

热处理对 Inconel625/X90 堆焊层组织及性能的影响

刘伟¹, 康全¹, 李阳², 刘俐超¹, 周志民¹, 张军磊¹, 杨眉¹

(1.西南石油大学 材料科学与工程学院, 成都 610500;

2.四川石油天然气建设工程有限责任公司, 成都 610500)

摘要: **目的** 研究不同固溶温度对堆焊层组织及力学性能的影响规律。**方法** 对 Inconel625 堆焊层分别进行 850、910、980 °C 的固溶处理, 采用金相显微镜、SEM、EDS 进行显微组织观察及堆焊层元素分析, 并测试其硬度。**结果** 堆焊熔合线附近出现魏氏组织和马氏体层, 且合金元素含量迥异, 在基材和熔敷金属之间形成较高的浓度差, 使硬度分布极不均匀, 经不同热处理后, 魏氏组织得以消除, 马氏体层也随着温度的增加而逐渐消失, 合金元素的分布变均匀。850 °C 固溶处理后, 敷材扩散区的 Ni、Cr 和 Fe 质量分数分别为 36.14%、28.31% 和 18.27%, 相比于堆焊态, 合金元素发生了较大扩散; 980 °C 固溶处理时, 合金元素的分布最均匀, 相对于堆焊态合金元素的含量, Ni 含量下降约 16.27%, Cr 含量下降约 8.32%, Fe 含量上升约 37.76%。未处理时的硬度从敷材至基材呈先下降、后升高的 V 型趋势, 经 850 °C 和 980 °C 固溶处理后, 试样硬度趋于均匀, 热影响区硬度比未处理的有明显提高, 分别提高 24HV 和 32HV。**结论** 热处理后, 堆焊层的组织及元素分布变均匀, 硬度分布曲线趋于直线, 并随固溶温度的升高, 各区元素含量的波动逐渐减小, 元素分析曲线过渡平滑, 晶粒度逐渐增大。

关键词: 堆焊; 热处理; 显微组织; 力学性能; 魏氏组织

中图分类号: TG156; TG455 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0083-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.013

Effects of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Inconel625/X90 Surfacing Layer

LIU Wei¹, KANG Quan¹, LI Yang², LIU Li-chao¹, ZHOU Zhi-min¹, ZHANG Jun-lei¹, YANG Mei¹

(1.School of Material Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2.Sichuan Petroleum and Natural Gas Construction Engineering Co., Ltd, Chengdu 610500, China)

ABSTRACT: The work aims to study the law of influence of different solution temperature on microstructure and mechanical

收稿日期: 2017-11-02; 修订日期: 2018-01-24

Received: 2017-11-02; **Revised:** 2018-01-24

基金项目: 大学生创新创业计划训练项目 (201710615064); 四川省高等学校油气田材料重点实验室项目 (X151517KCL02); 西南石油大学课外开放实验重点项目 (KSZ17126)

Fund: Supported by the College Students Innovation Industry Program Training Project (201710615064); Sichuan Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Field Materials Project (X151517KCL02); The Key Project of the Extra-curricular Opening Experiment of Southwest Petroleum University (KSZ17126)

作者简介: 刘伟 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为油气用材料焊接及热处理。

Biography: LIU Wei (1991—), Male, Master, Research focus: oil and gas welding and heat treatment.

通讯作者: 杨眉 (1971—), 男, 博士, 副教授, 从事金属材料设计加工研究。

Corresponding author: YANG Mei (1971—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: design and processing of metal materials.

