

# 交直流干扰下X80管线钢的腐蚀疲劳裂纹扩展行为研究

叶家凡<sup>1</sup>, 刘文黎<sup>1</sup>, 靳军军<sup>2</sup>

<sup>1</sup>成都工贸职业技术学院机械工程学院, 四川 成都

<sup>2</sup>西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年5月17日; 录用日期: 2026年6月10日; 发布日期: 2026年6月16日

## 摘要

本文针对X80高钢级管线钢在含氢环境下的氢脆与腐蚀疲劳问题, 研究了交、直流电流干扰对其疲劳裂纹扩展行为的影响机制。通过原位电化学充氢方法, 对X80管线钢母材及焊接接头进行了单边缺口低周疲劳试验, 并结合扫描电子显微镜(SEM)和电子背散射衍射(EBSD)技术, 系统分析了断口形貌、裂纹扩展路径及微观组织演变。结果表明: 在无干扰条件下, 焊接接头因针状铁素体组织而表现出优于母材的疲劳性能, 裂纹呈沿晶扩展。直流充氢( $5\text{ mA/cm}^2$ )显著加速裂纹扩展, 导致脆性穿晶断裂, 严重降低疲劳寿命。交流充氢同样降低疲劳性能, 但影响弱于直流充氢; 其损伤机制为阳极溶解与阴极充氢的叠加, 在断口上同时观察到腐蚀产物与脆性特征, 且随电流密度增加, 阴极充氢效应增强。本研究揭示了交直流干扰下管线钢的损伤机理差异, 为评估埋地管道在杂散电流干扰下的服役安全性提供了实验依据。

## 关键词

X80管线钢, 腐蚀疲劳, 交直流干扰, 氢脆, 裂纹扩展, 焊接接头

## Study on Corrosion Fatigue Crack Propagation Behavior of X80 Pipeline Steel under AC and DC Interference

Jiafan Ye<sup>1</sup>, Wenli Liu<sup>1</sup>, Junjun Jin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Chengdu Industry and Trade College, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: May 17, 2026; accepted: June 10, 2026; published: June 16, 2026

文章引用: 叶家凡, 刘文黎, 靳军军. 交直流干扰下 X80 管线钢的腐蚀疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(3): 333-345. DOI: 10.12677/met.2026.153034

## Abstract

This paper investigates the mechanisms of fatigue crack propagation in X80 high-grade pipeline steel and its welded joints under alternating current (AC) and direct current (DC) interference in hydrogen-containing environments. Low-cycle fatigue tests on single-edge-notched specimens were conducted coupled with in-situ electrochemical hydrogen charging. The fracture morphology, crack propagation paths, and microstructural evolution were systematically analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and electron backscatter diffraction (EBSD). The results indicate that under interference-free conditions, the welded joint exhibits superior fatigue performance compared to the base metal due to its acicular ferrite microstructure, with cracks propagating intergranularly. DC charging (5 mA/cm<sup>2</sup>) significantly accelerates crack growth, leading to brittle transgranular fracture and a severe reduction in fatigue life. AC charging also degrades fatigue performance, but to a lesser extent than DC. The damage mechanism under AC interference is a superposition of anodic dissolution and cathodic hydrogen charging, with both corrosion products and brittle features observed on fracture surfaces. The cathodic hydrogen effect becomes more dominant with increasing current density. This study elucidates the differential damage mechanisms under AC/DC interference, providing experimental basis for assessing the service safety of buried pipelines under stray current interference.

## Keywords

X80 Pipeline Steel, Corrosion Fatigue, AC and DC Interference, Hydrogen Embrittlement, Crack Propagation, Welded Joints

Copyright © 2026 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. 前言

在复杂的地质与交变电磁环境中，管道不可避免地会遭受杂散电流的交直流干扰，这种电化学环境与机械应力的协同作用，可能急剧加速材料的损伤与失效进程[1]-[3]。

在此背景下，管线钢的腐蚀疲劳行为，特别是氢致裂纹的萌生与扩展机理，成为学术界与工程界关注的焦点[4][5]。焊接接头作为管道系统的薄弱环节，其组织不均匀性、残余应力集中以及微观缺陷的存在，进一步加剧了氢的局域富集与脆化倾向[6][7]。尽管通过优化焊接工艺与材料可在一定程度上控制初始氢含量，但在管道全寿命周期内，外部环境引入的氢源与动态载荷的交互作用，使得接头区域面临更复杂的失效风险。

目前，针对单一环境因素下材料氢脆行为的研究已较为丰富[8]-[13]，但对于交、直流杂散电流这种特定干扰模式下，氢渗透行为、电化学腐蚀反应与疲劳裂纹扩展三者间的耦合机制，尚缺乏系统性的认知。特别是交流与直流干扰对裂纹尖端微观过程、断裂模式转变以及材料微观组织响应的影响差异，仍有待深入揭示。

因此，本研究聚焦于交直流干扰这一典型工况，采用原位电化学充氢耦合低周疲劳实验方法，系统研究 X80 管线钢母材及其焊接接头在动态氢环境下的裂纹扩展行为。通过集成扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)及能谱分析(EDS)等微区表征技术，旨在从宏 - 微观多个尺度，阐明交直流干扰影

响下氢损伤与疲劳断裂的竞争与协同机制, 以期为高钢级管线在杂散电流环境下的完整性评估与安全防护提供坚实的理论依据与实验支撑。

## 2. 实验材料及方法

### 2.1. 实验材料

本研究以 X80 高钢级管线钢为主要研究对象, 其母材的具体化学成分如表 1 所示。该材料具有细小的晶粒结构, 显微组织主要由针状铁素体(AF)与粒状贝氏体(GB)构成, 并在晶界处弥散分布有马氏体 - 奥氏体岛状组织[14]。

**Table 1.** Chemical composition of X80 pipeline steel (wt%)

**表 1.** X80 管线钢的化学成分(wt%)

元素	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cu
wt%	0.463	1.94	0.28	0.07	0.008	0.08	0.002
元素	Mo	Al	Ti	Nb	N	Cr	Fe
wt%	0.2	0.07	0.04	0.07	0.013	0.29	Balance

焊接接头采用 GTAW (钨极惰性气体保护焊)与 FCAW-S (自保护药芯焊丝电弧焊)复合工艺制备, 管材规格为 D1016 mm × 15.3 mm。坡口设计为  $47^\circ \pm 3^\circ$  的 V 型, 钝边保留  $1.0 \pm 0.5$  mm, 组对间隙为  $3.5 \pm 1.0$  mm [14]。

