引用格式：刁望，王艺霏，肖帅恒，等.锡青铜及5种常用铁碳合金在模拟海水中的耐腐蚀磨损性能[J].材料工程，2026，54(3)：201-212.
DIAO Wang，WANG Yifei，XIAO Shuaiheng，et al.Corrosion and wear resistance of tin bronze and five commonly used iron-carbon alloys in simulated seawater[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(3)：201-212.

锡青铜及5种常用铁碳合金在模拟海水中的耐腐蚀磨损性能

刁 望[1]，王艺霏[1]，肖帅恒[1]，曾 嵘[1]，张启发[1]，杨理京[2]，温文辉[1]，戴乐阳[1]，程 俊[3]，曾步辉[1*]，王军伟[1*]

（1 集美大学 轮机工程学院 福建省船舶与海洋工程重点实验室，福建 厦门 361021；2 西安赛福斯材料防护有限责任公司，西安 710200；3 集美大学 海洋装备与机械工程学院，福建 厦门 361021）

摘要：船舶的锚链环、外露在海水中的滑动轴承等零部件长期处于海水腐蚀与磨损（简称“蚀损”）工况，其耐蚀损性能直接影响海工装备的服役安全性。利用腐蚀磨损原位电化学测试方法，研究了锚链钢（CM690）、轴承钢（GCr15）、船体钢板（AH36钢）、柴油机缸套用铸铁（HT350）、滑动轴承铜轴瓦（锡青铜QSn8）和常用机械零件用钢（45钢）在人工海水中的耐腐蚀和耐蚀损性能，探究了其耐蚀损机理。结果表明：在纯腐蚀条件下，QSn8自腐蚀电位远高于其他铁碳合金，且腐蚀速率最小（0.09 mm/a）。但在腐蚀磨损条件下，HT350因具有较高硬度和石墨片的润滑作用，其蚀损率（6.28×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$）较低，仅次于QSn8（3.47×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$）；其他4种材料蚀损率均较高，在（1.22～1.88）$\times10^{-5}$ $mm^3/(N\cdot m)$之间。QSn8在模拟人工海水环境下具有较好的耐腐蚀和耐蚀损性能，是耐蚀损零件首选材料，但成本较高，在满足其他力学性能要求的前提下，可以选择HT350材料。

关键词：腐蚀磨损；锡青铜；铁碳合金；海水腐蚀
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000271 **CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000271
中图分类号：TG17；TB31 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4381(2026)03-0201-12

Corrosion and wear resistance of tin bronze and five commonly used iron-carbon alloys in simulated seawater

DIAO Wang[1]，WANG Yifei[1]，XIAO Shuaiheng[1]，ZENG Rong[1]，ZHANG Qifa[1]，YANG Lijing[2]，WEN Wenhui[1]，DAI Leyang[1]，CHENG Jun[3]，ZENG Buhui[1*]，WANG Junwei[1*]

（1 Key Laboratory of Marine and Offshore Engineering of Fujian Province，School of Marine Engineering，Jimei University，Xiamen 361021，Fujian，China；2 Xi'an Saflex Material Protection Limited Liability Company，Xi'an 710200，China；3 School of Marine Equipment and Mechanical Engineering，Jimei University，Xiamen 361021，Fujian，China）

Abstract：The ship′s anchor chain rings，sliding bearings，and other components exposed to seawater are subjected to long-term corrosion and wear，collectively referred to as tribocorrosion. The tricoborrosion resistance of these materials directly affects the operational safety of marine equipment. In this study，the *in-situ* electrochemical testing method for corrosion and wear are employed to investigate the tribocorrosion resistance of six commonly used materials in artificial seawater environments：anchor chain steel（CM690），bearing steel（GCr15），high-strength marine steel（AH36 steel），cast iron for diesel engine cylinder liners（HT350），tin bronze for plain bearing bushings（QSn8），and steel most commonly used in mechanical structures（45 steel）. The objective is to analyze their corrosion resistance and damage resistance mechanisms. The results show that under pure corrosion conditions，QSn8 exhibits a significantly higher self-corrosion potential compared to other iron-carbon alloys，and has the lowest corrosion rate（0.09 mm/a）. However，under corrosion wear conditions，HT350 demonstrates a relatively

low wear loss rate (6.28×10^{-6} mm^3/(N·m)), second only to QSn8 (3.47×10^{-6} mm^3/(N·m)). This is attributed to its high hardness and the lubricating effect of graphite flakes within the cast iron matrix. The other four materials exhibits higher wear rates, around (1.22-1.88) $\times10^{-5}$ mm^3/(N·m). QSn8 shows excellent resistance to both corrosion and wear in simulated seawater conditions, making it a promising candidate for tribocorrosion-resistant components. However, its relatively high cost may limit its widespread application. If other mechanical performance requirements are met, HT350 can serve as a cost-effective alternative.

Key words: corrosion and wear; tin bronze; iron and carbon alloy; seawater corrosion

在“海洋强国”背景下,开发和利用海洋资源是我国重要战略目标之一[1]。船舶、海上风电和海洋石油开采平台、深海探测器等海洋装备的锚链环、外露关节轴承、螺旋桨等海工装备摩擦副或过流部件长期处于海水腐蚀和磨损等恶劣环境中,要求其结构材料具有良好的耐腐蚀和耐磨损性能。腐蚀与磨损(简称“蚀损”)作用将加速材料失效过程,缩短设备的服役寿命,增加设备的维修成本[2-3]。据报道,浮吊船“福景001”轮于2022年7月2日凌晨在海域防台锚地避3号台风“暹芭”时,因锚链严重蚀损导致断裂,走锚遇险,最终酿成27人落水失联,造成“福景001”轮沉没的重大事故[4]。研究海工装备摩擦副和过流部件常用典型结构材料在海洋环境中的耐腐蚀和耐蚀损性能,并探讨其机理,对选材和开发具有耐蚀损性的先进材料具有重要意义。

处于海水或盐雾腐蚀环境中的海工装备摩擦副和过流部件较多,工况较为复杂。比如船体外板和甲板不仅长期处于海水和/或盐雾腐蚀环境,而且还遭受砂砾等固体物磨损破坏;锚链和系泊链用于系泊船舶、浮动式海上风电平台或石油开采平台的链状物,不仅处于海水腐蚀环境,而且锚链在收放过程中,链与链之间也会产生剧烈摩擦,系泊链受风浪对系泊物的作用,连环接触面也将长期处于磨损状态。GCr15广泛用于制造轴承的滚球、滚柱及内外套圈等零部件[5],经常处于高负载、高强度的接触疲劳工作环境中。水陆两栖飞机起落架轴承还处于海水腐蚀环境中,要求其具有较好的耐蚀损性能。此外,海上船舶发动机气缸套工作在高温、高压、高湿等复杂环境中[6],当海上盐雾随空气被吸入气缸,在气缸套间容易产生微量海水腐蚀环境,从而导致气缸套腐蚀磨损,而目前气缸套材料大多以合金铸铁和铸态贝氏体灰铸铁为主,基体通常以珠光体和铸态贝氏体为主[7]。铜合金因具有良好的耐腐蚀和耐磨损性能,被广泛用作轴套、轴承和螺旋桨叶片等零部件,在船舶和海上风电等装备上具有广泛应用。由于上述材料在海工装备中应用较为广泛,而它们又常常处在腐蚀+磨损的工作环境中,对材料的耐腐蚀磨损性能有较高的要求。海洋中的复杂环境将对材料造成不同程度的失效损失,降低设备的服役寿命,增加设备的维护成本。因此研究它们在海水中的耐腐蚀磨损性能,可以为海洋装备选材提供一定的理论基础支撑。

