

DOI: 10.11973/jxgccl202311007

不同含量 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ 复合材料在不同条件下的摩擦学性能

侯 翌,贾均红,何乃如

(陕西科技大学机电工程学院,西安 710021)

摘 要: 以不同温度(1 300, 1 350, 1 400 $^{\circ}\text{C}$)下无压烧结 Ti_3AlC_2 粉末以及铜粉末为原料,采用粉末冶金法制备 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ 复合材料,研究了不同 Ti_3AlC_2 含量(质量分数 5%, 10%, 15%, 20%)下复合材料在干摩擦条件以及蒸馏水和海水环境下的摩擦学性能。结果表明:无压烧结 Ti_3AlC_2 粉末的适宜温度为 1 350 $^{\circ}\text{C}$,此时 Ti_3AlC_2 质量分数为 96%;随着 Ti_3AlC_2 含量的增加,复合材料的相对密度降低,硬度先升后降,当 Ti_3AlC_2 的质量分数为 15% 时,硬度最高,约为 120 HV;在干摩擦条件下,随着 Ti_3AlC_2 含量的增加,复合材料的摩擦因数和磨损率均显著降低;复合材料在蒸馏水和海水环境中的磨损率均低于干摩擦条件下,在蒸馏水环境中的摩擦因数高于干摩擦条件,而在海水环境中的摩擦因数低于在蒸馏水环境且略高于干摩擦条件下。

关键词: $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ 复合材料;蒸馏水环境;海水环境;干摩擦条件;摩擦学性能

中图分类号: TB331

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)11-0035-08

Tribological Properties of Different Content $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ Composites under Different Conditions

HOU Zhao, JIA Junhong, HE Nairu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: With Ti_3AlC_2 powder prepared by pressureless sintering at different temperatures (1 300, 1 350, 1 400 $^{\circ}\text{C}$) and copper powder as raw materials, $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ composites were prepared by powder metallurgy. The tribological properties of composites with different content of Ti_3AlC_2 (mass fraction of 5%, 10%, 15%, 15%) under dry friction condition and in distilled water and seawater environments. The results show that the optimum pressureless sintering temperature of Ti_3AlC_2 powder was 1 350 $^{\circ}\text{C}$, and the mass fraction of Ti_3AlC_2 was 96%. With increasing Ti_3AlC_2 content, the relative density of the composite decreased, and the hardness increased first and then decreased, and reached the highest value (about 120 HV) when the mass fraction of Ti_3AlC_2 was 15%. Under dry friction condition, the friction coefficient and wear rate of the composite decreased significantly with increasing Ti_3AlC_2 content. The wear rates of composites in distilled water and seawater environments were lower than those under dry friction condition; the friction coefficient in distilled water environment was higher than that under dry friction condition, and in seawater environment was lower than that in distilled water environment and slightly higher than that under dry friction condition.

Key words: $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ composite; distilled water environment; seawater environment; tribological property

0 引 言

铜合金具有优异的耐腐蚀性、耐磨性、导热性、

导电性以及易成型等特点,在石油化工、船舶、汽车等领域得到广泛应用^[1-7]。鉴于铅良好的自润滑性能,铜铅合金表现出优异的减摩性能,并且由于与钢轴相容性良好以及成本低而被广泛用作中速及中低负载下的轴承和套筒等的材料^[8-11]。然而,随着铅含量的增加,铜铅合金的耐磨性和承载能力逐步降低,且铅对环境有害,因此亟需开发具有高强度、高

收稿日期:2022-08-15;修订日期:2023-08-16

作者简介:侯翌(1998—),男,陕西咸阳人,硕士研究生

通信作者(导师):何乃如副教授

硬度以及优良摩擦学性能的环境友好型铜基复合材料。研究^[12-13]表明,硬质陶瓷颗粒,如 SiC 、 WC 、 Al_2O_3 和 ZrO_2 等具有弥散强化作用,可显著提升铜基复合材料的强度及耐磨性。然而,硬质增强相的添加也增加了对偶件的磨损,导致摩擦副的摩擦因数升高^[14]。研究^[15-16]发现:加入少量的软质石墨可以提高铜基复合材料的硬度,同时石墨为复合材料提供了润滑效果;石墨的层状结构和柔软性使得摩擦副接触表面形成了一层固体润滑膜,显著降低了摩擦副的磨损,且在高载荷下保持了低摩擦因数。

近些年, $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$ 陶瓷(n 取 1,2 或 3,其中 M 为早期过渡金属, A 为主族元素, X 为碳元素或氮元素)因兼具金属材料的导热、导电、易加工特性以及陶瓷材料的耐腐蚀特性,成为了陶瓷材料领域的研究热点^[17-23]。同时, $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$ 陶瓷为六方三元层状结构,与石墨相似,具有优异的减摩耐磨性能,因此成为铜基复合材料的一种理想的纳米增强填料。目前,已对 $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n/\text{Cu}$ 复合材料组织和性能进行了一些研究,并取得了一些成果。例如,刘可心等^[24]和王虎伟^[25]分别研究了 $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{Cu}$ 和 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ 复合材料的力学性能以及干摩擦条件下的摩擦磨损机制,发现相较于纯铜, $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$ 陶瓷的添加使复合材料的力学性能得到显著提升,同时磨损率和摩擦因数均降低,耐磨性能增强。目前,有关 $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n/\text{Cu}$ 复合材料的研究主要集中在干摩擦方面,而在水环境以及海水环境下的摩擦学性能方面的报道较少。因此,作者以无压烧结 Ti_3AlC_2 粉和铜粉为原料,采用粉末冶金法制备了 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ 复合材料,研究了不同 Ti_3AlC_2 添加量下复合材料在干摩擦条件以及蒸馏水和海水环境下的摩擦学性能,以期为 $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n/\text{Cu}$ 复合材料在海水环境中的应用提供试验参考。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验原料包括钛粉末(纯度 99.9%,粒径 $48\text{ }\mu\text{m}$,北京兴荣源科技有限公司提供)、铝粉末(纯度 99.9%,粒径 $48\text{ }\mu\text{m}$,北京兴荣源科技有限公司提供)、 TiC 粉末(纯度 99.5%,粒径 $48\text{ }\mu\text{m}$,秦皇岛一诺高新材料开发有限公司提供)、铜粉末(纯度 99.9%,粒径 $48\text{ }\mu\text{m}$,中冶鑫盾合金提供)。将钛粉末、铝粉末、 TiC 粉末按物质的量比为 2:1:1.2 进行配料,混合后放入 BM40 型行星球磨机中进行湿法