### 2.2. 实验方法

所有疲劳试样均依据 GB/T 6398-2017《金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法》标准进行加工。首先对试样进行疲劳预制裂纹处理, 随后开展正式的裂纹扩展实验。静态载荷设定为 3.3 kN, 动态载荷为 2.7 kN, 应力比(R)为 0.1。基于预实验, 确定母材试样循环周次约为 105.3 千周次(kc), 焊接接头试样约为 126.5 千周次(kc), 以期获得约 2 mm 的稳定裂纹长度。

为模拟杂散电流干扰下的氢渗透环境, 本实验采用原位电化学充氢技术, 将疲劳试验与充氢过程同步进行。充氢溶液为 0.5 mol/L  $H_2SO_4$  + 0.2 g/L  $CH_4N_2S$  的混合溶液。充氢条件设置如下: 直流充氢(DC): 电流密度为 5 mA/cm<sup>2</sup>。交流充氢(AC): 电流密度分别为 5 mA/cm<sup>2</sup> 与 20 mA/cm<sup>2</sup>, 采用 50 Hz 工业工频, 与现场杂散电流频率一致。旨在实验室有限周期内实现氢渗透与腐蚀损伤的加速老化, 快速凸显交直流干扰对裂纹扩展的影响规律, 缩短试验周期、提升数据可对比性。

疲劳裂纹扩展实验在自主搭建的立式疲劳试验机上进行, 试样采用改进型单边缺口拉伸试样, 其几何尺寸严格遵循图 1 所示。为防止腐蚀介质干扰位移测量精度, 在试样裂纹扩展面上方特别设计了防护卡口, 以隔离引伸计。

疲劳试验在室温下进行, 采用轴向加载方式。最大载荷为 5.6 kN, 加载频率为 0.5 Hz, 波形为正弦波, 应力比保持为 0.1。实验过程中实时记录循环周次与对应的裂纹长度。

试验结束后, 依据 GB/T 6398-2017《金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法》中推荐的多项式数据处理方法, 将原始数据(循环周次 N 与裂纹长度 a)进行处理, 最终获得裂纹扩展速率(da/dN)与应力强度因子幅( $\Delta K$ )的关系曲线, 用于定量分析材料的疲劳裂纹扩展行为。

为深入揭示损伤机理, 利用扫描电子显微镜(SEM)对疲劳断口的微观形貌进行系统观察。同时, 采用电子背散射衍射(EBSD)技术对裂纹尖端区域的晶粒取向、晶界类型及分布进行精确表征, 以阐明氢损伤与交直流干扰对裂纹扩展路径及微观组织演变的影响机制。

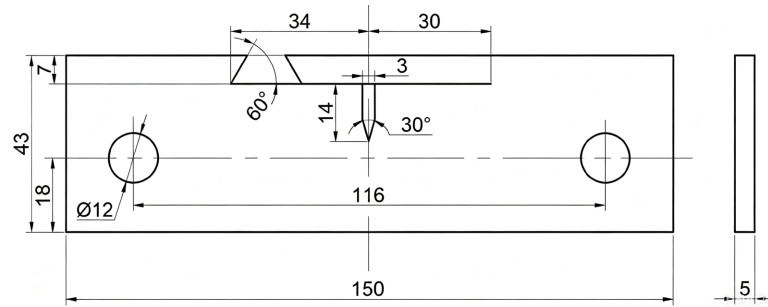


Figure 1. Dimension drawing of fatigue crack growth specimen (mm)  
 图 1. 疲劳裂纹扩展试样尺寸图(mm)

### 3. 实验结果及分析

#### 3.1. 疲劳裂纹扩展曲线

图 2 展示了 X80 管线钢母材和焊接接头在空气中的  $da/dN-\Delta K$  曲线，在疲劳裂纹扩展的过程中，焊接接头的裂纹扩展速率始终低于母材，这表明 X80 管线钢焊接接头的疲劳性能优于母材。

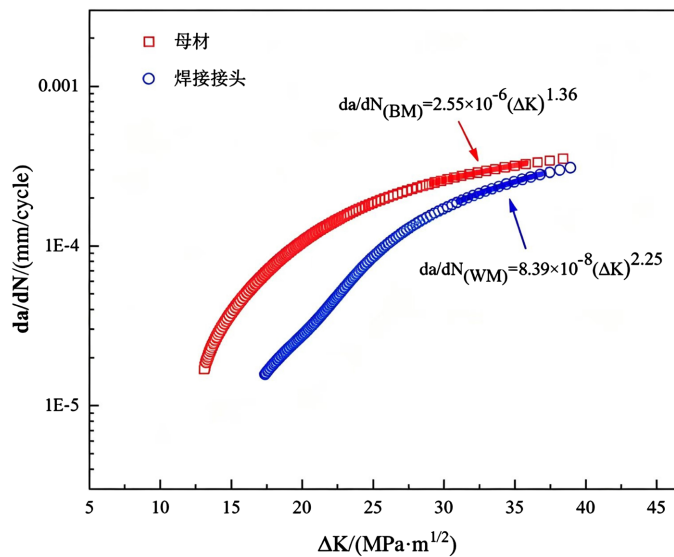


Figure 2.  $da/dN-\Delta K$  curves of X80 pipeline steel base metal and welded joint in air  
 图 2. X80 管线钢母材和焊接接头在空气中的  $da/dN-\Delta K$  曲线

选择  $da/dN-\Delta K$  曲线上的直线段区域进行线性拟合，以获得母材和焊接接头的  $C$ 、 $m$  和 Paris 曲线方程，具体拟合数据见表 2。

