

# X80 高 Nb 管线钢组织与性能分析\*

严春妍<sup>1</sup>, 黄健成<sup>1</sup>, 田松亚<sup>1</sup>, 白世武<sup>2</sup>

(1.河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022;

2.中国石油天然气管道科学研究院, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 总结回顾了 X80 高 Nb 管线钢的研究和发展, 对其冶金设计、化学成分、显微组织结构、各项力学性能以及应力腐蚀行为、焊接性等进行了分析, 并讨论了 X80 高 Nb 管线钢在应用中需要进一步研究的几个技术问题。通过低 C 高 Nb 合金化设计, 可获得细小的针状铁素体组织, 保证材料成分的同时具有很高的强度和良好的韧性。高温轧制技术(high temperature processing, HTP)的采用, 不仅满足 X80 管线钢的技术条件要求, 而且可以显著降低生产成本, 有利于实现石油天然气更加高效经济的输送。

**关键词:** X80 管线钢; 焊接; 高 Nb; HTP; 微合金化

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-3938(2013)07-0005-06

## Analysis on Microstructure and Mechanical Properties of High-niobium Microalloyed X80 Pipeline Steel

YAN Chunyan<sup>1</sup>, HUANG Jiancheng<sup>1</sup>, TIAN Songya<sup>1</sup>, BAI Shiwu<sup>2</sup>

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, Jiangsu, China;

2. Petroleum-Gas Pipeline Research Institute of China, Langfang 065000, Hebei, China)

**Abstract:** Research and development status of high-niobium microalloyed X80 pipeline steel were summarized and reviewed. Metallurgical design, microstructures, mechanical properties, stress corrosion behavior and field weldability were analyzed, and several applicative technological problems requiring further study and exploration were discussed. A low carbon-high niobium alloy design is used to produce a refined acicular ferrite microstructure which provides a combination of high strength and excellent toughness. The employment of high temperature processing(HTP) enables an excellent combination of key material performance characteristics satisfying relative specifications for X80 pipeline steel. Moreover, the HTP design allows for a significant reduction of total cost to realize the economical and efficient transmission of oil and gas.

**Key words:** steel pipeline steel; welding; high-niobium; HTP; microalloying

## 0 前言

目前, 管线钢和管线钢管已成为材料科学和管道工程中最富活力、最具研究成果的领域, 其研究、开发和生产水平已成为一个国家冶金工业水平和装备制造工业水平的重要标志。随着天然气在全球范围内需求的持续增长, 管线钢的用量

攀升, 为了提高管道输送效率、降低敷设管线费用, 高钢级管线钢将成为今后长距离输气管线敷设的主要用钢。近十年来, 制钢业积极致力于 X80 及以上高钢级高强管线钢的研制。目前, 世界范围内已经建成了数千千米的 X80 管道, X80 钢正在逐步取代 X70 钢, 成为高压输气管线的主流钢级。以往高钢级管线钢的成分设计加入了价格较高的

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011258), 大学生创新性实验计划资助项目(201110294033)。

Mo 和 V 等元素,但是成本高、能耗大的问题日渐突出。为了推广 X80 管线钢的应用,实现最经济化地生产高钢级高性能管线钢,对于 X80 管线钢特别是新一代高温轧制技术(high temperature processing, HTP)生产管线钢的研究还在进一步深入之中<sup>[1-3]</sup>。

笔者介绍了具有优良强韧平衡特性的高 Nb 成分 X80 管线钢的冶金学设计理念,以及材料的化学成分和组织结构特征,并分析了其各项力学性能和工艺性能特征。

## 1 研发概况

用传统的热机械轧制(thermo mechanical controlled process, TMCP) 工艺生产 X80 管线钢,通常采用低 C、高 Mn、含 Mo 的成分设计,加入 Nb 和 Ti 等微合金元素,在控轧工艺和轧后加速冷却等方面做严格控制。这种 X80 管线钢利用了固溶强化、相变强化以及析出强化来最大程度地细化晶粒,从而提高强度和韧性,降低韧脆转变温度,具有良好的强韧性匹配。