properties of surfacing. Solution treatment was applied to Inconel625 surfacing layer at 850 °C, 910 °C and 980 °C, respectively. The microstructure of surfacing layer was observed and surfacing layer elements were analyzed with metallurgical microscope, SEM and EDS. Hardness of the layer was tested as well. The results showed that there were Widmanstatten structure, Martensitic layers, and content of alloying element varied significantly around surfacing weld line. High concentration difference between substrate and deposited metal resulted in an extremely uneven hardness distribution. After different heat treatment, Widmanstatten structure was eliminated, Martensite layer also gradually disappeared as the temperature increased, the distribution of alloying elements became uniform. The content of Ni, Cr and Fe in the diffusion zone changed to 36.14%, 28.31% and 18.27% at 850 °C. Compared with the content of alloying element in surfacing state, the content of Ni, Cr and Fe in the diffusion zone changed greatly, and the element distribution was the most uniform at 980 °C. In alloying elements, the content of Ni decreased by nearly 16.27%, the content of Cr decreased by nearly 8.32% and the content of Fe increased by nearly 37.76%. Untreated hardness from the dressing to the substrate first decreased and then increased (V trend), sample hardness at 850 °C and 980 °C tended to be uniform, hardness of heat-affected zone was 24HV and 32HV, respectively, obviously higher than that of untreated zone. After heat treatment, microstructure and element distribution of surfacing layer become uniform, and hardness tends to be linear. With the increase of solution temperature, the content of elements in each zone decreases gradually, the curve transits smoothly and grain size increases gradually.

KEY WORDS: surfacing; heat treatment; microstructure; mechanical property; Widmanstatten structure

使用高强度管线钢不仅可提高油气管道输送能力,还可降低管道壁厚,节约管道建设成本。X90 作为第三代管线钢,具有高强度和韧性,但面对强腐蚀性油气田,X90 钢的耐蚀性不足^[1-3]。双金属复合管可很好地解决这一问题,其覆层采用耐蚀合金,基材为碳钢,使管道不仅具有优异的耐蚀性,而且具有高强度,因而双金属复合管具有良好的发展前景^[4-6]。镍基合金兼有优异的抗多种介质腐蚀性能,近几年来,随着酸性油气田环境逐渐苛刻与恶劣,该合金已逐渐被广泛应用。

国内外学者对镍基合金堆焊层进行了相应的研究和探索。高伟等^[7]认为在 X65 表面堆焊镍基合金,焊接电流越大,热输入就越大,从而使堆焊层耐蚀合金元素的稀释率增加,导致堆焊层的耐蚀性下降。Rajani 等^[8]认为 Inconel625 堆焊层中,若 Fe 元素含量超过 12 %,堆焊层的耐蚀性能将严重降低。Janusz Adamiec^[9]等认为 Inconel625 堆焊层在强酸气体中具有优异耐蚀性,是由于堆焊层表面不断生成一层氧化膜,其成分为 Cr₂O₃,但堆焊层的 Fe 含量过高会对堆焊层的耐蚀性产生不利影响。吴向清等^[10]认为对 N80 钢-镍基合金涂层进行 600 °C 热处理后,涂层组织更加致密,涂层耐蚀性能较原始涂层提高了大约 100 倍。邸新杰等^[11]认为 Inconel625 在进行 850 °C 固溶

处理后会析出大量的 δ,从而使力学性能提高。Qi 等^[12]认为对镍基合金 718 进行时效处理会有 γ'析出,从而提高强度和韧性。G. P. Dinda 等人^[13]认为对 Inconel625 薄壁进行 700 °C 热处理,组织中有 γ'相和 γ"相析出,使其力学性能显著提高。

X90 钢或将成为下一代管线钢的理想选择,但对 X90 堆焊 Inconel625 热处理工艺的研究甚少。本文研究不同固溶温度对堆焊组织及力学性能的影响规律,为科学制定 Inconel625/X90 堆焊焊后的热处理工艺奠定基础。

1 试验材料和方法

采用热丝 TIG 焊,在 X90 上堆焊 Inconel625,对应的焊丝为 ENiCrMo-3,直径为 3.2 mm,其主要成分见表 1。基材尺寸为 100 mm×200 mm×16.8 mm,堆焊厚度为 3~4 mm,然后在 SX-10-12 型箱式电阻炉中进行 850 °C (空冷)×2 h、910 °C (空冷)×2 h、980 °C (空冷)×2 h 热处理。

