

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.05.007

建筑装饰用铝青铜表面改性与耐磨性能研究

郑子方^{1*}, 王子怡², 李强³

(1. 郑州西亚斯学院, 河南 郑州 450000; 2. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471000; 3. 河南理工大学 材料科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 为了提升装饰用铝青铜合金的表面耐磨性, 采用非平衡磁控溅射和等离子渗氮相结合的方法, 在铝青铜合金表面制备了不同成分和膜厚的改性膜层, 对比分析了改性膜层的显微形貌、物相组成和耐磨性能。结果表明: 装饰用铝青铜合金表面磁控溅射 Cu-Ti 膜的 Ti/Cu 原子比接近 6.7(M1)、1.7(M2) 和 0.5(M3), 预置膜厚分别为 3.4 μm 、3.4 μm 和 2.8 μm 。660 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ 渗氮处理后, M1、M2 和 M3 膜层的截面厚度分别为 7.2 μm 、5.8 μm 和 2.7 μm , 磨损率分别为 $0.21\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $6.27\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $9.98\times 10^{-14}\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$; 660 $^{\circ}\text{C}/5\text{ h}$ 渗氮处理后, M1、M2 和 M3 膜层的截面厚度未见明显变化, 磨损率分别为 $0.47\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $0.22\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $3.94\times 10^{-14}\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。660 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ 和 660 $^{\circ}\text{C}/5\text{ h}$ 渗氮处理后, 膜层的磨损率较铜合金基体明显降低。660 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ 渗氮处理后, M1 膜层的磨损率最小 ($0.21\times 10^{-14}\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$), 耐磨性最好, 此时的磨损机制为氧化磨损加黏着磨损。

关键词: 铝青铜; 表面改性层; 渗氮; 显微形貌; 摩擦磨损

中图分类号: TU512

文献标识码: A

Research on surface modification and wear resistance of aluminum bronze for architectural decoration

Zheng Zifang^{1*}, Wang Ziyi², Li Qiang³

(1. Zhengzhou Sias College, Zhengzhou 450000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to improve the surface wear resistance of aluminum bronze alloy for decoration, a combination of unbalanced magnetron sputtering and plasma nitriding was used to prepare modified film layers with different compositions and film thicknesses on the surface of aluminum bronze alloy. The microstructure, phase composition and wear resistance of the modified film layers were compared and analyzed. The results showed that the Ti/Cu atomic ratio of the Cu-Ti film sputtered on the surface of aluminum bronze alloy for decoration was close to 6.7 (M1), 1.7 (M2), and 0.5 (M3), with preset film thicknesses of 3.4 μm , 3.4 μm , and 2.8 μm , respectively. The cross-sectional thicknesses of M1, M2, and M3 film layers after nitriding treatment at 660 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ were 7.2 μm , 5.8 μm , and 2.7 μm , with wear rates of $0.21\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, $6.27\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ and $9.98\times 10^{-14}\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, respectively. After nitriding treatment at 660 $^{\circ}\text{C}/5\text{ h}$, there was no significant change in the cross-sectional thickness of M1, M2,

收稿日期: 2024-01-10

修回日期: 2024-02-29

作者简介: 郑子方(1985—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 建筑材料等。email: summerrecall@163.com

基金项目: 河南省自然科学基金项目(ZX21023305); 河南省科技攻关计划项目(2102210282); 2024 年民办普通高等学校专业建设资助项目(教政法[2023]369 号)

and M3 film layers, and the wear rates were $0.47\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, $0.22\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ and $3.94\times10^{-14}\text{ m}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, respectively. The wear rate of the film layer after $660\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ and $660\text{ }^{\circ}\text{C}/5\text{ h}$ nitriding treatment is significantly reduced compared to the copper alloy matrix. The wear rate of the M1 film layer after $660\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ nitriding treatment is smallest with the best wear resistance, and the wear mechanism is oxidation wear and adhesive wear.

Keywords: aluminum bronze; surface modification layer; nitriding; microscopic morphology; friction and wear

铜及其合金由于具有柔和的质感、良好的强度和韧性、良好的耐磨性和经久耐用等特点,在建筑中应用较为广泛。常见的建筑灯饰、门把手、雕塑、浴室器具等多用铜合金进行装饰^[1]。随着现代建筑对装饰材料性能要求的提高,装饰用铜合金除需要保持原有特性外,还需要具有良好的耐磨性能,以满足装饰用材在日常使用过程中的摩擦磨损,从而保障其艺术性和服役寿命。和钢、铝等其他金属材料相比,铜合金具有硬度低、耐磨性差等问题^[2],有必要对其进行表面改性处理,以在不改变其固有物性的前提下提升其耐磨性能。虽然采用激光表面改性、电子束表面改性、表面机械合金化、表面喷涂等方法,能够在铜合金表面制备改性层,并一定程度改善其腐蚀性能和摩擦性能,但是所制备的表面改性层存在与基体的结合力差、改性层脆性大、易于开裂和剥落等问题^[3-5]。

