

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231225002

文章编号: 1672-9331(2024)04-0044-24

引用格式: 聂鹏, 杨世源, 郭永强, 等. 氢环境下金属材料的疲劳寿命预测: 从裂纹的角度[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(4): 44-67.

Citation: NIE Peng, YANG Shiyuan, GUO Yongqiang, et al. Fatigue life prediction of metal materials in hydrogen environment based on cracks [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(4): 44-67.

氢环境下金属材料的疲劳寿命预测: 从裂纹的角度

聂鹏¹, 杨世源^{1,2}, 郭永强³, 王永金⁴, 潘立栋³, 张家铭³, 孟德彪^{1,2}

(1. 电子科技大学 机械与电气工程学院, 四川 成都 611731; 2. 电子科技大学广东电子信息工程研究院, 广东 东莞 523808; 3. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100089; 4. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 随着氢能技术的快速发展, 金属设备在氢环境下的运用越发广泛。然而, 氢脆效应可显著削弱金属材料的疲劳性能, 为相关设备的安全性埋下了隐患。因此, 精准预测氢环境下金属材料的疲劳寿命具有重要意义。本文系统分析了氢环境下金属材料的疲劳裂纹扩展行为, 总结了氢脆效应下各参数对疲劳裂纹扩展速率的影响。同时, 调研并分析了氢环境下金属材料疲劳性能的研究及寿命预测方法的应用。氢环境下金属材料的疲劳裂纹扩展速率测算结果可作为输入进行计算材料的疲劳寿命, 但研究发现疲劳裂纹扩展速率受多种参数的综合影响。尽管断裂力学的方法是疲劳裂纹扩展阶段常用的方法, 也是氢环境下疲劳寿命预测的常用理论, 但其求解效率尚有待提高。机器学习凭借其高效准确的预测性能, 被广泛应用于各类疲劳问题的寿命预测中, 但其在氢环境下金属材料的疲劳寿命预测领域尚少见。若能采用相关数据增强的方法扩充氢环境下的疲劳寿命数据, 进而采用机器学习的方法进行寿命预测, 将有望显著提升氢环境下金属材料疲劳寿命预测的效率。

关键词: 氢环境; 疲劳性能; 裂纹扩展; 寿命预测; 机器学习

中图分类号: U467.4+97; TK91

文献标志码: A

Fatigue life prediction of metal materials in hydrogen environment based on cracks

NIE Peng¹, YANG Shiyuan^{1,2}, GUO Yongqiang³, WANG Yongjin⁴, PAN Lidong³,
ZHANG Jiaming³, MENG Debiao^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Institute of Electronic and Information Engineering of UESTC in Guangdong, Dongguan 523808, China; 3. China Academy of Machinery Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China; 4. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: With the rapid development of hydrogen energy technology, metal equipment is increasingly used in hydrogen environments. However, the hydrogen embrittlement effect will significantly weaken the fatigue performance of metal materials, posing hidden dangers to the

收稿日期: 2023-12-25; 修回日期: 2024-02-02; 接受日期: 2024-02-09

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2022A1515240010); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-EYIT-23-08)

通信作者: 孟德彪(1985—)(ORCID: 0000-0002-8306-0046), 男, 副教授, 主要从事不确定性下的结构强度分析与智能设计优化的研究。E-mail: dbmeng@uestc.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

safety of related equipment. Therefore, it is of great significance to accurately predict the fatigue life of metal materials in a hydrogen environment. This paper systematically analyzed the fatigue crack growth behavior of metal materials in a hydrogen environment and summarized the effects of various parameters on the fatigue crack growth rate under the hydrogen embrittlement effect. At the same time, the research on fatigue properties of metal materials in a hydrogen environment and the application of fatigue life prediction methods were investigated. The fatigue crack growth rate of metal materials in hydrogen environment can be used as an input to calculate the fatigue life of materials, but research has found that the fatigue crack growth rate is affected by a variety of parameters. Although the method based on fracture mechanics is commonly used in the fatigue crack growth stage and serves as a commonly used theory for fatigue life prediction in a hydrogen environment, its solution efficiency needs to be improved. With its efficient and accurate prediction performance, machine learning is widely used in the life prediction of various fatigue problems. However, it is still less applied in the field of fatigue life prediction of metal materials in a hydrogen environment. If relevant data enhancement methods can be used to expand fatigue life data in hydrogen environments, machine learning-based methods can be used for life prediction, which may significantly improve the efficiency of fatigue life prediction of metal materials in hydrogen environments.