近年来,随着对 Nb 微合金化的物理冶金机理研究的深入,钢中含 C 量降低,可允许添加较高含量的 Nb,使  $\gamma$  再结晶温度显著提高,因而可采用较高的轧制温度来生产满足现代油气管道所需要的高强韧钢板<sup>[4-5]</sup>,这种方法被称为 HTP 技术。在少 Mo 合金化情况下,通过高 Nb 合金化设计,也可获得针状铁素体组织。与管线钢生产采用的传统 TMCP 工艺相比,HTP 工艺可以采用较高的轧制温度,提高轧制效率,同时,以 Nb 代

替昂贵的 Mo,可显著降低管线钢板的成本。

天然气长输管线大量采用 X80 钢是近几年才开始的,2004 年建成投产的美国第一条 X80 管线——夏延平原输气管道(Cheyenne Plains Pipeline)的建设中使用了 HTP 技术生产的 X80 钢<sup>[6]</sup>。我国南京钢铁集团公司首先开发了 X80 HTP 管线钢,并于 2006 年由华北石油钢管厂进行了  $\phi 813 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$  直缝埋弧焊管制管试验。结果表明,在满足性能要求的前提下,HTP 钢具有明显的成本优势,且具有较好的焊接性和韧性。

## 2 组织结构与成分

为满足管线钢高强度、高韧性、良好的焊接性能及抗氢致开裂(hydrogen induced cracking, HIC)、应力腐蚀开裂(stress corrosion cracking, SCC)性能的要求,除了采用合理的冶金技术以外,还要严格控制管线钢的成分。

高强度管线钢中加入 Nb 元素是为了同时获得较高的强度和韧性;Nb 对钢的显微组织的影响主要有晶粒细化、延迟再结晶、沉淀强化和亚结构的强化。为了充分发挥多种合金元素各自独特的作用,除了对 Nb 的含量进行控制之外,还需对 Ti 和 V 等其他微合金化元素的最佳成分进行设计。采用 HTP 工艺生产 X80 管线钢时在合金设计上采用超低 C 微合金化方案,最大限度地降低 S, P, O, N 和 H 等元素的含量,降低 Mo 元素的含量,增加了 Nb 的含量到 0.1% 左右。几种典型 X80 高 Nb 管线钢的化学成分见表 1。

表 1 几种 X80 高 Nb 管线钢的化学成分

%

编号	$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Al})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{V})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Cr})$
1	0.04	0.20	1.80	0.034	0.092		0.013		0.25	0.30
2	0.04	0.20	1.80	0.036	0.093		0.015	0.15	0.25	0.30
3	0.04	0.20	1.80	0.040	0.095	0.025	0.015	0.27	0.25	
4	0.04	0.20	1.79	0.032	0.092	0.002	0.009	0.01	0.16	0.30
5	0.06	0.20	1.73	0.035	0.091		0.013	0.01	0.15	0.30
6	0.06	0.20	1.71	0.034	0.088	0.002	0.010	0.001	0.176	0.29

与 X70 钢相比,对 X80 钢成分进行了调整,显微组织结构进一步优化,M/A 组元更细小,分布更均匀。X80 高 Nb 管线钢的组织类型主要为低 C 粒状贝氏体和细小的针状铁素体,其显微组织如图 1 所示。

研究表明,针状铁素体的有效晶粒尺寸较小,其中的岛状组织弥散细小,不易诱发裂纹,并能阻碍裂纹的扩展,因而针状铁素体管线钢具有优良的强韧特性。针状铁素体板条内有高密度的位错,由于相变形成的亚晶位错具有很大的可

