

Academic

Report Conference
of Pipeline Steel

论文集

2003 国际管线钢

学
术
报
告
会

中国国际石油天然气管道
建设与技术、装备展览会
China International Petroleum
Pipeline Construction and
Technical Equipment Exhibition

序 言

现在我国钢材年需用量已经突破二亿吨,成了世界上消耗和进口钢材最多的国家。从1996年以来我国的钢产量已经连续七年保持着世界首位纪录。这一切使我国成了名符其实的钢铁大国。但是,我国工程技术界对钢材产品发展的认识 and 关注却与上述现状极不相称。不但令人尴尬,也容易导致在将来的重大工程方面发生技术决策失误,蒙受经济损失。

今春同廊坊康盛工程集团公司肖冶教授谈论应该经常将国际一流有创见和实用价值的管道钢论文的作者专家邀请到廊坊来,经常给大家讲一讲国际在这方面科技发展的前沿情况。后来,肖教授说,这个建议已经得到有关方面支持,希望我能物色和推荐几篇当代国际一流专业报告,邀请其作者来廊坊,在管道工程和装备展览会期间举办的管线钢国际论坛会讲学。

这种想法和邀请得到日本住友金属钢管公司副总裁兼技术总监竹内泉博士,韩国浦项钢铁公司技术研究院副院长周雄龙博士,新日铁千叶 Kimitsu 研究所钢管研究开发部主任研究员 Yoshio Terada 博士,日本 JFE 集团公司焊接钢管部副总经理 Moriyasu Nagae 先生等专家的热心支持,都慷慨地应邀专程前来讲学,并在百忙中为这个论坛撰写了高水平学术报告。

住友竹内泉副总裁的报告高屋建瓴针对当前管道工程界和钢管制造业最关心的提高管线焊管的强度级别问题做了详细,全面权威性论述,浦项周雄龙副院长和板材发展部长 Ki Bong Kang 博士针对针状铁素体管线钢的控轧和在线快冷技术及它们对管线钢服役性能的影响做了详尽报告,新日铁 Yoshio Terada 博士发表了如何提高高强度管线钢的多次加热焊接热影响区韧性和实现低屈服比和高均匀拉伸延伸率性能的研究报告和用于生产铺设穿越地震带和冻土区的高变形性能 UOE 钢管方面的进展,日本 JFE Moriyasu Nagae 先生发表了控轧和在线快冷技术用于生产在酸性天然气环境工作的高强度和大厚度钢板方面的最新进展。这四篇报告全面地叙述了当代高压输气管线工程用焊接钢管的发展前沿动态。其研究成果对厚度达到 50 毫米酸性天然气高压容器钢板和焊接结构优质钢板也有意义。所以,这是一本国际先进水平的管线钢文集。

我国管道工程界技术权威潘家华教授的报告讲了我国管线工程界目前对采用焊接钢管的观点。我国宝山钢铁公司管线钢首席研究员郑磊报告了我国在高压输气管线用钢方面的进展。所以,这也是一本反映我国管道工程界在管线钢管方面开始迈进国际先进水平门槛纪录。

感谢上述诸位作者的辛勤工作。

最后,感谢中国石油天然气总公司管道局和康盛工程集团公司对这次论坛的支持。

中国科学院金属研究所

王仪康

2003 年 8 月

管线钢学术交流报告会会议时间安排表

时 间 安 排 表

会议地点：中国廊坊国际会议展览中心 301 会议室

会议时间：8：30—17：00 8.7 2003

时间	报告人	职位、职称	题目
8：30-9：00	开幕式、领导、嘉宾讲话		
9：00-10：00	潘家华	教授级高级工程师	中国管材及制管工业的发展趋势
10：00-11：00	竹内泉博士	日本住友金属钢管公司 副总裁、技监	高强度管线钢在输气 管线工程应用展望 (X 70、X 80)
11：00-12：00	郑磊 (教授级高级工 程师)	宝山钢铁股份有限公司 技术中心 首席研究员	针状铁素体 X70 高强 度高韧性管线钢板卷 的组织 and 性能
12：00-13：30	午 餐		
13：30-15：00	周雄龙博士	韩国浦项钢铁公司技术 研究所所长	针状铁素体 X70 管线 钢的优点和在恶劣环 境输送石油、天然气 工业的发展
15：00-：15：15	休 息		
15：15-16：00	Yoshio terada	日 本 新 日 铁 公 司 (NIPPON STEEL CO.)	高强度、焊接热影响 区高韧性和高变形性 能焊接钢管的新发展
16：15-17：00	Mr. Moriyasu Nagae	JFE 钢铁公司	在酸性环境中应用的 高强度管线焊接钢 管的新进展
18：00-19：30	晚 宴		

Foreword

The total consumption of steel has upraised as high as 220 million tones per year which led our country became of the top consumer and importer of steel products in the world. China has kept the record of world's No.1 steel producer for seven consecutive years and been worthy to be a big steel country in the world. Yet from the point view of the frontier progress on the steel product, our Chinese's knowledge and achievement can hardly match with the above reality. Our ignorance not only let us be embarrassed but fallibly make wrong decision to incur suffering on our major projects for coming.

I have talked over with professor Xiao Ye on this idea why we don't invite the inspired and practical presentations overseas coming to let our people contact these frontier knowledges frequently. Months ago, professor Xiao called me that the Authorities of Pipeline bureau hope me to select and recommend the presentations overseas for the international forum of line pipe steel during the exhibition of pipeline construction and technical equipment in Langfang.

