

国内外 X80 深水钻井隔水管主管性能对比*

毕宗岳^{1,2}, 牛爱军^{1,2}, 牛辉^{1,2}, 刘海璋^{1,2}, 黄晓辉^{1,2}, 张万鹏^{1,2}

(1. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008;

2. 宝鸡石油钢管有限责任公司 钢管研究院, 陕西 宝鸡 721008)

摘要: 随着我国海洋油气勘探向着深水领域发展, 钻井隔水管的国产化研制显得越来越重要。通过对我国自主研制的 X80 级 $\phi 533.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$ 规格的海洋钻井隔水管主管和国外制造的同等规格的隔水管主管在板材成分、组织、拉伸性能、冲击性能、CTOD 断裂韧性及几何尺寸控制等方面的试验检测对比, 结果表明我国已经初步掌握了 X80 深水钻井隔水管主管的制造技术, 但在焊接质量稳定性、几何尺寸精度控制方面尚需进一步改进。

关键词: 焊管; X80 钢; 钻井隔水管; 性能对比

中图分类号: TE973 文献标志码: A 文章编号: 1001-3938(2013)11-0005-05

Performance Comparison of Main Pipeline of X80 Deepwater Drilling Riser in Domestic and Overseas

BI Zongyue^{1,2}, NIU Aijun^{1,2}, NIU Hui^{1,2}, LIU Haizhang^{1,2},

HUANG Xiaohui^{1,2}, ZHANG Wanpeng^{1,2}

(1. National Petroleum and Gas Tubular Goods Engineering Technology Research Center, Baoji 721008, Shaanxi, China;

2. Steel Pipe Research Institute, Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: Along with the development of marine oil-gas exploration towards to the deep water field in China, the China localization development for well drilling riser is more and more important. The main pipeline of X80 grade marine well drilling riser with $\phi 533.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$ produced in China was contrasted with that manufactured in overseas from several aspects, such as material composition, microstructure, tensile property, impact property, CTOD fracture toughness and geometric dimension control etc. The results showed that China manufacturer has preliminarily mastered the manufacturing technology of X80 deepwater drilling riser, but the stability of welding quality, geometric dimension precision control still need further improvement.

Key words: welded pipe; X80 steel; well drilling riser; performance comparison

0 前言

钻井隔水管作为井口与平台之间的重要部件, 其主要功能是隔离海水、引导钻具、循环钻井液、起下海底防喷器组、系附压井、防喷、增压管线、补偿钻井船的升沉运动等, 在勘探和钻

井平台、浮式钻井船上得到了广泛应用^[1-2]。

海洋钻井隔水管是一种具有高风险、高难度、高技术含量的石油钻井装备^[3]。由于使用环境具有特殊性, 海水腐蚀、浪涌、洋流环境和深水压力等环境因素对海洋钻井隔水管主管的质量也提出了严格的要求, 不仅要具有更高强度, 低

* 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)课题, 深水钻井隔水管系统工程化研制(2013AA09A222)。

的屈强比,还要具有高的低温韧性和优良的抗动态撕裂能力,同时对管线钢焊接性和耐腐蚀性也提出更高的要求^[4-5]。为保证海洋钻井隔水管服役在深水高压环境下具有较强的抵抗外压的能力,对钢管外观几何尺寸的控制具有更严格的要求^[6]。

当前,世界范围内除美国、挪威等国家几个大的海洋工程公司能够研制系统的钻井隔水管外,其他国家和公司还不具备开发能力^[7]。相比较而言,我国的深水钻井隔水管技术还处于起步阶段,与国外先进技术水平相比差距很大^[8]。目前我国深水开发所采用的海洋钻井隔水管主管基本上全部依赖进口^[9]。

我国深水海域十分广阔,蕴藏着丰富的油气资源。为了提升我国深海石油勘探开发能力,推进我国深水钻井隔水管管材的开发及应用,宝鸡石油钢管有限责任公司研制了深水钻井隔水管用 X80 级直缝埋弧焊管。

