

亚温淬火对 NiCrMo-3 堆焊层耐磨性能的影响

武 斌, 伍金荣, 柴 慧, 李永坤

(西南石油大学 新能源与材料学院, 四川 成都 610500)

摘要:研究了亚温淬火对 NiCrMo-3 堆焊层显微组织、力学性能及耐磨性能的影响。结果表明,与未淬火试样相比,亚温淬火后 NiCrMo-3 堆焊层的晶粒较小,呈絮状分布。堆焊层表面的主要物相为金属间化合物 CrO_2 和 NiFe_2O_4 ,基体间存在 Ni、Cr 元素形成的间隙化合物。亚温淬火后堆焊层的硬度较高并具有良好的耐磨性能,且强度提高,但韧性下降。亚温水淬时的摩擦因数在摩擦过程中减小,拉伸断口中的脆硬相之间有韧性带状组织。

关键词:亚温淬火; NiCrMo-3 堆焊层; 显微组织; 耐磨性

中图分类号: TG156.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2022)01-0276-05

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2022.01.046

Effect of subcritical quenching on wear resistance of NiCrMo-3 surfacing layer

Wu Bin, Wu Jinrong, Chai Hui, Li Yongkun

(School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China)

Abstract: Effect of subcritical quenching on microstructure, mechanical properties and wear resistance of the NiCrMo-3 surfacing layer was studied. The results show that the grain size of the surfacing layer after subcritical quenching is smaller and flocculent structured which composes of intermetallic compounds as CrO_2 and NiFe_2O_4 on surface and interstitial compounds formed by Ni and Cr elements at substrates. The hardness of the surfacing layer after subcritical quenching is high and shows good wear resistance, the strength increases but the toughness decreases. The friction coefficient of which subcritical water quenched decreases during friction test, and a ductile banded structure between the brittle and hard phases occurs in its tensile fracture.

Keywords: subcritical quenching; NiCrMo-3 surfacing layer; microstructure; wear resistance

镍铬基合金具有优异的耐磨和耐蚀性能,在汽车工业、核能以及机械零件加工中被广泛应用。在材料表面制备镍铬基堆焊层可有效提高基体的耐高温、耐辐射、抗氧化、耐磨和耐蚀性,增加材料的使用寿命^[1-4]。表面堆焊是制备堆焊层的常用方法,通过热源将具有特殊性能的合金熔覆在基体表面,既可以使基体表面强化,也可用于机械零件失效部分的修复,还可节省贵重的生产材料,降低和节约生产成本^[5-8]。镍铬合金作为一种重要的堆焊材料被广泛使用,冯勋等^[9]采用 EQNiCr-3 和 ERNiCr-3 材料对 AP1000 汽水分离再热器中的一、二级再热器管板进行带极电渣堆焊和手工钨极氩弧焊,在合适焊接参数下获得了尺寸完整、变形小且质量符合设计要求的焊缝。武英海等^[10]利用手工电弧堆焊在 Cr-Mo 耐热钢表面堆焊镍基合金,通过焊前预热、合理选择焊接顺序及焊接中利用电弧热源进行亚温淬火,得到了优良的堆焊层。张

兆林^[11]对 ENiCrMo-3 镍基合金的单层带极电渣堆焊工艺进行了研究,发现当单层堆焊厚度大于 4.5 mm 时,镍基堆焊材料的平板堆焊特性和筒体内壁堆焊特性具有明显的差异。Kimura 等^[12]研究了焊后亚温淬火对镍-铝搅拌摩擦焊接头的断裂性能,发现接头中间层主要由 NiAl 组成,其断裂强度随中间层宽度的增加而增加,其接头强度主要取决于焊后亚温淬火过程中靠近 Al 基体侧的 NiAl 中间层的强度。Mousavi 等^[13]研究了亚温淬火对钛-不锈钢复合材料爆炸焊焊缝中间层组织的影响,发现中间熔合区主要由 Ti、Fe、Ni、Cr 等元素组成,不同的金属间化合物相取决于不同的加热温度,且提高加热温度可以增加复合中间层的宽度。

由于大件、厚件以及多道焊镍基合金焊缝位置会产生很大的焊接残余应力,陆传航^[14]对镍基合金复合管进行了焊后去应力退火处理,得到单相的网状或树枝状奥氏体焊缝组织,堆焊层表面无微裂纹,抗晶间腐

收稿日期:2021-10-10

修订日期:2021-11-08

作者简介:武 斌(1985—),男,实验师,主要研究方向为材料连接技术与理论,E-mail:kohnkaka_2005@sina.com

引文格式:武 斌,伍金荣,柴 慧,等. 亚温淬火对 NiCrMo-3 堆焊层耐磨性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(1): 276-280.

