

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180023

低温影响管线钢稳定性及焊接工艺的研究进展

敬加强¹, 郭 杰^{1,2}, 刘清友², 侯 玮³

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500; 2. 钢铁研究总院工程用钢研究所, 北京 100081; 3. 北京旭日奥油能源技术有限公司, 北京 100082)

摘 要: 随着油气长输管道逐渐向高寒地区延伸, 油气长输管道的施工、运营和维护均受到低温环境的影响。这就使低温环境下管线钢材料的选取、结构完整性评估以及管道的安全运营十分关键。综述了国内外低温环境对管线钢的疲劳寿命、裂缝萌生和扩展以及在焊接工艺和焊缝疲劳稳定性方面的研究成果, 揭示了低温环境对管线钢疲劳裂缝萌生和扩展、焊缝力学性能及焊缝疲劳稳定性的影响机理, 总结了目前研究存在的问题, 并在此基础上提出了今后研究的重点。

关键词: 管线钢; 低温; 疲劳裂缝; 焊缝稳定性

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)08-0008-07

Research progress of low temperature's effect on pipeline steel stability and welding technology

JING Jia-qiang¹, GUO Jie^{1,2}, LIU Qing-you², HOU Wei³

(1. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China;

2. Department of Engineering Steels, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

3. Sun Rise Petro Solutions Technology Co., Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: Along with the extension of the long distance oil and gas pipeline to the alpine region, the construction, operation and maintenance of long distance oil and gas pipelines are affected by the low temperature environment. This makes the selection of pipeline steel materials, structural integrity assessment and safe operation of pipelines critical in low temperature environment. The literatures about fatigue life, crack generation and growth, welding technology and weld fatigue stability of pipeline steel are reviewed. The mechanism of the effect of low temperature environment on the fatigue crack generation and the expansion and the mechanical properties and the fatigue stability of the weld of pipeline steel is revealed. The problems existing in the present study are summarized, and on this basis, the key points for future research are put forward.

Key words: pipeline steel; low temperature; fatigue crack; weld stability

近几年,随着中国经济的快速发展,油气资源在能源消费中所占比例日益增加,其中进口资源的比重也在相应增长。俄罗斯是中国主要的油气进口国之一,有多条油气长输管道穿越两国冻土地带,如中俄东线、漠大线等。管道在中国的入境点位于黑河和漠河地区,该区域冬季平均温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,少数情况可达 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。这使得该区域内油气长输管道的施工、运营和维护均受到低温环境的影响。因此,低温环境下,管线钢材料的选取、结构完整性评估以及管道的安全运营十分关键。

关于低温环境对管线钢影响方面的研究,主要

集中于两个方面。一方面为管线钢所用材料的低温疲劳稳定性及裂缝萌生和扩展方面的研究;另一方面为管线钢在低温环境中的焊接工艺及焊缝稳定性方面的研究。因此,国内学者开展了一批针对X80钢在低温环境下的疲劳寿命、埋弧焊工艺等方面的研究^[2-8]。而国外学者则针对极寒地区油气长输管道在低温环境下管材的疲劳断裂、裂缝扩展等进行了研究^[9-17]。根据研究的时间顺序,文章将主要对以下3个方面进行阐述:管线钢在低温环境下的疲劳寿命;低温对管材疲劳裂缝的萌生和扩展的影响;低温环境对焊接施工工艺及焊缝结构的力学稳

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304900)

作者简介: 敬加强(1964—),男,博士,教授; **E-mail:** jjq@swpu.edu.cn; **收稿日期:** 2018-01-18

通讯作者: 郭 杰(1984—),女,博士生; **E-mail:** 275566325@qq.com

定性影响。以上将为管线钢低温环境下的稳定性研究提供参考依据。

1 管线钢在低温环境下的疲劳寿命

石油管线钢指用于输送石油、天然气等流体的大口径焊接钢管。根据使用场景不同,分为高寒地区、高硫地区和海底铺设3类。根据美国石油协会API标准,管线钢以字母X开头表示,其后数字表示屈服强度,如X70钢、X80钢,数字越大所代表的钢级越高。目前,X80管线钢已成为中国主要的长输管线用钢,为了提高运输能力,管线钢未来的发展趋势为:高钢级、大口径和高输送压力。常见的管线钢元素及其功能见表1。

