

海洋平台桩腿防腐层修复三层包覆防护结构研究与应用

张彦军^{1,2}, 韩文礼^{1,2}, 张贻刚^{1,2}, 杨耀辉^{1,2}, 解蓓蓓^{1,2}, 徐忠苹^{1,2}

(1. 中国石油集团工程技术研究院, 天津 300451;

2. CNPC 石油管工程重点实验室-涂层材料与保温结构研究室, 天津 300451)

摘要: 目的 研究开发一种可在海水环境中施工的海洋平台桩腿飞溅区防腐层修复体系——三层包覆结构及其施工方法。方法 通过材料研究及产品生产研究和性能评价及现场应用及检测, 开发出满足防腐层修复的材料体系和施工方法。结果 该三层包覆防护结构的自憎水密封油的憎水率达到 98.4%, 防腐带的拉伸强度达 18.6 MPa, 断裂伸长率达 21.6%; 防护套的拉伸强度达 31.8 MPa, 断裂伸长率达 760%, 抗紫外光时间达 3000 h, 三层包覆防护体系能够耐渤海湾百年一遇的冰冲击。结论 研制的三层包覆防护材料能满足海洋环境的施工和防腐要求, 同时满足海洋平台飞溅区桩腿防腐和抗冰冲击的要求, 是一种海洋平台桩腿及其他类似构筑物飞溅区腐蚀防护效果很好的修复技术。

关键词: 桩腿; 防腐层; 修复; 自憎水; 三层包覆防护结构; 抗冰冲击

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)11-0123-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.019

Research and Application of Three-Layer Coating Protective Structure for Offshore Platform Pile Leg

ZHANG Yan-jun^{1,2}, HAN Wen-li^{1,2}, ZHANG Yi-gang^{1,2}, YANG Yao-hui^{1,2}, XIE Bei-bei^{1,2}, XU Zhong-ping^{1,2}

(1. CNPC Research Institute of Engineering Technology, Tianjin 300451, China; 2. Research Division of Anti-corrosion Coating and Thermal Insulation Structure, CNPC Key Tubular Goods Laboratory, Tianjin 300451, China)

ABSTRACT: The work aims to research and develop a kind of anticorrosive coating repair system in splash zone of offshore platform pile leg which can be constructed in the seawater environment, i.e., a three-layer coating structure and its construction method. A material system and construction methods suitable to repair the anticorrosive coating were developed by material research, product production research, property evaluation as well as field application and testing. Hydrophobicity of the hydrophobic sealing oil of the three-layer coating protective structure was 98.4%, while tensile strength of the anticorrosion belt was up to 18.6 MPa and elongation at break was up to 21.6%; tensile strength of the protective sleeve was up to 31.8 MPa, elongation at break was up to 760% and UV-resistant duration was up to 3000 h. The three layer coating protection system could resist the once-in-a-century ice impact in Bohai Gulf. The three-layer coating protective materials developed by our lab turned to be an excellent repairing technology and be capable of protecting offshore platform pile leg and other similar structures in splash zone from corrosion. In addition, the materials met the construction and anti-corrosion requirements of marine environment in addi-

收稿日期: 2016-04-22; 修订日期: 2016-06-21

Received: 2016-04-22; Revised: 2016-06-21

作者简介: 张彦军 (1977—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事石油设施腐蚀与防护研究

Biography: ZHANG Yan-jun(1977—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: corrosion and protection of oil facilities.

tion to the corrosion protection and ice impact resistance requirements of offshore platform pile leg in the splash zone.

