

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-584-08

铝制换热器耐腐蚀性测试标准与研究综述

赵洋 蔡宁 杨双 杨荞慧

(中家院(北京)检测认证有限公司 北京 100176)

【摘要】 针对铝制换热器耐腐蚀性测试标准和测试技术进行综述,发现当前国内外耐腐蚀性测试标准中应用的试验方法主要为盐雾试验,而各标准对铝制换热器的测试存在一定差异和局限性。调研发现各文献针对铝制换热器使用NSS和SWAAT试验占比分别为40%和28%;使用电镜扫描和性能测试的评价方式占比分别为38%和23%。调研中国雨水状况结合部分文献推断:对于房间空调器用铝制换热器而言,以PH值为4.5~5.5之间的盐雾环境与干燥静置按时间比1:2交替运行的方式进行试验较为合理。

【关键词】 铝代铜; 换热器; 耐腐蚀; 标准; 盐雾试验

中图分类号 TB657.5 文献标识码 A

Review on Corrosion Resistance Test standard and Research of Aluminum Heat Exchanger

Zhao Yang Cai Ning Yang Shuang Yang Qiaohui

(CHEARI(Beijing) Certification & Testing Co., Ltd, Beijing, 100176)

【Abstract】 This paper summarizes the corrosion resistance test standards and test technologies of aluminum heat exchangers. It is found that the test method used in the current corrosion resistance test standards at home and abroad is mainly salt spray test, and there are some differences and limitations in the test of aluminum heat exchangers in various standards. It is found that NSS and SWAAT test accounts for 40% and 28% respectively for aluminum heat exchangers; The evaluation methods of scanning electron microscope and performance test accounted for 38% and 23% respectively. Based on the investigation of China's rainwater situation and some literature, it is inferred that for the aluminum heat exchanger for room air conditioner, it is reasonable to conduct the test in the salt spray environment with PH value between 4.5 ~ 5.5 and dry standing in the mode of alternating operation with time ratio of 1:2.

【Keywords】 Aluminum instead of copper; Heat exchanger; Corrosion resistance; Standards; Salt spray test

作者(通讯作者)简介: 赵洋(1988-),男,工学硕士,工程师, E-mail: zhy@cheari.com

收稿日期: 2021-12-27

0 引言

当前,中国已经成为全世界最大的空调器生产及出口国。据统计,2020年我国房间空调器的总销量为14146万台,其中内销为8028万台,出口为6118万台,出口比率高达43.2%,巨大产能压力之下衍生出对换热器大量需求,2020年家用电器行业换热器总销售额约为588.1亿元,其中翅片管换热器占比高达98.0%;微通道换热器占比约为0.7%^[1]。然而,目前家用电器尤其是空调器所使用

的换热器材质大多为铜,进一步结合我国的资源类型发现,2020年我国铜精矿产量约为168万吨,进口精铜矿约为2200万吨^[2],同期国内原铝产量高达3731.7万吨,占全球总产量的57.2%^[3],由此看见,当前我国既是铜资源紧缺国家又是铜资源消耗大国。另一方面,铜价的持续增长已成为我国制造业面临的共性资源问题,部分专家预测在未来的2022~2025年间,铜价将从1.1875万美元/吨进一步增长至1.5万美元/吨^[4],因此无论从全空调行业

产业链安全性的角度, 还是从空调企业可持续发展的角度, 进行铝代铜换热器的研究和开发都是势在必行的。

现阶段同类型的空调换热器使用铝材与使用铜材相比仍然存在两个主要弊端, 即: 铝制换热器的可靠性存疑以及铝材的换热性能较低, 其中可靠性更是限制铝代铜换热器应用和发展的安全性问题。在可靠性测试中, 耐腐蚀试验是考核铝制换热器的最主要手段, 但是现行国内外换热器标准和科研方案在该方向上所使用的方法参差不齐, 大多都是沿用了基础材料标准中盐雾试验的测试方法, 并没有针对换热器本身研制新的测试标准和科研方案, 因此, 本研究建立在综述既往耐腐蚀测试标准和科研成果的同时分析各类检测方案的优劣性, 旨在为铝制换热器的进一步研发提供思路。

