

“铝代铜”技术在空调制冷行业中的开发与 应用

王丽丹, 曾庆亚, 曲华*, 袁迅道

(青岛中科应化技术研究院, 青岛 266000)

(Tel:0532-87989080, Email: quhua_pl@sina.com)

摘要: 针对空调换热器与制冷管路“铝代铜”这一行业关注的焦点问题, 以铜资源匮乏的现状为背景, 对“铝代铜”技术在空调制冷行业的应用进行了技术和经济可行性分析。介绍了“铝代铜”技术在制冷管路和换热器上开发和应用的现状及优势。分析了9系铝合金在空调制冷行业的应用前景。得出追求低成本、高效率、高质量的“铝代铜”技术已成为空调制冷业的发展趋势。

关键词: 铝代铜 空调制冷 铜铝连接管 全铝换热器 9系铝合金

Research and Applications of “Replacing copper with aluminum” Technology in the Air-conditioning Industry

Wang Lidan Zeng Qingya Qu Hua* Yuan Xundao

(Qingdao Zhongke Institute of Applied Chemistry Technology, Qingdao 266000)

Abstract The “replacing copper with aluminum” technology applied in the air-conditioning industry, contraposing the focus issues of heat exchangers and cooling pipes, was studied technically and economically based on the background of copper resource scarcity. The development, application status and advantages of “replacing copper with aluminum” technology in refrigerating pipes and heat exchangers were introduced and the application prospect of 9000 series aluminum alloys in the air-conditioning refrigeration industry was analyzed. It has become the development trend in air-conditioning industries to pursue the “replacing copper with aluminum” technology, which owns advantages of lower cost, higher efficiency and higher quality.

Keywords replacing copper with aluminum air-conditioning Cu-Al tube aluminum heat exchanger 9000 series aluminum alloy

0 前言

铜材具有优良的延展性、导热性及耐蚀性,几十年来一直是空调、冰箱等制冷产品热交换器材的首选材料,包括冷凝器、蒸发器(简称“两器”)用管、两器连接用管及配套管件等。近年来,铜材价格一直居高不下,给空调、冰箱等家电制造商带来了不小的成本压力,催生了“铝代铜”的开发与应用。2007年,国内爆发了铜铝管的行业内大争论:正方认为“铝代铜”为技术进步,是发展趋势;反方认为“铝代铜”是制造商偷工减料,应继续使用

全铜管。至今，“铝代铜”在“铜铝之争”上占据技术优势，但是由于消费者的惯性思维和激烈的市场竞争，“铝代铜”在市场上仍处于劣势。

本文就“铜铝之争”问题展开，主要介绍了“铝代铜”技术的必要性、可行性及在空调制冷行业中的应用和优点；对比了9系铝合金与3003防锈铝的耐蚀性，说明了9系铝合金在空调中应用前景良好，为消费者及相关技术人员了解“铝代铜”现状及趋势提供技术依据。

1 “铝代铜”技术在空调制冷行业应用的必要性

铜是一种重要的金属材料，作为战略物资广泛的应用在民用和军事领域。我国是全球最大的铜资源消费国，随着经济的飞速发展，我国的铜资源已难以满足需求。我国的铜矿床规模以中小型居多，大型、超大型矿床数量极少，多分布在新疆、西藏、云南等偏远地区，开采成本高，难以利用；且我国铜矿床贫矿居多，富矿少，平均品位0.87%，大多数铜矿属于中低品位^[1,2]。据统计^[3,4]，2016年，我国铜储量约为2800万吨，仅占全球的3.9%；矿山铜产量182万吨，占全球的8.8%；精炼铜产量844万吨，超过全球的三分之一；然而我国铜的消费量呈现不断上升的趋势，从2013年的983万吨增长到2016年的1164万吨，消费量接近全球的一半。我国铜资源不平衡的供需关系导致了铜长期依赖进口，2016年，铜的进口量达到363万吨，占全球的38.1%。柳群义等^[5]根据铜需求的“S”型规律，预测中国铜的需求量将在2025年前后达到峰值，需求量在1400~1600万吨。这种情况下，国内铜的价格必将维持在较高的价位。最新数据显示，2018年1~5月份，铜的价格稳定在5万元/吨以上（数据来源：上海有色网）。

