

QPQ处理对27SiMn合金钢堆焊镍铝青铜合金涂层组织与性能的影响

宿友亮¹ 崔昊¹ 郜雪楠¹ 郑浩博^{2†}

(1. 宁夏大学机械工程学院, 宁夏银川750021; 2. 宁夏大学化学化工学院, 宁夏银川750021)

摘要: 针对淬火-抛光-淬火(QPQ)处理对27SiMn合金钢堆焊的镍铝青铜合金涂层性能影响不明确的问题, 该文开展了铜合金涂层的几何特征、组织变化、耐腐蚀性能和硬度检测等的研究, 探讨QPQ处理工艺对铜合金涂层组织与性能的影响, 以验证该复合防腐工艺的合理性和可行性。结果表明: 碳/氮化与氧化两道工序后, 铜合金涂层形成了一种双层结构的渗层, 其中金属碳化物跨越双层结构分布, 铜的氧化物只在近表层分布, 起防腐作用; QPQ处理前后的堆焊铜合金组织均有基体相 α 、亚稳定相 β' , 以及分散于 α 相中的多种 κ 相; 高、中温回火作用, 致使 β' 相大量析出 α 相, 基体相融合增大, 整体硬度下降; 铜合金堆焊层试样表面的耐腐蚀性保护评级为9级, 铜合金堆焊层QPQ处理试样表面的耐腐蚀性保护评级为10级, QPQ处理后的铜合金表面的耐腐蚀性并未降低, 反而超过了未经处理前的情况。该复合防腐技术在提升缸筒内壁耐腐蚀性的同时, 又兼顾接头孔等其他部位及缸体外表面的耐腐蚀性, 可应用于此类缸筒零部件的维修再制造。

关键词: 淬火-抛光-淬火处理; 表面熔铜; 复合涂层; 立柱油缸; 防腐

中图分类号: TG178

文章编号: 1000-565X(2025)03-0105-11

液压支架是煤矿综采中的核心支护设备, 其可靠服役是确保井下长期安全作业的关键^[1]。立柱油缸是液压支架的主要承载部件, 粉尘、多介质腐蚀环境极易导致立柱油缸核心部件的腐蚀、磨蚀, 进而导致油缸泄压、泄漏, 严重威胁矿井安全, 立柱油缸成为液压支架装备服役中的易耗部件^[2]。目前, 为确保矿井安全, 避免计划外停产, 往往会定检排查, 对出现泄压、漏液等异常情况的立柱油缸进行批量更换。因此, 废旧立柱油缸服役能力的

快速恢复, 成为煤矿综采提质增效的关键技术亟需^[3]。

立柱油缸外缸体返修中, 企业根据油缸的缸筒内孔表面磨损和损伤深度情况来确定外缸体的修复工艺。当缸筒内孔表面损伤深度在设计公差范围(深度 <0.25 mm)时, 缸筒内孔修复以珩磨为主^[4]; 当表面损伤超出设计允许公差时, 被切除的缸体损伤层较厚, 导致缸体内孔尺寸超出了活塞与缸体的配合公差, 必须先通过激光熔覆、堆焊和旋压不锈

收稿日期: 2024-05-21

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BSB03096)

Foundation item: Supported by the Key R & D Program of Ningxia Hui Autonomous Region (2022BSB03096)

作者简介: 宿友亮(1987—), 男, 博士, 教授, 主要从事在位修复技术、表面强化与近净成形技术研究。E-mail: suy1@nxu.edu.cn

†通信作者: 郑浩博(1989—), 男, 博士生, 副教授, 主要从事无机及有机聚合物材料的制备及应用研究。E-mail: haobo-zheng@163.com

钢套等技术在缸体内壁增加一定厚度的材料,再精加工获得所需的配合尺寸及表面质量^[5-7]。

堆焊、熔覆抗腐蚀性、耐磨性强的铜合金,既能补偿尺寸,又能显著提高内孔的耐腐蚀性能,成为废旧油缸内孔修复的有效手段之一^[8-10]。此外,在通过表面堆焊铜合金提升缸筒内孔耐腐蚀性的同时,还需要对缸筒内孔以外的缸底、转接头等部位进行防腐处理,以提升油缸整体的耐腐蚀性能,延长油缸的服役寿命。目前主要采用一种融合热处理技术和防腐技术的复合表面改性技术,即淬火-抛光-淬火(QPQ)复合处理^[11-12]。QPQ技术可赋予零部件极高的耐磨性、极好的抗蚀性、良好的耐疲劳性能、微变形,可同时替代多道热处理和防腐蚀工序,而且是对环境友好的工艺技术,在国内外得到了广泛的应用。近些年,国内外相关团队持续开展关于QPQ技术工艺及装备的研究,以在材料极限性能和关键零部件极限服役性能上获得突破并应用。QPQ代表着此项技术的淬火、抛光、淬火的大体工艺流程,具体包含了金属表面清洗、盐浴(氮化与氧化)、冷却和抛光过程。

考虑到QPQ处理后不利于堆焊、熔覆质量的控制,采用先对缸筒内孔进行堆焊、熔铜,再精加工,最后对缸体做整体QPQ处理的工艺^[13]。然而,该工艺尚处于探索应用阶段,QPQ处理对堆焊、熔铜后缸筒内孔铜合金性能的影响尚不清楚^[14]。因此,文中以某型重载液压立柱油缸缸体外缸体用27SiMn合金钢基材为研究对象,对合金钢样件进行堆焊铜合金及整体QPQ处理,探究QPQ处理对27SiMn合金钢基材堆焊铜合金涂层组织与性能的影响,并验证复合防腐工艺在油缸维修再制造中应用的可行性,以期后续工艺的改进提供数据参考。

1 实验

1.1 试样制备及处理工艺

实验所需试样选材为液压支架油缸常用的27SiMn合金钢,基材表面堆焊镍铝青铜符合DIN 1733标准,铜合金化学成分如表1所示。

试样基体均取自同一根27SiMn棒材,制备流

表1 铜合金化学成分

Table 1 Chemical composition of copper alloy %

元素	Cu	Al	Fe	Mn	Ni	Pb	Si	Zn	其他
含量	余量	7.5~ 9.5	1.5~ 2.5	1.0~ 2.5	1.8~ 3.0	≤0.02	≤0.2	≤0.2	≤0.4

