

蒸馏海水淡化用金属传热材料的应用现状 和前景分析

齐春华^{1,2}, 冯厚军^{1,2}, 邢玉雷^{1,2}, 冯建民^{1,2}, 徐克^{1,2}

(1. 国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

(2. 国家海水利用工程技术研究中心, 天津 300192)



齐春华

摘要: 蒸馏淡化是一项重要的海水淡化技术。蒸馏淡化是将海水蒸发后冷凝获得淡水, 传热材料在设备安装成本中所占比例达15%~22.5%。要求传热材料耐蚀, 传热效率高, 强度高和价格适中, 优化选材能有效降低工程造价和淡化成本, 选材需综合考虑成本、使用寿命和导热效率。铜合金和钛合金是目前工程应用的主流材料, 多级闪蒸传热材料多采用铜合金管, 低温多效蒸馏则采用钛合金管与铝黄铜管组合。开发新型传热材料降低工程造价和海水淡化成本是海水淡化技术的发展趋势。新开发的铝合金和超级不锈钢与传统材料相比, 在保证效率的同时, 价格更低, 有望进一步降低工程造价和淡化成本。综述了国内外应用于蒸馏海水淡化的金属传热材料, 包括钛合金、铜合金、铝合金和不锈钢, 从材料的耐蚀性、传热效率、成本和使用过程中注意事项等方面进行了分析和讨论, 并简单介绍了新型有机高分子传热材料。

关键词: 海水淡化; 金属材料; 传热; 腐蚀

中图分类号: TQ085^{+.4}; TK172 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2013)05-0307-07

Application Status and Prospect Analysis of Metal Heat Transfer Materials in Distillation Desalination

QI Chunhua^{1,2}, FENG Houjun^{1,2}, XING Yulei^{1,2}, FENG Jianmin^{1,2}, XU Ke^{1,2}

(1. Institute of Seawater Desalination & Multipurpose Utilization, SOA, Tianjin 300192, China)

(2. National Engineering Technology and Research Center for Seawater Utilization, Tianjin 300192, China)

Abstract: Distillation desalination is one of the most popular processes of desalination, which is to vaporize sea water and condense to obtain potable water. The heat transfer materials cost accounts for 15% ~ 22.5% in the total infrastructure of the project. The heat transfer materials used to vaporize sea water is not only in a demand of high corrosion resistance of seawater and heat conductivity but also a reasonable price. The selection of heat transfer materials should compromise between cost, lifetime and heat transfer properties. The suitable selection could reduce the price of the desalination project and the cost of desalination. Copper alloy and titanium alloy are presently popular heat transfer materials. Normally, copper alloy tube is used for multi-stage flash distillation, the combination of titanium alloy tube and copper alloy tube for multiple-effect distillation. To develop new heat transfer materials to reduce the cost is one main pursuit of desalination industry. The new aluminum alloy and super steel comparing with traditional materials, the cost is lower with the same product capacity. There is evidence that aluminum alloy and super steel will be the popular materials for heat exchangers in future. In this paper, the heat transfer metal materials applied for the distillation desalination, including titanium alloy, copper alloy, aluminum alloy and steel, are summarized. The discussions about corrosion resistance, heat transfer efficiency, cost and application precautions of the materials used for distillation desalination have been conducted. The new develop polymer heat transfer materials are also introduced briefly.

Key words: seawater desalination; metal material; heat transfer; corrosion

1 前言

海水淡化与跨流域调水, 中水回用等措施相比, 具

有见效快, 水质好, 水量稳定等特点, 是解决沿海地区水资源缺乏的重要方式。商业化的海水淡化方法主要有反渗透(SWRO)、低温多效蒸馏(MED)和多级闪蒸(MSF)等^[1]。蒸馏是淡化海水的主要技术, 装置的规模日益扩大, 其主要发展趋势之一是采用高性价比材料, 进一步降低工程造价。

在蒸馏海水淡化设备投资成本中, 蒸发器占据比例较高, 约为整个淡化装置费用的60%~70%, 其中换

收稿日期: 2012-09-17

基金项目: 国家海洋局海洋公益科研专项项目(No. 201205030);

国家海洋局海洋公益科研专项项目(No. 201205016)

第一作者及通信作者: 齐春华, 女, 1977年生, 高级工程师

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2013.05.08

热器的传热材料就占蒸发器投资预算的 25% ~ 35 %。传热材料的合理选材,对降低海水淡化工程造价有十分重要的影响。目前工程化应用的传热材料主要为金属材料,包括铜合金、钛合金、铝合金以及不锈钢等。新近发展了高分子材料,但未见有关工程实际应用的报道^[2]。

