

# 海水抽水蓄能机组过流部件表面电弧喷涂涂层性能研究

刘玉鑫<sup>1,2</sup>, 葛光男<sup>1,3,4</sup>, 吴双杰<sup>5</sup>, 贾朋刚<sup>1,3</sup>, 霍岩<sup>1,3</sup>, 文道维<sup>1,3</sup>

- (1. 哈动国家水力发电设备工程技术研究中心有限公司, 哈尔滨 150040;
- 2. 哈尔滨电气集团有限公司, 哈尔滨 150028;
- 3. 哈尔滨电机厂有限责任公司, 哈尔滨 150040;
- 4. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;
- 5. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

[摘要] 采用电弧喷涂技术制备了 Al、75Zn25Al 及 NiCr 涂层, 通过基本性能测试、微观形貌表征及中性盐雾试验, 研究了三种涂层在海水抽水蓄能机组过流部件中的腐蚀防护性能。研究表明, 75Zn25Al 涂层与基体结合力偏低, 耐腐蚀性能较差, Al 及 NiCr 涂层与基体结合力较高, 具有极好的耐腐蚀性能, 且 NiCr 涂层具有较高的耐磨损及冲刷性能。NiCr 涂层可推荐应用于活动导叶中、下轴颈以及顶盖、底环过流面等部件的腐蚀防护, Al 涂层可推荐应用于尾水管、蜗壳等部件的腐蚀防护。

[关键词] 抽水蓄能机组; 过流部件; 电弧喷涂; 腐蚀防护

[中图分类号] TK730.5 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3983(2021)05-0088-04

## Study on the Corrosion Protection Performance of Arc Spraying on the Surface of Water-passing Components of Seawater Pumped Storage Unit

LIU Yuxin<sup>1,2</sup>, GE Guangnan<sup>1,3,4</sup>, WU Shuangjie<sup>5</sup>, JIA Penggang<sup>1,3</sup>, HUO Yan<sup>1,3</sup>, WEN Daowei<sup>1,3</sup>

- (1. Hadong National Hydropower Equipment Engineering Technology Research Center Company Limited, Harbin 150028, China; 2. Harbin Electric Group Company Limited, Harbin 150028, China;
- 3. Harbin Electric Machinery Company Limited, Harbin 150040, China; 4. School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 5. Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, CAS, Ningbo 315201, China)

**Abstract:** The Al, 75Zn25Al and NiCr coatings were prepared by arc spraying technology. The corrosion protection performance of the three coatings on the flow passage parts of the sea water pumped storage unit was studied through the basic performance test, micromorphology characterization and neutral salt spray resistance test. The results show that the adhesion strength between 75Zn25Al coating and matrix is low, and the corrosion resistance is poor. The adhesion strength between Al and NiCr coating and matrix is high, which has excellent corrosion resistance. NiCr coating can be recommended to apply to the corrosion protection of the middle and lower journal of the movable guide vane as well as the flow passage surface of the top cover and bottom ring. Al coating can be recommended to apply to the corrosion protection of the draft tube, volute and other components.

**Key words:** pumped storage unit; water-passing components; arc spraying; corrosion protection

### 0 前言

海水抽水蓄能电站是以海水为工作介质、利用海洋作为下水库的一种新型抽水蓄能电站形式, 与传统

淡水抽水蓄能电站相比, 其具有调峰填谷、启动迅速、运行灵活等特点的同时, 还具有选址方便、水源充足、水位变化小等特点<sup>[1,2]</sup>。我国海洋资源丰富, 研究构建太阳能、风能、潮流能、潮汐能及海水抽水蓄能组成的清洁低碳、安全高效的能源供应体系, 对

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2017YFB0903700)

于推动沿海及海岛地区发展具有重要意义<sup>[3]</sup>。现阶段,日本、埃及、爱尔兰、希腊等国家对海水抽水蓄能电站的选材、防污、防腐和防渗进行了一系列的研究工作<sup>[4-9]</sup>。然而,由于海水强烈的腐蚀性,海水抽水蓄能机组过流部件的点蚀、磨损腐蚀、缝隙腐蚀等问题依然存在,严重威胁机组的安全稳定运行。

