

核电装置换热器的失效分析及其解决对策

杨振国

(复旦大学材料科学系, 上海 200433)

摘要: 采用近 20 种宏观分析技术和测试方法, 对国外进口 CANDU-6 型核电装置换热器传热钛管发生的若干起泄漏案例进行了系统的失效分析。通过破口形态的观察和分析, 在国内外首次发现了钛管在海水环境下存在氢鼓泡的失效机制, 并揭示出其他 5 种不同的失效机制及其对应的形貌特征。明确认定钛管在设计、制造、安装过程中的某些疏忽是导致其过早失效的主要原因, 而其它如贝壳、泥沙、橡胶带等异物进入管内引起的堵塞是另一重要原因。提出了一系列针对性的解决方法, 并经实施后效果显著; 其成果对于确保核电、电力、石化、化工、冶金等工业用的换热器在海水环境下的有效防护和安全运行均有指导意义。

关键词: 钛管; 换热器; 核电装置; 海水; 失效分析

Failure Analysis and Countermeasure of Heat Exchangers in Nuclear Power Facility

YANG Zhen-guo

(Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract: By using about twenty macroscopic and microscopic analysis techniques and testing methods, failure analysis on a number of leakage cases of heat transfer titanium tubes, which occurred in some heat exchangers of nuclear power facility with type of CANDU-6 from abroad, was systematically carried out. Through observation and analysis on fractographs of the failure tubes, a new kind of failure mechanism by hydrogen-blistering existed in the tubes under circumstance of seawater was firstly found at home and abroad; other five kinds of failure mechanisms as well as their corresponding morphology distinctions were also revealed. It was definitely identified that the inappropriate ways adopted in design, manufacture and installation of the tubes, resulting in their premature failure, were primary causes and choking of the tubes resulted from some foreign materials like oyster shell, sediment, and rubber-lined belt, etc. was the other important cause. A series of specific countermeasures, which have been demonstrated successfully after implementation, were thus put forward. Moreover, the achievements obtained can also provide instructive significance for ensuring effective protection and safety operation of heat exchangers running under circumstance of seawater in some industries such as nuclear power, electric power, petrochemical, chemical, metallurgy and so on..

Key words: titanium tube; heat exchanger; nuclear power facility; seawater; failure analysis

基于水资源、节能和核电装置安全等的综合考虑, 我国在用或新建的核电站绝大多数建在滨海地区, 并以海水为介质, 通过热交换方式冷却用于核岛、常规岛系统的除盐水和饱和蒸汽。然而, 天然海水通常含有泥沙, 而且盐分和氯离子含量高, 有较强的腐蚀磨损作用; 一旦换热器在设计、选材、制造、安装、维护等某一环节处理不当^[1, 2], 即会在海水环境下形成选择性的腐蚀磨损工况, 大大缩短使用寿命。因而, 换热器在海水介质下是否能正常运行, 将直接关系到整个核电装置的寿命长短及其结构完整性。

作者简介: 杨振国 (1958—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事复合材料和失效分析的研究, 在国内外期刊上已发表论文 90 余篇、专利 10 项、省部级科技进步奖 2 项、发明专利 1 项等。联系电话: 021-65642523 E-mail: zgyang@fudan.edu.cn

本文研究的是某滨海地区进口核电站循环冷却水 (RCW) 换热器传热钛管发生若干起过早失效的复杂案例。该换热器的设计寿命为 40 年, 然而使用不到 3 年, 就频繁发生许多钛管的失效案例, 而且失效形式多样, 对核电装置的正常运行产生了影响。作者采用了一系列的现代分析仪器和方法, 对各种钛管的失效开展了系统的表征分析, 在国内外首次报道了钛管在海水温度下会发生氢鼓泡的失效机制, 并进一步公开报道了其他 5 种鲜为人知的钛管失效机制, 如表面凹陷、微动磨损、泥沙堵塞、贝壳卡塞、橡胶带堵塞等所对应的形貌特征。明确界定了管板内的钛管失效是由电化学腐蚀或贝壳卡塞所致; 管板外的钛管失效是安装时引入的表面压痕、运行时泥沙与橡胶带等在管内的堵塞、以及支撑板处机械割痕处微动磨损

所引起,正确确定了各种钛管失效的不同起因,为快速、正确、有效地解决这起复杂的钛管过早失效提供了重要的理论依据。所提出的一系列解决方法经现场实施后效果显著,其研究成果不仅对确保我国在用或新建的核电装置在海水介质中的安全运行有重要意义,而且对电力、石化、化工、冶金等其他工业的换热器在海水中的有效防护也具有实用参考价值。

1 RCW 换热器基本概况

图 1 所示的是某滨海地区 2 台 CANDU-6 型 700MW 重水堆核电机组常规岛系统的 RCW 换热器,每台机组各配备 4 台。它是由加拿大原子能有限公司(AECL)提供核岛装置、由美国 YUBA 公司提供常

规岛 RCW 换热器。该换热器是一种卧型管壳式热交换设备,设计寿命为 40 年,管壳侧介质分别是海水和除盐水。每台换热器内置 4932 根钛管,管长 14630mm、管径 $\phi 19\times 0.71$ (mm)、材质为按美国 ASME SB338 Gr.2 标准设计的焊接钛管。每根钛管用板间距为 603mm 碳钢板穿孔支撑,两端用钛/钢复合管板固定,管板厚 78 mm,海水侧覆盖一层 5mm 厚、符合美国 ASME SB265 Gr.1 标准的钛板。管板与管口的连接采用液压胀接工艺,胀接率为 80%,但管板口未进行过密封焊。具体工艺参数见表 1。

