

海水管路典型部件腐蚀失效研究进展

朱 光^{1,2}, 高顺长^{1,2}, 黄 玮², 刘 炬^{1,2}, 刘 峰^{1,2}, 侯 健^{1,2}

(1. 海洋腐蚀与防护全国重点实验室, 青岛 266237; 2. 洛阳船舶材料研究所, 洛阳 471023)

摘 要: 海水管路系统是电力、船舶等领域的重要组成部分, 腐蚀是造成海水管路失效的重要原因, 换热管、阀、泵等是海水管路中的高频故障部件。通过对以上海水管路部件的失效案例进行调研与分析, 总结了不同部件的失效类型及原因, 提出了降低海水管路腐蚀失效风险的措施。海水管路部件的腐蚀与设计、选材、使用工况等因素有关, 冲刷腐蚀、空泡腐蚀、微生物腐蚀、电偶腐蚀、缝隙腐蚀等是海水管路中较为常见的失效类型。在海水管路设计、建造和使用过程中, 应针对各部件常见的腐蚀类型与特点采取相应的措施, 以降低腐蚀风险。

关键词: 海水管路; 腐蚀; 失效原因; 换热器; 冲刷腐蚀

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2024)09-0045-12

海水管路是指在服役过程中用来输送或排出海水并完成特定任务的管路, 是电力、舰船、石油等领域的重要组成部分^[1]。根据应用场景, 可将海水管路分为岸基海水管路和离岸海水管路。岸基海水管路建设于海岸边, 从海洋中抽取海水完成特定工作。核电、火电等电力领域是岸基海水管路的典型应用环境, 能源领域的热阱需要大量的冷介质进行换热, 与匮乏且昂贵的淡水资源相比, 取之不尽、用之不竭的海水是较理想的冷介质^[2-3]。正因如此, 我国目前所有投产的核电站都建设在海岸边^[4]。岸基海水管路有着管路规模大、海水流量大、运行较为规律、海水环境稳定等特点。离岸海水管路主要应用在海洋环境中服役的舰船、海上石油平台。船舶的动力系统、海水淡化系统、消防系统、压载水系统以及海上石油平台的注水系统、冷却系统均需要大量的水资源供给, 直接从海洋中抽取海水并在使用完成后直接排放成为唯一选择^[5]。离岸海水管路有着管路规模小、运行过程和海水环境不稳定等特点。

目前, 海水管路的部件以金属材料为主, 经过数十年的发展, 海水管路使用的金属材料经历了碳钢、不锈钢、铜合金(紫铜、黄铜、白铜)、钛合金等几代的更替。各类金属材料在海水环境中均存在巨大的腐

蚀风险^[6], 腐蚀导致海水管路失效的案例时有发生。

海水管路由泵、阀门、换热器等不同部件组成^[1,6], 不同部件的工作状态和服役环境有着较大差别, 常见的腐蚀失效原因有所不同。笔者通过搜集近年来海水管路中换热器、阀门、泵等典型部件腐蚀失效的案例, 分析、归纳不同部件的常见腐蚀失效形式及诱发原因, 为海水管路设计、制造和使用提供依据, 降低海水管路出现腐蚀失效的概率。

1 海水管路中换热器的腐蚀失效案例及原因

海水换热器是冷热流体进行热交换的设备, 它是船舶动力系统以及核电站冷却系统的重要组成部分^[7]。以工业中应用最为广泛的管壳式换热器为例, 海水换热器的管程内通海水, 壳程内通蒸汽、热水等热流体, 冷热流体在换热管壁上进行热交换以降低热流体的温度。换热管是海水换热器最容易失效的部位, 目前常见的换热管主要包括铜合金和钛合金两种材料, 其在海水中使用时均会出现腐蚀穿孔的现象, 不同材料换热管失效的典型形貌如图 1 所示。铜合金换热管有着传热性能好、在海水中能够形成耐蚀膜层的优点, 目前主要应用于船舶领域。钛合金换热管则有着耐蚀性优异, 比强度高优点, 目前主要应用于核电、火电等电力领域。表 1 和表 2 分别列出了近年来铜合金和钛合金海水换热管的失效案例, 由于材料性能的特点和应用环境不同, 影响两种换热管失效的主要因素略有差别。

海水换热器中使用的铜合金换热管种类较多, 白铜(铜镍合金)^[11]、青铜^[21]和黄铜^[22-23]均有应用案

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 国防科工局技术基础科研项目(JSHS2023206A001)

通信作者: 刘峰(1971—), 研究员, 博士, 主要从事海洋腐蚀与防护方面的研究, 0532-68725105, liuf@sunrui.net

表 1 海水管路中铜合金换热管失效案例
Tab. 1 Failure cases of copper alloy heat exchange tubes in seawater pipelines

应用领域	材料	失效状态及相关工况	失效类型	失效原因	参考文献
船舶	B10 铜镍合金	柴油机空冷管发生腐蚀穿孔,蚀坑形状不规则; 管内通海水,管外接触热空气,服役时间 1 a	垢下腐蚀	海洋生物在管内壁不均匀沉积,沉积物下方形成腐蚀微电池,海水中硫、氯元素加速腐蚀	[8]
石油	B30 铜镍合金	海水换热管与管板连接处及换热管入水口侧内壁存在大面积腐蚀坑; 管内通海水,管外通热原油,海水中含有大量海生物等固体,部分管堵塞	微生物腐蚀 冲刷腐蚀	海生物、污泥沉积提供了厌氧环境,导致硫酸盐还原菌的微生物腐蚀 管堵塞和变向导致局部海水流速过高,海水中的固体颗粒对管形成多相流冲刷,破坏保护膜	[9]
船舶	BFe10-1.6-1 铜镍合金	板式冷却器进出水管发生腐蚀穿孔; 管内通海水,海水中含砂,穿孔附近存在大量划痕	冲刷腐蚀 晶间腐蚀 垢下腐蚀	含砂海水形成多相流冲刷,破坏腐蚀产物层 晶界处发优先腐蚀,海水冲刷作用下晶粒脱落 泥沙在管内沉积,沉积物下方形成腐蚀原电池	[11]
船舶	B10 铜镍合金	板式换热器的海水进出水管短期内多次穿孔; 管内通海水,管道与钢制法兰及钛合金换热板耦接	电偶腐蚀	B10 管与钛合金换热板偶接,电位较低的 B10 管成为阳极并加速腐蚀	[14]
船舶	B10 铜镍合金	换热器海水进出水管的弯管处发生腐蚀穿孔; 管内通海水,海水中携带泥沙,失效位置临近焊缝	焊接质量不佳 冲刷腐蚀	弯管处存在焊缝的热影响区,加大管材的腐蚀倾向 管内海水流速较高,弯头处海水变相产生紊流并携带泥沙,造成多相流冲刷	[15]
船舶	B10 铜镍合金	管壳式换热管中部腐蚀穿孔,管内堆积海生物; 管内通海水,外部通氟利昂	垢下腐蚀 冲刷腐蚀	管内淤积的海生物产生酸性环境,破坏表面保护膜 局部的高流速破坏保护膜,加速基体腐蚀	[16]
船舶	B10 铜镍合金	加热器盘管焊缝处内表面发生腐蚀穿孔; 管内通热蒸汽,管外浸泡在海水中,服役数年	脱成分腐蚀	焊缝微观存在枝晶偏析,枝晶内含镍量低,优先发生腐蚀	[17]
船舶	B30 铜镍合金	换热器盘管与法兰的连接焊缝处减薄,表面存在大量腐蚀坑,局部穿孔; 管内通海水,管外通热淡水,管内外均承压	空泡腐蚀	换热器设计不合理导致海水沸腾,在金属表面引起空泡腐蚀	[18]
火电/核电	B30 铜镍合金	凝汽器换热管内壁存在大量点蚀坑; 管内通海水,管外通蒸汽	微生物腐蚀	腐蚀产物层和垢层提供了厌氧环境,海水中含有硫元素,硫酸盐还原菌,导致微生物腐蚀	[19]
火电	B30 铜镍合金	凝汽器换热管腐蚀穿孔; 管内通海水,海水间断加次氯酸钠,管外通热蒸汽	微生物腐蚀	海生物和污泥沉积提供了厌氧环境,硫酸盐还原菌,导致微生物腐蚀	[20]
船舶	QA11-6-6 铝青铜	换热器海水进出水管铜套腐蚀过快; 铜套与钛合金管板直接接触,受锌阳极保护	机械损伤 电偶腐蚀	铜套内壁在装配过程中产生机械损伤,易保留海水 钛合金与铝青铜形成电偶对,且铜套面积较小,形成“大阴极,小阳极”结构	[21]
火电/核电	HA177-2 铝黄铜	凝汽器换热管外壁存在大量点蚀坑; 管内通热蒸汽,管外通海水,外壁存在不均匀垢层	脱成分腐蚀	管表面形成不均匀垢层,垢层破损处富集氯离子,导致锌元素优先腐蚀	[22]
船舶	HSn70-1 锡黄铜	凝汽器换热管腐蚀穿孔; 管内通海水,管外通氟利昂	脱成分腐蚀	基体中砷元素存在偏析,海水中存在氯离子,导致锌元素优先腐蚀	[23]

