



中国有色金属学报
The Chinese Journal of Nonferrous Metals
ISSN 1004-0609, CN 43-1238/TG

《中国有色金属学报》网络首发论文

题目: 热处理对 Fe 基非晶涂层耐磨及耐腐蚀性能的影响
作者: 王海博, 李春燕, 王顺平, 李金玲, 寇生中
收稿日期: 2021-03-23
网络首发日期: 2021-08-21
引用格式: 王海博, 李春燕, 王顺平, 李金玲, 寇生中. 热处理对 Fe 基非晶涂层耐磨及耐腐蚀性能的影响. 中国有色金属学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20210820.1521.013.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



热处理对 Fe 基非晶涂层 耐磨及耐腐蚀性能的影响

王海博^{1,2}, 李春燕^{1,2}, 王顺平¹, 李金玲¹, 寇生中^{1,2}

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730000;
2. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730000)

摘要: 采用超音速火焰喷涂(HVOF)制备了 $(\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.2})_{61}\text{Cr}_9\text{Co}_6\text{Si}_{1.5}\text{B}_{17.5}\text{Nb}_5$ 非晶涂层, 探究了不同热处理温度和时间对非晶涂层的磨损性能和腐蚀性能的影响。利用 X 射线衍射仪(XRD)、同步热分析仪(DSC)、透射电子显微镜(TEM)、扫描电子显微镜(SEM)、高速往复摩擦磨损试验机、电化学工作站等仪器对组织结构及相应的性能进行检测。结果表明, 随着热处理温度和时间增加, 涂层仍保持非晶态, 涂层孔隙率降低, 涂层表面氧化磨损和剥层磨损减轻, 磨痕表面更加平整; 在人工海水溶液中有更宽的钝化区间和低的钝化电流密度(J_{pass}), 热处理后的非晶涂层耐磨、耐腐蚀性能得到改善提升。当涂层在 480 °C 热处理 1110 min 时, 涂层出现 FeNi_3 纳米晶体相, 涂层有最低孔隙率为 0.6%, 磨损率为 $1.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$, 且涂层有最低的自腐蚀电流密度(J_{corr}) $4.591 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 。

关键词: 非晶涂层; 热处理; 磨损性能; 腐蚀性能

中图分类号: TG139+8

文献标志码: A

引文格式: 王海博, 李春燕, 王顺平, 等. 热处理对 Fe 基非晶涂层耐磨及耐腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37952

WANG Hai-bo, LI Chun-yan, WANG Shun-ping, et al. Effect of heat-treated on wear resistance and corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37952

非晶合金, 也称金属玻璃(MG), 其原子排列具有长程无序、短程有序的结构特征。由于非晶合金内部在三维空间呈拓扑无序状态, 不存在成分偏析、夹杂物和第二相等晶体缺陷, 具有比常规晶体更致密的无序堆积结构。因此具有一些明显优于晶态材料的力学、物理及化学性能, 例如高强度、高硬度、优异的耐磨、耐腐蚀性能及磁学性能, 已成为备受人们关注的新一代合金材料^[1-5]。同时, 非晶合金在电子技术、纳米技术、医用卫生领域及航空航天和海洋防腐领域具有广阔的应用前景。

其中 Fe 基非晶合金由于具有低成本、高强度、高硬度和优异的耐磨、耐腐蚀性能等优势作为材料

科研工作者的重点研究工作之一^[6-8]。而将 Fe 基非晶粉末制备成涂层, 对延长工业生产设备的使用寿命、提高海洋工程领域制造装备的耐磨、耐腐蚀性能等提供了可行的方法。超音速火焰喷涂(HVOF)作为热喷涂技术的一种, 于上世纪 80 年代兴起, 多被用来制备防腐、耐磨合金涂层, 因其在喷涂时提高熔滴射流速度的同时, 也降低了原料颗粒由于过热引起的氧化等问题, 所以制备的涂层孔隙率较低, 涂层质量高^[9-10]。非晶合金的形成条件要求冷却速率要达到 10^5 K/s 以上, 而 HVOF 的冷却速率可以达到 10^7 K/s 左右, 这足以满足非晶合金成形的冷却速度。因此, HVOF 作为制备 Fe 基非晶涂

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51861021, 51661016); 兰州理工大学红柳一流学科建设计划项目

收稿日期: 2021-03-23; **修订日期:** 2021-07-14

通信作者: 李春燕, 教授, 博士; 电话: 13669306976; E-mail: licywz@163.com

层优良技术之一,为 Fe 基非晶合金走向工业化和商业化提供了更有利的条件^[11-12]。随着 HVOF 制备 Fe 基非晶涂层技术的不断成熟,人们对制备高性能的 Fe 基非晶涂层提出了更高要求。研究者发现在 Fe 基非晶粉末中混入第二相颗粒可以改善涂层的性能,如非晶粉末中混入 WC 或 Al₂O₃ 颗粒可提高非晶涂层的耐腐蚀性能^[13-14];添加 B₄C 颗粒可以提高非晶涂层的断裂韧性和耐磨性能^[15];加入 316L SS 颗粒可提高涂层的结合强度^[16]。而不同的增强颗粒对 Fe 基非晶涂层的性能影响是不同的,如 316L SS 颗粒虽能增加 Fe 基非晶涂层的结合强度,但由于 316L SS 颗粒在热喷涂过程中具有强烈的氧化倾向,在 316L SS 相/基体界面形成了 Fe₃O₄ 纳米粒子,这些 Fe₃O₄ 纳米粒子成为涂层高电化学活性的原因,而使得涂层耐腐蚀性能下降。除了添加第二相颗粒增强的方法,热处理和低温循环处理的方式同样可以提高 Fe 基非晶涂层的性能^[17-19]。上述方法均能改善 Fe 基非晶涂层的性能,而通过热处理改善 Fe 基非晶涂层的方法虽已有一定的研究,但该方法对非晶涂层的结构演变及耐磨耐腐蚀性能的影响还有待进一步探索。