基于物理隔绝、电化学保护及腐蚀产物阻塞作用,热喷涂防腐涂层已成为应用较为广泛的腐蚀防护技术,而且有大量实例已经证明其在海洋环境中具有优异的耐蚀性能<sup>[10]</sup>。其中电弧喷涂技术具有喷涂效率高、喷涂质量可靠、成本低廉、基体热输入小、便于现场施工等特点,在海工设施防腐中得到了广泛应用<sup>[11-44]</sup>。梁国等<sup>[15]</sup>研究了超音速电弧喷涂锌铝涂层在海水中的腐蚀行为,结果表明锌铝涂层基于腐蚀产物阻塞作用及牺牲阳极保护作用,可以作为有效的钢铁防腐技术应用到海洋防腐中。廖相巍等<sup>[16]</sup>研究了电弧喷涂 NiCr 合金涂层在转炉烟罩水冷壁的高温防腐耐磨领域的应用性能,结果表明电弧喷涂 NiCr 合金涂层具有高耐腐蚀性和高耐磨性。国内学者对电弧喷涂进行了大量研究,但对于海水抽水蓄能机组过流部件研究较少。

本文结合海水抽水蓄能机组过流部件运行工况及腐蚀行为特点,研究海水抽水蓄能机组过流部件表面电弧喷涂防腐性能,为海水抽水蓄能机组过流部件表面防护提供参考依据。

## 1 涂层制备及测试方法

### 1.1 涂层制备

利用型号为 EAS-4 电弧喷涂设备,以 Q235B 碳钢为基体制备三种涂层,各涂层喷涂工艺参数见表 1,每种涂层进行 4 次喷涂。

表 1 不同涂层喷涂工艺参数

涂层种类	丝材 直径/mm	喷涂 电压/V	喷涂 电流/A	喷涂 距离/mm	压缩空气 压力/bar
Al	2	30	150	100	6
75Zn25Al	2	28	150	100	6
NiCr	2	32	260	200	6

### 1.2 涂层基本性能测试

涂层厚度测试采用横断面厚度显微测量法,利用 AXIO 光学显微镜对涂层横断面进行观察,采用 DM2500 M 测厚仪进行厚度测量。涂层的孔隙率测定利用扫描电子显微图像分析法。显微硬度试样经镶嵌、磨抛,利用 HV-4000 显微硬度仪进行测试,饱和

加载时间为 15s,其中 Al 及 75Zn25Al 涂层载荷为 2.94N, NiCr 涂层载荷为 4.90N。涂层结合强度测试参照 GB/T 8642-2002 《热喷涂抗拉结合强度的测定》,粘结剂为 E-7 胶,利用 Instron5985 电子万能拉伸试验机进行拉伸试验,拉伸速率为 1mm/s。

### 1.3 涂层微观形貌表征

利用 Quanta 250 型号扫描电子显微镜对 3 种涂层的微观形貌进行表征。

### 1.4 涂层耐腐蚀性能测试

利用型号为 Q-fog CCT-1100 的盐雾试验箱对涂层试样进行中性盐雾试验,中性盐雾试验按照 GB/T 10125-1997 进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层基本性能测试结果与分析

为分析电弧喷涂 Al、75Zn25Al 及 NiCr 涂层的基本性能,对 3 种涂层的厚度、孔隙率、显微硬度及与基体结合强度进行了测试,结果见表 2。由表 2 可知,由于喷涂设备、送丝速率相同,喷涂时间接近,三种涂层的厚度差别不大,均为 300 $\mu$ m 左右。从涂层孔隙率结果可以看出,3 种涂层孔隙率均在 2.2% 以下,其中 NiCr 涂层低至 0.136%。较低的孔隙率表明, NiCr 涂层的致密性较好,能够有效阻止腐蚀介质通过涂层中的孔隙渗入涂层/基体截面<sup>[17]</sup>。同时较低的孔隙率也使得 NiCr 涂层能获得更高的显微硬度。Al、75Zn25Al 及 NiCr 涂层的显微硬度分别为 36.17 HV<sub>3</sub>、41.24 HV<sub>3</sub> 及 307.6 HV<sub>5</sub>。结合强度分别为 26 MPa、8.7 MPa、36 MPa。对比三种涂层的孔隙率、显微硬度和结合强度,可知, NiCr 涂层具有较高的硬度及结合强度, Al 涂层其次, 75Zn25Al 涂层最差。研究表明 Al 涂层的磨损为粘着磨损和磨粒磨损, Zn 涂层的磨损为氧化磨损, Al-Zn 涂层的磨损二者兼有<sup>[18]</sup>。所以 75Zn25Al 涂层的耐磨性大于 Al 涂层。而 NiCr 涂层具有比 75Zn25Al 涂层更高的硬度及结合强度,这有益于保障涂层拥有良好的耐磨损及冲刷性能。NiCr 涂层可推荐应用于活动导叶中、下轴颈以及顶盖、底环过流面等部件的防护。

