

# 我国高钢级管线钢和钢管应用基础研究进展及展望

冯耀荣\*, 霍春勇, 吉玲康, 李鹤林

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, 中国石油集团石油管工程技术研究院, 西安 710077

\* 通信作者, Fengyr@cnpcc.com.cn

收稿日期: 2016-04-19

**摘要** 回顾我国油气输送管道工程、高钢级管线钢和钢管的研发应用历程及取得的成果, 指出它们的发展方向。我国油气输送管道工程、高钢级管线钢和钢管的研发应用具有研发周期短、应用速度快、实施效果好等显著特点。经过近 20 年的努力, 我国在油气输送管道, 特别是大口径、高压输送管道, 管型、钢级、材质、尺寸等参数优化和高钢级管材研发应用等方面达到国际领先水平。研发形成了 X70/X80 钢级材质选用、针状铁素体管线钢组织分析鉴别与评定技术、管型选用和螺旋埋弧焊管残余应力控制技术、高压输气管道断裂控制技术、地震断裂带等基于应变设计地区管材变形控制技术、厚壁高钢级管线钢及钢管试验检测评价技术、高钢级管线钢焊接热影响区局部脆化的脆化机理、断裂规律与预防技术。自主研发了 X70/X80 系列热轧板卷和大口径厚壁螺旋埋弧焊管制造技术、宽厚板和大口径厚壁直缝埋弧焊管制造技术、感应加热弯管和管件成分设计及制造工艺技术。将 I 类地区的设计系数提高到了 0.8, 将 X80 管材口径扩大至 1 422 mm, 初步完成 X90 管线钢和钢管的研制。为更好地满足大口径高压输气管道工程发展的需求, 必须进一步深化应用基础研究, 联合进行产品研发与技术攻关, 形成大口径高钢级输气管道输量与其他参数(压力、钢级、设计系数、管径、壁厚等)的优化技术。建立或完善管道应变设计、可靠性设计、高压输气管道断裂控制等理论和方法。研究解决 X90~X120 高钢级管线钢和钢管屈服比、应变时效、低温韧性、屈服强度测试等关键技术难题, 掌握高钢级管材成分、组织、性能、工艺等的相关性。联合冶金和制管企业, 形成批量生产能力。研究形成 X90~X120 管材现场焊接技术, 进一步提高环焊缝质量性能水平。最终实现高钢级管线钢和钢管生产和应用技术的全面突破。

**关键词** 高钢级管线钢; 高钢级管线钢管; 管线; 应用基础研究; 研究进展; 发展展望

## 1 我国管道工程与高钢级管线钢和钢管研发应用成效

石油和天然气占全球一次能源的 57%, 我国陆上 70% 石油和 99% 天然气依靠管道输送, 油气管道是国民经济的生命线。根据国家能源规划, 中国石油天然气集团完成了油气管道和管网建设的全面布局, 特别是“十一五”以来开始建设与西北中亚、东北俄罗斯、西南缅甸相连的 3 大陆上油气通道, 统筹国内外资源与市场, 基本上形成了连通海外、覆盖全国的油气骨

干管网。

为了满足长距离大输量高压天然气管道输送的需要, 中国石油集团整体部署, 科技管理部门组织开展了若干重大科技攻关, 开展了高钢级管线钢管研发和应用关键技术研究, 使我国在较短的时间内, 将输气管线的钢级由 X52、X60、X65 提升至 X70 和 X80, 在过去螺旋埋弧焊管的基础上发展了直缝埋弧焊管, 产品质量、性能均达到国际先进水平。成功研发了系列 X70、X80 大口径、厚壁螺旋埋弧焊管和直缝埋弧焊管及弯管和管件, 形成了规模化的生产制造能

引用格式: 冯耀荣, 霍春勇, 吉玲康, 李鹤林. 我国高钢级管线钢和钢管应用基础研究进展及展望. 石油科学通报, 2016, 01: 143-153  
FENG Yaorong, HUO Chunyong, JI Lingkang, LI Helin. Progress and prospect of research and application of high grade pipeline steels & steel pipes in China. Petroleum Science Bulletin, 2016, 01: 143-153. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.009

力,使输气管线压力从 6.3 MPa 逐步提升至 8.4 MPa、10 MPa 和 12 MPa,单管输送能力达到 300 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ 。在管线钢和钢管的研发和应用方面,我们用不到 20 年的时间取得了发达国家用将近 40 年才取得的研究成绩(见图 1)<sup>[1-6]</sup>。

我国管道工程发展、高钢级管线钢及钢管研发应用具有研发周期短、应用速度快、实施效果好的显著特点,建成了全世界瞩目的西气东输管线和全球规模最大的西气东输二线和三线,材料和设备基本实现国产化,我国的 X70、X80 钢管制造技术及应用规模达到国际领先水平。材料及重大装备的国产化带动了产业升级,推动了民族工业发展。我国高压大口径输气管道使全国 5 亿人受益,为我国能源安全和生态文明建设做出了重大贡献。

## 2 我国高钢级管线钢和钢管应用基础研究的主要进展

### 2.1 X70/X80 钢级材质选用及针状铁素体管线钢组织分析鉴别与评定技术<sup>[7-11]</sup>

通过研究不同组织状态 X70/X80 管线钢的性能特

点,揭示了管线钢成分、组织、性能、工艺之间的相关性。研究发现针状铁素体型管线钢具有韧性好、抗氢致开裂(HIC)性能好、形变强化抗力高和包辛格效应敏感性低等特点。确定了在重要大口径高压输气管线上采用针状铁素体型管线钢的技术路线。在对国内外文献进行系统调研的基础上,采用光学金相和电子金相等手段,系统研究了针状铁素体管线钢的组织特征(图 2),提出了便于工程研究和检验的简化的组织鉴别和评定方法(即将针状铁素体管线钢组织简化为铁素体(多边和准多边形铁素体)和贝氏体(针状铁素体 AF、粒状贝氏体),研发了可提高组织中各组成相反差的特殊腐蚀显示技术。

研究制定了依据管线钢硬组织带(M/A 或珠光体)的条数、在视域内的贯穿程度、连续性以及与夹杂物相关性对带状组织进行评定的方法。提出了针状铁素体型管线钢铁素体晶粒度评定方法(用于生产检验的比较法、用于仲裁的截点法)。解决了针状铁素体管线钢组织分析鉴别、带状组织和晶粒度评定技术难题。根据实验研究结果编制、出版了高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱及西气东输管线、西气东输二线等 X70/X80 管道工程用管线钢和钢管系列标准。