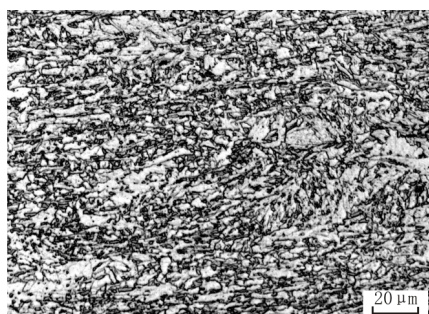


图1 X80 高 Nb 钢显微组织

动性,因而有利于材料强韧性的提高;若干板条平行排列构成板条束,板条界为小角度晶界,板条束界为大角度晶界,针状铁素体的板条宽度一般在  $0.6\sim 1\ \mu\text{m}$ ;相邻的铁素体板条间分布有粒状或薄膜状 M/A 组元。X80 高 Nb 管线钢中 M/A 组元的典型形貌如图 2 所示。可以看出,SEM 下 M/A 组元呈白亮色。X80 钢显微组织中存在的细小的 M/A 岛状组织,常分布在原奥氏体晶界、铁素体板条界或板条束界。虽然 M/A 组元可能致脆,但由于晶粒细化,管线钢中的 M/A 组元尺寸细小,不足以构成 Griffith 裂纹临界尺寸,且其中的残余奥氏体是一种有利的韧性相,可以降低裂纹尖端应力,消耗部分裂纹扩展功。

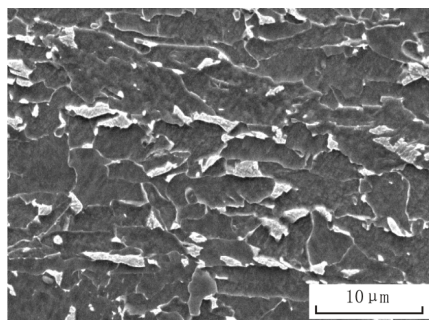


图2 M/A 组元形貌

### 3 性能分析

管线钢的性能主要包括强度、韧性、平台能、转变温度、断裂性能、应变时效、可焊性、应力腐蚀、疲劳性能、各向异性等。由于油气输送管道要求大管径、高输送压力、长距离、跨越恶劣环境地带等特点,因此对管线钢的性能提出了更高的要求,应具有高强度、足够高的夏比冲击韧性(起裂、止裂韧性)、足够低的韧脆转变温度、优良的抗氢致开裂和应力腐蚀开裂性能,以

及良好的焊接性能。

#### 3.1 强度和韧性

对于 X80 宽厚钢板,其力学性能应满足 API SPEC 5L 规范对管线管的要求。根据国内需要,我国也制定了相应的国家标准。GB/T 21237—2007《石油天然气输送管用宽厚钢板》规定 X80 管线钢板性能指标见表 2。

表2 X80 钢板的力学性能指标

$R_{0.5}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$R_{0.5}/R_m$	$A/\%$	$A_{KV}/\text{J}(-20\ ^\circ\text{C})$	$S_A/\%(-20\ ^\circ\text{C})$	
					单值	平均值
555~690	625~825	0.93	$\geq 18$	150	$\geq 70$	$\geq 85$

提高钢的强度是满足油气输送管道工程中管径增大、输送压力提高的主要实现途径。API SPEC 5L—2008 对 X80 管线钢的强度要求见表 3。管线钢遵循低合金高强钢的一般强韧化机理,但通过控制轧制和控制冷却过程,使钢中添加的微合金元素对位错强化、晶界强化、固溶强化以及沉淀强化发挥更大的作用。在 X80 高 Nb 管线钢中,较多的 Nb 可以形成细小的碳化物和氮化物,抑制奥氏体晶粒的长大;在轧制过程中提高再结晶温度,抑制奥氏体的再结晶、细化晶粒,提高钢的强度。

表3 X80 管线钢管的拉伸力学性能(API SPEC 5L)

管体				焊缝
$R_{0.5}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$R_{0.5}/R_m$	$A/\%$ (最小值)	$R_m/\text{MPa}$
555~705	625~825	0.93	按规定的公式确定	$\geq 625$

从管线系统的安全性和可靠性考虑,韧性是管线钢最重要的力学性能之一。在管线钢领域中,通常以 Charpy 冲击试验、落锤撕裂试验(drop weight tear test, DWTT)和断裂韧性试验进行韧性的测试和评价。为了保证 X80 高 Nb 管线钢具备高的韧性,需要采用超低 C 的成分设计;通过铁水预处理、转炉精炼、钢包冶金和连铸等多步冶金新技术和新工艺,尽可能降低钢中杂质元素(S, P, O, H 等)的含量,获得高度“纯净”的管线钢;采用微合金化, X80 高 Nb 管线钢中 Nb 的充分溶解和高温轧制等新工艺,获得细小的针状铁素体(或贝氏体)强韧化组织。