1 X80 海洋钻井隔水管主管用板材

高强度、强韧性、高塑性、易焊接、耐腐蚀

是钻井隔水管主管用板材的基本要求,同时为满足钻井隔水管的施工安全,对板材纵向强度性能也有要求。板材的质量是保证管线安全的最基本也是最为关键的因素。针对 X80 海洋钻井隔水管主管的特殊性能要求,进行了 X80 级 25.4 mm 厚壁深水钻井隔水管用板材的开发。

1.1 板材成分及组织设计

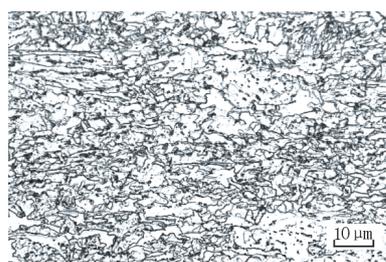
深水钻井隔水管主管对钢管的强度、塑性、韧性要求高。低碳或超低碳的针状铁素体型管线钢,具有强度高、韧性好的特点,所以采用针状铁素体型组织^[10]。降低碳含量不仅有助于提高钢的韧性,还可以改善钢的焊接性能。为保障管线的安全可靠性,在提高管线钢强度的同时,还要相应提高其韧性。因而采用超低碳和添加 Nb, V, Ti, Mo, Cr 和 Cu 等元素的低合金化成分设计,结合纯净钢冶炼技术和适当的热机械控制轧制工艺,使钢有极高的纯净度、高的均匀性和超细化晶粒,降低钢中有害元素含量并进行夹杂物变性处理,得到具有针状铁素体组织的高强度、高韧性 X80 管线钢。试制 X80 钢的主要化学成分见表 1,微观金相组织如图 1 所示。

表 1 试制 X80 钢的主要化学成分

$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{V+Nb+Ti})$	Ni, Cr, Nb, V, Ti, Mo 等	Pcm
≤ 0.07	≤ 0.25	≤ 1.80	≤ 0.015	≤ 0.003	≤ 0.12	适量	≤ 0.19



(a) 壁厚中心处组织



(b) 壁厚1/4处组织

图 1 X80 板材微观组织

1.2 板材力学性能

由于形变强化和包辛格效应的作用贯穿于管线钢管的制管和随后的压平拉伸试样制作以及拉伸试验的全过程,其相互作用决定了钢管的最终强度^[11]。因此,形变强化和包辛格效应是管线钢强度设计时应充分考虑的问题。

管线钢在成型过程中抗拉强度的变化与屈服强度的变化不同,钢管的抗拉强度总比钢板高

些。另外,钢管在扩径时冷作硬化,扩径后可提高钢管的屈服强度。直缝焊管在制造过程中力学性能变化的综合结果表现为形变强化大于包辛格效应,即屈服强度和抗拉强度高于钢板^[12]。因此,钢板的屈服极限可以略小于 API SPEC 5L 规定的相应钢级的屈服值。针对深水钻井隔水管用 X80 直缝埋弧焊管,研制的 X80 钢板的主要力学性能试验结果见表 2。

表 2 试制 25.4 mm 厚 X80 钢板的主要力学性能

试样形式	屈服强度 $R_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	延伸率 $A/\%$	屈强比 $R_{0.2}/R_m$	-20 °C 冲击试验		-10 °C DWTT 剪切面积 $S_N/\%$	硬度 HV ₁₀
					冲击功 A_{kv}/J	剪切面积 $S_N/\%$		
横向圆棒	519	617	27.6	0.84	452	100	88	227
纵向圆棒	510	603	24.6	0.85	471	100	94	

2 国产 X80 海洋隔水管主管

宝鸡石油钢管有限责任公司在国内率先开展了 X80 级 $\phi 533.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$ 海洋钻井隔水管主管用直缝埋弧焊管的研制，并将试制钢管的化学成分、拉伸性能、夏比冲击性能、CTOD 性能及外观几何尺寸等与日本 JFE 公司制造的同规格钻井隔水管主管进行了对比。