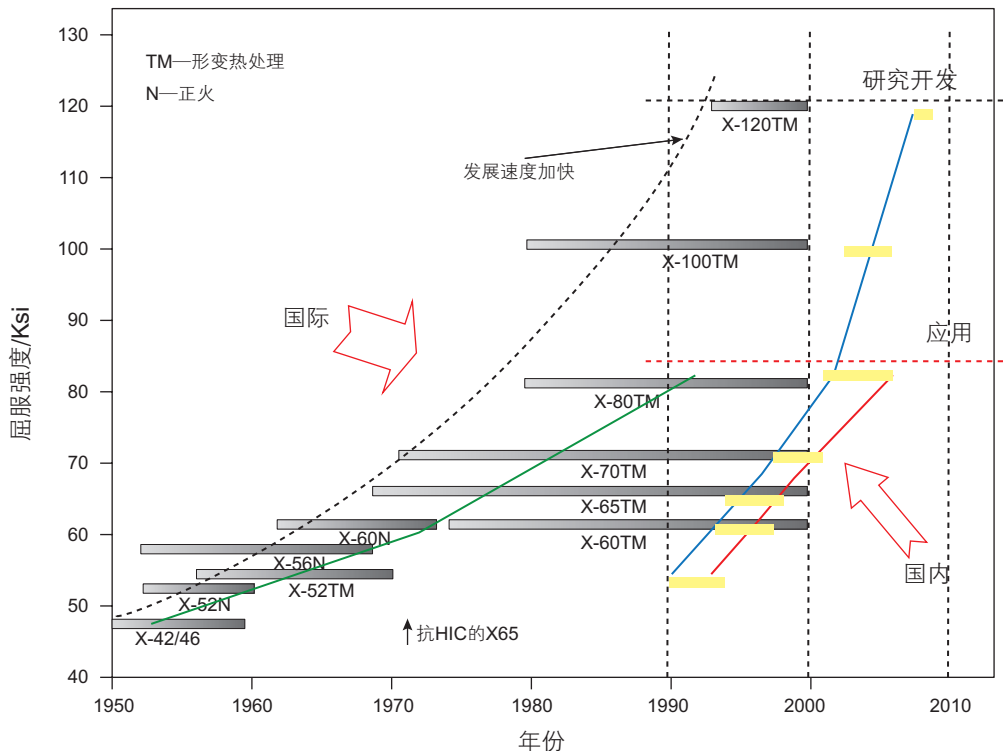


图 1 管线钢和钢管研究应用进展国内外对比

Fig. 1 Pipeline research and application progress

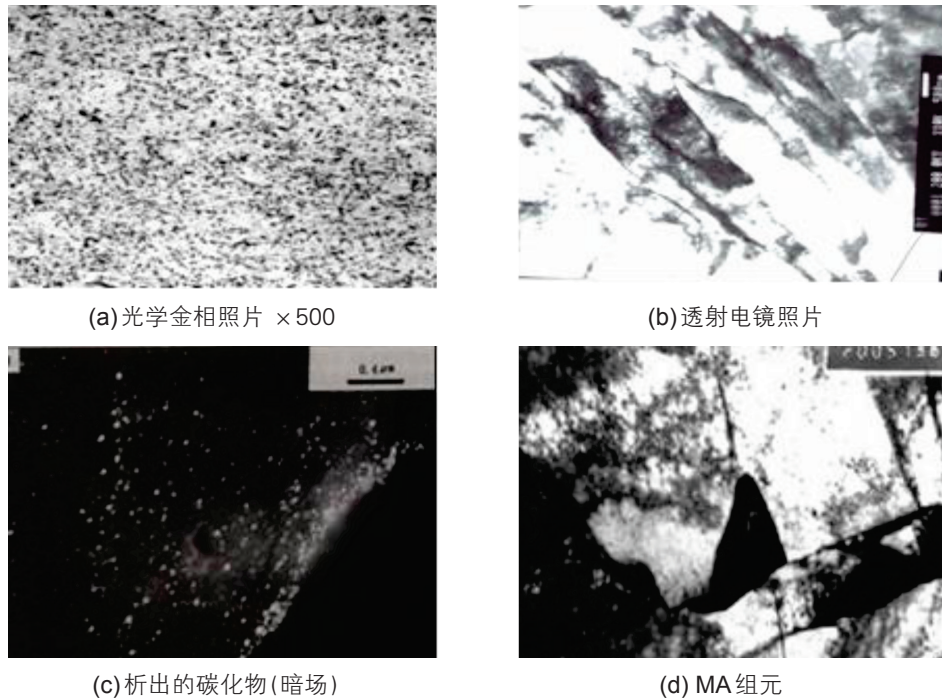


图2 针状铁素体的典型形貌  
Fig. 2 Typical morphology of acicular ferrite

2.2 X70/X80 钢级管型选用及螺旋埋弧焊管残余应力控制技术<sup>[8,12]</sup>

对国产大口径螺旋埋弧焊管、J-C-O成型并扩径的直缝埋弧焊管(JCOE)和进口U-O成型并扩径的直缝埋弧焊管(UOE)进行了系统对比评价和试验研究,结果表明国产大口径螺旋埋弧焊管和JCOE直缝埋弧焊管质量水平可以达到进口UOE焊管水平,螺旋埋弧焊管存在残余应力大、不稳定以及焊缝表面质量差的缺点。研究提出了提高国产螺旋埋弧焊管质量的措施,制定了高压大口径输气管道国产螺旋埋弧焊管技术要求。研究提出了大口径高压输气管线管型选用指导意见,提出在一般情况下(非酸性环境中),只要螺旋埋弧焊管规格尺寸满足要求,螺旋埋弧焊管和直缝埋弧焊管可以等同采用,推荐螺旋埋弧焊管和直缝埋弧焊管联合使用。通过采取一定的工艺措施,并提出材料补充要求,可进一步扩大国产螺旋埋弧焊管的使用范围。

系统研究了螺旋埋弧焊管和直缝埋弧焊管残余应力的大小、分布特点及成型工艺、水压试验对残余应力的影响规律。在成型工艺调整合适的情况下,螺旋埋弧焊管的残余应力水平可以达到或接近直缝埋弧焊管的水平。揭示了环切试验中切口位置对残余应力的影响,建立了切口张开量与残余应力之间的对应关系(图3),提出了用切口张开量预测和控制焊管残余应力的方法及判据,并在焊管生产中得到应用。