采用 4% (质量分数) 硝酸酒精对 X90 进行侵蚀,再对 Inconel625 进行电解抛光。采用 Axio Imager A2m 型金相显微镜对堆焊层的微观组织进行观察。利用 HVS-10ZC 维氏硬度计,按照 GB/T 4340.1—2009 测

表 1 X90 与 ENiGrMo-3 化学成分

Tab.1 Chemical composition of X90 and ENiGrMo-3												wt%
Alloy	C	Si	Mn	P	S	Nb+Ta	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	Fe
X90	0.06	0.25	1.90	≤0.008	≤0.002	0.09	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0		Bal.
ENiGrMo-3	<0.1	<0.5	<0.5			3.15~4.15	20~23	>58	8~10	<0.4	<0.4	<5

试堆焊层至基材处的显微硬度, 测试载荷为 1000 g, 加载时间为 15 s, 并对堆焊层过渡区进行 EDS 分析。

2 结果及分析

2.1 显微组织分析

热处理前后熔合线附近 X90 侧的显微组织如图 1 所示。堆焊组织为板条铁素体、板条贝氏体及魏氏组织。图 1a 中可以清楚地分辨出锯齿状边界, 组织严重不均匀, 这会极大地降低材料韧性和塑性。而魏氏组织将导致 HAZ 强度及冲击韧性等力学性能显著降低, 使 HAZ 容易发生脆性开裂, 这是焊后热处理原因之一。粗大奥氏体晶粒内部分布着板条铁素体、板条贝氏体、粒状贝氏体组织, 贝氏体组织不再呈弥散分布。热处理后 (图 1b—d), 试样熔合线附近的基材组织得到明显改善, 与基材组织趋于一致, 基材非热影响区的晶粒长大明显。

850 °C 的组织为多边形铁素体、板条铁素体、粒状贝氏体, 贝氏体有弥散分布向团状分布的趋势。910 °C 的组织由块状铁素体和粒状贝氏体组成, 组织与 850 °C 的一致, 但组织更加粗大, 贝氏体团状分布更显著。热处理后, 基材熔合线附近的粗大过热铁素体 (魏氏组织) 消失, 而合金元素在扩散、重结晶的作用下, 大大地改善了熔合区性能, 增强了堆焊层与基体的结合性能, 有效降低了堆焊层在工作过程中的剥落倾向, 使工件的使用寿命大大增加^[14]。

图 2 为经热处理后 Inconel625 侧的显微组织。由图 2 可以看出, 由于成分过冷导致熔合线至熔敷金属顶部出现平面晶—胞状晶—树枝晶—等轴晶的组织转变, 平面晶是堆焊过程中温度梯度 G 和凝固速度 R 综合作用的结果。研究表明^[15], 熔池凝固速度与焊接速度存在如下关系:

$$R = V \cos \alpha \quad (1)$$

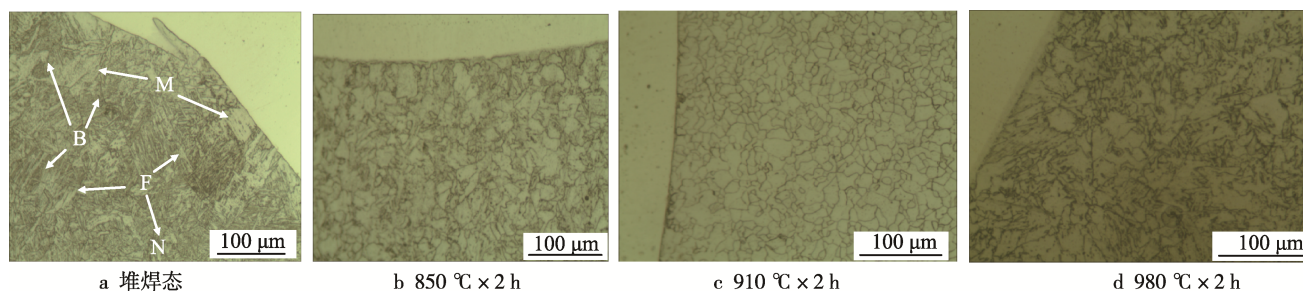


图 1 不同热处理后 X90 侧组织形貌

Fig.1 Morphology on X90 side after different heat treatment: (a) surfacing state, (b) 850 °C×2 h, (c) 910 °C×2 h, (d) 980 °C×2 h

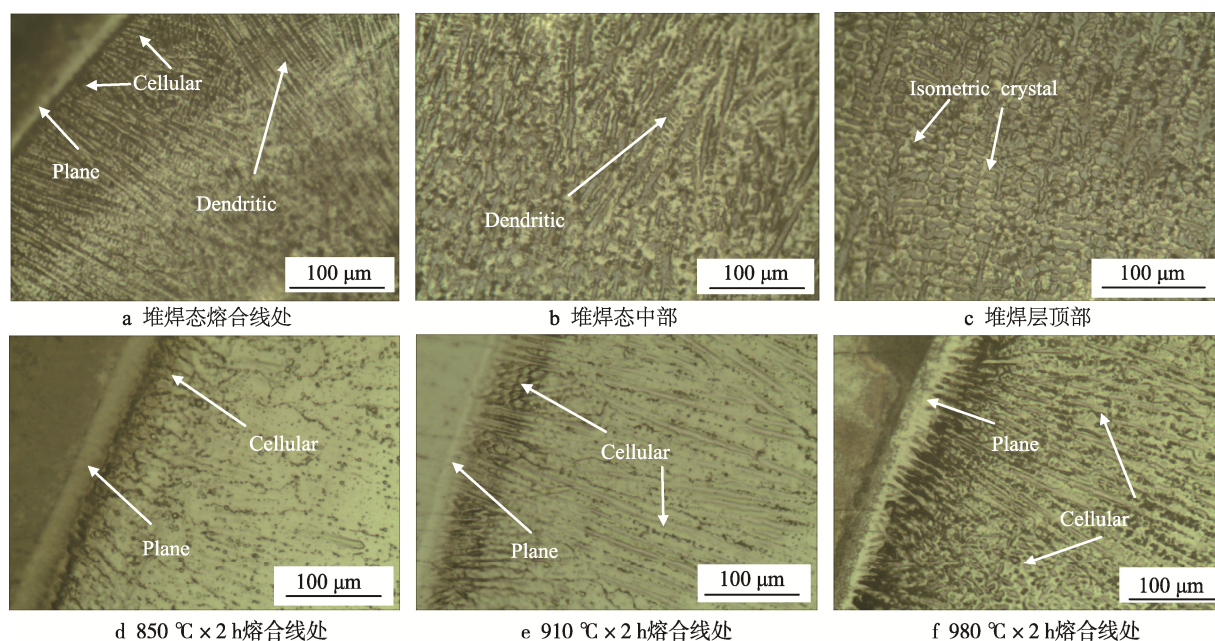


图 2 不同热处理后 Inconel625 侧组织形貌

Fig.2 Morphology on Inconel625 side after different heat treatment: (a) surfacing weld line, (b) surfacing state middle, (c) surfacing layer top, (d) 850 °C×2 h weld line, (e) 910 °C×2 h weld line, (f) 980 °C×2 h weld line