Key words: hydrogen environment; fatigue performance; crack growth; life prediction; machine learning

Foundation items: Project (2022A1515240010) supported by the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation; Project (FRF-EYIT-23-08) supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities

Corresponding author: MENG Debiao (1985—) (ORCID:0000-0002-8306-0046), male, associate professor, research interest: structural strength analysis and intelligent design optimization under uncertainty.

E-mail: dbmeng@uestc.edu.cn

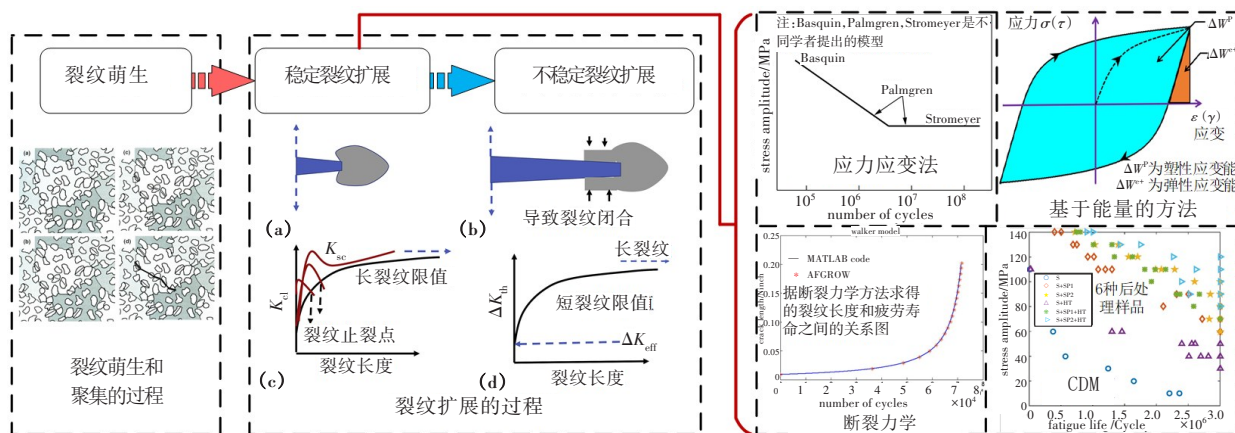
0 引言

氢能源作为当前“双碳”目标背景下的清洁能源之一,在未来可能为世界摆脱对化石能源的依赖发挥关键作用。目前,虽然太阳能和风能在新能源领域有着很大的发展潜力,但是这类能源生产的高峰和低谷是随着日照强度和风速等自然条件的周期性变化而出现的,而这些周期不一定与能源需求的高峰和低谷一致。用上述两种能源在高峰期的过剩电力生产氢气并储存,在有需求的时候通过电化学燃料电池将氢能转化为可用能源。氢能作为补充能源有着一定的发展潜力,然而因其运输和储存一直是该领域的难点。如何有效预测氢脆效应下金属材料的疲劳性能和寿命是亟待解决的问题。

金属材料的疲劳失效是材料在承受波动应力

和应变时,内部损伤逐渐累积,在这一过程中伴随着裂纹的逐渐形成,最终引发零件断裂和失效^[1-5],这是工程中常见的现象。对于疲劳裂纹的形成过程,不同的学者有不同的划分: SCHIJVE^[6]将这个过程分为4个阶段,即裂纹成核、微裂纹扩展、宏观裂纹扩展和失效; SHANG^[7]则将其分为5个阶段,即早期旋回形成与破坏、微裂纹形核、短裂纹扩展、宏观裂纹扩展、最终断裂。尽管不同的学者有不同的划分方法^[8],但总结起来有3个共同的阶段:裂纹萌生、稳定裂纹扩展和不稳定裂纹扩展,如图1所示。

