

西气东输二线工程用 X80 级 $\phi 1\,219\text{ mm}$ 感应加热弯管的研发

赵志伟¹, 高振宇², 付彦宏², 彭立山¹, 何方平¹

(1. 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司管件分公司, 河北 青县 062658;

2. 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司巨龙钢管公司, 河北 青县 062658)

摘 要: 介绍了 X80 级 $\phi 1\,219\text{ mm}$ 感应加热弯管的主要性能及研发过程, 主要包括总体研发方案的确定, 弯管母管化学成分、制造工艺的研究, 以及弯管煨制工艺的研究。最后, 对 $\phi 1\,219\text{ mm}$ 感应加热弯管进行了验证性试验, 试验结果表明, 该弯管性能完全满足西气东输二线管道工程的设计要求。

关键词: X80; 大直径感应加热弯管; 力学性能; 几何尺寸

中图分类号: TG445

文献标志码: A

文章编号: 1001-3938(2012)02-0005-05

The Development of X80 Grade $\phi 1\,219\text{ mm}$ Hot Induction Bend Used to the 2nd West-east Gas Pipeline Project

ZHAO Zhi-wei¹, GAO Zhen-yu², FU Yan-hong², PENG Li-shan¹, HE Fang-ping¹

(1. CNPC Bohai Equipment Manufacturing Co., Ltd., Pipe Fitting Branch, Qingxian 062658, Hebei, China;

2. CNPC Bohai Equipment Manufacturing Co., Ltd., Julong Steel Pipe Company, Qingxian 062658, Hebei, China)

Abstract: In this article, it introduced main properties and research & development course of X80 grade $\phi 1\,219\text{ mm}$ induction heating bend from several aspects, covering determination of the general research & development project; research on chemical composition, manufacturing process and heat-bend process. In the end, the experiment to X80 grade $\phi 1\,219\text{ mm}$ induction heating bend was carried out, the result indicated that the properties of the said pipe can fully meet design demand for the 2nd West-east Gas Pipeline Project.

Key words: X80; large diameter induction heating bend; mechanical property; physical size

0 前 言

西气东输二线工程建设之前, 世界上敷设的 X80 管道约 2 500 km, 主要集中在加拿大、美国、英国和德国。我国在 2005 年的西气东输冀宁联络线中完成了 7.8 km X80 试验段的敷设, 并取得了较大成功。西气东输二线主干线采用 X80 级 $\phi 1\,219\text{ mm}$ 埋弧焊接钢管, 要求与其配套使用的弯管产品同样也为 X80 级 $\phi 1\,219\text{ mm}$ 。为保证西气东输二线工程建设顺利进行, 迫切需要对 X80 级 $\phi 1\,219\text{ mm}$ 大直径感应加热弯管

进行立项研发, 实现 X80 弯管国产化, 以满足西气东输二线工程建设对弯管产品的需求。

1 X80 级 $\phi 1\,219\text{ mm}$ 弯管主要性能

X80 级 $\phi 1\,219\text{ mm}$ 大直径感应加热弯管主要用于高压长距离油气输送管道。可适用温度为 $-20\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作环境, 额定工作压力 12 MPa, 壁厚范围为 18.4~32 mm。

本产品抗震性好, 强度韧性高, 性能稳定可靠, 使用寿命长, 各项性能均达到或优于《西气

东输二线管道工程用感应加热弯管技术条件》(Q/SY GJX 0129—2008), ISO 15590-1:2001(E) 和 SY/T 5257—2004 等相关标准的要求,可满足国内外大型重点管线工程的需求。弯管主要力学性能见表 1。

表 1 X80 级 $\phi 1\,219\text{ mm}$ 大直径感应加热弯管主要力学性能

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	冲击功(-20℃)/J			
			平均值		最小值	
			母材	焊缝	母材	焊缝
≥625	≥555	≥18	≥90	≥75	≥60	≥50

表 2 各钢厂 X80 级材料的主要化学成分

%

钢厂	w(C)	w(Mn)	w(Mo)	w(Ni)	w(Cr)	w(Nb)	w(V)	其他	CE(IIW)	CE(Pcm)
A 钢厂 K70(俄罗斯)	0.054	1.77	0.194	0.259	0.132	0.057	0.057	Si,Cu,Ti	0.457	0.179
A 钢厂(X80,高 Nb 钢)	0.06	1.74	0.001	0.17	0.32	0.091	0.004	Si,Cu,Ti	0.440	0.198
B 钢厂(X80,高 Mo 钢)	0.06	1.82	0.25	0.24	0.021	0.053	0.024	Si,Cu,Ti	0.448	0.189
C 钢厂(高 Nb 加 Mo)	0.05	0.19	0.12	0.257	0.224	0.082	0.002	Si,Cu,Ti	0.456	0.17
D 钢厂(日本)	0.06	1.84	0.27	0.1	0.029	0.025	0.003	Si,Cu,Ti	0.45	0.220

