

X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 21.4\ \text{mm}$ 螺旋缝埋弧焊管性能

孙 宏, 孙志刚, 宗秋丽, 郑青昊
(渤海装备华油钢管有限公司, 河北 青县 062658)

摘 要: 分析 X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 21.4\ \text{mm}$ 螺旋缝埋弧焊管的化学成分、力学性能、组织结构和几何尺寸; 研究了壁厚对 X80M 钢级焊管热影响区硬度的影响。分析认为: X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 21.4\ \text{mm}$ 焊管的合金元素范围比 $\Phi 1\ 219\ \text{mm} \times 18.4\ \text{mm}$ 焊管明显缩窄, 力学性能相比 Q/SYGD 0503.2 有较大的富余量, 韧性良好, 残余应力较低, 管端几何尺寸控制良好, 但热影响区存在一定程度的软化。后续应关注壁厚增加带来的大壁厚焊管热影响区软化和焊接接头低强匹配等问题。

关键词: 螺旋缝埋弧焊管; 中俄东线; X80M 钢级; 性能; 热影响区; 软化

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2022.1.34.38

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Properties of $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 21.4\ \text{mm}$ X80M SAWH Pipe

SUN Hong, SUN Zhigang, ZONG Qiuli, ZHENG Qinghao
(North China Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Qingxian 062658, China)

Abstract: Analyzed here in the paper are the main aspects of the $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 21.4\ \text{mm}$ X80M SAWH pipe, including the chemical composition, the mechanical properties, the microstructure and the geometric dimensions, etc. Also studied is the effect by the wall thickness on the HAZ hardness of the pipe. It is regarded via the analysis that compared with the $\Phi 1\ 219\ \text{mm} \times 18.4\ \text{mm}$ weld pipe, the alloy element range of the $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 21.4\ \text{mm}$ X80M SAWH pipe is obviously less wide, and compared with the requirements as specified under Standard Q/SYGD 0503.2, the mechanical properties of the X80M pipe have rather large margin. The pipe also features good toughness, low residual stress, and well controlled pipe-end dimensions; however there exists certain degree of HAZ softening. It is suggested to pay attention in the follow-up process to the issues like how the wall thickness increase affects HAZ softening of the heavy-wall weld pipe and the weld joint low strength-mating.

Key words: SAWH pipe; Sino-Russia-East Natural Gas Pipeline; St. G X80M; property; HAZ; softening

随着人类对天然气需求的不断增大, 国内外开发并大规模应用了 X80 钢级焊管, 尤其是我国的西气东输二线、西气东输三线及陕京四线等天然气管道工程, 其主干线采用了 X80 钢级 $\Phi 1\ 219\ \text{mm}$ 焊管, 管道最大输送压力达到了 $12\ \text{MPa}$ ^[1-2]。2017 年中俄东线天然气管道工程全面加快建设, 这是我国首条采用 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 规格焊管的长输天然气管道工程, 管道最大设计压力也达到了 $12\ \text{MPa}$ ^[3]。现主要介绍 X80M 钢级(M 代表热机械轧

态交货) $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 21.4\ \text{mm}$ 螺旋缝埋弧焊管的主要性能指标及特点。

1 材料性能

1.1 化学成分

X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管管体的化学成分见表1, 管体 C、Nb 元素区间如图 1 所示, 管体与焊缝的主要化学成分对比见表 2; 与文献[4]中介绍的 X80 钢级 $\Phi 1\ 219\ \text{mm} \times 18.4\ \text{mm}$ 螺旋缝埋弧焊管的化学成分(平均值)进行对比, 具体如图 2 所示。从图 1~2 可以看出, X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管的化学成分均满足 Q/SYGD 0503.2—2016《中

孙 宏(1974—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 从事石油输送钢管材料与试验技术工作。

