

管线钢焊接接头腐蚀与防护的研究进展

曹睿^{1,2} 丁云² 赵小康² 钟伟强²

1 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室 兰州 730050

2 兰州理工大学材料科学与工程学院 兰州 730050

摘要 介绍了管线钢焊接接头腐蚀行为的最新研究进展,综述了管线钢焊接接头腐蚀行为的研究方法,包括应力腐蚀法、盐雾腐蚀法、浸泡实验法和电化学法等,并对各研究方法的优缺点和应用范围加以比较和分析。同时介绍了管线钢接头腐蚀机理及其研究热点和最新研究进展,包括应力腐蚀机理、盐雾腐蚀机理和 CO₂ 腐蚀机理,并总结了改善管线钢焊接接头耐蚀性的腐蚀防护方法。

关键词 管线钢 腐蚀方法 腐蚀机理 腐蚀防护

中图分类号 TG171

文章编号 1002-6495(2017)06-0657-07

Research Progress on Corrosion and Protection of Welded Joints of Pipeline Steels

CAO Rui^{1,2}, DING Yun², ZHAO Xiaokang², ZHONG Weiqiang²

1 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2 School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Correspondent: CAO Rui, E-mail: caorui@lut.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (51675255, 51761027), Gansu Province Basic Research Innovation Group Planning Project (17JR5RA107) and Gansu Efficient Collaborative Innovation Team Project (2017C-07)

Manuscript received 2017-03-03, in revised form 2017-06-20

ABSTRACT The current status of the study on corrosion behavior of welded joints of pipeline steel was reviewed, while the corrosion testing methods including stress corrosion test, salt spray test, immersion test and electrochemical test were discussed in detail in terms of their advantages and disadvantages as well as the range of application for each method. At the same time, the research progress on corrosion of welded joints of pipeline steels such as stress corrosion, salt spray corrosion and CO₂ corrosion as well as the relevant mechanism were introduced. The methods for improving the corrosion resistance of welded joints of pipeline steels were also summarized.

KEY WORDS pipeline steel, corrosion methods, corrosion mechanism, corrosion protection

管道运输是输送油气的一种重要方式,管线钢的研究对管道工程的发展具有重要的指导意义。其较高的耐压强度、低温韧性、耐腐蚀性和优良的焊接

性能等优点已经使之广泛应用于制作石油、天然气的输送管道^[1]。管线工程的发展趋势是大管径、高压、高冷和腐蚀的服役环境、海底管线的壁厚化,其主要优点在于能够提高传输效率并降低管线工程建设及传输成本^[2]。输气管道大多服役在潮湿的环境下,不可避免的会引起管线的腐蚀和疲劳断裂。工程上的管线钢大多采用埋弧焊焊接方法,焊接接头是一个由不同组织组成的区域,各区域组织性能差异较大。所以高压输送管线的焊接部位,尤其是管线环焊部位和弯道部位等应力集中处是失效事故的

资助项目 国家自然科学基金(51675255,51761027),甘肃省基础研究创新群体计划(17JR5RA107)和甘肃省高效协同创新团队项目(2017C-07)

收稿日期 2017-03-03 **定稿日期** 2017-06-20

作者简介 曹睿,女,1977年生,教授

通讯作者 曹睿, E-mail: caorui@lut.cn, 研究方向为新材料的焊接性及材料的变形断裂行为

DOI 10.11903/1002.6495.2017.038

多发位置^[3-5]。

焊接接头组织成分相较于母材复杂多变,因此其服役行为与管线钢母材也存在差异。Koh等^[6]研究发现铁素体-针状铁素体组织比铁素体-珠光体组织更耐硫化物应力腐蚀开裂(SSCC)。从已有的文献来看,国内外学者对管线钢接头腐蚀性能的研究主要涉及接头的宏观腐蚀行为,其中腐蚀起始区域,腐蚀影响因素及短期腐蚀性能等是主要的研究热点,而对接头腐蚀机理的研究尚不完善,还有很多难题尚未攻克。管线钢材料、服役条件及腐蚀行为研究方法的不同造成接头腐蚀敏感性差异,在众多研究管线钢接头腐蚀行为的报道中,一些文献^[7-9]指出母材比接头的耐蚀性好,主要是因为组织成分的均匀性。也有文献^[10,11]得出相反的结论。下面将详细介绍目前国内外关于管线钢焊接接头腐蚀行为研究方法、接头腐蚀机理的最新进展及改善接头耐蚀性的防护方法。

1 管线钢腐蚀行为研究方法

1.1 应力腐蚀法

应力腐蚀法是研究接头应力腐蚀开裂(SCC)性能的常用方法,根据试样加载方式又可分为恒应变法、恒载荷法和慢应变速率法,其中慢应变速率法具有更高的灵敏性^[3,12]。该方法主要用于研究埋地管线的SCC性能,土壤环境下的SCC是其中一种主要破坏形式,目前认为主要与土壤溶液中碳酸盐的浓缩聚集有关,有两种存在形式:高pH值SCC和近中性pH值SCC,国内外很多学者对此进行大量的研究,其中近中性pH值SCC的机理尚未达成统一的认识,有待于进一步的研究^[13-16]。

