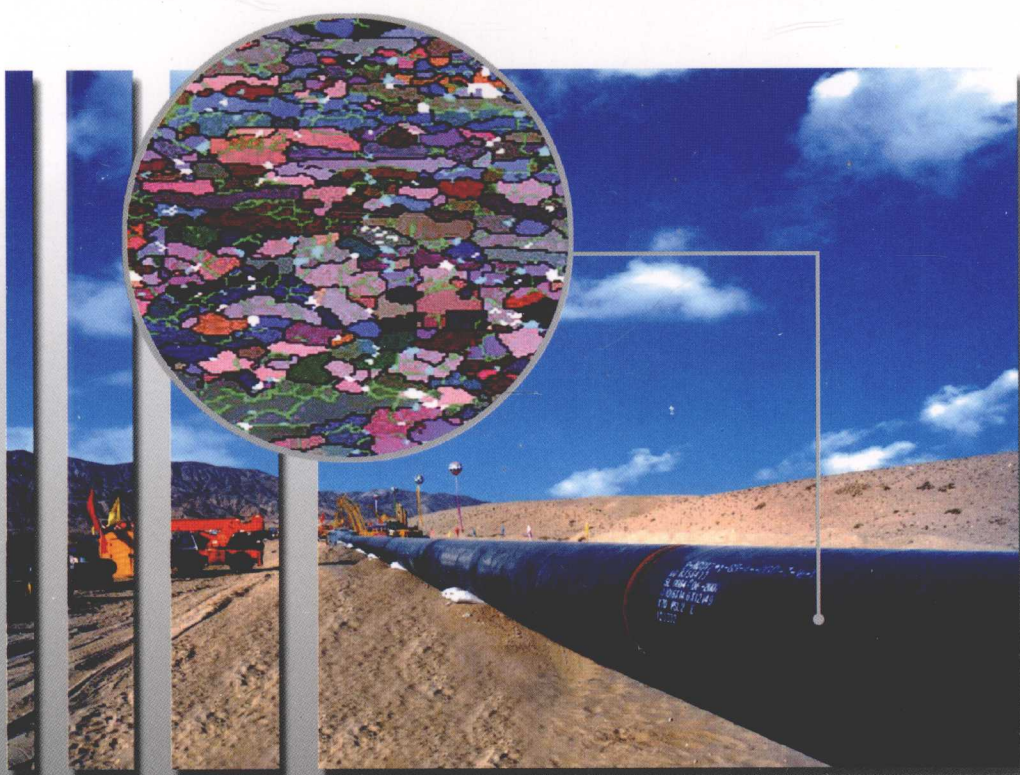


高钢级管线钢组织性能

图谱

• 张小立 著



陕西出版集团
陕西科学技术出版社

高钢级管线钢组织性能图谱

张小立 著

陕 西 出 版 集 团
陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

高钢级管线钢组织性能图谱/张小立著. —西安:陕西科学技术出版社, 2009. 5

ISBN 978 - 7 - 5369 - 4586 - 9

I. 高... II. 张... III. ①钢管 - 金相组织 - 图谱
②钢管 - 性能 - 图谱 IV. TG142.1 - 64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 059371 号

出 版 者 陕西出版集团 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编 710003
电话(029)87211894 传真(029)87218236
<http://www.snstp.com>

发 行 者 陕西出版集团 陕西科学技术出版社
电话(029)87212206 87260001

印 刷 陕西丰源印务有限公司

规 格 787mm × 1092mm 16 开本

印 张 11.75

字 数 250 千字

版 次 2009 年 5 月第 1 版
2009 年 5 月第 1 次印刷

定 价 25.00 元

版权所有 翻印必究

前言

天然气是石化燃料中最清洁的燃料,而且在全球范围内其资源远比石油丰富。有关专家预测,天然气将保持高速发展的势头并且最终将超过石油,在能源消费中占第一位。为缩小天然气价格与可替代能源价格的差价,抑制工业项目用气的过快增长和汽车用气的盲目发展,中国国家发改委决定自2007年11月1日起适当提高化肥以外工业用天然气出厂价格和车用天然气销售价格。“作为极其清洁的能源,中国政府将进一步扶持天然气行业的发展,调整天然气定价机制,与市场接轨逐步提高天然气价格是大势所趋。”

同时按照国家能源发展“十一五”规划,未来天然气占一次性能源消费总量的比例将在5年内提高2.5个百分点,到2010年达到5.3%。国家发改委能源局相关负责人则预测,今后20年国内天然气需求年均增长率将超过15%,到“十一五”末,中国天然气年需求量将在1000亿 m^3 以上,2020年达到2000亿 m^3 以上。随着国际原油价格的走高,天然气销售价格还将逐步提高,以缩小其与可替代能源价格的差价。更有专家预测,未来几年中国天然气价格每年将上调8%左右。

事实表明,世界上业已探明可再生石油储量60%集中在中东地区,其余主要分布在前苏联(独联体国家)、美国、南美、中国等地;天然气已探明储量80%集中在10个国家,其中独联体占40%、中东占30%。专家预测,至2020年世界能源的需求将会增长60%,发展中国家的需求增长121%。石油仍将作为一种主要能源得以发展,而天然气的需求将增长近104%。从区域分布来看,石油需求主要在大西洋、亚太地区,而天然气最大的用户则在独联体(34%),其余大部分在北美、西欧;从地域上来看,用户主要集中在工业发达的城市地区,而油气田则大部分分布在极地、冰原、荒漠、海洋等偏远地带。对那些天然气液化运输方法不可行的荒芜大陆地区,将天然气长距离运输到最终市场的可行方法是管道输送。作为石油和天然气的一种经济、安全、不间断的长距离输送工具,油气输送管线在近40年得到了巨大的发展,这种发展势头在未来的几十年中仍将持续下去。