表1 常见管线钢元素及其功能

Table 1 Common pipeline steel elements and functions

编号	元素	质量分数/%	功 能
1	C	0.01~0.05	增加管线钢的强度,但对材料的韧性、塑性和焊接性有负面影响
2	Mn	1.10~2.00	固溶强化,增加强度和韧性;过量会发生锰偏析现象,降低材料的电化学腐蚀性能
3	S	<0.05	改善切削加工性能,但会降低材料的塑性,影响抗HIC、抗SSCC能力和冲击韧性
4	P	0.03~0.04	提高强度,增加耐大气腐蚀性能;过量则易引起偏析现象,降低材料的焊接性能
5	H	<0.000 2	会引起材料中出现白点,出现发裂现象,其质量分数越高,HIC的几率越大,腐蚀率越高,平均裂缝长度会显著增加
6	O	<0.001 5	在钢的炼制过程中会自然进入钢中,后期会进入脱氧工艺,但仍然会以FeO、MnO等形式存在,使材料的强度、塑性、尤其疲劳强度和冲击韧性降低
7	其他元素		如Cu可显著改善管线钢的抗HIC能力;Mo可提高材料的抗拉强度;Nb对材料的低温韧性有所改善;Ni则改善热脆性;Ti可提高材料的强度和韧性

2 低温环境下管线钢疲劳裂缝的萌生和扩展

2.1 疲劳裂缝的萌生

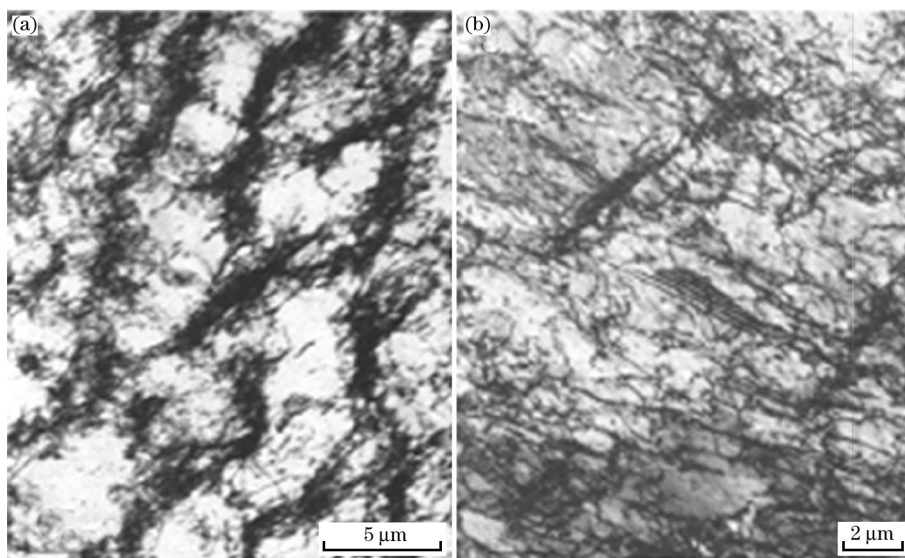
随着各领域对用钢要求的提高,钢材疲劳裂缝的萌生与扩展机理也是一个主要的研究方向^[24-26]。长输管道在服役过程中会穿越各种地形地貌,容易受到交变荷载的影响,比如管道周围土壤的冻融、泥石流与滑坡等地质灾害的作用力、海底管道受水流的冲击和浮力作用、管道上方车辆的震动等。管线钢在以上作用力的交互影响下会逐渐萌生疲劳裂缝。

从微观角度出发,在常温环境中,由于管线钢材料局部发生不可逆的塑性形变,引起槽口位置的粒子、晶体边界等产生复杂的错位,使得材料萌生疲劳裂缝^[27]。文献[28]通过试验描述了在疲劳裂缝

