

DN 1 400 管道制管研究

陈敬民 曹晓燕

中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司,四川 成都 610017

摘要:

由中国石油承建的土库曼斯坦南约洛坦气田 EPC 项目,其外输管道管径为 $\Phi 1\,420\text{ mm}$ 。由于 DN 1 400 管道在我国尚属首次应用,没有相应经验积累和工程借鉴,为此,设计方设立专题予以研究。通过资料收集、技术交流和对国内外钢管厂生力能力及技术水平的调研分析,对于 $\Phi 1\,420\text{ mm}$ 线路用管的制造得出如下结论:采用针状铁素体为主的 X70 管线钢,晶粒度要求为 No.10 级或更细,带状组织应不大于 3 级;我国钢管厂具备生产 X70 $\Phi 1\,420\text{ mm}$ 钢管的技术实力和生产设备,能够实现国产化。在研究基础上编制的管道技术规格书,已得到土库曼斯坦业主的书面认可。

关键词:

DN 1 400;管道;制管;研究

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2011)06-0010-04

0 前言

由中国石油承建的土库曼斯坦南约洛坦气田 EPC 项目,其外输管道设计压力 7.4 MPa,管径为 $\Phi 1\,420\text{ mm}$,材质为 X70,长约 108 km,输送规模为 $100\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 。

由于 DN 1 400 管道在国内尚属首次应用,没有相应经验积累和工程借鉴,为此,设计方设立专门课题予以研究。本文仅对 X70 $\Phi 1\,420\text{ mm}$ 线路用管的制造进行分析,研究成果将直接应用于土库曼斯坦南约洛坦外输管道项目。

1 $\Phi 1\,420\text{ mm}$ 钢管在油气田工程的应用

1.1 国外 $\Phi 1\,420\text{ mm}$ 输气管道现状

国外长输天然气管道发展较早,在大口径、高压输气管道方面处于领先地位,然而对于直径 $\Phi 1\,420\text{ mm}$ 输气管道修建的却不多,主要分布在苏联。

乌连戈依—中央输气系统是苏联主要的输气系

统之一,是世界上最大的输气系统。该系统由 6 条输气管道组成,管道总长约 $2\times 10^4\text{ km}$,多数管道直径为 $\Phi 1\,420\text{ mm}$,且大部分建在同一管道走廊内。乌连戈依—乌日哥罗德输气管道是该系统中唯一的一条出口管道,将西伯利亚天然气输送到西欧,该管道在苏联境内总长 4 450 km。

因此,有业绩的制造商就是现俄罗斯的几家大口径管道生产厂家。目前,俄罗斯最主要的钢管生产企业共有七家,分属三大集团公司,主要有管材冶金股份有限公司(TMK)、联合冶金公司(OMK)等。

1.2 我国大口径管道现状

目前,我国已建输气管道中,尚无使用 $\Phi 1\,420\text{ mm}$ 的工程实践。管径 $\Phi 1\,016\sim 1\,219\text{ mm}$ 的大口径管道主要为西气东输输气管道工程、陕京二线输气管道工程、西气东输二线管道工程^[1-4]。

西气东输输气管道工程全长 4 000 km,管径

收稿日期:

2011-07-04

基金项目:

中国石油天然气集团公司重点工程资助项目(S2010-14D);中国石油天然气集团公司重点科研资助项目(KY2010-11)

作者简介:

陈敬民(1974-),男,陕西宝鸡人,高级工程师,学士,主要从事油气田地面工程设计相关工作。

Φ1 016 mm,设计压力 10 MPa,材质选用 X70;陕京二线输气管道工程全长约 820 km,设计压力 10 MPa,材质选用 X70,管径 Φ1 016 mm;西气东输二线管道工程包括 1 条干线和 8 条支干线,全长近 9 000 km,工程干线用钢管材质为 X80,管径为 Φ1 219 mm,其中西段设计压力 12 MPa,东段设计压力 10 MPa,支线用钢管材质为 X70,外径为 Φ1 016 mm,设计压力 10 MPa。