KEY WORDS: pile leg; anticorrosive coating; repair; hydrophobic; three-layer coating protective structure; ice impact resistance

海洋平台桩腿在设计时要求耐用 20~30 年,但海洋环境腐蚀严酷,特别是波浪飞溅区,由于周而复始地受海水的冲击和浸泡以及干湿交替,桩腿飞溅区的腐蚀冲击最为严重,飞溅区的腐蚀破坏往往会导致平台钢结构设施由于安全性降低而提前报废,缩短了整个平台的使用寿命。

本文研究出一种可在现场实施的海洋平台桩腿飞溅区防腐层修复体系——三层包覆防护结构和施工方法,并在渤海湾的海洋平台桩腿进行了现场应用,通过近 2 年的现场应用,表明该防护体系能够满足海洋平台桩腿飞溅区修复的要求。

1 三层包覆防护结构材料

海洋平台桩腿飞溅区的修复技术应满足四个要求:1)表面处理简单;2)材料安全环保;3)保护时间长效;4)可现场施工。根据这个趋势并借鉴其他防护方式,新研制的三层包覆修复结构包括:底层-自憎水密封油、中间层-防腐带、外护层-防护套。自憎水密封油具有良好的憎水效果,涂敷于经过处理的桩腿表面,防腐带周向缠绕在管桩表面,防护套为轴向单侧开口法兰结构,防护套周向长度为管桩圆周长的 90%,安装时用液压扳手沿管桩圆周拉紧使法兰盘贴合,通过法兰盘上的螺栓孔,用不锈钢自锁螺栓固定,三层包覆防护结构见图 1。

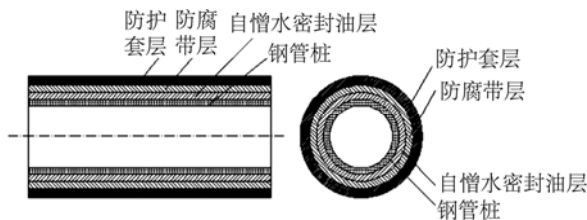


图 1 三层包覆防护结构示意图
Fig.1 Three-layer coating protection structure

1.1 自憎水密封油

采用盐雾腐蚀试验和电化学阻抗试验相结合的方法,进行了自憎水密封油的基础油脂及防锈

剂、填充剂等材料研究,形成了自憎水密封油配方。主要性能指标见表 1。

表 1 自憎水密封油主要性能指标
Tab.1 Main performance indexes of the self hydrophobic water seal oil

序号	检测项目	检测方法	检测结果
1	固体含量	SY/T0417	100%
2	憎水率	GB/T10299	98.4%

1.2 防腐带

采用无纺布作为防腐带的载体,利用浸胶机将研制的自憎水密封油压浸在无纺布两侧,形成防腐带产品。采用相同制备工艺,相同载体,制备了三种不同自憎水密封油(分别编号为 I、II、III)类型的防腐带(分别编号为 1、2、3)产品。考察研究防腐带的吸水率、拉伸强度和断裂伸长率三个指标。吸水率体现无纺布载体与自憎水密封油压制后整体的吸水情况,吸水率测试参照 HG/T 3856—2006《绝缘漆漆膜吸水率测定法》进行,结果见图 2,图 2 中 1、2、3 图标表示 1、2、3 号的防腐带产品。拉伸强度和断裂伸长率体现防腐带的拉伸变形性能,拉伸强度和断裂伸长率测试参照 GB/T 1040.2—2006《塑料拉伸性能的测定第 2 部分:模塑和挤塑塑料的试验条件》进行。

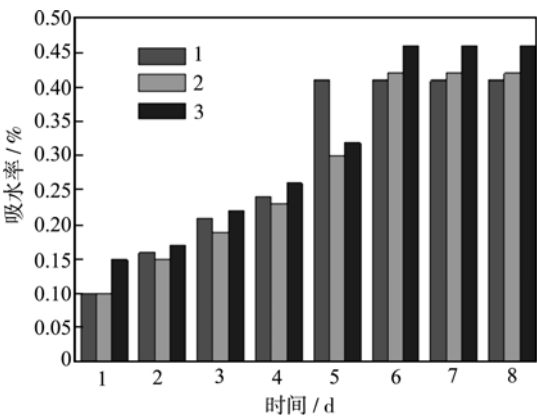


图 2 防腐带吸水率
Fig.2 Water absorption rate of corrosion zone

表 2 防腐带拉伸强度和断裂伸长率
Tab.2 Tensile strength and elongation at break

防腐带编号	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
1 [#]	18.4	21.6
2 [#]	18.6	21.4
3 [#]	17.9	19.5

