

文章编号:0253-4339(2013)04-0005-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.04.005

采用表面喷锌及喷硅扁管的微通道换热器长效特性研究

韦 伟¹ 徐坤豪² 梁媛媛¹ 陈江平¹

(1 上海交通大学 制冷与低温工程研究所 上海 200240; 2 萨帕铝热传输(上海)有限公司 上海 201807)

摘 要 腐蚀特性是全铝微通道换热器的主要特征之一。对两种不同表面处理方式的挤压扁管:表面喷锌挤压扁管和表面喷硅挤压扁管的长效特性进行了对比研究。对采用这两种不同表面处理方式的挤压扁管的微通道换热器样件,分别进行了 7 天和 14 天的盐雾腐蚀实验(SWAAT),对比腐蚀前后两个换热器样品的换热量、空气侧压降和总热阻变化情况。结果表明,采用表面喷硅扁管的微通道换热器的长效特性优于采用表面喷锌扁管。
关键词 腐蚀;微通道换热器;表面喷锌;表面喷硅;长效性
中图分类号:TB657.5 **文献标识码**:A

Study on Long-term Performance of Microchannel Heat Exchanger
with Zn-coated and Si-coated Extruded Tube

Wei Wei¹ Xu Kunhao² Liang Yunayuan¹ Chen Jiangping¹

(1. Inst. of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong Univ., Shanghai, 200240, China; 2. Sapa Heat Transfer (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 201807, China)

Abstract Corrosion character is one of the main characters of Al microchannel heat exchanger. In the present study, standard seawater acidified test (7 and 14 days) were carried out on microchannel heat exchangers with Zn-coated extruded tube and Si-coated extruded tube, and the performances of the test samples before and after the corrosion were tested in order to compare the change of capacity, air side pressure drop and thermal resistance. The result showed that, the long-term performance of the sample with Si-coated extruded tube was much better than the sample with Zn-coated extruded tube.
Keywords corrosion; microchannel heat exchanger; Zn-coated; Si-coated; long-term performance

全铝微通道换热器已经在车用空调中广泛使用^[1-2],近年来在商用和家用空调中也得以逐步推广。全铝微通道换热器具有单位面积换热量高、结构紧凑的优点,可降低制冷剂的充注量。但由于采用全铝结构,用户对于其防腐性能非常关注,换热器长期使用后性能的衰减也是考核换热器的主要指标之一。

全铝微通道换热器的防腐主要在于扁管。目前扁管主要由单一组分的铝合金材料经高温挤压成型。为了保护内部流通制冷剂,扁管一般采用电化学防腐,即用一层电位更低的金属材料(通常是锌)覆盖扁管表面^[3-4]。在和空气接触而自然腐蚀的过程中,锌层会优先释放电子被空气中的氧气氧化并最终达到平衡。这种牺牲阳极的阴极保护法效果十分显著,但同时带来如下几个隐患:

1) 锌层的覆盖很难保证绝对均匀,结合制造过

程中的缺陷,例如扁管表面晶粒组织的不一致,可能会导致扁管的“点蚀”,这种局部腐蚀持续进行的最终结果就是扁管的穿孔。

2) 钎焊时翅片表面钎料的流动会促使锌向焊接部位聚集,腐蚀一段时间后,焊接部位会先于翅片本身而被破坏,最终导致翅片脱落。翅片脱落虽然不是换热器失效的特征,但会大大影响换热器的实际使用性能。

近年德国 Behr 发明了扁管表面喷硅技术,由于硅可作为钎料,换热器不需要复合材料的翅片即可完成扁管与翅片的焊接,可节省翅片的成本。虽然表面喷硅扁管仍需要同时喷锌或者其他阳极金属来进行防腐,但它在焊接后几乎没有溶蚀现象,换热器的钎焊接头处会比较牢固。

为对比分析这两种换热器的长效特性,收集了采

用表面喷锌挤压扁管 (Zn-coated tube) 和表面喷硅挤压扁管 (Si-coated tube) 制成的微通道换热器, 分别进行了 7 天和 14 天的海水盐雾腐蚀实验 (SWAAT), 并在冷凝器工况下测试和对比了换热器换热量、空气侧压降以及总热阻的变化情况。

1 实验过程

1.1 测试样件

测试的两个样件均采用百叶窗翅片, 它们的主要尺寸参数见于表 1。

在新样件完成性能测试后, 分别进行了 7 天和 14 天的海水盐雾腐蚀实验 (SWAAT), 以模拟不同程度的腐蚀状况, 在 SWAAT 实验后进行性能测试。海水盐雾腐蚀实验依照美国标准^[5]进行。

