

应力条件下埋地输油管线菌致开裂行为研究进展

张逸哲^{1,2}, 张天遂^{1,2}, 万辉海^{1,2}, 李广芳^{1,2}, 刘宏芳^{1,2*}

¹华中科技大学能量转换与存储材料化学教育部重点实验室, 湖北 武汉

²华中科技大学材料化学与服役失效湖北省重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年9月28日; 录用日期: 2022年10月27日; 发布日期: 2022年11月3日

摘要

应力腐蚀开裂(SCC)作为一种破坏性强又不易发现的潜在性威胁,一直是腐蚀领域的重要研究课题。传统应力腐蚀机理从阳极溶解和氢至开裂两方面解释了SCC现象。然而单纯的应力条件已经不足以解释实际埋地管线的腐蚀过程,大量的事故现场调查表明硫酸盐还原菌(SRB)作为一种广泛分布于土壤环境中的厌氧型腐蚀性微生物,它的存在会与应力形成协同作用导致菌致开裂行为的发生。近年来的研究证实应力对于SRB的生长代谢无明显影响,而二者的协同作用可以从三个方面加速腐蚀:1) 改变腐蚀产物结构,增加腐蚀产物含硫量,提高材料局部腐蚀敏感性;2) 加速材料表面点蚀萌生和裂纹扩散,诱导材料发生二次点蚀现象;3) 促进基底对于H⁰的吸收,为氢脆过程提供了H⁰的来源。本文首先综述了传统应力腐蚀开裂机理,并分别从SRB影响金属材料应力腐蚀敏感性、SRB诱导点蚀和SRB促进氢脆三个方面综述了SRB诱导下的应力腐蚀研究进展,为日后埋地管线的安全服役提供了理论依据。

关键词

微生物腐蚀, 硫酸还原菌, 应力腐蚀开裂, 菌致开裂, 协同作用

Research Progress on Bacteria-Induced Cracking Behavior of Buried Oil Pipelines under Stress Conditions

Yizhe Zhang^{1,2}, Tiansui Zhang^{1,2}, Huihai Wan^{1,2}, Guangfang Li^{1,2}, Hongfang Liu^{1,2*}

¹Key Laboratory of Energy Conversion and Storage Materials Chemistry, Ministry of Education, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

²Hubei Provincial Key Laboratory of Materials Chemistry and Service Failure, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Sep. 28th, 2022; accepted: Oct. 27th, 2022; published: Nov. 3rd, 2022

*通讯作者。

文章引用: 张逸哲, 张天遂, 万辉海, 李广芳, 刘宏芳. 应力条件下埋地输油管线菌致开裂行为研究进展[J]. 化学工程与技术, 2022, 12(6): 353-364. DOI: 10.12677/hjct.2022.126046

Abstract

Stress corrosion cracking (SCC), as a potential threat that is highly destructive and well covert, has always been an important research topic in the field of corrosion. The traditional stress corrosion mechanism explains SCC phenomenon from two aspects of anodic dissolution and hydrogen-induced cracking. However, pure stress condition is insufficient to explain the actual process of buried pipeline corrosion, a large number of accident site investigations have shown that sulfate-reducing bacteria (SRB), as an anaerobic corrosive microorganism widely distributed in the soil environment, can synergize with stress formation and lead to the occurrence of bacterial-induced cracking behavior. Recent studies have confirmed that stress has no significant effect on the growth and metabolism of SRB, the synergistic effect of the two can accelerate corrosion from three aspects: 1) Change the structure of corrosion products, increase the sulfur content of corrosion products, and improve the local corrosion sensitivity of materials; 2) Accelerate the initiation of pitting corrosion and crack propagation on the surface of materials, and induce secondary pitting corrosion of materials phenomenon; 3) Promote the absorption of H^0 by the substrate and provide a source of H^0 for the hydrogen induced cracking process. In this paper, the traditional stress corrosion cracking mechanism is firstly reviewed, and the research progress of stress corrosion induced by SRB is reviewed from three aspects: SRB affects the stress corrosion susceptibility of metal materials, SRB induced pitting corrosion and SRB promotes hydrogen induced cracking, which provides a theoretical basis for the safe service of buried pipelines in the future.

Keywords

Microbiologically Influenced Corrosion, Sulfate-Reducing Bacteria, Stress Corrosion Cracking, Bacteria-Induced Cracking, Synergistic Action

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

埋地输油管线(以下简称埋地管线)作为我国石油天然气行业最主要的运输方式,随着埋地时间的推进,许多实际应用中的埋地管线开始逐渐面临着腐蚀开裂的风险,大约在 20 世纪中期世界上发现了首批埋地管线应力腐蚀开裂的案例,随后由应力腐蚀开裂(SCC)引起的埋地管道安全事故屡见不鲜[1] [2]。埋地管线通常服役于土壤环境下,而土壤作为一种复杂的多孔胶体体系,土壤中的腐蚀性离子和复杂的微生物都会诱导腐蚀的发生,产生诸如化学腐蚀、电化学腐蚀、应力腐蚀、微生物腐蚀、电偶腐蚀、杂散电流腐蚀等[3] [4],同时广泛存在多种腐蚀现象并存的协同作用[5] [6] [7]。管线钢作为埋地管线建设的主要钢材,随着管线运输压力的递增,X80, X100, X120 等新型高强度钢会逐渐成为未来埋地管线建设的主要钢材[8] [9],但是无论是过往使用的 X65 管线钢还是目前研制的高级管线钢,由于钢材生产过程中不可避免的瑕疵,其表面或多或少的存在划痕、微晶、凹陷等薄弱位置,加上铸钢过程中掺杂的少量夹杂物,使得管线钢在服役过程极易发生开裂现象[10]。

在失效管线事故现场调查中发现,土壤环境中微生物参与了管线钢的腐蚀过程。微生物腐蚀(Microbiologically influenced corrosion, MIC)是通过微生物自身生命活动和代谢产物直接或间接地影响金

属表面腐蚀进程[11] [12]。MIC 本质上属于电化学腐蚀,其广泛存在于土壤、水、潮湿等环境之下,每年基于微生物腐蚀所导致的经济损失占总腐蚀的 20%以上。硫酸还原菌(Sulfate-reducing bacteria, SRB)作为典型的厌氧型腐蚀微生物,它可以将 SO_4^{2-} 还原成 HS^- 并从中获得生命活动所需的能量,也是腐蚀危害性最大的菌种之一[13]。在失效管线事故现场调查中发现,土壤环境中微生物参与了管线钢的腐蚀过程。据报道,美国超过 77%的油田井安全事故都于 SRB 的代谢活动有关[14], Li 等[15]调查发现韩国天然气公司失效管线表面覆盖着易于剥离的黑色沉淀,滴加盐酸后散发臭鸡蛋气味,说明腐蚀产物黑色沉淀为硫化物,间接证明了土壤环境中 SRB 参与了管线的应力腐蚀开裂过程。近一个世纪以来科学家对 SRB 进行了深入的研究,目前已经提出很多关于 SRB 腐蚀行为的机理,最经典的就是阴极去极化理论(CDT)[16],近期科学家们又从生物催化的角度出发,提出了 BCSR (Biocatalytic Cathodic Sulfate Reduction)理论[17][18][19],该理论认为,在体系中拥有充足碳源(如乳酸钠)时,SRB 会优先利用现有的有机物质作为电子供体,而在生物较厚区域,碳源受到生物膜的阻隔很难到达底部,故此金属表面与生物膜交界处的 SRB 以活泼金属(如 Fe)为唯一电子供体,在金属表面形成类似与纳米线的触须直接从金属中获得电子,从而导致点蚀发生。Sherar 等[20]证实,生物膜的形成与发展高度依赖于体系中的营养物质,在缺少碳源的情况下,无菌环境的腐蚀加剧,出现结晶硫化亚铁,而在 SRB 存在的体系,缺少碳源会诱导 SRB 形成远大于其本体体积的纳米线网,直接从金属主体中吸收电子获得能量,形成硫化物包裹细菌的特殊形貌。

