

CrNiMo-CrNi3Mo-CrNiMo 三层复合超高强度钢板开发

李雷¹ 李福坤^{2,3} 苏春霞^{2,3} 陈本文^{2,3} 杨晰^{2,3} 高山^{2,3}

(1 鞍钢股份有限公司制造管理部, 鞍山 114021; 2 海洋装备用金属材料及其应用
国家重点实验室, 鞍山 114009; 3 鞍钢股份有限公司技术中心, 鞍山 114009)

摘要 为了开发同时具有超高强度和良好韧性的低合金超高强度钢板, 采用 30MnCrNiMo 连铸坯和 33MnCrNi3Mo 钢锭, 经过真空复合焊接, 高温轧制, 淬火 + 低温回火热处理工艺研制出 15 mm CrNiMo-CrNi3Mo-CrNiMo 三层复合超高强度钢板; 利用探伤、拉伸、冷弯、冲击、硬度等试验检验其结合度和力学性能; 利用光学显微镜、扫描电镜等分析三层复合超高强度钢的组织 and 冲击断口形貌。结果表明, 采用该工艺生产的三层复合超高强度钢板结合性良好, 能够满足 GB/T 7734-2015 I 级探伤要求; 复合钢板的综合力学性能良好, 结合面处硬度值存在明显的过渡区域; 结合面组织和基体组织均为回火马氏体组织。

关键词 低合金超高强度钢 复合钢板 真空焊接 探伤

Development of CrNiMo-CrNi3Mo-CrNiMo Triple-Layer Clad Ultra-High Strength Steel Plate

Li Lei¹, Li Fukun^{2,3}, Su Chunxia^{2,3}, Chen Benwen^{2,3}, Yang Xi^{2,3} and Gao Shan^{2,3}

(1 Manufacturing Management Department of Angang Steel Co., Ltd, Anshan 114021;

2 State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009;

3 Technology Center of Angang Steel Co., Ltd, Anshan 114009)

Abstract In order to develop low alloy ultra-high strength steel with super high strength and good toughness, a 15 mm CrNiMo-CrNi3Mo-CrNiMo triple-layer clad ultra-high strength steel is developed by 30MnCrNiMo steel billet and 33MnCrNi3Mo steel ingot, the process consists vacuum combined welding, high temperature rolling, quenching and low temperature tempering heat treatment. The bonding degree and mechanical properties are tested by flaw detection, tensile, impact, cold bending and hardness tests. Microstructure and the impact fracture of triple-layer clad ultra-high strength steel are analyzed by means of optical microscope and scanning electron microscope. Results show that the triple-layer clad ultra-high strength steel produced by current process has good bonding properties and can satisfy the GB/T 7734-2015 I demand of flaw detection. The comprehensive mechanical properties of clad steel plate are fine, and there is obvious transition zone in hardness of the joint surface. Both the structure at bonding site and matrix structure are tempered martensite structure.

Material Index Low Alloy Ultra High Strength Steel, Clad Steel Plate, Vacuum Welding, Flaw Detection

低合金超高强度钢由于具有强度高、成本低、加工工艺简单等特点, 已经广泛应用到航空、航天、常规防护等对性能有特殊要求的领域, 并向着更高强度级别和更优综合力学性能的方向发展^[1-5]。但随着强度级别的不断提高, 塑韧性会急剧下降^[6-7], 很难满足用户的特殊使用要求。为了满足用户个性化需求, 开发具有特殊性能的超高强度钢, 本文通过试验研究了软-硬-软组合的三层复合超高强度钢的生产工艺, 探索生产超高强度钢的新途径, 为工业生产奠定基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料选用钢厂生产的 30MnCrNiMo 连铸坯和试验室自制的 33MnCrNi3Mo 钢锭。30MnCrNiMo 连铸坯生产工艺流程为: 铁水预处理-转炉冶炼-炉

外精炼(RH + LF)-喂线处理-板坯连铸, 连铸坯断面尺寸为 1 550 mm (宽度) × 230 mm (厚度)。33MnCrNi3Mo 为实验室 200 kg 真空感应炉冶炼的钢锭, 钢锭坯断面尺寸为 135 mm × 135 mm。试验钢化学成分如表 1 所示。