#### 3.2 应变时效

应变时效是管线钢在钢管制造和服役过程中普遍存在的现象。相对 X70 钢, X80 钢具有一定的应变时效敏感性。X80 钢的应变时效是指,



X80 钢制管过程中的矫直、成型、水压和涂层对 X80 板卷制管后的强度上升、塑性和韧性下降,并可能造成屈强比超标。针对应变时效可能造成屈强比超标的问题,制管过程中可以通过一定程度上提高固溶元素来提高抗拉强度,调整轧钢工艺,提高卷取温度,减少固溶碳的影响,从成分设计和轧钢工艺上进行调整<sup>[7]</sup>;在钢管的防腐涂层工艺中,应对加热温度和保温时间进行严格控制<sup>[8-10]</sup>。

应变时效作为管线钢的一种特殊现象,需要采用合适的参量予以表征。随着管道行业对基于应变的管线设计的重视,有必要对管线钢应变时效敏感性的表征参数做出规定,简单的方法是:可以采纳 GB/T 4160—2004《钢的应变时效敏感性试验方法(夏比冲击法)》标准要求,用管线钢应变时效前后的力学性能比值作为应变时效敏感性系数,建议以屈服强度、屈强比和夏比冲击功 3 个性能来评判。

### 3.3 焊接性

油气管道的钢管需要在现场对接焊接,这种焊接是在复杂的气候和地域条件以及不稳定的机械负荷下进行的,因而对管线钢的焊接性提出了更高的要求。管线钢的焊接主要包括制管成型焊接和现场环缝焊接两个领域。无论是焊管的成型焊接,还是管线的现场环缝焊接,获取高可靠性焊接接头的基础是管线钢的焊接性。X80 高 Nb 管线钢焊接的主要问题是冷裂纹和焊接热影响区(heat affected zone, HAZ)脆化<sup>[11-13]</sup>。采用合适的焊接热输入时,粗晶区(coarse-grained HAZ, CG-HAZ)的主要组织类型为针状铁素体和粒状贝氏体(如图 3 所示),CGHAZ 的韧性较高;采用过高的焊接热输入时,CGHAZ 晶粒粗大,针状铁素体明显减少,热影响区脆化倾向增加。

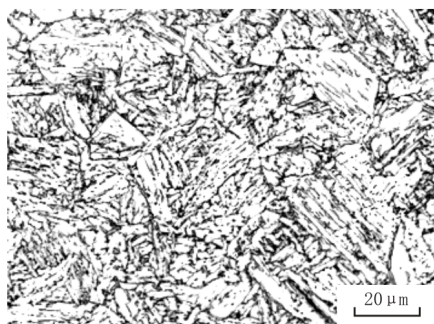


图 3 粗晶区典型组织

实际焊接过程中,可以通过适当的焊前预热和控制层间温度等来降低 X80 高 Nb 管线钢的焊接冷裂敏感性。通过控制焊接热输入、引入微合金化元素、焊前预热、焊后热处理等方法来控制焊接热影响区的晶粒度和显微组织的形态,防止焊接热影响区(尤其是粗晶区)的脆化。

### 3.4 疲劳性能

变动应力在服役管道中是普遍存在的,这种变动应力一方面来自管道内部输送压力的波动和气体介质的分层结构,另一方面来自于管线外部的波动载荷,如埋地管道上方车辆等运行物体的移动、海洋管道海浪的冲击、沼泽地管道浮力的波动、沙漠管道流沙的迁移以及管道温差引起的应力变化等。管线钢管表面的局部损伤和内部微小的缺陷都可能在疲劳载荷的诱导下酿成灾难性的断裂事故。管道的焊接、敷设等施工过程中,由于操作失误等原因引起的外部机械损伤对管线钢疲劳性能有比较大的影响,是造成管线完整性被破坏的一个主要因素。