程如图1所示:①准备1根直径为210mm的棒料;②将棒材切割成直径为210mm、厚度为40mm的钢片,共2块;③粗铣圆柱形钢片的一侧端面至表面平整;④在铣削后的端面上堆焊约5mm的铜合金;⑤粗铣圆柱形钢片的铜合金涂层侧至表面平整,且涂层厚度为 (3.0 ± 0.1) mm;⑥通过平面磨削,将所有圆柱形钢片(共计4块)铣削后的端面磨削至表面粗糙度达到0.8μm;⑦通过线切割将圆柱形钢片切割成尺寸为70mm×140mm×40mm的长方体大试样;⑧取其中2块堆焊铜合金的长方体大试样进行QPQ处理;⑨将长方体大试样切割成尺寸为12mm×15mm×40mm的长方体小试样,并编号;⑩对长方体小试样进行超声清洗,并进行烘干处理(100℃恒温干燥2h,烘干箱型号为DZF-6050),按编号密封装袋。

基材27SiMn表面堆焊铜合金由宁夏天地支护装备有限公司完成:采用二氧化碳保护焊机配纯氩气,堆焊前需要对基材件进行200℃低温预热,后续由人工完成堆焊。堆焊参数范围为:电流200~230A,电压22~24V,铜合金焊丝由该企业对外采购,包装上铜合金牌号为Cu-AlBz₆MnNiF。由苏州鑫利莱精密光学部件有限公司完成大试块的QPQ处理,处理工艺流程为:①表面清理除油;②350℃预热工件0.5h;③ (580 ± 10) ℃碳/氮化1.5h;④抛光;⑤370℃氧化0.5h;⑥冷却、清洗、干燥、保存。

1.2 主要设备和实验过程

通过HV-1000STA维氏微观硬度计,对铜合金堆焊层表面及内部进行多点硬度测量,其中,测试试验力为500g,保压时间为10s。

主要设备为:Axio Scope.A1光学显微镜,ZEISS Crossbeam350电子显微镜,Ultima IV X射线衍射仪,DDR-120盐雾试验箱,HV-1000STA维氏微观硬度计。

通过Axio Scope.A1光学显微镜观测铜合金堆焊层表面在QPQ处理前后的变化情况。此外,还对铜合金内部的金相组织进行观察,观测前对试样进行嵌样、预磨、抛光和腐蚀等操作。

通过ZEISS Crossbeam350电子显微镜对铜合金堆焊层表面在QPQ处理后形成的渗层形貌结构进行观测,对渗层厚度进行测量,并对铜合金堆焊层QPQ处理形成的渗层进行EDS能谱分析。

通过Ultima IV X射线衍射仪对铜合金堆焊层表面生成的物质进行成分检测和分析。

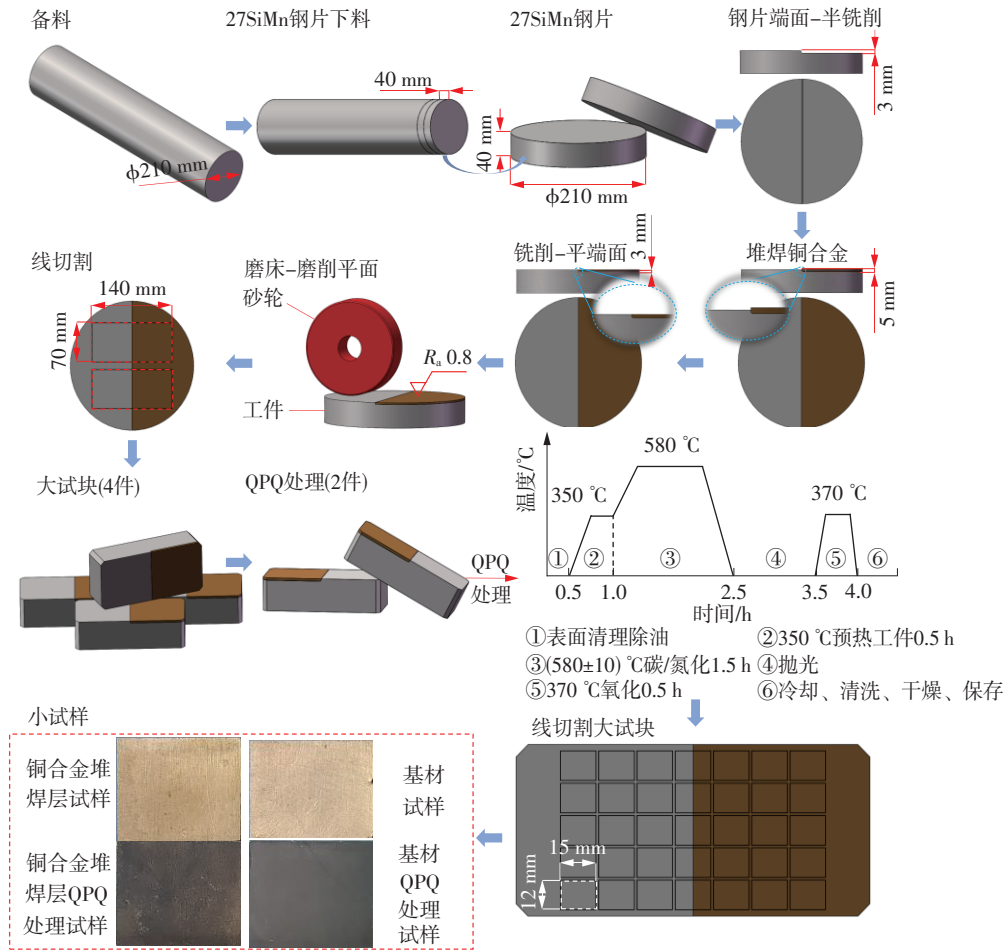


图1 试样制备流程

Fig. 1 Preparation procedure of sample

通过DDR-120盐雾试验箱对铜合金堆焊层的耐蚀性进行评价，实验条件为：盐水溶液质量浓度50 g/L、盐水溶液pH值7.0、空气压缩力70 kPa、喷雾量1.3 mL/h、试验温度35℃、压力桶温度47℃，盐水温度35℃。

2 实验结果及分析

2.1 QPQ处理对堆焊铜合金表面特征的影响

SEM扫描电镜分析结果如图2所示，从图中可知，铜合金到基材过渡层的结合良好。文中涉及的铜合金堆焊工艺是工程中废旧油缸内孔修复的常用手段之一，企业现有工艺能够确保铜合金涂层与基材材料的牢固结合。在返修后的实际应用中从未出现铜合金涂层脱落、界面开裂等问题。

