

X65MO小直径厚壁HFW海底输送管研制

孙磊磊, 屈献永, 郑磊
(宝山钢铁股份有限公司中央研究院, 上海 201900)

摘要: 针对大厚径比HFW海洋管制管过程中纵向屈强比上升的问题, 研究了化学成分、冷却工艺对X65MO管线钢组织和性能的影响。结果表明, 增加C元素含量或去除V元素有利于降低材料预拉伸后的纵向屈强比; 试验材料在高温下卷取, 其显微组织为铁素体+珠光体, 轧态纵向拉伸曲线具有较长的屈服平台, 预拉伸后具有最低的屈强比和最高的均匀延伸率; 随着卷取温度降低, 晶粒更加细小, 贝氏体组织增加, 预拉伸后的纵向屈强比上升幅度较大, 而在相同卷取温度下, 降低冷却速度有利于降低预拉伸后的纵向屈强比。根据研究结果制定了卷板工艺, 试制了X65MO钢级 $\Phi 323.9\text{ mm}\times 14.3\text{ mm}$ HFW海管, 管材横纵向屈强比等拉伸性能均满足规范要求。

关键词: HFW海底输送管; 拉伸性能; 屈强比; 卷取温度; 冷却速度

中图分类号: TG113.25

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.01.006

Development of X65MO Small Diameter Thick Wall HFW Offshore Linepipe

SUN Leilei, QU Xianyong, ZHENG Lei
(Research and Development Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: The effect of chemical composition and cooling process on the microstructure and properties of X65MO pipeline steel was studied to solve the issue of increased longitudinal yield ratio during the process of high thickness to diameter ratio HFW offshore linepipe. The results showed that increasing the content of C element or removing V element were beneficial for reducing the longitudinal yield ratio of the material after pre-tension. At high temperatures, the microstructure of test material is ferrite+pearlite, and the longitudinal tensile curve in the rolled state has a long yield plateau. After pre-tension, it has the lowest yield strength ratio and the highest uniform elongation. As the coiling temperature decreases, the grains become finer, and the bainite structure increases. The longitudinal yield strength ratio after pre-tension increases significantly. At the same coiling temperature, reducing the cooling rate is beneficial for reducing the longitudinal yield strength ratio after pre-tension. A rolling process was developed and for the developed X65MO steel $\Phi 323.9\text{ mm}\times 14.3\text{ mm}$ HFW offshore linepipe, tensile properties, such as transverse and longitudinal flexural ratios, can meet the specification requirements.

Key words: HFW offshore linepipe; tensile properties; yield ratio; coiling temperature; cooling rate

1 概述

油气输送海底管线(以下简称海管)服役中需承受内压、外压、轴向力、弯矩、潮汐等多种载荷的联合作用,一旦破损泄漏就会造成严重的后果,因此对海底管线的安全性要求更高。相对于陆地管线,通常海底管线设计采用的壁厚更大,技术要求也更加严格^[1-3]。

海管在管型选择上主要有直缝埋弧焊管、高

频焊管(HFW)、无缝管等,其中,HFW焊管具有高尺寸精度和经济性优势,在浅海区域海管工程中应用广泛^[4-6]。HFW海管常采用双层管设计,其内管具有小直径、厚壁特点,厚径比较大,常用规格厚径比见表1。对于厚径比在0.04以上的HFW焊管,材料在制管冷成型过程中会发生较大的塑性变形和加工硬化,屈服强度和屈强比显著上升,之后在定径工序,钢管径向受压,纵向受拉伸变形,导致纵向屈强比进一步上升,同时纵

向均匀延伸率下降。因此,纵向屈强比的控制一直是大厚径比HFW海管的难点之一^[7-10]。

常用的海管技术规范主要有API SPEC 5L

表1 HFW海管典型规格的厚径比

厚度/ mm	t/D				
	Φ273 mm	Φ323 mm	Φ355 mm	Φ406 mm	Φ457 mm
12.7	0.047	0.039	0.036	0.031	0.028
14.3	0.052	0.044	0.040	0.035	0.031
15.9	-	0.049	0.045	0.039	0.035
17.5	-	-	0.049	0.043	0.038
19.1	-	-	-	-	0.042