本实验采用 HVOF 制备 Fe 基非晶涂层,分析不同热处理温度和时间对非晶涂层的结构演变及耐磨、耐腐蚀性能的影响,为热处理对 Fe 基非晶涂层的性能的影响提供更多的理论研究依据。

1 实验

利用真空气雾化法制备粒径为 18~48 μm 的 (Fe_{0.5}Ni_{0.2})₆₁Cr₉Co₆Si_{1.5}B_{17.5}Nb₅ 非晶粉末。采用郑州立佳 HV-80-JP 超音速火焰喷涂(HVOF)设备在尺寸为 45 mm×500 mm×10 mm A32 船体用钢表面制备 Fe 基非晶涂层,所制备的非晶涂层厚度约为 650±30 μm。具体的喷涂工艺参数为:氧气流量为 53 m³/h,煤油流量为 22 L/h,送粉速率为 22 g/min,喷涂速率为 400 mm/s。非晶涂层热处理设备选用天津中环管式炉,为避免热处理过程中涂层出现氧化,在管式炉中通入氩气保护。热处理温度及保温时间根据等温差示扫描量热(DSC)实验结果确定。

采用德国林赛斯 STA PT1000 同步热分析仪对非晶涂层进行等温 DSC 和升温 DSC 分析,升温速率分别为 0.83 和 0.33 °C/min,涂层质量小于 10 mg。

通过升温 DSC 确定涂层的过冷液相区($\Delta T_x = T_x - T_g$; T_x : 晶化温度; T_g : 玻璃转化温度)。使用 D/max-2400 X 射线衍射仪(XRD)对非晶涂层进行物相结构分析, XRD 射线源为铜靶 K α , 扫描速度为 2 (°)/min, 步长为 0.01°, 扫描范围 20°~80°。采用 FEI TF200X 透射电子显微镜(TEM)观察非晶涂层的亚显微结构,非晶涂层样品采用砂纸水磨至厚度为 80 μm,将其冲成直径为 3 mm 的薄片,再采用离子减薄进行精确减薄。显微硬度采用 HV-1000 显微硬度仪,对非晶涂层侧面进行显微硬度测试,显微硬度仪施加载荷为 200 g,保载时间为 15 s。非晶涂层磨损性能采用 MFT-R4000 室温高速往复摩擦磨损试验机在干摩擦条件下测试,使用直径 6 mm 的 GCr15 钢球作为对磨件,非晶涂层表面用砂纸打磨,以保证摩擦磨损实验涂层表面具有同一粗糙度($R_a = 0.36 \mu\text{m}$),滑动行程为 5 mm,滑动速度为 25 mm/s,滑动时间为 30 min,施加载荷为 10 N。腐蚀性能测试采用上海华晨 HC-600e 电化学工作站,铂片电极作为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极,测试样品作为工作电极。样品在室温下 100 mL 人工海水^[20](24.53 g/L NaCl, 5.20 g/L MgCl₂, 4.09 g/L Na₂SO₄, 1.16 g/L CaCl₂, 0.695 g/L KCl, 0.201 g/L NaHCO₃, 0.101 g/L KBr, 0.027 g/L H₃BO₃, 0.025 g/L SrCl₂, 0.003 g/L NaF, PH=8.2)溶液中进行测试。将样品在人工海水溶液中浸泡 30 min,待开路电位稳定后开始实验,动态极化曲线以 0.005 V/s 的固定速率扫描。涂层侧面形貌及磨损后磨痕形貌采用 FEI Quanta 450 FEG 扫描电子显微镜(SEM)和 LSM 800 激光共聚焦光学显微镜(OM)进行观察。孔隙率测试采用 Image J 软件,为保证孔隙率测试结果的准确性,每个样品测试三次,取平均值。采用美国 KLA-Tencor 公司生产的非接触式光学轮廓仪检测计算摩擦磨损后的磨损体积,进而得出磨损率(Q)。

2 结果与讨论

2.1 非晶涂层热处理温度的选择

在非晶涂层的过冷液相区 ΔT_x (447.2~505.6 °C, 见图 1 插图)及以下选取 440、460 和 480 °C 3 个温度进行等温 DSC 实验,为保证升温时间对保温时非晶合金晶化放热影响较小,采取快速升温(0.83 °C/s)到 440、460 和 480 °C 进行保温。结果如

图 1 所示, 非晶涂层在 440、460 和 480 °C 保温 60 min 均没有观察到放热晶化现象。为探究不同温度及保温时间对非晶涂层的结构及性能影响, 所以本实验选取热处理温度及保温时间为 440 °C 保温 20、40 和 60 min, 460 °C 保温 20、40 和 60 min, 480 °C 保温 20、40 和 60 min 和 480 °C 更长的保温时间, 进一步通过控制保温时间来实现调控涂层的晶化程度。

2.2 非晶涂层热处理后组织结构

图 2 所示为非晶涂层在 440、460 和 480 °C 热处理保温不同时间的 XRD 谱, 非晶涂层分别保温 20、40 和 60 min 时均没有尖锐的晶体峰存在, 均为宽化的非晶漫散峰, 涂层仍保持非晶态(见图 2(a)~(c))。为进一步探究热处理时间对非晶涂层晶化程度的影响, 对涂层进行 480 °C, 保温 90~1110 min