表 2 Al、75Zn25Al 及 NiCr 涂层的基本性能测试结果

涂层	涂层厚度/ $\mu$ m	孔隙率/ %	显微硬度	结合强度/ MPa
Al	290	2.118	HV <sub>3</sub> : 36.17	26
75Zn25Al	320	2.191	HV <sub>3</sub> : 41.24	8.7
NiCr	280	0.136	HV <sub>5</sub> : 307.6	36

## 2.2 涂层微观形貌分析

图1为(a) Al、(b) 75Zn25Al及(c) NiCr涂层表面的微观形貌。从图1可以明显看出,(c) NiCr涂层的熔融粒子的扁平化较为充分,呈现典型的层状结构特征,组织均匀致密,没有明显的空隙和缺陷,可有效阻止腐蚀介质进入涂层,使涂层对基材形成很

好的屏蔽作用。而75Zn25Al涂层的表面则比较粗糙,存在大的凹坑和凸起,部分颗粒不能充分扁平化,涂层孔隙率相对较高。75Zn25Al涂层表面存在未充分熔融且扁平化的颗粒,势必导致涂层较为疏松,颗粒间界面结合力弱的问题,这也是导致涂层结合力不佳的主要原因。

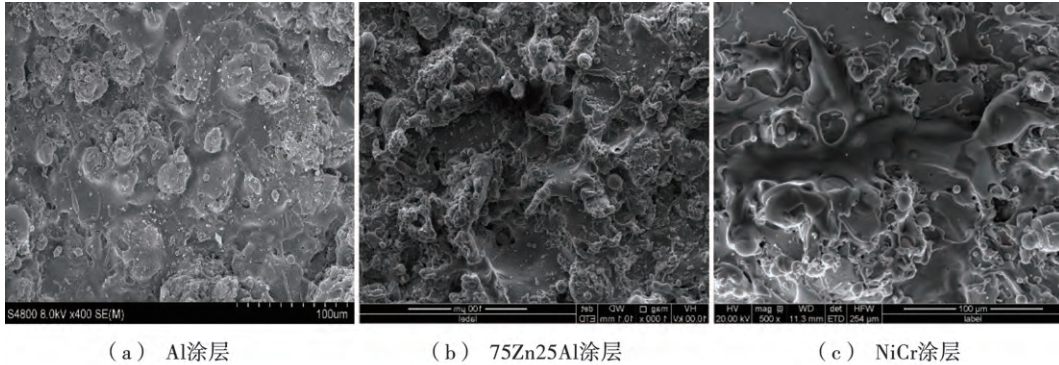
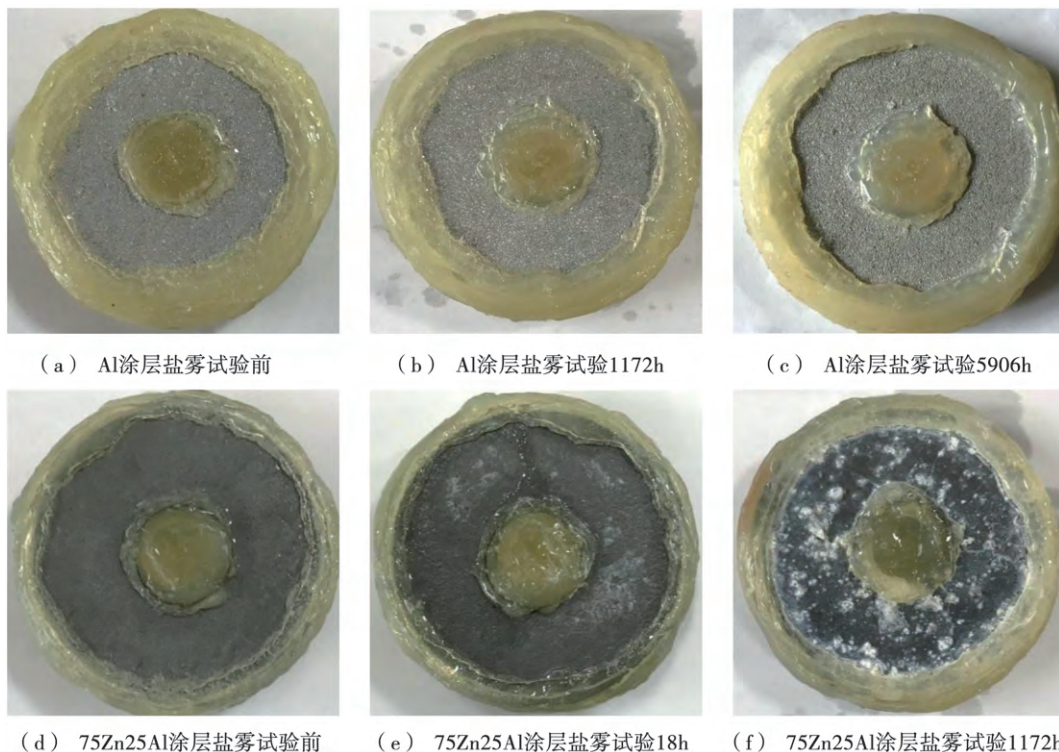


