

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.06.008

温度对 10CrMn2NiSiCuAl 极地破冰船用钢板 干摩擦行为的影响

王东胜^a, 常雪婷^a, 王士月^b, 孙士斌^b, 尹衍升^a

(上海海事大学 a.海洋科学与工程学院;b.物流工程学院,上海 201306)

摘要:采用 Bruker UMT-3 Tribolab 摩擦磨损仪测试了与宝山钢铁股份有限公司共同开发的破冰船用低温钢板 10CrMn2NiSiCuAl 在不同环境温度下的摩擦磨损性能,利用轮廓扫描仪和扫描电子显微镜表征了磨痕及磨屑的表面形貌,采用电子能谱(EDS)以及 X 射线衍射谱(XRD)分析了磨屑表面的化学元素及成分,进而推断其磨损机制。结果表明:环境温度对摩擦磨损的性能有显著影响,当环境温度为 20℃ 时,摩擦磨损形式以疲劳失效、氧化磨损和黏着磨损为主,磨痕表面的过渡层能够降低摩擦系数,减少磨损量,表面磨损产物主要为 Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄;随着环境温度降低至 -20℃,磨损机制转变为微切削作用下的磨粒磨损和塑性变形,磨痕表面出现犁沟形貌,磨损产物主要为 Fe 元素,磨屑的长宽比减小,出现球形磨屑,磨损量急剧增加。

关键词:破冰船用钢板;低温摩擦;磨损机理;黏着磨损

中图分类号:TH117.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)06-066-10

Friction and wear properties of 10CrMn2NiSiCuAl icebreaker steel plates effected by temperature

WANG Dongsheng^a, CHANG Xueting^a, WANG Shiyue^b, SUN Shibin^b, YIN Yansheng^b

(a. School of Marine Science and Engineering; b. School of Logistics

Engineering, Shanghai Maritime University; Shanghai 235100, P.R.China)

Abstract: Dry reciprocating friction and wear properties of a novel icebreaker steel (10CrMn2NiSiCuAl), which is co-developed by our group and BaoSteel Co., Ltd, were investigated using a UMT-3 Tribolab multi-specimen tester at different temperature. In this study, the wear scar morphologies and friction cross sections of the tested samples before and after the friction tests were recorded by coherence Scanning Interferometry. The surface morphologies, composition of worn surfaces and wear debris were characterized by scanning electron microscope, energy dispersive spectrometer and X-ray diffraction. Results show that the friction and wear properties are obviously affected by temperature. The wear mechanism is mainly fatigue failure accompanied with oxidation and adhesive wear at 20 °C, which turn to abrasive wear and fatigue wear when the temperature decreases. The transition layer on the worn scar formed by Fe₂O₃ and Fe₃O₄ reduces the friction coefficient and wear rate. The declamation and spherical wear debris occur on the worn surface when the temperature decreases to -20 °C, which aggravates the wear rate quickly.

Keywords: icebreaker plate; cryogenic friction; wear mechanism; adhesive wear

收稿日期:2017-12-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0300700,2016YFB0300704)。

Supported by the National Key R & D Program of China (2016YFB0300700, 2016YFB0300704).

作者简介:王东胜(1981—),男,上海海事大学博士研究生,主要从事材料摩擦学研究,(E-mail) wangds@shmtu.edu.cn;
尹衍升(联系人),上海海事大学教授,博士生导师,长江学者,(E-mail) ysyin@shmtu.edu.cn。

随着全球温室效应的加剧,极地区域覆盖的海冰面积正在快速减少,极地区域的环境也更加有利于航运业和能源开发的进行。根据美国地质勘探局的评估报告,北极区域占全球未探明石油储量的 13%,同时还有 9%的世界煤炭能源和 30%的未开发天然气资源^[1]。如果北极航道开通,将形成一个包括东亚、俄罗斯在内的环北极大型经济圈,将给国际政治版图带来巨大变迁。北极航道一旦开通,将大大减少中国对传统航线的依赖,降低航运安全风险、减少航运成本、确保能源运输安全,具有重大的战略意义^[2]。

极地破冰船技术的发展则是进行极地考察、极地资源开发、极地运输的核心要素。破冰船从破冰等级上可以分为 7 档,第 1 档破冰能力最强,第 7 档破冰能力最弱^[3]。中国目前拥有的唯一一艘配备相对完善的破冰船“雪龙”号,是 1993 年从乌克兰购买的极地运输船基础上改造使用的,只相当于俄罗斯最高级的抗冰船,还不是真正意义上的破冰船^[4],其破冰能力大概在第 6 档,至今已承担了 33 次南极考察和 7 次北极科学考察任务。

雪龙号破冰船船体采用的钢板为具有特殊低温高性能的 E 级船用钢板制成,船板为乌克兰钢铁研究院研制并随船进口使用,虽然经历 20 余年的航行,仍具有较好的抗冰面磨损、耐低温冲击、耐海水腐蚀性能。而我国新一代破冰船已于 2017 年 9 月开工建设,预计可以实现双向破冰,破冰能力可以提高 3~4 级,然而其船体钢板仍为国外进口^[5],大大增加了我国破冰船的研发周期和制造成本。破冰船用钢板已成为制约我国极地开发和利用过程中的瓶颈,开发新型高性能破冰船用钢板势在必行。

极地环境下船舶摩擦学研究的主要问题包括:极地低温环境下船舶甲板机械及其关键摩擦副的摩擦特性(冷脆性、低温摩擦材料等)、针对极地低温环境液压传动系统的润滑油特性、船体线形设计以及船体界面的极地低温适应性问题^[6]。目前国内的相关研究主要侧重对破冰船的船体型线、破冰方法对于破冰性能的影响等^[7-8],对于破冰船用钢板在不同环境温度、不同冲击载荷下的摩擦磨损性能、腐蚀性能研究较少,笔者主要研究了本课题组与宝钢引进乌克兰冶炼技术共同研发的破冰船用钢板 10CrMn2NiSiCuAl 在不同温度环境下的干摩擦性能,测试其在不同载荷下的摩擦系数和磨损率。结合摩擦表面形貌分析及各种表征手段,研究该破冰船用低温钢板在不同温度干摩擦环境下的摩擦机理,为该类钢板作为船用钢板在低温海冰载荷工况下航行时的摩擦蚀损性能提供依据。

