

大直径超厚 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋埋弧焊管开发 *

黄晓辉^{1,2}, 毕宗岳^{1,2}, 张 超^{1,2}, 赵红波^{1,2},
牛 辉^{1,2}, 韦 奉^{1,2}, 牛爱军^{1,2}

(1. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008;
2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008)

摘 要: 通过低碳高 Nb+Mo/Ni 合金设计理念, 采用粗轧低温快轧技术, 成功开发出典型的针状铁素体型 X80 级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 大直径超厚螺旋埋弧焊管用热轧卷板。在制管过程中采用低残余应力成型技术, 结合适度增加水压压力, 管体内表面和外表面环向应力都低于 80 MPa, 并通过试验确定了厚壁管材焊接过程中的最佳热输入线能量。对试制后的 X80 级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋埋弧焊管进行理化性能检测, 结果显示, 管体屈服强度为 556~615 MPa, 抗拉强度为 648~655 MPa, 焊接接头拉伸强度 $\geq 669\ \text{MPa}$, 0 °C 下, 母材、HAZ 和焊缝夏比冲击性能都在 150 J 以上, 母材 DWTT 剪切面积 94%, 且管体和焊接接头硬度最大值仅 255HV₁₀。检测结果表明, 试制的 X80 级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 管材具有良好的力学性能, 且理化性能全部符合 API SPEC 5L 标准要求。

关键词: 大直径; 超厚壁; 螺旋埋弧焊管; 力学性能

中图分类号: TG445

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.01.005

Development of X80 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ Large Diameter Ultra Thick Wall SSAW Pipe

HUANG Xiaohui^{1,2}, BI Zongyue^{1,2}, ZHANG Chao^{1,2}, ZHAO Hongbo^{1,2},
NIU hui^{1,2}, Wei Feng^{1,2}, Niu Aijun^{1,2}

(1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd., Baoji 710008, Shaanxi, China; 2. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: Through the design concept of low-carbon high Nb+Mo/Ni alloy and the technology of rough rolling, low temperature fast rolling, the typical acicular ferrite hot rolled coil used for X80 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ large diameter ultra-wall thickness submerged-arc welded helical pipe has been successfully developed. In the process of pipe manufacturing, the low residual stress forming technology is adopted, combined with the increase of water pressure, the circumferential stress on the inner surface and outer surface of the pipe is less than 80 MPa, and the best heat input line energy in the welding of thick wall pipe is determined through experiments. Physical and chemical properties of X80 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ submerged-arc welded helical pipe were tested after trial production. The results show that the yield strength of the pipe is 556~615 MPa, the tensile strength is 648~655 MPa, and the tensile strength of the welded joint is $\geq 669\ \text{MPa}$. At 0 °C, the Charpy impact properties of

* 基金项目: 国家重点研发计划“低温高压服役条件下高强度管线用钢”(项目编号 2017YFB0304903); 中国管线研究组织项目“X80 级管线钢制管后强度变化规律研究”(项目编号 CPRO2018NO3)。

base metal, HAZ and weld are above 150 J, the shear area of base metal DWTT is 94%, and the maximum hardness of pipe and welded joint is only 255HV₁₀. It can be seen that the trial production of X80 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ pipe shows good mechanical properties, and all physical and chemical properties meet the requirements of API SPEC 5L standard.