Our invitation got generous supports from Dr. Takeuchi Izum Deputy president of pipe company Sumitomo Metal, Dr. Wung Yong Choo Deputy General Super intendant of Tech. Res. Labs POSCO, Dr. Yoshio Terada Chief Research Metallurgist of Pipe & Tube Group of Kimitsu R&D lab. Nippon Steel Corporation and Mr. Moriyasu Nagae, Deputy General Manager Technical Service for Welded Pipe Welded Pipe Sec. JFE Steel Corporation.

They come here to make presentations concerning significance and problem of increasing the strength of pipe steel in coming projects, the research and practical experience of acicular ferrite pipe steels, the research and developing high performance UOE pipe with high strength, excellent HAZ toughness, low Y/T ratio and deformability for the pipeline across seismic or permafrost regions and the newest progress and experience on the high strength pipe and thick plate working in sour environment. Their presentations made this proceeding to be quite a symposium of up-to date line pipe steel.

The presentation by Professor Pan Jia-hua, one of the technical authorities in pipe line field in China, expressed the present consideration on line pipe in China. The presentation by Mr. Zheng Lei, top researcher on pipe steel of Baoshan Steel, described the recent progress on the advanced line pipe steel for gas transmission trunk line in China. Which indicated China begin entering the threshold of advanced pipe steel field.

Greatly thanks towards the above listed authors for their hard working.

Gratefully acknowledge Bureau of Pipe Line CNPC and Kanssen Croup Company for their support

Yikang Wang

Institute of Metal Research Chinese Academy of Science

August 2003

Schedule Of The International Forum

TIME: 8:30 am—17:00 pm 7 Aug. 2003

ADD: ROOM 301 Langfang International Exhibition Center

Time	Speaker	Affiliation	Title
8:30-9:00	Opening ceremony		
9:00-10:00	Pan Jiahua	Bureau of Pipeline CNPC China	Pipeline Industry in China
10:00-11:00	Takeuchi Izume	Sumitomo Metal Japan	Prospects for high-strength line pipes for gas transmission pipelines
11:00-12:00	Zheng Lei	Technical Center Baoshan Steel Shanghai China	Research and development of X70 pipeline steel with acicular ferrite used in West-east Pipeline Project
12:00-13:00	Lunch		
13:30-15:00	Wung Yong Choo Ki Bong Kang Hyung Seok Cho	Technical Research Laboratory Posco Steel Korea	Merits of X70 grade linepipe steels with an acicular microstructure and new development for the severe transportation environment in the oil and gas industry. X70
15:15-16:00	Yoshio terada	NIPPON STEEL CO. Japan	High strength linepipes with excellent HAZ toughness and deformability
16:15-17:00	Mr. Moriyasu Nagae	JFE STEEL CORPORATION Japan	Recent Development in High Strength Linepipe for Sour Environment
18:00-19:30	Dinner		

目 录

1. 中国管材及制管工业的发展趋势-----潘家华
2. 高强度管线钢在输气管线工程应用展望-----竹内泉
3. 针状铁素体 X70 管线钢的优点和在
恶劣环境输送石油、天然气工业的发展-----周雄龙
4. 高强度、焊接热影响区高韧性和
高变形性能焊接钢管的新发展-----Yoshio terada
5. 针状铁素体 X70 高强度高韧性管线钢
板卷的组织 and 性能-----郑 磊
6. 我国高压输送天然气管线钢管的发展
-----王仪康 杨柯 单以银 钱百年

CONTENTS

1. Pipeline Industry in China----- Pan Jiahua
2. Prospects for high-strength line pipes
for gas transmission pipelines----- Takeuchi Izume
3. Merits of X70 grade linepipe steels with
an acicular microstructure and new development for the severe
transportation environment in the oil and gas industry.X70
----- Wung Yong Choo
4. High strength linepipes with excellent HAZ toughness
and deformability----- Yoshio terada
5. Recent Development in High Strength Linepipe
for Sour Environment----- Mr. Moriyasu Nagae
6. The High Strength Line Pipe in China-----Yikang Wang,
Yang Ke, Yiyin Shan, Mingchun Zhao, Bainian Qain

我国管材及制管工业的发展趋势

潘家华

我国管材及制管工业正处于快速发展的大好时期,是朝阳工业。在当前的大好形势下,我们必须以市场为导向,既看到近期的需求,更要看到远期,避免盲目性,把资金、技术力量用在“刀刃上”,决不能一哄而上。

我国的管道工业在近十年必定处于快速发展的时期,这是由以下三个因素决定的:

1、我国国民经济将会继续保持快速发展的势头,这是国内、外绝大多数经济专家所预测的;

2、在经济快速发展的进程中,就像所有的发达国家一样,我国必定会经历一场能源结构的改变,即以煤为主逐步转向以石油、天然气为主,而后者均是由管道运输的;

3、成品油运输方式的转变。我国早期成品油几乎全部用火车运输,除军用的“格拉”管线外,成品油管线几乎为零。从安全考虑及经济效益的趋势,相信未来十年管道输送将全部代替火车运送成品油。经济发达国家在七十年代已逐步取消火车运送成品油,在这些国家的油管道中,就长度而言,成品油管道远远超过原油管道。

在管道的建设投资中,钢管大致可占到30—40%左右,由此看出在管材和制管行业的投资有可能获得较高的效益。但由另一方面看,由于人们愈来愈深的对HSE的关切,所以对管材和制管的质量要求愈来愈高,亦即对管道用钢管的可靠性要求越来越高。再者由于在一定范围的提高输送压力可节省投资、降低运输费用,所以输送压力,尤其对输气管线有逐渐提高的趋势,从而对管材的强度、冲击韧性等一系列指标的要求有所提高。此外由于油气田逐渐向高寒地区、海上以及高含硫等资源进展,这些也给管道钢管及管材提出了更高要求。