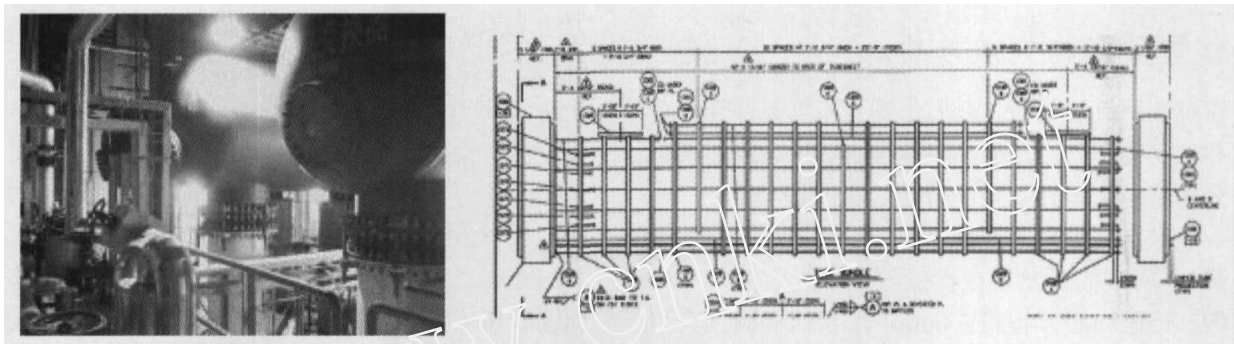


图 1 RCW 管壳式换热器内外壁结构

(a) 外形结构

(b) 钛管、管板、支撑板等内部连接形式

Fig. 1 Structure of recirculation cooling water (RCW) tubular heat exchanger (a) external structure (b) internal structure

表 1 RCW 换热器的工艺参数

Table 1 Process parameters of RCW heat exchanger

parameter	media	flow flux $Q / \text{m}^3/\text{s}$	velocity $V / \text{m/s}$	pressure P / MPa	inlet temperature $T_i / ^\circ\text{C}$	outlet temperature $T_o / ^\circ\text{C}$
tube side	seawater	3.34	2.7	0.3	30.5	35.1
shell side	desalted water	2.21	1.0	0.4	41.5	35.0

2 台核电机组分别于 2002 年 6 月和 12 月投入运行,实际运行时间不到 3 年。正如表 1 中所示,RCW 换热器管壳侧海水和除盐水的介质流速均不高,分别为 2.7m/s 和 1.0m/s,通常不会对管壁形成冲刷磨损条件,而且钛管表面生成的致密氧化钛钝化膜是极耐海水腐蚀的。然而,每台换热器均出现了少则几十根、多则上百根钛管壁厚减薄过快的缺陷管,并且有几十根缺陷管最终发生了破裂,而且钛管失效位置大多数发生在管板内或管板与第一块支撑板之间,形态复杂多样,原因不明。究竟是什么原因导致钛管在相对短的时间内出现严重的损伤和失效,需要作深入细致的综合分析和研究。

2 外观检验和性能评定

为了快速判断钛管泄漏的主要因素,对停役维修

的 1# 机组 1# RCW 换热器进行了现场观察和取样,重点检查了海水入口侧管板口的外观状况。发现管板口某些部位存在一些隐患,如管板与钛管之间未密封焊、管板与钛管之间有锈蚀痕迹、管内有贝壳、泥沙等异物堵塞、以及管板表面有局部机械割痕等。

同时,对取样的海水、除盐水、贝壳、泥沙、橡胶带等环境介质,分别采用了红外光谱 (FTIR)、拉曼光谱 (Raman)、X 射线荧光分析 (XRF)、原子吸收光谱 (AAS)、三维体视电镜、扫描电镜 (SEM)、能谱分析 (EDS)、电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-AES)、X 射线衍射分析 (XRD)、热失重分析 (TGA) 等,对材料的组成、成分、含量、基团、结构、属性等物理、化学性质进行了综合分析和测试。结果表明换热器的操作条件和工况介质均处在正常范围内,并不存在其它不明的腐蚀性介质,尤其是生

物腐蚀介质。

再进一步采用拉伸试验、冲击试验、硬度测定、金相检验、光学显微镜(OM)、氮氢氧分析仪、碳硫分析仪、透射电镜(TEM)以及 SEM、EDS、XRD 等力学、物理性能表征和测试方法,对在用钛管基体材料的化学成分、元素比例、组织、显微形貌、相结构、力学强度、表面硬度、焊缝组织、断口形态等进行了综合试验和观察。还开展了钛管的扩口、压扁等工艺性能的评定试验。试验结果表明钛管材料为密排六方晶系的 α -钛基体,其材质的各项性能指标全部符合美国 ASME SB338 Gr.2 标准规定的要求^[3]。

综上所述,在用的钛管材质、介质工况及其运行条件均为正常,钛管的过早失效与其材质没有关系。

3 钛管破口的失效分析

在对在用钛管材质、工艺介质及环境条件等综合测试和评定的基础上,对 6 种不同的钛管失效的典型实例分别进行了细致观察和分析。兹分述如下。

3.1 氢鼓泡失效形态及分析

图 2 所示的是发生在管板内钛管失效的一个典型案例。该破口距管板口 33mm,形状似椭圆,大小 $5\times 3\text{mm}$,椭圆长轴与钛管成 30° 角,破口外壁边缘明显向里凹,(图 2 (b)),周围还有一些锈蚀斑痕;破口内壁及附近表面均光滑,但部分吸附一些棕红色锈蚀物。破口明显朝里弯的特征,表明有一种外力作用于管外壁致使其边缘明显由外向里弯。