球磨混合,球磨介质为乙醇,磨球为直径 6 mm 氧化锆球,球料质量比为 10:1,球磨时间为 8 h,球磨转速为 $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。将混合后的原料粉末在 ZT-40-20 型真空热压烧结炉中进行无压烧结,烧结温度为 $1\text{ }300,1\text{ }350,1\text{ }400\text{ }^\circ\text{C}$,以氩气为保护气体,保温时间为 2 h。将烧结所得 Ti_3AlC_2 块机械破碎并且过 400 目筛,得到 Ti_3AlC_2 粉末原料。

将质量分数分别为 0,5%,10%,15%,20%的 Ti_3AlC_2 粉末和铜粉末在 BM40 型行星球磨机中以乙醇为介质进行湿法球磨混合,磨球为直径 6 mm 氧化锆球,球料质量比为 7.5:1,球磨时间为 6 h,转速为 $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。将混合粉末置于直径 30 mm 的石墨模具中,在 ZT-40-20 型真空热压烧结设备中以 $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率加热至设定烧结温度 $800\text{ }^\circ\text{C}$,在 25 MPa 压力下真空烧结 60 min,得到尺寸为 $\phi 30\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ 复合材料试样。

1.2 试验方法

采用 D/max2200PC 型 X 射线衍射仪(XRD)对 Ti_3AlC_2 粉末和复合材料进行物相分析,采用铜靶, K_α 射线,工作电压为 40 kV,工作电流为 40 mA,扫描范围为 $5^\circ\sim 80^\circ$,扫描速率为 $10\text{ }^\circ\cdot\text{min}^{-1}$;基于 XRD 谱并参考文献[26]计算 Ti_3AlC_2 中 Ti_3AlC_2 、 Ti_2AlC 以及 TiC 的含量,以确定无压烧结温度。采用 FEI Verios 460 型扫描电子显微镜(SEM)观察复合材料的微观形貌,并用附带的能谱仪(EDS)进行微区成分分析。利用 HV-1000 型维氏硬度计测复合材料的维氏硬度,载荷为 2 N,保载时间为 10 s,测 8 次取平均值。通过阿基米德排水法测定复合材料的密度,计算出相对密度。采用 MSR-2T 型往复摩擦磨损试验机以球盘接触方式进行摩擦磨损试验,试验环境分别为空气环境(干摩擦)以及蒸馏水和海水环境,复合材料试样尺寸为 $\phi 30\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,试验前用砂纸与研磨膏打磨抛光至表面粗糙度 R_a 为 $0.08\sim 0.18\text{ }\mu\text{m}$,对磨件为直径 6 mm 的 GCr15 钢球,接触形式为线接触,线速度为 $0.04\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,载荷为 6 N,试验时间为 30 min。利用 SEM 及附带的 EDS 对磨损表面的微观形貌和成分进行分析。采用 DSX510 型非接触式三维轮廓仪测量磨痕的截面尺寸,计算磨损率 W ,计算公式为

$$W = Sl/(FL) \quad (1)$$

式中: S 为复合材料磨痕的横截面面积; l 为往复摩擦的长度; F 为试验载荷; L 为往复摩擦的总距离。

2 试验结果与讨论

2.1 物相组成及微观形貌

由图 1 结合表 1 可以看出:在 1 300 ℃ 烧结温度下, Ti_3AlC_2 粉末的主晶相是 Ti_3AlC_2 ,但还含有质量分数 8%的 TiC,说明反应温度过低,原料未能反应完全;当烧结温度为 1 350 ℃ 时, Ti_3AlC_2 粉末仅含有质量分数 4%的 TiC,说明在烧结过程中反应较完全;随着烧结温度继续升高到 1 400 ℃, Ti_3AlC_2 (002) 晶面($2\theta=9.5^\circ$)的衍射峰强度增大,但 TiC 的衍射峰也增强,质量分数达到 10%,这主要是由于 Ti_3AlC_2 在温度高于 1 370 ℃ 时会发生分解产生 TiC^[27]。可知,无压烧结 Ti_3AlC_2 粉末的适宜温度为 1 350 ℃,

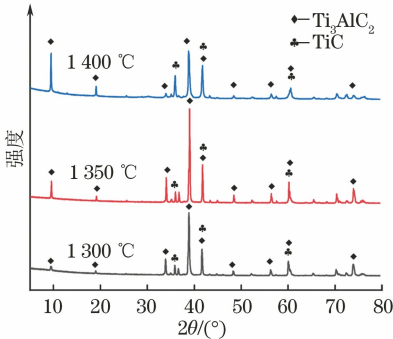


图 1 不同温度无压烧结 Ti_3AlC_2 粉末的 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of Ti_3AlC_2 powder pressureless-sintered at different temperatures

表 1 计算得到不同温度无压烧结 Ti_3AlC_2 粉末中各相的质量分数

Table 1 Mass fraction of each phase in Ti_3AlC_2 powder pressureless-sintered at different temperatures

温度/℃	质量分数/%		
	Ti_3AlC_2	Ti_2AlC	TiC
1 300	92	0	8
1 350	96	0	4
1 400	90	0	10

后续采用该粉末制备 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ 复合材料。

由图 2 可以看出, $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ 复合材料由 Ti_3AlC_2 相和铜相组成,随着 Ti_3AlC_2 含量的增加, Ti_3AlC_2 的衍射峰增强,表明复合材料中 Ti_3AlC_2 含量相应增加。由图 3 可以看出, $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ 复合