1 试验部分

1.1 试验材料及制备

笔者使用的测试样品采用新型极地破冰船用低温钢板 10CrMn2NiSiCuAl,是与宝钢股份有限公司厚板研究所引进乌克兰技术联合研发的破冰船船体专用低碳合金钢,样品的化学成分参见表 1,力学性能见表 2。为了保证船用低温钢板比普通的船用钢板具有高强度、高低温韧性及焊接性能,钢板添加了不同的微量合金元素、使用 TMCP 控温冷却工艺来提高船用低温钢板的焊接性能、低温力学及冷脆性能;在添加的合金元素中含量比较大的为 Mn、Si、Cu 和 Al 元素。Mn 是弱碳化物形成元素,能减少晶界碳化物,细化珠光体,相应地细化了铁素体晶粒,能够提高钢的硬度但不影响钢的韧性,提高材料的摩擦磨损性能。Si 在冶炼过程中的作用是脱氧,对碳素结构钢的机械性能影响不大;随着硅元素的增加,强度和硬度提高,而伸长率变化不大;当硅的含量超过一定范围将粗化晶粒,对韧性不利。Cu、Cr 元素能够有效提高低温船用钢板的海水抗腐蚀性能,也能起到细化船用结构钢的晶粒提高合金钢强度的作用,能够提高材料的摩擦磨损性能。铝作为脱氧剂或合金化元素加入钢中,铝脱氧能力比硅、锰强得多,在钢中的主要作用是细化晶粒、固定钢中的氮,从而显著提高钢的冲击韧性,降低冷脆倾向和时效倾向性。

表 1 10CrMn2NiSiCuAl 低温钢板的化学成分

Table 1 Chemical composition of arctic ship plates elements

%

$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(Cr)$	$w(Ni)$	$w(Cu)$	$w(Al)$	$w(Fe)$	CEQ
0.09~0.12	0.15~0.35	1.60~2.10	0.13~0.25	0.30~0.50	0.15~0.25	0.05~0.10	Bal	0.43

表 2 10CrMn2NiSiCuAl 低温钢板的力学性能
Table 2 The mechanical properties of 10CrMn2NiSiCuAl arctic ship Plates

σ_s /MPa	σ_b /MPa	Hardness/HV	弹性模量/GPa	泊松比
516	580	220	197	0.24

为保证实验条件的一致性,本实验将厚板加工成 10 mm×10 mm×3 mm 的试块,采用 150#、400#、800# 和 1200# 砂纸逐级打磨抛光至粗糙度 R_a 为 $(0.15 \pm 0.05) \mu\text{m}$,然后分别使用乙醇和蒸馏水超声清洗 10 min 后干燥待用。

1.2 摩擦磨损试验

为测试钢板在不同温度下的摩擦性能,对布鲁克公司生产的 UMT-3 TriboLab 型多功能摩擦磨损实验机的往复摩擦试验模块进行了改装,改造后低温摩擦腔结构如图 1 所示。为保证试验环境的一致性,该装置中使用的压缩空气必须经过干燥除湿处理。干燥后的空气经过低温压缩制冷单元降温,然后流入低温腔,可以控制低温腔内的温度在 -40°C 至室温之间,安装在侧壁的温度传感器可以实时测量腔内温度并将其反馈至摩擦磨损实验机和低温制冷单元。另外,通过闭环控制可以保证低温腔温度稳定在设定值,误差为 $\pm 0.5\%$ 。在本试验中,采用的实验环境温度分别为 20、5、0、 -10 、 -20°C ;实验载荷分别为 10、20、30 N;往复频率为 2 Hz,滑动幅度为 5 mm。测试表面接触方式为球-面接触,对偶球摩擦副选用直径为 8 mm 的 Al_2O_3 陶瓷球(弹性模量为 390 GPa,泊松比为 0.24,硬度 HV 为 1 800),往复试验时间为 30 min。为保证试验的可重复性,每个试验采用 3 个平行样进行摩擦磨损试验。

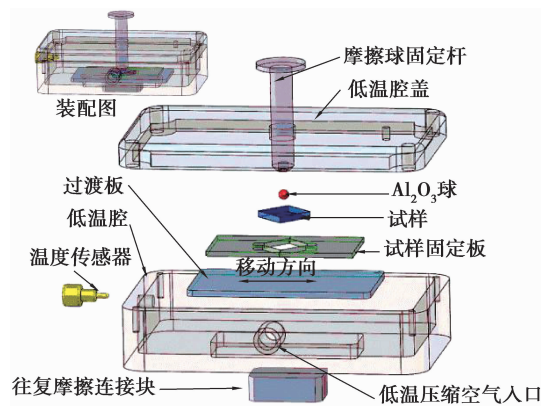


图 1 低温摩擦装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of low temperature friction device

1.3 表征手段

采用布鲁克 Contour GT-II 型白光干涉仪观察试件摩擦前表面形貌及摩擦后磨痕形貌,并进行摩擦断面曲线测量。采用上海泰明光学仪器有限公司生产的 HXD-2000TM/LCD 数字式显微硬度计测量试样磨损后的表面硬度变化。

采用帕那科 XPert PRO X 射线衍射仪(XRD,Cu 靶)对摩擦磨损后的磨痕表面物相进行表征,测量范围为 $20^\circ \sim 80^\circ$,扫描速度为 $4^\circ/\text{min}$,电流为 250 mA,电压为 40 kV。采用日本精工 JOEL JSM7500F 扫描电子显微镜观察试样的表面形貌,同时利用 EDS 对试样磨损表面及磨屑进行元素测量。

磨损率按照如下公式^[9]计算,每一数值采取 3 个平行样取平均值的方法确定:

$$\omega_k = \frac{V}{N \times d} = \frac{V}{N \times 2f \times A \times t}, \quad (1)$$

式中: ω_k 为磨损率, $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; V 为磨损体积, m^3 ; N 为摩擦载荷, N; d 为滑行距离, m; A 为往复移动幅度, m; f 为往复摩擦频率, Hz; t 为磨损时间, s。

2 结果及讨论

2.1 摩擦系数曲线

图2为极地破冰船钢板在不同载荷及温度下的摩擦系数曲线,其中图2(a)为极地船用钢板在法向载荷为20 N时不同温度下的摩擦系数曲线。从图中可以发现,在常温下,Al₂O₃球与钢板组成摩擦副的摩擦系数为0.45~0.56,随着环境温度的降低,摩擦系数稍微提高,在0.52~0.70之间波动。图2(b)为极地船用钢板在不同载荷和温度下的平均摩擦系数变化曲线,数据表明在相同环境温度下摩擦系数随着加载压力的增加而降低;而在相同的载荷下,室温条件下该钢材的摩擦系数最低;在环境温度为5℃时,平均摩擦系数达到相对高点,随着摩擦腔环境温度的不断降低,摩擦系数稍有降低,当环境温度为-20℃时,摩擦系数在0.55~0.57之间波动,呈现趋于恒定的变化趋势。