Wu Bin, Wu Jinrong, Chai Hui, et al. Effect of subcritical quenching on wear resistance of NiCrMo-3 surfacing layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(1): 276-280.

蚀性能良好。为了改善镍基堆焊层的力学性能和耐蚀性,郭龙龙^[15]研究了在相同保温时间下,亚温淬火温度对堆焊层显微组织、力学性能及耐蚀性能的影响,发现在 750 °C 亚温淬火后堆焊层中的部分 Laves 相发生了分解,在晶界处析出了 δ 相,少量的 δ 相可提高堆焊层的屈服强度和抗拉强度,而随着温度的升高,δ 相析出量增加,镍基堆焊层的抗晶间腐蚀和抗 CO₂/H₂S 酸性介质腐蚀性能降低。同样对于 Inconel 625 镍基堆焊层,卿颖^[16]通过更高的焊后亚温淬火工艺发现,在 1020 °C 亚温淬火后熔敷金属的组织长大,合金元素均匀分布;但由于出现了魏氏体组织,韧性降低。在镍基堆焊层制备过程中,受堆焊层制备工艺和元素烧损的影响,堆焊层因铬元素的偏聚和焊接应力导致耐磨和耐蚀性能降低,虽然目前国内外学者已在镍基堆焊层的成形工艺和亚温淬火工艺对其力学性能及耐蚀性的影响方面开展了相关研究,但针对亚温淬火对 NiCrMo-3 堆焊层耐磨性能影响的研究还较少。本文对 NiCrMo-3 堆焊层进行亚温淬火处理,研究了亚温淬火对镍基堆焊层组织、力学性能及耐磨性的影响。分析堆焊层的组织演变及力学性能变化,为优化堆焊层组织、提高镍基堆焊层的耐磨性提供参考依据。

1 试验材料及方法

试验选用 Q345 钢为基体材料,尺寸为 200 mm × 80 mm × 8 mm。堆焊材料为直径 φ3.0 mm 的 NiCrMo-3 镍基焊材,两种材料的化学成分见表 1。堆焊层采用钨极氩弧焊(TIG)进行多层熔敷,工艺参数如表 2 所示,制备过程如图 1 所示,堆焊时需严格控制熔敷速度,确保熔覆层的厚度和质量。

表 1 试验材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of the tested material (mass fraction, %)

材料	C	Si	Mn	Mo	Cr	P	S	Ni	Fe
Q345	0.18	0.42	1.56	0.1	0.2	≤0.035	≤0.035	0.45	Bal.
NiCrMo-3	≤0.01	0.15	≤0.10	8.7	22.0	≤0.03	≤0.03	Bal.	0.2

表 2 TIG 堆焊工艺参数

Table 2 TIG welding process parameters

焊接电流/ A	电压/ V	速度/ (mm · s ⁻¹)	保护气流量/ (L · min ⁻¹)	热输入/ (kJ · mm ⁻¹)
130	23.4	3	12	4.0

堆焊层制备后经自然冷却,再进行表面铣削加工,保证其平面平整。然后将堆焊层分别加工成 20 mm × 20 mm × 8 mm 金相试样,35 mm × 6 mm × 5 mm 摩擦磨损测试试样,43.3 mm × 15 mm × 8 mm 摩擦因数测试

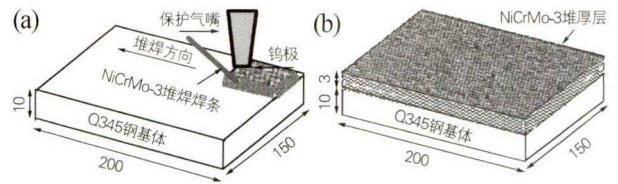


图 1 NiCrMo-3 堆焊层的制备

Fig. 1 Preparation of the NiCrMo-3 surfacing layer

试样及如图 2 所示的棒状拉伸试样。通过经验公式计算堆焊层结合区的临界奥氏体相变温度为 725 °C。将上述试样放入 STM-12-12 智能箱式电阻炉(温控精度 ±0.1 °C)中进行 730 °C × 25 min 亚温淬火处理,冷却方式分别为水冷和油冷。