1 铝制换热器耐腐蚀测试标准综述

1.1 盐雾试验标准综述

目前对于金属的耐腐蚀测试通常使用的方法为盐雾试验和交替浸没试验, 上述两者试验按照溶液的成分、PH 值以及操作方法可以主要分为: 中性盐雾试验 (NSS), 酸性盐雾试验 (AASS)、循环酸性海水试验 (SWAAT)、铜加速盐雾试验 (CASS)、中性溶液交替浸没试验以及酸性溶液交替浸没试验。在盐雾试验方法方面美国材料实验协会 (American Society of Testing Materials, 以下简称 ASTM) 已经有了比较多的研究基础, 对于 SWAAT、CASS、NSS 等试验方法都有了比较详细的介绍, 而中国国家标准以及欧盟的 IEC、ISO 标准在这方面更加侧重了比较基础的 NSS、AASS 试验方法的修订, 各类标准对应的测试原理基本相同, 只是在试验时间、溶液成分、PH 值等方面有细微的差别, 具体标准的试验条件如表 1 所示。

表 1 部分标准试验方法对比

Table 1 Comparison of test methods of various standards

标准号	试验类型	溶液条件	PH	温度	时间
ASTM G85 ^[5]	SWAAT	4.2wt%合成海盐、醋酸	2.8-3.0	47℃	24小时×N
ASTM B117 ^[6]	NSS	5.0wt% NaCl	6.5-7.2	35℃	24小时×N
ASTM B368 ^[7]	CASS	5.0wt% NaCl、 100ppm Cu ⁺⁺ 、醋酸	3.1-3.3	49℃	建议: 6/16/22/48/96/ 192/240/504/720小时
ASTM G44 ^[8]	交替浸没	3.5wt% NaCl 3.5wt% NaCl、醋酸	6.4-7.2 2.9-3.3	27℃	10分钟浸没、50分钟干燥交替进行; 总时间20-90天
ISO 9227 ^[9] (GB/T 10125 ^[10])	CASS	50g/L NaCl、 0.26g/L CuCl ₂ ·2H ₂ O、醋酸	3.1-3.3	50℃	建议: 2/6/24/48/72/96/144/168 /240/480/720/1000小时
IEC 60068-2-11 ^[11] (GB/T 2423.17 ^[12])	NSS	50g/L NaCl、 5.0wt% NaCl	6.5-7.2	35℃	建议: 16/24/48/96/168/336/672小时
GB/T 12967.3 ^[13]	CASS	50g/L NaCl、 0.26g/L CuCl ₂ ·2H ₂ O、醋酸	3.1-3.3	50℃	建议: 4/8/16/24/32/40/48 /56/64/72/96/120小时
GJB 150.11A ^[14]	NSS	5.0wt% NaCl	6.5-7.2	35℃	——
ISO 3768 ^[15]	NSS	5.0wt% NaCl	6.5-7.2	35℃	建议: 2/6/16/24/48/96 /240/480/720小时

从表 1 中的对比可以获知: 第一, 国内外涉及基础金属盐雾试验所采用的溶液条件大多数均以 5%质量分数的 NaCl 溶液为基础, 同时加入铜离子或醋酸用以调和成不同 PH 值的溶液用于雾化。其中具有特殊性的方法是 SWAAT 试验和交替浸没

试验, 前者使用合成海盐溶液代替传统的 NaCl 溶液进一步模拟金属在高湿度的沿海区域所面临的严苛状况; 后者考虑到浸没对金属可能造成较大损伤程度, 故而将 NaCl 溶液浓度降低为 3.5%。第二, 通常酸性盐雾试验 (包括 SWAAT、AASS、

CASS)，所采用的 PH 值基本维持在 3 左右，而 NSS 一般设置在 6.5-7.2 之间。第三，各个版本盐雾试验标准对于试验时间的设定存在一定的差异，但考虑到不同溶液对铝制换热器的实际腐蚀程度，一般来说时间不建议小于 500 小时。第四，对比同等酸度盐雾试验和交替浸没试验的试验时间可以得知通常盐雾时间为连续试验，而交替浸没时间为较短时间浸没同时辅以较长时间的干燥静置，故而推测在相同时间下，同等酸度的浸没环境严苛程度要高于盐雾环境。另外，对比 SWAAT、CASS 和 AASS 试验发现，SWAAT 试验由于存在多种复合盐类且溶液 PH 值略低于 CASS 和 AASS 试验，故而严酷等级在三者中最高，其次 CASS 试验中加入的 Cu²⁺ 离子也能够更加有效的诱发铝制换热器腐