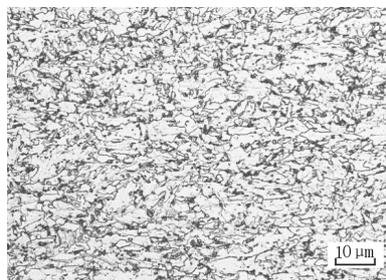
2.1 化学成分及组织分析

国产 X80 钻井隔水管主管与日本 JFE 公司制造的 X80 钻井隔水管主管的主要化学成分见表 3。

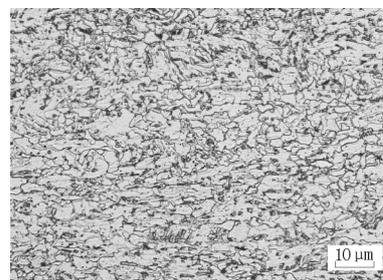
表 3 国内外 X80 钻井隔水管主管主要化学成分对比

产地	检测位置	$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{V})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Mo})$	Pcm
中国	管体	0.069	0.227	1.40	0.015	0.004	0.156	0.139	0.124	0.064	0.011	0.027	0.118	0.174
	焊缝	0.084	0.323	1.33	0.019	0.007	0.118	0.103	0.103	0.048	0.013	0.025	0.253	0.196
日本	管体	0.058	0.153	1.41	0.012	0.006	0.098	0.040	0.101	0.052	0.037	0.022	0.201	0.162
	焊缝	0.065	0.190	1.37	0.015	0.008	0.062	0.030	0.090	0.060	0.03	0.022	0.230	0.193

国内外 X80 钻井隔水管主管的显微组织如图 2 所示，可以看出，国产 X80 隔水管与日本 JFE 公司制造的 X80 隔水管材料的组织设计均采用以针状铁素体为主的组织形式。



(a) 中国



(b) 日本

图 2 国内外 X80 钻井隔水管主管的显微组织

从表 4 可以看出，日本 JFE 公司制造的隔水管主管管体的横向、纵向屈服强度及抗拉强度均高于国产 X80 隔水管，屈服强度高出 40 MPa，横向抗拉强度高出 44 MPa，纵向抗拉强度高出 11 MPa；焊缝抗拉强度略低于国产钢管；

从表 3 可以看出，在隔水管管材成分上，国内外均采用低碳 ($w(\text{C}) \leq 0.07\%$) 设计，以保证管材良好的焊接性能和低温韧性；控制 C, Mn, S 和 P 的含量，加入 Cu 和 Cr 以保证隔水管管材在海洋服役环境中的抗腐蚀性；通过添加 Nb, V 和 Ti 微合金元素，细化晶粒，提高管材强度；通过加入 Mo, Ni, Cu 和 Cr 等微合金元素，提高管材的淬透性，保证管材沿板厚方向得到均匀的显微组织。日本 JFE 公司制造的隔水管管材成分中 Mo 和 V 含量稍高，国产隔水管管材成分中 Si 和 Ni 等含量略高于日本同类管材。

2.2 拉伸试验

分别在试制钢管和日本 JFE 公司制造的钢管管体母材和焊缝位置上取样，进行拉伸试验，结果见表 4。

国产钢管的延伸率及屈强比略优于日本钢管，表现出更好的塑性，能更好地适用于深海钻井。拉伸性能的差异，主要在于管材成分上的差异以及钢管在制造过程中的成型、扩径、水压等工艺控制。

表4 国内外 X80 钻井隔水管主管拉伸试验结果对比

钢管产地	取样位置	试样形式	屈服强度 $R_{0.5}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	延伸率 A /%	屈强比 $R_{0.5}/R_m$
中国	管体	横向圆棒	590	666	26.0	0.89
		纵向圆棒	585	669	25.8	0.87
	焊缝	横向板样		712	断于熔合线	
日本	管体	横向圆棒	630	710	26	0.92
		纵向圆棒	625	680	21.5	0.92
	焊缝	横向板样		695	断于熔合线	