低温环境对管线钢的影响主要表现在疲劳寿命和塑性形变。在早期的研究中,通过观察发现,不同元素组成的金属材料在低温环境下的疲劳寿命会表现出相同的特征,即随着温度的降低,疲劳寿命增加。然而,当温度低于某一临界数值后,试验材料会发生脆断现象^[18-21]。因此,早期学者使用应力-应变曲线描述低温环境下的管材结构失效情况,根据试验结果找出不同管材的低温应变极限值。文献[22-23]针对铁和低合金钢的研究成果表明:在相同的应变范围内,铁和低合金钢的疲劳寿命随温度的降低而增加。所以优化管线钢材料的元素组成及其配比以便满足不同低温环境的结构稳定性,成为了管线用钢主要的研究方向之一。

萌生过程中的不可逆滑动现象。当管线钢处于低温环境中时,其疲劳裂缝的萌生和扩展机理将发生变化。

在特定情况下,温度的变化将影响材料亚结构的错位以及裂缝的萌生和扩展。文献[29-30]对316L和316LN奥氏体钢在氮元素作用和低温影响下的循环特性进行了研究。在低循环疲劳试验中,结合电镜扫描的材料位移研究结果显示,在无氮元素的316L型奥氏体钢中所累积的断裂能量(SFE)将会随着温度的递减而递减。该试验结果说明,当温度降低时,温度变化将引起交叉滑移等形变过程并逐渐抑制滑动的增加。故管线钢材料在低温环境下的抗疲劳性能有所提高,而疲劳裂缝的出现则会延迟。不同温度时316L型奥氏体钢的结构错位电镜扫描照片如图1所示^[29]。



(a) 26.85 °C (300 K); (b) -196.15 °C (77 K)。

图1 316L型奥氏体钢的结构错位电镜扫描照片

Fig. 1 Scanning diagram of 316L austenitic steel structure

2.2 疲劳裂纹的扩展

文献[31]在进行低温环境下材料疲劳裂纹扩展特性研究时,以是否具有疲劳韧-脆性转变(FDBT)临界温度值(Fatigue Ductile-Brittle Transition)为标准,将试验材料分为两组。对于具有该临界值的金属材料,当温度为-269.15 °C (4 K)以上时,材料的疲劳裂纹扩展受到材料韧-脆性机制变化的影响较大。因此,理想的低温材料为体心立方晶格金属材料和合金金属材料。这些金属材料无疲劳韧-脆性转变(FDBT)临界温度值,在低温环境下的裂纹扩展和传播速度较为缓慢。文献[32]对两组二元合金的疲劳裂纹扩展率特点进行了研究,两组材料分别为Fe-Si合金和Fe-Ni合金。通过试验发现:材料裂纹扩展速率随温度的降低而减小,但温度低于疲劳韧-脆性转变(FDBT)临界温度后,该趋势将发生转变,出现裂纹扩展速率随温度的降低而增加的现象。

在裂纹扩展速率方面,通过相关试验记录中显微镜对塑性区域大小变化的观察发现:每当试验材料的裂纹发生变化,均对应特定的扩展阶段和晶体尺寸。管材的裂纹扩展速率在不同微观结构下的变化特征见表2^[27]。

塑性区域半径 r_p 见式(1)^[27]。

$$r_p = A \cdot \left(\frac{\Delta K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (1)$$

式中: A 为常数,由特定的裂纹状态决定; σ_y 为屈服

强度,MPa; ΔK 为临界应力强度因子。

通过前人的研究成果可知:当环境温度 $T > \text{FDBT}$ (疲劳韧-脆性转变临界温度值)时,材料临界应力强度会随着环境温度的降低而有所增加,这是由于材料结构错位产生的热效应减少。当 $T < \text{FDBT}$ 时,疲劳临界应力强度因子 K_{Ic} 和在疲劳裂纹从阶段II向阶段III转换的应力强度振幅减小,将导致裂纹在低温下具有较高的传播速度。

表2 常温条件下疲劳裂纹扩展速度3个阶段主要特征

Table 2 Main characteristics of fatigue crack propagation speed in three stages under normal temperature condition

阶段名称	I 缓慢扩展 阶段	II 中等扩展 阶段	III 高速扩展 阶段
微观实效模型	单向剪切	双向滑动	附加静态模型
裂纹表面特征	平面或锯齿状	出现涟漪纹理	附加解理或微孔聚集
裂纹闭合水平	高	低	—
负载影响	大	小	大
应力影响	—	大	大
裂纹尖端附近可塑性	$r_p \leq d_g$	$r_p \geq d_g$	$r_p \gg d_g$

