

外径 1 422 mm 的 X80 钢级管材技术条件研究及产品开发

张伟卫^{1,2} 李 鹤^{1,2} 池 强^{1,2} 赵新伟^{1,2} 霍春勇^{1,2} 齐丽华^{1,2}
李炎华^{1,2} 杨 坤^{1,2}

1. 中国石油集团石油管工程技术研究院 2. 石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室

张伟卫等. 外径 1 422 mm 的 X80 钢级管材技术条件研究及产品开发. 天然气工业, 2016, 36(6): 84-91.

摘 要 为了满足中俄东线天然气管道工程 $380 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 超大输气量的要求, 大口径、厚壁、高钢级钢管便成为了主要选择。为此, 结合该管道工程用外径为 1 422 mm 的 X80 钢管技术条件的研究制订过程, 对国内外管线钢管技术标准进行了对比分析, 同时对外径为 1 422 mm X80 钢管技术条件中的化学成分和止裂韧性等关键技术指标及制订过程进行了分析探讨, 并对外径为 1 422 mm X80 钢管的开发过程及产品性能进行了介绍。通过生产试制和产品检测, 证明现有技术条件合理有效地解决了化学成分控制、断裂控制、产品焊接稳定性等技术问题, 不仅满足了工程要求, 而且也适应生产情况, 可以保障中俄东线天然气管道的本质安全。该研究成果可为中俄东线建设外径为 1 422 mm X80 钢天然气管道提供技术支撑, 同时对于其他天然气管道工程技术条件的制订也具有指导意义。

关键词 中俄东线天然气管道工程 1 422 mm 外径 X80 管线钢管 技术条件 技术指标 化学成分 止裂韧性 焊接
DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2016.06.013

Technical specifications of the X80 large OD 1 422 mm line pipes and the corresponding product development

Zhang Weiwei^{1,2}, Li He^{1,2}, Chi Qiang^{1,2}, Zhao Xinwei^{1,2}, Huo Chunyong^{1,2}, Qi Lihua^{1,2}, Li Yanhua^{1,2}, Yang Kun^{1,2}

(1. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710077, China; 2. State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 36, ISSUE 6, pp.84-91, 6/25/2016. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The steel pipes with large diameter, thick wall and high steel grade are preferred to meet the requirements of extremely high gas transmission rate ($380 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$) in the Sino-Russian eastern route gas pipeline project. In this paper, the technical standards of line pipes at home and abroad were comparatively analyzed after the research and formulation process of technical specifications of API 5L X80 line pipes (OD 1 422 mm) used in the above mentioned project was introduced. The key technical indexes such as chemical components, crack-arrest-toughness values, etc. and its formulation process were discussed. In addition, the development process and product performance of the X80 line pipes (OD 1 422 mm) were described. It is proved by trial production and product tests that using X80 line pipes (OD 1 422 mm) in this gas project is a rational and effective solution to the following technical issues such as chemical composition control, fracture control and welding stability maintenance. This type of line pipes are proved to not only meet project requirements, but suit for production cases. As a result, the safety of Sino-Russian eastern route gas pipeline will be guaranteed essentially. The research results in this paper provide a strong technical support for the application of API 5L X80 line pipes (OD 1 422 mm) in the Sino-Russian eastern route gas pipeline project, and play a guiding role in drawing up the technical specifications of other gas pipeline projects.

Keywords: Sino-Russian eastern route gas pipeline project; OD 1 422 mm; API 5L X80 line pipe; Technical specification; Technical index; Chemical component; Crack-arrest-toughness value; BTC method; Charpy vee-notched (CVN) impact energy

作者简介: 张伟卫, 1981 年生, 高级工程师, 硕士; 主要从事输送管与管线材料及标准方面的研究工作。地址: (710077) 陕西省西安市锦业二路 89 号。电话: (029)81887838。ORCID: 0000-0002-3459-4420。E-mail: zhangweiwei@cnpc.com.cn

近年来,随着天然气需求量的日益增加,我国油气管道特别是天然气管道建设进入了一个新的高峰期,大口径、厚壁、高钢级钢管成为管道建设的主要选择^[1-2]。在“十一五”期间中国石油天然气集团公司(以下简称中石油)正式立项开展了外径为1 219 mm的X80管线钢前期先导技术研究,取得了一些成果,制订了一系列外径为1 219 mm的X80钢管技术条件,并用于“西气东输”二线等天然气管线建设中。就当时全球已经建成和正在建设的天然气高压长输管道而言,不论钢级、长度、管径、壁厚还是输送压力,“西气东输”二线工程都堪称世界之最^[3]。

2014年5月,中石油与俄罗斯天然气公司正式签署了《中俄东线管道供气购销协议》,约定从2018年起,俄罗斯开始通过中俄东线天然气输送管道向中国供气。为了满足中俄东线 $380 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 超大输气量的要求,中石油通过对外径为1 422 mm的X80钢管应用技术的攻关,形成了第三代大输量天然气管道应用配套技术,并决定在国内737 km的中俄东线黑河—长岭段干线首次使用外径为1 422 mm的X80钢管。

管线钢的质量是保证管线安全的最基本也是最关键的因素之一,钢管订货技术条件是钢管生产、检验和验收的依据,确定其合理的技术要求对保证管线的安全可靠、经济性和可行性是非常重要的。受中国石油管道项目经理部的委托,中国石油集团石油管工程技术研究院负责研究、制订了中俄东线天然气管道工程用外径为1 422 mm的X80管线钢、钢管系列技术条件。笔者对中俄东线天然气管道工程用外径为1 422 mm的X80管线钢、钢管系列技术条件制订过程中的几个关键问题进行了论述,并对其开发过程及产品性能进行了介绍。