蚀，因此认为 CASS 试验的严酷程度略高于 AASS 试验，最后 NSS 试验作为最为基础的盐雾试验类型，无论从溶液成分还是酸碱度的层面考量，都被认为是严苛程度最低的试验方法。

1.2 腐蚀考核标准综述

目前国内外对于盐雾试验的方法已相对比较成熟，然而对于盐雾试验考核方式的统一性却比较差，ASTM 系列标准仅仅以出具试验过程中温湿度及溶液参数形式的报告确定结果，对于结果评估方面采用“根据买卖双方的协议，或根据被测材料或样品的规格进行细致及时的评估”的方式，而考察 IEC、ISO 以及中国国家标准发现主要的评估方式主要分散在视检、重量测量、电镜扫描和能谱分析等方式，具体分类如表 2 所示。

表 2 部分标准评估方式对比

Table 2 Comparison for evaluation methods of some standard

对应标准号	评估类型	方法简述
ASTM系列	视检	视检表面情况
IEC 60068-2-11(GB/T 2324.17)	视检	视检表面情况
GB/T 22639 ^[16]	视检	根据腐蚀类型（点蚀、剥落、分层、变色等）分级
GB/T 6461 ^[17]	视检	根据腐蚀类型以及腐蚀面积进行加权计算
ISO 9227(GB/T 10125)	重量测量	根据ISO 8407 ^[18] 的方法剥落腐蚀物测量重量损失
GB/T 7998 ^[19]	腐蚀深度	通过金相显微镜观察晶间腐蚀的最大深度
SN/T 3009 ^[20]	电镜扫描	通过电子显微镜以及能谱分析仪进行分析
GB/T 3246.1 ^[21]	电镜扫描	通过电子显微镜观察微观形态
GJB 150.11A	溶液分析	分析盐溶液的PH和沉降率

从表 2 中的对比可以看出，大多数国内外标准中对于腐蚀试验后的判别方法都集中在视检，视检的内容主要分为腐蚀面积、腐蚀类型以及无明确规定的定性检查。其他一些标准中也分别给出了重量损失、腐蚀深度、电镜扫描以及溶液分析检查的思路。另外 ISO 9223^[22]还给出了一种通过获取环境中的硫酸根离子、氯离子、湿度、温度等参数对铝腐蚀等级计算的评估方法。然而对于铝制换热器而言，受限于样品的体积和形状，采用微观评价的方式存在操作难度较高、取样工作量较大、取样均匀度较差等问题，因此采用视检和重量测量的方式较为合理。

1.3 换热器耐腐蚀性标准综述

国内现行的换热器标准中对于耐腐蚀性方面的试验要求相对较为简单，大多数标准中以引用现行材料行业的试验方法为主，换热器标准中更加侧

重对于耐腐蚀试验后在耐压、气密以及性能方面的考核。其中通用性较高的 GB/T 151^[23]中仅简单的规定了耐压和泄露的试验方法，房间空调器用换热器标准 GB/T 23130^[24]进一步规定了耐腐蚀试验引用 GB 10125 中的方法进行，由此可见国家标准中并未针对换热器尤其是铝制换热器设置单独的耐腐蚀试验方法。另外，行业标准 QB/T 4681^[25]中对微通道换热器设置了耐腐蚀的盐雾试验方法，其方法与既有材料行业标准类似，但该标准对试验时间做出了 500 小时的明确规定。考虑到微通道换热器应用铝材的情况比较高，进一步调研相关标准发现 JB/T 11967^[26]、T/ZZB 0815^[27]等标准中明确规定了使用类似 SWAAT 的方法对于微通道换热器进行耐腐蚀试验，并且将试验温度进行了高低温的分类，然而方法中对于试验时间却并未明确。因此，由上述现行的中国标准来看，当前国内对于铝制换

热器的耐腐蚀性试验的方法研究仍然不足, 随着铝代铜换热器的逐步发展, 有必要研制专用于铝制换热器耐腐蚀测试的国家标准。

2 铝制换热器耐腐蚀测试研究综述

2.1 基础铝材耐腐蚀测试研究综述

当以金属铝作为换热器材料的替代方案时, 换热器的耐腐蚀性也必将受到铝材本身属性的制约, 因此铝材本身耐腐蚀性的测试和评价方法将成为换热器测试的有力依据, 在这一领域国际材料行业的研究成果很多, 文献[28-35]介绍了使用 NSS 对 2A12 铝合金、7475 铝合金、7075 铝合金、镀锌涂层铝材、汽车专用铝材以及其他铁铝合金进行耐腐蚀测试的方法, 试验时间在 96 小时~2520 小时不等; 文献[36-38]介绍了使用包括 CASS、AASS 在内的酸性盐雾试验对 6000 系列铝合金耐腐蚀性以及铝材阳极氧化的测试方法, 试验时间在 700 小时~1440 小时不等; 文献[39]介绍了采用 720 小时溶液浸泡的方法测试铝材涂层耐腐蚀性; 文献[40]采用阴极击穿的方式测试了 2024 铝合金、7075 铝合