针对上述海工装备摩擦副和过流部件的常用典型材料,国内外学者已经广泛研究了其耐腐蚀和/或磨损行为。Vukelic等[8]研究了船体外板用AH36钢制造的焊接件长期暴露于自来水和自海浪中的表面状态和力学性能变化。结果表明,暴露在海浪中的试样力学性能蜕化和质量损失率均大于暴露于自来水环境中的试样,且暴露在海浪中的试样在前6个月内,腐蚀凹坑深度增长最快,之后逐渐减慢。刘信等[9]以CM490锚链钢为研究对象,通过一系列实验,从微观形貌和宏观腐蚀行为两方面分析渗锌层的耐腐蚀性能,结果表明,锚链钢试样经过渗锌、渗锌+钝化工艺处理均能降低腐蚀电流密度、增加极化电阻,从而提升耐腐蚀性能。Altınok等[10]对S355J2钢分别采用正火以及淬火和回火处理,分别得到了2级和3级系泊链钢,研究了其在海水环境下的腐蚀磨损性能。结果表明,在纯腐蚀条件下,2种钢都发生活性溶解,但2级钢的耐腐蚀性能优于3级钢;在滑动摩擦下,2种钢的摩擦因数相当,但由于3级钢的耐腐蚀性能较差,使得其磨损率较高。Han等[11]研究了稀土添加对GCr15轴承钢在海洋环境下腐蚀敏感性的影响。结果表明,稀土的添加使得轴承钢中的长条状MnS夹杂物改变为小的球形氧硫化物,从而降低了GCr15轴承钢对海洋腐蚀的敏感性;同时腐蚀坑均出现在钢基体表面,随着腐蚀的进行,MnS被迅速腐蚀。贾文哲等[12]运用超声滚压表面强化技术对45钢棒料进行强化加工,研究了45钢新型的抗腐蚀方法,结果表明当超声滚压参数取到合适值时,可以降低45钢在海水中的腐蚀速率,提高其抗腐蚀性能。船用气缸套进行渗氮处理可以显著提高气缸套的耐腐蚀、磨损、疲劳等性能,但是氮化后的气缸套需要再次研磨抛光,这就可能会导致孔表面的氮层脱落,吕凌[13]通过抽样监测气缸套的诸多性能,发现只要对铸造工艺的因素进行合理控制,就

可以使铸件有良好的金相组织，高性能的机械铸件，从而有效减少氮层的脱落，提高船用气缸套的耐腐蚀和磨损性能。Huttunen-Saarivirta 等[14]研究了含铅锡青铜在模拟海水中的腐蚀、磨损和腐蚀磨损行为。结果表明，在纯腐蚀条件下，在锡青铜表面形成的腐蚀产物未对基体形成保护；在纯磨损条件下，锡青铜发生塑性变形，磨料磨损为主要的磨损机制；同时因腐蚀磨损之间的协同作用增加了材料的损失，其中磨损引起的腐蚀约占材料损失的80%。

上述研究仅侧重于研究材料在腐蚀或磨损单一条件下的性能，或者不同材料的研究者因各自实验条件的不同，得到的数据可比性较差，且尚未在相同腐蚀磨损条件下系统对比这些材料在海水环境下纯腐蚀和腐蚀与磨损交互作用下耐蚀损性能。所以，本工作选择锡青铜 QSn8、锚链钢 CM690、滚动轴承钢 GCr15、高强度船舶用钢 AH36 钢、铸铁 HT350 和优质碳素结构钢 45 钢作为研究对象，在相同的实验条件下系统对比了他们在模拟海水中纯腐蚀和耐腐蚀磨损性能，探讨了耐蚀损机理，填补了国际上关于海工装备常用金属结构材料在海水环境中耐蚀损性能横向对比的空白。该研究对海工装备用耐腐蚀磨损零部件科学选材，以及开发耐蚀损合金具有重要参考价值。

1　实验材料与方法

实验中所用到的 GCr15、45 钢和 QSn8 试样均是从市场上购买获得的；CM690、HT350、AH36 钢是分别从锚链、废旧船舶柴油机气缸套、船舶甲板余料上切取获得的。通过电火花直读光谱仪（赛默飞，ARL3460）测得上述试样化学成分，如表 1 所示。采用电火花数控线切割机床将试样切割为 10 mm×10 mm×3 mm 的块状，依次在 500#、1000#、2000# 的 SiC 砂纸上磨光所有表面，然后连接导线并用环氧树脂镶嵌试样，仅暴露出试样 10 mm×10 mm 的一个表面，用于做电化学测试和腐蚀原位测试。实验中作用的模拟海水均为3.5%（质量分数，下同）的NaCl水溶液。

表 1　实际测得的试样成分

Table 1　Composition of specimens tested

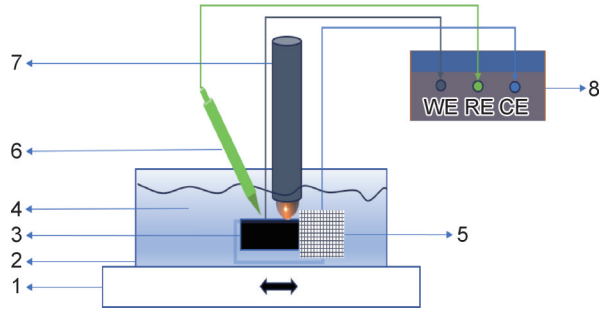
Sample	Mass fraction/%								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Fe	Sn	Cu
AH36 steel	0.15	0.15	0.50	0.01	0.02		Bal.		
CM690	0.20	0.25	1.64	0.01	0.02		Bal.		
GCr15	0.43	0.25	0.27	0.00	0.01	1.45	Bal.		
45 steel	0.44	0.19	0.77	0.01	0.02		Bal.		
HT350	3.00	1.98	0.68	0.11	0.30	0.44	Bal.		
QSn8				0.01	0.31			8.53	Bal.

用于做金相实验的试样，依次采用3.5 μm和0.25 μm的金刚石抛光膏抛光至镜面，其中 GCr15、CM690、45 钢、HT350 和 AH36 钢均采用体积分数为 5% 的硝酸＋酒精溶液浸蚀，QSn8 采用体积分数比为 1∶1 的 0.9 g/L 氨水＋30% 双氧水溶液浸蚀，然后采用金相显微镜观察显微组织。采用维氏硬度计（FALCON 500）测量试样硬度，载荷为 10 N，保压时间 10 s。

采用多通道电化学工作站（科斯特，CS2350M）开展纯腐蚀实验：采用三电极系统，试样为工作电极（working electrode，WE），Pt 网为对电极，参比电极是饱和甘汞电极（SCE），其电势比标准氢电极（SHE）高 0.241 V，即 $E_{SCE}=E_{SHE}+0.241$ V。作为工作电极的试样表面在 2000# 的 SiC 砂纸上再次磨光以去除表面氧化层后，浸入 NaCl 水溶液中，同时开始监测开路电位（OCP）；测量 4 h 后，开始测电化学阻抗谱数据（正弦输入振幅为 10 mV，频率为 10^{-2}～10^{5} Hz）；然后测量动电位极化曲线，从 OCP-0.5 V 开始，以 10 mV/s 扫描至 OCP＋1.5 V，获得“摩擦前”电化学参数。

腐蚀磨损实验在多功能摩擦磨损试验机（Rtec，MFT-5000）上进行，其装置结构如图 1 所示。试样固定在电解槽底部，并完全浸没在 3.5%NaCl 电极液中。该试样与常规做电化学测试的试样相同，未封裹的试样表面向上，作为待测面，与摩擦试验机的对磨件接触，对磨件向试样施加垂直载荷，摩擦试验机带动试样做往复运动，通过摩擦试验机控制软件采集摩擦因数数据。同时，试样作为工作电极，Pt 网和饱和甘汞电极分别作为对电极（counter electrode，CE）和参比电极（reference electrode，RE），与电化学工作站相应端口连接，在摩擦过程中，同步采集电化学数据，如开路电位、摩擦因数和极化曲线等“摩擦中”电化学参数。

其中电解槽是容积约为360 cm^3的长方体结构，对磨件是直径为4 mm的Al_2O_3球，摩擦频率为2 Hz，单次摩擦行程为4 mm，摩擦载荷为10 N。每次测试前，试样在电解液中浸泡1 h，然后开始摩擦实验，采集摩擦因数(COF)，并同步监测摩擦期间的OCP。摩擦1 h后停止摩擦，再监测10 min的OCP。摩擦结束后，采用激光共聚焦显微镜(基恩士，KEYENCEVK-X250)和扫描电子显微镜(蔡司，Crossbeam 550)分析摩擦腐蚀实验后试样磨痕表面特征。上述纯腐蚀和腐蚀磨损实验中，每种成分合金采用3个平行试样。Landolt等[15]和Stott等[16]也采用与本工作相似的实验装置开展了腐蚀磨损研究。



1-friction table base；2-electrolyzer；3-friction specimen (WE)；4-seawater solution；5-Pt mesh (CE)；6-RE；7-counter abrasive member；8-electrochemical workstation

图1 腐蚀磨损结构装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of structural device for corrosive wear