1 国内外相关管线钢标准对比分析

油气输送管道用钢管技术标准可分为国际标准、国家标准、行业标准和企业标准等。如ISO 3183属国际标准,GB/T 9711是国家标准,API SPEC 5L可认为是行业标准,中国石油发布的Q/SY 1513以及中国石油管道建设项目经理部发布的Q/SY GJX 149—2015等是企业标准。

目前在我国使用的陆上油气输送钢管基础标准

主要有API SPEC 5L、ISO 3183和GB/T 9711等。中国石油在吸收国内外技术标准研究成果的基础上,还形成了自己的油气输送钢管技术标准体系,经常使用的通用技术标准有Q/SY 1513和CDP-S-NGP-PL-006等,此外根据不同的工程需求,还制订了大量的工程技术条件,如“西气东输”二线天然气管道工程用管材技术条件和中俄东线天然气管道工程用管材技术条件等。

ISO 3183是国际标准化组织制订的石油天然气工业管道输送系统用钢管标准,被GB/T 9711等同采用。由于GB/T 9711的采标修订工作受管理因素限制,更新较ISO 3183慢,目前等同采用ISO 3183:2007版本。API SPEC 5L是美国石油学会制订的一个被普遍采用的规范。上述标准或规范兼顾了管线钢的技术要求与制造厂实际生产的可行性,但相对管线与制管技术的发展,这些标准或规范中的技术要求显得比较宽松,许多条款仅给出了原则性能要求,具体指标不明确。因此已经很少单独用于管线项目。

目前,世界上大多数石油公司都习惯采用API SPEC 5L作为管线钢管采购的基础规范,在该规范基础上,根据当地实际情况或管线工程的具体要求,制订补充技术条件。中国石油的管线钢管通用技术标准Q/SY 1513、CDP-S-NGP-PL-006等就是以API SPEC 5L《管线管规范》为基础,吸收了国内外管线钢和工程经验编制而成,具有很强的实用性和可行性,但由于是通用技术条件,有些指标,如化学成分、夏比冲击功(CVN)等要求比较宽松,需要根据具体工程情况进一步确定。

在具体技术指标方面,GB 9711—2011、ISO 3183:2012、API 5L:2012等标准的最大适用管径包括1 422 mm,化学成分指标要求较为宽松,其技术指标要求只满足一般钢管的最基本要求,如要求C含量(质量分数,下同)不大于0.12%,Si含量不大于0.45%,其他合金元素范围也非常宽泛^[4-6],没有考虑现场焊接对化学成分的要求,缺乏工程应用指导意义。CVN要求3个试样最小平均值为54 J,仅能满足管体材料不发生启裂失效的最基本要求,不能满足钢管自身止裂要求,因而不能保证长输管道的本质安全。

中国石油企业标准Q/SY 1513.1—2012《油气输送管道用管材通用技术条件 第1部分:埋弧焊管》最大适用管径为1 219 mm,最高适用钢级为X80,

理化性能指标基本与 ISO 3183、GB/T 9711 和 API SPEC 5L : 2012 相同, 区别在于 Q/SY 1513.1—2012 中碳当量不要求 CE_{IIW} 指标 (表 1)。夏比冲击韧性

只给出了确定方法 (冲击功值要求应按 API SPEC 5L 的附录 G 确定), 没有给出具体数值, 需要根据具体工程进行计算或试验验证确定。

表 1 Q/SY 1513.1—2012 对 X80 管线钢化学成分的要求表

钢号	根据熔炼分析和产品分析的最大质量分数									最大碳当量 ^{a)}	
	C ^{b)}	Si	Mn ^{b)}	P	S	V	Nb	Ti	其他 ⁱ⁾	CE_{IIW}	CE_{Pcm}
L555 或 X80	0.12% ^{e)}	0.45% ^{e)}	1.85% ^{e)}	0.025%	0.015%	f)	f)	f)	h)	/	0.25%

注: a) 根据产品分析, 如果碳的质量分数大于 0.12%, 则 CE_{IIW} 极限适用; 如果碳的质量分数小于或等于 0.12%, 则 CE_{Pcm} 极限适用; b) 碳含量比规定最大质量分数每降低 0.01%, 则允许锰含量比规定最大质量分数增加 0.05%, 对于大于等于 L485 或 X70 小于等于 L555 或 X80 的钢级, 最大值不应超过 2.00%; c) 除非另有协议; d) 除非另有协议, 铌、钒和钛的总含量不应超过 0.15%; e) 除非另有规定, 铜的最大含量为 0.50%, 镍的最大含量为 1.00%, 铬的最大含量为 0.50%, 钼的最大含量为 0.50%; f) 除非另有规定, 不得有意加入 B, 残留 B 含量应 ≤ 0.001%。 CE_{IIW} 表示采用国际焊接学会公式确定的碳当量; CE_{Pcm} 表示采用 Ito-Bessyo 碳当量公式的化学部分确定的碳当量; c) d) 见其他章节。

