

自升式钻井平台支撑系统用 $\Phi 406$ mm \times 45 mm 大口径 厚壁 X100QO 无缝钢管的开发

彭俊 李倩 江南菘

(湖北新冶钢有限公司钢管研究所, 黄石 435001)

摘要 根据自升式钻井平台支撑系统用管的服役条件及使用要求, 设计了 X100QO 厚壁钢管的化学成份。采用“70 t 电弧炉冶炼 \rightarrow LF + VD \rightarrow 连铸 $\Phi 460$ mm 圆坯 \rightarrow ASSEL 机组轧管 \rightarrow 调质热处理”工艺流程生产 $\Phi 406$ mm \times 45 mm 规格 X100QO 大口径厚壁无缝钢管。通过生产过程控制钢的纯净度及尺寸精度, 并根据试验结果确定了 950 $^{\circ}$ C 淬火, 水冷, 530 $^{\circ}$ C 回火, 空冷的热处理工艺。检测结果表明, 该无缝钢管具有高强度及优良的冲击韧性、焊接性能好, 完全满足自升式钻井平台支撑系统用管的设计及使用要求, 并通过了 ABS 美国船级社的认证。

关键词 X100QO 自升式钻井平台 支撑系统 大口径厚壁无缝钢管

Development of $\Phi 406$ mm \times 45 mm X100QO Steel Large-Diameter Heavy-Walled Seamless Pipe Use for Support System of the Jack-up Drilling Platform

Peng Jun, Li Qian and Jiang Nansong

(Steel Tube Research Institute, Hubei Xingyegang Steel Co Ltd, Huangshi 435001)

Abstract According to the service conditions and application requirements of the pipe for the support system of the jack-up drilling platform the chemical composition of X100QO steel heavy-walled pipe has been designed. The $\Phi 406$ mm \times 45 mm X100QO large-diameter heavy-walled seamless steel pipe is produced by process of “70 t EAF \rightarrow LF + VD \rightarrow CCM $\Phi 460$ mm round billet \rightarrow ASSEL rolling \rightarrow quenching and tempering”. By control of purity of steel and dimensional accuracy of tube in production process, according to the test results the quenching temperature is 950 $^{\circ}$ C, water cooling, tempering temperature is 530 $^{\circ}$ C, air cool process. The test results show that the seamless pipe has high strength, excellent impact toughness and good welding performance, fully meets the design and use requirements of the pipe for the support system of the jack-up drilling platform, and has passed the certification of ABS American Classification Society.

Material Index X100QO, Jack-up Drilling Platform, Support System, Large-Sized and Heavy-Wall Seamless Pipe

自升式钻井平台, 是一种超大型的焊接钢结构, 要求海洋平台用钢必须具有高强度、高韧性、易焊接、耐腐蚀及大厚度^[1]。

X100QO 无缝钢管是目前强度级别最高的平台支撑系统用管, 作为平台的关键承力部件的支撑系统用管, 综合性能要求尤为重要, 这种无缝钢管也是目前业内公认的技术难度大、要求高的产品之一^[2]。

湖北新冶钢有限公司结合自身装备特点及用户使用要求, 针对自升式钻杆平台桩腿支撑系统用无缝钢管的特点, 通过成份设计^[3]、焊接性能研究、轧制及热处理工艺研究, 成功开发了 $\Phi 406$ mm \times 45 mm 规格大口径厚壁 X100QO 无缝钢管, 并通过了 ABS 美国船级社的认证。

1 X100QO 钢管的性能要求

X100QO 钢管的化学成分和力学性能要求分别

表1 钻井平台用 X100QO 无缝钢管的化学成分要求/%
Table 1 Chemical composition requirements of steel seamless pipe X100QO for drilling platform / %

C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Ni	Cr	Mo
\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq
0.14	0.45	1.70	0.020	0.010	0.10	0.06	0.05	0.6	0.55	0.70

注: $P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cr + Cu)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$, $CE_{pcm} \leq 0.33$

表2 钻井平台用 X100QO 无缝钢管的力学性能要求
Table 2 Mechanical properties requirements of steel seamless pipe X100QO for drilling platform

屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	屈强比	延伸率/ %	-40 $^{\circ}$ C 横向 冲击功/J
≥ 690	770 ~ 940	≤ 0.93	≥ 14	≥ 54

见表1、表2。

按照船级社规范, 通常要求钢管在 50 kJ/cm 的热输入条件下, 焊缝位置抗拉强度 ≥ 770 MPa, 融合线位置冲击功 ≥ 54 J^[4]。

2 化学成分设计

为保证支撑系统用管在使用过程中的安全,合理设计钢种的化学成份,确保钢管的强度及低温韧性^[4]、焊接性是最关键的,要求采取降碳、多元合金化及微合金化设计,控制尽量低的碳当量以提高钢管的焊接性;同时考虑到钢管厚度较大,为保证有足够的强化元素,加入适量的 Cr、Mo 合金以控制马氏体回火组织的相变强化;加入足够的 Ni 以提高低温韧性;加入 Nb、V 微合金化对奥氏体晶粒进行细化,以起到细晶强化作用,同时 V 与钢中其它元素结合还可以起到固溶强化的作用。除主要元素外,还需要注意尽量降低 P、S、O 等有害元素含量。

