

十五年来华北石油钢管厂 高钢级管线钢管的开发和生产

王晓香

(华北石油钢管厂, 河北 青县 062658)

摘要: 简述了华北石油钢管厂微合金管线钢管的早期开发情况,重点回顾了自1993年陕京输气管道建设以来华北石油钢管厂高钢级管线钢管的发展历程和制管工艺、装备和技术的发展。我国的高钢级管线钢管的发展和进步是钢厂、管厂和研究院所紧密协作的结果,也得到了国际上许多专家的帮助。希望今后继续加强国内和国际合作,促进共同发展。

关键词: 高钢级管线钢; 含铌微合金; X60 ~ X120 钢级

中图分类号: TG335.75 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-3938(2009)02-0005-09

Development and Production of North China Petroleum Steel Pipe Factory High Grade Pipeline Steel in Recent 15 Years

WANG Xiao-xiang

(North China Petroleum Steel Pipe Factory, Qingxian 062658, Hebei, China)

Abstract: This article briefly introduced the development situation of North China Petroleum Steel Pipe Factory micro-alloyed pipeline steel in early time, and reviewed the development course, manufacturing process and equipment & technology of North China Petroleum Steel Pipe Factory high steel grade pipeline steel since construction of Shaanxi-Beijing gas pipeline in 1993 year. Development and progress of high steel grade pipeline steel in China was the result of the close cooperation among steel maker, pipe factory, and research institute, as well as many international experts' support. In order to promote development together, it wish to further strengthen the cooperation between China domestic and the abroad.

Key words: high grade pipeline steel; microalloyed steel with Nb content; X60 ~ X120 steel grade

15年来,从陕京输气管道X60级钢管的开发起步,我国的高钢级油气输送管线钢管开始起步。1998年X65级钢管大批量走向国门,2000年开始进行西气东输X70级针状铁素体钢管的研制,X70级钢管国产化取得重大进展,2003年开发了X80级管线钢管,2007年开始进行西气东输二线X80级钢管的研制,2008年开始X80级钢管的大批量生产。2005年和2007年分别开发成功X100级和X120级管线钢管。

1 微合金管线钢管的早期开发

国外从20世纪60年代开始,开展了大规模

的油气管道建设工程,大量应用微合金管线钢管。如加拿大已在1971年采用低碳Mo-Nb微合金化针状铁素体管线钢生产X70级钢管。

我国自1970年开始建设油气长输管线,当时国内还没有真正意义上的管线钢。螺旋焊管用板卷停留在A3/A3F等一般碳素结构钢水平,最高强度板卷为从日本进口的TS 52K。我国长输管道水平大大落后于西方先进工业国。

1983年,华北石油钢管厂与原冶金部北京钢铁研究总院和上海第一钢铁厂合作进行了相当于API 5L X60强度级别的10MnVNb管线钢管的开发和国内首次批量制管试验。共试制了240 t 10MnVNb管线钢板卷,其主要化学成分见表1^[1]。

华北石油钢管厂采用这些板卷共试制 $\phi 529 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 螺旋埋弧焊钢管 164 根。在试制过程中,对铌微合金化管线钢管的焊接材料匹配和焊接工艺,管体、焊缝和热影响区的组织和性能进行了大量的试验研究,并进行了 6 次钢管实物水压爆破试验。通过试验和批量试制,优选出较好的焊接材料匹配,特别是含铌焊丝的试验为以后铌微合金化管线钢的焊接积累了大量的数据和经验。但那时钢管的性能指标体系还未与国际先进标准接轨,尤其是还没有明确提出钢管的韧性指标。

表 1 国内首次批量试制 10MnVNb 管线钢

板卷的主要化学成分				%
$w(\text{C})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{S})$	
0.1 ~ 0.13	1.07 ~ 1.49	0.2 ~ 0.38	0.016 ~ 0.03	
$w(\text{P})$	$w(\text{V})$	$w(\text{Nb})$		
0.014 ~ 0.035	0.021 ~ 0.058	0.015 ~ 0.046		

2 陕京管线 X60 级微合金管线钢管的开发

1991 年 7 月 12 日,由中国石油天然气总公司和北京市政府共同投资建设的陕甘宁气田至北京的天然气输送管道(简称陕京输气管道)是我国第一条长距离输气管道,全长 918 km,设计压力 6.4 MPa,所需 $\phi 660 \text{ mm} \times 7.1 \text{ mm}$ 螺旋焊管全部由中国石油天然气总公司所属管厂生产,在穿跨越等地段采用进口 UOE 直缝埋弧焊管。

陕京输气管线工程制定了严格的企业标准,提出了对 API SPEC 5L 标准的补充技术规定。陕京输气管线在我国首次采用 API SPEC 5L X60 管线钢,提出了钢管的低温韧性指标为 -30°C 的夏比冲击功平均值不低于 50 J。其化学成分要求见表 2^[2]。

表 2 陕京管线 X60 级板卷的

化学成分要求					%
$w(\text{C})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{S})$	$w(\text{P})$	
≤ 0.11	≤ 1.55	≤ 0.35	≤ 0.01	≤ 0.025	
$w(\text{Nb} + \text{V} + \text{Ti})$		$w(\text{Cr} + \text{Ni} + \text{Cu})$		$w(\text{N})$	
≤ 0.12		≤ 0.50		≤ 0.009	

