

# X100 级管线钢及其焊接性

严春妍<sup>1</sup>, 李午申<sup>1</sup>, 冯灵芝<sup>1</sup>, 薛振奎<sup>2</sup>, 白世武<sup>2</sup>, 刘方明<sup>2</sup>

(1. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072;

2. 中国石油天然气管道科学研究院, 河北 廊坊 065000)

**摘 要:** 针对高压长距离油气输送管线的发展带来的对高强度钢管的巨大需求, 论述了 X100 级管线钢的研究发展状况、冶金学设计原理、力学性能, 以及现场焊接性等问题。指出 X100 级管线钢的生产需要综合应用超纯净冶炼、控轧控冷工艺以及合理的合金设计等多方面的先进技术和措施。X100 级管线钢具有优良的力学性能, 下屈服强度可达 690 MPa 以上。采用合适的焊接工艺, 可获得较好的现场焊接性和强韧性良好的焊接接头。X100 级管线钢的生产以及材料标准的制定等问题还有待进一步的研究。

**关键词:** X100 级管线钢; 组织结构; 延性止裂; 环缝焊接; 焊接性

**中图分类号:** TE973.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2007)10-105-04



严春妍

## 0 序 言

随着天然气的需求在全球范围内持续增长, 天然气供应以及现有输送系统使得天然气市场呈现供不应求的现状, 如何实现经济有效的天然气长距离输送已成为现今全球经济大环境中的重要一环。为了提高其输送效率、降低铺设管线费用, 高钢级管线钢将成为今后长距离输气管线铺设的主要用钢。

从高钢级管线钢的开发使用上来看, 近十年来, 制钢业积极致力于 X80 级及以上高钢级高强度钢管的研制, 日本新日铁等公司已成功开发出 X100 级的高强度钢管。为了满足强度、低温韧性以及直缝焊接性和现场焊接性等多方面的要求, X100 级管线钢的设计有必要超越先前的设计理念。文中介绍了具有优良低温强韧平衡特性的管材的冶金学设计理念, 并阐述了管材力学性能和 X100 级管线钢的现场焊接性。

## 1 研发概况

对于 X100 级管线钢, 目前国外几大钢管生产厂家均采用低碳高锰的纯净钢, 结合微钛处理, 在炼钢和轧钢工艺过程中通过 Nb, Mo, B 和 Ni 等合金元素的固溶强化、沉淀强化、细晶强化等作用, 得到具备高强度高韧性以及良好焊接性的管线钢。各厂家在

生产时都十分注意 X100 级管线钢化学成分的准确控制、非再结晶区的总压下量、终冷温度以及贝氏体+马氏体组织的控制。

日本钢铁公司 NSC (Nippon Steel Corporation) 早在 1985 年就开始了 X100 级管线钢的研究。英国 BP 公司 9 年前开始与钢铁和制管企业合作, 开发了非酸性天然气输送管道用 X100 级管线钢管, 进行了冶金理化性能评价、焊接性评估以及钢管现场弯曲试验, 并进行了多次全尺寸爆破试验以确定 X100 级管材对钢管长程开裂的止裂能力。1998 年起至今, 加拿大管道公司 TCPL (Trans Canada Pipelines Limited) 一直进行着 X100 级管线钢的开发应用等研究工作。Europipe 从 1995 年起, 已有小尺寸产品问世, 其管壁厚度范围在 12.7 ~ 25.4 mm 之间, 管径在  $\phi 914.4$  mm ~  $\phi 422.4$  mm 之间。为解决 X100 级管线钢的现场焊接性问题, 意大利 SNAM 公司在对 Europipe 生产的 X100 级钢管进行了多种焊接工艺试验后得出, 只要采取适当的措施, X100 级钢管现场焊接的焊缝强度和韧性可获得满意的结果<sup>[1-3]</sup>。

## 2 X100 级管线钢组织结构与成分

X100 级管线钢微观组织机构含有低温转变产物(如马氏体和下贝氏体), 母材组织主要为含细化 M-A 组元的细小贝氏体-铁素体和下贝氏体, 管材焊缝组织通常为针状铁素体和贝氏体。