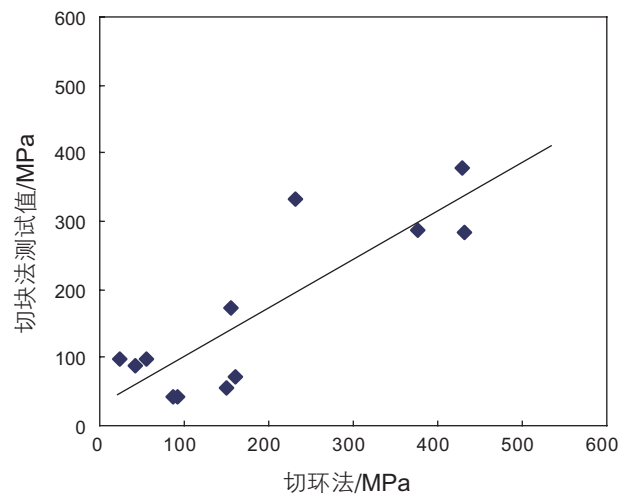


图3 切块法与切环法残余应力值的对应关系  
Fig. 3 The corresponding relationship of residual stress between ring cut value and piece cutting value

2.3 X70/X80 高压输气管道断裂控制技术<sup>[2,5-6,13]</sup>

采用理论分析、数值计算、实验研究等方法系统研究了高压输气管道的动态断裂与止裂行为。在分析国际相关研究成果的基础上,结合对管线钢管止裂韧性测试和分析研究,提出了高钢级输气管线断裂控制的新参量M及止裂判据:  $M_c = C_v^{1/2} / \sigma_y > 0.0229$  及其修正公式  $M = A + RDt/3$  ( $M_c$ 为M参量临界值;  $C_v$ 为Charpy

冲击韧性值,  $J$ ;  $\sigma_y$ 为屈服强度, MPa;  $R$ 为应力比;  $D$ 为管径, mm;  $t$ 为壁厚, mm;  $A$ 为分布参数)。结合西气东输管道及国内管材生产的实际情况, 制定了西气东输管线的断裂控制方案。

针对西气东输二线管道的具体情况, 分析了影响管道止裂韧性的主要因素(管道几何参数、输送压力、天然气组分、沿线压力和温度分布等), 根据国际上全尺寸钢管气体爆破试验数据库、国内X80管材性能数据库、Battelle双曲线模型以及GasDecom软件对西气东输二线的止裂韧性要求进行了系统研究, 基于输气管道安全可靠性与经济可行性, 提出了西气东输二线管道管材止裂韧性要求。

自主开发了适用于富气组分的天然气减压波分析程序DecomWave。分析研究了西气东输二线气源的气质组分、冬夏季不同操作工况对减压波特性的影响, 提出了西气东输二线安全运行参数的控制要求。

在实验室研究的基础上, 模拟西气东输二线实际工况, 开展了X80管道实物的气体爆破试验(图4), 对西气东输二线管道止裂韧性指标的合理性及管道的安全性进行了验证。实验结果也表明, 螺旋埋弧焊管

的止裂能力优于直缝埋弧焊管。

研究还发现: 落锤撕裂试验(DWTT)可以准确地反映全尺寸钢管断裂行为、断口分离与钢管止裂能力成反比关系。2次爆破试验结果表明, 与Charpy冲击试验(CVN)相比, DWTT扩展能量能更好地表征钢管的止裂能力。

#### 2.4 地震断裂带等应变设计地区管材变形控制技术<sup>[5-6]</sup>

研究发现大应变管线钢管应具有连续的应力-应变行为(图5a), 其组织结构一般为铁素体+贝氏体+M(A)(马氏体和残余奥氏体)(图5b), 确定以屈强比、均匀塑性变形延伸率和应力比 $R_{t2.0}/R_{t1.0}$ 和 $R_{t5.0}/R_{t1.0}$ 作为其性能控制指标。系统研究确定了X70/X80大应变管线钢和钢管的关键技术指标、形变硬化和应变时效的影响规律和判据。使用量纲分析法获得钢管的临界屈曲应变的预测公式, 如下所示:

$$\varepsilon_b^{crit} = 0.070547 \times \left(\frac{D}{t}\right)^{-0.84508} \times \left(\frac{p}{p_y}\right)^{-0.0223329} \times \left(\frac{\sigma_y}{E}\right)^{-0.138764} \times \left(\frac{e_{5.0}}{e_{1.0}}\right)^{6.15051}$$



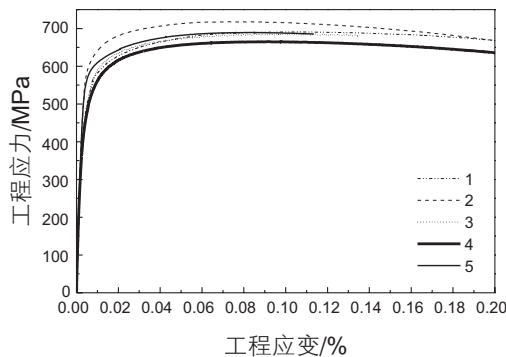
(a) 爆破试验场景



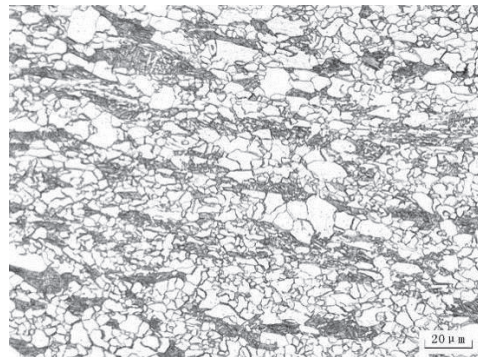
(b) 爆破口形貌图

图4 管线爆破试验场景及爆破口形貌

Fig. 4 The scene and fracture morphology of pipeline burst test



(a) 工程应力-应变曲线



(b) 大变形管线钢典型双相组织

图5 X70抗大变形管线钢管的组织和性能

Fig. 5 The stress-strain behavior and microstructure of X70 high strain pipeline steels

建立了能够全面准确反映载荷状态、材料性能、钢管规格、几何特性等因素的屈曲应变预测模型和方法。经过 1 000 余次数值模拟分析发现，只有当管体材料的流变应力比  $R_{2.0}/R_{1.0}$  和  $R_{5.0}/R_{1.0}$  分别超过 1.04 和 1.08 时，管体的屈曲应变(用 2D 平均压缩应变来表示)才能达到 1.5% 的水平(图 6)。(  $R_{1.0}$  为变形 1% 时的应力, MPa;  $R_{2.0}$  为变形 2% 时的应力, MPa;  $R_{5.0}$  为变形 5% 时的应力, MPa;  $D$  为管径, mm;  $t$  为壁厚, mm;  $p$  为内压力, MPa;  $p_y$  为内屈服压力, MPa;  $E$  为弹性模量;  $e_{5.0}$  为变形 5% 时的应变;  $e_{1.0}$  为变形 1% 时的应变;  $\sigma_y$  为屈服强度, MPa)