三种防腐带的吸水率都小于 0.5%，拉伸强度和断裂伸长率指标均满足施工要求，但从三个指标综合考虑，1[#]、2[#]防腐带较好，在后续试验中继续对 I[#]、II[#]自憎水密封油及相应的 1[#]、2[#]防腐带进行研究。

1.3 防护套

防护套材质为高密度聚乙烯，制备了不同配方的高密度聚乙烯样品（编号为 a、b、c、d、e）。首先进行拉伸强度和断裂伸长率测试（参照 GB/T 1040.2），其后选择物理性能试验结果较好的 c、d 样品进行抗紫外光老化测试（以下简称抗 UV 测试，参照 ASTM G-154《非金属材料暴露于荧光设备的紫外线中的测试方法》进行），结果分别见表 3—4。

表 3 聚乙烯物理性能测试
Tab.3 Physical properties of polyethylene

聚乙烯编号	方向	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
a	轴向	31.7	712
	周向	31.4	708
b	轴向	30.4	732
	周向	30.6	736
c	轴向	32.9	756
	周向	30.8	760
d	轴向	31.2	752
	周向	30.2	748
e	轴向	31.6	708
	周向	31.8	690

表 4 聚乙烯抗 UV 性能测试
Tab.4 Polyethylene anti UV performance test

聚乙烯 编号	试验 名称	方向	UV辐 照前	UV辐照			
				500 h	1000 h	2000 h	3000 h
c	拉伸强度 /MPa	周向	31.6	31.6	30.4	26.4	24.6
		轴向	31.8	30.2	30.0	28.2	25.2
	断裂伸长 率/%	周向	756	748	744	624	612
		轴向	760	744	742	636	620
d	拉伸强度 /MPa	周向	32.1	30.6	30.2	24.6	22.1
		轴向	31.6	31.2	31.0	22.4	21.2
	断裂伸长 率/%	周向	746	744	738	620	610
		轴向	748	742	740	632	624

根据物理性能和抗紫外光老化性能测试结果，确定以 c、d 配方制作外护套。

1.4 三层包覆防护结构的样品管制作

通过研究自憎水密封油、防腐带及外防护套，研制出三层包覆防护系统的材料体系，经试验形成相应的施工方法和技术。根据前文研究结果，选取性能较好的 I[#]、II[#]自憎水密封油，1[#]、2[#]防腐带和 c、d 外护套，制备四种结构的三层包覆防护样品管，具体防护结构构成见表 5，样品管管体采用 Q235 无缝管、管径为 219 mm、壁厚 6 mm，每种结构制作样品管 5 支。

表 5 三层包覆防护样品管结构
Tab.5 Three-layer coating protective tube structure

样品管 代号	自憎水 密封油	防腐带	防护套	
			聚乙烯种类	厚度/mm
A	I [#]	1 [#]	c	2
B	II [#]	2 [#]	d	2
C	I [#]	1 [#]	d	2
D	II [#]	2 [#]	c	2

2 三层包覆防护结构体系性能评价

对 A、B、C、D 四种结构的样品管进行高温高压耐水密闭性试验。考虑到冰冲击性是重点考察防护套的防护性能，故抗冰冲击性能试验仅对 A、B 两种结构的样品管进行评价。

2.1 三层包覆防护结构的高温高压耐水密闭性

采用自制的高温高压耐水密闭性装置进行高温高压耐水密闭性试验，考察三层包覆体系样品的密封防腐性能，结果见表 6。由表 6 可以看出，三层包覆防护结构体系在高温高压下仍具有较好的密封防腐性能。

表 6 高温高压耐水密闭试验结果
Tab.6 Test results of high temperature and high pressure water resistance

样品管代号	试验结果	试验条件
A	无鼓泡、无剥离，膜下无水	介质为人造海水， 温度50℃， 压力0.5 MPa， 时间28 d
B	无鼓泡、无剥离，膜下无水	
C	无鼓泡、无剥离，膜下无水	
D	无鼓泡、无剥离，膜下无水	