可以看出,尚未开发的天然气资源多数在边远地区,离消费地甚远。为取得大量的宝贵的天然气,必须修建长距离的输气管道,而发展高钢级的管线钢是降低长距离输气管道建设成本及运输成本的必要条件,这就是高钢级管线钢发展的驱动力。

管线钢是指用于输送石油、天然气等的大口径焊接用热轧卷板或宽厚板。管线钢在使用过程中,除要求具有较高的耐压强度外,还要求具有较高的低温韧性和优良的焊接性能。近几年来,随着管道工程的飞速发展,带动了管线用钢产量的大幅提高。目前国内管线钢需求巨大,2005年管线钢消耗 $160 \times 10^4 \text{t}$,其中热轧板卷 $150 \times 10^4 \text{t}$ 、宽厚板 $10 \times 10^4 \text{t}$,2010年将达到 $350 \times 10^4 \sim 400 \times 10^4 \text{t}$ 。

1965 年以前,我国使用 Q235 热轧钢带(A3 钢)生产螺旋焊接钢管输送原油和天然气。1965 年,在四川发现了天然气,修建川西北威远到成都的输气管线,采用鞍钢提供的 16Mn 高强度热轧钢带。由于当时天然气田脱硫站对天然气的脱水不够,不能够始终保证天然气的含水量在 5×10^{-6} 以下,因此导致所建造的管线多次发生硫化氢应力腐蚀断裂等重大事故。到了 20 世纪 70 年代我国改向日本按照 X52 强度级要求订购管线钢。一直到 20 世纪 90 年代的近 20 年时间跨度内,我国从日本进口了数百万吨管线钢板,用以建造重要的输送油、气管线。

到了 20 世纪 90 年代,我国开始大规模修建西北高压输送原油和天然气管线。修建新疆沙漠管线需要加长泵站距离,管线压力从沿用的 4.5MPa 提高到了 6.5MPa,所以管线钢提高到了 X60。修建陕京输气管线输送压力提高到 8.5MPa,管线钢强度提高到 X65 等。国产的 X52 ~ X65 级管线钢为控轧 C - Mn - Nb - Ti 或 C - Mn - Nb - TiV 系列铁素体 - 珠光体型微合金钢,已成功用于建设新疆沙漠输油管线和陕 - 京输气管线等几条重要的输送管线。

近年来我国石油、天然气工业发展迅速,为满足石油、天然气的输送,管线钢逐年大幅度增长,2003 年我国管线钢产量为 185t,其中高牌号管线钢 X70 产量为 3115×10^4 t。随着石油、天然气的长距离输送,要求生产厚壁、高强度、高韧性、焊接性良好的高牌号管线钢。我国管线钢正向低碳、超洁净、多元微合金元素的成分设计,最大限度地降低 S、P、O、N 和 H 的含量,从而满足用户要求。同时管线钢的设计与生产工艺紧密相关,实现最经济化地生产更高强度和韧性的管线钢是今后管线钢发展的根本方向。X70 管线钢已在我国一些大型钢铁企业批量生产,X80 管线钢也已在我国鞍钢、武钢、宝钢少量生产,并均已通过国家的鉴定,其产品质量完全符合用户和 API 标准要求。X80 管线钢的生产体现了一个钢铁企业的综合技术实力。

采用高输送压力和高钢级管线钢,可以为长距离、大输量天然气管道节省大量钢材,产生巨大的经济效益。图 1 给出了从 X70 到 X120 各钢级的压力适用范围。由图可见,正在应用中的 X70 和 X80 钢管的输气压力适用范围为 8 ~ 15MPa;用于更高压力和富气输送的 X100 的适用压力范围为 15 ~ 22MPa;X120 则适用于十分高的压力和大密度的气体输送,其适用压力范围为 15 ~ 28MPa。德国 Ruhrgas 公司的 Mr. Steiner 介绍说,德国面积较小,管道输气压力达到 8MPa 就算高压,距离达到 250km 已是长距离,在德国这样的管道就应当采用高钢级。

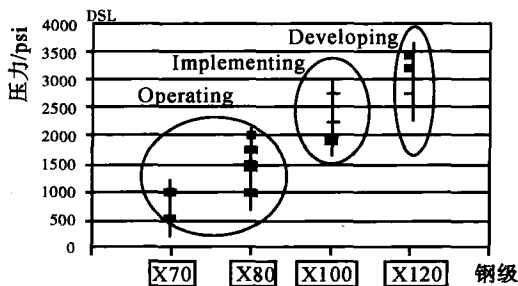


图 1 今后可能采用的钢级及其适用压力范围

经初步估算,与 X70 级相比,X80 级管线钢可以使投资成本降低约 7%,如果使用 X100 取代 X70 级管线钢,将使成本进一步降低。由于高压管线基建费用是很昂贵的,因此使用高强度钢具有很大的吸引力。材料等级的提高会增大单位质量管线钢的制造成本,因此,减小管壁厚度并不是一个理想的选择。一般认为,在保持管壁厚度不变的情况下,减小管子的直径,同时增大管线的输送压力,是解决上述问题的最佳方法。

