

X80M 直缝埋弧焊管用热轧钢板开发

翟冬雨, 杜海军, 吴俊平, 姜金星, 刘 帅

(南京钢铁股份有限公司技术研发处, 江苏 南京 210035)

摘 要: 为了满足中俄东线 $450 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 超大输量及 -40°C 极寒地区服役的国家重大管道工程建设用钢要求, 结合南钢自身设备特点, 试验开发了具有高强韧性的 $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ 直缝埋弧焊管用热轧钢板。通过冶金热力学温度控制及保护浇铸手段, 得到了成分波动范围窄、低倍组织评级 C0.5 级的高洁净度铸坯, 试验确定了 TMCP 轧制工艺, 钢板力学性能检测富裕量充裕, 少量先共析铁素体+针状铁素体+贝氏体+马奥岛的软/硬相复合组织, 满足了 X80M 钢板高强韧性要求, 强韧性指标符合管道技术规范要求, 实现了中俄东线低温超大输量管道用钢的批量工业生产。

关键词: 热轧钢板; 焊管; 直缝埋弧焊; 多相复合组织; 强韧性

中图分类号: TF76, TG335.5

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)01-0131-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.01.021

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Development of X80M hot-rolled steel plate for LSAW pipe

Zhai Dongyu, Du Haijun, Wu Junping, Jiang Jinxing, Liu Shuai

(Technology Research and Development Department, Nanjing Iron and Steel Co., Ltd., Nanjing 210035, Jiangsu, China)

Abstract: In order to meet the requirements for annual transportation of 45 billion cubic meters of the China-Russian Eastern Line and the demand for construction of major national pipelines in extremely cold regions at -40°C , NISCO has tested and developed $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ straight seam submerged arc welded pipeline steel plates which have high strength and toughness. The high cleanliness casting slabs with narrow composition fluctuation range and low organization rating C0.5 were obtained by metallurgical thermodynamic temperature control and protective casting methods. The industrial test verified the TMCP rolling process. The microstructure is composed of small amount of eutectoid ferrite+acicular ferrite+bainite+M/A island soft/hard phase, which meets the high strength and toughness requirements of X80M steel plate. The strength and toughness performance indicators meet the requirements of pipeline technical specifications and meet mass industrial production of steel for low-temperature and large-volume pipelines.

Key words: hot-rolled steel plate, pipe, straight seam submerged arc welded, multiphase composite microstructure, toughness

0 引言

中俄东线石油天然气工业管道输送工程是我国十二五重点工程项目, 是我国首次在石油管道输送项目上挑战世界难度最大、服役环境最恶劣超高压

石油管道工程, 该项目管道输送向大口径、大壁厚和高压输送^[1-3]方向发展, 采用钢级为 X80 级管线标准。中俄东线天然气管道工程^[4], 全长 3 371 km, 分北段(黑河—长岭)、中段(长岭—永清)和南段(永清—上海)三个项目建设, 是我国目前口径最大、

收稿日期: 2020-05-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0304900)。

作者简介: 翟冬雨 (1978—), 男, 本科, 高级工程师, 主要工作方向: 钢铁新产品开发, E-mail: zhaidongyu@njsteel.com.cn。

压力最高的长距离天然气输送管道,干线线路管径 1 422 mm^[5],设计压力 12 MPa,设计输量 $380 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,中俄东线南段的部分地段管道采用 $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ 规格 X80M 管线钢。高钢级 X80M 钢管对母材的纯净度^[6]要求及强韧性^[7-8]要求较为苛刻,开发应用难度大。

南钢 2017~2018 年批量供货中俄东线北段 $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 25.7/30.8 \text{ mm}$ X80M^[9]项目, $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ X80M 产品厚度规格增加,低温韧性及钢水洁净度要求不变,钢管强韧性性能匹配及低温落锤性能研发难度大。南钢依据 2017~2018 年批量供货生产经验,以热力学温度控制为基础,通过真空处理及动态轻压下技术的应用,获得洁净度高的优质

铸坯,采用 TMCP 轧制工艺,获得了先共析铁素体+针状铁素体+贝氏体+马奥岛的软/硬相复合组织,满足了 X80M $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ 直缝埋弧焊管用管线钢板的强韧性要求,满足了中俄东线天然气管道工程南段管道技术规范,提升了企业的整体制造水平,满足了国家重大工程的国产化材料要求。

1 技术指标及参数

X80M $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ 直缝埋弧焊管用管线钢板,产品满足中俄东线天然气管道工程(南段)技术规范。焊管用热轧钢板拉伸试验结果应符合表 1 的要求,夏比 V 型缺口冲击功与剪切面积百分数应符合表 2 的要求。