金的耐腐蚀性。综合来看, 国际上仍然多用中性、酸性盐雾试验对铝材的耐腐蚀度进行测试, 而试验结果的考察多用电镜扫描 (SEM) 以及能谱仪 (EDS) 进行, 另外盐雾试验的时间通常不小于 96 小时。

2.2 铝制换热器耐腐蚀测试研究综述

与铝材腐蚀试验综述类似, 当前国内外学者在进行铝制换热器耐腐蚀性研究时, 使用较多的试验方法仍为 SWAAT、NSS 和 CASS 试验, 其中欧美地区应用较多的为 SWAAT 试验; 日本应用较多为 CASS 试验; 国内则是以 NSS 试验为主。值得一提的是虽然国内从科研角度应用 NSS 试验较多, 然而调研换热器企业可以发现为了缩短试验周期、加速新型铝制换热的研发进度, 很多厂家也考虑采用 SWAAT、AASS 对产品进行耐腐蚀考核。而考核方式与铝材不同的是对于换热器除了使用电镜扫描和能谱仪以外, 还加入了重量测试和性能测试作为主要的评价方法。经检索相关度较高的重点文献, 各研究人员给出的试验方法、对比方案、考核方式以及主要结论对比如表 3 所示。

表 3 部分耐腐蚀测试研究对比

Table 3 Comparison of some corrosion resistance tests

作者	研究对象	试验方法	考核方法	主要结论
D Ifezue等 ^[41]	铝制换热器	通入腐蚀性流体	视检、电镜扫描	腐蚀类型为点蚀和晶间腐蚀, 易发生腐蚀的部位为管两端的表面, 推测原因为热分布不均造成
Hyun-Min Kwon等 ^[42]	铝制换热器	通入腐蚀性流体	视检、性能	循环通入70℃, 3.5wt%海盐溶液12和18周, 铝管分别需要15μm和20μm厚度的涂层维持可靠性
Yu Zhao等 ^[43]	铝和铜制翅片	NSS	性能	96小时NSS试验后铜翅片换热性能下降2%, 而铝翅片换热性能下降12%, 铜翅片比铝翅片换热性能高约67%
Jingxin Su等 ^[44]	铝制换热器	NSS+多种盐类	重量、电流密度	在环境中没有氯离子时几乎没有重量损失发生, 但是在失重率达到一定值后再增大氯离子也不会使腐蚀更加严重, 同时失重率与电流密度成正比
Mehdi Askari等 ^[45]	多种金属合金换热器	类似浸没试验	视检、电镜扫描	海水浸没一段时间后, 腐蚀物的成分约为71wt%碳酸盐化合物、27wt%金属氧化物以及少量氯化钠
S Nasrazadani等 ^[46,47]	铝制换热器	SWAAT、NSS、CASS、PH变化	电镜扫描	2500小时NSS试验后40组换热器均无泄露, 然而将PH值降低至5.5后, 换热器有大面积的损伤
A C Scott等 ^[48]	真空钎焊铝制换热器	SWAAT、NSS、CASS等	电镜扫描	NSS、CASS、浸没试验可诱发半球形点蚀; SWAAT可诱发晶间腐蚀以及点蚀, 另外SWAAT试验腐蚀情况与时间不呈线性关系