表 1 测试样件尺寸参数
Tab. 1 Dimension of test samples

项目	喷硅扁管样件	喷锌扁管样件
迎风面积/m ²	0. 20088	0. 19188
扁管长度/mm	540	533
扁管数量/mm	37	52
翅片宽度/mm	16	16
翅片高度/mm	7. 9	5. 4
翅片间距/mm	2. 6	2. 3

1.2 实验装置

样件的性能测试在标准的汽车空调综合实验室进行。如图 1 所示, 实验室分为冷凝器室和蒸发器室两个环境室, 并由独立的环境机组来分别控制两个环境室的温度和湿度。样件安装在测试风洞上, 由可调速风机来控制流经样件的风量, 同时风量大小由喷嘴

组测出, 样件的通空气侧压降力由压差传感器测出。性能测试过程中, 空气侧与制冷剂侧的状态参数均进行测量与控制, 测量参数与精度见于表 2。与此相对应, 样件的换热能力同时由空气侧及制冷剂侧通过焓差法计算得出, 在整个实验中, 空气侧能力与制冷剂侧能力的相对偏差保证在 ±5% 以内。根据 Moffat^[6]的不确定度计算方法, 实验台的冷凝器换热能力测量误差为 3%, 风量测量误差为 1. 9%。

表 2 测量参数及精度
Tab. 2 Measured parameters and precision

测量参数	测量精度	测量范围
温度	± 0. 5℃	- 40 ~ 200℃
制冷剂侧压力	± 10. 0kPa	0 ~ 3000kPa
空气侧压降	± 2. 0Pa	0 ~ 500Pa
制冷剂质量流量	± 1. 5kg/h	0 ~ 500kg/h
压缩机转速	± 10r/min	0 ~ 6000r/min
压缩机扭矩	± 0. 02N·m	0 ~ 50N·m

1.3 实验工况

实验工况采用了车用冷凝器的测试标准, 制冷剂为 R134a, 具体参数如表 3 所示。

表 3 性能测试工况
Tab. 3 Test conditions

控制变量	数值
冷凝器室干球温度	35℃
冷凝器入口制冷剂压力	1640kPa (G)
冷凝器入口制冷剂过热度	25℃
冷凝器出口制冷剂过冷度	5℃
迎面风速	1. 0, 2. 0, 3. 0m/s

1.4 数据处理

在每一次性能测试中, 同时获得冷凝器空气侧和制冷剂的换热量, 并且两者的相对偏差在 ±5% 之内, 证明换热量测量值是可信的。冷凝器样件的空气侧阻力由压差传感器测出。

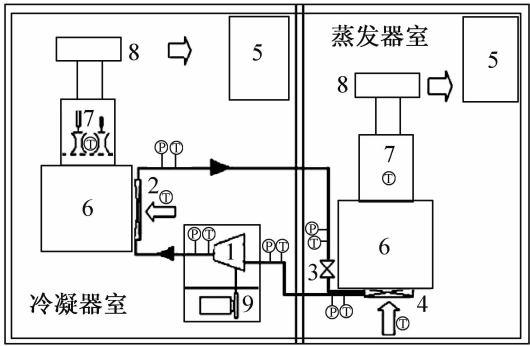
对数平均温差法被广泛用于计算换热器总换热系数^[7-8], 如公式 (1) 所示。其中 Q_{ave} 是冷凝器空气侧换热量与制冷剂侧换热量的平均值, ΔT_m 是对数平均温度差, 计算方法见于公式 (2)。总热阻可由总换热系数经简单计算而得出, 见于公式 (3)。

$$U = \frac{Q_{ave}}{A \cdot \Delta T_m}$$

(1)

图 1 汽车空调实验室原理图

Fig. 1 Schematic of heat exchanger performance test facility



1 压缩机 2 冷凝器 3 膨胀机构 4 蒸发器 5 环境机组
6 测试风洞 7 喷嘴组 8 调整风机 9 电机

$$\Delta T_m = \frac{(T_{r.in} - T_{a.out}) - (T_{r.out} - T_{a.in})}{\ln[(T_{r.in} - T_{a.out}) / (T_{r.out} - T_{a.in})]} \quad (2)$$
$$R = \frac{1}{U \cdot A} \quad (3)$$