表 1 X80M $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ 直缝埋弧焊管用热轧钢板拉伸性能试验要求
Table 1 Requirements for X80M $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ hot-rolled steel plate for LSAW pipe

钢级	屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		最大屈强比($R_{m,0.2}/R_m$)	最小伸长率(A_1)/%
	最小	最大	最小	最大		
X80	555	700	625	765	0.93	按 API Spec 5L

注:本要求为钢管拉伸性能要求。根据协商一致原则,由制造商负责对供应的钢板拉伸性能进行调整,但应保证制成钢管的拉伸性能符合直缝埋弧焊钢管技术条件的规定。

表 2 X80M $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ 直缝埋弧焊管用热轧钢板夏比冲击试验要求
Table 2 Charpy impact test requirements for X80M $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ hot-rolled steel plate for LSAW pipe

钢级	试验温度/℃	位置	夏比冲击剪切面积(S_A)/%		夏比冲击功/J	
			单个试样最小值	三个试样最小平均值	单个试样最小值	三个试样最小平均值
X80	-30	板宽 1/4 横向	70	85	160	210

注:10 mm×10 mm×55 mm 试样。

2 钢成分及坯料规格设计

成分设计根据中俄东线天然气管道工程管道技术规范要求为依据,基于前期中俄东线北段 $\Phi 30.8 \text{ mm}$ X80M 的千吨级试制开发及供货以及中石化鄂安沧项目用 $\Phi 1\,219 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$ L555M 大批量供货的技

术积累,结合南钢的设备和工艺特点设计 X80M $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ 直缝埋弧焊管用热轧钢板的冶炼成分,具体如表 3 所示。

根据成品钢板规格要求,考虑到尽可能大的压缩比设计,炼钢坯料设计:320 mm×2 770 mm。

表 3 X80M $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ 直缝埋弧焊管用热轧钢板 X80M 坯料成分设计
Table 3 Alloying design for X80M $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ hot-rolled steel plate for LSAW X80M billet

	C	Si	Mn	P	S	Nb+V+Ti	Ca	%
内控	0.040~0.060	0.20~0.30	1.60~1.70	≤0.012	≤0.002	0.055~0.080	0.000 5~0.004 0	
	Alt	Cr	Ni	Cu	B	N	H	Pcm
内控	0.015~0.050	0.10~0.20	0.15~0.30	0.10~0.20	≤0.000 5	≤0.006 0	≤0.000 2	0.17~0.22

3 冶炼过程控制及检验分析

X80M $\Phi 1\,422 \text{ mm} \times 32.1 \text{ mm}$ 直缝埋弧焊管用热轧钢板以洁净钢设计理念进行设计,以低碳设计为核心,低磷硫、低有害气体含量为目标。转炉顶底复吹,

全程底吹操作且后期加大底吹流量,加快后期碳氧反应速度,使用微碳合金、微碳原料等手段实现低碳冶炼;双挡渣技术,炉渣下渣检测实现超低磷冶炼;加大铁水脱硫能力,扒渣干净,LF 快速造白渣,快速脱硫等技术实现超低硫生产;高真空度≤100 Pa 情况下不

低于 20 min 的真空保持时间, 配合连铸全保护浇铸手段实现氧、氮、氢的有害气体去除。采用先进的结晶器液面控制技术稳定液面, “恒拉速”控制制度, 连铸动态二冷及动态轻压下技术, 配合安置在扇形段辊式电磁搅拌器, 有效控制铸坯表面及内部质量, 改善