传热材料的选择涉及多种因素,不仅要考虑工程成本,也要考虑因材料性能不同而导致的工程运行成本、效率和稳定性等。换热器处于海水淡化整个过程中最容易引起腐蚀的工况,接触完全不同的两相流,内部为冷凝的蒸汽,外部为海水。换热器传热材料的腐蚀是海水淡化工程实践中材料失效的主要原因。换热器传热材料的传热效率和结垢倾向等问题也是海水工程实践要考虑的重要因素^[3-5]。

本文从蒸馏海水淡化用金属传热材料的特性及要求出发,分类对比分析了国内外工程应用的海水淡化金属传热铜合金、钛合金、铝合金和不锈钢,从材料的成份、传热效率和抗腐蚀性能等方面,探讨了不同材料各自的优势和存在的问题,在总结现有材料的基础上简单介绍了国内外传热材料的发展状况。

2 蒸馏海水淡化用金属传热材料的特性及要求

蒸馏海水淡化的传热材料长期处于高温、浓缩海水环境中,受到海水冲刷及盐雾腐蚀。为实现淡化工程稳定高效的运行,对传热材料综合性能提出了较高要求。

良好的耐腐蚀性能 传热材料以均匀腐蚀为主,对切口和应力不敏感,不发生腐蚀疲劳和腐蚀破裂等局部类型的腐蚀;具有良好的自钝化能力,金属表面可快速生成稳定的保护膜。

良好的导热性能 蒸馏海水淡化靠热传递实现造水,传热材料应具有良好的导热性能,导热性能越好,在相同的温度梯度下传热速率越大;导热性较差的金属,除了传热速率降低之外,还会因受热产生较大的内应力,使传热管容易发生裂纹和变形,影响其正常使用。

良好的力学拉伸性能 保障蒸馏海水淡化装置的传热材料在内外压差、液膜和冷凝液负重情况下可正常工作,不易发生断裂。通过拉伸试验可以测出金属的屈服强度、抗拉强度、伸长率与断面收缩率等性能指标。在蒸馏海水淡化装置中,要求传热管抗拉强度不小于 300 MPa,裂伸长率不低于 40%,探伤不应存在砂眼、裂纹等明显缺陷,同轴度误差不高于 5%。

综合成本低 原材料易于获取,易加工,因为海水淡化工程主要用传热管,所以要求传热材料易于加工成管状。

3 用于蒸馏淡化传热的金属材料

在蒸馏海水淡化工程中,使用的传热材料有铜合金、钛合金、铝合金和不锈钢等。传热材料的优化选择对海水淡化工程十分重要。传热材料的选择不仅影响工程的安装成本也影响工程的运行成本。铜合金在 MSF 工程中应用最广泛。表 1 是 MSF 工程选材总结^[6],不同工况选用不同材料,在 MSF 的冷凝器热回收低温部分一般使用 90/10 Cu/Ni;而在高温部分、盐水加热器和热排出段则采用 70/30 Cu/Ni 和 66/30/2/2 Cu/Ni/Fe/Mn,原因之一是高镍含量使合金的高温耐蚀性好。虽然镍含量高合金成本比 90/10 Cu/Ni 高 30% ~ 40 %,但是使用寿命长,降低了失效的概率,提高了工程的运行效率。

表 1 MSF 传热管材料的选择

Table 1 Material selection for MSF heat transfer tubes

	Frequent	Occasional	Rare
Brine Heater	70/30 Cu/Ni 66/30/2/2 Cu/Ni/Fe/Mn	90/10 Cu/Ni	Titanium (ASTM B338-2) with titanium tube plate)
Heat Transfer Tube Heat Recovery section			
High Temperature Stage 112 °C ~ 70 °C	70/30 Cu/Ni 66/30/2/2 Cu/Ni/Fe/Mn	90/10 Cu/Ni	Al-brass
Low Temperature Stage Below 70 °C	90/10 Cu/Ni Al-brass	90/10 Cu/Ni Titanium (ASTM B338-2)	70/30 Cu/Ni
Heat Transfer Tube Heat Reject section	70/30 Cu/Ni Titanium	90/10 Cu/Ni	Al-brass

在 MED 的降膜蒸发器中,也要根据材料本身,结合实际工况,选用材料,表 2 所示的是一些国外 MED 海水淡化工厂传热管的选材^[7]。钛合金和铝黄铜管组合是 MED 主流选择。在蒸发器中,第一排传热管直接受海水冲刷,一般选用耐冲蚀性能优异的钛合金,其余则采用传热率高、价格相对便宜的铝黄铜。