近年来,通过大口径管道来运输天然气的经济性的关键之处现在越来越明了,那就是提高管道输送压力,提高管道输送压力将大大提高对高级别、高性能钢管的需求。尽管当材料等级提高时,每吨钢管的价格也随之提高,但工程的总成本仍然会降低。工程造价的降低受益于高强度管线钢的使用,具体表现在以下几个方面:①所需钢材量减少;②输送成本降低;③管线敷设成本降低。以鲁尔天然气输送管道采用 X80 级管线钢为例,如果采用 X70 级管线钢,管壁厚度为 20.8mm,而 X80 级钢管的管壁厚度仅为 18.3mm。这样,通过减小管壁厚度,管线节省了 2×10^4 t 钢材,管壁厚度减小,所需的焊接次数减少,同时又降低了焊接所需费用;另一方面,管线输送压力提高,降低了天然气输送成本。由此可以推知,如果采用 X100 或 X120 级管线钢,将会更进一步降低工程造价,材料用量对比如图 2 所示。

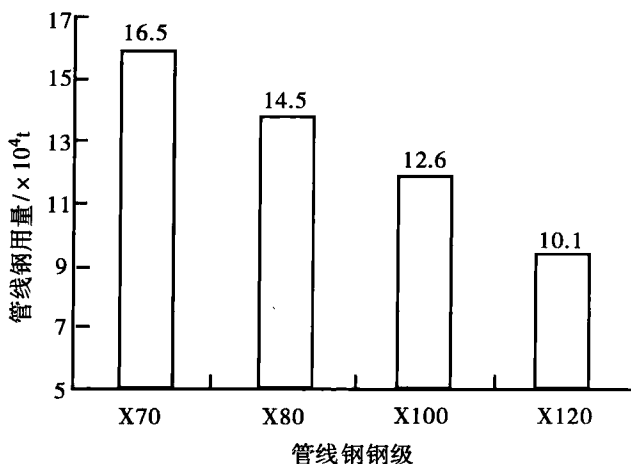


图2 使用不同等级高强度管线钢的材料用量对比

国内对高强度管线钢的研究起步较晚,各个生产厂家呈现出同时进行的状态:

宝钢:近年宝钢管线钢开发生产发展很快,无论是数量还是品种质量,在国内市场都占绝对优势。宝钢经过 10 多年管线钢的开发和生产,已较好地掌握了高强度高韧性管线钢板卷的微合金化成分设计、冶金工艺控制、生产质量保证等关键技术。通过不断地优化、调整,已逐渐形成宝钢 X52、X65、X70 系列管线钢的成分、工艺体系和生产质量控制技术,实现了产品的更新换代。产品满足了国内外市场需求,质量稳定,先后在我国西气东输工程、印度输油管线、土耳其输气管线等一系列国内外重大长输管线工程中得到成功应用。宝钢 5000mm 宽厚板项目从冶炼、精炼、连铸到轧机的设备装备均达到世界先进水平,已于 2005 年建成,其中管线钢产品的钢级为 X80(预留 X100),最大厚度为 40mm,最大宽度为 4500mm。

武钢:武钢是国内第二大管线钢生产企业。近几年,武钢将管线钢作为企业的重点发展品种,其在国内的市场份额提高很快。武钢在管线钢品种质量上也取得了很大的进展。武钢生产的高韧性管线钢已达到德国、日本主要钢厂的同类钢材的实物水平。2004年武钢管线钢的研制开发取得重大突破,顺利实现了17.5mm厚X70高性能管线钢大批量稳定供货。连续承接了苏丹管线、中哈管线、陕京管线、沿江管线、双兰管线、冀宁管线等10余条管线的供货权,全年合同量达70余万吨,居国内首位。随后又积极开展15.3mm和17.5mm高强度、高韧性的X80热轧厚板卷的研试工作,并顺利通过中国石油天然气集团公司鉴定。鉴定委员会专家认为,武钢开发的15.3mm厚X80管线钢热轧卷板可完全满足X80螺旋焊管制管的要求,已具有批量生产稳定性,能按要求实现批量生产与供货。

鞍钢:目前已开发生产出X70、X80高等级管线钢板、卷,并可工业化生产。2006年7月7日,在我国新建“川气出川”大型天然气管道试验段铺设工程中,鞍钢独揽 3.2×10^4 t极限规格X70螺旋焊接用管线钢卷板供货权。“川气出川”天然气管道工程是我国“十一五”重要输气工程,工程铺设管道全长1937km。目前在国内能够生产30.4mm厚X70宽厚板并供货的厂家只有鞍钢一家。2006年7月13日,鞍钢生产的X100管线钢宽厚板及用它卷制的直缝焊钢管顺利通过了国内权威科研机构试验评价。X100管线钢研制开发成功,使鞍钢管线钢钢级形成了X60、X65、X70、X80和X100的系列化,为角逐国内外高端管线钢市场增添了一件“利器”。

南钢:南钢于2005年10月28日在中厚板卷厂成功轧制出厚度8.7mmX60管线钢、9.5mm钢卷,目前X70管线钢也已经开始工业化生产,X80已经开发出来,但生产量不是太多,最大厚度为40mm,最大宽度为3300mm。X100已经被列入科研课题,正在开发。

近年来,我国石油、天然气工业发展迅速,为满足石油、天然气的输送,管线钢的需求逐年大幅度增长。我国的四大天然气气田(陕甘宁、青海柴达木、新疆塔里木、川渝)资源远离消费市场,所以建设高压长距离输送管线是解决长时期、大规模运输天然气的主要措施,今后我国将在国外寻找油气资源,通过海运或管道输送至国内。可以展望,在21世纪管道运输将成为我国主要的运输产业,并且随着“西气东输”工程的实施,将掀开我国在21世纪石油天然气输送业蓬勃发展的序幕。采用高强度管线钢,长距离高压大输量输送富气,可以节约钢材,大幅度减少管线工程的投入,增加管线的运行效益,提前回收投资,必然在将来的油、气运输中发挥重大作用。