疲劳寿命是指材料从原始状态到失效所承受的应力循环次数。疲劳寿命预测是金属材料疲劳研究的广泛课题,在工程设计和后期维护中起着至关重要的作用。疲劳寿命通常通过疲劳试验和分析来确定^[15-17],在疲劳试验中,材料或结构会经历一系列的循环载荷,其中载荷幅值和频率根据

图1 疲劳裂纹产生机制及评估方法^[9-14]Fig. 1 Fatigue crack generation mechanism and evaluation method^[9-14]

实际工况设定^[18-22]。通过试验记录载荷和循环次数之间的关系,进而确定材料或结构的疲劳寿命。

氢脆是指由于氢的存在,金属材料的力学性能在外荷载作用下急剧变化,材料出现低塑性、不可逆损伤,并在低应力循环加载下发生延迟断裂的现象^[23]。大多数金属,包括低合金钢、沉淀硬化钢、高温合金和铝合金,在受到氢脆影响时,因各自对氢脆效应敏感程度不同,展现出不同的性能变化和疲劳断裂机制。图2总结了金属材料氢脆现象形成的原因以及材料氢脆敏感性的影响因素。氢的存在使金属的延展性和疲劳强度均降低,最终导致内部裂纹的形成。

疲劳裂纹扩展是金属材料在安全设计中须考虑的基本特性之一。在氢气中,金属材料的疲劳裂纹扩展行为加剧,特别是在高压氢气、高浓度氢气和变化加载频率等因素的影响下,疲劳裂纹扩展速率显著增加,疲劳破坏的进程加快,金属材料的疲劳寿命大大降低。此外,通过试验测得的疲劳裂纹扩展速率等参数,可作为输入构建疲劳寿命预测模型,进而预测金属材料的疲劳寿命。因此,对金属材料疲劳裂纹扩展的研究是预测金属材料疲劳寿命的关键所在。

金属材料的疲劳寿命预测对于工程结构的可靠性和安全性有着重要意义。常见的疲劳寿命预测方法通常先采用物理方法描述材料的疲劳损伤演化过程,再通过模型来预测材料未来的行为^[24-25]。在氢环境下,由于氢脆、应力腐蚀和氢诱导裂纹扩展等现象的存在,金属材料的疲劳裂纹

扩展速率会增加,疲劳寿命会降低。因此,在疲劳裂纹扩展阶段,常见的基于断裂力学的疲劳寿命预测方法在氢环境下的应用较为广泛^[26-30]。此外,随着近些年来机器学习技术的快速发展,相关应用也拓展到疲劳寿命预测领域,如支持向量机,人工神经网络等都是常用模型^[31-35]。然而,这些方法在氢环境下的疲劳寿命预测应用却很少,未来在该领域还有很大的发展空间。

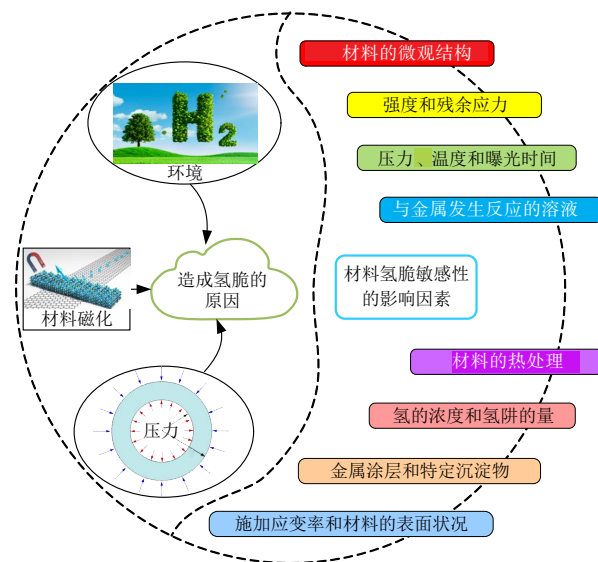


图2 材料氢脆的原因及氢脆敏感性影响因素

Fig. 2 Causes of hydrogen embrittlement of materials and factors influencing its sensitivity

本文旨在系统回顾氢环境下金属材料疲劳的相关研究,主要介绍氢脆影响下金属材料疲劳裂纹扩展、性能退化和寿命预测等方面的内容。具体章节划分如下:第1节介绍了氢脆机制及其对疲劳裂纹的影响;第2节讨论了氢环境下金属材料疲