1.1.1 恒应变法 恒变形法是使管线钢接头发生拉伸或弯曲变形,弯曲时接头不能产生裂纹,借助微观金相组织分析并结合断裂时间来评定其在试验环境中的SCC敏感性的方法。该方法简单且无需特殊的设备,容易实现,适合在有限空间的容器内进行成批的长期实验,但不能准确测定应力值,裂纹产生后还会出现应力松弛,使裂缝延展放慢或中止,为了测出裂缝最初出现的时间,可能要多次中止实验,取出试样进行观察,得到的实验数据也比较分散。赵东胜等^[17]采用三点弯曲加载研究了X65管线钢焊接接头在H₂S/CO₂环境中的SCC性能,结果显示SCC对低温和酸性条件比较敏感。

1.1.2 恒载荷法 恒载荷法是研究应力腐蚀的传统方法,它利用砝码、力矩、弹簧等对试样施加载荷,恒载荷法加载是恒定的,虽然实验设备复杂,但

是却可以准确测出最初的应力值,通过测量出金属出现裂纹和断裂的时间,进而来研究金属的应力腐蚀敏感性。但是随着腐蚀和应力的持续作用使其横截面不断减小,导致实际有效应力值不断增大,因而不能得到准确的应力值。

Zhou等^[18]采用四点弯曲实验对X60和CrFe铁625合金异种金属焊接接头施加恒定载荷来研究其在H₂S环境下的SSCC性能,研究发现异种金属焊接接头熔合线的SSCC在H₂S酸溶液环境下具有很高的敏感性。

1.1.3 慢应变拉伸实验法 慢应变速率拉伸方法(SSRT)是以非常缓慢的应变速率把载荷施加到试样上,通过观察断裂试件断口形貌,来分析试件的断裂类型,以此来评价环境的SCC敏感性。SSRT在评价SCC性能方面有2种优点:(1)实验周期短,Ikeda等^[19]证实了这一点。(2)主要用来测量合金对应力腐蚀的敏感性。该方法创新性地提供了在传统应力腐蚀实验中不能迅速激发应力腐蚀的环境里对应力腐蚀敏感性的快速试验。

Parkins^[20]认为应力腐蚀开裂需要一定的应变速率限定条件,只有当应变速率达到限定范围时,才可能发生SCC。Beavers等^[21]研究发现在慢应变速率拉伸实验中必须考虑电位这个因素,必要时要对材料实际服役环境所要求的电位范围都进行实验。

Zvirko等^[22]研究结果表明低强度的X60管线钢比17H1S钢具有较好的耐SCC性能。Kong等^[23]和Wan等^[24]也采用此方法评定了特定钢种在特定环境下的SCC行为。

综合以上,恒应变法和恒载荷法主要适用于确定裂纹扩展速率(CGR)和裂纹扩展的临界参量的裂纹行为实验中,如应力强度因子门限值 K_{ISCC} 。与恒应变法相比,恒载荷法的试样将更快地断裂且实验条件更为苛刻,试样寿命较短,更加接近实际工况。与前两种实验方法相比,慢应变速率拉伸法适用于快速评价焊接接头应力腐蚀敏感性,因其具有较高的灵敏性且应力腐蚀实验周期短而被广泛应用,可定量判断接头SCC敏感性的大小。但是其实验设备复杂,实验影响因素较多,对材料要求也严格,在后续比较腐蚀环境和空气拉伸曲线的工作时,难以比较裂纹的潜伏期和扩展期,不能准确地计算裂纹扩展速率。

1.2 盐雾实验法

盐雾腐蚀实验按照人造气氛腐蚀实验盐雾实验(SSC)(GB/T 10125-1997)标准进行,通过调整试验箱中盐雾的压力和温度来模拟试样接头在海洋或

含盐潮湿地区气候环境下的腐蚀行为,主要有酸性盐雾和中性盐雾两种实验方法,目前对管线钢接头酸性盐雾实验的研究较少。盐雾实验是模拟管线钢服役环境进而加速接头腐蚀的研究方法,其模拟效果差,不能定量的表征管线钢接头实际服役工况,因此仅作为一种加速腐蚀实验方法对接头的腐蚀性能进行评估^[25-27]。

Kong等^[28]采用NaCl盐雾腐蚀法研究了X70管线钢在模拟海洋大气环境下的SSC行为,发现表面首先发生严重的点蚀,随着腐蚀时间延长,进而出现全面腐蚀。杨光等^[29]研究表明Cl⁻容易诱发点蚀,并且点蚀是裂纹萌生和扩展的主要来源,其形成的氧化膜提高了X70管线钢焊接接头的防盐雾腐蚀性能。