家电行业是用铜量比较大的行业，2012年家电行业用铜量约占我国铜消费的15%，是第二大铜消费行业^[5]。铜在空调制冷行业中主要用来制造蒸发器、冷凝器用内螺纹铜管及室内外机连接管。自2005年起，中国已成为世界上最大的空调制造基地，据国家统计局^[6,7]数据显示，2017年1~11月空调产量为17541.99万台，占全球市场份额的85%。以一台分体式空调平均铜用量5kg^[8]计算，2017年空调用铜量在87万吨以上。据统计^[9]，铜材料成本占空调原材料成本的15%~20%。目前铝的价格约为1.46万/吨，铜的价格为5万元/吨，铝价格不足铜价格的1/3；而铝的密度是2.7g/cm³，铜的密度是8.9g/cm³，铜密度是铝密度的3倍以上。据统计^[9]，如果使用全铝热交换器和铜铝连接管路，预计可降低空调整机成本的25%以上。

空调利润持续走低，行业盈亏已经触底。20世纪90年代初，空调产业在国内处于起步阶段，属于暴利行业，随着市场扩大和竞争加剧，利润逐渐下滑，2005年行业平均利润接近0，致使一些管理落后、竞争能力差的企业纷纷退出市场。空调业发展至今20余年，经历了萌芽期，走过快速增长期，短暂洗牌后步入成熟期，行业利润也从暴利走向微利，甚至亏损^[10]。

综上所述，铜资源短缺、价格上涨及空调行业激烈的竞争导致的成本上升和利润下降，迫使空调制冷行业不得不寻找性能相近而价格更低的替代材料。

2 “铝代铜”技术在空调制冷行业应用的可行性

金属材料的热导率从高到低前几位依次是银（420 W/m K）、铜（410 W/m K）、金（318 W/m K）、铝（237 W/m K）。金、银价格高昂，不适合做铜的替代材料。铝具有良好的延展性、导电性、导热性、耐热性和耐核辐射性，而且重量轻、强度高、可加工性好，可以满足两器中各种形状铜管的加工要求。谷海华^[11]等研究了电冰箱以铝代铜的腐蚀特性，发现T2铜和1060纯铝在R22制冷剂中的腐蚀速率分别是0.022mm/a、0.041mm/a，铝耐制冷剂腐蚀性能相差不是太大。目前研发的铝材料在防腐蚀、防渗漏、抗压、可塑性、热交换性等方面均可达到或接近铜的特性^[12]。因此，从金属材料的性质考虑，铝是铜的最佳替代材料。并

且，在资源储备上，我国铝资源储量丰富，2013 年铝土矿资源为 8.3 亿吨，电解铝产量为 1988.3 万吨，占世界总产量的 65% 以上^[13]。

3 “铝代铜”在空调制冷行业中的应用及优势

目前，“铝代铜”技术在空调制冷行业中的开发与应用主要集中在以下两个方面：

(1) 铝管替代制冷连接铜管

铝管在空调器上的替代主要是分体式空调室内机与室外机的制冷剂连接管道，该连接管只需耐压、防腐，对换热性能几乎没有要求，目前多数空调厂家采用铝铜空调连接管代替传统铜管。连接管两头需要焊接在空调器上，且在浸水环境下工作，铜比铝的焊接、耐蚀性好，因此铜铝连接管一般采用两头用铜中间用铝。不同金属材料在电解质溶液中存在电极电位差，差值越大，发生电偶腐蚀的倾向越大^[14]。铜对氢的电极电位为 +0.34V，铝对氢的电极电位为 -1.66V，铜铝间的电极电位差为 2V，相当于一节干电池电压的 1.3 倍，一般认为会发生严重的电偶腐蚀^[15]。TCL 集团^[16]对于铜铝焊接处的防腐蚀措施提出了三种方案：喷塑、喷漆、套热缩管，经过盐雾试验表明，焊接处喷塑与套热缩管均未出现腐蚀，考虑到生产加工便捷性，普遍采用套热缩管的方式来控制腐蚀。赵越^[17]等指出，由于管路抽空和制冷剂不含水分、Cl 等，冰箱铜铝连接管在长期使用过程中未发现从管路内部腐蚀的故障件。所以，铜铝连接管的性能满足制冷连接管的要求，能够替代传统铜管。

与传统铜管相比，铜铝连接管具有以下优点^[18]：①采用薄壁铜铝管焊接技术，焊缝强度高于铜管、铝管的自身强度。②铜管不做防腐处理，而铜铝连接管焊接处套热缩管，保证铝管与水分、潮湿空气隔绝，使用寿命超过 20 年，国家规定连接管的使用寿命为 15 年。③铜的导热系数是铝的 1.8 倍，采用铜铝连接管能够减小冷量损失，提高节能水平。④铝管质软且重量轻，易于安装和移机。