Key words: large diameter; ultra-wall thickness; SAWH; mechanical properties

0 前言

随着油气市场的不断扩大,油气管道输量将继续增加,由于 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 规格 X80 钢级管道输量适应范围广,适应性强,输气量可从 $300 \times 10^8\ \text{m}^3/\text{a}$ 增至 $500 \times 10^8\ \text{m}^3/\text{a}$ 以上,从而受到青睐^[1-2]。2016 年开始, $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 21.4\ \text{mm}$ 规格 X80 螺旋埋弧焊管已开始在中俄东线应用,设计压力 12 MPa。尽管目前世界上已有很多大中型钢厂、管厂能生产壁厚 21.4 mm 以上 X80 中厚板、直缝埋弧焊管,但针对止裂性能优异的 21.4 mm 以上厚度 X80 钢级螺旋埋弧焊管用卷板及焊管,由于厚壁导致的表面和心部的冷却速率相差较大,组织及力学性能均匀度难以控制,同时 21.4 mm 以上超厚壁 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 螺旋焊管直径大,成型难度大,焊接质量要求高,所以目前国内外未见 X80 钢级及以上且壁厚超过 23 mm 的螺旋焊管^[3-5]。宝鸡石油钢管有限责任公司联合钢厂开发出国内热轧卷板生产线最大极限壁厚 25.4 mm 的卷板,成功试制出国内 X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋埋弧焊管,并对其组织和性能进行研究。

1 板材性能

1.1 化学成分

超厚壁 X80 管线钢具有高强度、高韧性、良好的焊接性能和一定的抗腐蚀能力,随着厚度增加, DWTT 控制难度急剧加大^[6]。为保证管体强度,同时提高低温冲击性能,在成分设计上采用低碳高 Nb+Mo/Ni 合金设计,开发出了 $1\ 550\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 厚壁 X80 热轧卷板。成分设计时,采用 LF+RH 双联工艺,降低 S、P 含量,提高钢水洁净度,降低偏析,采用粗轧低温快轧技术,使精轧前再结晶奥氏体晶粒尺寸降低,提高断裂韧性;采用 0.07%~0.09% 的 Nb 微合金化提高晶粒细化效果;加入适量 Cr、Mo 等提高钢的淬透性,确保厚壁热轧卷板在层流冷却过程中,能有效缩小表面和心部的冷却速率差,从而确保板材厚度方向组织和力学性能的均匀稳定,并促进针状铁素体 (AF) 生成,提高低温韧性;考虑产品的经济性和综合性能,添加 Ni 和 Cu 元素,利用固溶强化效果提高超厚壁板材的强度和断裂韧性,利用 Ni 进一步提高钢的低温韧性;X80 厚壁卷板化学成分设计见表 1。

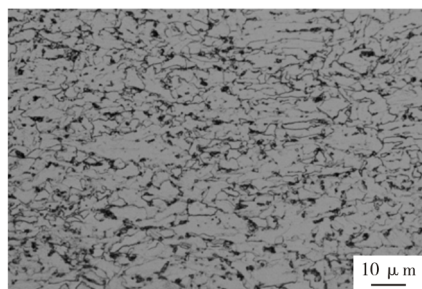
表 1 X80 厚壁卷板化学成分

							%
$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Mo}+\text{Cr})$	$w(\text{Ni}+\text{Cu})$	$w(\text{Nb})$
0.05	0.22	1.55	0.011	0.002	0.45	0.28	0.08

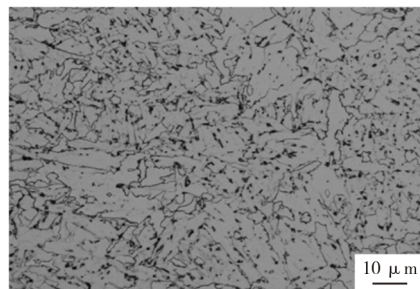
1.2 组织分析

超厚壁卷板需要加密冷却,从而稳定组织和性能。 $1\ 550\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 规格 X80 热轧卷板

金相组织如图 1 所示,X80 管线钢表面和组织均以细长的针状铁素体 (AF) 为主,晶粒尺寸相差在 $1\ \mu\text{m}$ 以内,组织显著细化,有效



(a) 表面



(b) 中心

图 1 X80 热轧卷板金相组织

晶粒尺寸细化到平均值 $6.2\ \mu\text{m}$ ，采用定量金相估算组织含量，板厚边部 AF 组织占 85%，板厚中心 AF 组织占 82%。成分中添加了较多的 Mo 和 Ni/Cu 来提高卷板的强韧性，组织呈现典型的针状铁素体类型，晶界取向不一，相互交错。由于 AF 组织能够在裂纹扩展过程中不断改变裂纹方向，增加有效距离，粗轧低温快轧技术形成的细小 AF 晶界作为大角度晶界可以更有效地阻止裂纹传播，从而显著提高热轧卷板断裂韧性和止裂性能，且具有较高的强度和优良的抗腐蚀断裂性能^[7-8]。Mo 元素的增加显著提高了奥氏体的稳定性，低温组织特征明显。