本文尝试采用非平衡磁控溅射和等离子渗氮相结合的方法,在铝青铜合金表面制备改性层。通过预先在铜合金基体表面预置 Cu-Ti 膜以提升与基体的结合力,再通过等离子渗氮的方法将氮引入到改性层表面,以提升表面耐磨性。这方面的研究报道相对较少,膜层成分及渗氮工艺参数对膜层形貌和耐磨性能的影响规律也不清楚^[6-9]。采用非平衡磁控溅射和等离子渗氮相结合的方法,在建筑装饰用铝青铜合金表面制备不同成分和膜厚的改性膜层,通过对比分析改性膜层的显微形貌、物相组成和耐

磨性能,可为建筑用铜合金的表面改性层设计提供参考并推动其实际应用。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为装饰用铝青铜的主要元素化学成分如表 1 所示。采用线切割的方法将装饰用铝青铜加工成 $20\text{ mm}\times20\text{ mm}\times5\text{ mm}$ 。

表 1 装饰用铝青铜的化学成分(wt.%)
Tab.1 Chemical composition of decorative aluminum bronze(wt.%)

Al	C	Si	Pb	P	S	Fe	Mn	Sn	Zn	Cu
8.96	0.01	0.05	0.02	0.04	0.02	3.27	0.28	0.06	0.07	余量

1.2 表面处理

在对装饰用铝青铜进行表面镀膜前,采用 200 #~2000 #砂纸逐级打磨、抛光膏抛光后,清洗吹干。之后进行磁控溅射和等离子渗氮处理,具体工艺参数如表 2 所示。采用北京创世威纳科技有限公司的 msip016 型非平衡磁控溅射离子镀设备,在膜层表面预置 Cu-Ti 膜。靶材为纯 Cu 靶和纯 Ti 靶,溅射时间为 3 h,基底偏压为 -70 V ,基体与靶材距离为 120 mm ,保护气为高纯氩气,通过控制靶材功率调整膜层成分^[10]。在 Carbolite 公司提供的 SENTECH SI 600F 型脉冲等离子体高温多元共渗系统中,对预置 Cu-Ti 膜进行进一步等离子渗氮处理,渗氮处理时间分别为 2 h 和 5 h,渗氮结束后空冷至室温。

表 2 磁控溅射和等离子渗氮工艺参数
Tab.2 Process parameters for magnetron sputtering and plasma nitriding

膜层	磁控溅射		等离子渗氮		
	Ti 靶功率/W	Cu 靶功率/W	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h	气体流量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
膜层 M1	2600	150	660	2, 5	$0.3\text{N}_2+0.1\text{H}_2$
膜层 M2	2100	300	660	2, 5	$0.3\text{N}_2+0.1\text{H}_2$
膜层 M3	1200	450	660	2, 5	$0.3\text{N}_2+0.1\text{H}_2$

1.3 测试方法

采用钢研纳克生产的FE-2050X型扫描电子显微镜对膜层的表面形貌和截面形貌进行观察,并采用附带的牛津能谱仪进行微区成分分析;采用日本理学 SmartLab SE 智能 X 射线衍射仪进行物相分析,扫描速度为 $2^\circ/\text{min}$;采用美国 AEP 公司 UT 750 型多功能摩擦磨损试验机对不同膜层进行干摩擦摩擦磨损性能测试,对磨球为直径 5 mm 的 WC 球,施加的载荷为 4 N、转速 180 r/min;采用深圳市中图仪

