

卷取温度对 150 ksi 超高强度焊管卷板组织和性能的影响

杨 森¹, 胡学文¹, 余宣洵¹, 毕宗岳^{2,3}, 孙照阳¹,
李鸿斌^{2,3,4}, 吴志文¹

(1. 马鞍山钢铁股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000; 2. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司, 西安 710018; 3. 中国石油宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008;
4. 陕西省高性能连续管重点实验室, 陕西 宝鸡 721008)

摘 要: 为满足深井和超深井油气开发对高强度焊管的需求, 采用低碳微合金化成分设计+TMCP工艺, 开发了 150 ksi 钢级焊管专用钢, 并研究了卷取温度对卷板组织和性能的影响。结果显示: 随着卷取温度升高, 卷板马氏体含量呈现下降趋势, 材料的强度下降, 塑性和韧性随之上升; 在卷取温度为 550 °C 条件下, 卷板的屈服强度为 740 MPa, 抗拉强度为 1 103 MPa, 延伸率为 17%, 达到设计要求, 具有良好的强塑性。用其制造 $\Phi 50.8 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ 的焊管, 管材屈服强度为 1 078 MPa, 抗拉强度为 1 141 MPa, 延伸率为 21%, 均达到了 150 ksi 钢级焊管的设计要求。

关键词: 150 ksi; 焊管; 卷取温度; 组织; 性能

中图分类号: TG162.83

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.06.007

Effect of Coiling Temperature on Microstructure and Properties of Plate Bending of 150 ksi Ultra-high Strength Welded Pipe

YANG Sen¹, HU Xuewen¹, YU Xuanxun¹, BI Zongyue^{2,3}, SUN Zhaoyang¹, LI Hongbin^{2,3,4}, WU Zhiwen¹

(1. Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China; 2. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd., Xi'an 710018, China;
3. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China;
4. Shaanxi Province Key Laboratory of High Performance Coiled Tubing, Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: In order to meet the demand of high strength welded pipe in deep and ultra-deep wells, 150 ksi steel is developed by using low carbon microalloying composition design +TMCP process, and the influence of coiling temperature on the microstructure and properties of the plate bending is studied. The results show that with the increase of coiling temperature, the content of martensite in steel decreases, the strength of the material decreases, and the plasticity and toughness increase. Under the coiling temperature of 550 °C, the yield strength of the platebending is 740 MPa, the tensile strength is 1 103 MPa, and the elongation is 17%, which meets the design requirements and has good strong plasticity. The $\Phi 50.8 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ welded pipemade of the plate bending has a yield strength of 1 078 MPa, a tensile strength of 1 141 MPa and a elongation of 21%, all of which meet the design requirements of 150 ksi steel grade welded pipe.

Key words: 150 ksi; welded pipe; coiling temperature; microstructure; performance

0 前 言

钢铁材料因其特有的优势, 在经济社会发展

所需金属材料中占有重要地位^[1]。高强度高韧性、经济性的高强钢产品被广泛应用于工程机械、汽车、火车、建筑及油气输送和开采等领域^[2-5]。

国内外的主要先进钢铁企业都开发了不同级别的高强度钢,例如JFE的HITEN系列^[6]、新日铁的WEL-TEN系列^[7]、SSAB公司的WELDOX系列^[8]、蒂森克虏伯的XABO系列^[9],以及济钢、武钢、宝钢、首钢等企业开发出的600~1 000 MPa等多个级别的高强度钢^[2,10~11]。各大钢厂典型的高强度钢的制造技术有微合金化技术、TMCP技术、在线回火热处理工艺技术和淬火+回火热处理工艺技术等^[2,7]。

随着油气开采条件越来越恶劣,高井压、超深井的不断增加,高钢级的套管和超高强度的连续管的需求也呈现逐年增加的趋势^[12~14],随之带来了高强和超高强焊管用钢原料的研发需求。因为加入较多的合金元素,超高强焊管用钢原料钢带的性能也变的更加难以控制。通过对成分、组织、控轧控冷、卷取温度等研究,开发出了

超高强度焊管专用钢,本研究主要分析了卷取温度对150 ksi超高强度焊管卷板组织和性能的影响,以期对超高强度管材制造提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本研究开发的150 ksi钢级焊管专用钢采用微合金化成分设计+TMCP工艺进行设计和生产。参考国内120 ksi钢级和130 ksi钢级焊管的成分设计,提高C、Mn含量并添加Nb、V、Ti复合微合金化来保证其强度,加入适量的Cr、Mo元素增强材料的淬透性,以达到冷却过程中性能稳定性的控制,加入适量Ni、Cu等合金提升材料的韧性指标^[15~17]。基于以上思路,150 ksi钢级焊管专用钢的成分设计见表1。