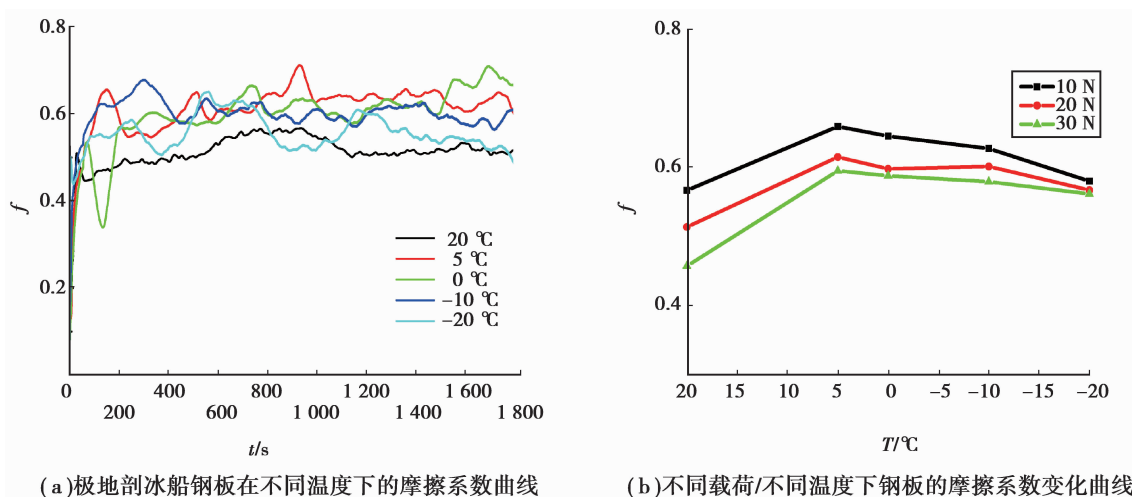


图2 极地破冰船钢板不同载荷及温度下摩擦系数曲线

Fig.2 Friction coefficient curves of icebreaker plates under different loads and temperatures

2.2 磨痕轮廓变化

图3为极地船用钢板在20 N载荷下,不同环境温度中磨痕截面轮廓曲线及磨痕表面3D形貌;由图3(a)可以发现,在20 N的法向载荷作用下,当低温腔环境温度为20℃时,破冰船钢板在Al₂O₃球的作用下磨痕宽度为463 μm、深度为10.1 μm,在磨痕两侧有轻微因塑性变形产生的挤出凸起,同样的现象在图3(b)中磨痕3D形貌图中也可清晰发现;当环境温度从20℃降至5℃时,磨痕的宽度和深度有所扩大,磨痕截面轮廓中表面粗糙度增大;图3(c)表明在磨痕的表面出现了共同存在的犁沟状形貌与凹坑形貌;当低温摩擦腔温度下降到0℃时,磨痕的宽度和深度继续扩大,磨痕表面的凹坑形貌相对5℃时有所减少,犁沟状形貌更加明显,如图3(d)所示;摩擦环境温度降至-10℃时,试样表面磨痕的宽度和深度都迅速增加,尤其是当环境温度为-20℃时,试样表面磨痕的宽度和深度分别扩大至1 262 μm和54.8 μm,如图2(e)、(f)所示。综合图3及前期的研究^[10-11]可以发现,随着摩擦环境温度的降低,相同载荷下,破冰船用钢板磨痕的宽度和深度逐渐增加,表面3D形貌由凹坑状形貌转变为沟槽状形貌。

图4为利用轮廓扫描软件测量极地破冰船用钢板磨痕的净磨损体积,再根据公式(1)计算得到试样的体积磨损率变化曲线。由图可见,在相同载荷作用下,当摩擦环境温度从20℃降至-20℃时,极地破冰船用钢板的磨损率呈现前期缓慢增加而后快速变大的趋势;且随着法向载荷的增大,磨损率呈现这种变化的趋势更加明显,表明温度的降低改变了Al₂O₃球与试样之间的磨损机理。

图5显示了极地破冰船用钢板在不同环境下摩擦磨损接触区域硬度的变化趋势。在20℃环境温度下磨痕表面的平均硬度较原始表面有了显著的提高,且法向载荷越大,硬度增加值也越高;随着摩擦环境温度的降低,磨痕表面的硬度增加量越小,低温摩擦腔温度为-20℃时,磨痕表面增加的硬度在20(HV,0.981N)左右,与基体原有表面硬度相比,增加较小。不同载荷作用下,随着摩擦环境温度降低的硬度变化曲线对比

