

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.04.017

## 功能性添加剂组合对水基金属加工液抗菌性的影响

周方旭, 李广宇\*

(沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要:** 针对水基金属加工液容易产生细菌从而导致加工液失效的问题, 研究了不同种功能性添加剂对金属加工液抗菌性的影响。将现场取回的已失效加工液进行扩菌培养, 采用测菌片测试菌数含量, 通过电子显微镜观察微生物被抑制情况, 对比了多种添加剂及其复配组合的抗菌性能。实验结果表明, 5% BA、3% DCHA 与 2% MBM 三种添加剂复配的抑菌效果最佳, 由于特种胺与硼酸的加入, 有效地提升了加工液体系的抗菌性能。通过分析各类添加剂的抑菌机理, 探讨了添加剂复配后产生的协同效应, 得出不同类型添加剂的有效组合对增强加工液的抗菌性具有积极作用。

**关键词:** 金属加工液; 功能性添加剂; 杀菌剂; 特种胺

**中图分类号:** TQ153.2

**文献标识码:** A

## Effect of functional additive combination on antimicrobial property of water-based metalworking fluids

Zhou Fangxu, Li Guangyu\*

(School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that water-based metalworking fluids are contaminated by microorganism, which can lead to fluid failure, this study was conducted to investigate the effect of different functional additives on the microbiocidal property of metalworking fluids. The waste metalworking fluids collected from the site was cultured to expand microorganism. The bacterial content was tested by bacterial counting slides, and the microorganism inhibition was observed under an electron microscope, to compare the microbiocidal properties among various additives and their compound combinations. Experimental results show that the combination of three microbicides, namely 5% BA, 3% DCHA, and 2% MBM, exhibits the best microbiocidal effect. Adding special amines and boric acid effectively enhances the microbiocidal performance of metal working fluids. By analyzing the microbiocidal mechanisms of various additives, it is explored that the synergistic effect of the various additives compounding has a positive effect on enhancing the microbiocidal properties of metalworking fluids.

**Keywords:** metal working fluid; functional additive; microbicide; special amines

收稿日期: 2024-05-26

修回日期: 2024-08-04

作者简介: 周方旭(2000—), 硕士研究生, 研究方向为精细化工—新型润滑材料, email: a15809852300@163.com

通信作者: 李广宇(1971—), 博士, 副教授, 研究方向为精细化工—新型润滑材料、先进表面处理材料, email: lgych@163.net

基金项目: 2022 年辽宁省教育厅高等学校基本科研面上项目(LJKMZ20220598)

引用信息: 周方旭, 李广宇. 功能性添加剂组合对水基金属加工液抗菌性的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 107-112.  
Zhou Fangxu, Li Guangyu. Effect of functional additive combination on antimicrobial property of water-based metalworking fluids[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 107-112.

金属加工液因其具备润滑、冷却、清洗、防锈等作用,被广泛应用于机械加工行业中<sup>[1-2]</sup>。加工液主要分为乳化油、全合成及半合成金属加工液<sup>[3-4]</sup>,随着机械加工行业的飞速发展,油基金属加工液已经无法满足市场需求,半合成加工液的使用占比愈来愈高,能够达到加工液总用量的70%以上<sup>[5-6]</sup>,且呈现逐年上升的趋势<sup>[7]</sup>。然而水基金属加工液也存在较为突出的问题,为了保证加工液的各方面性能<sup>[8]</sup>,在其中加入多种功能性添加剂,这些加工液的有效成分会成为微生物生长的营养物质,导致加工液容易滋生细菌发生腐败<sup>[9-10]</sup>。由于微生物繁殖导致加工液的润滑性与防锈性能下降<sup>[11]</sup>,降低了加工液的质量和有效性,同时,还可能污染生产环境,对接触加工的工人造成职业健康危害<sup>[12-14]</sup>,因此,预防和减少金属加工液的微生物污染是十分重要的研究方向。