由此看出,管材和制管行业机遇与挑战并存。我国冶金及制管业为我国管道工业的发展已做出了很大的贡献,但要充分满足未来的要求还需付出更大的努力,本文仅就此做进一步阐述。

在我国未来管道工业的发展中,预计天然气管道所用的钢管重量约占油、气管道总钢管用量的70%以上,故在以下的论述中重点偏重在输气管线上。

一、关于钢级

管道介质的输送压力有逐渐增高的趋势,在输气管线上尤为明显。这是因为在一定范围内提高输送压力会增加经济效益,以输气管线为例,在输量不变的条件下,随着输送压力的提高气体的密度增加而流速减小,从而使摩阻下降。

在一条输气管线的站间距内由进站到出站压力逐渐下降,而流速逐渐增加,随之摩阻也逐渐增加,故离进站口3/4长度消耗进出站压差 Δp 的一半,而后1/4长度消耗另一半。输气管线与输油管线最大的差别是由进站到出站流速是逐渐增加的,这是介质的可压缩性造成的。而油基本上是不可压缩的,虽然输送压力沿管程逐步下降,但流速是不变的,摩阻也是前后相同的。由此看出对于输气管线压力的提高可使摩阻下降,而输送能耗下降。

还应指出,输气管线的能耗远比输油为大,仅以西气东输管线为例,该管线输送压力 $p=10\text{MPa}$,输量为120亿 $\text{m}^3/\text{年}$,管线长度为4000KM,粗略按经验估计能耗大致为12亿 $\text{m}^3/\text{年}$,而输量的1/10作为沿途的能源消耗掉了。

由于对降低能耗的关切,输送压力有逐步增加的趋势。早期我国四川省的天然气管线输送压力为2.5MPa,以后增加到4MPa,陕京线提升为6MPa,西气东输增至10MPa,国外经济发达国家近十气输气管线多选取12MPa。

在输气管线上压比亦有逐渐下降的趋势。所谓压比指进站压力与出站压力之比,压比

减少意味着全线均在较高的压力下运行,这样也可使能耗减小。早期压力多为 1.6,后来降至 1.4,近年国外有些输气管线取压比为 1.25。当然,压比减小,压缩机站数要增加,从而投资会增加。对于管径、压力、压比均需进行优化计算和比选。

当输量确定,通过优化确定管径、压力、压比以后,如选取较高压力而钢材强度等级太低,则会造成壁厚过大,这给制管、现场焊接以及运输等诸多环节带来困难,甚至难以实现。生产的需求促进了钢材等级的提高。

API 于 1926 年发布 API5L 标准,最初只包括 A25、A、B 三种钢级,最小屈服值分别为 172、207、251MPa。

API 于 1947 年发布 API5LX 标准,该标准中增加了 X42, X46, X52 三种钢级,其最小屈服值分别为 289、317、358MPa。

1966 年开始,先后发布了 X56、X60、X65、X70 四种钢级,其最小屈服值分别为 386、413、448、482MPa。

1972 年 API 发布 U80、U100 标准,其最小屈服值分别为 551、691Mpa,以后 API 又将 U80、U100 改为 X80、X100。

粗略统计,全世界 2000 年以前 X70 用量在 40%左右, X65、X60 均在 30%左右徘徊,小口径成品油管线也有相当数量选用 X52 钢级,且多为 ERW 钢管。

关于 X80 钢级,国内、外议论很多,国际上曾对 X80 研制已耗巨额投资的钢铁巨头更是积极宣传 X80,甚至 X100,但时至今日 X80 只处于“试验段”阶段,总长仅 400KM 左右。目前正在建设中的管线尚无采用 X80 钢级的,计划中或正在准备中兴建的管线尚无下定决心采用 X80 者,对此笔者曾与国外多家管道工程公司(负责管道设计)的技术人员交换过意见,大家看法基本相同,大致可归纳如下:

1、X80 钢级随着操作压力的提高及准备工作的完善将来必定会得到发展;

2、当前大石油业主不愿意首先选用 X80 大致出于以下原因:

(1)某一种新钢级(包括炼钢、轧制、制管)由开始生产至熟练的生产要有一个不合格率由高至低的过程,用同样的检验手段其出厂的不合格率也会有一个由低至高的过程,首先采用者要承担此风险;

(2)在现场焊接过程中,包括预热温度、层间温度、热输入量等对新钢级要有一个探索过程,在此期间不合格率也有一个由高至低的过程,首先采用者更多地承担此风险;

(3)采用 X80 后,现场使用的冷弯机、焊丝、环缝自动焊机、热弯头工艺等可能需要改变,重新购置或研制,从而增加了工程费用;

(4)采用 X80 后,同样直径,当操作压力不够高的情况下,钢材强度等级的提高意味着厚度的减薄,亦即厚度直径比(t/D)的减小,这也就意味着管线刚性的降低。从事故分析及风险分析看,管线的第三方破坏通常占破坏原因的 40%以上,而管线抵抗第三方破坏能力仅与 t/D 比有关而与强度等级无关。

从我国国情看,我国虽然经济近十多年迅速发展,但仍属发展中国家,笔者建议在采用 X80 问题上我们不做“第一个吃螃蟹”的人,采取“韬光养晦”的策略,这对业主单位有利对我国冶金行业也有利。

我国冶金行业在近十余年来为发展管道钢付出了极大的辛劳,取得可喜的业绩,目前正在全力攻关 X70 宽板(做直缝埋弧焊管用)并积极为能稳定 X70 热轧卷板的质量做努力,如当前决定大量采用 X80 钢级,固我国冶金业对此既无经验又无业绩而难与国外冶金行业竞争,笔者对我国冶金业不仅节深厚的感情,也深信我国冶金业的能力,但不宜操之过急,当然目前抽出少量的力量对 X80 进行探索还是必要的,但必须抓住主要矛盾。