俄东线天然气管道工程技术规范 第 2 部分：X80 级螺旋缝埋弧焊管技术》要求；C 元素含量大部分在 0.055% 及以下，Nb 元素呈双峰分布，这主要是因为不同钢厂的成分设计存在差异。

表 1 X80M 钢级 Φ1 422 mm 焊管管体化学成分(质量分数) %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
平均值	0.053	0.23	1.69	0.010 0	0.001 7	0.22	0.22	0.19
最大值	0.070	0.29	1.83	0.015 0	0.005 0	0.26	0.27	0.23
最小值	0.037	0.16	1.57	0.004 4	0.000 2	0.16	0.15	0.15
要求值 ^①	≤0.07	≤0.30	≤1.80	≤0.015	≤0.005	0.15~0.30	0.12~0.27	0.15~0.25
项目	Al	Cu	Nb	Ti	V	B	N	CE _{RM}
平均值	0.030	0.032	0.067	0.011 0	0.006 9	0.000 2	0.004 7	0.18
最大值	0.059	0.160	0.080	0.018 0	0.025 0	0.000 5	0.007 7	0.20
最小值	0.009	0.005	0.053	0.003 8	0.000 2	0.000 1	0.001 7	0.15
要求值 ^①	≤0.06	≤0.30	0.050~0.080	≤0.025	≤0.03	≤0.000 5	≤0.008	≤0.22

注：①指 Q/SYGD 0503.2 要求值。C 含量每减少 0.01%，Mn 含量可以增加 0.05%，但 Mn 含量不得超过 1.85%；C 含量每减少 0.01%，Nb 含量可增加 0.005%，但 Nb 含量不得超过 0.085%。

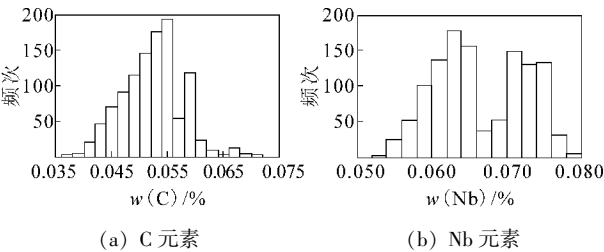


图 1 X80M 钢级 Φ1 422 mm 焊管管体 C、Nb 元素区间

表 2 X80M 钢级 Φ1 422 mm 焊管化学成分(质量分数) %

项目	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb+Ti+V	B
管体	0.052	0.24	1.63	0.24	0.25	0.21	0.012	0.070	0.000 1
焊缝	0.049	0.30	1.62	0.19	0.27	0.16	0.035	0.057	0.001 2

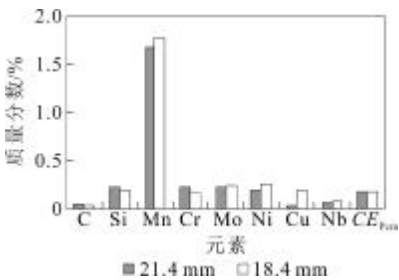


图 2 不同壁厚 X80 钢级螺旋缝埋弧焊管的化学成分对比

化学成分方面，Φ1 422 mm 规格焊管中的 C 含量上限值从 Φ1 219 mm 规格的 0.09% 下降到 0.07%，实测值在 0.037%~0.070%，平均值为 0.053%；Cr、Mo、Nb 及 Ni 含量均增加了下限要求，特别是 Nb 含量上限值从 0.11% 下降到 0.08%，同早期应用于

冀宁联络线的 X80 钢级管道工程 Nb 含量上限值。较高的 Nb 含量可满足大壁厚 X80M 钢级管线管高强度和高韧性的要求，另一方面也保证了可焊性。

从表 2 可以看出，焊缝中的 Cr、Ni 与 Nb+Ti+V 含量明显低于管体，但 B 元素含量明显高于管体，B 元素主要来源于焊丝。微量的 B 元素可显著提高钢的淬透性^[5]；适量的 B 元素可促进熔敷金属产生均匀细小的针状铁素体组织，有助于改善熔敷金属的低温冲击韧性^[6]。

