盖的省市包括重庆、贵州的全部区域，以及云南、浙江南部，四川中东部，广西、广东、福建北部，湖北西部，湖南和江西的大部分地区。其中，福建、广东、广西省内的 IV-V 区分界线是由 18 个地区环境差异，以及我国中亚热带-南亚热带分界线综合确定。

5) V 区大气的腐蚀性最为严重，主要包括南亚热带-湿润、边缘热带-湿润、中热带-湿润、赤道热带-湿润等气候环境带，气候炎热、多雨、湿度大。铝合金在此分区腐蚀 1 年相当于受到标准潮湿空气作用 2000 h 以上，合金钢在此分区腐蚀 1 年相当于受到标准潮湿空气作用 1800 h 以上。V 区的典型代表城市是万宁。V 区的地理位置最靠南，包括海南、台湾、香港、澳门、我国南海海域的全部区域，以及广东、广西、福建省的南部地区。

4.3 讨论

1) 在实际工程中简化处理时，I 区的大气腐蚀环境弱，飞机在此区域服役可不考虑结构腐蚀问题。其他分区的典型代表城市反映了各分区的大气平均腐蚀水平，可以首先重点编制代表城市的加速环境谱。当分析同一分区中的其他区域时，在该环境谱的基础

上乘上一个较小的折算系数即可。

2) 文中研究的大气环境分区针对的是航空铝合金和合金钢，并不适用于橡胶材料、有机涂层等高分子材料的老化问题，应当注意区分。

3) 文中对我国大气腐蚀分区研究得还比较粗略，虽然有的省份因大气腐蚀性的差异较大，被分入了 2~3 个区，但很多的区域分界线仍由省界简化处理，这是由于分析的环境数据有限造成的。在实际应用中，如果有些地区靠近两个大气腐蚀分区的交界处，建议具体问题具体分析。如果实在不能得到具体结论，建议从偏于安全的角度出发，以腐蚀较严重的分区情况处理。

4) 随着我国南海岛礁机场的建成以及航母训练任务的推进，我国飞机的服役环境已向远海延伸。文中统计分析的数据主要限于大陆及靠近沿海的岛屿大气数据，未对更加靠南的岛礁环境数据与舰载环境数据进行分析。飞机在这些环境下的服役环境如何，是否有必要划分全国的“第六大分区”等问题还有待下一步开展深入研究。

5 结论

1) 收集了我国大气环境 17 个典型地区的气象环境数据，介绍了气象环境要素的简化处理方法，编制了各地区的气候、化学环境总谱，并根据腐蚀的电荷当量原理，以铝合金、合金钢两种材料的折算系数，将各地区的大气环境向标准潮湿空气作用时间进行了折算。

2) 基于系统聚类的方法，根据大气腐蚀的差异性，将 17 个典型地区进行了分类，确定了我国大气腐蚀分区个数和各分区的划分标准。

3) 根据收集的数据资料与参考文献中提供的数据资料，结合我国气候环境、降水量与大气污染的分布情况，通过综合分析给出了我国大气腐蚀分区结果，绘制了我国大气腐蚀分区图。

参考文献:

- [1] HE Yu-ting, LI Chang-fang, ZHANG Teng, et al. Service Fatigue Life and Calendar Life Limits of Aircraft Structure: Aircraft Structural Life Envelop[J]. The Aeronautical Journal, 2016, 120(9): 1746-1762.
- [2] 何宇廷, 张腾, 崔荣洪, 等. 飞机结构寿命控制原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
HE Yu-ting, ZHANG Teng, CUI Rong-hong, et al. Theory and Technology of Aircraft Structure Life Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [3] 刘道庆, 吴超, 陈亮. 飞机腐蚀疲劳典型部位地面停放局部环境谱及当量折算[J]. 飞机设计, 2011, 31(5): 15-17.

- LIU Dao-qing, WU Chao, CHEN Liang. Ground Parking Local Environment Spectrum & Equivalence Converting of Aircraft Typical Parts[J]. Aircraft Design, 2011, 31(5): 15-17.
- [4] 苏景新, 张春晓, 徐天杰. 民用飞机典型腐蚀环境区域的聚类及差异性研究[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(8): 708-714.
SU Jing-xin, ZHANG Chun-xiao, XU Tian-jie. Cluster Analysis for Typical Ground Environment Areas of Civil Airports and Redional Difference Analysis for Corrosion of Civil Aircrafts[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(8): 708-714.
- [5] 周希沅. 中国飞机结构腐蚀分区和当量环境谱[J]. 航空学报, 1998, 20(3): 230-233.
ZHOU Xi-yuan. Corrosion Demarcation of Airplane Structures of China and Equivalence Environmental Spectrum[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1998, 20(3): 230-233.
- [6] 陈跃良, 段成美. 海军飞机环境谱加速腐蚀当量折算研究[R]. 青岛: 海军航空技术学院, 1995.
CHEN Yue-liang, DUAN Cheng-mei. Research on Accelerated Corrosion Equivalent Conversion of Naval Aircraft Environment Spectrum[R]. Qingdao: Naval Aeronautical Technonlgy Institute, 1995.
- [7] 周希沅. 飞机结构的当量环境谱与加速试验谱[J]. 航空学报, 1996, 17(5): 613-616.
ZHOU Xi-yuan. Equity Environmental Spectrum and Speed Test Spectrum for Aircraft Structure[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1996, 17(5): 613-616.
- [8] 刘庭耀. 飞机结构腐蚀环境的聚类分析[J]. 飞机设计, 1997, 17(4): 25-29.
LIU Ting-yao. Cluster Analysis of Aircraft Structure Corrosion Environment[J]. Aircraft Design, 1997, 17(4): 25-29.
- [9] 吴德权, 高瑾, 卢琳, 等. 三元乙丙橡胶老化与气候关联性及其老化程度全国分布预测[J]. 工程科学学报, 2016, 38(10): 1438-1446.
WU De-quan, GAO Jin, LU Lin, et al. Correlation between EPDM Aging Properties and Climate as Well as Prediction of the Distribution of EPDM Aging Degree in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(10): 1438-1446.
- [10] 张福泽. 飞机日历寿命确定的区域定寿法[J]. 航空学报, 2001, 22(6): 549-552.
ZHANG Fu-ze. Method of Area Determination of an Aircraft Calendar Life[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2001, 22(6): 549-552.
- [11] 陈群志, 李喜明, 刘文珽, 等. 飞机结构典型环境腐蚀当量关系研究[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 414-418.
CHEN Qun-zhi, LI Xi-ming, LIU Wen-ting, et al. Investigation of Corrosion Equivalent Relationships between the Accelerated Environment and the Typical Service Environments of Aircraft Structures[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1998, 19(4): 414-418.
- [12] 陈群志, 崔常京, 王逾涯, 等. 典型机场地面腐蚀环境数据库研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 47-49, 76.
CHEN Qun-zhi, CUI Chang-jing, WANG Yu-ya, et al. Study on Database of Ground Corrosion Environment of Typical Airfield[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3): 47-49, 76.
- [13] 陈跃良, 金平, 林典雄, 等. 海军飞机结构腐蚀控制及强度评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
CHEN Yue-liang, JIN Ping, LIN Dian-xiong, et al. Structural Corrosion Control and Strength Assessment of Naval Aircraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [14] 刘元海, 任三元. 典型海洋大气环境当量加速试验环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 48-52.
LIU Yuan-hai, REN San-yuan. Study on Equivalent Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Typical Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 48-52.
- [15] 余建, 何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
YU Jian, HE Xu-hong. Data Statistical Analysis and SPSS Application[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2003.