采用 SEM 方法,将图 2 (c) 中三维体视电镜照片的宏观破口再放大,可以清晰看到内壁表面有明显的冲刷磨损痕迹,并吸附一些白色颗粒(图 3 (a));经 EDS 分析,确认这些白色颗粒是泥沙。再对该图右上角边缘小孔局部放大(图 3 (b)),可清楚看到小孔边缘附近有明显的漩涡冲刷磨损痕迹,表面形态如鱼鳞片状,还有一些细小黑色颗粒吸附其上。经 EDS 检测,这些颗粒是被漩涡冲刷磨损掉的钛基体,

从而使管壁快速减薄而破裂。为了进一步判明破口为何由管外壁向里弯的原因,特分别采用了 X 射线光电子能谱仪(XPS)、二次离子质谱仪(SIMS)和 XRD 三种方法,对其内外壁边缘表面微区材料的组成、氢元素含量、化合物种类及物相结构等进行了综合分析。

XPS 检测到破口外壁边缘存在两种不同的钛元素特征峰,如图 4 所示,其表面电子结合能分别为 458.48eV 和 455.74eV。前者是钛管表面氧化钛钝化膜(TiO_2)的电子结合能,后者没有对应的已知钛化合物;而内壁仅检测到钛元素的一个特征峰,即对应的 TiO_2 。因此可以认为破口外壁表面曾发生过化学反应,生成了一种新的钛化物;故进一步采用了 SIMS 方法,对破口外壁表面微区的元素组成进行了表面分析,结果检测到氢元素的存在,而且该元素沿壁厚变化达到几十个微米的深度(图 5),而相应的内壁表面则没有检测到氢元素。可以推定破口外壁表面存在氢化钛化合物。再采用 XRD 法对该表面进行物相的结构分析,经与标准粉末衍射卡(PDF)对比,其近表面层存在二个主晶相:氢化钛($\text{TiH}_{1.924}$)和 α -钛(基体),如图 6 所示,其中氢化钛是非严格化学配比的钛化合物,分子式是 $\text{TiH}_{1.924}$ 。它是由氢原子与钛基体发生化学反应后生成的脆性化合物相。在对该破口进行金相分析观察时,还看到外壁表面层明显有分层、脱落现象,并有黄色的锈蚀斑痕,从而进一步证实是脆性氢化钛相。

那么,管板内钛管外壁表面的氢化钛究竟是怎样产生的呢?这是电化学腐蚀反应的结果。前已提到,钛管与管板之间采用胀节工艺固定的,管板口未进行密封焊。胀接部分通常有缝隙且外壁表面有局部挤伤,钛管与碳钢管板之间在海水电解质作用下必然有较大的电位差,电偶腐蚀和缝隙腐蚀不可避免地会发生,且吸氧腐蚀、析氢腐蚀和吸氢还原反应三者同时进行。碳钢管板作为腐蚀电池的阳极,铁被氧化而溶

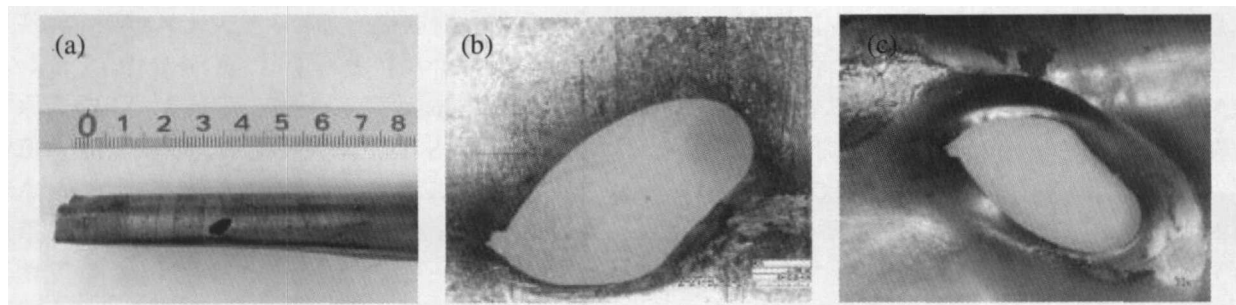


图 2 管板内失效钛管破口的宏观形貌 (a) 距管口的位置; (b) 外壁边缘内凹形态; (c) 内壁表面形态

Fig. 2 Macroscopic appearance of the failure tube fracture inside tube sheet

(a) position from side of tube sheet; (b) concave morphology on outer-wall surface; (c) inner-wall surface morphology