1.3 力学性能

对 $1\ 550\ \text{mm}\times 25.4\ \text{mm}$ 规格 X80 热轧卷板进行力学性能试验，试验结果见表 2。 $-60\ ^\circ\text{C}$ 卷板的冲击功均可达到 256 J，厚壁 DWTT 在 $-20\ ^\circ\text{C}$ 时剪切面积平均达到 99%，85%DWTT 的韧脆转变温度约为 $-30\ ^\circ\text{C}$ ，对于超厚壁 X80 卷板而言，表明卷板低温韧性控制较好。

表 2 $1\ 550\ \text{mm}\times 25.4\ \text{mm}$ X80 热轧卷板力学性能

$R_{\text{p}0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	冲击功/J	
			$-20\ ^\circ\text{C}$	$-60\ ^\circ\text{C}$
557	652	44	330	256

2 低应力成型技术

所有管材焊接成型后都会产生残余应力，最高可达到材料的屈服强度。采用合适的成型下压量和水压工艺，可使厚壁螺旋焊管残余应力减小且重新均匀分布^[9-11]。X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}\times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋焊管成型前，将钢带铣边到 $1\ 542\ \text{mm}$ 宽后，再铣出焊接坡口。因为厚壁板材对坡口敏感性很高，随着外坡口角度的增加，焊道填充空间扩展，焊缝余高会明显降低，熔深、熔宽尺寸随之增加，所以为保证厚壁焊管内外焊道的熔深、减小焊缝余高以及改善焊趾形貌，经过多次试验确定如图 2 所示的 X 型坡口。

为得到低残余应力的 X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}\times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋焊管，成型过程中，由于壁厚产生成型抗力大，需合理增大 2 号辊的下压量，针对

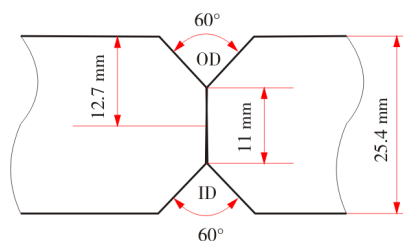


图 2 接头坡口尺寸图

$1\ 422\ \text{mm}$ 大直径，调节设置转盘角度 $69^\circ 25'$ ，内辊角度 $69^\circ 5'$ ，外辊角度 $69^\circ 46'$ ，调节螺距到 $1\ 647\ \text{mm}$ 。由于 $25.4\ \text{mm}$ 属于厚壁带钢，需施加一定的阻力对带钢进行导向，从而降低螺旋焊管在成型过程中的残余应力。

成型后对 X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}\times 25.4\ \text{mm}$ 大直径厚壁螺旋缝埋弧焊管适度增加水压，打压后采用盲孔法（如图 3 所示）对管体焊缝两侧进行残余应力测试，测量结果如图 4 所示。经过试验，当水压值达到 101%SMYS 强度且保压 15 s 后，内表面和外表面环向应力均为双向拉应力状态，焊缝及两侧环向应力都低于 $80\ \text{MPa}$ ，焊缝区残余应力相对较小，表明适度增加水压后可大幅降低管体及焊缝的残余应力，且残余应力的变化幅度减小，分布也更加均匀。