1.2 试验方法

采用轧制方法研制超高强复合钢板的工艺流程为: 坯料切割铣磨-坯料真空焊接-复合坯加热-复合坯轧制-复合钢板探伤-复合钢板切割-复合钢板淬火 + 回火热处理-复合钢板探伤-组织性能检验。其

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested steels / %

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
33MnCrNi3Mo	0.33	0.25	0.88	0.008 7	0.006 5	3.13	0.82	0.44
30MnCrNiMo	0.29	0.29	0.91	0.008 0	0.003 0	1.18	0.88	0.35

中,主要生产工艺流程大体分为3步:真空组合焊接、加热轧制、淬火+回火热处理。

1.2.1 真空组合焊接

30MnCrNiMo 钢碳当量为 0.766, 33MnCrNi3Mo 钢碳当量为 0.998, 两种高碳当量钢在焊接时易产生裂纹。焊接之前首先进行最佳焊接工艺参数摸索:先将 30MnCrNiMo 连铸坯和 33MnCrNi3Mo 模铸坯加工成 30 mm × 40 mm × 100 mm 的小钢块并且 6 个面铣磨, 铣磨后将表面的油污擦掉, 避免表面生锈影响焊接;在真空状态下进行焊接, 焊接过程中控制高压、束流、速度、偏扫和线能量 5 个参数, 使复合坯焊缝处不出现裂纹;沿着同一方向进行焊接, 使角部闭合, 确保在轧制过程中角部不发生开裂;焊缝熔深需达到一定深度, 确保轧制过程中焊缝不发生开裂, 使 2 块坯料能够完全复合, 最佳焊接工艺参数见表 2。

利用表 2 焊接工艺参数, 将尺寸为 25 mm (厚) × 100 mm (宽) × 170 mm (长) 的 2 块 30MnCrNiMo 钢和尺寸为 50 mm (厚) × 100 mm (宽) × 170 mm (长) 的 1 块 33MnCrNi3Mo 钢, 按照 1:2:1 的厚度配比, 在真空状态下, 焊接成外层为 30MnCrNiMo 钢, 内层为 33MnCrNi3Mo 钢的 100 mm × (厚) × 100 mm (宽) × 170 mm (长) 的三层复合坯, 如图 1 所示。同时加工两块与三层复合坯相同尺寸的 30MnCrNiMo 钢和 33MnCrNi3Mo 钢, 作为参照样。

1.2.2 加热轧制

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

项目	数值
高压/kV	60
束流/mA	60
速度/(mm · min ⁻¹)	320
偏扫	0
线能量/(kJ · cm ⁻¹)	6.75

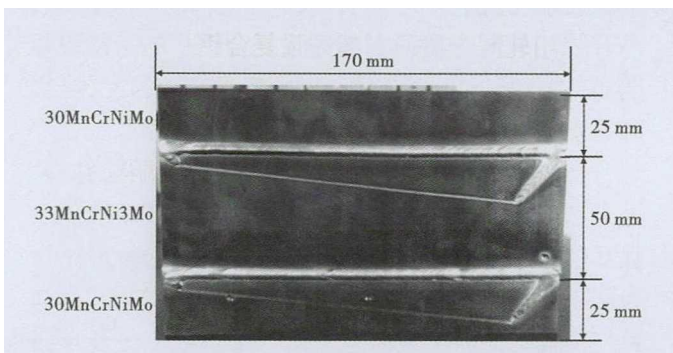


图 1 三层复合坯形貌

Fig. 1 Morphology of three-layer composite blank

三层复合坯以及参照样加热温度为 1 200 °C, 保温 1.5 h, 为了促进不同组元间物理结合, 复合坯轧制必须具有较高的温度以及较大的道次压下率^[8-9], 因此利用实验室 550 mm 中厚板轧机, 采用高温、慢辊速、大压下的轧制工艺进行生产: 开轧温度约为 1 150 °C, 终轧温度约为 1 000 °C; 辊速为 1 m/s; 将 100 mm 厚复合坯以及参照样分别轧制成 15 mm 成品厚度, 压下率为 85%, 道次压下率见表 3。