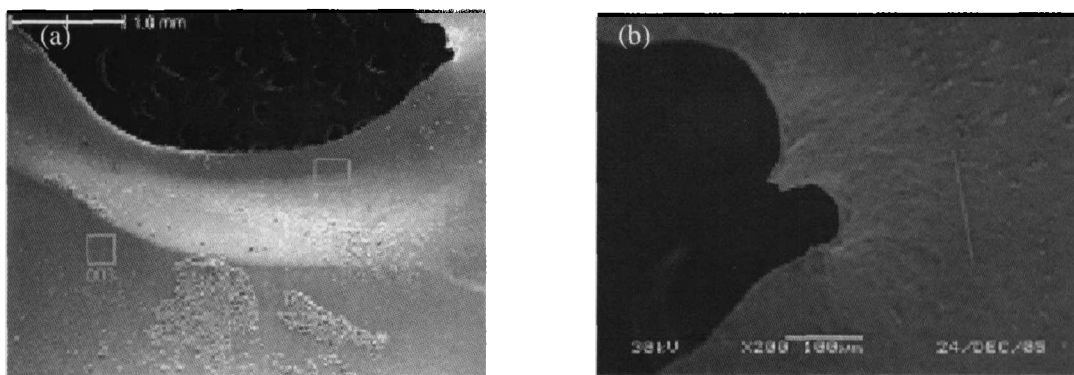


图3 管板内失效钛管椭圆形破口的 SEM 图像 (a) 内壁表面形态; (b) 微孔边缘局部放大形态

Fig. 3 SEM micrograph of the failure tube with an oval-shaped fracture inside tube sheet (a) inner-wall; (b) magnified micro-hole

解; 钛管外壁表面作为阴极, 在挤伤闭合区内发生析氢反应和氢原子还原反应, 在敞开区则发生氧的还原反应。电极反应析出的氢在 α -钛基体内扩散系数很小, 室温下的溶解度仅为 20ppm^[2]。于是, 在钛表面挤伤微区内, 吸附的部分氢原子在铁离子的催化作用下与钛材发生反应生成氢化钛, 富余的氢原子则在闭合区内不断聚集化合生成氢分子, 达到一定浓度后在该微区发生氢鼓泡, 导致钛管外壁由外向里鼓胀而微突起, 闭合区内锈蚀物的体积膨胀也促进了这种微突起的变大。管内壁形成的微突起犹如一种障碍物, 含泥沙海水与此相遇时流体会改变流向, 并以该微突起为

中心形成喇叭状漩涡冲刷流型, 而管板口附近的海水本身又处于紊流状态, 更加剧了对微突起表面的冲刷作用 (图 3 (b)), 微突起越磨越薄, 终因管壁太薄而破裂。随后破口又在电偶腐蚀、缝隙腐蚀和冲刷磨损共同作用下不断被磨损扩大。

因此, 管板内的钛管失效, 主要是由于设计上的欠考虑。未在管板口实施密封焊, 使钛管与碳钢管板之间组成了腐蚀电池, 钛管外壁表面发生析氢反应和氢原子还原反应后在闭合区内产生氢鼓泡, 鼓胀的微突起在泥沙海水的漩涡冲刷磨损下出现破裂而变大。

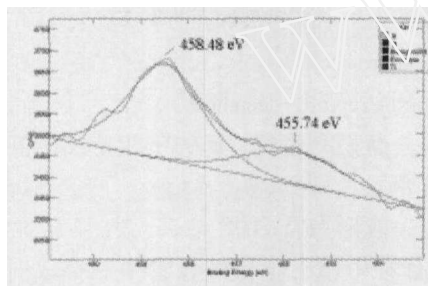


图4 破口外壁表面存在两个明显的 Ti 元素 XPS 特征峰

Fig. 4 Two distinctly different XPS peaks for a titanium element on the fracture outer-wall surface

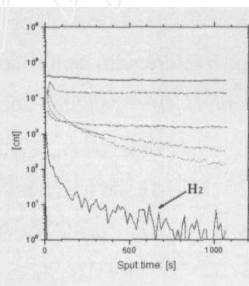


图5 破口外壁表面氢元素含量沿深度变化 (SIMS)

Fig. 5 Variation of hydrogen element content with depth of the fracture outer-wall surface (SIMS).

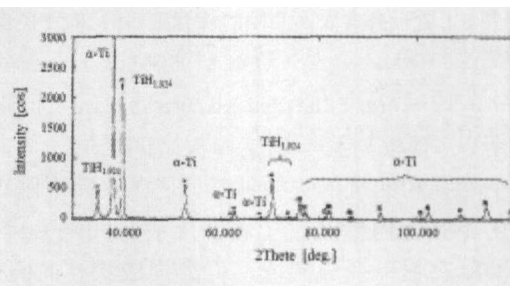


图6 破口外壁近表面存在氢化钛的 XRD 衍射峰位置

Fig. 6 XRD pattern for titanium hydride on the fracture outer-wall nano-surface

3.2 表面凹坑的失效形态及分析

本次分析中, 许多钛管破口出现在管板与第一块支撑板之间, 图 7 是其中一个最典型的失效形貌。该破口距管板口 213mm, 在同一距离处沿内壁周向分布有 4 个表面凹坑, 其中 2 个凹坑已破裂。这些凹坑的形状均为准圆形, 大小在 1.5~2.5mm 之间, 深的为孔形, 浅的为钱币形, 它们之间的分布间距有一定规律, 凹坑附近没有看到其它的磨损痕迹, 因而认为凹坑不是由异物堵塞产生的。

对图 7 中代表性的表面凹坑进行 SEM 的细致观

察。可以看到该凹坑是由一个破裂的深孔和一个钱币形凹陷所组成 (图 8 (a)), 深孔周围表面光滑, 深孔区内磨损痕迹清晰 (图 8 (b)), 其上还吸附了一些黑色颗粒; 用 EDS 测定是磨损掉的钛基体。再对其他几个相似的凹坑进行观察, 其破损形态基本相同。因而推定, 这些凹坑是钛管在安装过程中因使用很硬的牵引夹头, 在内壁产生了挤压变形而引入表面压痕, 即凹陷, 而且牵引夹头有过局部移位, 在深孔附近还留下了一个钱币形浅凹陷的痕迹, 见图 8 (a)。