表 2 一些 MED 工厂传热管的选材

Table 2 Materials selection for some MED plants heat transfer tubes

Plant	Evaporator		Condenser tubes
	First row tube	Other rows tube	
Mirfa	Ti	Al-Brass	Al-Brass
Jebel Dhanna	Ti	Al-Brass	Al-Brass
Sila	Ti	Al-Brass	Al-Brass
Trapani	Ti	Al-Brass	Al-Brass
Ashdod	Ti	Al-alloy	Al-alloy
Curacao	Ti	Al-Brass	Al-Brass
St. Marteen	Ti	Al-Brass	Al-Brass
Nagoya	Al-Brass	Ti	Ti
Las Palmas	Ti	Al-#5052	Al-#5052

在我国自主技术设计、建设的大唐黄岛发电厂, 3 000 t/d 以及 6 台出口印尼的 2.1 万 t/d 蒸馏海水淡化装备中, 在充分考虑技术条件、产品设计寿命和经济性等因素的基础上, 在距离海水喷淋管最近的前 3 排换热管全部采用钛管, 以避免喷淋管道所喷淋出的海水所造成的冲刷腐蚀, 其它则采用铝黄铜管。

铝合金和不锈钢是基于降低工程造价而开发的新材料, 实际工程应用少。铝合金传热效率高, 屈服强度高, 成本低, 但高温耐蚀性差, 一般用于 MED。不锈钢耐蚀性能好, 但易产生点蚀和缝隙腐蚀, 且导热系数低, 目前较少用于海水淡化传热管材料。

3.1 铜合金

铜合金是海水处理设备应用中最重要传统材料之一, 它具有优良的耐蚀性、较好的传热性能、易加工成型和较经济的优势, 一直是海水淡化工程的首选材料。

海水淡化用铜合金主要有铝黄铜、锡黄铜和铜镍合金, 如表 3 所示。我国已具备海水淡化用传热管的研发、生产和制造能力, 并已形成了相应的国家标准, 其主要化学成分与美国生产的基本相同。用于传热管的合金材料的牌号分别为 HA177-2 (铝黄铜), HSn70-1 (锡黄铜) 和 BFe10-1-1, BFe30-1-1, BFe30-2-2 (铜镍合金), 分别对应美国牌号 C68700, C44300, C70600, C71500 和 C71640。

表 3 海水淡化常用铜合金基本成份和牌号

Table 3 Nominal compositions and number of copper alloy used in desalination plants

Alloy	Nominal compositions								Number	
	Cu	Zn	Al	Sn	Ni	Fe	Mn	As	UNS	GB
Al-brass	76	22	2					0.04	C68700	HA177-2
Sn-brass	70	Rem		1.2				0.04	C44300	HSn70-1
90/10 Cu/Ni	Rem				10	1.5	1.0		C70600	BFe10-1-1
70/30 Cu/Ni	Rem				30	0.6	1.0		C71500	BFe30-1-1
66/30/2/2 Cu/Ni	Rem				30	2.0	2.0		C71640	BFe30-2-2

铝黄铜和锡黄铜是在铜锌合金中加入铝和锡元素而形成的特殊黄铜, 使用过程中表面形成一层氧化亚铜膜, 提高了耐蚀性, 常用于海水淡化冷凝较温和的工况。铝黄铜和锡黄铜表面的氧化亚铜保护膜易在海水的冲刷过程中, 受剪切力的作用而脱落。另外铝黄铜和锡黄铜耐污性差, 在污染的海水中腐蚀速率加快。铜镍合金与铝黄铜相比, 有更好的耐蚀性。90/10 Cu/Ni 耐冲刷, 点蚀性能更好。90/10 Cu/Ni 适用于工况温度较高的传热管的热回收段。70/30 Cu/Ni 适用于传热管中加热和散热部分。传热管的海水加热和散热部分的海水中含有高浓度的悬浮物、硫化物和氯化物, 工程实践中此部分是最易被腐蚀而失效的。6/30/2/2 Cu/Ni/Fe/Mn 是 70/30 Cu/Ni 的改进型。铁和锰的加入, 不仅提高了保护膜的稳定性也增加了薄膜的自修复能力。合金保护膜稳定性的提高, 相应的耐冲刷性能也得到提高。铜合金表面的保护膜, 在高速水流环境中, 会在剪切应力的作用下脱落。水流速越高, 剪切力越大。铝黄铜和锡黄铜的保护薄膜的结合力比铜镍合金小, 不适于在高速水流下工作。90/10 Cu/Ni, 70/30 Cu/Ni 和 66/30/2/2 Cu/Ni/Fe/Mn 的保护薄膜与基体的结合力依次增加, 耐水冲刷能力依次增强。