为了对比磨痕对试样耐腐蚀性能的影响，进一步研究了带磨痕试样在3.5%NaCl溶液中耐腐蚀性，采用新制备的试样，在该溶液中摩擦30 min后，采用前文所述纯腐蚀电化学参数，测量了每种试样“摩擦后”的电化学参数。

2 实验结果

2.1 显微组织及硬度

6种试样在金相显微镜下的金相照片分别如图2(a)～(f)所示。其中AH36钢、CM690、GCr15和45钢均是由铁素体和珠光体组成，白亮部分为铁素体，暗灰部分为珠光体。GCr15和HT350显微组织高倍SEM照片分别如图2(g)，(h)所示，GCr15组织中渗碳体呈颗粒状，铸铁基体中明显可见层片状石墨。QSn8试样可见枝晶组织结构。

图3是6种试样的维氏硬度。由图中可知，HT350的硬度最高，为346.94$HV_{0.05}$，其次为45钢，为202.96$HV_{0.05}$，CM690和GCr15的硬度接近，在180$HV_{0.05}$左右，AH36钢和QSn8的硬度较低，分别为152.67$HV_{0.05}$和132.01$HV_{0.05}$。

2.2 纯腐蚀行为

2.2.1 开路电位

6种试样在NaCl水溶液下纯腐蚀实验中的OCP随时间变化的曲线图如图4所示。OCP指的是WE在没有负载情况下的电位与参比电极之间电位的差值，一般而言，OCP的大小与材料的耐腐蚀倾向呈正相关，即OCP值越偏正，该材料的耐腐蚀倾向越好。由图4可知，各种试样OCP都是呈先减小后趋于稳定的趋势，而稳定时的OCP不同，是因为各种试样在NaCl水溶液中的活性不同导致的。最终稳定时QSn8的OCP最高，为−0.21 V，表明该试样的耐腐蚀倾向更好；其他五种铁碳合金试样的OCP值除GCr15(−0.59 V)略高外，其他4种试样的OCP值接近，介于−0.67～−0.62 V之间。

2.2.2 电化学阻抗谱

试样在NaCl水溶液中测得的电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy，EIS)，又叫交流阻抗谱。在电化学阻抗谱中可得到两组图，Nyquist图和Bode图，分别如图5(a)，(b)所示，采用的模拟等效电路图如图5(c)所示。在Nyquist图中，容抗弧的半径大小通常意味着试样的电荷传递阻抗的大小，一般来说，容抗弧的半径越大，材料的耐腐蚀倾向越好。在Bode图中，频率-相位角曲线的峰宽越宽、频率-阻抗模曲线中低频部分阻抗模越大，则试样耐蚀倾向更好，而QSn8的阻抗电阻|Z|值最大，说明该试样的耐蚀性倾向更好。通过拟合等效电路得到的拟合参数值，见表2。在等效电路中，R_s代表溶液电阻，CPE元件指“常数相位元件”(constant phase element)，这是一种用于电化学阻抗谱(EIS)模型中的元件，R_p对应于电荷转移电阻，一般来说，R_p值越大，电荷转移越难，也就意味着该试样的耐蚀倾向更好[17]。由表2可知，QSn8的R_p值最大，表明QSn8的耐蚀性优于其他试样，这与Bode图中得到的结果一致。

2.2.3 动电位极化曲线

各种试样在NaCl水溶液中测得的动电位极化曲线如图6所示。在动电位极化曲线中，可获得各种试样的自腐蚀电位(E_{corr-b})和自腐蚀电流值(I_{corr-b})。根据电化学腐蚀理论，材料的耐腐蚀能力与自腐蚀电极电位呈负相关，腐蚀速率与自腐蚀电流密度呈正相关[18]，即材料的自腐蚀电极电位越高，材料的耐腐蚀倾向越好，自腐蚀电流越小，腐蚀速率越小。从图6中可知，6种试样阳极分支没有明显的钝化区间，表明都发生了活性溶解。QSn8的自腐蚀电位比较偏正