应力腐蚀开裂(SCC)作为一种破坏性强又不易发现的潜在性威胁,经常造成突发性火灾、爆炸、泄露等重大安全事故,其造成事故的主要原因是应力和腐蚀的共同作用下导致材料开裂[21][22][23]。早在 19 世纪末期科学家们逐渐发现 SCC 潜在的破坏性,20 世纪中叶科学家将 SCC 的研究定义为重点工程,同时认为 SCC 的敏感性与材料本身和周围环境有关,21 世纪以来关于 SCC 的研究范围越来越广,关于 SCC 的研究也不再局限于单纯的应力条件,多种因素的协同作用成为当前研究的热点[24][25][26]。在土壤环境下,SRB 分布广泛,在多个应力腐蚀开裂的现场均可检测到大量的活性 SRB,本文综述了近年来 SRB 诱导应力腐蚀开裂的机理和研究进展,为日后埋地管线的防护起到理论和借鉴作用。

2. 应力腐蚀开裂机理

应力腐蚀开裂属于环境开裂的一种类型,在应力腐蚀发生时,钢材不会出现明显的失重现象,但会严重降低钢材的机械强度,在最简单条件下,应力腐蚀仅仅与材料本身性质相关。通常情况下,只有存在应力(主要是拉应力)才能产生应力腐蚀开裂,这种应力可以是材料加工过程中引入的残余内应力,也可以是外界环境施加的外应力[27][28]。Takumi Haruna 等[29]研究了不同退火温度下 SM 400B 碳钢对应力腐蚀的敏感性,不同退火温度会导致成品钢具有不同的缺陷,1073 K 温度时,碳钢表面发生脱碳,SCC 敏感性达到最大。

1958 年, Hoar 等第一次提出 SCC 的阳极溶解理论,该理论认为材料首先在应力和腐蚀的共同作用下产生微观裂纹,此时材料并没有真正开始“破裂”,而是沿着裂纹前沿发生金属的阳极溶解。对于裂纹的形成源, Hoar 等认为可能是由于金属表面存在晶界、亚晶界、露头的位错群、滑移带上位错堆积区;淬火、冷加工造成的局部应变区;或异种杂质原子造成的畸变区以及所谓堆垛层错区等,这些区域在特殊条件下会优先发生阳极腐蚀,并向纵深方向发展,最终导致应力腐蚀开裂的发生[30]。1967 年, Raicheff 等发现金属阳极溶解与压力加载速率成正比关系,同年 Gutman 进一步研究后将这种现象命名为“力学-化学效应”[31][32]。McEvily 等在阳极溶解理论的基础上,还发展出表面膜破裂机理,认为金属在特定介质和应力的协同作用下会发生塑性形变,即金属中的位错沿滑移面移动,在金属表面形成滑移阶梯,当滑移阶梯足够大时,表面膜就会发生破裂[33]。

另一个广泛认同的理论就是氢至开裂理论，这是一种在氢和应力共同作用下导致材料发生脆性断裂的现象[34]，该理论认为，腐蚀过程中阴极反应产氢，氢原子优先吸附在裂纹前端的金属表面，随后溶解在金属晶格之中，造成应力集中现象，最终引起脆性断裂[35] [36] [37]。Kan 等[38]采用慢应变速率拉伸(SSRT)和有限元模拟的方法研究了光滑试样在不同氢浓度下的开裂现象，他们提出，材料是否发生脆性开裂只取决于氢气的含量和持续的时间，氢的存在显著的降低了材料的伸长率，但是对材料的强度影响较小，同时随着氢浓度的提升，材料的伸长率迅速下降，引起材料脆性断裂的氢临界浓度约为 1.8 ppm。在初始氢量为 2.90 ppm 下，施加不同大小的拉应力，可明显的观察到氢至开裂体系中的三种典型的断口形貌：沿晶(intergranular, IG)、穿晶(transgranular, TG)和韧性(ductile, D)断裂，见图 1。Wu 等[39]认为裂纹萌生的临界氢浓度与初始氢浓度无关，但与局部应力分布和应力三轴度有明显关系。Yan 等[40]进一步采用拉伸实验和有限元模拟相结合的方法，证实了裂纹的起始位置不受相邻裂纹的影响，且随着试样中氢气的富集，裂纹相互作用的距离阈值变大。

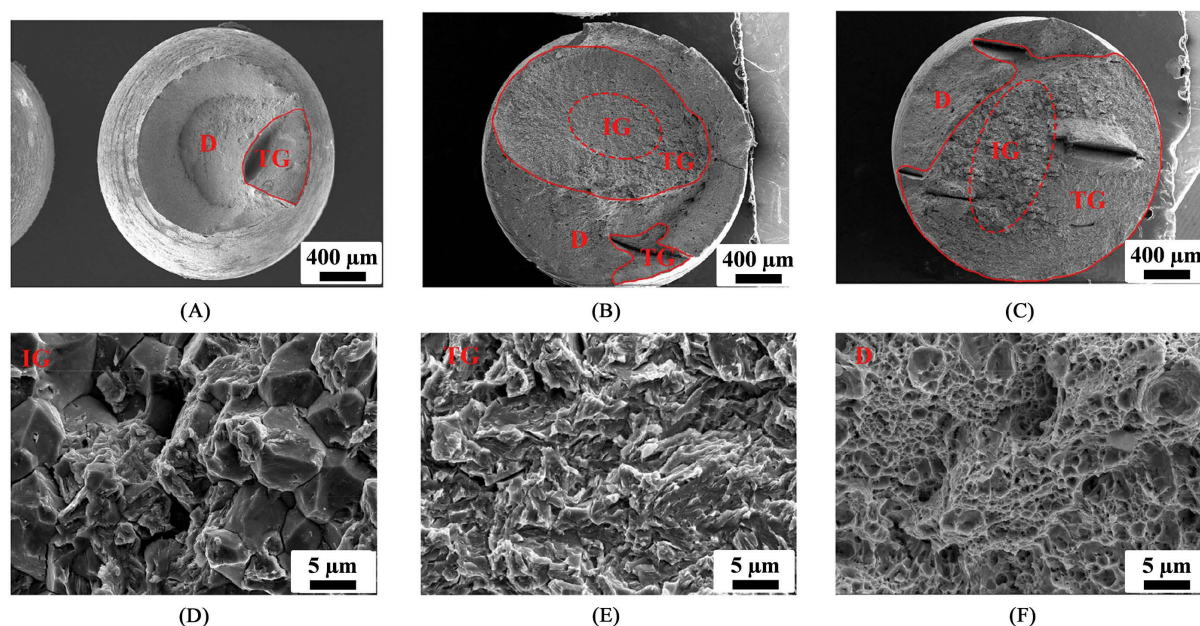


Figure 1. Fracture surface at initial hydrogen content of 2.90 ppm under strain rate of (A) $5 \times 10^{-5}/s$, (B) $1 \times 10^{-5}/s$, and (C) $5 \times 10^{-6}/s$; (D), (E), and (F) are the local enlarged areas of the fracture features of the intergranular, transgranular, and ductile fracture zones which are labeled “IG”, “TG”, and “D” in (A), (B), (C) respectively [38]