图1 Al、75Zn25Al及NiCr涂层表面的微观形貌

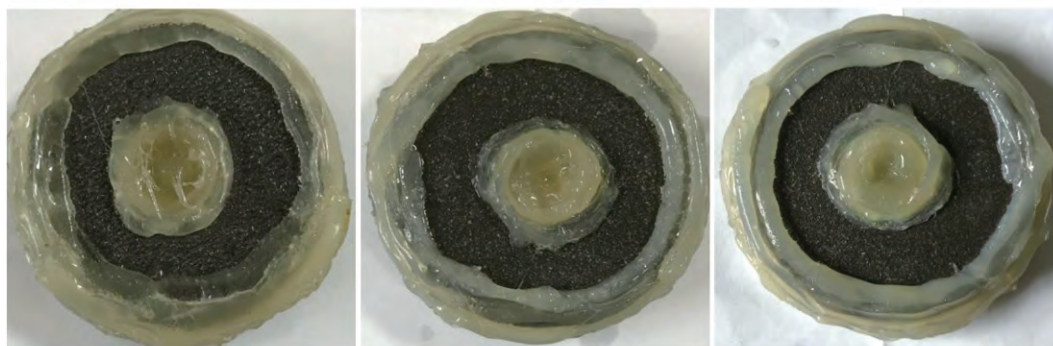
## 2.3 涂层耐腐蚀性能分析

为表征Al、75Zn25Al及NiCr涂层的耐腐蚀性能,对三种涂层在同种条件下进行中性盐雾试验,结果如图2所示。中性盐雾试验结果表明,75Zn25Al涂层在试验18h后开始出现局部腐蚀现象,至盐雾试验1172h,腐蚀产物较多,腐蚀已较为明显,基本丧失对基体的保护作用。其原因在于75Zn25Al合金组织成分不均匀,颗粒间相结构不同,涂层不够致密,

表面粗糙,空隙较多使得腐蚀介质能更容易的进入涂层,涂层受到破坏,腐蚀明显,最终导致其耐腐蚀性差,王珂等<sup>[19]</sup>也得出相同结论。Al及NiCr涂层在试验5906h后仍未发生明显锈蚀,说明两种涂层具有极好的耐腐蚀性能。研究表明NiCr涂层主要相是镍基固溶体、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 和 $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ <sup>[20]</sup>。由于铬的优先氧化,形成 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 或晶石型氧化物,阻挡液相腐蚀介质进入涂层基体,使得腐蚀难以继续。