华北石油钢管厂承担了陕京管线 X60 螺旋埋弧焊钢管的试制和主要生产任务。针对首次采用 X60 管线钢、要求保证钢管低温韧性的特点,进行了多次力学性能和工艺试验,掌握了丰富的第一手数据。在螺旋焊管成型中,完善了低残余

应力成型法,大大减小了钢管的残余应力;通过焊接工艺试验筛选出 Mn - Mo - Ti - B 系高韧性焊丝和 SJ101 烧结焊剂的焊材匹配;采用了双丝串列埋弧焊接工艺和碱性焊条修补等新材料、新工艺,全面提高了焊接质量和焊缝性能。

陕京管线前期制管采用从日本进口的 X60 级板卷。1993 年,华北石油钢管厂配合宝钢进行了 X60 级板卷国产化的攻关,共同合作对制管前后的力学性能变化,特别是对包辛格效应进行了大量的研究,取得了板卷制管前后强度、韧性和硬度等性能变化的关联数据,开发了适合宝钢 X60 级板卷的焊接工艺,解决了含铌管线钢的可焊性与焊区韧性等问题,成功地用国产 X60 级板卷试制出 $\phi 660 \text{ mm} \times 7.1 \text{ mm}$ 螺旋焊管。此后的生产全部采用了宝钢的 X60 级板卷 5 万多吨,钢管质量全部满足标准要求。X60 级板卷和螺旋焊管首次实现国产化,大大缩小了我国高钢级管线钢管和国外先进水平的差距,为今后更高钢级管线钢的国产化打下了良好基础,也开启了华北石油钢管厂与宝钢在高钢级管线钢领域的长期友好合作之门。

3 管线钢管大批量走向国门

陕京管线 X60 级钢管国产化的成功,大大提高了我国油气输送钢管的技术水平和国际竞争力,为我国管线钢管走向国际市场提供了良好的经验和业绩证明。陕京管线建成之际,正值我国在苏丹投资建设的大尼罗河石油项目投产,急需建设通向苏丹港的 1 500 km 原油输送管线,正好为我国油气输送钢管走向国门提供了一个极好的机遇。

苏丹原油管线钢级为 X65,管径为 711.2 mm,壁厚为 10.72 mm,这些参数均比陕京管线有较大提高。钢管标准的制定借鉴了加拿大的管线钢管和焊接的有关标准,采用低碳、高纯净度和微合金化的成分设计,铌含量的上限提高到 0.08%。

X65 级管线钢是国内首次大批量生产,其技术要求也比陕京管线高。经过宝钢和管厂的协作攻关,国产 X65 级板卷的性能很好地满足了标准要求。

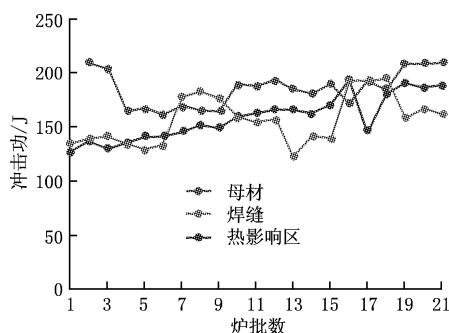
苏丹管线 X65 级钢管的开发使我国含铌微合金管线钢又上了一个新台阶。表 3 给出了出口苏丹 X65 级管线钢的化学成分标准要求和实物

表 3 出口苏丹 X65 管线钢的化学成分标准要求和实物水平

	$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{S})$	$w(\text{P})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{V})$	$w(\text{Ti})$
实物	0.07	0.24	1.31	0.004	0.010	0.044	0.042	0.013
标准	≤ 0.18	≤ 0.50	≤ 1.88	≤ 0.01	≤ 0.03	≤ 0.08	≤ 0.08	≤ 0.06

水平的数据。从表 3 可看出,其实物水平较标准要求有很大富裕,特别是碳含量低,可焊性良好^[1]。

苏丹管线 X65 级钢管开发的另一个重大技术进步是钢管的韧性指标有了大幅提高。由于母材、焊接材料和焊接工艺的进步,钢管母材、焊缝和热影响区 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的夏比冲击功都超过了 100 J (见图 1),为今后更高钢级油气管线的生产打下了坚实的基础。

图 1 苏丹 X65 级钢管 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 夏比冲击功

苏丹穆格莱德原油管线的建设在 1999 年如期完成。此后,中石油集团又陆续向苏丹出口了

大批钢管,部分钢管的钢级提高到 X70,管径提高到 813 mm。华北石油钢管厂至今已出口高钢级管线钢管 $30 \times 10^4\text{ t}$,绝大多数是 X65 及以上钢级,最大管径达到 1420 mm。这些事实表明,我国管线钢管技术有了长足的进步,在国际市场具有相当强的竞争力。

4 针状铁素体 X70 级管线钢管的首次开发

涩宁兰输气管道工程是国家确定的 2000 年西部大开发的十大重点工程之一,被视为西气东输的序曲。在涩宁兰输气管线上进行了 11 km X70 钢级管线试验段的建设,为西气东输管道采用 X70 钢级的决策进行了具有关键意义的探索。