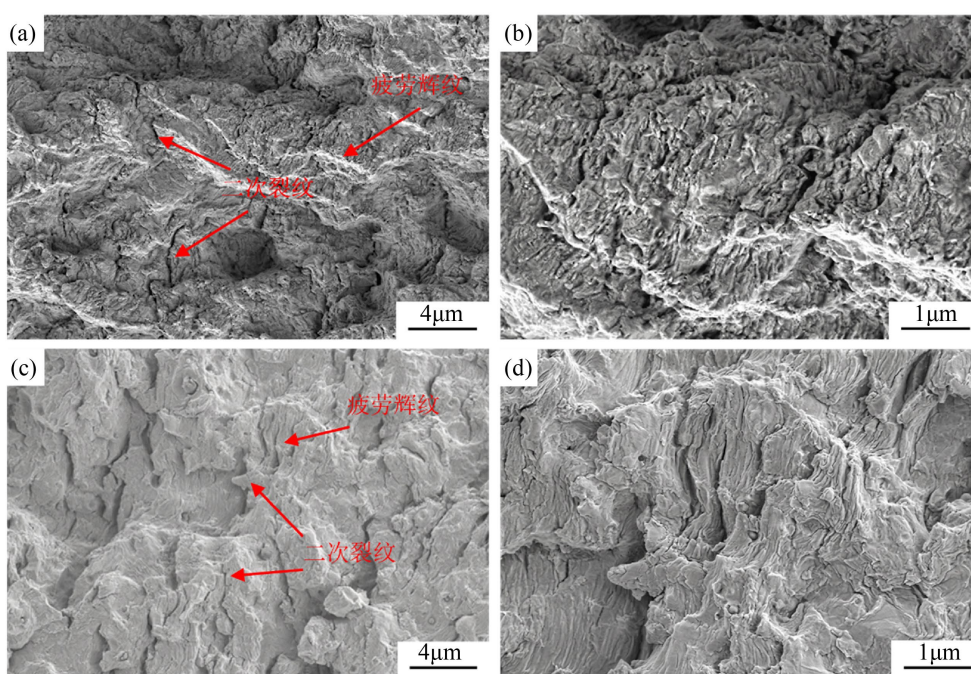
Table 2. Fitting data of Paris formula  
 表 2. Paris 公式拟合数据

区域	Paris 常数 C	Paris 常数 m	Paris 曲线方程
母材	$2.55 \times 10^{-6}$	1.36	$da/dN = 2.55 \times 10^{-6} (\Delta K)^{1.36}$
焊接接头	$8.39 \times 10^{-8}$	2.25	$da/dN = 8.39 \times 10^{-8} (\Delta K)^{2.25}$

焊接接头优异的疲劳性能归因于其独特的显微组织。与母材的针状铁素体 + 粒状贝氏体双相组织不同，焊接接头主要由多位向析出的针状铁素体构成。这种由焊缝中特定夹杂物(如 TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等)诱导内生的针状铁素体组织[15]，呈现出交错互锁的片层结构，能有效偏折裂纹扩展路径，增加裂纹扩展阻力，从而提升了接头的疲劳韧性[16]。

### 3.2. 疲劳断口形貌

利用扫描电子显微镜(SEM)对空气中疲劳试样的断口进行观察，结果如图3所示。母材断口呈现典型的准解理断裂特征，可见清晰的撕裂棱及大量与裂纹扩展方向垂直的疲劳辉纹。同时，断口表面分布有若干二次裂纹，其形成与铁素体/贝氏体相界处的变形不协调有关[17]。二次裂纹的生成消耗了主裂纹扩展的能量，客观上起到了阻碍裂纹扩展的作用[18] [19]。



**Figure 3.** Fracture morphology of X80 pipeline steel specimens in air: (a) (b) base metal; (c) (d) welded joint (junction region of weld zone and coarse-grained heat-affected zone (CGHAZ))

**图 3.** X80 管线钢试样在空气中的断口形貌：(a) (b)母材；(c) (d)焊接接头(焊缝区与粗晶热影响区(CGHAZ)交界区域)

相比之下，焊接接头断口则表现出更明显的韧性断裂特征。微观可见均匀、细密的疲劳辉纹，进一步证实了其良好的塑性变形能力。尽管在断口上也观察到富含 C、Ti 等元素的夹杂物及由此引发的二次裂纹，但如表 3 的 EDS 面扫描分析结果表明，元素分布整体均匀，未出现明显偏聚。这表明，焊接接头与母材疲劳性能的差异主要源于二者基体组织的不同，而非杂质相的直接作用。

**Table 3.** EDS elemental analysis on fracture surfaces of fatigue specimens of welded joint in air

**表 3.** 焊接接头在空气中的疲劳试样的断口的 EDS 元素分析

元素	wt%	元素	wt%
C	4.86	Cr	0.12
N	1.31	Mn	1.67

续表

Al	0.06	Fe	90.28
Si	0.28	Ni	1.13
P	0.06	Cu	0.00
S	0.07	Nb	0.05
Ti	0.09	Mo	0.00

### 3.3. 交直流干扰下腐蚀疲劳行为研究

#### 3.3.1. 充氢环境对裂纹扩展动力学的影响

引入电化学充氢环境后，材料的疲劳裂纹扩展行为发生显著变化。图 4 和图 5 分别展示了母材及焊接接头在不同充氢条件下的 da/dN-ΔK 曲线，相应的 Paris 公式拟合参数列于表 4 和表 5。

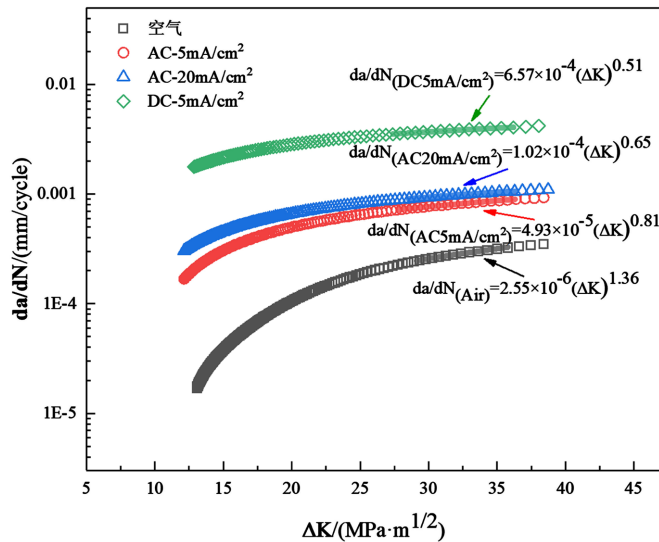


Figure 4. da/dN-ΔK diagrams of X80 pipeline steel base metal under different hydrogen charging conditions

图 4. 不同充氢条件下 X80 管线钢母材的 da/dN-ΔK 图

Table 4. Fitting data of Paris equation for X80 pipeline steel base metal under different hydrogen charging conditions  
表 4. 不同充氢条件下 X80 管线钢母材的 Paris 公式拟合数据