水基加工液中微生物包括细菌和真菌,其中主要含有肺炎球菌、金黄色葡萄球菌、大肠埃希菌等细菌以及曲霉、酵母等真菌<sup>[5,15]</sup>。加工液中微生物含量过高,快速分解有机物,有效组分被消耗殆尽,就会造成pH值降低<sup>[16]</sup>,这是导致切削液失效的最主要的原因。因此,为了解决加工液微生物稳定性的问题,目前较为主流的方法是在体系中加入杀菌剂或功能添加剂来进行抑制细菌和真菌的滋生<sup>[11,17-18]</sup>,根据杀菌机理的不同分为释放甲醛型、异噻唑啉酮型、含硼类以及胺类<sup>[5,19]</sup>。然而,不同抑菌剂对于加工液的微生物稳定性的影响也不尽相同,本文主要探究了杀菌剂与添加剂之间的复配组合对于金属加工液抑菌的影响,对各组试验液进行了性能评价,并分析探讨了各种添加剂的杀菌机制,为未来提升加工液抗菌性能提供新的思路与参考。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 基础配方

用于试验的基础液配方为环烷基基础油、石油磺酸钠、高级脂肪酸、非离子表面活性剂等。为了更加明显地体现不同添加剂的抑菌效果,且使微生物能够更好地生长繁殖,基础液原液中并未加入杀菌剂。以此作为母液,在后续试验中,分别加入不同种的抑菌添加剂到切削液中作为培养样本,添加剂用量均为质量百分数。将从大连某工厂车间现场取回的已失效的金属加工液废液作为此次试验添

加的菌种。

#### 1.1.2 实验仪器

HQD45恒温摇床、PHBJ-260型酸度计、LC-MSB-HD恒温磁力搅拌器、CX-0088型增氧泵、DHP781型电热恒温培养箱、德国Schulke mikrocount combi测菌片、Nikon ECLIPSE Ts2型显微镜。

#### 1.1.3 功能添加剂种类

MBM为吗啉型释放甲醛型杀菌剂;MBO为唑烷类释放甲醛型水基杀菌剂;PE为苯氧乙醇,主要抑制革兰氏阴性菌<sup>[20]</sup>;DCHA为二环己胺,一种特种胺;BDEA为正丁基二乙醇胺,具有长支链的特种胺;BMEA:正丁基乙醇胺是具有长碳链的特种胺;BA为硼酸。

### 1.2 实验方法

本试验采用金属加工液抗菌动态恒温摇床法,根据ASTM D3946—92《Standard Test Methods for Evaluating the Bacteria Resistance of Water-Dilutable Metalworking Fluids》,即水基金属加工液抗菌性能评价方法,在实验室内建立水基切削液抗菌性能测试平台。首先向250 mL的锥形瓶中分别加入180 mL含有不同杀菌剂的切削液,并向其中添加培养好的菌种20 mL,以及20 g铸铁屑、淀粉等微生物所需的营养物质,搅拌均匀。将锥形瓶置于30℃恒温摇床内,通空气于试样中。以7天为1个周期,每周通气5天后停气2天。在此过程中,及时补加无菌水以防止好氧菌死亡以及厌氧菌的过度繁殖。定期测定pH值并记录外观变化,同时,采用德国Schulke mikrocount combi测菌片检测试样中的细菌和真菌菌落总数。试验中所用菌种的细菌菌落总数达到 $10^9$  cfu/mL以上,真菌菌落总数达到 $10^4$  cfu/mL以上。样品变质指标为:细菌总数大于 $10^7$  cfu/mL,真菌总数大于 $10^3$  cfu/mL。

为从多维度分析不同种的功能添加剂对加工液抗菌性的影响,采用了Nikon ECLIPSE Ts2型显微镜对各组检测试样进行了显微拍摄来观察微生物的生长情况,并采用复孔实验,以减少实验误差。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同添加剂对切削液抗菌性的影响