2 结果与讨论

表 4 和表 5 分别列出了两个样件在进行盐雾腐蚀前的性能测试数据,包括不同风速下的换热量、空气侧压降以及总传热热阻。由于这两个样件的尺寸参数有很大不同,性能参数之间不能进行直接比较,因此在讨论腐蚀对换热量、空气侧压降以及总热阻的影响时,对比了两个样件腐蚀后的性能数据与腐蚀前的百分比。

表 4 表面喷硅扁管样件在腐蚀前的性能
Tab. 4 Performance of sample with Si-coated tube before SWAAT

迎面风速/(m/s)	1	2	3
换热量/W	4422. 5	7620. 3	10224. 6
空气侧压降/Pa	10. 93	31. 88	59. 23
热阻/(K/W)	0. 003584	0. 002217	0. 001706

表 5 表面喷锌扁管样件在腐蚀前的性能
Tab. 5 Performance of sample with Zn-coated tube before SWAAT

迎面风速/(m/s)	1	2	3
换热量/W	5359. 3	9334. 5	12433. 5
空气侧压降/Pa	12. 75	37. 07	71. 88
热阻/(K/W)	0. 002299	0. 001297	0. 000998

2.1 腐蚀对换热能力的影响

图 2 列出了腐蚀实验后两个样件换热量的下降情况,可看出风速越大时,换热量的下降情况越明显,且喷硅扁管样件腐蚀之后的换热性能衰减小于喷锌扁管样品。在 7 天和 14 天腐蚀之后,喷硅扁管样件的换热量分别为腐蚀前的 87.4% ~ 93.0% 与 72.1% ~ 76.2%,而喷锌扁管样件换热量分别为腐蚀前的 84.9% ~ 88.9% 与 61.1% ~ 74.1%。

2.2 腐蚀对空气侧压降的影响

如图 3 所示,两个样件在腐蚀之后空气侧压降上升,这反映了腐蚀之后样件翅片的破损情况。7 天和 14 天腐蚀之后,喷锌扁管样件的空气侧压降上升为腐蚀前的 137.6% ~ 143.7% 与 162.3% ~ 164.0%,相比之下,喷硅扁管样件的是腐蚀前的 117.6% ~ 130.0% 与 122.9% ~ 141.7%。喷锌扁管样件的空

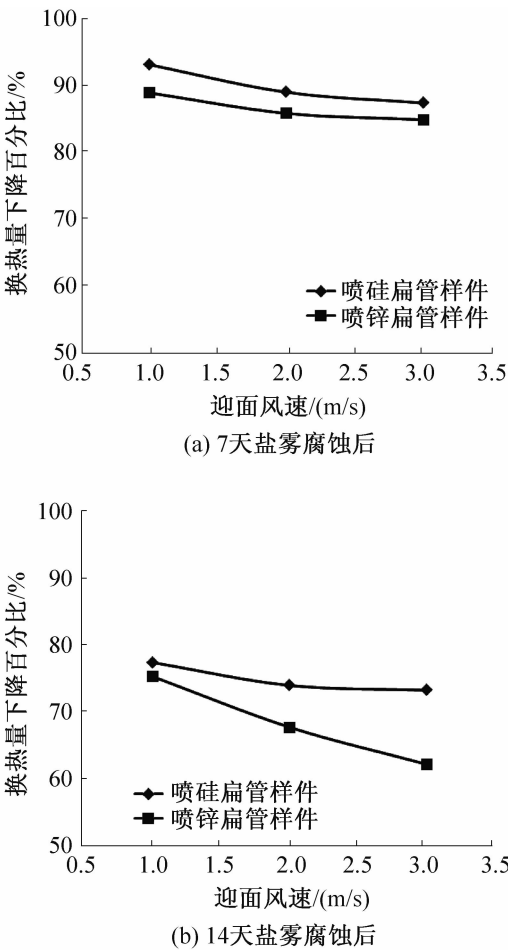


图 2 腐蚀前后各样件换热能力变化情况对比
Fig. 2 Comparison of capacity of each sample before and after SWAAT

气侧压降上升明显大于喷硅扁管样件。

2.3 腐蚀对热阻的影响

图 4 为腐蚀前后两个样件的总热阻变化情况,喷锌扁管样件的总热阻上升百分比均明显高于喷硅扁管样件。在经 7 天与 14 天盐雾腐蚀之后,喷锌扁管样件的总热阻上升为腐蚀前的 130.8% ~ 148.6% 与 179.7% ~ 252.3%,喷硅扁管样件为 113.6% ~ 124.1% 与 156.2% ~ 165.2%。