图3为铜合金表面在QPQ处理前后的变化情况。从样件表面整体情况来看，黄色铜合金表面经QPQ处理后呈现不同程度的发黑(暗红色)现象，表明在黑色区域形成了渗层，但存在明显的处理不

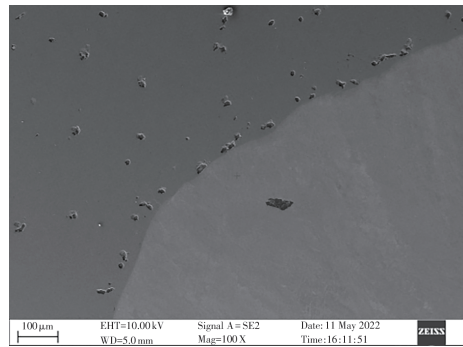


图2 铜合金到基材过渡层的显微形貌

Fig. 2 Micromorphology of the transition layer from copper alloy to substrate

均匀现象，有暗红色的斑点分散或聚集于铜合金表面。QPQ处理前后铜合金表面的XRD分析结果表明，QPQ处理后铜合金表面主要生成了氧化亚铜(Cu₂O)，氧化亚铜为暗红色，与光镜下观测到的颜色一致。

图4为QPQ处理后铜合金堆焊层截面图。图4(a)中的A—A为制样截面，用来观测区域①、

区域②和区域③的渗层情况；从图 4(b)可知，区域①未见渗层；从图 4(c)可知，区域②介于区域①和区域③中间，渗层从区域①无渗层过渡到区域③有渗层，渗层厚度呈现出从左至右逐渐增加；从图 4(d)可知，区域③的渗层较厚且均匀，

渗层厚度在 $10\mu\text{m}$ 左右。因此，铜合金在 QPQ 处理后的表面颜色可以反映渗层的分布情况，接近铜合金底色的区域未见渗层，介于暗红色和铜合金底色之间的过渡区域渗层较薄，暗红色区域对应的渗层较厚。

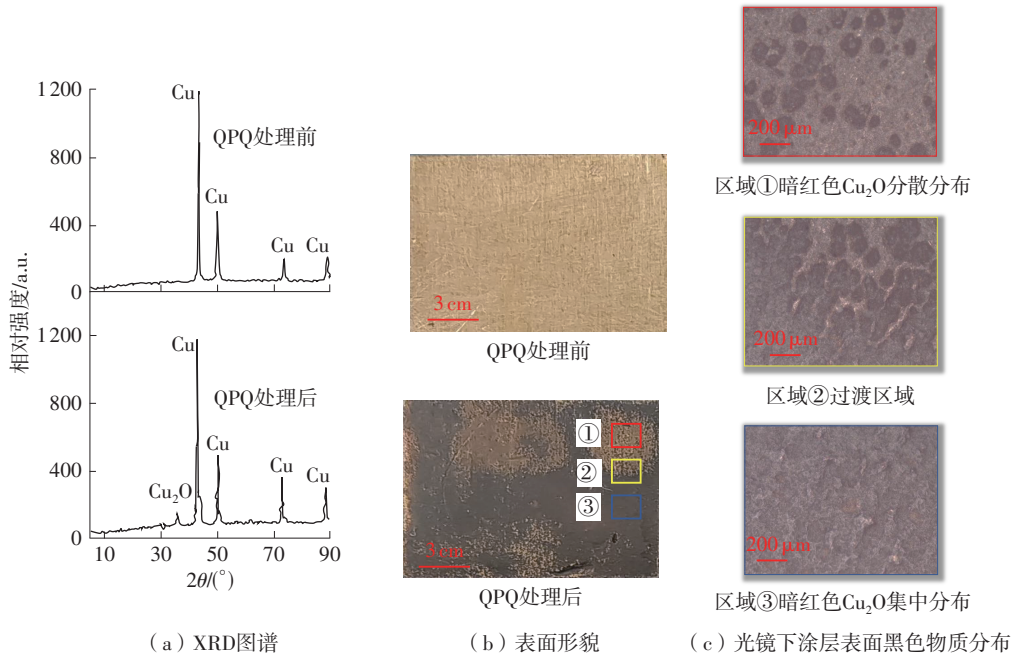


图 3 铜合金表面 QPQ 处理前后变化

Fig. 3 Changes in copper alloy surface before and after QPQ treatment

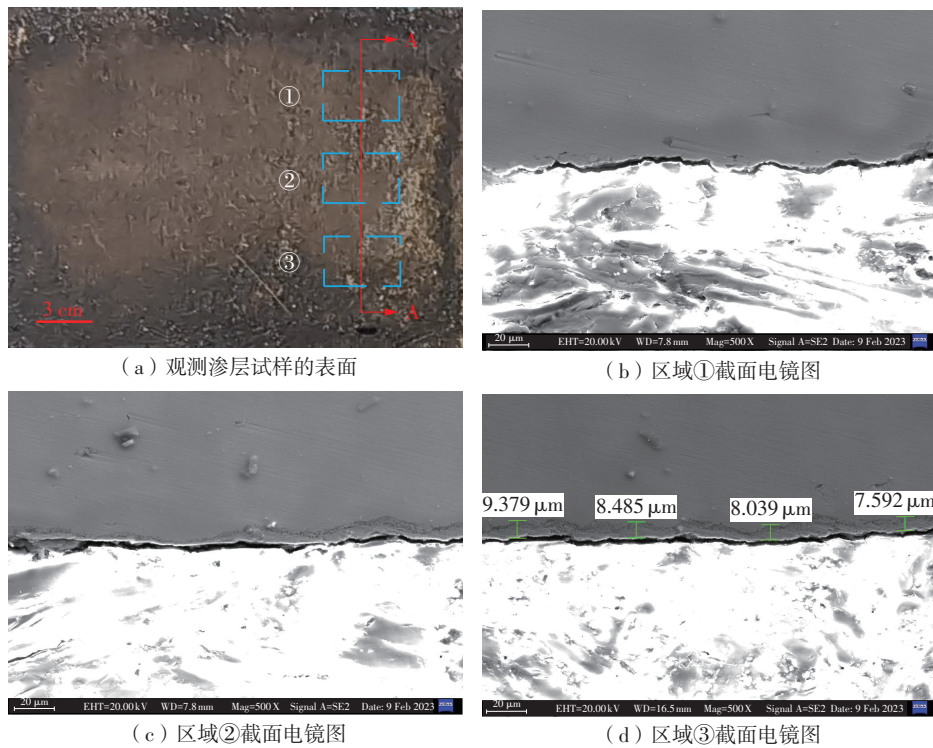


图 4 QPQ 处理后铜合金堆焊层截面

Fig. 4 Cross-section of copper alloy cladding layer after QPQ treatment

通过SEM扫描电镜观测较厚渗层区域发现，铜合金表面QPQ处理后形成的渗层具有双层结构，如图5所示。该双层结构是由QPQ处理过程中“渗碳/氮”和“氧化”两个处理工艺共同形成的，“渗碳/氮”工艺首先会在铜合金表面形成一层化合层，有类似于马氏体的组织集中分布于该层中，而“氧化”工艺在“渗碳/氮”化合层基础上引入氧原子，在铜合金表面形成了以Cu₂O为主的氧化层，但氧化层相对于化合层薄，所以形成