铜管表面的保护膜是耐海水腐蚀的屏障, 保护膜的初次形成十分重要。铜合金在自然状态下或者处于干净的海水中可形成以氧化铜为主的耐海水腐蚀的保

护薄膜, 铁、镍和锰等元素的加入主要是起增强薄膜的作用。保护膜的初步形成在数天之内就能完成, 但是发展成熟则需要 3 个月以上。第一次形成的保护膜十分重要, 它会影响铜管的后续使用寿命。要形成稳定的保护膜, 前提是铜合金管表面质量高、光滑无缺陷。如果铜管表面存在缺陷, 缺陷位置的保护膜易被破坏而引起腐蚀。另外铜管表面要保持干净, 避免有杂质, 如碳, 会引起电化学腐蚀, 严重影响铜管的使用寿命。

海水淡化用铜合金管的生产流程一般包括配料、熔炼、铸造成坯、铸坯加热、挤压轧制、涡流探伤、切割打磨、退火、探伤和材料性能测试等。铜管生产过程中冷热应力大, 加工件变形大, 易产生内部裂纹。裂纹会导致铜管的强度、耐蚀性能迅速下降。生产过程中须严格控制, 避免成品中有内部裂纹, 一般采用涡流探伤的方式进行检测。

铜合金在海水淡化领域需求巨大。根据 GWI (Global Water Intelligence) 预测, 未来 20 年世界海水淡化市场将继续以 10% ~ 30% 的速度增长, 其中仅 2012 年就将新增淡化水产能约 640 万 t/d, 若以年平均增长 20% 测算, 到 2015 年新增海水淡化产能将达到 900 万 t/d。考虑到蒸馏淡化海水市场份额以及铜管使用比例, 现有设备维修需求量等, 每年对铜合金传热管的新增需求量将达到 20 万 t。

3.2 钛及钛合金

钛合金材料,同时具备较强的导热性能和耐腐蚀性能,在石化、电力等行业都有广泛应用。近年来,钛合金材料在海洋工程及海水淡化方面的应用也逐渐得到重视。有研究显示,即使海水流速达到 36 m/s,钛及钛合金腐蚀速率也仅为 0.074 mm/a。这种优良的抗海水冲刷腐蚀性能,使许多滨海电站与核电站纷纷在凝汽器、海水换热器等设备中大规模使用钛合金材料。

在蒸馏海水淡化中,由于钛及钛合金优异的耐腐蚀性能,在工程设计上可以达到免维护的水平。在 MSF 装置中,冷凝器将海水作冷却水,冷却各级闪蒸室产生的水蒸汽,但由于海水腐蚀性很强,且常混有泥沙、微生物等,所以容易造成传热管腐蚀和微生物附着。现在几乎所有 MSF 海水淡化装置的冷凝器上都使用钛管。特别是为了杀死海水中的细菌,不得不注入氧化型杀菌剂时,更需使用耐腐蚀性好的钛管。此外,当热回收冷凝器介质中含有氨或硫化氢等污染物时,将增大铜合金管腐蚀速率,也需采用钛管取代铜合金管。同样在 MED 海水淡化设备中,热交换器管内走蒸汽,管外喷淋海水,考虑技术条件、产品设计寿命和经济性等因素,在距离海水喷淋管最近,海水流速快,冲蚀现象明显的前几排换热管全部采用钛管。国外典型海水淡化厂传热材料使用情况见表 2。

钛的抗腐蚀性好,但传热效率较铜合金偏低,价格比铜合金贵。钛导热率为 17 W/m·K,铝黄铜为 100 W/m·K,90/10 Cu/Ni 为 47 W/m·K,70/30 Cu/Ni 为 29 W/m·K。钛耐腐蚀性好,强度高,管壁可以做得更薄。如果铜合金管壁厚度为 0.9~1 mm,钛管厚度就可以为 0.4~0.5 mm。由于钛的密度低 (4.50 g/cm³),约为铜合金 (8.40~8.90 g/cm³) 的一半。相同传热面积,钛管厚度为铜合金的 ~1/2,质量仅为铜合金的 ~1/4,安装同等长度的钛管质量只是铜合金管的 50%。当钛管壁厚为铜合金管的 50% 时,相同传热面积的钛管质量仅为铜合金管的 1/4。目前工程上主要采用的钛合金