二、关于金相组织

随着钢材等级的提高,冲击韧性的增加以及其它一些指标如 FATT 的降低等炼钢工艺

及轧制工艺也相应的有所变化,最终金相组织形态也跟着变化,这是很自然的。然而作为业主单位(买方)有无必要在定货技术条款上对金相组织提出确定的要求,诸多管道专家有不同的看法。

管线钢按金相组织形态分类至今大致有以下四种:

1、铁素体—珠光体钢: 简称为 FP(Ferrite-Pearlite), 基本成份为 C、Mn, 有时加少量 Nb、V; 一般 C 成份为 0.10—0.25%, Mn 成份为 1.30—1.70%, 轧制工艺采用热轧及正火。

X52 及以下各钢级均采用此种工艺,我国早期所建的管线,如四川的管线,“东八三”所建的管线均属此种钢,当时一部分国内生产,“东八三”所用的管道钢基本上是国外进口的。

当采用更高钢级时,为提高强度需增 C,但 C 增加使可焊性下降、FATT 上升,故必须另找出路。

2、少珠光体钢,这种钢通常将珠光体控制在 15% 以下,从化学成份上分有以下三种:

(1)Mn-Nb 钢

(2)Mn-V 钢

(3)Mn-V-Nb 钢

C 成份一般控制在 0.1% 以下,轧制工艺采用控轧,以上又称为“微合金控轧钢”,钢级中 X56、X60、X65、X70 钢可采用这种钢。

3、针状铁素体钢(Accicular Ferrite)

这种钢主要化学成份为 C、Mn、Nb、Mo, 采用控轧工艺,这种钢相对于前者包辛格效应小且减少偏析,多用于 X65、X70 钢级,根据报导国外有少量 X80 钢试制时也采用这种钢,其缺点为由于加 Mo,而 Mo 的价格较贵,故成本偏高。

4、超低炭贝氏体钢(Ultra Low Carbon Bainite)

这种钢主要化学成分为 Mn、Nb、Mo、B、Ti, 采用控轧、控冷工艺,通常 C 含量小于 0.03%,这是最新一代产品,其特点为不仅强度高且冲击韧性高、可焊性好、FATT 值低,从发展看来 X70 以及以后可能会较多采用的 X80 均会应用这种钢。

由以上论述看出,对于 X70,少珠光体钢、针状铁素体钢、超低炭贝氏体钢均可采用。笔者意见对于某一种钢级而言,只要能满足业主单位所提出的管材的机械物理性能即可,不必限制冶金单位必须采用何种工艺。各冶金厂条件差别很大,各自有其特点和优势,“条条大路通罗马”,对 X70 限制必须采用针状铁素体似无必要。笔者与许多国外管道设计专家交换意见,大家看法是一致的。

三、关于管型

目前在油气管道上常用的管型有螺旋埋弧焊管(SSAW)、直缝埋弧焊管(LSAW)、电阻焊管(ERW),当直径较小时(如直径为 152mm 或更小)则选用无缝钢管。

我国早期由前苏联引进螺旋埋弧焊管技术,随着管道工业的发展,在六十年末至七十年代我国的螺旋管厂迅速发展,至今大型螺旋钢管厂有五、六家,加上中小型及民营螺旋管厂总计有数十家。我国原油管线几乎全部采用螺旋钢管,气管线,如“西气东输”管线,一类地区选用螺旋钢管。

国外经济发达国家由七十年代末、八十年代初开始,用直缝埋弧焊管逐渐取代螺旋钢管,至今绝大多数八十年代到目前新投产的气管线几乎均采用直缝埋弧焊管。

螺旋钢管具有产生缺陷的概率高、内应力大、尺寸精度差等缺点,这是其被淘汰的主要原因^[1]。螺旋焊管面临着两种命运,一为淘汰,二为改造。

据了解,欧洲及加拿大有着螺旋钢管厂改造非常成功的范例,主要方法有卷板两侧(约 50mm 宽度范围内)进行超声波探伤、同时两侧用铣边机加工出坡口,压边以及预精焊分开

等等。我国管道专家黄志潜等曾多次就螺旋管改造问题赴国外考察,并做出详尽、精辟的论述,建议国内各螺旋管厂参照进行改造⁽²⁾。

上个世纪(2000 年以前)我国所建的长输管道绝大多数采用螺旋焊管,在笔者任中国石油天然气管道局总工程师的十五年间曾处理过大量的事故,其中相当大的部分为螺旋焊缝开裂。

前苏联曾大量采用螺旋埋弧焊管,据有关方面材料,前苏联管道事故率远高于欧美,且钢管缺陷造成事故的比例也远远高于欧美,苏联解体前数年曾由日本大量进口直缝埋弧焊管并建成若干直缝埋弧焊管工厂,但由资料上看有些是双焊缝的⁽³⁾⁽⁴⁾。

2002 年笔者及一些国内专家与俄国 gasprom 专家闲谈时,他们意见,如现有的螺旋管质量不提高,输气管线应采用直缝埋弧焊管。

笔者建议,我们应采取“两条腿走路”的方针,一是积极改造现有螺旋管厂,笔者相信,现有螺旋管经认真改造后,不仅原油管线可大量采用,输气管线部分地区也可采用,这仍是大有前途的;二是大力发展我国直缝埋弧焊管制管业,采取 UOE 或 JCOE 均可。