表 3 不同化学成分 X80 级钢管的力学性能试验结果

钢厂	试验存在问题	化学成分调整方向	目的
A 钢厂 K70(俄罗斯)	内弧侧强度偏低, $R_{el}=551\text{ MPa}$, $R_{eH}=604\text{ MPa}$	提高 C 含量	提高管体强度
A 钢厂(X80,高 Nb 钢)	整体强度偏低 $R_{el}=470\text{ MPa}$, $R_{eH}=553\text{ MPa}$	提高 C,Mo 和 V 含量,降低 Nb 含量	提高管体强度
B 钢厂(X80,高 Mo 钢)	整体强度偏低 $R_{el}=509\text{ MPa}$, $R_{eH}=583\text{ MPa}$	提高 C 和 V 含量,减少 Mo 含量	提高管体强度
C 钢厂(高 Nb 加 Mo)	整体强度偏低 $R_{el}=519\text{ MPa}$, $R_{eH}=571\text{ MPa}$	提高 C 和 V 的含量	提高管体强度
D 钢厂(日本)	过渡区强度偏低 $R_{el}=555\text{ MPa}$, $R_{eH}=620\text{ MPa}$	提高 C 和 Ni 的含量	提高过渡区强度

通过对以上多种化学成分感应加热弯管母管的研究,掌握了 C, Mn, Cr, Mo, Ni, Cu 和 V 等化学成分对焊制成型工艺和热处理工艺的影响,确定了 X80 钢级弯管母管化学成分的理想控制目标值(见表 4)。

2 X80 级 $\phi 1\,219\text{ mm}$ 弯管的研发过程

2.1 总体研发方案

由于国内外在 X80 级 $\phi 1\,219\text{ mm}$ 感应加热弯管的研究方面尚没有成功的经验可借鉴,因此设计了如下的研发方案:①弯管母管化学成分研究;②弯管母管制造工艺研究;③感应加热弯管焊制工艺研究;④感应加热弯管回火热处理工艺系列研究。

2.2 弯管母管化学成分研究

国内外多个钢厂的 X80 级或相当于 X80 级母管的化学成分及力学性能试验结果分别见表 2 和表 3。

表 4 X80 钢级弯管母管化学成分的控制目标值

%

w(C)	w(Mn)	w(Mo)	w(Ni)	w(Cr)	w(Nb)
0.07	1.76	0.22	0.27	0.16	0.06
w(V)	w(Ti)	其他	CE(IIW)	CE(Pcm)	
0.03	0.02	Si,Cu,S,P	0.46	0.193	

2.3 弯管母管制造工艺研究

同直管用钢板相比,弯管母管用钢板在强度、壁厚和合金含量等方面均有很程度的提高,焊接难度进一步加大。为此,在试制过程中,有针对性地进行了大量的焊接试验研究,并针对钢板的合金特点,对埋弧焊丝、焊剂进行了不同合金系和强度匹配的对比试验,找到了强度、韧性与可焊性的最佳平衡点,同时对焊接工艺参数进行了全面优化。

焊接工艺研究的重点在于通过研究热影响区及焊缝组织以及强度、塑性、韧性的变化规律,以此来指导焊接工艺,找到焊接接头强度和塑性、韧性的最佳接合点;在保证无损检测合格率、良好的焊缝宏观形貌的前提下,控制焊接线能量,避免加热区组织的过量长大,提高焊接热影响区性能。

焊接接头的韧性控制是弯管母管焊接的关键。同直管相比，母管合金含量更高，强度、壁厚更大，可焊性更差，如何通过焊接工艺调整改善接头韧性，是直缝埋弧焊管制造的关键技术之一。

根据焊缝、焊接热影响区冲击韧性随焊接线能量的变化规律，对焊接工艺参数进行了优化。在保证焊缝形貌及熔合要求的基础上，通过调整焊接线能量，有效改善了焊缝和热影响区的韧性。