劳裂纹扩展方面的研究;第3节对金属材料在氢环境下的疲劳性能退化及寿命预测的研究进行了总结;第4节提出了一些结论及对未来研究的建议。

1 氢脆机制及相关行为对疲劳裂纹的影响

氢脆是指在含有氢的环境中,金属材料的延展性和韧性显著降低,从而导致材料脆性断裂失效的现象^[36]。氢脆的本质是材料中的氢在应力诱导下会富集于微缺陷处,随着应力的不断增加,该处氢浓度达到临界值,并促使缺陷处裂纹的萌生与扩展^[37]。随着裂纹的向外延伸,萌生的裂纹尖端成为新的应力集中区及氢富集区,驱使裂纹进

一步扩展。反复循环最终导致材料在宏观上表现为延迟断裂^[38]。延迟断裂是指在外荷载作用下结构件不会即时断裂,而是在应力的逐步诱导下,富集的高浓度原子氢群促使氢致裂纹形核、扩展,最终宏观表现为断裂失效^[39]。

氢脆又分为环境氢脆、氢反应氢脆和内部可逆氢脆,其中氢反应和内部可逆氢脆属于传统的氢脆,这3种氢脆的区别见表1。长期处于氢气环境中的储氢容器和管道等系统出现的氢脆现象称为环境氢脆。环境中的氢通过气态输运、物理吸附、氢分子离解、化学吸附、金属中的扩散和溶解等复杂过程,最终使金属材料产生氢致开裂和塑性损伤。

表1 氢脆的类型和特点

Table 1 Types and characteristics of hydrogen embrittlement

类型	氢的来源	典型工况	裂纹起源	断裂特征	脆化控制因素
环境氢脆	气态氢分子	氢气压: $10^{-6} \sim 10^8$ Pa, 通常室温附近最明显	表面或内部,尚不明确	裂纹扩展速率与温度、压力有关	氢的表面吸附过程
内部可逆氢脆	冶炼或加工过程引入的氢原子	氢含量: 0.1~10.0 ppm	材料内部	裂尖不断形成新的成核区	沿高应力三轴度区的晶格扩散过程
氢反应氢脆	任意来源的气态氢或氢原子	热处理或高温氢环境	材料内部	沿晶断裂,不可逆	形成氢化物/气泡的反应过程

1.1 氢脆机制

对于氢脆作用下金属材料裂纹扩展的不同现象,研究人员提出了不同的机制来解释,但只有少数机制被普遍接受。这些氢脆机制可以单独发生,也可以组合发生。目前,氢脆的主要机制有3种,即氢增强脱聚机制(hydrogen enhanced decohesion mechanism, HEDE)、氢增强局域塑性(hydrogen enhanced localized plasticity, HELP)和吸附诱导位错发射(adsorption induced dislocation emission, AIDE)。图3为这三种脆氢机制示意图。

HEDE是最早的氢脆机制,该机制认为氢原子

会导致材料的特性发生变化。当氢在材料中的溶解度较大时,氢原子在材料内部迅速扩散,从而降低裂纹尖端材料的原子间强度,形成解理型断裂^[40-43]。

HELP机制认为,氢原子在裂纹尖端附近的积聚降低了位错运动的阻力,从而增加了位错的迁移率,这些位错在金属晶格中充当了塑性变形的载体^[44-48]。由于氢使材料的屈服应力局部下降,在低应力水平下可能产生局部位错运动,这也意味着断裂表面会显示脆化材料的局部塑性变形和裂纹尖端的滑移带^[49]。

AIDE是HEDE和HELP的组合,这种机制认为溶质氢原子被吸附在应力集中区(如裂纹尖端)的表面。氢在裂纹尖端的吸附先通过HEDE机制削弱了材料的原子键和内聚强度,并促进位错从裂纹尖端注入,再通过HELP机制的滑移和微孔形成来促进裂纹扩展^[50-52]。

除了这3种主要的氢脆机制,还有其他解释金属材料在氢环境下性能退化的机制,如氢增强宏观延展性(hydrogen enhanced macroscopic ductility, HEMP)和氢致微孔聚结(hydrogen