表1 150 ksi钢级焊管专用钢成分

$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Cr}+\text{Cu}+\text{Ni}+\text{Mo})$	$w(\text{Nb}+\text{V}+\text{Ti})$
0.12~0.16	0.3~0.50	1.5~1.9	≤ 0.020	≤ 0.003	1.2~2.5	0.12~0.20

试验钢的生产流程为:转炉冶炼—钢包炉法(LF)精炼—真空循环脱气(RH)精炼—连铸—热轧—层流冷却—卷取,最终得到4.0 mm×1 120 mm的热轧卷板。生产过程中铸坯需进行缓冷^[18],控制铸坯加热温度为 $1\,230\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,中间坯厚度为40 mm,精轧入口温度为 $980\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,终轧温度为 $850\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,卷取温度为 $520\sim 620\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 试验方法

根据卷取温度曲线,选择 $528\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $561\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $617\text{ }^{\circ}\text{C}$ 四个温度条件下的卷板作为试验原料。在热轧卷板宽1/4位置截取纵向拉伸试样,按照ASTM A370—2021进行拉伸试验,试样的标距为50 mm,平行段宽度为25 mm;在热轧卷的1/4位置截取横向夏比冲击试样,按照ASTM E23—2018进行夏比冲击试验,试样尺寸

为 $2.5\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$;在热轧卷板宽1/4位置取金相试样,使用Axio Imager M2m金相显微镜和QUANTA450型扫描电镜,依据ASTM E112—2013标准观察试验钢的晶粒形貌和马氏体形貌,并测定试验钢的马氏体含量,依据ASTM E92—2017标准进行硬度检测,以此研究卷取温度对试验钢组织和性能的影响。同时对典型卷取温度条件下的热轧卷板的组织、力学性能、冲击性能以及夹杂物等进行了检测。

2 试验结果及分析

2.1 卷取温度对试验钢组织的影响

对不同卷曲温度条件下试验钢的显微组织进行观察,结果如图1所示,发现其显微组织均为

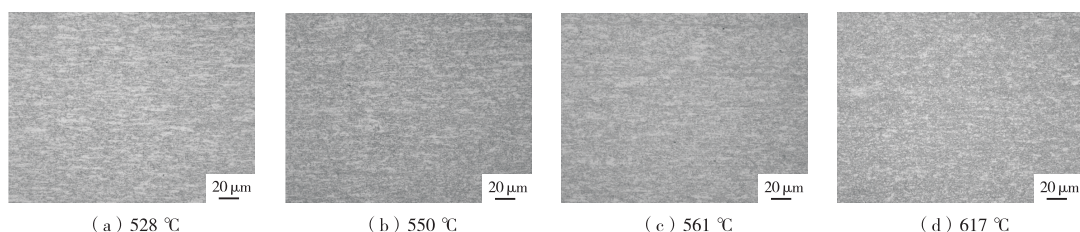


图1 不同卷曲温度条件下试验钢的显微组织

铁素体+马氏体，钢中马氏体组织细小且均匀分布在铁素体基体上。

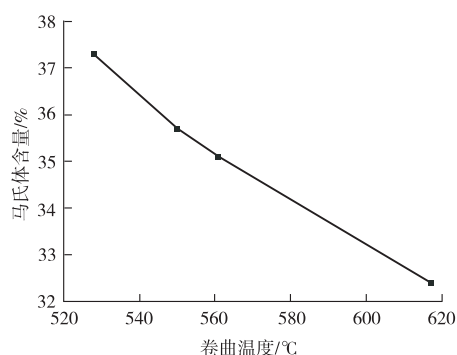
2.2 卷取温度对试验钢力学性能的影响

利用图像处理软件统计不同卷曲温度条件下试验钢厚度方向的上表面 1/4 位置、中心位

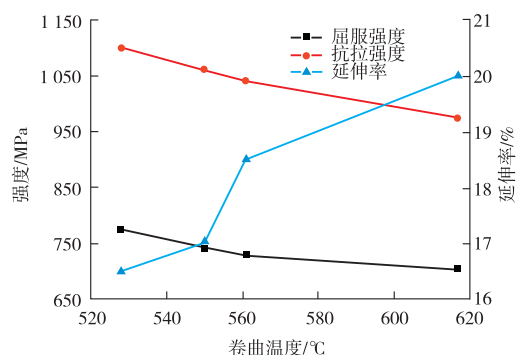
置和下表面 1/4 位置马氏体的占比，并取平均值，以此作为该温度条件下马氏体含量；然后检测对应卷取温度条件下试验钢的拉伸性能、-20℃冲击功和硬度，检验结果见表 2 和图 2。