注: d_g 为材料晶体颗粒粒径。

改良了X80管线钢材料组成^[33],各元素化学成分见表3。该种材料配比增加了管线钢的韧性,降低了屈服强度。该管材不但安全性能有所提高,在

裂缝尖端张开位移(CTOD)检测中,CTOD_{-30℃}值为0.20~1.56 mm,甚至某些试件在-60℃的检测中仍具有理想的结果。文献[34]通过降低碳元素,控制

磷、硫元素和其他夹杂物的方式研发了-100℃无缝钢管。该管材外径范围可从60到720 mm,具备良好的低温韧性和抗腐蚀性能。

表3 试验用X80管线钢化学成分(质量分数)

Table 3 Chemical composition of X80 pipeline toughened test

C	Si	Mn	P	S	Cr+Ni+Cu+Mo	Nb	N
≤0.08	≤0.35	≤1.85	≤0.010	≤0.005	≤0.80	0.07~0.11	≤0.005

3 低温环境下管线钢焊接工艺及焊缝力学性能

低温环境对管线钢的焊接施工及焊缝稳定性有着较大的影响。在低温环境下,管线钢需要的施焊温度通常高于环境温度。因此,需要对施焊环境进行预加热,使其维持在一定范围内方可进行施工作业。而低温环境下的焊缝稳定性将直接影响长输管道的安全运营,需要根据中国的实际情况做出相应研究。

3.1 焊接施工温度要求

不同国家对管线钢在低温环境下的焊接施工规定有所不同。典型的有:美国国家标准AWS D1.1/D1.1M: 2006《钢结构工程》中规定温度低于-20℃时停止焊接施工;日本建筑学会的JASS6《钢结构工程》中将停止施工温度设为-5℃。在中国的管线钢低温焊接施工中,通常要求温度控制在-5℃以上,低于该温度时需停止焊接作业。

前面提到,中国长输管道需穿越-30℃甚至-50℃的寒冷地区。因此,在实际施工中,要求将预热温度提高20~30℃且完成焊接后立即进行保温,例如采用电加热带或使用石棉被对焊口进行包裹保温^[34]。为保证施工质量,需要做好施工作业者的防寒工作,搭建防风棚,使焊接在密闭、温度较高的环境下进行,避免焊接后急冷,保证焊缝凝固结晶过程处于正常状态。

3.2 低温环境下焊缝力学性能

针对不同钢级管线钢在低温环境下的焊缝稳定性进行了力学试验^[35-37]。试验中,首先将管材置于温度为-20℃、相对湿度为70%RH、风速为1 m/s的环境中放置4 h,然后进行焊接作业。为了保证试验结果和施工现场一致,焊接结束后对焊缝进行保温处理,达到降低冷却速度的目的。

通过对X80钢管在-40~0℃环境温度下进行拉伸弯曲性能试验和低温冲击吸收功试验,利用电

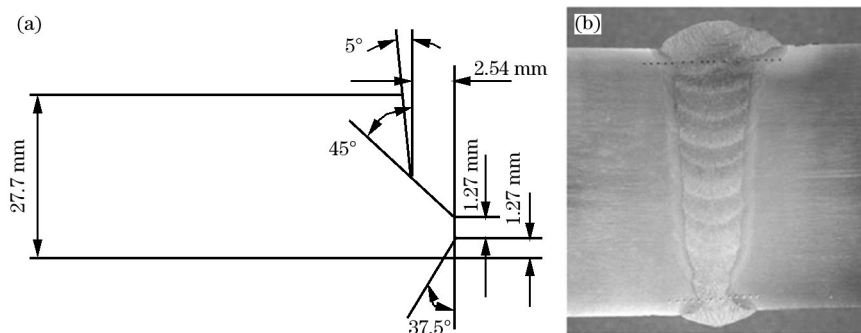
镜对断口观测后发现,随着温度的降低,焊缝的冲击韧性逐渐降低。当温度低于-30℃时,冲击数据开始大幅离散,试验数据不再具有规律。试验结果表明,低温环境会加快焊缝冲击韧性的下降速率。这一现象将对焊缝的抗冲击性能造成较大的影响,在后期的运营和维护中需要对焊缝进行专门的保护措施,以便降低长输管道受到冲击破坏的风险。

