

硼对含钨铁基耐磨堆焊合金组织性能的影响

于吉鲲¹, 孟政¹, 贾华²

(1.大连海洋大学 应用技术学院, 辽宁 大连 116300; 2.大连海洋大学 机械与动力工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要 为提高堆焊合金的耐磨性, 制备不同硼含量的Fe-Cr-C-B-W耐磨堆焊合金。借助金相显微镜、扫描电子显微镜、X射线衍射仪、洛氏硬度计和磨料磨损试验机分析堆焊层的组织性能。结果表明: 堆焊层主要由马氏体、残余奥氏体、 $M_7(C, B)_3$ 、 $M_3(C, B)$ 、 Fe_3W_3C 和WC组成。加入堆焊层的B主要固溶于 M_7C_3 和 M_3C 碳化物中, 形成 $M_7(C, B)_3$ 和 $M_3(C, B)$ 复合碳化物, 未与W形成W-B系列化合物。随硼添加量增多, 初生奥氏体晶粒细化, 共晶硬质相增多并呈均匀弥散分布, 堆焊层硬度增加, 磨损量先减后增。当B添加量(质量分数, 下同)为2%时, 堆焊层的硬度和耐磨性达最佳匹配, 硬度为63HRC, 磨损量最小。

关键词 药芯焊丝; 堆焊层; 显微组织; 耐磨性

中图分类号 TG455

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2022)02-0082-04

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20220124.003

Effect of boron on microstructure and properties of tungsten containing iron base hardfacing alloy

YU Jikun¹, MENG Zheng¹, JIA Hua²

(1.College of Applied Technology, Dalian Ocean University, Dalian 116300, China;

2.College of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract In order to improve the wear resistance of hardfacing alloy, Fe-Cr-C-B-W surfacing alloys with different boron contents were prepared. The microstructure and properties of surfacing layer were analyzed by metallographic microscope, scanning electron microscope, X-ray diffractometer, Rockwell hardness tester and abrasive wear tester. The results show that the surfacing layer is mainly composed of martensite, retained austenite, $M_7(C, B)_3$, $M_3(C, B)$, Fe_3W_3C and WC. Element B added to the surfacing layer is mainly dissolved in M_7C_3 and M_3C carbides to form $M_7(C, B)_3$ and $M_3(C, B)$ composite carboborides, but fails to form W-B series compounds with element W. With the increase of boron addition amount, the primary austenite grain is refined, the eutectic hard phase increases and is evenly dispersed, the hardness of surfacing layer increases, and the wear amount decreases firstly and then increases. When the boron content (mass fraction) is 2%, the hardness and wear resistance of the surfacing layer reach the best match. At this time, the hardness is 63HRC and the wear amount is lowest.

Keywords flux cored wire; surfacing layer; microstructure; wear resistance

随社会生产力和工业技术的快速发展, 大多数行业都离不开金属材料^[1]。这些金属材料制成的机械零件在使用过程中相互接触产生磨损失效, 严重影响企业的正常连续生产, 因此提高金属材料的耐磨性有重要意义^[2-3]。金属基复合材料由塑韧性好的基体组织与硬度高的增强相组成, 能发挥基体组织与增强相的共同优点, 综合性能优越^[4-5]。碳化物、氮化物和硼化物是金属基复合材料中的主要增强相^[6-7], 其中硼化物具有硬度高和稳定性好的特点, 是金属基复合材料的主要增强相^[8-10]。硼与钨能生成W-B系化合物, 主要包括 W_2B 、WB、 WB_2 、 W_2B_4 、 WB_4 和 WB_{12} 。不仅具有熔点高、硬度高和电导率高的特点, 还具有耐磨损、耐高

温及耐腐蚀等优良性能, 在结构材料和耐磨材料等领域应用前景广阔^[11-15]。本文作者自制含硼自保护耐磨堆焊药芯焊丝, 选择明弧堆焊法制备Fe-Cr-C-B-W耐磨堆焊合金, 研究硼对堆焊层显微组织、硬度和耐磨性的影响规律。