(2) 全铝换热器

蒸发器和冷凝器都是热交换器，是空调器的重要组成部分，重量约占机组重量的 30%~40%，动力消耗占总动力消耗的 20%~30%，其性能的好坏直接影响到整个空调系统的制冷(制热)能力。现在普遍使用的结构形式是铜管外胀接铝翅片结构的换热器(图 1^[9])。2010 年 6 月，国家对家用空调开始实施新的能效标准，新旧能效标准对比见表 1^[9]。由表中看出，新能效标准中，将家用空调制冷量小于 4500W 的能效市场准入门槛从 2.6 提高到 3.2，旧标准中的 1 级能效相当于新标准中的 2 级能效。

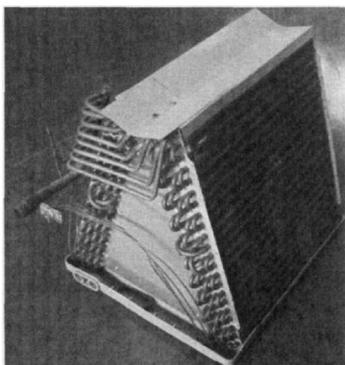


图 1 铜管翅片式换热器

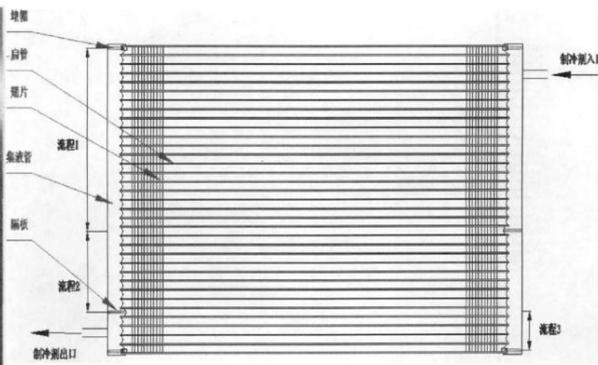


图 2 平行流式换热器

新能效标准对空调的换热效率提出了更高的要求，按照现有的工艺难以达到国家标准要求，有些空调厂家通过使用节能元件及增大换热器面积提高能效，成本大大提高。因此，研究各种高效、紧凑的新型换热器势在必行。空调用铝制换热器主要有平行流换热器(图 2^[9])

和整体式全铝换热器（图 3^[9]）。

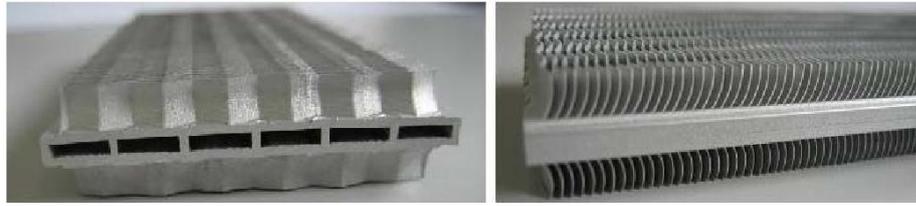


图 3 整体式全铝换热器

表 1 新旧空调能效标准对比

| | | 类型 | 额定制冷量 (CC) W | 1 级 | 2 级 | 3 级 | 4 级 | 5 级 |
|--------------------------|-----|----|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 旧能效标准 GB 12021.3-2004 | 分体式 | | CC≤4500 | 3.4 | 3.2 | 3.0 | 2.8 | 2.6 |
| | | | 4500<CC≤7100 | 3.3 | 3.1 | 2.9 | 2.7 | 2.5 |
| | | | 7100<C≤14000 | 3.2 | 3.0 | 2.8 | 2.6 | 2.4 |
| | 整体式 | | | 3.1 | 2.9 | 2.7 | 2.5 | 2.3 |
| 新能效标准 GB 12021.3-2010 | 分体式 | | CC≤4500 | 3.6 | 3.4 | 3.2 | | |
| | | | 4500<CC≤7100 | 3.5 | 3.3 | 3.1 | | |
| | | | 7100<C≤14000 | 3.4 | 3.2 | 3.0 | | |
| | 整体式 | | | 3.3 | 3.1 | 2.9 | | |