铸坯中心偏析及中心疏松, 抑制铸坯中间裂纹发生。

3.1 有害元素检测分析

通过冶炼过程控制, 钢水洁净度获得大幅度提升, 有害杂质得到有效控制, 产品磷、硫、氧、氮、氢控制实绩如图 1 所示。

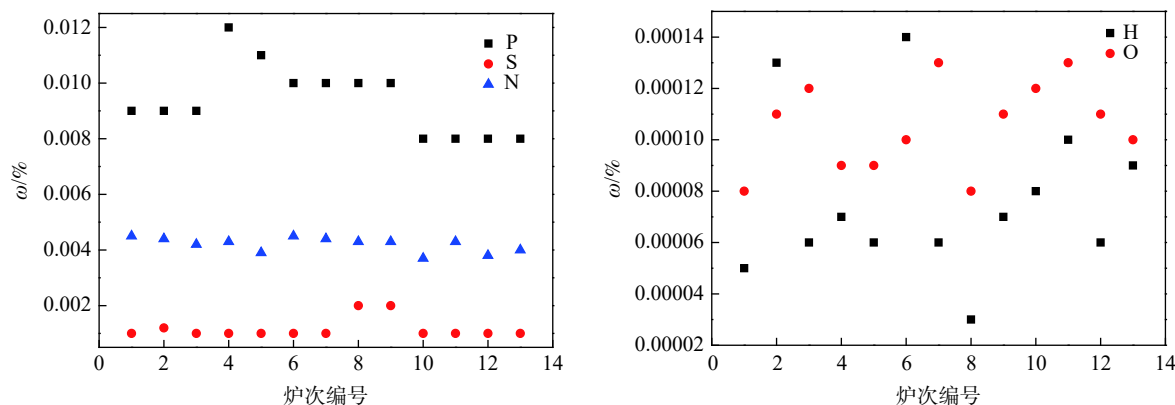


图 1 成品磷、硫、氧、氮、氢控制

Fig. 1 Phosphorus, sulfur, oxygen, nitrogen, hydrogen contents in finished steel product

3.2 冶炼过程热力学温度控制

X80MΦ1 422 mm×32.1 mm 直缝埋弧焊管用热轧钢板冶炼各工位温度对产品质量影响较大, 过程温度控制是冶炼过程动力学的基础, 为了保证钢水具有良好的流动性, 有利于提高脱碳、脱磷、脱硫的速率, 减轻 LF 脱硫、合金化的压力, 对过程热力学进行了严格的控制, BOF 温度控制在 1 640 ~ 1 680 °C, LF

温度控制在 1 590 ~ 1 620 °C, RH 温度控制在 1 550 ~ 1 570 °C, CCM 温度控制在 1 535 ~ 1 545 °C。

3.3 钢板低倍组织评级

对板坯炉次依据 YB 4 003 进行低倍评级, 中心偏析 C 类 0.5 级, 中心疏松 0.5 级, 无其它内部缺陷, 表明炼钢过程控制能力良好, 板坯低倍质量控制良好, 低倍检测如图 2 所示。



图 2 冶炼铸坯低倍评级

Fig. 2 Rating of macro-structure of cast slab

3.4 钢板夹杂物评级

对轧制钢板夹杂物评级分析如图 3 所示, 合格率为 100%。各类型夹杂物主要在 1.5 级以下, 表明试制冶炼钢种具有良好的纯净度。

4 X80MΦ1 422 mm×32.1 mm 直缝埋弧焊管用热轧钢板 TMCP 工艺技术研究

4.1 不同终轧温度对试验钢力学性能和显微组织的影响

不同终轧温度下试验钢的拉伸性能变化趋势如

图 4 所示, 终轧温度为 770 ~ 811 °C 时, 试验钢屈服强度和抗拉强度变化不大, 屈服强度基本保持在 555 ~ 570 MPa, 抗拉强度为 675 ~ 705 MPa; 不同终轧温度下, 试验钢-20 °C 冲击功都比较高, 冲击韧性优异。

因此, 终轧温度在 770 ~ 811 °C 时, 终轧温度对试验钢的拉伸性能影响不大, 且夏比冲击性能较高。

图 5 所示为试验钢 770 °C 和 795 °C 时的扫描电镜照片, 其组织类型基本一样, 都是由贝氏体、针状铁素体和少量多边形铁素体组成, 且组织比例变化不大, 所以试验钢强度和韧性变化不大。

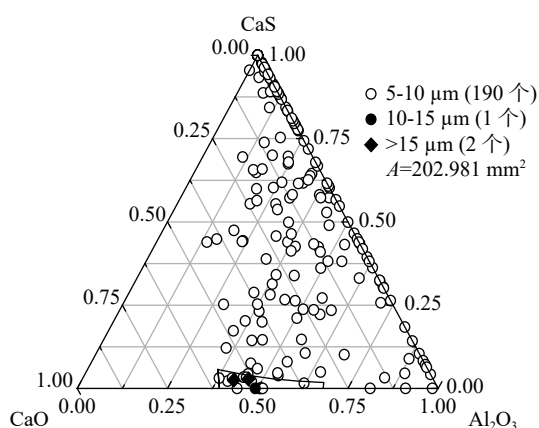


图3 试制钢板的夹杂物检测结果

Fig. 3 Test results of inclusions in trial steel plates

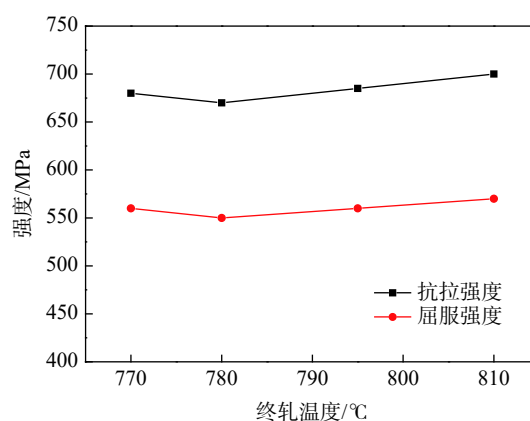


图4 不同终轧温度下试验钢的拉伸性能变化趋势

Fig. 4 Tensile properties of test steel processed under different finish rolling temperatures