1.3 溶液浸泡法

溶液浸泡法主要用来定性评价焊接接头横截面及焊缝表面的点蚀及晶间腐蚀行为,通常与SSRT,电化学,失重法等方法结合在一起使用。该方法的不足之处在于实验人员通过肉眼观察腐蚀试样进行定性判断腐蚀情况,实验结果因人而异导致最后的判定结果也有所差别,但能较好地评价焊接接头组织区域的腐蚀敏感性,通过对微观腐蚀形貌进行观察,对腐蚀产物进行分析,同时结合失重法对腐蚀速率进行计算,从而定量评估区域的腐蚀性能,对实际工况腐蚀情况有指导意义,是研究焊接接头腐蚀性能的常用方法。

Zhu等^[10]采用浸泡法研究了3Cr低合金管线钢在含CO₂溶液环境下的腐蚀行为,发现焊接接头区域的BM比单片的母材(BM)腐蚀严重,焊缝(WZ)比单片的WZ腐蚀较轻,而热影响区(HAZ)与单片的HAZ腐蚀程度相当。

Bordbar等^[30]采用浸泡法研究了热处理前后X70管线钢焊接接头在0.5 mol/L Na₂CO₃和1 mol/L NaHCO₃混合溶液中浸泡45 d的腐蚀行为,结果显示,HAZ的耐腐蚀性最低是因为HAZ的孔隙度和渗透率较大造成的,热处理后,BM的耐腐蚀性有所降低,而HAZ和WZ的耐蚀性明显提高,因为热处理通过去除局部应力和晶格缺陷减小了阳极溶解。

刘珍光等^[31]利用浸泡法研究实验钢在超临界CO₂环境的腐蚀行为,发现短时间浸泡后腐蚀速率较大,之后迅速下降,这与基体表面形成的腐蚀产物有关。张宁等^[32]研究发现X80管线钢在滨海滩涂土壤模拟液中的腐蚀行为随浸泡时间和腐蚀产物的变化而改变。

1.4 电化学法

电化学方法用于研究埋地管线钢的SSC行为,

因其操作简单,能定量测量接头的腐蚀速率和极化电位等一系列优点而被广泛应用。该方法是通过测量接头的开路电位、极化曲线、电化学阻抗谱等腐蚀性参数,再结合其他的定性、定量的实验来评价其腐蚀行为。目前常用的电化学研究方法有线性极化法、稳态极化法、动电位扫描极化法等。其中,动电位和稳态极化技术已经用来研究高pH值SCC发生开裂的电位范围和评估开裂环境对SCC的影响,但不能单独用来研究近中性pH值SCC,此外这两种技术都有各自的局限性。由于大多数环境下都存在电化学腐蚀现象,因此常用的电化学测试手段和机理亟待更深层次的研究。

Khalaj等^[33]采用该方法测量了X70管线钢焊接接头在碳酸溶液中的动电位极化曲线,发现原始试样和焊接试样有最低的腐蚀电流密度,贝氏体显微组织区域有较高的钝化电流密度。Qiao等^[34]分析了不等厚的20G管线钢焊接接头在含有CO₂和Cl⁻的溶液中耐腐蚀性,发现Cl⁻加速了CO₂腐蚀速率,同时接头的极化曲线和阻抗曲线十分相似,各区域的腐蚀电位、自腐蚀电流密度和阻抗值非常接近,腐蚀速率大体相等。王炳英等^[35]研究发现X80管线钢及焊接接头在NS4溶液中的极化曲线具有典型的活性溶解特征,没有活化-钝化行为和明显的阳极溶解型应力腐蚀敏感电位区。

1.5 其他方法

失重法是对试样进行一定时间的浸泡腐蚀,然后通过计算腐蚀前后试样的质量变化来确定试样的平均腐蚀速率的一种快速简单的腐蚀研究方法,但后续对接头腐蚀产物的处理工作较为复杂,为得到准确的腐蚀速率,应谨慎选择腐蚀溶液,实验操作要规范,以免由于腐蚀产物未除尽或基体组织被除掉这种主观原因而导致质量误差,从而影响了实验的准确性^[36]。

原位观察法是通过观察接头组织在腐蚀介质中连续变化的情况来研究其腐蚀行为,它较为直观地反应了接头组织在腐蚀介质中的演变过程,是研究接头腐蚀机理常用的方法。因其可以较好地研究接头组织不同区域的腐蚀行为和机理而被广泛应用。

2 管线钢焊接接头腐蚀机理

管线钢服役环境恶劣,工况复杂,主要应用在不同pH值的土壤、海水和大气中,且运输介质不同,在交变作用下接头发生多种不同的类型腐蚀,亟待更深层次的研究其腐蚀机理。

2.1 应力腐蚀机理

应力腐蚀的影响因素很多,导致应力腐蚀开裂

机理复杂,国内外很多学者对此进行了广泛的研究,至今还没有完全统一。从现有的文献看,主要存在两种观点:高pH值环境下SCC和近中性pH值环境下SCC,其中高pH值环境下主要发生沿晶应力腐蚀开裂(IGSCC),并且保护膜破裂+阳极溶解机制普遍已经达成了共识^[37-40],近些年对机理的研究主要集中在近中性pH值环境下SCC,还没有形成统一的理论,目前主要存在以下3种观点:阳极溶解(AD)机制^[41]、氢脆(HE)机制^[42]和阳极溶解(AD)+氢脆(HE)混合机制^[18,43-46]。