宝钢首次开发的 X70 板卷具有优良的低温韧性和可焊性, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 夏比冲击功超过 200 J, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 落锤撕裂试验剪切面积仍为 100%;碳当量 $\text{CE}(\text{Pcm})$ 值不大于 0.16%,显示了针状铁素体管线钢的突出优点。涩宁兰管线 X70 级针状铁素体管线钢的主要化学成分实物水平与标准要求对照见表 4^[2]。

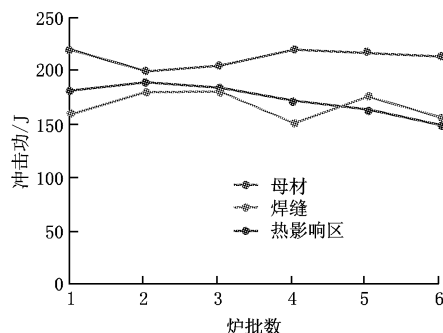
表 4 涩宁兰管线 X70 级针状铁素体管线钢的主要化学成分

	$w(\text{C})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{S})$	$w(\text{P})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{V})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{Ti})$	$\text{CE}(\text{Pcm})$
实物	0.05	1.40	0.002	0.014	0.19	0.048	0.057	0.015	0.16
标准(max.)	0.09	1.60	0.005	0.02	0.30	0.06	0.06	0.04	0.20

由于针状铁素体型 X70 级管线钢在国内是首次应用,对钢板制管后力学性能的变化,特别是包辛格效应的影响缺乏数据,需要经反复试验掌握其规律,以最终确定板卷的技术要求。

华北石油钢管厂与宝钢合作,进行了国内首批 1000 t 针状铁素体型 10.3 mm 厚 X70 级管线钢板卷的制管试验。针对 X70 级输气钢管韧性要求高的特点,开发了 SJ101 - G 新型高韧性烧结焊剂和 E5515 - G 高韧性 X70 级修补焊条,进行了大量焊接工艺试验。试验结果表明, SJ101 - G 新型高韧性烧结焊剂与 08Mn - Mo - Ti - B 焊丝的匹配最佳。采用这种匹配和优化双丝焊接工艺

参数施焊,钢管焊缝和热影响区的低温冲击韧性均超过 150J (见图 2),又上了一个台阶。这种

图 2 涩宁兰 X70 级钢管 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 夏比冲击功

焊材匹配成为此后一系列 X70 级管线钢管生产的基本焊材匹配延用至今,为西气东输 X70 级钢管国产化提供了宝贵的经验。

我国高钢级输送管线钢管正在一步一个脚印地前进,逐步接近世界先进水平。

5 西气东输 X70 级钢管的开发

2000 年初,党中央、国务院做出了建设西气东输工程的决定。西气东输干线全长 3 900 km,需要大直径焊接钢管 160×10^4 t。西气东输 X70 级钢管的技术标准充分吸收了世界各国管线钢管技术的最新成果,明确提出钢管的组织应以针状铁素体为主。在钢管的化学成分要求方面,与涩宁兰 X70 试验段标准相比,在总量控制的前提下,进一步将铌的含量上限提高到 0.08%,而将钛的上限降低到 0.025%,同时增加了对氮含量的限制,适应了国际管线钢的发展趋势。西气东输 X70 级钢管的化学成分如表 5^[2] 所示。

表 5 西气东输 X70 级针状铁素体管线钢的主要化学成分要求 %

$w(\text{C})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{S})$	$w(\text{P})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{V})$
≤ 0.09	≤ 1.65	≤ 0.005	≤ 0.02	≤ 0.3	≤ 0.06
$w(\text{Nb})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Nb} + \text{V} + \text{Ti})$		$w(\text{N})$	CE(Pcm)
≤ 0.08	≤ 0.025	≤ 0.15		≤ 0.008	0.21

按工程设计,干线共需螺旋焊管 84×10^4 t,钢级为 X70,外径为 1 016 mm,壁厚为 14.6 mm 和

17.5 mm,具有管径大、管壁厚、强度高、输送压力大等特点。而此前我国天然气长输管道外径仅为 711 mm,最大壁厚为 12.7 mm,钢级最高为 X65。这对于我国制管业既是千载难逢的机遇,也是极为严峻的挑战。根据西气东输工程对钢管的特殊要求,华北石油钢管厂对焊接工艺、成型工艺、生产设备、精整设备、检验设备等多方面进行了深入研究,在国内率先自主开发了新型成型器和管端扩径等多项技术,新建了大直径螺旋焊管生产线,使企业技术装备和钢管制造水平有了质的飞跃,为 X70 级螺旋焊管国产化的顺利实现提供了强有力的技术保障。开发的新型成型机能够实现稳定的低残余应力成型,解决了大直径、高强度螺旋焊钢管残余应力控制的难题。精确成型和管端整径技术的应用,使钢管尺寸精度较 API 5L 标准要求大大提高(图 3),满足了现场全自动环焊工艺要求。

2000 年华北石油钢管厂先后采用宝钢等公司提供的板卷进行了西气东输工程 X70 钢级 $\phi 1\ 016$ mm 螺旋焊钢管的试制。于 2001 年 1 月 25 日顺利试制出中国第一根 X70 钢级、 $\phi 1\ 016$ mm $\times 14.7$ mm 螺旋埋弧焊钢管。经中石油西安管材研究所检测,首次试制的钢管各项指标均达到标准规定要求。2001 年 9 月 3 日,由华北石油钢管厂生产的首批 1 000 t 西气东输 X70 钢级、 $\phi 1\ 016$ mm $\times 14.6$ mm 螺旋埋弧焊钢管专列发往西气东输新疆库尔勒施工现场。在 9 月 22 日西气东输工程新疆试验段开工现场使用。