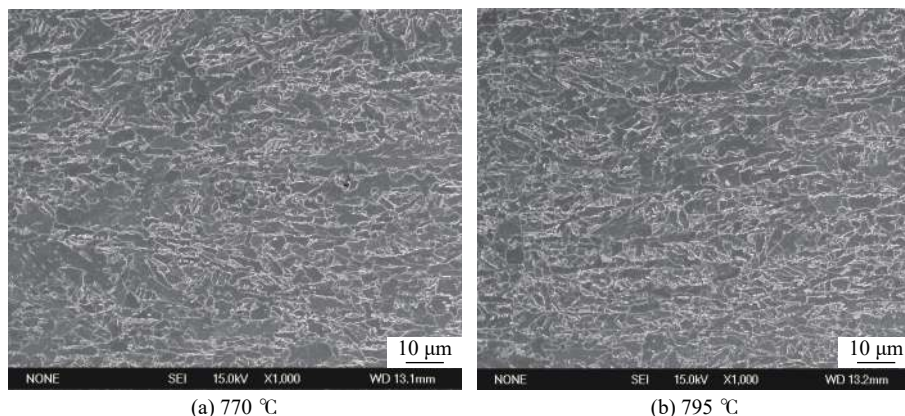


图5 试验钢在不同终轧温度下的显微组织 ×1 000

Fig. 5 Microstructure of test steel processed at different finish rolling temperatures ×1 000

4.2 不同入水温度对试验钢力学性能和显微组织的影响

在现场轧制过程中,同一终轧温度不同开冷温度是通过轧后弛豫时间来控制的,不同的入水温度代表终轧至开冷的弛豫时间不同。在终轧结束后,材料由于在轧制变形过程中产生大量的形变位错,使储存能升高,弛豫使得位错回复、储存能降低。弛豫时间越长储存能越低,因此得到的组织形态、晶粒大小不同,最终导致材料的综合性能不同。

图6为试验钢在不同入水温度下的力学性能,从图6可以看出,随着入水温度的降低,试验钢的屈服强度和抗拉强度总体呈下降趋势。冲击功均在300 J及以上,并且随着入水温度降低,冲击功先上升后下降,入水温度刚降至 A_3 温度附近,会有细小F析出,有利于冲击功的提高,入水温度下降过多,会导致F、AF、B组织粗大,不利于冲击功。在入水温度为760℃时,试验钢的DWTT剪切面积值相对略低,随着入水温度下降,试验钢的DWTT值先上升后下降,变化规律与冲击功相似。

图7为试验钢不同入水温度下的扫描照片,从图7可以看出,试验钢的组织类型以针状铁素体为主,但不同入水温度下试验钢铁素体的比例不同。由组织观察可以看出733℃入水时钢中铁素体含量明显多于761℃入水时的试样,铁素体含量增加,冲击韧性有所提高。

4.3 不同返红(终冷)温度对试验钢力学性能和显微组织的影响

在入水温度一定时,不同的返红温度得到的组织类型和晶粒尺寸不同,这对试验钢的强度、冲击韧性有影响。

图8为试验钢的力学性能变化趋势,随着返红温度的升高,屈服强度和抗拉强度略有下降。当返红温度为525℃时,DWTT值相对较低,随着返红温度的降低,DWTT值升高,当返红温度为433℃时,试验钢的DWTT值较高,落锤性能较好。返红温度过高,冷却速度减小,过冷度减小,晶粒细化程度降低,材料的韧性会有所下降。