全铝平行流换热器（图 2）当量直径为 $100\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ ，而微通道的界定范围为 $1\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ ，平行流换热器是基于微通道技术发展起来的一种高效紧凑式换热器^[20]。平行流换热器传热管技术已十分成熟，在车辆空调系统中已大批量使用，它由集流管、数条平行支路的多空扁管和铝翅片焊接而成，具有高效、紧凑、体积小且质量轻的优点，目前在家用空调的使用尚处于研究阶段^[21]。林创辉^[22]从结构、换热性能、阻力和体积质量等方面对比分析了管翅式换热器和平行流换热器，通过在风冷式空调器上的试验测试、与传统管翅式铜管铝翅片换热器进行换热性能和空调系统性能对比，得出结论：采用全铝平行流换热器，制冷量和 EER 均有一定的改善，机组的能效由原来的国家四级能效提升至国家三级能效，且制冷剂充注量方面比传统铜管套翅片换热器减少 25%，其使用性能可达到要求。在相同技术条件下，与传统换热器相比，全铝平行流换热器是目前批量生产的最高效的换热器，同等换热体积情况下，换热能力增大一倍；同等换热能力情况下，微尺寸平行流换热器的体积仅为铜管翅片式换热器的 43%；铜管套翅片式换热器，由于存在铜和铝两种金属，废材回收麻烦，而全铝平行流换热器采用铝材制作，其废材回收更方便，材料利用率高。

管翅式换热器和平行流式换热器，都是通过焊接或胀管将传热管和翅片连接而成，翅片和传热管之间存在接触热阻。空调两器的一次焊漏率可高达 0.5%~2%，通过严格控制钎料成分、加热温度、焊接物的表面状态等因素，焊漏率也仅能控制在 0.2% 以内，且焊接容易出现应力腐蚀的问题。胀接是依靠传热管的塑性变形和翅片的弹性变形来达到密封和紧固，胀接对连接部位表面状况和工艺过程控制都非常严格，否则随着运行时间的增长，会出现脱胀现象；无论焊接还是胀接，连接部位在湿空气条件下，都容易出现电偶腐蚀问题^[23]。而整体式全铝换热器（图 3）并没有以上问题。整体式全铝换热器采用金属切削挤压加工工艺，在扁平状的铝合金传热管基板表面上直接铲削出散热翅片，翅片背离刀具一侧表面的材料受到挤压作用，在翅片表面上形成不规则的凸起结构，表面比较粗糙，同时另一面受拉伸作用，

形成的表面非常光滑。整体式换热器，彻底消除了翅片与传热管之间的接触热阻，提高了换热器的传热系数；增加了传热管结构的刚度，提高了换热器的耐压性，不存在湿空气条件下翅片与传热管之间的电化学反应问题，具有广泛的应用前景。

4 9 系铝合金在空调制冷行业中应用前景良好

9 系铝合金是中科院长春应化所在国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划（863 计划）和创新基金支持下取得的国际领先的科研成果，其核心技术已获得 7 项国家发明专利权、3 项国防专利权和 1 项美国发明专利权，还有多项核心专有技术将在适当的商业时机申请国内外专利。我们突破了传统铝合金制备工艺，发展了一种现代非平衡态合成技术，通过粉末冶金的方式生产出系列轻质高强的特种高性能铝合金产品。其中 9C 系列高耐蚀铝合金具有强度高、耐蚀性好、加工性能良好的优点。例如，3003 铝合金是工业防锈铝合金，其耐蚀性非常好，是目前平行流式换热器和整体式全铝换热器的优选材料。3003、9C37、9C34 铝合金机械力学性能对比见表 2。铝合金材料的耐蚀性可以用电化学阻抗弧的大小进行表征，电化学阻抗弧越大，表明耐蚀性越好。笔者通过电化学方法比较了 3003、9C37、9C34 铝合金在 3.5% 中性氯化钠溶液中的耐腐蚀性能，见图 4。从测试结果可以得出，耐蚀性顺序为：9C37>9C34>3003。从材料机械力学性能和耐腐蚀性能看，9C 系列高耐蚀铝合金在空调制冷行业中具有明显的应用优势。

表 2 3003、9C37、9C34 铝合金力学性能对比表

| 牌号 | 抗拉强度 MPa | 屈服强度 MPa | 硬度 (HB) |
|------|----------|----------|---------|
| 3003 | 140~180 | ≥ 115 | 35~45 |
| 9C37 | 550 | 535 | 130 |
| 9C34 | 450 | 415 | 120 |