在焊材匹配上，为保证钢管制管后的热稳定性，选择了以 Mn、Si 和 Mo 元素为主的合金焊丝，同时添加 Ti 和 B 等元素保证焊缝的韧性。在强度匹配上，考虑到焊接热影响区是整个接头最薄弱的地带，钢板强度水平越高，焊接后热影响区软化现象越明显，因此，在焊材强度选择上，制定了低强匹配的原则，使热影响区强度同焊缝基本接近，改善了热影响区在扩径、冷弯试验中的受力情况。采用不同的焊材匹配及焊接工艺焊接了 4 个管段，各管段焊材匹配见表 5，焊接后和回火处理后焊缝性能分别见表 6 和表 7。

表 5 焊材匹配试验

管段编号	焊丝	焊剂	外焊线能量/ (kJ/cm)
GD347	C($\phi 4.0$, JW-9)	F(SJ101G)	37
GD348	C($\phi 4.0$, JW-9)	D(林肯 995N)	43
GD349	C($\phi 4.0$, JW-9)	F(SJ101G)	37
GD351	C($\phi 4.0$, JW-9)	D(林肯 995N)	43

表 6 焊接后焊缝夏比冲击韧性试验结果($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

管段 编号	取样位置	冲击吸收功/J				剪切面积/%				结果
		1	2	3	平均	1	2	3	平均	
GD347	焊缝	180	195	185	187	80	90	85	85	合格
	热影响区	155	70	130	118	50	35	40	42	合格
GD348	焊缝	100	85	90	92	65	60	60	62	合格
	热影响区	45	37	65	49	10	10	20	13	不合格
GD349	焊缝	185	170	145	167	85	80	70	78	合格
	热影响区	130	115	110	118	55	35	30	40	合格
GD351	焊缝	125	170	130	142	50	80	55	62	合格
	热影响区	90	45	52	62	35	30	30	32	不合格

从表 6 可以看出，各管段焊接后焊缝冲击性

能全部合格。

弯曲试验结果：GD348 正弯裂，其他正、反弯均合格。

从试验结果来看，F 焊剂以及小的焊接线能量对焊缝及热影响区夏比冲击韧性均有好处。

表 7 回火处理后焊缝夏比冲击韧性试验结果($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

管段 编号	取样位置	冲击吸收功/J				剪切面积/%				结果
		1	2	3	平均	1	2	3	平均	
GD347	焊缝	180	165	205	183	85	80	90	85	合格
	热影响区	250	217	235	234	100	95	100	98	合格
GD348	焊缝	40	70	55	55	30	45	40	38	不合格
	热影响区	145	87	75	102	60	45	45	50	合格
GD349	焊缝	95	65	105	88	50	40	60	50	合格
	热影响区	205	185	210	200	100	85	100	95	合格
GD351	焊缝	120	65	125	103	50	50	55	52	合格
	热影响区	190	155	200	182	95	65	100	87	不合格

从表 7 可以看出，回火处理后焊缝冲击性能全部合格。

回火处理后进行各管段弯曲试验，结果全部合格。

管段焊接试验结果表明：采用 GD347 方案，可以获得较高的焊缝及热影响区夏比冲击韧性，焊接接头拉伸、弯曲性能均合格。

2.4 感应加热弯管煅制工艺研究

2.4.1 确定中频感应加热温度

我们设定了弯管煅制速度和冷却水压力，进行了系列煅制温度试验，以确定中频感应加热温度，试验结果见表 8。

表 8 系列煅制温度弯管力学性能试验数据

试验 温度	管体屈服 强度/MPa	管体抗拉 强度/MPa	夏比冲击功 ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)/J	剪切面积/ %
T_1	485	645	330,360,330	100,100,100
T_2	510	650	345,330,330	100,100,100
T_3	550	660	320,335,330	100,100,100
T_4	565	660	290,300,300	90,100,100
T_5	580	670	275,290,290	90,100,95
T_6	600	680	220,230,240	80,85,85

根据表 8 中的数据作出弯管煅制温度与力学性能的关系曲线，见图 1。

由图 1 可知，要获得满足 X80 钢级标准要

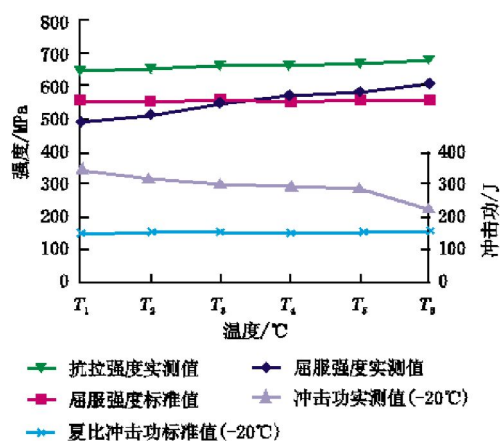


图 1 弯管煨制温度与弯管力学性能曲线

求的力学性能, 钢管煨制温度大于 T_4 就可以, $T_4=1\ 050\sim 1\ 120\ ^\circ\text{C}$ 。一般情况下, 煨制温度随钢管壁厚增大而增加。