2.2 盐雾腐蚀机理

管线钢在含有Cl⁻的盐雾环境中容易诱发点蚀行为,其腐蚀过程可分为三个阶段:(1)表面发生点蚀,形成一层含大量NaCl的水膜,进而产生氧化还原反应;(2)由点蚀扩展产生的腐蚀产物;(3)腐蚀产物溶解,金属完全暴露在溶液中,对其表面产生均匀腐蚀。由于金属暴露在空气中,与O₂接触而形成腐蚀产物铁盐Fe₂(OH)₂Cl₂,最终全部风干氧化形成锈蚀物Fe₂O₃。由于腐蚀产物稀疏多孔,Cl⁻可以穿透腐蚀产物而与内部Fe²⁺结合,从而破坏腐蚀平衡,进一步加速腐蚀。

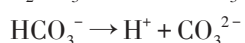
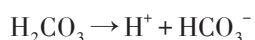
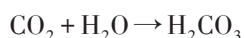
杨光等^[29]研究了X70管线钢焊接接头的盐雾腐蚀行为,发现腐蚀试样表面有很多裂纹,腐蚀产物之间的空隙比较大。X70管线钢焊接接头的腐蚀主要是因为Cl⁻半径较小,能通过腐蚀产物表面的裂纹进入接头内部与金属发生反应,从而加速了接头的局部腐蚀。

孔德军等^[25]对X70管线钢焊接接头的盐雾腐蚀进一步分析,发现Cl⁻活性破坏了表面氧化膜,促进局部腐蚀损伤,形成细小的点蚀坑,随着Cl⁻富集进而破坏氧化膜,同时阳极产生的Fe²⁺与水电离产生的OH⁻离子反应,生成难溶于水的Fe(OH)₂,并与腐蚀介质中的FeCl₂进一步反应最终生成铁盐而形成致密的腐蚀膜,从而阻止腐蚀的继续进行,随着腐蚀膜的脱落,盐雾腐蚀继续进行。

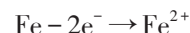
2.3 CO₂腐蚀机理

由于石油天然气在运输管线中存在伴生气体CO₂,其溶于水后形成腐蚀介质对管线钢的腐蚀情况比盐酸更为严重,产生全面腐蚀和严重的局部腐蚀^[47-50]。

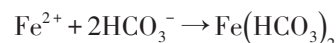
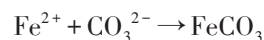
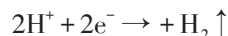
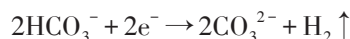
发生的腐蚀反应为:



阳极发生氧化反应



阴极发生析氢反应



从而形成腐蚀产物FeCO₃。

析出H₂的存在,特别是在管线钢腐蚀裂尖处的聚集,会形成氢脆机制的SCC。

关于CO₂腐蚀机理中阴极H₂的生成过程和阳极腐蚀产物FeCO₃的生成过程仍不明确,还需进一步研究证实。

3 管线钢接头的防腐蚀措施

为了保证管线钢在服役环境下具有更好的耐腐蚀性能,常常需要提高管线钢的耐腐蚀能力,通常采用物理隔离和电化学改性等手段进行防腐,具体方法有接头热处理、表面改性、涂层处理与阴极极化、使用缓蚀剂或者改善腐蚀环境,以改变管线钢的组织性能、化学成分、表面应力、电化学性能和使用环境等。针对不同的使用环境,使用一种或多种防腐蚀措施对管线钢进行防腐。

3.1 接头热处理

由于接头区域的化学成分、组织性能、晶粒尺寸和残余应力等与母材不同,通常导致接头比母材更易于腐蚀,通过对焊接接头进行后期的热处理工艺来改善接头组织性能,消除成分偏析和残余应力,从而提高管线钢接头力学性能和耐腐蚀性能。但热处理改善管线钢接头耐腐蚀性通常是有限的,还需要结合其他方法共同加以防护。

3.2 防护涂层与阴极保护

目前管线钢的防腐主要是通过表层涂覆防护层+阴极保护相结合的形式进行防护,主要应用在土壤环境中长输管线。表面涂层是通过在管线钢表面涂覆特定的防护涂层来物理隔绝腐蚀介质,起到被动保护的作用。管线钢的防护涂层目前有许多不同种类,涂层在管线钢装配使用过程中会脱落,而且剥离涂层下的管线钢腐蚀较为严重,这引起国内外学者们的重视,已成为一个重点研究方向^[51]。

阴极保护是通过在管线钢直接或间接施加电流,使其处于较负电位下,从而防止管线钢腐蚀的一种方法^[52]。该方法主要用于大型金属构件或土壤电阻率较高的金属结构防护,如:长输埋地管道,大型

罐群等。对于管线钢的一般性腐蚀广泛采用阴极保护与有机涂层联合使用的防护方法,该方法对低强度级别的管线钢来说,既可以控制一般性腐蚀,又可以降低其SCC敏感性;而对于高强度级别的钢种,阴极极化(或传统意义的阴极保护)则不能有效控制材质的SCC性能。