研究表明,显微组织对 X80 高 Nb 管线钢的疲劳强度和 S-N 曲线有很大的影响,采用细化晶粒和改善组织的方法,控制钢中夹杂物的含量和尺寸形状,可以提高 X80 高 Nb 管线钢的疲劳强度<sup>[14-17]</sup>。

### 3.5 应力腐蚀行为

应力腐蚀开裂(SCC)是管线钢管最常见的失效形式之一。管道 SCC 的发生必须同时满足 3 个条件:敏感材料、拉应力和环境介质。其中,环境因素较为复杂,包括 pH 值、温度、土壤的电阻率、外加电位等因素。对输油、输气管道而言,主要腐蚀介质为  $H_2S$ ,土壤和地下水中的  $NO_3^-$ ,  $OH^-$ ,  $CO_3^{2-}$  和  $HCO_3^-$  等也可以引起 SCC。X80 管材的 SCC 可分为高 pH SCC 和近中性 pH SCC 两类<sup>[18-20]</sup>,前者是沿晶 SCC(intergranular SCC, IGSCC),后者是穿晶 SCC(transgranular SCC, TGSCC)。

钢材的化学成分和显微组织对 SCC 行为有重要的影响。研究结果表明,作为 X80 高 Nb 管线钢主要组织类型的细小针状铁素体具有优良的抗 SCC 性能。这是因为,一方面,材料的组织细小均匀,残留的 H 渗入后引起的氢压可以由更多的晶粒来承受,裂纹不易产生;晶界面积增

加,也将阻碍裂纹的扩展。另一方面,针状铁素体晶粒间无特定位相关系,裂纹扩展过程中必然受彼此咬合并相互交错分布的细小铁素体条束的阻碍,因此裂纹不易扩展。另外,由于 X80 高 Nb 管线钢中加入的高 Nb 及 V 等微合金元素产生的碳氮化物,在位错网络上的沉淀析出,起到了强烈的氢陷阱作用,也能提高管材对 SCC 的抵抗能力。

管材通过提高钢的纯净度、适当的热处理、喷丸处理和电化学保护等方法,可以提高材料的 SCC 抗力<sup>[18,21-23]</sup>。

## 4 相关技术问题

### 4.1 成分、组织与性能

研究表明,化学成分和工艺的变化,导致了 X80 管线钢组织和性能的差异。钢中加入的微合金化元素(Nb, V, Ti 等)在钢中的作用很大程度上取决于工艺的配合,它不仅是细化晶粒和析出强化的效果,而且对钢的耐蚀性、耐热性、耐磨性以及其他的物理、化学性质的影响也是十分重要的。因此,有必要进一步研究高强度管线钢成分、组织和性能之间的内在联系,通过工艺控制来获得组织和性能优异的 X80 高 Nb 管线钢。

### 4.2 包申格效应和屈强比

对于管线钢包申格效应与钢管强度的研究已进行了多年。研究表明,钢管屈服强度的变化是管线钢形变能力与包申格效应综合作用的结果。钢板的强度水平、屈强比的水平,以及形变量的大小,对钢管的屈服强度均产生影响<sup>[24-26]</sup>。研究 X80 高 Nb 管线钢的包申格效应与屈强比之间的关系,以及屈强比与管道形变容量、极限载荷及缺陷容限尺寸之间的关系,对于钢管强度、韧性、屈强比以及临界缺陷尺寸等验收指标的确定十分重要。

### 4.3 断裂控制

高强度、高韧性管线钢的断裂控制一直是国际上研究的热点。美国 Battelle 双曲线方法和有关简化公式可以对低于 X80 级别的高强度管线钢管进行止裂韧性的设计和预测,然而,对于 X80 级别及以上的超高强度管线钢管,传统的以

CVN 冲击功作为止裂参数不能保证管道止裂能力设计和预测的准确性。为适应现代管道高压、低温和富气输送的要求,采用 DWTT 扩展能和裂纹尖端张开角(crack tip opening angle, CTOA)临界值作为新的断裂参量和判据,并配合有限元方法进行数值模拟,已成为管道止裂韧性设计和预测新的研究领域<sup>[27-30]</sup>。对于该领域研究的理论完善和工程应用正在进一步深入。