2.2 三层包覆防护结构冰冲击试验

为了考察三层包覆防护结构体系的抗冰能力,进行了冰冲击冰磨蚀的室内模型比尺试验,比尺为 1:5。

2.2.1 试验路线

平整冰盖对三层防护系统的冲击作用体现为两种模式:一是冰盖冲击过程中对材料形成的整体挤压作用,这种作用模式将造成材料的整体变形,进而可能导致防护材料的整体撕裂破坏;另一种是冰盖在桩柱前发生连续破坏的过程中,对防腐防护材料形成持续不断的磨蚀作用,这种作用将体现为一种长期的累积效应,进而可能导致材料局部的磨损破坏。本试验将针对上述两种形式的作用展开系统研究。试验路线见图 3。

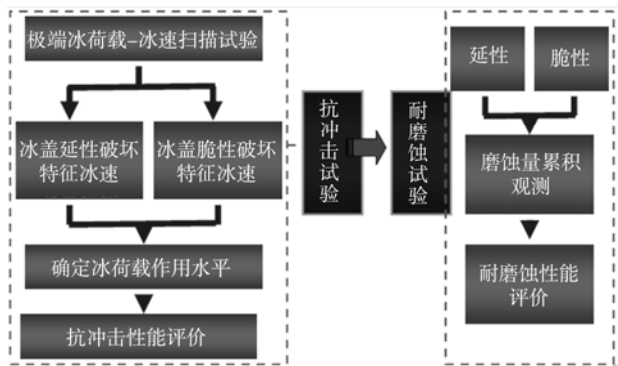


图 3 冰冲击试验路线
Fig.3 Ice impact test road map

2.2.2 试验参数

A、B 两种结构的样品管各三支,冰晶类型为尿素冰(与天然海冰生长结构一致)。模拟渤海湾曹妃甸冰区,模拟冰厚为渤海湾曹妃甸冰区 100 年一遇,44.9 cm。冰速在 0.1~1.4 m/s 范围内选择 2~3 个点,单一冰速下磨蚀累计时间 ≥ 10 h。

2.2.3 冰冲击试验数据及结论

2.2.3.1 抗冲击试验分析

经冰速扫描试验,当冰速 $v=150$ mm/s 时,A、B 两桩所受冰力均达到最大值,分别达到 8.84 kN 与 9.38 kN。在该冰速下,A、B 两种防护材料在冰盖冲击下的变形量也达到最大值,分别为 0.1 mm 与 0.7 mm。

由于原型中 A、B 两种防护材料的最外层防护套厚度为 2 mm,在抗冲击试验模型比尺为 1:5 的情况下,A 防护材料的实际变形为 0.4 mm,具

有较好的抗冲击性能。而 B 防护材料在冰盖的冲击作用下会发生较大的变形,其实际变形为 3.5 mm,超过防护套层的厚度,可能造成防护套的撕裂破坏。因此 B 防护材料的抗冲击性能无法承受渤海湾百年一遇的冰情。耐磨蚀试验仅对 A 样品管进行。

2.2.3.2 耐磨蚀试验分析

在耐磨蚀试验中,发现了两种不同磨蚀机理下的局部磨损现象,分别为平整冰正面冲击磨蚀造成的划痕和冰盖边缘啃蚀效应造成的凹痕,见表 7。其中,划痕的增长速率随磨蚀时间小幅增大,最大磨损深度为 0.02 mm,对累积磨蚀量的影响较小。

表 7 两类不同磨蚀机理下的磨蚀情况
Tab.7 Abrasion under two different abrasion wear mechanisms

磨蚀类型	最大磨蚀深度 /mm	磨蚀体积 /mm ³	占累积磨蚀总量/%
划痕	0.02	0.18	3.00
凹痕(1号)	0.42	4.36	72.74
凹痕(2号)	0.13	0.73	12.13
凹痕(3号)	0.13	0.73	12.13

当大面积冰盖在管桩前端发生大面积劈裂时,在冰盖边缘的啃蚀效应下,防护层表面开始出现凹痕,在测试时间内共出现 3 个凹痕,其中 1 号凹痕最大,最大磨损深度为 0.42 mm。凹痕出现造成的磨损量很大,对累积磨蚀量起主导作用。且防护材料上的最大冰力随累积磨蚀量的增加而小幅增大。