是 GB 的 TA2 即 UNS 的 R50400/GR.2。以 2012 年 4 月份价格水平计算,钛合金的价格 (~2.8 万 US \$/t) 是铜合金 (~0.80 万 US \$/t) 的 3~4 倍,采用薄壁钛管的经济性与铜合金相当。

在使用过程中要注意钛合金管的电化学腐蚀、缝隙腐蚀和吸氢。钛在海水中的自腐蚀电极低于许多金属,与这些金属混合使用时,会因形成电偶对而促进其它金属的腐蚀。钛在高温盐水中存在缝隙腐蚀。采用胀管法安装在管板上的钛管,在 100 ℃,pH 值为 8 的海水中容易发生缝隙腐蚀。由于在蒸发器中同时使用了铜合金传热材料,所以可降低钛管的缝隙腐蚀倾向,即使淡化装置中海水温度达到 120 ℃ 也不会出现明显的缝隙腐蚀现象。为了提高设备的可靠性,实际 MSF 海水淡化工程中一般采用管端焊接法来防止钛管在高温段 (>100 ℃) 的缝隙腐蚀。

在 80 ℃ 或 100 ℃ 以上的海水中,由于钛具有较强的活性,容易吸收原子态或分子态氢,从而导致材料氢脆。在中性盐水溶液中,钛与铜合金及不锈钢接触时不会发生吸氢,但与电位较负的铁、锌等金属接触时,由于耦合电极的电位较负 (低于 -0.7 V),钛合金容易产生吸氢现象,采用 Fe-Ni 合金作牺牲阳极板时,就可避免钛吸氢。

另外在使用薄壁钛合金管时,由于薄壁钛合金抗弯刚性及固有的振动数低,为避免由于管振动而引起的管破损问题,可采用比铜合金管的管板间隙小的方法来解决。

3.3 铝合金

铝合金导热率为 140~160 W/m·K,密度 2.66 g/cm³,与铜合金传热材料相比不但导热性能高,而且密度低。以 2012 年 4 月份的价格水平计算,铝的价格 (0.21 万 US \$/t) 仅是铜的 ~1/4。铝合金替代铜传热管,可显著降低蒸馏海水淡化装备投资成本。5000 系列铝合金 (表 4),具有较强的耐海水腐蚀特性,被广泛应用在海洋工程中。

表 4 5000 系列铝合金牌号和化学组成

Table 4 Nominal number and compositions of 5000 series aluminum alloy

UNS Number	Compositions							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10	
5083	0.40	0.40	0.10	0.40~1.0	4.0~4.9	0.05~0.25	0.25	0.15
5086	0.40	0.50	0.10	0.20~0.7	3.5~4.5	0.05~0.25	0.25	0.15
5154	0.25	0.40	0.10	0.10	3.10~3.90	0.15~0.35	0.20	0.20
5356	0.25	0.40	0.10	0.10	4.50~5.50	0.05~0.20	0.10	0.06~0.20
5454	0.25	0.40	0.10	0.50~1.0	2.4~3.0	0.05~0.20	0.25	0.20
5456	0.25	0.40	0.10	0.50~1.0	4.7~5.5	0.05~0.20	0.25	0.20
5754	0.40	0.40	0.10	0.50	2.6~3.6	0.30	0.20	0.15

世界上只有 IDE 公司在 MED 海水淡化工程中使用铝合金传热管,如 IDE 公司承建的天津北疆电厂投资建设的 20 万 t/d MED 装置,就是采用 5052 铝合金传热材料。装置由 13 效蒸发单元组成,各蒸发单元内除上层采用钛材外,其余均采用铝合金管,据分析可使工程总投资节省 25% 以上。由于铝合金在高温海水中的防腐性能还比较差,尚未见应用于 MSF 装置中的报道。

除了开发耐蚀铝合金材料外,为保证铝合金材料在低温多效海水淡化装置中运行的可靠性,IDE 公司配套开发了离子陷阱技术,即在原海水进入蒸发器前通过装有铝合金填料的离子阱装置,以便除去海水中易诱导铝材料点蚀的重金属离子,如铜、铁离子等,避免下游工艺中对铝管的腐蚀。

3.4 不锈钢

不锈钢作为海水淡化工程的常用材料,通常用作 MED 装置的管板、除雾器、淡水箱和管路等,很少用作蒸馏淡化装置的传热管,这主要是因为不锈钢材料导热系数低以及不锈钢薄壁管的耐蚀能力有待验证。随着材料技术的发展和海水淡化技术的不断进步,新开发的超级不锈钢已经开始用于蒸馏海水淡化装置的传热管材(表 5)。超级不锈钢与传统不锈钢相比,耐蚀能力强,具有与钛合金相当的强耐点蚀和缝隙腐蚀能力。超级不锈钢有强的耐冲刷能力,甚至优于钛合金。超级不锈钢的强度高,耐蚀性能好,在保证工程设计寿命的基础上,与传统传热材料铜合金相比,管壁可以做薄,厚度只有铜合金 $\sim 1/2$ 。薄壁管的使用不仅可以节约材料,也可以提高传热效率。