正是钛管内壁先存在表面凹陷且塑性变形受损, 含泥

沙海水流经此处就成为漩涡冲刷磨损中心, 经过长期冲刷磨损后, 凹陷变成凹坑, 达到一定深度后成为选

择性漩涡冲刷磨损源, 凹坑被磨成深孔, 最终磨穿变大。

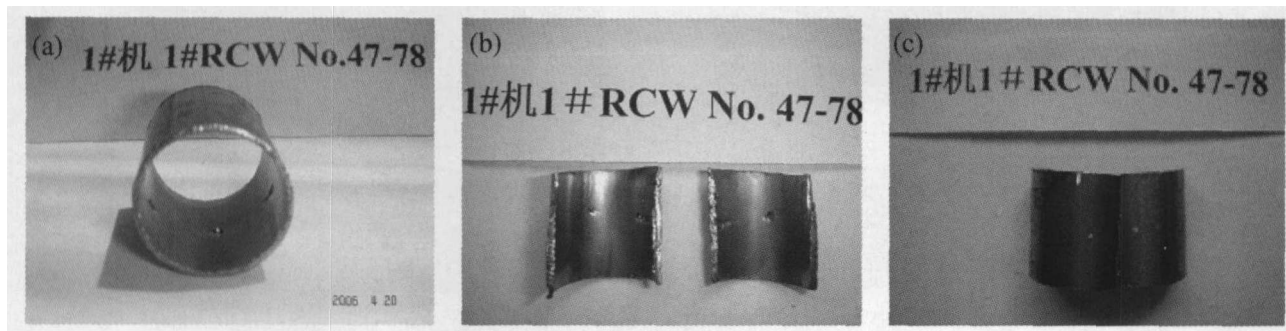


图7 管板外失效钛管破口的宏观形貌 (a) 外观形貌; (b) 内壁凹坑分布形态; (c) 破口外壁形态

Fig. 7 Macroscopic appearance of the failure tube fracture outside tube sheet

(a) external appearance; (b) distribution of four dents along inner-wall; (c) outer-wall appearance of the fracture

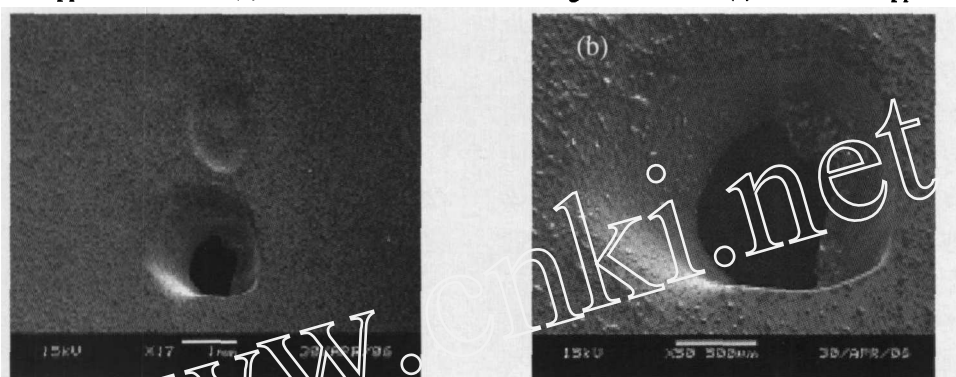


图8 管板外含表面凹陷的钛管破口的 SEM 图像 (a) 破裂深孔和钱币形浅凹陷形态; (b) 破裂深孔的局部放大

Fig. 8 SEM micrograph of the tube fracture with dents outside tube sheet

(a) The ruptured deep hole and coin-shaped dent; (b) Magnification of the ruptured deep hole

所以, 管板与第一块支撑板之间沿同一周向分布有多个深孔和凹坑的失效钛管, 是在安装中因牵引夹头使用不当在内壁产生了表面压痕 (凹陷), 然后在漩涡冲刷磨损下变成凹坑, 再磨损成深孔而破裂。

3.3 异物堵塞的失效形态及分析

3.3.1 贝壳堵塞的失效形态及分析

图9是管板内出现的钛管破口的一种特有形貌。该破口距管板口约42mm, 形状不规则, 大小9mm×5mm, 破口内壁周围还有其它摩擦痕迹, 表明有异物存在。这种破口边缘凹凸不平, 形状为马蹄形的冲刷磨损特征 (图9(c)), 显示出异物为贝壳堵塞后引起的破坏特征。贝壳卡在管内后, 其软体本身易弯曲变形, 自身还有多个不规则孔洞。含泥沙海水流经此阻挡物时, 一方面流体被加速, 另一方面还形成严重紊流形态, 海水只能从孔洞或孔隙处喷射出不规则的高速冲击流, 对管内壁产生严重的冲击磨损, 定向的冲击磨损形成了特殊的马蹄形破口, 非定向的冲击流体则形成了不规则的磨损形态。所以, 马蹄形破口特征表明了这是由贝壳卡塞在管内形成的定向

冲击射流产生的冲击磨损产生的, 其破口随持续的冲击磨损作用而不断变大。

3.3.2 泥沙堵塞的失效形态及分析

图10为三维体视显微镜下拍摄的钛管中三个取向平行、互成阶梯形的窄条孔破口形貌。其特征是三个破口均在管板与第一块支撑板之间, 第一个破口距管板口125mm处, 每个破口大小不等, 窄条孔的最大尺寸有5mm长。从失效形态来看, 破口外壁表面没有磨损痕迹, 表明破口是从内壁先破裂的。