了可观测的双层结构。

2.2 QPQ处理前后铜合金表面渗层的组织

文中通过堆焊工艺所获得的镍铝青铜合金层的金相组织如图6所示，由白色的基体相及不同形状的组成相构成。由铸态铜-铝合金相图可知，以铜为基的固溶体 α 相，是此类合金的基本组成相^[14-15]，如图7所示。 β 相是以电子化合物Cu₃Al为基的固溶体，平衡冷却下向 $\alpha+\gamma_2$ 转化。冷却速度的加快会抑制 β 相向 $\alpha+\gamma_2$ 的共析转变，而相变成一种亚稳

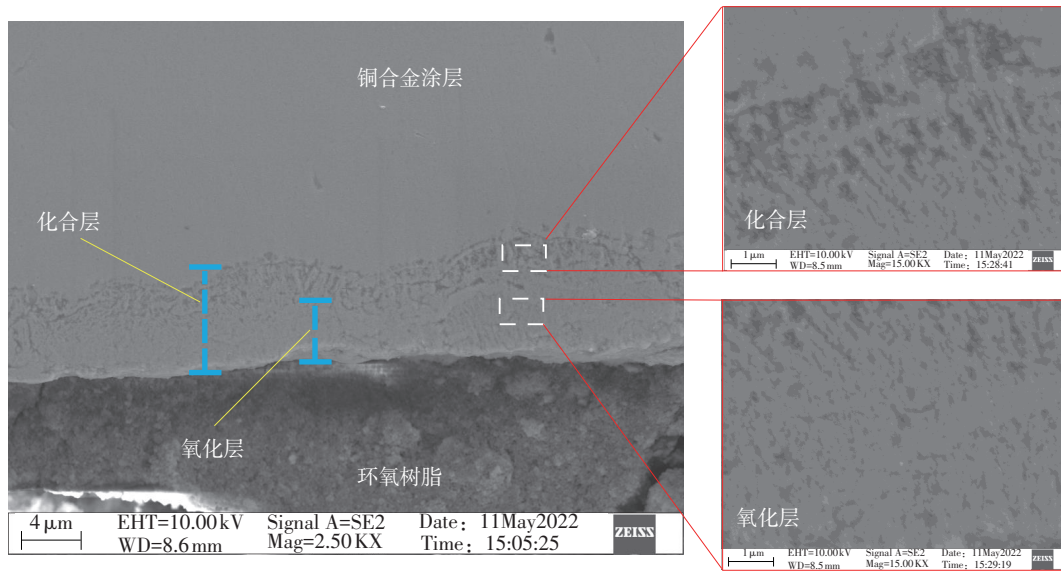


图5 QPQ处理后铜合金表面渗层显微形貌

Fig. 5 Surface morphology of copper alloy penetration layer after QPQ treatment

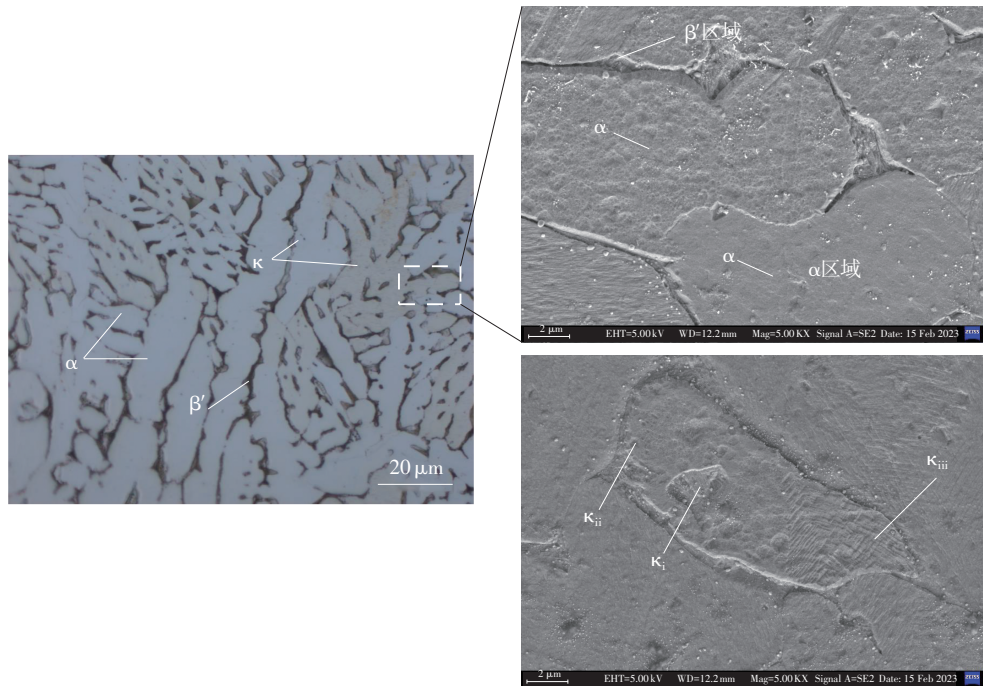
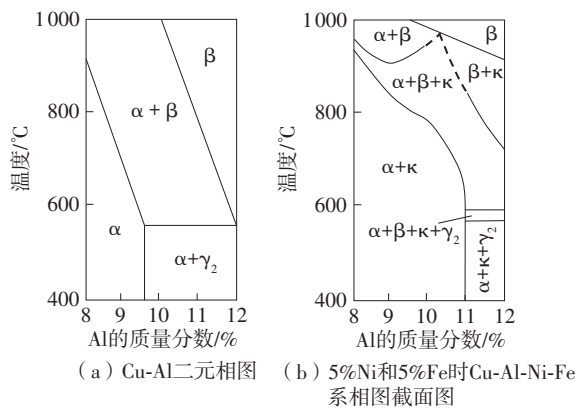