式中: R 为熔池凝固速度; V 为焊接速度; α 为 R 与 V 方向的夹角。

在熔池底部, 即熔合线附近, α 接近 90° , 液态金属的凝固速度 R 极小。同时, 母材温度远远低于液态熔池温度, 导致熔池底部产生很大的温度梯度 G , 在堆焊层底部形成平面晶区。该区由细小板条马氏体、少量孪晶马氏体和碳化物组成, 也称马氏体层。马氏体为淬硬相, 导致材料变脆, 将成为堆焊层裂纹源萌生的地方^[15]。随距熔合线距离的增加, 温度梯度 G 和凝固速度 R 也发生改变。温度梯度变小, 熔池金属凝固模式由平面晶向胞状晶、树枝晶和等轴晶转变。

在堆焊层中部, 柱状树枝晶的生长方向比较紊乱, 表现出择优生长。在堆焊层的中部区域, 枝晶变细小, 柱状枝晶逐渐转化为等轴枝晶, 生长方向比较紊乱。这是由于堆焊层上部, 液态熔池金属既可通过基体散热, 又可通过周围环境散热, 且电弧热量分布不均匀, 只要某区晶体的择优取向与该区散热方向一致, 该晶体就可长大。堆焊层上部组织也出现枝晶生长紊乱的现象。X90 对镍基合金稀释及冷却过快导致扩散不充分, 使熔合线附近的合金元素含量较低, 导致 M_s 点较高, 马氏体转变区变宽及元素分布不均匀引起的偏析, 使马氏体层特征明显, 枝晶形貌清晰可见。而经热处理后, 马氏体层和枝晶形貌都不突出,

枝晶花样变简单, 枝晶干变粗大。随热处理温度的升高, 马氏体层的形貌愈不明显, 元素充分扩散使熔合线处的 Ni、Cr 元素含量提高, Ni 元素有助于提高奥氏体的稳定性, 促进奥氏体的形成。随固溶温度的升高, 晶粒尺寸明显变大, 当温度达 980°C 时, 合金晶粒长大最明显。因固溶处理时, 通过回复和再结晶使晶界迁移, 引起晶粒间相互吞并而长大。在一定的保温时间下, 温度越高, 析出相对晶界的钉扎作用越弱, 这使晶体越易发生回复和再结晶, 晶界迁移越快, 晶粒尺寸越大。

2.2 堆焊层能谱分析

如图 3 所示, 堆焊层元素含量呈现三段式, 合金元素含量迥异。Inconel625/X90 堆焊层的主要元素为 Fe、Ni、Cr、O、Mo 和 Nb。堆焊过程中, 基料与堆焊金属熔化并混合, 在基材和熔敷金属之间形成较高的浓度差, 从而发生扩散。基材扩散区的 Ni、Cr、Fe 质量分数分别为 14.89%、11.70%、65.96%, 而敷材扩散区的 Ni、Cr、Fe 质量分数分别为 41.67%、28.89%、13.32%。由于堆焊基材侧的温度较低, 加速了熔池冷却, 使 Ni、Cr、Fe 等元素未充分扩散, 导致基材扩散区和敷材扩散区的元素含量相差甚大, 界面液相混合区的元素含量波动显著^[16]。 850°C 处理