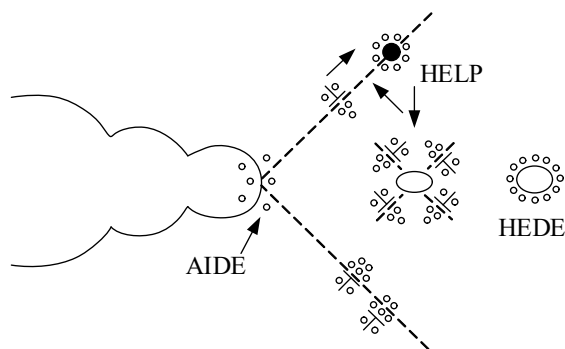


图3 三种氢脆机制的示意图^[40]

Fig. 3 Three hydrogen embrittlement mechanisms^[40]

assisted micro void coalescence, HAMC)。HEMP 机制假设整个金属试样都处于氢气环境中,氢气扩散和氢原子的固溶软化,导致金属材料的屈服强度降低,此时整个试样会塑性化,在宏观上表现为塑性增强^[53-54]。HAMC 机制聚焦于微孔聚结这一延性断裂机制,处于氢环境下的金属材料会发生位错运动和局部塑性变形,裂纹扩展方向上的微孔相互连接,最终产生锯齿状的裂纹^[55-56]。

1.2 氢扩散行为

从原理上来讲,扩散是由于浓度梯度的存在,颗粒从一个区域传递到另外一个区域的过程,此过程将持续进行,直到混合物中的各个组分分布均匀。扩散现象最开始在流体中被观察到,后来人们发现在固体中也存在扩散现象。金属材料中的氢主要来源于高压氢气、电化学充氢和腐蚀反应。在疲劳领域,金属材料因氢脆发生性能退化,主要是高压氢气的作用导致的。

高压氢气溶解于金属材料主要有3个步骤:

1) 物理吸收:氢气与金属材料表面发生范德华相互作用,这个阶段吸收能为 3.0~5.0 kJ/mol。由于物理阶段的氢吸收是可逆的,因此很容易达到平衡。

2) 化学吸收:这一过程发生在单原子层内,主要为短程化学相互作用。氢气分子的解离能可达 4.47 eV,吸收能也高达 40.0~160.0 kJ/mol。化学吸收过程不可逆且相对缓慢。

3) 氢气溶解:在经历化学吸收后,由于氢原子浓度梯度的作用,金属材料内部的氢原子开始向其他地方扩散。

对于高压氢气,金属中的溶解氢浓度 C_H 遵循 Sieverts 定律:

$$C_H = S \sqrt{P_{H_2}} \quad (1)$$

式中: S 为溶解度常数,取决于材料的类型和温度; P_{H_2} 是氢分压。

在理想情况下,氢原子通过晶体点阵之间的空隙进行扩散,在晶格中,氢原子通常会在热力学平衡位置附近发生振动,当这个振动的能量超过氢原子扩散的激活能时,氢原子就会由一个空隙扩散到另外一个空隙。

氢的扩散主要与材料的晶体结构和温度有关。当温度升高时,材料的有效氢扩散系数增加,

扩展速率提高。另外,材料晶体结构的不同也会导致氢扩展速率存在差异,在温度相同的情况下,体心立方等非密排结构氢的扩散系数要远比面心立方等密排结构氢的大。在氢扩散导致材料裂纹扩展及失效的过程中,氢陷阱通常作为裂纹的起源或材料开裂的参与方。所谓氢陷阱,即材料中的一些晶体缺陷,如晶界、相界、位错等,会捕捉氢。由于氢陷阱和氢原子应力场之间的相互作用,大量氢原子向氢陷阱的位置扩散并聚集,从而导致材料裂纹的萌生、扩展及断裂(图4)。