4 低温环境对管线钢焊缝疲劳稳定性的影响

低温环境下的焊接工作对管线钢的焊缝疲劳性能影响较大^[38-40]。焊接工作偶尔会存在某些缺陷,如咬边、未完全熔焊和焊接深度不足,造成焊缝应力集中,萌生应力疲劳裂缝,而气孔和夹渣现象会加快裂缝的扩展速度。由于温度对焊缝疲劳稳定性的相关试验不充分或数据较为分散,故相关结论不具备普适性。这部分研究内容主要是为了提高焊缝的抗疲劳性能。通过对焊接之后的焊缝保温处理,使得焊接处材料内奥氏体向马氏体转变的晶格扩展,从而产生压缩应力,改善焊缝的抗疲劳性能^[41-44]。

使用直径为1 067 mm,壁厚为27.7 mm的X80管线钢在室温和-60℃两种条件下进行了焊缝强度试验^[45],试验时的焊缝坡口示意图如图2所示。该试验用钢的材料化学组成参见表4,其中P_{cm}为镍、铬、钼、铌及钛等元素的复合材料。

焊缝的屈服强度试验结果表明,随温度的降低,焊缝的屈服强度和抗拉强度均有所加强,结果见表5^[45]。但通过对焊缝微观结构的观察发现,焊缝热影响区域萌生疲劳裂缝,表现出因热量输入不足而导致焊接热影响区域狭窄的现象。而受到低温影响,较小颗粒的奥氏体晶粒淬透性有限,导致出现上贝氏体的固态转化并出现疲劳裂缝,从而降低了焊缝的抗冲击能力。焊缝热影响区域内的疲劳裂缝如图3所示^[45]。



(a) 焊缝坡口示意图; (b) 焊接效果图。

图 2 焊缝坡口示意图和焊接效果图

Fig. 2 Diagram of weld bevel and weld macrograph

表 4 试验用 X80 管线钢化学成分(质量分数)

Table 4 Chemical composition of X80 pipeline toughened

test in literature					%
C	Si	Mn	P	S	P_{cm}
0.07	0.04	1.61	0.006	0.001	0.17

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cr + Cu)/20 + (Ni + Mo)/10 + V$$

表 5 X80 钢及其埋弧焊缝在室温和 -60 °C 下屈服强度变化试验结果

Table 5 X80 steel and submerged arc welding seam under room temperature and -60 °C and yield strength test results

温度/°C	管线钢屈服强度/MPa	焊缝屈服强度/MPa
室温	528~570	575~690
-60	625~692	600~770

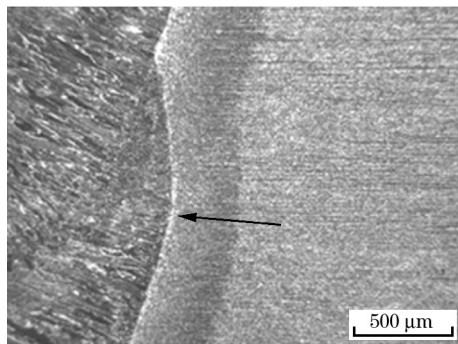


图 3 焊缝中热影响区域内的疲劳裂缝

Fig. 3 HAZ of root bead in literature

5 结语

(1) 油气长输管道的管线钢材料,在低温环境下均体现出随着温度的降低,其抗疲劳性能增加的特性,但温度降低至一定数值后材料将发生脆断。国外学者将该温度定义为疲劳韧-脆性转变(FDBT)临界温度,但该临界温度值因管材化学成分的元素组成不同而不同。因此,优化管线钢元素配比及质

量分数成为了研究低温环境下材料疲劳特性的主要方法。

(2) 利用电子显微镜观察管线钢在低温环境时的疲劳裂纹扩展,可将其划分为不同的扩展阶段。依据试验环境温度与疲劳韧-脆性转变(FDBT)临界温度的差异,可观察到裂缝在各阶段的不同形状和扩展特征。根据实际的应用情况,管线钢所处温度通常低于疲劳韧-脆性转变临界温度,故疲劳裂缝会有较高的传播速度。