3 结论

研究表明:
采用表面喷锌扁管进行防腐蚀的冷凝器样件,在盐雾腐蚀后,各项性能的衰减最为严重。在经 7 天与 14 天盐雾腐蚀之后,换热量分别下降为腐蚀前的 84.9% ~ 88.9% 与 61.1% ~ 74.1%,空气侧压降上升为腐蚀前的 137.6% ~ 143.7% 与 162.3% ~ 164.0%,总热阻上升为腐蚀前的 130.8% ~ 148.6% 与 179.7% ~ 252.3%。这是因为锌的电化学活性比

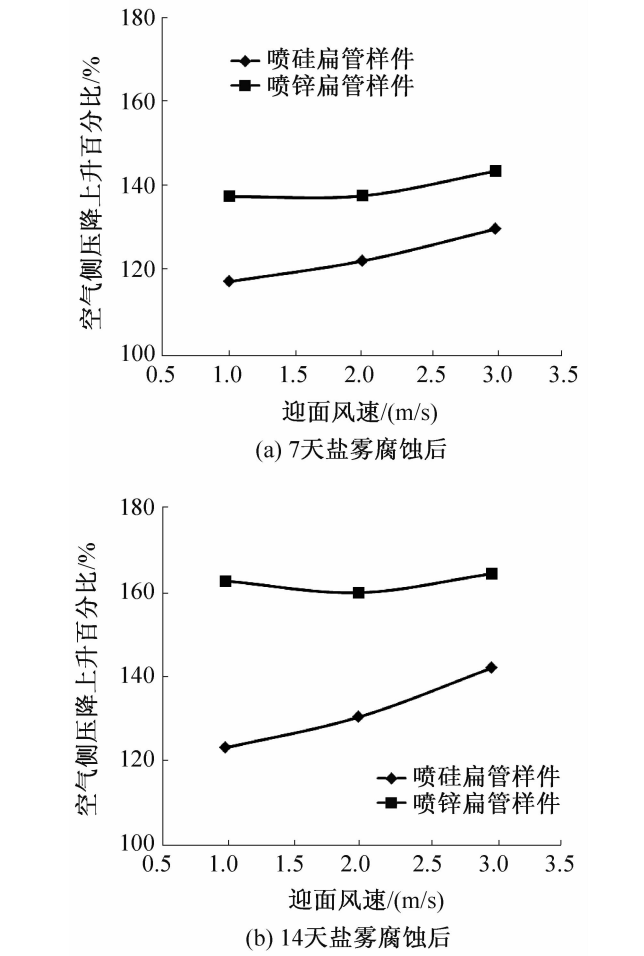


图 3 腐蚀前后各样件空气侧压降变化情况对比

Fig. 3 Comparison of air side pressure drop of each sample before and after SWAAT

铝强,扁管表面的锌层是作为牺牲层来保护铝制扁管,在电化学腐蚀中表面锌层容易发生反应而损失。同时由于锌在电化学腐蚀中产物较多,因此会明显增大换热器的空气侧压降。

采用喷硅扁管换热器样件经腐蚀后,由于扁管的表面保护层不发生电化学反应,因此此样件在腐蚀之后的性能表现大幅优于采用表面喷锌扁管的样件。喷硅扁管样件在 7 天和 14 天腐蚀后,换热量分别下降为腐蚀前的 87.4% ~ 93.0% 与 72.1% ~ 76.2%,空气侧压降上升为腐蚀前的 117.6% ~ 130.0% 与 122.9% ~ 141.7%,总热阻上升为腐蚀前的 113.6% ~ 124.1% 与 156.2% ~ 165.2%。