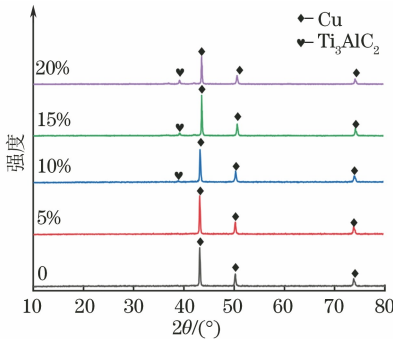
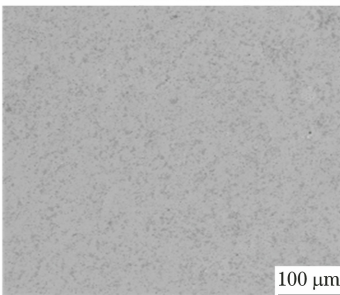
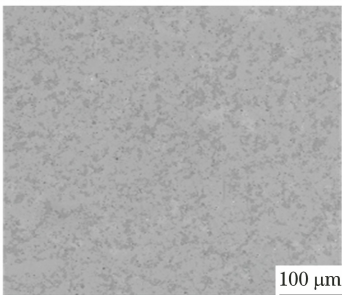


图 2 添加不同质量分数 Ti_3AlC_2 试样的 XRD 谱

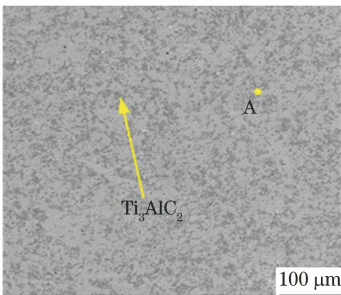
Fig.2 XRD patterns of samples with different mass fractions of Ti_3AlC_2



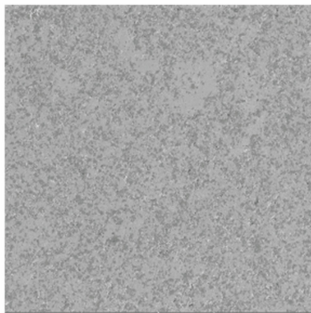
(a) 5%, 微观形貌



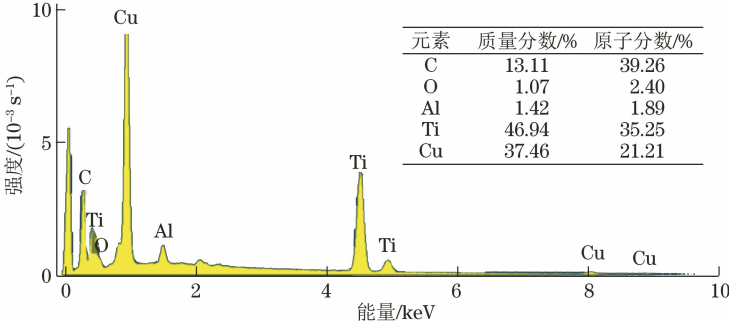
(b) 10%, 微观形貌



(c) 15%, 微观形貌



(d) 20%, 微观形貌



(e) 图(c)中A点的EDS谱

图 3 添加不同质量分数 Ti_3AlC_2 试样的微观形貌及 A 点处的 EDS 谱

Fig.3 Micromorphology (a—d) and EDS spectrum at point A (e) of samples with different mass fractions of Ti_3AlC_2

材料结构致密,未出现明显孔洞等缺陷, Ti_3AlC_2 黑色颗粒均匀分布在铜基体中。

2.2 相对密度和硬度

当 Ti_3AlC_2 质量分数分别为 0, 5%, 10%, 15%, 20% 时,试样的相对密度分别为 99.8%, 95.5%, 94.6%, 93.4%, 90.7%。可知,随着 Ti_3AlC_2 含量的增加,复合材料的相对密度降低。 Ti_3AlC_2 的密度为 $4.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,低于纯铜($8.87 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),随着 Ti_3AlC_2 含量的增加,复合材料的密度降低;同时, Ti_3AlC_2 具有六方三元层状结构,与铜的界面结合较差,因此随着 Ti_3AlC_2 含量的增加,复合材料的密度降低。由图 4 可以看出:复合材料的硬度较纯铜(Ti_3AlC_2 质量分数为 0)明显升高,这是由于 Ti_3AlC_2 为硬质陶瓷,硬度为 357 HV,在铜基体中均匀分布,起到了弥散强化作用;复合材料的硬度随着 Ti_3AlC_2 含量的增加先升高后降低,且当 Ti_3AlC_2 的质量分数为 15% 时达到最高,为 $(120 \pm 4) \text{ HV}$;但当 Ti_3AlC_2 的质量分数增加至 20% 时,异质界面的结合较差,相对密度降低,因此硬度有所降低。

2.3 摩擦学性能

由图 5 可以看出,在干摩擦条件下随着 Ti_3AlC_2

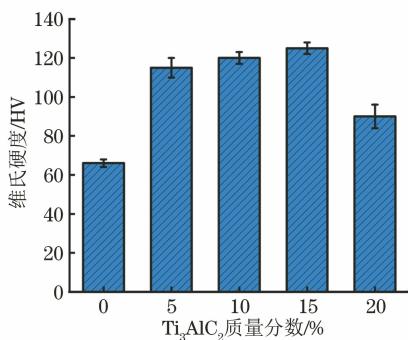


图 4 添加不同质量分数 Ti_3AlC_2 试样的硬度

Fig. 4 Hardness of samples with different mass fractions of Ti_3AlC_2

含量的增加,复合材料的摩擦因数减小,磨损率先增大后降低。当 Ti_3AlC_2 的质量分数达到 20% 时,复合材料的摩擦因数和磨损率均最低,分别约为 0.48 和 $1.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。一方面, Ti_3AlC_2 因具有层状结构而易进行剪切,故具有良好的自润滑性能,可以降低复合材料的摩擦因数^[28];另一方面, Ti_3AlC_2 的添加提高了复合材料的硬度,使得复合材料抵抗塑性变形的能力增强,因此摩擦因数与磨损率降低^[25]。

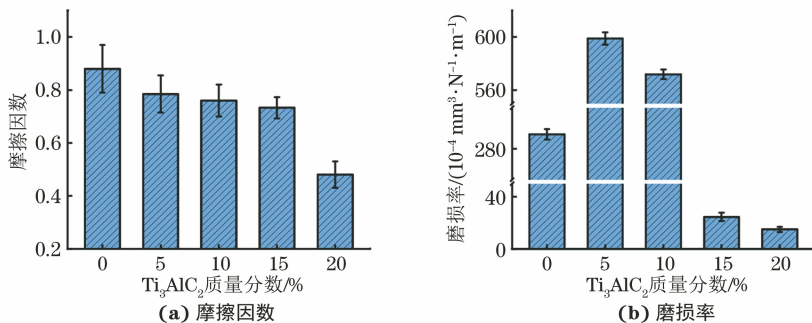


图 5 干摩擦条件下添加不同质量分数 Ti_3AlC_2 试样的摩擦因数和磨损率

Fig. 5 Friction coefficients (a) and wear rates (b) of samples with different mass fractions of Ti_3AlC_2 under dry friction condition