图1和2为添加不同种抑菌剂2% MBM、2% MBO、4% PE、3% DCHA、3% BDEA、3% BMEA对乳化切削液抗菌性能影响的实验结果对比图。

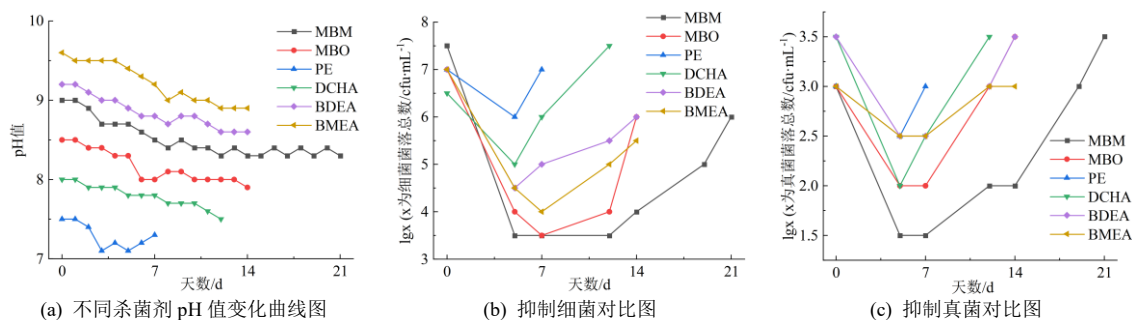


图 1 不同杀菌剂 pH 值与抑菌情况对比

Fig.1 Comparison of pH value and bacteriostasis of different fungicides

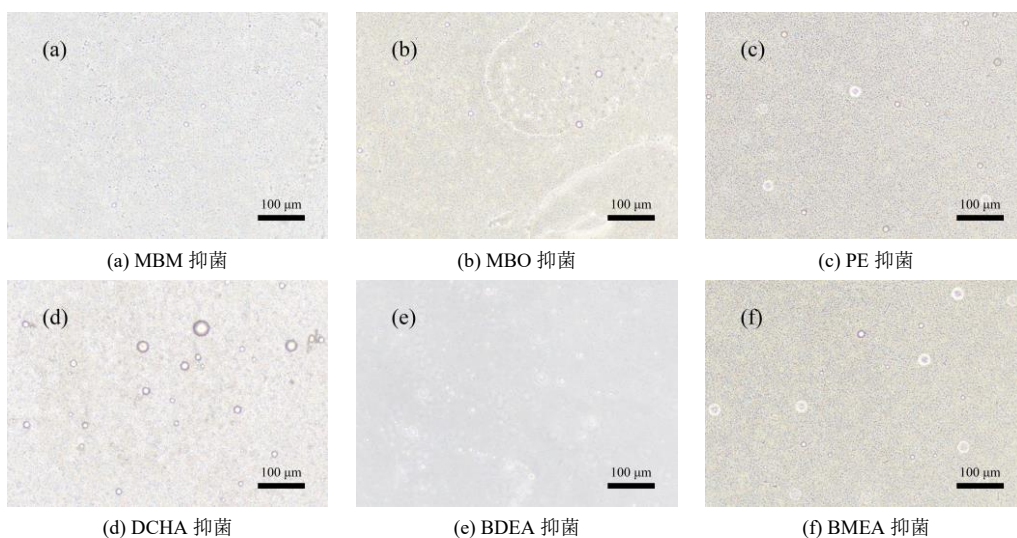


图 2 不同种杀菌剂显微照片

Fig.2 Micrographs of different microbicides

对比图1实验结果可知,单独添加一种杀菌添加剂仅在短期内对于切削液有抑菌作用,但无长期性;同时,该体系中pH值下降速度快,杀菌剂也很快被耗尽。对比图2中六种杀菌剂的显微照片可知,含有MBM杀菌剂的样液,微生物存活量相对较少。然而总体来看,样液内微生物生存数量均较高,说明仅添加一种抑菌剂并不能达到良好的抗菌效果。综上所述,MBM在综合性能表现上来看对比其他几