表 2 海水管路中钛合金换热管失效案例
Tab. 2 Failure cases of titanium alloy heat exchange tubes in seawater pipelines

应用领域	材料	失效状态及相关工况	失效类型	失效原因	参考文献
核电	TA2	管壳式换热器换热管海水侧入水口腐蚀穿孔,管板腐蚀严重; 管内部通海水外部通热淡水,支撑板与折流板为碳钢,管板为钛钢复合板	冲刷腐蚀	管口形状不规则和管内卡滞物导致局部流速过高,造成冲刷腐蚀	[10]
			电偶腐蚀	钛管与钛钢复合板形成电偶对,加速钢板腐蚀	
			缝隙腐蚀	管板与管口间未密封焊,狭缝引发缝隙腐蚀	
核电	工业纯钛	板式换热器海水入口板边缘腐蚀穿孔,海水侧表面存在裂纹; 管内通海水,海水中含砂,服役数月后失效	冲刷腐蚀	海水中存在固体颗粒,造成多相流冲刷腐蚀	[12]
			疲劳	钛板加工时产生微裂纹,工作过程中存在振动,导致裂纹疲劳开裂	
核电	TA1	位于支撑板附近的凝汽器换热管管壁减薄失稳; 管内通海水,海水中含砂,管外通热蒸汽,管由碳钢折流板支撑,服役 8 a	接触磨损	运行振动过程中管与折流板产生偏心接触磨损	[13,27]
			空泡腐蚀	高压蒸汽冷凝过程中形成空泡,破坏管表面钝化膜	
			冲刷腐蚀	海水中的固体颗粒与气流共同造成三相流冲刷腐蚀,破坏钝化膜	
核电	TA2	换热器海水进口水室腐蚀穿孔,管内残留黑色沉积物; 管内部通海水,外部通热蒸汽,海水中含砂	冲刷腐蚀	海水在水室处形成旋涡,导致局部高流速,且海水中携带泥沙,在管内壁形成多相流冲刷腐蚀	[28]
核电	TA2	换热器管板附近换热管严重减薄,部分管泄漏; 管内通含砂海水,管由碳钢折流板支撑,两端管板为包覆钛的碳钢板	电偶腐蚀	碳钢与钛之间形成电偶对,碳钢管板析氢腐蚀	[29]
			缝隙腐蚀	换热管与管板胀焊处存在狭缝,碳钢管板析氢腐蚀	
			氢腐蚀	氢气进入钛晶格后逸出,导致钛管表面起泡	
			冲刷腐蚀	含砂海水在形成多相流冲刷腐蚀,钛管起泡处破裂	

例,最常见的是以 B10、B30 为代表的铜镍合金。铜镍合金在一定流速的海水冲刷下会生成一层腐蚀产物膜,能够有效提高基体的耐蚀性^[24]。铜镍合金换热管最常见的失效类型包括冲刷腐蚀^[9,11,15]、垢下腐蚀^[8,11,16]和微生物腐蚀^[19-20]。当海水流速在正常范围时,不会引起换热管的冲刷腐蚀。当海水流经弯管^[15]及管路尺寸突变处^[9]时,会因流态变化而导致局部海水流速过高,破坏管壁表面的腐蚀产物膜。特别是当海水中含有泥沙等固体颗粒时,固体颗粒与海水形成的多相流冲刷会加剧破坏作用^[11]。铜合金换热管被泥沙颗粒冲刷破坏的形貌如图 1(a)所示,泥沙颗粒在金属管表面留下了明显的“犁沟”。保护膜破坏后,在流动海水作用下裸露的金属基体表面会继续形成腐蚀产物膜,出现“成膜,破坏,成膜”的过程,冲刷腐蚀最严重的区域会不断减薄,直至穿孔失效。为了避免冲刷腐蚀,一方面要合理设

计管路,尽量避免海水流动过程中产生紊流和漩涡,从而导致局部流速过高;另一方面需要对管内海水进行预先过滤,减少大尺寸固体颗粒物。

沉积物和微生物则是铜镍合金换热管失效的另一类主要原因。除了铜镍合金自身形成的腐蚀产物层,换热管内壁还存在海水温度升高产生的钙镁沉积物以及来自海水的泥沙和海洋生物,不同的组分共同形成的沉积物附着于管内壁,其形貌如图 1(b)所示。垢层的不均匀分布会导致管内壁的不同区域存在氧气与腐蚀介质浓度差,形成微电池,导致局部区域快速腐蚀^[8]。同时,沉积层下方会形成有利于硫酸盐还原菌等微生物生存的厌氧环境。当海水环境合适(例如含有大量的硫元素)时,硫酸盐还原菌会将硫酸根还原为酸性的硫化氢,破坏腐蚀产物膜和基体,在管内壁形成蚀坑甚至穿孔^[19-20]。为了避免这两类影响因素,一方面,要选择合适的阻垢技术