由图 6 可以看出:纯铜磨损表面产生了较严重的剥落,且出现明显的塑性变形,磨损机制主要为疲劳磨损和黏着磨损。当 Ti_3AlC_2 的质量分数为 5% 时,复合材料磨损表面出现了大量磨屑,且有大片剥落现象,磨损机制为严重的黏着磨损;虽然该复合材料的摩擦因数相比于纯铜明显降低,但是由于 Ti_3AlC_2 的添加破坏了铜基体的连续性,在循环应力的作用下表层出现疲劳剥落,导致其磨损率明显增大。当 Ti_3AlC_2 质量分数大于 5% 时,磨损表面出现了间断的润滑膜及少量的凹坑和磨屑,磨损机制为黏着磨损,且随着 Ti_3AlC_2 含量的增加,磨损程度逐渐减小;与 Ti_3AlC_2 质量分数为 5% 的复合材

料相比,更多 Ti_3AlC_2 的添加可以起到更有效的润滑作用,从而降低复合材料的摩擦因数和磨损率。磨损表面磨痕光滑区域为摩擦副接触表面;当 Ti_3AlC_2 质量分数为 15% 时,由 EDS 分析结果可知,磨损区域中的铁、氧元素质量分数分别为 28.77% 和 26.01%。这说明该区域存在大量的 FeO_x ,在 FeO_x 与 Ti_3AlC_2 的协同润滑作用下,复合材料的摩擦因数与磨损率显著降低。

纯铜在蒸馏水介质中的摩擦因数高于 1.5,超出试验机测试范围。由图 7 可以看出,在蒸馏水环境下,随着 Ti_3AlC_2 质量分数的增加,复合材料的摩擦因数降低,磨损率先增大后减小。由于存在流体

阻力,水环境中复合材料的摩擦因数明显高于干摩擦条件;同时水作为润滑介质可避免摩擦副的直接接触,从而使复合材料的磨损率大幅度低于干摩擦

条件。当 Ti_3AlC_2 的质量分数达到 20% 时,复合材料在水环境中的摩擦因数和磨损率分别约为 0.75 和 $1.1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

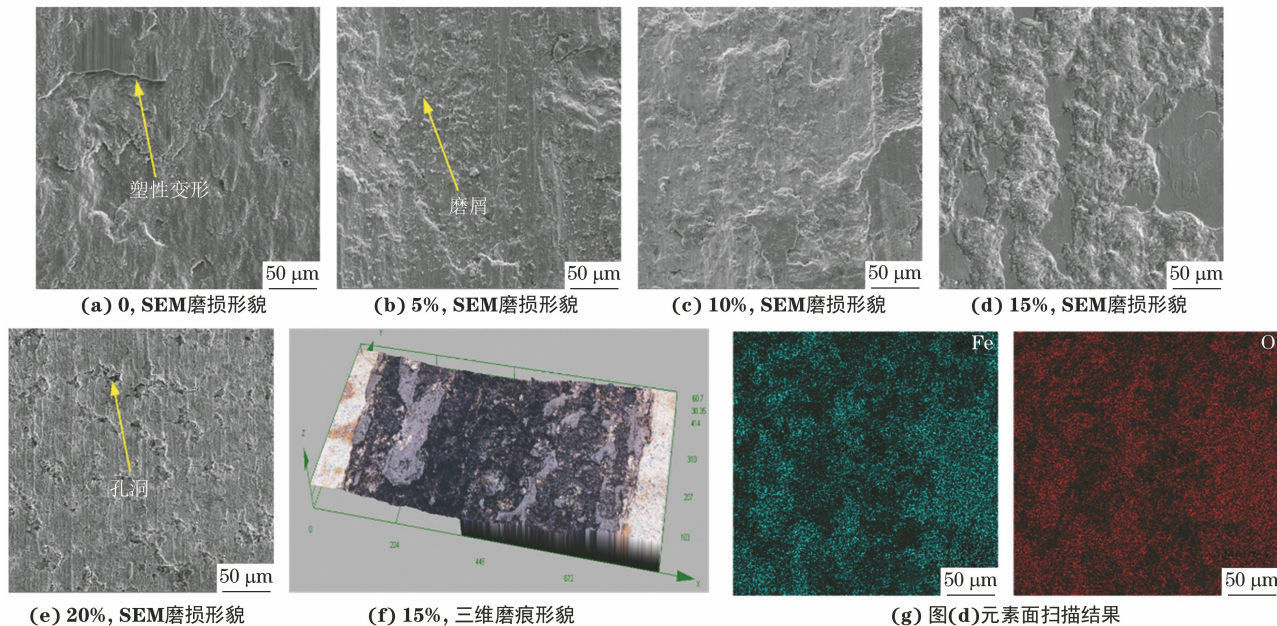


图 6 干摩擦条件下添加不同质量分数 Ti_3AlC_2 试样的 SEM 磨损形貌、三维磨痕形貌及元素面扫描结果

Fig. 6 Wear SEM morphology (a-e), three-dimensional wear scar morphology (f) and element surface scan results (g) of samples with different mass fractions of Ti_3AlC_2 under dry friction condition

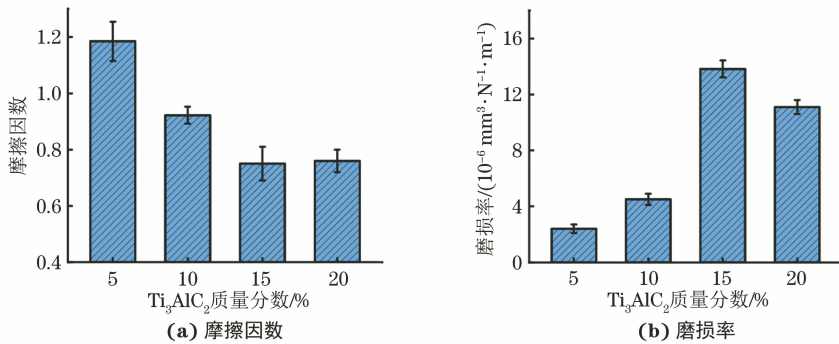


图 7 蒸馏水环境下添加不同质量分数 Ti_3AlC_2 复合材料的摩擦因数和磨损率

Fig. 7 Friction coefficients (a) and wear rates (b) of composites with different mass fractions of Ti_3AlC_2 under distilled water environment