表2 行业技术规范对海管屈强比的要求

行业规范	海管屈强比要求
API SPEC 5L 2018附录J	横向: ≤0.93;纵向:按协议约定
DNV-OS-F101 2005版	横向: ≤0.92;纵向:非抗酸≤0.94,抗酸≤0.95
DNVGL-ST-F101 2017版	横向: ≤0.93;纵向:MPQT检验,要求≤0.93
IOGP S-616 2019版	横向: X60及以上钢级, ≤0.92;纵向: ≤0.93,均匀延伸率≥6%

通过研究成分设计、冷却工艺对海管用X65MO管线钢卷板组织和性能的影响,采用纵向预拉伸的试验方法,模拟HFW制管过程中纵向变形后的拉伸性能演变规律,进一步通过工业试制,开发了X65MO大厚径比HFW海管。

附录J和DNVGL-ST-F101,此外,IOGP组织发布的IOGP S-616最新版技术规范对海管部分增加了较多特殊要求。上述技术规范对海管屈强比的要求见表2,表2中API SPEC 5L 2018附录J是最基础的海管规范,纵向性能依协议而定,无强制要求;2005版DNV-OS-F101要求海管纵向屈强比≤0.94;2017版DNVGL-ST-F101要求海管纵向屈强比≤0.93,但仅要求在MPQT时进行检验;2019版的IOGP S-616则最为严格,要求海管纵向屈强比≤0.93,纵向均匀延伸率≥6%,并作为工业批量生产的常规检验项目。

2 试验材料及方法

试验用三种X65MO管线钢成分设计见表3。1#成分含有0.075%C,并添加了V元素;2#成分在1#成分的基础上降低C、Mn含量,增加了Cr;3#成分在2#成分的基础上去掉了V元素。

表3 试验钢化学成分设计

成分编号	化学成分/%					
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(Cr)	w(V)	w(Mo+Ni+Nb+Ti)
1#	0.075	0.20	1.35	-	0.03	适量
2#	0.065	0.20	1.30	0.16	0.03	适量
3#	0.065	0.20	1.30	0.16	-	适量

采用500 kg真空感应熔炼炉进行冶炼,并浇铸成250 mm厚度轧钢坯料,随后在实验室中试机组进行轧制。第一组试验采用了3种不同成分、相同工艺制备试验钢,研究成分对组织性能的影响;第二组试验采用相同成分、不同冷却工艺制备试验钢,研究工艺对组织性能的影响。两组试验的冷却工艺见表4。目标厚度15.9 mm,试验钢板经层流冷却,进入卷取炉保温后缓冷,以模拟热轧板卷的缓冷过程。对试验钢进行显微组织、横向拉伸、纵向拉伸试验,并通过预拉伸模拟HFW制管纵向变形后拉伸性能的演变规律。

表4 试验钢冷却工艺参数

试验组别	成分编号	试验钢编号	冷速/ (°C·s ⁻¹)	卷取温度/ °C
第一组	1#	1-0#	17±3	570
	2#	2-0#	17±3	570
	3#	3-0#	17±3	570
第二组	1#	1-1#	20±3	430
	1#	1-2#	28±3	520
	1#	1-3#	20±3	520
	1#	1-4#	20±3	570

3 试验结果及讨论

3.1 成分对组织性能的影响

3.1.1 显微组织

第一组试验钢的工艺相同，均采用了较高

的卷取温度 570 °C，金相组织如图 1 所示。从图 1 可以看出，试验钢组织均为多边形铁素体+珠光体，其中，C 含量相对较高、不含 Cr 元素的 1-0# 试验钢中珠光体含量最多，其铁素体晶粒尺寸也略大于 2-0# 试验钢和 3-0# 试验钢。