表 5 可用于海水淡化不锈钢基本成份和牌号

Table 5 Number and compositions of steel used in desalination plants

UNS Number	Nominal compositions										
	Cr	Mo	Ni	Mn	P	S	Si	Co	C	N	Ti & Nb
S44735	29	4	0.3	0.5	0.03	0.01	0.4	0.03	0.02	0.02	0.5
S34565	24	4.5	17	6.0					0.01	0.45	
S32645	24	7.3	22	3.0	0.02	0.001	0.4		0.1	0.5	

4 国内外蒸馏海水淡化传热材料的应用现状及发展趋势

传热管在蒸馏淡化装置中的作用非常重要,是提高性能,降低造价和造水成本的关键。开发高效、耐蚀和廉价的海水淡化用传热管材料,是促进蒸馏海水淡化技

术发展的重要方向。目前工程用传热材料主要是铜合金和钛合金,根据工况的不同进行不同的组合选择。传热材料的选择是一种多重选择,需综合考虑成本、使用寿命和传热效率。在保证铝合金和不锈钢使用寿命和传热效率的前提下,以降低成本为目的开发了新型传热材料,如表 6 所示^[8-15]。

表 6 海水淡化用传热材料

Table 6 Desalination heat exchanger materials

Materials	5154	S44735	C68700	C70600	C71500	C71640	R50400
	Al Mg ³	AL-29-4CR	Al-brass	90/10 Cu/Ni	70/30 Cu/Ni	66/30/2/2 Cu/Ni/Fe/Mn	Ti Gr. 2
Density (g/cm ³)	2.66	7.90	8.40	8.90	8.95	8.86	4.50
Thermal Conductivity (W/(m·K))	150	17	100	50	29	25	22
Yield strength (MPa)	120	415	110	105	125	170	730
Tube Thickness (mm)		0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3
Cost Index	1	9.2	4.2	5.6	5.8	7.0	16.7
Abrasion		++	---	--	-	-	+
Pit Corrosion		+	---	--	-	--	++
Crevice Corrosion		+	--	---	--	--	++

未来蒸馏海水淡化传热材料的应用应该注重 2 个方面的发展,一是开展强化传热研究,减少金属传热材料的用量,二是促进廉价金属传热材料的推广,拓宽材料种类选择范围。

贵重金属材料的强化传热 为了降低装置的投资费用,研究开发强化传热技术,开发诸如薄壁传热管、异型管、翅片管和表面处理管等产品,以提高传热效率,减少传热管用量和降低装置造价。薄壁传热管不仅能提

高传热效率,也可有效减少材料用量。

随着针对铜合金材料在热法海水淡化装备中腐蚀规律研究的不断深入以及薄壁铜合金管加工制造技术的发展,采用管壁更薄、力学性能更好的铜管来提高换热性能,减少材料用量已被普遍采用。最近 10 年间,国际上 MED 铜传热管壁厚已由 1 mm 降至 0.7 mm。我国出口印度尼西亚的 6 套总计 2.1 万 t/d 低温多效海水淡化装置就采用了厚度为 0.7 mm 的 C68700 铝黄铜管。

钛管与铜管相比,价格高,导热率低。钛的强度和耐蚀都高于铜合金。在保证使用寿命的基础上,钛管管壁厚度可以比铜管做得更薄。铜合金传热管壁厚一般为 0.70 mm,而钛管仅为 0.30 mm,加之钛材密度仅为铜合金材料的一半左右,同样传热面积的钛管重量仅为铜合金管的 1/4。目前钛管价格为铝黄铜管 ~4 倍,在 MED 中全部使用钛管,在造价成本上与传统钛管和铝黄铜组合相当。

用新近发展的超级不锈钢做传热材料,综合性能与钛相当,而价格只有钛合金的 55 %。不锈钢做为传热材料,将明显降低工程造价。推广不锈钢传热管在蒸馏海水淡化工程中的应用,是蒸馏海水淡化未来几年的一个发展趋势。如奥地利维奥技术瓦巴格公司承建的 MED 海水淡化装置采用了德国 fischer 公司生产的 S34565 薄壁不锈钢传热管。超级不锈钢作为传热材料,性能与钛相当,价格只有钛合金的 ~1/2。国际上其它大型不锈钢钢铁公司也开发出了类似的超级不锈钢,如芬兰 Outokumpu 开发的超级奥氏体不锈钢(S32654)和法国 Valmet 公司开发的超级铁素体不锈钢(S44735)。