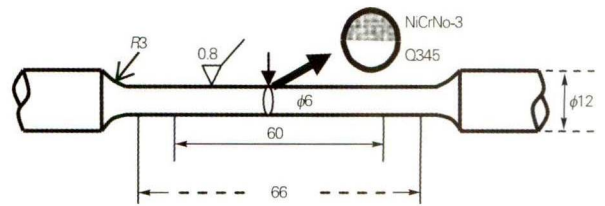


图 2 拉伸试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the tensile specimen

金相试样先用 120 ~ 5000 目碳化硅金相砂纸进行表面打磨,经王水腐蚀后用 M35 光学显微镜进行组织观察。拉伸试验参照 ASTM E8/E8M-13a《金属材料拉伸试验方法》,采用 WDW-1000 万能试验机进行测试;利用 HVS-1000 显微硬度计进行镍基堆焊层硬度测试,加载载荷法码 500 g,保压 10 s。采用 M-2000 型磨损试验机进行磨损量测试,上试样为亚温淬火后的镍基合金,下试样为淬火后的 45 钢圆环试样(见图 3),硬度为 67 HRC,摩擦副之间的正压力为 120 N,下试样转速为 400 r/min,每 30 min 后取下试样,用无水乙醇洗净并吹干,采用精度为 0.1 mg 的电子天平称量试样的质量变化,分析其质量损失变化。采用 Bruker UMT-TriboLab 磨损试验机测试亚温淬火后堆焊层的摩擦因数,对磨材料为直径 φ7.14 mm、表面粗糙度 0.01 μm、硬度为 65 ~ 68 HRC 的硬质合金球,其中垂

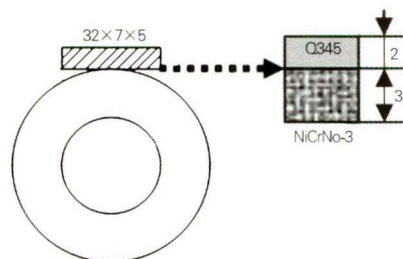


图 3 磨损试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the wear test

直于滑动方向的作用力为 50 N, 往复频率 5 Hz。

2 试验结果与分析

2.1 亚温淬火对堆焊层组织的影响

亚温淬火后 NiCrMo-3 堆焊层的显微组织如图 4 所示, 可以看出, 未淬火堆焊层的组织主要为块状镍基

奥氏体组织, 晶粒较大, 堆焊层和基体间有明显的边界。而亚温水淬和油淬后的显微组织呈现为不规则的白色絮状奥氏体组织, 主要为 Cr_2Ni_3 , 无明显的晶界, 在组织间还均匀分布有 CrO_2 、 CrN 金属间化合物, 由于未完全奥氏体化, 块状组织较少, 同时由于油淬更平缓的冷却特性, 金属间化合物分布更分散, 尺寸约为 $5\ \mu\text{m}$ 。