图 1. 初始氢含量为 2.90 ppm 时，不同拉伸速率下材料发生开裂的断口形貌，(A) $5 \times 10^{-5}/s$ ，(B) $1 \times 10^{-5}/s$ ，and (C) $5 \times 10^{-6}/s$ ；其中(D)，(E)，(F)分别为沿晶，穿晶和韧性断裂形貌的局部放大区域，在图(A)，(B)，(C)中分别标记为 IG (intergranular, 沿晶)、TG (transgranular, 穿晶)、D (ductile, 韧性) [38]

3. SRB 参与应力腐蚀开裂的协同作用

许多现场案例都证实，MIC 是埋地管道泄露和爆炸的重要威胁之一。Lenhart 等[41]研究了 13 条锈蚀的石油管道表面，发现厌氧生物膜增加了管道的点蚀和腐蚀，他们提出 H_2S 的产生和生物膜的形成是导致管线钢失效的主要原因。Jain [42]通过电化学研究发现，MIC 与应力腐蚀过程是同时发生的，钢表面残留的水分会给微生物提供生命活动的场所，同时有利于生物膜的形成，加速刚体腐蚀。而在诸多腐蚀性微生物中，人们普遍认为 SRB 是土壤环境中埋地管线腐蚀的主要贡献者[43] [44] [45]。

目前而言，对于应力和 SRB 的单独研究已经开展很多，然而在实际情况应力与 SRB 往往是同时作用于管线钢，诸多现场失效分析都证实二者同时影响埋地管线的应力腐蚀开裂[46] [47]。

3.1. SRB 对金属材料应力腐蚀敏感性的影响规律

土壤中微生物的生理活动会极大的改变土壤环境的理化性质,对埋地管线的服役时间造成严重的影响。很多研究都表明,土壤中的 SRB 可以将硫酸盐还原成硫化物,造成管线钢局部腐蚀敏感性的增加[48][49]。王丹等[50]以大港土壤环境为实验介质,对比了无菌环境和 SRB 存在条件下应力腐蚀开裂的区别,发现在 SRB 的生长周期内,SRB 的生理活动可以促进 X80 管线钢的阳极溶解,且 SRB 的数量越多 X80 管线钢的应力腐蚀开裂敏感性越高,同时从 SSRT 曲线可看出(图 2(A)),X80 管线钢在空拉条件下明显具有更好的抗拉强度和延伸率,表明 SRB 的存在提高了 X80 管线钢的 SCC 敏感性。Li 等[51]研究了在拉伸实验条件下 SRB 对 X80 管线钢 SCC 敏感性的影响,认为外加拉应力和 SRB 协同促进了金属阳极溶解,在金属表面薄弱区产生应力集中,导致裂纹出现和扩展,SRB 的生理活动和外加拉应力协同作用增加了管线钢的 SCC 敏感性。曾锋等[52]研究得出,16Mn 钢在含 SRB 的海泥环境中 SSRT 延伸率变小,拉断所需时间缩短,应力腐蚀开裂敏感性增加(图 2(B))。王欣彤等[53]研究得出,在无菌 3.5% NaCl 介质条件下,2205 双相不锈钢几乎不具备 SCC 敏感性,而在 SRB 存在条件下 SCC 敏感性显著增加,二者呈现正相关趋势。同时在 SRB 作用下双相不锈钢在介质中发生了选择性腐蚀,铁素体相优先腐蚀具有更高的 SCC 敏感性[54],其断口呈线穿晶断裂特征。此外弹性应力和塑性应力都会促使 SRB 的腐蚀产物发生改变,增加腐蚀产物的硫含量和孔隙率,提高管线钢局部腐蚀敏感性,促进管线钢的腐蚀过程[55]。

阴极保护作为一种有效的腐蚀防护手段,可以有效减缓海洋用钢的腐蚀速率,但较大的外加阴极电位会改变管线钢表面的电化学反应,导致管线钢的 SCC 敏感性发生变化。大量研究表明,阴极保护虽然有抑制 SRB 的作用,但是 SRB 存在也会导致所需的阴极保护电流增大[56][57][58]。吴堂清[59]研究了阴极保护和 SRB 共同作用下 X80 管线钢的应力腐蚀开裂敏感性的变化,结果显示,SRB 的生长代谢与外加阴极保护协同促进了土壤环境中管线钢的 SCC 过程,共同导致了管线钢 SCC 敏感性的提高,有趣的是这种协同作用会随着阴极保护的负移而减弱,较低阴极保护电位下土壤溶液的碱化可能是造成这种联合作用降低的重要原因。

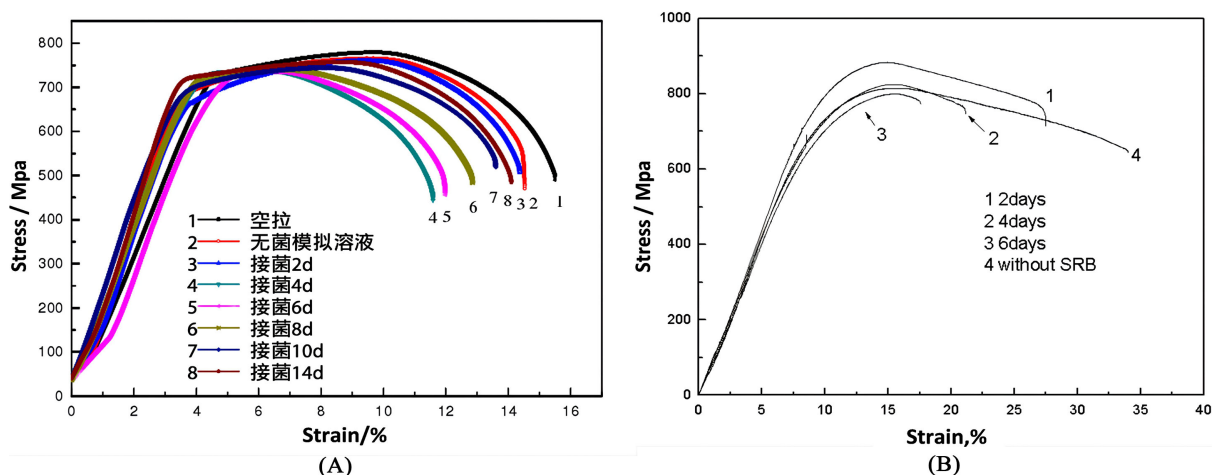


Figure 2. (A): SSRT curve of X80 pipeline steel in Dagang soil solution [50]; (B): Comparison of SSRT curves of 16Mn steel with different SRB growth days [52]

图 2. (A): X80 管线钢在接菌大港土壤溶液中的 SSRT 曲线[50]; (B): 16Mn 钢在不同 SRB 生长天数时的 SSRT 曲线对比[52]

3.2. SRB 诱导点蚀促进应力腐蚀开裂

SRB 可以通过直接或间接的方式从金属表面获取电子以维持其生理代谢活动,由此会诱导金属表面

出现点蚀[60]。点蚀往往是 SCC 裂纹的起源[47]，在外加应力的作用下，点蚀的尖端出现应力集中现象，金属局部电化学活性提高，局部腐蚀加剧，最终导致应力腐蚀开裂[61] [62]。