种功能添加剂其抑菌性较好,pH下降速度相对较慢,对于增强金属加工液的抑菌性有积极作用。

## 2.2 复配特种胺对切削液抗菌性的影响

从上述试验结果来看,仅添加一种杀菌剂无法保持切加工液的长期抑菌性。因此,在后续研究中,引入胺类添加剂与杀菌剂MBM进行复配,增强切削液体系的杀菌性。图3和4为不同类型的特种胺3% DCHA、3% BDEA、3% BMEA分别与2% MBM杀菌

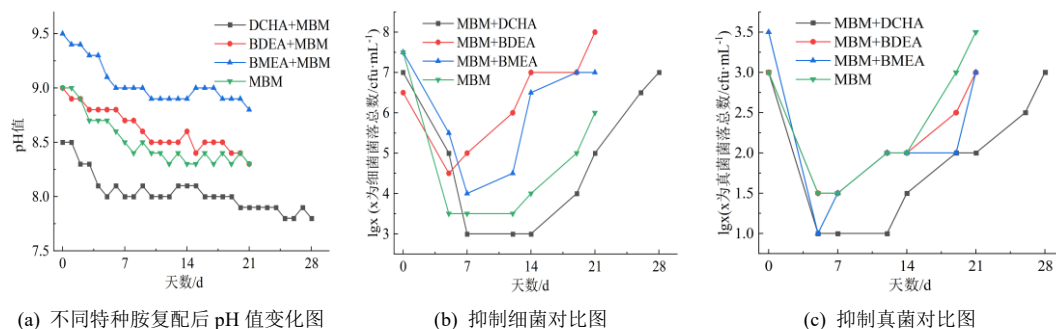


图 3 不同特种胺与杀菌剂复配后 pH 值与抑菌情况对比

Fig.3 Comparison of pH value and bacteriostasis after the combination of different special amines and microbicides

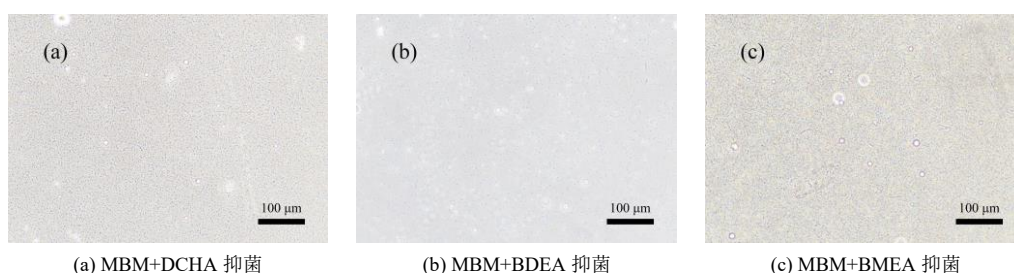


图4 不同特种胺与杀菌剂复配显微照片

Fig.4 Micrographs of different special amines combined with microbicides

剂复配后对切削液抗菌性能影响的试验结果对比图。

从图3对比结果来看,引入特种胺与杀菌剂复配以后从总体上来看切削液体系的杀菌性能有所提升,从图4不难看出,DCHA与MBM的组合相较于其他两组微生物生存量较少,同时与单独添加MBM和DCHA相比,在抗菌性上更是有了很大的提升,因此可以说明,将特种胺与杀菌剂组合可以增强体系的微生物抗性。

### 2.3 硼酸对切削液抗菌性的影响

增加特种胺后,加工液体系的抑菌效果有明显改善,加工液的使用寿命也有显著提升,但仍旧无法保持长期的稳定抑菌。最终决定在杀菌体系中引入硼酸来复配,使加工液抗菌性得到进一步提升。在3% DCHA+2% MBM组合基础上加入硼酸,探究该复配组合对切削液抗菌性能的影响,下图为增加2.5%和5%硼酸用量后的复配组合试验结果对比。