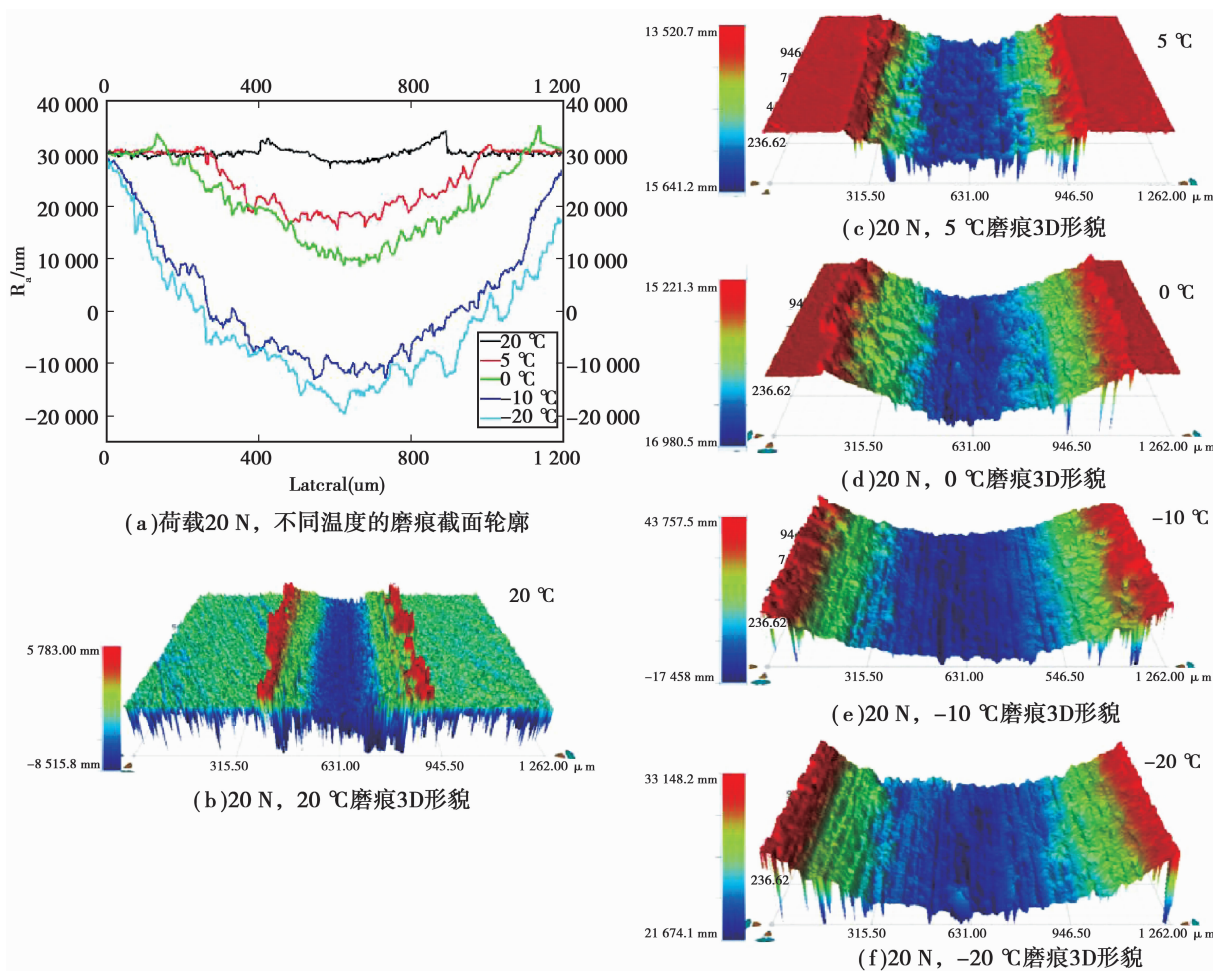


图 3 极地破冰船钢板在 20 N 载荷不同环境温度下的磨痕截面轮廓及 3D 形貌

Fig.3 The worn section profile and 3D morphology of icebreaker under different temperatures and 20N load

可以推测:在相同载荷作用下,随着环境温度的降低,极地破冰船钢板受摩擦作用在磨痕接触表面过渡层^[12]和加工硬化层^[13]对于表面硬度的影响作用逐渐减弱。

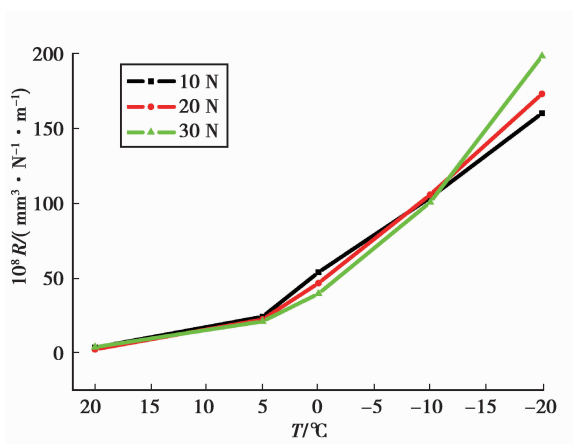


图 4 极地破冰船钢板磨损率变化曲线

Fig.4 Wear rate curves of icebreaker plates

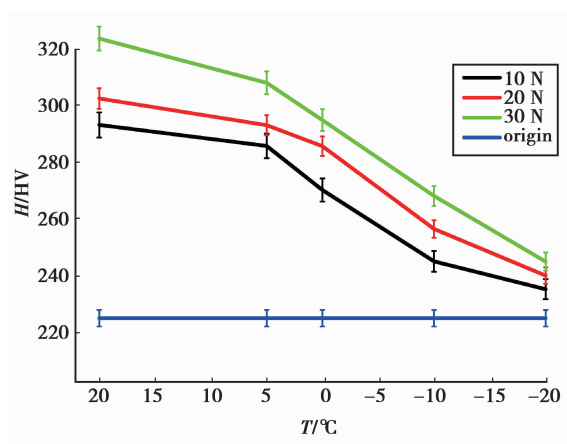


图 5 极地破冰船钢板磨痕表面硬度变化曲线

Fig.5 Worn surface hardness curves of icebreaker plates under different temperatures

2.3 微观形貌与磨屑分析

图 6 为极地船用钢板在 20 N 法向载荷下、不同温度环境中的磨痕表面磨痕形貌,其中图 6 (a)、(b)为钢

板在环境温度 20 °C、法向载荷分别为 20 N 和 30 N 的磨痕表面。可以发现,摩擦试样表面存在片状凸起和部分剥落坑,表面相对光滑,这是由于在摩擦磨损过程中基体表面形成了一层过渡层。根据赫兹接触公式^[14],在往复摩擦过程中,当法向载荷为 20 N 时,球与船用低温钢板间的接触应力 P_{\max} 为 1 670 MPa,理论剪切应力 $\tau_{\max} = 518$ MPa。由于表面微凸体的存在,实际接触面积要比理论接触面积要小得多,这样造成摩擦副之间的实际接触应力更大。由于 Al_2O_3 球的硬度较高,摩擦副之间塑性变形以试样发生脱落和挤出为主,当摩擦行为发生时,突然施加的摩擦力会造成试样表面发生剧烈变化,通过破坏表面微凸体的方式来促使试样表面发生塑性变形,基体因疲劳失效产生磨屑,磨屑在法向压力、摩擦力以及摩擦热的共同作用下,在试样表面形成一层过渡层。过渡层的存在降低了表面的粗糙度,进而也使得摩擦系数下降。这也与图 2(a) 中摩擦系数曲线对应,当环境温度为 20 °C 时,摩擦系数相对较低且波动较小。当过渡层与基体的结合力小于法向载荷和摩擦力的交变应力时,会从基体上分离形成凸起,当凸起脱落后就构成了剥落坑。

从图 6(c)、(d) 中可以看出,当环境温度降低到 5 °C 后,磨痕表面的粗糙度明显增大,表面的剥落坑和凸起也增多,并呈现少许磨粒在表面形成的犁沟形貌;当温度为 0 °C 时,则在磨痕表面出现犁沟、凸起和脱落坑共存的形貌,但凸起和剥落坑的尺寸较 20 °C 时要小。结合图 5(e)、(f) 形貌观察对比可知,当环境温度降至 -20 ~ -10 °C 时,基体在冷脆因素的影响下表面形貌主要以磨粒磨损形成的犁沟和塑性变形为主,这与 20 °C 时磨痕的形貌有了明显的差别,显示两者的主要磨损机理存在差异。