自主开发了能够确定大应变钢管内压+弯曲极限承载能力的全尺寸试验评价系统, 并进行了实物性能试验评价。经过大应变钢管的工业性试验验证, 确定各项技术指标合理可行。研究制定了西气东输二线、

中缅管线基于应变设计地区使用直缝埋弧焊管技术条件, 并在大应变钢管试验评价、检验验收和管道工程中得以广泛应用。

### 2.5 高钢级厚壁管线钢及钢管试验检测评价技术<sup>[5,6-11,14,15]</sup>

#### 2.5.1 异常断口分析评判技术

针对 X70/X80 壁厚管线钢和钢管落锤撕裂试验中出现的异常脆性断口问题, 对 DWTT 试验断口特别是异常断口进行了系统的分析研究, 综合研究了发生异常断口影响因素及其与载荷性质和材料品质之间的联系, 提出了 DWTT 试验断口和异常断口的分类方法、异常断口的评判方法与标准(图 7)。上述断口分类和评定方法纳入了西气东输、陕京二线和 X80 管线钢管工程应用标准, 并被川气东送管线、X80 工程

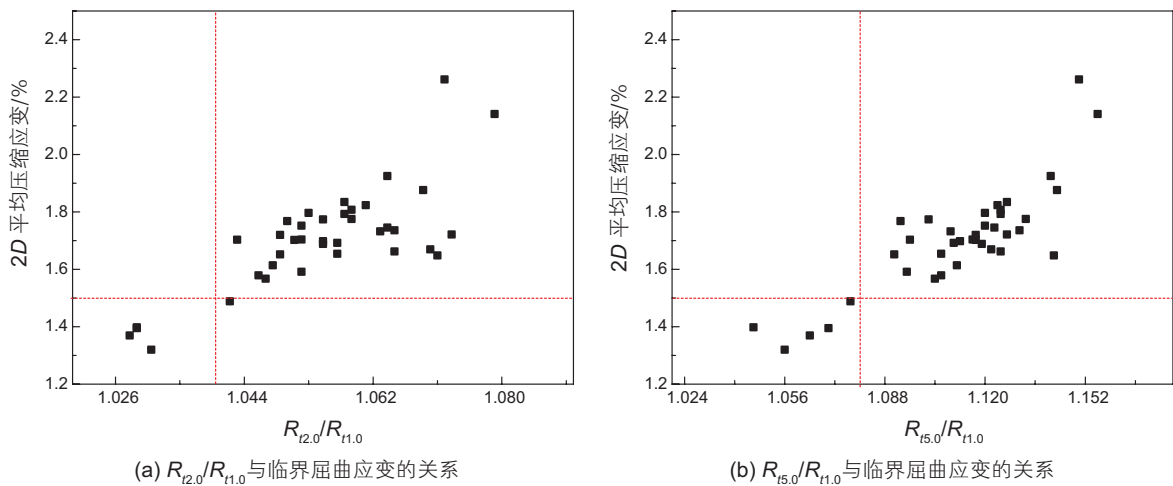


图 6 应力比与弯曲载荷下临界屈曲压缩侧 2D 长度平均压缩应变的关系

Fig. 6 Relationship between stress ratio and critical buckling average compression strain inside the 2D length on the bending side

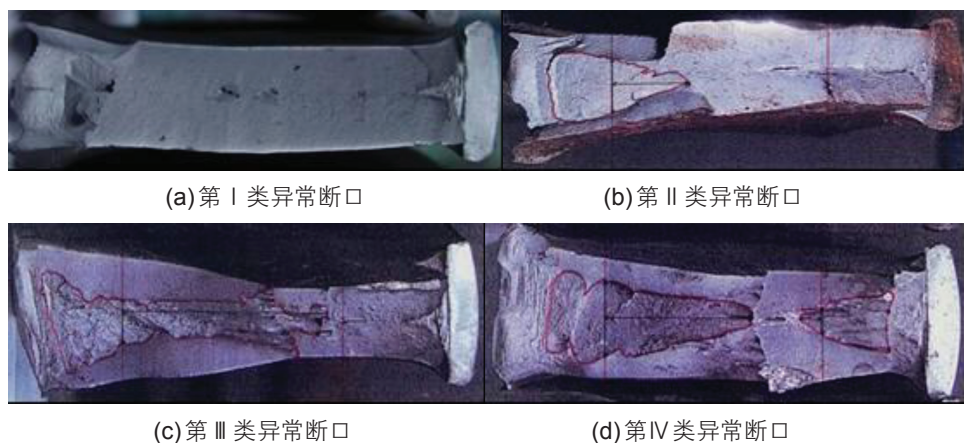


图 7 DWTT 异常断口分类

Fig. 7 The classification of DWTT abnormal fracture

应用段采用，同时纳入石油天然气行业标准和国家标准草案中，解决了高钢级管线钢和管线钢管应用中的技术难题。

2.5.2 断口分离分类及评判技术

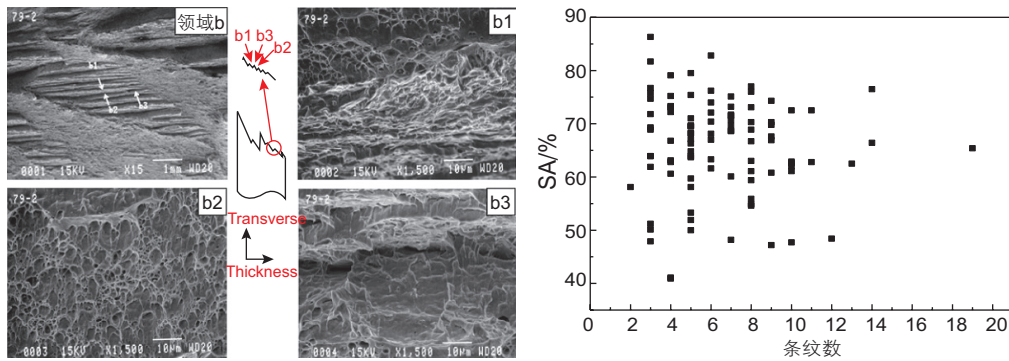
对X80 管线钢的断口分离现象进行了系统研究，发现夹杂物、带状偏析、微观结构等是引起断口分离的主要原因。研究制定了断口分离分级方法，采用该方法对西气东输二线试制的X80 管材断口分离情况进行了分析，对断口分离严重的钢厂提出改进建议，并提出了减轻或控制断口分离的措施。同时，对出现三角区 (arrowhead marking) 的DWT T试验断口特征进行了分析研究，确定在计算断口脆性面积时三度区按50%计算 (图8)。这些研究成果已经作为补充评定方法应用于西气东输二线管材的断口评定中，研究成果还为各制造厂家开发减少断口分离现象的制造工艺提