表 2 卷取温度对试验钢组织和力学性能的影响

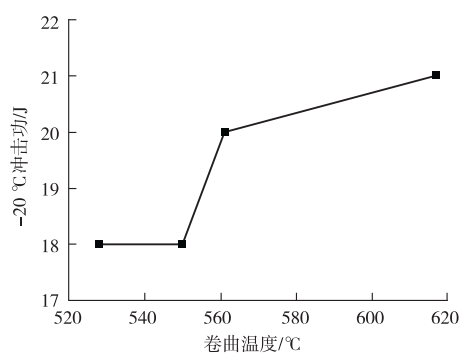
钢卷规格/(mm×mm)	卷取温度/℃	马氏体含量/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	硬度(HV _{1.0})	-20℃冲击功/J
4.0×1 120	528	37.4	775	1 100	16.5	352	18
	550	35.7	744	1 061	17.0	337	18
	561	35.1	729	1 040	18.5	331	20
	617	32.5	704	974	20.0	321	21



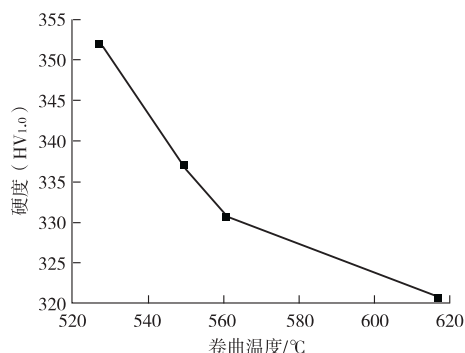
(a) 对试样马氏体含量的影响



(b) 对试验钢拉伸性能的影响



(c) 对试验钢冲击功的影响



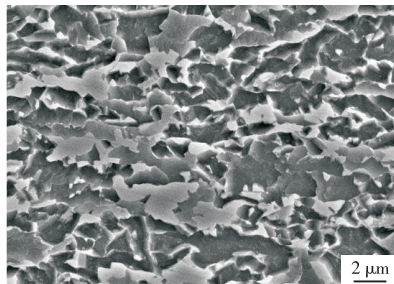
(d) 对试验钢硬度的影响

图 2 卷取温度对试验钢组织和性能的影响

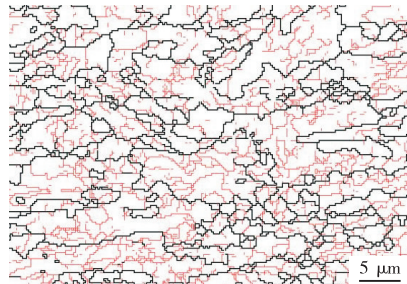
表 2 中的检测结果显示，随着卷取温度的变化，试验钢的马氏体含量、屈服强度、抗拉强度、延伸率、冲击功和硬度指标均随之变化。由图 2 可知，在试验温度 528~617℃ 范围内，随着卷取温度的升高，试验钢中马氏体含量呈现下降趋势（如图 2 (a) 所示），试验钢的屈服强度和抗拉强度呈现降低的趋势，延伸率呈现上升的趋势（如图 2 (b) 所示），试验钢的 -20℃ 冲击功整体呈现上升的趋势（如图 2 (c) 所示），试验钢的硬度呈现下降的趋势（如图 2 (d) 所示）。

试验钢卷取温度升高，马氏体转化时间变短，马氏体含量也随之减少；同时钢卷高温卷取后，产生了一定的自回火效果，在较高的自回火温度条件下，试验钢中的马氏体组织产生的自回火效果增强，马氏体会逐渐开始分解。试验钢在热轧过程中，总压下率超过 98%，钢中产生大量的形变亚结构，这些形变亚结构经过快速水冷后得到了大量的保留，它们在冷却相变中促进原子的扩散，提高了铁素体的形核率，形成了细小的铁素体，随着卷取温度的升高，铁素体长大并更