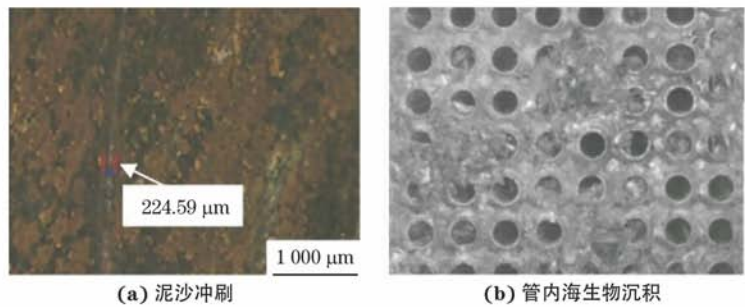


图 1 铜合金海水换热器失效的典型形貌

Fig.1 Typical failure morphologies of copper alloy seawater heat exchangers: (a) sediment particle erosion; (b) marine biological deposition inner pipe

和防污技术,保证换热管工作过程中管内的清洁程度;另一方面,在换热器停止运行时,采取合适的方法避免微生物的快速繁殖,例如将海水完全排空^[20]。

除了铜镍合金外,青铜、黄铜换热管在海水中的主要失效类型为脱成分腐蚀。以锌黄铜为例,铜合金中的锌原子在腐蚀环境中优先发生腐蚀^[25-26]。这类铜合金由于材料本身性能的限制并不适用于海水环境,已经被铜镍合金和钛合金等耐蚀性更好的材料替代。

随着钛合金冶炼和成型工艺逐渐成熟,耐海水腐蚀性能更优的钛合金换热管逐渐投入应用。目前,钛合金换热管一般不会由于自身耐蚀性不足而出现腐蚀,其腐蚀失效类型主要有两种,一类是冲刷腐蚀^[10,12,28],一类是电偶腐蚀^[10,29]。与铜合金换热管类似,钛合金换热管同样会由于局部流速过高和海水中携带固体颗粒而产生严重的冲刷腐蚀;但二者不同的是,铜合金换热管失效是腐蚀产物膜的“形成,破坏,形成”引起的换热管减薄导致的,而钛合金换热管失效则是海水腐蚀环境加速冲刷磨损过程导致的。

电偶腐蚀是钛合金换热管中最常见的失效形式之一,但失效并非出现在钛合金部件上,而是与钛合金部件电连接的其他金属部件上。钛合金在海水中的电位是 $-0.2\sim 0.2$ V(相对于标准氢电极)^[30],高于其他常见金属。当不同金属部件之间直接接触或绝缘失效时,会形成电偶对。由于换热器中钛合金换热管的面积较大、电位较高,极易与其他金属部件形成“大阴极、小阳极”的状态,导致其他金属部件快速腐蚀失效。同时,与钛合金换热管直接接触的其他金属部件由于电偶腐蚀而放出的氢气,会对钛合金换热管的力学性能和耐蚀性造成影响。部分氢气会转变为溶解型氢原子进入钛合金换热管的晶格,并在应力的作用下富集在应力集中区域,造成氢脆^[31];同

时,晶格中的氢原子逸出会在钛合金表面形成鼓泡,导致钛合金换热管在流动海水中发生腐蚀^[29]。对于电偶腐蚀,一方面要保证钛合金换热管和其他金属部件之间严格绝缘;另一方面可以将电偶腐蚀风险较高的部件更换为钛合金或者非金属材料。对于氢气造成的腐蚀,除了避免异种金属的电连接外,在钛合金部件的应用过程中应尽量避免氢气的产生和累积。

在特殊的工作环境中,换热管还会发生空泡腐蚀。通常,空泡是海水流动过程中的流速不均匀引起金属表面产生的压力差导致的,空泡在金属表面的产生和破碎会对金属表面产生明显破坏^[32]。但在换热器中,高温条件下的气液相变过程也会在金属表面形成空泡。例如,某船舶使用的凝汽器自身设计不合理,导致换热管中的海水过度升温至沸腾,沸腾过程中产生的蒸汽导致 B30 换热管内壁发生空泡腐蚀^[18]。某核电厂使用的钛合金换热器壳程为热蒸汽,蒸汽在冷凝过程中在换热管外壁形成空泡并破坏钛合金表面的钝化膜,钝化膜在缺氧环境中无法恢复,导致钝化膜破坏区域成为腐蚀薄弱区域,最终在多相流冲刷的作用下管壁发生穿孔^[13,27]。该类失效与换热器的结构及工作环境有关,不同材料的换热管均有发生空泡腐蚀的风险。在换热器结构设计过程中应对此类失效加以规避,防止金属换热管表面在气液相变过程中产生过大的压差而产生空泡腐蚀。

2 海水管路中阀门的腐蚀失效案例及原因分析

阀门是海水管路系统中的常见部件,主要作用为控制管路开关及调节管内流体的流量。海水管路中常见的阀门包括截止阀和蝶阀,两种阀门的模型和工作原理如图 2(a)和(c)所示。截止阀是通过控制阀瓣的平行移动来调节管内流量,其密封性较好,

能够快速控制管路开关;蝶阀是通过控制阀瓣(蝶板)的旋转角度来调节管内流态,其密封性相对较差,但控制流量较为精准。阀门在服役过程中会根

据实际需求在常开、常闭、半开等状态切换,阀门的状态转变会导致阀门内海水流态发生剧烈变化,提高阀门的腐蚀风险。

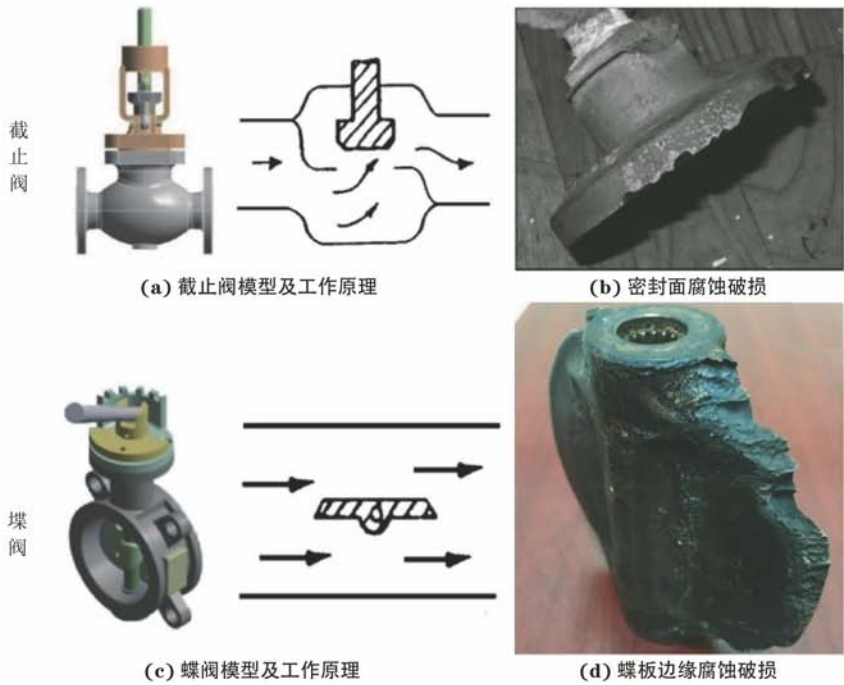


图 2 海水管路中常见阀门的工作原理及失效典型形貌^[33-38]

Fig. 2 Working principle (a,c) and typical failure morphology (b,d) of common valves in seawater pipeline^[33-38]