X100 级管线钢的生产, 与 X80 级管线钢相比,

在热机械轧制 (thermo mechanical controlled process, TMCP) 工艺和快冷技术方面进行了优化改进, 并对化学成分进行了调优。研究表明, X100 级管线钢应选用低碳贝氏体钢, 同时须注重 Ti-B-Al-N-O 之间的平衡, 各元素含量控制在下列范围为宜 (质量分数):

$C \leq 0.6\%$ ,  $1.7\% \leq Mn \leq 1.9\%$ ,  $0.1\% \leq Nb \leq 0.5\%$ ,  $0.2\% \leq Mo \leq 0.3\%$ ,  $Ti/N > 3.5$ ,  $Ti \leq 0.025\%$ <sup>[4-5]</sup>。目前国外各主要钢管生产厂家试制实物产品的化学成分如表 1 所示, 对应的力学性能参数如表 2 所示。

表 1 各主要钢管生产厂家试制的 X100 级管线钢的化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of X100 pipeline steel of main pipe suppliers

序号	生产厂家	C	Mn	Si	P	S	Mo	Nb	Ti	Al	B	N
1	日本新日铁	0.06	1.96	0.22	0.006	0.002 6	0.11	0.045	0.013	—	—	—
2	日本住友金属	0.06	1.84	0.18	0.008	0.003 0	0.25	0.04	0.008	—	0.000 3	0.002 3
3	日本川崎制铁	0.06	1.80	0.30	0.010	0.001 0	0.26	0.06	0.015	0.030	—	—
4	欧洲钢管公司	0.06	1.90	0.35	0.010	0.002 0	0.28	0.05	0.018	0.029	—	0.004 0

表 2 各主要钢管生产厂家试制的 X100 级管线钢的力学性能参数  
Table 2 Mechanical properties of X100 pipeline steel of main pipe suppliers

序号	生产厂家	下屈服强度	抗拉强度		断后伸长率	试验	冲击吸收功			剪切	85°剪切面积
		$R_{d1}/MPa$	$R_m/MPa$		$A(\%)$	温度	$A_{KV}/J$			面积比	转变温度 FATT
		母材	母材	焊缝	母材	$T/^\circ C$	母材	热影响区	焊缝	$S_A(\%)$	$T_f/^\circ C$
1	日本新日铁	710	848	793	30	-20	133	144 (-10℃)	71~130 (-10℃)	100 (-10℃)	-15
2	日本住友金属	711~776	706~817	722~833	18~23	20	235~241	—	—	97 (-10℃)	—
3	日本川崎制铁	727~770	852~917	875	25	0	320~350	110 (-20℃)	180 (-20℃)	96 (-10℃)	-20
4	欧洲钢管公司	752	816	837	18	20	270	136 (-20℃)	168 (-20℃)	85 (-20℃)	-50

### 3 X100 级管线钢力学性能

整体测试包括耐破度试验、纯弯曲测试、坍塌测试、外压弯曲测试、环扩测试以及裂纹的扩展测试等。

#### 3.1 X100 级管线钢的抗破能力

大多数管线所承受的载荷来自于内部压力, 许多管线设计指标中允许管道在压力作用下轴向应力达到指定最小屈服强度 (specified minimum yield strength, 简称 SMYS) 的 80%。

采用水压爆破试验对 X100 级钢管的变形能力进行研究, 试验结果表明, 平均周向断后伸长率随着管材抗拉强度增大而降低, 强度最高的 X100 级管线钢起裂于热影响区, 而其它几组试验裂纹位于母材。由此可见, 裂纹起裂点位置是决定高强度管线钢总伸长率大小的重要因素<sup>[9]</sup>。研究表明, 焊缝、母材的强度配合以及冷裂纹敏感指数值是控制热影响区软化的重要指标。当焊缝、母材强度配合不足时, 应变集中于热影响区, 故应控制母材抗拉强度低于 800 MPa 以维持 X100 级管线钢焊缝与母材的强度配

合, 且焊材也应有强度上限和足够的韧度。另外, 还应限制冷裂纹敏感指数在较窄范围内。可见, 可调整的因素范围十分有限。不过, 已经证明 X100 级钢管强度可满足 0.8 倍 SMYS 水平下高压输送。