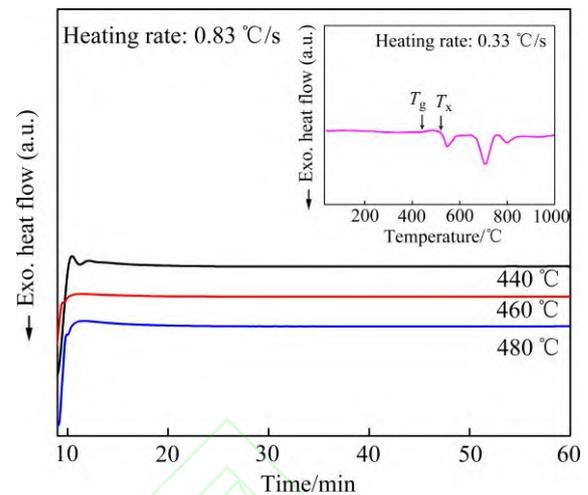


图 1 非晶涂层不同温度等温 DSC 曲线及未处理原始非晶涂层升温 DSC 曲线(插图)

Fig. 1 Isothermal DSC curve of amorphous coating at different temperatures and DSC cure of original amorphous coating (inset)

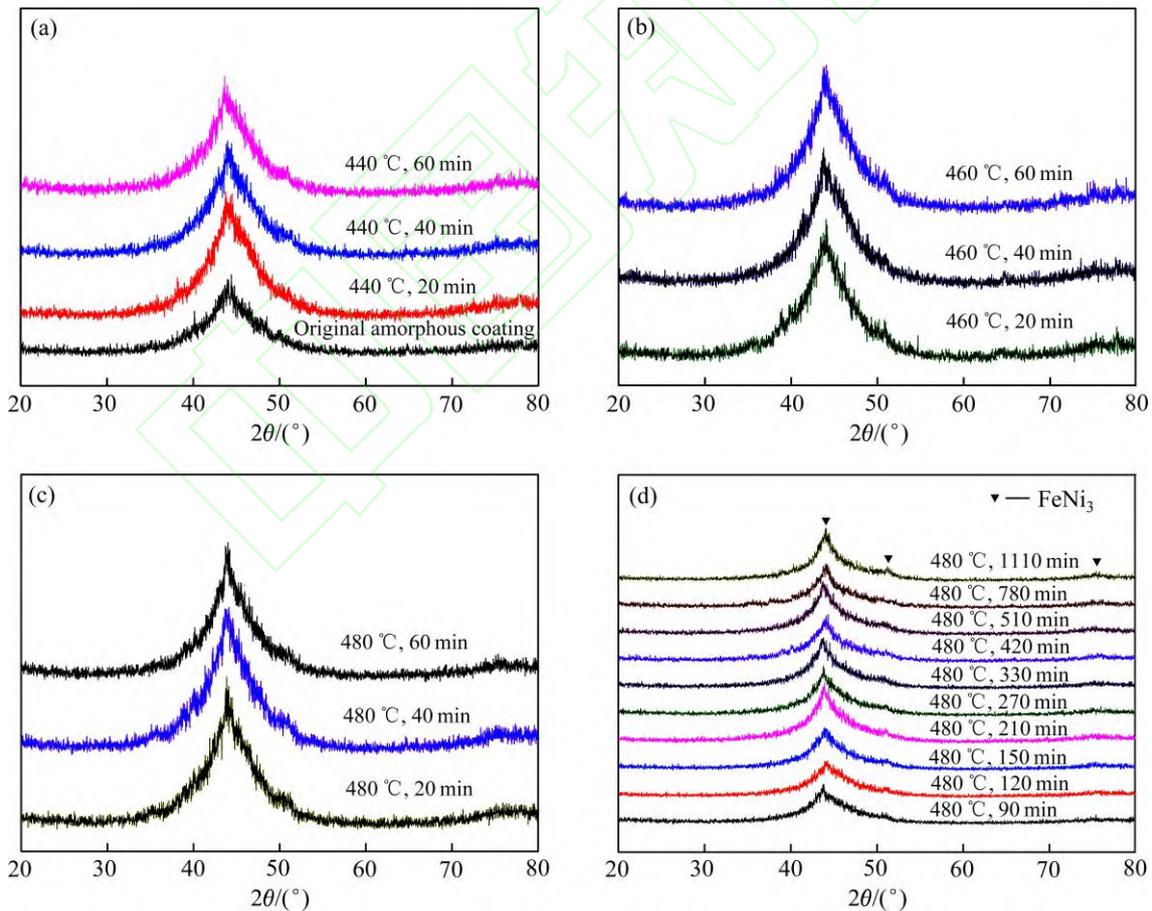


图 2 XRD 衍射图谱: (a)未处理的原始非晶涂层和非晶涂层 440 °C 热处理保温 20、40 和 60 min; (b)非晶涂层 460 °C 热处理保温 20、40 和 60 min; (c)非晶涂层 480 °C 热处理保温 20、40 和 60 min; (d)非晶涂层 480 °C 热处理保温 90~1110 min

Fig. 2 XRD patterns: (a) original amorphous coating and heat-treated at 440 °C for 20, 40 and 60 min; (b) heat-treated at 460 °C for 20, 40 and 60 min; (c) heat-treated at 480 °C for 20, 40 and 60 min; (d) heat-treated at 480 °C for 90–1110 min

min 的热处理,发现在 1110 min 时, XRD 衍射图谱中出现强度较弱的晶体峰,为 FeNi_3 相(见图 1(d))。这也表明该非晶涂层具有较好的非晶结构稳定性,在一定的低温条件(低于 T_x)下可长时间使用仍可保持非晶态。

为了进一步了解非晶涂层在 480 °C 热处理保温 1110 min 的微观结构,采用 TEM 对其进行了形貌观察(见图 3)。图 3(a)可以看出,非晶涂层明场像为灰色均一衬度,并未发现晶体结构,但涂层的选区电子衍射(SAED)花样出现了少量明锐的衍射斑点(见图 3(a)插图)。图 3(b)为对应的高分辨透射电子显微(HRTEM)照片,可观察到一些纳米级晶体相出现,其相应的晶面间距分别为 2.02 Å 和 1.71 Å,通过与标准 PDF 卡片数据比对,发现其与 FeNi_3 在 [111](标准晶面间距 2.04 Å)和 [200](标准晶面间距 1.77 Å)数值相匹配,与 XRD 衍射图谱分析相一致。