3.3 缓蚀剂

缓蚀剂作为抑制管线钢腐蚀的化学药品是腐蚀防护的重要手段,通过在管道表面沉淀、吸附形成保护膜,可以有效抑制管道的微生物腐蚀和垢下腐蚀等。目前,缓蚀剂的种类繁多,防腐机理也大有不同。由于其成本低,效果显著,所以在石油天然气行业大量应用,同时应该致力于新型、低毒、高效的缓蚀剂的开发和生产^[53]。

3.4 表面改性

表面改性是提高防腐性能的研究热点,包括激光熔覆、渗层和喷丸处理等,通过以上手段在管线钢表层引入外界元素,或者改变表层组织和细化晶粒,并且将表面拉应力转变为压应力,对提高管线钢的抗SCC性能起到很好的效果,同时其他表面改性工艺对腐蚀性能影响和应用正在研究中。由于该方法只是表面处理,不需要对管线钢内部进行处理,所以易于自动化生产,但它不能从根本上解决腐蚀问题。吴永忠等^[54]发现原始状态的X70管线钢焊缝存在残余拉应力,易于与Cl⁻发生应力腐蚀开裂,而激光冲击处理在焊缝引入残余压应力,同时细化表层晶粒,表层产生强化层,从而提高管线钢焊缝抗盐雾腐蚀性能。

吴永忠等^[26]研究结果表明热浸渗铝处理后试样表层形成一层致密的Al₂O₃层,且内层有多种析出物,其表层黑色物质为Fe/Al化合物,有效地阻止了腐蚀性介质Cl⁻离子和基体活性铁的接触,从而抑制了表面点蚀的发生。

3.5 改善腐蚀环境

腐蚀环境的差异对管线钢的腐蚀影响较大,因此通过改善腐蚀环境的温湿度、pH值和介质流速等变量,即可有效延缓管线钢的腐蚀进度。伍远辉等^[55]研究发现湿度对X70管线钢腐蚀的影响显著,并且土壤含水量在15%~20%时,腐蚀速率最大,当湿度相同时,盐含量高的土壤腐蚀较快。

吴华等^[56]发现介质流动导致腐蚀速率增大,腐蚀形态呈现均匀腐蚀-局部腐蚀-均匀腐蚀的特点,随着流速增加,腐蚀产物膜不断被腐蚀介质冲刷而厚度变小,当流速达到一定值后,腐蚀产物膜基本被

冲刷掉,导致管线钢的腐蚀加剧。

谢飞等^[57]研究发现随着溶解氧含量的不断降低,管线钢腐蚀速率下降,当溶解氧含量降到0.35 mg/L时,管线钢表面产生以FeCO₃为主的腐蚀产物膜,从而明显抑制了腐蚀反应的进行,对X80管线钢起到保护作用,此时管线钢腐蚀现象最不明显。王霞等^[58]发现pH值和Cl⁻含量均对管线钢的腐蚀产生影响。

4 结论

管线钢腐蚀的定性化表征较为多见,而管线钢腐蚀量化机理研究较少,特别是复杂的交互式环境对于管线钢腐蚀的影响仍在研究中。腐蚀机理的深入研究对如何评价管线钢在不同工况下服役的腐蚀行为具有重要的研究意义和指导意义。

参考文献

- [1] Yang Y H, Shi L, Xu Z, et al. Fracture toughness of the materials in welded joint of X80 pipeline steel [J]. Eng. Fract. Mech., 2015, 148: 337
- [2] Wang X L, Dong L M, Yang W W, et al. Effect of Mn, Ni, Mo proportion on microstructure and mechanical properties of weld metal of K65 pipeline steel [J]. Acta Metall. Sin., 2016, 52: 649 (王学林, 董利明, 杨玮玮等. Mn/Ni/Mo 配比对 K65 管线钢焊缝金属组织与力学性能的影响 [J]. 金属学报, 2016, 52: 649)
- [3] Li Y T, Du Z Y, Tao Y Y, et al. Microstructures and SSCC properties for base metals and welding joints of domestic X70 pipeline steels [J]. J. Tianjin Univ., 2005, 38: 274 (李云涛, 杜则裕, 陶勇寅等. 国产 X70 管线钢与焊接接头组织及 SSCC 性能 [J]. 天津大学学报, 2005, 38: 274)
- [4] Kobayashi Y, Ume K, Hyodo T, et al. The resistance of welded linepipes to sulfide stress cracking [J]. Corros. Sci., 1987, 27: 1117
- [5] Takahashi A, Ogawa H. Influence of softened heat-affected zone on stress oriented hydrogen induced cracking of a high strength line pipe steel [J]. ISIJ Int., 1995, 35: 1190
- [6] Koh S U, Kim J S, Yang B Y, et al. Effect of line pipe steel microstructure on susceptibility to sulfide stress cracking [J]. Corros. Sci., 2004, 60: 244
- [7] Wu M, Xie F, Chen X, et al. Corrosion behavior of X80 pipeline steel and its weld joint in Ku'erle soil environment [J]. J. Sichuan Univ. (Eng. Sci. Ed.), 2013, 45(5): 185 (吴明, 谢飞, 陈旭等. X80 管线钢及其焊缝在库尔勒土壤环境中腐蚀行为 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(5): 185)
- [8] Huang A G, Li Z Y, Yu S F, et al. Corrosion behavior of weld metal of low-alloy steel [J]. Trans. China Weld. Inst., 2005, 26(11): 30 (黄安国, 李志远, 余圣甫等. 低合金钢焊缝金属的腐蚀行为 [J]. 焊接学报, 2005, 26(11): 30)
- [9] Zhou X L, Li H R, Hua X Z, et al. Microstructures and corrosion properties of submerged arc welded joint for X80 pipeline steel [J]. Trans. China Weld. Inst., 2011, 32(1): 37 (周贤良, 李晖榕, 华小珍等. X80 管线钢埋弧焊接接头的组织和腐蚀性能 [J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 37)
- [10] Zhu J Y, Xu L N, Feng Z C, et al. Galvanic corrosion of a welded