2.3 夏比冲击试验

分别在试制钢管和日本 JFE 公司制造的钢管管体和焊缝位置取样,进行管体及焊接接头夏比冲击试验,结果见表 5 和表 6。

从表 5 可看出,国产和日本制造的 X80 钻井隔水管主管管体-20℃时横向和纵向冲击韧性差别不大,相对比较稳定。国产钢管管体横向和

纵向夏比冲击功比日本产钢管的冲击功高出约 1.4 倍。从表 6 可看出,国产钢管-20℃时焊缝夏比冲击功最小 110 J,最大 173 J;日本产钢管焊缝夏比冲击功最小 208 J,最大 220 J。相比之下,国产钢管焊缝的冲击韧性受焊接热循环的影响较大,夏比冲击功波动较大,日本产钢管的冲击韧性较高,且更为稳定。

表5 国内外 X80 钻井隔水管主管管体-20℃冲击试验结果对比

钢管产地	冲击吸收功 A_{kv} /J		剪切面积 S_n /%	
	横向	纵向	横向	纵向
中国	430,393,410	432,424,429	100,100,100	100,100,100
日本	305,311,295	309,313,303	100,100,92	100,100,100

表6 国内外 X80 钻井隔水管主管焊接接头-20℃冲击试验结果对比

钢管产地	冲击吸收功 A_{kv} /J		剪切面积 S_n /%	
	焊缝	热影响区	焊缝	热影响区
中国	130,173,110	315,333,332	86,87,78	100,95,100
日本	210,220,208	242,234,222	95,100,100	100,95,95

2.4 CTOD 试验

裂纹尖端张开位移 (CTOD) 试验是一种评价材料和焊接接头抗断裂性能的有效方法。与传统的 V 形缺口夏比冲击韧性比较,CTOD 试验更能有效准确地评价钢材的抗脆断能力^[13]。裂纹尖端张开位移作为一个重要的弹塑性断裂参量,因其直观性与易测性,正在逐步被广泛采纳,并作为评价海洋管材安全可靠性的判据之一。分别对国内外 X80 钻井隔水管主管进行 CTOD 试验,结果见表 7。对比结果表明,国产隔水管主管的断裂韧性已经达到国外水平。

从表 7 可看出,0℃时国产隔水管主管管体和焊缝处的 CTOD 特征值 δ_m 分别为 0.550 mm 和

0.335 mm,远高于技术规范中对海洋隔水管的 CTOD 特征值 $\delta_m \geq 0.254$ mm 的要求,达到与国外隔水管的同等水平。试验结果表明,国产隔水管管体母材对裂纹的启裂和扩展具有很强的抗力,焊接接头也具有良好的断裂韧性。

2.5 几何尺寸

海洋钻井隔水管因受到深水高压影响,对主管的外观几何尺寸精度要求比较高,尤其是对管径的不均度要求。对国内外 X80 钻井隔水管主管的壁厚、外径、内径、直线度及焊缝高度等进行测量,结果见表 8。

从表 8 可以看出,日本制造的 X80 钢级、 $\phi 533.4$ mm \times 21.4 mm 钻井隔水管主管在壁厚、

表 7 国内外 X80 钻井隔水管主管 0 °C 裂纹尖端张开位移试验结果对比

钢管产地	取样位置	a_0 /mm	P /kN	V_P /mm	Δa /mm	δ_m /mm
中国	管体	17.634	25.868	2.238	0.398	0.550
	焊缝	17.321	25.104	1.323	0.567	0.335
日本	管体	17.320	26.353	2.138	0.588 4	0.538 6
	焊缝	17.373	26.155	1.363	0.446 4	0.342 4