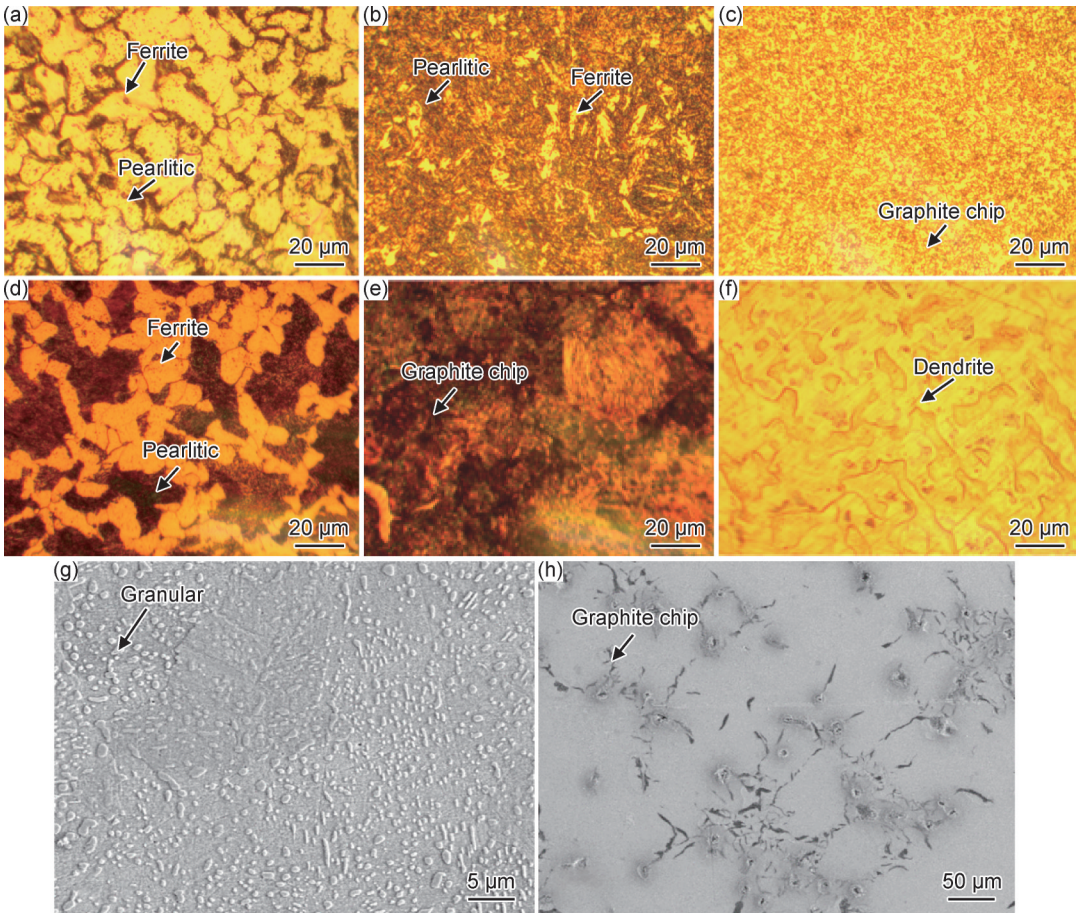


图 2　试样金相照片及 SEM 照片

(a)AH36;(b)CM690;(c)GCr15;(d)45 钢;(e)HT350;(f)QSn8;(g)GCr15;(h)HT350

Fig.2　Metallographic photos and SEM photos of specimens

(a)AH36;(b)CM690;(c)GCr15;(d)45 steel;(e)HT350;(f)QSn8;(g)GCr15;(h)HT350

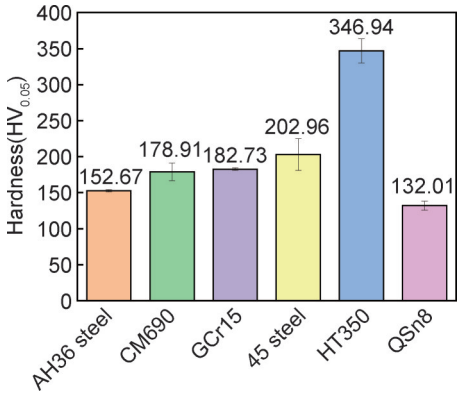


图 3　6 种试样的维氏硬度

Fig.3　Vickers hardness of six specimens

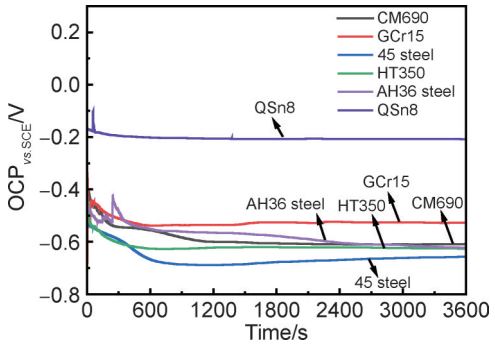


图 4　6 种试样在 NaCl 水溶液中开路电位与时间的关系图

Fig.4　Plot of OCP *versus* time in aqueous NaCl solution for six specimens

(−0.37 V),其余 5 种铁碳合金的自腐蚀电位接近,介于−0.93～−1.02 V 之间,均负于 QSn8 自腐蚀电位;QSn8 的自腐蚀电流也明显小于 5 种铁碳合金。通过 Tafel 拟合法获得各种试样的腐蚀速率如表 3 所示。虽然采用电化学方法获取的材料腐蚀速率受数据拟合人员主观因素、实验环境干扰等因素影响较大,但不同材料的腐蚀速率差异趋势仍具有可比性,如图 6 和表 3 所示,锡青铜的腐蚀速率最小,是 0.09 mm/a,GCr15 和 AH36 钢的腐蚀速率较为接近,约为 0.96 mm/a,其次是 45 钢和 CM690,腐蚀速率在 1.53 mm/a 附近,其中 HT350 的腐蚀速率最高,为 2.18 mm/a,表明 HT350 的耐腐蚀性能较差,QSn8 的耐腐蚀性能较好。QSn8 有更好的耐海水腐蚀性能,可延长设备使用寿命。

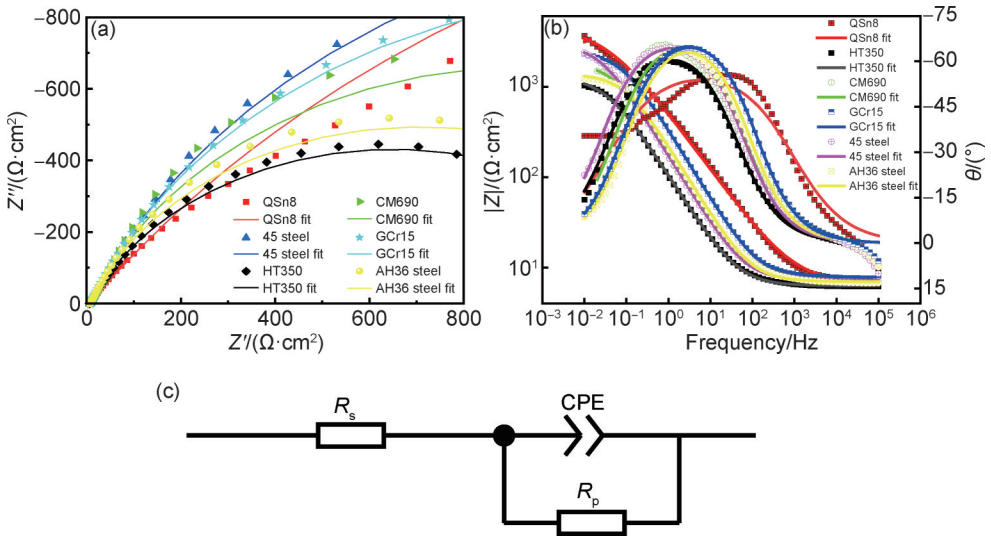


图5 6种试样在NaCl水溶液中电化学阻抗谱及模拟电路

(a)Nyquist 图;(b)Bode 图及相位角图;(c)拟合电路图

Fig.5 Electrochemical impedance spectra and analog circuits of six specimens in aqueous NaCl solution

(a)Nyquist plot;(b)Bode plot and phase angle diagram;(c)fitted circuit diagram

表2 6种试样在NaCl水溶液中阻抗拟合数值

Table 2 Impedance fitting values for six specimens in aqueous NaCl solution

Sample	R_s/Ω	CPE-T/(F·cm^{-2})	CPE-P	R_p/Ω
AH36 steel	6.994	1.040×10^{-3}	7.823×10^{-1}	1399.8
CM690	7.237	1.259×10^{-3}	7.809×10^{-1}	1885.7
GCr15	7.754	6.904×10^{-4}	7.827×10^{-1}	2467.9
45 steel	7.204	1.390×10^{-3}	7.714×10^{-1}	3027.5
HT350	6.267	2.395×10^{-3}	7.502×10^{-1}	1287.8
QSn8	5.812	4.543×10^{-4}	6.534×10^{-1}	3662.0

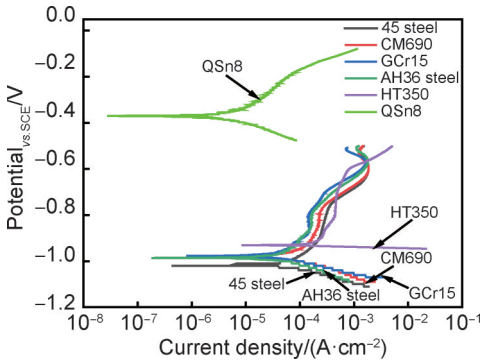


图6 6种试样在NaCl水溶液中纯腐蚀条件下的动电位极化曲线图

Fig. 6 Dynamic potential polarization curves of six specimens under pure corrosion conditions in aqueous NaCl solution

2.3 腐蚀磨损行为

2.3.1 开路电位

6种试样在NaCl水溶液中腐蚀摩擦条件下测得开路电位与时间的关系曲线如图7所示。从图中可知,摩擦开始后,QSn8试样的开路电位降低,而其他5种铁碳合金试样的开路电位上升,表明QSn8试样表面存在一层保护膜。稳定摩擦期间,QSn8开路电位(−0.25 V)远高于其他5种铁碳合金(−0.61~−0.55 V)。

表3 6种试样动电位极化曲线拟合数据

Table 3 Fitting data of kinetic potential polarization curves for six specimens

Sample	Pure corrosion			Corrosion during friction			
				Friction		After friction	
	$E_{corr\text{-}b,vs.\ SCE}$/V	$I_{corr\text{-}b}$/(A·cm^{-2})	Corrosion rate/(mm·a^{-1})	$E_{corr\text{-}b,vs.\ SCE}$/V	$E_{corr\text{-}d}-E_{corr\text{-}b}$/V	$E_{corr\text{-}a,vs.\ SCE}$/V	$E_{corr\text{-}a}-E_{corr\text{-}b}$/V
AH36 steel	−0.987	8.248×10^{-5}	0.97	−0.453	0.534	−0.879	0.108
CM690	−0.982	1.413×10^{-4}	1.66	−0.425	0.557	−0.838	0.144
GCr15	−0.978	8.002×10^{-5}	0.94	−0.422	0.556	−0.651	0.327
45 steel	−1.017	1.140×10^{-4}	1.33	−0.419	0.598	−0.815	0.202
HT350	−0.931	1.855×10^{-4}	2.18	−0.502	0.429	−0.891	0.040
QSn8	−0.369	3.791×10^{-6}	0.09	−0.195	0.174	−0.278	0.091

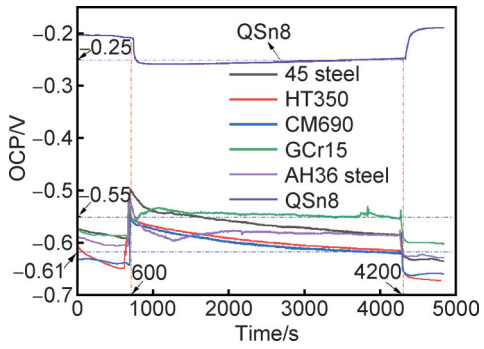


图7　6种试样在NaCl水溶液中腐蚀磨损条件下的开路电位

Fig.7　OCP of six specimens under corrosive wear conditions in aqueous NaCl solutions

2.3.2　摩擦因数

图8是各种试样在NaCl水溶液中测得的摩擦因数关系图。QSn8的摩擦因数呈先增加、后减小、最后趋于平稳的趋势，其他铁碳合金则呈先增加后缓慢趋于平稳的趋势。最终稳定时，QSn8的摩擦因数最低，其值约为0.20左右；其次是HT350，约为0.27；AH36钢、45钢和CM690的摩擦因数接近，约为0.30；GCr15的摩擦因数最高，约为0.43。各种试样在开始阶段摩擦因数上升则是因为处在开始的磨合期，材料光滑的表面开始变得粗糙，从而导致摩擦因数不断上升。而随着摩擦的进行，QSn8的摩擦因数下降则可能是因为在摩擦阶段产生的磨屑以及NaCl水溶液对锡青铜基体有着一定的润滑作用，从而导致其摩擦因数下降。