- joint in 3Cr low alloy pipeline steel [J]. *Corros. Sci.*, 2016, 111: 391
- [11] Hu L H, Zhang L, Xu L N, et al. CO₂ corrosion behavior of 3Cr low-alloy pipeline steel and weld joints [J]. *J. Univ. Sci. Technol. Beijing*, 2010, 32: 345
(胡丽华, 张雷, 许立宁等. 3Cr 低合金管线钢及焊接接头的 CO₂ 腐蚀行为 [J]. *北京科技大学学报*, 2010, 32: 345)
- [12] Henthorne M, Parkins R N. Some aspects of stress-corrosion crack propagation in mild steel [J]. *Corros. Sci.*, 1966, 6: 357
- [13] Manfredi C, Otegui J L. Failures by SCC in buried pipelines [J]. *Eng. Fail. Anal.*, 2002, 9: 495
- [14] Yang W. Some new advances in research of SCC of buried oil and gas pipelines [J]. *Corros. Prot.*, 2003, 24: 461
(杨武. 埋地油气管线应力腐蚀破裂研究的一些新进展 [J]. *腐蚀与防护*, 2003, 24: 461)
- [15] Lu B T, Luo J L, McCrady B. Near-neutral pH SCC initiation and early propagation of X70 pipeline steel [A]. *Proceedings of the 4th International pipeline Conference [C]*. Calgary, ASME, 2002: 1821
- [16] Arafin M A, Szpunar J A. A new understanding of intergranular stress corrosion cracking resistance of pipeline steel through grain boundary character and crystallographic texture studies [J]. *Corros. Sci.*, 2009, 51: 119
- [17] Zhao D S, Xiang A, Wang J F, et al. Sulfide stress corrosion cracking resistance of X65 pipeline steel welded joint in H₂S/CO₂ environment [J]. *Corros. Prot.*, 2014, 35: 43
(赵东胜, 向安, 王聚锋等. X65 管线钢焊接接头在 H₂S/CO₂ 环境中抗 SSCC 性能 [J]. *腐蚀与防护*, 2014, 35: 43)
- [18] Zhou C S, Huang Q Y, Guo Q, et al. Sulphide stress cracking behaviour of the dissimilar metal welded joint of X60 pipeline steel and Inconel 625 alloy [J]. *Corros. Sci.*, 2016, 110: 242
- [19] Ikeda A, Kaneko T, Ando Y. On the evaluation method of sulfide stress cracking susceptibility of carbon and low alloy steels [J]. *Corros. Sci.*, 1987, 27: 1099
- [20] Parkins R N. 1990 Plenary Lecture: Strain rate effects in stress corrosion cracking [J]. *Corrosion*, 1990, 46: 178
- [21] Beavers J A, Koch G H. Limitations of the slow strain rate test for stress corrosion cracking testing [J]. *Corrosion*, 1992, 48: 256
- [22] Zvirko O I, Savula S F, Tsependa V M, et al. Stress corrosion cracking of gas pipeline steels of different strength [J]. *Procedia Struct. Integr.*, 2016, 2: 509
- [23] Kong D J, Wu Y Z, Long D. Stress corrosion of X80 pipeline steel welded joints by slow strain test in NACE H₂S solutions [J]. *J. Iron Steel Res.*, 2013, 20: 40
- [24] Wan H X, Du C W, Liu Z Y, et al. The effect of hydrogen on stress corrosion behavior of X65 steel welded joint in simulated deep sea environment [J]. *Ocean Eng.*, 2016, 114: 216
- [25] Kong D J, Wang J C, Ye C D. Mechanism of salt spray corrosion of X70 high grade pipeline steel welded joints [J]. *Trans. China Weld. Inst.*, 2015, 36(5): 51
(孔德军, 王进春, 叶存冬. X70 高钢级管线钢焊接接头盐雾腐蚀机理 [J]. *焊接学报*, 2015, 36(5): 51)
- [26] Wu Y Z, Long D, Kong D J. Salt spray corrosion behaviours of X70 pipeline steel by hot-dipped-aluminum treatment [J]. *J. Sichuan Univ. (Eng. Sci. Ed.)*, 2011, 43(Suppl.): 218