综上,采用表面喷硅挤压扁管的微通道换热器长效特性优于采用表面喷锌扁管。

符号说明

U ——总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$

A ——换热面积, m^2

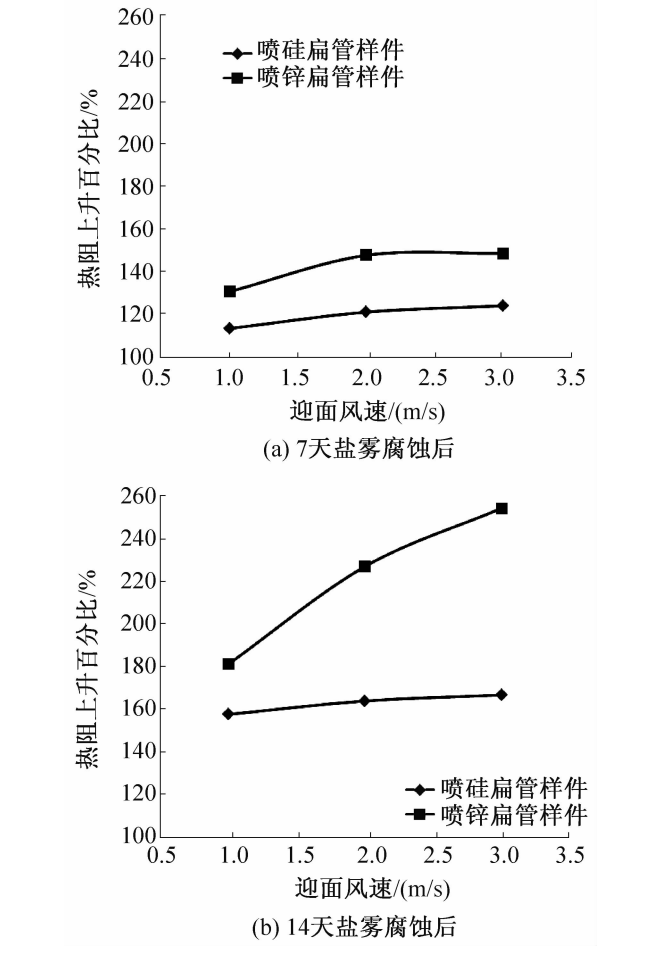


图 4 腐蚀前后各样件总热阻变化情况对比

Fig. 4 Comparison of thermal resistance of each sample before and after SWAAT

Q_{ave} ——空气侧与制冷剂侧换热量平均值, W

T ——温度, K

ΔT_m ——对数平均温差, K

R ——总热阻, K/W

Q_0 ——腐蚀前样件空气侧与制冷剂侧换热量平均值, W

Q_{SWAAT} ——腐蚀后样件空气侧与制冷剂侧换热量平均值, W

$\Delta p_{a,0}$ ——腐蚀前样件空气侧压降, Pa

$\Delta p_{a,SWAAT}$ ——腐蚀后样件空气侧压降, Pa

R_0 ——腐蚀前样件总热阻, K/W

R_{SWAAT} ——腐蚀后样件总热阻, K/W

参考文献

[1] Jingwei Wu, Jianguo Yang, Hongyuan Fang, et al. The bond strength of Al - Si coating on mild steel by kinetic spraying deposition[J]. Applied Surface Science, 2006, 252(22): 7809-7814.

[2] Sanghoon Yoon, Hyung Jun Kim, Changhee Lee. Deposition behavior of bulk amorphous NiTiZrSiSn according to the kinetic and thermal energy levels in the kinetic spraying

- process [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200 (20/21): 6022-6029.
- [3] D R Holmes. New corrosion-resistant high temperature heat exchanger materials[J]. Corrosion Science, 1968, 8(8): 603-622.
- [4] Sanghoon Yoon, HyungJun Kim, Changhee Lee. Fabrication of automotive heat exchanger using kinetic spraying process[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201 (24): 9524-9532.
- [5] American Society for Testing and Materials. ASTM G85-02 Standard Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing [S]. Philadelphia, 2002.
- [6] R J Moffat. Describing the uncertainties in experimental results[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1(1): 3-7.
- [7] Dong-quan Deng, Lie Xu, Shi-qiong Xu. Experimental investigation on the performance of air cooler under frosting conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23 (7): 905-912.
- [8] Yanping Xia, Anthony M Jacobi. Air-side data interpreta-

tion and performance analysis for heat exchangers with simultaneous heat and mass transfer: wet and frost surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(25/26): 5089-5102.

作者简介

韦伟,男(1987-),硕士在读,上海交通大学机械与动力工程学院制冷所,021-34206087, E-mail: 15921549861@163.com。研究方向:汽车空调。目前进行的研究项目有:电动汽车热泵开发、平行流换热器折叠管性能研究以及微通道换热器在家用空调上的应用等。

About the author

Wei Wei (1987-), male, Master Candidate, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, 021-34206087, E-mail: 15921549861@163.com. Research fields: vehicle air conditioning. Recent projects: electric vehicle air conditioning and heat pump system, performant study on folded tube using in paralld heat exchanger, feasibility study of the application of micro-channel heat exchanger in domestic air-conditioning.