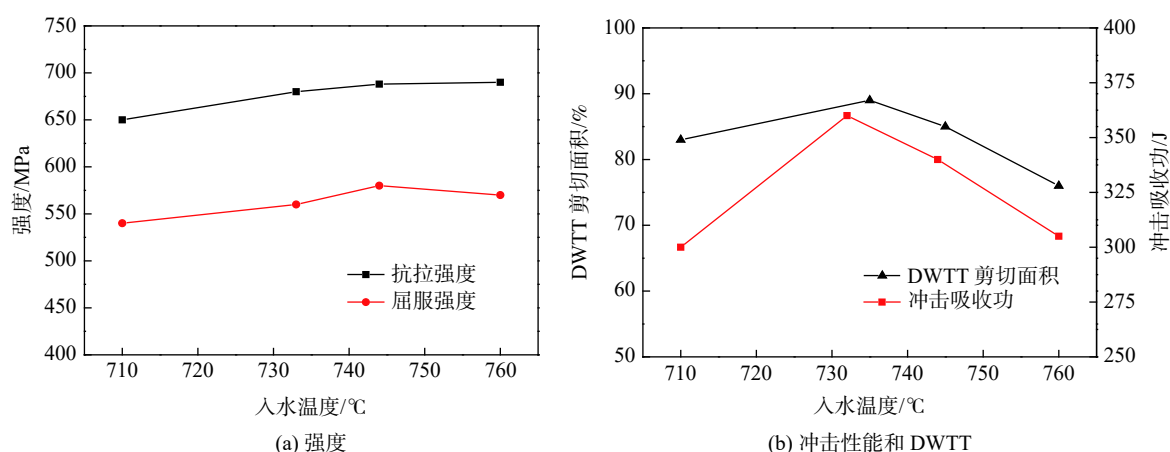


图 6 试验钢在不同入水温度下的力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of test steel at different entry temperatures into water cooling section

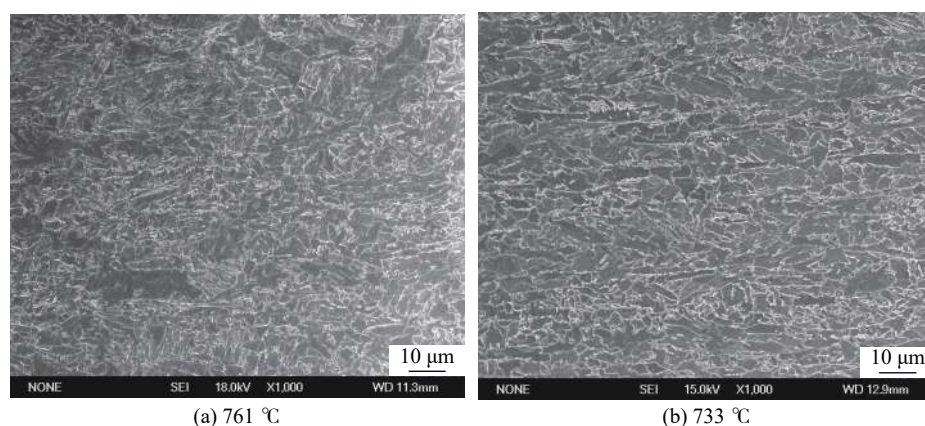


图 7 试验钢在不同入水温度下的显微组织

Fig. 7 Microstructure of test steel at different entry temperatures into water cooling section

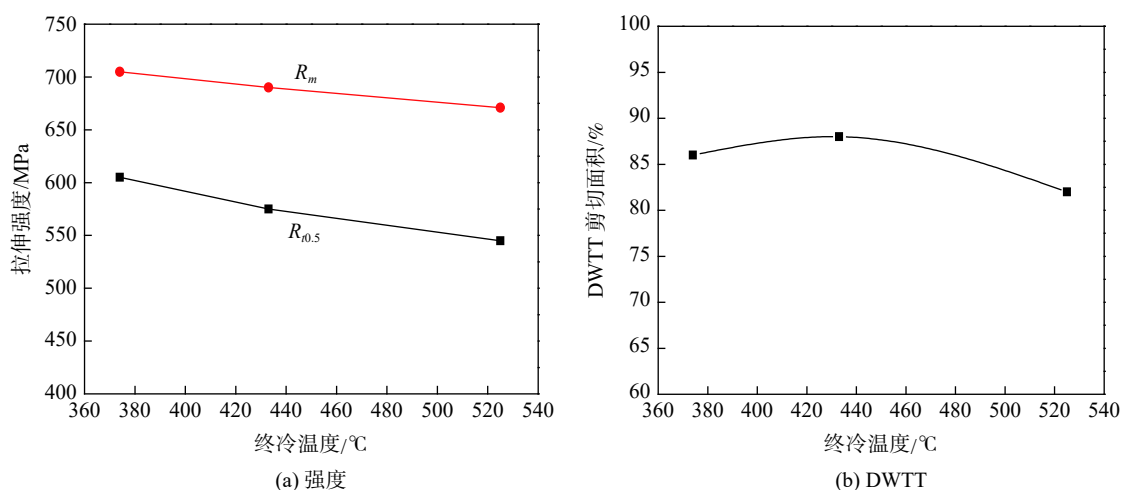


图 8 试验钢在不同返红温度下的强度与 DWTT

Fig. 8 Test steel strength and DWTT at different end cooling temperatures

4.4 TMCP 工艺确定

为确保 X80M 的强度、冲击韧性和 DWTT 性能,需制定合理的轧制工艺,综上终轧温度、入水温

度和返红温度对抗拉强度和低温韧性的研究,关键点工艺拟为:终轧温度 785 °C±10 °C,入水温度 735 °C±10 °C,返红温度 430 °C±10 °C。