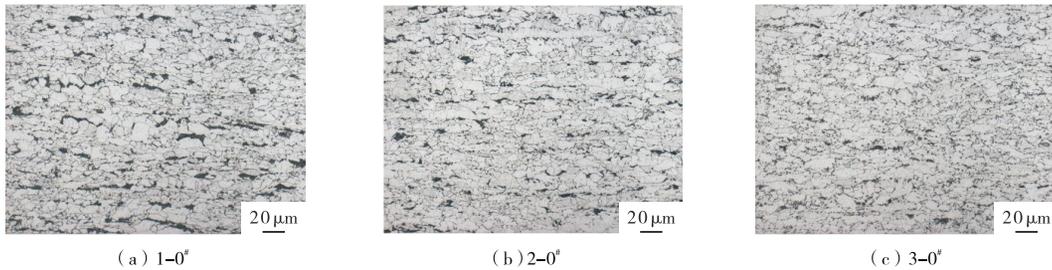


图 1 第一组试验钢金相组织

3.1.2 拉伸性能

表 5 为第一组试验钢横向拉伸性能。2-0# 试验钢相对 1-0# 试验钢，C、Mn 含量略降，添加了

Cr，屈服强度上升 20 MPa 左右；3-0# 试验钢相对于 2-0# 试验钢去掉了 V 元素，屈服强度下降，与 1-0# 试验钢较为接近。

表 5 第一组试验钢横向拉伸性能

编号	方向	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	均匀延伸率/%	延伸率/%
1-0#	横向	502	571	0.878	13	32
2-0#	横向	524	589	0.889	12	33
3-0#	横向	506	568	0.891	13	34

本研究重点关注纵向拉伸性能，尤其是纵向屈服比，分别检验了试验钢轧态纵向拉伸性能，

以及纵向预拉 4%、6%、8% 后的拉伸性能，以模拟 HFW 制管过程的纵向变形，结果如图 2 所示。

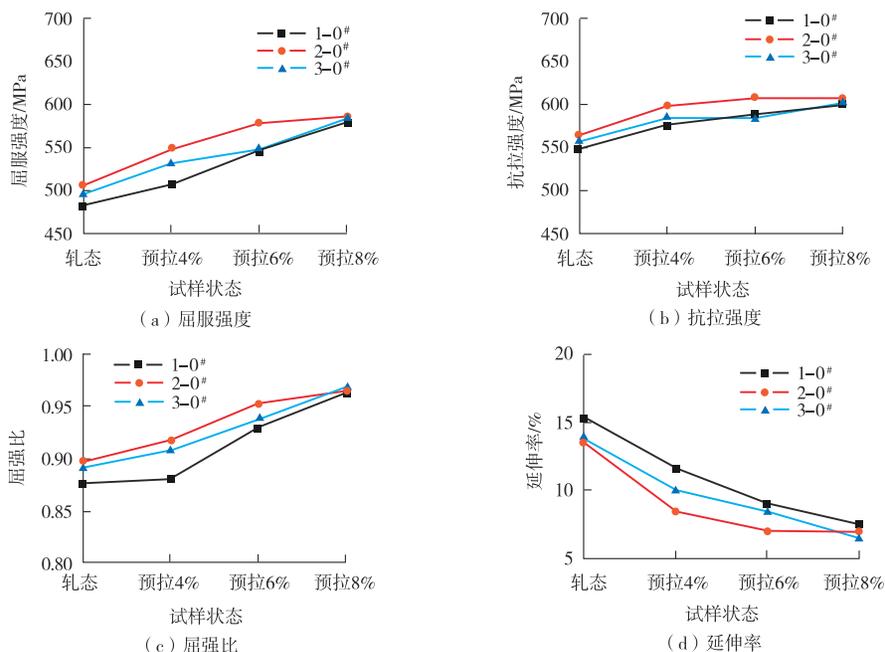


图 2 第一组试验钢纵向预拉伸后的拉伸性能对比

轧态钢板经纵向预拉伸后,纵向强度随预拉伸量的增加而逐步上升,其中屈服强度上升幅度明显高于抗拉强度,进而导致屈强比上升,而均匀延伸率则随着预拉伸量的增加而逐步减小。1-0#试验钢轧态和预拉伸后的屈服强度和屈强比最低,均匀延伸率则最高,预拉伸6%后,屈强比为0.93;3-0#试验钢屈服强度和屈强比略高于前者,均匀延伸率略低;2-0#试验钢屈服强度和屈强比最高,预拉伸6%后,屈强比达到0.95,均匀延伸率则最低。由此可见,提高C含量有利于降低屈强比,添加V则略提高了屈强比。