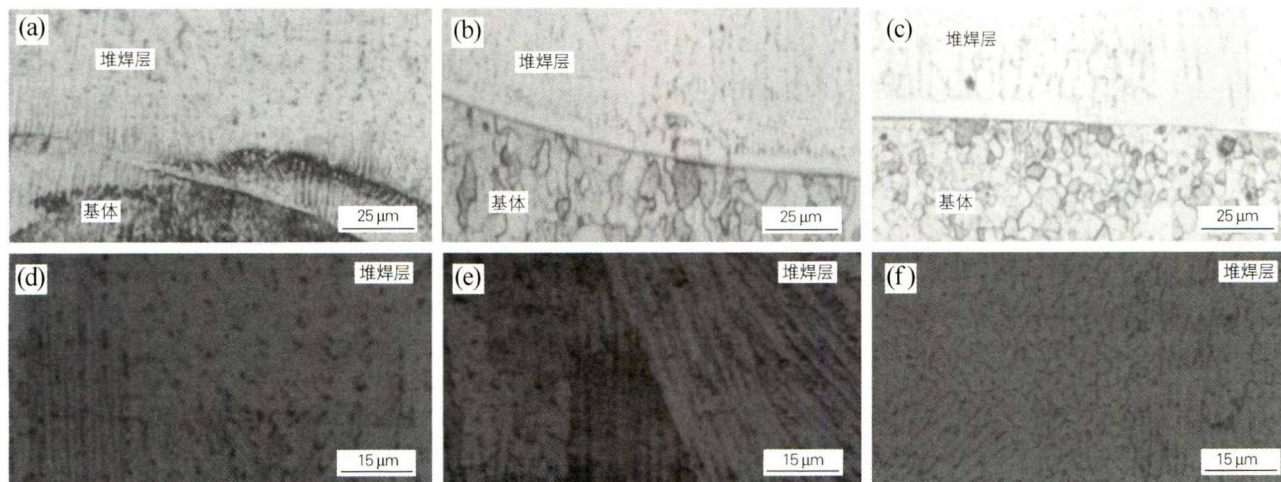


图4 NiCrMo-3 堆焊层的显微组织

(a, d) 未淬火; (b, e) 亚温水淬; (c, f) 亚温油淬

Fig. 4 Microstructure of the NiCrMo-3 surfacing layer

(a, d) without quenching; (b, e) subcritical quenching in water; (c, f) subcritical quenching in oil

对亚温淬火后的 NiCrMo-3 堆焊层进行 X 射线衍射分析发现 (如图 5(a)), 未淬火堆焊层的主要物相组成为游离 Cr 和 Cr_2Ni_3 化合物。亚温水淬后 Cr_2Ni_3 化合物分解, 含量降低, 主要产生了游离 Cr 及其氧化物 (如 CrO_2), 还有 Ni-NiFe₂O₄ 镍铁氧化物。除此以外, 由于与高温空气接触, 堆焊层表面有少量 CrN 产生, 这可能会增加表面硬度并改变其耐磨性。通过 EDS 对堆焊层的元素分布进行线扫描分析可知 (如图 5(b)), 相比于 Q345 基体材料, NiCrMo-3 堆焊层具有较高的 Ni、Cr 元素含量, 其中含量由高到低分别为 $\text{Ni} > \text{Cr} > \text{Mo}$ 。

2.2 亚温淬火对堆焊层硬度和耐磨性能的影响

NiCrMo-3 堆焊层的显微硬度变化如图 6(a) 所示, 可以看出, 显微硬度由堆焊层-过渡层-基体逐渐降低, 未淬火堆焊层的硬度约为 205 HV0.5, 过渡层的平均硬度约为 170 HV0.5, 基体层的平均硬度约 135 HV0.5。亚温油淬对高合金含量的镍基堆焊层和过渡层的硬度影响不大, 但基体硬度增加, 达 160 HV0.5 以上。相比油淬, 亚温水淬对整个试样的硬度有较大影响, 其中镍基堆焊层的平均硬度达 230 HV0.5 以上, 这主要是由于小尺寸的硬质金属间化合物固溶到奥氏体基体中所致; 受元素扩散的影响, 过渡层和基体层的平均硬度

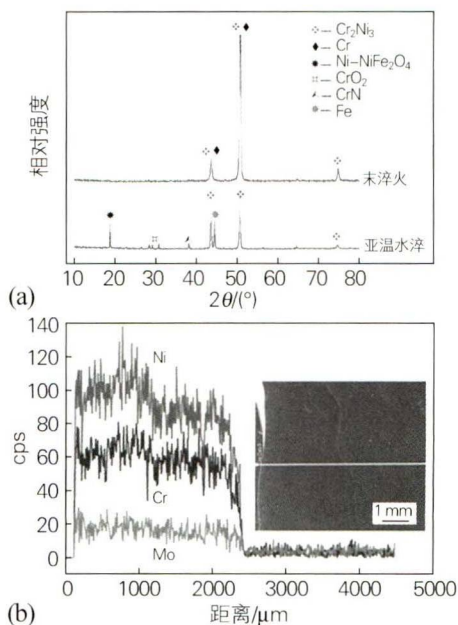


图5 NiCrMo-3 堆焊层的 XRD 分析(a) 和 EDS 线扫描分析(b)

Fig. 5 XRD patterns(a) and EDS line scanning analysis(b) of the NiCrMo-3 surfacing layer