图11是其中一个窄条孔破口的SEM显微形貌照片。可以清楚地看到, 破口内壁经历了挤压塑性变形, 周围有多条平行的挤压条痕, 且窄形大条痕发生了褶皱, 显示有局部塑性大变形的痕迹。根据断口学痕迹分析, 这种破口是RCW换热器在停运时未能把管内沉积的泥沙冲洗干净塞积后引起的。可以认为, 泥沙虽然堵塞了钛管的绝大部分通道, 但仍有小部分通道未塞满成为很窄的细缝, 海水流过此缝时, 由于泥沙堵塞的两边存在较大的压力差, 必然以高速冲击流冲过该缝, 对管内壁产生强烈的冲击磨损和磨粒磨削,

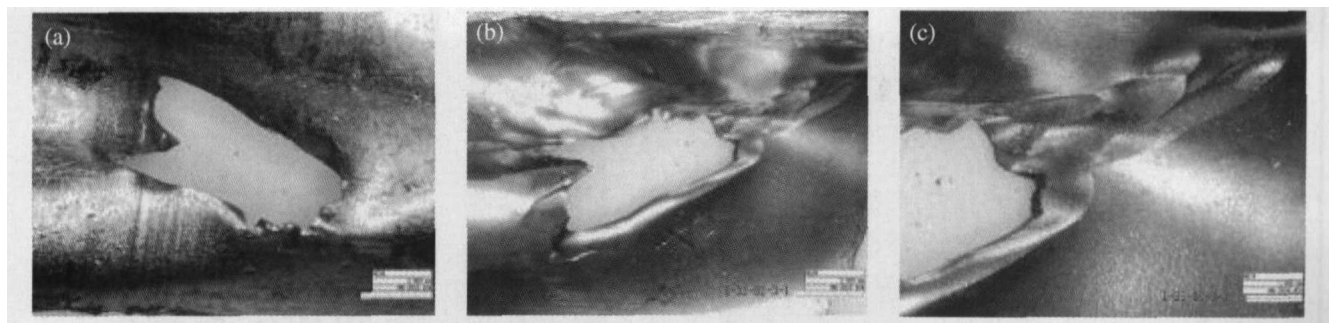


图9 管板内有蹄形破口的失效钛管的宏观形貌 (a) 外壁; (b) 内壁; (c) 内壁局部放大形貌

Fig. 9 Macroscopic appearance of the failure tube with a horseshoe-shaped fracture inside tube sheet

(a) outer-wall; (b) inner-wall; (c) local magnification of inner-wall

于是表面生成了冲击条痕和磨粒磨损的破损特征。

因此可以推定,该钛管破口是由于管内通道的绝大部分被泥沙和淤泥堵塞后,海水经过未堵塞通道的窄缝处就形成了很高的冲击力,对管内壁产生了严重的冲击磨损、磨粒磨损及塑性变形,最终因冲击磨损的持续作用使得管壁快速减薄而破损变大。

3.3.3 橡胶带堵塞的失效形态及分析

本分析中还有如图 12 所示的、钛管破口出现在第 4、5 块支撑板之间的失效形态。该破口距管板口约 2830mm,共有 3 个平行孔洞,每个孔洞大小在 2~3mm,内壁有多根长达 200mm 以上且长短不一的曲折变形的尖锐刀刃条,见图 12 (b)。将整个直管段剖开后看到内有堵塞的橡胶带,已盘成环状的橡胶带由于受到海水的冲刷磨损,其表面也变得相当光滑,见图 12 (c)。

经核查,橡胶带来自于 RCW 系统水室内防腐用橡胶衬里层,是因表面粘结不牢发生部分脱落后冲进管内的。进入管内的橡胶带如果填满通道并得到充分伸展,其磨损行为就象泥沙,是以冲击磨损和磨粒磨损为主,内壁形成了多根塑性变形的、弯折的刀刃条(图 12 (b));若橡胶带在管内未能全部填满并发生折叠,其磨损行为如同贝壳,是以射流型冲击磨损为主,正如图 12 (a、b) 中所见的 3 个孔洞的破损形貌。

因而,该破口完全是防腐橡胶带不慎进入管内形成的冲击磨损、磨粒磨损和冲刷磨损造成的。

3.4 微动磨损的失效形态及分析

图 13 为距出水口侧一定距离的钛管失效的特别案例。该破口距出水口侧 1715mm,形貌不规则,大小为 10mm×5mm,正好在支撑板处,外壁表面摩擦条痕带明显可见,其条痕带宽度即是支撑板的厚度。

该破口内壁表面及附近均很光滑,没有磨损痕迹,可以认定这不是由异物堵塞引起。仔细观察图 13 (a)、(b) 破口外壁形貌,可以清楚地看到有一条弯曲较长的机械割痕,这显然是钛管在穿过支撑板固定生成环形磨损面的 SEM 显微形貌照片。磨损面上除沉积一层分布疏松的金属粉末外,还有溃烂、微凹陷等形态(图 14 (b));对磨屑粉末进行 EDS 分析,确认这些粉末是氧化钛和氧化铁的混合物,是微动磨损产生的金属磨屑。显然,该机械割痕在微动磨损持续作用下,外壁表面逐步被磨损减薄,接触面薄弱处还出现局部溃烂,表面损伤严重,最终由疲劳开裂而失效。