充氢方式	Paris 常数 C	Paris 常数 m	Paris 曲线方程
未充氢	$2.55 \times 10^{-6}$	1.36	$da/dN = 2.55 \times 10^{-6} (\Delta K)^{1.36}$
交流充氢(5 mA/cm <sup>2</sup> )	$4.93 \times 10^{-5}$	0.81	$da/dN = 4.93 \times 10^{-5} (\Delta K)^{0.81}$
交流充氢(20 mA/cm <sup>2</sup> )	$1.02 \times 10^{-4}$	0.65	$da/dN = 1.02 \times 10^{-4} (\Delta K)^{0.65}$
直流充氢(5 mA/cm <sup>2</sup> )	$6.57 \times 10^{-4}$	0.51	$da/dN = 6.57 \times 10^{-4} (\Delta K)^{0.51}$

研究表明：直流充氢(DC)的损伤最为严重，即使是在较低的电流密度(5 mA/cm<sup>2</sup>)下，直流充氢也急剧加速了母材和焊接接头的裂纹扩展，Paris 常数 C 值增大了 2~3 个数量级，疲劳寿命显著缩短。而交流充氢(AC)的影响具有电流密度依赖性，虽然同样降低了材料的疲劳性能，但其损伤程度弱于同等电流密度的直流充氢。随着交流电流密度从 5 mA/cm<sup>2</sup> 增加至 20 mA/cm<sup>2</sup>，母材的裂纹扩展速率进一步上升，

表明损伤加剧。

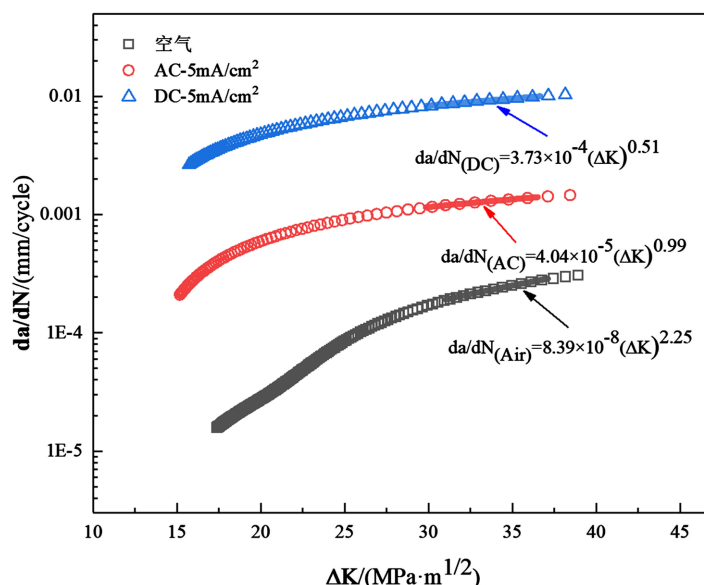


Figure 5.  $da/dN$ - $\Delta K$  curves of X80 pipeline steel welded joints under different hydrogen charging conditions

图 5. 不同充氢条件下 X80 管线钢焊接接头的  $da/dN$ - $\Delta K$  图

Table 5. Paris equation fitting data of X80 pipeline steel welded joints under different hydrogen charging conditions