在 SRB 和屈服应力的共同作用下，由 SRB 引起的点蚀(局部腐蚀)和屈服应力导致的微裂纹在试样表面共存(图 3(A))，二者的共同作用加速了试样的 SCC 过程。Wu 等[63]认为 SRB 首先诱导管线钢表面出现点蚀坑，同时在屈服应力下试样表面的蚀坑迅速发展成微裂纹，随后 SRB 的生理活动可能诱导微裂纹壁上形成二次点蚀，而后在二次点蚀的底部和裂纹尖端再次发生应力集中，进一步促进局部腐蚀和微裂纹生长。弹性应力与 SRB 的生理活动之间也存在类似协同作用[65]。SRB 的生理活动诱导不锈钢表面生成点蚀，而弹性应力的存在使金属表面腐蚀产物膜变得疏松，促使不锈钢表面生成裂纹加速局部腐蚀进程。施加的弹性应力还会进一步促进裂纹生长，在严重的应力集中条件下，凹坑底部可能发生塑性形变现象，导致不锈钢的阳极溶解速率迅速加剧，腐蚀点尖端活性增强，出现二次点蚀。硫酸盐还原菌生理活动引起的二次点蚀、阳极溶解和钝化层形成这些过程的重复和循环，形成了一个反馈回路，它们之间的协同作用增强了钢的腐蚀。

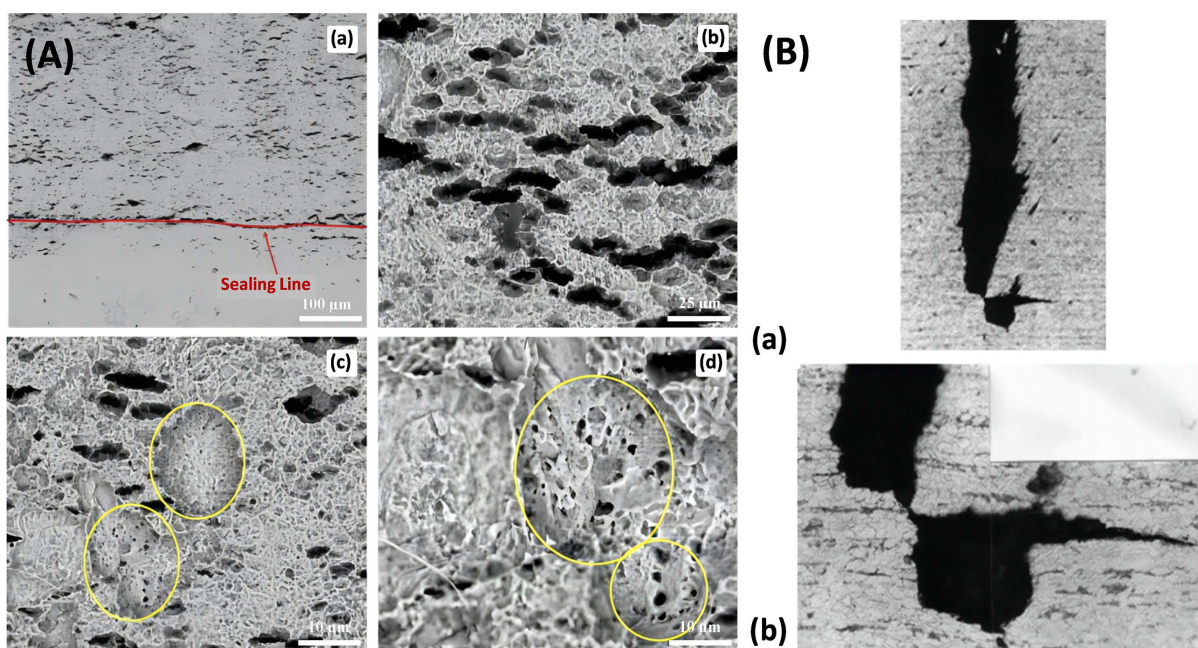


Figure 3. (A): Corrosion attack surface morphologies for the specimen with load (650.7 MPa) after 90 day exposure in soil solution inoculated with SRB [63]; (B): (a) Cross section of a macrocrack jointed to an elongated MnS inclusion in the microstructure ($\times 100$) and (b) crack's tip in higher magnification ($\times 500$) [64]

图 3. (A): 在接种了 SRB 的土壤溶液中暴露 90 天后，带荷载(650.7 Mpa)试样表面腐蚀侵蚀形貌[63]; (B): (a) 微观结构中 与细长的锰夹杂物连接的宏观裂纹的横截面($\times 100$), (b) 放大倍数更高的裂纹尖端($\times 500$) [64]

Abedi 等[64]研究了 API 5L X52 管道的开裂现象，发现 SRB 的参与改变了管线钢点蚀和裂纹起源，从裂纹截面看，单纯应力作用下的 SCC 裂纹尖端是长而尖锐的，而 SRB 参与形成的裂纹尖端是袋状结构(图 3(B))，又为其生长提供了厌氧环境。

综合来看，SRB 的生理活动和外加应力改变了钢表面性质，增强了钢的点蚀敏感性，甚至在一次点蚀底部诱发微小的二次点蚀。它们的协同作用明显加速了钢的腐蚀，是导致管线钢 SCC 行为的重要因素：硫酸盐还原菌的活性诱导点蚀，外加应力保持并促进了点蚀的生长(局部腐蚀)。

3.3. SRB 氢损伤机理促进应力腐蚀开裂

厌氧腐蚀中, 主要的阴极反应是氢离子(H^+)和水的还原, 从而形成氢原子(H^0)。部分没有结合成分子的 H^0 会吸附在金属表面, 进入金属点阵, 扩散并富集到裂纹尖端, 从而导致金属材料的开裂现象[66] [67] [68]。

SRB 通过还原环境中的硫酸盐获得能量, 其主要还原过程可以近似为[69]: $SO_4^{2-} + 8H^0 \rightarrow S^{2-} + 4H_2O$, 从中可以看出 SRB 的生理活动一方面起到阴极极化的作用, 另一方面生成的负 2 价硫离子可以与水中分解的 H^+ 结合成 H_2S 。 H_2S 与 Fe 反应可以生成吸附态的氢原子(H_{ads}), 同时减缓 H^0 原子结合成 H_2 的速率[70] [71] [72]。宋洋等[73]研究了 H_2S 对 Q245 钢应力腐蚀开裂的影响, 发现 H_2S 的存在阻碍了阴极反应生成的活性氢原子结合成氢分子, 氢原子更倾向于向金属内部扩散。诸多文献都认为在高浓度硫化物和硫化氢环境下, 高强度钢 SCC 的敏感性提高, 同时促进了氢脆过程[74] [75] [76] [77]。