ERW 钢管具有内外表面光洁、尺寸精度好、价格相对较低的优点,目前在国内外、外已广泛采用。早期国产 ERW 钢管曾先后出现过两次较大事故,均因热处理偏离焊缝造成的,但这种事故是可以完全避免的。今后成品油管线相信会大量采用 ERW 钢管⁽⁵⁾。

四、关于钢管的韧性指标⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾

钢管的韧性指标是与钢管的强度的指标一样,都是最重要的机械物理性能指标,韧性指标一般从三个方面提出要求。

1、 FATT 指标

FATT 是 Fracture Appearance Transition Temperature 的简称,通常译为“韧脆转变温度”。FATT 可分为三种:一种以 DWTT 试验为依据,用其剪切面积(ShearArea)为 80%或 85%所对应温度为转变温度,这种方法应用的最多,且剪切面积多取 80%,另一种以夏比试验为依据,第三中以爆破试验为依据。

提出 FATT 要求是保证管线不发生脆性断裂,通常取 FATT 值为设计的管线可能产生的最低温度再减 10℃。

世界管道史上最早也是最严重的一次脆性断裂事故发生在 1960 年,在美国 Trans-Western 管线上进行气压试验时发生的,该管线直径 30 英寸(762mm),壁厚 0.375 英寸(9.5mm),钢级为 X56,破坏时环向应力仅为 0.63(SMYS),断裂总长 13.36km。爆破时飞出 19 块碎片,取出两块做夏比冲击试验,其剪切面积仅为 10%和 40%。此事故以后引起全世界的关注,并促进了断裂力学及断裂动力学的发展。

1974 年冬季,大庆至铁岭复线嫩江穿越段在陆上进行气压试验时发生脆性断裂,事故后笔者赶往现场进行事故调查和处理。该管线直径 720mm, X52 钢级试压至大约 4.5Mpa 爆破,穿越段全长近 2km 全部脆断,有些碎块飞出近百米以外。笔者仔细的观察了多数断口,其剪切面积大致在 5—15%范围内。该管线因采用热输,故钢材定货时未提出 FATT 要求,因赶进度,施工队伍在未经讨论的情况下,决定冬季气压试验以致造成事故⁽⁹⁾。

由以上看出,无论对输气管线还是输油管线都必须按规定提出 FATT 要求,以避免脆性断裂。

2、起裂韧性指标

钢管中的缺陷长度 $2a$ (或当量裂纹长度)由于疲劳裂纹扩展、腐蚀裂纹扩展等诸多原因,会逐渐增长,当 $2a$ 增长至临界裂纹长度 $2ac$ 时,则发生“质变”,由稳定裂纹增长变成失稳扩展。以上 a 代表钢管中缺陷或当量缺陷长度的一半, ac 为临界裂纹长度的一半。

ac 的数值与钢管的韧性有关,冲击韧性越高, ac 值越大,所以冲击韧性也是材料对缺陷的“容忍程度”或“容忍能力”的一个指标。

管道工作者要求在管线整个服役期限内(或管线整个寿命期内)2a 达不到 2ac, 这样管线就不会发生失稳扩展, 而稳定扩展只要达不到失稳扩展则是无害的, 而且稳定扩展也是必定会产生的。

随着管线工作条件的不同, 稳定扩展的速度也是不一样的, 故起裂韧性指标也不尽相同。

3、关于失稳扩展的止裂⁽⁸⁾

我们要尽一切努力使管线不发生起裂, 但有时起裂是难以完全避免的, 这样我们还必须退一步打算, 即一旦发生起裂, 由稳定扩展转变为失稳扩展时, 失稳扩展必须得到止裂。

由于管道工作者提出明确的 PAIT 要求以及冶金工业的技术进步, 除早期发生过脆性断裂扩展事故外, 近几十年所发生的失稳扩展均系延性扩展。

在世界管道史上第一次延性失稳扩展发生在六十年代末期, 管径 36 英寸, 钢级为 X65, 断裂长度接近 1000 英尺(304.8m)。以后, 直径在 12—36 英寸范围内, 钢级 X60、X65、X70 均发生过这种破裂。近二十余年关于管道断裂的研究工作主要集中在延性断裂的止裂上, 而且取得可喜的成就。目前在美国、英国、日本等地均有研究小组及试验场地, 诸多的研究成果比较接近。

笔者在九十年代初曾与冶金专家肖季美教授等共同研究、探讨, 在各种方法中我们推荐采用 Battele 方法, 2001 年 Battele 几位专家访华时曾详细介绍了他们的理论与试验一致性的事实。在这方面我国及国外已有数百篇论述, 详细计算请参考文献⁽⁸⁾。

以上仅供广大读者参考, 不妥之处还望读者指正。

(2003 年 6 月)

参 考 文 献

(1) 潘家华: “提高我国螺旋焊管质量的努力方向”, “潘家华油气储运工程著作选集”第二卷 ppl03~108, 石油工业出版社, 2001 年 3 月第一版;

(2) 黄志潜: “国外油气输送管道用螺旋埋弧焊管制造技术的发展”, “石油管工程应用基础研究论文集” pp20~27, 石油工业出版社, 2001 年 8 月;

(3) Victor Starostin: “Pipeline disaster in the USSR”, Pipe and Pipeline International, March-April, 1990, pp7~8;

(4) “Soviet NGL Pipeline explosion likely to tighten Supervision” Jane 12. 1989. Oil and Gas Journal, p25;

(5) 潘家华: “ERW 钢管的历史与发展前景”, “潘家华油气储运工程著作选”第三卷, pp87~92, 石油工业出版社, 2001 年 3 月第一版;

(6) G. T. Hahn, M. F. Kanniren: “Fast Fracture and Crack Arrest ” ASME, American Society for Testing and Materials, 1916 Race Street, Philadelphia, Pa 19103;