所以,该破口的失效机制是先由机械割伤和微动磨损导致钛管疲劳开裂,然后壳侧除盐水进入破口处产生紊流冲刷磨损,停车维修时还有电偶腐蚀产生,使破口不断变大,最终是在机械割伤、微动磨损和电

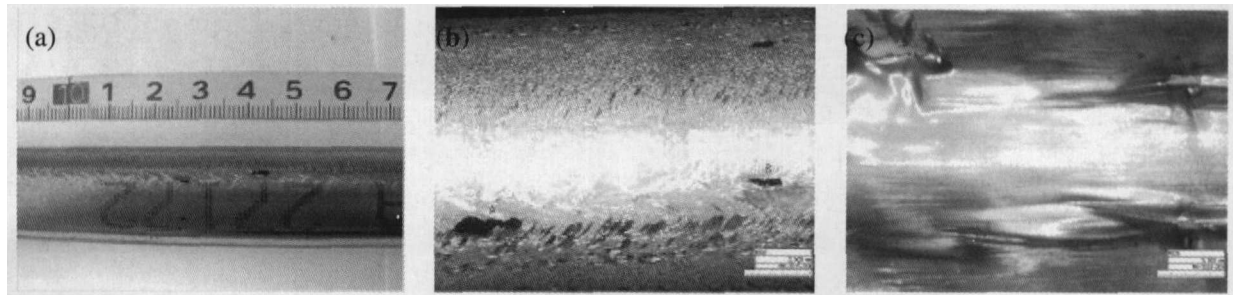


图10 管板外有三个窄条孔的失效钛管的宏观形貌 (a) 外观形貌; (b) 外壁; (c) 内壁

Fig. 10 Macroscopic appearance of the failure tube with three slot-shaped holes outside tube sheet

(a) external appearance; (b) outer-wall; (c) inner-wall

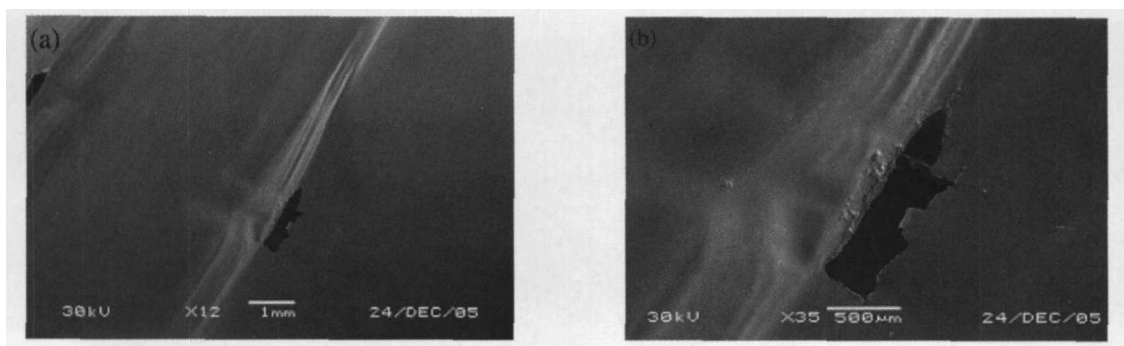


图 11 窄形条孔破口的 SEM 图像 (a) 内壁形态; (b) 局部放大后的破损形态

Fig. 11 SEM micrograph of the fracture with slot-shaped holes

(a) inner-wall morphology; (b) magnified morphology of the ruptured hole



图 12 第一块支撑板外的失效钛管的宏观形貌 (a) 外观形貌; (b) 内壁形态, (c) 堵塞的光滑橡胶带

Fig. 12 Macroscopic appearance of the failure tube outside the first supporting plate

(a) external appearance; (b) inner-wall appearance; (c) smooth rubber-lined belt chocked inside the tube

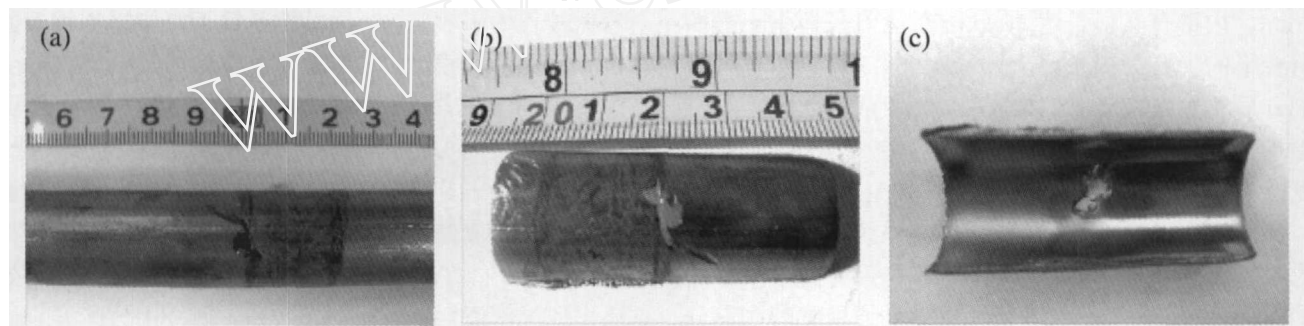


图 13 靠近出水侧支撑板处的失效钛管的宏观形貌 (a) 外观形貌; (b) 外壁形态; (c) 内壁形态

Fig. 13 Macroscopic appearance of the failure tube on the supporting plate near seawater outlet