器股份有限公司提供的 SuperViewW1 型白光干涉仪对磨痕轮廓进行测量并计算体积磨损率^[11]。

2 结果与讨论

2.1 磁控溅射膜层

图 1 为铜合金表面膜层的显微形貌和 X 射线衍射图谱(XRD),分别列出了膜层 M1、M2 和 M3 的表面形貌和 XRD 图谱。

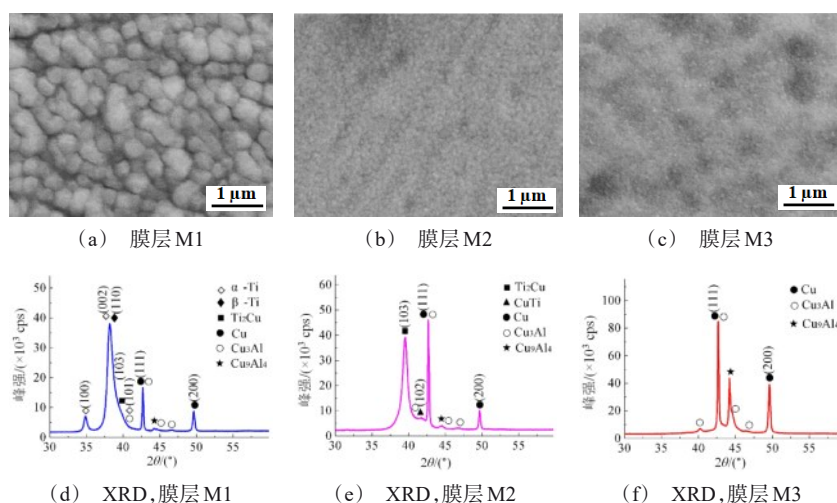


图 1 铜合金表面膜层的显微形貌和 XRD 图谱

Fig. 1 Micromorphology and XRD patterns of the surface film on copper alloy

从表面显微形貌中可见,M1膜层表面呈颗粒状,颗粒之间的界面较为清晰,颗粒尺寸相对较大;M2和M3膜层表面颗粒尺寸较小,膜层表面未见异常孔洞或者裂纹等缺陷。膜层M1、M2和M3的表面形貌差异主要与磁控溅射工艺不同有关。从XRD图中可见,M1膜层表面主要由 α -Ti、 β -Ti和 Ti_2Cu 相组成,并含有少量 Cu_3Al 和 Cu_9Al_4 相,Cu相衍射峰主要来自铜合金基体;M2膜层主要由 Ti_2Cu 相组成,并含有少量 CuTi 、 Cu_3Al 和 Cu_9Al_4 相;M3膜层主要由Cu、 Cu_3Al 和 Cu_9Al_4 相组成,未检测到Cu与Ti之间的化合物。

表3为铜合金表面膜层的组成及膜厚测试结果。M1、M2和M3膜层的Ti/Cu原子比接近6.7、1.7和0.5,预置膜厚分别为 $3.4\ \mu\text{m}$ 、 $3.4\ \mu\text{m}$ 和 $2.8\ \mu\text{m}$,划痕法测得膜层破碎时的临界载荷分别为52 N、38 N和44 N。可见,通过改变Ti靶和Cu靶功率可在铜合金基体表面制备不同成分和不同膜厚的Cu-Ti

膜,且磁控溅射Cu-Ti膜与铜合金基体具有良好的结合力,后续可进一步通过表面渗氮处理来提升膜层的耐磨性^[13]。

表3 铜合金表面膜层的组成、膜厚和结合力

Tab.3 Composition,thickness and and adhesion of film on the surface of copper alloy

膜层	组成/at.%		膜厚/ μm	膜层破碎时的临界载荷/N
	Cu	Ti		
膜层 M1	13	87	3.4	52
膜层 M2	37	63	3.4	38
膜层 M3	66	34	2.8	44

2.2 等离子渗氮膜层的物相和形貌

图2为铜合金表面渗氮膜层的XRD分析结果,分别列出了 660°C 渗氮2 h和渗氮5 h后膜层的XRD图谱。对表面膜层进行 $660^\circ\text{C}/2\ \text{h}$ 渗氮处理后,M1膜层中除了 β -Ti、 Ti_2Cu 相,还出现了 $\text{TiN}_{0.3}$ 、 Cu_3Ti 、 AlCu_2Ti 相;M2膜层中原有 Ti_2Cu 相衍射峰减

弱,新形成了 $\text{TiN}_{0.3}$ 和 AlCu_2Ti 相;M3 膜层中可见 $\text{TiN}_{0.3}$ 、 Cu_3Ti 和 CuTi 相衍射峰,且膜层中 $\text{TiN}_{0.3}$ 衍射峰强度有随着膜层中 Ti 含量的降低而减弱的趋势。延长渗氮时间至 5 h,660 °C/5 h 渗氮处理后,M1 和

M3 膜层的物相组成未见明显变化,M3 膜层中 $\text{TiN}_{0.3}$ 相消失,并形成了 Cu_3Ti 相。此外, $\text{TiN}_{0.3}$ 、 AlCu_2Ti 和 Cu_3Ti 相的硬度都高于铜合金基体^[14]。