1 试验材料与方法

药芯焊丝的钢带选H08A(尺寸为16 mm×0.3 mm), 包裹药粉粒度为150.0~187.5 μm, 成分由石墨(99.5%C)(质量分数, 下同)、高碳铬铁(60.6%Cr, 8.24%C)、硼铁(19.38%B)和钨粉(98%W)组成。试验中, 先确定Cr、C和W的质量分数分别为35%、10%和

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2021-10-28

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究项目(QL202017; QL201914); 辽宁省博士科研启动基金计划项目(2021-BS-237);

大连海洋大学第二届“湛蓝学者工程”资助项目(191022007)

第一作者: 于吉鲲, 男, 副教授; 主要从事材料表面强化技术及机械制造研究。E-mail: yujikun@dlou.edu.cn。

通信作者: 贾华, 女, 博士, 讲师; 主要从事特种焊接材料及表面强化技术研究。E-mail: jiahua110023@126.com。

15%,在0~4%范围内改变硼的添加量,不足100%部分用还原铁粉补充,制备Fe-Cr-C-B-W药芯合金粉末。用南通机电设备公司生产的四罐四模式药芯焊丝成型机制备药芯焊丝,控制包粉率约为45%,直径约为2.8 mm。

用MZ-1250型埋弧焊机将药芯焊丝熔敷在尺寸为100 mm×80 mm×12 mm的Q235钢表面,采取明弧堆焊,不添加焊剂,制备Fe-Cr-C-B-W系耐磨堆焊合金,堆焊工艺参数:焊接电压为25~30 V;焊接电流为200 A;焊接速度为0.01 m/s;焊丝伸出长度为15 mm。堆焊层的化学成分如表1所示。

表1 不同B添加量时堆焊层的化学成分

Table 1 Chemical compositions of surfacing layer with different B contents

B添加量/%	w(W)/%	w(Cr)/%	w(C)/%	w(B)/%	w(Fe)/%
0	3.49	13.35	1.53	—	余量
1	3.51	13.41	1.49	0.35	余量
2	3.47	12.94	1.51	0.55	余量
3	3.48	12.97	1.54	0.81	余量
4	3.50	13.22	1.51	1.25	余量

堆焊结束后,将焊缝表面打磨平整,沿焊缝横断面制作金相试样。对试样磨制抛光,用质量分数为4%的硝酸酒精腐蚀,用水和酒精清洗后吹干。用OML-PUS BX-6型金相显微镜和日立S-3400N型扫描电子显微镜观察显微组织;用布鲁克D8型X射线衍射仪分析物相组成;用HRC-150型洛氏硬度计测试宏观硬度;用MLS-23型橡胶轮式湿砂磨损试验机进行磨损试验。试样尺寸为56 mm×27 mm×11 mm。试验参数:石英砂粒度为212~630 μm;胶轮直径为150 mm;胶轮转速为240 r/min;胶轮表面压力为1.5 MPa;磨损时间为3 min。磨损前用分析天平测量出试样的质量 G_0 ,将磨损后试样吹干,测出磨损后的质量 G_1 ,计算试样被磨损的质量 $\Delta G=G_0-G_1$ 。

2 结果与分析

2.1 堆焊层的X射线衍射分析

图1为B添加量为2%时堆焊层的XRD衍射图。可以看出,堆焊层主要由马氏体、残余奥氏体、 $M_7(C, B)_3$ 、 $M_3(C, B)$ 、 Fe_3W_3C 和WC组成。药芯焊丝中有W和B,但通过XRD分析在堆焊层中未检测到硼钨化合物。堆焊层中的B主要固溶于 M_7C_3 和 M_3C 碳化物,形成 $M_7(C, B)_3$ 和 $M_3(C, B)$ 复合碳化物。W主要与C和Fe形成WC硬质相或 Fe_3W_3C 复相碳化物。