近年来,海水管路中阀门典型的失效案例如表 3 所示。目前,海水管路中出现腐蚀失效的阀门最常用的材料为青铜,包括锡青铜、铝青铜及镍铝青铜等,青铜阀门腐蚀失效类型包括缝隙腐蚀^[36,38]、冲刷腐蚀^[36-37,39]和空泡腐蚀^[37]。缝隙腐蚀一般出现在阀门常闭的状态,阀瓣在关闭时密封面与阀体间难以避免地存在一定的缝隙,当该缝隙的尺寸恰好处于阀瓣材料的缝隙腐蚀敏感区域时,极易诱发缝隙腐蚀。缝隙腐蚀的发生会直接导致阀瓣密封面的破坏,进而导致阀门密封失效^[43]。同时,高流速的水流会从密封面破坏处流过造成冲刷腐蚀,导致密封面破损处进一步腐蚀^[36,38]。这类腐蚀的形貌如图 2(b)所示。针对缝隙腐蚀,需要在设计过程中对阀门的密封结构进行优化,避免狭缝的产生。

除了阀门密封失效容易引发冲刷腐蚀外,在阀门打开和关闭的过程中产生的瞬时高流速海水会对阀瓣产生强烈的冲刷作用,导致冲刷腐蚀和空泡腐蚀^[36]。当海水内含有泥沙等固体颗粒时,冲刷腐蚀的破坏性会加重。特别是在阀瓣打开程度较小时,海水在阀瓣附近会形成湍流,局部的高流速会在阀瓣边缘产生空泡腐蚀^[37],对阀瓣边缘

造成严重的破坏,如图 2(d)所示。为降低产生冲刷腐蚀和空泡腐蚀的风险,一方面在阀门的使用过程中尽量避免阀门长时间小角度开启,从而导致局部流速过高;另一方面要采取过滤等措施减少海水中的固体颗粒。同时,阀门通常需要铸造和焊接成型,当阀门存在铸造缺陷或焊接缺陷时,其耐蚀性会显著降低^[39-40],在阀门制造过程中需要对其表面质量严格把控,减少表面缺陷。

除了青铜,不锈钢在海水管路阀门中也有应用。不锈钢阀门的腐蚀失效案例一般与材料本身有关。例如,某核电厂海水管路系统中的奥氏体不锈钢截止阀,由于阀杆材料本身不耐海水腐蚀且热处理工艺不合格而出现断裂^[41]。

3 海水管路中泵的腐蚀失效案例及原因

泵是海水系统的重要部件,其主要作用是向海水管路中供给海水,常见的泵包括潜水泵、管道增压泵等。在泵运行过程中,通过叶轮高速旋转产生的吸力将海水吸入泵内,然后将海水压入海水管路。在海水管路中,一般采用大流量、大扬程的泵,这需要叶轮持续高流速旋转,因此叶轮成为海水泵中最容易失效的部件,其典型失效形貌如图 3 所示。

表 3 海水管路中阀门的失效案例
Tab. 3 Failure cases of valves in seawater pipelines

应用领域	材料	失效状态及相关工况	失效类型	失效原因	参考文献
船舶	5-5-5 锡青铜	截止阀的阀瓣密封面存在大量腐蚀坑,导致阀门泄漏; 阀门内通海水,海水流速 1~3 m/s,服役时间 1~3 a	缝隙腐蚀	阀门密封面在常闭状态下存在狭缝,引发缝隙腐蚀	[36]
			冲刷腐蚀	阀门开、闭过程中高速高压海水对阀门密封面产生强烈冲刷腐蚀	
石油	10-3 铝青铜	蝶阀的蝶板边缘严重腐蚀,两侧腐蚀程度不同; 阀门内通海水,阀体为碳钢,海水中含砂	空泡腐蚀	阀门打开较小时,蝶板边缘产生湍流,局部流速较高,在蝶板边缘形成空泡	[37]
			冲刷腐蚀	含砂海水形成多相流冲刷腐蚀	
船舶	5-5-5 锡青铜	截止阀与阀瓣之间密封失效,管路漏水; 阀内通海水,使用不足 3 a 后失效	冲刷腐蚀	高速高压海水对阀瓣产生强烈冲刷,海水的泥沙形成多相流冲刷	[38]
			缝隙腐蚀	泥沙在阀瓣表面附着并形成狭缝,造成缝隙腐蚀	
石油	9-4-4-2 铝青铜	截止阀阀芯附近的出水口壁腐蚀穿孔,穿孔附近区域存在大量腐蚀坑; 阀门内通海水,海水流速 1~2 m/s,服役时间 3 a	铸造缺陷	局部铁元素富集导致材料耐腐蚀和耐冲蚀性能下降	[39]
			冲刷腐蚀	穿孔处位于流向转变处,流速过高,穿孔处遭受严重的冲刷腐蚀	
石油	9-4-4-2 铝青铜	蝶阀底座发生腐蚀; 蝶阀底座接触海水,阀门关闭时与镍基合金 625 材质的密封圈接触,阀门焊接成型,填充材料为锰铝青铜	焊接工艺不当	焊接工艺不当且焊后未进行热处理,焊缝区形成易腐蚀的 β 相	[40]
			电偶腐蚀	阀门关闭时阀体与密封圈接触并形成电偶对,加速阀体的腐蚀	
核电	X6CrNiCu17-04 奥氏体不锈钢	截止阀阀杆断裂导致阀芯掉落,堵塞管线; 阀门内通海水,管路工作时阀门常开,检修时关闭	点蚀	该材料海水中易点蚀	[41]
			晶间腐蚀	热处理工艺不当导致晶界粗化,引发晶间腐蚀	
石油	S20430 奥氏体不锈钢	固定阀门的螺栓断裂; 螺栓用于固定海水管路阀门,与海水直接接触	晶间腐蚀	材料的敏化作用导致碳化铬在晶间析出,材料耐晶间腐蚀性性能降低,螺栓出现晶间腐蚀直至断裂	[42]

表 4 是近年来典型的海水泵叶轮的腐蚀失效案例,冲刷腐蚀^[44,47,49-50]和空泡腐蚀^[44-45,49]是叶轮最常见的失效类型。在叶轮旋转并抽取海水的过程中,叶轮不同位置的流速、压力存在明显的差别。叶轮边缘处的海水流速可达到叶轮出口处海水流速的十余倍^[51],因此从海水中直接抽取海水的潜水泵难

以对海水进行充分的沉淀或过滤,导致海水中含有大量的固体颗粒,叶片边缘极易在高流速的多相流冲刷下产生腐蚀和磨损。受到多相流冲刷腐蚀的叶轮表面通常呈麻点状,局部区域受到泥沙颗粒的剧烈磨损而产生犁沟,其典型形貌如图 3(a)~(b)所示。同时,叶轮不同位置的流速差异会导致不同区