图 3 残余应力测点分布图

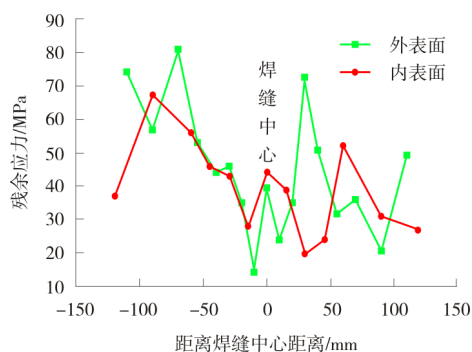


图 4 焊管内外表面环向残余应力分布图

3 焊接热输入控制

厚壁板材焊接热输入过大，易造成焊缝（尤其是 HAZ）晶粒粗大，韧性降低，且易产生焊缝咬边等焊接缺陷。热输入过小，焊缝硬度偏高且易产生未熔透等焊接缺陷^[12-14]。采用 H08C 焊丝和 SJ101H1 焊剂，研究了不同热输入对 X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 焊管焊缝及 HAZ 韧性的影响，测试结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，随着热输入的增加，焊缝及 HAZ 平均韧性先增加后减小，当内焊热输入为 $24\ \text{kJ/cm}$ ，外焊热输入为 $23.8\ \text{kJ/cm}$ 时，焊缝和 HAZ 平均冲击韧性达到最佳，分别为 $314\ \text{J}$ 和 $200\ \text{J}$ 。

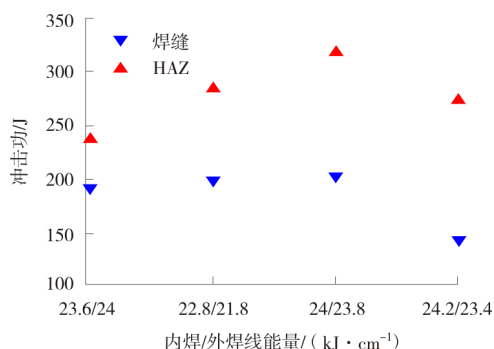


图 5 热输入对焊缝韧性的影响

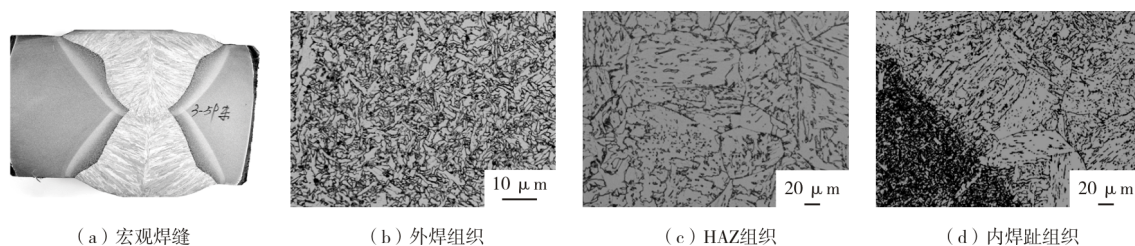


图 6 焊接接头金相组织

以大角度分布，取向自由度大，并具有很高的位错密度，这种组织使管材具有较高的强度和优良的抗断裂性能，同时 HAZ 的 $B_{\text{粒}}$ 组织强度较高，保证了厚壁焊接接头的高强度和高韧性。

4.3 力学性能

对 X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋埋弧焊管管体及焊缝试样进行拉伸试验，在管体 180° 横向取 $\Phi 12.7\ \text{mm}$ 棒试样 24 根，在焊接接头取垂直焊缝 $38.1\ \text{mm}$ 矩形板样 12 块进行拉伸试验，图 7 为拉伸试验结果。统计结果表明，管体屈服强度在 $556\sim 615\ \text{MPa}$ ，抗拉强度在

4 试制及组织性能分析

4.1 试制工艺

采用图 5 中内焊热输入 $24\ \text{kJ/cm}$ 。外焊热输入 $23.8\ \text{kJ/cm}$ 焊接工艺及相应参数（见表 3），投料 2 卷约 $56\ \text{t}$ ，在生产线上进行了 X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 大直径厚壁螺旋缝埋弧焊管试制。