1.2 显微组织

在 X80M 钢级 Φ1 422 mm 焊管上取金相试样，采用硝酸乙醇溶液(体积分数为 4%)浸蚀，其显微组织如图 3 所示。X80 钢级 Φ1 422 mm 焊管管体的显微组织(图 3a~b)为粒状贝氏体、少量铁素体和少量珠光体，管体表面附近的晶粒尺寸略小于壁厚中心的。外焊道的显微组织(图 3c)主要为晶内成核针状铁素体和柱状先共析铁素体，柱状先共析铁素体的宽度较小，平均宽度不超过 20 μm；因晶内成核针状铁素体的晶粒取向具有随机性，起到了阻止裂纹扩展的作用^[7-8]。内焊道的显微组织(图 3d)主要为晶内成核针状铁素体，未见柱状先共析铁素体，存在局部可见的原奥氏体晶界^[9]；生产中发现，晶内成核针状铁素体有的呈针状，而有的呈块状。热影响区的显微组织主要为粒状贝氏体，存在晶界较明显的原奥氏体晶粒，生产实际中也经常有原奥氏体晶界不明显或消失的情况，晶内分布有条状或颗粒状马奥组元(M-A)^[9]，M-A 组元呈链状，有

明显的方向性。从图 3(f)可以看出,焊缝金属依附熔池边界母材晶粒外延生长,形成联生结晶^[8],但是没有形成连续的柱状晶。

1.3 力学性能

1.3.1 拉伸性能

在 X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管管体取横向 $\Phi 12.7\ \text{mm}$ 圆棒试样,在焊接接头取宽度 $38.1\ \text{mm}$ 板状试样,检测其拉伸性能,具体如图 4~5 所示。从图 4~5 可以看出,钢管管体的屈服强度、抗拉强度和屈强比总体上呈正态分布;焊接接头的抗拉强度最小值、最大值及平均值分别为 $680\ \text{MPa}$ 、 $785\ \text{MPa}$ 及 $726\ \text{MPa}$,抗拉强度平均值比 Q/SYGD 0503.2 要求高 $100\ \text{MPa}$ 以上。

1.3.2 夏比冲击韧性

在 X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管管体横向、焊缝中心及热影响区分别取 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 55\ \text{mm}$ 尺寸 V 型缺口试样,检测其在 $-10\ ^\circ\text{C}$ 的夏比冲击吸收功,结果如图 6 所示。检测发现,管体横向、焊缝中心及热影响区在 $-10\ ^\circ\text{C}$ 时的夏比冲击吸收功平均值分别为 $346\ \text{J}$ 、 $169\ \text{J}$ 及 $203\ \text{J}$,冲击功总体上符合正态分布。焊缝中位向各异的细小针状铁素体有助于改善焊缝区的低温韧性^[8,10]。为了对比热影响