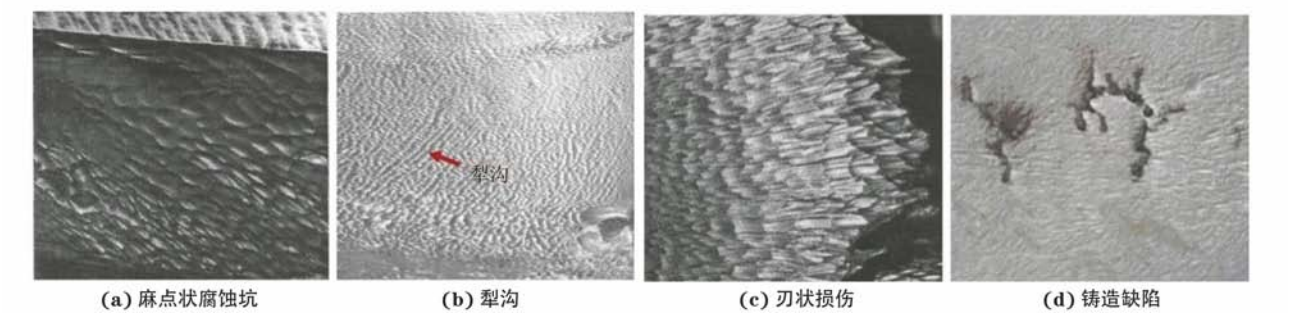


图 3 海水管路中泵叶轮的失效典型形貌^[44-47]

Fig. 3 Typical failure morphology of pump impeller in seawater pipeline^[44-47]: (a) poket-shaped pits; (b) trench; (c) edge damage; (b) casting defect

表 4 海水管路中泵叶轮的失效案例
Tab. 4 Failure cases of pump impellers in seawater pipelines

应用领域	材质	失效状态及相关工况	失效类型	失效原因	参考文献
核电	25/5 双相不锈钢	水泵叶轮损坏严重,表面存在大量磨痕; 泵持续运行 10~12 个月,海水中砂质量浓度为 2.5 kg/m ³	冲刷腐蚀	含砂海水形成多相流冲刷,与电化学反应共同作用导致叶轮腐蚀	[44]
			空泡腐蚀	叶轮处泥沙淤积导致叶轮入口产生空泡,直至穿孔	
火电/核电	316L 奥氏体不锈钢	入水侧和出水侧叶轮片正面存在沟槽,减薄严重;与盖板交界处叶片腐蚀穿孔泵抽取海水,海水中含砂,服役 10~12 个月	冲刷腐蚀	含砂海水的持续冲刷造成多相流冲刷腐蚀,造成材料快速流失	[45]
			空泡腐蚀	叶轮高速转动时,叶轮背面形成负压区并产生大量真空气泡,导致空泡腐蚀	
核电	A890 3A 双相不锈钢	泵叶轮开裂,表面存在密集缺陷; 泵抽取海水	缝隙腐蚀	铸造工艺不当导致叶轮表面存在大量缩松、缩孔,部分缺陷处于缝隙腐蚀敏感区,发生缝隙腐蚀	[46]
核电	1Cr18Ni9 奥氏体不锈钢	立式混合泵的叶轮叶片磨损和腐蚀严重; 泵抽取海水,海水中含砂	冲刷腐蚀	含砂海水对叶轮叶片形成多相流冲刷腐蚀	[47]
石油	不锈钢	叶轮片表面存在明显腐蚀坑; 增压泵抽取带油海水,工作压力为 0.5 MPa	点蚀	钢 Cr 含量不足,无法形成完整钝化膜,容易点蚀	[48]
			电偶腐蚀	含 Cr 量不同的叶片形成电偶对,加速低电位叶片腐蚀	
			冲刷腐蚀	流体中含有油、液、气,形成多相流冲刷腐蚀,叶轮处流体改向导致局部形成高流速湍流	
			空泡腐蚀	流体中含有气体,流动过程中叶片表面产生气泡,引起空泡腐蚀	
船舶	16-4 硅黄铜	叶轮叶片、流道、前后盖板的表面被大量腐蚀产物覆盖,基体上存在大量麻点和腐蚀坑; 泵抽海水,持续使用 10 a	空泡腐蚀	高流速冲击在叶轮等表面形成空泡,形成腐蚀坑	[49]
			冲刷腐蚀	腐蚀坑处形成紊流,局部流速加快,造成冲刷腐蚀	
			脱成分腐蚀	基体中富 Zn 的 β 相优先腐蚀	
核电	CF8M 奥氏体不锈钢	叶轮叶片减薄,正面存在沟槽,背面存在麻点; 泵吸取海水,海水高砂低盐,持续运行 1 a 后失效	冲刷腐蚀	高含砂量海水对叶轮造成多相流冲刷腐蚀	[50]

域产生压力差,甚至局部区域产生负压,负压区容易出现气泡的产生和溃灭,对金属表面造成剧烈损伤,引发空泡腐蚀^[52]。空泡腐蚀会对叶轮造成严重破坏,刃状损伤是空泡腐蚀区域的典型形貌,如图 3(c)~(d)所示。为避免叶轮产生冲刷腐蚀和空泡腐蚀,一方面要对泵进行合理设计,并按照使用工况合理选型;另一方面可选择耐磨材料,或者在叶轮表面涂覆耐磨涂层来提高其使用寿命。

目前,海水泵叶轮的材料以不锈钢为主,包括奥氏体不锈钢和双相不锈钢。由于叶轮形状复杂,一般采用铸造成型,若铸造工艺不合格,则容

易在叶轮表面形成缩松、缩孔等缺陷,或导致成分偏析现象,如图 3(f)所示。当叶轮表面存在铸造缺陷时,缺陷区域容易诱发缝隙腐蚀等局部腐蚀,形成薄弱区^[46]。当叶轮在铸造过程中出现成分偏析时,也会由于成分不均匀等因素导致局部腐蚀或电偶腐蚀^[48]。

除了叶轮外,泵体^[53]、泵轴^[54-55]等部件也会出现腐蚀失效,其典型案例如表 5 所示。其中最值得注意的是腐蚀疲劳^[53,55]失效。由于泵体、泵轴等部位在工作时承受交变载荷而容易产生疲劳裂纹,同时在腐蚀介质的作用下裂纹会快速扩展导致开裂,

特别是对于在海水中生成钝化膜的不锈钢,交变载
荷会破坏钝化膜从而降低材料的耐蚀性。因此,承
受交变载荷且应用在腐蚀环境中的部件在选材时应

严格考虑材料的耐蚀性和疲劳性能;承受交变载荷
但并不接触腐蚀介质的部件应严格密封,防止接触
海水。

表 5 海水管路中泵体、泵轴的失效案例

Tab. 5 Failure cases of pump bodies and pump shafts in seawater pipelines

应用领域	材质	失效状态及相关工况	失效类型	失效原因	参考文献
石油 (海上平台)	4310 奥氏体 不锈钢	往复式柱塞泵泵体顶部及底部发生开 裂泄漏; 泵抽取海水,使用 3 个月后失效	点蚀	材质不合格导致泵体在海水中发生吸 氧腐蚀	[53]
			腐蚀疲劳	失效位置承受交变载荷,在腐蚀介质的 作用下导致腐蚀疲劳开裂	
核电	20Cr13 马氏体不锈钢	泵轴的 O 型圈处存在环状和成片分布 的点蚀坑; 泵间歇抽取海水,正常状态下泵轴不接 触海水	点蚀	O 型圈密封不严渗入海水,泵轴材质在 海水中易点蚀	[54]
			缝隙腐蚀	轴套与轴之间形成狭窄缝隙,产生缝隙 腐蚀	
船舶	1Cr17Ni2 马氏体不锈钢	泵轴装夹齿轮和泵轴直径过渡处断裂; 泵轴直接接触海水,断裂失效多次发生	腐蚀疲劳	泵轴在工作时承受交变载荷,在海水介 质中发生腐蚀疲劳	[55]
石油 (海上平台)	马氏体不锈钢	叶轮密封环断裂,两端面严重腐蚀; 泵吸取海水,密封环与叶轮的材质不同	电偶腐蚀	叶轮密封环和叶轮在海水介质中形成 电偶腐蚀对,密封环优先腐蚀	[56]

