应用研究

钛在海水淡化领域中的应用

纪腾飞*　赵 斌　金跃峰　刘 钊

（西部金属材料有限公司）

摘　要　对钛及钛合金的特点进行了分析，对其应用中存在的问题进行了讨论，并对其在海水淡化领域中的推广应用提出了建议。

关键词　钛　钛合金　海水淡化　换热管　耐蚀性　蒸馏

中图分类号　TQ 050.4　　DOI：10.16759/j.cnki.issn.1007－7251.2017.02.003

Application of Titanium in Seawater Desalination

Ji Tengfei　Zhao Bin　Jin Yuefeng　Liu Zhao

Abstract：The characteristics of titanium and titanium alloys are summarized. The problems in the application are discussed, and some suggestions for popularizing titanium and titanium alloys in seawater desalination are put forward.

Key words：Titanium; Titanium alloy; Seawater desalination; Heat exchange tube; Corrosion resistance; Distillation

0　引言

淡水资源是人类赖以生存的物质基础。由于淡水资源仅占地球总水量的 2.53%，而且空间分布极不均匀，如今淡水资源短缺已经成为全球性问题。使用海水淡化技术开辟新的淡水资源，增加淡水供应总量，已经成为世界各国解决淡水匮乏的一种重要途径。由于海水的腐蚀性很强，海水淡化设备的设计和制造必须使用能够承受海水腐蚀的材料。钛及钛合金由于耐海水腐蚀性能良好，在世界范围内取得了广泛的应用。随着社会经济的发展及淡化海水需求量的日益增大，其应用的深度和广度都将日趋扩大[1]。

1　钛及钛合金的特点

钛及钛合金由于其耐蚀性强、密度低、比强度高，同时具有较高的抗冲击性能、良好的加工成型性能，因此被誉为“海洋金属”，在海水淡化工程中具有良好的适用性。其特点如下：

（1）比强度高

钛及钛合金密度较小，约为碳钢密度的 40%，但是具有较高的强度，因此使用钛及钛合金制作的设备能够在相同的承压条件下，大幅度地减轻设备重量。

（2）对海水耐蚀性好

由于钛及钛合金能够自发地在与大气接触的地方形成致密的氧化膜，并且氧化膜具有自愈合性，在其出现破损时能够及时地进行自身修复，因此钛在氯化物水溶液中具有优异的耐腐蚀性能，在进行结构设计时可减少腐蚀裕量；同时由于不需要防腐涂料，可简化工艺及降低成本。

（3）较高的抗冲击性能

由表 1 可见，钛及钛合金具有较高的抗冲击性能。若使用钛及钛合金制作承压管道，则可有效地

* 纪腾飞，男，1986 年生，助理工程师。西安市，710201。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

提高其抗水周期性冲击的能力。

表 1 几种金属材料的抗冲击性能 [5]

合金牌号（名称）	抗冲击性能/(10^3 mm/s)
Gr.9	24.130
Gr.2	16.002
Inconel 625	13.970
316SS	5.334

（4）良好的成型及加工性能

钛及钛合金具有良好的塑性和韧性，可以使用传统加工技术生产板材、管材、锻件及铸件；焊接性好，使用普通的钨极气体保护焊即可，焊缝的强度和塑性均接近母材。

（5）可回收及再利用

退役的钛制设备可以根据具体腐蚀情况及设备材料现状进行全面评估，并依据相应的设计规范降级使用；钛及钛合金设备在经过长时间使用后，还可对其材料进行回收再利用或者降级使用，这样就可减少设备在整个服役期的综合成本。因此从可持续性及环保的角度出发，选用服役期间不易受海水腐蚀的钛合金是一个趋势。

2 海水淡化技术中钛及钛合金的应用

按照分离方法的不同，可以将海水淡化技术分为热法和膜法两大类。膜法主要包括反渗透和电渗析；热法包括低温多效蒸馏、多级闪蒸等。目前应用最为广泛的是低温多效蒸馏、多级闪蒸及反渗透技术。截至 2006 年年底，反渗透海水淡化产量占全球海水淡化总产量的 51%，多级闪蒸所占比例为 32%，而低温多效蒸馏所占比例为 8% [2]。