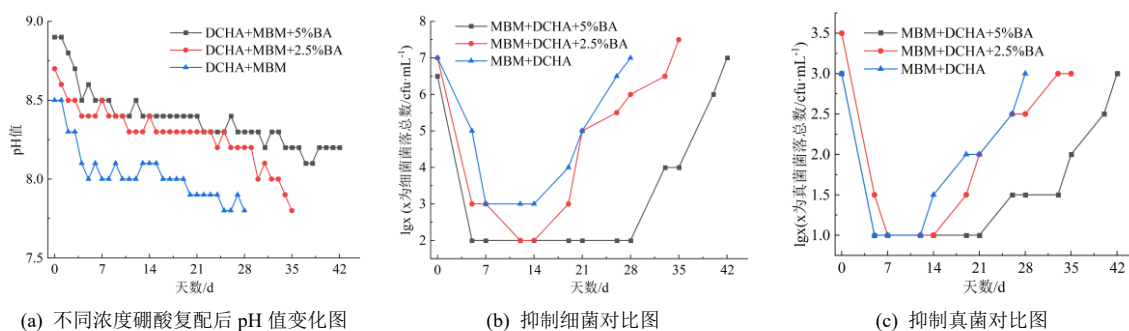


图5 不同特种胺与杀菌剂复配后 pH 值与抑菌情况对比

Fig.5 Comparison of pH value and bacteriostasis after the combination of different special amines and microbicides

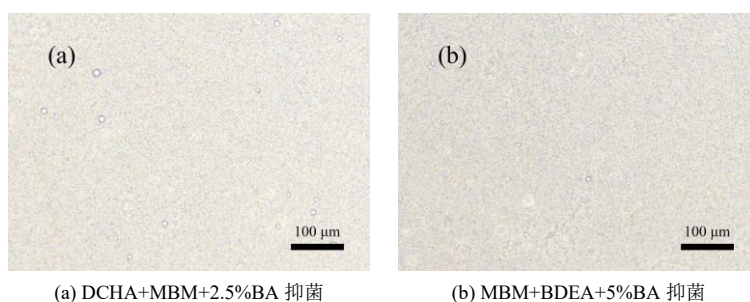


图6 不同硼酸浓度下的抑菌显微照片

Fig.6 Bacteriostatic micrograph at different boric acid concentrations

从图5和6中可以看出,加入5%硼酸的组别表现出了良好的微生物抗性,抑菌效果脱颖而出,有优良的pH值稳定性,且对比3% DCHA+2% MBM组,加入硼酸后抑菌性更加持久。而且随着硼酸浓度的增加、抑菌性能和碱储备能力的提升,使切削液体

系的pH值稳定性随之增强,更有效地延长了金属加工液的使用寿命。

### 2.4 功能添加剂对切削液抗菌性的影响的机制分析

由于选用添加剂的种类不同,其抑菌的效果与

机制也有所不同。杀菌剂的整体作用机制可以根据其主要针对的微生物结构来定义,可以总结为3个层次的相互作用:与细胞外组分的相互作用、与细胞质膜的相互作用和与细胞质组分的相互作用<sup>[21]</sup>。MBM作为甲醛释放型杀菌剂,作用于细胞质组分间,相比于其他杀菌剂有较好的抑菌效果,这是由于甲醛释放剂通过释放甲醛破坏微生物细胞的蛋白质结构,或与承担细胞主要功能的酶发生烷基化反应<sup>[5,22]</sup>,从而达到了抑制微生物繁殖的目的。

然而,在引入特种胺复配组合后,体系的杀菌性能可以看出有显著提升,这可能是因为传统醇胺容易被微生物代谢,通过引入适当修饰基团,改善了醇胺的生物抗性,使加工液的杀菌性得以提升。