除了换热管、阀门、泵等特殊部件,海水管路中
最多的部件是直管、弯管、法兰、三通等。与换
热管等部件相比,这些部件的工作环境简单,因此
它们仅会发生流动海水冲刷腐蚀,发生失效的风
险相对较低,但电偶腐蚀^[57]、冲刷腐蚀^[58]等导
致的失效也时有发生,这可以通过优化管路结构、
合理选材等方法加以规避。

4 结论与展望

针对目前海水管路中换热器、阀门、泵等部件
发生腐蚀失效的案例,可以得到以下结论。

(1) 海水管路部件的腐蚀失效类型与使用环
境及材质有关;在部件设计过程中,应对部件的服
役工况进行调研,建立部件的环境载荷谱,并针对
服役工况优化设计、合理选材。

(2) 冲刷腐蚀、空泡腐蚀是换热器、阀、泵叶
轮等部件最常出现的腐蚀类型,这两种腐蚀通常
是结构设计不合理、管内存在卡滞物等,在管路
内产生局部高流速导致的,海水含有泥沙等固体
颗粒会加重冲刷腐蚀。在设计过程中,应合理设
计管路结构,减少紊流、漩涡的出现,避免在海
水流态变化区域布置焊缝等腐蚀薄弱区。在设
备使用过程中,一方面要通过过滤、沉降等手段
尽量减少海水中的固体颗粒,另一方面要通过电
解防污、药剂防污等方法减少海水中的海生物,
防止海水管路卡滞、堵塞而加重冲

刷腐蚀。

(3) 对于不同材料部件接触的部位,电偶腐
蚀和缝隙腐蚀是常见的失效类型,在设计和制造
过程中,不同材料的部件之间严格绝缘,避免“小
阳极、大阴极”的出现。

(4) 垢下腐蚀和微生物腐蚀是表面易形成腐
蚀产物膜的铜镍合金等材料常见的失效类型,在
设备使用过程中应当选用合适的防污措施,避免
海生物堆积。

(5) 制造工艺不合格是导致部件腐蚀失效的
常见原因,铸造不合格产生的缩孔等缺陷易导致
缝隙腐蚀,焊接、热处理不合格会降低材料的耐
蚀性;在设备制造过程中应严格管控加工质量,保
证材料及铸造、焊接、热处理等工艺满足设计要
求。

(6) 一些特殊的腐蚀失效类型与部件材料
及其所处工况有关,如氢腐蚀、腐蚀疲劳等;针
对特殊的材质和工作环境,应在设计阶段进行考
虑以降低腐蚀风险,例如钛合金部件应避免接
触氢气,交变载荷区域要考虑材料的疲劳性能。

参考文献

[1] 马爱利,张亚明,姜胜利,等. 船用焊接 B10 铜镍环失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术,2015,27(5):473-482.
MA A L, ZHANG Y M, JIANG S L, et al. Failure analysis of a weld ring of B10 copper-nickel for marine pipe combination[J]. Corrosion Science and Protection

- Technology, 2015, 27(5): 473-482.
- [2] ZHENG W D, YE T Z, YOU S J, et al. Experimental investigation of the heat transfer characteristics of a helical coil heat exchanger for a seawater-source heat pump[J]. Journal of Energy Engineering, 2016, 142(1): 04015013.
- [3] 阎丽静. 滨海核电厂海水系统腐蚀的根本原因分析[J]. 给水排水, 2018, 54(S1): 70-74.
- [4] 曾维明, 黎玮玮, 罗宏. 核电站法兰短管腐蚀穿孔及其失效分析[J]. 广东化工, 2016, 43(17): 181-182.
- ZENG W M, LI W W, LUO H. Failure analysis for corrosion perforation of pipe flange in nuclear power plants[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(17): 181-182.
- [5] 王广夫, 贾智棋, 董彩常, 等. 舰船海水管路体系典型材料的性能[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(4): 24-27.
- WANG G F, JIA Z Q, DONG C C, et al. Properties of typical materials for marine seawater pipeline system[J]. Corrosion & Protection, 2022, 43(4): 24-27.
- [6] 刘国栋, 杨银清, 杜章林, 等. 舰船常用海水管材电化学腐蚀及电绝缘问题[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(3): 122-128.
- LIU G D, YANG Y Q, DU Z L, et al. Discussion on electrochemical corrosion and electrical insulation of common marine pipes [J]. Development and Application of Materials, 2019, 34(3): 122-128.
- [7] EZGI C, ÖZBALTA N, GIRGIN I. Thermohydraulic and thermoeconomic performance of a marine heat exchanger on a naval surface ship[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 64(1/2): 413-421.
- [8] 缪红建, 丁雪峰, 王永红. 海水介质下铜合金空冷器管失效原因分析[J]. 船舶, 2015, 26(2): 79-82.
- MIAO H J, DING X F, WANG Y H. Failure analysis of copper alloy tube of air cooler under the sea[J]. Ship & Boat, 2015, 26(2): 79-82.
- [9] 金晓男, 窦涛, 裴振刚, 等. BFe30-1-1 铜镍海水冷却器管侧泄漏原因分析[J]. 中国海上油气, 2008, 20(1): 68-72.
- JIN X N, DOU T, PEI Z G, et al. An analysis of the leakage problem on the tube side of a BFe30-1-1 cupronickel seawater cooler[J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(1): 68-72.
- [10] 袁建中, 叶琛, 刘一舟, 等. 热交换器传热钛管的涡流检测及失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(1): 77-封 3.
- YUAN J Z, YE C, LIU Y Z, et al. Eddy current testing and failure analysis of titanium tubes used in heat exchanger[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(1): 77-封 3.
- [11] 石常亮, 张欣, 李扬, 等. 船舶冷却系统铜镍合金管腐蚀穿孔原因[J]. 理化检验(物理分册), 2022, 58(2): 53-57, 61.
- SHI C L, ZHANG X, LI Y, et al. Causes of corrosion perforation of copper-nickel alloy tube in ship cooling system[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2022, 58(2): 53-57, 61.
- [12] 何西扣, 董毅, 朱衍勇. 核电站用板式换热器失效分析[J]. 物理测试, 2010, 28(2): 55-59.
- HE X K, DONG Y, ZHU Y Y. Failure analysis of heat exchanger plate in nuclear power plant [J]. Physics Examination and Testing, 2010, 28(2): 55-59.
- [13] CHEN F J, YAO C, YANG Z G. Failure analysis on abnormal wall thinning of heat-transfer titanium tubes of condensers in nuclear power plant Part I: Corrosion and wear[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 37: 29-41.
- [14] 姚磊, 唐小东, 付云鹏, 等. 基于故障树理论的舰船海水管路系腐蚀失效原因分析及应用[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 56-63.
- YAO L, TANG X D, FU Y P, et al. Corrosion failure causes of ship seawater piping based on fault tree theory and its application [J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 56-63.
- [15] 孙宏坤, 吴鹏飞, 宋嘉睿. 某舰镍铜管海水系统失效原因分析[J]. 广船科技, 2021, 41(2): 15-18.
- SUN H K, WU P F, SONG J R. Failure analysis of nickel-copper pipe seawater system in a ship[J]. GSI Shipbuilding Technology, 2021, 41(2): 15-18.
- [16] 廖雄, 李泉明, 刘艳辉, 等. 中央空调冷凝器腐蚀失效分析与对策[J]. 能源与环境, 2010(5): 21-22.
- LIAO X, LI Q M, LIU Y H, et al. Corrosion failure analysis and countermeasures of condenser in central air conditioning [J]. Energy and Environment, 2010(5): 21-22.
- [17] 郭海霞, 张欣耀, 李慧. 加热管盘管泄漏原因分析[J]. 物理测试, 2020, 38(3): 46-50.
- GUO H X, ZHANG X Y, LI H. Cause analysis of leakage for heating coil[J]. Physics Examination and Testing, 2020, 38(3): 46-50.
- [18] 邓为民, 费培忠. 铜镍合金换热管的失效机理分析[J]. 电站辅机, 2012, 33(2): 21-24.
- DENG W M, FEI P Z. Mechanism analysis on the failure of constantan heat exchange tubes[J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2012, 33(2): 21-24.
- [19] 李进, 许兆义, 周卫青, 等. 循环冷却水系统中铜镍合