同时,“十一五”期间将建设陕京二线、中俄以及中亚或俄罗斯至上海天然气管线,最终与“西气东输”管线形成“两横两纵”的天然气干线,并将修建3万km成品油输送管道。与此同时,从管线钢的品质特性来说,我国也已于20世纪80~90年代初期的铁素体-珠光体微合金管线钢发展到目前的针状铁素体管线钢(见图3),完成了第一代产品到第二代产品的转变。随着X80强度级别管线钢的批量生产以及X100级别管线钢的试制成功,我国已具备了X52、X56、X60、X65、X70、X80、X100等级别管线钢的生产能力,缩短了与德国、日本等先进国家的差距。

从2008年中国液化天然气国际会议上获悉,西气东输二线建设方案基本敲定,工程总投资预计为1434.9亿元(不含关税和增值税),建设1条干线,8条支干线,管线全长8794km。

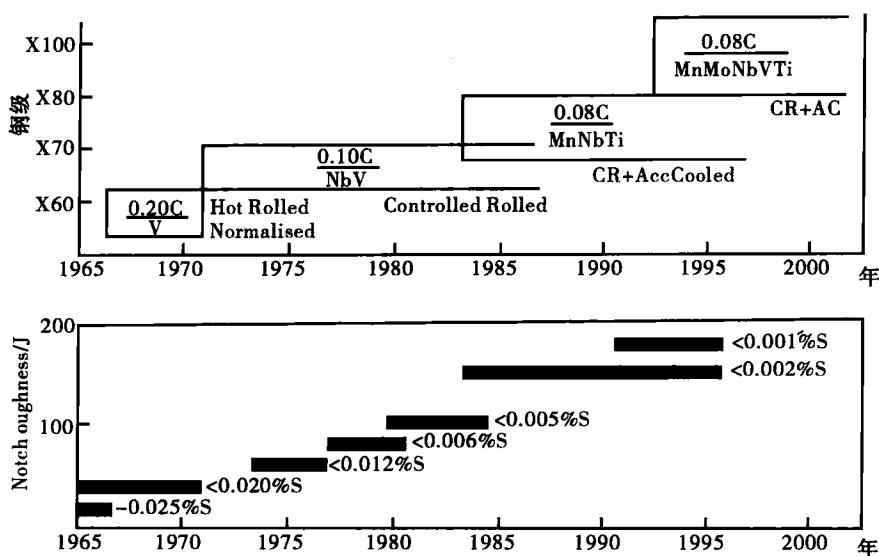


图3 管线钢成分工艺的发展

按照规划,西气东输二线干线管道从新疆霍尔果斯口岸入境之后,经独山子、乌鲁木齐,在红柳与西气东输线路重合,然后向东经酒泉、山丹、武威,在宁夏中卫过黄河后与西气东输一线线路分开,向东南经西安、南昌、赣州,到达广州。干线全长4945km。支干线包括新疆轮南—吐鲁番、宁夏中卫—陕西靖边、河南洛阳—江苏徐州、江西南昌—上海、江西樟树—湖南湘潭、广东翁源—深圳、广东广州—广西南宁、广东肇庆—湛江。支干线总长3849km。按照规划,西气东输二线2010年开始输气,2012年输气量为300亿 m^3 。

为确保西气东输二线的供气安全,有关方面对国内管道沿线的塔里木和长庆气区进行了资源论证和勘探开发规划。通过论证,塔里木和长庆气区具备增储上产的资源基础,2015年除了保证向陕京线供气,每年还可向西气东输二线提供100多亿 m^3 的应急保安气量。

今后15年我国将迎来以天然气管道建设为主的更大的油气管道建设高峰,中石油集团2006~2020年需要油气长输干线用管1000万t,考虑支线及管网用管,年均用管160万t,其中直缝埋弧焊管占30%左右,年均需要 $40 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4 \text{t}$;中石化集团已开始建设长达3000km的川鲁输气管道;三大石油集团均计划在东部沿海地区建设液化天然气管道;中海油的广东和福建LNG管道已开工建设。“十一五”期间新建和规划的西气东输复线及洲际输气管道要求输气量大(年输气量提高到300亿 m^3 /年以上)、工作压力高(14MPa),需采用更高钢级(X80)、更大管径和壁厚的优质钢管。在“十一五”期间,X100高级别管线钢的应用与开发,是我国钢铁工业和制管工业面临的重要课题。

随着经济的强劲增长,我国对石油天然气等能源的需求也相应增加,其中大部分油气需从国外进口,尤其是从中亚国家和俄罗斯进口。这意味着从中亚和西西伯利亚到中国东北部将建设一个巨大的长距离管线输送的网络。鉴于此,长距离输送则要求更高钢级的高强度管线钢管,同时还要求有高韧性,特别是必须有很高的CVN。因此,近年来开发更高强度管线钢的经济驱动力不断增加,曾在国际标准中处于最高钢级的X70已被X80所取代,X100和X120国际标准的草稿业已推出。这一新版标准的问世不但伴随着

对其性能水平定义方法的完全改变,而且要求参与人员要熟悉这些产品的实际表现,并掌握其内在特征的最新和最可靠的知识。

目前,世界工业发达国家在高钢级的高性能管线钢管的研发和应用上走在了前列:如加拿大的 Welland 于 1995 年至 1999 年 7 月销售的供天然气输送的 SSAW 和 UOE 焊管, X70 与 X80 之和达 100%; Ipsco 公司在 1998 年年报中披露已成功进行了 X90 和 X100SSAW 钢管试生产,最终目标是生产各种规格的 X100 钢管;日本的 NKK、住友金属、新日铁、川崎等公司及欧洲钢管公司也相继研制成功 X90 和 X100UOE 钢管,ExxonMobil、Europe Pipe、Nippon Steel 和 Sumitomo Metal 正在研制 X120 钢管。针对国内情况,长距离、高压、大流量输气管道,近年来通过西气东输工程、陕京二线工程和冀宁输气管道工程的建设,在高压输送技术方面已经取得了很大的进步。但是必须看到与国际先进水平之间仍然存在着很大的差距,表 1 给出了国内外大型输气管道高压输送技术的差距比较。