3.1.3 冲击韧性

管线钢行业标准的冲击试验通常引用ASTM A370标准,采用的是KV8锤头,但在本试验中,由于KV8冲击力过高,无法有效对比试验钢的冲击功差异,故而采用了KV2锤头进行冲击试验,结果见表6。三种成分试验钢均具有较好的低温冲击韧性,-40℃低温下的冲击功均在200J以上,对比可见,1-0#试验钢的冲击功略低于2-0#和3-0#试验钢,这主要是由于其C含量相对较高,显微组织中珠光体含量也高于后两者。

表6 第一组试验钢冲击韧性

编号	试验温度/ ℃	夏比冲击功/J			均值
		1	2	3	
1-0#	-20	244	240	234	239
	-40	218	204	221	214
2-0#	-20	264	253	270	262
	-40	242	231	244	239
3-0#	-20	256	278	259	264
	-40	242	246	236	241

3.2 冷却工艺对组织性能的影响

3.2.1 显微组织

图3为第二组试验钢的金相组织。430℃低温卷取工艺制备的1-1#试验钢组织以粒状贝氏体为主,晶粒细小;520℃卷取、高冷速工艺制备的1-2#试验钢的组织为铁素体+粒状贝氏体+珠光体,其铁素体晶粒尺寸较为细小;520℃卷取、低冷速工艺制备的1-3#试验钢的组织为铁素体+珠光体,其多边形铁素体的含量和晶粒尺寸均大于1-2#;570℃高温卷取工艺制备的1-4#试验钢组织为铁素体+珠光体,其铁素体晶粒尺寸略大于其他两种试验钢。

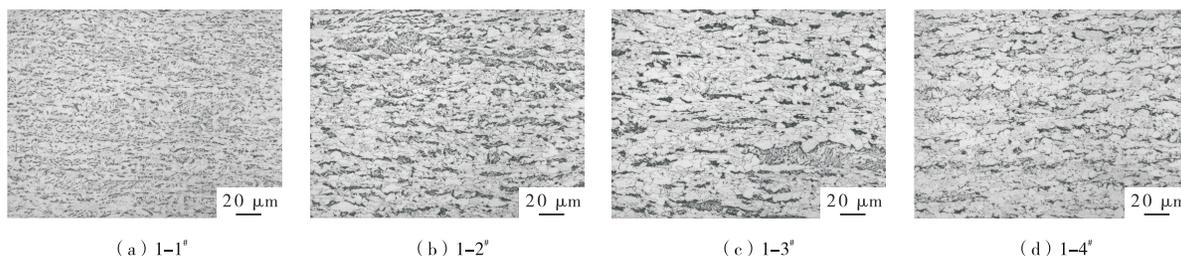


图3 第二组试验钢金相组织

3.2.2 拉伸性能

图4为第二组试验钢的横向拉伸性能。在冷速相近的情况下,1-1#、1-3#、1-4#试验钢的横向屈服强度和抗拉强度随着卷取温度升高而下降。而采用520℃卷取温度、高冷速工艺制备的

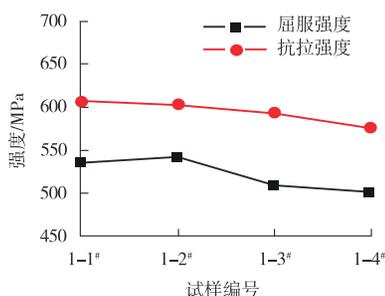


图4 第二组试验钢横向拉伸性能

1-2#试验钢,其屈服强度明显高于相同卷取温度、低冷速工艺制备的1-3#试验钢,而且其强度与430℃低温卷取的1-1#试验钢较为接近。由此可见,卷取温度和冷速均会影响试验钢强度,而冷速的影响效果更为明显。

