

新型抗穴蚀涂料的研究进展

杨玉伟, 王 轩, 余红伟, 徐朝阳

(海军工程大学基础部化学与材料教研室, 湖北 武汉 430033)

[摘要] 概述了穴蚀的形成原因和防护措施;介绍了采用热喷涂、堆焊、化学镀、等离子表面技术制备的不同种类金属涂层的抗穴蚀情况;重点评述了环氧树脂系列、聚氨酯系列、超高分子量聚乙烯等有机涂层在抗穴蚀领域的研究进展,并与金属涂层做了对比;综述了陶瓷有机复合涂层的抗穴蚀效果;比较了几种涂层的优缺点,并对其未来研究方向进行了展望。

[关键词] 穴蚀;有机涂层;环氧树脂;聚氨酯;超高分子量聚乙烯;金属涂层

[中图分类号] TG174.44 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0110

[文章编号] 1001-1560(2022)04-0167-05

Research Progress of New Cavity-Resistant Coatings

YANG Yu-wei, WANG Xuan, YU Hong-wei, XU Chao-yang

(Department of Chemistry and Materials, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The causes and protective measures of cavitation erosion were summarized. The cavitation corrosion resistance of different kinds of metal coatings prepared by thermal spraying, surfacing, electroless plating and plasma surface technology was introduced. Then, the research progress of organic coating such as epoxy resin series, polyurethane series, ultra high molecular-weight polyethylene coatings in the field of cavitation resistance was reviewed emphatically and compared with metal coatings. The anti-cavitation effect of ceramic organic composite coatings was reviewed. The advantages and disadvantages of several kinds of coatings were compared. Finally, the future research direction was prospected.

Key words: cavitation erosion; organic coatings; epoxy resin; polyurethane; ultra high molecular-weight polyethylene; metal coatings

0 前言

舰船在水中航行时,由于高速水流的冲击,船底板、泵喷管内壁、螺旋桨桨叶以及桨叶周边的零部件极易产生空化从而导致穴蚀,发生穴蚀的部件呈现蜂窝状坑槽,遭到破坏。产生穴蚀的主要原因是:多相流体高速运动,液体内部压力分布不均导致内部形成压力差,产生气泡,气泡溃灭时形成不断冲击材料表面的冲击波^[1]。研究发现,防止穴蚀可以从3方面入手:(1)从防止穴蚀产生,延缓穴蚀速度入手,首先对空化进行抑制,切断产生穴蚀的源头;(2)对穴蚀进行防护,尽可能降低穴蚀速度,延长材料完整性时间;(3)从选材入手,研制耐穴蚀金属材料以及在表面涂装抗穴蚀涂料等。因为穴蚀的形成环境复杂多样^[2],新型材料的研发和制造成本高,所以研究人员更加倾向于从材料表面防护技术出发,既保护节约原有的贵重材料,又对易发生穴蚀损

坏的部件有针对性的防护^[3,4]。因此,近几年国内外学者分别从金属涂层和有机涂层2个方面进行了研究。

1 金属涂层及其制备技术研究进展

金属涂层主要是通过表面涂镀技术如热喷涂、堆焊、渗氮以及激光和等离子表面改性技术等^[3,5]在材料表面制得的,通过这层具有抗穴蚀作用的涂层可改善材料的抗穴蚀性能,减缓穴蚀的形成,满足工业需求。

1.1 热喷涂技术

近年来,热喷涂技术由于其对基体热影响小、变形小、生产效率高等特点,越来越广泛地被应用到各种过流金属部件的抗空蚀上。热喷涂技术可以在材料表面制成材料保护层和功能涂层,赋予材料本身没有的性能^[6]。热喷涂是通过热源或动力源,将线状或粉状涂层材料加热加速,形成熔化、半熔化或未熔化固态的高