1.2.3 淬火+低温回火热处理

在 LINSEIS L78 RITA 相变仪上测定相变点及连续冷却转变曲线 CCT, 分别获得 30MnCrNiMo 钢和 33MnCrNi3Mo 钢的相变点, 见表 4。将轧后钢板进行淬火、低温回火热处理, 结合相变点进行热处理工艺摸索, 通过试验确定出复合钢板的最佳热处理工艺参数, 见表 5。

表 3 轧制道次压下率

Table 3 Rolling pass reduction rate

道次	1	2	3	4	5	6	7
压下率/%	20	33	25	22	25	28	21

表 4 试验钢相变点/°C

Table 4 Phase transition point of tested steels /°C

试验钢	Ac ₁	Ac ₃	Bs	Ms
33MnCrNi3Mo	708	764	425	298
30MnCrNiMo	735	818	472	340

表 5 三层复合板热处理工艺

Table 5 Heat treatment process of triple-layer plate

淬火			回火		
淬火温度/°C	总在炉时间/min	冷却方式	回火温度/°C	总在炉时间/min	冷却方式
900	65	水冷	200	200	空冷

1.3 组织性能检验方法

从热处理态钢板上切取横向拉伸、冲击、弯曲试样, 硬度试样以及金相试样。拉伸试样按照 GB/T 228-2010 加工成 Φ10 mm × 120 mm 的标准圆拉力试样, 在 Z1200 材料试验机上进行拉伸试验; 冲击试样按照 GB/T 229-2007 加工成 10 mm × 10 mm × 55 mm 的 V 型缺口标准试样, 在 ZBC2602 全自动冲击试验机上进行冲击试验; 布氏硬度检验按 GB/T 231. 1-2002 标准执行; 利用 SUPRA55 场发射扫描电镜进行冲击断口形貌观察; 用卡尔·蔡司 (ZEISS Aviovert 200 MAT) 研究级光学显微镜进行组织观察。

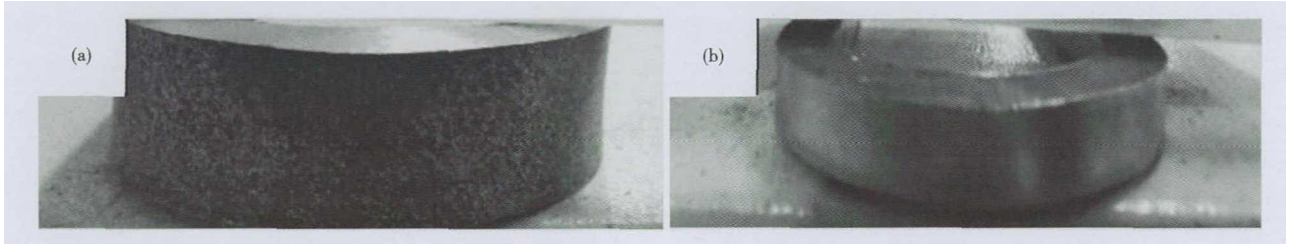


图 2 弯曲试验结果:(a)正弯;(b)侧弯

Fig. 2 Results of bending test: (a) forward bending; (b) side bending

2 试验结果及分析

2.1 结合度

热处理态复合钢板用 USN 60 超声波探伤仪进行结合度探伤检验,执行标准为 GB/T 7734-2015《复合钢板超声波检验方法》,结果表明 15mm 三层复合钢板无明显缺陷,满足探伤 I 级标准要求。为检验三层复合板的弯曲能力及覆板与基板结合能力,按照 GB/T 6369-2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》对复合板进行正弯、侧弯检验。采取的弯曲角度为 180°,弯心直径 $d = 6a$ (a 为试样厚度),弯曲试验结果如图 2 所示,弯曲试样正面、侧面均未观察到裂纹,未出现覆板与基板分层开裂现象,说明复合面结合良好。