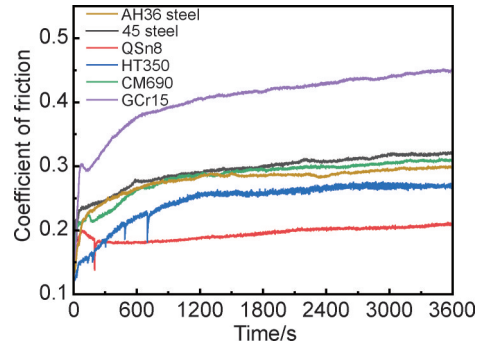


图8　6种试样在NaCl水溶液中腐蚀磨损条件下的摩擦因数

Fig.8　Coefficient of friction of six specimens under corrosive wear conditions in aqueous NaCl solution

2.3.3　腐蚀磨损下的动电位极化曲线

图9为各种试样在模拟人工海水环境中纯腐蚀、摩擦中与摩擦后条件下的动电位极化曲线关系图。其中，摩擦中极化曲线是指试样在摩擦的同时测得的极化曲线，摩擦后极化曲线是指试样在3.5%NaCl水溶液中摩擦30 min后，待试样的开路电位恢复到接近摩擦前的开路电位时，再开始测得的动电位极化曲线。摩擦过程中和摩擦后的极化曲线反映的自腐蚀电位($E_{corr\text{-}d}$、$E_{corr\text{-}a}$)如表3所示。与纯腐蚀条件下的自腐蚀电位相比，6种试样的$E_{corr\text{-}a}$都有较大幅度的上升，除铜合金QSn8增加0.174 V外，其他5种合金增加幅度较大，介于0.429～0.598 V间；6种试样阳极分支对应的腐蚀电流也比纯腐蚀条件下高约2个数量级。摩擦后，6种试样的$E_{corr\text{-}a}$虽然比摩擦中的低，但仍然明显高于纯腐蚀条件下的自腐蚀电位(0.04～0.327 V)；且阳极分支的腐蚀电流均比纯腐蚀小，表明提高了耐腐蚀性。此外，无论是在纯腐蚀、摩擦中还是摩擦后，QSn8的自腐蚀电位都是6种试样中最高的，表明其具有较好的耐腐蚀倾向。

2.3.4　磨损率

磨损率是指在单位长度单位载荷下摩擦磨损所造成的材料体积损失，其计算公式如(1)所示：

$$W=\frac{10^{-6}A_c}{0.12Fft} \tag{1}$$

式中：W为磨损率，mm³/(N·m)；A_c为磨痕平均截面积，μm²；F为施加载荷，N；f为频率，Hz；t为摩擦时间，min。最终计算出6种试样在NaCl水溶液中的磨损率。在NaCl水溶液中，6种试样腐蚀磨损率如图10所示。除HT350外，4种铁碳合金的磨损率均较高，均大于1.0×10^{-5} mm³/(N·m)；QSn8的腐蚀速率最低，3.47×10^{-6} mm³/(N·m)，具有最好的耐腐蚀磨损性能；HT350的耐腐蚀磨损性能次之，为6.28×10^{-6} mm³/(N·m)。

2.3.5　磨痕表面特征

腐蚀磨损1 h后，通过激光共聚焦显微镜采集的磨痕3D形貌照片如图11(a)～(f)所示。除HT350外，其他4种铁碳合金磨痕深度和宽度均较大，HT350和QSn8的磨痕深度较窄，深度较浅。磨痕轮廓如图11(g)所示，QSn8的磨痕深度最浅，其次为HT350，CM690次之，然后是AH36钢和GCr15，磨痕深度最宽的为45钢，表明QSn8和HT350的耐磨性能较好。

磨痕表面SEM照片如图12所示。6种试样表面均可明显发现犁沟，表明均发生了磨粒磨损。其中，如图12(a)～(e)所示，4种铁碳合金磨痕表面均有大量火山状凸起物，EDS分析表明，该位置均富含O元素，与磨痕周围磨屑成分接近，如表4所示。推测在磨损过程中发生了腐蚀，蚀坑被磨屑填充。当摩擦结束后，蚀坑内的磨屑吸潮，导致体积膨胀。所以，这5种铁碳合金还发生了腐蚀磨损。QSn8试样磨痕表面没有明显看到被腐蚀的痕迹，但O元素含量明显高于周围未摩擦部位。

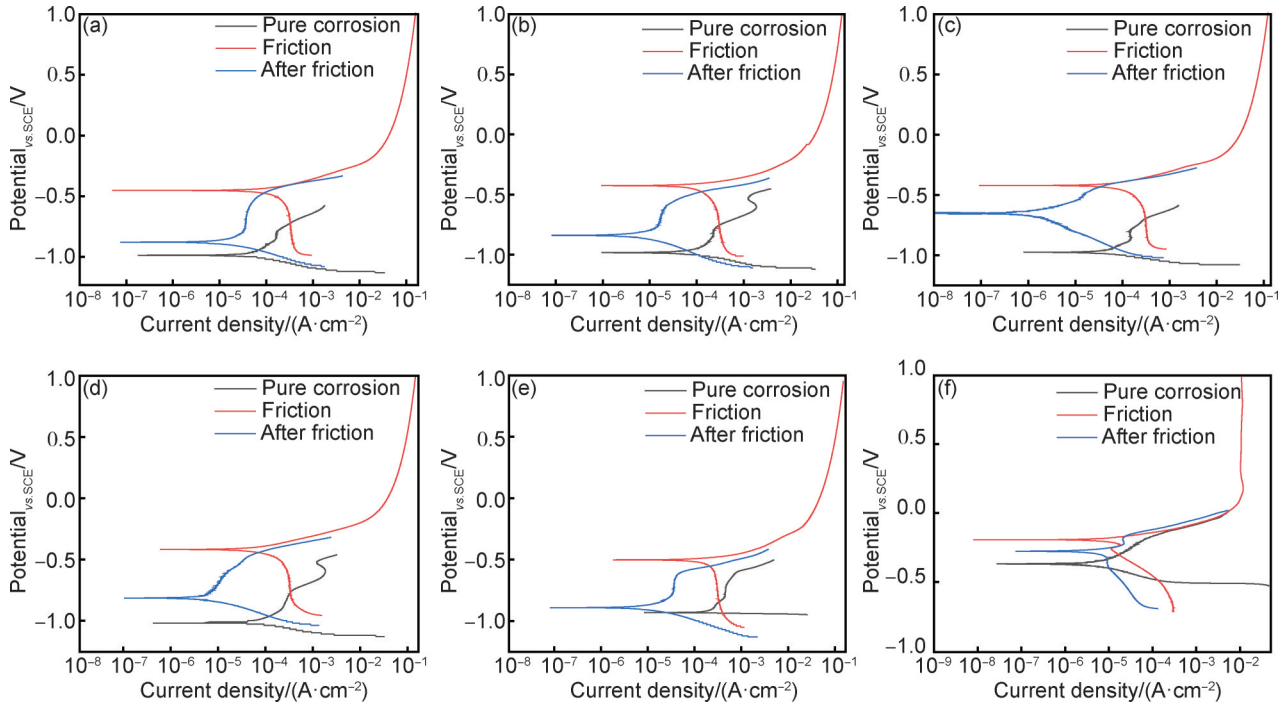


图 9　6 种试样在 NaCl 水溶液中纯腐蚀、摩擦中、摩擦后条件下的动电位极化曲线

(a)AH36 钢;(b)CM690;(c)GCr15;(d)45 钢;(e)HT350;(f)QSn8

Fig.9　Dynamic potential polarization curves of six specimens under pure corrosion, in-friction and post-friction conditions in aqueous NaCl solution