(吴永忠, 龙丹, 孔德军. X70 管线钢热浸渗铝处理后盐雾腐蚀行为 [J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2011, 43(增刊1): 218)
- [27] Kong D J, Wu Y Z, Fu G Z, et al. EDS analysis of aluminized coatings on X70 pipeline steel after salt spray corrosion [J]. *Trans. Mater. Heat Treat.*, 2013, 34(6): 125
(孔德军, 吴永忠, 付贵忠等. X70 管线钢渗铝层盐雾腐蚀后能谱面扫描分析 [J]. *材料热处理学报*, 2013, 34(6): 125)
- [28] Kong D J, Wu Y Z, Long D. Salt spray corrosion resistance of aluminized coatings on X70 pipeline steel by laser thermal radiation [J]. *Rare Metal Mater. Eng.*, 2014, 43: 2083
- [29] Yang G, Kong D J, Ye C D, et al. Salt spray corrosion behavior of X70 pipeline steel welded joints by submerged arc automatic welding [J]. *Trans. Mater. Heat Treat.*, 2014, 35(8): 157
(杨光, 孔德军, 叶存冬等. X70 管线钢埋弧自动焊接接头的盐雾腐蚀行为 [J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(8): 157)
- [30] Bordbar S, Alizadeh M, Hashemi S H. Effects of microstructure alteration on corrosion behavior of welded joint in API X70 pipeline steel [J]. *Mater. Des.*, 2013, 45: 597
- [31] Liu Z G, Gao X H, Du L X, et al. Corrosion behavior of pipeline steel used as protective layers of flexible pipes under supercritical CO₂ conditions [J]. *J. China Univ. Petrol.*, 2016, 40(4): 127
(刘珍光, 高秀华, 杜林秀等. 海洋软管铠装层用管线钢在超临界 CO₂ 环境下腐蚀行为 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 2016, 40(4): 127)
- [32] Zhang N, Sun H Y, Sun L J, et al. Electrochemical corrosion behavior of X80 pipeline steel in a simulated soil solution for coastal tidal flat wetland [J]. *J. Chin. Soc. Corros. Prot.*, 2015, 35: 339
(张宁, 孙虎元, 孙立娟等. X80 管线钢在滨海滩涂土壤模拟液中的电化学腐蚀行为 [J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2015, 35: 339)
- [33] Khalaj G, Khalaj M J. Investigating the corrosion of the Heat-Affected Zones (HAZs) of API-X70 pipeline steels in aerated carbonate solution by electrochemical methods [J]. *Int. J. Press. Vess. Pip.*, 2016, 145: 1
- [34] Qiao Q, Cheng G X, Wu W, et al. Failure analysis of corrosion at an inhomogeneous welded joint in a natural gas gathering pipeline considering the combined action of multiple factors [J]. *Eng. Fail. Anal.*, 2016, 64: 126
- [35] Wang B Y, Huo L X, Wang D P, et al. Stress corrosion cracking of X80 pipeline steel in near-neutral pH values solutions [J]. *J. Tianjin Univ.*, 2007, 40: 757
(王炳英, 霍立兴, 王东坡等. X80 管线钢在近中性 pH 溶液中的应力腐蚀开裂 [J]. *天津大学学报*, 2007, 40: 757)
- [36] Fan Z, Liu J Y, Li S L, et al. Microstructure and seawater corrosion to welding joint of X70 pipeline steel [J]. *J. Southwest Petrol. Univ. (Sci. Technol. Ed.)*, 2009, 31(5): 171
(范舟, 刘建仪, 李士伦等. X70 管线钢焊接接头组织及其海水腐蚀规律 [J]. *西南石油大学学报 (自然科学版)*, 2009, 31(5): 171)
- [37] Parkins R N. Current topics in corrosion: Factors influencing stress corrosion crack growth kinetics [J]. *Corrosion*, 1987, 43: 130
- [38] Lu B T, Song F, Gao M, et al. Crack growth model for pipelines exposed to concentrated carbonate-bicarbonate solution with high