#### 3.2 止裂性能

输气管线用钢的动态延性裂纹扩展 (dynamic-ductile fractures, 简称 DDF) 现象发现于 20 世纪 60 年代末 70 年代初, 但那时的断裂理论研究尚未深入, 因此当时利用增压管道全尺寸试验结果来确定如何控制 DDF。这些试验通常需要对几百英尺长的管段进行测试, 但试验结果容易受到土壤和填料、被测钢材的性能和钢种、钢材韧性表示方法、增压介质以及壁厚等因素的影响。

防止高压天然气管线系统延性断裂是 X100 级管线钢止裂问题的一个重要研究方向, 其全尺寸裂纹扩展试验是在较高压力下进行的。Battelle 研究所在这方面的研究成果令人瞩目, 所提出的 Battelle 简化方程计入了大量全尺寸试验结果, 可用于 DDF 止裂韧性 (夏比冲击功) 预测, 并被一些管线建设项目采用。但因该方程是基于 X80 钢级以下管线钢的基本数据获得的, 只适用单相气体输送、冲击韧度在 100 J 以下

的情况。随着材料强度和韧度的提高,该方程的预测准确性明显不足。为预测高钢级管线钢 DDF 止裂能力,可采用“Battelle 双曲线方法”,但对韧性较好的材料,该方法对裂纹扩展速率的低估程度非常大,需对 Battelle 裂纹速率扩展方程重新进行修正。

由新日铁公司组织建立的高强度管线钢研究委员会(JISI)从 7 个全尺寸爆破试验结果出发,提出了高强度管线(high-strength line pipe,简称 HLP)方法。这种方法采用落锤撕裂试验 DWTT 吸收能表示钢材韧性(传统采用 CVN 能量表示止裂韧性),并能根据气体组成,精确计算气体减压波曲线,应用于 Battelle 双曲线方法中从而计算出裂纹扩展距离和速度。但对于 X100 级管线钢,此方法预测的裂纹扩展速度和裂纹长度值普遍偏高,需要对 Battelle 初始止裂压力方程进行修正<sup>[7]</sup>。

大量试验结果得出,对 X100 级管线钢进行全尺寸裂纹扩展测试时采用各处均一的韧性分布方式更为合理,应优先使用全裂纹扩展长度作为判据。

4 X100 级管线钢焊接性分析

碳当量表示碳及合金元素对焊后开裂趋势的影响,通常碳当量越大,强度增加,此时越容易出现焊接裂纹,因此需要对碳当量进行适当的控制。与其他强度级别较低的管线钢相比,X100 级管线钢的碳当量处于较高水平,目前 TMCP 工艺允许的碳当量

的合适范围大约在 0.40~0.52 之间<sup>[8]</sup>。

X100 级钢管直缝焊接时,若能在低含碳量条件下保证较高的碳当量就可以降低热影响区软化,获得良好的焊接性能。环缝的焊接性直接影响着管线的安全运行,但 X100 级钢管环缝焊接总的说来未出现严重问题,焊缝金属强度和低温韧性结果都比较令人满意。环缝焊接时,焊接方法可采用焊条电弧焊(SMAW)和熔化极气体保护焊(GMAW),焊材选择要尽量满足焊缝强度与母材强度达到过匹配。

因管线钢环缝焊接多采用纤维素焊条配合焊条电弧焊,易产生脆硬低温转变产物,冷裂敏感性大大增加,因此有必要对 X100 级管线钢的冷裂敏感性进行研究。铁研试验结果表明,GMAW 焊缝较少出现缺陷,具有令人满意的强韧性,因而更加适合高压大管径长距离输气管道的现场焊接。焊缝要获得良好的性能,必须采用合适的焊接工艺参数。热输入过小时,焊缝出现脆硬第二相组织,强度、硬度有所提高,但韧性大大下降;热输入过大,则组织过于粗大,韧性也会下降。同样,预热温度和层间温度过高或过低时,都会破坏韧性。通常自动焊热输入不超过 1.0 kJ/mm,焊条电弧焊热输入大小不超过 1.5 kJ/mm。试验确定的 X100 级管线钢环缝焊接用预热温度和层间温度最低为 100℃,常用预热温度范围约在 100~120℃之间,但实际焊接时为保证所有焊道温度均在 100℃以上,应适当提高预热温度<sup>[9]</sup>,常规焊接工艺接参数见表 3。