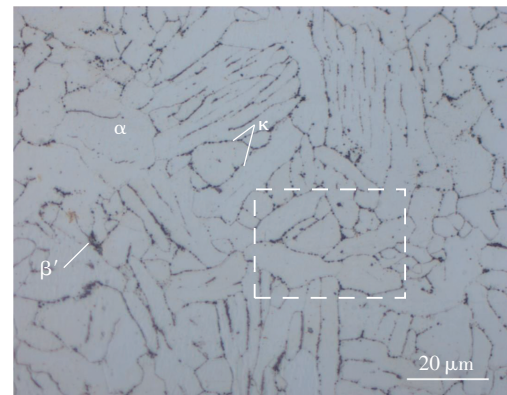
图6 堆焊铜合金层的金相组织

Fig. 6 Metallographic organization of overlay copper alloy layer

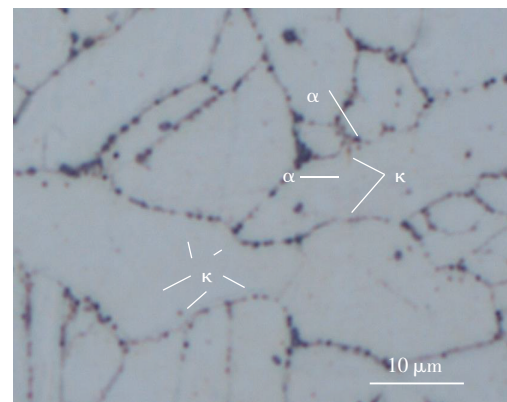
图7 Cu-Al系相图^[15]Fig. 7 Phase diagram of Cu-Al system^[15]

定组织 β' 相。加入铁元素(质量分数为2%~3%)后,会出现 Al_3Fe 化合物(又称 κ 相、富铁相),呈颗粒状析出,起变质细化晶粒作用。加入镍元素可提高合金的共析转变温度。Cu-Al-Ni-Fe四元复杂铝青铜会出现一种Ni-Fe-Al相, κ 相固溶于 α 相中。由焊接态镍铝青铜合金相图可知,铜合金堆焊层试样表面主要由白色基体相 α 与亚稳定相 β' ,以及相间组织 κ 相构成^[16-17]。由此可知,图6中的白色基体相为 α 相,黑色为密排六方结构的亚稳定相 β' 。堆焊的铜合金涂层的冷却形式属于非平衡快速冷却,但冷却速度较慢,具有高热稳定性的 β 相在快速冷却过程中不能及时转化为 α 相,在局部区域形成了残余马氏体 β 相,分布于 α 相之间,聚集形成 β' 相^[18]。其中,花状的 κ_1 相分布于 α 相中,尺寸较大;片层状的 κ_{III} 相一般位于 α 相与 β' 相之间的界面,球状的 κ_2 相位于片层状共析产物 κ_{III} 相周围^[15]。

QPQ处理过程中的铜合金相当于经历了加热保温过程,使铜合金组织发生了变化,如图8所示。其中,“渗碳/氮”工艺加热温度为 $(580 \pm 10)^\circ\text{C}$ 、保温1.5h;经历高温回火后, β' 相中大量析出 α 相,基体相融合增大,共析体聚缩甚至分离^[14]。然而,由于保温时间短,部分细小的 κ 相分别从 α 相和 β' 相中析出,而 γ_2 并未从共析体中完全解离出来。“氧化”工艺加热温度为 370°C 、保温0.5h,氧化过程中铜合金组织发生相变程度低,仅有少量 κ 相从 α 相中析出。由此可知,铜合金在QPQ处理后的组织依然主要由 α 相、 β' 相和 κ 相构成,如图8(a)所示。从图8(b)可见,组织中存在大量的 α 相和 κ 相间隔分布的情况,这些组织主要是由 β' 相共析转变而成。铜合金组织中, α 相中的 κ 相较处理前明显增多,其原因是: β' 相发生共析转变成 κ 相、



(a) 区域显微组织



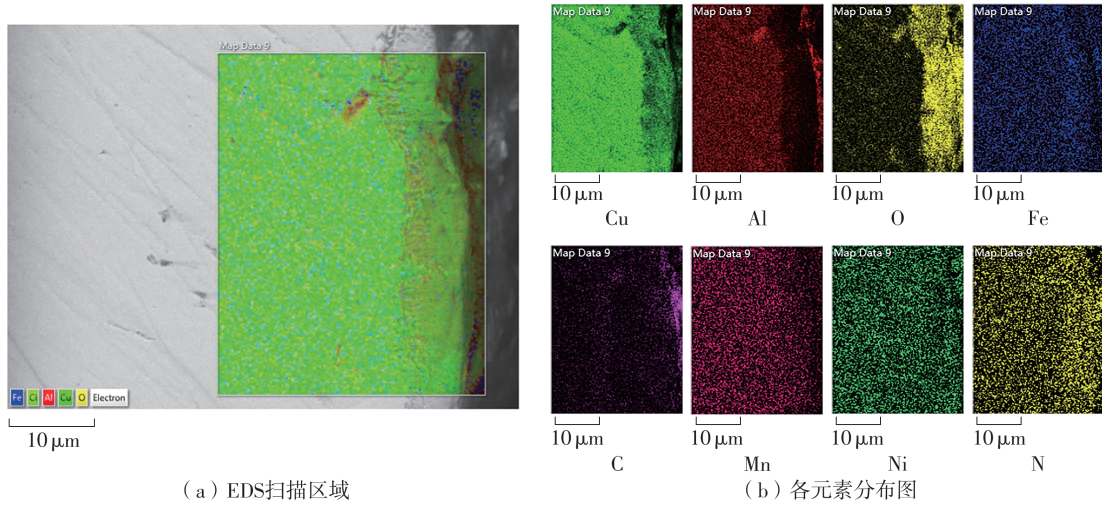
(b) 局部放大微观结构

图8 QPQ处理后堆焊铜合金层的金相组织

Fig. 8 Overlay copper alloy layer metallographic organization after QPQ

从原有的 α 相中析出 κ 相。 κ 相的增多,有利于该合金硬度、耐蚀性的提升。

铜合金表层组织和成分是决定防腐性能的关键。在明确铜合金层整体组织的基础上,通过EDS能谱分析仪对渗层成分进行分析,发现“渗碳/氮”工艺将大量的碳元素引入到铜合金堆焊层表面,而氮元素甚微,如图9所示,按检测到元素成分含量从大到小顺序排列。从图中可知,此铜合金表层组织类似于马氏体的组织,多为金属碳化物堆积而成。从化学反应活性及镍铝青铜中组成元素来看,可能的金属碳化物有 FeC 、 NiC 和 MnC ^[19-20]。进而由渗层区域点成分分析可知,渗碳/氮化合层的位置3、位置5、位置9均有含量较高的金属元素Fe、Mn和Al,如图10所示。由此判断,渗碳/氮化合层中类似马氏体组织的形成是由于铁与锰元素和碳元素形成了过渡碳化物薄片,外形和板条状马氏体相似,如图10所示,这种结构在一定程度上对铜合金硬度有强化作用,所以QPQ处理后铜合金涂层表面硬度高于内部的硬度。但是,QPQ处理过程中 α 相的增多和