- 金点腐蚀影响因素分析[J]. 北京交通大学学报(自然科学版),2005,29(4):13-18.
- LI J, XU Z Y, ZHOU W Q, et al. Corrosion failure analysis of copper-nickel alloy in cooling water system [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29 (4):13-18.
- [20] 廖庆华. BFe30-1-1 白铜管早期腐蚀失效原因分析 [J]. 西北电力技术, 2004, 32(4):70-72.
- LIAO Q H. The analysis on the reason of earlier corrosion invalidation of Bfe30-1-1 white brown pipe [J]. Smart Power, 2004, 32(4):70-72.
- [21] 徐鲁杰, 魏玉文, 黄大生, 等. 某船用柴油机热交换器海水进出口铜套腐蚀故障排查[J]. 内燃机与配件, 2023(14):72-74.
- XU L J, WEI Y W, HUANG D S, et al. Corrosion of copper sleeve embedded in seawater inlet and outlet of a marine diesel engine heat exchanger [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2023(14):72-74.
- [22] 张大全, 于印哲, 刘洁, 等. 低温多效海水淡化装置中 HA177-2 铜管腐蚀失效分析[J]. 上海电力学院学报, 2017, 33(2):167-172.
- ZHANG D Q, YU Y Z, LIU J, et al. Failure analysis of the HA177-2 alloy tube in low temperature multi-effect distillation installation [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2017, 33(2):167-172.
- [23] 熊从贵, 林通, 王昕光, 等. 船用冷凝器换热管的失效分析[J]. 机电工程, 2014, 31(6):753-756.
- XIONG C G, LIN T, WANG X G, et al. Failure analysis of heat exchanging tube of marine condenser [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(6):753-756.
- [24] 王晓, 李明, 刘峰, 等. 温度对 B10 铜镍合金管冲刷腐蚀行为影响规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(6):1329-1338.
- WANG X, LI M, LIU F, et al. Effect of temperature on erosion-corrosion behavior of B10 Cu-Ni alloy pipe [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(6):1329-1338.
- [25] 赵同新, 崔会杰, 胡晓春, 等. 黄铜脱锌腐蚀行为特征电子探针分析[J]. 物理测试, 2021, 39(3):23-28.
- ZHAO T X, CUI H J, HU X C, et al. EPMA analysis on corrosion behavior characteristics of brass dezincification [J]. Physics Examination and Testing, 2021, 39(3):23-28.
- [26] HU Q F, LIU Y C, ZHANG T, et al. Corrosion failure analysis on the copper alloy flange by experimental and numerical simulation [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 109:104276.
- [27] CHEN F J, YAO C, YANG Z G. Failure analysis on abnormal wall thinning of heat-transfer titanium tubes of condensers in nuclear power plant Part II: erosion and cavitation corrosion [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 37:42-52.
- [28] 胡诗萌, 王胜辉, 杨振国. RCW 换热器钛管的失效分析[C]//2013 年全国失效分析学术会议论文集. 上海:《理化检验-物理分册》编辑部, 2013:465-469.
- [29] GONG Y, YANG Z G, YUAN J Z. Failure analysis of leakage on titanium tubes within heat exchangers in a nuclear power plant. part II: mechanical degradation [J]. Materials and Corrosion, 2012, 63(1):18-28.
- [30] 杨万国, 董彩常, 亓云飞, 等. 钛合金海水管路系统材料腐蚀特性研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(11):36-39.
- YANG W G, DONG C C, QI Y F, et al. Corrosion characteristics of titanium alloy seawater pipeline system materials [J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(11):36-39.
- [31] MADINA V, AZKARATE I. Compatibility of materials with hydrogen. Particular case: hydrogen embrittlement of titanium alloys [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(14):5976-5980.
- [32] GAO G Y, GUO S S, LI D R. A review of cavitation erosion on pumps and valves in nuclear power plants [J]. Materials, 2024, 17(5):1007.
- [33] 孙浩伟. 蝶阀结构强度的力学特性分析[J]. 阀门, 2024(4):471-475.
- SUN H W. Mechanical characteristics analysis of butterfly valve structural strength [J]. Valve, 2024(4):471-475.
- [34] 查洒洒, 赵晶. 核级截止阀抗冲击性能数值分析[J]. 阀门, 2024(4):454-459.
- ZHA S S, ZHAO J. Numerical analysis of impact resistance performance of nuclear-grade globe valve [J]. Valve, 2024(4):454-459.
- [35] 易志芳, 何颀, 张国强, 等. 供热空调水系统阀门的种类和选用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 1998, 25(5):123-128.
- [36] 王培, 逢昆, 张海峰, 等. 船舶海水管路青铜截止阀腐蚀失效分析[J]. 材料保护, 2018, 51(10):143-146.
- WANG P, PANG K, ZHANG H F, et al. Analysis of corrosion failure of bronze cut-off valve in marine seawater pipe system [J]. Materials Protection, 2018, 51(10):143-146.
- [37] KHADEM HOSSEINI R, YAREIEE S. Failure analysis of a nickel aluminium bronze butterfly valve