图 4(a)~(c)所示为非晶涂层在 440、460 和 480 °C 热处理保温 60 min 的截面 OM 形貌图,涂层截面致密且与基体结合紧密,没有出现微裂纹,随着热处理温度的升高,涂层孔隙率降低,经 440、460 和 480 °C 热处理涂层的孔隙率分别约为 0.8%、0.7% 和 0.7%,均低于原始未处理的非晶涂层(0.9%)。当涂层在 440 °C 热处理保温 20、40 和 60 min,涂层的孔隙率基本没有变化,均为 0.8% 左右;460 和 480 °C 热处理不同保温时间孔隙率也均基本没有变化。而涂层在 480 °C 热处理 1110 min 时,涂层的孔隙率再次降低,约为 0.6%(见图 4(d))。这是由于随着热处理时间的增加,非晶涂层内部原子随着时间发生缓慢的变化,逐渐向稳定原子排列方式转变,而这些原子缓慢发生固态扩散进行重新排序时将淹没涂层中孔隙,导致涂层孔隙率降低,变得更致密^[21]。

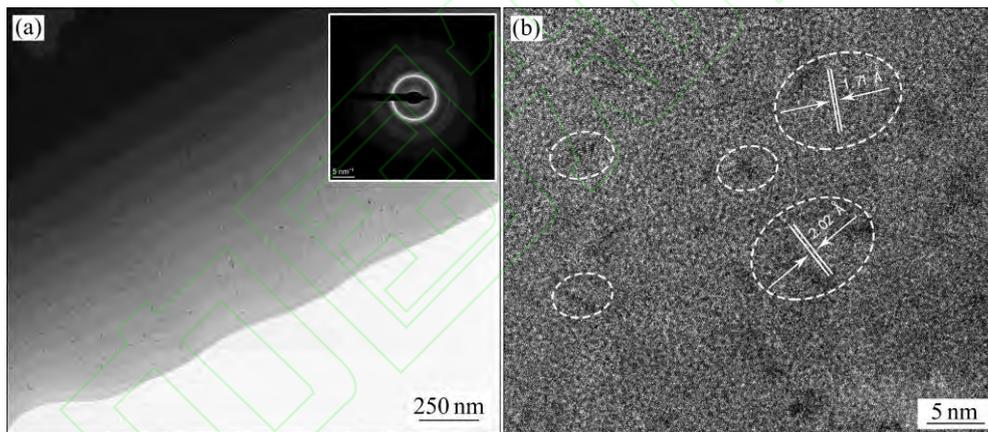


图 3 非晶涂层在 480 °C 热处理保温 1110 min TEM 像

Fig. 3 TEM image of amorphous coating heat-treated at 480 °C for 1110 min: (a) Morphology and SAED of amorphous coating; (b) HRTEM morphology of amorphous coating

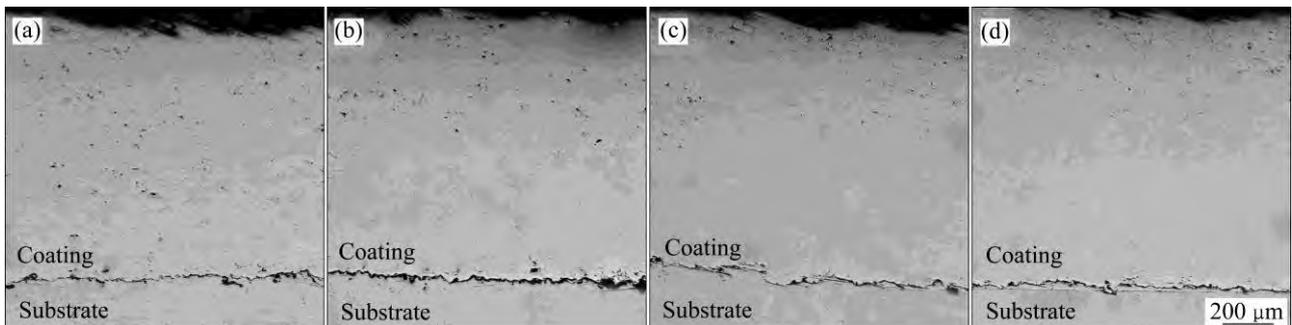


图 4 非晶涂层在不同热处理温度和保温时间的截面 OM 图片

Fig. 4 Cross-section SEM image of different heat-treated temperatures and holding times: (a) Heat-treated at 440 °C for 60 min; (b) Heat-treated at 460 °C for 60 min; (c) Heat-treated at 480 °C for 60 min; (d) Heat-treated at 480 °C for 1110 min

2.3 非晶涂层热处理后显微硬度

图 5 所示为非晶涂层在 440、460 和 480 °C 分别热处理 20、40、60 和 1110 min 的涂层截面显微硬度分布柱状图。从图中可以看出, 随着热处理温度和保温时间的增加, 涂层孔隙率减少, 变得更致密, 涂层显微硬度有上升的趋势, 均高于未热处理的原始非晶涂层的平均值(653.4 HV_{0.2})。当热处理温度为 480 °C 保温 1110 min, 非晶涂层内出现 FeNi₃ 纳米晶体相, 弥散的分布在非晶基体中, 涂层抵抗塑性变形能力增强, 此时涂层有最大的显微硬度, 显微硬度平均值为 931.7 HV_{0.2}。