廉价金属传热材料开发应用 廉价传热材料是当前热法海水淡化的研究热点之一,较为成熟的是铝合金传热管。IDE 公司掌握有成熟的耐蚀铝合金传热管制造技术,表面改性技术和系统运行防护技术,可实现铝合金材料在装置中的稳定工作。IDE 公司开发的铝合金管在低温多效蒸馏海水淡化装置中已有 20 年的应用历史,在降低装置成本和提高竞争力方面效果显著,如我国北疆电厂海水淡化一期 4 台 25 000 t/d 低温多效海水淡化装置由 IDE 公司承建,二期 4 台 25 000 t/d 装置也由其中标。

新型非金属传热材料的开发 在蒸馏海水淡化的发展中,寻找价格低廉,满足生产需求的各种传热材料,一直是海水淡化研究的一个重点。已开展研究的用于传热的非金属材料主要包括石墨、玻璃、陶瓷和塑料。其中塑料与其它非金属材料相比,具有良好的耐蚀性、自润滑性、耐老化性和易加工性等特点,有突出的应用优势。塑料换热器操作温度在 40 ~ 120 °C,与目前蒸馏海

水淡化温度重合。塑料换热器耐腐蚀、耐冲蚀,可在较高操作水流下工作。另外塑料本身表面张力低且不易黏附,另外质地柔软、热膨胀系数较大有一定的自清洁能力。塑料换热器耐污染性极强,使用过程中基本不用除垢,即使除垢,由于塑料具有良好的耐蚀性,也可采用价格低廉的酸洗^[2, 16]。

塑料用作换热材料,具有明显的经济性。在蒸馏法海水淡化中,换热器费用占前期建设投资的 20% ~ 40%,药剂费用占后期运行费用的 8% ~ 10%,维护费用占后期运行费用的 10% ~ 15%。塑料换热器成本仅为传统金属换热器的 33% ~ 66%,且不易结垢。塑料换热器的使用,将使这三部分费用都将大幅度降低。塑料换热器在海水淡化中的应用的发展前景广阔,若能在蒸馏法海水淡化中实现塑料换热器的应用,大规模替代现在的金属换热器,则淡化水成本将会大幅下降。

参考文献 References

- [1] Hui Shaotang(惠绍棠), Ruan Guoling(阮国岭), Yu Kailu(于开录). *Desalination and Recycling Economy*(海水淡化与循环经济)[M]. Tianjin: Tianjin People's Publishing Press, 2005.
- [2] Scheffler T B, Leao A J. Fabrication of Polymer Film Heat Transfer Elements for Energy Efficient Multi-Effect Distillation[J]. *Desalination*, 2008(222): 696 - 710.
- [3] Rautenbach R, Schaefer S. Development and Testing of Ultrathin Super Austenitic Tubes for Heat Exchangers in Desalination Plants[J]. *Desalination*, 2000(127): 13 - 17.
- [4] Prasanta K D, Hawlader M N A, Chou S K, et al. Performance of a Single-Effect Desalination System Operating with Different Tube Profiles and Materials[J]. *Desalination*, 2004(166): 69 - 78.
- [5] Sommariva C, Hogg H, Callister K. Maximum Economic Design Life for Desalination Plant; the Role of Auxiliary Equipment Materials Selection and Specification in Plant Reliability[J]. *Desalination*, 2002(153): 199 - 205.
- [6] Sommariva C, Hogg H, Callister K. Cost Reduction and Design Lifetime Increase in Thermal Desalination Plants; Thermodynamic and Corrosion Resistance Combined Analysis for Heat Exchange Tubes Material Selection[J]. *Desalination*, 2003(158): 17 - 21.
- [7] Shammiri M A, Safar M. Multi-Effect Distillation Plants; State of the Art[J]. *Desalination*, 1999(126): 45 - 59.
- [8] National Standardization Administration of the People's Republic of China(国家标准化管理委员会). GB/T 8890 - 2007, *Seamless Copper Alloy Tube for Heat Exchanger*[S]. Beijing: China Quality Press, 2007.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM B 111/B 111M-2004, *Standard Specification for Copper and Copper-Alloy*