2.2 力学性能

热处理态复合钢板以及参照样的力学性能见表 6。从表 6 中可以看出,复合钢板的屈服强度为 1 384 MPa,抗拉强度为 1 735 MPa,延伸率为 11%,断面收缩率为 45%, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收能量在 27 J 左右,强度、韧性、塑性均介于 30MnCrNiMo 钢和 33MnCrNi3Mo 钢之间,体现出较好的强韧性匹配。复合钢板厚度为 15 mm,沿厚度方向的截面洛氏硬度如图 3 所示。从图 3 可以看出,外层 30MnCrNiMo 钢厚度 3 ~ 4 mm,HRC 硬度均值为 46;内层 33MnCrNi3Mo 钢为 7 ~ 8 mm,HRC 硬度均值为 53,轧后厚度配比仍然为 1:2:1,较为均匀,内层为超高硬度层,外层相对较软,结合面处硬度值存在明显的过渡区域。综上可以看出三层复合钢板具有较好的

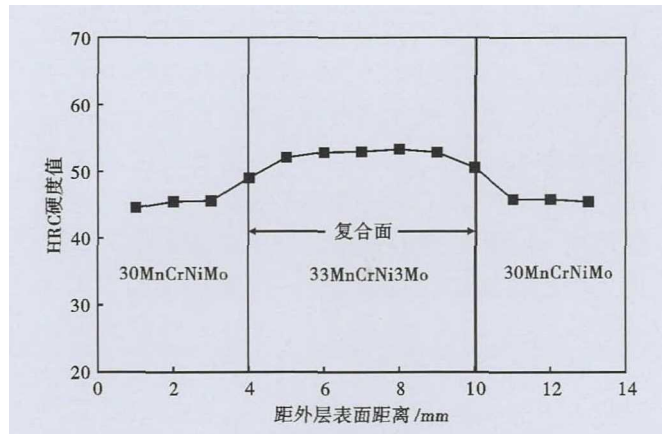


图 3 三层复合钢板厚度方向的硬度曲线

Fig. 3 Hardness curve of triple-layer clad steel plate in thickness direction

强韧性匹配,同时沿厚度方向体现出软-硬-软的特殊性能。

2.3 冲击试样断口扫描

为进一步检测复合面结合状态,将冲击试样断口采用扫描电镜(SEM)扫描,冲击断口 SEM 组织如图 4 所示。从图 4 中可以看出,经过淬火、低温回火后,复合钢板的两个复合面以及参照样的冲击断口均为韧窝状韧性断裂,说明 33MnCrNi3Mo 钢强度在高达 2 000 MPa 情况下,依然具有一定韧性,在相同放大倍数下,外层 30MnCrNiMo 钢比内层 33MnCrNi3Mo 钢组织更细小,韧窝数量更多,说明外层钢板韧性更好,这和冲击吸收能量结果一致。结合力学性能结果可以看出,该三层复合钢板外层具有较好的韧性和一定的硬度,内层具有较高的硬度和一定的韧性,两者具有较好的强韧性匹配,能够满足不同领域对超高强度钢的特殊使用要求。

在复合面位置以及参照样上取金相试样,打磨、抛光、用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后,在金相显微镜下观察金相组织,发现试验钢的复合面以及参照样均为回火马氏体组织,晶粒尺寸相差不大,这是因为基板与覆板均达到了高强度高硬度级别,因此复合面和基体的金相组织均为回火马氏体组织。

表 6 热处理三层复合板的力学性能

Table 6 Mechanical properties of triple-layer clad plate after heat-treatment

材料	$R_{p0.2}$ / MPa	R_m / MPa	A/ %	Z/ %	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收能量 AK _{v2} /J			
					N1	N2	N3	平均
复合钢板	1 384	1 735	11.0	45.0	27.8	26.8	25.7	26.8
30MnCrNiMo	1 300	1 650	10.5	47.5	32.8	38.4	35.0	35.4
33MnCrNi3Mo	1 650	2 050	7.0	40.0	24.0	25.2	25.5	24.9