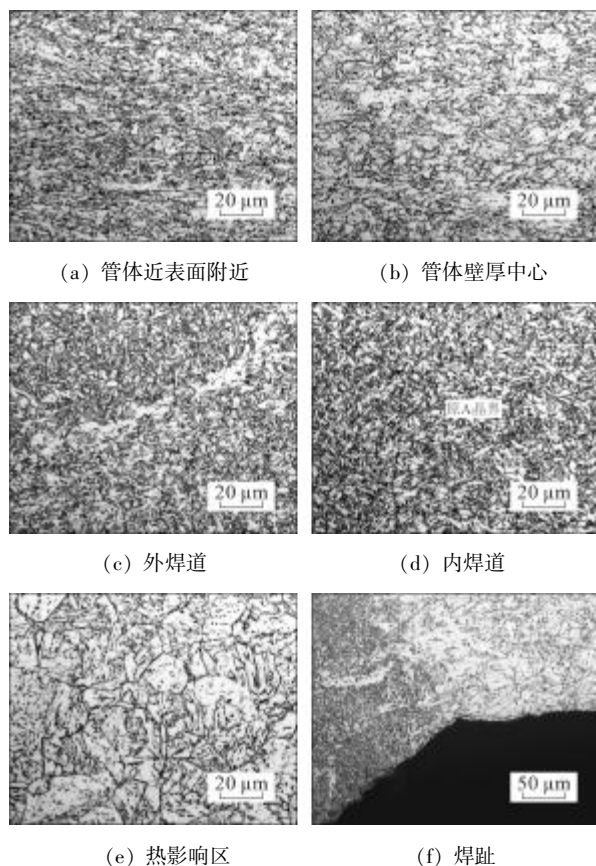


图 3 X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管的显微组织

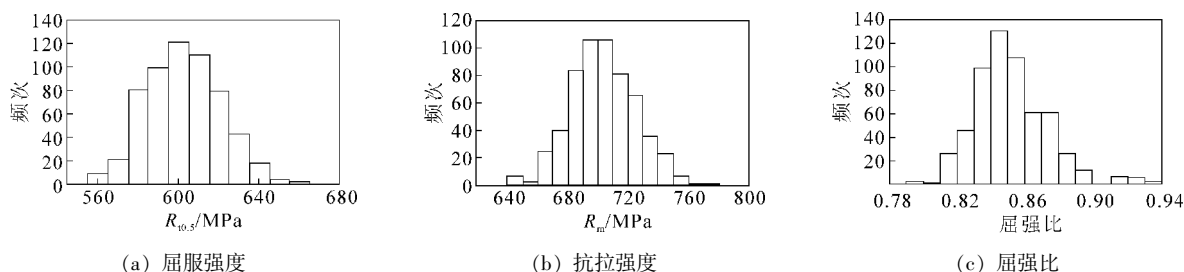


图 4 X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管管体纵向拉伸性能

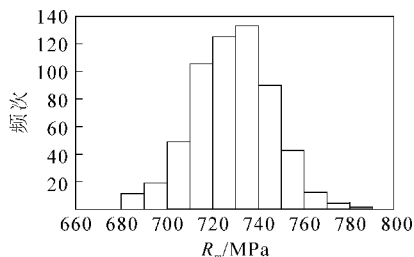


图 5 X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管焊接接头抗拉强度

区不同位置的冲击性能,除了进行试样缺口中心线通过外焊道熔合线的 $-30\ ^\circ\text{C}$ 夏比冲击试验外,还进行了试样缺口中心线通过内焊道熔合线的 $-30\ ^\circ\text{C}$ 夏比冲击试验,两种试样的缺口中心线通过的区域不

同,但是试验平均值相同,均为 $140\ \text{J}$ 。

X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管在 $-45\ ^\circ\text{C}$ 的夏比冲击吸收功如图 7 所示。从图 7 可以看出:管体横向与管体纵向的夏比冲击吸收功均在 $300\ \text{J}$ 上下波动,仅管体横向出现了一个偶发低值;焊缝中心线及热影响区的夏比冲击吸收功均在 $100\ \text{J}$ 上下波动;与 $-10\ ^\circ\text{C}$ 试验时不同,焊缝中心线及热影响区的夏比冲击吸收功的差异性减小,并趋于一致。检测时由于部分样本进入韧-脆转变区间,所以部分组(1 组 3 个试样)试样的冲击功的组间差异变大。