通过耐磨蚀试验,绘制了累积磨蚀量曲线,见图 4,累积磨蚀量描述了防护材料经受两种不同冰磨蚀机理共同作用下的整体磨损水平。由累积磨蚀量曲线可知,A 防护材料的整体耐磨蚀性能较好,尤其是在平整冰正面冲击的磨蚀作用下具有良好的耐磨蚀性能。

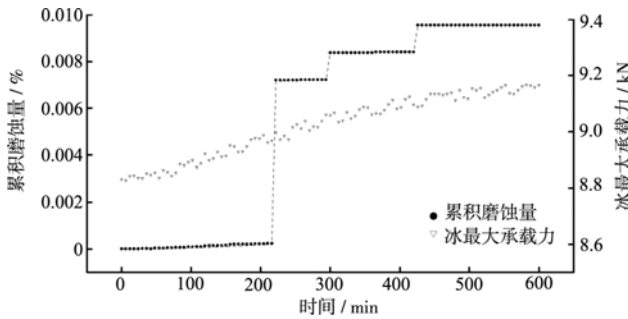


图 4 累积磨蚀量和冰最大承载力曲线
Fig.4 Maximum bearing capacity curve of cumulative erosion and glacial amount

通过冰冲击试验和耐磨蚀试验, A 样品管防护结构, 即 I[#]自憎水密封油、1[#]防腐带、c 防护套结构的三层包覆防护材料体系具有较好的抗冰冲击性能, 能够承受渤海湾百年一遇的冰冲击和冰磨蚀。

3 现场应用

研制的三层包覆防护结构, 采用 A 结构样品管防护结构材料, 在渤海湾某油田采油平台桩腿进行了现场应用。桩腿直径在 1000 mm 左右。

3.1 桩腿腐蚀情况

钢管桩原采用涂层防腐防护方式。经过多年的服役, 钢管桩飞溅区潮差区出现了较大范围的防腐层脱落和管桩腐蚀, 见图 5。



图 5 桩腿腐蚀情况
Fig.5 Corrosion of pile leg

3.2 现场试验的效果检查

施工过程按照施工作业指导书进行。现场施工结束后, 共进行了 2 次外观检查, 1 次破坏性检查。经过第一个冰期后, 检查了三层包覆防护结构的外观情况, 所有三层包覆结构外观良好, 无海生物附着, 两端依然有底油存在, 不锈钢螺栓连接牢固, 见图 6。



图 6 一个冰期后桩腿外观情况
Fig.6 Appearance of legs in a post glacial period

经过 2 个冰期后, 检查了三层包覆防护结构的外观情况, 所有三层包覆结构外观良好, 无海生物附着, 不锈钢螺栓连接牢固, 两端依然有底油存在, 见图 7。



图 7 二个冰期后桩腿外观情况
Fig.7 The appearance of legs after two ice ages

三层包覆防护结构的破坏性检测结果显示: 三层包覆结构外观良好, 表面完整, 无海生物附着, 不锈钢螺栓连接牢固; 剖开防护套层后, 钢桩表面防腐底油、防腐带仍 100%包裹覆盖, 钢桩表面无水、无腐蚀, 见图 8。



图 8 破坏性检测
Fig.8 Destructive testing

4 结论

- 1) 研制的用于桩腿飞溅区修复的三层包覆防护结构具有材料安全环保、可水下施工、施工工艺简单、防护体系整体密封性好、防水、抗渗、防海生物附着、抗渤海湾百年一遇冰冲击等特性。
- 2) 经过 2 个冰期的应用试验, 三层包覆结构外观良好、表面完整、无海生物附着, 不锈钢螺栓连接牢固, 无腐蚀迹象, 表明该技术可以满足海洋环境桩腿的腐蚀防护要求。