对第二组试验钢的轧态、预拉伸4%、预拉伸6%、预拉伸8%试样分别进行纵向拉伸试验,结果如图5所示。整体来看,随着纵向预拉变形量的增加,试验钢纵向屈服强度和屈强比快速上升,抗拉强度上升幅度较小,均匀延伸率则显著下降,与第一组试验钢规律一致。对比不同卷取温度的1-1#、1-3#、1-4#试验钢可以发现,卷取温度较高的试验钢,预拉伸变形状态下表现出相

对较低的纵向屈强比，同时也具有较高的均匀延伸率，即1-4#试验钢在本组试验中表现出最低的屈强比和最高的均匀延伸率。而对比采用不同冷

却速度、相同卷取温度的1-2#和1-3#试验钢数据可以发现，低冷速工艺的1-2#试验钢表现出相对较低的屈强比和较高的均匀延伸率。

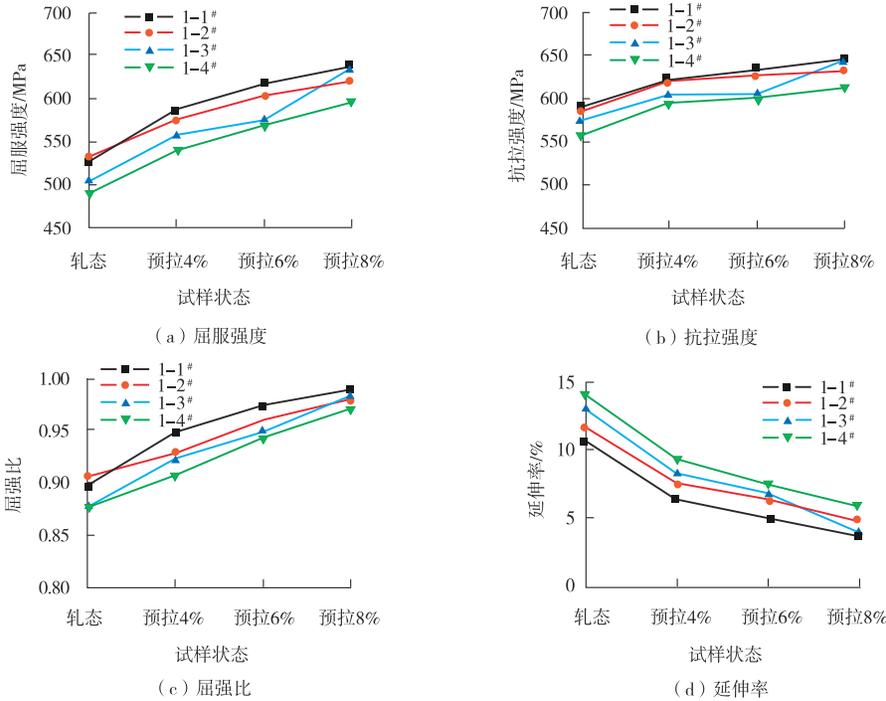


图5 第二组试验钢纵向预拉伸后的拉伸性能对比

图6为1-1#试验钢和1-4#试验钢轧态试样和纵向预拉伸后试样的纵向拉伸曲线。1-1#和1-4#试验钢的轧态试样拉伸曲线均有较明显的屈服平台，预拉伸后两者的屈服平台均消失，屈服点明显上升，均匀延伸率下降，随着预拉伸量进一步增加至6%和8%，拉伸曲线的屈服点进一步上升，均匀延伸率则进一步下降。对比可发现，1-1#试验钢轧态拉伸曲线的