### 4.4 异常断口评判技术

由于高强度、高韧性和厚壁管线钢的广泛应用,近年来 DWTT 试样异常断口的频繁出现,使得 DWTT 作为韧性评定试验在实际生产过程中遇到较大的问题。研究表明,材料的纯净度、均匀性和组织状态,以及试样缺口的形态对异常断口的形成都有一定的影响。当 DWTT 试样出现异常断口时,对异常断口的有效性评价具有相当的技术性。因此,需要加强技术交流与合作,在 X80 钢级及以上高强度管线钢管 DWTT 异常断口评判技术及标准验收指标方面达成共识,对于高强度管线钢的工程应用非常重要。

### 4.5 管道环焊缝焊接工艺及强度匹配

对于 X80 钢级及以上的高强度管道,采用何种强度匹配,目前尚未形成统一认识。对于高强度和超高强度管线钢而言,如果环焊缝采用高匹配会带来焊接工艺复杂化、现场焊接难度大等问题,并可能造成焊接结构的安全性低于最低安全限度;而采用等强匹配或匹配系数接近 1 的低强匹配,用牺牲少许强度来提高韧性的方法,对管道结构的安全服役较为有利。然而,对基于应变设计的管道则要求采用焊缝的高强匹配,这就对管线钢屈服强度的上限偏差、焊接材料的选择,以及现场焊接施工提出了更严格的要求。高强度管道环焊缝强度匹配对管道承载能力、环焊缝缺陷容限尺寸和形变能力以及环焊缝氢致裂纹倾向等的影响,还需要进一步的研究和评估。

## 5 结 论

(1) X80 高 Nb 管线钢的低含 C 量、超低 P、S 含量以及高达 0.1%左右的 Nb 元素的添加,在保证材料成分的同时具有高的强度和韧性的条件下,降低了合金化成本,实现了高性能 X80 管