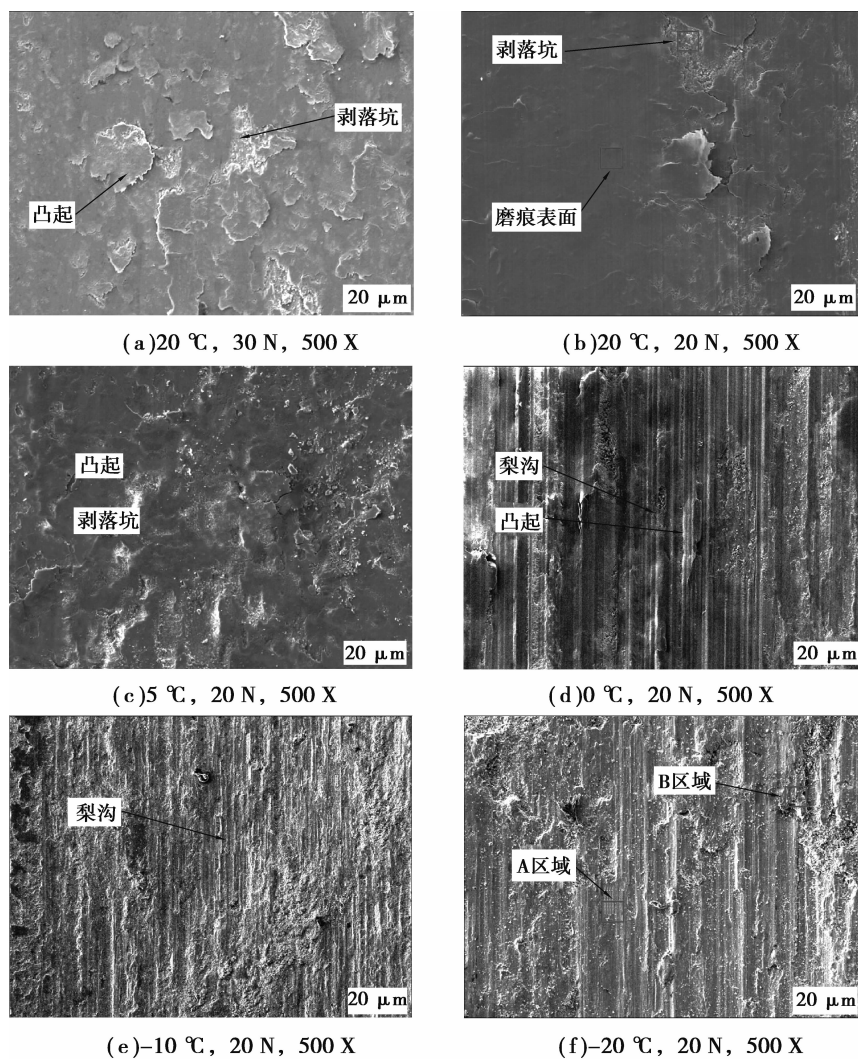


图 6 不同环境温度下极地破冰船用钢板磨痕表面形貌

Fig.6 Worn surface topography of icebreaker under different temperatures

为分析两者的磨损机理差异,对图 6 所示的环境温度为 20 °C 和 -20 °C 的磨痕表面所示区域进行 EDS 能谱分析,其结果如图 7 所示。图 7(a)、(b) 为试样在环境温度 20 °C、载荷 20 N 作用下磨痕凸起区域的能谱

分析,结合图 9 的磨痕表面 XRD 图谱分析,磨痕凸起层主要以 Fe、O、C 为主。其中 C 元素含量波动较小,但是将凸起层区域与剥落坑内的 O 元素含量进行对比会发现凸起区域的 O 含量要高;这是由于 Al_2O_3 球与试样相互作用时,在接触区产生瞬间高温,一方面促使因微切削作用脱落的磨屑发生氧化反应^[15],另一方面也会促使形成的过渡层发生塑性流动,并与摩擦球产生黏着磨损;而以 Fe 元素以及 Fe 的氧化物为主的过渡层也会对于球和试样的摩擦磨损产生润滑作用,降低摩擦副之间的摩擦系数和磨损量。

图 7(c)、(d)为环境温度下降至 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时磨痕表面与残留磨屑区域的元素分析结果。对比发现,磨痕表面无 O 元素的存在,而磨痕上残留的磨屑中 O 元素的含量也有所减少。结合图 5 的磨痕形貌分析以及图 3、图 4、图 5 可以推测,当环境温度降至 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,试样磨痕表面在接触应力作用下产生了塑性变形,磨损形式以接触面微凸体在剪切应力微切削作用下脱落的微凸体形成的磨粒磨损为主,在磨痕的表面已无法形成具有润滑作用的过渡层。