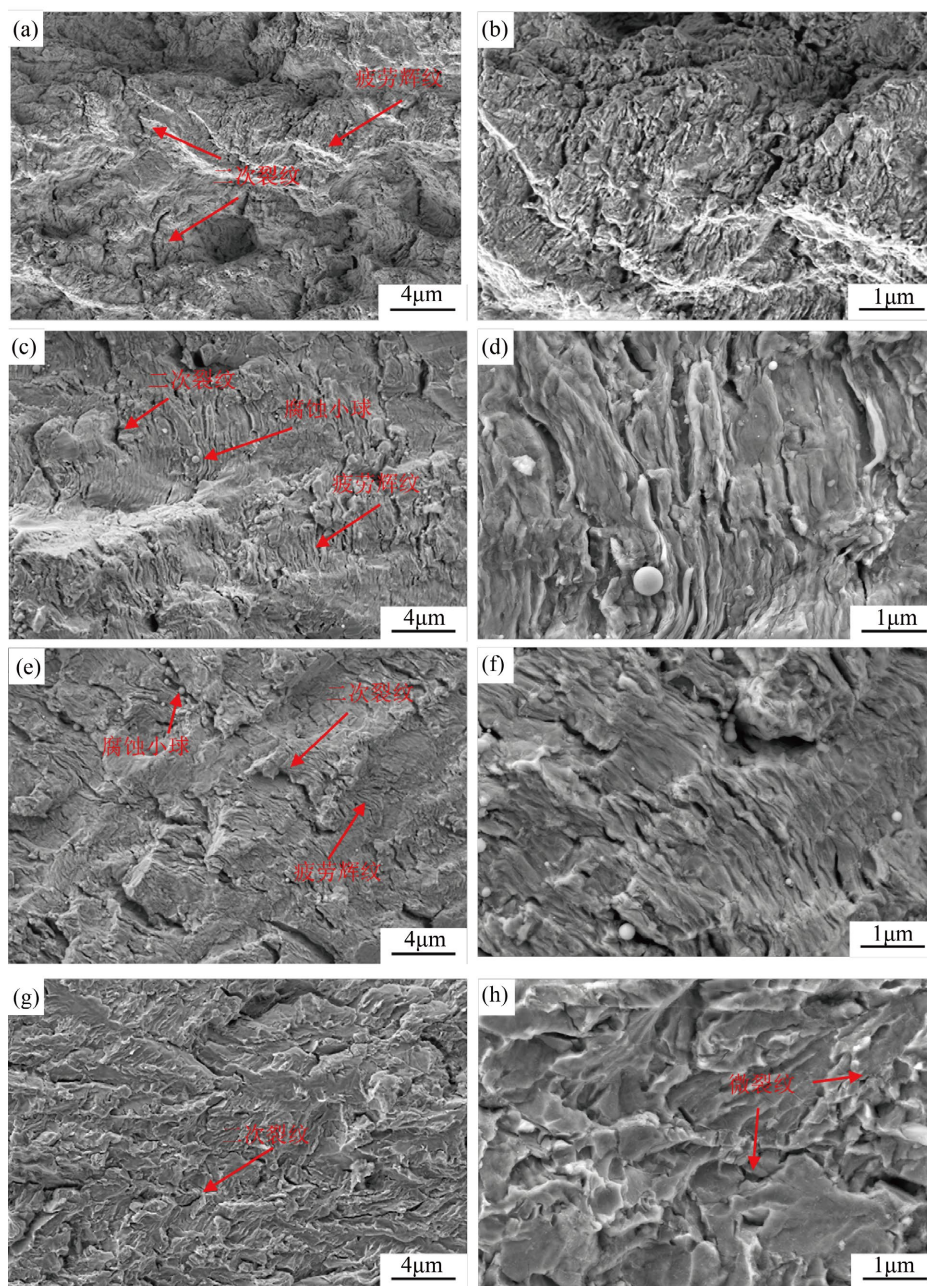
表 5. 不同充氢条件下 X80 管线钢焊接接头的 Paris 公式拟合数据

充氢方式	Paris 常数 C	Paris 常数 m	Paris 曲线方程
未充氢	$8.39 \times 10^{-8}$	2.25	$da/dN = 8.39 \times 10^{-8} (\Delta K)^{2.25}$
交流充氢(5 mA/cm <sup>2</sup> )	$4.04 \times 10^{-5}$	0.99	$da/dN = 4.04 \times 10^{-5} (\Delta K)^{0.99}$
直流充氢(5 mA/cm <sup>2</sup> )	$3.73 \times 10^{-4}$	0.51	$da/dN = 3.73 \times 10^{-4} (\Delta K)^{0.51}$

在交流干扰下, 焊接接头仍表现出比母材更佳的疲劳性能, 这与其针状铁素体组织的强韧性和可能更优的耐蚀性有关。

### 3.3.2. 充氢环境诱导的断裂模式转变

充氢环境不仅改变了裂纹扩展速率, 更引发了断裂模式的根本性转变。如图 6(g), 图 6(h)及图 7(e)图 7(f)所示, 直流充氢后, 无论是母材还是焊接接头, 其断口上的疲劳辉纹基本消失, 取而代之的是大量沿晶或穿晶分布的二次裂纹和微裂纹, 呈现典型的氢致脆性断裂特征。裂纹扩展路径变得平直, 表明氢原子在裂纹尖端的富集弱化了原子间结合力, 促进了低应力下的脆性解理。交流充氢下的损伤机制更为复杂, 是阳极溶解与阴极充氢协同作用的结果。在较低电流密度(5 mA/cm<sup>2</sup>)下, 断口(图 6(c), 图 6(d))仍可见疲劳辉纹, 但出现了明显的腐蚀产物(小球状)。EDS 分析(表 6)证实该产物主要为铁的氧化物(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)和/氢氧化物(FeOOH), 此为阳极溶解的直接证据。当电流密度升高至 20 mA/cm<sup>2</sup>(图 6(e), 图 6(f)), 断口疲劳辉纹模糊、变窄, 并出现穿晶特征的微裂纹, 表明阴极充氢导致的氢脆效应开始占据主导。对于焊接接头(图 7(c), 图 7(d)), 其断口表现出更广泛的均匀腐蚀形貌, 这与其内部杂质相在交变电场下更易发生阳极溶解有关。



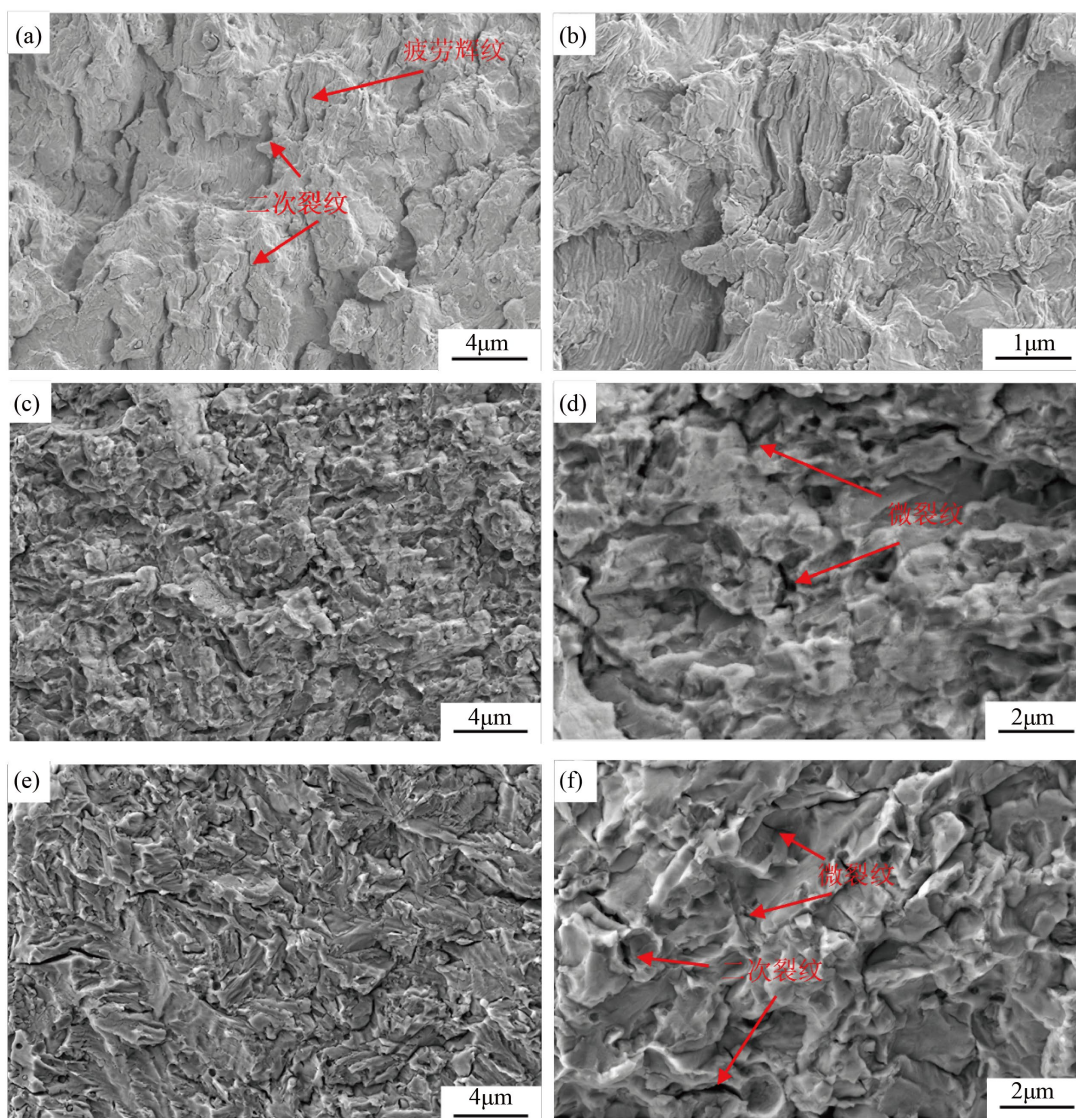
**Figure 6.** Fracture morphology of X80 pipeline steel base metal under different hydrogen charging conditions: (a) (b) uncharged; (c) (d) AC of 5 mA/cm<sup>2</sup>; (e) (f) AC of 20 mA/cm<sup>2</sup>; (g) (h) DC of 5 mA/cm<sup>2</sup>