在引入硼酸后,明显增强了体系的抗菌性能,这可能是由于硼酸是一种酶抑制剂,可以阻断磷脂代谢中的酶,而硼酸中的硼是一种缺电子元素,易与外部电子结合<sup>[23]</sup>。硼酸与胺类物质结合生成的硼酸盐,通过与带负电的细胞表面结合,改变细胞膜或细胞壁的渗透性,导致细胞破裂死亡<sup>[5]</sup>。

将不同类型的添加剂联用,发挥各抑菌剂间的协同作用,特种胺与硼酸的引入,弥补了MBM作为甲醛释放型杀菌剂的缺陷,拓宽了抗菌谱,提高了抗菌有效性。

### 3 结论

(1) 不同抑菌添加剂对于改变体系微生物抗性的能力有所不同,甲醛释放剂的抑菌表现良好,对于真菌和细菌均有抑制作用,在综合性能方面要优于其他类型杀菌剂;

(2) 相对于传统醇胺,添加了修饰基团的特种胺更具有生物抗性,单独使用时杀菌效果并不理想,但与杀菌剂复配后,抗菌效果得到了显著增强;

(3) 引入5%硼酸后的杀菌剂组合,抑菌效果提升明显,且具有优异的pH值稳定性,综合性能良好,对于延长切削液的使用寿命具有正向作用。

### 参考文献

[1] 申媛媛,董耀华,李庆宏,等. 铝合金在切削乳化液中的微生物腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 275-284.

[2] 刘伟康,郭春梅,姜鹏飞,等. 环保型环烷基油金属切削液的开发与应用[J]. 石化技术与应用, 2024, 42(2): 100-103.

[3] 戴媛静,王宇,周玥. “双碳”趋势下金属加工液的发展[J]. 中国科技信息, 2023(10): 121-124.

[4] Saha R, Donofrio R S. The microbiology of metalworking fluids[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012(94): 1119-1130.

[5] Tang L Z, Zhang Y B, Li C H, et al. Biological stability of water-based cutting fluids: progress and application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022(35): 3.

[6] Rao D N, Srikant R R, Srikant P N. Effect of emulsifier content on microbial[J]. Int. J. Machining and Machinability of Materials, 2007, 2(3): 469-477.

[7] 李庆宏,杨懿,吴泽奇,等. 切削液的微生物劣化对碳钢耐腐蚀行为的影响[J]. 润滑与密封, 2020, 45(10): 14-21.

[8] Passman F J, Küenzi P. Microbiology in water-miscible metalworking fluids[J]. Tribology Transactions, 2020, 63(6): 1147-1171.

[9] Rabenstein A, Koch T, Remesch M, et al. Microbial degradation of water miscible metal working fluids[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2009, 63(8): 1023-1029.

[10] Martino P D. Ways to improve biocides for metalworking fluid[J]. Aims Microbiology, 2021, 7(1): 13-27.

[11] 王晓菲. 水基切削液杀菌剂的合成及性能评价[J]. 化工技术与开发, 2017, 46(6): 26-28.

[12] Trafny E A., Lewandowski R, Kozłowska K, et al. Microbial contamination and biofilms on machines of metal industry using metalworking fluids with or without biocides[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015(99): 31-38.

[13] Selvaraju S B, Khan I U H, Yadav J S. Susceptibility of mycobacterium immunogenum and pseudomonas fluorescens to formaldehyde and non-formaldehyde biocides in semi-synthetic metalworking fluids[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2011, 12(1): 725-741.

[14] 李春风,罗新民. 金属加工液中控制微生物方法初探[J]. 润滑油, 2005, 20(1): 21-24.

[15] 李广宇,李春惠,张芒芒,等. 复合杀菌剂对水基切削液抗菌性能影响的研究[J]. 化学与黏合, 2015, 37(2): 85-90.

[16] 李庆宏,韩明眸,申媛媛,等. 微生物对切削液稳定性的影响[J]. 润滑与密封, 2021, 46(3): 11-16.