2.4.2 确定冷却水压力

试验方案设计如下: 煨制温度选定 T_5 , 煨制速度 $35\sim 45\ \text{mm/min}$, 系列冷却水压力学性能试验结果见表 9。

表 9 系列冷却水压力学性能试验结果

试验水压	管体屈服强度/MPa	管体抗拉强度/MPa	夏比冲击功 ($-20\ ^\circ\text{C}$)/J	剪切面积/%
p_1	500	640	315, 320, 320	100, 100, 100
p_2	520	650	330, 310, 320	100, 100, 100
p_3	525	660	330, 330, 330	100, 100, 100
p_4	550	670	315, 330, 320	100, 100, 100
p_5	580	680	315, 325, 320	100, 100, 100
p_6	585	680	310, 330, 330	100, 100, 100

根据表 9 中的数据作出弯管煨制冷却水压与力学性能的关系曲线见图 2。

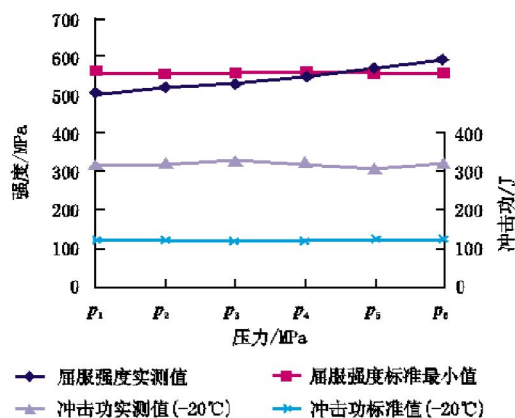


图 2 冷却水压力与弯管力学性能关系曲线

由图 2 可知, 要获得满足 X80 钢级标准要求的力学性能, 冷却水压力只需要大于 p_5 即可。因此冷却水压力确定为 p_5 , $p_5=0.10\sim 0.30\ \text{MPa}$ 。一般情况下, 冷却水压随钢管壁厚增大而增加。

2.4.3 确定煨制速度

通过多次试验, 我们发现当煨制速度在 $20\sim 50\ \text{mm/min}$ 内, 均能得到满意的力学性能和几何尺寸。因此煨制速度确定为 $35\sim 45\ \text{mm/min}$ 。

综上所述, 确定 X80 级 $\phi 1\ 219\ \text{mm}$ 感应加热弯管煨制工艺为: 加热温度 T_5 , 冷却水压力 p_5 , 煨制速度 $35\sim 45\ \text{mm/min}$ 。

2.5 感应加热弯管回火热处理工艺研究

在确定了感应加热弯管煨制成型工艺后, 按该工艺煨制了 1 根弯管并进行了系列温度的回火热处理工艺研究, 试验结果见表 10。

表 10 系列温度回火热处理母材及焊缝部分力学试验数据

回火温度	母材屈服强度/MPa	母材抗拉强度/MPa	焊缝夏比冲击功 ($-20\ ^\circ\text{C}$)/J
T_1	560	690	150, 120, 120
T_2	575	680	140, 190, 155
T_3	590	670	145, 130, 105
T_4	580	630	80, 50, 45
T_5	557	620	75, 45, 30
T_6	550	620	70, 115, 120

根据表 10 中的数据做出弯管系列温度回火热处理与力学性能的关系曲线 (见图 3)。

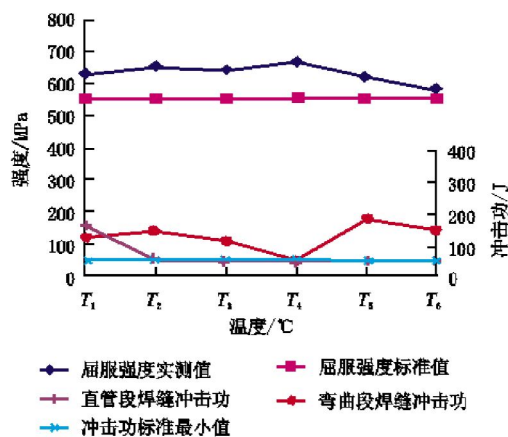


图 3 回火热处理温度与弯管力学性能关系曲线

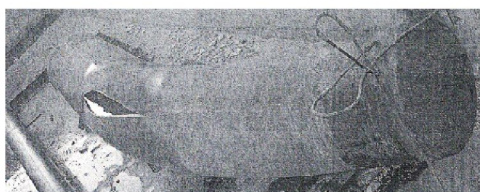
由表 3 可知, 回火温度选择为 T_3 , 可获得满

意的弯管力学性能, 所以确定 X80 级 $\phi 1219$ mm 感应加热弯管回火热处理温度为 T_3 , $T_3=550^\circ\text{C}$ 。