(a)AH36 steel;(b)CM690;(c)GCr15;(d)45 steel;(e)HT350;(f)QSn8

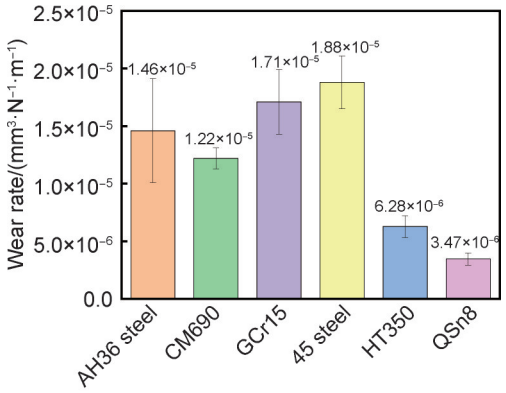


图 10　6 种试样在 NaCl 水溶液中腐蚀磨损条件下的磨损率

Fig. 10　Wear rates of six specimens under corrosive wear conditions in NaCl aqueous solution

3　分析讨论

在 NaCl 水溶液中纯腐蚀条件下，5 种铁碳合金腐蚀速率远高于锡青铜。根据图 2 所示微观组织结构可知，AH36、CM690H、45 钢和 GCr15 主要由渗碳体和铁素体相组成，HT350 中也明显可见片状石墨。在本工作所述大气气氛下 NaCl 水溶液中，他们将形成腐蚀微电池，发生电化学腐蚀：电极电位较低的金属基体中的 Fe 原子将作为阳极发生溶解反应，电极电位较高的渗碳体和石墨作为阴极，发生阴极反应，阳极和阴极反应式分别如下所示：

$$Fe = Fe^{2+} + 2e^- \tag{2}$$

$$2H_2O + 4e^- + O_2 = 4OH^- \tag{3}$$

因 Cu 的化学稳定性比 Fe 大，所以 QSn8 的 OCP 和自腐蚀电位均远大于本研究的 5 种铁碳合金，且前者的腐蚀速率仅仅是后者的 1/10～1/24，如图 4 和表 3 所示。

由图 6 可知，QSn8 试样动电位极化曲线的阳极分支对应的电流密度，远远低于 5 种铁碳合金。Hutchison 等[19-20]通过开路条件下的浸泡实验发现，QSn8 中锡元素对铜元素在腐蚀产物中的损失有双向作用，即低含量锡促进铜的溶解，高含量锡可以在铜锡合金表面生成钝化层。Debiemme-Chouvy 等[21]通过浸泡实验研究了 Cu13Sn 在 0.5 mol/L NaCl 腐蚀介质中 21 h 内形成的腐蚀产物，认为在锡青铜中由于铜会选择性溶解到腐蚀介质中，浸泡腐蚀 1 h 内会出现氧化锡富集，时间过长，会导致氧化锡层上覆盖一层氧化亚铜（CuO_2），抑制金属铜的溶解过程，所以，如图 5 所示，QSn8 的容抗弧半径和膜电阻 R_p 均远大于 5 种铁碳合金的容抗弧半径和膜电阻。

在腐蚀磨损条件下，如图 7 所示，当对磨件在试样表面开始摩擦时，QSn8 试样的 OCP 降低，进一步验证

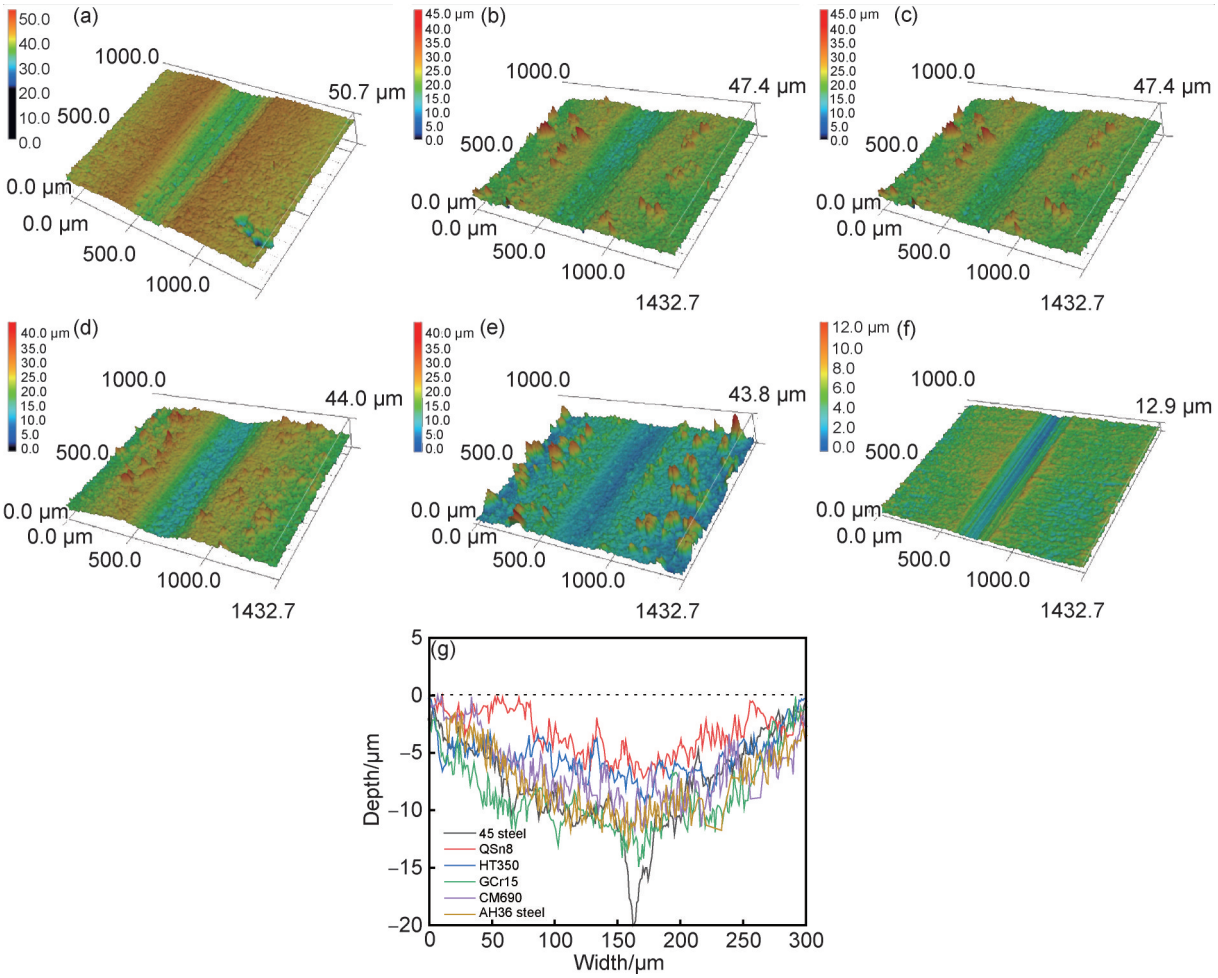


图 11　6 种试样在 NaCl 水溶液中腐蚀磨损 1 h 后激光共聚焦显微镜拍摄的磨痕 3D 形貌及轮廓图

(a)AH36 钢;(b)CM690;(c)GCr15;(d)45 钢;(e)HT350;(f)QSn8;(g)磨痕轮廓

Fig.11　3D morphology and contours of abrasion marks taken by laser confocal microscopy of six specimens after 1 h of corrosion and wear in NaCl aqueous solution

(a)AH36 steel;(b)CM690;(c)GCr15;(d)45 steel;(e)HT350;(f)QSn8;(g)abrasion contours

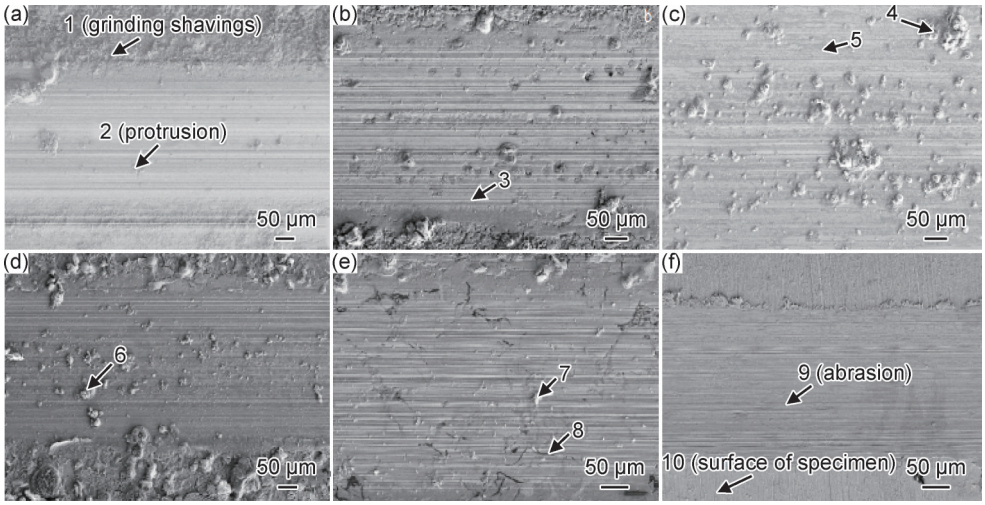


图 12　腐蚀磨损后磨痕表面 SEM 照片

(a)AH36 钢;(b)CM690;(c)GCr15;(d)45 钢;(e)HT350;(f)QSn8

Fig.12　SEM photographs of abraded surfaces after corrosive wear

(a)AH36 steel;(b)CM690;(c)GCr15;(d)45 steel;(e)HT350;(f)QSn8

表 4 图 10 所示磨痕表面 EDS 分析结果(原子分数/%)