表 3 常规焊接工艺参数  
Table 3 Typical welding parameters

焊接方法	预热温度 $T_p/℃$	层间温度 $T_l/℃$	热输入 $E/(kJ\cdot mm^{-1})$			
			根焊道	热焊道	填充焊道	盖面焊道
熔化极气体保护焊	$\geq 100$	100~250	0.60	0.70~0.75	0.75	0.80~1.0
焊条电弧焊	$\geq 200$	120~250	1.0	1.0	1.5	1.0

研究表明,X100 级管线钢焊接性良好,含碳量、碳当量以及冷速适中并配以合适的焊接规程时,焊接接头可获得良好的力学性能。GMAW 焊缝强度相对 SMAW 焊缝要高些,基本能满足与母材强度的过匹配。环焊缝韧性较高,随着温度下降焊缝金属韧性(冲击韧性和 CTOD 值)呈下降变化。此外,CTOD 值随着下屈服强度的增加明显下降。GMAW 焊缝热影响区一般不会出现软化,薄壁管 SMAW 焊缝热影响区会出现轻微软化,但软化程度不大。

5 X100 级管线钢相关技术问题

根据国内外有关 X100 级管线钢已有的技术数

据及资料分析后发现,X100 级管线钢投入实际使用之前还存在一些技术问题尚待解决。

5.1 下屈服强度的确定

下屈服强度的测定可采用圆棒试样或扁平试样。但扁平试样所得结果通常低于圆棒试样,其扩径测定法耗费较大,不太适合高强度管屈服应力的评估。而圆棒试样可避开包辛格效应,适于 X100 级管线钢性能试验,但应注意试样尺寸不应太小。鉴于下屈服强度、抗拉强度在 X100 管线设计中的重要性,钢管生产厂和用户应对评价程序进行讨论并达成协议。

5.2 焊接接头强度及现场焊接性

X100 级管线钢应能满足焊接性、防止热影响区

软化和焊缝金属性能三项主要性能标准。软化和过匹配问题是接头焊缝强度的控制因素。

环缝焊接问题是 X100 级管线钢焊接的主要问题, 焊材选择应能满足焊缝、母材强度过匹配, 力求获得良好的韧性水平。为避免焊缝中产生过大残余应力, 得到合适的熔深和良好焊接性, 打底焊缝应选用低氢纤维素焊条; 填充焊道和盖面焊道的焊材选择应满足焊缝与母材强度等匹配或轻微过匹配, 药皮类型为低氢型(每 100 g 熔敷金属中扩散氢含量小于 5 mL)。但 X100 级管线钢的焊缝强度并非总是高于母材, 且断裂也不总发生在母材中, 焊缝与母材很难保证过匹配。对低碳 X100 级管线钢, 为提高韧性应控制冷裂纹敏感指数在较低水平以保证 DDF 的止裂。

### 5.3 屈服比和塑性变形

X100 级管线钢的屈服比较高, 可能超过 API 要求的 0.93。采用 TMCP 工艺不进行热处理就可生产出高强度钢板材, 尽管高屈服比难以避免, 该生产工艺仍适用高强管线钢板材的大规模生产。在满足经济性和生产适应性的条件下, 生产商应能批量生产出屈服比较低的高强度钢。此外, 对涉及钢管塑性变形的任何工艺(如现场冷弯和现场水压试验超过 100%SMYS), 需确定标准和规程是否需要修订。

### 5.4 DDF 止裂研究及薄壁管的应用

高压输送天然气时采用薄壁大口径 X100 级钢管, 可大大提高输送效率, 减少使用钢材、降低管道建设费用。而大口径薄壁管需具备较高的止裂韧性以防止 DDF 发生, 就目前 X100 级钢管韧性水平而言, 需要对不带止裂器的大口径薄壁管的管径和壁厚上限进行限制, 并通过全尺寸爆破试验确定止裂韧性。此外, 在 X100 管线建设前, 需对止裂装置进行经济性评估。