供了技术依据。

2.5.3 拉伸试验方法及屈强比

(1)通过对百余套X80 板卷 / 螺旋钢管、钢板 / 直缝钢管纵向和横向不同形式拉伸试样的试验研究，得到板 / 管之间的矩形和圆棒试样屈服强度对比关系。结果表明，X80 钢级管材包申格效应更加明显，相对于低钢级而言圆棒试样和条形试样的差异性更大，圆棒试样更接近于真实管道的情况，提出了采用圆棒试样进行X80 横向拉伸强度测试的方法。

(2)根据管材的受力情况，研究了临界缺陷长度和屈强比之间的关系，并对屈强比与管道安全性进行了分析研究，结果如图9和图10所示。根据先屈服后断裂 (YBB) 的判据 (即全截面屈服应力等于净截面断裂应力)，确定了焊管屈强比与焊管缺陷尺寸和宽板试样几何之间的关系。分析了钢管常规力学性能、抗



注：对断口上95个三角区的统计结果分析显示，三角区上条纹数在2~19个之间，最小剪切面积40.9%，最大86.3%，平均65.8%。

图8 三角区剪切面积的统计分析

Fig. 8 Statistical analysis of triangle shearing area

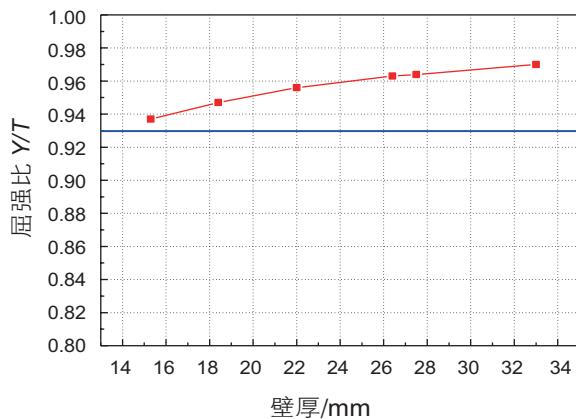
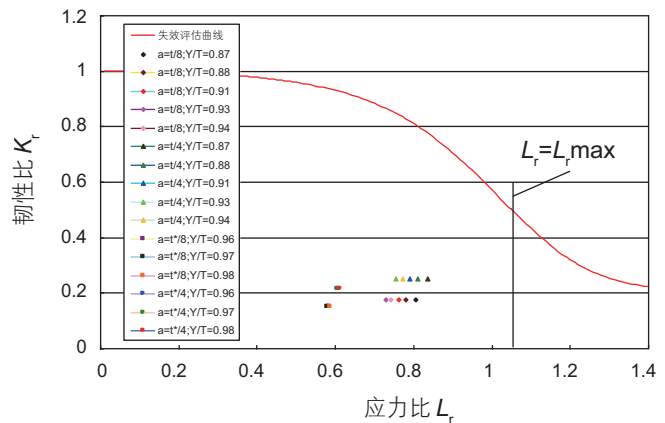


图9 3mm\*50mm 缺陷时，壁厚和最大屈强比的关系

Fig. 9 The wall thickness and the maximum Y/T ratio (3mm\*50mm defects)



注：t=18.4 mm, t\*=22.0 mm

图10 屈强比对X80管道安全性的影响

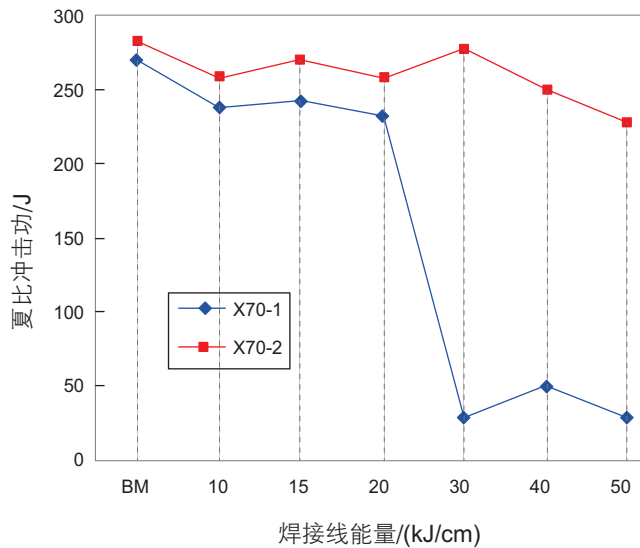
Fig. 10 The effect of defect on the safety of X80 pipeline

拉伸应力应变行为、均匀延伸率、硬化指数、钢管承压能力与屈强比之间的关系。最终根据理论计算及试验分析，对不同壁厚的X80 钢管屈强比进行了科学规定。该研究成果已经纳入西气东输二线X80、X70 板卷、钢板、螺旋钢管、直缝钢管等相关技术标准。

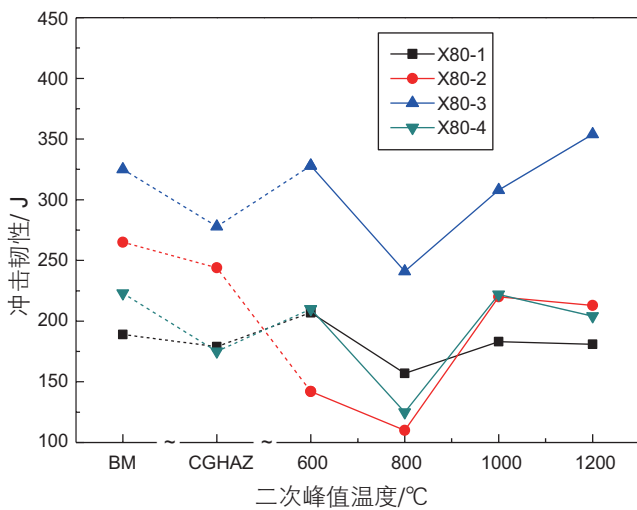
**2.6 高钢级管线钢焊接热影响局部脆化区的脆化机理、断裂规律与预防技术<sup>[4]</sup>**

运用管道工程学、材料强韧化理论和现代物理测试技术，对X70/X80 管线钢在焊接热过程中局部脆化的行为、断裂规律以及预防和控制措施进行了系统的研究。结果表明：管线钢在焊接热过程中存在3 种局部脆化形式。(1) 单道焊一次热循环中的粗晶区