由图 8 可以看出:当 Ti_3AlC_2 质量分数为 5% 时,复合材料磨损表面较光滑,仅存在少量的划痕;当 Ti_3AlC_2 质量分数为 10% 和 15% 时,磨损表面划痕增多且出现明显的剥落坑;当 Ti_3AlC_2 质量分数达到 20% 时,磨损表面较为光滑,未出现明显的剥落坑,但是可以发现垂直于滑动方向的裂纹。随着 Ti_3AlC_2 含量的增加,致密性能的降低导致磨损程度增大;同时脱落的 Ti_3AlC_2 颗粒在蒸馏水的冲击下很难在表面形成有效摩擦膜,而且颗粒在摩擦过程中会引起三体磨损,从而增大复合材料的磨损率。

纯铜在海水介质中的摩擦因数高于 1.2,超出

试验机测试范围。由图 9 可以看出:在海水环境下,随着 Ti_3AlC_2 质量分数的增加,复合材料的摩擦因数和磨损率均整体呈降低趋势,摩擦因数略低于在蒸馏水环境,略高于干摩擦条件。 Ti_3AlC_3 质量分数为 20% 的复合材料在海水环境下具有最低的摩擦因数,约为 0.55,磨损率为 $4.86 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。在海水环境下复合材料的磨损率显著高于在蒸馏水环境下,但仍低于干摩擦条件。由图 10 可以看出:在海水环境下, Ti_3AlC_2 质量分数为 5% 的复合材料磨痕表面出现明显的疲劳裂纹以及片状剥落坑,这是因为复合材料中的金属原子易与

海水中的阴离子发生反应,促进裂纹的扩展,导致复合材料的分层磨损^[29-30];随着 Ti_3AlC_2 含量的增加,磨损表面较光滑,磨损程度显著降低; Ti_3AlC_2 质量分数为 15% 的复合材料磨损表面存在氧、钛、铝、铁

元素,质量分数分别为 16.64%,11.49%,2.72%,6.88%,这表明在海水环境中产生了大量金属氧化物。金属氧化物与 Ti_3AlC_2 的共同作用降低了复合材料的摩擦因数与磨损率。

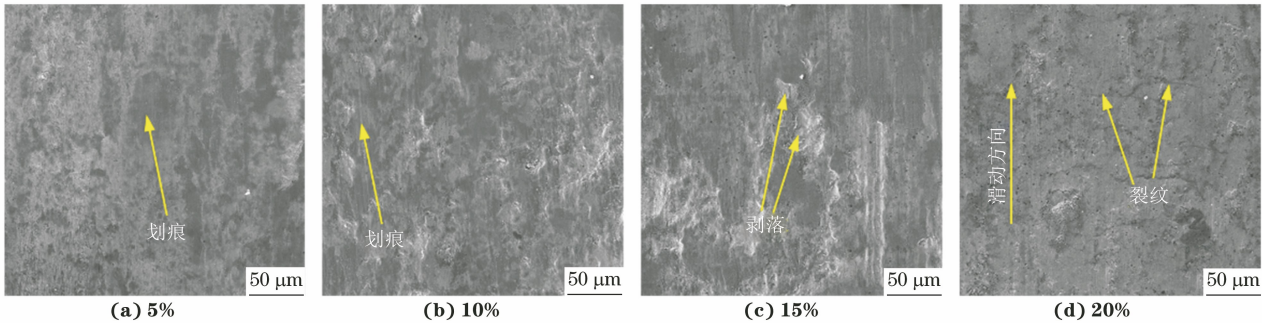


图 8 蒸馏水环境下添加不同质量分数 Ti_3AlC_2 复合材料的磨损形貌

Fig.8 Wear micrographs of composites with different mass fractions of Ti_3AlC_2 under distilled water environment

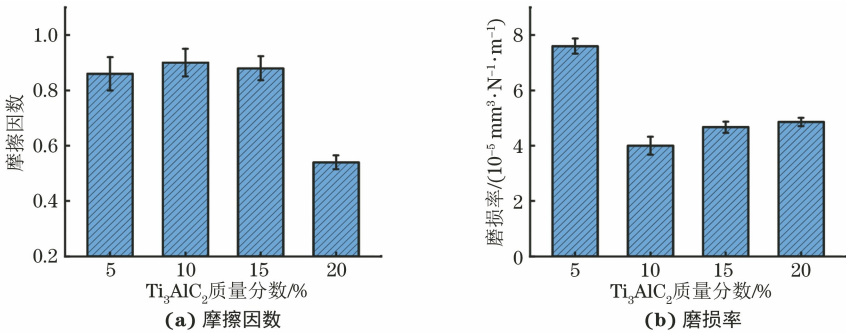


图 9 海水环境下添加不同质量分数 Ti_3AlC_2 复合材料的摩擦因数和磨损率

Fig.9 Friction coefficients (a) and wear rates (b) of composites with different mass fractions of Ti_3AlC_2 under seawater environment