(7) 潘家华: “油气管道断裂力学分析”, 石油工业出版社, 1989 年 9 月, 北京, 第一版;

(8) 潘家华: “关于输气管道的止裂研究”, 焊管, 第 24 卷, 第 4 期, 2001 年 7 月, ppl~9;

(9) Pan Jiahua: “Some Fracture Problems in Pipelines”, 此文系潘家华教授于 1983 年在瑞士 Basle 召开的欧洲管道会议上发表的论文, 该文选在该会的论文集中, 2001 年选入“潘家华油气储运工程著作选集”第二卷 ppl5~23。

输气管线用高强度管道的发展前景

Izumi Takeuchi⁽¹⁾, Jun Fujino⁽²⁾, Akio Yamamoto⁽²⁾ and Shuji Okaguchi⁽³⁾, Hiroyuki Makino⁽³⁾

1 Sumitomo Metal Industries Ltd. Tokyo, Harumi 1-chome, Cho-ku, Tokyo, Japan

2 Sumitomo Metal Industries Ltd. Kashima Steel Works, Hikari 3, Kashima-city, Ibaraki-ken, Japan

3 Sumitomo Metal Industries Ltd. Corporate Research Laboratory Fuso-cho 1-8, Amagasaki-city, Hyogo-ken, Japan

摘要

随着天然气消费量的增长,输气管线的重要性也显得越来越突出。为了实现安全、经济的天然气运输,管线必须在天然气田的发展中担任重要的角色。长距离输气管线带来了对高强度管道的巨大需求。API X70 级管道已经应用在全球的主要管线工程中,而 API X80 级管道也已经被引进以降低管线的成本。为实现安全而且经济的管线,X80 以上级别的管道技术正在发展,而 X100 级钢管已经在向商品化接近。然而与普通级别的管道相比,要实现 X100 级别管道的建造,就有必要对高强度管线钢的变形行为、焊接设计和动态韧性断裂的止裂能力等方面进行仔细研究。为了实现能在高压下安全运行的 X100 级别的输气管线,不仅需要建立钢管的性能标准,而且还必须建立起合适的建造规范。

1. 简介

为实现输气管线的安全且经济的运行,对钢管的性能提出了非常苛刻的要求。包括炼钢、轧板和制管工艺等方面在内的全面的技术发展已经有能力制造各种在严酷条件下使用的高级别商用管道,如酸性环境下服役的管道、深海下服役的厚壁管道以及北极地区服役的高强度、高韧性管道。

由于具有 CO₂ 排放量低的优点,天然气的使用受到了来自环保方面的热切关注。地处遥远地区的天然气田的发展依赖于运输费用。据可靠估算,要实现经济运行,长距离

输送管线就必须在高压下运行,并且必须减少钢材的使用量。钢厂对高强度管线的发展需求已经非常急迫,而且据报道,API X80 已经实现了成功应用。

对于天然气管线,除了有高强度的要求,同时也要求极高的韧性以获得动态韧性断裂的止裂能力。对 X100 级高强度钢管的评估已经开展,以确定建造及安全运行的可行性。评估结果表明 X100 级管道刚刚准备好它的首次应用。本文概括了在高强度管线中所应用的技术,并且从钢铁制造商的角度,对在 X100 投入应用之前需要阐明的一些问

题进行了总结。

2. 高级别钢管生产中的技术

2.1 炼钢技术

为实现高级别钢管的生产,已经研究成功了一系列的技术。这是因为为了获得质量高而且稳定的高级别管道,不仅需要制管厂的技术,而且需要炼钢厂和轧板厂的技术。在日本,我们的优势就是能在每个综合性的钢厂完成这一目标。炼钢阶段的关键技术是使钢纯净化以获得低的硫、磷含量。工艺包括转炉和预处理、钢水包处理以及真空除气之后的连铸过程。图 1 展示了炼钢过程以及其中每个步骤对生产高级别管线钢所起的作用[1]。

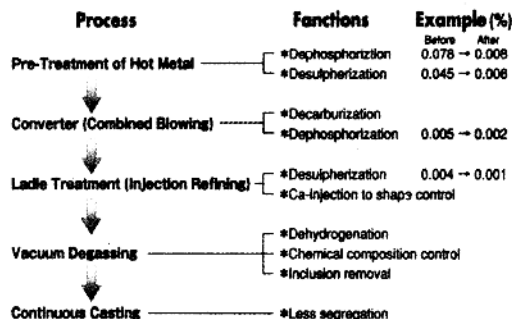


Fig.1 Steel making process for high grade line pipe

低的硫含量能增加高强度钢裂纹扩展的吸收能。大规模生产硫含量在 10ppm 以下的钢是可行的。通过同时降低碳和硫的含量,可以在 X100 级别以上的高强度钢中获得高韧性。Ca 处理技术控制了夹杂物的形态,从而能改善在酸性环境下服役的管道的

抗 HIC(氢致裂纹)能力。

真空除气的应用使得在大规模生产中获得纯净钢成为可能。此外,在真空处理的过程中,对合金元素的精确控制能把钢的化学成分控制在一个很窄的范围里,从而能把钢管的性能波动降到最低。对于 X80 及以上级别的高强度钢,控制性能波动显得越来越重要。钢的强度越高,其裂纹敏感性也越高,因此钢中的氢含量必须控制在比传统级别的钢更低的水平上,而这正是真空处理能做到的。