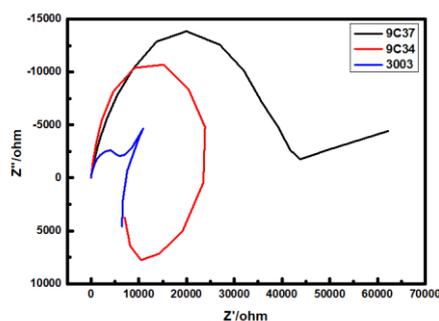


图 4 电化学阻抗测试结果图

5 结论

在我国铜资源紧缺的情况下，铜价上涨不仅仅是产品利润压缩的问题，濒临枯竭的铜资源会使我国制冷行业在国际中丧失竞争力，因此，以铝代铜意义重大，必将成为空调制冷行业的发展趋势。通过前文分析，可以看出铝铜连接管替代铜管已经在空调制冷行业广泛使用且优势明显，全铝换热器代替传统换热器也已成为行业技术开发的热点和重点。9C 系列高耐蚀铝合金具有优秀的机械力学性能和耐腐蚀性能，在空调制冷行业中具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 黄崇轲, 白冶, 朱裕生, 等.中国铜矿床[M].北京: 地质出版社, 2001.
- [2] 邓会娟, 季根源, 易锦俊, 等.中国铜矿资源现状及国家级铜矿床实物地质资料筛选[J].中国矿业, 2016, 25 (2): 143~149.
- [3] USGS. Mineral commodity summaries 2017[R]. (2107-01-31) [2017-03-16]. <https://mineral.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2017/mcs2017.pdf>.
- [4] World Bureau of Metal Statistics. World metal statistics yearbook 2017-research and markets[R]. Dublin: business wire, 2017.
- [5] 柳群义, 王安建, 张艳飞, 等.中国铜需求趋势与消费结构分析[J]. 中国矿业, 2014, 23 (9): 5~8.
- [6] http://www.clii.com.cn/zhhyim//201712/t20171222_3916712.html
- [7] http://www.clii.com.cn/zhhyim//201612/t20161220_3902073.html
- [8] 吴伟明, 高岩.铜与铝软钎焊技术的研究现状[J].电子工艺技术, 2008, 29 (2): 105~111.
- [9] 汪霞玲.全铝平行流换热器应用于家电空调器的设计与实验研究[D].浙江: 浙江大学能源工程学系, 2011: 1~26.
- [10] 李嵩.制冷空调行业部分上市公司 2016 年半年报集锦[J].制冷与空调, 2016, 16(9):112~114.
- [11] 谷海华, 任爱梅, 詹予忠.电冰箱换热器以铝代铜腐蚀特性的实验研究[J].郑州大学学报, 2012, 33 (3): 84~86.
- [12] 张希川, 张海滨, 左丽娜, 等.铜铝管技术在制冷空调行业中的应用研究[J].制冷与空调, 2008, 8: 92~105.
- [13] 李春风, 柳振江, 王建平, 等.我国铝矿资源现状分析及可持续发展建议[J].中国矿业, 2014, 23(8):5~10.
- [14] 林春华, 葛祥荣, 等.简明表面处理工手册[M].北京: 机械工业出版社, 1995, 12~13.
- [15] 张卫星, 张学伟.浅谈空调行业中铜铝换热器的腐蚀问题[J].制冷空调与电力机械, 2010: 87~92.
- [16] 王岸林.家用空调铝代铜的应用与研究[J].论文园地, 2008, 7: 59~61.
- [17] 赵越, 左铁军, 王昕, 等.“铜铝铜空调连接管”的开发与应用[J].制冷与空调, 2008, 8: 106~111.
- [18] HAYAKAWA M. Assembly of copper and aluminum pipes used in refrigeration cycle of air-conditioner, has stainless steel pipe inserted into ends of copper and aluminum pipes at its two ends which are brazed in vacuum or reduced environment: Japanese , JP2005262248-A,2005-09-29.
- [19] http://www.citygf.com/szb/html/2010-05/28/content_185378108.htm.
- [20] Mohamed R.H. , Abdel-Salam, Melanie Fauchoux, Gaoming Ge, et al. Expected energy and economic benefits, and environmental impacts for liquid-to-air membrane energy exchangers(LAMEEs) in HVAC systems: A review[J]. Applied Energy, 2014 , 127:02~218.
- [21] C.C. Shen, J.H. Lu. Analysis of the performance of the evaporator of automotive air conditioning system[J].International Journal of Automotive Technology, 2014 , 15(1):19~38.
- [22] 林创辉.平行流换热器在空调机上的应用研究[J].制冷, 2011 , 30(4):1~5.
- [23] 徐拥军, 崔增平, 吕慧玲, 等.铜铝结构热交换器的电偶腐蚀及控制[J].腐蚀与防护, 2004, 25 (7): 309~340.