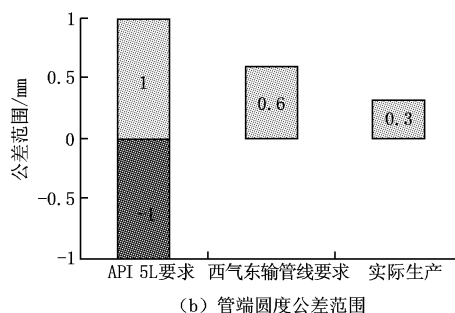
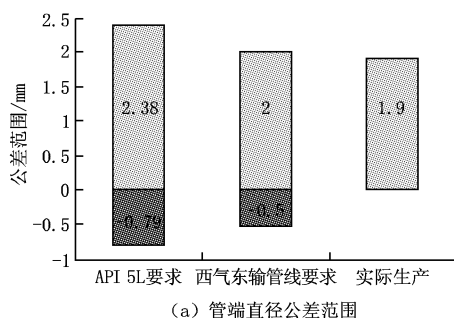


图 3 西气东输 X70 钢级 $\phi 1\ 016$ mm $\times 14.6$ mm 螺旋焊管的管端尺寸精度

在西气东输工程之前,我国不能生产直缝埋弧焊管。陕京管线等工程所需的直缝埋弧焊管全部从国外进口。为了满足西气东输工程建设的需要,华北石油钢管厂巨龙钢管公司新建了 JCOE

生产线,于 2002 年 2 月试制出第一根钢管。2002 年 6 月 17 日,批量试生产的 X70 钢级 $\phi 1\ 016$ mm $\times 17.5$ mm 和 $\phi 1\ 016$ mm $\times 21$ mm 两种规格的西气东输工程直缝埋弧焊接钢管顺利通过了国家鉴

定。认为这项技术成果达到了国际先进水平,钢管质量达到了国外同类产品实物水平,填补了国产油气输送管道用 X70 级大直径直缝埋弧焊管的空白。2002 年 6 月 21 日,首批国产直缝埋弧焊管发往陕西子长和山西临汾西气东输工程施工现场,用于西气东输工程。

西气东输 X70 级螺旋焊管全部由中石油、中石化所属 6 家钢管厂生产,国产化率达到 100%。制管用 X70 级板卷主要由宝钢提供,国产化率超过 70%。据中石油西安管材研究所对西气东输 X70 级螺旋焊管批量生产数据分析,国产螺旋焊管与进口 UOE 钢管实物水平相当,全部钢管焊接后均一次试压成功。国产直缝埋弧焊管占直缝钢管总量的 15%。直缝焊管国产化的实现,使西气东输国产大直径焊管总用量达到 2 014 km,保证了钢管国产化率过半和大直径钢管国产化目标的全面实现。

西气东输工程后又陆续建设了陕京二线输气管道、西气东输至陕京二线联络线——冀宁输气管道以及川气东送管道等 X70 级干线输气管道,国产螺旋焊管的壁厚提高到 17.5 mm,钢管国产化率不断提高。在冀宁联络线还建设了国内第一段 X80 钢级应用段。

6 俄罗斯东西伯利亚—太平洋石油管线(泰纳线)钢管开发

2006 年,国产 K60 钢级 JCOE 钢管成功出口俄罗斯,用于举世瞩目的东西伯利亚—太平洋石油管线(泰纳线)。这是我国高钢级管线钢管首次大批量进入俄罗斯油气干线管道市场。

泰纳线 K60 管线钢的强度等级大约相当于 API 5L 的 X70,其化学成分要求见表 6^[2]。由表 6 可见,泰纳线标准同样接受了现代高铌管线钢的成分设计思想,不仅允许采用较高的铌含量,而且规定了铌的下限。

宝钢、首钢和沙钢等钢厂成功开发了 K60 级管线钢宽厚板。华北石油钢管厂承担了主要的制

管任务,共生产约 9×10^4 t。国产钢管进入俄罗斯泰纳线市场,充分展示了我国在高等级管线钢管技术领域的实力和飞速发展。

泰纳线钢管直径、壁厚与西气东输二线基本相同,钢管实际强度接近 X80 钢级的强度水平, K60 钢级 JCOE 钢管的开发为西气东输二线钢管国产化提供了很好的练兵机会。

7 西气东输二线 X80 级管线钢管开发

7.1 X80 级管线钢管应用工程

我国 X80 级管线钢管的开发从 2003 年初开始。2004 年初,中石油集团决定在西气东输与陕京二线的联络线——冀宁输气管道上实施 X80 级管线钢管应用工程。应用段设在 2 级和 3 级地区结合部,在 2 级地区应用壁厚为 15.3 mm 的螺旋埋弧焊管,3 级地区应用壁厚 18.4 mm 的直缝埋弧焊管,X80 级钢管的壁厚比同地区级别使用的 X70 级钢管壁厚分别降低 2.2 mm 和 2.6 mm,壁厚减薄 12.5% 左右。