表 3 试制焊接工艺及参数

焊接顺序	焊丝直径/mm	焊接速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	电流/A	电压/V	热输入/($\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$)
内焊	1 [#]	4.0	1 150	35.6	24
	2 [#]	3.2	560	38	
外焊	1 [#]	4.8	1 250	33.3	23.8
	2 [#]	4.0	600	34.6	

4.2 金相组织

图 6 所示为 X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋埋弧焊管焊接接头金相组织。从宏观组织可见，焊缝熔深 $2.5\ \text{mm}$ ，含量 $1.8\ \text{m}$ ，内外焊表面过渡平滑，焊接过程中焊缝尺寸得到较好的控制。外焊缝组织以针状铁素体（AF）+粒状贝氏体（ $B_{\text{粒}}$ ）+多边形铁素体（PF）为主，焊接 HAZ 组织以 $B_{\text{粒}}$ 为主。埋弧焊管焊缝形成大量的 AF，

$648\sim 655\ \text{MPa}$ ，焊接接头抗拉强度 $\geq 669\ \text{MPa}$ ，焊管的强度、塑性等均符合 API SPEC 5L 标准要求。

将 X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋埋弧焊管管体、HAZ 及焊缝试样分别在 $20\ ^\circ\text{C}$ 、 $0\ ^\circ\text{C}$ 、 $-10\ ^\circ\text{C}$ 、 $-20\ ^\circ\text{C}$ 、 $-40\ ^\circ\text{C}$ 、 $-60\ ^\circ\text{C}$ 下进行系列温度夏比冲击试验，试验结果如图 8 所示。从图 8 可以看出， $0\ ^\circ\text{C}$ 下，母材、HAZ 和焊缝冲击功都在 $150\ \text{J}$ 以上，符合 API SPEC 5L 标准要求； $-60\ ^\circ\text{C}$ 时，焊缝和 HAZ 平均冲击功在 $112\ \text{J}$ 以上，呈现出极好的低温韧性。