中俄东线天然气管道工程用管材技术条件则是在 Q/SY 1513 基础上, 借鉴了 API SPEC 5L : 2012 的最新成果, 结合中俄东线工程的具体特点, 对外径为 1 422 mm 管线钢及钢管的各项关键技术指标进行研究攻关, 主要针对近年来管线工程的热点问题, 确定了更为严格的化学成分指标, 计算并验证了钢管的 CVN 值, 规定了夹杂物评定标准等, 此外, 还对管材和板材的试验检验方法和要求进行了优化, 提出了更严格的制造、检验程序和更科学合理的质量控制措施。如化学成分要求 C 含量不大于 0.07%, Mn 含量不大于 1.85%, Nb、Mo、Ni 含量等根据螺旋缝埋弧焊管和直缝埋弧焊管管型的不同分别有不同的要求, 有效地解决了现场焊接质量的稳定性问题。关于 CVN 指标, 采用了 Battelle 双曲线 (BTC) 方法进行理论计算, 并利用近年来管道断裂控制技术研究最新成果, 采用 Leis-2、Eiber 和 TGRC2 等多种修正方法进行修正^[7], 同时通过全尺寸气体爆破试验进行了验证。

中俄东线天然气管道工程用外径为 1 422 mm 的 X80 钢管材技术条件还明确了试验样品的加工要求, 如板卷力学性能试验样品要求与板卷轧制方向成 20° 取样, 拉伸试验采用直径为 12.7 mm 的圆棒试样。

此外, 通过研究, 中俄东线天然气管道工程用外径为 1 422 mm 的 X80 钢管材技术条件还规定了严格的非金属夹杂物验收极限。针对夏比冲击试验中普遍存在的断口分离问题, 增加了夏比冲击试样断口分离程度分级方法, 针对钢管管端非分层缺陷检测问题, 增加了非分层缺陷的检测和验收方法等。

2 外径为 1 422 mm 的 X80 钢管材技术条件制订中的几个关键问题

2.1 化学成分

自“西气东输”二线管道工程开始, 我国 X80 管线钢的生产和应用越来越多, 随着钢铁冶金技术的进步, 为了降低生产成本, 国内各钢铁企业根据自身的特点, 开发出了多种合金体系的管线钢, 不同钢铁企业生产的管线钢化学成分差别很大, 甚至同一企业不同阶段生产的管线钢的化学成分也有很大的差异^[8]。这种化学成分的较大差异, 会降低焊接工艺和焊材的适用性, 缩小现场焊接的工艺窗口, 增加管线焊接的难度, 造成焊缝力学性能波动加剧, 从而给管道的服役安全带来隐患, 对于壁厚超过 20 mm 的 X80 管线钢, 这一问题尤为突出。为了解决这一难题, 在中俄东线天然气管道工程用外径为 1 422 mm 的 X80 管材技术条件制订过程中, 对化学成分指标进行了大量的试验研究工作, 目标就是限定中俄东线天然气管道工程用管线钢的化学成分波动范围, 制订经济、科学的化学成分指标, 从而稳定管线钢质量和现场焊接工艺窗口。

2.1.1 碳、锰、铌

化学成分对管线钢的显微组织、力学性能和焊接性能有着重要的影响。通过研究, 决定外径为 1 422 mm X80 管线钢采用低 C、Mn 的成分设计, 并加入适量的 Mo、Ni、Nb、V、Ti、Cu、Cr 等元素。炼钢时钢材应采用吹氧转炉或电炉冶炼, 并进行炉外精炼, 并采用热机械控轧工艺 (TMCP) 生产, 最终管线钢的晶粒尺寸达到 10

级以上,从而保证生产出具有良好的强韧性、塑性和焊接性的管线钢。

对“西气东输”二线等天然气管道工程用 X80 钢管的化学成分及焊接结果进行研究分析发现,管线钢中 C、Mn、Nb 的剧烈波动(图 1~3),对焊接性能影响具有较大的影响。