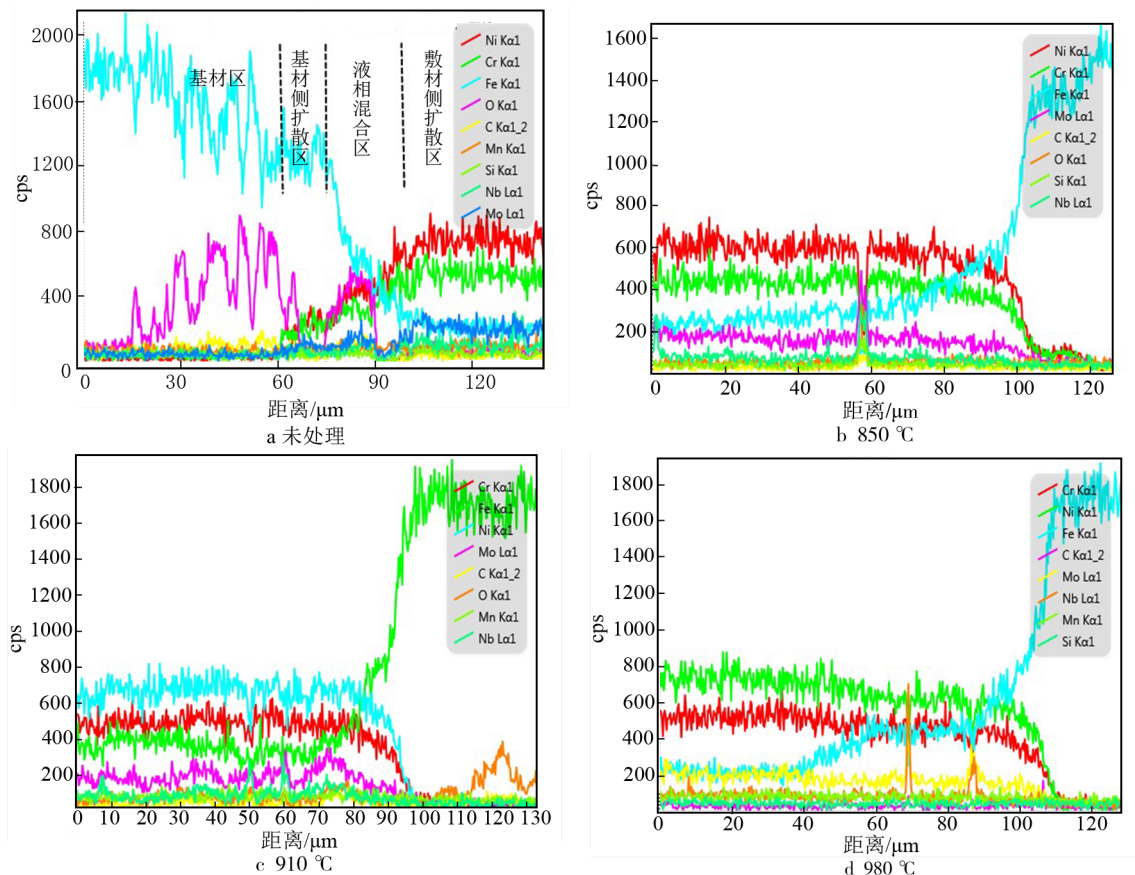


图3 EDS线扫描结果

Fig.3 Results of EDS line scanning:(a) untreated, (b) 850°C , (c) 910°C , (d) 980°C

后, 敷材扩散区的 Ni、Cr、Fe 质量分数变为 36.14%、28.31% 和 18.27%, 相比于堆焊态, 发生了较大扩散; 980 °C 处理后, 基材扩散区、液相混合区和敷材扩散区的元素最均匀, Ni 含量下降约 16.27%, Cr 含量下降约 8.32%, Fe 含量上升约 37.76%。这说明热处理使堆焊层元素发生迁移现象, 并随固溶温度的升高, 基材扩散区、液相混合区和敷材扩散区元素含量的波动逐渐减小, 曲线过渡平滑。

2.3 堆焊层硬度分析

由图 4 可知, 未处理试样的硬度从敷材至基材呈先下降、后升高的 V 型趋势, 硬度最低在熔合线基材侧, 为 169.3HV; 熔敷金属的硬度略有下降, 约下降 20HV。由于冷却速度快, 元素未得到充分扩散, 使敷材稀释严重, 合金元素降低, 从而导致硬度下降。熔合线靠近基材侧, 基材硬度下降较明显, 约下降 80HV, 这是因为原始组织细密, 经冷弯处理后, 位错密度增加, 继续变形困难, 故硬度较高。而堆焊过程中, 基材热影响区经重结晶及回复再结晶后, 位错密度下降, 且堆焊使基材晶粒变大, 两者的共同作用导致基材硬度明显降低^[17]。固溶处理后, 热影响区的硬度发生明显变化, 850 °C 和 980 °C 试样的硬度分布曲线趋于直线, 热影响区的硬度比未处理试样的有明显提高, 分别提高 24HV 和 32HV, 这是由于经热处理后, 基材扩散区、液相混合区和敷材扩散区的合金元素分布均匀。