[收稿日期] 2021-11-22

[通信作者] 王 轩(1986-),研究生,副高职,研究方向为船用非金属材料,电话:17786037224, E-mail:1069755331@qq.com

速粒子流,依次喷向基体,并在其上不断沉积形成具有抗穴蚀作用的涂层^[7]。其中 WC 基金属陶瓷涂层具有高硬度、高耐磨性,在航空航天、船舶、海洋等领域得到了广泛应用,特别是 WC-Co 纳米涂层使用较多^[8]。

石璠等^[9]通过超音速火焰(HVOF)喷涂工艺制备了几种具有微纳米结构的金属陶瓷复合涂层。通过测试比较发现:WC-12Co 纳米涂层中穴蚀坑小,数量多,分布广;气体燃料 HVOF 制备的 WC-10Co-4Cr(WCr)微米涂层穴蚀坑面积大,但分布少;液体燃料 HVOF 制备的 WCr 微米涂层表面无明显穴蚀坑。主要原因是 WCr 微米涂层中加入 Cr 提高了涂层粘结相的强度与抗电化学腐蚀性能,使得液体燃料 HVOF 制备的 WCr 涂层具有最优的抗穴蚀性能。孙丽雨等^[10]进一步将通过热喷涂技术 HVOF 制得的非晶金属(AM 涂层)和 WC-10Co-4Cr 涂层(WC 涂层)进行比较,试验结果表明:随着压裂液 KCl 浓度升高,AM 涂层的耐蚀性优于 WC 涂层;并且在试验过程中,AM 涂层和 WC 涂层出现了不同的穴蚀形式。AM 涂层的穴蚀损伤源自于表层孔隙恶化以及阶梯状断裂裂纹的扩展,致使涂层以层状剥离的形式发生损伤破坏;而 WC 涂层的穴蚀损伤则是由于表面颗粒脱落形成凹坑,密集凹坑相连致使表层大面积剥落。

1.2 堆焊技术

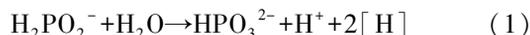
堆焊是利用焊接热源使基材表面与敷焊的材料之间形成熔化冶金,从而在基体表面敷上有特殊性能的物质。它的目的不是为了联接零件,而是借用焊接的手段在零件上堆敷 1 层或几层具备所希望性能的材料,以获得具有耐磨、耐热、耐蚀等特殊性能的熔敷层。Ni-Ti 合金具有超弹性,可用作抗穴蚀材料。人们通过堆焊技术制备 NiTi 堆焊涂层(NiTi-TIG),涂层致密且厚度可达毫米级别。经热处理后,NiTi 涂层材料具有良好的抗穴蚀性能^[11],但因其价格昂贵,工艺复杂困难,限制了其使用。

石振平等^[12]用堆焊法成功制备了厚度为 1.5 mm 的添加 Ni 过渡层的 NiTi 堆焊涂层(NiTi-Ni-TIG),表面致密且没有裂纹,这是因为 Ni 具有良好的塑性和变形能力,热膨胀系数在不锈钢和 NiTi 之间,可抑制焊接时裂纹的出现。与没有 Ni 过渡层的 NiTi-TIG 相比,NiTi-Ni-TIG 涂层中的硬脆相减少,试验结果表明,抗穴蚀性能强弱为:Ni-Ti 合金 > NiTi-Ni-TIG > NiTi-TIG > 不锈钢。NiTi-TIG 和 NiTi-Ni-TIG 的抗穴蚀性能均好于不锈钢。NiTi-Ni-TIG 的抗穴蚀性能较好,是因

为 Ni 掺入使得 NiTi-Ni-TIG 中的裂纹和硬脆相减少所致。

1.3 化学镀技术

化学镀使用范围广,适用于各种金属、半导体等,不受基体材料尺寸大小和形状的影响,并且可以得到均匀的镀层;特别是化学镀 Ni-P 镀层厚度均匀、结合牢固、有较高的硬度、较好的耐磨和耐腐蚀性,因此被广泛应用于石油化工、航空航天等领域^[13]。化学镀 Ni-P 镀层的机理如下[式(1)~(3)],在施镀过程中,次磷酸钠本身也被还原[如式(4)],使镍原子和磷原子共同沉积,形成 Ni-P 合金。