(a) EDS扫描区域

(b) 各元素分布图

图9 渗层部位EDS元素分布

Fig. 9 EDS elemental distribution of penetration sites

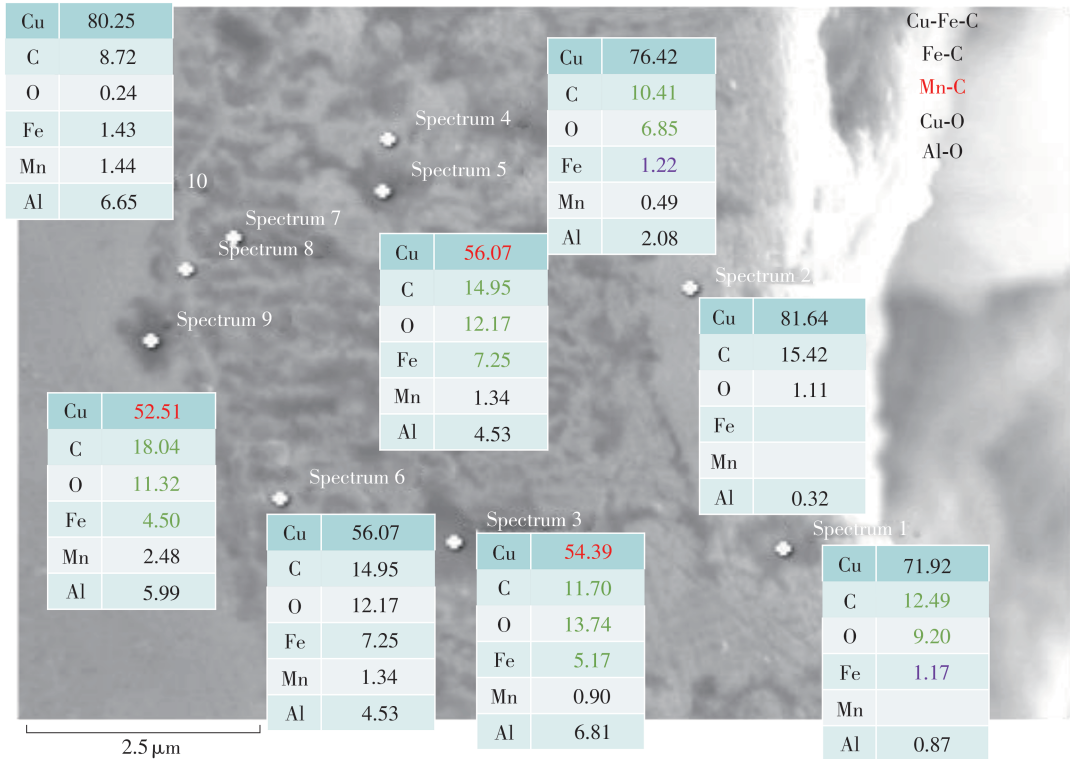


图10 铜合金QPQ处理的渗层截面EDS能谱分析

Fig. 10 EDS spectroscopic analysis of the permeable layer cross-section after QPQ treatment of copper alloy



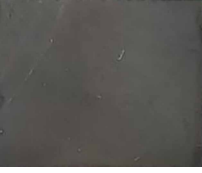



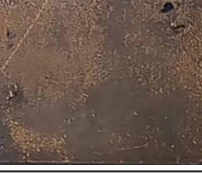

粗化，导致硬度稍有降低，不过仍满足使用要求^[21]。

在氧化层中，由于氧化层很薄，组织不能够观察到，所以对氧化层(主要金属氧化物为Cu₂O，少量为Al₂O₃)化合物性质的研究更为重要。Cu₂O在常温干燥空气中稳定，在潮湿环境中会慢慢氧化形成氧化铜，不溶于水，遇酸歧化。但是，该物质在液压支架乳化液介质(7≤pH≤9)的工作环境下性质稳定，会有较好的耐蚀性能。

2.3 QPQ处理对铜合金涂层表面耐蚀性的影响

通过168 h中性盐雾试验(检测方法按照标准GB/T 10125—2021进行)表征基材堆焊铜合金在QPQ处理后的复合防腐涂层表面的耐蚀性，同时将基材试样、基材QPQ处理试样和基材表面堆焊铜合金试样表面的耐蚀性能作为对比试验，盐雾试验情况如表2所示。所有盐雾试验用的试样均为同批次

表2 盐雾试验情况
Table 2 Salt spray test conditions

试样	表面形貌		腐蚀情况	保护评级
	盐雾试验前	盐雾试验后		
基材试样			第1天开始出现腐蚀, 96h后表面全部腐蚀	0
基材QPQ处理试样			第1天开始出现腐蚀, 96h后表面大面积腐蚀	2
铜合金堆焊层试样			经168h盐雾实验后, 试样表面稍有变色	9
铜合金堆焊层QPQ处理试样			经168h盐雾实验后, 试样表面未腐蚀, 但铜合金QPQ渗层颜色变浅	10

制备, 储存条件一致, 基材试样在储存过程中出现了锈蚀。

168h中性盐雾试验后, 基材堆焊铜合金QPQ处理试样表面未见锈点, 仅出现试样表面黑色变浅的现象, 耐蚀效果优良。基材试样在存放过程中(试验前)就出现了生锈现象, 与QPQ处理的基材试样表面相比可知, QPQ处理可以使基材试样表面的耐蚀性能大幅提高; 外缸体缸筒内孔堆焊铜合金后做QPQ处理, 不但能增强熔铜表面的耐蚀性能, 还能增强缸底、管接头内孔等金属表面的耐蚀性能。此结果表明, 经QPQ处理后的铜合金表面的防腐性能优良, 不同试样表面耐蚀性能从高到低顺序依次为: 铜合金堆焊层QPQ处理试样表面、铜合金堆焊层试样表面、基材QPQ处理试样表面、基材试样表面。按照GB/T 6461—2002中基于出现腐蚀的基体面积占比的保护评级表示法, 铜合金堆焊层试样表面的耐蚀性保护评级均为9级, 铜合金堆焊层QPQ处理试样表面的耐蚀性保护评级均为10级。QPQ处理后的铜合金表面的耐腐蚀性并未降低, 且超过了未经QPQ处理的堆焊铜合金表面的耐腐蚀性能。