Table 4 Results of EDS analysis of abraded surface shown in Fig.10 (atom fraction/%)

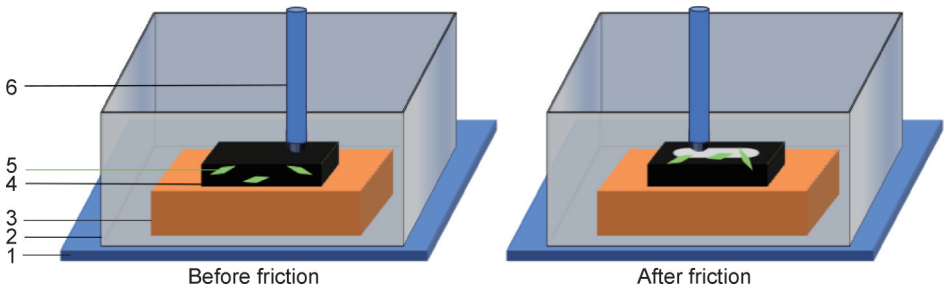
Location	Fe	O	C	Cr	Cu	Sn	Si
1	41.04	58.96					
2	58.18	41.82					
3	45.78	53.55					
4	34.21	65.79					
5	84.52	4.62		10.86			
6	31.56	68.44					
7	51.21	29.81	16.93				2.05
8*	62.59	12.80	21.45				1.92
9		18.57			77.94	2.58	
10**		8.17			85.33	5.72	

Note: * S and P are detected to be 0.61% and 0.62% respectively; **P values of 0.78% and 0.62% are detetcted

了锡青铜表面存在钝化膜,因磨痕处的钝化膜被摩擦破坏,裸露出金属基体,导致其OCP较低;当摩擦停止后,磨痕表面被再次钝化,所以OCP值又上升,恢复至接近摩擦前的电位值。而5种铁碳合金表面因为没有生成有效保护膜,所以,当摩擦开始后,OCP没有降低,而是因为磨屑被摩擦头碾压在试样表面,以及生成的磨屑,对磨痕起到一定的保护作用,OCP值均上升[22]。由于GCr15中含有能提高耐腐蚀性能1.5%的合金元素Cr,所以,如图4所示,在纯腐蚀和腐蚀磨损过程中,该试样的OCP值均略高于其他4种铁碳合金。如图7所示,腐蚀磨损后,该试样的自腐蚀电位($E_{corr\text{-}a}$=−0.651 V)也高于其他4种铁碳合金试样。

摩擦后,6种试样表面未磨损区域覆盖了一层磨屑(图12),且均富含氧元素(表4),因此推测磨屑主要是金属氧化物。因为这些金属氧化物对试样起到保护作用,所以如图9和表3所示,虽然6种试样摩擦后试样自腐蚀电位($E_{corr\text{-}a}$)比腐蚀磨损期间的低,但均比纯腐蚀条件下的高,表现出较好的耐腐蚀倾向。另外,摩擦后6种试样阳极分支的腐蚀电流密度均低于摩擦前纯腐蚀条件下的腐蚀电流密度,进一步表明,腐蚀磨损后,6种试样的耐腐蚀性能得到改善,与前文结论一致。

HT350的纯腐蚀速率最大,但其腐蚀磨损率仅次于QSn8,是其他4种铁碳合金的33%~51%,具有较好的耐腐蚀磨损性能。其原因有2个:(1)HT350的硬度较高(346.94$HV_{0.05}$),如图3所示,根据Archard磨损定理[23],材料的硬度越高,磨损率越低。(2)根据图12所示磨痕表面SEM和EDS结果可知,5种铁碳合金均发生了磨粒磨损和腐蚀磨损,但腐蚀磨损实验结束后,HT350试样磨痕表面碳含量较高,推测是HT350试样磨痕表面发生腐蚀后,金属基体被腐蚀,石墨片凸出于磨痕表面,在对磨件摩擦作用下,石墨被涂覆在磨痕表面,起到减磨和润滑的作用,其机理示意图如图13所示。所以,如图8所示,HT350试样的摩擦因数明显低于其他4种铁碳合金。



1-friction table base; 2-electrolyzer; 3-epoxy block; 4-specimen; 5-graphite flake; 6-counterbore

图13 HT350摩擦示意图

Fig. 13 Schematic diagram of HT350 friction

轴承钢虽然具有较高的硬度,并被广泛用作滚珠等零件材料,但在本工作所述模拟海水环境中,缺少润滑油保护和润滑条件下,腐蚀磨损率较高,是铸铁的3倍,摩擦因数(0.43)是本工作研究的6种材料中最高的,不适宜选作海洋环境中要求耐腐蚀磨损工况的材料。

众所周知，QSn8因具有优异的耐腐蚀、耐磨损性能而被广泛用作轴瓦、阀芯、螺旋桨等处于磨损、腐蚀、冲蚀等复杂工况的零件[24]。在本工作研究的模拟海水腐蚀＋磨损工况下，QSn8不仅具有优异的耐腐蚀性能（纯腐蚀速率 0.09 mm/a），而且虽然该锡青铜硬度较低（132.01$HV_{0.05}$），但仍具有非常低的腐蚀磨损率（3.47×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$），非常适宜加工海洋环境下要求耐腐蚀磨损的零部件。但QSn8成本较高，参考市售工业纯铜价格76000元/吨，大约是灰铸铁价格的9倍。HT350耐腐蚀磨损性能（6.28×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$）略低于QSn8，但远高于本工作研究的高强度船舶用钢AH36、锚链钢CM690、轴承钢GCr15和机械结构零件用钢45钢；另外，HT350塑性较差，抗拉强度较低（灰铸铁约252 MPa）[25]。因此，若对材料塑性和抗拉强度要求不高，考虑经济性和要求零件具有较高耐海水腐蚀和磨损时，可以选择HT350材质。当然，海洋是非常复杂的系统，影响腐蚀的因素比较多，包括氯离子（Cl^-）、溶解氧浓度、温度、海洋生物等，其中，Cl^-是导致海水腐蚀性较强的最主要因素，因此，本工作采用3.5%NaCl水溶液代替实际海水，研究了6种常用合金在该溶液中的腐蚀磨损行为。关于溶解氧含量、温度、海洋生物等因素对腐蚀磨损行为的影响，尚待后续进一步研究。

4　结论

（1）在纯腐蚀条件下，研究的6种材料中，QSn8的腐蚀速率最小（0.09 mm/a），HT350的腐蚀速率最大（2.18 mm/a），而其他4种铁碳合金试样的腐蚀速率介于两者之间，表明QSn8的耐腐蚀性能最好。

（2）磨损促进了腐蚀，在腐蚀磨损条件下，本工作研究的6种合金蚀损率由小到大依次是：QSn8＜HT350＜CM690＜AH36＜GCr15＜45钢，因铜合金QSn8具有最低的腐蚀磨损率（3.47×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$）和最小的摩擦因数（0.20），是加工海水环境下耐腐蚀磨损零部件最佳材料；HT350蚀损率仅次于QSn8，主要因为其具有较高的硬度和石墨减磨润滑作用，但也不排除碳化物等硬质相对摩擦头支撑作用和该试样良好的抗摩擦疲劳开裂性能等潜在因素。

（3）对处于海水腐蚀与磨损条件下的零件，若对塑性和抗拉强度要求不高，从考虑材料成本角度，可以考虑采用铸铁HT350代替铜合金QSn8。

参考文献

[1] 周永宽，康嘉杰，付志强，等.HVOF喷涂AlCoCrFeNi高熵合金涂层在模拟海水钻井液中的腐蚀和磨损性能研究[J].表面技术，2022，51(5)：148-157.
ZHOU Y K，KANG J J，FU Z Q，et al.Corrosion and wear properties of HVOF sprayed AlCoCrFeNi HEA coating in simulated seawater drilling fluid[J].Surface Technology，2022，51(5)：148-157.