(3) 在管线钢的低温焊接施工工艺要求方面,不同国家会根据本国实际情况规定相应的工艺要求。中国要求管线钢的焊接温度应保持在 -5 °C 以上,低于该温度则停止施焊作业。作业前的预热及焊接后的保温工作较为关键。焊缝的抗冲击性能随环境温度的降低而降低,因此,对管线钢的焊缝施加特殊防护不仅是焊接工作的重点,也是管道服役阶段需要特别注意的问题。管线钢焊接工艺不成熟会萌生疲劳裂缝,同时焊接缺陷问题更会加快裂缝的扩展速度。

(4) 低温环境下,管线钢的焊缝疲劳稳定性为目前主要的研究方向。但该部分研究因相关试验不充分或数据离散等问题,导致结果不具备普适性。焊缝的屈服强度试验结果表明,随着温度的降低,焊缝的屈服强度和抗拉强度均有所加强,但裂缝的抗冲击能力降低。

(5) 今后随着能源需求不断增加,管道会进一步向气候更恶劣、人烟更稀少的地区延伸,如何进一步防止低温下管材的脆性转化,提高管材韧性;如何在更恶劣环境下提高管材的耐蚀性和焊接性是今后研究的重点,更具有现实意义。

参考文献:

[1] 尹长华, 杨武堂. -20 °C 低温环境下大口径 X80 钢管的焊接

- [J]. 焊接技术, 2009, 38(5): 19. (YIN Chang-hua, YANG Wu-tang. Welding of the big diameter X80 pipe in low temperature environment of -20°C [J]. Welding Technology, 2009, 38(5): 19.)
- [2] 刘文月, 任毅, 高红, 等. X70/X80 管线钢厚板低温 CTOD 韧性研究[J]. 焊管, 2016, 39(10): 10. (LIU Wen-yue, REN Yi, GAO Hong, et al. Low temperature CTOD toughness research of X70/X80 thick plates used for pipeline steel[J]. Experiment and Research, 2016, 39(10): 10.)
- [3] 张清清, 章传国, 郑磊. T8/5 时间对 X80 管线钢热影响区组织和韧性的影响[J]. 中国冶金, 2017, 7(4): 26. (ZHANG Qing-qing, ZHANG Chuan-guo, ZHENG Lei. Effect of T8/5 time on microstructure and toughness in heat affected zone of X80 pipeline steel [J]. China Metallurgy, 2017, 27(4): 26.)
- [4] 单庆林, 陈玉鑫, 王雷川, 等. 高级别管线钢氮质量分数控制的研究与实践[J]. 中国冶金, 2016, 26(11): 51. (SHAN Qing-lin, CHEN Yu-xin, WANG Lei-chuan, et al. Practice and study in nitrogen mass fraction control for high grade pipeline steel [J]. China Metallurgy, 2016, 26(11): 51.)
- [5] 王秉新, 连景宝, 刘相华, 等. 热轧工艺对 X80 管线钢组织及低温塑性形变的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(11): 3786. (WANG Bing-xin, LIAN Jing-bao, LIU Xiang-hua, et al. Effect of hot-rolling processes on microstructures and low-temperature toughness in X80 grade pipe-line steel[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2014, 45(11): 3786.)
- [6] 颌向旭. 表面机械研磨处理对 X80 管线钢低温渗铝的影响[D]. 西安: 西安石油大学, 2011. (XIE Xiang-xu. Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment on the Aluminizing X80 Pipeline Steel at Low Temperature[D]. Xi'an: Xi'an University of Petroleum, 2011.)
- [7] 湛铁强, 宋欣, 张国栋, 等. 中亚 C 线大壁厚 X80 低温管线钢工艺与性能研究[J]. 中国冶金, 2014, 24(s): 57. (CHEN Tie-qiang, SONG Xin, ZHANG Guo-dong, et al. Study of process and property on low temperature toughness of large wall X80 pipeline steel for Central-Asia C project[J]. China Metallurgy, 2014, 24(s): 57.)
- [8] 刘志义. X80 钢半自动焊及低温焊接施工工艺研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2011. (LIU Zhi-yi. Study on Construction Process of Semi-Automatic Welding and Low-Temperature Welding of X80 Pipeline Steel[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.)
- [9] 孙亮. 管线钢控氮分析与实践[J]. 中国冶金, 2016, 26(10): 67. (SUN Liang. Nitrogen control analysis and practice of pipeline steel[J]. China Metallurgy, 2016, 26(10): 67.)
- [10] WANG Bing-xin, LIAN Jing-bao. Effect of microstructure on low-temperature toughness of a low carbon Nb-V-Ti microalloyed pipeline steel[J]. Materials Science and Engineering, 2014, 592: 50.