(g) NiCr涂层盐雾试验前

(h) NiCr涂层盐雾试验1172h

(i) NiCr涂层盐雾试验5906h

图2 三种涂层盐雾试验前后表面形貌

### 3 结论

(1) 75Zn25Al 涂层由于组织成分不均匀,颗粒间相结构不同,导致熔融粒子扁平化不充分,涂层与基体结合力偏低,中性盐雾试验 18h 后即出现腐蚀现象,耐腐蚀性能较差。

(2) Al 及 NiCr 涂层具有较高的硬度,和基体结合力也较高。NiCr 涂层由于铬优先形成的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 起到阻挡腐蚀介质和保护基体的作用,在中性盐雾试验 5906h 后仍未发生明显锈蚀,具有极好的耐腐蚀性能。

(3) 电弧喷涂 Al 及 NiCr 涂层在海水抽水蓄能机组过流部件的腐蚀防护领域具有较好的应用前景,充分考虑涂层性能特点、制备成本及机组腐蚀防护需求, NiCr 涂层可推荐应用于活动导叶中、下轴颈以及顶盖、底环过流面等部件的腐蚀防护, Al 涂层可推荐应用于尾水管、蜗壳等部件的腐蚀防护。

#### [参考文献]

- [1] 张旭,张鹏,陈昕. 海水抽水蓄能电站发展及应用[J]. 水电站机电技术,2019,6(42): 66-70.
- [2] 钱钢粮. 我国海水抽水蓄能电站资源综述[J]. 水电与抽水蓄能,2017,10(3): 1-6.
- [3] 谭雅倩. 海水抽水蓄能系统特性与优化研究[D]. 中国科学院大学,2017.
- [4] 柴建峰,肖微. 海水抽水蓄能电站及我国工程建设条件浅析[J]. 水电与抽水蓄能,2016,2(2): 46.
- [5] 谭雅倩,周学志,徐玉杰,等. 海水抽水蓄能技术发展现状及应用前景[J]. 储能科学与技术,2017,6(1): 35.
- [6] D. A. Katsaprakakis ,D. G. Christakis ,I. Stefanakis ,

et al. Technical details regarding the design , the construction and the operation of seawater pumped storage systems [J]. Energy ,2013 ,55: 619.

- [7] G. Manfrida ,R. Secchi. Seawater pumping as an electricity storage solution for photovoltaic energy systems [J]. Energy ,2014 ,69: 470.
- [8] E. McLean ,D. Kearney. An Evaluation of Seawater Pumped Hydro Storage for Regulating the Export of Renewable Energy to the National Grid [J]. Energy Procedia ,2014 ,46: 152.
- [9] S. Rehman ,L. M. Al-Hadhrami ,M. M. Alam. Pumped hydro energy storage system: A technological review [J]. Renewable Sustainable Energy Rev. , 2015 ,44: 586.
- [10] 张海军. 海洋环境下典型热喷涂涂层污损-腐蚀、腐蚀-空蚀交互作用行为初探 [D]. 青海大学,2019.
- [11] 陈建阳,肖跃文,李雄晖,等. 电机喷涂铝涂层的保护极限及钢箱梁桥大面积长效防腐 [J]. 桥梁建设,2001(1): 32-34,40.
- [12] 程国东,李家福,马永青,等. 电弧喷涂铝在海洋工程中应用与质量控制 [J]. 石油化工腐蚀与防护,2005,32(3): 51-53.
- [13] ESPALLARGAS N. Future Development of Thermal Spray Coatings: Types , Designs , Manufacture and Applications [ G ]. Cambridge: Woodhead Publishing ,2015.
- [14] VARDELLE A , MOREAU C , AKEDO J , et al. The 2016 thermal spray roadmap [J]. Journal of Thermal Spray Technology ,2016 ,25(8): 1376-1440.

(下转第98页)

Engineering ,2017: 1-9.

[12] 李彦军,陈超,裴吉,等. 不同空化工况下轴流泵装置压力脉动试验 [J]. 农业机械学报, 2018 ,49( 12): 158-164.

[13] 侯敬生,袁建平,范猛,等. 轴流泵空化流动的非定常特性研究 [J]. 中国农村水利水电, 2017 ( 11): 168-172.

[14] 石磊,张德胜,陈健,等. 基于 PANS 模型的轴流泵叶顶空化特性 [J]. 排灌机械工程学报, 2016 ,34( 7): 584-590 +625.