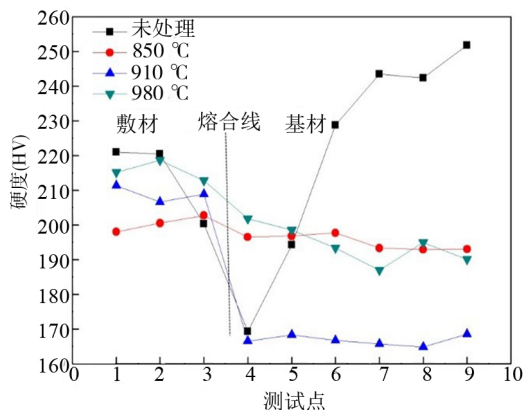


图 4 堆焊层硬度分布

Fig.4 Hardness distribution of surfacing layer

3 结论

1) 热处理后的熔合线 X90 侧均是多边形铁素体、板条铁素体、粒状贝氏体, 而堆焊态是由板条铁素体、板条贝氏体、魏氏组织组成。经热处理后, 魏氏组织得以消除, 且随着热处理温度的升高, 熔合线附近马氏体层也在逐渐减弱。

2) 堆焊态元素含量呈现三段式, 合金元素含量

迥异, 在基材和熔敷金属之间形成较高的浓度差, 980 °C 热处理后, 试样的元素分布最均匀。相对于堆焊态合金元素含量, 敷材扩散区的 Ni 含量下降约 16.27%, Cr 含量下降约 8.32%, Fe 含量上升约 37.76%。固溶温度越高, 基材扩散区、液相混合区和敷材扩散区的元素扩散越充分, 含量越均匀。

3) 未处理试样的硬度从敷材至基材呈先下降、后升高的 V 型趋势, 最低在熔合线基材侧, 为 169.3HV。850、980 °C 处理后的试样硬度分布曲线趋于直线, 热影响区较未处理堆焊层有明显提高, 分别提高了 24HV 和 32HV。

参考文献:

- [1] 范军, 蒲继文, 周丹, 等. 天然气长输管道建设对生态环境的影响及防范措施[J]. 油气田环境保护, 2010(3): 9-12.
FAN Jun, PU Ji-wen, ZHOU Dan, et al. Effects of Natural Gas Long-distance Pipeline Construction on Ecological Environment and Preventive Measures[J]. Oil and Gas Field Environmental Protection, 2010(3): 9-12.
- [2] WANG X, LI X, WU S, et al. Effect of Austenitic State on the Multi-phase Control in X90 Pipeline Steel with High Nb Content[J]. Materials Today Proceedings, 2015, 2(2): S701-S706.
- [3] VLAHOVIC M, SAVIC M. Materials and Design[J]. Materials & Design, 2012, 4(2): 133-169.
- [4] 曾德智, 杜清松, 谷坛, 等. 双金属复合管防腐技术研究进展[J]. 油气田地面工程, 2008(12): 64-65.
ZENG De-zhi, DU Qing-song, GU Tan, et al. Study on Anti-corrosion Technology of Bimetallic Composite Pipe[J]. Surface Engineering of Oil and Gas Field, 2008(12): 64-65.
- [5] 郭崇晓, 张燕飞, 吴泽. 双金属复合管在强腐蚀油气田环境下的应用分析及其在国内的发展[J]. 全面腐蚀控制, 2010, 24(2): 13.
GUO Chong-xiao, ZHANG Yan-fei, WU Ze. The Application Analysis of Bimetal-pipe in Oil and Gas Fields with High Corrosion and Its Interior Development[J]. Comprehensive Corrosion Control, 2010, 24(2): 13.
- [6] WEN P, FENG Z, ZHENG S. Formation Quality Optimization of Laser Hot Wire Cladding for Repairing Martensite Precipitation Hardening Stainless Steel[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 180-188.
- [7] 高伟, 刘志豪. 镍基合金等离子堆焊层的组织和性能[J]. 石油机械, 2012(3): 30-34.
GAO Wei, LIU Zhi-hao. The Structure and Property of