- in a seawater line[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021,129:105686.
- [38] 韩茂盛,罗皓,刘乐乐,等.铜合金截止阀密封失效原因分析[J]. *材料开发与应用*,2021,36(2):49-54.
HAN M S,LUO H,LIU L L,et al. Failure analysis of copper alloy globe valve [J]. *Development and Application of Materials*,2021,36(2):49-54.
- [39] 孙吉星,金曦,李敏,等.某海上油田海水系统青铜阀门腐蚀穿孔原因分析[J]. *材料保护*,2017,50(3):95-98.
SUN J X,JIN X,LI M,et al. Analysis on causes of corrosion perforation in bronze globe valve of certain offshore oil field seawater system [J]. *Materials Protection*,2017,50(3):95-98.
- [40] MOTA N M,TAVARES S S M,DO NASCIMENTO A M,et al. Failure analysis of a butterfly valve made with nickel aluminum Bronze (NAB) and manganese aluminum Bronze (MAB) [J]. *Engineering Failure Analysis*,2021,129:105732.
- [41] 毛雄忠,祝刚,尹亮.截止阀阀杆断裂失效分析[J]. *核科学与工程*,2019,39(4):532-538.
MAO X Z,ZHU G,YIN L. Analysis on failure of stem fracture of globe valves[J]. *Nuclear Science and Engineering*,2019,39(4):532-538.
- [42] TAVARES S S M,CORTE J S,MENEZES C A B,et al. Failure analysis of an austenitic stainless steel stud in seawater oil platform [J]. *Engineering Failure Analysis*,2009,16(1):552-557.
- [43] 姚磊,徐雄,傅刚,等.浅航舰船海水管系环境与青铜阀门的腐蚀[J]. *船舶*,2019,30(6):76-82.
YAO L,XU X,FU G,et al. Analysis of environment of seawater pipes and corrosion of bronze valves in warships[J]. *Ship & Boat*,2019,30(6):76-82.
- [44] 向先保,张承卓.海水循环泵双相不锈钢叶轮失效机理分析[J]. *水泵技术*,2012(05):38-42.
- [45] 徐晓刚.不锈钢海水泵叶轮失效原因分析及解决方法[J]. *兰州石化职业技术学院学报*,2008,8(3):16-19.
XU X G. Failure analysis of the impellers of sea water pumps of stainless steel and solution[J]. *Journal of Lanzhou Petrochemical Polytechnic*,2008,8(3):16-19.
- [46] 王方方,贺锡鹏,赵阳,等.海水淡化系统取水泵叶轮开裂失效分析[J]. *铸造技术*,2018,39(7):1620-1622,1625.
WANG F F,HE X P,ZHAO Y,et al. Failure analysis on cracked impeller of pump of seawater desalination system[J]. *Foundry Technology*,2018,39(7):1620-1622,1625.
- [47] 吴昉赞,周澄,张晓.海水循环水泵叶轮失效原因分析及处理建议[J]. *全面腐蚀控制*,2015,29(12):39-41.
WU F B,ZHOU C,ZHANG X. The Analysis of Failed Seawater pump Impellers and Solution [J]. *Total Corrosion Control*,2015,29(12):39-41.
- [48] 阚振江,张秀林,李家锋,等.南海西部油田海水混输泵失效分析[J]. *腐蚀与防护*,2009,30(7):508-510.
KAN Z J,ZHANG X L,LI J F,et al. Failure analysis of transportation pump for seawater-oil mixture at west oil platform in South China Sea[J]. *Corrosion & Protection*,2009,30(7):508-510.
- [49] 杜兆伟,李华峰,伍志明,等.某船海水泵叶轮失效原因分析[J]. *材料保护*,2019,52(6):179-183.
DU Z W,LI H F,WU Z M,et al. Analysis on failure cause of a sea water pump impeller [J]. *Materials Protection*,2019,52(6):179-183.
- [50] 吴继权,周旭南,张居光.海水泵叶轮叶片的断裂分析[J]. *理化检验(物理分册)*,2009,45(7):443-445.
WU J Q,ZHOU X N,ZHANG J G. Fracture analysis of sea water pump impeller vane[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)*,2009,45(7):443-445.
- [51] 李辉.高速离心泵叶轮与导叶匹配特性研究及优化设计[D].镇江:江苏大学,2022.
LI H. Study on matching characteristics and optimization design of impeller and guide vane of high-speed centrifugal pump [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2022.
- [52] 吕秀丽.离心泵内部三维流场数值模拟研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2009.
LYU X L. Numerical simulation of three-dimensional flow field in centrifugal pump [D]. Fuxin: Liaoning Technical University,2009.
- [53] 杨中娜,赵杰瑛,孟强,等.某海上平台4130钢注水泵泵体开裂失效分析[J]. *天然气与石油*,2021,39(4):78-84.
YANG Z N,ZHAO J Y,MENG Q,et al. Failure analysis on cracking of 4130 steel casing of an offshore platform water injection pump [J]. *Natural Gas and Oil*,2021,39(4):78-84.
- [54] 彭岳峰,徐柱,吴小亮,等.海水升压泵泵轴腐蚀失效分析[J]. *金属热处理*,2019,44(S1):384-387.
- [55] 高博,谢占成,申世坤.海水泵轴失效分析与Incoloy925合金在船用柴油机上的应用[J]. *热加工工艺*,2019,48(8):212-213,218.
GAO B,XIE Z C,SHEN S K. Failure analysis of marine pump shaft and application of incoloy 925 alloy in marine diesel engine [J]. *Hot Working Technology*,2019,48(8):212-213,218.
- [56] 曲伟首.注水泵密封环腐蚀原因分析[J]. *全面腐蚀控*

制,2021,35(3):18-21,27.

QU W S. Corrosion reason analysis for sealing ring of water injection pump [J]. Total Corrosion Control, 2021,35(3):18-21,27.

[57] 史磊,白占坤,方奇术. 核电厂海水循环水系统金属膨胀节失效分析[J]. 全面腐蚀控制,2021,35(12):52-55,66.

SHI L,BAI Z K,FANG Q S. Failure analysis of metal expansion joint in seawater circulating water system of nuclear power plant[J]. Total Corrosion Control, 2021,35(12):52-55,66.

[58] 孙吉星,金曦,李敏,等. 某海上油田海水管线系统弯头腐蚀穿孔的原因[J]. 腐蚀与防护,2016,37(10):802-805,810.

SUN J X,JIN X,LI M, et al. Causes of corrosion perforation in an elbow of seawater pipeline system in a certain offshore oil field [J]. Corrosion & Protection,2016,37(10):802-805,810.

Research Progress on Corrosion Failures of Typical Components of Seawater Pipelines

ZHU Guang^{1,2}, GAO Shunchang^{1,2}, HUANG Wei², LIU Ju^{1,2}, LIU Feng^{1, 2}, HOU Jian^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection, Qingdao 266237, China;

2. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: Seawater pipeline system is an important part of power, ship and other fields. Corrosion is an important cause of seawater pipeline failure. Heat exchange tubes, valves and pumps are high-frequency fault components in seawater pipelines. Through the investigation and analysis of the above failure cases of the components, the failure types and causes of different components are summarized, and the measures to reduce the risk of corrosion failure are put forward. The corrosion of the components are related to factors such as design, material selection, and operating conditions. Erosion corrosion, cavitation corrosion, microbial corrosion, galvanic corrosion, and crevice corrosion are common failure types in the components. In the process of design, construction and use of seawater pipelines, corresponding measures should be taken according to the common corrosion types and characteristics of each component to reduce the risk of corrosion.

Key words: seawater pipeline; corrosion; failure cause; heat exchanger; erosion corrosion