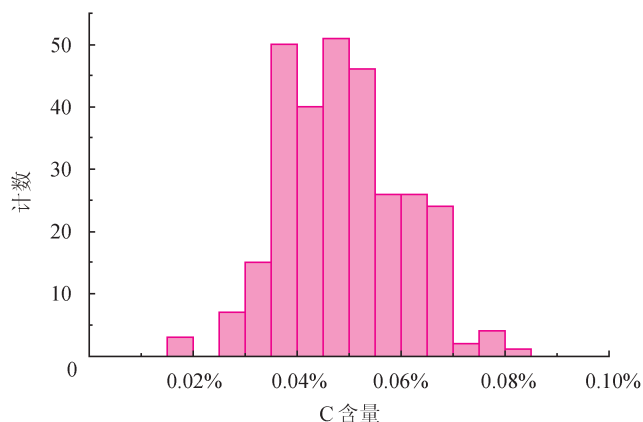


图1 X80 钢管的 C 含量分布统计图

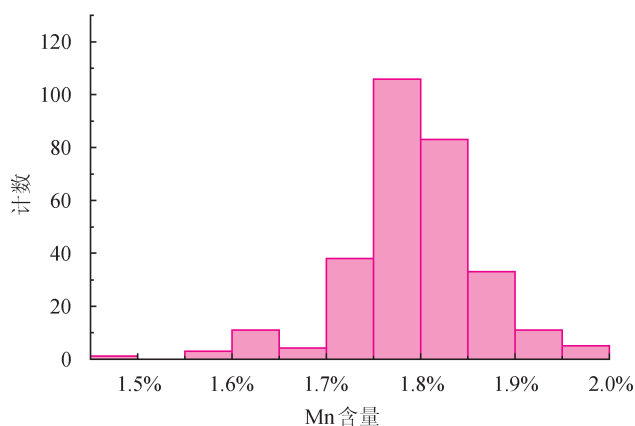


图2 X80 钢管的 Mn 含量分布统计图

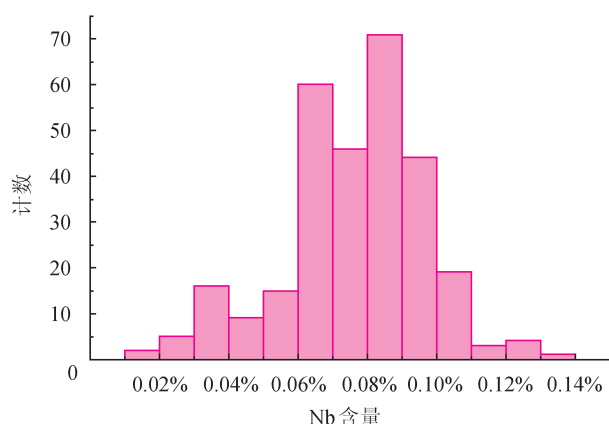


图3 X80 钢管的 Nb 含量分布统计图

在管线钢中 C 是增加钢强度的有效元素,但是它对钢的韧性、塑性和焊接性有负面影响^[9]。降低 C

含量可以改善管线钢的韧脆,转变温度和焊接性,但 C 含量过低则需要加入更多的其他合金元素来提高管线钢的强度,使冶炼成本提高^[10]。综合考虑经济和技术因素, C 含量应控制在 0.05%~0.07%。

为保证管线钢中低的 C 含量,避免引起其强度损失,需要在管线钢中加入适量的合金元素,如 Mn、Nb、Mo 等。Mn 的加入引起固溶强化,从而提高管线钢的强度。Mn 在提高强度的同时,还可以提高钢的韧性,但有研究表明 Mn 含量过高会加大控轧钢板的中心偏析,对管线钢的焊接性能造成不利影响^[11]。因此,根据板厚和强度的不同要求,管线钢中锰的加入量一般是 1.1%~2.0%。Nb 是管线钢中不可缺少的微合金元素,能通过晶粒细化、沉淀析出强化作用改善钢的强韧性。但有研究表明 Nb 对阻止焊接热影响区晶粒长大和改善热影响区韧性并不十分有效,这是因为在焊接峰值温度下,Nb 的碳、氮化物的热稳定性尚有不足^[11]。较低的 Nb 含量,在焊接热循环过程中不能有效抑制热影响区奥氏体晶粒长大,最终导致相变时产生大尺寸的块状 M/A 和粒状贝氏体产物,使韧性恶化。过高的 Nb 含量,在焊接热循环过程中会导致较大尺寸的沉淀析出,同时使晶粒均匀性恶化,也会损害热影响区韧性^[12-13]。研究结果表明,Nb 的加入量一般控制在 0.03%~0.075% 比较合理。

通过大量实验研究、工业试制分析和专家组研讨,认为外径为 1 422 mm、X80 管线钢的 Mn 含量最高不宜大于 1.85%,Nb 的含量应控制在 0.04%~0.08% 之间。图 4、5 给出了按最新技术条件工业试制的外径为 1 422 mm X80 钢管的环焊缝及热影响区在 -10℃ 下的 CVN 值,可以看出其合格率超过 97%。

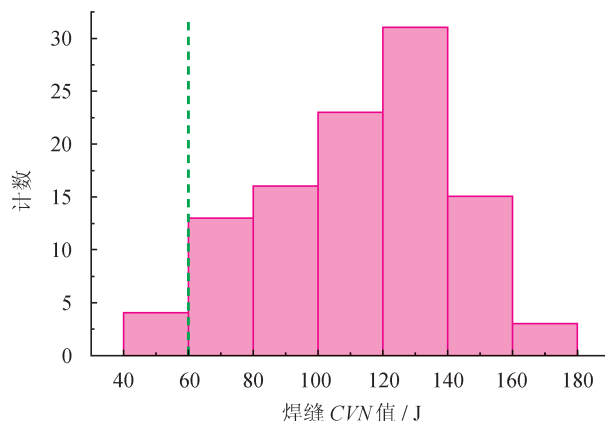


图4 外径为 1 422 mm X80 钢管环焊缝的 CVN 分布图

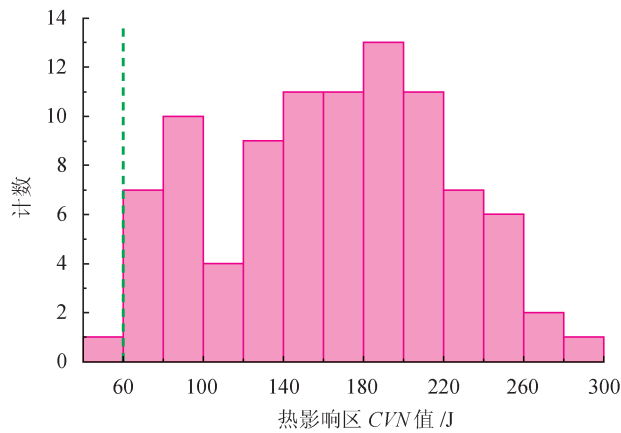


图 5 外径为 1 422 mmX80 钢管热影响区的 CVN 分布图

2.1.2 其他合金元素

Ti 是强的固 N 元素，在管线钢中可形成细小的高温稳定 TiN 析出相。这种细小的 TiN 粒子可有效地阻碍再加热时奥氏体晶粒长大，有助于提高 Nb 在奥氏体中的固溶度，同时对改善焊接热影响区的冲击韧性有明显作用。研究表明 Ti/N 的化学计量比为 3.42 左右，利用含量为 0.02% 左右的 Ti 就可以固定钢中含量为 0.006% 的 N。管线钢中的 N 含量一般不超过 0.008%。因此技术条件中 Ti 的含量规定控制在 0.025% 以下。