5 X80MΦ1 422 mm×32.1 mm 直缝埋弧焊管用热轧钢板性能及组织检验

对实际生产获得产品进行抽样检查,拉伸性能检验结果见图9,冲击性能检验结果见图10,落锤性能检验结果见图11。按照图12所示位置对X80MΦ1 422 mm×32.1 mm 直缝埋弧焊管用热轧钢板的硬度(HV10)检测,硬度值分布在201~239,完

全满足技术要求,检测结果见表4。

金相显微组织 500X 检测表明,钢板具有细小晶粒的特点,晶粒度评级均为 11.0~12 级,带状组织评级小于 2.0 级。X80MΦ1 422 mm×32.1 mm 直缝埋弧焊管用热轧钢板组织类型为少量先共析铁素体+针状铁素体+贝氏体+马奥岛的软/硬相复合组织。多相组织的获得使试验钢具有良好的强韧性匹配。典型的显微组织如图13所示。

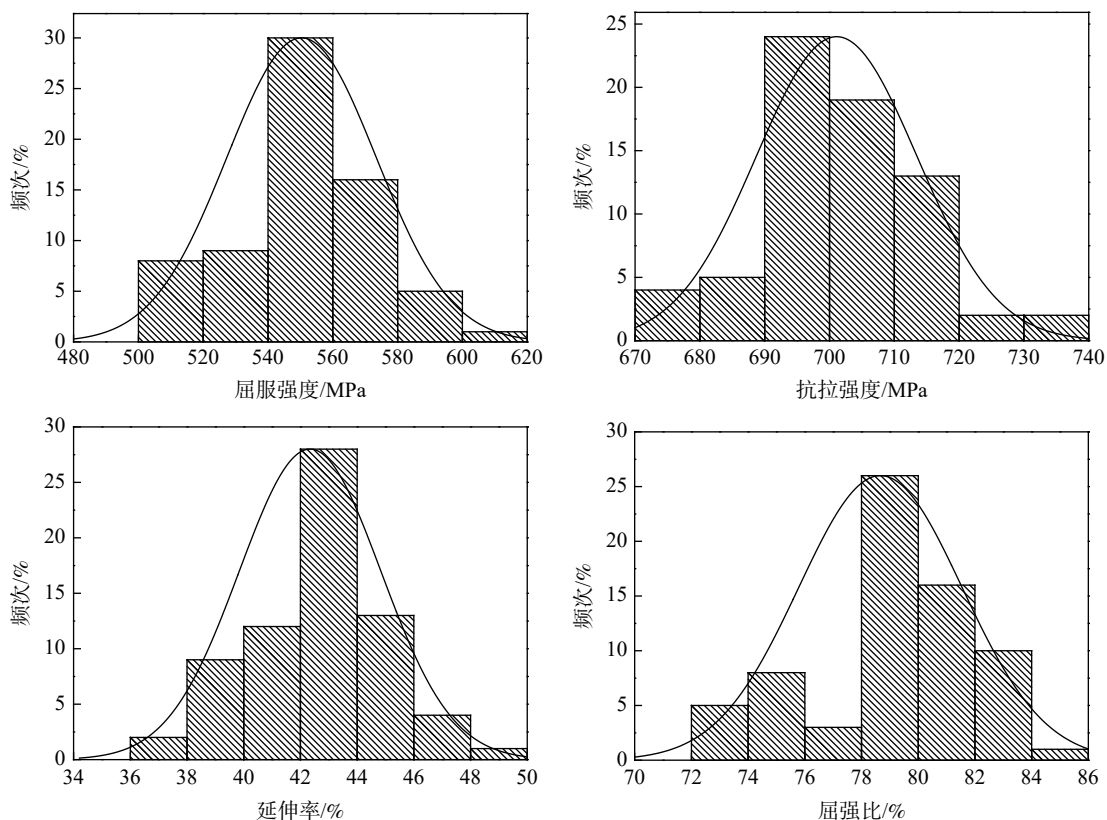


图9 X80M 拉伸性能分布

Fig. 9 Distribution of tensile performance of X80M steel plate

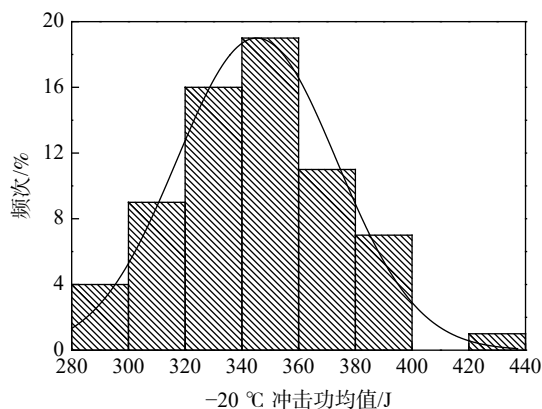


图10 X80M 冲击性能分布

Fig. 10 Distribution of impact performance of X80M steel plate

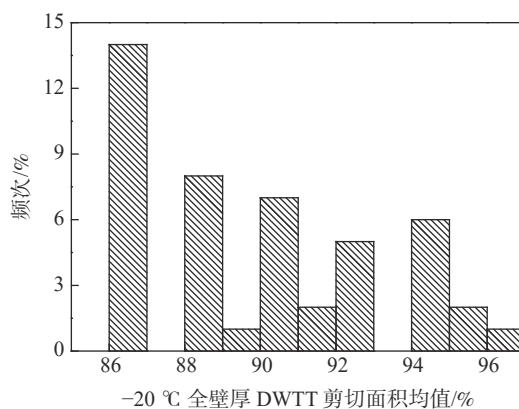


图11 X80M 落锤性能分布

Fig. 11 Distribution of Drop weight performance of X80M steel plate

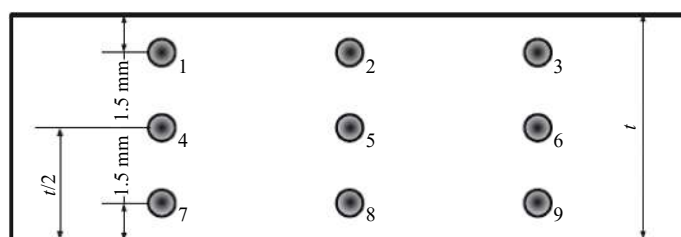


图 12 维氏硬度测试点位置

Fig. 12 Vickers hardness test point location

表 4 X80MΦ1 422 mm×32.1 mm 直缝埋弧焊管用热轧钢板硬度(HV10)检测结果

Table 4 Hardness (HV10) test results of X80M Φ1 422 mm×32.1 mm hot rolled steel plate for LSAW pipe

试样号	厚度/mm	厚度方向截面硬度(HV10)									