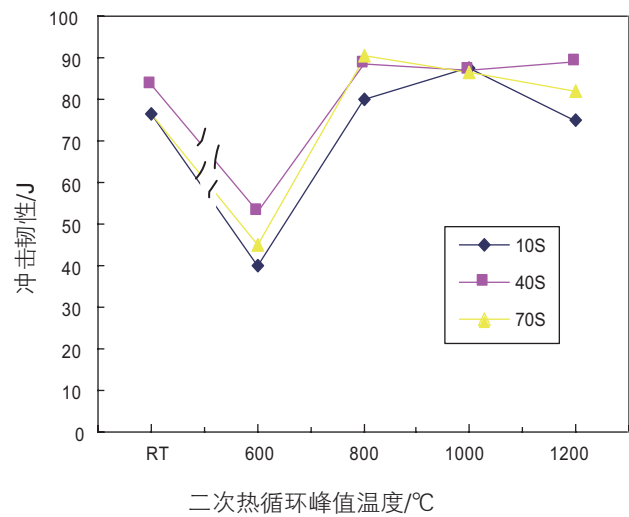
(CGHAZ)局部脆化(图 11a)，韧性损失可达 49%。(2) 多道焊二次热循环中的临界粗晶区(IRC GHAZ)局部脆化(图 11b)，韧性损失可达 69%。(3) 亚临界粗晶区(SCGHAZ)局部脆化(图 11c)，韧性损失可达 61%。导致CGHAZ局部脆化的原因是焊接热过程中的晶粒粗化和显微组织的变化。焊接高热输入条件下形成的多边形铁素体和珠光体，致使CGHAZ韧性恶化；中等焊接热输入促使针状铁素体生成，使CGHAZ韧性损伤程度降低。导致IRC GHAZ局部脆化的原因是焊接热过程中形成的粗大、富碳的M-A 组元和表现出来的组织遗传现象。导致管线钢SCGHAZ局部脆化的原因是焊接热过程中，基体内碳化物的析出粗化和残余奥氏体的热失稳分解。



(a) X70 单道焊粗晶区局部脆化



(b) X80 多道焊临界粗晶区局部脆化



(c) X80 亚临界粗晶区局部脆化

图 11 管线钢在焊接热过程中的三种局部脆化形式

Fig. 11 Three kinds local embrittlement of pipeline steels in welding thermal process

管线钢局部脆化区中裂纹的形核具有3种方式,即夹杂物形核、贝氏体铁素体板条与M-A组元界面处形核以及M-A组元内部形核。原奥氏体晶界、贝氏体铁素体板条束界可改变裂纹的扩展方向,从而降低裂纹的扩展速度。管线钢的显微组织形态对裂纹扩展有不同的作用。针状铁素体使裂纹扩展速度降低;块状铁素体对裂纹的阻止作用较小;M-A组元对裂纹的扩展没有阻止作用。根据实验观察和有限元数值分析的结果,建立了管线钢焊接局部脆化区的断裂模型。

在有关管线钢焊接局部脆化机理和断裂规律研究的基础上,提出了预防和控制焊接局部脆化的工艺途径和措施。

### 2.7 第3代管线钢和钢管应用关键技术研究

我国天然气长输管道工程的发展趋势是进一步增大输量并尽可能地降低建设成本。最近,我国相继与中亚国家和俄罗斯签订新的油气供应协议,将来需要建设输量为450亿~600亿 $\text{m}^3/\text{a}$ 的天然气管道。第2代(X70和X80)天然气管道工程技术已经不能满足超大输量的需求,需要发展新一代(第3代)管道工程技术(钢级X90/X100,管径1219~1422 mm,压力不低于12 MPa,输量300亿~600亿 $\text{m}^3/\text{a}$ ,设计系数0.8)。“十二五”期间,中国石油集团设立第3代管线钢和钢管应用研究重大科技专项,取得了重要的理论和技术进展。

#### 2.7.1 输气管道提高强度设计系数工业性应用研究<sup>[16-19]</sup>

分析研究了提高强度设计系数对管道临界缺陷尺寸、刺穿抗力、应力腐蚀开裂敏感性、失效概率及运行风险的影响,表明我国输气管道在I类地区采用0.8设计系数是可行的(图12)。系统研究确定了0.8设计系数管材关键性能指标和质量控制要求,制定了西气东输三线0.8设计系数管道用X80螺旋缝埋弧焊管技术条件,在西三线示范工程中成功敷设261 km,节约管材12.6万t,节约采购成本约1亿元。

系统分析了X80厚壁三通的断裂抗力和极限承载能力,在确保三通极限承载能力不小于3.5倍管道设计压力的情况下,管件壁厚减薄20%~30%,减小了厚壁管件设计的过度保守性,降低了制造难度,在西气东输三线管道工程中得到应用。

#### 2.7.2 OD1 422 mm X80 管线钢管应用研究<sup>[20-21]</sup>

研究形成X80、OD1 422 mm、12 MPa管道断裂控制技术,建成了国内第1个、世界第3个全尺寸管道气体爆破试验场。以天然气为管道介质开展了X80、OD1 422 mm、12 MPa管道全尺寸爆破试验,这在

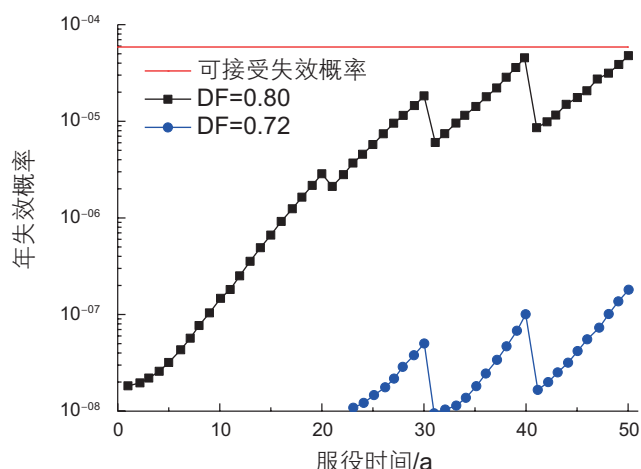


图12 两种设计系数X80管道年失效概率与服役时间的关系  
Fig. 12 Relationship between annual failure probability and service life of X80 pipeline decided by two design factors

全世界范围内尚属首次。研究制定了OD1 422 mm、X80管材系列技术标准,完成了螺旋埋弧焊管、直缝埋弧焊管、弯管和管件的试制评价。研发形成OD1 22 mm、X80焊管现场焊接工艺,形成线路工程设计和施工技术规范。以上研究成果为中俄东线的建设奠定了良好的技术基础。

#### 2.7.3 X90 管线钢管应用关键技术研究<sup>[22-24]</sup>

研究提出了X90管线钢管断裂阻力曲线的修正模型,提出了新的修正系数,确定了止裂韧性指标。系统研究了X90管材成分、组织、性能、工艺之间的相关性,制定了X90管材的关键技术指标、检测评价方法及配套的系列标准。基本完成了X90焊管和管件的研发及试验评价,为X90管线钢和钢管的工程应用奠定了基础。