Cr、Mo 是扩大 γ 相区，推迟 α 相变时先析铁素体形成、促进针状铁素体形成的主要元素，对控制相变组织起重要作用，在一定的冷却条件和终止轧制温度下超低碳管线钢中加入 0.15% ~ 0.35% 的 Mo 和低于 0.35% 的 Cr 就可获得明显的针状铁素体及贝

氏体组织，通过组织的相变强化提高钢的强度。

Cu、Ni 可通过固溶强化作用提高钢的强度，同时 Cu 还可以改善钢的耐蚀性，Ni 的加入主要是改善 Cu 在钢中易引起的热脆性，且对韧性有益。在厚规格管线钢中还可补偿因厚度的增加而引起的强度下降。一般管线钢中铜含量低于 0.30%，镍含量低于 0.5%。

为了更好地稳定产品的理化性能，保证钢管具有良好的现场焊接性，结合国内管线钢生产中合金元素的实际控制能力，外径为 1 422 mmX80 钢管材技术条件根据钢管类型对 C、Mn、Nb、Cr、Mo 和 Ni 的含量进行了约定。通过试验研究，并组织冶金和焊接专家讨论协商，确定管线钢中 C 的含量目标值为 0.060%，Mn 的目标值为 1.75%，Nb 的目标值为 0.06%。直缝钢管中 Ni 目标值为 0.20%，必须加入适量的 Mo，且含量应大于 0.08%。螺旋缝钢管中 Cr、Ni、Mo 的目标值均为 0.20%。考虑到生产控制偏差、检测误差及经济性，外径为 1 422 mm X80 钢管材技术条件中规定 C 含量不大于 0.070%，Mn 含量不大于 1.80%。直缝钢管 Nb 的含量范围为 0.04% ~ 0.08%，Mo 的含量范围为 0.08% ~ 0.30%，Ni 的含量范围为 0.10% ~ 0.30%；螺旋缝钢管中 Nb 的含量范围为 0.05% ~ 0.08%，Cr 的含量范围为 0.15% ~ 0.30%，Mo 的含量范围为 0.12% ~ 0.27%，Ni 的含量范围为 0.15% ~ 0.25%。表 2 给出了外径为 1 422 mmX80 钢管材技术条件确定的化学成分含量要求。

表 2 外径为 1 422 mm X80 钢管的化学成分要求表

元素	产品分析结果	螺旋缝钢管组成推荐范围	直缝钢管组成推荐范围
碳	≤ 0.09%	≤ 0.070%	≤ 0.070%
硅	≤ 0.42%	≤ 0.30%	≤ 0.30%
锰	≤ 1.85%	≤ 1.80% ^{c)}	≤ 1.80% ^{c)}
磷	≤ 0.022%	≤ 0.015%	≤ 0.015%
硫	≤ 0.005%	≤ 0.005%	≤ 0.005%
铌 ^{a)}	≤ 0.11%	0.050% ~ 0.080% ^{d)}	0.040% ~ 0.080% ^{d)}
钒 ^{a)}	≤ 0.06%	≤ 0.03%	≤ 0.030%
钛 ^{a)}	≤ 0.025%	≤ 0.025%	≤ 0.025%
铝	≤ 0.06%	≤ 0.06%	≤ 0.06%
氮	≤ 0.008%	≤ 0.008%	≤ 0.008%
铜	≤ 0.30%	≤ 0.30%	≤ 0.30%
铬	≤ 0.45%	0.15% ~ 0.30%	≤ 0.30%
钼	≤ 0.35%	0.12% ~ 0.27%	0.08% ~ 0.30%
镍	≤ 0.50%	0.15% ~ 0.25%	0.10% ~ 0.30%
硼 ^{b)}	≤ 0.000 5%	≤ 0.000 5%	≤ 0.000 5%
CE _{pcm}	≤ 0.23%	≤ 0.22%	≤ 0.22%

注：a) V + Nb + Ti ≤ 0.15%；b) 不得有意加入硼和稀土元素；c) 碳含量比推荐最大含量每减少 0.01% 时，锰推荐最大含量可增加 0.05%，但锰含量不得超过 1.85%；d) 碳含量比推荐最大含量每减少 0.01% 时，铌推荐最大含量可增加 0.005%，但铌含量不得超过 0.085%

2.2 止裂韧性

API SPEC 5L:2012 和 ISO 3183:2012 中规定的 4 种止裂韧性计算方法中, 只有对 BTC 计算结果进行修正的方法适用于 12 MPa、外径为 1 422 mmX80 钢管道的止裂韧性计算^[14], 其中修正系数的确定来源于 X80 钢管道全尺寸爆破试验数据库。目前国际上通用的全尺寸爆破试验数据库如上篇霍春勇文章中的图 6 所示, 由此确定的中俄东线管道工程止裂韧