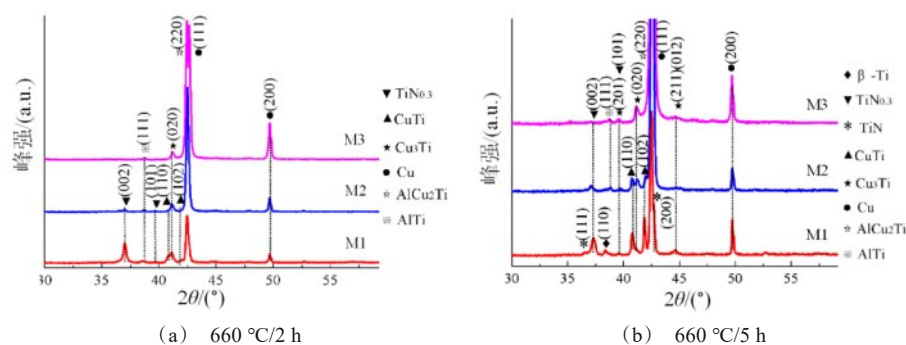


图2 铜合金表面渗氮膜层的XRD图谱

Fig.2 XRD patterns of nitriding film on the surface of copper alloy

图3为铜合金表面渗氮膜层的表面形貌。对表面膜层进行 660 °C/2 h 渗氮处理后,M1、M2 和 M3 表面渗氮膜层的形貌较为相似,都可见白色富Fe颗粒(如图3(c)位置D)均匀分布。但能谱分析表明,M1 渗氮膜层表面未检测到Al和Cu元素(图3(a)方框A所示),而M2和M3渗氮膜层表面可检测到Al和Cu元素(图3(b)的方框B和3(c)的方框C所示)。

这主要是由于Al和Cu元素在膜层中的扩散速率不同^[15]。延长渗氮时间至 5 h,660 °C/5 h 渗氮处理后,膜层表面富Fe颗粒有不同程度长大,且M2和M3渗氮膜层的表面富Fe颗粒长大较为明显。相较于 660 °C/2 h 渗氮处理后的膜层,660 °C/5 h 渗氮处理后膜层表面的Al和Cu元素含量有所增加(图3(d)的位置E及图3(f)方框)。

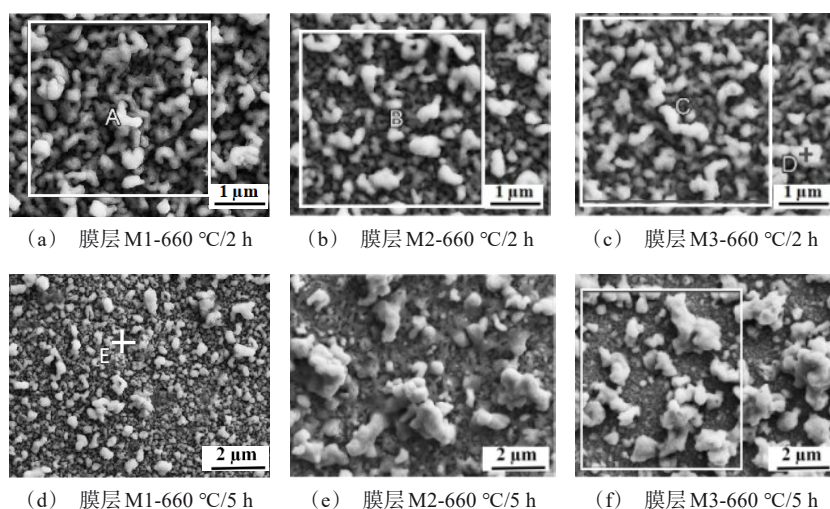


图3 铜合金表面渗氮膜层的表面形貌

Fig.3 Surface morphology of nitriding film on copper alloy surface

进一步对渗氮膜层进行截面形貌观察和能谱分析,如图4和图5所示。对表面膜层进行 660 °C/2 h 渗氮处理后,M1、M2 和 M3 膜层的截面厚度分别

7.2 μm、5.8 μm 和 2.7 μm。渗氮膜层中,膜层表面和界面结合处的Al、Cu、Ti元素有梯度分布特征,且M1 渗氮膜层外表面有较高含量的N元素,M2 和

M3 渗氮膜层外表面有较高含量的 Cu 和 Ti 元素。对表面膜层进行 660 °C/5 h 渗氮处理后, M1、M2 和 M3 膜层的截面厚度未见明显变化, 渗氮膜层中膜层表面和界面结合处的 Al、Cu、Ti 元素也呈现梯度分布特征, 元素扩散程度较 660 °C/2 h 渗氮处理后

更加明显。这主要是因为渗氮膜层在高温下停留的时间更长, 元素扩散会更加充分所致^[16]。此外, 660 °C/2 h 渗氮和 660 °C/5 h 渗氮处理后, 膜层与基体的界面结合良好, 未见裂纹或者孔洞等缺陷存在。