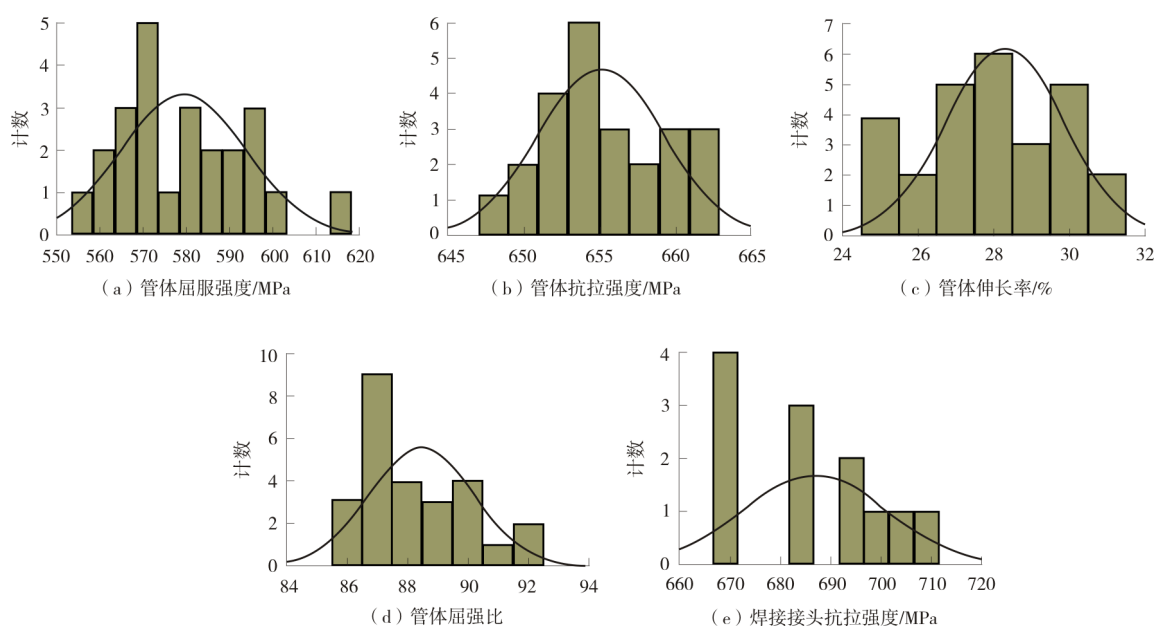


图 7 焊管拉伸性能统计直方图

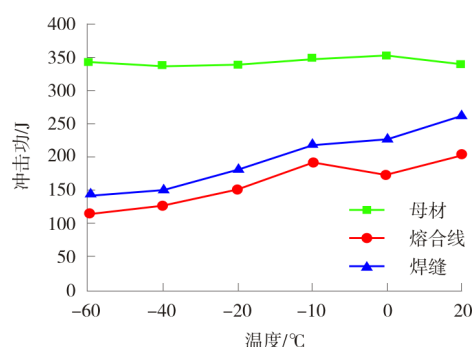


图 8 焊接接头系列温度夏比冲击试验

为了进一步研究厚壁管材不同壁厚部位的热影响区冲击韧性分布规律,分别在壁厚中心和去除表面 2 mm 区域的熔合线、距离熔合线 1 mm 及 3 mm 处取样,在 0 °C 下进行夏比冲击试验,试验结果如图 9 所示。壁厚中心和去除表面 2 mm 区域从熔合线、距离熔合线 1 mm 及 3 mm 处的试样平均韧性都大于 150 J,可见焊接接头

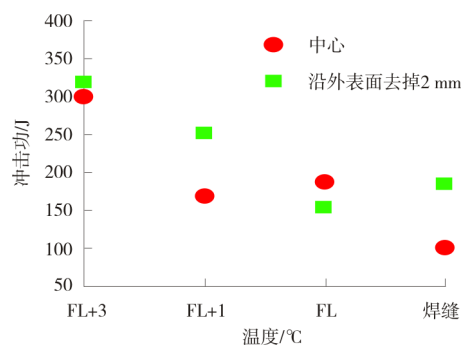


图 9 熔合线区域夏比冲击试验

与管体强度匹配,壁厚不同部位的热影响区粗晶区附近整体韧性稳定,焊缝及热影响区未发生明显软化。

对 X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋埋弧焊管管体在 20 °C、0 °C、-10 °C、-20 °C、-40 °C 下进行 DWTT 试验,试验结果如图 10 所示。由图 10 可以看出,0 °C 下母材 DWTT 剪切面积均 94% 以上,符合 API SPEC 5L 标准要求。对焊接接头进行弯曲试验,弯轴直径 180 mm,弯曲角度 180°,试验后的母材、HAZ 和焊缝或熔合线处都未见裂纹或破裂,可见弯曲性能也符合 API SPEC 5L 标准要求。

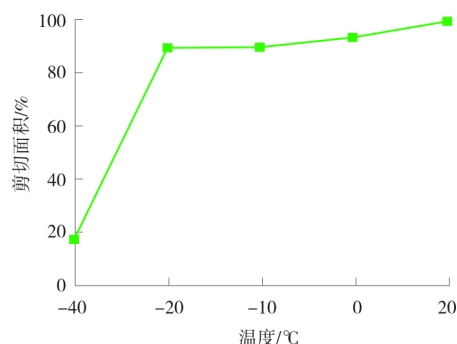


图 10 管体系列温度 DWTT 试验结果

对 X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋埋弧焊管管体和焊接接头进行硬度试验,试验结果见表 4。由表 4 可以看出,经过低应力成型和水压后的管体和焊接接头硬度最大值仅 255HV₁₀,硬

表 4 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋缝埋弧焊管焊缝硬度值

取样位置	测量样本数量	最小值	最大值	平均值
母材	32	215	242	231
HAZ	48	209	254	233
焊缝	32	227	255	239
标准要求	$\text{HV}_{10} \leq 280$			