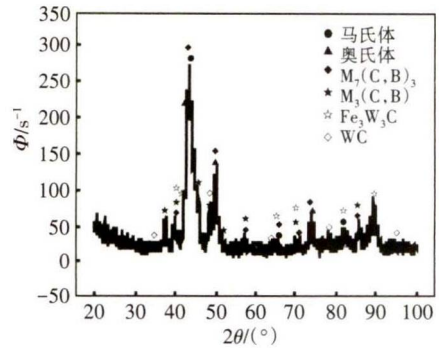


图1 B添加量为2%时堆焊层的XRD衍射图

Fig.1 XRD diffraction pattern of surfacing layer with 2% B addition amount

2.2 堆焊层的显微组织分析

图2为不同B添加量时堆焊层的金相组织。可以看出,堆焊层为典型的亚共晶组织,主要由初生奥氏体和共晶组织($M_7(C, B)_3$ 、 $M_3(C, B)$ 、 Fe_3W_3C 和WC)组成。随B添加量增多,堆焊层中树枝晶初生奥氏体相晶粒尺寸减小,数量减少,共晶组织增多,在初生奥氏体周围呈连续网状分布。当B添加量为4%时,基体组织初生奥氏体的数量最少,晶粒最细小,共晶组织体积分数最多,尺寸增大,呈团簇状分布。亚共晶成分合金在结晶过程中,首先析出初生奥氏体相,随温度下降,初生奥氏体相不断长大,其中固溶的W、C和B添加量减少,不断向周围液态金属中扩散。当液相满足共晶反应条件时将发生共晶转变,生成由奥氏体、 $M_7(C, B)_3$ 、 $M_3(C, B)$ 、 Fe_3W_3C 和WC组成的共晶组织。堆焊层中加入W和B,目的是在堆焊层中生成B-W系列化合物,进一步提高堆焊层的硬度和耐磨性。通过XRD和显微组织分析,在堆焊层中未发现B、W化合物。根据W-C和W-B合金相图可知^[16],形成WC和WB时,C与B的质量分数约为5%~7%,但WC生成温度(3 049 K)比WB(2 938 K)高,加上堆焊层中C含量比B高,对形成WC更有利。其次,W的原子半径大,在初生奥氏体中的溶解度大,导致向晶界迁移速度慢,而C和B原子半径小,B在奥氏体中的最大溶解度(0.002%)比碳(2.11%)小,在熔池冷却过程中大量B将快速向液态金属扩散,所以在W、C和B原子迁移过程中更易生成W和C的化合物,即 Fe_3W_3C 和WC相。随W的消耗,剩余液相金属将不能满足W与B相互反应的成分条件,因此堆焊层中无W-B系化合物生成。

图3为B添加量为2%时堆焊层横截面的组织形貌。可以看出,在堆焊层与母材结合部位生成一层白亮层,为平面晶。在电弧热作用下,药芯焊丝与母材表面层熔化,冷却后呈冶金结合,结合强度较高。由结合