1.3.3 落锤撕裂试验

研究表明,在三维应力状态下,裂纹尖端处于

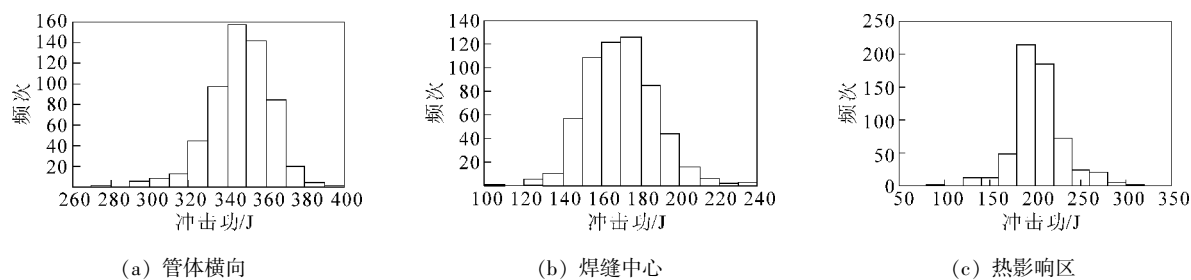


图6 X80M 钢级 Φ1 422 mm 焊管在-10 °C 的夏比冲击吸收功

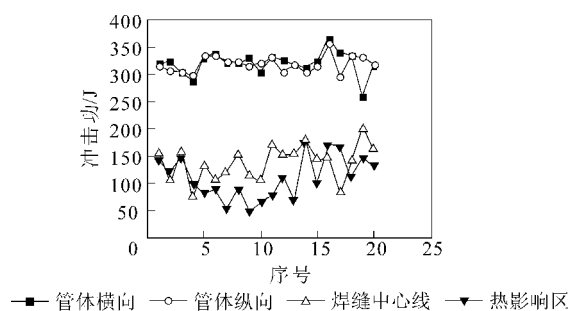


图7 X80M 钢级 Φ1 422 mm 焊管在-45 °C 的夏比冲击吸收功

三轴拉伸状态,厚度方向上存在离面约束,使得管材韧性随着壁厚的增加而降低^[11]。在-5 °C对Φ1 422 mm×21.4 mm 规格焊管进行了 600 多次的落锤撕裂试验,试样尺寸为 305 mm×76 mm×厚度,采用深度为 5 mm 的压制缺口。结果发现,X80M 钢级焊管在-5 °C 时的剪切面积百分比绝大多数为 100%,壁厚提高至 21.4 mm 后,仍然表现出优异的韧性,试验结果均满足 Q/SYGD 0503.2 要求。

1.3.4 焊接接头的维氏硬度特性

为了对比应用于中俄东线管道工程不同壁厚(21.4 mm 和 17.8 mm)X80M 钢级 Φ1 422 mm 螺旋缝埋弧焊管焊接接头的硬度特性,选取了同一钢厂板卷生产的焊管,且生产日期差别不大。硬度平均值分布如图 8 所示。检测发现:硬度最大值均低于 Q/SYGD 0503.2 规定(要求≤280 HV10)。21.4 mm 壁厚焊管硬度值的高点在 1、8、9 及 14 位置,均为母材;其次是 4、5、11 及 12 位置,即焊缝,并且内焊道的硬度值略高于外焊道;硬度值低点在 2、3、6、7、10 及 13 位置,即热影响区,其中靠近焊管外表面的 2、3、6、7 位置硬度值基本相同,靠近钢管内表面的 10 及 13 位置硬度值基本相同,靠近焊管内表面的热影响区的硬度值略高于靠近焊管外表面的硬度值。17.8 mm 壁厚焊管硬度值的高点在 11、12 位置,即内焊道位置;其次是 1、

8、9 及 14 位置,即母材位置;硬度值低点在 2、3、6、7 位置,即靠近焊管外表面的热影响区,其中 2、3、6、7 位置硬度值基本相同,靠近焊管内表面的 10、13 位置硬度值基本相同,靠近焊管内表面的热影响区的硬度值略高于靠近焊管外表面的