降低由连铸过程带来的中心部位的偏析是生产抗酸性环境钢的关键技术。选择合适的化学成分并冶炼出纯净的钢只是完成了第一步,而对凝固区的控制才能在最后达到降低偏析的目的。利用 TMCP(热变形控制加工)技术已经研制出了抗酸性环境的 X80 级钢,而实践证明 TMCP 技术能通过控制材料中的相变来降低偏析[2]。

2.2 TMCP 工艺在高强度管线钢中的应用

TMCP 工艺是生产在北极地区、深海及酸性环境中服役的现代高级别管线钢所需的至关重要的技术。最初引进控制轧制技术是为了获得高强度高韧性钢板,而在加入对再结晶和相变过程的控制之后,控制轧制技术已成为获得细化的铁素体组织的技术。在 TMCP 过程中,除了使用控制轧制技术之外,还利用终轧后的控制冷却技术使组织从细化的铁素体为主向细化的贝氏体为主转变。通过 TMCP 工艺既能获得更高的强度

和更高的韧性，又能保证焊接所要求的合适的含碳量。为了获得超过 X80 的超高强度，还利用了马氏体相变的强化作用。轧制条件和冷却条件被仔细选择以得到最佳的组织。
Photo1 是高强度管线钢的典型金相组织，其中 X60 为细化的铁素体加珠光体组织；X70 是细化的针状铁素体组织；X80 是下贝氏体；X100 是下贝氏体加马氏体。

终冷温度是低碳当量（Pcm）的钢获得高强度的一个重要的影响因素，如图 2 所示

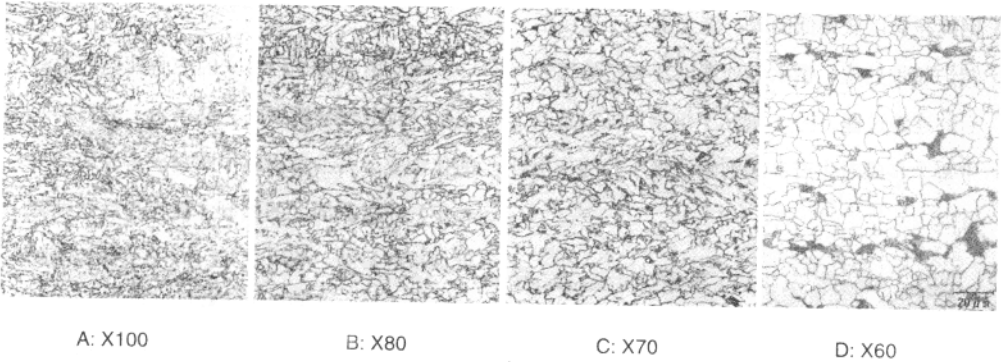


Photo. 1 Typical microstructure of high strength line pipe steel

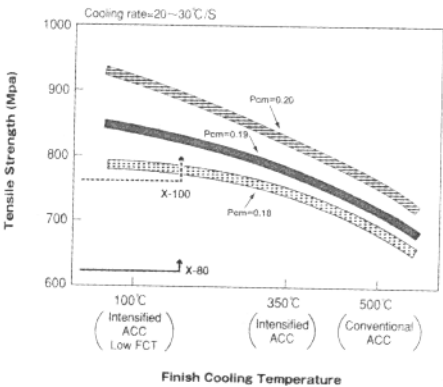


Fig.2 Effect of cooling method in TMCP on tensile strength of linepipe

[3]。高强度可以通过强化冷却加上低终冷温度来获得，也可以通过提高碳当量来实现，但是低碳当量具有更好的焊接性能。众所周知，随着强度的提高，材料的延伸率和韧性都会下降。图 3 比较了用 TMCP 工艺生产的 X80、X100 钢与低级别钢的典型应力—应变曲线，随着材料强度的提高，均匀延伸率降低了，而且据估计，在 UOE 制管过程中高强度钢的曲强比也有增大的趋势。

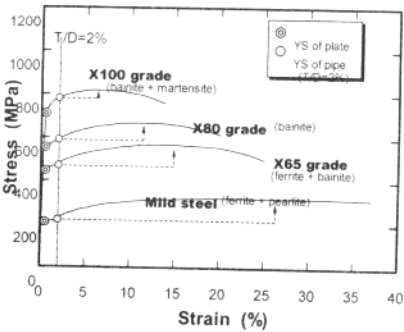


Fig.3 Typical stress-strain curves of X-100 and X-80 by TMCP together with lower grade steels for line pipes

2.3 高强度管道的制管过程

在管道生产中有若干种制管方法，其中 UOE 工艺是目前生产高强度管道采用得最普遍的方法，同时还使用辊压弯板和压力弯板来使钢管成型。而以板卷为原料的螺旋制管工艺，适合用于薄壁钢管的制造。SAW（埋弧焊）是制管过程中常用的焊接方法。在 UOE 过程中，扩管工艺在焊接后被用来使钢管达到最终的尺寸，某些辊压弯板厂和压力弯板厂也装备了扩管设备。制管过程中每道工序的冷加工差异将会导致钢管的在性能上的差异。成型、压缩和扩管过程的实质就是冷变形。大多数输气管线的钢管壁厚与直径的比值（t/D）大约为 1—3%，在成型过程中的压缩变形不超过 1%，因此扩管时大约采用 1%的变形量。所有这些变形都会使钢板制成钢管后拉伸性能和冲击性能发生改变。如图 3

所示，高强度钢板对于冷变形的敏感性要比低强度钢高，因此在管道用钢板的设计中，必须了解制管过程造成的性能变化，以使钢管的最终性能达到使用要求。

对于那些较小规模的初期设备投资，螺旋制管工艺具有一定的优势，但是高强度板卷的可用性以及制管厂的生产能力限制了 X80 以上级别的高强度钢管的生产。

3. 输气用高强度管道

3.1 高强度管道的性能

为了理解 X80 级以上高强度管道的特点，我们回顾了 12 年的有关技术文献[4]—[14]。结果见图 4 至图 6。同时还列出了目前的 X70 生产数据，以对传统高强度管线钢的性能加以比较。表 1 总结了西气东输管线工程所用 X70 级管道的数据。