性修正方法为 TGRC2, 修正系数为 1.46。

中俄东线的天然气组成如表 3 所示, 按照中俄东线实际工况管径为 1 422 mm、壁厚为 21.4 mm、输送压力为 12 MPa、运行温度为 0 ℃进行止裂韧性计算。用 BTC 方法计算其止裂韧性结果为 167.97 J, 按 1.46 倍修正后止裂韧性为 245 J, 结果如表 4 所示。表 4 中还给出了 Leis-2、Eiber、Wilkowski 等方法的修正结果。

表 3 中俄东线计算用气质组成表

组分	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	N ₂	CO ₂	H _c	H ₂
含量	91.41%	4.93%	0.96%	0.41%	0.24%	1.63%	0.06%	0.29%	0.07%

表 4 中俄东线止裂韧性计算结果表

计算方法	BTC/J	BTC + Eiber 修正	BTC + Leis-2 修正	BTC + Wilkowski 修正	BTC + TGRC2 修正
CVN 值 /J	167.97	251	250	286	245

由于现有的全尺寸气体爆破实验数据库无法覆盖中俄东线天然气管线 X80 钢级、1 422 mm 外径、12 MPa 压力下输送富气的设计参数要求。因此, 2015 年 12 月在中国石油管道断裂控制试验场, 针对中俄东线天然气管道具体的设计参数和服役条件, 对外径为 1 422 mmX80 钢管的延性断裂止裂指标进行了全尺寸爆破试验验证。结果表明, 采用 BTC 方法计算, 并用 TGRC2 方法进行修正后的外径为 1 422 mm 的 X80 钢管止裂韧性指标为 245 J 是安全和经济的。

2.3 非金属夹杂物

近年来, 许多管道工程使用的高钢级管线钢均在金相检测过程中发现了超尺寸大型夹杂物。管线钢中大型夹杂物的存在会对其力学、焊接和耐腐蚀等性能产生不利影响, 进而给油气输送管道的安全运营带来很大的工程风险。为了有效降低管线钢中大型夹杂物的存在给管道输送系统带来的风险, 石油管工程技术研究院李炎华^[15]等, 针对高钢级管线钢中大型夹杂物的特性进行了大量的研究工作, 进而为高钢级管线钢中大型夹杂物级别判定标准的制订提供了依据。

目前, 国内管线钢夹杂物评判通常采用 ASTM E 45-2005:Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel 和 GB/T 10561—2005 《钢

中非金属夹杂含量的测定标准评级图显微检验法》。ASTM E45-2005 将夹杂物按形态和分布分为 4 类, 即 A(硫化物类)、B(氧化铝类)、C(硅酸盐类)和 D(球状氧化物类); 而 GB/T 10561-2005 将夹杂物分为 5 类, 即除上述 4 种外, 还增加了 DS(单颗粒球类)。

李炎华等从大型夹杂物在高钢级管线钢冶炼过程中的运动规律角度进行了分析, 认为对于形态呈单颗粒球状的 DS 类夹杂物的厚度应当控制在 50 μm 以下, 对于形态比小于 3 的 B 类夹杂物, 其厚度应当控制在 33 μm 以下, 即如果按照标准 GB/T 10561—2005 对管线钢中的大型夹杂物进行评定, DS 类夹杂物评级应该在 2.5 级(53 μm)以下。中俄东线天然气管道工程用外径为 1 422 mm 的 X80 钢管材技术条件采用了这一研究成果, 在非金属夹杂物级别验收极限中, 定义了超标大型夹杂物的概念, 并给出了验收和复验标准, 如表 5 所示。

2.4 力学性能试样取样位置

“西气东输”二线建成以来, 油气管道工程用螺旋缝埋弧焊钢管的管径均小于 1 219 mm, 为了取样方面, 热轧板卷技术条件中力学性能取样位置均要求与板卷轧制方向成 30° 取样。取样角度与板宽和钢管管径的关系, 如式(1)所示。

$$\sin\alpha=B/(\pi D) \tag{1}$$

式中 α 表示螺旋角, (°); B 表示板宽, mm; π 表示圆周率; D 表示钢管直径, mm。

表 5 外径为 1 422 mmX80 钢管技术条件中的非金属夹杂物级别限定表

类型	A ^{a)}		B ^{a), b), c)}		C ^{a)}		D ^{a)}		DS ^{b), c)}
系列	薄	厚	薄	厚	薄	厚	薄	厚	—
级别	≤ 2.0%	≤ 2.0%	≤ 2.0%	≤ 2.0%	≤ 2.0%	≤ 2.0%	≤ 2.0%	≤ 2.0%	≤ 2.5%

注：厚度大于 50 μm 的 B 类夹杂物以及评级超过 2.5 的 DS 类夹杂物均定义为超标大型夹杂物；a) 如果代表一熔炼批试样的 A、B、C、D 类夹杂物中有一类及以上的评价不符合规定要求，则将该熔炼批判为不合格；b) 如果评价过程中发现某一视场中同时存在 2 个或 2 个以上的同类或不同类超标大型夹杂物，将该熔炼批判为不合格；c) 如果代表一熔炼批钢管的夹杂物检验中发现某一视场中存在单个超标大型夹杂物，则需要同一熔炼批中再随机抽取 2 个试样进行复验。如果 2 个试样的复验结果均符合 A、B、C、D 类夹杂物规定要求且未出现超标大型夹杂物，则除原取样不合格的那根钢管外，该熔炼批合格。如果任一个试样的复验结果不符合 A、B、C、D 类夹杂物规定要求或出现了超标大型夹杂物，则该熔炼批判为不合格。