张红菊等^[14]采用化学复合镀的方法,在灰铸铁基体材料表面镀上 Ni-P 镀层,将试样放入温箱式电阻炉中进行热处理,在 20k 超声波穴蚀试验机上进行穴蚀试验,震幅为 50 μm ,试验结束后通过计算失重率分析试样的耐蚀性。结果显示:经化学镀镍后试样的失重率低于未镀试样。经热处理后,Ni-P 镀层具有较好的耐蚀性,相比于未镀试样耐蚀性提高 87%,相比于未热处理试样耐蚀性提高 39%。镀态时 Ni-P 镀层为非晶结构,具有较好的耐蚀性。分析认为 Ni-P 镀层结合牢固、有较高的硬度,从而保护了基体材料。

1.4 等离子表面改性技术

等离子表面改性技术是离子溅射除固态、液态和气态之外的第四态物质,即等离子态。在外界高能作用下,分子或原子被离解成阳离子及同等数量的阴离子或电子,这一总体称为等离子体。利用等离子体进行溅射的工艺称为等离子溅射。

丁红钦^[15]采用双阴极等离子溅射沉积工艺,在 304 不锈钢基体表面制备了 Cr_3Si 纳米涂层,通过 XRD、SEM、TEM、纳米压痕仪对其结构及性能进行了表征,结果显示涂层表面均匀致密,与基体结合强度高,并且 Cr_3Si 纳米涂层具有高硬度;并在水中进行了穴蚀试验和电化学性能测试,结果表明 Cr_3Si 纳米涂层的抗穴蚀性能优于不锈钢,电化学性能受穴蚀影响较小,具有良好的抗穴蚀性能。

2 有机抗穴蚀涂层研究进展

用于抗穴蚀的有机涂层主要包括环氧树脂系列、

聚氨酯系列以及其他有机涂层。在穴蚀过程特别是在海洋环境下的穴蚀过程中,有机涂层比金属涂层更具抗张强度和抗腐蚀性能。有机涂层不会因损伤而增加基体材料发生电化学腐蚀的可能性;同时由于其优良的弹性,不会因为材料的热胀冷缩而产生较大的破坏;并且有机涂层的施工难度小,成本也相对较低;正是因为这些优点才使得有机涂层在抗穴蚀领域应用更为普遍。

2.1 环氧树脂系列

环氧树脂是环氧乙烷经离子聚合形成的一种低分子量聚合物^[16]。大多数环氧树脂呈液态或者黏稠态,向其中加入固化剂后可形成交联的三维网状结构^[17]。然而一般的环氧树脂固化后交联密度大,内应力大,存在质脆、耐热性、耐疲劳性、柔韧性差等缺点^[18]。因此环氧树脂必须经增韧改性后使用,环氧树脂抗穴蚀涂层主要是在环氧树脂中掺入各种添加剂强化其抗穴蚀性能。

姜玉领等^[19]合成了聚邻甲基苯胺-纳米 SiO₂ 粒子,掺入环氧树脂形成复合纳米涂层,测得纳米涂层与缸套结合强度高达 43 MPa,结合牢固;利用振动气体穴蚀法研究纳米涂层的抗穴蚀性能,结果显示在表面有涂层样块的冲击深度 100 μm 的穴蚀所需时间为 875 min,未涂样块只需 486 min。可见复合纳米涂层能有效阻止穴蚀发生。杨润^[20]通过原位聚合法制备了聚脲甲醛包覆环氧树脂(E-51)与活性稀释剂正丁基缩水甘油醚(BGE)微胶囊,掺入 Q-301 环氧树脂中,通过冲蚀试验证实了该复合涂层的冲蚀性能良好。马凯文^[21]将水溶性高分子聚丙烯酰胺的水溶液通过油包水体系制得微胶囊,加入环氧树脂涂层中,与未加入微胶囊的环氧树脂涂层相比,其抗穴蚀性能显著提高,这种涂料廉价易获得,可成为将来大规模生产的防穴蚀涂料。