参考文献

[1] 张朝生. 日本防腐蚀钢管桩 30 年海水腐蚀试验分析

- [J]. 焊管, 2008, 31(4): 88—89.
- ZHANG Chao-sheng. Corrosion Test Analysis of 30 Years of Japanese Anti-corrosive Steel Pipe Piles[J]. Welded Pipe and Tube, 2008, 31(4): 88—89.
- [2] 侯保荣. 钢铁设施在海洋浪花飞溅区的腐蚀行为及其新型包覆防护技术[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(4): 174—176.
- HOU Bao-rong, Corrosion Behavior of Iron and Steel Facilities in Splash Zone of Sea Spray and Its New Coating Protection Technology[J]. Corrosion & Protection, 2007, 28(4): 174—176.
- [3] HOU Bao-rong, DUAN Ji-zhou, ZHANG Jing-lei. Tests for Hanging Steel Specimens in Seawater[J]. MP, 2002, 41(10): 45—49.
- [4] COLE B E, HIGASHI R E. Micromachined Pixel Arrays Integrated with CMOS for Infrared Applications[J]. IEEE, 2000, 366: 63—64.
- [5] 赵煜. 钢管桩滨海码头防腐体系的二次修复[J]. 材料开发与应用, 2004, 19(6): 26—29.
- ZHAO Yi. The Two Restoration of the Corrosion Protection System of Steel Pipe Piles in the Coastal Port[J]. Material Development and Application, 2004, 19(6): 26—29.
- [6] 张启富, 郝晓东. 钢结构腐蚀防护现状和发展[J]. 中国建筑金属结构, 2006(9): 22—26.
- ZHANG Qi-fu, HAO Xiao-dong. Current Status and Development of Corrosion Protection for Steel Structures. China building metal structure, 2006, 9: 22—26.
- [7] 侯保荣. 海洋钢结构浪花飞溅区腐蚀控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- HOU Bao-rong. Corrosion Control Technology of Marine Steel Structure Spray Splash Zone[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [8] 高宏飙, 陈强, 王静, 等. PTC 复层矿脂包覆防腐技术在海上风电的应用[J]. 中国涂料, 2013, 28(12): 39—43.
- GAO Hong-biao, CHEN Qiang, WANG Jing, et al. Anti-corrosion Technology Application of Petrolatum Tape and Covering on Offshore Wind Farm[J]. China Coatings, 2013, 28(12): 39—43.
- [9] 刘树奎, 陈韬. 水位变动区钢管桩涂层修复技术经济比选[J]. 中国港湾建设, 2012(2): 100—102.
- LIU Shu-kui, CHEN Tao. Technical and Economic Comparison of Repair of Steel Pipe Pile Coating in Tidal Zones[J]. China Harbour Engineering, 2012(2): 100—102.
- [10] 张坚彬, 杨小刚. 复层矿脂包覆技术在滨海电厂钢结构关键部位的防护应用[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(11): 896—899.
- ZHANG Jian-bin, YANG Xiao-gang. Application of Multilayer Petrolatum Coated Anti-corrosion Technology to Key Parts of Steel Structure in a Coastal Power Plant[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(11): 896—899.
- [11] 冯庆斌. XG 包覆防腐方案在天津 LNG 项目螺栓上的应用[J]. 石油和化工设备, 2014, 17(1): 57—59.
- FENG Qing-bin. Application of XG Coating on the Bolt of Tianjin LNG Project[J]. Petroleum and Chemical Equipment, 2014, 17(1): 57—59.
- [12] 李亚坤, 王佳, 胡凡, 等. 薄液层下金属腐蚀行为研究方法的进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(6): 423—426.
- LI Ya-kun, WANG Jia, HU Fan, et al. Progress of Research Methods of Metal Corrosion under Thin Electrolyte Film[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 119(6): 423—426.
- [13] WALTER G W. Laboratory Simulation of Atmospheric Corrosion by Electrochemical Mass Loss Comparisons[J]. Cor Sci, 1991, 32(12): 1331.
- [14] Federal Highway Administration. Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States[R]. FHWA—RD—01—156, 2002.
- [15] HOU Bao-rong, ZHANG Jie, DUAN Ji-zhou, et al. Corrosion of Thermally Sprayed Zinc and Aluminum Coatings in Splash and Tidal Zone Conditions[J]. CEST, 2003, 38(2): 157—160.