## 6 结 论

(1) 采用 TMCP 和快冷技术, 在炼钢和轧钢工艺过程中通过 Nb, Mo, B 和 Ni 等合金元素的固溶强化和沉淀强化等作用, 可以得到强度韧性兼备的 X100 级管线钢。

(2) X100 级管线钢的微观机构具有较低温度下的转变产物, 为含有细化 M-A 组元的细小贝氏体—铁素体和下贝氏体。

(3) X100 级钢管具有良好的力学性能, 可满足

0.8 倍 SMYS 水平下高压输送, DDF 止裂问题还有待进一步研究, 严酷服役条件下可以使用止裂器。

(4) X100 级管线钢具有良好的现场焊接性, 适合环缝焊接的焊接工艺规程也已制定出, 采用合适的焊接工艺可获得令人满意的焊接接头。

(5) X100 级管线钢的使用对建造长距离天然气运输管道有着重要的意义, 其应用必将带来良好的经济效益。但就目前而言, X100 级管线钢在实现推广应用之前仍需作大量的工作, 其力学性能、韧性、止裂性能以及焊接性等方面尚需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 郑 磊, 傅俊岩. 高等级管线钢的发展现状[J]. 钢铁, 2006, 41(10): 1—10.
- [2] Graef M K, Hillenbrand H G, Heckmann C J, *et al.* High strength large-diameter pipe for long-distance high-pressure gas pipelines[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2004, 14(1): 69—74.
- [3] Schwinn V, Fluess P, Bauer J. Production and progress work of plates for pipes with strength level of X80 and above[C]//International Conference on the Application and Evaluation of High-grade Line Pipes in Hostile Environments. Yokohama, Japan, 2002.
- [4] 黄开文. X80 和 X100 钢级管线钢的合金化原理和生产要点[J]. 轧钢, 2004, 21(6): 55—58.
- [5] Pontremoli M, Mannucci G. Technological challenges for safe application of X100 and X120 steels[C]//Seminar Forum of X100/X120 Grade High Performance Pipe Steels. Beijing, China: Petroleum Storage & Transportation Committee of Chinese Petroleum Society, 2005: 223—231.
- [6] 李小红, 辛希贤. 高钢级天然气输送管线钢强度特性[J]. 焊管, 2004, 27(3): 85—89.
- [7] Hiroyuki Makino, Izumi Takeuchi. Fracture propagation and arrest of gas transmission pipelines by X100 and X120[C]//Seminar Forum of X100/X120 Grade High Performance Pipe Steels. Beijing, China: Petroleum Storage & Transportation Committee of Chinese Petroleum Society, 2005: 262—288.
- [8] Aristotele R, Divito L F, Barsanti L. Welding X100 steels for gas pipelines[J]. Welding International, 2004, 18(11): 877—882.
- [9] Hudson M, Blackman S, Hammond J, *et al.* Girth welding of X100 pipeline steels[C]//International Pipeline Conference (IPC 02) Calgary, Canada, 2002.

作者简介: 严春妍, 女, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为焊接物理冶金和金属焊接性。发表论文 10 篇。

Email: yanchunyan1982@126.com

solder. ANSYS finite element analysis tool was used to implement the simulation. In the end, the stress and strain distribution were obtained. The strain range was achieved from the hysteresis loop. The fatigue life of PBGA was predicted using Engelmaier model. The simulation result of the model shows that the position of the critical soldered position of a plastic ball grid array component is right below the edge of its die, but not the outboard solders. This result is helpful to improve the thermal fatigue reliability of plastic ball grid array components.

**Key words:** plastic ball grid array; soldered joint; thermal fatigue; finite element method

**Effect of cladding material on LY12CZ aluminium alloy by Laser Cladding** SUN Fujuan, HU Fangyou, HUANG Xuren, TANG Yuanheng (Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China). p93—96

**Abstract:** Through controlling process parameters of impulse laser, current, pulse width, frequency, spot diameter and scanning velocity, laser cladding LY12 and Al-Y was used to repair corrosion damage of aluminum alloys. After cladding, fatigue test, fracture and microstructure of the specimens were studied. The result indicated that the life of the specimen cladded by Al-Y was 402% of that by LY12. There was no large pore and crack in the Al-Y layer which joined with the substrate firmly. There was much impurity in the cladding layer of LY12.