2.2 聚氨酯系列

聚氨酯是由多元醇化物、异氰酸酯和扩链剂经缩聚反应生成的,其主链由软段和硬段构成,硬段使聚氨酯具有刚性,软段使聚氨酯具有柔性。两者相互结合使得聚氨酯具有以下优点:硬度范围宽、抗冲击性能强、耐疲劳、抗蚀性强等。近几年,在隔热、防腐、舰船、建筑等领域广泛应用^[22]。

聚氨酯具有其它材料无法比拟的抗空蚀性能^[23]。冯建东等^[24]研究得出,随着聚氨酯构成中硬段含量逐渐增加,与氢键相关的振动峰明显增强,试样的伸长率降低,拉伸强度增加,100%定伸永久变形率增加,耐穴

蚀时间逐渐缩短。并且试样耐穴蚀时间与硬段含量之间并非呈线性关系,而是当硬段含量在 30%左右时表现出较好的耐穴蚀性能。Qiao 等人^[25]研究了一种疏水性聚二甲基硅氧烷基聚氨酯(Si-PU_x),其中羟丙基聚二甲基硅氧烷(H-PDMS)和聚丁二醇(PTMG)为混合软链段,以及 2,4-甲苯二异氰酸酯,1,4-丁二醇,三乙醇胺通过缩聚反应作为硬链段并研究其性能。空化磨损试验表明,随着 H-PDMS 含量的增加,Si-PU_x 涂层的抗穴蚀性不断提高,而随着 H-PDMS 含量的增加,Si-PU 的附着力降低。使用光学显微镜和三维轮廓仪观察了穴蚀试验后 Si-PU_x 涂层的表面。用 12.5%(质量分数)的 H-PDMS 沉积的 Si-PU_x 的累积质量损失仅为 2.96 mg,空化 80 h 后表面没有明显的孔洞和裂纹。结果表明,抗穴蚀性与涂层的耐水性,硬度,粘合强度和动态力学性能相关。与高强度环氧树脂相比,Si-PU_x 涂层似乎可以承受更长时间的抗穴蚀性。Zhang 等^[26,27]研究了一种疏水性氟化聚氨酯(FPU),通过用全氟烷基乙醇(TEOH-10)引入氟来改性二苯基甲烷-二异氰酸酯(MDI)并调节添加的 MDI 的剂量和时间来制备 CH₂OH 基团。耐水性试验表明,由于氟碳链(-CF₂CF₃)向材料表面迁移并形成了与疏水性较好的有机氟膜,FPU 的疏水性非常强。特别是当 TEOH-10 的摩尔用量为 MDI 的理论量的 0.3~0.5 时,FPU 的吸水率仅为 0.014 6%~0.018 2%,FPU 的高内聚压力保持在 10.31~10.79 MPa。试验表明,随着氟含量增加,FPU 的抗蚀性能不断提高,可作为防穴蚀涂层使用。

2.3 其他有机涂层

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)具有优异的物理、力学性能和耐磨性以及抗冲击性,是防弹衣的首选材料^[28]。但是高分子量的 UHMWPE 熔融态有着非常高的黏度,传统的注塑或挤出工艺无法加工。近期研究表明,在高速压实条件下,UHMWPE 新生粉末的烧结可以在非常短的时间内完成。

UHMWPE 烧结体具有优异的力学性能和良好的加工性能。研究表明^[28],某些柔顺材料具有很好的抗汽蚀性能,甚至可能超过某些金属。热效应在聚合物的抗汽蚀性能中起着重要作用,其熔融温度相对较低,在受到强烈空化冲击时可能发生局部熔融。Deplancke 等^[29]在流速约为 90 m/s 的流体力学隧道中对 2 种分子量分别为 0.6 mg/mol 和 10.5 mg/mol 的 UHMWPE 涂层的抗穴蚀性能进行研究,结果显示:分子量为 10.5 mg/mol 的 UHMWPE 具有比不锈钢更好的抗穴蚀性,