按目前主流热轧板卷产品宽度 1 500 ~ 1 600 mm 计算，对于管径 1 219 mm 的螺旋缝埋弧焊管，热轧板卷的取样角度为 23.1° ~ 24.7°，对于管径 1 422 mm 的螺旋缝埋弧焊管，热轧板卷的取样角度为 19.6° ~ 21°。因此对于外径 1 422 mm 的螺旋缝埋弧焊管，与板卷轧制方向成 20° 取力学性能样，更符合实际情况。

图 6、7 给出了实际生产的热轧板卷 20°、30° 位置的力学性能对比图。可以看出与轧制方向夹角 20° 位置的屈服强度、抗拉强度、DWTT 剪切面积高于 30° 位置，若按与轧制方向成 30° 位置取样，

容易低估热轧板卷的力学性能，造成不必要的浪费。因此在中俄东线天然管道工程用热轧板卷技术条件中力学性能的检测取样位置更改为与轧制方向成 20° 位置。

3 外径为 1 422 mmX80 钢级大口径钢管的开发

2013 年以来，中石油组织相关科研单位和国内大型钢铁企业和制管企业，开展了外径为 1 422 mm 的 X80 钢级大口径钢管的联合开发。在研发阶段，共进行单炉产品试制 3 轮，参与生产制造企业 15 家，试制产品 2 000 t。工业应用阶段，进行了 1 次千吨级小批量试制，参与生产制造企业 8 家，试制产品 6 000 t。经第三方检测评价表明，试制的外径 1 422 mm、X80 钢管的化学成分和力学性能均符合中俄东线天然气管道工程用外径 1 422 mm、X80 钢管技术条件要求。试制钢管的屈服强度为 595 ~ 668 MPa，抗拉强度为 677 ~ 745 MPa，母材 CVN 值为 324 ~ 486 J，焊缝 CVN 值为 138 ~ 232 J，热影响区 CVN 值为 172 ~ 354 J。通过环焊试验证明，所试制的外径 1 422 mm、X80 钢管的环焊缝性能均能满足标准要求。

4 结论

1) 中俄东线天然气管道工程用外径为 1 422 mm、X80 钢管技术条件，借鉴了 API SPEC 5L：2012 的最新成果，结合中俄东线工程的具体特点，提出了适合外径为 1 422 mm 管材的化学成分、夹杂物评定、CVN 值、力学性能试验方法等关键技术指标要求，技术条件具有很强的可操作性，既能满足工程要求，也能适应生产情况，其研究经验在我国未来的天然气管道工程建设上推广应用。

2) 中俄东线天然气管道工程用外径为 1 422

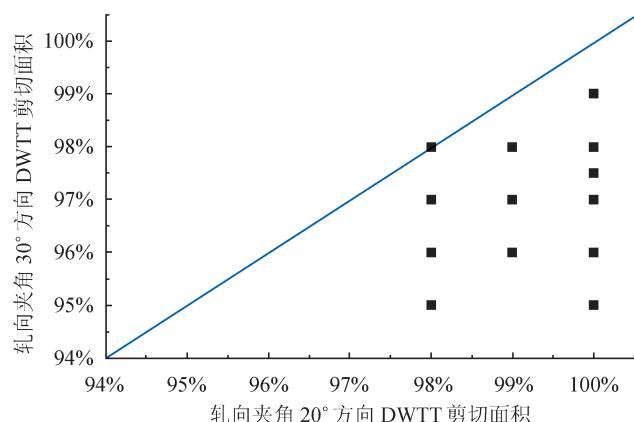


图 6 热轧板卷 20°、30° 位置的拉伸性能图

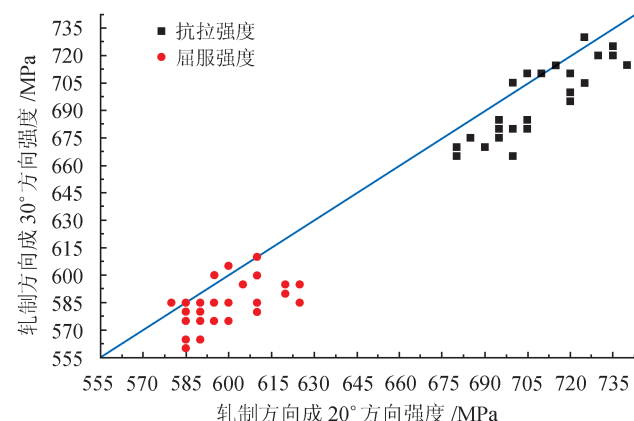


图 7 热轧板卷 20°、30° 位置的 DWTT 性能图

mm、X80 钢管技术条件规定管线钢采用低 C、Mn 的成分设计, 并对添加的 Mo、Ni、Nb、V、Ti、Cu、Cr 等合金元素含量进行了严格的限定, 是国内油气管道建设以来对化学成分要求最为严格的工程技术条件。工业试制结果表明, 该技术条件制订的化学成分指标符合生产要求, 并可有效解决管材的理化性能和焊接性能稳定性问题。

3) 采用 BTC 方法计算, 并用 TGRC2 方法进行修正来确定外径为 1 422 mm、X80 钢管的止裂韧性指标是安全和经济的, 外径为 1 422 mm、X80 钢管的止裂韧性指标应为 245 J。