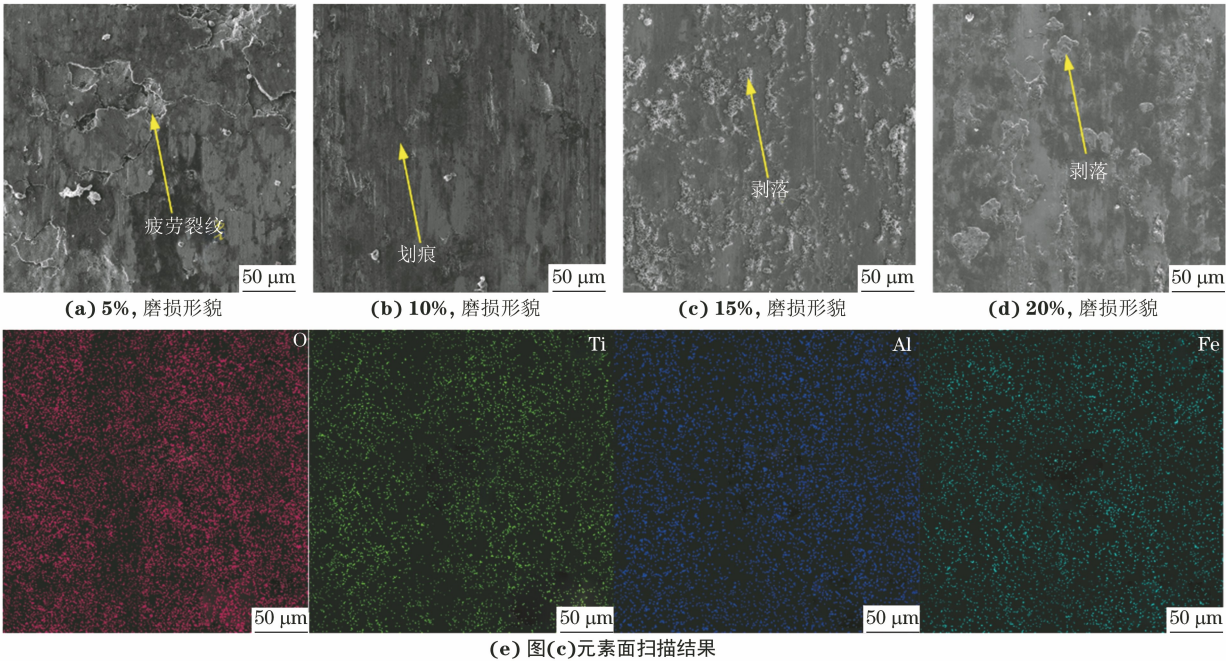


图 10 海水环境下添加不同质量分数 Ti_3AlC_2 复合材料的磨损形貌及图(c)的元素面扫描结果

Fig.10 Wear micrographs (a—d) and element mapping results of Fig.(c) (e) of composites with different mass fractions of Ti_3AlC_2 under seawater environment

由图 11 可以看出:在干摩擦条件下,对磨球磨损表面较平滑,仅存在轻微的划痕,表面钛、氧、铁元素的质量分数分别为 0.85%,6.72%,72.79%,可知表面生成了由 FeO_x 和 Ti_3AlC_2 构成的复合摩擦膜;蒸馏水环境下对磨球表面较光滑,钛和氧元素含量较低,质量分数分别为 0.03%和 1.25%,铁元素

质量分数为 73.11%,可知表面生成了大量的 FeO_x ;海水环境下对磨球磨损表面出现大量麻点及少量的腐蚀坑,表面存在大量的铁(质量分数 76.44%)和氧元素(质量分数 8.12%)以及少量的钛元素(质量分数 0.13%)。大量金属氧化物的生成降低了复合材料的磨损程度。

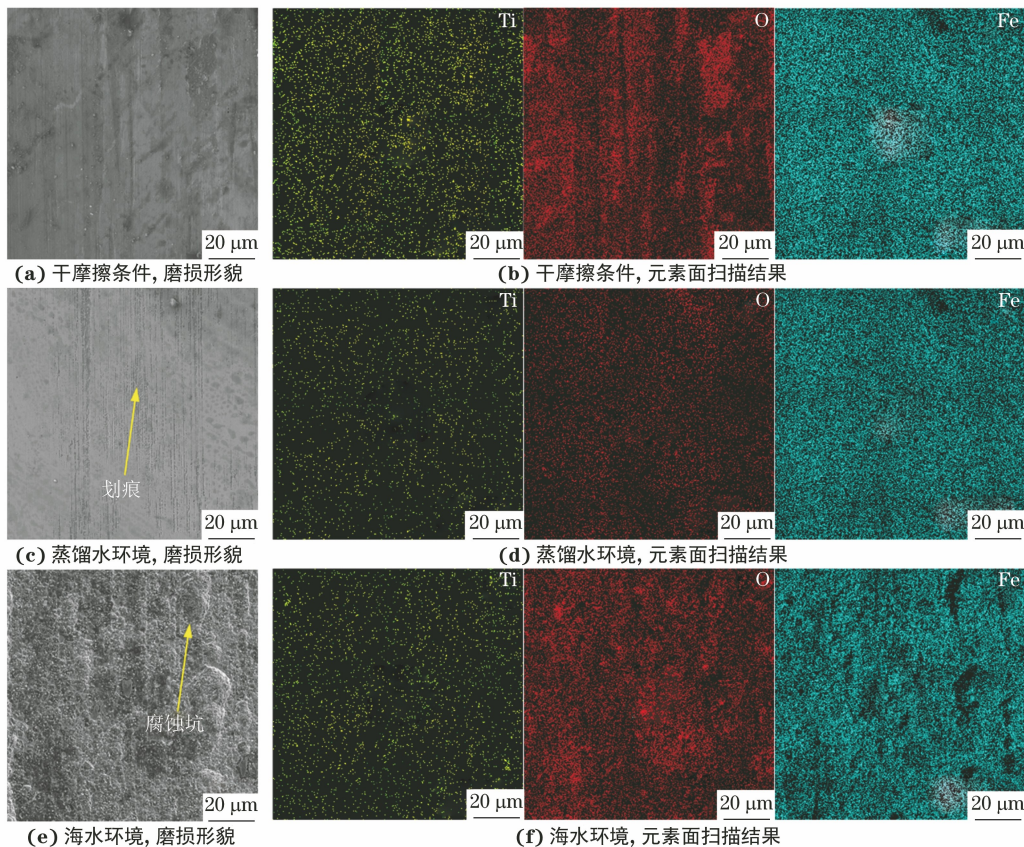


图 11 不同条件下与添加质量分数 20% Ti_3AlC_2 复合材料磨损后 GCr15 钢球的磨损形貌及元素面扫描结果

Fig. 11 Wear micrographs (a, c, e) and element mapping results (b, d, f) of GCr15 steel ball after friction with composite adding with 20wt% Ti_3AlC_2 under different conditions: (a—b) dry friction condition; (c—d) distilled water environment and (e—f) seawater environment