而分子量为 0.6 mg/mol 的 UHMWPE 具有与传统镍铝青铜合金相似的抗穴蚀性。但该涂层工艺复杂,仍需要进一步深入研究。

3 新型抗穴蚀复合涂层的进展

陶瓷材料具有优异的耐磨性、耐腐蚀性、耐高温等特点。人们在陶瓷涂层中引入有机物,制备了性能优良的陶瓷-有机复合涂层。Deng 等^[30] 研究报道了将真空压力浸渍环氧树脂制成喷涂陶瓷涂层的陶瓷/有机涂层。试验结果表明,与喷涂后的陶瓷涂层相比,陶瓷/有机涂层的硬度、致密性和内聚强度得到了极大的改善。环氧树脂完全填充了陶瓷涂层的缺陷,并有效地防止了海水地入侵,显著改善了陶瓷/有机涂层的抗气蚀侵蚀。早在 2018 年 Deng 等^[31] 制备了陶瓷-有机复合防穴蚀涂层,将环氧树脂引入等离子喷涂陶瓷涂层的孔隙和微裂纹中,获得了硬度、韧性、弹性回复、层状界面结合和抗穴蚀等综合性能优异的陶瓷-有机复合涂层。结果表明,环氧树脂的引入大大提高了其致密性和力学性能,涂层与金属之间的黏附性和耐冲击性均有显著提升。与纯陶瓷涂层相比,新型复合涂层具有更好的抗穴蚀性能,经 10 h 模拟穴蚀试验仍保持完整。陶瓷材料是近年来的研究热点,虽然性能优异,但是其成本较高、制备工艺复杂、对设备要求高,想要大规模生产使用,还需加大投入。

4 结 语

本综述详细介绍了抗穴蚀涂层的使用情况及研究进展。表面涂层防护技术是解决穴蚀问题极高效的措施,可对基体材料部件的表面性能(如力学性能,抗穴蚀性能等)进行强化,从而提高材料性能,显著延长使用寿命。更重要的是对于舰船等大型机械,抗穴蚀涂层的引入可大幅度提高使用年限,降低维护费用。金属涂层相比于有机涂层对基体材料形状、尺寸影响小,但存在工艺复杂、成本高的缺陷。新型复合材料兼有 2 种不同涂层的性能,综合性能优异,是未来发展的新方向。

[参 考 文 献]

[1] 罗 经. 穴蚀破坏行为与超声空化的特征研究[D]. 北京:机械科学研究总院, 2008.
LUO J. Research on cavitation failure behavior and ultrasonic cavitation characteristics [D]. Beijing: General Institute

of Mechanical Science research, 2008.

- [2] RYL J, WYSOCKA J, SLEPSKI P, et al. Instantaneous impedance monitoring of synergistic effect between cavitation erosion and corrosion processes [J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 203: 388-395.
- [3] 刘成龙, 林英英, 王玥霁, 等. 金属材料表面抗空蚀涂层的研究进展[J]. *材料导报*, 2011, 25(1): 127-131.
LIU C L, LIN Y Y, WANG Y J, et al. Progress in Coatings on the Surface of Metals for Anti-cavitation Corrosion [J]. *Materials Review*, 2011, 25(1): 127-131.
- [4] 刘秀生, 代清华, 汪 洋, 等. 抗空泡腐蚀涂层的研究及部分进展: 第 19 届全国涂料涂装及表面保护会议论文集 [C]. 重庆: 中国腐蚀与防护学会, 中国表面工程协会, 2016.
LIU X S, DAI Q H, WANG Y, et al. Research and partial progress of cavitation corrosion resistant coatings; Proceedings of National Conference on Coating and Surface Protection [C]. Chongqing: Chinese society of corrosion and protection; Chinese Surface Engineering Association, 2016.
- [5] 崔 珊. 金属材料表面抗空蚀涂层的研究进展[J]. *中国金属通报*, 2018(11): 68.
CUI S. Research progress of cavitation resistance coatings on metal materials [J]. *China Metal Bulletin*, 2018(11): 68.
- [6] VARDELLE A, MOREAU C, AKEDO J, et al. The 2016 thermal spray roadmap [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(8): 1 376-1 440.
- [7] 李长久. 热喷涂技术应用及研究进展与挑战[J]. *热喷涂技术*, 2018, 10(4): 1-22.
LI C J. Applications, Research Progresses and Future Challenges of Thermal Spray Technology [J]. *Thermal Spraying Technology*, 2018, 10(4): 1-22.
- [8] WU Y P, HONG S, Zhang J F, et al. Microstructure and cavitation erosion behavior of WC - Co - Cr coating on 1Cr18Ni9Ti stainless steel by HVOF thermal spraying [J]. *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, 8(32): 21-26.
- [9] 石 璁, 丁 翔, 胡一鸣, 等. WC 基涂层材料和制备工艺对其组织结构与性能的影响[J]. *热喷涂技术*, 2015, 7(2): 39-45.
SHI J, DING X, HU Y M, et al. Effect of WC Based Coating Materials and Fabrication Technology on the Structures and Properties [J]. *Thermal Spraying Technology*, 2015, 7(2): 39-45.
- [10] 孙丽丽, 王尊策, 王 勇. AC-HVAF 非晶和金属陶瓷涂层在压裂液中空蚀行为研究[J]. *材料导报*, 2017, 31(16): 89-93.