- Seamless Condenser Tubes and Ferrule Stock*[S]. Washington D C: AMTS Press, 2004.
- [10] National Standardization Administration of the People's Republic of China (国家标准化管理委员会). GB/T 3625-2007. *Heat Exchanger and Condenser Titanium and Titanium Alloy Tubes* [S]. Beijing: China Quality Press, 2007.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM B 337-95. *Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Pipe*[S]. Washington D C: AMTS Press, 1995.
- [12] National standardization Administration of the People's Republic of China (国家标准化管理委员会). GB/T 6893-2000, *Aluminium and Aluminium Alloy Cold Drawn (Rolled) Seamless Tubes*[S]. Beijing: People's Publishing House, 2000.
- [13] American Society for Testing and Materials. ASTM B210-04, *Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Drawn Seamless Tubes*[S]. Washington D C: AMTS Press, 2004.
- [14] European Committee for Standardization. DIN EN 754-2: 2008, *Aluminum and Aluminum-Alloys-Cold Drawn Rod/Bar and Tube - Part 2: Mechanical Properties*[S]. Brussels: CEN Press, 2008.
- [15] Sommariva C, Hogg H, Callister K. Forty-Year Design Life: the Next Target Material Selection and Operating Conditions in Thermal Desalination Plants[J]. *Desalination*, 2001(136): 169-176.
- [16] Christmann Jochen B P, Krätz L J, Bart H J. Falling Film Evaporation with Polymeric Heat Transfer Surfaces[J]. *Desalination*, 2011 In press.

“有色金属材料在海洋工程领域中的研发和应用交流会”在苏召开

2013年5月11日,由中国工程院化工、冶金与材料工程学部主办,中铝苏州有色金属研究院、北京航空航天大学材料学院承办,苏州高新区、苏州市千人计划专家联合会协办的“有色金属材料在海洋工程领域中的研发和应用交流会”在苏州举行。苏州市常委、副市长、高新区党工委书记浦荣皋出席会议并致辞,中国工程院院士周廉,苏州高新区党工委书记、管委会主任周旭东,市科技服务中心主任赵玮芳,苏州市千人计划专家联合会理事长张佩琢以及全国高校院所的80多名材料专家出席了会议。

本次研讨会是中国工程院“中国海洋工程材料应用现状及发展对策”咨询项目系列会议之一,旨在促进海洋工程材料产学研结合,为新型海洋工程材料专家搭建一个交流平台,为加快和培育海洋工程材料产业、支撑战略性新兴产业的海洋经济发展提供技术保障。中国工程院院士周廉,中国有色金属加工协会主任王碧文,北京航空航天大学材料学院院长马朝利,国家“千人计划”专家、中铝苏州有色金属研究院副总经理张海,天津海水淡化与综合利用研究所总工阮国岭,苏州有色金属研究院有限公司铜合金中心副主任李华清等6位专家作了专题演讲,80多位业界专家学者和企业技术人员围绕产业政策、前沿技术、市场推广、特色应用等方面进行探讨和交流。(本刊通讯员)

“海洋工程领域用无机非金属材料的研究、生产与应用交流会”在南京召开

由中国工程院化工、冶金与材料工程学部主办,南京工业大学承办的“海洋工程领域用无机非金属材料的研究、生产与应用交流会”于2013年5月13日在南京召开。中国工程院院士周廉、唐明述,南京工业大学副校长乔旭、材料学院院长沈晓冬教授,同济大学王培铭教授,清华大学李克非教授,哈尔滨工业大学李家和教授及江苏建科院刘加平教授等来自国内相关高校院所40余名与会代表参加了本次会议。

周廉院士首先介绍了咨询项目具体内容,阐述了海洋工程材料的“产、学、研、用”机制。唐明述院士结合我国水泥混凝土领域现状对项目的开展和调研提出了具体建议。沈晓冬教授对项目前期初步调研工作进行了汇报。清华大学李克非教授、海洋涂料国家重点实验室桂泰江主任、上海建材集团马勇工程师、济南大学芦令超教授、中国科学院海洋所段继周主任等8位专家分别就我国海洋工程材料领域使用材料及相关研究进展情况进行了专题汇报。

随后,与会专家为海洋工程领域用无机材料应用调研工作建言献策,对我国海洋工程材料的研发与应用提供了中肯的建议。周廉院士对会议进行了总结,肯定了会议召开的及时性、内容的广泛性,对建设海洋工程材料数据库有很大的意义。最后周廉院士以保证混凝土建筑耐久性、基础工业开展的远观性、混凝土行业机制实践性3方面勉励与会的混凝土专家为混凝土行业多做贡献。(本刊通讯员)