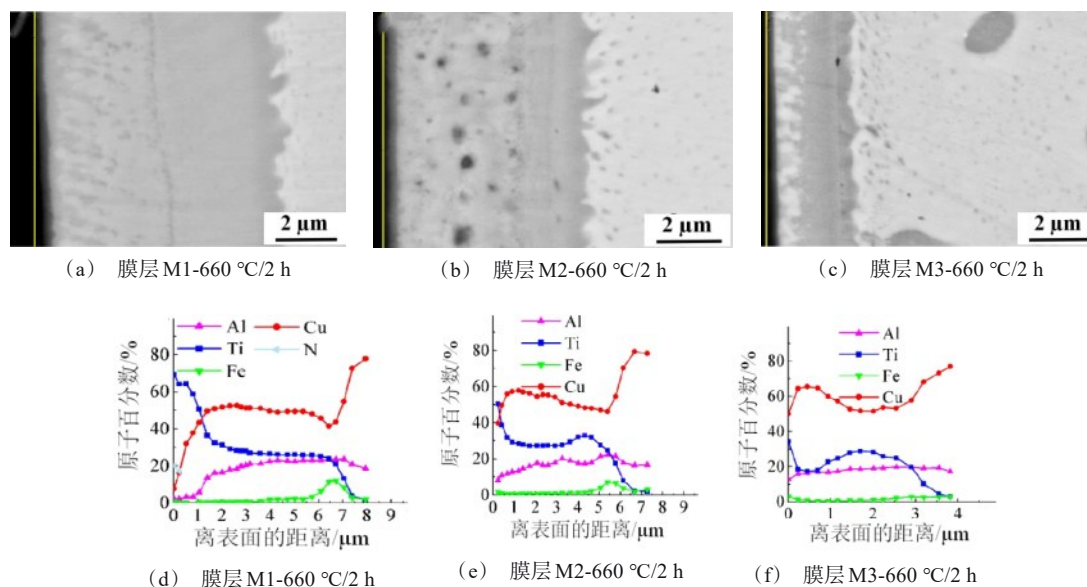


图4 渗氮 2 h 后膜层的截面形貌和元素线扫描分析

Fig.4 Cross section morphology and elemental line scanning analysis of the film after 2 hours of nitriding

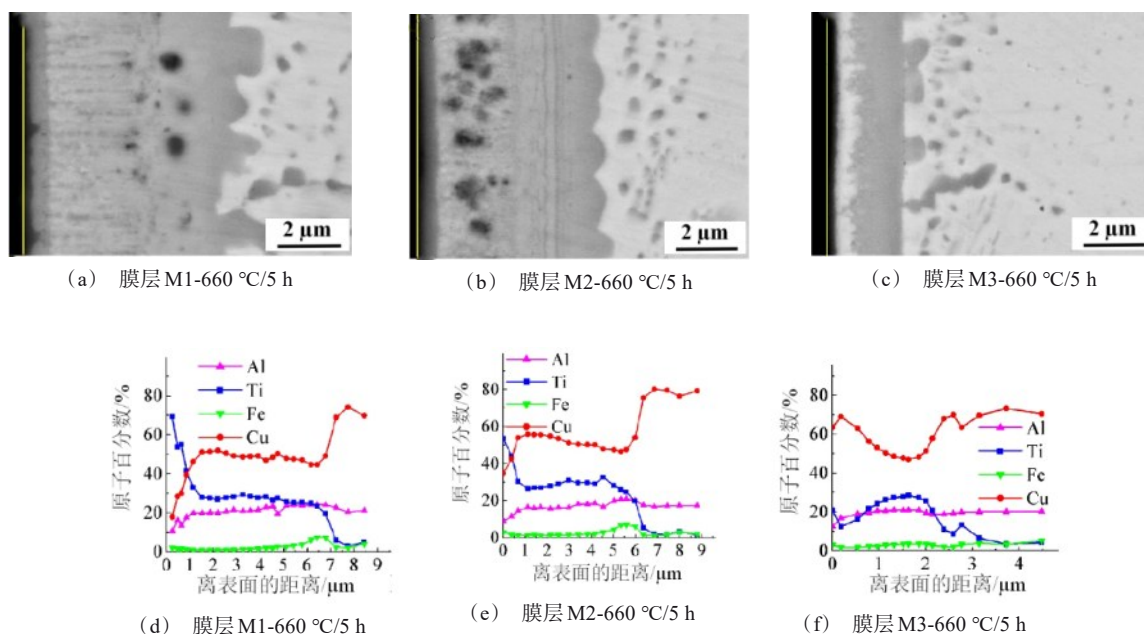


图5 渗氮 5 h 后膜层的截面形貌和元素线扫描分析

Fig.5 Cross section morphology and elemental line scanning analysis of the film after 5 hours of nitriding