度较低, 远低于标准要求的 280HV_{10} , 完全符合 API SPEC 5L 标准要求。

5 结 论

(1) 通过低碳高 Nb+Mo/Ni 合金设计理念和粗轧低温快轧技术开发的 $25.4\ \text{mm}$ 厚壁 X80 管线钢热轧卷板厚度组织均匀, 针状铁素体型管线钢晶粒更细, 保证了卷板的强度和低温韧性。

(2) 采用大直径厚壁焊管低残余应力成型控制技术, 通过合理增大 2° 辊的压下量, 以及适度增加水压到 $101\%\text{SMYS}$ 后, 大幅度降低了管体及焊缝残余应力, 管体内表面和外表面环向应力均低于 $80\ \text{MPa}$ 。

(3) 采用内焊热输入 $24\ \text{kJ/cm}$, 外焊热输入 $23.8\ \text{kJ/cm}$ 时, X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 大直径厚壁螺旋缝埋弧焊管焊缝和 HAZ 冲击韧性最佳。

(4) 对试制的 X80 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 25.4\ \text{mm}$ 螺旋埋弧焊管, 依据 API SPEC 5L 进行自检合格后, 送国家油气管材质量监督检验中心检测, 结果表明, 试制的螺旋埋弧焊管理化性能符合相关标准要求。

参考文献:

[1] 李鹤林, 吉玲康, 田伟. 高钢级钢管和高压输送; 我国油

气输送管道的重大技术进步[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 84-90.

[2] 罗东晓. 实施全国天然气管网大联通的战略构想[J]. 天然气工业, 2006, 26(10): 139-141.

[3] 牛涛, 安成钢, 姜永文, 等. 超厚规格 X70 管线钢热轧卷板组织性能研究[C]. 第十届(2015)中国钢铁年会论文集, 上海. 2015: 532-538.

[4] 方立志. 本钢厚规格 X70 管线钢热轧板卷的生产试验[J]. 冶金丛刊, 2012(5): 21-23.

[5] 刘文波, 赵迪, 侯庆平, 等. 厚规格管线钢热轧板卷的开发与生产试验[C]. 第八届(2011)中国钢铁年会论文集, 北京, 2011: 312-314.

[6] 李群, 田鹏, 土志勇, 等. 坯料厚度及轧制规程对厚规格管线钢落锤撕裂性能的影响[J]. 轧钢, 2015, 32(1): 19-23.

[7] 张小立, 玛耀荣, 赵文轮, 等. 高级别管线钢显微组织的演变[J]. 特殊钢, 2008, 29(2): 41-43.

[8] 郭振, 温永红, 胡水平, 等. 针状铁素体钢的组织类型及对性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2007(6): 5-8.

[9] 田均平. 埋弧双丝焊工艺参数对焊缝成型的影响[D]. 西安: 西安石油大学, 2009.

[10] 李为卫, 杨扬, 徐晓峰. 大口径厚壁 X80 螺旋埋弧焊管的开发[J]. 现代焊接, 2009, 78(6): 12-15.

[11] 毕宗岳. 管线钢管焊接技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.

[12] 陶红标, 土明林, 范倚, 等. 第三代汽车钢的热物性及相变特征研究[J]. 炼钢, 2013, 29(5): 65-69.

[13] 熊庆人, 冯耀荣, 霍春勇, 等. 螺旋缝埋弧焊管残余应力的测试与控制[J]. 机械工程材料, 2006, 30(5): 13-16.

[14] 李四军, 朱海宝, 周平, 等. 厚规格 X 80 管线钢的组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(24): 85-88.

[15] 黄志潜. 油气输送管道用螺旋埋弧焊接钢管的制造技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社. 2006.

作者简介: 黄晓辉 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事油气管材开发及焊接技术的研究工作。

收稿日期: 2021-08-14

编辑: 郭克星

欢迎投稿 欢迎订阅