2 线路用管若干技术问题分析

2.1 金相组织

以针状铁素体为主的 X70 管线钢是发达国家高压输气管线的首选管线钢,也是我国 X70 以及西气东输输气管道工程选用的管线钢种。这种钢的特征是进一步提高洁净度,使用钙处理硫化物,在连续铸锭过程中采用电磁搅拌和软压缩措施,在钢的基体中加入微量钼(0.2 %~0.4 %)以促使针状铁素体的形成,并用适量铜、镍、铬强化基体,在高温动态再结晶临界温度 T_r 上下温度区间进行控制轧制,通过在线强制加速冷却,进一步细化晶粒度(平均 3~8 μm)。这种钢具有更好的焊接性能,有高达 450 J 的冲击韧性。

从管线安全角度,由于以针状铁素体为主的钢加入了钼,其沉淀硬化相更为弥散和稳定,沉淀硬化效应更强,钢板的纵-横向性能差异小,具有相当高的横向韧性。由于在基体加入了铜、镍,这种钢具有较好的抗阳极腐蚀(点蚀)、氢致开裂(HIC)和硫化氢应力开裂(SSC)性能,对管道的长期安全运行极为有利。

从管线工程施工角度,针状铁素体型管线钢具有较好的焊接性能,具体表现在它的焊接冷裂纹系数($P_{cm} \leq 0.20\%$)低,这对于铺施工环境条件恶劣的高压输气管线极为有利。

从制造焊管角度看,由于以针状铁素体为主的钢基体组织是由具有亚结构、不对称的铁素体和铁素体与碳化物有共格相位关系的铁素体板条混合组织,没有碳化物层片,所以也就会降低钢管成型过程发生的包辛格效应,即减少屈服强度的下降。

通过以上分析,外输管道线路用管采用以针状铁素体为主的 X70 管线钢,既考虑了国内实际生产水平和生产能力,又考虑了与世界先进技术水平接轨的迫切性与经济性要求。

2.2 带状组织及晶粒度评定方法

现有的 GB/T 1329《金属显微组织检验方法》^[5]是针对传统的铁素体+珠光体型管道钢制定的带状组织评定方法,不适用于针状铁素体型管道钢带状组织的评定。我国在西气东输输气管道工程中,通过对 X70 针状

铁素体管线钢进行大量的实验研究,制定出了适合针状铁素体管道钢的带状组织评定方法。通过实验研究,提出了针状铁素体型管道钢铁素体晶粒度测定法。该测定方法在西气东输输气管道工程、陕京二线输气管道工程、西气东输二线管线工程管材质量控制中得到应用。

因此,借鉴我国的工程实际经验制定的方法和要求;对针状铁素体型管线钢,晶粒度要求为 No.10 级或更细,带状组织应不大于 3 级。

2.3 化学成分设计

管线钢的化学成分设计,是决定钢材质量、力学性能以及焊接性能的基础。表 1 列出了非酸性环境用 X70 管线钢在 API 5L^[6]、西气东输输气管道、陕京二线输气管道、西气东输二线管道等工程^[7-12]的化学成分。

表1 非酸性环境用X70管线钢产品化学成分比较

元素	各化学元素的质量比分析/(%)最大			
	API 5L*	西气东输输气管道工程**	西气东输二线管道工程***	陕京二线输气管道工程**
碳	0.12	0.09	0.09	0.09
硅	0.45	0.35	0.35	0.35
锰	1.70	1.65	1.65	1.65
磷	0.025	0.020	0.020	0.020
硫	0.015	0.005	0.005	0.005
铌	除非另有协议, V+Nb+Ti≤0.15 %	0.08	0.11	0.08
钒		0.06	0.06	0.06
钛		0.025	0.025	0.025
铝	/	0.06	0.06	0.06
氮	/	0.010	0.008	0.008
铜	0.50	0.30	0.30	0.30
铬	0.50	0.25	0.35	0.25
钼	0.50	0.15~0.30	0.30	0.30
镍	0.50	0.30	0.30	0.30
硼	/	/	0.000 5	/
CE _{ITW}	0.43	0.42	/	0.42
CE _{ITm}	0.25	0.21	0.21	0.21