2.3 渗氮膜层的摩擦磨损性能

图 6 为铜合金表面渗氮膜层的摩擦系数曲线,

表 4 中列出了铜合金基体和表面膜层渗氮处理后的磨损率的测试结果。

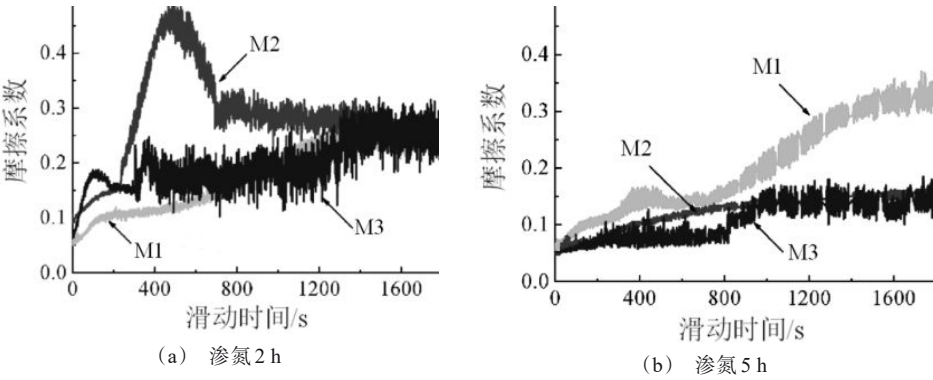


图 6 铜合金表面渗氮膜层的摩擦系数

Fig.6 Friction coefficient of nitriding film on the surface of copper alloy

表 4 铜合金基体和表面膜层渗氮处理后的磨损率

Tab.4 Wear rate of copper alloy matrix and surface layer after nitriding treatment

渗氮处理	渗氮膜层磨损率/($10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)		
	膜层 M1	膜层 M2	膜层 M3
渗氮 2 h	0.21	6.27	9.98
渗氮 5 h	0.47	0.22	3.94
基体	18.55		

从 660 °C/2 h 渗氮处理后各膜层的摩擦曲线可知,M2 渗氮膜层的摩擦系数波动幅度较大。在摩擦磨损稳定阶段,M1、M2 和 M3 渗氮膜层的摩擦系数分别在 0.11~0.23、0.25~0.28 和 0.18~0.27,磨损率分别为 $0.21 \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $6.27 \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $9.98 \times 10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。经过 5 h 渗氮处理后,M2 和 M3 渗氮膜层的摩擦系数更为稳定,稳定阶段的摩擦系数有所减小,而 M1 渗氮膜层的摩擦系数波动幅度相对较大。M1、M2 和 M3 渗氮膜层的磨损率分别为 $0.47 \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $0.22 \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $3.94 \times 10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。此外,和铜合金基体的磨损率($18.55 \times 10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)相比,660 °C/2 h 和 660 °C/5 h 渗氮处理后,膜层的磨损率明显降低。这主要是因为表面渗氮膜层中含有 $\text{TiN}_{0.3}$ 和 AlCu_2Ti 等硬质相,能够增强表层抵抗摩擦磨损的能力^[17]。

图 7 为铜合金表面渗氮膜层的摩擦磨损形貌,表 5 中列出了磨痕在不同区域的能谱分析结果。从 660 °C/2 h 渗氮处理后膜层的磨损形貌中可见,M1 和 M2 渗氮膜层的磨痕较浅,M3 渗氮膜层的磨痕较宽、较深。M1、M2 和 M3 渗氮膜层的磨痕深度分别

为 0.48 μm 、0.67 μm 和 16.26 μm ,磨痕宽度分别为 128 μm 、327 μm 和 516 μm 。能谱分析表明,M1 渗氮膜层的区域 B 含有 N 元素,A、C、D 和 F 区域的 O 含量较高。可见,3 种渗氮膜层在摩擦磨损过程中都出现了氧化磨损,且 M3 渗氮膜层还存在黏着磨损特征。而区域 B 的 N 元素主要是由于渗氮膜层的外表层形成了薄层氮化物^[18]。延长渗氮时间至 5 h,660 °C/5h 渗氮处理后,M1、M2 和 M3 渗氮膜层的磨痕深度分别为 1.49 μm 、0.68 μm 和 4.28 μm ,磨痕宽度分别为 198 μm 、152 μm 和 415 μm 。M1 和 M2 渗氮膜层的磨痕较浅,且 M1 渗氮膜层的磨痕中还存在凹坑形态,而 M3 渗氮磨损的磨痕相对较深,形成了犁沟和局部凹坑形态。能谱分析表明,G、H、I 和 J 区域都含有 N 元素,而所有微区都存在较高含量的 O 元素。表明 660 °C/5 h 渗氮处理后,渗氮膜层都发生了氧化磨损,且 M1 和 M2 渗氮膜层的外表面都形成了硬度较高的氮化层,可以有效提升表面膜层的抗摩擦磨损能力^[19-20]。反映在磨损率上则表现为 M1 和 M2 氮化膜层的磨损率明显低于 M3 氮化膜层。