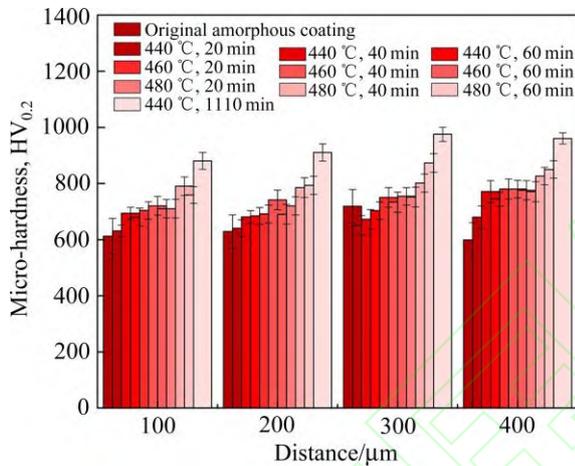


图 5 非晶涂层热处理截面显微硬度分布柱状图

Fig. 5 Cross-section micro-hardness distribution histogram of heat-treated amorphous coating

2.4 非晶涂层热处理后磨损行为

图 6(a)~(j)所示为非晶涂层在施加载荷为 10 N 不同温度热处理和保温时间的磨痕 SEM 像, 热处理后的涂层表面磨痕存在剥落坑(图中蓝色箭头)和氧化黏附层(图中红色箭头), 磨损机制与未处理的原始非晶涂层一样仍为氧化磨损和剥层磨损, 但磨损程度显著减轻。如图 6(a)~(c)为 440 °C 热处理分别保温 20、40 和 60 min, 随着热处理保温时间的增加, 磨痕表面更加光滑, 剥落坑减少, 这表明随着热处理的时间增加, 涂层表面磨损逐渐减弱, 且随着热处理温度的增加, 这种现象更明显。当热处理温度为 460(见图 6(d)~(f))和 480 °C(见图 6(g)~(i))分别保温 20、40 和 60 min 时, 涂层磨痕表面剥落坑和氧化黏着层明显减少, 涂层热处理温度为 480 °C 保温 60 min 时, 涂层磨痕表面相对光滑, 仅

存在少量的剥落坑和氧化黏着层。这是由于非晶涂层在低于 T_x 温度进行热处理, 涂层内原子扩散重排将淹没孔隙, 降低涂层孔隙率, 涂层变得更致密, 剥落坑的诱因减少, 涂层的耐磨性能改善^[22]。

图 6(j)、(k)所示为 480 °C 热处理保温 1110 min 非晶涂层磨痕形貌和磨痕三维形貌图, 涂层磨痕表面平整, 剥落和氧化均较少。这是由于该温度下热处理的非晶涂层, 结构致密、孔隙率下降, 且非晶基体内存在弥散分布的 FeNi₃ 纳米晶体相, 这些纳米晶体相在一定程度上可以起到弥散强化的作用, 在磨损过程中, 可阻止材料去除, 提高了非晶涂层的耐磨性^[23-24]。此外, 也有大量研究表明, 材料表面硬度的提高有利于提高涂层的耐磨性^[25-26]。通过磨损率公式 $Q=V_m/(SL)$ ^[27], 其中 V_m 是磨损体积 (mm^3), S 是滑动距离(m), L 为施加载荷(N), 非晶涂层在 480 °C 热处理保温 1110 min 的磨损率为 $1.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$, 磨损率低于未处理的原始非晶涂层($4.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$)。

2.5 非晶涂层热处理后腐蚀行为

图 7 所示为非晶涂层在人工海水溶液中, 440、460 和 480 °C 热处理保温 20、40、60 和 1110 min 的动电位极化曲线图。从图中可以看出, 热处理后非晶涂层的自腐蚀电位(ϕ_{corr})均在 -0.25 V 左右, 与未处理的原始非晶涂层 ϕ_{corr} 基本一致, 但相比原始未处理的非晶涂层, 经过热处理后的非晶涂层自腐蚀电流密度(J_{corr})有所降低。在同一热处理温度, 不同热处理时间, 如图 7(a), 可以看出随着非晶涂层热处理时间的增加, 涂层的 J_{corr} 略有降低。但在同一时间, 不同温度的热处理, 如图 7(a)~(c), 非晶涂层分别在 440、460 和 480 °C 热处理 60 min, J_{corr} 分别为 1.041×10^{-7} 、 9.082×10^{-8} 和 $7.794 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, 随着热处理温度的增加, 涂层的 J_{corr} 也呈现降低的趋势, 当涂层在 480 °C 热处理保温 1110 min 时, 涂层有最低的 J_{corr} , 为 $4.591 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 。这是由于热处理降低了涂层的孔隙率, 使非晶涂层更致密, 减少了腐蚀介质通过孔隙与涂层内部进一步接触, 减缓涂层内部腐蚀, 提高涂层的耐腐蚀性能。

经过热处理后的涂层均存在稳定的钝化区间和低的钝化电流密度(J_{pass})。从图 7(c)中 480 °C 热处理保温 1110 min 的动电位极化曲线可以看出, 该保