- pH [J]. *Corros. Sci.*, 2010, 52: 4064
- [39] Li M C, Cheng Y F. Corrosion of the stressed pipe steel in carbonate-bicarbonate solution studied by scanning localized electrochemical impedance spectroscopy [J]. *Electrochim. Acta*, 2008, 53: 2831
- [40] Song F M. Predicting the mechanisms and crack growth rates of pipelines undergoing stress corrosion cracking at high pH [J]. *Corros. Sci.*, 2009, 51: 2657
- [41] Gonzalez-Rodriguez J G, Casales M, Salinas-Bravo V M, et al. Effect of microstructure on the stress corrosion cracking of X-80 pipeline steel in diluted sodium bicarbonate solutions [J]. *Corrosion*, 2002, 58: 584
- [42] He D X, Chen W, Luo J L. Effect of cathodic potential on hydrogen content in a pipeline steel exposed to NS4 near-neutral pH soil solution [J]. *Corrosion*, 2004, 60: 778
- [43] Parkins R N, Blanchard Jr W K, Delanty B S. Transgranular stress corrosion cracking of high-pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH [J]. *Corrosion*, 1994, 50: 394
- [44] Park J J, Pyun S I, Na K H, et al. Effect of passivity of the oxide film on low-pH stress corrosion cracking of API 5L X-65 pipeline steel in bicarbonate solution [J]. *Corrosion*, 2002, 58: 329
- [45] Cheng Y F. Analysis of electrochemical hydrogen permeation through X-65 pipeline steel and its implications on pipeline stress corrosion cracking [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2007, 32: 1269
- [46] Smanio V, Fregonese M, Kittel J, et al. Contribution of acoustic emission to the understanding of sulfide stress cracking of low alloy steels [J]. *Corros. Sci.*, 2011, 53: 3942
- [47] Hu Y Q, He F, Bao W, et al. Research progress of corrosion on CO₂ pipeline transportation [J]. *Surface Technol.*, 2016, 45(8): 14 (胡耀强, 何飞, 鲍文等. CO₂输送管道腐蚀研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(8): 14)
- [48] Liu Y, Li Y. Research progress of CO₂ corrosion of internal gas pipeline steel [J]. *J. Chin. Soc. Corros. Prot.*, 2013, 33: 1 (刘玉, 李焰. 天然气管线钢CO₂腐蚀研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33: 1)
- [49] Cheng P, Huang X Q. Research status and prospect on CO₂ corrosion resistant pipeline steel [J]. *Res. Iron Steel*, 2015, 43(2): 59 (程鹏, 黄先球. 抗CO₂腐蚀管线钢研究现状与展望[J]. 钢铁研究, 2015, 43(2): 59)
- [50] Liu X W, Cai Q W, Wu H B, et al. Effect of CO₂ partial pressure on corrosion resistance of X80 pipeline steel [J]. *Corros. Prot.*, 2012, 33: 502 (刘晓玮, 蔡庆伍, 武会宾等. CO₂分压对X80管线钢腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33: 502)
- [51] Zhao B, Du C W, Li X G, et al. Progress and prospect in on the buried pipeline steel with disbonded coating [J]. *Sci. Technol. Rev.*, 2013, 31(8): 72 (赵博, 杜翠薇, 李晓刚等. 剥离涂层下的埋地管线钢腐蚀研究进展与展望[J]. 科技导报, 2013, 31(8): 72)
- [52] Liu Y, Li Y, Li Q. Effect of cathodic polarization on hydrogen embrittlement susceptibility of X80 pipeline steel in simulated deep sea environment [J]. *Acta Metall. Sin.*, 2013, 49: 1089 (刘玉, 李焰, 李强. 阴极极化对X80管线钢在模拟深海条件下氢脆敏感性的影响[J]. 金属学报, 2013, 49: 1089)
- [53] Shen Y X, Zhao H J, Peng H P, et al. Research of several different pipeline corrosion and study progress of its corrosion inhibitor [J]. *J. Changzhou Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2016, 28(3): 60 (沈雅欣, 赵会军, 彭浩平等. 几种不同管道腐蚀形态及其缓蚀剂研究进展[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2016, 28(3): 60)
- [54] Wu Y Z, Kong D J, Long D, et al. Effects of laser shock wave on salt spray corrosion of X70 pipeline steel welded lines [J]. *Trans. China Weld. Inst.*, 2012, 33(12): 101 (吴永忠, 孔德军, 龙丹等. 激光冲击对X70管线钢焊缝盐雾腐蚀的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(12): 101)
- [55] Wu Y H, Sun C, Zhang S Q, et al. Influence of soil humidity on corrosion behavior of X70 pipeline steel in saline soils of Qinghai salt lake region [J]. *Corros. Sci. Prot. Technol.*, 2005, 17: 87 (伍远辉, 孙成, 张淑泉等. 湿度对X70管线钢在青海盐湖盐渍土壤中腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17: 87)
- [56] Wu H, Huang L M, Gu T. Effect of medium velocity on corrosion performance of X60 pipeline steel under high CO₂ pressure [J]. *Corros. Prot.*, 2012, 33: 1095 (吴华, 黄黎明, 谷坛. 介质流速对X60管线钢高压CO₂腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33: 1095)
- [57] Xie F, Wang D, Wu M, et al. Effect of dissolved oxygen on corrosion behavior of X80 pipeline steel and its mechanism [J]. *J. Iron Steel Res.*, 2015, 27(3): 60 (谢飞, 王丹, 吴明等. 溶解氧对X80管线钢腐蚀行为的影响及其机制[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 60)
- [58] Wang X, Wu H M, Hou D, et al. Effects of time, pH and Cl⁻ concentration on electrochemical corrosion behavior of filmed pipeline steels [J]. *Corros. Prot.*, 2014, 35: 1087 (王霞, 吴红梅, 侯铎等. 时间、pH和Cl⁻对既成膜管线钢腐蚀电化学行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35: 1087)