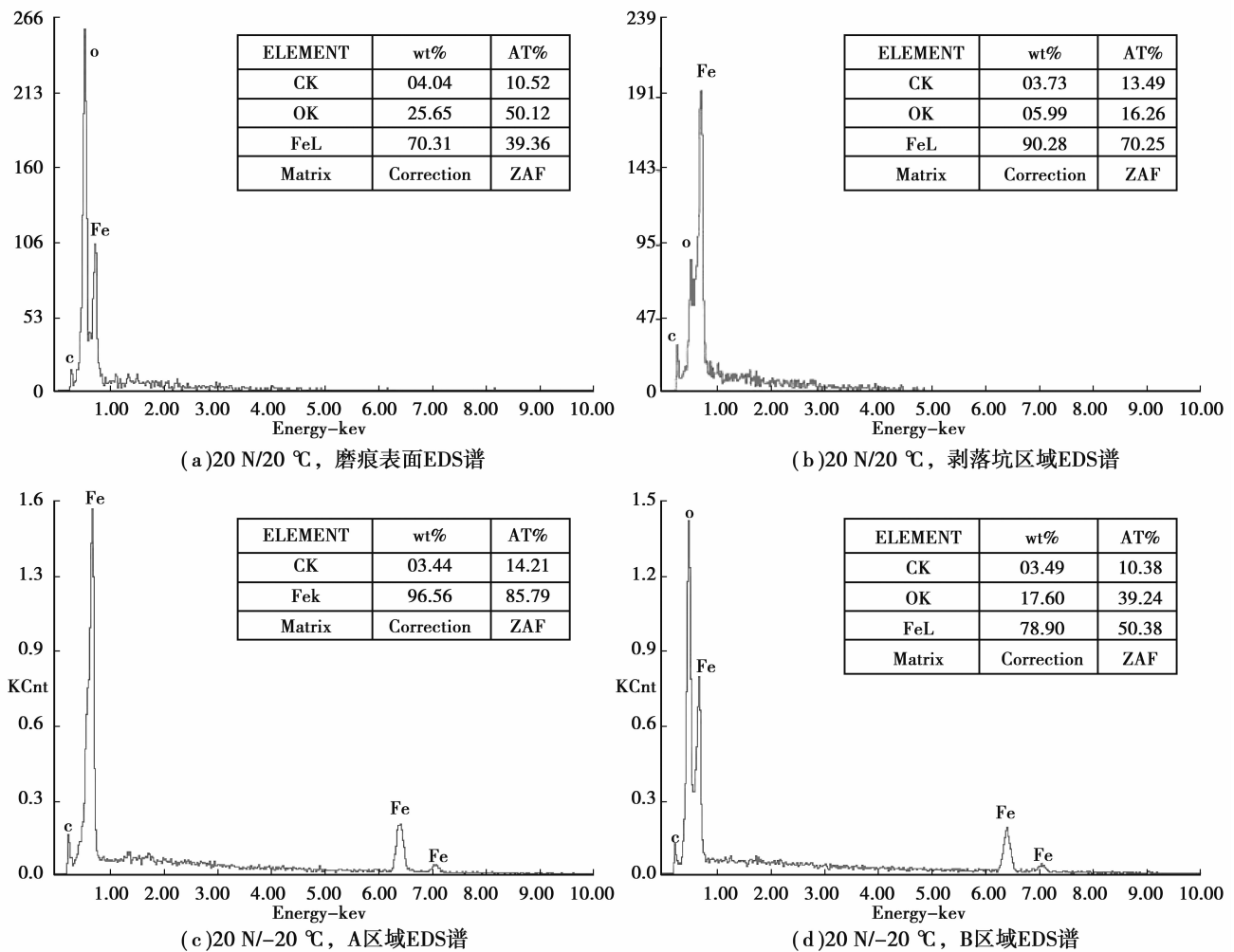


图 7 不同温度极地破冰船钢板磨痕表面 EDS 分析

Fig.7 EDS spectrum of icebreaker plates under different temperatures

图 8 为 20N 法向载荷不同摩擦环境温度下的磨屑形貌图。通过观察可以发现,当环境温度在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,出现的磨屑主要为带状屑和片状屑,见图 8(a),带状屑的长宽比大,主要是试样受到显微切削作用形成。片状屑的长宽比较小且厚度比较薄,主要是由于表面的过渡层产生裂纹、凸起发生疲劳失效剥落形成。当环境温度降至 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时,磨屑的长宽比减少,在出现片状屑的同时,出现了颗粒状的磨屑,如图 8(b) 所示,这是由于温度降低后磨屑受到摩擦热的作用减少,磨屑颗粒之间的结合力削弱,表面微凸体以颗粒状脱落形成磨屑。从图 8(c)、(d) 可知,在低温环境下,结合图 5 的接触面硬度分析可知,接触面受到加工硬化和过渡层的影响减弱,接触面的硬度降低,材料的性能受到冷脆性能作用,抗磨损能力减弱;当试样受到磨粒磨损而发生塑性

变形时,产生的磨屑主要是以块状屑和球状屑为主。因为缺少过渡层的润滑作用, Al_2O_3 与试样之间的摩擦系数增加,接触区域受到的剪切应力增大。试样在磨粒形成的微切削作用下,表面粗糙度增大,接触面的微凸峰发生脱落时就会形成块状磨屑和球状磨屑,块状屑和球状屑残留在接触面上又会进一步加剧试样表面的摩擦磨损行为,促使图3和图4中磨损量随着温度下降而急剧上升。

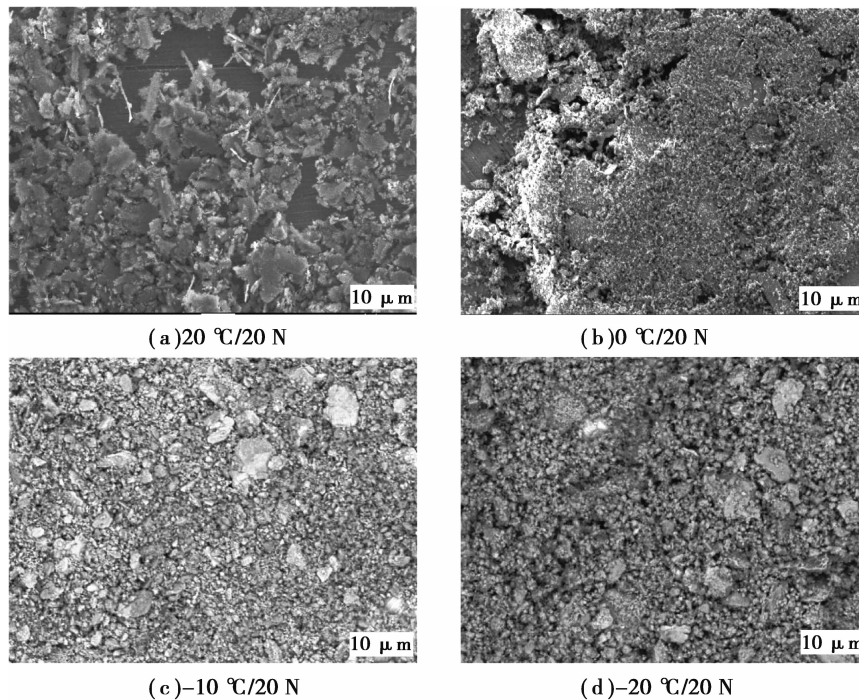


图8 不同环境温度极地破冰船钢板磨屑形貌图

Fig.8 Worn debris topography of icebreaker under different temperatures

根据 Archard 摩擦理论^[16],在接触区会出现摩擦瞬间温升,摩擦闪温的高低与接触压力、摩擦速度、表面粗糙度相关。摩擦闪温的出现会对磨痕表面的氧化产物和氧化物厚度产生影响。为了确定不同的环境温度对磨屑氧化产物的影响,将磨痕表面进行 XRD 分析,见图9。可以发现在 20 °C 时,船用低温钢板的摩擦磨损产物主要为 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、Fe,当环境温度为 5 °C 时,接触区的瞬间温升^[17]会受到周围环境的辐射而降低,磨痕表面的氧化产物以 Fe_2O_3 、Fe 为主,当温度降到 0 °C 时,摩擦温升的影响进一步减弱,表面 Fe_2O_3 减弱并出现了 Fe 元素。当环境温度降到 -10 °C 时,则以 Fe 元素为主,未出现 Fe 氧化物的特征峰。相关文献^[18-20]显示,在铁的氧化中 Fe_2O_3 具有磨粒作用,会提高摩擦系数并加剧接触表面的磨损,而 Fe_3O_4 和 FeO 则对于接触面的摩擦系数有消减作用。这也再次说明图 2(a)、(b)中关于摩擦系数在环境温度为 5 °C 时出现的摩擦系数较高及磨损率变高的成因,可见环境温度对于接触区的摩擦闪温影响较大。

2.4 磨损机理分析

由以上试验结果可以分析,在 20 N 的法向载荷作用下,极地破冰船用钢板变形以塑性变形为主,当环境温度从 20 °C 降至 -20 °C 的过程中, Al_2O_3 球与船用低温钢板组成摩擦副的磨损摩擦系数逐渐增加,磨损率增加,当环境温度低于 5 °C 时磨损由氧化磨损转变为磨粒磨损,磨痕表面硬度增幅减少,磨痕表面的粗糙度增加,磨屑长宽比降低,可见,环境温度对于船用低温钢板的摩擦磨损性能影响较大。