[15] Xi Shen , Desheng Zhang , Bin Xu , et al. Experimental Investigation of the Transient Patterns and Pressure Evolution of Tip Leakage Vortex and Induced-Vortices Cavitation in an Axial Flow Pump [J]. Journal of Fluids Engineering , 2020 , 142 ( 10): 101-206.

[16] Bin Xu , Xi Shen , Desheng Zhang , et al. Experimental and Numerical Investigation on the Tip Leakage Vortex Cavitation in an Axial Flow Pump with Different Tip Clearances [ J ]. Processes ,2019 ,7( 12): 935.

[17] Desheng Zhang , Lei Shi , Ruijie Zhao , et al. Study on unsteady tip leakage vortex cavitation in an axial-flow pump using an improved filter-based model [J]. Journal of Mechanical Science and Technology ,2017 ,31( 2): 659-667.

[18] Peng Lin , Dong Hu , Zi-jun Lin , et al. The mechanism of joint effects of axial-flow pump cavitation and sediment wear [J]. Advances in Mechanical Engineering ,2020 ,12( 5): 1-14.

[19] 林鹏,胡东,吕云杰,等. 含沙空化对轴流泵内流动特性的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2020 ,40( 4): 21-26 +76.

[20] 吴子娟,侯聪,梁武科,等. 叶片安装角对轴流泵空化性能的影响 [J]. 水动力学研究与进展 ( A 辑) ,2020 ,35( 3): 277-284.

[21] Weimin Feng , Qian Cheng , Zhiwei Guo , et al. Simulation of cavitation performance of an axial flow pump with inlet guide vanes [J]. Advances in Mechanical Engineering ,2016 ,8( 6): 1-8.

[22] 洪锋,张天宇,苏华山,等. 非线性空泡模型在轴流泵空化模拟中的评估分析 [J]. 流体机械, 2020 ,48( 6): 55-61.

[23] 王斌,王俊华,李露露. 基于 FBM 模型的轴流泵空化研究 [J]. 通用机械, 2020( 6): 50-53.

[24] 张磊,杨维波,梁守方,等. 叶轮机械流固耦合问题研究进展 [J]. 热力发电, 2014 ,43( 12): 1-8.

[25] 高鹏,韩汝军,乔羽,等. 基于流固耦合的离心泵口环间隙泄漏对叶轮强度的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2017 ,36( 8): 53-58.

[26] 牟介刚,陈莹,谷云庆,等. 不同空化程度下离心泵流固耦合特性研究 [J]. 振动与冲击, 2016 ,35( 23): 203-208.

[27] 吴晨晖,汤方平,杨帆,等. 空化对轴流泵叶轮能量转化特性的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2019 ,39( 4): 49-55 +74.

[收稿日期] 2020-12-04

\*\*\*\*\*

(上接第 91 页)

[15] 梁国,魏伟,王玉纯,等. 超音速电弧喷涂锌铝合金涂层的制备及在海水中的腐蚀行为研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2014 ,9( 28): 55-57.

[16] 廖相巍. 电弧喷涂 NiCr 合金涂层的研究与应用 [D]. 辽宁科技大学, 2007.

[17] 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.

[18] 刘宪军. 电弧喷涂 Al , Zn 涂层和 Al-Zn 伪合金涂层的磨损性能 [J]. 材料保护, 2001 ,3( 5): 42-125.

[19] 王柯. 电弧喷涂 Al-Zn-Si-RE 合金涂层与 Al-Zn 伪合金涂层的耐蚀性能对比 [J]. 中国表面工程, 2014( 12): 27-6.

[20] 徐连勇. 高速电弧喷涂 FeCrAl 涂层和 NiCr 涂层组织及性能研究 [D]. 天津大学, 2003.

[收稿日期] 2020-06-20



[作者简介]

梁武科 (1965-), 2006 年毕业于西安理工大学动力系水利水电工程专业, 获得博士学位, 主要从事空化空蚀的机理和防护措施研究, 教授。



[作者简介]

刘玉鑫 (1987-), 2013 年毕业于中国科学院大学, 现从事金属材料腐蚀与防护工作, 高级工程师。