X80 级管线钢管应用工程在控制 Nb + Ti + V 总量的基础上,将 Nb 质量分数的上限提高到 0.08%。所用 X80 级钢管和板材全部国产化,板卷和钢板均为针状铁素体管线钢,全部钢管的 CE(Pcm) 值在 0.15% ~ 0.20% 之间,可焊性好。其中宝钢研制的 X80 级板卷采用了超低碳—高铌的成分设计,铌含量突破了过去管线钢标准常用的 0.056% 的上限。X80 级应用工程管线钢主要化学成分的标准与实物水平见表 7^[2]。

2004 年底至 2005 年初完成了应用段所需钢管的批量生产。试验分析结果表明,含铌 0.07% 的 X80 级钢管的低温冲击韧性优良,其 -20℃ 母材的夏比冲击功(CVN) 达到 300 J 水平,热影响区达到 250 J 水平,焊缝达到 150 J 以上,与常规铌含量的 X80 级钢管相比,其低温冲击韧性显著提高(见图 4^[3])。本次试验的结果为今后 X80 级管线钢管的开发提供了宝贵的经验。

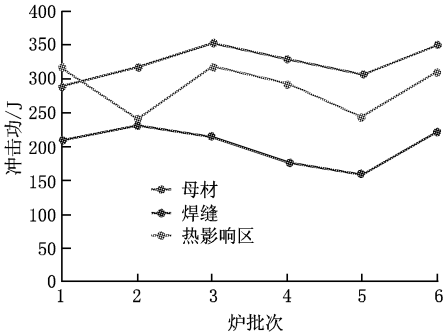
X80 级管线钢管应用工程共铺设 X80 级钢管 7.9 km。由于钢管尺寸精度高,可焊性好,焊接质量好,合格率高,整个施工过程非常顺利。该管线已于 2005 年底投入运行,安全输气至今。

表 6 泰纳线 K60 管线钢的主要化学成分要求 %

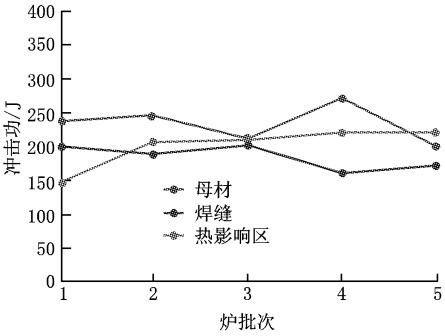
$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$
0.09	0.16 ~ 0.37	1.65	0.013	0.006
$w(\text{Nb})$	$w(\text{V})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{N})$	$w(\text{Cr})$
0.02 ~ 0.09	0.09	0.05	0.009	0.4

表 7 X80 级应用工程管线钢主要化学成分的实物水平与标准要求 %

	w(C)	w(Mn)	w(Mo)	w(Nb)	w(Nb + Ti + V)	CE(Pcm)	CE(IIW)
板卷 1	0.04	1.89	0.30	0.070	0.125	0.18	0.47
板卷 2	0.04	1.80	0.28	0.054	0.070	0.18	0.44
平板	0.04	1.81	0.21	0.053	0.069	0.16	0.41
标准(Max.)	0.09	1.85	0.35	0.080	0.150	0.23	0.43



(a) 含Nb0.07%X80钢管夏比冲击功 (-20℃)



(b) 含Nb0.054%X80钢管夏比冲击功 (-20℃)

图 4 不同铌含量 X80 级管线钢管的夏比冲击性能

7.2 西气东输二线 X80 级管线钢管的开发

7.2.1 西气东输二线钢管开发面临的新问题

西气东输二线引进中亚地区的天然气,管线的年输气量将达到 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$,管道干线长 4 843 km,西段设计压力 12 MPa,直径 1 219 mm,壁厚 18.4 mm 及以上,干线需用 X80 级钢管 278 $\times 10^4$ t。这是世界管道史上史无前例的宏伟工程。

虽然前期完成的 X80 级钢管应用工程取得了阶段性成果,但对更大规模的西气东输二线的要求来说,还有以下几个方面的问题需要解决:

(1) 钢管断裂韧性要求高,1 级地区(设计系数 0.72)钢管的止裂韧性要求为 220 J;

(2) 钢管最小壁厚为 18.4 mm,比西气东输一线提高了 26%,最厚的规格达到 33 mm,大大超过世界上已建 X80 级输气管线的钢管壁厚,保证如此厚壁钢管的强度和高韧性十分困难;

(3) 钢管壁厚的增加使焊接热输入增加,导致焊接热影响区性能恶化,必须开发具有更好焊接性能的管线钢和焊接工艺;

(4) 为了输送的经济性,应尽可能降低用钢量和成本。

西气东输二线 X80 级管材技术标准在控制铌、钒、钛总量为 0.15% 的前提下,将铌含量的上限提高到 0.11%,为经济的高性能高铌管线钢的开发和应用铺平了道路。

西气东输二线 X80 级钢管化学成分要求见表 8,钢管的壁厚和止裂韧性要求见表 9。

表 8 西气东输二线 X80 级钢管的主要化学成分要求(产品分析) %

w(C)	w(Mn)	w(Nb)	w(Ti)	w(Cr)
≤0.09	≤1.95	≤0.11	≤0.025	≤0.45
w(Nb + Ti + V)	w(Mo)	w(N)	CE(Pcm)	
≤0.15	≤0.35	≤0.008	0.23	