屈服平台末端对应的应变量为2.5%，1-4#试验钢则为3.8%。在屈服平台阶段，应变增加，但流变应力并不增加，经4%预拉伸，前者的屈服平台不足以抵消预拉变形量，随后的流变应力会快速上升，导致预拉伸后的屈服强度大幅度上升，而对于后者，屈服平台可抵消更多的预拉变形，随后的均匀变形量较小，因而其屈服强度上升幅度小于前者。

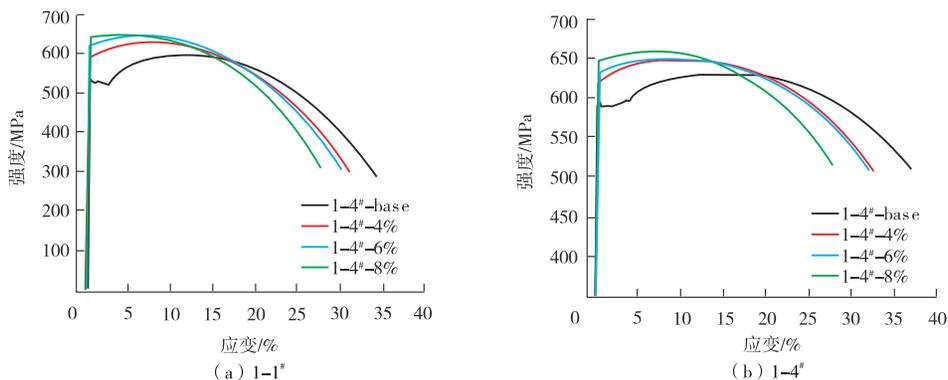


图6 试验钢轧态和预拉伸后试样的拉伸曲线

3.3 讨论

在第一组试验中，2-0#试验钢在1-0#试验钢

的成分基础上添加了Cr元素，其金相组织中的铁素体晶粒更为细小，另由于C含量有所降低，

组织中的珠光体含量有所下降,导致其轧态和预拉伸后的纵向屈强比明显高于1-0#试验钢,同时表现出较低的均匀延伸率。3-0#试验钢在2-0#试验钢的成分基础上去掉了V元素,金相组织差别不大,强度略有下降,轧态和预拉后的纵向屈强比也有所下降。由此可见,提高C含量可有效降低试验钢预拉伸后的纵向屈强比,去掉V元素亦可小幅降低试验钢的屈强比。

冷却工艺是决定管线钢显微组织的关键技术参数,在第二组试验中,随着卷取温度降低,金相组织中的晶粒更加细小,贝氏体含量增加,在570℃高卷取温度下,试验钢组织为铁素体+珠光体,且铁素体晶粒尺寸略大于其他试验钢,具有较低的屈强比和较高的均匀延伸率,其轧态纵向拉伸曲线具有较长的屈服平台,在该范围内,预拉变形对流变应力的影响得以缓解,而在430℃低卷取温度下,组织为细小的粒状贝氏体,其轧态的纵向拉伸曲线的屈服平台相对较短,在相同的预拉变形量情况下,流变应力上升幅度更大,进而导致其预拉后的屈服强度和屈强比大幅上升。而在相同卷取温度下,低冷速工艺制备的1-3#试验钢显微组织中,多边形铁素体的含量和晶粒尺寸大于高冷速工艺制备的1-2#试

验钢,其轧态和预拉伸后表现出较低的纵向屈强比和较高的均匀延伸率。由此可见,在本试验研究的成分和工艺范围内,提高卷取温度、降低冷速,有利于降低试验钢的纵向屈强比、提高均匀延伸率。

4 工业试制

针对 $\Phi 323.9\text{ mm}\times 14.3\text{ mm}$ 大厚径比规格X65MO级HFW海管用户需求,根据试验研究规律,以1#试验钢成分为基础,进行适当优化调整,并采用中低冷速、中高卷取温度的工艺方案在2050热轧产线进行板卷轧制,再经HFW焊管生产线制成焊管,具有较好的生产稳定性。