		近上表面值			心部单值			近下表面值			最大值
试样1	32.1	205	203	216	208	209	207	205	211	206	216
试样2	32.1	234	211	229	216	211	213	212	219	218	234
试样3	32.1	220	215	213	221	212	220	221	219	218	221
试样4	32.1	239	225	229	216	220	214	217	216	211	239

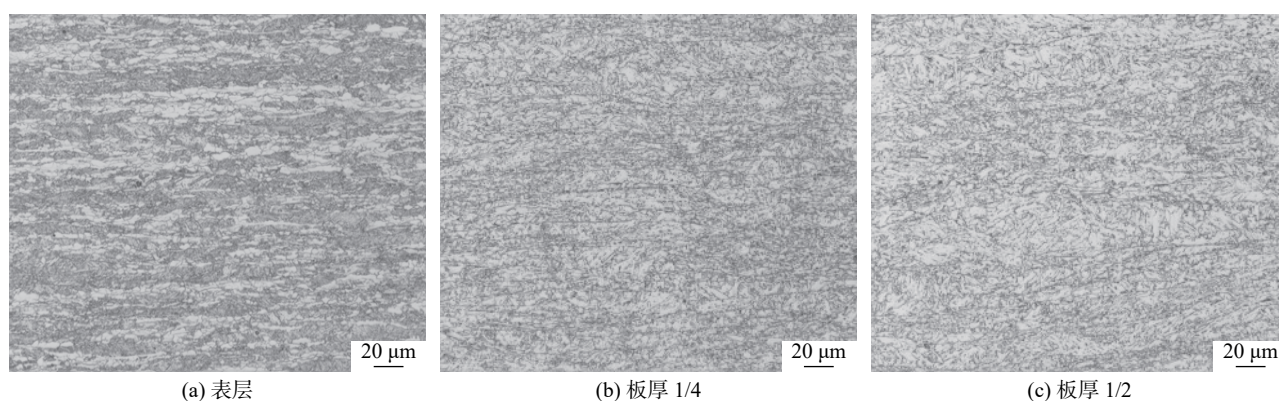


图 13 X80M 钢板金相组织

Fig. 13 Metallographic structure of X80M steel plate

6 结论

1) 依据中俄东线天然气管道工程管道技术规范要求设计了开发成分并确定了所需获得的少量先共析铁素体+针状铁素体+贝氏体+马奥岛的软/硬相复合组织类型。

2) 通过冶炼过程成分控制、温度控制及保护浇铸的手段, 得到了有害元素成分控制合理、夹杂物控制严格、低倍组织优异洁净度高的优质铸坯。

3) 通过对 TMCP 工艺的研究, 确定了轧制过程关键点工艺的确定: 终轧温度 $785\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 入水温度 $735\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 返红温度 $430\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4) 通过拉伸性能检验、冲击性能检验、落锤性能检测、硬度性能检验、金相检验分析, 生产开发的 X80MΦ1 422 mm×32.1 mm 直缝埋弧焊管用热轧钢板符合中俄东线天然气管道工程管道技术规范要求, 满足了我国重大工程国产化的生产需求。

参考文献

- [1] Zeng Y P, Zhu P Y, Tong K. Effect of microstructure on the low temperature toughness of high strength pipeline steels[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2014, 22(3): 254.