表 9 西气东输二线 X80 级钢管的壁厚和 -10℃ 止裂韧性要求

位置	壁厚/mm	$S_A/\%$		C_V/J	
		单个	平均	单个	平均
管体横向	18.4	80	90	170	220
	22,26.4,27.5,33	80	90	140	
焊缝及热影响区	所有壁厚	30	40	60	

7.2.2 西气东输二线 X80 级热轧板卷和螺旋焊管的开发

从 2007 年 1 月开始,华北石油钢管厂与国内多家钢厂合作进行了厚度 18.4 mm 螺旋焊管的制管试验。

最初的试验采用 HTP 工艺开发的 X80 级热轧板卷。大量试验数据表明,高 Nb + Cr 成分的螺旋焊管横向屈服强度只能达到 X70 钢级的强度水平,不能保证钢管达到 X80 钢级要求,而采用高温轧制难以保证板卷的 DWTT 性能。为此,各钢厂均改进了成分设计,采用高 Nb + Mo(0.2% ~ 0.3%),同时降低了终轧温度,最终试制出满足西气东输二线制管要求的 X80 钢级、厚度 18.4 mm 热轧板卷。

表 10 为厚度 18.4 mm、X80 级热轧板卷的一种典型化学成分。

表 10 厚度 18.4 mm X80 热轧板卷的典型化学成分 %

	$w(\text{C})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Nb} + \text{Ti} + \text{V})$
实物	0.05	1.74	0.10	0.018	0.12
标准(max.)	0.09	1.95	0.11	0.025	0.15
	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{N})$	CE(Pcm)
实物	添加	添加	添加	0.004	0.19
标准(max.)	0.45	0.35	0.50	0.008	0.23

参与西气东输二线 X80 级螺旋焊管试制的国内各钢管厂都对制管设备进行了增强改造,以适应 18.4 mm 大壁厚、高强度螺旋焊管的生产,同时开发了高韧性焊材,完成了千吨级小批量试制,并于 2008 年初投入大批量生产。图 5 ~ 图 7 所示是千吨级试制的螺旋焊管横向屈服强度、CVN 和 DWTT 试验结果。

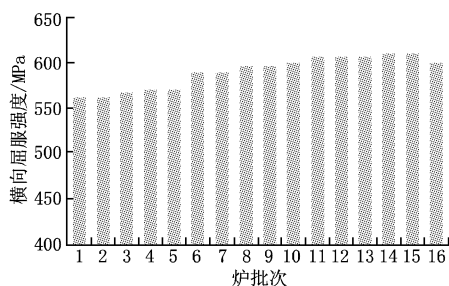


图 5 批量试制的螺旋焊管横向屈服强度

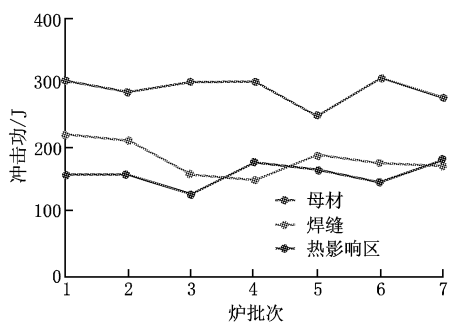


图 6 批量试制螺旋焊管横向 CVN(-10 °C)

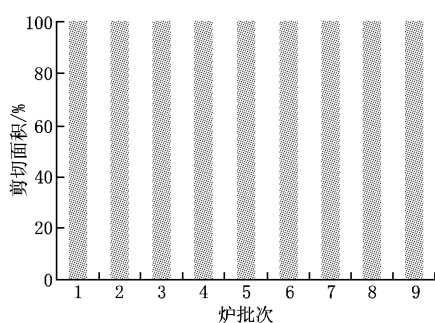


图 7 批量试制螺旋焊管 DWTT 剪切面积(0 °C)

从图中可见钢管的韧性优良,特别是 DWTT 剪切面积全部为 100%。目前 X80 级热轧板卷和螺旋焊管已进入大批量生产阶段,截止到 2008 年 10 月底,已生产 51×10^4 t。

7.2.3 西气东输二线 X80 级热轧钢板和直缝埋弧焊管的开发

在 X80 级管线钢板和直缝埋弧焊管开发方面,我国近年来建设了多套宽板轧机,X80 级管线钢宽厚板开发的装备条件有了明显提高。

多数钢厂初期采用超低 C - Nb - Cr 成分、微钛处理、HTP 轧制的方案。经过多次试验,证明采用超低 C - 高 Nb + Cr、微钛处理的成分设计是可行的,但是采用 HTP 轧制的钢板其原始奥氏体晶粒尺寸较大,DWTT 剪切面积不能满足要求,为此对轧制工艺进行了优化,开发了具有中国特色的优化 HTP(OHTP)工艺^[3]。

2007 年初,宝钢采用新建成的 5 m 轧机试制出 22 mm 厚度的 X80 级管线钢板。钢板的主要性能见表 11。

表 11 宝钢 X80 钢级 22 mm 钢板的主要性能

化学成分/%	CE(Pcm)/%	$R_{t0.5}$ /MPa	C_V /J (-20 °C)	S_A /°C (-15 °C)	HV ₁₀
$w(\text{Nb}) = 0.09$ $w(\text{Cr}) = 0.3$ 无 Mo	0.18	560 ~ 595	≥330	>85	≤229