表 1 国内外大型输气管道高压输送技术的差距比较

	最大输 气压力 /MPa	最大输 量/($\times$ 10^8 m ³ / a)	已建成管 道最高钢 级 API 5L	试制成 功最高 钢级 API 5L	1 级地 区设计 系数 (许用 应力 法)	管道在 地质灾 害地区 的设计 方法	适应大 变形的 专用钢 材	大功率 轻型燃 气轮机 压缩机 组	高压大 口径球 阀
中国	10	120	X70	X80	0.72	尚不掌握	无	不能生产	试制成功
国外	12 ~ 15, 18 (即将 实施)	137, 465 (即将 实施)	X80, X100, X120 (试验段)	X100, X120	0.80	基于应 变的极 限状态 法	有	批量生产	批量生产

已竣工的西气东输一线工程中,采用的是 X70 钢级。目前建设的西气东输二线工程中采用的是 X80 钢级。未来在中国铺设的天然气管线,必然要采用更高的钢级,基于 X120 钢级在技术准备仍然不够成熟,那么其选择也必然在 X80 ~ X100 之间。中国在西气东输一线工程中所采用的 X70 并非是西方传统意义上的 X70,其无论在显微组织上还是在性能指标上都接近于西方国家的 X80,因此在未来天然气管线上采用 X80,对中国钢铁生产、管道生产和施工等企业来说困难不是很大,技术风险亦较小。其问题是 X80 和现有的 X70 区别不大,成本降低幅度有限,采用 X100 则会显著降低管线的建设和运行成本。

但综合目前国内的 X65 ~ X80 管线钢, X65 及 X70 性能稳定,处于成熟的技术产品,但 X80 ~ X100 管线钢还存在一些质量不稳定,韧性和强度指标矛盾明显,各厂家的管线钢组织性能并不完全一致等问题。总而言之,最突出的问题还是韧性 - 强度的协调性,各厂家产品组织差异较突出等。

本书在分析国产和国外数家高钢级管线钢力学性能数据和各种组织图谱分析的基础上,探讨并总结了管线钢组织演变、组织性能的关系、影响韧性和强度的关键因素、有效晶粒和韧性指标、断裂机理、弯管及二次加热、力学性能分布均匀性等。希望为我国管线钢事业的蓬勃发展奉献绵薄之力,为国内各管线钢生产厂家提供借鉴和指导。

目 录

第一章 概述	(1)
1.1 高钢级管线钢的发展现状	(1)
1.2 高钢级管线钢的合金化原理	(15)
1.3 高钢级管线钢的化学成分和组织设计	(19)
1.4 高钢级管线钢的强度特征	(25)
1.5 组织和性能关系研究的必要性	(28)
1.6 高钢级管线钢组织性能研究的现状	(31)
第二章 高钢级管线钢组织的变化规律	(36)
2.1 管线钢的组织控制	(36)
2.2 珠光体-铁素体型管线钢	(37)
2.3 针状铁素体型管线钢	(39)
2.4 粒状贝氏体铁素体型管线钢	(42)
2.5 下贝氏体型管线钢	(44)
2.6 结论	(45)
第三章 高钢级管线钢透射组织分析	(46)
3.1 X70 管线钢中的透射组织分析	(46)
3.2 X80 管线钢透射组织形貌	(47)
3.3 X100 管线钢的透射组织形貌	(53)
3.4 结论	(56)
第四章 高钢级管线钢强韧性规律及其与组织的关系	(57)
4.1 高钢级管线钢强度变化规律	(57)
4.2 强度和金相及扫描组织	(61)
4.3 高钢级管线钢韧性变化规律	(64)
4.4 组织与强韧性的关系	(67)
4.5 结论	(74)
第五章 高钢级管线钢晶粒度和有效晶粒度的变化规律	(75)
5.1 前言	(75)

5.2	提高钢铁强韧性的机理分析	(75)
5.3	高钢级管线钢晶粒度的变化规律	(77)
5.4	高钢级管线钢有效晶粒的变化规律	(78)
5.5	结论	(80)
第六章	高钢级管线钢有效晶粒与韧性指标的关系	(81)
6.1	前言	(81)
6.2	不同钢级管线钢中的晶界取向差	(81)
6.3	系列管线钢晶界取向差分布规律	(84)
6.4	不同钢级管线钢中的相分布	(87)
6.5	有效晶粒与夏比冲击功	(88)
6.6	结论	(90)
第七章	有效晶粒随热处理制度的变化规律探讨	(91)
7.1	不同热处理制度下的有效晶粒及其与韧性指标的对应关系	(91)
7.2	结论	(93)
第八章	高钢级管线钢断裂机理及拉伸速率与断裂方式研究	(94)
8.1	高钢级管线钢断裂机理	(94)
8.2	焊接热影响区断裂机理	(96)
8.3	拉伸速率对断裂方式的影响	(98)
8.4	结论	(99)
第九章	管线钢力学性能均匀性的探讨	(100)
9.1	前言	(100)
9.2	管线钢不同位置的力学性能	(101)
9.3	结论	(103)
第十章	热影响区的局部脆化现象与组织的关系	(104)
10.1	试验材料和方法	(104)
10.2	冲击韧性和金相组织	(104)
10.3	宏观断口形貌和微裂纹特征	(105)
10.4	冲击断口微观特征	(106)
10.5	结论	(108)
第十一章	高钢级管线钢二次加热后韧性指标协调性及其与组织关系探讨	(109)
11.1	前言	(109)
11.2	二次加热管材夏比冲击韧性与剪切率的关系	(110)
11.3	母管冲击韧性与剪切率的关系	(111)