## 3 我国管道工程和高钢级管线钢及钢管发展展望

随着世界经济的不断发展,能源消费将持续增加,全球仍处于油气管道建设的持续增长期,油气输送管线钢和钢管的需求量呈现波动式增加。我国天然气资源大约60%集中在西部地区,主要是塔里木和长庆天然气、新疆煤制气。进口天然气包括中亚天然气、俄罗斯西伯利亚和东伯利亚天然气。上述天然气资源大部分需要通过管道实现“西气东输”和“北气南运”。由此预测我国油气长输管道建设每年需要高性能钢管100万~300万t。

我国天然气长输管道工程的发展趋势是进一步增大输量并尽可能地降低建设成本。近年来,我国相继



与中亚国家和俄罗斯签订新的油气供应协议,今后需要建设输量为450亿~600亿 $\text{m}^3/\text{a}$ 的天然气管道。第2代(X70和X80)天然气管道工程技术已经不能满足超大输量的需求。需要发展新一代(第3代)管道工程技术:钢级X90/X100,管径1219~1422 mm,压力不低于12 MPa,输量300亿~600亿 $\text{m}^3/\text{a}$ ,设计系数0.8。第3代管线钢和钢管的研究已取得重要的阶段性成果。

实现超大输量天然气输送的主要途径有:(1)进一步提高管材钢级,如采用X90或X100,提高运行压力;(2)采用较高的设计系数,如由目前的0.72增加到0.77或0.80,从而提高许用压力;(3)增加壁厚,以增大承压能力;(4)增大管径,如可将管径增大至1422 mm,增加输送量;(5)以上途径的组合应用。为了更好地满足大口径高压输气管道工程发展需求,必须进一步深化应用基础研究、联合进行产品研发与技术攻关、形成大口径高钢级输气管道输量与其它参数(压力、钢级、设计系数、管径、壁厚等)的优化技术。建立或完善管道应变设计、可靠性设计、高压输气管

道断裂控制等理论和方法,研究解决X90~X120高钢级管线钢和钢管屈强比、应变时效、低温韧性、屈服强度测试等关键技术难题。掌握高钢级管材成分、组织、性能、工艺相关性。联合冶金和制管企业形成批量生产能力,研究形成X90~X120管材现场焊接技术,进一步提高环焊缝质量性能水平,实现高钢级管线钢和钢管技术的全面突破。

目前,我国超大输量天然气管道建设和高钢级管材的研发应用进入了新的发展阶段,随着管径、压力、设计系数、钢级的进一步增大或提高,管道面临的风险将进一步增大。这就需要对具体管线的设计参数进行更加科学的论证,开展更为深入的应用基础研究,综合考虑管道长期服役的安全可靠性和经济性、管材制造能力和质量水平、现场施工技术和能力等因素。特别是要将管道全寿命周期的安全性摆在首位,使管道安全性和经济性得到高度兼顾和优化,确保我国长距离大输量高压输气管道工业又好又快地发展。

## 参考文献

- [1] 冯耀荣,陈浩,张劲军,等.中国石油油气管道技术发展展望[J].油气储运,2008,27(3):1-8. [FENG Y R, CHEN H, ZHANG J J, et al. The progress and prospect of oil and gas pipeline technology of CNPC[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2008, 27(3): 1-8.]
- [2] 冯耀荣,霍春勇,吉玲康,等.我国管线钢和钢管研究应用新进展及发展展望[J].石油管工程,2013,19(6):1-5. [FENG Y R, HUO C Y, JI L K, et al. The new progress and development prospect for research and application of pipeline steels and pipes in China[J]. Tubular Goods Engineering, 2013, 19(6): 1-5.]
- [3] 霍春勇.高钢级管材的发展[C].石油设备材料国产化会议,北京,2013. [HUO C Y. The development of high grade tubular products [C]. Oil & Gas Equipment Materials Localization Meeting, Beijing, 2013.]
- [4] 冯耀荣,庄传晶.X80级管线钢管工程应用的几个问题[J].焊管,2006,29(1):1-5. [FENG Y R, ZHUANG C J. Some aspects on X80 line pipe application[J]. Welded Pipe and Tube, 2006, 29(1): 1-5.]
- [5] “西气东输二线X80管材技术条件及关键技术指标研究”技术报告[R].中国石油集团石油管工程技术研究院,2009. [“Research on technical requirement and key technical indexes of X80 pipes for the Second West-East Gas pipeline Project”[R]. CNPC Tubular Goods Research Institute, 2009.]
- [6] “西气东输二线管道断裂与变形控制关键技术研究”技术报告[R].中国石油集团石油管工程技术研究院,2013. [“Research on the key technology of fracture and deformation Control for the Second West-East Gas Pipeline”[R]. CNPC Tubular Goods Research Institute, 2013.]
- [7] 冯耀荣,霍春勇,马秋荣,等.西气东输管道及钢管相关技术研究//西气东输管道及钢管应用基础研究论文集[M].西安:陕西科技出版社,2004. [FENG Y R, HUO C Y, MA Q R, et al. Related technology research of West-East Gas Pipeline and pipes. //Symposium of the basic research for application in West-East Gas Pipeline and steel pipes[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2004.]
- [8] 冯耀荣,陈浩,张劲军,等.油气输送管道工程技术进展[M].北京:石油工业出版社,2006. [FENG Y R, CHEN H, ZHANG J J, et al. The progress of oil and gas pipeline engineering technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.]
- [9] 李鹤林,郭生武,冯耀荣,等.高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱[M].北京:石油工业出版社,2001. [LI H L, GUO S W, FENG Y R, et al. Atlas for microstructure analysis and identification of microalloyed high strength pipeline steels[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.]
- [10] 冯耀荣,高惠临,霍春勇,等.管线钢显微组织的分析与鉴别[M].西安:陕西科技出版社,2008. [FENG Y R, GAO H L, HUO C Y, et al. Microstructure analysis and identification of pipeline steels[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2008.]
- [11] 冯耀荣,李鹤林.管道钢及管道钢管的研究进展与发展方向:上[J].石油规划设计,2005,16(5):1-7. [FENG Y R, LI H L. Research progress and development prospect of pipeline steels and pipes(I)[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2005, 16(5): 1-7.]