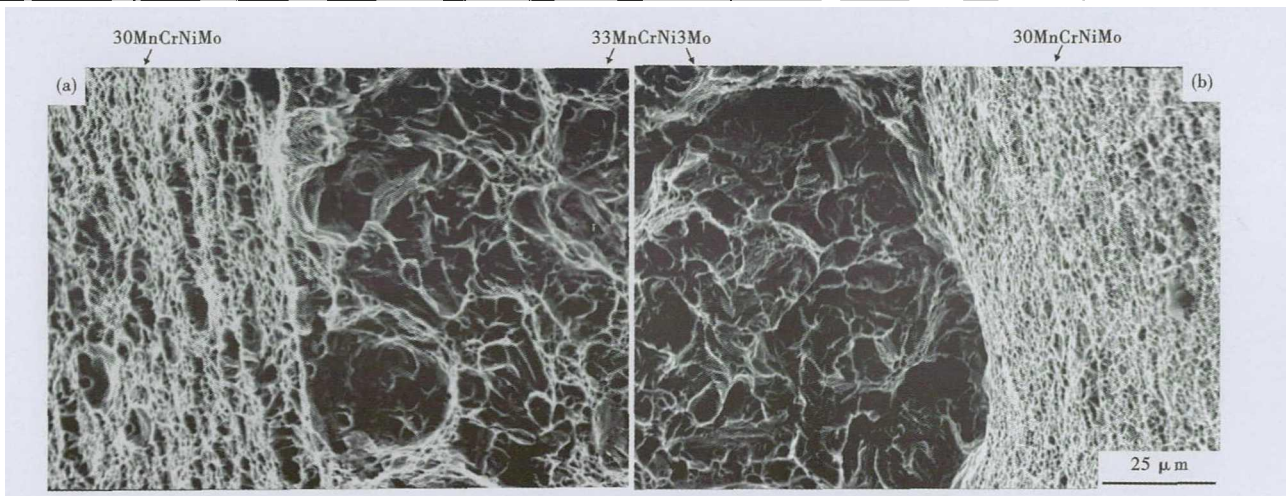


图4 三层复合板复合面处冲击断口 SEM 组织:(a)30MnCrNiMo(左)-33MnCrNi3Mo(右);(b)33MnCrNi3Mo(左)-30MnCrNiMo(右)
Fig.4 SEM morphology of impact fracture of triple-layer clad plate: (a) 30MnCrNiMo (L)-33MnCrNi3Mo (R); (b) 33MnCrNi3Mo (L)-30MnCrNiMo (R)

3 结论

(1)采用钢锭铣磨,真空复合焊接,高温轧制,淬火+低温回火热处理工艺流程研制的15mm厚三层复合超高强度钢板,复合面结合性能良好,能够满足GB/T 7734-2015探伤标准的I级要求。

(2)三层复合钢板综合力学性能良好,具有较好的强韧性匹配,抗拉强度为1735 MPa,屈服强度

为1384 MPa,延伸率为11%,断面收缩率为45%,
-40℃冲击吸收能量在27 J左右,强度、韧性、塑性均介于基板与覆板之间,外层具有较好的韧性和一定的硬度,内层具有较高的硬度和一定的韧性,结合面处硬度值存在明显的过渡区域。

(3)淬火+低温回火后的三层复合钢板复合面金相组织与基体一致,均为回火马氏体组织。

参考文献

- [1] 范长刚,董瀚,雍岐龙,等.低合金超高强度钢的研究进展[J].机械工程材料,2006,30(8):1-4.
- [2] 王涛亮,路妍,任凤章,等.低合金超高强度钢研究进展[J].金属热处理,2015,40(2):13-19.
- [3] 张晓刚.近年来低合金高强度钢的进展[J].钢铁,2011,46(11):1-3.
- [4] Shanmugam S, Ramisetti N K and Misra R D K, et al. Microstructure and High Strength-Toughness Combination of a New 700 MPa Nb-Microalloyed Pipeline Steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 478(1/2): 26-37.
- [5] Wang Z D, Kang J and Lu F, et al. Study on Quenching and Tempering Process of Q960 High Strength Steel for Construction Machinery [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(S1/1):432-436.
- [6] Saeglitz M and Krauss G. Deformation, Fracture and Mechanical Properties of Low-Temperature-Tempered Martensite in SAE 43xx Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28A(2):377-387.
- [7] Krauss G. Deformation and Fracture in Martensite Carbon Steels Tempered at Low Temperatures [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2001, 32(2): 205-221.
- [8] 崔忠圻.金属学与热处理[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [9] 福田隆,齋藤康信.复合钢板的轧制技术[J].塑性加工,2003,44(512): 14-19.

李 雷(1981-),男,硕士(东北大学),工程师,长春工业大学(本科)毕业,金属材料热处理研究。

E-mail:lilei_8181@163.com

收稿日期:2019-11-28