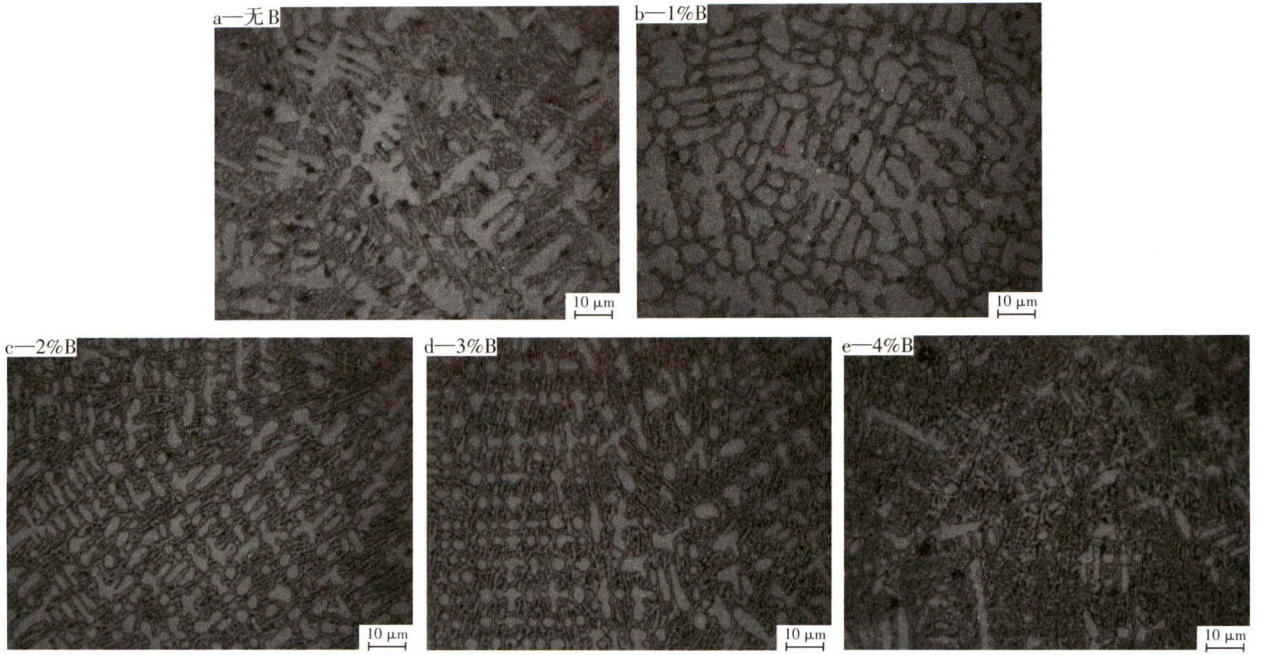


图2 不同B添加量时堆焊层的金相组织

Fig.2 Microstructure of surfacing layer with different B contents



图3 B添加量为2%时堆焊层横截面的组织形貌

Fig.3 Microstructure of cross section of surfacing layer with 2%B addition amount

面向堆焊层过渡,母材的稀释作用逐渐减弱,初生奥氏体晶粒减小,共晶硬质相增多,这对提高堆焊层硬度和耐磨性十分有利。

2.3 堆焊层的硬度和耐磨性分析

图4为不同B添加量时堆焊层硬度和磨损量的变化曲线。可以看出,当B添加量在0~4%变化时,随B

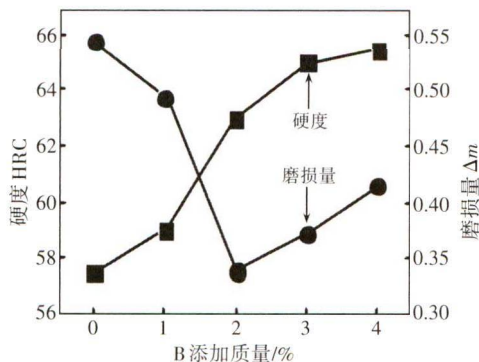


图4 堆焊层硬度和磨损量的变化曲线

Fig.4 Variation curve of hardness and wear loss of hard-facing layer

添加量增多,堆焊层硬度增加,当B添加量为4%时达最大值,为65.5HRC。而磨损量先减后增,在B添加量为2%时取得最小值,为0.3395g,硬度为63HRC。这是由于随B添加量增多,堆焊层中生成的共晶硼化物、碳化物或复合碳硼化物增多,不仅增加了堆焊层硬度,阻碍了初生奥氏体晶粒长大,与基体组织匹配良好,所以堆焊层硬度增加,磨损失质量减少,即堆焊层耐磨性提高。随B添加量增多,共晶硬质数量进一步增多,导致堆焊层硬度增加和脆性倾向增大。在低应力磨料磨损工况下,这些脆硬的共晶硬质相易脱落,在后续的磨损过程中成为坚硬磨料,所以堆焊层的硬度增加,磨损失质量增加,即堆焊层整体耐磨性变差。