- SUN L L, WANG Z C, WANG Y. Cavitation Corrosion Mechanism of AC-HVAF Sprayed Amorphous Metallic Coatings and Cermet Coatings in the Hydraulic Fracturing Fluid [J]. *Material Review*, 2017, 31(16):89-93
- [11] 张志萍, 周勇, 张健. 超音速电弧喷涂制备镍钛涂层的空蚀性能[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(6):107-109.
- ZHANG Z P, ZHOU Y, ZHANG J. Cavitation Properties of NiTi Coating Deposited by Supersonic Arc Spraying[J]. *Hot Working Process*, 2012, 41(6):107-109.
- [12] 石振平, 王政彬, 郑玉贵. 镍过渡层对镍钛堆焊涂层空蚀的影响:第十届全国腐蚀大会摘要集[C]. 北京:中国工程院, 中国腐蚀与防护学会, 2019.
- SHI Z P, WANG Z B, ZHENG Y G. Effect of nickel transition layer on cavitation corrosion of nickel titanium surfacing coating: Abstract Collection of the 10th National Congress on Corrosion [C]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, Chinese Society of Corrosion and Protection, 2019.
- [13] 刘冰洋, 周根树, 任颖, 等. 镀层厚度对铝基化学镀镍磷导电性和耐蚀性的影响[J]. *表面技术*, 2020, 49(6):276-283.
- LIU B Y, ZHOU G S, YEN Y, et al. Effect of Coating Thickness on Conductivity and Corrosion Resistance of Electroless Ni-P on Aluminum Alloy [J]. *Surface Technology*, 2020, 49(6):276-283.
- [14] 张红菊, 徐超, 王勇. 灰铸铁气缸套表面 Ni-P 涂层的组织结构及抗穴蚀性研究[J]. *内燃机与配件*, 2017, 60(3):120-122.
- ZHANG H J, XU C, WANG Y. Study on Microstructure and Cavitation Resistance of the Ni-P Plating of Gray Cast Iron Cylinder Liner [J]. *Internal Combustion Engines and Accessories*, 2017, 60(3):120-122.
- [15] 丁红钦. 高速水润滑滑动轴承材料及其表面改性层的空蚀性能研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- DING H Q. Study on cavitation and corrosion performance of high-speed water lubricated plain bearing materials and their surface modified layers [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [16] MAKSYM P, MAGDALENA T, DZIENIA A, et al. Enhanced Polymerization Rate and Conductivity of Ionic Liquid-Based Epoxy Resin [J]. *Macromolecules*, 2017, 50(8):3262-3272.
- [17] ZHANG J H, KONG Q H, WANG D Y. Simultaneously improving the fire safety and mechanical properties of epoxy resin with Fe-CNTs via large-scale preparation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 15(8):6376-6386.