加等轴化, 体积分数增加^[19]。另外, 试验钢的卷取温度较高时, 钢卷自回火效果增强, 试验钢中马氏体和铁素体的界面上会出现细小的析出相, 温度升高, 细小的析出相增多且逐渐长大, 同时, 析出相的增多也会使钢中溶解的合金元素减少, 降低了钢的固溶强化效果, 钢的强度逐渐降低^[20-21]。综上, 随着卷取温度的升高, 试验钢中软相组织铁素体增加, 硬相组织马氏体减少, 同时析出相增多且长大, 直接使试验钢的屈服强度和抗拉强度降低; 软相组织铁素体含量的增加直接提升了试验钢的延伸率和冲击性能, 提高了试验钢的塑性和韧性; 硬相组织马氏体含量的减少直接降低了试验钢的硬度。



(a) 扫描组织



(b) 晶界图

图3 550 °C卷取温度下150 ksi钢级焊管专用钢显微组织

表3 550 °C卷取温度下150 ksi钢级焊管专用钢拉伸和冲击试验结果

钢卷规格/(mm×mm)	拉伸性能				夏比冲击功/J				
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	屈强比	20 °C	0 °C	-20 °C	-40 °C	-60 °C
4.0×1 120	740	1 103	17.0	0.67	21	19	18	17	16
设计要求	≥700	≥990	≥10	≤0.93	-	-	-	-	-

表4 550 °C卷取温度下150 ksi钢级焊管专用钢硬度

测试位置	硬度(HV _{1.0})
壁厚 1/4	356、359、361
壁厚 1/2	347、344、352
壁厚 3/4	355、363、348
设计要求	≤375

由图3可知, 卷板的显微组织为细小且均匀分布的铁素体+马氏体双相组织, 其中大角度晶界占比约为46%, 平均有效晶粒尺寸约为1.9 μm, 细小且均匀的晶粒确保卷板具有良好的强度和塑韧性。

由表3可以看出, 卷板的屈服强度为740 MPa, 抗拉强度为1 103 MPa、屈强比为0.67、延伸率为

3 典型卷取温度条件下卷板的组织和性能

根据卷板的设计要求, 需满足屈服强度≥700 MPa、抗拉强度≥990 MPa。由表2可知, 617 °C条件下抗拉强度无法满足设计要求, 而在561 °C条件下屈服强度富余量较小, 所以在实际生产过程中, 通常选择528 °C和550 °C作为卷取温度。由于卷板强度较高, 卷取温度过低可能导致卷取机超负荷故障。综合以上原因, 选择550 °C作为卷板的生产温度, 在表1的成分体系下, 进行150 ksi钢级焊管专用钢的工业化试制, 并对实物卷板的组织和性能进行测试。卷板的显微组织如图3所示, 拉伸和夏比冲击检验结果见表3, 硬度检测结果见表4, 夹杂物检验结果见表5。

17.0%, 达到了设计要求; 卷板在-60~20 °C条件下冲击功无明显下降, 在-60 °C条件下仍然有16 J的冲击功, 具有良好的韧性。

由表4可知, 试制卷板的硬度为344HV_{1.0}~363HV_{1.0}, 满足设计的要求, 且硬度波动范围较小, 钢卷性能稳定。

卷板按照ASTM E45—2018的A方法进行夹杂物评级, 由表5可知, 钢中夹杂物及其等级为B类(细)0.5级、D类(细)0.5级、D类(粗)0.5级; 卷板的夹杂物尺寸主要集中在1~5 μm范围内, 最大夹杂物尺寸为11.36 μm, 整个钢中不存在大颗粒夹杂, 这为试验钢的塑韧性和疲劳性能提供了重要的基础。该卷板经国内制管企业制

表5 550 ℃卷取温度下 150 ksi 钢级焊管专用钢夹杂物检验结果

检测面积/mm ²	总数/个	夹杂物类型及等级			夹杂物尺寸/μm		尺寸范围的夹杂物比例/%			
		B(细)	D(细)	D(粗)	平均	最大	1~2 μm	2~5 μm	5~10 μm	10~15 μm
38.88	759	0.5	0.5	0.5	2.01	11.36	70.2	25.7	4.0	0.1
设计要求	—	≤2.0	≤2.0	≤1.5	—	—	—	—	—	—

成规格为Φ50.8 mm×4.0 mm的焊管，其屈服强度为1 078 MPa，抗拉强度为1 141 MPa，延伸率为21%，扩口和压扁试验合格，均达到了150 ksi钢级焊管的设计要求，且具有良好的疲劳寿命，并且在油田实现了工业化应用。