按以上思路设计 X100QO 钢管的化学成份,具体见表 3。

3 生产过程

3.1 冶炼工艺

以铁水 + 废钢为原材料,采用 70 t 超高功率电弧炉熔炼,并进行 LF + VD 精炼、真空脱气等纯净钢生产工艺,尽可能降低钢中夹杂物及气体,同时利用中间包感应加热、电磁搅拌等手段,进一步改善材料的偏析。冶炼后期,对钢水进行 Ca 处理,使夹杂物分布更加弥散、细小。连铸过程重点控制钢水过热度及铸坯冷却速度,改善钢坯的成份偏析并提高表面质量。

3.2 轧管工艺

表 3 钻井平台用 X100QO 无缝钢管的化学成分控制目标/%
Table 3 Chemical composition control target of steel seamless pipe X100QO for drilling platform /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Nb	Ti
0.03 ~ 0.10	0.10 ~ 1.00	≤	≤	0.20 ~ 0.01	0.01 ~ 0.01	0.01 ~ 0.005	~ 0.10	0.30
1.50	0.010	0.005	0.50	0.12	0.08	0.030		

采用以下工艺生产钢管:
Φ460 mm 连铸圆坯→环型炉加热→锥型穿孔机穿孔,毛管尺寸 Φ450 mm × 53 mm→ASSEL 轧管机轧管,荒管尺寸 Φ428 mm × 45 mm→减径→空冷。

钢管采用 Φ460 mm 大规格钢坯轧制,可以保证足够的变形量,以充分破碎铸态组织,加热温度以 1 200 ~ 1 300 ℃ 为宜,以避免出现粗大组织。轧制过程轧管机的减径量保证在 20 mm 以上,

以充分利用 ASSEL 轧管机壁厚精度高、旋转轧制各向异性小的优势。最终钢管实际外径公差可以控制在 ±0.5% D、壁厚公差控制在 ±5% S 以内。

3.3 热处理工艺

适当提高了淬火温度,并采用水冷淬火,同时控制冷却水量 ≥ 2 000 m³/h,确保钢管形成足够的马氏体组织。

采用膨胀法,测定该钢种 Ac₁ 为 721 ℃,Ac₃ 为 842 ℃,Ms 为 442 ℃,以测定的 Ac₃ 为依据,根据实际热处理经验将 X100QO 支撑管的淬火温度设定为 950 ℃,并通过试验室模拟,得出回火温度-强度、回火温度-冲击功的关系图[图 1(a,b)]。

由图 1(a)可以看到,随着回火温度的升高,强度并不是直线下降,而是呈现了先高后低的趋势,这是由于随着回火温度的上升,钢中 Mo、V 等元素的逐渐析出碳氮化物从而形成了二次强化。

根据试验数据选择了 950 ℃ 作为最终的淬火温度,淬火保温时间 ≥ 1 h,530 ℃ 作为最终的回火温度,回火保温时间 ≥ 2 h。

4 实际检验数据

按照船级社及用户协议要求,第三方机构对公司生产的 Φ406 mm × 45 mm X100QO 大口径厚壁无缝钢管进行了见证检验,检验结果见表 4。

为验证材料在低温环境下的韧性变化,还对材料进行了低温韧-脆性转变温度测试,具体见表 5。

表 4 Φ406 mm × 45 mm 规格 X100QO 钢管的力学性能
Table 4 Mechanical properties of Φ406 mm × 45 mm steel pipe X100QO

取样位置	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	收缩率/ %	屈服强度/ 抗拉强度
壁厚中心	722	803	21	71	0.90

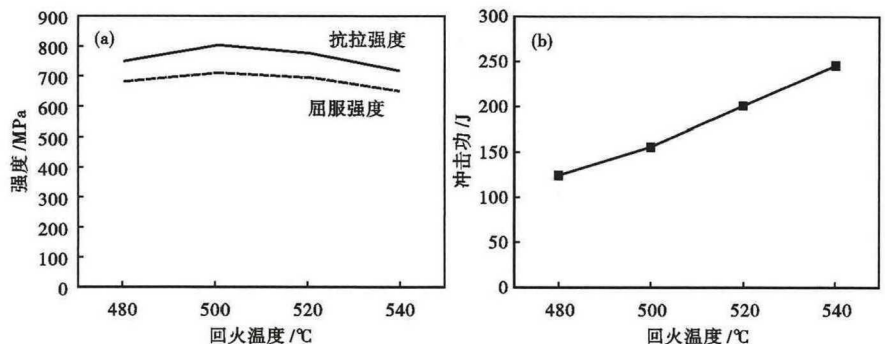


图 1 回火温度对 X100QO 钢强度(a)和冲击功(b)的影响

Fig. 1 Effect of tempering temperature on strength (a) and impact energy (b) of steel X100QO