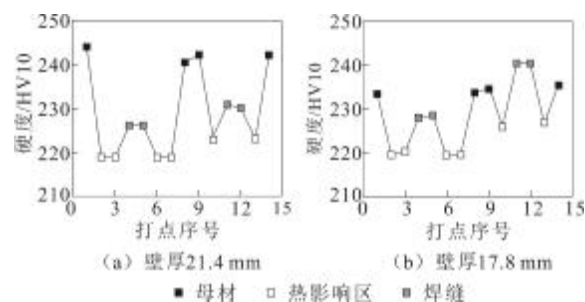


图8 不同壁厚 X80 钢级螺旋缝埋弧焊管焊接接头硬度平均值分布

硬度值。

热影响区的硬度低于母材的原因可以归究于热影响区的软化^[12-13]。用硬度衡量的热影响区软化率,21.4 mm 壁厚焊管约为 9.0%,17.8 mm 壁厚焊管约为 5.3%,可见壁厚对焊管热影响区软化率有显著影响。21.4 mm 壁厚焊管焊缝的硬度比母材低 5.7%,17.8 mm 壁厚焊管焊缝的硬度与母材相当。可见,对于硬度指标,21.4 mm 壁厚焊管焊接接头存在低强匹配问题。从图 8 可以看出,21.4 mm 壁厚焊管焊接接头的硬度波动幅度明显大于 17.8 mm 壁厚焊管的。因此,对于大壁厚焊管,应关注壁厚增加带来的热影响区软化和焊接接头的低强匹配问题。

2 焊管残余应力

依据 Q/SYGD 0503.2,采用切环法检测 X80M 钢级 Φ1 422 mm×21.4 mm 焊管的残余应力,通过切开弹复量得到的残余应力近似代表整个焊管的残余应力水平^[14-15]。检测发现,周向切口张开间距平均值为 13 mm,满足 Q/SYGD 0503.2 要求(要求切

口张开间距 ≤ 90 mm)。文献[16]指出,水压试验和稳压试验均会使螺旋缝埋弧焊管内外表面的残余应力分布趋于均匀,并且可明显降低残余应力。因此,X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 21.4\ \text{mm}$ 焊管的实际残余应力会比焊后状态更低一些。

3 焊管外观和几何尺寸

检查 X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管的外观质量,发现其内外表面质量和管端内、外焊道修磨质量好,均满足 Q/SYGD 0503.2 要求。对于输送管道的环缝焊接,焊管管端的尺寸至关重要。中俄东线管道工程项目要求:管端外径允许偏差为 $-1.0 \sim +1.5\ \text{mm}$ (对应的管端周长为 $4\ 461.9 \sim 4\ 469.8\ \text{mm}$),且两端平均直径之差 $\leq 2.0\ \text{mm}$,管端椭圆度 $\leq 8.5\ \text{mm}$ 。统计发现,X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管实际的管端周长为 $4\ 463 \sim 4\ 469\ \text{mm}$,两端直径之差平均值 $< 1.5\ \text{mm}$,管端椭圆度 $\leq 4.5\ \text{mm}$,头端与尾端的实际管端椭圆度平均值分别为 $2.07\ \text{mm}$ 与 $1.84\ \text{mm}$,钢管管端尺寸精度控制良好。X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管管端椭圆度分布如图 9 所示,管端椭圆度呈多峰分布,并非正态分布,这可能是由于样本是 3 个生产阶段组成造成的。

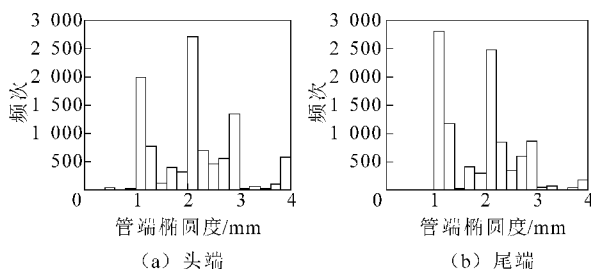


图 9 X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管管端椭圆度分布

4 结 语

(1) X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管的合金元素范围比 $\Phi 1\ 219\ \text{mm}$ 焊管明显缩窄,管体的显微组织为细小的粒状贝氏体,内外焊缝组织主要为交错分布的、细小的晶内成核针状铁素体,外焊缝存在较窄的柱状先共析铁素体,热影响区的显微组织主要为粒状贝氏体。