2.1 多级闪蒸及低温多效蒸馏

多级闪蒸(MSF)是将加热到一定温度的海水引入闪蒸室进行急剧蒸发的海水淡化技术，产生的蒸汽冷凝后即为淡水。图 1 为多级闪蒸原理示意图。

低温多效蒸馏(MED)是利用传热管的潜热来蒸发经过预热的海水，管内的蒸汽被冷凝成淡水，管外蒸发得到的二次蒸汽进入下一效传热管被冷凝，浓缩海水则被排出。

无论是多级闪蒸或是低温多效蒸馏，传热管对材料的耐蚀性要求较高，必须采用价格昂贵的铜合金、特种不锈钢及钛合金管材。随着蒸馏法装置性能的不断升级与优化，具有优异耐腐蚀性能的钛管

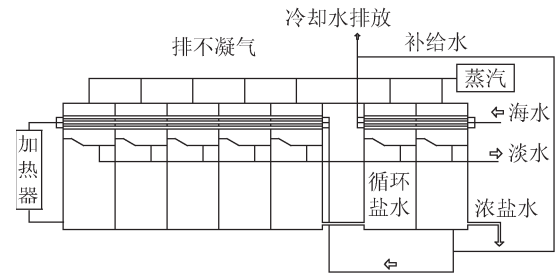

图 1 多级闪蒸原理

获得了越来越多的应用。

世界各国钛传热管在蒸馏法海水淡化中的应用例子如表 2 所示。

表 2 钛传热管在蒸馏法海水淡化中的应用

国家	地点	日产淡水/($m^3 \cdot d^{-1}$)	钛管规格/(mm×mm×mm)	总质量/t
美国	维尔京群岛	/	0.7（壁厚）	24
美国	南太平洋海岸	/	/	400
中国	天津大港电厂	3000	Ø16×0.6×1840	1.77
中国	山东黄岛电厂	3000	Ø19×0.5×4220	1.25
日本	长崎	2650	Ø19×0.5×*L*	0.50
日本	大阪	2000	Ø22×0.5×*L*	1.35
日本	大分，鹤崎	9500	Ø19×0.4×*L*	13.5
沙特阿拉伯	拉斯扎乌尔	/	/	6200
沙特阿拉伯	吉达	11 000	Ø19×0.7×*L*	1300
沙特阿拉伯	盐步	21 000	Ø22×0.7×*L*	61.3
沙特阿拉伯	朱拜勒	23 000	Ø32×0.63×*L*	1450
沙特阿拉伯	朱拜勒	23 600	Ø22×0.7×*L*	1400
利比亚	/	4500	Ø19×0.5×*L*	850
德国	皮斯特里茨	3600	Ø25.4×0.5×*L*	500

2.1.1 钛传热管的应用特点

（1）管壁厚度

传热管一般为小管径，壁厚较薄。铜合金材料管一般采用 0.75 mm 以上的壁厚。由于钛及钛合金管材的强度较高，因此广泛使用 0.4~0.7 mm 的薄壁钛焊管。

（2）传热系数

钛及钛合金的传热系数较低，仅为 0.16 W/($m^2 \cdot K$)，为铝黄铜的 1/6、铜镍合金的 1/1.7 [2]。但由于钛优异的耐腐蚀性能，所以其壁厚可以大大减薄，相对来说，亦即提升了传热效率。

（3）经济性

目前我国已经形成了成熟的钛材制造、加工技

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

术，大部分钛材无需依赖进口。单从质量上进行核算，钛管价格是铜管的数倍。若考虑实际应用，钛管的厚度比铜管要薄，并且钛管的密度仅为铜管的1/2，因此采用薄壁钛管的整体价格与铜合金基本相当。也就是说，钛管在综合性能方面具有较强的竞争力。

2.1.2　存在的问题

钛管虽然在蒸馏法中有着优异的特性，但在实际设备制造及应用中仍然存在以下方面的问题。

（1）电位腐蚀

钛材具有较低的电位，在与其他金属配合使用时，尤其是与其他金属直接接触的部位，容易促使其他金属的电位腐蚀，导致其他金属部件出现失效。应极力避免这种情况。

（2）震动

若使用薄壁钛管，由于其刚性较厚壁管有所降低，因此必须通过增加支撑结构来增强其刚性，同时还应该防止由于震动而引起的破损、泄漏及变形等问题。

（3）钛焊管制备技术

近几年，我国建成了若干条钛带生产线，目前已能够生产纯钛及部分钛合金钛带，为钛及钛合金焊管的大规模生产打下了坚实的基础。但与发达国家相比，我国的海水淡化装置的生产规模比较小，整体水平还有待提高。与发达国家相比，我国钛管技术的差距主要表现在起步晚、工艺不够成熟、钛管成材率低、稳定性差等方面，对钛管生产技术和设备的掌控还需进一步完善[3]。