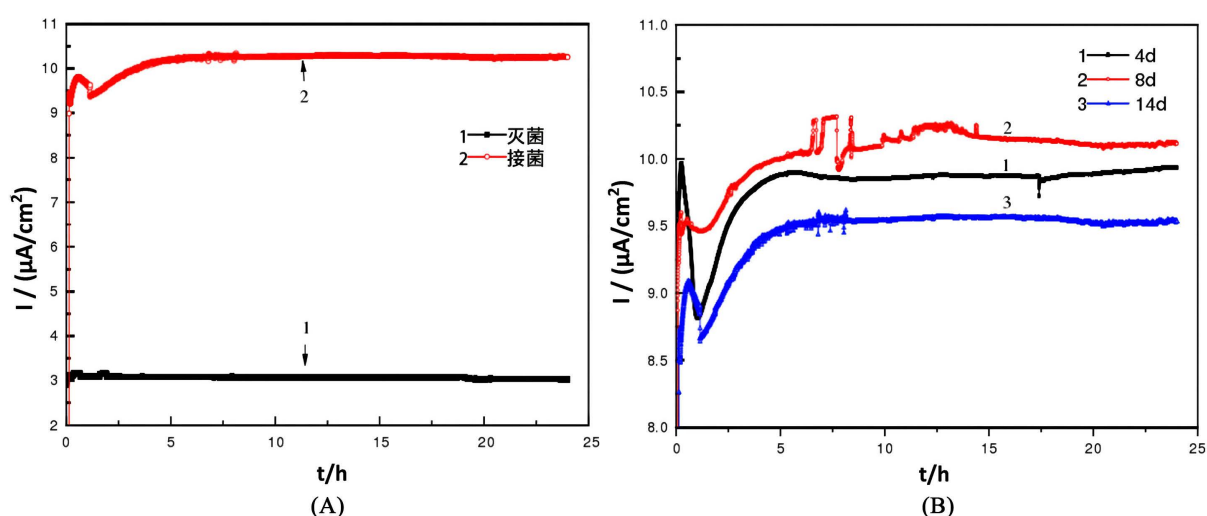


Figure 4. (A): Comparison of the hydrogen permeation current density of X80 steel in the soil simulated solution with SRB and in the sterilized oil simulated solution; (B): Comparison of the hydrogen permeation current density of X80 steel at self-corrosion potential at 4 d, 8 d and 14 d of SRB growth [50]

图 4. (A): X80 钢在接种 SRB 和灭菌土壤模拟溶液中的氢渗透电流密度比较; (B): X80 钢在自腐蚀电位下 SRB 生长 4 d, 8 d 和 14 d 时的氢渗透电流密度比较[50]

据文献报道, 含有氯离子溶液中少量的 H_2S 会加速氢的吸收并大大促进疲劳裂纹扩展速率[78] [79] [80] [81], SRB 的生理活动促进了铁素体和珠光体钢中氢原子(H_0)向钢基体扩散的过程[82] [83]。王丹[50]等对比了不同条件下氢渗透密度曲线(图 4)发现, X80 管线钢在接种的土壤模拟溶液中的氢渗透电流密度是在灭菌土壤模拟溶液中的 3~4 倍, 在 SRB 的不同生长阶段的氢渗透电流密度关系为: 生长稳定期 > 生长对数期 > 生长残余期, SRB 的参与促进了氢渗透过程的发生。Biezma [84]研究了氢气在微生物诱导应力腐蚀开裂中的作用, 认为 SRB 的生理活动是材料中氢的主要来源, 并认为 SRB 与应力的协同作用加速了材料机械性能的恶化和损坏。Sowards 等[85]在接种 SRB 的乙醇溶液中和施加阴极保护(-1.03 V vs. SCE)的海盐溶液中分别进行了实验(图 5(A)), 结果显示在低应力区域 SCC 主要表现为沿晶断裂, 在中高应力区域 SCC 主要表现为穿晶断裂, 对比产酸菌和 SRB 平台区的裂纹扩展行为, 可以发现 SRB 对于阳极溶解的促进作用远小于产酸菌, 相比于产酸菌, SRB 环境下阴极反应生成的硫化物促进了裂纹的增长。在应力腐蚀开裂的研究中, 充氢环境和接种 SRB 环境的电化学结果十分相似(图 5(B)), 充氢后 X80 管线钢 SCC 也表现出穿晶开裂, 断口呈脆性断裂特征, 随充氢时间的延长, 材料强度损失较小, 塑性损失

较明显, 拉伸断口由韧窝状韧性断口向解理状脆性断口发展, SCC 敏感性不断增大[86] [87] [88]。

基于上述研究可以看出, SRB 的新陈代谢不仅降低了 H^0 复合成 H_2 的概率, 增加了 H^0 的表面覆盖率, 而且促进了金属基体对 H^0 的吸收, 为氢脆过程提供了 H^0 的来源。氢损伤机制是 SRB 诱导材料应力腐蚀开裂的主要方式。

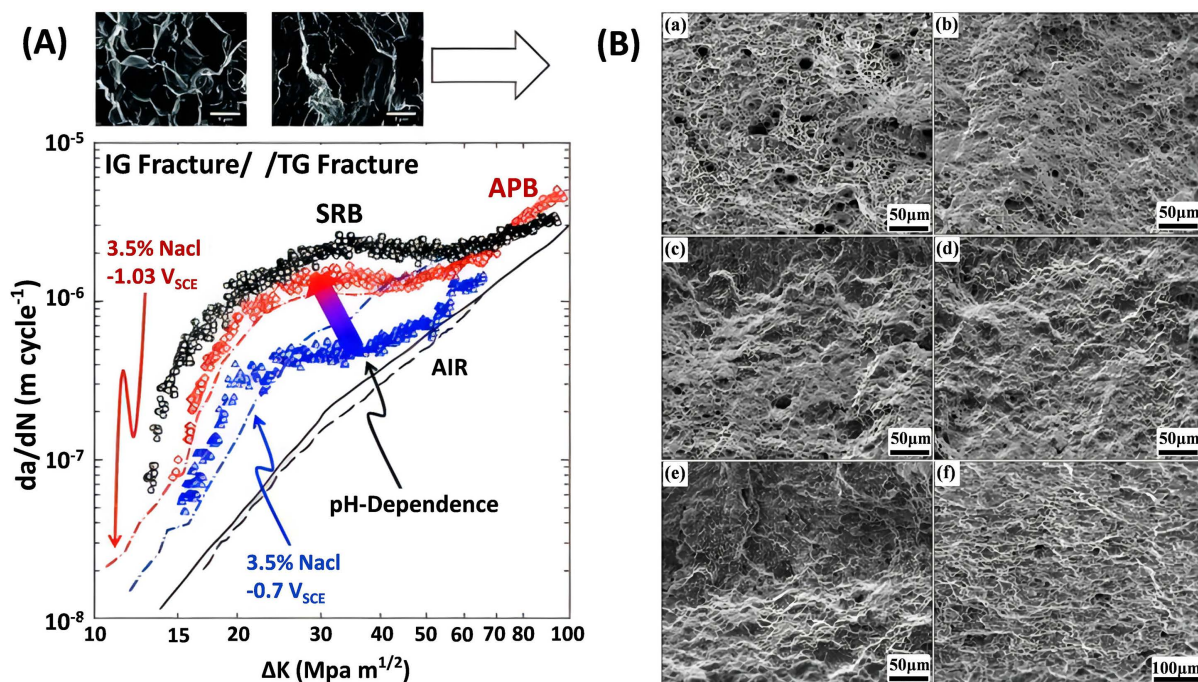


Figure 5. (A): Comparison of X70 fatigue-crack-growth data acquired in ethanol solutions inoculated with APB and SRB, and crack-growth data acquired in saltwater with applied cathodic potential (dashed lines) reported elsewhere [85]; (B): SEM images of fracture surface of X80 metal fractured under different hydrogen charging conditions, hydrogen charging current density/($mA \cdot cm^{-2}$)/hydrogen charging time/h: (a) 0/0; (b) 25/1; (c) 50/1; (d) 100/1; (e) 100/2; (f) 100/3 [86]