2.4 QPQ处理对铜合金涂层表面硬度的影响

铜合金为有色金属合金, 硬度相对较软, 且铜合金QPQ处理后渗层厚度较薄, 利用维氏硬度能更加准确地评估铜合金QPQ处理表面渗层及铜合金涂层内部的硬度值。堆焊的铜合金涂层表面平均硬度约为188HV, 如表3所示; 而经过QPQ处理后表面平均硬度为170HV左右, 有所下降。堆焊铜合金内部(堆焊层截面)硬度在QPQ处理前约为150HV, 处理后约为140HV, 内部硬度有所降低。图11为铜合金堆焊层QPQ处理前后的维氏硬度值。

尽管铜合金堆焊层在QPQ处理前后的硬度值偏低, 但依旧满足使用要求。 β' 马氏体组织的硬度一般为171HV, 比 α 相硬度高; γ_2 相组织的硬度一般为520HV, 共析组织 $\alpha+\gamma_2$ 的硬度一般为272~305HV。室温冷却条件下的焊接态组织来不及形成共析组织 $\alpha+\gamma_2$, 致使本研究中的堆焊铜合金硬度不高。尽管在560℃左右环境温度下, 铜合金组织会发生共析转变, β' 相分解为 α 相和 κ 相, κ 相的析出会产生明显的沉淀硬化, 但析出程度不够; 而且基体相的融合增大会导致整体硬度下降。因此, 可在焊接后适当降低冷却速度, 增加盐浴保温时间来提高硬度^[14]。

表3 铜合金涂层表面QPQ处理前后的维氏硬度

Table 3 Vickers hardness of copper alloy coating surface before and after QPQ treatment

试样名称	试样编号	10次测量的硬度/HV										平均硬度/HV
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
铜合金	1	203.2	178.2	188.8	164.4	198.4	195.7	206.0	191.3	171.1	165.8	186.3
	2	176.9	177.2	170.6	180.5	188.2	163.9	198.4	185.3	167.1	205.4	181.4
	3	188.2	171.6	214.4	214.5	215.9	194.5	189.7	185.2	190.1	215.3	197.9
铜合金 QPQ处理	4	178.2	162.5	190.6	163.9	175.0	151.6	159.1	163.4	167.9	155.7	166.8
	5	186.9	184.0	133.9	141.6	199.7	175.5	185.7	200.8	175.3	164.9	174.8
	6	159.6	195.7	172.9	167.9	179.9	157.1	165.9	148.6	169.1	177.6	169.4

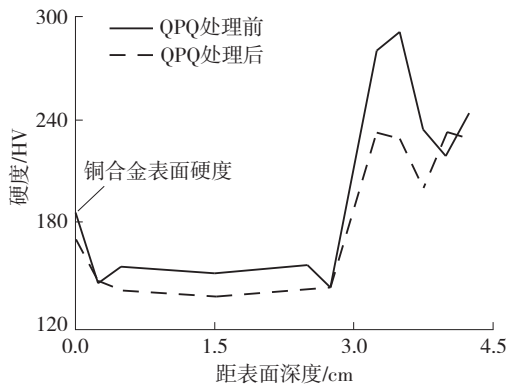


图11 铜合金堆焊层硬度沿距表面深度方向的分布

Fig. 11 Distribution of hardness along the depth direction from the surface in copper alloy surfacing layers

3 结论

(1)QPQ处理的堆焊铜合金涂层表面会形成双层结构的渗层,该结构由QPQ处理中“渗碳/氮”和“氧化”两个处理工艺共同形成。铜合金涂层形成了一种双层结构的渗层,其中氧元素集中在表层,深入内部的主要以碳元素为主,氮元素甚微。表面形成铜的氧化物、内部形成金属碳化物,起防腐作用。

(2)QPQ处理前后的堆焊铜合金组织均有体相 α 、亚稳定相 β' ,以及分散于 α 相中的多种 κ 相。由于保温中高温回火作用, β' 相大量析出 α 相,基体相融合增大。

(3)渗碳/氮化合层中类似马氏体组织的形成是由于铁与锰元素和碳元素形成了过渡碳化物薄片,外形和板条状马氏体相似。此结构在一定程度上起强化表面的作用,处理后铜合金涂层表面硬度高于内部的硬度。

(4)铜合金堆焊层试样表面的耐蚀性保护评级均为9级,铜合金堆焊层QPQ处理试样表面的耐蚀性保护评级均为10级,QPQ处理后的铜合金表

面的耐腐蚀性并未降低,反而超过了未经QPQ处理的铜合金堆焊层试样表面的耐腐蚀性能。

(5)堆焊铜合金经QPQ处理后,铜合金表面、内部硬度值均呈现下降趋势。其中,铜合金组织变化是引起材料硬度值变化的主要原因:①室温冷却条件下的焊接态组织来不及形成共析组织 $\alpha+\gamma_2$,致使本研究中的堆焊铜合金硬度不高;②在560℃左右环境温度下铜合金组织会发生共析转变, β' 相分解为 α 相和 κ 相, κ 相的析出会产生明显的沉淀硬化,但析出程度不够;③基体相的融合增大,导致整体硬度下降。

参考文献:

- [1] 郭辰光,孙瑜,吕宁,等. 液压支架缸体内壁面再制造粉流场影响规律分析[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 304-314.
GUO Chen-guang, SUN Yu, LÜ Ning, et al. Analysis of the influence law of the remanufactured powder flow field on the inner wall of hydraulic support [J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 304-314.
- [2] 史学琦. 煤矿井下液压支架油缸泄漏故障及维修探析[J]. 现代工业经济和信息化, 2017(18): 57-58, 68.
SHI Xueqi. Leakage failure and maintenance of cylinder of hydraulic support in coal mine [J]. Modern Industrial Economy and Informatization, 2017(18): 57-58, 68.
- [3] 魏传君. 液压支架立柱缸筒维修与再制造技术分析[J]. 冶金管理, 2019(17): 77, 79.
WEI Chuanjun. Analysis of repair and remanufacturing technology of hydraulic support column cylinder barrel [J]. Metallurgical Management, 2019(17): 77, 79.