续表 3 部分耐腐蚀测试研究对比

作者	研究对象	试验方法	考核方法	主要结论
Yupeng Wang 等 ^[49]	铝制微通道换热器	SWAAT	重量、性能	SWAAT试验10天后风阻增加97%，换热效率下降10%，清除腐蚀物重量下降2.3%，换热性能回升2.3%
Hui Pu等 ^[50]	铝制翅片换热器	NSS	性能	100~400 小时试验后，换热器的换热效率降低8.7%~20.5%，风阻增大1.7%~13.1%
Feriha S Birol 等 ^[51]	铝翅片	浸没试验	电相关方法	AA8006 和 AA8011 材料的点蚀电位分别为-700mV/SCE和-450mV/SCE，磁滞宽度分别为40mV和200mV，腐蚀率分别为0.117μm/年和0.175μm/年
刘志孝等 ^[52]	铝制微通道换热、铜铝翅片管换热器	NSS	性能	1250小时后翅片管、微通道换热器换热量分别衰减19.59%、37.13%，风阻分别增大219.03%、318.73%
武滔等 ^[53]	普通铝制、耐腐蚀涂层铝箔换热器	NSS	电镜扫描	2000小时后耐腐蚀涂层铝箔比普通铝箔换热器耐腐蚀性强4~5倍，但同款空调性能（制冷量，COP）下降2%
彭楚堂等 ^[54]	3003/3003+锌涂层/3026铝材换热器	SWAAT、沉浸试验	电镜扫描、能谱分析	SWAAT试验1000小时或醋酸海水浸泡试验500小时均证明3003+锌涂层材料防腐性能更具优势
颜圣绿等 ^[55]	铝制微通道换热器	NSS	性能	连续试验30天后换热量衰减18%、50天后换热量衰减38%
祁小松等 ^[56]	铝制微通道换热器	SWAAT	电镜扫描、电势差分析	试验122天后发生泄露，管表面的镀锌层对微通道换热器至关重要，但Zn过多也会引起翅片和管道腐蚀脱离
王林平 ^[57]	铝翅片换热器	NSS、调节含氧量	电镜扫描	试验127h后含氧量越高的水对于铝翅片的腐蚀性越强，用温度较高的水有利于避免腐蚀

从表 3 中部分文献的综述可以看出在科研层面大多数研究学者是基于 SWAAT、NSS 以及浸没试验的基础上进行个性化的调整，以便对铝制换热器的不同层面进行考核，其中得出的较为共性的结论包括：第一，铝制换热器在耐腐蚀试验后较铜制换热器更易发生泄露风险和性能损失；第二，铝制微通道换热器耐腐蚀试验后较铝制翅片管换热器的性能降低幅度更大，泄露风险也更高；第三，通常使用酸性盐雾试验对于铝制换热器考核的方法严苛等级要远高于中性盐雾试验，但所需的试验时间可以大幅缩短；第四，涂层尤其是镀锌涂层对于铝制换热器的抗腐蚀性能至关重要。另外，结合表 3 以及其他相关文献^[58-60]可以对既有研究学者所使用的试验和判别方法进行统计，统计结果如图 1、图 2 所示。

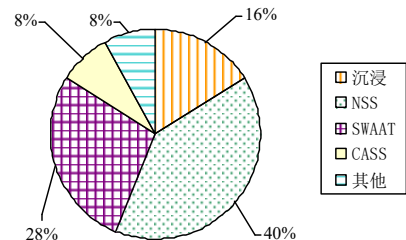


图 1 现有研究中试验方法比例

Fig.1 Proportion of test methods in existing studies

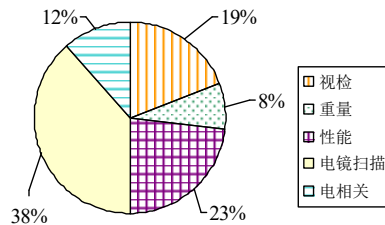


图 2 现有研究中考核方法比例

Fig.2 Proportion of assessment methods in existing research

通过统计既有研究所使用的方法可以得知当

前对于换热器耐腐蚀性考核的最主要方式仍然是 NSS 和 SWAAT 试验,而采用的考核方式以电镜扫描和性能考核为主。然而考虑到标准制定角度以及后期检测机构对于产品批量检测的便利程度和可操作性,通常认为以 SWAAT 或 NSS 作为试验方法,搭配 GB/T 6461 中的视检方式以及 GB/T 10125 中的重量检测方式为较为合理的铝制换热器耐腐蚀性检测方案。