- [11] Fassina P, Brunella B M F, Lazzari L, et al. Effect of hydrogen and low temperature on fatigue crack growth of pipeline steels [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 103: 10.
- [12] Fassina P, Bolzoni F, Fumagalli G, et al. Influence of hydrogen and low temperature on mechanical behavior of two pipeline steels[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 81: 43.
- [13] Odd M Akselsen. Low temperature toughness in SA welding of 420 MPa steel[C]//Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011: 19.
- [14] Hauge M. Arctic offshore materials and platform winterisation [C]//International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012: 33.
- [15] Akselsen O M. Low temperature fracture toughness of X80 girth welds[C]//Proc 22nd Annual Int Offshore and Polar Eng Conf. Rhodes: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012: 4.
- [16] 徐景涛. X80 管线钢在长输管道中的应用及展望[J]. 中国冶金, 2016, 26(8): 1. (XU Jing-tao. Application and prospect of X80 steel in long-distance pipeline[J]. China Metallurgy, 2016, 26(8): 1.)
- [17] 王志勇, 李少坡, 李群, 等. 经济型 X80 管线钢的研制开发[J]. 中国冶金, 2016, 26(11): 64. (WANG Zhi-yong, LI Shao-po, LI Qun, et al. Research and development of low-cost X80 pipeline steel[J]. China Metallurgy, 2016, 26(11): 64.)
- [18] 张清清, 章传国, 郑磊. T8/5 时间对 X80 管线钢热影响区组织和韧性的影响[J]. 中国冶金, 2017, 27(4): 26. (ZHANG Qing-qing, ZHANG Chuan-guo, ZHENG Lei. Effect of T8/5 time on microstructure and toughness in heat affected zone of X80 pipeline steel[J]. China Metallurgy, 2017, 27(4): 26.)
- [19] Bishop S, Spretnak J. Mechanical properties, including fatigue of titanium-base alloys, RC-130-B and Ti-150-A at very low temperatures[J]. ASM Transactions, 1953, 45: 993.
- [20] Kenneford A, Nichols R. Fatigue properties of steels at low temperatures[J]. J Iron and Steel Inst, 1960, 194: 13.
- [21] Yakovenko L, Pustovalov V. Fatigue life of brittle superconducting alloys in normal and superconducting states[J]. Materials Science and Engineering 1983, 60(2): 109.
- [22] Polak J, Klesnil M. The dynamics of cyclic plastic deformation and fatigue life of low carbon steel at low temperatures[J]. Materials Science and Engineering 1976, 26(2): 157.
- [23] Yakovenko L, Pustovalov V. Fatigue life of brittle superconducting alloys in normal and superconducting states[J]. Materials Science and Engineering 1983, 60(2): 109.
- [24] 章伟钢, 韩顺, 厉勇, 等. 大型客机用 300M 钢疲劳破坏行为[J]. 钢铁, 2017, 52(10): 83. (ZHANG Wei-gang, HAN Shun, LI Yong, et al. Behavior of fatigue fracture of 300M steel for large passenger aircraft[J]. Iron and Steel, 2017, 52(10): 83.)
- [25] 刘杰. 钢轨表面疲劳裂纹扩展机制[J]. 钢铁, 2017, 52(4): 67. (LIU Jie. Analysis of propagation mechanism of fatigue crack on rail surface[J]. Iron and Steel, 2017, 52(4): 67.)
- [26] 张慧芳, 肖振兴, 周宇, 等. 无镍高氮不锈钢弯曲疲劳裂纹萌生与扩展行为[J]. 钢铁, 2017, 52(10): 89. (ZHANG Hui-fang, XIAO Zhen-xing, ZHOU Yu, et al. Bending fatigue crack initiation and propagation behaviors of a nickel free high nitro-