4) 中俄东线天然气管道工程用外径为 1 422 mm、X80 管材技术条件在非金属夹杂物级别验收极限中, 采用最新研究成果定义了超标大型夹杂物的概念, 并给出了验收和复验标准, 有利于提高钢管的力学, 焊接, 耐腐蚀等性能。

5) 对于外径为 1 422 mm 的螺旋缝埋弧焊管用热轧板卷, 与板卷轧制方向成 20° 取力学性能样, 更符合生产实际情况, 对板卷的力学性能评估也更为准确。因此在中俄东线天然管道工程用热轧板卷技术条件中力学性能的检测取样位置为与轧制方向成 20° 位置。

参 考 文 献

- [1] 刘清梅, 杨学梅, 赵谨, 封娇洁. 中国管道建设情况及管道用钢发展趋势 [J]. 上海金属, 2014, 36(4): 34-37.
Liu Qingmei, Yang Xuemei, Zhao Jin, Feng Jiaojie. Situation of China pipeline construction and development trend of pipe steel[J]. Shanghai Metals, 2014, 36(4): 34-37.
- [2] 彭涛, 程时遐, 吉玲康, 张骁勇, 高惠临. X100 管线钢在应变时效中的脆化 [J]. 热加工工艺, 2013, 36(2): 179-183.
Peng Tao, Cheng Shixia, Ji Linggang, Zhang Xiaoyong, Gao Huilin. Embrittlement of X100 pipeline steel during strain aging[J]. Hot Working Technology, 2013, 36(2): 179-183.
- [3] 李鹤林, 吉玲康. 西气东输二线高强韧性焊管及保障管道安全运行的关键技术 [J]. 世界钢铁, 2009, 9(1): 56-64.
Li Helin, Ji Linggang. High toughness welded pipe and the key technologies of ensuring the safety of pipeline operation of 2nd West-East Gas Pipeline[J]. World Steel, 2009, 9(1): 56-64.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 9711 石油天然气工业管线输送系统用钢管 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 9711 Petroleum and natural gas industries—Steel pipe for pipeline transportation systems[S]. Beijing: China Standard Press, 2012.
- [5] International Organization for Standardization. ISO 3183 Petroleum and natural gas industries—Steel pipe for pipeline transportation systems[S]. Geneva: ISO Copyright Office, 2012.
- [6] American Petroleum Institute. API SPEC 5L specification for line pipe[S]. 45th ed. Washington DC: API Publishing Services, 2012.
- [7] 高惠临. 管线钢管韧性的设计和预测 [J]. 焊管, 2010, 33(12): 5-12.
Gao Huilin. The design and prediction of linepipe toughness[J]. Weld Pipe and Tube, 2010, 33(12): 5-12.
- [8] 尚成嘉, 王晓香, 刘清友, 付俊岩. 低碳高铌 X80 管线钢焊接性及工程实践 [J]. 焊管, 2012, 35(12): 11-18.
Shang Chengjia, Wang Xiaoxiang, Liu Qingyou, Fu Junyan. Weldability of low carbon and high niobium X80 pipeline steel and its engineering practice[J]. Weld Pipe and Tube, 2012, 35(12): 11-18.
- [9] Bai Lu, Lige T, Ding Hongsheng, Wang Li, Kang Qilan, Bai Shi-wu. The influence of the chemical composition of welding material used in semi-automatic welding for pipeline steel on mechanical properties[C]//ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 7-10 October 2008, Evanston, Illinois, USA. DOI:http://dx.doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72110
- [10] 孙磊磊, 郑磊, 章传国. 欧洲钢管集团管线管的发展和现状 [J]. 世界钢铁, 2014, 14(1): 45-53.
Sun Leilei, Zheng Lei, Zhang Chuanguo. Linepipe development and current status of Europipe Group[J]. World Steel, 2014, 14(1): 45-53.
- [11] 高惠临. 管线钢与管线钢管 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2012: 22-27.
Gao Huilin. Pipeline steel and linepipe[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2012: 22-27.
- [12] Wang BX, Liu XH, Wang GD. Correlation of microstructures and low temperature toughness in low carbon Mn-Mo-Nb pipeline steel[J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(12): 1522-1528. DOI: http://dx.doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000326
- [13] 缪成亮, 尚成嘉, 王学敏, 张龙飞, Subramanian M. 高 Nb X80 管线钢焊接热影响区显微组织与韧性 [J]. 金属学报, 2010, 46(5): 541-546.
Miao Chengliang, Shang Chengjia, Wang Xuemin, Zhang Long-fei, Subramanian M. Microstructure and toughness of HAZ in X80 pipeline steel with high Nb content[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(5): 541-546.
- [14] 霍春勇, 李鹤林. 西气东输二线延性断裂与止裂研究 [J]. 金属热处理, 2011, 36(增刊): 4-9.
Huo Chunyong, Li Helin. Ductile fracture arrest toughness of 2nd West-East Gas Pipeline[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(Suppl.): 4-9.
- [15] 李炎华, 吉玲康, 池强, 熊庆人. 高钢级管线钢中大型夹杂物的特性 [J]. 管道技术与设备, 2013(1): 4-6.
Li Yanhua, Ji Linggang, Chi Qiang, Xiong Qingren. Characteristics of large inclusions in high grade pipeline steel[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2013(1): 4-6.

(修改回稿日期 2016-04-14 编辑 何 明)