3 铝制换热器耐腐蚀性试验理论探讨

房间空调器用换热器面临的主要腐蚀风险在于室外机长期暴露在不可控的环境之中,因此本研究认为对于环境的合理模拟应成为换热器耐腐蚀试验的基本前提。考察现有研究成果看出既往学者均是采用 PH 值处于 2.9~3.3 之间的 SWAAT、CASS 以及 AASS 或 PH 值处于 6.5~7.2 之间的 NSS 对铝制换热器的运行环境进行模拟,进而选择不同的试验时间对其进行测试,但是采用这两种方法存在的问题在于:中性盐雾试验的时间过长且对换热器的腐蚀程度较小,而酸性盐雾试验对于换热器运行环境的模拟过于严苛,不能反应换热器在真实环境下的使用状态,且对试验室周边环境污染较为严重。因此,本研究认为可以建立一种处于二者之间的弱酸性盐雾试验,在减少试验时间、降低试验污染的同时模拟换热器的真实运行环境。基于这一因素首先考察我国降雨情况可获知:如图 3 所示,我国 2020 年雨水的 PH 值为 4.39~8.43 之间,主要城市中降雨天数最多的为贵阳(204 天),最少的为银川(40 天)^[61],取降雨量前 20 位的城市进行全年平均降雨天数的计算为 122 天/年,约占全年时间的 1/3。因此,为模拟室外侧换热器最可能面临的情况,按照 PH 值为 4.5~5.5 之间的盐雾试验与样品干燥交替进行较为合理。进一步结合 2.1 节文献中既有研究所采用的 96~2520 小时试验时间,发现采用较长时间(1000 小时以上)的研究方向通常是用于考核材质的极限能力,而较短时间(200 小时以内)所研究的内容多在于材质的腐蚀机理。但是铝制换热器产品检测认证的角度出发,试验周期过长的结果是产品的腐蚀程度较大,该结果容易造成试验数据离散性较高、结果一致性变低,而试验周期较短则容易发生腐蚀不明显、难以进行考核的弊端。因此综合来看,本研究认为采用 QB/T

4681 中所设定总试验时间 500 小时即可满足铝制换热器的考核要求,同时全面考虑试验操作频率过高对误差的影响以及试验工况交替对真实环境的模拟,认为合理的试验模型可以为:30 分钟 PH 值为 4.5~5.5 之间的盐雾试验、60 分钟干燥静置交替进行不少于 350 次。最后,对于试验结果的考核方式而言,虽然文献中所采用较多的方式为电镜扫描,但从检测认证的角度而言,一方面电镜扫描在设备、人力、周期、成本等方面的投入较大、另一方面电镜扫描相关标准中并没有明确腐蚀程度的划分方式,因此采用 GB/T 6461 中视检以及 GB/T 10125 中重量检查的方式对换热器的腐蚀程度进行评估对于检测认证机构而言是更合理、更高效的方式。

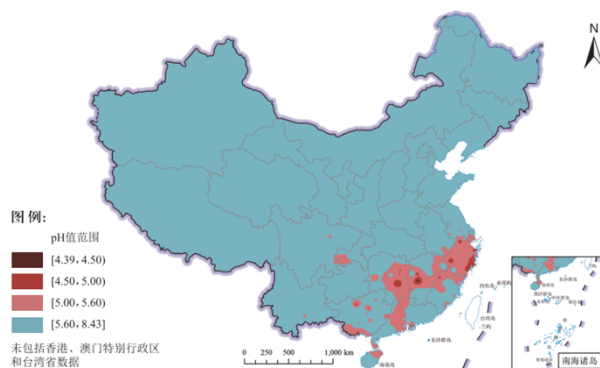


图 3 中国酸雨分布情况

Fig.3 Distribution of acid rain in China

4 结论

本次主要针对铝代铜换热器耐腐蚀性测试标准与测试技术进行综述,并得出以下结论:

(1) 当前国内外标准中涉及的盐雾试验方法对于房间空调器用铝制换热器的耐腐蚀测试存在一定的局限性,有必要针对空调专用的铝代铜换热器建立全新的耐腐蚀测试标准。

(2) 调研现有科研成果发现对于铝制换热器的耐腐蚀测试所使用的盐雾试验方法主要为 NSS 和 SWAAT 试验,二者使用率分别占本次调研结果的 40%和 28%,对于试验后评价的方法使用较多的为电镜扫描和性能测试,二者使用率分别占本次调研结果的 38%和 23%。

(3) 考察中国雨水状况并结合既有调研结果可以推断:以 PH 值为 4.5~5.5 之间的盐雾环境与干燥静置按时间比 1:2 交替运行行为较合理且能够

模拟空调室外侧铝制换热器所处环境的试验方式。

参考文献:

- [1] 2020 年中国制冷空调产业发展白皮书[M].北京:中国制冷空调工业协会,2021:63-64.
- [2] 王艳,王发,孙静.2021 年铜市场分析与展望[J].中国有色金属,2021,(3):46-48.
- [3] 王祝堂.2020 年全球原铝产量 65267 kt[J].轻合金加工技术,2021,49(6):46.
- [4] 严曼青.原料价格大涨 制造企业如何应对[N].中国工业报,2021-11-09(002).
- [5] G85-11, Standard Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing[S]. USA:American Society of Testing Materials, 2011.
- [6] B117-03, Standard Practice for Operating Salt Spray(Fog) Apparatus[S]. USA: American Society of Testing Materials, 2003.
- [7] B368-09, Standard Test Method for Copper-Accelerated Acetic Acid-Salt Spray(Fog) Testing(CASS Test)[S]. USA:American Society of Testing Materials, 2014.
- [8] G44-99, Standard Practice for Exposure of Metals and Alloys by Alternate Immersion in Neutral 3.5% Sodium Chloride Solution[S]. USA:American Society of Testing Materials, 2013.
- [9] ISO 9227, Corrosion tests in artificial atmospheres—Salt spray tests[S]. 2017.
- [10] GB/T 10125-2012,人造气氛腐蚀试验 盐雾试验[S].北京:中国标准化出版社,2013.
- [11] IEC 60068-2-11, Environmental testing—Part 2-11:Test Ka:Salt mist[S].2021.
- [12] GB/T 2423.17-2008,电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 Ka: 盐雾试验[S].北京:中国标准化出版社,2009.
- [13] GB/T 12967.3-2008,铝及铝合金阳极氧化膜检测方法 第 3 部分:铜加速乙酸盐雾试验 (CASS) [S].北京:中国标准化出版社,2008.
- [14] GJB 150.11A-2009,军用装备实验室环境试验方法 第 11 部分:盐雾试验[S].北京:中国人民解放军总装备部,2009.
- [15] ISO 3768, Metallic coatings—Neutral salt spray test(NSS test)[S].1976.
- [16] GB/T 22639-2008,铝合金加工产品的剥落腐蚀试验方法[S].北京:中国标准化出版社,2009.
- [17] GB/T 6461-2002,变形铝及铝合金制品组织检验方法[S].北京:中国标准化出版社,2003.
- [18] ISO 8407, Corrosion of metals and alloys-Removal of corrosion products from corrosion test specimens[S]. 2009-11-01.
- [19] GB/T 7998-2005,铝合金晶间腐蚀测定方法[S].北京:中国标准化出版社,2005.
- [20] SN/T 3009-2011,金属表面海水腐蚀扫描电镜鉴定方法[S].北京:中国标准化出版社,2012.
- [21] GB/T 3246.1-2000,变形铝及铝合金制品组织检验方法[S].北京:中国标准化出版社,2000.
- [22] ISO 9223, Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of atmospheres-Classification, determination and estimation[S]. 2012-02-01.
- [23] GB/T 151-2014,热交换器[S].北京:中国标准化出版社,2015.
- [24] GB/T 23130-2008,房间空调器用热交换器[S].北京:中国标准化出版社,2009.
- [25] QB/T 4681-2014,房间空气调节器用微通道换热器[S].北京:中国标准化出版社,2014.
- [26] JB/T 11967-2014,冷冻空调设备冷凝器用微通道换热器[S].北京:机械工业出版社,2014.
- [27] T/ZZB 0815-2018,热泵热水器冷凝器用微通道换热器[S].杭州:杭州市标准化研究院,2018.
- [28] H C Liu, H P Xu, L Q Zhu, et al. Corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy in neutral salt spray environment with different Al-clad removing processes[J]. Materials and Corrosion, 2013,64(3).
- [29] M Palm, R Krieg. Neutral salt spray tests on Fe-Al and Fe-Al-X[J]. Corrosion science, 2012,64(NOVa):74-81.
- [30] Calabrese L, Galtieri G, Borsellino C, et al. Durability of hybrid clinch-bonded steel/aluminum joints in salt spray environment[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016,87(9a12).
- [31] Kong Dejun, Wang Jinchun. Salt spray corrosion and electrochemical corrosion properties of anodic oxide film on 7475 aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds: An Interdisciplinary Journal of Materials Science and Solid-state Chemistry and Physics, 2015,632(Null).
- [32] Gangadhar T G, et al. Effect of hybrid reinforcements on