- [18] 王涵, 张谦, 毕治功. 环氧树脂及其在建筑地坪涂料中的应用[J]. *化工科技*, 2019, 27(2):74-78.
- WANG H, ZHANG Q, BI Z G. Epoxy resin and its application in building floor coatings [J]. *Chemical Technology*, 2019, 27(2):74-78.
- [19] 姜玉领, 郭进京, 赵慧. 高强度纳米涂层气缸套的制备及其抗穴蚀性能的研究[J]. *内燃机与配件*, 2018(23):12-14.
- JIANG L Y, GUO J J, ZHAO H. Preparation and Cavitation Erosion Resistance of High Strength Nanocoating Cylinder Liner [J]. *Internal Combustion Engines and Accessories*, 2018(23):12-14
- [20] 杨润. 微胶囊/环氧树脂复合材料的冲击冲蚀特性研究[D]. 长沙:湖南科技大学, 2017.
- YANG R. Impact erosion characteristics of microencapsulation/epoxy resin composites [D]. Changsha, Hunan University of Science and Technology, 2017.
- [21] 马凯文, 王源升, 王轩, 等. 自修复抗穴蚀微胶囊的制备及性能表征[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(7):62-68.
- MA K W, WANG Y S, WANG X, et al. Preparation and Characterization of Anti-Cavitation Microcapsules [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2019, 35(7):62-68.
- [22] 乔兴年. 聚氨酯弹性体涂层的制备及其抗空蚀性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2019.
- QIAO X N. Preparation of polyurethane elastomer coatings and their cavitation resistance [D]. Haerbin: Haerbin Engineering University, 2019.
- [23] 王庆书, 吴定平, 周峰峰, 等. 聚氨酯在水轮机抗空蚀运用中的探讨[J]. *水电与新能源*, 2018, 32(3):18-21.
- WANG Q S, WU D P, ZHOU F F, et al. Application Prospect of Polyurethane in the Cavitation Protection of Hydro-turbine Units [J]. *Hydropower and New Energy*, 2018, 32(3):18-21.
- [24] 冯建东, 齐育红, 杨帆, 等. 硬段含量对 TDI-BDO-PPG 水性聚氨酯涂层穴蚀性能的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(10):9-14.
- FENG J D, QI Y H, YANG F, et al. Effects of Hard-segment Content on Cavitation Property of TDI-BDO-PPG Waterborne Polyurethane Coating [J]. *Surface Technology*, 2017, 46(10):9-14.
- [25] QIAO X N, CHEN R R, ZHANG H S, et al. Outstanding cavitation erosion resistance of hydrophobic polydimethylsiloxane-based polyurethane coatings [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(25):47668.