- [2] Shin S Y, Huang B, Lee S, *et al.* Correlation of microstructure and charpy impact properties in API X70 and X80 line-pipe steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 458(1-2): 281.
- [3] Niu Yanlong, Liu Qingyou, Jia Shujun. Microstructure and impact toughness of X80 grade high strength low alloy pipeline steel[J]. *Iron & Steel*, 2019, 54(2): 67.
(牛延龙, 刘清友, 贾书君. X80级高强低合金管线钢组织与冲击韧性[J]. *钢铁*, 2019, 54(2): 67.)
- [4] Du Wei, Li Helin, Wang Haitao, *et al.* Research status of high-performance oil and gas pipelines in China and abroad[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2016, 35(6): 577-582.
(杜伟, 李鹤林, 王海涛, 等. 国内外高性能油气输送管的研发现状[J]. *油气储运*, 2016, 35(6): 577-582.)
- [5] Zhang Kunfeng, Zhang Xingchang, Gao Zhaoliang, *et al.* Study on the distribution characteristics of environment and geological hazards along the west-east gas pipeline[J]. *Industry and Technology Forum*, 2009, 8(4): 117-128.
(张昆峰, 张兴昌, 高照良, 等. 西气东输管道沿线环境及地质灾害分布特征研究[J]. *产业与科技论坛*, 2009, 8(4): 117-128.)
- [6] Wang Xinhua, Li Xiugang, Li Qiang, *et al.* Control of string shaped non-metallic inclusions of CaO-Al₂O₃ system in X80 pipeline steel plates[J]. *Acta Metall. Sin.*, 2013, 49(5): 553-561.
(王新华, 李秀刚, 李强, 等. X80管线钢板中条串状CaO-Al₂O₃系非金属夹杂物的控制[J]. *金属学报*, 2013, 49(5): 553-561.)
- [7] Li Pingquan. Failure accidents and typical cases of oil and gas transmission pipeline[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2005, (4): 76-84, 92.
(李平全. 油气输送管道失效事故及典型案例[J]. *焊管*, 2005, (4): 76-84, 92.)
- [8] Tong Ke, Xie Xuedong, Li Liang, *et al.* Failure cause and typical case analysis of bending pipe used in oil and gas transmission[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2016, 2(1): 46-49.
(仝珂, 谢学东, 李亮, 等. 油气输送用弯管失效原因及典型案例[J]. *石油管材与仪器*, 2016, 2(1): 46-49.)
- [9] Fang Wei, Zou Bin, Li Weiwei, *et al.* Separations and their contribution into the impact toughness of pipeline steels of strength class K65 (X80)[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2018, 41(2): 65.
(方伟, 邹斌, 李为卫, 等. K65(X80)管线钢断口分离及其对冲击韧性的影响[J]. *焊管*, 2018, 41(2): 65.)

编辑 杨冬梅

Iluka 资源公司公布 2020 年产销量

(2021 年 3 月 5 日) 据 Iluka 资源公司公布的报告显示, 从 4 月份开始, 其 Narngulu 湿选厂和 Jacinth-Ambrosia 矿山调整了生产设置以应对疫情给市场带来的不确定性。Iluka 公司 2020 年产量见表 1。

表 1 Iluka 资源公司 2020 年产销量

万 t

	2019 年		2020 年	
	产量	销量	产量	销量
锆英砂	32.2	27.4	18.5	24.0
天然金红石	18.4	20.0	17.3	16.2
人造金红石	19.6	20.7	22.7	11.6
合计	70.2	68.1	58.5	51.8

2020 年, 该公司天然金红石产量减少主要受 Sierra Rutile 厂开工率下降所致; 人造金红石产量的增长得益于 SR2[#]炉产量创出新高。但是, 该 SR2[#]炉自 2021 年 2 月份起将面临暂时停产 3~6 个月, 以此降低人造金红石的库存。该产品库存目前处于高位或与此前与科慕公司的合同纠纷有关。该公司 Eneabba 项目于 4 月份投入运营, 为目前全球稀土品位最高的矿床。

(吴优 供稿)