11.4	二次加热后管线钢的断口观察和分析	(111)
11.5	二次加热后材料的组织变化	(112)
11.6	结论	(113)
第十二章	X70 级弯管组织与强韧性随热处理制度变化关系	(114)
12.1	前言	(114)
12.2	试验材料和过程	(115)
12.3	二次加热后材料力学性能与热处理制度的关系	(115)
12.4	二次加热组织变化影响规律初探	(119)
12.5	结论	(123)
第十三章	X80 级弯管热处理制度和组织性能相关性	(124)
13.1	试验材料和方法	(125)
13.2	不同管线钢母材二次加热后强度指标的变化规律	(125)
13.3	不同管线钢母材二次加热后韧性指标的变化规律	(129)
13.4	二次加热组织变化影响规律初探	(130)
13.5	结论	(133)
第十四章	X80 管线钢韧性指标的研究及其组织优化	(134)
14.1	试验材料和方法	(134)
14.2	X80 管线钢的韧性指标及其关系	(135)
14.3	X80 管线钢的组织优化研究	(137)
14.4	结论	(139)
第十五章	管线钢设计系数提高到 0.8 的可行性分析	(140)
15.1	前言	(140)
15.2	标准及规范回顾	(141)
15.3	设计系数为 0.72 和 0.8 的背景材料	(143)
15.4	高应力管线的安全纪录	(143)
15.5	高应力管线最近开展的工作	(144)
15.6	大口径高压管线的可靠性分析	(146)
15.7	在 80% SMYS 下运行的其他工程和技术考虑	(149)
15.8	80% SMYS 运行的结论和理由	(150)
15.9	0.8 设计系数的实现	(151)
第十六章	X120 的组织设计及使用调研与展望	(153)
16.1	目标性能及发展计划	(153)
16.2	板材的开发	(154)

16.3	管子制备工艺的发展	(159)
16.4	钢管性能	(160)
16.5	大规模生产技术	(163)
16.6	钢管特能	(166)
16.7	结论	(169)
第十七章	总结	(170)
参考文献		(172)
致谢		(174)

第一章 概述

1.1 高钢级管线钢的发展现状

管道输送是将石油天然气从遥远的开采地向最终用户端长距离输送的重要方式。随着世界经济的飞速发展,对石油、天然气的需求日益增加,预计在未来 10~15 年内,石油天然气的需求量将增加 1 倍。作为石油、天然气的一种经济、安全、不间断的长距离输送工具,油气输送管道在近 40 年取得了巨大的发展。目前,全世界石油、天然气管道的总长度已超过 $2.3 \times 10^6 \text{ km}$,并以每年 $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4 \text{ km}$ 的速度增加。在近 10 年,我国已建成陕京管线、涩宁兰管线、兰成渝管线以及西气东输管线等十几条重大长输管线,预计今后 10~15 年内,我国共需各类油气输送干线用钢管约 $1000 \times 10^4 \text{ t}$ 。

为节省管线工程的建设投资,降低运输费用,采用高强度等级的管线钢更加经济 and 合理,并对管道用钢管可靠性的要求越来越高,要求具有高强度、高的低温止裂韧性以及良好的焊接性,对特殊地区的管线钢还要求具有抗 H_2S 腐蚀及抗大应变的能力。近代冶金工业的技术进步,微合金成分设计、纯净钢冶炼技术和 TMCP 轧制技术的发展使生产制造长输管线用的高性能管线钢成为可能。20 世纪 70 年代初期 X65 管线钢开始投入使用,80 年代 X70 钢逐渐被引入工程建设。1985 年 API 标准中增加了 X80 钢级,随后 X80 开始部分在一些管线工程中使用。为进一步降低未来高压输气管线的建设成本,日本、德国的管线钢制造商与一些石油公司合作进行更高强度等级的 X100 和 X120^[1] 管线钢的开发试制。

近年来随着油气田的开采向边远的荒漠、极地冻土带和海洋等区域发展,开发了具有抗大应变性能的 X65~X100 的高强度管线钢。目前正在建设的从挪威到英国的 Langede 海底管线已采用口径为 1016mm,最大壁厚达 34mm 的 X70 焊管。降低碳含量可减少钢的偏析、提高管线钢的韧性和焊接性,同时将钢中铌的质量分数提高到 0.110%,可显著提高形变奥氏体的再结晶温度,可在相对高的轧制温度下生产高强度管线钢,形成管线钢的 HTP(高温轧制)技术,这种成分体系的高强度管线钢正越来越受到重视。最近建成的美国第一条 X80 管线钢工程使用了这种成分体系的 X80 管线钢。此外,管线钢的抗腐蚀性能逐渐受到重视。

近年来国际高等级管线钢的发展特征可概括为以下几点:

(1) 为降低长距离天然气管线的建设成本,开发了 X100 和 X120 超高强度管线钢,并已进行了 X100 和 X120 管线试验段建设,取得了显著的进展。

(2) 满足“基于应变设计”的抗大应变高强度管线钢以双相显微组织为特征,强度等级从 X65 至 X100,可应用于冻土带、地震区和水土流失区域的管线建设。

(3) 海底管线用钢和抗 HIC 管线管的强度等级已从以往的 X65 提高到 X70, X70 管

线管的最大壁厚可达 34.1mm,并已批量在工程中应用。

(4)新型的 HTP 高强度管线钢采用超低碳高铌含铬的成分设计,具有十分优良的性能,用铬替代钼可显著地降低成本,生产的 X80 管线管已应用于美国第一条 X80 管线。