达 185 HV0.5。结合磨损量测试结果 (如图 6(b)) 可知, 水淬后表面硬度增加有助于提高材料的耐磨性。

图 7 为亚温淬火后 NiCrMo-3 堆焊层摩擦因数的

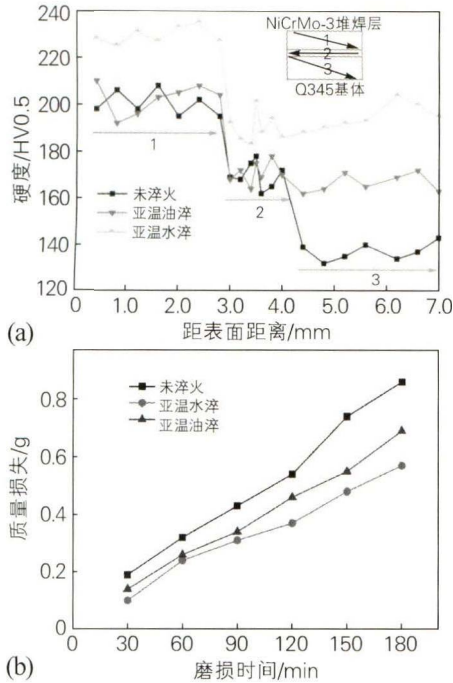


图 6 NiCrMo-3 堆焊层的显微硬度 (a) 和质量损失 (b)
Fig. 6 Microhardness (a) and mass loss (b) of the NiCrMo-3 surfacing layer

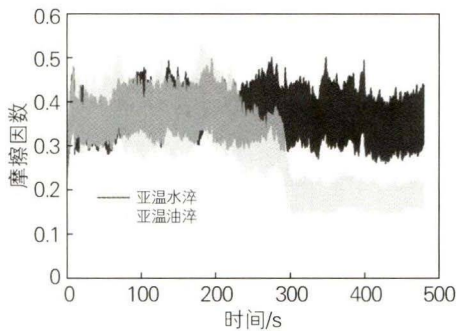


图 7 亚温淬火后 NiCrMo-3 堆焊层的摩擦因数
Fig. 7 Friction factor of the NiCrMo-3 surfacing layer after subcritical quenching

变化,由图 7 可知,虽然水淬和油淬后表面硬度并不相同,但在摩擦前期,两种试样的表面摩擦因数都在 0.28~0.45 之间。随着摩擦的进行,油淬后的镍基堆焊层摩擦因数降低,耐磨性得到改善,这主要是由于软硬组织间的相互协同,软相组织在磨痕表面可有效保护硬质磨屑的分离、脱落,有利于摩擦表面润滑体系的建立,改善材料表面的耐磨性。

2.3 亚温淬火对堆焊层力学性能的影响

亚温淬火后 NiCrMo-3 堆焊层/Q345 钢基体复合试样的应力-应变曲线如图 8 所示。分析可知,亚温油淬后复合试样的抗拉强度为 331 MPa,亚温水淬后堆焊层-基体复合试样的抗拉强度可达 515 MPa,与未经热处理试样的抗拉强度(281 MPa)相比显著增强,但整体塑性变形能力降低,断后伸长率减小,其中亚温油淬试样的断后伸长率约为 16.1%,亚温水淬试样断后伸长率约为 9.2%,未淬火试样断后伸长率约为 18.2%。

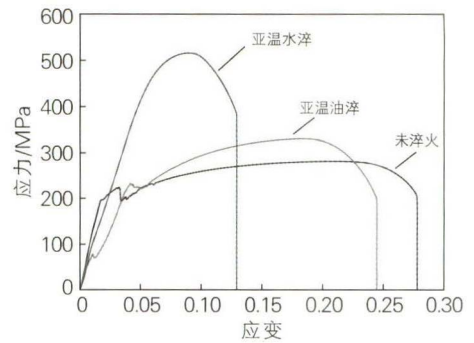


图 8 亚温淬火后 NiCrMo-3 堆焊层/Q345 钢的应力-应变曲线
Fig. 8 Stress-strain curves of the NiCrMo-3 surfacing layer/Q345 steel after subcritical quenching

图 9 所示为 NiCrMo-3 堆焊层的拉伸断口形貌。可见未淬火堆焊层的拉伸断口分布有大小不一的韧窝,形态细小、致密,断裂形式表现为典型的韧性断裂;