**图 6.** 不同充氢条件下 X80 管线钢母材的断口形貌图: (a) (b) 未充氢; (c) (d) 5 mA/cm<sup>2</sup> 交流; (e) (f) 20 mA/cm<sup>2</sup> 交流; (g) (h) 5 mA/cm<sup>2</sup> 直流

**Table 6.** EDS elemental analysis of corrosion products on fracture surfaces of base metal specimens after hydrogen charging with 5 mA/cm<sup>2</sup> alternating current

**表 6.** 母材在 5 mA/cm<sup>2</sup> 的交流电流充氢后试样断口处的腐蚀产物的 EDS 元素分析

元素	wt%	at%
Fe	86.11	36.0
O	13.89	64.0

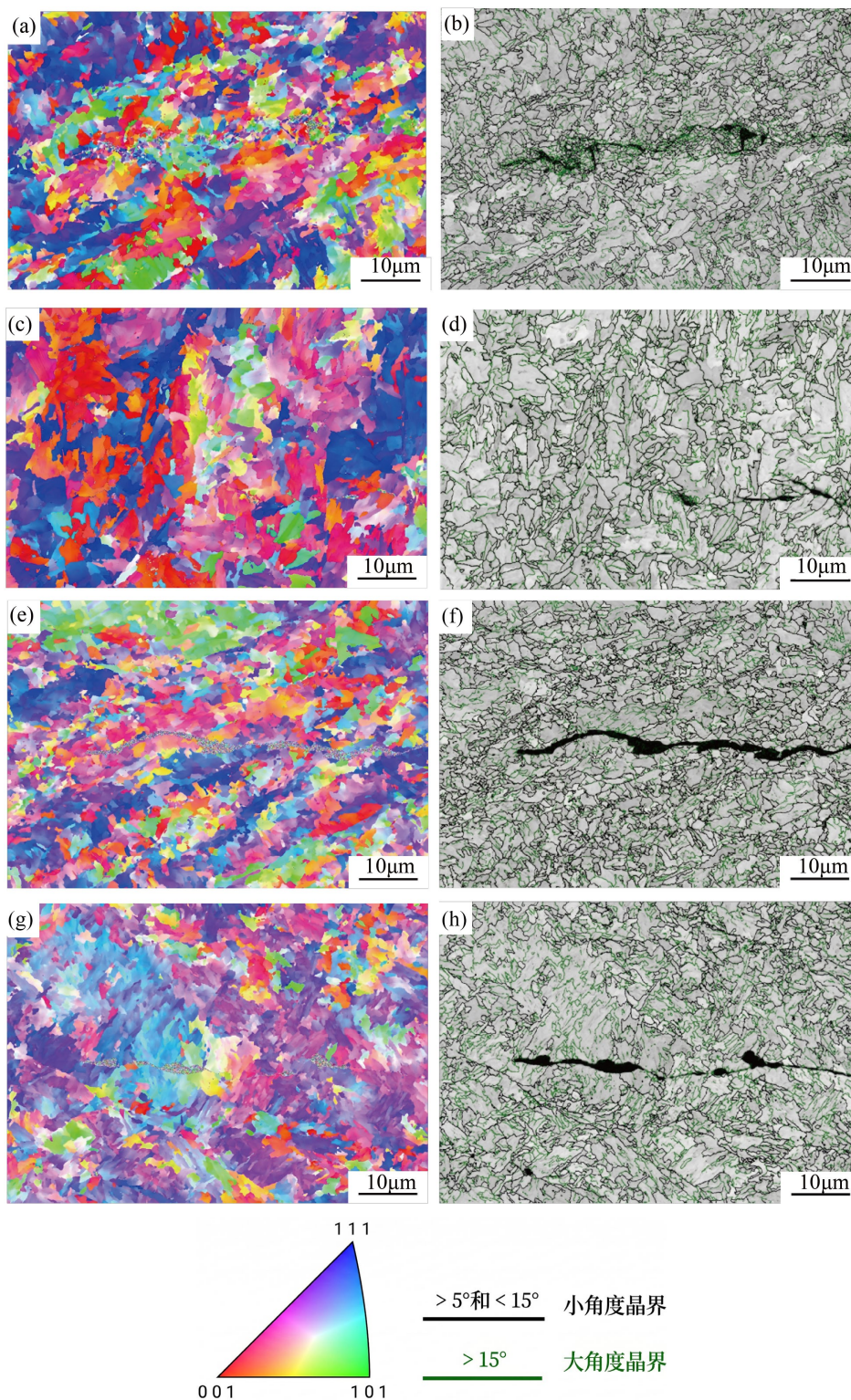


**Figure 7.** Fracture morphology of welded joints of X80 pipeline steel (interface between weld zone and coarse-grained heat-affected zone, CGHAZ) under different hydrogen charging conditions: (a) (b) without hydrogen charging; (c) (d) 5 mA/cm<sup>2</sup> alternating current; (e) (f) 5 mA/cm<sup>2</sup> direct current

**图 7.** 不同充氢条件下 X80 管线钢焊接接头(焊缝区与粗晶热影响区(CGHAZ)交界区域)的断口形貌图: (a) (b)未充氢; (c) (d) 5 mA/cm<sup>2</sup> 交流; (e) (f) 5 mA/cm<sup>2</sup> 直流