注:*C 含量比允许最大含量每减少 0.01 %时,Mn 允许最大含量可以增加 0.05 %,但在产品分析中 Mn 含量不得超过 2.00 %;**V+Nb+Ti≤0.15 %;Ni+Cr+Cu≤0.50 %;不得有意加入 B 和稀土元素;碳含量每减少 0.01 %时,锰的允许最大含量可以增加 0.05 %,但在产品分析中锰含量不得超过 1.75 %。铬+钼+锰的总含量不应超过锰的最大允许含量+0.20 %;***V+Nb+Ti≤0.15 %。在控制总量的前提下,允许制造商对单个元素含量进行微调;不得有意加入 B 和稀土元素;C 含量比允许最大含量每减少 0.01 %时,Mn 允许最大含量可以增加 0.05 %,但在产品分析中 Mn 含量不得超过 1.85 %。

通过收集相关资料,俄罗斯 TMK 公司 TY75-86《工作压力 7.4 MPa 带外防腐层的直径 530、720、1 020、1 220 和 1 420 mm 直缝和螺旋焊钢管技术条

表2 俄罗斯TY75-86输气用焊管化学成分

钢级	壁厚 /mm	碳 max	硅 max	锰 max	磷 max	硫 max	铌 max	钒 max	铝 max	Ceq max
K60	~ 18.7	0.12	0.50	1.75	0.025	0.010	0.06	0.08	0.06	0.43
	23.2	0.12	0.50	1.75	0.025	0.010	0.06	0.08	0.06	0.44
	~ 26.7	0.12	0.50	1.75	0.025	0.010	0.06	0.08	0.06	0.44

注: Nb+V+Ti 的总含量≤0.16%; 可根据需要所用钢材允许微量加入以下元素: Cr≤0.30%, Ni≤0.30%, Cu≤0.30%, Mo≤0.30%; 碳当量以每炉钢水桶样分析数据按下式计算: $Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V + Nb + Ti)/5 + (Cu + Ni)/15$ 。

表3 俄罗斯TY14-156-77-2008直缝电焊管化学成分

强度等级	各化学元素的质量比/(%)最大							
	碳	锰	硅	硫	磷	钒	铌	氮
K60	0.12	1.75	0.40	0.006	0.020	0.12	0.10	0.010
X70	0.12	1.75	0.4	0.005	0.020	0.12	0.10	0.010

注: a) CE_{Mn} 不大于 0.43%, CE_{Rm} 不大于 0.24%; b) 允许铬、镍和铜的含量比占各不大于 0.3%, 但三种元素的含量比不应大于 0.60%; c) 铝的含量比为 0.02%~0.05%, Al/N 比值不小于 2; d) 允许钼、钛的含量比分别为 ≤0.35% 和 ≤0.035%, 相应地, 硼的含量比应不大于 0.004%; e) 当钢板厚 ≤15.0 mm 时, 钢板内的钒、铌、钛总含量比应不大于 0.15%; 当板厚 >15.0 mm 时, 钒、铌、钛总含量比应不大于 0.16%; f) 用于生产强度等级 K60、X70 钢管的钢, 当 C 含量比规定的最大值每减少 0.01% 时, Mn 最大含量允许增加 0.05%, 但在产品分析中的 Mn 含量不可超过 1.85%。

表4 俄罗斯TY14-156-76-2007螺旋电焊管化学成分

各化学元素的质量比/(%)不大于									
碳	锰	硅	钒	铌	硫	磷	铝	钛	钼
0.12	1.85	0.50	0.12	0.08	0.006	0.020	0.02~0.05	0.035	0.30

注: a) CE_{Mn} 不大于 0.43%, CE_{Rm} 不大于 0.24%; b) 允许铬、镍和铜的含量比占各不大于 0.3%, 但三种元素的总含量比不应大于 0.60%; c) 钢板内的钒、铌、钛总含量应不大于 0.16%; d) 氮的含量比应不小于 0.010%; e) 当 C 含量比规定的最大值每减少 0.01% 时, Mn 最大含量允许增加 0.05%, 但在产品分析中的 Mn 含量不可超过 2.00%。

表5 X70焊接钢管力学性能要求

标准或技术要求	屈服强度		拉伸强度		屈强比
	$R_{t0.5}/MPa$		R_m/MPa		
	min	max	max	min	max
API 5L	485	635	760	570	0.93
西气东输输气管道工程	485	620	760	570	0.90(允许其中 5% 炉批 ≤0.92)
西气东输二线管道工程	485	630	760	570	
陕京二线输气管道工程	485	620	760	570	