3 结 论

(1) 无压烧结 Ti_3AlC_2 粉末的适宜温度为 $1\ 350\ ^\circ\text{C}$,此时粉末中 Ti_3AlC_2 的质量分数为 96%;添加 Ti_3AlC_2 的铜基复合材料结构致密, Ti_3AlC_2 颗粒均匀分布在铜基体中;随着 Ti_3AlC_2 含量增加,复合材料的相对密度降低,硬度呈先增后降的趋势,当 Ti_3AlC_2 质量分数为 15%时,硬度最高,约为 120 HV。

(2) 在干摩擦条件下,随着 Ti_3AlC_2 含量的增加,复合材料的摩擦因数和磨损率显著降低。当 Ti_3AlC_2 的质量分数为 20%时,摩擦因数和磨损率分别约为 0.48 和 $1.5 \times 10^{-5}\ \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

(3) 在蒸馏水和海水环境中,介质的存在隔绝

了 GCr15 钢对磨球与复合材料的接触,导致复合材料的磨损率低于干摩擦条件下。蒸馏水的存在使得摩擦过程中的阻力增大,且摩擦副接触表面难以生成润滑膜,因此摩擦因数高于干摩擦条件下;在海水环境中,摩擦副接触表面迅速生成大量的金属氧化物而形成润滑膜,因此摩擦因数低于在蒸馏水环境但略高于摩擦条件下。当 Ti_3AlC_2 的质量分数达到 20%时,复合材料在蒸馏水和海水环境中的摩擦因数分别约为 0.75,0.55,磨损率分别约为 1.1×10^{-5} , $4.86 \times 10^{-5}\ \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] CHEN B M, BI Q L, YANG J, et al. Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN) for Cu-based P/M friction

- composites[J]. Tribology International, 2008, 41(12): 1145-1152.
- [2] MA X C, HE G Q, HE D H, et al. Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system[J]. Wear, 2008, 265(7/8): 1087-1092.
- [3] SINGH J B, CAI W, BELLON P. Dry sliding of $\text{Cu-15wt}\%\text{Ni-8wt}\%\text{Sn}$ bronze: Wear behaviour and microstructures [J]. Wear, 2007, 263(1/2/3/4/5/6): 830-841.
- [4] NAYEB-HASHEMI H, VAZIRI A, ZIEMER K. Wear resistance of $\text{Cu-18vol.}\% \text{Nb}$ (P/M) composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 478(1/2): 390-396.
- [5] 陈爱华, 闫晨, 孟志立. 铜基复合材料制备及研究新进展[J]. 中国冶金, 2019, 29(2): 7-11.
CHEN A H, YAN C, MENG Z L. Preparation and research progress of copper matrix composites[J]. China Metallurgy, 2019, 29(2): 7-11.
- [6] 徐金城, 李晓龙, 夏龙, 等. 短碳纤维增强铜基复合材料的制备及其性能的研究[J]. 兰州大学学报, 2004, 40(4): 28-32.
XU J C, LI X L, XIA L, et al. Preparation of C_f/Cu composite and investigations in its properties[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2004, 40(4): 28-32.
- [7] ZHAO Z Y, BAI P, DU W, et al. An overview of graphene and its derivatives reinforced metal matrix composites: Preparation, properties and applications[J]. Carbon, 2020, 170: 302-326.
- [8] ZENG J, XU J C, HUA W, et al. Wear performance of the lead free tin bronze matrix composite reinforced by short carbon fibers[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(13/14): 6647-6651.
- [9] SADYKOV F A, BARYKIN N P, ASLANYAN I R. Wear of copper and its alloys with submicrocrystalline structure[J]. Wear, 1999, 225/226/227/228/229: 649-655.
- [10] AKSOY M, KUZUCU V, TURHAN H. A note on the effect of phosphorus on the microstructure and mechanical properties of leaded-tin bronze [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 124(1/2): 113-119.
- [11] 唐红跃. 铜镍与铜铅轴承材料的摩擦学性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
TANG H Y. Study on tribological properties of copper-nickel and copper-lead bearing materials[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [12] SORKHE Y A, AGHAJANI H, TAGHIZADEH TABRIZI A. Mechanical alloying and sintering of nanostructured TiO_2 reinforced copper composite and its characterization [J]. Materials & Design, 2014, 58: 168-174.
- [13] ZHANG J, ALPAS A T. Wear regimes and transitions in Al_2O_3 particulate-reinforced aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 1993, 161(2): 273-284.
- [14] RAJEEV V R, DWIVEDI D K, JAIN S C. Effect of experimental parameters on reciprocating wear behavior of Al-Si-SiC_p composites under dry condition [J]. Tribology Online, 2009, 4(5): 115-126.
- [15] CUI G J, BI Q L, YANG J, et al. Effect of normal loads on tribological properties of bronze-graphite composite under seawater condition[J]. Tribology Transactions, 2014, 57(2): 308-316.
- [16] 王怡然, 高义民, 李焯飞, 等. 石墨镀 Sn 调控对石墨/Cu 复合材料组织及力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(5): 1497-1506.
WANG Y R, GAO Y M, LI Y F, et al. Effect of Sn modification on microstructure and mechanical properties of graphite/Cu composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(5): 1497-1506.
- [17] YOSHIDA M, HOSHIYAMA Y, OMMYOJI J, et al. Microstructural evolution during the formation of Ti_3AlC_2 [J]. Materials Science and Engineering: B, 2010, 173(1/2/3): 126-129.
- [18] 方双全, 田郭涛, 秦云晴, 等. 层状陶瓷 Ti_3AlC_2 的制备与腐蚀行为[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(3): 168-172.
FANG S Q, TIAN G T, QIN Y Q, et al. Preparation and corrosion behavior of layered Ti_3AlC_2 ceramics [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(3): 168-172.
- [19] ZHOU A G, WANG C A, HUANG Y. A possible mechanism on synthesis of Ti_3AlC_2 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 352(1/2): 333-339.
- [20] TZENOV N V, BARSOUM M W. Synthesis and characterization of Ti_3AlC_2 [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2004, 83(4): 825-832.
- [21] 李小雷, 周爱国, 汪长安, 等. 自蔓延高温合成 Ti_3AlC_2 和 Ti_2AlC 及其反应机理研究[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(3): 407-410.
LI X L, ZHOU A G, WANG C A, et al. Preparation of Ti_3AlC_2 and Ti_2AlC by self-propagating high-temperature synthesis and study on mechanism of the reaction[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 30(3): 407-410.
- [22] LIANG B Y, WANG M Z, SUN J F, et al. Preparation of Ti_3AlC_2 by mechanically activated sintering with Sn aids[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009, 27(5): 927-930.
- [23] YE H C L, SHEN Y G. Effects of using Al_4C_3 as a reactant on formation of Ti_3AlC_2 by combustion synthesis in SHS mode[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 473(1/2): 408-413.
- [24] 刘可心, 王蕾, 杨晨, 等. $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{Cu}$ 复合材料的制备与摩擦磨损性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(11): 2844-2852.
LIU K X, WANG L, YANG C, et al. Preparation and tribological properties of $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{Cu}$ composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(11): 2844-2852.
- [25] 王虎伟. $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ 基复合材料制备工艺和性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
WANG H W. Study on preparation technology and properties of $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{Cu}$ matrix composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