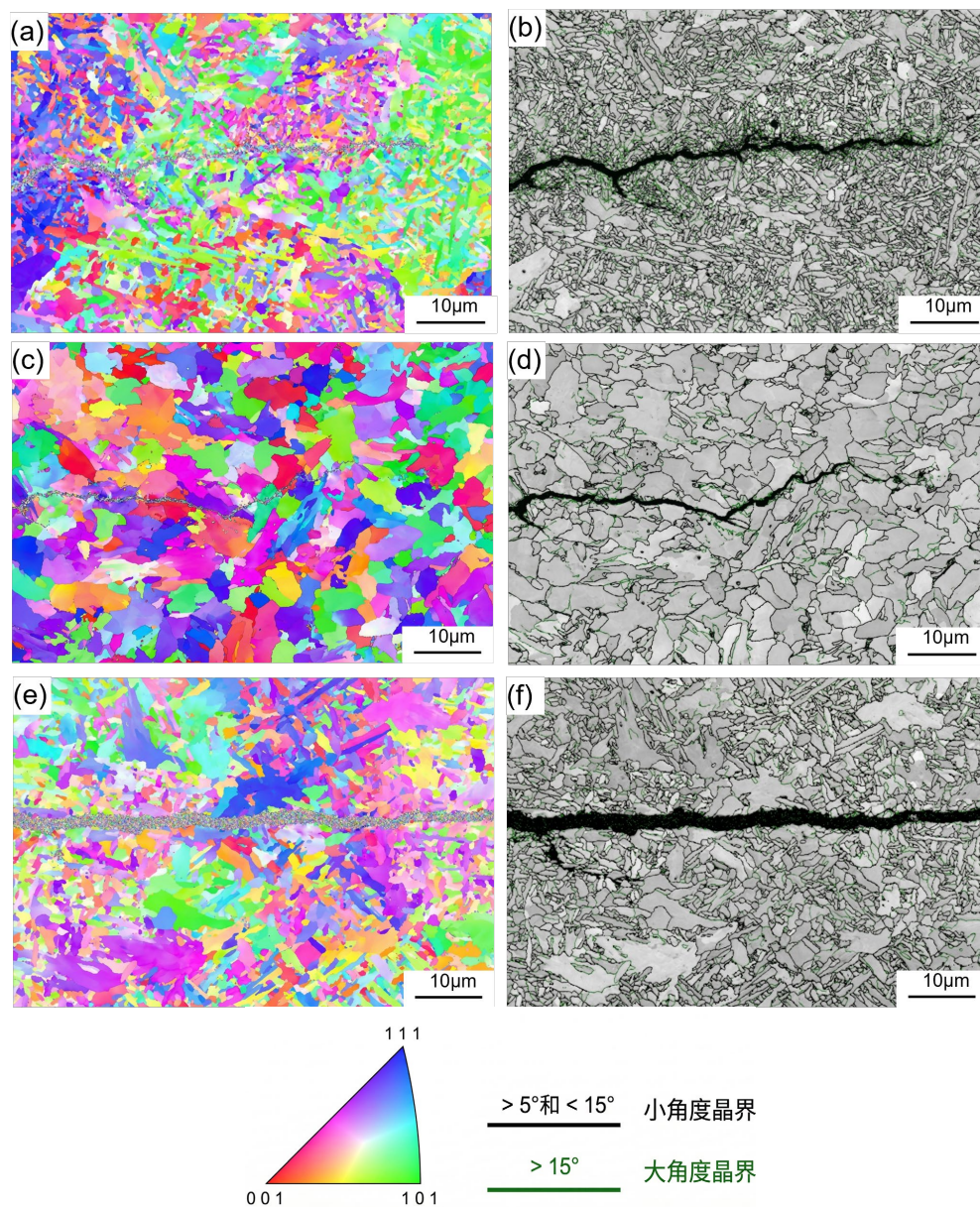
### 3.3.3. 裂纹尖端微观组织演变与扩展路径分析

通过 EBSD 技术对裂纹尖端区域进行表征(图 8, 图 9), 从晶粒尺度揭示了不同环境下的裂纹扩展机制。在空气环境下, 裂纹扩展主要沿大角度晶界进行, 路径曲折呈“Z”字形[20], 属于典型的沿晶扩展。裂纹在穿越不同取向的晶粒时频繁发生偏折, 消耗了更多能量。在直流充氢环境下, 裂纹扩展模式转变为穿晶扩展, 路径较为平直。氢原子在应力驱动下于裂纹尖端富集, 弱化了晶内结合力[21], 使裂纹能够直接穿越晶粒, 扩展阻力降低。在交流充氢环境下, 裂纹扩展也以穿晶为主, 但路径特征混合了阳极溶解造成的孔洞和阴极充氢诱发的微裂纹分叉。母材在 20 mA/cm<sup>2</sup> AC 下, 裂纹变细且分叉增多, 表明高电流密度下阴极充氢的贡献增强。焊接接头在 AC 下裂线路径变宽, 则与其基体在长时间阳极溶解作用下发生的腐蚀减薄有关。



**Figure 8.** Grain orientation and grain boundary distribution at crack tips of X80 pipeline steel base metal under different hydrogen charging conditions: (a) (b) uncharged; (c) (d) 5 mA/cm<sup>2</sup> DC charging; (e) (f) 5 mA/cm<sup>2</sup> AC charging; (g) (h) 20 mA/cm<sup>2</sup> AC charging

**图 8.** 不同充氢条件下 X80 管线钢母材裂纹尖端的晶粒取向和晶界分布图：(a) (b) 未充氢；(c) (d) 5 mA/cm<sup>2</sup> 的直流电流充氢下；(e) (f) 5 mA/cm<sup>2</sup> 的交流电流充氢下；(g) (h) 20 mA/cm<sup>2</sup> 的交流电流充氢下



**Figure 9.** Grain orientation and grain boundary distribution at the crack tip of X80 pipeline steel welded joints under different hydrogen charging conditions: (a) (b) uncharged; (c) (d) 5 mA/cm<sup>2</sup> DC; (e) (f) 5 mA/cm<sup>2</sup> AC  
**图 9.** 不同充氢条件下 X80 管线钢焊接接头裂纹尖端的晶粒取向和晶界分布图: (a) (b) 未充氢; (c) (d) 5 mA/cm<sup>2</sup> 直流; (e) (f) 5 mA/cm<sup>2</sup> 交流

#### 4. 结论

(1) 在无外界电流干扰的空气中, X80 管线钢焊接接头的疲劳裂纹扩展抗力显著优于其母材。这主要归因于焊接接头中由夹杂物诱导形成的、多位向分布的针状铁素体组织。该组织能有效偏折和阻碍裂纹扩展, 表现为更低的 Paris 裂纹扩展速率( $da/dN$ )。微观断口分析显示, 两者均呈现韧性断裂特征, 伴有疲劳辉纹与二次裂纹, 且裂纹扩展路径以沿大角度晶界的曲折扩展为主。