(a) external appearance; (b) outer-wall; (c) inner-wall

偶腐蚀的共同作用下使破口变宽变大。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 综合性力学性能试验确认, RCW 换热器的钛管材料是 α -钛基材, 其化学成分、组织、显微结构、力学性能、焊缝质量、工艺性能等均符合 ASME SB338 Gr.2 标准规定的各项指标, 质量评定合格。

(2) RCW 换热器所接触的海水、除盐水等介质以及相应的温度、压力、流速等工艺参数, 均不会对钛管材料产生明显的磨损或腐蚀作用, 但含泥沙海水对钛管减薄有一定的冲刷磨损效应。

(3) 钛管与管板之间由于未密封焊发生电偶腐蚀和缝隙腐蚀, 析氢还原反应产生氢鼓泡, 管壁出现微突起, 在泥沙海水冲刷磨损下导致钛管破裂。因此, 管板口设计上的疏忽是管板内钛管失效的主要起因。

(4) 钛管在安装过程中因牵引夹头过硬在内壁产生表面压痕, 形成漩涡冲刷磨损中心, 在泥沙海水冲刷磨损下破裂。因而, 含多个表面凹坑的钛管失效是由安装不当造成, 也是大量钛管失效的重要原因。

(5) 管板内管内壁有马蹄形形态的失效钛管, 是贝壳卡塞在管内引起海水改变流向形成冲击流体, 并在冲击磨损的持续作用下发生的破裂。

(6) 管内有多阶梯型窄条孔形态的失效钛管

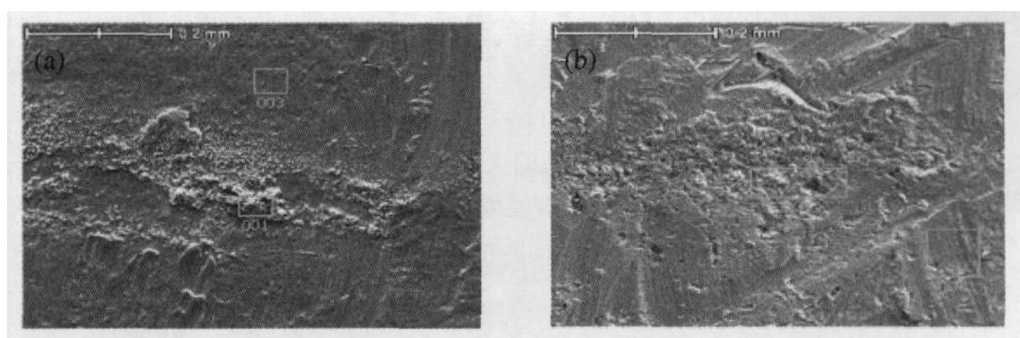


图 14 微动磨损产生的管壁外表面的 SEM 图像 (a) 磨损带上金属磨屑形态; (b) 磨损带上局部溃烂、微凹陷形态

Fig. 14 SEM micrograph on the tube outer-wall surface by fretting a brasion

(a) metal grindings on the abrasion band;

(b) diabrosis and micro-dent on the abrasion band

发生在管板与第一个支撑板之间,其破裂是泥沙堵塞在管内并使海水以高速冲击流方式冲过窄缝产生冲击磨损和磨粒磨损所引起的。

(7) 第一块支撑板以外管内壁有多孔及弯折刀刃条形态的失效钛管,完全是防腐橡胶带冲入管内堵塞并产生冲击磨损、磨粒磨损和冲刷磨损所造成的。

(8) 支撑板处发生钛管失效,是钛管在穿孔时受到了机械割伤并在微动磨损作用下引起疲劳开裂。

4.2 建议

(1) 管板与钛管之间应用密封保护焊,彻底消除电偶腐蚀和缝隙腐蚀;也可用高分子封堵剂密封。

(2) 定期检查滤网质量,防止贝壳进入水室和管内;若允许,可在母管和水室进口处再设置一道孔径小于 15mm 的滤网,阻止 RCW 母管系统内自生的贝壳进入管内。

(3) RCW 换热器停车检修时,管内沉积的泥沙和污泥必须冲洗干净,消除结垢和堵塞;若条件许可,可建立澄清池,降低海水中的泥沙含量。

(4) 距管板口 250mm 以内、有表面凹坑的缺陷管,可在管板口加套一根形状为梯形、长 300mm 的

尼龙保护套管,阻止海水对缺陷管的冲刷磨损,延长使用寿命,同时还可起到阻挡异物进入管内的作用。

(5) 距管板口 250mm 以外、表面凹坑又较大的缺陷管,必须在管板口采取封堵措施暂停其使用,确保正常的生产秩序;建议备用新管在下次停车维修时用于更换,以恢复换热器原有热交换量的设计能力。

(6) 可以从工艺上考虑适当降低海水流速的可行性,以减缓泥沙海水对管侧的冲刷磨损程度;但必须是在进行细致的热量交换和能量平衡等综合分析和计算的基础上方可调整工艺参数。

参考文献:

- [1] Protogerakis E, Steiger K. Titanium and up-to-date Material for the Construction of Chemical Apparatus - A Contribution to the Knowledge of Damages [J]. Werkstoffe und Korrosion, 1986, 37: 111-118.
- [2] Leyens C, Peters M. Titanium and Titanium Alloy[M]. Berlin: Wiley-VCH Verlag GmbH, Germany, 2003.
- [3] ASME SB338: Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers [S], USA, 1990.