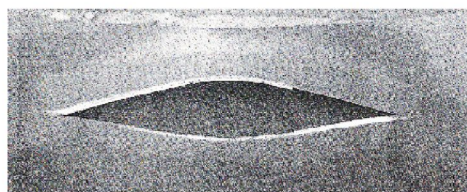
3 X80 级 $\phi 1219$ mm 弯管的验证性试验

为了进一步验证该弯管产品的综合力学性能, 委托中国石油集团渤海装备华油钢管公司对 X80 级 $\phi 1219$ mm $\times 32$ mm 感应加热弯管进行了爆破试验, 理论爆破压力 29.54 MPa, 最高压力 36.68 MPa, 实际爆破压力 35.75 MPa, 试验温度 29°C 。在试验压力达到 32.51 MPa 时, 钢管膨

胀均匀; 随着压力的增加, 弯管管体变形均匀, 当试验压力达到 36.68 MPa 时, 弯曲区的管体出现明显的膨胀突起, 随着打压的进行, 突起变形加剧, 最终弯管在此处爆破。具体试验结果: 测试屈服压力 32.51 MPa, 大于理论计算屈服压力最小值 26.23 MPa; 测试最高压力 36.68 MPa, 大于理论计算最高压力最小值 29.54 MPa; 试验管爆破压力为 35.75 MPa, 爆口位于距排气口封头 3 200 mm 处, 弯曲区外弧侧母材处, 距焊缝边缘最小距离 430 mm。爆破弯管形貌及爆破试验曲线见图 4 和图 5。



(a) 爆破弯管全貌



(b) 弯管爆破口形貌

图 4 X80 级 $\phi 1219$ mm $\times 32$ mm 爆破弯管实物照片

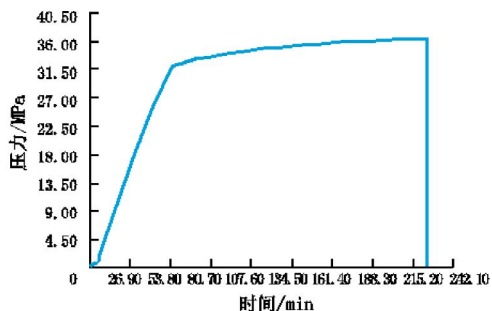


图 5 X80 级 $\phi 1219$ mm $\times 32$ mm 感应加热弯管爆破试验压力-时间曲线

试验结果表明, 生产的 X80 钢级 $\phi 1219$ mm 感应加热弯管完全满足西气东输二线天然气管道工程的设计要求。

4 结 语

X80 钢级 $\phi 1219$ mm 感应加热弯管的成功研制不仅保证了西气东输二线工程建设的顺利进行, 而且实现了工程建设用弯管的国产化, 为国家节约了大量外汇。它将会对相关产品及技术的发展起到引领和推动作用。本产品成功运用于西

气东输二线建设, 得到了施工方和业主方的一致好评, 取得了良好的经济及社会效益。

参考文献:

- [1] 刘迎来, 李平全. 感应加热弯管的生产技术现状与发展 [C]//石油管道工程应用基础研究论文集. 北京: 石油工业出版社, 2001: 181.
- [2] 崔忠圻. 金属学与热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [3] 纪美术, 冯斌, 杜则裕. 控轧钢管热弯管的应用与发展趋势 [J]. 焊接技术, 2007, 36(05): 61-63.
- [4] Q/SY GJX 0129—2008, 西气东输二线管道工程用感应加热弯管技术条件 [S].
- [5] 吉玲康, 谢丽华, 杨肃. 高钢级管线管试样形状对拉伸试验结果的影响 [J]. 石油机械, 2006(01): 11-15.
- [6] SUNGTAK L, BYUNG C K, DONGIL K. Fracture Toughness Analysis of Heat-affected Zones in High-strength Low-alloyed Steel Welds [J]. Metall Trans, 1993, 24A: 2803.

作者简介: 赵志伟 (1980—), 男, 河北沧州人, 大学本科, 工程师, 主要从事石油天然气输送管道行业用感应加热弯管及管配件的性能研究与开发工作。

收稿日期: 2011-09-01

编辑: 罗 刚