- the Nickel Base Alloy Plasma Surfacing Welding Layer[J]. Petroleum Machinery, 2012(3): 30-34.
- [8] RAJANI H R Z, MOUSAVI S A A A, SANI F M. Comparison of Corrosion Behavior between Fusion Cladded and Explosive Cladded Inconel 625/Plain Carbon Steel Bimetal Plates[J]. Materials & Design, 2013, 43: 467-474.
- [9] ADAMIEC J. High Temperature Corrosion of Power Boiler Components Cladded with Nickel Alloys[J]. Materias Characterization, 2009, 60(10): 1093-1099.
- [10] 吴向清, 谢发勤, 孙黎, 等. 热处理对 N80 钢表面镍基合金涂层 CO₂ 腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(3): 190-192.
- WU Xiang-qing, XIE Fa-qin, SUN Can, et al. Effect of Heat Treatment on CO₂ Corrosion Resistance of Ni-based Alloy Coating on N80 Steel[J]. Corrosion and Protection, 2012, 33(3): 190-192.
- [11] 邸新杰, 邢希学, 王宝森. Inconel 625 熔敷金属中 δ 相的形核与粗化机理[J]. 金属学报, 2014(3): 323-328.
- DI Xin-jie, XING Xi-xue, WANG Bao-sen. Nucleation and Coarsening Mechanism of δ Phase in Inconel 625 Deposited Metal[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014(3): 323-328.
- [12] QI H, AZER M, RITTER A. Studies of Standard Heat Treatment Effects on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Net Shape Manufactured Inconel718[J]. Metallurgical & Materials Transactions Part A, 2009, 40(10): 2410-2422.
- [13] DINDA G P, DASGUPTA A K, MAZUMDER J. Laser Aided Direct Metal Deposition of Inconel 625 Superalloy: Microstructural Evolution and Thermal Stability[J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 509(1): 98-104.
- [14] 汪中玮, 张清辉, 肖逸锋. 镍基高温耐磨无渣堆焊焊条及其热处理工艺[J]. 焊接学报, 2006, 27(1): 109-112.
- WANG Zhong-wei, ZHANG Qing-hui, XIAO Yi-feng. Nickel-based High-temperature Wear-resistant Non-slag Surfacing Electrode and Its Heat Treatment Process[J]. Journal of Welding, 2006, 27(1): 109-112.
- [15] 王昱成, 于捷, 李彦, 等. 异种钢熔合区马氏体相变过程及组织[J]. 焊接学报, 1999, 20(3): 147-152.
- WANG Yu-cheng, YU Jie, LI Yan, et al. Study on Martensitic Transformation Process and Microstructure of Dissimilar Steel Fusion Zone[J]. Welding Journal, 1999, 20(3): 147-152.
- [16] 夏佃秀, 王学林, 李秀程, 等. X90 级别第三代管线钢的力学性能与组织特征[J]. 金属学报, 2013, 49(3): 271-276.
- XIA Dian-xiu, WANG Xue-lin, LI Xiu-cheng, et al. Properties and Microstructure of Third Generation X90 Pipeline Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(3): 271-276.
- [17] 邵振遥, 史文博, 李壮, 等. 热处理对 X90 管线钢组织性能的影响[J]. 材料与冶金学报, 2016, 15(3): 225-229.
- SHAO Zhen-yao, SHI Wen-bo, LI Zhuang, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of X90 Pipeline Steel[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2016, 15(3): 225-229.