图7和图8分别为工业生产的 $\Phi 323.9\text{ mm}\times 14.3\text{ mm}$ 规格X65MO HFW海管的管体横向拉伸和纵向拉伸性能统计图,横纵向的屈服强度、抗拉强度、屈强比均在X65MO海管技术要求范围内。管体纵向屈服强度均值为539 MPa,较横向屈服强度均值高35 MPa,这主要是由于大厚径比HFW焊管制管成型和定径后,纵向受拉伸变形较大,屈服强度显著上升,而横向在应变强化作用下,强度亦有上升,但横向板拉试样需压平再进行拉伸试验,在包申格效应作用下,屈服强度会有所下

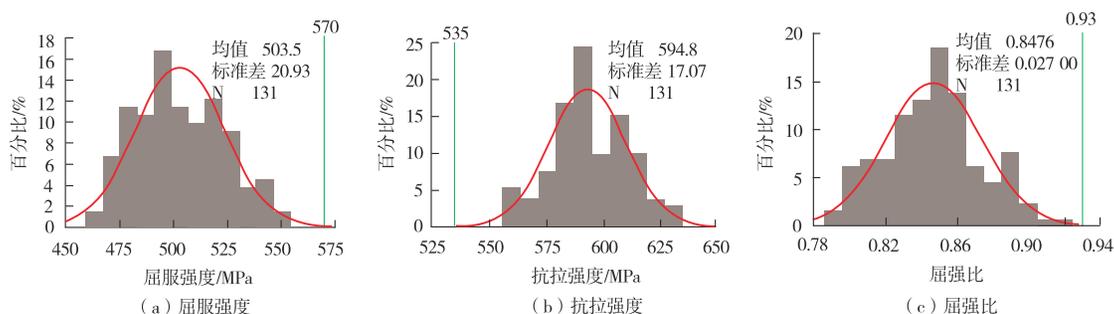


图7 $\Phi 323.9\text{ mm}\times 14.3\text{ mm}$ 规格HFW海管横向拉伸性能

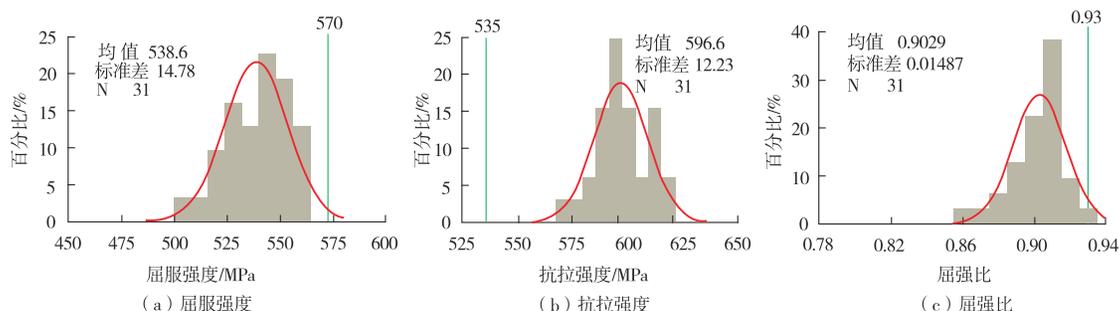


图8 $\Phi 323.9\text{ mm}\times 14.3\text{ mm}$ 规格HFW海管纵向拉伸性能

降。纵向和横向的抗拉强度差别不大,从而导致纵向的屈强比明显高于横向,前者均值在0.90附近,个别数值接近0.93上限,整体均满足 ≤ 0.93 的技术要求。

5 结 论

(1) 通过调整 X65MO 钢级 HFW 海管的化学成分, 研究其对组织性能及屈强比的影响, 结果表明, C 含量相对较高的 1# 成分试验钢中珠光体含量相对更高, 预拉伸后的纵向屈强比最低, 均匀延伸率最高, 3# 成分试验钢次之, 而 2# 成分试验钢预拉后纵向屈强比最高。可见, 提高 C 含量、去除 V 元素有利于降低试验钢预拉后的纵向屈强比。