随着我国冶金技术的进步,经过 10 多年的开发和生产,管线钢的产量逐年上升,并逐渐形成包括高止裂针状铁素体的 X70 和 X80、抗 HIC 的 X65、高强度高韧性(铁素体 + 珠光体组织)的 X60 和 X65 等不同等级的微合金化管线钢成分设计、冶炼和 TMCP 技术和生产质量控制技术。产品先后应用于我国西气东输工程、X80 管线钢应用工程、忠武输气管线工程、番禺—惠州海底输气管线工程以及海外的印度输油管线、土耳其输气管线等一系列国内外重大长距离油气输送管线工程。

随着我国能源结构调整和环保需求,对天然气的需求不断增加,管线建设目前正以平均 7% 的增长速度增加,预计到 2020 年中国还将新建 50000km 的天然气管线。同时,加大海上石油天然气的开采,并不断向深海发展。因此,应该借鉴世界上高等级管线钢已有的经验,进行超高强度管线钢、抗大应变管线钢、深海管线用钢、高等级厚壁抗 HIC 管线钢和新型 HTP 管线钢的开发,以满足未来国内外天然气管线建设的需要。

1.1.1 管线钢的发展历史

我们的祖先在公元前 600 年即开始用竹筒输送天然气。后来,英国人用木管和铅管输送天然气,其安全性极差。输送油、气的大口径钢管是 20 世纪初首先在美国发展起来的。1926 年,美国石油学会发布的 API 5L 标准只包括 3 个碳素钢级。1947 年发布的 API 5LX 增加了 X42、X46、X52 3 个钢级。1964 年的 API 5LS 将螺旋焊管标准化。1967 ~ 1970 年期间 API 5LX 和 5LS 增加了 X56、X60、X65 3 个钢级,1973 年增加了 X70 钢级。1987 年 6 月,API 5LX 和 5LS 合并于第 36 版 SPEC5L 中。第 36 版到现在的第 43 版包括 A25、A、B、X42、X46、X52、X56、X60、X65、X70、X80 共 11 个钢级。X100 已开发成功,但尚未列入 API 标准。目前,全世界油气输送管的用量中,X65 和 X70 钢之和占 85% 以上。

油气输送管的几个里程碑:1806 年英国伦敦安装了第一条铅制管;1843 年铸铁管开始用于天然气管道;1925 年美国建成第一条焊接钢管天然气管道;1967 年第一条高压、高钢级(X65)跨国天然气管道(伊朗至阿塞拜疆)建成;1970 年在北美开始将 X70 管线钢用于天然气管道;1994 年德国开始在天然气管道上使用 X80 钢级;1995 年加拿大开始使用 X80 钢级;2000 年开始开发玻璃纤维—钢复合管用于高压天然气管道;2002 年 TCPL 在加拿大建成了一条管径 1219mm、壁厚 14.3mm、X100 钢级的 1km 试验段,同年,新版的 CSZ245-1-2002 中首次将 Grade690(X100)列入加拿大国家标准;2004 年 2 月,Exxon-Mobil 石油公司采用与日本新日铁合作研制的 X120 钢级焊管在加拿大建成一条管径 914mm、壁厚 16mm、1.6km 长的试验段。油气输送管道输送压力和钢级随年代的发展变化如图 1-1 和图 1-2 所示。

管线钢是近 30 年来在低合金高强度钢基础上发展起来的。为了全面满足油气输送管线对钢的要求,在成分设计和冶炼、加工成型工艺上采取了许多措施,从而自成体系。管线钢已成为低合金高强度钢和微合金钢领域最富有活力、最具研究成果的一个重要分支。在成分设计上,大体上都是低碳(超低碳)Mn-Nb-Ti 系或 Mn-Nb-V(Ti)系,有