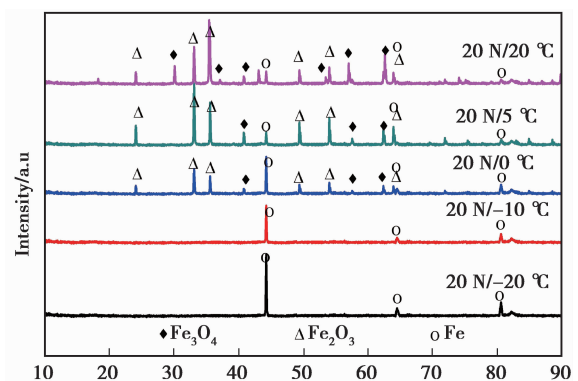


图9 极地破冰船钢板磨痕表面 XRD 图谱

Fig.9 The worn surface XRD spectrum of icebreaker plates

2.4.1 过渡层对摩擦磨损性能的影响

当环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在球与试样的接触区域会形成如图 10(a)所示的过渡层,过渡层主要以 Fe 的氧化物和 Fe 元素为主,能够有效地起到润滑作用,增加接触面的实际接触面积,降低接触应力,减少摩擦副之间的摩擦系数,从而使试样的比磨损率降低,磨痕表面的粗糙度降低。随着环境温度的降低,如图 10(b)所示过渡层厚度减少,其影响逐渐减弱,散落在磨痕表面的磨屑长宽比减小,磨痕的尺寸增大;接触区内的磨粒会对硬度较低的试样微切削产生磨粒磨损,从而形成犁沟状表面形貌,样品的磨损率迅速增加。将 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下钢样磨痕表面放大可以发现,在磨痕的表面有明显的黏着剥落坑存在,如图 11 所示。

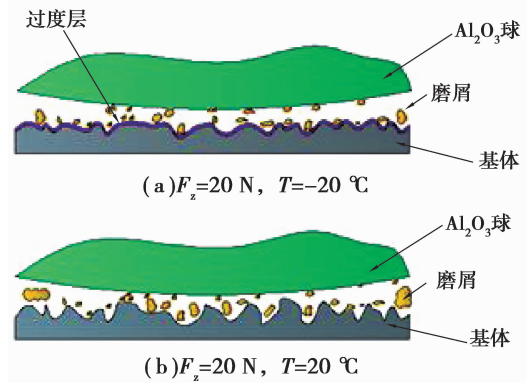


图 10 极地破冰船钢板磨损机理示意图
Fig.10 Schematic diagram of icebreaker plates wear mechanism

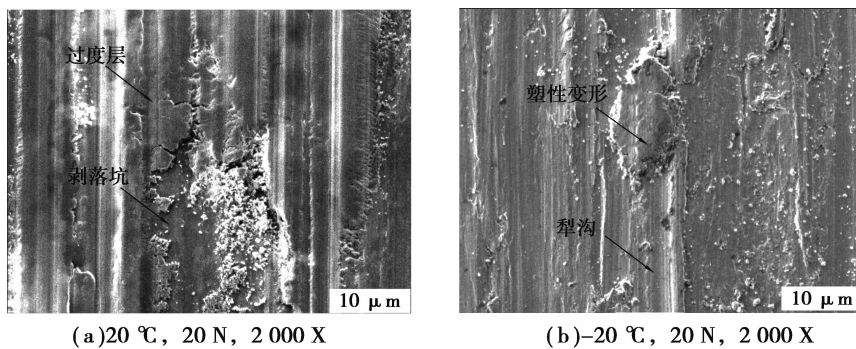


图 11 极地破冰船钢板磨痕表面放大图

Fig.11 Detail worn surface topography of icebreaker plates

为了进一步验证不同环境温度下摩擦磨损过程中黏着磨损现象,将摩擦副在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在同一往复周期内的摩擦力变化进行了对比,并对摩擦磨损过程的摩擦力实时数据监控,结果如图 12 所示。图 12(a)为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时摩擦力波动图,在加载和回程的过程中,最大峰值摩擦力相差 0.31 N ,这种现象在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时也有体现;而当环境温度降至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,最大峰值摩擦力则只相差 0.08 N 。图 11(b)显示在加载和回程过程中,由于接触面黏附力的存在,导致加载和回程峰值的摩擦力有差异,呈现典型的黏着摩擦特征^[21]。结合图 11(a)中磨痕表面黏附坑的存在,可见在室温环境为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,摩擦形式除了有氧化磨损行为还存在有黏着磨损,而在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下则以磨粒磨损和微切削为主。

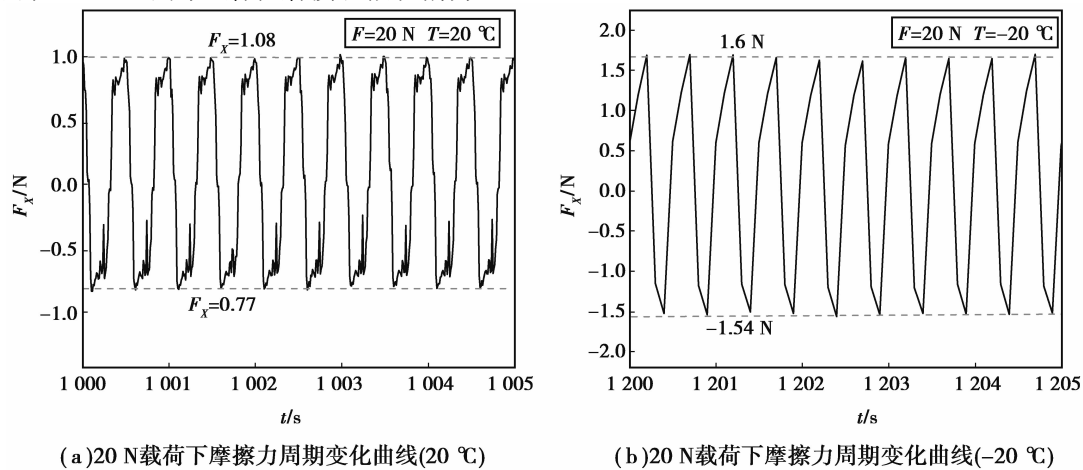


图 12 不同温度下极地破冰船钢板往复摩擦力变化曲线

Fig.12 The reciprocating friction force curve of icebreaker plates at different temperature

3 结 论

1)随着摩擦环境温度从20℃下降到-20℃,破冰船用低温钢板磨损机理主要由氧化磨损、黏着磨损及材料的疲劳失效转变为微切削作用下的磨粒磨损和塑性变形,在接触面表面出现剥落、塑性变形、犁沟等形貌。

2)破冰船用钢板摩擦磨损过程中磨屑随着温度的降低,成分会发生改变。在温度降低过程中,摩擦磨损表层的磨损产物由 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 转变为以Fe元素为主的磨屑;磨屑的长宽比缩小,由带状屑逐渐转变为块状屑和球状屑。

3)相同载荷作用下,破冰船用钢板的比磨损率随着环境温度降低而急剧增加。

参考文献:

- [1] Bird K J, Charpentier R R, Gautier D L, et al. Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle[J]. Fact Sheet, 2008.
- [2] 朱英富,刘祖源,解德,等.极地船舶核心关键技术现状及我国发展对策[J].中国科学基金,2015(3):178-186.
ZHU Yingfu, LIU Zuyuan, XIE De, et al. Current situation of key core technology of polar ship and development strategy of China [J]. China Science foundation, 2015(3):178-186.(in Chinese)
- [3] 张健,韩文栋.极地破冰船技术现状及我国发展对策[J].中国水运,2016,16(5):47-50.
ZHANG Jian, HAN Wendong. Technology status of polar icebreaker and development strategy in China [J]. China Water Transport, 2016, 16 (5): 47-50.(in Chinese)
- [4] 沈权,赵炎平.破冰船技术及几种破冰方法[J].航海技术,2010(1):5-7.
SHEN Quan, ZHAO Yanping. Icebreaker technology and several ice breaking methods [J]. Navigation Technology, 2010 (1): 5-7.(in Chinese)
- [5] 刘诗瑶.我国自主建造的第一艘极地科考破冰船开工[J].珠江水运,2017(2):44-45.
LIU Shiyao. The first polar scientific expedition ice breaker built by ourselves. [J]. Pearl River Water Transport, 2017 (2): 44-45.(in Chinese)
- [6] 严新平,袁成清,白秀琴,等.绿色船舶的摩擦学研究现状与进展[J].摩擦学学报,2012,32(4):410-420.
YAN Xinping, YUAN Chengqing, BAI Xiuqin, et al. Current status and progress of Tribology Research on green ships. [J]. Journal of Tribology, 2012, 32 (4): 410-420.(in Chinese)
- [7] 刘瀛昊,佟福山,高良田.极地破冰船的快速性优化设计[J].计算机仿真,2016,33(11):405-409.
LIU Yinghao, TONG Fushan, GAO Liangtian. Optimum design of polar icebreaker [J]. Computer Simulation, 2016, 33 (11): 405-409.(in Chinese)
- [8] 刘源,张志国,张维,等.破冰船阻力性能估算[J].舰船科学技术,2014,36(7):53-57.
LIU Yuan, ZHANG Zhiguo, ZHANG Wei, et al. Estimation of the resistance performance of an ice breaker [J]. Ship Science and Technology, 2014, 36 (7): 53-57.(in Chinese)
- [9] 段海涛,杜三明,张永振,等.高速干滑动条件下钢/铜摩擦副摩擦磨损表面摩擦热规律研究[J].润滑与密封,2007,32(10):40-42.
DUAN Haitao, DU Sanming, ZHANG Yongzhen, et al. Friction and wear behavior of steel and copper friction pairs under high speed dry sliding [J]. lubrication and Sealing, 2007, 32 (10): 40-42.(in Chinese)
- [10] 王东胜,王士月,孙士斌,等.一种船用低温钢板在干态室温下的往复摩擦特性研究[J].表面技术,2017,46(8):120-127.
WANG Dongsheng, WANG Shiyue, SUN Shibin, et al. Study on reciprocating friction characteristics of a cryogenic ship plate at dry room temperature [J]. Surface Technology, 2017, 46 (8): 120-127.(in Chinese)

(下转第91页)

- [14] 姚娟娟,高乃云,王成金. 水中离子对超声降解 2 种有机磷农药的影响机理[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(6): 13-19.
YAO Juanjuan,GAO Naiyun,WANG Chengjin.Effects of ion on the degradation of two organophosphorus pesticides by ultrasonic[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(6): 13-19. (in Chinese)
- [15] Li H W, Zhao SS. Analysis on influencing factors of degradation of water treatment with ultrasonic wave based on GPC[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 484/485: 501-506.
- [16] Janda V, Kastl G, Pivokonsky M, et al. Oxyanions of halogens in drinking water[J]. Chemické Listy, 2015, 109(5): 360-363.
- [17] Fang J, Zhao Q, Fan C, et al. Bromate formation from the oxidation of bromide in the UV/chlorine process with low pressure and medium pressure UV lamps[J].Chemosphere, 2017, 183: 582-588.
- [18] Tyrovolas K, Diamadopoulos E. Bromate formation during ozonation of groundwater in coastal areas in Greece [J]. Desalination. 2005, 176(1/2/3): 201-209.
- [19] Yang L, Sostaric J Z, Rathman J F, et al. Effect of ultrasound frequency on pulsed sonolytic degradation of octylbenzene sulfonic acid[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2008, 112(3): 852-858.
- [20] Fang J, Shang C. Bromate formation from bromide oxidation by the UV/persulfate process [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(16): 8976-8983.

(编辑 郑洁)

~~~~~  
(上接第 75 页)

- [11] 王东胜,王士月,孙士斌,等. 新型极地破冰船用钢板与 DH32 船用钢板干摩擦性能研究[J].材料保护, 2017,46(9): 21-28.  
WANG Dongsheng, WANG Shiyue, SUN Shibin, et al. Study on dry friction properties of new polar icebreaker plate and DH32 marine steel plate [J] Materials Protection, 2017,46(9): 21-28.(in Chinese)
- [12] Luo Q. Origin of friction in running-in sliding wear of nitride coatings[J]. Tribology Letters, 2010, 37(3):529-539.
- [13] 宋伟,马茂元,席慧智,等. JW 钢板中的带状组织及其对力学性能的影响[J]. 钢铁, 1997(7):54-58.  
SONG Wei, MA Maoyuan, XI Huizhi, et al. Banded structure in JW steel plate and its influence on mechanical properties [J]. Steel, 1997(7): 54-58.(in Chinese)
- [14] A E H, M A, D S F R S. A treatise on the Mathematical Theory of Elasticity[J].Mathematical Theory of Elasticity,1944, 305(1):1385.
- [15] So H. Characteristics of wear results tested by pin-on-disc at moderate to high speeds[J]. Tribology International, 1996, 29(5):415-423.
- [16] Archard J F. The temperature of rubbing surfaces[J]. Wear, 1959, 2(6):438-455.
- [17] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8):981-988.
- [18] Escobar C, Caicedo J C, Caicedo H H, et al. Design of hard surfaces with metal (Hf/V) nitride multilayers[J]. Journal of Superhard Materials, 2014, 36(6):366-380.
- [19] Mnif R, Baccouch Z, Elleuch R, et al. Investigations of high temperature wear mechanisms for tool steel under open-sliding contact[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(8):2864-2870.
- [20] Vergne C, Boher C, Gras R, et al. Influence of oxides on friction in hot rolling: Experimental investigations and tribological modelling[J]. Wear, 2006, 260(9):957-975.
- [21] Ramakrishna S N, Espinosamarzal R M, Naik V V, et al. Adhesion and friction properties of polymer brushes on rough surfaces: a gradient approach[J]. Langmuir the Acs Journal of Surfaces and Colloids, 2013, 29(49):15251-15259.

(编辑 王维朗)