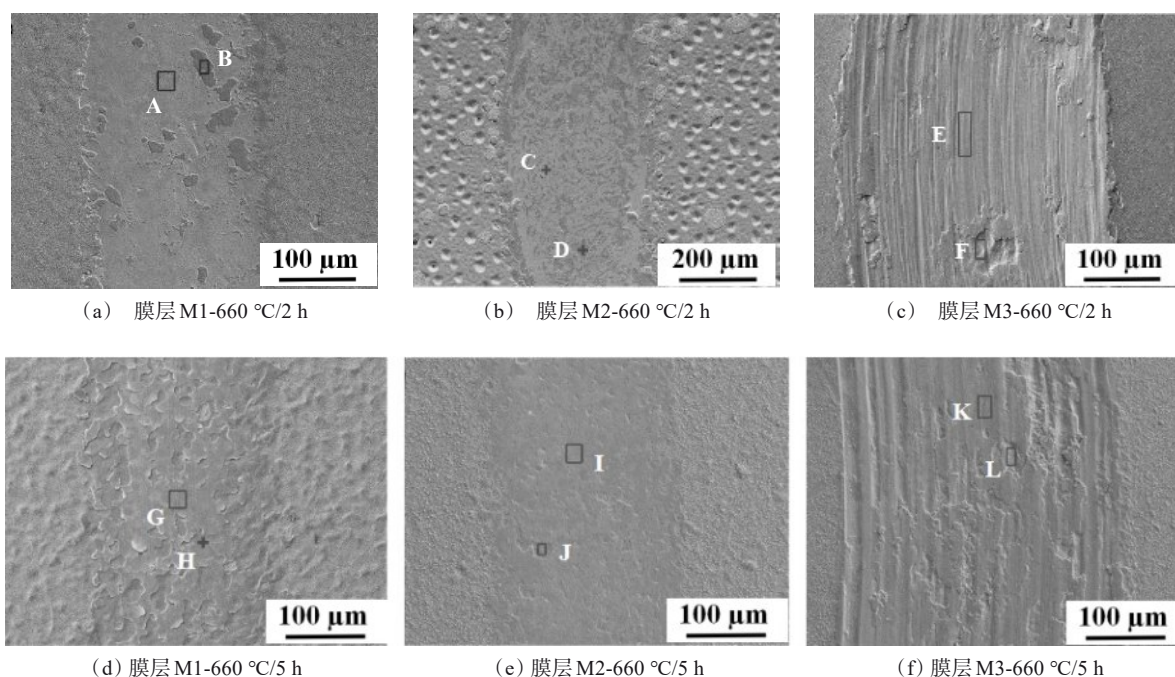


图7 铜合金表面渗氮膜层的摩擦磨损形貌

Fig.7 Friction and wear morphology of nitrided film on copper alloy surface

表5 磨痕不同区域的能谱分析结果

Tab. 5 Energy spectrum analysis results of different areas of grinding crack

区域	原子百分含量/ %							
	O	N	C	Al	Ti	Fe	W	Cu
A	58.50	—	8.56	—	18.62	10.36	3.69	0.27
B	42.30	3.85	5.97	—	40.46	6.72	0.22	0.48
C	11.41	—	19.09	11.74	14.98	1.67	—	41.11
D	41.54	—	13.61	6.87	10.50	0.88	—	26.60
E	—	—	0.22	13.21	—	4.40	20.84	61.33
F	10.81	—	0.22	11.33	2.06	3.33	19.00	53.25
G	54.30	4.74	5.43	0.86	28.91	3.60	1.19	0.97
H	31.27	16.01	9.00	1.55	38.16	2.62	—	1.39
I	51.58	2.74	8.73	0.97	14.30	19.84	1.10	0.74
J	49.42	6.81	6.89	1.86	21.08	11.74	0.42	1.78
K	34.54	—	11.11	11.12	6.23	2.15	—	34.85
L	26.41	—	12.47	12.79	10.65	2.16	—	35.52

3 结论

(1)装饰用铝青铜合金表面磁控溅射 Cu-Ti 膜的 Ti/Cu 原子比接近 6.7、1.7 和 0.5, 预置膜厚分别为 3.4 μm、3.4 μm 和 2.8 μm。M1 膜层主要由 α-Ti、β-Ti 和 Ti₂Cu 相组成, M2 膜层主要由 Ti₂Cu 相组成, M3 膜层中未检测到 Cu-Ti 化合物。