- nitrogen and sensitization on the microstructure and pitting corrosion behavior of AISI type 316LN stainless steels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(4):1170-1178.
- [19] 王庆田,胡朝威,冷晓春,等. 核反应堆堆内构件用 304H 奥氏体不锈钢敏化非腐蚀条件下的性能研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(22):101-105.
- WANG Q T, HU C W, LENG X C, et al. Property research of 304H austenite stainless steel used in RVI under sensitizing but no corrosion circumstance[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(22):101-105.
- [20] KAIN V, SAMANTARAY R, ACHARYA S, et al. Influence of low-temperature sensitization on stress corrosion cracking of 304LN stainless steels [M]//Environment-Induced Cracking of Materials. Amsterdam: Elsevier, 2008: 163-172.
- [21] BALI S C, KAIN V, RAJA V S. Effect of low-temperature sensitization on intergranular stress corrosion cracking behavior of austenitic stainless steels in simulated boiling water reactor environment[J]. Corrosion, 2009, 65(11): 726-740.
- [22] 朱若林, 张利涛, 王俭秋, 等. 核级 316LN 不锈钢弯管在高温高压水中的应力腐蚀裂纹扩展行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(1): 54-61.
- ZHU R L, ZHANG L T, WANG J Q, et al. Stress corrosion crack propagation behavior of elbow pipe of nuclear grade 316LN stainless steel in high temperature high pressure water [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2018, 38(1): 54-61.
- [23] 万章, 孔韦海, 张强. S22053 不锈钢在 6% FeCl_3 溶液中的点蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(1): 18-22.
- WAN Z, KONG W H, ZHANG Q. Pitting behavior of S22053 stainless steel in 6% FeCl_3 solution [J]. Corrosion & Protection, 2019, 40(1): 18-22.
- [24] 李光福, 黄春波, 李敬民, 等. 固溶态控氮不锈钢在高温水中的应力腐蚀破裂[J]. 核动力工程, 2005, 26(4): 384-389.
- LI G F, HUANG C B, LI J M, et al. Stress corrosion cracking of solution-annealed nitrogen-containing austenitic stainless steels in high temperature water environments [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(4): 384-389.
- [25] NINGSHEN S, KAMACHI MUDALI U, MITTAL V K, et al. Semiconducting and passive film properties of nitrogen-containing type 316LN stainless steels[J]. Corrosion Science, 2007, 49(2): 481-496.
- [26] SATO N. Anodic breakdown of passive films on metals[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1982, 129(2): 255-260.
- [27] PARK J O, MATSCH S, BÖHNI H. Effects of temperature and chloride concentration on pit initiation and early pit growth of stainless steel[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2002, 149(2): B34.
- [28] 刘传森, 李壮壮, 陈长风. 不锈钢应力腐蚀开裂综述[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 1-13.
- LIU C S, LI Z Z, CHEN C F. Stress corrosion cracking of stainless steel[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 1-13.
- [29] 孙彦伟, 陈吉, 朴楠, 等. 离子渗氮对 X80 管线钢在碱性土壤模拟溶液中腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 93-98.
- SUN Y W, CHEN J, PIAO N, et al. The effect of plasma nitriding on the corrosion resistance of X80 pipeline steel in alkaline soil simulation solution [J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 93-98.
- [30] 张志伟, 刘素芬, 李兆杰, 等. 304 奥氏体不锈钢腐蚀失效原因分析及组织表征[J]. 金属热处理, 2019, 44(增刊 1): 96-102.
- ZHANG Z W, LIU S F, LI Z J, et al. Cause analysis and microstructure characterization of corrosion failure of 304 austenitic stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(S1): 96-102.
- [31] LUO H, GAO S J, DONG C F, et al. Characterization of electrochemical and passive behaviour of alloy 59 in acid solution[J]. Electrochimica Acta, 2014, 135: 412-419.
- [32] LEE J B, YOON S I. Effect of nitrogen alloying on the semiconducting properties of passive films and metastable pitting susceptibility of 316L and 316LN stainless steels[J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 122(1): 194-199.
- [33] LYU J L, LUO H Y. Effect of temperature and chloride ion concentration on corrosion of passive films on nano/ultrafine grained stainless steels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(12): 4223-4229.

(上接第 42 页)

- [26] PENG C Q, WANG C A, SONG Y, et al. A novel simple method to stably synthesize Ti_3AlC_2 powder with high purity [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 428(1/2): 54-58.
- [27] LI S B, ZHAI H X, BEI G P, et al. Synthesis and microstructure of Ti_3AlC_2 by mechanically activated sintering of elemental powders[J]. Ceramics International, 2007, 33(2): 169-173.
- [28] ZHANG Z L, ZHAI H X, ZHOU Y, et al. Preparation of composites from Al and Ti_3AlC_2 and its tribo-chemistry reactions against low carbon steel [J]. Key Engineering Materials, 2008, 368/369/370/371/372: 989-991.
- [29] PETCH N J. XXX. The lowering of fracture-stress due to surface adsorption[J]. Philosophical Magazine, 1956, 1(4): 331-337.
- [30] GRUNBERG L, JAMIESON D T, SCOTT D. Hydrogen penetration in water-accelerated fatigue of rolling surfaces [J]. Philosophical Magazine, 1963, 8(93): 1553-1568.