4 结 论

（1）卷取温度直接影响 150 ksi 钢级焊管专用钢中铁素体、马氏体的占比以及强度、延伸率、冲击性能和硬度。卷取温度升高，钢中铁素体含量增加，马氏体含量减少，屈服强度、抗拉强度和硬度呈现下降趋势，延伸率和冲击功呈现下降趋势。

（2）在 550 ℃卷取温度条件下，150 ksi 钢级焊管专用钢卷板的屈服强度为740 MPa，抗拉强度为1 103 MPa，延伸率为17%，达到设计要求，具有良好的强塑性。制造成规格为Φ50.8 mm×4.0 mm的焊管，实物检测屈服强度为1 078 MPa，抗拉强度为1 141 MPa，延伸率为21%，达到了150 ksi钢级焊管的设计要求。

参考文献：

[1] LU K. The future of metals [J]. Science, 2010, 328 (5976) : 319-320.

[2] 李大赵, 庄治华, 申丽媛, 等. 先进高强度钢微观组织调控研究现状与发展趋势[J]. 金属热处理, 2019, 44(5): 12-17.

[3] 李大赵, 索志光, 崔天燮, 等. 采用TMCP技术的低碳低合金高强度钢生产的研究现状及进展[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(1): 1-7.

[4] 郑瑞, 李飞, 张谦. 高强度工程机械用钢应用现状和发展前景[J]. 首钢科技, 2010(2): 4-7, 32.

[5] 沈孝芹, 李欢欢, 于复生, 等. 工程机械用高强度钢及其焊接研究现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46(1): 18-22.

[6] JFE. JFE-HITEN high strength steel plates[EB/OL]. [2012-11-15]. <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/catalog/c1e-002.pdf>.

[7] 陈付红, 丁伟, 黄维, 等. 国外先进公司工程机械用高强度钢发展现状[J]. 上海金属, 2015, 37(1): 47-51.

[8] Anon. Weldox high strength steel [EB/OL]. [2012-11-15]. <http://www.ssab.com/en/Brands/Weldox/Products>.

[9] Anon. ThyssenKrupp steel Europe material specifications [EB/OL]. [2012-11-15]. <http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/en/publikationen/produktinformationen/grobblech.jsp>.

[10] 李灿明, 王建景, 闫志华. 国内工程机械用钢发展现状和市场预测[J]. 山东冶金, 2008, 30(5): 9-11.

[11] 田志强, 张云飞, 付成安, 等. 薄规格高强度工程机械用钢板的现状与发展趋势[J]. 机械工程材料, 2013, 37(6): 1-5.

[12] 李周波, 毕宗岳, 张峰, 等. Q125 钢级 SEW 石油套管的研发[J]. 焊管, 2013, 36(8): 32-35.

[13] 武会宾, 刘立甫, 王立东, 等. Q125 级套管钢高频电阻焊接头耐 CO₂/H₂S 腐蚀行为[J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 17-21, 114.

[14] 毕宗岳, 余晗, 鲜林云, 等. 连续管技术研究现状与发展趋势[J]. 焊管, 2023, 46(7): 1-13.

[15] 李鸿斌, 毕宗岳, 刘云, 等. 超高强度 CT120 连续管研制及性能研究[J]. 焊管, 2020, 43(5): 24-29.

[16] 王亮, 唐家财, 王维东, 等. 国产 CT130 变壁厚连续管性能及现场应用[J]. 焊管, 2023, 46(4): 39-43.

[17] 李鸿斌, 任永峰, 白耀岗, 等. 调质工艺对低碳微合金钢管组织及性能的影响[J]. 焊管, 2023, 46(4): 16-22.

[18] 沈世雕, 黄福祥, 陈书浩, 等. 轧制前堆垛缓冷对钢中带状组织影响的研究[C]//第八届冶金工程科学论坛论文集. 北京: 北京科技大学, 2009: 183-188.

[19] 吴腾, 吴润, 熊维亮, 等. 卷取温度对高强热轧 DP 钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(11): 52-57.

[20] 刘嘉楠, 汪云辉, 李永亮, 等. 超高强度热轧马氏体钢的开发和组织性能的研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(17): 27-29, 34.

[21] 孙国强, 梁剑雄, 刘振宝, 等. 回火温度对铁素体/马氏体双相不锈钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(1): 86-90.

作者简介：杨 森（1984—），男，工学硕士，工程师，目前主要从事管线钢新产品开发工作。

收稿日期：2023-05-11
修改返回日期：2024-01-08
编辑：袁雪婷