华北石油钢管厂于 2007 年 5 月采用宝钢研制的高 Nb + Cr X80 钢板进行了首次 $\phi 1219$ mm \times 22 mm 直缝埋弧焊管试制。采用 JCO 成型和四丝串列埋弧焊焊接,焊材采用改进的 Mn - Mo - Ti - B 焊丝和高韧性碱性烧结焊剂。焊缝性能良好。试制钢管的管体、焊缝和热影响区性能均符合技术条件要求并有较大余量,已于 2007 年 7 月通过了中石油西安管材研究所按西气东输二线标准进行的评定。

在首次试制基础上,华北石油钢管厂分别采用宝钢、沙钢和鞍钢板材进行了 3 次千吨级直缝埋弧焊钢管试制。板材的典型化学成分见表 12^[4]。

表 12 厚度 22 mm X80 管线钢板典型化学成分 %

$w(\text{C})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{Ti})$
0.056	1.75	0.10	0.015
$w(\text{Nb} + \text{Ti} + \text{V})$	$w(\text{N})$	其他	CE(Pcm)
0.12	0.004	Cr, Ni, Cu	0.19

在批量试制 $\phi 1\ 219\ \text{mm} \times 22\ \text{mm}$ X80 级直缝埋弧焊管过程中,突出的问题一是制管后横向屈服强度显著上升,二是 DWTT 剪切面积不能满足标准要求。

根据以上试验结果,钢厂对轧制工艺进行了改进,改善了板材的组织 and 形变硬化性能,适当调整了板材屈服强度范围,在制管时选择适当的成型和冷扩径参数,以控制屈强比过分升高。最终钢管的横向屈强比可控制在 0.94 以下,钢管 DWTT 性能良好,见图 8;钢管的低温冲击性能优良,见表 13。

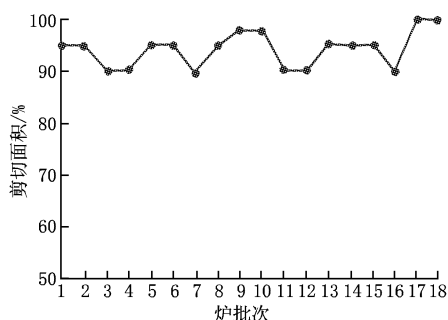


图 8 批量试制 X80 $\phi 1\ 219\ \text{mm} \times 22\ \text{mm}$ 直缝埋弧焊管 DWTT 剪切面积

表 13 试制 22 mm X80 JCOE 钢管
夏比冲击试验结果 ($-10\ ^\circ\text{C}$)

	C_V/J		$S_A/\%$	
	平均值	最小值	平均值	最小值
管体	420	365	100	100
标准	180	140	90	80
焊缝	150	130	70	60
标准	80	60	40	30
HAZ	230	215	80	70
标准	80	60	40	30

华北石油钢管厂已生产直缝埋弧焊管钢管 3 000 多吨,钢管质量稳定,实物性能良好,并进行了更大壁厚钢管的试制。截止到 2008 年 10 月底,华北石油钢管厂和宝钢已生产 $\phi 1\ 219\ \text{mm}$ 直缝埋弧焊管 $14 \times 10^4\ \text{t}$ 。

7.2.4 X80 级感应加热弯管的开发

华北石油钢管厂从 2007 年 5 月开始进行 X80 钢级 $\phi 1\ 219\ \text{mm} \times 22\ \text{mm}$ 感应加热弯管的试制工作。试制初期采用干线钢管进行了多次试制,结果不太理想。为此华北石油钢管厂与钢厂和中石油西安管材研究所合作进行了专用母管的

研制。2008 年 4 月,采用宝钢钢板制成的专用母管完成了 $\phi 1\ 219\ \text{mm} \times 22\ \text{mm}$ 感应加热弯管小批量试制,并获得成功。

试制成功的 X80 钢级弯管各部位屈服强度在 610 ~ 660 MPa 之间,强度均匀,差异不大。管体夏比冲击功大于 230 J,热影响区大于 200 J,焊缝大于 90 J。与标准要求相比均有很大余量。硬度不超过 280HV₁₀,外弧最大壁厚减薄率仅为 5%,性能完全满足了西气东输二线技术要求,现已批量生产。壁厚 25.7 mm 和 32 mm 的弯管也已开发成功,通过了鉴定。

8 X100 和 X120 级超高强度管线钢管的开发

X100 和 X120 级超高强度管线管的应用可显著地节省长距离天然气输送管线的总成本。目前,X100 和 X120 级超高强度管线钢管已纳入最新出版的 API 5L/ISO 3183 管线钢管标准。我国在超高强度管线钢领域与西方发达国家相比落后近 20 年。在成功开发 X80 级高强度管线钢管后,华北石油钢管厂又与钢厂合作,进行了 X100 和 X120 级超高强度管线钢管的开发。

华北石油钢管厂首先与鞍钢、南钢合作进行了 X100 级管线钢开发。2006 年初,采用鞍钢制造的 X100 级钢板进行了 $\phi 813\ \text{mm} \times 14.3\ \text{mm}$ 钢管的试制。中石油西安管材研究所分析评价较为理想。2006 年 6 月,华北石油钢管厂采用南钢制造的 X100 级钢板进行了 $\phi 813\ \text{mm} \times 12.5\ \text{mm}$ 钢管的试制。试制钢管的强度满足 X100 钢级的要求,管体夏比冲击功和剪切面积以及 DWTT 剪切面积均较好,见表 14^[2]。