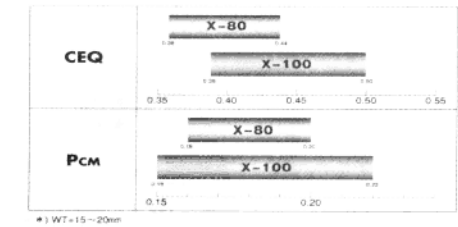
Table 1 Production data of X-70 for West East Pipeline in China (OD40"xWT17.5mm: Amount

(1) Chemical Composition (%)

	C	Ceq	Pcm
Average	0.06	0.39	0.17
σ	0.005	0.008	0.006

(2) Mechanical Properties

	Tensile Test			Impact Test Cv (at -20C) Joule			DWTT
	YS(Mpa)	TS(Mpa)	YR	Base Metal	HAZ	Weld	SA(N) at-5C
Average	575	672	0.86	317	275	216	99.8
σ	20	20.8	2.4	24.5	42.4	19.5	0.6



$$CEQ = CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15}$$
$$CE(Pcm) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

Fig.4 Carbon equivalent range of high strenath line

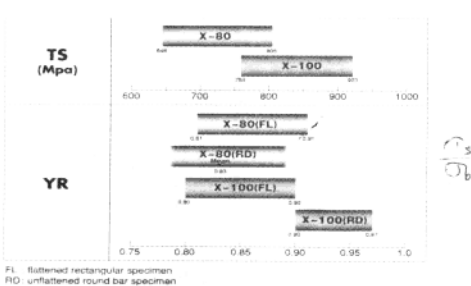


Fig.5 TS and YR range of high strength line pipe

X80 和 X100 级管线钢的化学成分以碳当量 C_{eq} 和 P_{cm} 的形式列在图 4 中, 其中钢管的壁厚范围从 15 至 20mm。为了提高强度, X100 有着比 X80 更高的 C_{eq} 是相当的。然而他们的 P_{cm} 值处于同一水平, 而对于碳含量低于 0.12% 的低碳钢, P_{cm} 是一个更加合适的碳当量值。如图所示, X100 和 X80 使用了较低的碳含量, 其中 X100 为 0.02% 至 0.08%, X80 为 0.04% 至 0.09%。与表 1 中结果比较, X70 的 C_{eq} 值处于 X80 的范围内。这表明钢厂试图把 X100 的 P_{cm} 控制在与传统的 X70 级钢相同的范围内, 以保持材料的焊接性, 同时避免给现场施工带来任何的不便。图 5 中给出了 X100 和 X80 的拉伸强度和曲强比。尽管它们的 P_{cm} 处在同一范围, X100 的拉伸强度仍然高于 X80, 其中 X80 的拉伸强度为 646-805MPa; X100 为 759-923MPa。这似乎表明正如 2.2 中提到的, 在生产高强度钢管方面, 完全是由 TMCP 工艺起的作用。图 5 中还比较了 X100

和 X80 的曲强比。在性能评估中, 同时采用了展平的矩形试样和未经展平的圆条形试样。

从相同的 X100 钢管上取了多个试样以对测试结果进行比较, 但没有相同 X80 钢管上的多个取样。X80 的圆条形试样的屈强比试验结果是来自于一份报告中的图表[12]。在不考虑试样的情况下, X80 的屈强比达到了 API 规格中的最大值 0.93。但是 X100 的不同试样的屈强比存在很大的差异。尽管展平试样的屈强比小于 0.90, 圆条形试样的屈强比从最小值 0.90 至最大值 0.97。根据文献报道[16], 高强度钢管的 Bauschinger 效应是不可忽略的, 因此高强度钢管的屈服强度的评估似乎是一个值得认真对待的问题。图 6 为从相同的 X100 钢管上取的两种形式的试样测得的屈服和拉伸强度。X100 的展平试样的屈服强度由于 Bauschinger 效应的作用被人为地降低了, 而未经展平的圆条形试样有可能反映了 X100 真实的屈服强度, 这

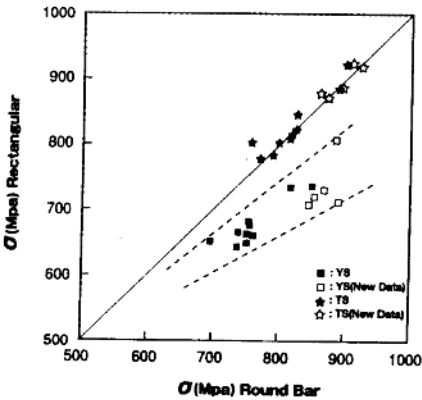


Fig.6 YS and TS of X-100 by flattened rectangular specimen and un-flattened round bar

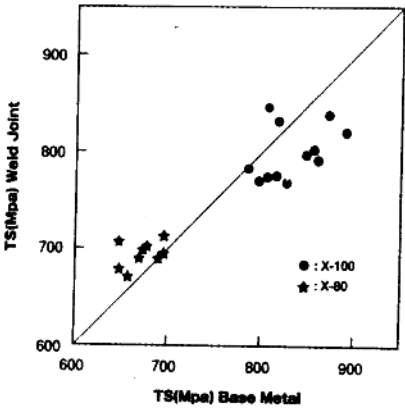


Fig.7 Weld joint tensile strength of high strength line pipe