**Key words:** aluminum alloys; laser cladding; fatigue life; fatigue fracture; microstructure

**Comparison of stress relief by PWHT and VSR in large dimension straight welded pipe** ZHANG Chao, LU Qinghua, XU Jijin, CHEN Ligong (School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China). p97—100

**Abstract:** Post-weld heat treatment (PWHT) and vibratory stress relieving (VSR) were used to control the residual stress in large-dimension welded pipes. The results show that both PWHT and VSR are able to relieve the residual stress effectively in large-dimension straight welded pipe and make the distribution of residual stress more uniform. Their effect in weld zone is more obvious than these in base metal. The results of stress relieving of VSR of as-cast microstructure are qualified but not acceptable in cold plastic deformation zone. The effect of PWHT on the stress relieving and stress uniform ability is better than that of VSR. However, considered of economy factor and technique convenience, VSR is confirmed as stress relieving technique to control the residual stress in large-dimension straight welded pipe.

**Key words:** vibratory stress relieving; post-weld heat treatment; residual stress

**Progress in friction stir welding of high melting point materials** LIU Huijie, ZHOU Li (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p101—104

**Abstract:** The research status of friction stir welding (FSW) of high melting point materials was introduced from the aspects of FSW tool design, microstructural characteristics and mechanical

properties of the joints, welding temperature distribution and residual stress and FSW assisted by hybrid heating sources. It indicates that the W-Re alloy and polycrystalline cubic boron nitride are suitable FSW tool materials. The FSW joints with high strength and fine microstructure can be produced when the proper tool geometry and welding parameters were used. For simulation of temperature distribution and residual stress in the FSW joints, physical models should be improved according to the real FSW process. The utilization of hybrid heating source is benefit to weld formation and tool life.

**Key words:** high melting point materials; friction stir welding; tool design; microstructural characteristics; residual stress; hybrid heating source

**Review of X100 pipeline steel and its field weldability** YAN Chunyan<sup>1</sup>, LI Wushen<sup>1</sup>, FENG Lingzhi<sup>1</sup>, XUE Zhenkui<sup>2</sup>, BAI Shiwu<sup>2</sup>, LIU Fangming<sup>2</sup> (1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Petroleum-Gas Pipeline Research Institute of China, Langfang 065000, Hebei, China). p105—108

**Abstract:** In view of the ever-increasing pipeline length and operating pressure, development of high-strength linepipes has become increasingly attractive and needed. The current knowledge of X100 pipeline steel about research and development status, metallurgical principles, mechanical properties, field weldability, and so on were presented. Production of grade X100 steel requires combination of super-clean refining, thermo-mechanical controlled process, proper metallurgical design and some other advanced techniques. Excellent mechanical properties and satisfying weldability are possessed for grade X100 steel. Yield strength of X100 grade steel generally exceeds 690 MPa. High strength-toughness welded joint can be obtained through proper welding procedures. Further work is required to improve the production of X100 pipeline steel and to establish appropriate material standards.

**Key words:** X100 pipeline steel; microstructure; ductile fracture arrest; girth welding; weldability

**General rules of writing scientific and technical papers** WANG Ya (Harbin Welding Institute, China Academy of Machinery Science and Technology, Harbin 150080, China). p109—112

**Abstract:** In order to help scientific and technical workers to know the basic requirements of writing academic papers, master its general methods and improve their rules, common problems in the submitted original manuscripts were analyzed and the methods to resolve these problems were given, based on the features of academic papers and combined with the experiences of the author on editing academic papers for many years. The basic structures of academic papers, requirements on writing and some problems needing in attention were also stated. According to some national and professional standards, standardized uses of professional terms and phases, symbols of physical quantity and measurement units, the requirements on figures and tables and regulations of references literature in papers were briefly explained.

**Key words:** scientific and technical papers; writing; standardization