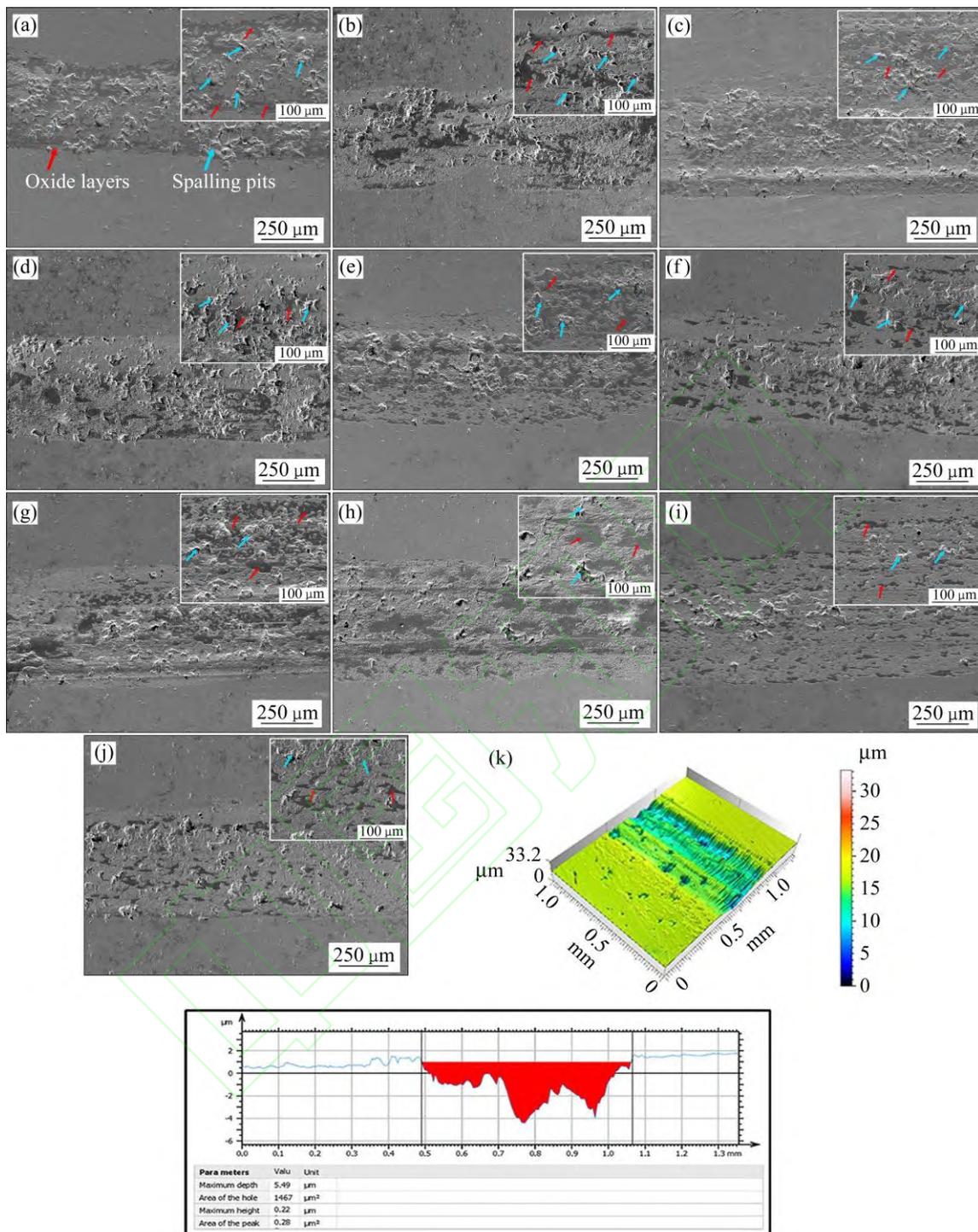


图 6 施加载荷为 10 N 的不同热处理温度和保温时间的非晶涂层磨痕 SEM 形貌和磨痕表面三维形貌

Fig. 6 SEM wear scar morphology of amorphous coating with different heat-treated temperatures and holding times under the applied load of 10 N and three-dimensional surface morphology of wear scar: (a)–(c) Heat-treated at 440 °C for 20, 40 and 60 min; (d)–(f) Heat-treated at 460 °C for 20, 40 and 60 min; (g)–(i) Heat-treated at 480 °C for 20, 40 and 60 min; (j)–(k) Wear scar morphology and three-dimensional surface morphology of heat-treated at 480 °C for 1110 min

温时间下，涂层有最宽的钝化区间和低的 J_{pass} 。这是由于该保温时间下涂层存在 FeNi_3 纳米晶体相，已有研究表明，添加 Ni 元素对提高 Fe 基非晶合金