2.2　反渗透

反渗透（RO）法利用的是反渗透膜的选择透过性，在一定的压力下使溶剂（水）通过半透膜进入膜的低压侧，而溶液中的其他组分（盐）被阻挡在膜的高压侧，并随浓缩水排出，从而实现有效分离的淡化方法。图 2 为反渗透法原理示意图。

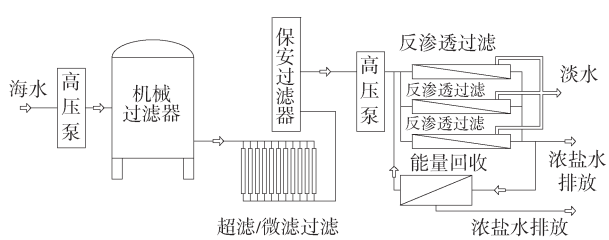

图 2　反渗透法原理

2.2.1　适用场合

目前文献中并未出现反渗透法使用钛及钛合金的先例，但是在某些特定场合，钛及钛合金材料能够达到传统的不锈钢材料无法达到的效果。

（1）腐蚀严重的场合

对于目前使用较为普遍的 S316L 不锈钢管道而言，在 10 ℃海水中浸泡 3 个月后，平均腐蚀速率≤0.01 mm/a，而焊接接头处的腐蚀速率达到了 0.015 mm/a [4]。不锈钢在海水中氯离子的作用下，容易出现点蚀及晶间腐蚀，导致焊缝出现断裂失效。在中东和地中海地区，部分海水淡化厂采用 316L、904L 等奥氏体不锈钢管道。但由于海水溶氧在浓水侧积聚，引起接管处缝隙腐蚀，严重影响了系统运行。而钛及钛合金在相同条件下具有极强的耐蚀性，使用钛或钛合金管道能够有效地降低管道腐蚀。

（2）无法维修的场合

在某些无法实现或较难实现设备维修及维护的场所，或者因为空间狭小而无法对部分管道进行更换的情况，为了保证设备的可靠性，减少维修所引发的风险，应使用钛及钛合金材料替代传统的不锈钢材料。

（3）总质量需要控制的场合

对于总质量有要求的设备，使用钛及钛合金材料能够在满足强度要求的情况下，大幅地减轻设备的总质量，实现设备的轻量化。

（4）长寿命要求的场合

由于海水常混有泥沙、海生物，它们在传热管内及管端附着，会侵蚀合金管。而钛管不会出现这种问题，特别是为了杀死海水中细菌，不得不注入氧时，更需使用耐蚀性好的钛管。对于设备全服役寿命有较高要求的场合，可使用钛及钛合金材料。

2.2.2　存在的问题

（1）无相关标准

目前国内无反渗透海水淡化用钛合金管道系统的材料选用、制造、检测的相关标准及技术规范，钛管管道的规格及尺寸仅能参考其他材料的设计方法设计和选用，因此对钛及钛合金的应用造成了一定的阻碍。

（2）无应用实例，数据较少

目前钛及钛合金材料在反渗透海水淡化工程中

（下转第 14 页）

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结论

利用 ANSYS 中的 Static Structural 模块，分析胶囊模具下部分的机械特性，得出如下结论：下模壳受力比下芯膜受力大，都存在较大的应力集中。分析下模壳和下芯模结构发现，下模壳结构圆角较多，受力较均匀；下芯模结构无圆角，应力集中明显。应加厚下模壳上部应力较大处，加大圆角；下芯模上部受力较小，故下芯模上部厚度也可较小，但也应在应力集中处增加过渡圆角。通过有限元分析，改进后的胶囊模具受力均匀，用料少，加工简单。因此采用有限元法，可以对压力容器的结构进行优化分析。总之，结合依据的标准和相关手册的常规设计方法，在保证安全性和创新性的基础上，采用有限元法，对标准和法律法规允许范围内的特种装备的结构进行优化及改进，有利于提高装备的使用效率，降低能耗和制造成本。

参考文献

[1] 2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Ⅷ Division 2, Alternative Rules for Construction of Pressure Vessels [S] . USA: ASME, 2007.