注： a_0 —初始裂纹长度； P —预制裂纹时的最大力； V_P —缺口张开位移分量； Δa —稳定裂纹扩展量； δ_m —CTOD 特征值。

表 8 国内外 X80 钻井隔水管主管外观几何尺寸检测结果对比

钢管产地	壁厚不均度/mm	外径不均度/mm	内径不均度/mm	直线度/(mm/m)	焊缝高度/mm
中国	0.20	1.12	1.88	0.5~1	2.7
日本	0.12	0.59	0.89	0.5~1	2.5

外径不均度、内径不均度等方面的控制得更好，尤其是外径和内径的不均度，可控制在 1 mm 以内，而国产钢管的外径和内径的不均度仅能控制在 2 mm 以内，尚需要进行工艺改进。

3 结 论

(1) 国内已经初步掌握了 X80 海洋钻井隔水管管材的制造技术，强度、塑性及韧性等指标已达到 X80 海洋钻井隔水管的使用要求；国产钢管在管体屈强比和冲击韧性的指标略高于国外水平，但焊接质量稳定性控制方面还有待改善。

(2) CTOD 试验结果表明，国产 X80 隔水管主管的 CTOD 性能高于标准要求，已达到国外同等水平。

(3) 海洋钻井隔水管对钢管的几何尺寸精度要求较高。国产 X80 海洋钻井隔水管主管在壁厚、外径、内径等外观几何尺寸的不均度控制方面与国外还有一定差距，需要从板材制造工艺及制管工艺等方面进行相应的改进。

参考文献：

[1] 程永平,修茜茜,王云伟. 3 000 m 超深水钻井船钻井隔水管布置方案研究[J]. 科技创新与应用,2012,11(01): 9-10.
 [2] CHANG Yuanjiang.Design Approach and It's Applica-

tion for Deepwater Drilling Risers[D]. Dong Ying:China University of Petroleum(East China),2008.
 [3] 闫永宏,王定亚,邓平,等. 钻井隔水管接头技术现状与发展建议[J]. 石油机械,2008,36(09):159-162.
 [4] YONG BAI,QIANG BAI. Subsea Pipelines and Riser [M]. [s.l.];Elsevier Ltd,2005.
 [5] 弓大为. 海洋钻井隔水管的受力分析[J]. 中国造船,2003,44(增刊):317-323.
 [6] BREKKE J N. Key Elements in Ultra-deep Water Drilling Riser Management[C]//Ptoceedings of the 2001 SPE/I-ADC Drilling Confernce. Amsterdam,the Netherlands; [s.n.],2001:1-8.
 [7] 王进全,王定亚. 国外海洋钻井隔水管与国产化研究建议[J]. 石油机械,2009,37(09):147-150.
 [8] 邓欣,鞠少栋,陈国明,等. 1 830 m 超深水钻井隔水管系统分析[J]. 中国造船,2010,51(02):457-462.
 [9] 赵洪山,刘新华,白立业. 深水海洋石油钻井装备发展现状[J]. 石油矿场机械,2010,39(05):68-74.
 [10] 张小立,冯耀荣,赵文轸,等. X80 级管线钢的组织 and 力学性能[J]. 特殊钢,2006,27(03):11-13.
 [11] 刘世泽,王利树,黎剑峰,等. 直缝焊管制造工艺对钢管拉伸强度影响的研究[J]. 钢管,2009,38(05):17-19.
 [12] 朱维斗,李年,杜百平. 包申格效应对板料与成品管屈服强度与屈强比的影响 [J]. 机械强度,2006,28(04):503-507.
 [13] 杨新岐,王东坡,王文先,等. 海洋平台焊接接头大型 CTOD 低温试验[J]. 中国海洋平台,2003,18(01):33-38.

作者简介:毕宗岳(1962—),男,博士,高级工程师,主要从事油气管材开发及焊接技术研究工作。

收稿日期:2013-06-17

编辑:罗 刚