(2) X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管的力学性能相比 Q/SYGD 0503.2 要求有较大的裕量,管体、焊缝和热影响区韧性良好;从焊接接头的硬度来看,热影响区存在一定程度的软化,需进一步研究。

(3) X80M 钢级 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$ 焊管的残余应力

保持在较低水平,管端几何尺寸控制良好,很好地满足了中俄东线管道工程的需求。

5 参考文献

- [1] 李延丰,任毅,陈小伟. $\Phi 1\ 219\ \text{mm} \times 22\ \text{mm}$ X80 含 Mo 直缝埋弧焊管的开发[J]. 钢管, 2008, 37(3): 28-32.
- [2] 王晓香,李延丰,付彦宏,等. X80 级管线钢管和感应加热弯管的开发[J]. 焊管, 2009, 32(5): 28-30; 2009, 32(6): 30-35.
- [3] 赵与越,庞贵良,王强,等. $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 38.5\ \text{mm}$ X80 钢级钢管理化性能研究[J]. 钢管, 2020, 49(6): 52-56.
- [4] 孙宏,田鹏,李延丰,等. X80 钢级 $\Phi 1\ 219 \times 18.4\ \text{mm}$ 螺旋焊管的研制与应用[J]. 石油科技论坛, 2011, 30(4): 59-61.
- [5] 曹忠孝,李文斌,庞兆夫,等. 微量硼对低碳贝氏体钢过冷奥氏体转变的影响[J]. 鞍钢技术, 2009(1): 22-24.
- [6] 霍光瑞,张俊旭,付学满. 微量 B 对 440 MPa 级焊条熔敷金属低温冲击韧性的影响[J]. 材料开发与应用, 2006, 21(2): 18-23.
- [7] SAOUDI A, FELLAH M, SEDIK A, et al. Assessment and statistical correlation of mechanical properties of double sided single pass submerged arc welded line pipe steel[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2020, 23(2): 452-461.
- [8] 翟战江,魏金山,彭云,等. 热输入对 X80 焊缝金属低温冲击性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(9): 146-149, 154.
- [9] 冯耀荣,高惠临,霍春勇,等. 管线钢显微组织的分析与鉴别[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2008.
- [10] 王燕. 焊接材料对 X70 直缝埋弧焊管焊缝组织性能的影响[J]. 钢管, 2020, 49(3): 21-24.
- [11] 张华,张宏,赵新伟,等. 管线钢落锤撕裂试验厚度效应试验研究[J]. 压力容器, 2016, 33(11): 14-19.
- [12] 陈小伟,王旭,王立柱,等. X80 管线钢焊接热影响区软化问题研究[J]. 焊管, 2017, 40(6): 1-8.
- [13] 朱敏,张延松. X80 埋弧焊热影响区的微观组织与局部软化行为分析[J]. 焊接学报, 2021, 42(4): 69-73, 96.
- [14] 张继建,付超,王宪栋,等. X90M 钢级螺旋缝焊管残余应力控制的实现——2 号辊压下量与残余应力关系模型的建立[J]. 钢管, 2015, 44(6): 61-66.
- [15] 马家鑫,郑福恩,荆松龙,等. 螺旋焊管切环试验残余应力评价方法分析[J]. 焊管, 2012, 35(11): 30-33.
- [16] 吉玲康,颜峰,霍春勇,等. 螺旋缝埋弧焊管的水压和稳压试验及残余应力[J]. 石油机械, 2000, 28(3): 15-17.

(收稿日期: 2021-11-15)