图5为B添加量为2%时堆焊层横截面的硬度曲线。其中横坐标0位置为熔合线,左侧为母材,右侧为堆焊层。可以看出,母材硬度较低,从母材到堆焊层表层,硬度逐渐增加。在距熔合线6.5mm处至堆焊层表

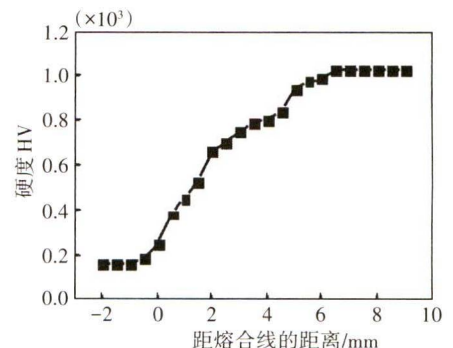


图5 B添加量为2%时堆焊层横截面的硬度分布

Fig.5 Hardness distribution of cross section of surfacing layer when B content is 2%

层,硬度基本趋于平稳且达到最大值,约为1 100HV。这是由于远离熔合线的母材对堆焊层的稀释作用逐渐减弱,成分趋于稳定,共晶硬质相增多,所以堆焊层表层具有较高硬度。

3 结论

1) Fe-Cr-C-B-W堆焊层主要由马氏体、残余奥氏体、 $M_7(C,B)_3$ 、 $M_3(C,B)$ 、 Fe_3W_3C 和WC组成。加入堆焊层的B主要固溶于 M_7C_3 和 M_3C 碳化物中,形成 $M_7(C,B)_3$ 和 $M_3(C,B)$ 复合碳化物,而未能与W形成W-B系列化合物。

2) Fe-Cr-C-B-W堆焊层与母材呈冶金结合,结合强度较高。母材的硬度最低,进入熔合线到堆焊层硬度逐渐增加,在距熔合线6.5 mm处至堆焊层表层硬度基本趋于平稳且达到最大值,约为1 100HV。

3) 增加Fe-Cr-C-B-W堆焊层中B含量,促进共晶硬质相($M_7(C,B)_3$ 、 $M_3(C,B)$ 、 Fe_3W_3C 和WC)生成,细化初生奥氏体晶粒,提高堆焊层的硬度和耐磨性。当B添加量为4%时,堆焊层的硬度达到最高,为65.5HRC。当B添加量为2%时,堆焊层的硬度和耐磨性达到最佳匹配,磨损量最小,硬度为63HRC。