(2)660 °C/2 h 渗氮处理后, M1、M2 和 M3 膜层的截面厚度分别 7.2 μm、5.8 μm 和 2.7 μm, M1 渗氮膜层外表面有较高含量的 N 元素, M2 和 M3 渗氮膜层外表面有较高含量的 Cu 和 Ti 元素。660 °C/5 h 渗氮处理后, M1、M2 和 M3 膜层的截面厚度未见明显变化, 膜层表面和界面结合处可见 Al、Cu、Ti 元素的梯度分布。

(3) 660 °C/2 h 渗氮处理后, M1、M2 和 M3 渗氮膜层的磨损率分别为 $0.21 \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $6.27 \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $9.98 \times 10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。660 °C/5 h 渗氮处理后, M1、M2 和 M3 膜层的磨损率分别为 $0.47 \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $0.22 \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $3.94 \times 10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。相较铜合金基体的磨损率($18.55 \times 10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$), 660 °C/2 h 和 660 °C/5 h 渗氮处理后, 膜层的磨损率明显降低。660 °C/2 h 渗氮处理后, M1 渗氮膜层的磨损率最小, 耐磨性最好。

参考文献

- [1] 张慧洁, 侯瑶, 吴克凡. 建筑装饰用铜合金的表面钝化工艺与性能研究[J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(6): 539-545.
- [2] 高铭余, 谢宏斌, 方攸同, 等. 铜及铜合金表面处理技术进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(5): 1121-1133.
- [3] 吕绪明, 何茆, 江涛, 等. 纯铜表面等离子渗钼层的摩擦磨损性能和耐腐蚀性能[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 219-226.
- [4] 李宪淮, 张好强, 丁岚, 等. 铜基超疏水表面制备方法的研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(9): 79-95.
- [5] Lin S P, Li D L, Zhou Q Q, et al. Study on corrosion perforation behavior of copper nickel alloy pipe during service in marine environment[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 153: 107628-107645.
- [6] 范晓龙, 杨晶晶, 李晓莹. 复材结构铜网表面膜应用研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(4): 180-182.
- [7] Haneda R, Nishihara H, Aramaki K. Chemical modification of an alkanethiol self-assembled layer to prevent corrosion of copper[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 144(4): 1215-1221.
- [8] 许文灿. 建筑装饰用铜合金表面 Ni-P 化学镀层的制备与性能研究[J]. 材料保护, 2022, 55(4): 104-110.
- [9] Panova V T, Kovivchak S V. Formation of oxide layers on the surface of copper and its alloys modified by a high-power ion beam[J]. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2019, 13(6): 1098-1102.
- [10] 关庆义, 孟建兵, 王帅柯, 等. 黄铜表面等离子体电解氧化膜层的制备及性能分析[J]. 材料工程, 2023, 51(7): 206-214.
- [11] 宋妮妮, 郭魂, 汪洪峰. FSSP 制备铜合金改性层耐磨性分析[J]. 常州工学院学报, 2019, 32(2): 13-16.
- [12] 宗彦, 付鹤鸣. 室内装饰用铜合金的表面化学转化及膜层性能[J]. 材料保护, 2020, 53(12): 72-77.
- [13] Yu H Y, Fang W, Chang R B, et al. Modifying element diffusion pathway by transition layer structure in high-entropy alloy particle reinforced Cu matrix composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(11): 2331-2339.
- [14] 孔丹, 罗志强, 金胜然. 铜合金的表面化学镀层制备与摩擦学性能研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(8): 23-30.
- [15] Song W W, Xu X J, Liu S R, et al. Effect on the wear resistance of copper alloy surface modification layer by FSSP implanting W particles[J]. Materials Transactions, 2019, 60(5): 765-769.
- [16] 刘滩, 肖鹏, 方华婵, 等. 石墨表面改性对铜基摩擦材料组织与性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(2): 195-204.
- [17] Paul C, Sellamuthu R. Effect of nickel content on hardness and wear behaviour of surface modified functionally graded Cu-Sn bronze alloy[J]. International Journal of Materials Engineering Innovation, 2016, 7(1): 43-55.
- [18] 吕绪明, 江涛, 张云汉, 等. 纯铜表面 Ta-W 合金层的抗高温氧化及摩擦行为[J]. 材料导报, 2022, 36(23): 104-108.
- [19] Agafonkina M O, Grafov O Y, Andreeva N P, et al. Modifying copper and copper alloy surface with depocolin and 5-chloro-1,2,3-benzotriazole from a neutral aqueous solution[J]. Russian Journal of Physical Chemistry A, 2021, 95(11): 2295-2303.
- [20] 李艳苗, 肖来荣, 翟鹏远, 等. 铜表面激光熔覆制备 Ni-Cu-Mo 覆层的显微组织及其摩擦磨损性能[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(5): 1502-1513.