表 14 X100 钢管夏比冲击试验结果

缺口位置	试验温度/ $^\circ\text{C}$	C_V/J	$S_A/\%$
管体	-20	200	80
焊缝	-20	170	67
HAZ	-20	160	67

X120 是目前管线钢管的最高钢级,也是目前管线钢开发的热点之一。世界上只有少数国家有能力开发。宝钢 5 m 宽厚板轧机建成后,华北石油钢管厂又与宝钢合作开发 X120 级管线钢管。为了保证所开发 X120 级钢管实物性能的可比

性,将试制 X120 级钢管的规格定为 $\phi 914 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 。宝钢于 2006 年底成功试制出 16 mm 厚度的 X120 级钢板。

为探索 X120 级钢管的焊接规律,进行了大量的焊接试验研究。焊接试验共进行了三轮,历经半年,最终优选出比较理想的焊材匹配和焊接工艺,于 2007 年 4 月完成了 $\phi 914 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 、X120 钢级 JCOE 钢管的试制,并送中石油西安管材研究所进行了测试。结果表明,宝钢研制的 X120 级管线钢碳当量较低,焊接性能优良。研制的钢管管体和焊缝的强度、冲击韧性和硬度等力学性能均较为理想,达到国际同类钢管实物水平。其夏比冲击试验结果见表 15^[2]。

表 15 X120 钢级 LSAW 钢管
夏比冲击试验结果(平均值)

缺口位置	试验温度/℃	C_V/J	$S_A/\%$
管体	-30	238	90
焊缝	-30	150	63
HAZ	-30	185	67

9 结 语

15 年来,华北石油钢管厂和国内钢厂密切合作,在高强度和超高强度管线钢和钢管的开发方面取得了长足的进步。X80 及以下钢级管线钢管已实现国产化。不仅能够满足国内管线建设需求,而且已大量出口。研制超高强度管线钢管的性能与国外水平基本相当,填补了我国在超高强度管线钢管领域的空白,大大缩小了我国与西方发达国家的差距,见图 9^[4]。

为进一步发展我国的油气管道事业,促进我国钢铁工业和输送钢管整体水平的进一步提升,使我国从钢管大国发展为钢管强国,任重而道远,华北石油钢管厂愿与同仁共同努力。

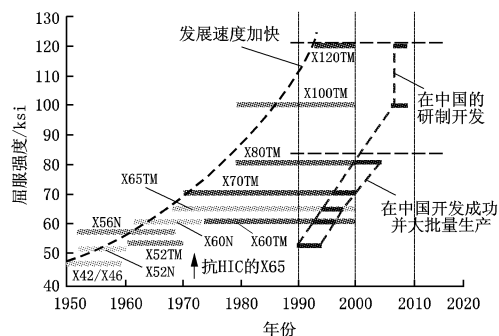


图 9 我国和国际管线钢开发应用对比

我国的高钢级管线钢管的发展和进步是钢厂、管厂和研究院所紧密协作的结果,也得到了国际上许多专家的帮助,今后应继续加强国内和国际合作,促进共同发展。

参考文献:

- [1] 华北石油机修厂. 10MnVNb 用于螺旋双面焊钢管试验报告[J]. 焊管通讯, 1983(2): 87.
- [2] 王晓香. 坚持不懈地推进钕微合金化管线钢在我国油气管线的应用[C]//新世纪高等级管线钢及钢管生产技术国际研讨会论文集. 北京: [出版地不详], 2007: 55-70.
- [3] 王晓香. X80 级管线钢管的开发[C]//新世纪高等级管线钢及钢管生产技术国际研讨会论文集. 北京: [出版地不详], 2007: 46.
- [4] ZHENG Lei, GAO Shan. The development of high performance pipeline steel in China[C]//International Conference on Steel Pipeline. Beijing: [n. s.], 2008: 19-20.

作者简介: 王晓香(1946-), 男, 教授级高工, 中国金属学会轧钢学会第五届焊管学术委员会主任委员, 石油管材专标委专家委员, 《焊管》、《钢管》杂志编委。

收稿日期: 2008-11-10

编辑: 郑一维

钢铁行业三大趋向值得关注

一是由于金融危机目前尚未见底, 今年对实体经济的影响会进一步加深, 其严重后果还会进一步显现, 还存在许多不稳定不确定因素, 由此导致今年必然形成国际范围内的经济链衔接的平衡期, 也是国内产业链之间的平衡期, 还会继续处于国内经济周期性的回落期。二是从宏观调控政策走向看, 今年将是重点防止经济运行下滑阶段, 是刺激内需的启动阶段, 是尽最大可能缩短经济回落期阶段。三是从钢铁行业发展趋势判断, 今年将是钢材价格逐步恢复和产能过剩更加凸显的一年; 将是在国内外经济动荡之后, 市场结构、竞争结构都会发生较大变化的一年; 还将是企业面对市场结构变化进行适应性调整并对战略转型和结构优化升级进行探索而采取新对策的一年。因此, 对今年的钢铁行业趋势, 既要充满信心, 又不能过于乐观。

摘自《中华钢管网》