[2] 裴兵兵，裴文乐，王建梅，等.人工海水中Q345钢的腐蚀磨损行为研究[J].润滑与密封，2025，50(5)：85-92.
PEI B B，PEI W L，WANG J M，et al.Corrosion and wear behavior of Q345 steel in artificial seawater[J].Lubrication Engineering，2025，50(5)：85-92.

[3] POSTLETHWAITE J，TINKER E B，HAWRYLAK M W.Erosion-corrosion in slurry pipelines[J].Corrosion，1974，30(8)：285-290.

[4] 陈鹏丽.“福景001”施工船遇险沉没3人获救27人落水失联[N].每日经济新闻，2022-07-04(7).
CHENG P L.“Fuk Jing 001” construction vessel sank in distress，3 people were lost in the water[N]. Daily Economic News，2022-07-04(7).

[5] 董庆，张育明，秦耀宗，等.GCr15轴承钢穿孔裂纹产生原因分析及改进措施[J].轧钢，2024，41(3)：64-68.
DONG Q，ZHANG Y M，QIN Y Z，et al.Cause analysis and improvement measures for perforation crack of GCr15 bearing steel[J].Steel Rolling，2024，41(3)：64-68.

[6] HOU X B，WANG Y X，DAI L Y，et al.Study on the corrosion and wear behaviors of cylinder liner in marine diesel engine burning low sulfur fuel oil[J]. Engineering Failure Analysis，2023，147：107151.

[7] 秦小才，王仕文，张雷.高性能气缸套材料及其热处理工艺研究[J].铸造工程，2024，48(3)：38-42.
QIN X C，WANG S W，ZHANG L.Study on high performance cylinder liner material and heat treatment process[J].Foundry Engineering，2024，48(3)：38-42.
process[J]. Casting Engineering，2024，48(3)：38-42.

[8] VUKELIC G，VIZENTIN G，IVOSEVIC S，et al.Analysis of prolonged marine exposure on properties of AH36 steel[J].Engineering Failure Analysis，2022，135：106132.

[9] 刘信，胡裕龙，迟钧瀚，等.锚链钢渗锌层在海洋环境中的腐蚀行为分析[J].材料开发与应用，2023，38(1)：23-28.
LIU X，HU Y L，CHI J H，et al.Study on corrosion behavior of zincified layer of anchor chain steel[J].Development and Application of Materials，2023，38(1)：23-28.

[10] ALTıNOK M，KURŞUNCU B，ALKAN S，et al.Effect of heat treatment and electrochemical potential on tribocorrosion behavior of high-strength low-alloy ship mooring chain steel[J]. JOM，2025，77(7)：5481-5495.

[11] HAN Y L，HAO L，WANG J Q，et al.Effect of rare earth addition on corrosion sensitivity of GCr15 bearing steel in marine environment[J].Materials Letters，2023，333：133693.

[12] 贾文哲，高红红，梁宇全，等.超声滚压对45钢抗海水腐蚀性能的影响[J].内燃机与配件，2024(4)：54-56.
JIA W Z，GAO H H，LIANG Y Q，et al.Effect of ultrasonic rolling on the corrosion resistance of 45 steel[J].Internal Combustion Engine & Parts，2024(4)：54-56.

[13] 吕凌.船用气缸套氮化层珩磨脱落问题的探讨[J].内燃机与配件,2020(23):69-70.
LYU L.Discussion on the honing and shedding of the nitride layer of marine cylinder liner[J].Internal Combustion Engine & Parts,2020(23):69-70.

[14] HUTTUNEN-SAARIVIRTA E,KILPI L,PASANEN A T,et al.Tribocorrosion behaviour of tin bronze CuSn12 under a sliding motion in NaCl containing environment:contact to inert *vs*.reactive counterbody[J].Tribology International,2020,151:106389.

[15] LANDOLT D, MISCHLER S, STEMP M. Electrochemical methods in tribocorrosion:a critical appraisal[J].Electrochimica Acta,2001,46(24/25):3913-3929.

[16] STOTT F H,BREAKELL J E.The influence of corrosion on the wear of cast iron in sulphuric acid solutions[J].Wear,1989,135(1):119-134.

[17] 朱鹏华.增材制造CoCrFeNiTi/Si高熵合金组织及性能分析[D].赣州:江西理工大学,2023.
ZHU P H.Microstructure and properties analysis of CoCrFeNiTi/Si high entropy alloy by additive manufacturing[D].Ganzhou:Jiangxi University of Science and Technology,2023.

[18] 刘微,王超会,姜娜,等.FeCoNiCrAl电沉积高熵合金镀层的耐磨损与耐腐蚀性能研究[J].现代制造技术与装备,2023(3):54-56.
LIU W,WANG C H,JIANG N,et al.Study on wear resistance and corrosion resistance of FeCoNiCrAl electrodeposited high entropy alloy coating[J].Modern Manufacturing Technology and Equipment,2023(3):54-56.

[19] HUTCHISON M J,ZHOU P,OGLE K,et al.Enhanced electrochemical Cu release from commercial Cu-Sn alloys:fate of the alloying elements in artificial perspiration[J].Electrochimica Acta,2017,241:73-88.

[20] HUTCHISON M J,SCULLY J R.Patina enrichment with SnO_2 and its effect on soluble Cu cation release and passivity of high-purity Cu-Sn bronze in artificial perspiration[J].Electrochimica Acta,2018,283:806-817.

[21] DEBIEMME-CHOUVY C, AMMELOOT F, SUTTER E M M.X-ray photoemission investigation of the corrosion film formed on a polished Cu-13Sn alloy in aerated NaCl solution[J].Applied Surface Science,2001,174(1):55-61.

[22] 董彬杰,董从林,白秀琴,等.人工海水溶液中系泊链钢的腐蚀磨损行为[J].表面技术,2022,51(5):40-48.
DONG B J,DONG C L,BAI X Q,et al.Corrosion and wear behavior of mooring chain steel in artificial seawater solution[J].Surface Technology,2022,51(5):40-48.

[23] 孙正,王勇,叶勇,等.钛合金表面激光熔覆高熵合金涂层研究进展[J].功能材料,2023,54(11):11038-11049.
SUN Z, WANG Y, YE Y, et al. Research progress of laser-cladded high entropy alloy coatings on titanium alloy surface[J].Journal of Functional Materials,2023,54(11):11038-11049.

[24] 刘近增,邢少华,钱峣,等.20#钢/锡青铜偶对在流动海水中的电偶腐蚀行为研究[J].中国腐蚀与防护学报,2023,43(1):127-134.
LIU J Z,XING S H,QIAN Y,et al.Galvanic corrosion behavior of 20# steel/tin bronze couple in flowing seawater[J].Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(1):127-134.

[25] 陈瑞润,李易励,王琪,等.Sn对超大型缸套用灰铸铁组织及力学性能的影响[J].铸造,2022,71(5):563-568.
CHEN R R,LI Y L,WANG Q,et al.Effect of Sn on microstructure and mechanical properties of gray cast iron for super large cylinder[J].Foundry,2022,71(5):563-568.

基金项目:厦门市自然科学基金资助项目(3502Z202373034);福建省自然科学基金资助项目(2023J01780);陕西省自然科学基金资助项目(2023-JC-YB-318)

收稿日期:2025-05-13;**录用日期**:2025-06-09

通讯作者:曾步辉(1973—),男,高级实验师,硕士,主要研究方向为船舶电气自动化,联系地址:福建省厦门市集美区石鼓路176号集美大学轮机工程学院(361021),E-mail:zengbuhui@126.com;王军伟(1986—),男,教授,博士,主要从事海洋、熔融盐等苛刻环境下耐腐蚀耐磨损先进合金及其涂层材料研究,联系地址:福建省厦门市集美区石鼓路176号集美大学轮机工程学院(361021),E-mail:wangjw86@163.com

(本文责编:齐书涵)