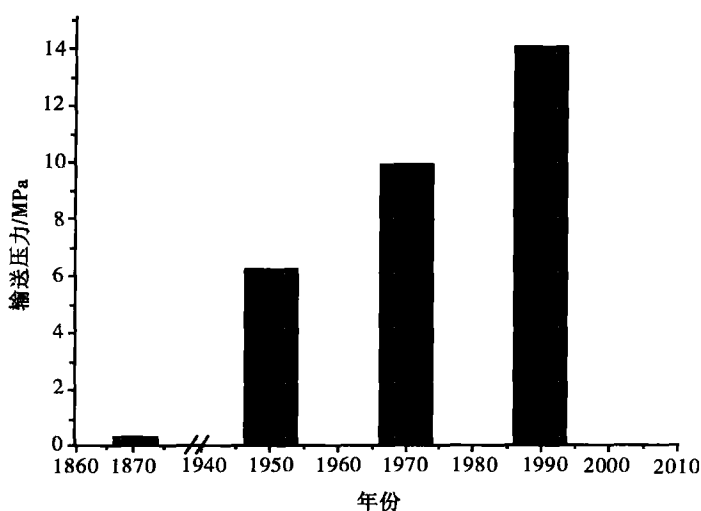


图 1-1 输送压力随年代的发展变化

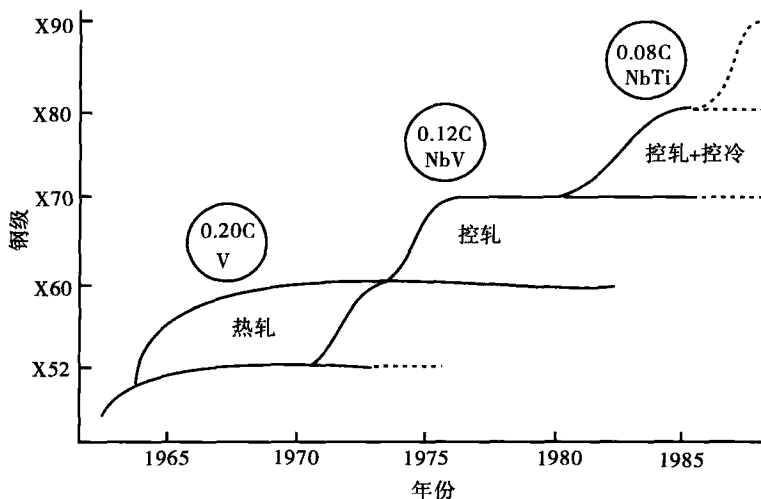


图 1-2 管道钢技术的发展过程

的还加入 Mo、Ni、Cu 等元素。

目前天然气高压输送的压力已达 10 ~ 15 MPa。实践证明,高钢级钢管的使用是降低管道建设投资的重要途径。加拿大 NOVA 公司在使用高钢级管道钢管方面处于领先地位,这主要是因为该公司从高钢级管道钢管的使用上获得了明显的经济效益。早在 20 世纪 70 年代,该公司就使用 X70 钢级管道钢管,在成功使用 X70 钢级钢管的基础上,于 90 年代开始使用 X80 钢级钢管。

在过去的 40 多年里,管道钢管经历了从 X52 到 X80 的开发、研制和使用过程,其中 X80 管道钢管的开发和应用经历了更长的时间(见图 1-3)。1985 年,MRW 开始生产 X80 钢管,该钢管用于长各为 3.2km 和 1.6km 的管道试验段上,管径分别为 1117.6mm 和 1422.4mm。1985 年,X80 钢管开始在欧洲和北美的部分管道上投入使用。

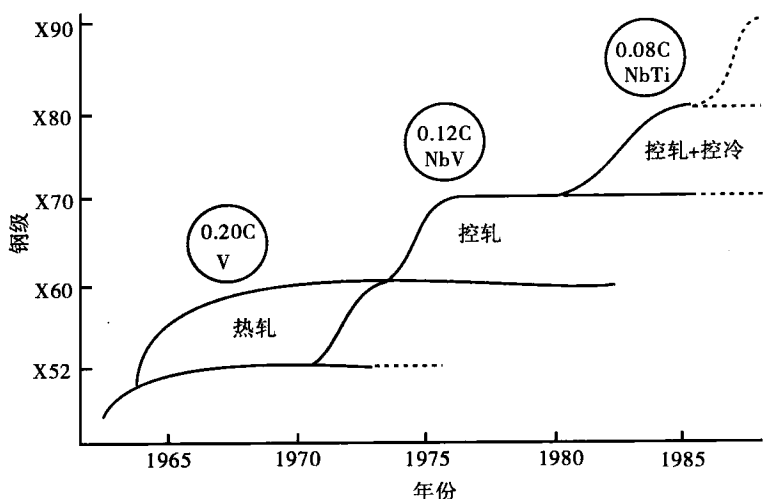


图 1-3 管线钢钢级随年代的发展变化

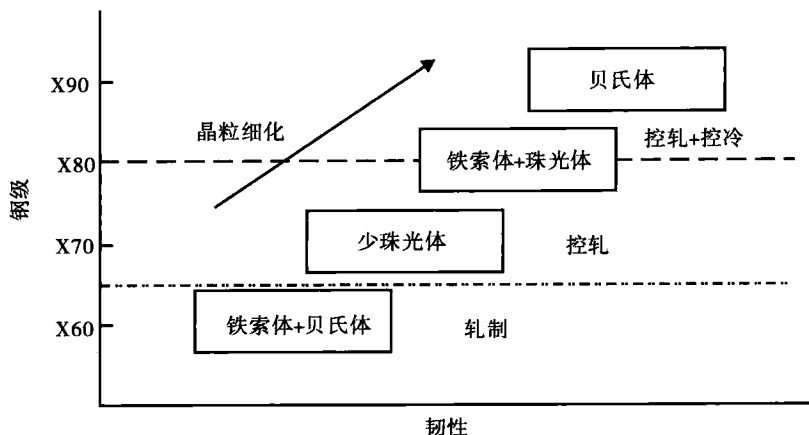


图 1-4 各种控制技术下管道钢的韧性与强度

X100 级管线钢在 20 世纪 80 年代中期已完成了试验,但那时尚无实际应用的需求。但是到 1995 年,几家石油和天然气公司开始设计 X100 级的材料。有关 X100 最早的研究报告发表于 1988 年,通过大量工作已形成很好的技术体系。欧洲钢管自 1995 年开始进行 X100 的开发试制,采用 TMCP 工艺。到 2002 年已生产了数百吨壁厚在 12.7 ~ 25.4mm 的 X100 管线钢。

2002 年 9 月,Transcanada 用 JFE/NKK 提供的口径 1219mm、壁厚 14.3mm 的 X100 钢管在加拿大 WESTPATH 项目中铺设了 1km 长的试验段,进行了世界上首次 X100 的应用试验。通过现场焊接试验,认为只要采取适当的措施,X100 现场焊接的焊缝强度和韧性可以获得满意结果。这对推广应用 X100 管线钢具有指导意义。

1993 年埃克森美孚公司开始 X120 超高强度管线钢的研发工作,并于 1996 年分别与日本新日铁和住友金属签订了 X120 管线钢的联合开发协议。

2004 年 2 月在加拿大阿尔波特北部用新日铁生产的外径 914mm、壁厚 16mm 的