(2) 直流电流充氢对材料疲劳性能的损害极为严重。在 5 mA/cm<sup>2</sup> 的直流充氢条件下, 氢原子在应力驱动下于裂纹尖端持续富集, 显著弱化了原子间结合力, 导致材料的氢脆敏感性急剧升高。其宏观表现

为疲劳寿命大幅缩短, Paris 公式中的常数  $C$  显著增大; 微观上则引发断裂模式由韧性向脆性的根本转变, 疲劳辉纹消失, 代之以大量的二次微裂纹和穿晶断裂形貌, 裂纹扩展路径变得平直。

(3) 交流电流充氢引发的损伤机制为阳极溶解与阴极充氢的协同叠加效应, 其损害程度介于空气环境与直流充氢之间。在较低的电流密度下, 阳极溶解导致材料腐蚀损耗(形成腐蚀产物  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeOOH}$ ) 为主要因素; 随着电流密度增加, 阴极半周的充氢效应增强, 逐渐成为主导损伤机制, 表现为断口出现氢脆微裂纹特征。交流干扰下的裂纹扩展虽亦转为穿晶模式, 但断口仍保留部分疲劳辉纹, 且主裂纹路径可见因阳极溶解形成的孔洞及氢致分叉裂纹, 体现了复合损伤模式的典型特征。

## 参考文献

- [1] 符耀庆, 王秀通, 陈胜利. 南朗段埋地天然气管道杂散电流检测与治理[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 22-27.
- [2] 郭爱玲, 郑京召. 湖南成品油管道杂散电流干扰检测评价及防护措施[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(9): 77-81.
- [3] 陈亮. 苏南成品油管道交流杂散电流干扰检测及防护措施[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(8): 779-783+787.
- [4] Asadipoor, M., Pourkamali Anaraki, A., Kadkhodapour, J., Sharifi, S.M.H. and Barnoush, A. (2020) Macro- and Microscale Investigations of Hydrogen Embrittlement in X70 Pipeline Steel by *In-Situ* and *Ex-Situ* Hydrogen Charging Tensile Tests and *In-Situ* Electrochemical Micro-Cantilever Bending Test. *Materials Science and Engineering: A*, **772**, Article ID: 138762. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138762>
- [5] Pourazizi, R., Mohtadi-Bonab, M.A., Zadeh Davani, R.K. and Szpunar, J.A. (2021) Effect of Thermo-Mechanical Controlled Process on Microstructural Texture and Hydrogen Embrittlement Resistance of API 5L X70 Pipeline Steels in Sour Environments. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **194**, Article ID: 104491. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104491>
- [6] Nanninga, N.E., Levy, Y.S., Drexler, E.S., Condon, R.T., Stevenson, A.E. and Slifka, A.J. (2012) Comparison of Hydrogen Embrittlement in Three Pipeline Steels in High Pressure Gaseous Hydrogen Environments. *Corrosion Science*, **59**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.01.028>
- [7] Dong, C.F., Liu, Z.Y., Li, X.G. and Cheng, Y.F. (2009) Effects of Hydrogen-Charging on the Susceptibility of X100 Pipeline Steel to Hydrogen-Induced Cracking. *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**, 9879-9884. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.090>
- [8] Zhang, T., Zhao, W., Li, T., Zhao, Y., Deng, Q., Wang, Y., *et al.* (2018) Comparison of Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Three Cathodic Protected Subsea Pipeline Steels from a Point of View of Hydrogen Permeation. *Corrosion Science*, **131**, 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.11.013>
- [9] He, C., Chen, X., Xu, Y. and Liu, Z.Y. (2011) Effects of Hydrogen on Electrochemical Behaviors of X80 Steel in Simulated Soil Solution. *Advanced Materials Research*, **335**, 468-473. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.335-336.468>
- [10] Zhou, J., Li, Z., Liu, J., Xing, X., Cui, G., Zhang, S., *et al.* (2020) Effect of AC Interference on Hydrogen Evolution Reaction of X80 Steel. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, **67**, 197-204. <https://doi.org/10.1108/acmm-11-2019-2216>
- [11] Dong, C.F., Liu, Z.Y., Yang, W.J., *et al.* (2010) Hydrogen Induced Cracking of X80 Pipeline Steel. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, **17**, 579-586. <https://doi.org/10.1007/s12613-010-0360-2>
- [12] Wan, H., Song, D., Cai, Y. and Du, C. (2020) The AC Corrosion and SCC Mechanism of X80 Pipeline Steel in Near-Neutral pH Solution. *Engineering Failure Analysis*, **118**, Article ID: 104904. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104904>
- [13] Meng, B., Gu, C., Zhang, L., Zhou, C., Li, X., Zhao, Y., *et al.* (2017) Hydrogen Effects on X80 Pipeline Steel in High-Pressure Natural Gas/Hydrogen Mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**, 7404-7412. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.145>
- [14] 孙万. 交流电流作用下 X80 管线钢的氢损伤行为研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2024.
- [15] 余圣甫, 谢明立, 黄安国, 等. 晶内铁素体的形核机理[J]. 钢铁研究学报, 2005, 17(2): 47-50.
- [16] 李建明, 王勇, 韩涛. X80 管线钢焊接接头疲劳裂纹扩展与微观组织关联性研究[J]. 材料工程, 2022, 50(6): 89-96.
- [17] 刘静, 周建龙, 崔光磊. 氢致 X80 钢疲劳断口特征与裂纹扩展规律[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2021, 33(4): 321-328.
- [18] Zhao, Z., Xu, P., Cheng, H., Miao, J. and Xiao, F. (2019) Characterization of Microstructures and Fatigue Properties for

---

Dual-Phase Pipeline Steels by Gleeble Simulation of Heat-Affected Zone. *Materials*, **12**, Article No. 1989.  
<https://doi.org/10.3390/ma12121989>

- [19] Chu, P., Xu, L., Wang, H., An, R. and Zhang, J. (2023) Effect of Microstructure on Gigacycle Fatigue and Crack Growth Behavior of X80 Grade Pipeline Steels. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **123**, Article ID: 103704.  
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103704>
- [20] 薛飞, 余伟炜, 蒙新明, 等. 国产压水堆核电站机组主管道疲劳裂纹扩展特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(8): 1310-1317.
- [21] 朱云蝶, 赵可可, 张吉鼎, 等. 渗透氢对 BCC 金属裂纹扩展行为的影响[J]. 原子与分子物理学报, 2025, 42(1): 51-58.