- gen stainless steel[J]. Iron and Steel, 2017, 52(10): 89.)
- [27] Antonio Alvaro, Odd M, Akselsen, et al. Fundamental aspects of fatigue of steel in arctic applications[C]//Proceedings of the Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference. Busan: [s.n.], 2014: 15.
- [28] Sangid M D. The physics of fatigue crack initiation[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 57: 58.
- [29] Vogt J, Foct J. Low-temperature fatigue of 316L and 316LN austenitic stainless steels[J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22(10): 2385.
- [30] Vogt J B, Magnin T. Effective stresses and microstructure in cyclically deformed 316L austenitic stainless steel: effect of temperature and nitrogen content[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1993, 16(5): 555.
- [31] Carpinteri A. Handbook of Fatigue Crack Propagation Inmetallic Structures[M]. Koninkrijk der Nederlanden: Access Online via Elsevier, 1994.
- [32] Moody N, Gerberich W. Fatigue crack propagation in iron and two iron binary alloys at low temperatures[J]. Materials Science and Engineering, 1979, 41(2): 271.
- [33] 聂文金, 张晓兵, 林涛铸, 等. 高性能钢组织控制及 $\phi 1422 \times 32$ mm K60-E2 低温管线管用钢板开发[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015. (NIE Wen-jin, Zhang Xiao-bing, Lin Tao-zhu, et al. Microstructure Control of the High Performance Steel and Development of Heavy Pipeline Steel Plates with High Toughness at a Low Temperature for $\phi 1422 \times 32$ mm K60-E2 LSAW Pipes[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.)
- [34] 李效华, 张国柱, 张传友, 等. -100 °C 低温无缝钢管的开发[J]. 钢管, 2014, 43(1): 25. (LI Xiao-hua, ZHANG Guo-zhu, ZHANG Chuan-you, et al. R&D of cryogenic seamless steel pipe for -100 °C service[J]. Steel Pipe, 2014, 43(1): 25.)
- [35] 李建军. X80 管线钢低温焊接技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. (LI Jian-jun. Research on Low Temperature Welding Technology of X80 Pipeline Steel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.)
- [36] 戈兆文. 长输管道焊接工艺评定标准分析及建议[J]. 压力容器, 2003, 20(7): 1. (GE Zhao-wen. Analysis and suggestion on welding procedure qualification standard for long distance gas transmission pipeline[J]. The Pressure Vessel, 2003, 20(7): 1.)
- [37] 隋永莉, 薛振奎, 赵海鸿. 石油天然气金属管道焊接工艺评定标准对比分析[J]. 压力容器, 2006, 23(6): 1. (SUI Yong-li, XUE Zhen-kui, ZHAO Hai-hong. Contrast of standard for weld procedure qualification of oil and gas metal pipeline[J]. The Pressure Vessel, 2006, 23(6): 1.)
- [38] Suresh S G, Zamiski, et al. Oxide-induced crack closure: An explanation for near-threshold corrosion fatigue crack growth behavior[J]. Metallurgical Transactions A, 1981, 12(8): 1435.
- [39] Lassen T. The effect of the welding process on the fatigue crack growth[J]. Welding Journal, 1990, 69: S75.
- [40] Rading G. The effect of welding on the fatigue crack growth rate in a structural steel[J]. Welding Journal, 1993, 72: 307.
- [41] 李龙庆, 李大东, 王艳. X80 管线钢螺旋埋弧焊管性能分析[J]. 电焊报, 2013, 43(8): 64. (LI Long-qing, LI Da-dong, WANG Yan. Performance analysis of submerged arc welding for X80 spiral pipes[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(8): 64.)
- [42] Singh P J, Mannan S. Fatigue life extension of notches in AISI 304L weld ments using deep cryogenic treatment[J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12(2): 263.
- [43] Kalia S. Cryogenic processing: a study of materials at low temperatures[J]. Journal of Low Temperature Physics, 2010, 158(5/6): 934.
- [44] 孔令然. X80 管线钢的研究与应用[J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21(36): 120. (KONG Ling-ran. Discussion on the research on and application of X80 pipeline steel[J]. Sci-tech Information Development and Economy, 2011, 21(36): 120.)
- [45] Odd M Akselsen, Xiaobo Ren, et al. Properties in submerged arc welding X80 plate Arctic applications[C]//Proceedings of the Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference. Hawaii: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2015: 31.