图 5. (A): X70 管线钢在接种 APB 和 SRB 的乙醇溶液中裂纹扩展行为和施加阴极保护的 NaCl 溶液中裂纹扩展行为(虚线)的比较[85]; (B): 不同充氢条件下 X80 钢断口 SEM 图, 充氢电流密度/($mA \cdot cm^{-2}$)/充氢时间/h: (a) 0/0; (b) 25/1; (c) 50/1; (d) 100/1; (e) 100/2; (f) 100/3 [86]

4. 总结与展望

应力与硫酸还原菌的对金属腐蚀行为的协同作用十分复杂, 本文综述了近年来相关的文献报道, 认为 SRB 主要是通过影响材料 SCC 敏感性、诱导点蚀和促进氢脆三个方面与应力产生协同作用。为提高管线钢的服役寿命, 可以通过减少焊接和机加工来降低外部拉应力, 提高材料的耐蚀性, 并通过强化表面强化技术来降低内部残余应力。

SRB 作为一种环境适应性极强的微生物, 其在土壤环境中大量存在。虽然国内外学者已经开始重视 SRB 与应力协同作用的研究, 但是目前对于含 SRB 土壤环境的应力腐蚀开裂研究仍处于初级阶段, 因此在未来很长一段时间对于其腐蚀机理以及防护对策的研究依旧是重中之重。在实际情况下, 土壤作为一种复杂的多孔胶体体系具有复杂多变性, 除了 SRB 和应力的作用, 温度和二氧化碳含量等都对材料的腐蚀行为具有显著的影响, 因此对于土壤环境下材料服役安全的研究不能仅仅局限于 SRB 与应力的协同作用, 更要注重现场复杂环境下的腐蚀行为。研究新型的测量技术, 实现工程现场实地实时快速的检测生物膜下微生物的生命活动和腐蚀行为, 将宏观研究转为微观研究是今后研究微生物腐蚀的重要方向。

基金项目

国家自然科学基金(52171069, 22005109)、中国博士后科学基金(2021M701292)、湖北省自然科学基金(2020CFB214)、能源转换与存储材料化学教育部重点实验室(2018)、湖北省材料化学与服务失效重点实验室开放项目(2020MCF02)。

参考文献

- [1] Volgina, N., Shulgin, A. and Khlamkova, S. (2021) Possibilities of Diagnosis of Stress Corrosion Cracking of Main Gas Pipelines from the Point of View of Microbiology. *Materials Today: Proceedings*, **38**, 1697-1700. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.224>
- [2] McNeill, L.S. and Edwards, M. (2001) Iron Pipe Corrosion in Distribution Systems. *Journal AWWA*, **93**, 88-100. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2001.tb09246.x>
- [3] 张春生, 申龙涉, 郭慧军, 等. 埋地油气管道外腐蚀原因及防腐技术的研究进展[J]. 当代化工, 2011, 40(2): 202-205.
- [4] 韦博鑫, 许进, 高立群, 等. 油气管线钢土壤环境硫酸盐还原菌腐蚀研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 30-44.
- [5] Liu, H., Fu, C., Gu, T., et al. (2015) Corrosion Behavior of Carbon Steel in the Presence of Sulfate Reducing Bacteria and Iron Oxidizing Bacteria Cultured in Oilfield Produced Water. *Corrosion Science*, **100**, 484-495. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.08.023>
- [6] Liu, H., Zheng, B., Xu, D., et al. (2014) Effect of Sulfate-Reducing Bacteria and Iron-Oxidizing Bacteria on the Rate of Corrosion of an Aluminum Alloy in a Central Air-Conditioning Cooling Water System. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **53**, 7840-7846. <https://doi.org/10.1021/ie4033654>
- [7] Liu, H. and Cheng, Y.F. (2018) Microbial Corrosion of X52 Pipeline Steel under Soil with Varied Thicknesses Soaked with a Simulated Soil Solution Containing Sulfate-Reducing Bacteria and the Associated Galvanic Coupling Effect. *Electrochimica Acta*, **266**, 312-325. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.02.002>
- [8] 张斌, 钱成文, 王玉梅, 等. 国内外高钢级管线钢的发展及应用[J]. 石油工程建设, 2012, 38(1): 1-4+64+83.
- [9] 罗金恒, 胥聪敏, 杨东平. SRB 作用下 X100 管线钢在酸性土壤环境中的应力腐蚀开裂行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(4): 321-327.
- [10] Boldyrev, D.A., Amirov, R.N. and Nefed'ev, S.P. (2020) Microstructure of Impurity Phase Inclusions in Gray Cast Iron and Their Composition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **966**, Article ID: 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012023>
- [11] Jia, R., Yang, D., Xu, J., et al. (2017) Microbiologically Influenced Corrosion of C1018 Carbon Steel by Nitrate Reducing *Pseudomonas aeruginosa* Biofilm under Organic Carbon Starvation. *Corrosion Science*, **127**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.08.007>
- [12] Juzeliūnas, E., Ramanauskas, R., Lugauskas, A., et al. (2007) Microbially Influenced Corrosion of Zinc and Aluminium—Two-Year Subjection to Influence of *Aspergillus niger*. *Corrosion Science*, **49**, 4098-4112. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.004>
- [13] 马刚, 顾艳红, 赵杰. 硫酸盐还原菌对钢材腐蚀行为的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(3): 289-297.
- [14] Iverson, W.P. (1972) Biological Corrosion. In: Fontana, M.G. and Staehle, R.W., Eds., *Advances in Corrosion Science and Technology*, Springer US, Boston, MA, 1-42. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8255-7_1
- [15] Li, S.Y., Kim, Y.G., Jeon, K.S., et al. (2000) Microbiologically Influenced Corrosion of Underground Pipelines under the Disbonded Coatings. *Metals and Materials*, **6**, 281-286. <https://doi.org/10.1007/BF03028224>
- [16] Costello, J.A. (1974) Cathodic Depolarization by Sulphate-Reducing Bacteria. *Academy of Science for South Africa (ASSAF)*, **70**, 202-204.
- [17] 夏进, 徐大可, 刘宏芳, 等. 从生物能量学和生物电化学角度研究金属微生物腐蚀的机理[J]. 材料研究学报, 2016, 30(3): 161-170.
- [18] Xu, D. and Gu, T. (2014) Carbon Source Starvation Triggered More Aggressive Corrosion Against Carbon Steel by the *Desulfovibrio vulgaris* Biofilm. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **91**, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.03.014>
- [19] Zhang, P., Xu, D., Li, Y., et al. (2015) Electron Mediators Accelerate the Microbiologically Influenced Corrosion of 304 Stainless Steel by the *Desulfovibrio vulgaris* Biofilm. *Bioelectrochemistry*, **101**, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2014.06.010>