的耐腐蚀性非常有效^[28–29]。因此，热处理使涂层形成的纳米晶体相，这些纳米晶体相富含 Ni 元素，比基体非晶相具有更好的耐蚀性，使涂层在人工海

水溶液中的耐腐蚀性能提高。

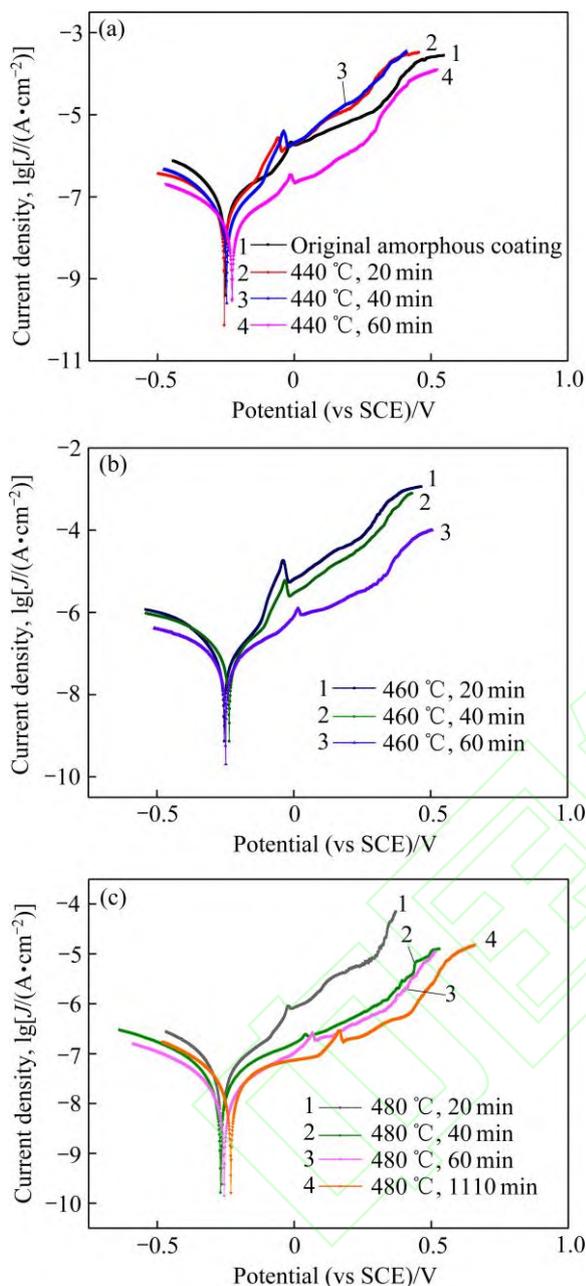


图7 非晶涂层在人工海水溶液中动电位极化曲线图

Fig. 7 Potentiodynamic polarization curves of amorphous coating in artificial seawater solution: (a) Original amorphous coating and heat-treated at 440 °C for 20, 40 and 60 min; (b) Heat-treated at 460 °C for 20, 40 and 60 min; (c) Heat-treated at 480 °C for 20, 40, 60 and 1110 min

5 结论

本实验对 $(\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.2})_{61}\text{Cr}_9\text{Co}_6\text{Si}_{1.5}\text{B}_{17.5}\text{Nb}_5$ 非晶涂层进行了 440、460 和 480 °C 热处理分别保温 20、40 和 60 min 和 480 °C 热处理保温 90~1110 min, 研

究了不同热处理温度和时间对非晶涂层的结构及性能的影响, 并对热处理后的涂层结构及耐磨、耐腐蚀性能等进行了检测, 得到以下结论:

1) 非晶涂层在 440、460 和 480 °C 热处理保温 20、40 和 60 min 均为非晶态, 但当热处理温度为 480 °C 保温 1110 min 时, 涂层晶化, 生成 FeNi_3 纳米晶相。

2) 非晶涂层随着热处理温度 and 时间的增加, 涂层变得致密, 孔隙率降低, 显微硬度升高, 均优于未处理的原始非晶涂层。涂层在 480 °C 热处理保温 1110 min 有最小的孔隙率, 为 0.6%, 此时显微硬度有最大值, 为 931.7 $\text{HV}_{0.2}$ 。

3) 随着热处理温度 and 时间的增加, 非晶涂层的耐磨性能有明显改善, 磨痕表面更平整, 剥落坑和氧化黏着层均减少, 磨损机制仍为氧化磨损和剥落磨损, 但要比未处理的原始非晶涂层磨损程度显著减弱, 当热处理温度为 480 °C 保温 1110 min 时, 涂层的磨损率为 $1.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。

4) 随着热处理温度 and 时间的增加, 非晶涂层在人工海水溶液中 ϕ_{corr} 均在 -0.25 V 左右, J_{corr} 下降, 均低于未处理的原始非晶涂层, 当热处理温度为 480 °C 保温 1110 min, 涂层有较低的 J_{corr} , 为 $4.591 \times 10^{-8} \text{ A cm}^{-2}$ 。且热处理后的非晶涂层均表现出宽的钝化区间和低的 J_{pass} 。

REFERENCES

- [1] 惠希东, 陈国良. 块体非晶合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
HUI Xi-dong, CHEN Guo-liang. Bulk amorphous alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [2] WANG W H, DONG C, SHEK C H. Bulk metallic glasses[J]. 2004, 44(2/3): 45–89.
- [3] JOHNSON W L. Bulk glass-forming metallic alloys: Science and technology[J]. MRS Bulletin, 1999, 24(10): 42–56.
- [4] AXINTE E. Metallic glasses from “alchemy” to pure science: Present and future of design, processing and applications of glassy metals[J]. Materials & Design, 2012, 35: 518–556.
- [5] QIAO J C, WANG Q, PELLETIER J M, et al. Structural heterogeneities and mechanical behavior of amorphous alloys[J]. Progress in Materials Science, 2019, 104:

- 250–349.
- [6] AXINTE E, CHIRILEANU M I. Recent progress in the industrialization of metallic glasses[J]. *Recent Patents on Materials Science*, 2012, 5(3): 213–221.
- [7] WANG L, WANG J Q, SUN M. Mechanical properties of Fe-based bulk amorphous Fe₄₁Co₇Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂ alloy rods[J]. *Chemical Physics Letters*, 2020, 750: 137511.
- [8] SI J J, WU Y D, WANG T, et al. Composition-controlled active-passive transition and corrosion behavior of Fe-Cr(Mo)-Zr-B bulk amorphous steels[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 445: 496–504.
- [9] BRANAGAN D J, S WANK W D, HAGGARD D C, et al. Wear-resistant amorphous and nanocomposite steel coatings[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32(10): 2615–2621.
- [10] QIN Y J, WU Y P, ZHANG J F, et al. Long-term corrosion behavior of HVOF sprayed FeCrSiBMn amorphous/nanocrystalline coating[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(4): 1144–1150.
- [11] WANG S L, CHENG J C, YI S H, et al. Corrosion resistance of Fe-based amorphous metallic matrix coating fabricated by HVOF thermal spraying[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(1): 146–151.
- [12] HUANG B, ZHANG C, ZHANG G, et al. Wear and corrosion resistant performance of thermal-sprayed Fe-based amorphous coatings: A review[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 377: 124896.
- [13] WANG G, XING C, TAO F, et al. Enhancement in the corrosion resistance of WC coatings by adding a Fe-based alloy in simulated seawater[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 305: 62–66.
- [14] YASIR M, ZHANG C, WANG W, et al. Tribocorrosion behavior of Fe-based amorphous composite coating reinforced by Al₂O₃ in 3.5% NaCl solution[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(8): 1–7.
- [15] MOVAHEDI B. On the prospects of using nanoindentation and wear test to study the mechanical behavior of Fe-based metallic glass coating reinforced by B₄C nanoparticles[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48(3): 1474–1483.
- [16] ZHOU H, ZHANG C, WANG W, et al. Microstructure and mechanical properties of Fe-based amorphous composite coatings reinforced by stainless steel powders[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2015, 31(1): 43–47.
- [17] ZHAI H M, LI X Q, LI W S, et al. Strategy for improving the wear-resistance properties of detonation sprayed Fe-based amorphous coatings by cryogenic cycling treatment[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2021, 410: 126962.
- [18] KANG Y H, CHEN Y M, WEN Y X, et al. Effects of structural relaxation and crystallization on the corrosion resistance of an Fe-based amorphous coating[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2020, 550: 120378.
- [19] LI C Y, WANG H B, DING J Q, et al. Effects of heat treatment on HVOF-sprayed Fe-based amorphous coatings[J]. *Surface Engineering*, 2020: 1–9.
- [20] CHEN J, WANG J Z, CHEN B, et al. Tribocorrosion behaviors of Inconel 625 alloy sliding against 316 Steel in seawater[J]. *Tribology Transactions*, 2011, 54(4): 514–522.
- [21] 傅斌友. 含非晶涂层制备及其晶化规律研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- FU Bin-you. A study of crystallization behavior of amorphous containing coatings[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
- [22] 吴亿璇, 罗强, 焦津, 等. 热处理对Fe基非晶涂层结构与性能的影响[J]. *金属功能材料*, 2016, 23(1): 12–16.
- WU Yi-xuan, LUO Qiang, JIAO Jin, et al. Effect of heat treatment on the structure and properties of Fe-based amorphous coatings[J]. *Metallic Functional Materials*, 2016, 23(1): 12–16.
- [23] 樊自拴, 潘继岗, 孙冬柏, 等. 热处理对铁基非晶合金涂层相组成及磨损性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2008, 29(1): 120–123.
- FAN Zi-shuan, PAN Ji-gang, SUN Dong-bai, et al. Influence of heat treatment on phase structure and wear characteristics of iron base amorphous alloy coatings[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, 29(1): 120–123.
- [24] 程江波, 梁秀兵, 徐滨士, 等. 铁基非晶纳米晶涂层组织及磨损性能研究[J]. *材料工程*, 2009(5): 17–21.
- CHENG Jiang-bo, LIANG Xiu-bing, XU Bin-shi, et al. Microstructure and wear properties of Fe-based amorphous/nanocrystalline Coatings[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009(5): 17–21.
- [25] MA H R, LI J W, JIAO J, et al. Wear resistance of Fe-based amorphous coatings prepared by AC-HVAF and HVOF[J]. *Materials Science and Technology*, 2016, 33(1): 65–71.
- [26] TSOTSOS C, YEROKHIN A L, WILSON A D, et al.

- Tribological evaluation of AISI 304 stainless steel duplex treated by plasma electrolytic nitrocarburising and diamond-like carbon coating[J]. *Wear*, 2002, 253(9/10): 986–993.
- [27] GREER A L, RUTHERFORD K L, HUTCHINGS I M. Wear resistance of amorphous alloys and related materials[J]. *International Materials Reviews*, 2002, 47(2): 87–112.
- [28] CHANG C T, DING Y H, SHAO Y, et al. Corrosion behavior of Fe-based ferromagnetic (Fe, Ni)-B-Si-Nb bulk glassy alloys in aqueous electrolytes[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354(40/41): 4609–4613.
- [29] HASHIMOTO K, NAKA M, MASUMOTO T. Effect of nickel addition on corrosion resistance of amorphous iron base alloys[J]. *Science Reports of the Research Institutes Tohoku University. Ser. A, Physics, Chemistry and Metallurgy*, 1976, 26(1): 48–54.

Effect of heat-treated on wear resistance and corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings

WANG Hai-bo^{1,2}, LI Chun-yan^{1,2}, WANG Shun-ping², LI Jin-ling², KOU Sheng-zhong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The amorphous coating with composition of $(\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.2})_{61}\text{Cr}_9\text{Co}_6\text{Si}_{1.5}\text{B}_{17.5}\text{Nb}_5$ was prepared by high velocity oxy fuel (HVOF), and the effects of different heat-treated temperatures and times for the structure, wear and corrosion properties were explored. The structure corresponding property was analyzed by X-ray diffractometer (XRD), differential scanning calorimetry (DSC), transmission electron microscope (TEM), scanning electron microscope (SEM), wear test machine, electrochemical workstation etc. The results show that with the heat-treated temperatures increasing, the coatings remain amorphous structure, the porosity of the coatings decrease, the oxidation wear and delamination wear of the coatings surface reduce, and the wear scar surface of coatings smooth. The heat-treated amorphous coatings exhibit a wider passive region and low passive current density (J_{pass}) in the artificial seawater solution, and the wear resistance and corrosion resistance of the amorphous coatings have been improved. The FeNi_3 nanocrystalline phase appears in the amorphous coating with heat-treated temperature of 480 °C for 1110 min. The coating has the lowest porosity of 0.6%, wear rate of $1.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$, and the lowest self-corroding current density (J_{corr}) of $4.591 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.

Key words: amorphous coating; heat-treated; wear resistance; corrosion resistance

Foundation item: Projects(51861021, 51661016) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project supported by the Hongliu First-class Discipline Construction Plan of Lanzhou University of Technology

Received date: 2021-03-23; **Accepted date:** 2021-07-14

Corresponding author: LI Chun-yan; Tel: +86-13669306976; E-mail: licywz@163.com