4 参考文献

- [1] 张玉杰,杨建华,许玲萍.激光熔覆技术在表面失效机械件中的应用[J].电镀与精饰,2021,43(8):39-43.
ZHANG Yujie, YANG Jianhua, XU Lingping. Application of laser cladding technology in mechanical parts with surface failure [J]. Plating and Finishing, 2021, 43(8): 39-43. (in Chinese)
- [2] 张伟.浅谈金属材料磨损失效及防护措施[J].科学技术创新,2020,18:23-24.
ZHANG Wei. Wear failure of metal materials and protective measures [J]. Scientific and Technological Innovation, 2020, 18:23-24. (in Chinese)
- [3] 陈华辉,邢建东,李卫.耐磨材料应用手册[M].北京:机械工业出版社,2006:24.
CHEN Huahui, XING Jiandong, LI Wei. Application manual of wear resistant materials [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006:24. (in Chinese)
- [4] BADISCH E, MITTERER C. Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance [J]. Tribology International, 2003, 36(10): 765-770.
- [5] 莫炯良,涂小慧,郑宝超,等. ZTA颗粒增强高铬铸铁基复合材料的制备及其耐磨性能研究[J].热加工工艺,2020,49(10):57-61.
MO Jiongliang, TU Xiaohui, ZHENG Baochao, et al. Fabrica-
- tion and abrasion resistance of ZTA particle reinforced high chromium cast iron matrix composites [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(10): 57-61. (in Chinese)
- [6] TANG S L, GAO Y M, LI Y F. Recent developments in fabrication of ceramic particle reinforced iron matrix wear resistant surface composite using infiltration casting technology [J]. Iron-making & Steelmaking, 2014, 41(8): 633-640.
- [7] 庞雅丹,陈伟鹏,杨家富,等. TiC/NbC添加量对铁基复合材料显微组织及力学性能的影响[J].稀有金属与硬质合金,2020,48(3):45-49.
PANG Yadan, CHEN Weipeng, YANG Jiafu, et al. Effect of TiC/NbC content on microstructure and mechanical properties of iron-based composite materials [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2020, 48(3): 45-49. (in Chinese)
- [8] 马国彬,谭建波.颗粒增强金属基复合材料的研究现状[J].铸造设备与工艺,2019,2:50-54.
MA Guobin, TAN Jianbo. Research status of particle reinforced metal matrix composites [J]. Foundry Equipment and Technology, 2019, 2:50-54. (in Chinese)
- [9] EROGLU M. Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: Microstructure and hardness [J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(16): 2229-2235.
- [10] 刘政军,李乐成,苏允海,等.硼对等离子熔覆高硼铁基金组织性能的影响[J].焊接学报,2012,33(1):45-48.
LIU Zhengjun, LI Lecheng, SU Yunhai, et al. Effect of boron on microstructure and properties of high-boron iron-based alloy by plasma transferred arc [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(1): 45-48. (in Chinese)
- [11] 丁卫东,栗卓新,李国栋.硼对液压支架立柱等离子熔敷涂层组织性能的影响[J].焊接学报,2017,38(4):77-80.
DING Weidong, LI Zhuoxin, LI Guodong. Performance study of high boron clad layer welded by PTA on hydraulic support piston rod surface [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(4): 77-80. (in Chinese)
- [12] 刘政军,勾健,贾华,等. Fe-Cr-C-B-Nb堆焊合金的显微组织和耐磨性[J].焊接学报,2018,39(3):75-78.
LIU Zhengjun, GOU Jian, JIA Hua, et al. Microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C-B-Nb hardfacing alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(3): 75-78. (in Chinese)
- [13] KAYHAN M, HILDEBRANDT E, FROTSCHER M, et al. Neutron diffraction and observation of superconductivity for tungsten borides, WB and W_2B_4 [J]. Solid State Sciences, 2012, 14(11/12): 1656-1659.
- [14] 曹晓舟,薛向欣,杨合,等.高温固相反应合成硼化钨粉体[J].稀有金属材料与工程,2014,43(8):1987-1990.
CAO Xiaozhou, XUE Xiangxin, YANG He, et al. Preparation of tungsten boride powder by high-temperature solid-state reaction [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(8): 1987-1990. (in Chinese)

40Cr 钢电沉积 Ni-W-PTFE 复合镀层的耐蚀性研究

张波¹, 樊巧芳¹, 刘忆²

(1. 江苏安全技术职业学院, 江苏 徐州 221000; 2. 徐州工程学院, 江苏 徐州 221000)