- [20] Venzlaff, H., Enning, D., Srinivasan, J., *et al.* (2013) Accelerated Cathodic Reaction in Microbial Corrosion of Iron Due to Direct Electron Uptake by Sulfate-Reducing Bacteria. *Corrosion Science*, **66**, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.09.006>
- [21] 董希青, 黄彦良. 不锈钢在海洋环境中的环境敏感断裂研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(3): 189-194.
- [22] 王田丽, 刘宏芳, 韩霞. 油田注水管道固着菌检测及控制技术[J]. 油气田环境保护, 2014, 24(4): 8-11+82.
- [23] 焦洋, 张胜寒, 檀玉. 核电站用不锈钢在高温高压水中应力腐蚀开裂行为的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(4): 417-428.
- [24] 谢尔盖·希普利洛夫. 应力腐蚀破裂和腐蚀疲劳研究: 历史回顾与趋势[C]//2002 中国国际腐蚀控制大会. 北京: 中国化工学会, 2002: 288-293.
- [25] Francis, R. (1997) Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers. *British Corrosion Journal*, **32**, 29. <https://doi.org/10.1179/bcj.1997.32.1.29>
- [26] Congleton, J., Shih, H.C., Shoji, T., *et al.* (1985) The Stress Corrosion Cracking of Type 316 Stainless Steel in Oxygenated and Chlorinated High Temperature Water. *Corrosion Science*, **25**, 769-788. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(85\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0010-938X(85)90010-1)
- [27] 李嘉栋, 陈超, 张世贵, 等. 不同应力条件下不锈钢局部腐蚀行为的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 101-115.
- [28] 刘传森, 李壮壮, 陈长风. 不锈钢应力腐蚀开裂综述[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 1-13.
- [29] Haruna, T., Zhu, L. and Shibata, T. (2000) Effects of Annealing Conditions on Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel in Aqueous Bicarbonate Solution. *Zairyo-to-Kankyo*, **49**, 138-143. <https://doi.org/10.3323/jcorr1991.49.138>
- [30] Hoar, T. and Hines, J. (1954) The Corrosion Potential of Stainless Steels during Stress Corrosion. *Journal of the Iron and Steel Institute*, **177**, 248.
- [31] Raicheff, R.G., Damjanovic, A. and Bockris, J.O.M. (1967) Dependence of the Velocity of the Anodic Dissolution of Iron on Its Yield Rate under Tension. *The Journal of Chemical Physics*, **47**, 2198-2199. <https://doi.org/10.1063/1.1712258>
- [32] Despic, A.R., Raicheff, R.G. and Bockris, J.O.M. (1968) Mechanism of the Acceleration of the Electrodeic Dissolution of Metals during Yielding under Stress. *The Journal of Chemical Physics*, **49**, 926-938. <https://doi.org/10.1063/1.1670162>
- [33] Mcevely, A.J. and Bond, A.P. (1965) On the Initiation and Growth of Stress Corrosion Cracks in Tarnished Brass. *Journal of the Electrochemical Society*, **112**, 131. <https://doi.org/10.1149/1.2423481>
- [34] Prange, F.A. (1952) Hydrogen Embrittlement Tests on Various Steels. *Corrosion*, **8**, 355-360. <https://doi.org/10.5006/0010-9312-8.10.355>
- [35] Niwa, M., Shikama, T. and Yonezu, A. (2015) Mechanism of Hydrogen Embrittlement Cracking Produced by Residual Stress from Indentation Impression. *Materials Science and Engineering: A*, **624**, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.008>
- [36] Lynch, S.P. (2007) Progression Markings, Striations, and Crack-Arrest Markings on Fracture Surfaces. *Materials Science and Engineering: A*, **468-470**, 74-80. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.083>
- [37] Novokshchenov, V. (1994) Brittle Fractures of Prestressed Bridge Steel Exposed to Chloride-Bearing Environments Caused by Corrosion-Generated Hydrogen. *Corrosion*, **50**, 477-485. <https://doi.org/10.5006/1.3293526>
- [38] Kan, B., Wu, W., Yang, Z., *et al.* (2020) Stress-Induced Hydrogen Redistribution and Corresponding Fracture Behavior of Q960E Steel At Different Hydrogen Content. *Materials Science and Engineering: A*, **775**, Article ID: 138963. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.138963>
- [39] Wu, W., Wang, Y., Tao, P., *et al.* (2018) Cohesive Zone Modeling of Hydrogen-Induced Delayed Intergranular Fracture in High Strength Steels. *Results in Physics*, **11**, 591-598. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.10.001>
- [40] Yan, Q., Yan, L., Pang, X., *et al.* (2021) Crack Initiation Stress Measurement of Hydrogen-Induced Cracking with Small Tapered Specimen Method. *Materials Science and Engineering: A*, **814**, Article ID: 141228. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141228>
- [41] Lenhart, T.R., Duncan, K.E., Beech, I.B., *et al.* (2014) Identification and Characterization of Microbial Biofilm Communities Associated with Corroded Oil Pipeline Surfaces. *Biofouling*, **30**, 823-835. <https://doi.org/10.1080/08927014.2014.931379>
- [42] Jain, L.A. (2011) Evaluation of the Propensity for Microbiologically Influenced Corrosion of Steels in Fuel Grade Ethanol Environments. Colorado School of Mines, Colorado.
- [43] Liu, W. (2014) Rapid MIC Attack on 2205 Duplex Stainless Steel Pipe in a Yacht. *Engineering Failure Analysis*, **42**,