- [4] 刘翔宇. 液压支架立柱的维修及再造技术分析 [J]. 机电工程技术, 2019, 48(12): 236-238.
LIU Xiangyu. Analysis of repair and reconstruction technology of hydraulic support column [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2019, 48(12): 236-238.
- [5] 高锋, 万滋雄, 黄昭明. 激光熔覆液压支架立柱工艺特点分析 [J]. 矿山机械, 2013, 41(6): 125-126.
GAO Feng, WAN Zixiong, HUANG Zhaoming. Characterization of laser cladding process for hydraulic support column [J]. Mining Machinery, 2013, 41(6): 125-126.
- [6] 王瑞. 矿用掩护式液压支架立柱维修技术研究 [J]. 机械管理开发, 2019(2): 255-256, 259.
WANG Rui. Research on maintenance technology of mine cover hydraulic support column [J]. Mechanical Management and Development, 2019(2): 255-256, 259.
- [7] 黄杰, 贺定勇, 杜开平, 等. FeCrNiMo激光熔覆层组织与电化学腐蚀行为研究 [J]. 表面技术, 2020, 49(12): 228-234.
HUANG Jie, HE Ding-yong, DU Kai-ping, et al. Microstructure and electrochemical corrosion behavior of FeCrNiMo layer fabricated by laser cladding [J]. Surface Technology, 2020, 49(12): 228-234.
- [8] 杨毅. 矿用液压支架维修关键技术分析 [J]. 矿业装备, 2021(4): 240-241.
YANG Yi. Analysis of key technology of mining hydraulic support maintenance [J]. Mining Equipment, 2021(4): 240-241.
- [9] 潘岳军. 矿用液压支架立柱外缸和中缸内表面损伤的修复工艺: CN107671488A [P]. 2018-02-09.
- [10] 韩启勇, 朱征宇, 张磊, 等. 采用中间层的高强度表面CMT堆焊耐腐蚀铜合金研究 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2019, 33(4): 13-17.
HAN Qiyong, ZHU Zhengyu, ZHANG Lei, et al. CMT surfacing of corrosion-resistant copper alloy on the high strength steel with an interlayer [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 33(4): 13-17.
- [11] 罗德福. QPQ技术在我国的发展 [J]. 金属热处理, 2022, 47(7): 227-233.
LUO Defu. Development of QPQ technology in China [J]. Metal Heat Treatment, 2022, 47(7): 227-233.
- [12] 张占辉, 薛家祥. 熔滴冲击方向对焊缝质量的影响 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 138-144.
ZHANG Zhanhui, XUE Jiayang. Effect of the direction of droplet impingement on the bead quality [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(4): 138-144.
- [13] 马莉. 液压支架立柱维修与再制造技术的应用研究 [J]. 当代化工研究, 2019(14): 65-66.
MA Li. Application research on maintenance and remanufacturing of hydraulic support column [J]. Modern Chemical Research, 2019(14): 65-66.
- [14] 李炯辉. 金属材料金相图谱 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [15] 吕维洁, 王立强. 镍铝青铜合金组织结构优化及腐蚀疲劳性能 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [16] WHARTON J A, STOKES K R. The influence of nickel-aluminium bronze microstructure and crevice solution on the initiation of crevice corrosion [J]. Electrochim Acta, 2008, 53: 2463-2473.
- [17] SABBAGHZADEH B, PARVIZI R, DAVOODI A, et al. Corrosion evaluation of multi-pass welded nickel-aluminum bronze alloy in 3.5% sodium chloride solution: a restorative application of gas tungsten arc welding process [J]. Materials & Design, 2014, 58: 346-356.
- [18] 宋德军, 胡光远, 卢海, 等. 镍铝青铜合金的应用与研究现状 [J]. 材料导报, 2007, 21(专辑IX): 450-452, 459.
SONG Dejun, HU Guangyuan, LU Hai, et al. Survey of progress on the research and practice of nickel-aluminum braze [J]. Materials Reports, 2007, 21 (Special IX): 450-452, 459.
- [19] 秦真波. 镍铝青铜合金的腐蚀行为及其表面改性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [20] 都春燕. 镍铝青铜合金的耐蚀性及表面处理的研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2014.
- [21] 孙梦龙, 谢春生. 热处理对新型铝镍青铜组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2016, 41(1): 97-100.
SUN Menglong, XIE Chunsheng. Effect of heat treatment on microstructure and properties of new aluminum-nickel bronze alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(1): 97-100.

Effect of QPQ Treatment on the Microstructure and Properties of Nickel-Aluminum-Bronze Alloy Coating of 27SiMn Alloy Steel

SU Youliang¹ CUI Hao¹ GAO Xuenan¹ ZHENG Haobo²

(1. School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: To address the unclear effects of quenching-polishing-quenching (QPQ) treatment on the performance of nickel-aluminum bronze alloy coatings welded onto 27SiMn alloy steel, this study investigated the geometric characteristics, microstructural changes, corrosion resistance, and hardness of the copper alloy coating. The influence of the QPQ treatment process on the coating's microstructure and properties was analyzed to verify the rationality and feasibility of this composite anti-corrosion technology. The results indicate that after undergoing the two processes of carbonization/nitriding and oxidation, the copper alloy coating forms a dual-layer infiltration structure, with metal carbides distributed across both layers and copper oxides concentrated near the surface, providing corrosion protection. Before and after QPQ treatment, the microstructure of the copper alloy coatings primarily consists of the matrix phase α , the metastable phase, and various κ phases dispersed within the α phase. High- and medium-temperature tempering leads to the precipitation of a large amount of β' phase into the α phase, causing the matrix phase to coalesce and expand while reducing overall hardness. According to the protection rating representation method based on the proportion of substrate area affected by corrosion, the protection rating of the surface of the copper alloy coatings layer samples is 9, while the copper alloy samples after QPQ treatment is 10. The corrosion resistance of the copper alloy surface after QPQ treatment is not only maintained but also exceeds that of the untreated one. In light of this, the composite anti-corrosion technology can be applied to the maintenance and remanufacturing of hydraulic bracket cylinder barrel parts, which can enhance the corrosion resistance of the inner wall of the cylinder barrel as a whole, while also considering the corrosion resistance of other parts such as the joint holes and the outer surface of the cylinder body.

Key words: QPQ processing; surface copper; composite coating; column cylinder; corrosion protection