[2] 2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Ⅷ Division [S] . USA: ASME, 2010.

[3] 2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code 2011a AddendaⅧ Division 2, Alternative Rules for Construction of Pressure Vessels [S] . USA: ASME, 2011.

[4] 沈鋆. ASME Ⅷ-2 中防止局部失效评定方法的原理 [J] . 化工机械, 2013, 40 (2) : 146-148.

[5] 钢制压力容器——分析设计标准:JB/T 4732—1995 [S].

[6] 张艳春, 于国杰. 压力容器分析设计及其工程中的应用 [C] //第十五届中国海洋（岸）工程学术讨论会论文集. 2011: 1430-1434.

[7] 李兵, 何正嘉, 陈雪峰. ANSYS/Workbench 设计、仿真与优化 [M] . 北京: 清华大学出版社, 2013.

[8] 王崧, 刘丽娟, 董春敏译. 有限元分析——ANSYS 理论与应用 [M] . 3 版. 北京：电子工业出版社, 2008.

[9] 刘敏珊, 董其伍, 刘彤. 过程装备特殊零部件应力分析 [M] . 北京: 化学工业出版社, 2009.

[10] 丁春黎, 张立新. 计算机辅助设计外压容器 [J] . 计算机与应用化学,2007, 24 (3) : 348-350.

[11] 杨德生, 缪正华, 赵国臣. 应力线性化原理在压力容器分析设计中的应用 [J] . 化工装备技术, 2010, 31 (1) : 21-22.

（收稿日期：2016-07-13）

（上接第 11 页）

无大规模产业化应用的实例，因此缺乏实际应用数据，无法有效地对其性能进行综合评价。

（3）成本较高

目前钛及钛合金材料的价格略贵于其他常用材料，这是阻碍钛及钛合金推广的最大原因，直接影响了钛材料在海水淡化领域的推广使用 [5]。若将钛与双相不锈钢进行对比，钛材的密度仅为双相不锈钢的 56%，使用相同规格的钛材料，其质量仅为双相不锈钢的 1/2，因此采用钛材的成本基本与双相不锈钢相当，但耐蚀性更加优良。

3 展望及建议

目前，我国海水淡化技术已经较为成熟，已建成具有自主知识产权的千吨级和万吨级示范工程，是完全独立掌握海水淡化技术的少数几个国家之一。随着海水淡化技术的发展以及海水淡化市场的开拓，钛及钛合金材料有着良好的应用前景。

为了更好地将钛及钛合金应用于海水淡化领域，提高我国的海水淡化技术水平，促进海水淡化事业的发展，提出以下几点建议：

（1）加强海水淡化研发、应用单位与钛材、钛设备生产制造单位的合作，大量收集钛合金在反渗透海水淡化系统中的应用数据，共同建立钛合金反渗透海水淡化的标准体系。

（2）加强传统钛合金材料及钛设备生产技术、装备的改造和升级，发展传统产业潜力，提高生产素质和市场竞争力。

（3）加大力度发展深加工技术，实施精品战略，促进钛合金产品结构优化，增强钛合金附加价值，打造具有国际竞争力的优秀品牌。

参考文献

[1] 王非. 我国海水淡化的现状与钛的应用 [J] . 钛工业进展, 2013, 30 (5) :6-7.

[2] 阮国岭. 海水淡化工程设计 [M] . 北京：中国电力出版社, 2013.

[3] 李献军，王镐，冯军宁，等. 钛焊管生产技术及其在我国海水淡化产业的应用前景 [J] . 中国钛业，2014 (1)：9-13.

[4] 梁军，张海兵，刘广义，等. 不锈钢管道在海水中的腐蚀研究 [J] . 材料开发与应用，2014 (5)：32-39.

[5] 郝晓华. 海水淡化——有色金属应用的朝阳领域 [J] . 世界有色金属，2006 (12)：12-15.

(收稿日期：2016-03-13)

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net