- 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.04.001>
- [44] Liu, Z.Y., Li, H., Jia, Z.J., *et al.* (2016) Failure Analysis of P110 Steel Tubing in Low-Temperature Annular Environment of CO₂ Flooding Wells. *Engineering Failure Analysis*, **60**, 296-306. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.041>
- [45] 赵健, 谢飞, 宫克, 等. X70 管线钢在硫酸盐还原菌作用下的应力腐蚀开裂行为[J]. 表面技术, 2017, 46(10): 108-114.
- [46] Kholodenko, V.P., Jigletsova, S.K., Chugunov, V.A., *et al.* (2000) Chemicomicrobiological Diagnostics of Stress Corrosion Cracking of Trunk Pipelines. *Applied Biochemistry and Microbiology*, **36**, 594-601. <https://doi.org/10.1023/A:1026652824694>
- [47] Rao, T.S. and Nair, K.V.K. (1998) Microbiologically Influenced Stress Corrosion Cracking Failure of Admiralty Brass Condenser Tubes in a Nuclear Power Plant Cooled by Freshwater. *Corrosion Science*, **40**, 1821-1836. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00079-1)
- [48] 李雪, 朱庆杰, 周宁, 等. 油气管道腐蚀与防护研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 206-217.
- [49] 朱世东, 李金灵, 付安庆, 等. 油气生产过程中套损腐蚀失效与防治技术研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 28-35.
- [50] 王丹. 硫酸盐还原菌对 X80 管线钢在土壤环境中腐蚀行为的影响[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- [51] Li, X., Xie, F., Wang, D., *et al.* (2018) Effect of Residual and External Stress on Corrosion Behaviour of X80 Pipeline Steel in Sulphate-Reducing Bacteria Environment. *Engineering Failure Analysis*, **91**, 275-290.
- [52] 曾锋, 刘向荣, 白金刚. 硫酸盐还原菌对 16Mn 钢在海泥中应力腐蚀开裂敏感性的影响[J]. 科技信息(科学教研), 2007(13): 276-277.
- [53] 王欣彤, 陈旭, 韩镇泽, 等. 硫酸盐还原菌作用下 2205 双相不锈钢在 3.5% NaCl 溶液中应力腐蚀开裂行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(1): 43-50.
- [54] 张杰, 李林涛, 黄知娟. 低 H₂S、高 CO₂ 分压条件下双相不锈钢应力腐蚀敏感性研究[J]. 表面技术, 2016, 45(7): 96-101.
- [55] 吴堂清, 周昭芬, 王鑫铭, 等. 弹塑性应力作用下 X80 管线钢的菌致开裂行为[J]. 表面技术, 2019, 48(7): 285-295.
- [56] 孙成, 李喜明, 许进, 等. 尿素对土壤中碳钢微生物腐蚀的影响[J]. 物理化学学报, 2012, 28(11): 2659-2668.
- [57] Domzaliccki, P., Lunarska, E. and Birn, J. (2007) Effect of Cathodic Polarization and Sulfate Reducing Bacteria on Mechanical Properties of Different Steels in Synthetic Sea Water. *Materials and Corrosion*, **58**, 413-421. <https://doi.org/10.1002/maco.200604024>
- [58] 李鑫, 尚东芝, 于浩波, 等. 油气管道 SRB 腐蚀研究新进展[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 211-220.
- [59] 吴堂清. X80 管线钢硫酸盐还原菌腐蚀开裂机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [60] 万红霞, 李婷婷, 宋东东, 等. X80 管线钢在硫酸盐还原菌作用下的腐蚀行为[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 281-290.
- [61] Wu, T., Yan, M., Yu, L., *et al.* (2019) Stress Corrosion of Pipeline Steel under Disbonded Coating in a SRB-Containing Environment. *Corrosion Science*, **157**, 518-530. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.06.026>
- [62] Akhi, A.H. and Dhar, A.S. (2021) Stress Intensity Factors for External Corrosions and Cracking of Buried Cast Iron Pipes. *Engineering Fracture Mechanics*, **250**, Article ID: 107778. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107778>
- [63] Wu, T., Xu, J., Sun, C., *et al.* (2014) Microbiological Corrosion of Pipeline Steel under Yield Stress in Soil Environment. *Corrosion Science*, **88**, 291-305. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.046>
- [64] Abedi, S.S., Abdolmaleki, A. and Adibi, N. (2007) Failure Analysis of SCC and SRB Induced Cracking of a Transmission Oil Products Pipeline. *Engineering Failure Analysis*, **14**, 250-261. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.07.024>
- [65] Wu, T., Xu, J., Yan, M., *et al.* (2014) Synergistic Effect of Sulfate-Reducing Bacteria and Elastic Stress on Corrosion of X80 Steel in Soil Solution. *Corrosion Science*, **83**, 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.01.017>
- [66] Domzaliccki, P., Birn, J. and Lunarska, E. (2008) Hydrogen Permeation Measurements in Natural Sea Environment. *Materials and Corrosion*, **59**, 732-738. <https://doi.org/10.1002/maco.200804111>
- [67] De Romero, M.F., Duque, Z., De Rincón, O.T., *et al.* (2002) Microbiological Corrosion: Hydrogen Permeation and Sulfate-Reducing Bacteria. *Corrosion*, **58**, 429-435. <https://doi.org/10.5006/1.3277633>
- [68] De Romero, M., Duque, Z., Rodríguez, L., *et al.* (2005) A Study of Microbiologically Induced Corrosion by Sulfate-Reducing Bacteria on Carbon Steel Using Hydrogen Permeation. *Corrosion*, **61**, 68-75. <https://doi.org/10.5006/1.3278162>

- [69] Von Wolzogen Kuhr, C. and Van Der Vlugt, L. (1934) Graphitization of Cast Iron as an Electrochemical Process in Anaerobic Soils. *Translation in Corrosion*, **17**, 293-299.
- [70] Gee, R. and Chen, Z. (1995) Hydrogen Embrittlement during the Corrosion of Steel by Wet Elemental Sulphur. *Corrosion Science*, **37**, 2003-2011. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(95\)00088-2](https://doi.org/10.1016/0010-938X(95)00088-2)
- [71] Zucchi, F., Grassi, V., Monticelli, C., et al. (2006) Hydrogen Embrittlement of Duplex Stainless Steel under Cathodic Protection in Acidic Artificial Sea Water in the Presence of Sulphide Ions. *Corrosion Science*, **48**, 522-530. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.01.004>
- [72] 孙建波, 靳亚鹏, 孙冲, 等. H₂S-CO₂ 环境下低铬钢的硫化物应力腐蚀开裂行为[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 1-7.
- [73] 宋洋, 赵国仙, 王映超, 等. Q245R 钢抗 H₂S 应力腐蚀开裂分析[J]. 焊管, 2021, 44(5): 38-43+49.
- [74] 艾志久, 范钰玮, 赵乾坤. H₂S 对油气管材的腐蚀及防护研究综述[J]. 表面技术, 2015, 44(9): 108-115.
- [75] 张显程, 巩建鸣, 涂善东, 等. 高强度硫化物应力腐蚀开裂及防范[J]. 炼油技术与工程, 2003, 33(10): 25-28.
- [76] 王峰, 王立贤, 刘智勇, 等. TP110TS 油管钢在酸性气田环境中的应力腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 57-62+73.
- [77] 袁玮, 黄峰, 赵小宇, 等. X70 MS 管线钢焊接接头硫化物应力腐蚀敏感性及氢捕获效率[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 34-44.
- [78] Iyer, R., Takeuchi, I., Zamanzadeh, M., et al. (1990) Hydrogen Sulfide Effect on Hydrogen Entry into Iron—A Mechanistic Study. *Corrosion*, **46**, 460-468. <https://doi.org/10.5006/1.3585133>
- [79] 王励钊, 李春福, 曹文豪. 电化学充氢条件下 TWIP 钢应力腐蚀敏感性的研究[J]. 表面技术, 2012, 41(4): 39-41.
- [80] 陶杉, 徐燕东, 杜春朝. 超级 13Cr 管材在低 H₂S 高 CO₂ 环境中的开裂敏感性研究[J]. 表面技术, 2016, 45(7): 90-95.
- [81] 宋东东, 贾玉杰, 涂小慧, 等. Cl⁻对冷变形 316L 奥氏体不锈钢在 H₂S 环境下应力腐蚀的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 23-27.
- [82] Sun, C., Li, X., Xu, J., et al. (2012) Effect of Urea on Microbiologically Induced Corrosion of Carbon Steel in Soil. *Acta Physico-Chimica Sinica*, **28**, 2659-2668. <https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB201208243>
- [83] Lunarska, E., Birn, J. and Domzalicki, P. (2007) Hydrogen Uptake by Structural Steels at Cathodic Protection in Sea Water Inoculated with Sulfate Reducing Bacteria. *Materials and Corrosion*, **58**, 13-19. <https://doi.org/10.1002/maco.200603980>
- [84] Biezma, M.V. (2001) The Role of Hydrogen in Microbiologically Influenced Corrosion and Stress Corrosion Cracking. *International Journal of Hydrogen Energy*, **26**, 515-520. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(00\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(00)00091-4)
- [85] Sowards, J.W., Williamson, C.H.D., Weeks, T.S., et al. (2014) The Effect of *Acetobacter* sp. and a Sulfate-Reducing Bacterial Consortium from Ethanol Fuel Environments on Fatigue Crack Propagation in Pipeline and Storage Tank Steels. *Corrosion Science*, **79**, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.10.036>
- [86] 谢飞, 王丹, 吴明, 等. 氢对 X80 钢在库尔勒土壤模拟溶液中应力腐蚀开裂行为的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(2): 690-696.
- [87] 梅华生, 王长朋, 张帷, 等. 电化学充氢对 X80 管线钢在鹰潭土壤模拟溶液中应力腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(5): 388-394.
- [88] Fangyu, G., Feng, H., Wei, Y., et al. (2021) Effect of Cyclic Stress Frequency on Corrosion Electrochemical Behavior of MS X65 Pipeline Steel in H₂S Containing Medium. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, **41**, 187-194.