表6 X70焊接钢管断裂韧性要求

标准或技术要求	试验温度 / °C	位置	夏比冲击剪切面积 SA / (%)		夏比冲击功 Akv/J (10 mm × 10 mm × 55 mm)
			单个试样值	三个试样平均值	
西气东输输气管道工程 陕京二线输气管道工程	-20	管体横向	≥80	≥90	单个试样最小值 ≥140 三个试样平均值 ≥190
		焊缝及热影响区	≥30	≥40	单个试样最小值 ≥60 三个试样平均值 ≥90
西气东输二线管道工程	-10	管体横向	≥80	≥90	单个试样最小值 ≥120 三个试样平均值 ≥160
		焊缝及热影响区	≥30	≥40	单个试样最小值 ≥60 三个试样平均值 ≥80

件》, TY14-156-77-2008《操作压力 ≤9.8 MPa 天然气干线用 530~1 420 mm 直缝电焊钢管》、TY14-156-76-2007《操作压力 <9.8 MPa, 天然气干线用 Φ1 420 mm 螺旋缝电焊钢管》对化学成分的规定见表 2~4。

通过以上分析可知, 外输管道线路用 X70 管的化学成分可在 API 5L 基础上, 参照国内外各工程对 X70 化学成分的技术规定, 适当提高要求, 既能更好地保证质量, 也符合国内实际生产水平和生产能力。

2.4 力学性能与韧性指标

足够的断口剪切面积和足够的夏比 V 型缺口 (CVN) 吸收功的组合是输气管线钢管管体的基本性能, 能确保钢管避免脆性断裂扩展, 并控制延性断裂的扩展。

2.4.1 国内外类似工程的韧性指标

表 5~6 列出了西气东输输气管道等工程用 X70 管线焊接钢管的力学性能与韧性指标。

落锤撕裂试验 (DWTT) 剪切面积的最小百分数要求为: 单个试样 ≥70%, 两个试样平均值 ≥85%。其中西气东输输气管道工程、陕京二线输气管道工程要求的试验温度为 -5 °C, 西气东输二线管道工程要求的试验温度为 0 °C。

俄罗斯 TMK 公司针对操作压力 <9.8 MPa, Φ1 420 mm、X70(K60) 运行温度不低于 -20 °C 直缝电焊钢管和螺旋缝电焊钢管的韧性指标规定见表 7。

2.4.2 外输管道线路用管的韧性指标

针对外输管道线路用管的运行压力、管径、壁厚

表7 操作压力<9.8 MPa,Φ1 420 mm,X70(K60)焊接钢管的韧性指标

母材冲击韧性 /($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$) ($\text{kgf}\cdot\text{m}\cdot\text{cm}^{-2}$)	母材落锤 试样剪切 面积百分 比 /($\%$)	焊接接头冲击韧性 /($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$) ($\text{kgf}\cdot\text{m}\cdot\text{cm}^{-2}$)		
		焊缝中心 及熔合线	熔合线	
$\geq 108(11.0)$	$\geq 79(8.0)$	≥ 85	$\geq 50(5.1)$	$\geq 50(5.1)$

注:a)分别取3个和2个试样的试验结果平均值,作为冲击韧性及剪切面积百分比值;b)单个试样上,允许冲击韧性降低 $9.8\text{ J}/\text{cm}^2(1.0\text{ kgf}\cdot\text{m}\cdot\text{cm}^{-2})$,剪切面积百分比降低10%;c)缺乏关于管道安装和运行最低温度数据时,应按以下温度对试样进行试验;V形缺口试样冲击试验及落锤冲击试验为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

等条件,可直接借鉴西气东输输气管道工程的大量成果,对管道的止裂韧性进行预测设计,不强制要求进行全尺寸止裂爆破试验。

因此,结合土库曼斯坦的气候条件以及已实施的土库曼斯坦阿姆河工程的实践经验,确定落锤撕裂试验(DWTT)实验温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,夏比V型缺口(CVN)实验温度定为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时参照西气东输的要求,韧脆转变温度低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。DWTT平均剪切面积应 $\geq 85\%$;CVN试验的母材冲击功平均值 $\geq 180\text{ J}$,剪切面积应 $\geq 90\%$;CVN试验的焊缝冲击功平均值 $\geq 80\text{ J}$,剪切面积应 $\geq 40\%$ 。