线钢的经济化生产。钢中较多的 Nb 提高了再结晶温度,阻止奥氏体晶粒长大,降低奥氏体向铁素体的相变温度,保证了 X80 高 Nb 管线钢具有优良的强韧性。

(2) HTP 工艺生产的 X80 管线钢的微观组织主要为细小均匀的针状铁素体和贝氏体。针状铁素体的板条间位错密度较高,部分位错缠结形成位错团。

(3) X80 高强管线钢的使用对建造长距离天然气运输管道具有重要的意义,其应用必将带来良好的经济效益。但就目前而言,X80 管线钢在实现推广应用仍需做大量的工作,其力学性能、止裂控制以及焊接性等方面尚需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] IVANI DE S BOTT, LUIS F G DE SOUZA, JOSÉ C G TEIXEIRA, et al. High-strength Steel Development for Pipelines: A Brazilian Perspective[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005(36A): 443-454.
- [2] FULVIO SICILIANO, DOUGLAS G, STALHEIM J, MALCOLM GRAY. Modern High Strength Steels for Oil and Gas Transmission Pipelines[C]//Proceedings of IPC 2008, Calgary, Alberta: [s.n.], 2008: 47-51.
- [3] 孙宏, 王庆强. 国际高强度管线钢管的研究进展[J]. 压力容器, 2012, 29(01): 32-38.
- [4] MALCOLM GRAY J. Niobium Bearing Steels in Pipeline Projects[C]//Proceedings of the International Symposium Niobium 2001, Orlando, Florida: [s.n.], 2001: 78-83.
- [5] 高惠临. 管线钢与管线钢管[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
- [6] FAZACKERLEY W J, MANUEL P A, CHRISTENSEN L. First X80 HSLA pipeline in the USA[C]//The Fifth International Conference on HSLA Steels, Sanya, Hainan: [s.n.], 2005: 326-329.
- [7] 张永青, 李明, 郝亚魁, 等. 首钢西气东输二线用 X80 热轧板卷产品设计和性能分析[J]. 首钢科技, 2010(01): 35-41.
- [8] 吴海凤, 郑磊. 预应变量和时效温度对 X80 管线钢性能的影响[J]. 材料热处理技术, 2009, 38(10): 166-169.
- [9] 张小立, 冯耀荣, 赵文珍, 等. X80 级管线钢的组织 and 力学性能[J]. 特殊钢, 2006, 27(03): 11-13.
- [10] 高建忠, 王春芳, 王长安, 等. 高钢级管线钢应变时效行为分析[J]. 材料开发与应用, 2009, 24(03): 86-90.
- [11] 安琳, 徐学利. X80 高强度管线钢的焊接性分析[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(06): 27-30.
- [12] 焦兰, 刘清友, 孙新军, 等. 高铌 X80 管线钢焊接粗晶区的组织和性能研究[J]. 钢铁, 2011, 46(03): 75-78.
- [13] 周振丰. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [14] 董楠楠, 张红梅. 微合金管线钢 X80 的高周疲劳行为研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(10): 74-77.
- [15] 李少华, 曾燕屏, 仝珂. 疲劳载荷作用下 X80 管线钢夹杂物的微观行为[J]. 石油学报, 2012, 33(03): 506-512.
- [16] 张华, 罗金恒, 赵新伟, 等. 西气东输二线 X80 钢管焊缝疲劳寿命分析[J]. 天然气工业, 2010(05): 95-98.
- [17] 李红英, 宾杰, 林武, 等. 回火对微合金管线钢疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2011, 42(09): 2635-2641.
- [18] 陈叶, 费敬银, 万冰华, 等. 埋地 X80 石油管道的应力腐蚀与防护[J]. 热加工工艺, 2011, 40(22): 55-59.
- [19] 张亮, 李晓刚, 杜翠微. 管线钢应力腐蚀机理的研究现状[J]. 装备环境工程, 2007, 4(06): 1-6.
- [20] 张鹏程, 唐荻, 武会宾, 等. X80 级管线钢硫化物应力腐蚀开裂研究[J]. 材料保护, 2008, 41(07): 10-12.
- [21] Albarran J L, Aguilar A, Martinez L, et al. Corrosion and Cracking Behavior in an API X80 Steel Exposed to Sour Gas Environment[J]. Corrosion, 2002, 58(09): 783-792.
- [22] JIA Y Z, WANG J Q, HAN E H, et al. Stress Corrosion Cracking of X80 Pipeline Steel in Near-neutral pH Environment Under Constant Load Tests with and Without Preload[J]. J. Mater. Sci. Technol., 2011, 27(11): 1039-1046.
- [23] LU B T, LUO J L. Relationship Between Yield Strength and Near-neutral pH Stress Corrosion Cracking Resistance of Pipeline Steels—An Effect of Microstructure[J]. Corrosion, 2006, 62(02): 129-140.
- [24] 蔡星周, 郭宝峰, 肖福仁. 高 Nb X80 管线钢的屈强比在塑性变形过程中的变化规律[J]. 塑性工程学报, 2010(05): 103-107.
- [25] 高惠临. 管线钢屈强比分析与评述[J]. 焊管, 2010(06): 10-14.
- [26] 邱松年, 李丽琴. 显微组织对管线钢屈强比和低温韧性的影响[J]. 宽厚板, 2008(05): 43-48.
- [27] 罗金恒, 赵新伟, 李新华, 等. X80 管线钢断裂韧性研究[J]. 压力容器, 2007(08): 6-9.
- [28] 高惠临. 管线钢管韧性的设计和预测[J]. 焊管, 2010(12): 5-12.
- [29] YASUHIRO SHINOHARA, YUKINOBU NAGATA, EIJI TSURU, et al. Evaluation for Fracture Toughness in Welded X80 Pipes: Experimental Analysis on Mechanical Properties of HAZ [C]//Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii: [s.n.], 2011: 356-360.
- [30] SHIN S Y, WOO K J, HWANG B, et al. Fracture-toughness Analysis in Transition-temperature Region of Three American Petroleum Institute X70 and X80 Pipeline Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009(40A): 867-876.

作者简介: 严春妍(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事焊接物理冶金和金属焊接性研究。

收稿日期: 2013-04-11

编辑: 李红丽