摘要 用电沉积法在 40Cr 钢表面制备 Ni-W-PTFE 复合镀层, 研究 PTFE 乳液添加量对复合镀层的成分、微观形貌、粗糙度和耐蚀性的影响。结果表明: 添加 PTFE 乳液制备的 Ni-W-PTFE 复合镀层成分为 Ni、W、F、C, 微观形貌不同于 Ni-W 合金镀层, 表面轮廓起伏程度下降, 耐蚀性提高。随 PTFE 乳液的添加量从 3 mL/L 增至 14 mL/L, 复合镀层中 PTFE 颗粒含量先增后减, 晶胞尺寸和粗糙度均先减后增, 耐蚀性先升后降。当 PTFE 乳液的添加量为 10 mL/L 时, Ni-W-PTFE 复合镀层晶胞细小且紧密结合, PTFE 颗粒的质量分数最高, 为 4.03%, 表面轮廓起伏最小、粗糙度仅为 0.258 μm , 腐蚀电流密度和腐蚀速率都最低, 为 $9.096 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 、 $3.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。该复合镀层致密及较多 PTFE 颗粒弥散分布隔离腐蚀介质, 延缓了腐蚀发展, 耐蚀性更好。

关键词 Ni-W-PTFE 复合镀层; 电沉积; PTFE 乳液添加量; 耐蚀性

中图分类号 TG174.4

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2022)02-0086-06

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20211102.001

Corrosion resistance of Ni-W-PTFE composite coatings electrodeposited on 40Cr steel

ZHANG Bo¹, FAN Qiaofang¹, LIU Yi²

(1. Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou 221000, China;

2. Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221000, China)

Abstract Ni-W-PTFE composite coatings were electrodeposited on 40Cr steel, and the effect of PTFE emulsion addition amount on the component, micromorphology, roughness and corrosion resistance of composite coating was studied. The results show that the Ni-W-PTFE composite coatings prepared by adding PTFE emulsion is composed of Ni, W, F and C, its micromorphology is different from that of Ni-W alloy coating, the surface profile fluctuation decreases and the corrosion resistance improves. With the increase (3-14 mL/L) of PTFE emulsion addition amount, the content of PTFE particles in the composite coating firstly increases and then decreases, both the grain size and roughness firstly decrease and then increase, leading to an gradually improved and then decreased corrosion resistance. The Ni-W-PTFE composite coating prepared with the PTFE emulsion volume fraction 10 mL/L has fine and compact grains, of which the highest PTFE particles content is 4.03%, the lowest roughness is 0.258 μm , the lowest corrosion current density and corrosion rate are $9.096 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, $3.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ respectively. The composite coating with compact structure and the uniform distribution of more PTFE particles play a role in isolating the corrosive medium, which effectively delaying the development of corrosion, so it show better corrosion resistance.

Keywords Ni-W-PTFE composite coating; electrodeposition; additive amount of PTFE emulsion; corrosion resistance

40Cr 钢淬透性、低温冲击韧性和力学性能良好, 广泛应用于机械制造行业^[1-2]。然而, 40Cr 钢的耐蚀性不理想, 在潮湿环境中及酸、碱、氯离子等介质存在下

易腐蚀。因此, 研究 40Cr 钢腐蚀防护具有重要意义。用电沉积法在 40Cr 钢表面制备 Ni 基合金镀层, 如 Ni-Co 合金镀层^[3]、Ni-W 合金镀层^[4]、Ni-Cr-Fe 合金镀

收稿日期: 2021-07-03; 修回日期: 2021-10-26

基金项目: 江苏省高校“青蓝工程”资助项目(014000773/2018-00376)

第一作者: 张波, 男, 讲师; 主要研究方向为金属基复合材料、材料成型等。

通信作者: 刘忆, 女, 硕士, 教授; 主要研究方向为复合材料、表面工程等。E-mail: teacher4085@126.com。

[15] 杨晓红, 赵伊鹏, 邹军涛, 等. 原位生成硼化钨对 CuW 合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(2): 679-686.

YANG Xiaohong, ZHAO Yipeng, ZOU Juntao, et al. Effects of in-situ synthesis of tungsten boride on microstructures and properties of CuW alloy[J]. Rare Metal Materials and Engi-

neering, 2021, 50(2): 679-686. (in Chinese)

[16] 梁基谢夫. 金属二元系相图手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 210-324.

ЛЯКИШЕВ Н П. Handbook of phase diagrams of metal binary systems[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 210-324. (in Chinese)