- [12] 冯耀荣, 李鹤林. 管道钢及管道钢管的研究进展与发展方向:下[J]. 石油规划设计, 2005, 17(1): 11-16. [FENG Y R, LI H L. Research progress and development prospect of pipeline steels and pipes(II)[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2005, 17(1): 11-16.]
- [13] 黄维和. 油气管道输送技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012. [HUANG W H. Oil & gas pipeline transportation technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.]
- [14] 冯耀荣, 等. 影响油气管道安全性的材料因素[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007. [FENG Y R, et al. Materials factors affecting the safety of oil and gas pipeline[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.]
- [15] 冯耀荣, 李洋, 吉玲康, 等. 屈服比对X80焊管力学性能和安全使用的影响 //X80管线钢和钢管研究与应用文集[M]. 西安: 陕西科技出版社, 2011. [FENG Y R, LI Y, JI L K, et al. The effect of yield to tensile ratio on mechanical properties and safety of X80 welded steel pipes.//Symposium of research and application for X80 pipeline steels and pipes[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2011.]
- [16] 吴宏, 张对红, 罗金恒, 等. 输气管道一级地区采用0.8设计系数的可行性[J]. 油气储运, 2013, 32(8): 799-804. [WU H, ZHANG D H, LUO J H, et al. Feasibility study on the design factor of 0.8 for gas pipeline in class I areas [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(8): 799-804.]
- [17] 赵新伟, 罗金恒, 张广利, 等. 0.8设计系数下天然气管道用焊管关键性能指标[J]. 油气储运, 2013, 32(4): 355-359. [ZHAO X W, LUO J H, ZHANG G L, et al. Key property indexes of welded pipes for natural gas pipeline with design factor of 0.8[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(4): 355-359.]
- [18] 吴宏, 刘迎来, 郭志梅. 基于验证试验法的X80钢级大口径三通设计[J]. 油气储运, 2013, 32(5): 513-516. [WU H, LIU Y L, GUO Z M. Design method based on verification test of large diameter X80 Tee-joint[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(5): 513-516.]
- [19] 刘迎来, 吴宏, 井懿平, 等. 高强度油气输送管道三通试验研究[J]. 焊管, 2014, 37(3): 28-33. [LIU Y L, WU H, JING Y P, et al. Test study on Tee-joint used in high strength oil and gas pipeline[J]. Welded Pipe and Tube, 2014, 37(3): 28-33.]
- [20] 李丽锋, 罗金恒, 赵新伟, 等. OD 1422 mm X80管道的风险水平[J]. 油气储运, 2016, 35(4): 25-29. [LI L F, LUO J H, ZHAO X W. Risk level of X80 pipeline with OD 1422 mm[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(4): 25-29.]
- [21] 中国石油信息资源网. 2015年中国石油及国际石油科技十大进展[EB/OL]. [2016-04-09]. [http://www.cnpc.com.cn/cnpc/jtxw/201601/879a072334c645f5890d0610063d27fd.shtml. [China Petroleum Information Resources Network. Top 10 petroleum technology progresses of CNPC and International in 2015[EB/OL]. [2016-04-09]. http://www.cnpc.com.cn/cnpc/jtxw/201601/879a072334c645f5890d0610063d27fd.shtml.]
- [22] 史立强, 牛辉, 杨军, 等. 大口径JCOE工艺生产X90管线钢组织与性能的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(3): 226-229. [SHI L Q, NIU H, YANG J, et al. Study on microstructure and properties of X90 large diameter line pipes produced by JCOE process[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(3): 226-229.]
- [23] 刘刚伟, 毕宗岳, 牛辉, 等. X90高强度螺旋埋弧焊管组织性能研究[J]. 焊管, 2015, 38(10): 9-13. [LIU G W, BI Z Y, NIU H, et al. Study on microstructure and properties of X90 high strength SAWH Pipes[J]. Welded Pipe and Tube, 2015, 38(10): 9-13.]
- [24] 王红伟, 吉玲康, 张晓勇, 等. 批量试制X90管线钢管及板材强度特性研[J]. 石油管材与仪器, 2015, 1(6): 44-51. [WANG H W, JI L K, ZHANG X Y, et al. Strength characteristics of X90 line pipes and plates in batch trial production[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2015, 1(6): 44-51.]

## Progress and prospects of research and applications of high grade pipeline steels & steel pipes in China

FENG Yaorong, HUO Chunyong, JI Lingkang, LI Helin

State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077 China

**Abstract** This paper reviews the research, development and achievement of high grade pipeline steels, steel pipes and oil and gas pipelines in China and their development trends. In China, the research and development of oil and gas pipelines, high grade pipeline steels and steel pipelines has the following characteristics. 1) The research and development cycle is short; 2) The research results can be applied quickly; 3) The application effects are good. After nearly 20 years of effort, China has reached an advanced level in the following two aspects. One is the parameter optimization technology of pipe type, steel grade, materials

and size of oil and gas transportation pipelines with large-diameters and high pressures. Another is the research and application of high grade pipe steels. Basic research into steel and pipeline technologies has achieved substantial progress in China. This includes the materials selection of X70/X80 grade steel, the identification and examination of the acicular ferrite pipeline steel microstructures, the pipe type selection and the residual stress control technology of spiral submerged-arc welding pipes, the fracture control technology of high pressure gas pipelines, pipeline deformation control technology in the areas of strain-based design, the testing and evaluation technology of high grade and thick wall pipeline steels and steel pipes and the embrittlement mechanisms, fracture occurrence and prevention technology of the high grade steel pipeline steels in heat affected welding areas. The design factor of class I area was enhanced to 0.8. A lot of new technologies were also developed in product research. The X70/X80 hot rolled plate and the large-diameter thick wall longitudinal submerged arc-welded pipe manufacture technology, the induction bends and the fitting material design and the manufacture technology were exploited. The diameter of X80 steel pipes was expanded to 1422 mm. The preliminary research into X90 pipe has been finished. In order to better meet the requirement of large-diameter high-pressure pipeline engineering, the basic applications research must be deepened further. We need to cooperate to develop products and technology. The optimization technology between the transportation capacity of large-diameter high grade steel gas pipeline and other parameters (pressure, steel grade, design factor, pipe diameter, wall thickness, etc.) needs to be developed. We also need to establish or improve the theory and methods of strain-based design, reliability-based design and fracture control of high-pressure gas pipelines. The key technical problems such as yield to tensile-strength ratio, strain aging, low temperature toughness, yield strength tests of X90-X120 high grade steel and pipes should be studied and solved. The correlation between composition, microstructure, process, property and performance of high grade pipes has to be mastered. Mass production capabilities require collaboration between metallurgy enterprises and pipe-makers. X90-X120 pipe field welding technology has to be developed and the girth weld performance level improved. A major breakthrough in high grade steel pipeline steels and the steel pipes production and application technology is required.

**Keywords** high grade pipeline steel; high grade steel pipe; pipeline; basic research; research progress; development prospect

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.009

(编辑 马桂霞)