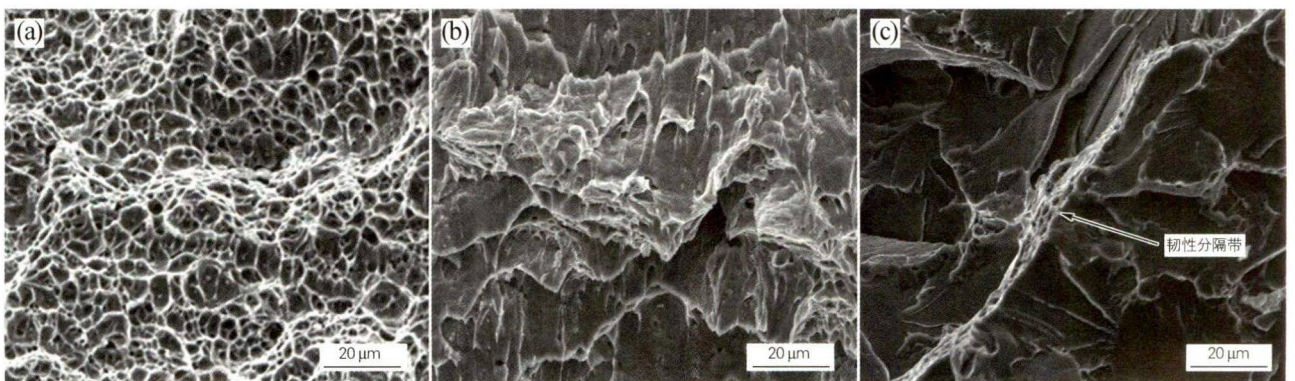


图 9 NiCrMo-3 堆焊层的拉伸断口形貌
(a) 未淬火;(b) 亚温水淬;(c) 亚温油淬

Fig. 9 Tensile fracture morphologies of the NiCrMo-3 surfacing layer
(a) without quenching; (b) subcritical quenching in water; (c) subcritical quenching in oil

亚温油淬后的断口表面有明显的撕裂断面,为坡度台阶断面,有起伏涟漪,综合呈现为混合型断裂特征。亚温水淬后的断口平整光滑,为沿晶脆性断裂形态,受加热温度和堆焊层化学成分的影响,在光滑的断面间分布有细小晶粒组成的韧性分隔带。

3 结论

1) NiCrMo-3 堆焊层经亚温水淬、油淬后的显微组织呈现为不规则的白色絮状奥氏体,有黑色的 Cr_2Ni_3 金属间化合物在基体组织间分布。亚温水淬后 Cr_2Ni_3 含量降低,分解并产生游离 Cr 及其氧化物(如 CrO_2),另外还有 $\text{Ni-NiFe}_2\text{O}_4$ 镍铁氧化物和少量 CrN 生成。

2) 亚温油淬可使基体硬度增加,达 160 HV0.5 以上,但对镍基堆焊层和过渡层的硬度影响不大。亚温水淬后镍基堆焊层的平均硬度达 230 HV0.5 以上,过渡层和基体的平均硬度为 185 HV0.5 左右。磨损前期亚温油淬和水淬后的堆焊层具有相近的表面摩擦因数(0.28~0.45),磨损后期,油淬试样的摩擦因数降低至 0.2 左右,耐磨性能得到改善,亚温油淬后的镍基堆焊层具有较好的耐磨性。

3) 亚温淬后 NiCrMo-3 堆焊层/Q345 钢基体复合试样的抗拉强度增加,塑性变形能力降低。与未淬火时相比,亚温油淬后复合试样的抗拉强度增加约 50 MPa,亚温水淬后堆焊层复合试样的抗拉强度增加约 230 MPa,由于整体塑性降低,其中亚温油淬试样的断后伸长率约为 16.1%,亚温水淬试样断后伸长率约为 9.2%。

参考文献:

- [1] 肖新华,李辉燕. 镍铬基合金管结构 GTAW 打底焊接变形和残余应力的有限元预测[J]. 热加工工艺, 2013, 42(13): 171-173.
Xiao Xinhua, Li Huiyan. Finite element prediction of residual stress and deformation for nickel-chromium based alloy tube structure GTAW bottom welding[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(13): 171-173.
- [2] 陈志超,陈广帅,朱庆波,等. 镍基自熔合金的氩弧堆焊工艺研究[J]. 焊接技术, 2019, 40(8): 58-61.
Chen Zhichao, Chen Guangshuai, Zhu Qingbo, et al. Study on argon arc surfacing process of nickel-based self-melting alloy[J]. Welding Technology, 2019, 40(8): 58-61.
- [3] 方迪生,高永光,刘万存,等. 双钨极镍基合金堆焊层组织与性能研究[J]. 焊接技术, 2020, 49(1): 26-29.
Fang Disheng, Gao Yongguang, Liu Wancun, et al. Study on the microstructure and properties of double tungsten nickel based-alloy surfacing layer[J]. Welding Technology, 2020, 49(1): 26-29.
- [4] 张伟,朵元才,张建晓,等. 热丝 TIG 堆焊 Alloy59 镍基合金工艺及其堆焊层性能研究[J]. 压力容器, 2020, 37(5): 13-17.
Zhang Wei, Duo Yuancai, Zhang Jianxiao, et al. Research on hot-wire TIG surfacing nickel-based Alloy59 process and its surfacing properties[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(5): 13-17.
- [5] 金亮,匡艳军,邱振生,等. 核电厂在制蒸汽发生器管板损伤缺陷修复方案研究[J]. 电焊机, 2019, 49(9): 42-48.
Jin Liang, Kuang Yanjun, Qiu Zhensheng, et al. Research on the repair schemes of the damaged tube-sheet on a fabricating steam generator of a nuclear power plant[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(9): 42-48.
- [6] 薛茂权. 含石墨镍铬基合金的高温氧化行为[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(10): 515-518.
Xue Maoquan. Oxidation behaviors of Ni-Cr-based super alloy at high temperatures[J]. Corrosion and Protection, 2007, 28(10): 515-518.
- [7] 汪彬,于强秀,朱彦明,等. 镍基 625 复合管组对错边修复工艺研究[J]. 焊接技术, 2020, 49(6): 66-68.
Wang Bin, Yu Qiangxiu, Zhu Yanming, et al. Study on repairing technology of wrong side of nickel base 625 composite pipe[J]. Welding Technology, 2020, 49(6): 66-68.
- [8] 周义琳,夏胜登,包孔,等. 自航式绞吸挖泥船耳轴堆焊工艺性能试验[J]. 造船技术, 2019(4): 57-60.
Zhou Yilin, Xia Shengdeng, Bao Kong, et al. Surfacing performance test on trunnion of self-propelled cutter-suction dredge[J]. Marine Technology, 2019(4): 57-60.
- [9] 冯勋,杨云丽. AP1000 汽水分离再热器中一、二级再热器管板的镍基合金堆焊[J]. 金属加工(热加工), 2020(1): 34-36.
- [10] 武英海,高兰云,王家开,等. Cr-Mo 钢堆焊镍基合金工艺评定及应用[C]//核能行业焊接技术经验交流会论文集. 2019: 56-59.
Wu Yinghai, Gao Lanyun, Wang Jiakai, et al. Process evaluation and application of nickel base alloy surfacing for Cr-Mo steel[C]//Symposium on Welding Technology and Experience Exchange in Nuclear Energy Industry. 2019: 56-59.
- [11] 张兆林. ENiCrMo-3 等级镍基合金单层带极电渣堆焊工艺研究[J]. 电焊机, 2020, 50(5): 67-72.
Zhang Zhaolin. Research on welding procedure of single-layer electroslag surfacing with band-electrode for ENiCrMo-3 grade nickel-base alloy[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(5): 67-72.
- [12] Kimura M, Fuji A, Konnoc Y, et al. Investigation of fracture for friction welded joint between pure nickel and pure aluminium with post-weld heat treatment[J]. Materials and Design, 2014, 57: 503-509.
- [13] Mousavi S, Sartangi P F. Effect of post-weld heat treatment on the interface microstructure of explosively welded titanium-stainless steel composite[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 494(1/2): 329-336.
- [14] 陆传航. 镍基合金复合管焊后热处理工艺[J]. 焊接技术, 2020, 49(1): 51-55.
Lu Chuanhang. PWHT welding procedure for nickel alloy cladding pipe[J]. Welding Technology, 2020, 49(1): 51-55.
- [15] 郭龙龙. 脉冲 TIG 堆焊 Inconel 625 工艺及堆焊组织性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
Guo Longlong. Study on process, microstructure and performance of Inconel 625 cladding layer deposited using pulsed TIG[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [16] 卿颖. 焊接工艺对 Inconel 625/Q235B 堆焊层组织性能的影响[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
Qing Ying. Effect of welding technology on microstructure and properties of Inconel 625/Q235B surfacing layer[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.