- corrosion characteristics of Al7075 based composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021,46(P13):5986-5990.
- [33] CECCHEL, SILVIA, CORNACCHIA, et al. A study of a non-conventional evaluation of results from salt spray test of aluminum High Pressure Die Casting alloys for automotive components[J]. *Materials and Corrosion*, 2019,70(1):70-78.
- [34] ZHANG JING, WANG JINCHUN, KONG DEJUN. Energy spectrum analysis of anodic oxidation film surface-interface on 7475 aluminum alloy after salt spray corrosion[J]. *International Journal of Materials Research*, 2017,108(3):208-212.
- [35] CHEN GUOYU. A long effect anticorrosion system of high speed boat's steel hull--of Spray Zinc-aluminum pseudo-alloy system[C]. *China international boat show high performance marine vehicles conference*, 2009.
- [36] Wang G, Tuo X, Kou L, et al. Research on corrosion performance of 6061 aluminum alloy in salt spray environment[J]. *Materials Science & Engineering Technology*, 2020,51(12):1686-1699.
- [37] BO LI, JUN YANG, XIAOMIN WANG, et al. The Reach on the Salt Spray Corrosion of 6000 Series Aluminum Alloys for the High-speed Trains[C]. *Research in mechanical engineering and material science: Selected, peer reviewed papers from the 2013 International Conference on Mechanical*, 2013:443-446.
- [38] V Lopez, E Otero, J A Gonzalez, et al. The behaviour of anodized aluminium in the salt fog test[J]. *Aluminium*, 1996,72(10):733-737.
- [39] DA SILVA F S, BEDOYA J, S DOSTA, et al. Corrosion characteristics of cold gas spray coatings of reinforced aluminum deposited onto carbon steel[J]. *Corrosion Science: The Journal on Environmental Degradation of Materials and its Control*, 2017,114(Jan.):57-71.
- [40] GhitaOuaziz, OumarouSavado. The Cathodic Breakdown Test to Assess Chromic Acid Anodized Aluminum Alloys Corrosion Protection Performance, in Correlation with Salt Spray (Fog) Testing[J]. *International Scholarly Research Notices*, 2012.
- [41] D Ifezue, F H Tobins. Corrosion Failure of Aluminum Heat Exchanger Tubes[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2015,15(4).
- [42] Hyun-Min Kwon, Yong-Ki Choi, Jeong-Tae Kwon. Effects of Corrosion on Heat Transfer Characteristics of Double-Tube Heat Exchangers[J]. *Asian Journal of Chemistry: An International Quarterly Research Journal of Chemistry*, 2015,27(11).
- [43] Yu Zhao, ZhaogangQi, QinrenWang, et al. Effect of corrosion on performance of fin-and-tube heat exchangers with different fin materials[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011,37:98-103.
- [44] Jingxin Su, Minyu Ma, Tianjing Wang, et al. Fouling corrosion in aluminum heat exchangers[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015,28(3).
- [45] Mehdi Askari, Sahar Afroukhteh, Daryoush Masouri. Corrosion of heat exchanger from UNS N06625 in condensate and gas cooler- Case study[C]. *European corrosion congress*, 2013.
- [46] S Nasrazadani, H Vaughan, D Ellerbrock, et al. Development of a New Accelerated Corrosion Test for All-Aluminum MicroChannel and Tube and Fin Heat Exchangers-Part II : Chamber Study[J]. *ASHRAE Transactions*, 2020,126(PTa2):572-580.
- [47] S Nasrazadani. Development of New Accelerated Corrosion Test(s) for All-Aluminum MicroChannel and Tube and Fin Heat Exchangers-Part I : Comprehensive Literature Review[J]. *ASHRAE Transactions*, 2020,126(PTa1):870-882.
- [48] Accelerated Corrosion Test Methods for Evaluating External Corrosion Resistance of Vacuum Brazed Aluminum Heat Exchangers[J]. *SAE Transactions*, 1991,100:578-586.
- [49] Yupeng Wang, Hui Zhao, Pega Hrnjak. An Evaluation of the Effect of Corrosion Tests on Thermal Performance of Aluminum Heat Exchangers[C]. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2021:2196.
- [50] Hui Pu, Guoliang Ding, Haitao Hu, et al. Effect of Salt Spray Corrosion on Air-Side Performance of Finned-Tube Heat Exchanger with Hydrophilic Coating Under Dehumidifying Conditions[J]. *HVAC&R Research*, 2010,16(3):257-272.