[17] 程慧杰,赵鹏飞,李小磊,等. 植物油基金属加工液中

- 的生物抑菌技术研究[J]. 润滑与密封, 2021, 46(11): 122-131.
- [18] 张秀妍, 马琳, 郝佳. 水基切削液杀菌剂的合成及杀菌性能研究[J]. 应用科技, 2008, 16(5): 15-16.
- [19] 杨兰, 曾诗琪, 熊星, 等. 水基金属加工液中微生物多样性研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 641-648.
- [20] 寇然, 金一丰, 周扬, 等. 苯氧乙醇的纯化工艺研究[J]. 精细化工中间体, 2021, 51(1): 40-44.
- [21] Morente E O, Fernández-Fuentes M A, Burgos M J G, et al. Biocide tolerance in bacteria[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 162(1): 13-25.
- [22] 鲍沂沂, 李谨, 刘庆坤. 金属切削液杀菌剂综述[J]. 合成润滑材料, 2022, 49(4): 29-32.
- [23] 李玮, 马涛, 王森, 等. 硼酸酯在水基切削液中的应用[J]. 工具技术, 2010, 44(5): 93-95.

\*\*\*\*\*

\*上接 77 页\*

- [7] 侯素霞, 罗积军, 徐军, 等. 基于声发射技术的压力容器应力腐蚀检测研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(3): 220-221.
- [8] 高言, 孙洁, 吴海东, 等. 热浸镀时间对含稀土的锌基合金镀层耐蚀性的影响[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(13): 953-957.
- [9] 赵越, 涂浩, 刘亚, 等. 双镀 Zn-xAl-1Mg 合金镀层的组织及耐蚀性[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(5): 26-31.
- [10] 刘志昌, 李洋洋, 王义, 等. 门窗五金件镀层腐蚀失效分析和解决[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(4): 234-237.
- [11] 彭昭玮, 李伟洲, 彭成章. 电沉积 Ni-Fe-Co 合金镀层的微观结构及耐腐蚀性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(5): 1593-1602.
- [12] 付传起, 林永威, 黄亚忠, 等. Ni-氧化石墨烯纳米复合镀层的力学及抗腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2023, 52(8): 290-300.
- [13] 赵冠琳, 刘树帅, 吴东亭, 等. 元素 W 与 Mo 对非晶 Ni-P 镀层热稳定性和耐腐蚀性能的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(7): 164-170.
- [14] 段峻, 陈兆建, 靳娟, 等. 热喷涂层与电镀层的抗气蚀和耐腐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2022, 55(8): 134-139.
- [15] 夏晓健, 万芯瑗, 严康骅, 等. 镍钨镀层的制备及其耐磨性和耐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(8): 29-34.
- [16] 商婷, 蒋光锐, 刘广会, 等. 热处理对 Zn-6%Al-3%Mg 镀层微观组织与耐蚀性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(6): 1413-1418.

\*\*\*\*\*

\*上接 100 页\*

- 40(3): 41-45.
- [15] 麟博. 电弧离子镀特种钢厚铬膜及其性能研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- [16] 夏春雷, 袁志华, 罗佳, 等. 炮钢基电镀铬涂层热震过程仿真与试验研究[J]. 材料保护, 2020, 53(4): 29-34.
- [17] 李建普, 卢旭东, 李冬冬. 舰用钛合金及铬涂层抗氧化和腐蚀性能研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(5): 72-76.
- [18] 陈彬. 电弧离子镀 TiAlN、CrAlN 涂层的制备及性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [19] 谢世明. 电弧离子镀 NiCoCrAlYTa 涂层的制备及抗氧化性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [20] Portilla O C, Giraldo A, Cardona A J, et al. Effect of temperature on the structure and tribological properties of Ti, TiN and Ti/TiN coatings deposited by cathodic Arc PVD[J]. Coatings, 2024, 14(7): 823-823.