(2) 试验钢高温下卷取, 其显微组织为铁素体+珠光体, 轧态纵向拉伸曲线具有较长的屈服平台, 预拉伸后具有较低的屈强比和较高的均匀延伸率。随卷取温度降低, 晶粒更加细小, 贝氏体增加, 预拉伸后的纵向屈强比上升, 均匀延伸率下降。在相同卷取温度下, 低冷却速度工艺试验钢预拉伸后表现出较低的纵向屈强比。

(3) 根据研究结果研制成功的 $\Phi 323.9 \text{ mm} \times 14.3 \text{ mm}$ 大厚径比 X65MO 级 HFW 海管, 纵向屈服强度和屈强比明显高于横向, 横纵向拉

伸性能均可满足规范要求。

参考文献:

- [1] 郑磊, 高珊, 陆敏. 海底管线用钢的开发和应用[J]. 焊管, 2006, 29(5): 36-39.
- [2] 王海涛, 池强, 李鹤林, 等. 海底油气输送管道材料开发和应用现状[J]. 焊管, 2014, 37(8): 25-29.
- [3] 牛爱军, 毕宗岳, 张高兰, 等. 海底管线用管线钢及钢管的研发与应用[J]. 焊管, 2019, 42(6): 1-6.
- [4] 胡松林. 焊管在海底管道中的应用探讨[J]. 焊管, 2019, 42(11): 1-5.
- [5] 杨连河, 叶培荣, 李虎昌, 等. X70 钢级 HFW 海底管线钢管的研制和开发[J]. 钢管, 2010, 39(1): 48-52.
- [6] 张业圣, 李志卫. 海洋石油用管的发展现状和前景展[J]. 钢管, 2009, 38(5): 1-10.
- [7] 王怡然, 孙磊磊. 退火温度对小直径厚壁 HFW 焊管组织与性能的影响[J]. 焊管, 2021, 44(5): 9-13.
- [8] 胡松林. 海洋用厚壁 HFW 管线管的研发[J]. 钢管, 2012, 41(3): 28-32.
- [9] 高惠临. 管线钢屈强比分析与评述[J]. 焊管, 2010, 33(6): 10-14.
- [10] 胡松林, 屈献永, 张曙华. HFW 高频焊接管管屈强比的控制与探讨[J]. 钢管, 2020, 49(5): 23-25.

作者简介: 孙磊磊 (1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要方向为钢铁材料开发。

收稿日期: 2023-05-20

修改返回日期: 2023-11-10

编辑: 罗 刚

我国首座城镇燃气掺氢综合实验平台投产

日前, 我国首座城镇燃气掺氢综合实验平台在深圳投入使用, 平台投用为我国利用现有城镇燃气管道掺氢提供了可推广、可复制的模式。该综合实验平台是集测试、验证、生产功能为一体, 掺氢比例可达 20%, 压力范围覆盖城镇燃气全部压力运行范围, 同时实验平台能够通过不同场景、不同压力来模拟城镇燃气的全应用场景。

天然气管道掺氢输送是将氢气与天然气进行不同比例混合, 再利用现有天然气管网进行输送。氢气和天然气性质不同, 天然气管道掺入氢气后, 将会给管材、阀门等设备带来一系列安全运行难题。而该综合实验平台不仅可针对管输条件的燃气管道以及阀门、连接件、表具等燃气基础设施开展管材氢环境长周期实验, 还可针对多种燃气器具及终端应用场景开展适应性研究。现阶段我国天然气掺氢利用的比例为 3%, 欧美部分国家天然气掺氢运输最高比例已经达到 20%。据预测, 2060 年我国氢能消费规模将达到近 8 600 万 t, 产业规模将达到 4.6 万亿元。因此该天然气掺氢平台顺利投产, 为开展天然气管道在掺氢比例、掺氢过程、硬件设施等方面适应性实验、确保燃气掺氢管道的安全提供科学有效的数据试验保障。

(摘自 搜狐网)