表5 Φ406 mm×45 mm规格X100QO钢管的低温韧-脆性转变测试

Table 5 Low temperature impact test results of Φ406 mm×45 mm steel pipe X100QO

试验项目	测试温度/℃	平均冲击功/J
横向V型冲击试验	0	205
	-20	201
	-40	170
	-60	145
	-80	121

表6 Φ406 mm×45 mm规格X100QO钢管焊后性能检测结果

Table 6 Welding procedure qualification test results of Φ406 mm×45 mm steel pipe X100QO

位置	平均V型横向冲击功(0℃)/J	抗拉强度/MPa	检测结果
焊缝	101	781	合格
熔合线	145	-	合格
熔合线外2 mm	185	-	合格
熔合线外5 mm	194	-	合格
熔合线外20 mm	206	-	合格

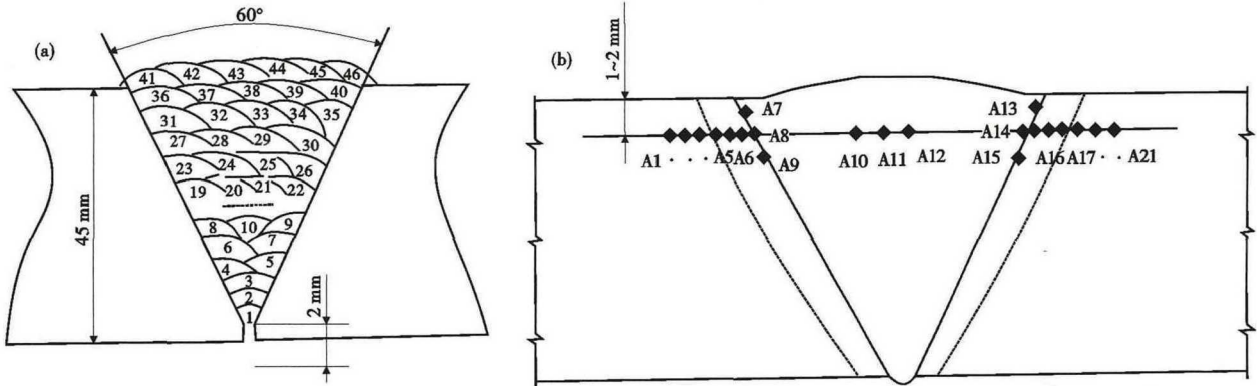


图2 焊接道次(a)和对接头硬度试验点位置(b)示意图
Fig.2 Diagram of welding passes (a) and joint hardness test point location (b)

表7 Φ406 mm×45 mm规格X100QO钢管焊后硬度值(HV5)检测结果

Table 7 Welding procedure hardness value test results of Φ406 mm×45 mm steel pipe X100QO(HV5)

基体			热影响区					熔合线					焊缝							
左侧		右侧	左侧		右侧			左侧		右侧										
A1	A2	A3	A13	A14	A15	A4	A5	A6	A16	A17	A18	A7	A8	A9	A19	A20	A21	A10	A11	A12
262	265	266	282	297	293	345	342	339	344	329	347	292	274	290	273	274	276	240	246	240

5 焊接评价试验

平台支撑管的焊接接头为钢管T、K、Y节点,需要从焊接工艺、焊接温度、焊后变形、焊缝外观、焊后NDT等方面进行严格控制,在正式焊前,必须按AWS(美国焊接学会)和ABS(美国船级社)相关规范要求焊接工艺评定^[5]。

公司生产的钢管在国内材料验证中心进行了焊接评定,焊接试样规格Φ406 mm×45 mm,采用手工焊接工艺,焊接道次如图2(a)所示。焊接热输入量为50 kJ/cm,焊后对焊缝进行超声探伤,合格后取样进行性能检测。性能检测结果合格(表6),硬度结果见图2(b)和表7。

6 结论

湖北新冶钢有限公司在开发X100QO支撑系统用管的过程中,解决了低碳当量厚壁管淬透性不足、大热输入量焊接工艺下焊接部位钢管强度降低幅度大等技术难题,钢管具有高强度及良好的低温韧性,

钢管截面性能稳定,在拥有高强度的同时具备较高的冲击韧性及良好的焊接性,完全满足自升式钻杆平台支撑系统用管的要求。

参考文献

- [1] 杨才福, 苏航. 高性能船舶及海洋工程用钢的开发[J]. 钢铁, 2012, 47(12): 1-2.
- [2] 周晓峰, 张传友, 刘江成, 等. X80钢级海洋自升式钻井平台桩腿支撑管的研制[J]. 钢管, 2015, 44(6): 32-32.
- [3] API 5L. Specification for Line Pipe[S]. Houston: American Petroleum Institute. 2012: 142-143.
- [4] ABS Rules for Materials and Welding 2018 Part2[S]. Houston: American Bureau of Shipping. 2018: 64-72, 454-461.
- [5] 丁果林, 徐捷. JU2000自升式钻井平台桩腿建造检验[J]. 中国船检, 2015, 44(6): 86-87.

彭俊(1982-),男,硕士(2011年北京科技大学),工程师,2004年三峡大学(本科)毕业,无缝钢管产品开发。

E-mail: pengjun@citicsteel.com

收稿日期: 2019-06-22