- ical Industry, 2020, 49(10): 62-65.
- [22] 刘薇, 王佳. 海洋浪溅区环境对材料腐蚀行为影响的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(6), 504-512.
LIU W, WANG J. Environmental Impact of Material Corrosion Research Progress In Marine Splash Zone[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2010, 30(6), 504-512.
- [23] 侯保荣, 西方笃, 水流微. 钢材在海水—海气交换界面区的腐蚀行为[J]. 海洋与湖沼. 1995, 26(5): 514-519.
HOU B R, XI F D, SHUI L C. Atsushi Nishikata, Tooru Tsuru. Corrosion behavior of steel in seawater air sea exchange interface [J]. Oceans and Lakes, 1995, 26(5): 514-519.
- [24] 潘德强, 洪定海, 郑恩慧. 华南海港钢筋混凝土码头锈蚀破坏调查报告[R]. 广州:交通部四航所, 南京水利科学研究所, 交通部四航局三处, 1981.
PAN D Q, HONG D H, ZHENG E H. Investigation report on corrosion damage of reinforced concrete Wharf in South China seaport[R]. Guangzhou, the fourth navigation Institute of the Ministry of communications, Nanjing Institute of water conservancy science, the third division of the fourth Navigation Bureau of the Ministry of communications, 1981.
- [25] 佚名. 海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断研究报告[R]. 广州:中国交通建设股份有限公司, 中交四航工程研究院有限公司, 2009.
ANON. Research Report on durability life prediction and health diagnosis of concrete structures in seaport engineering [R]. Guangzhou: China Communications Construction Co., Ltd., China Communications fourth Navigation Engineering Research Institute Co., Ltd., 2009.
- [26] WATANABE E, WANG C M, UTSUNOMIYA T, et al. Very large floating structures: applications, analysis and design[J]. CORE Report, 2004(2): 104-109.
- [27] 翁镭, 吴红艳, 兰亮云, 等. 耐海水腐蚀用铁素体基低碳高钛钢的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(11): 1 568-1 573.
WENG L, WU H Y, LAN L Y, et al. Study on Seawater Corrosion Resistant Ferrite Matrix High-Ti Steel[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2019, 40(11): 1 568-1 573.
- [28] 王小燕, 曹国良. 几种典型耐海水钢耐点蚀性能的比较[J]. 全面腐蚀控制, 2014(2): 63-67.
WANG X Y, CAO G L. Comparative Studies on Resistance against Pitting Corrosion of Several Seawater Resistance Steels[J]. Total Corrosion Control, 2014(2): 63-67.
- [29] 顾伟伟, 官耀华, 张华, 等. 海洋平台潮差段防腐涂装技术研究与应用[J]. 石油工程建设, 2014, 40(2): 27-30.
GU W W, GUAN Y H, ZHANG H, et al. Research and application of anti-corrosion coating technique in tidal zone of offshore jacket platform [J]. Petroleum Engineering Construction, 2014, 40(2): 27-30.
- [30] 王在峰, 宋积文, 陈胜利, 等. 某LNG码头灌注桩飞溅区用防蚀膏的性能[J]. 表面技术, 2016, 45(5): 194-200.
WANG Z F, SONG J W, CHEN S L, et al. Performance of Anticorrosion Greases Used for Splash Zone in Filling Piles of a LNG Wharf [J]. Surface Technology, 2016, 45(5): 194-200.
- [31] 潘杰, 侯保荣, 刘佳利, 等. PTC 矿脂包覆防腐蚀技术在国内的应用进展[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(12): 1 170-1 173.
PAN J, HOU B R, LIU J L, et al. Advances in Application of Petrolatum Tape Cover Anticorrosion Technology in China [J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(12): 1 170-1 173. [编校:董雪]
- +++++
- (上接第 171 页)
- [26] ZHANG R Z, REN Y Y, YAN D K, et al. Synthesis of hydrophobic fluorinated polyurethanes and their properties of resistance to cavitation [J]. Progress in Organic Coatings, 2017, 104:11-19.
- [27] 张瑞珠, 卢伟, 严大考, 等. 疏水性含氟聚氨酯的合成及其耐穴蚀磨损性能的研究[J]. 高分子学报, 2015, 11(7):808-818.
ZHANG R Z, LU W, YAN D K, et al. Cavitation Erosion Resistant Hydrophobic Fluorinated Polyurethane [J]. Acta Polymerica Sinica, 2015, 11(7):808-818.
- [28] FU J, GUALI B W, LOZYNSKY A J, et al. Ultra high molecular weight polyethylene with improved plasticity and toughness by high temperature melting[J]. Polymer, 2010, 51(12): 2 721-2 731.
- [29] DEPLANCKE T, LAME O, CAVAILLE J Y, et al. Outstanding cavitation erosion resistance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) coatings [J]. Wear, 2015:328-329: 301-308.
- [30] DENG W, AN Y L, ZHAO X Q, et al. Cavitation erosion behavior of ceramic/organic coatings exposed to artificial seawater [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 399: 126 133.
- [31] DENG W, HOU G L, LI S J, et al. A new methodology to prepare ceramic-organic composite coatings with good cavitation erosion resistance [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 44:115-119. [编校:董雪]