2.5 线路用管国产化的可能性

西气东输输气管道工程X70钢管的国产化推动了我国高钢级钢管技术和生产装备的进步,关键设备从国外引进,很快达到或接近世界先进水平。

目前,西气东输二线管道等工程所需的螺旋埋弧焊管均在國內制造,制管所需的热轧卷板国产化率超过70%。焊管工段的设备可以通过板宽2 000 mm,厚度20 mm的X70带钢;配备的多丝焊接设备可以焊接壁厚20 mm的钢管。精整工段配置了2 000 t钢管水压试验机和大口径钢管平头倒棱机等精整设备,使机组处理大口径(1 420 mm以上)高强度钢管的能力大大增强。水压试管机的最大试压管径可达2 200 mm。

国内JCOE、UOE直缝钢管生产线采用最先进的技术工艺和设备,并且由于直缝埋弧焊管一般用于质量要求高的重要管线,因此生产厂家均取得了ISO 9000和API 5L认证,具有较高的技术装备水平和管理水平。

虽然国内厂家均未生产过DN 1 400管道的业绩,但是通过西气东输和西气东输二线建设经验的积累和国内钢管厂家的技术储备,我国大钢管厂已具备生产南约洛坦项目X70 Φ1 420 mm螺旋埋弧焊钢管和直缝埋弧焊钢管的技术实力和生产设备。

3 结论

a)通过资料收集、技术交流和对国内外钢管厂生产力能力及技术水平的调研分析,我国大型钢管厂具备有生产南约洛坦项目用X70 Φ1 420 mm钢管的技术实力和生产设备,能够实现国产化。

b)土库曼斯坦南约洛坦气田线路用管采用针状铁素体为主的X70管线钢,晶粒度要求为No.10级或更细,带状组织应不大于3级。

c)以API 5 L为基础,同时借鉴西气东输输气管道工程和俄罗斯钢管公司针对X70大口径钢管的技术要求,并制定出补充定货技术条件,满足工程的需要。

目前,在上述研究基础上编制的Φ1 420 mm管道技术规格书已得到土库曼斯坦业主的书面认可,取得了阶段性成果,为今后的采购、施工、焊接等奠定了基础。

参考文献:

- [1] 周英,陈凤,孙在蓉. 陕京输气系统整合优化[J]. 天然气与石油,2011,29(1):5-8.
- [2] 向波. 西气东输二线管道设计的主要特点[J]. 天然气与石油,2008,26(3):1-5.
- [3] 向波,陈静,杨帆. 中卫—贵阳输气管道的创新设计研讨[J]. 天然气与石油,2010,28(5):1-5.
- [4] 吕宏庆,李均峰,汤永亮. 多年冻土管道的若干关键技术[J]. 天然气与石油,2009,27(6):1-4.
- [5] GB/T 13298-1991,金属显微组织检验方法[S].
- [6] API SPEC 5L,管线钢管规范[S].
- [7] 中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司. 西气东输管道工程用螺旋缝埋弧焊管技术条件[R]. 北京:中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司,2002.
- [8] 中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司. 西气东输管道工程用直缝埋弧焊管技术条件[R]. 北京:中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司,2002.
- [9] 中国石油北京华油天然气有限责任公司. 陕京二线管道工程用螺旋缝埋弧焊管技术条件[R]. 北京:中国石油北京华油天然气有限责任公司,2003.
- [10] 中国石油北京华油天然气有限责任公司. 陕京二线管道工程用直缝埋弧焊管技术条件[R]. 北京:中国石油北京华油天然气有限责任公司,2003.
- [11] 中国石油天然气股份有限公司管道建设项目经理部. 西气东输二线管道工程用X70直缝埋弧焊管技术条件[R]. 北京:中国石油天然气股份有限公司管道建设项目经理部,2007.
- [12] 中国石油天然气股份有限公司管道建设项目经理部. 西气东输二线管道工程用X70螺旋缝埋弧焊管技术条件[R]. 北京:中国石油天然气股份有限公司管道建设项目经理部,2007.