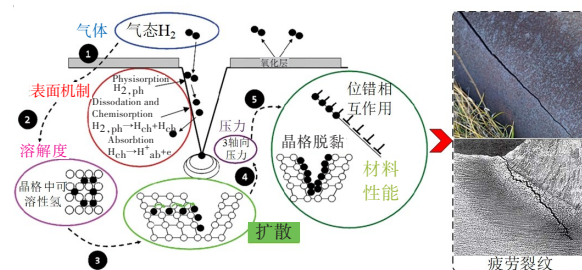


图4 氢脆致裂纹扩展原理图

Fig. 4 Principle of crack growth caused by hydrogen embrittlement

氢扩散是造成材料与氢相关裂纹萌生、扩展和断裂的原因。此外,氢脆效应与扩散氢的浓度有关,当扩散氢的浓度低于临界水平时,发生的氢脆效应可忽略不计;当扩散氢浓度高于临界值时,氢脆效应不容忽视,且该影响的严重程度取决于氢浓度。氢环境下材料萌生裂纹并扩展至断裂的过程还受其他因素的影响,如影响裂纹扩展速率的应力强度因子和加载频率两个因素,其中随着加载频率的降低,试件疲劳裂纹扩展速率增加。相关内容将在后文详述。

1.3 氢脆引起的裂纹萌生及扩展的机制

金属材料的疲劳裂纹萌生和扩展是其疲劳性能在微观机理上的表现,氢脆的影响也主要体现于此。对于初始无缺陷的金属材料而言,其疲劳寿命通常由裂纹萌生和扩展两个阶段的寿命组合而成:

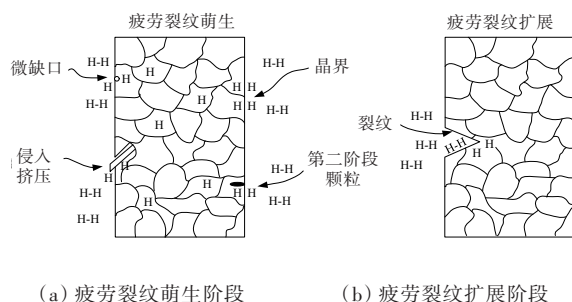
$$N_T = N_i + N_p \quad (2)$$

式中: N_T 为总的疲劳寿命; N_i 为疲劳裂纹萌生阶段的寿命; N_p 为疲劳裂纹扩展阶段的寿命,其中包括稳定扩展和不稳定扩展两个阶段。

氢脆对裂纹萌生和扩展阶段都有影响,导致金属材料疲劳寿命缩短。目前,氢环境下的金属

材料疲劳寿命研究主要集中在疲劳裂纹扩展方面,这部分将在后文阐述。在疲劳裂纹萌生阶段,氢气对材料的影响主要集中在循环应变过程中金属材料微观结构缺陷的演变方面。

通常,金属材料疲劳寿命的缩短和材料内部或表面界面积累的塑性应变有关,而氢气又会促进材料的局部塑性变形,这种变形不仅使材料表面凹凸不平,还会使疲劳裂纹萌生。图5展示了金属材料在疲劳载荷和氢交互作用下裂纹萌生和扩展的行为。图5(a)所示为在裂纹萌生过程中材料的局部应变缺陷(分布、数量和大小)影响氢作用的示意图。这些缺陷会捕捉氢原子,致使材料局部应力状态改变,从而为氢的扩散提供微小驱动力。从图5(b)中可发现,裂纹扩展过程中的应变主要在裂纹尖端区域,此时氢扩散的动力来源于局部的三轴应力。



(a) 疲劳裂纹萌生阶段 (b) 疲劳裂纹扩展阶段

图5 氢在材料疲劳断裂过程中的作用示意图^[57]

Fig. 5 Role of hydrogen in fatigue fracture process of materials^[57]

从微观机理的角度来看,在一种或多种氢脆机制作用下,金属材料疲劳断裂的发生(1.1节所述)被加速。这是因为在氢脆机制下,材料中发生了亚临界裂纹扩展。

在HEDE机制下,裂纹尖端的氢原子聚集导致材料内聚强度降低。当材料受到特定应力,且该应力超过裂纹尖端开口处原子间的强度时,便引发亚临界裂纹扩展。

在HELP机制下,氢原子聚集在位错核处,降低了移动位错之间的弹性相互作用或界面能。此外,位错运动的应力减小,塑性增强,使得材料很容易达到塑性极限并促进损伤的形成,导致裂纹尖端发生位错运动。因此,材料会在较低的外部应力下发生裂纹扩展,如图6所示。

在AIDE机制下,裂纹尖端吸附的氢会削弱金

属原子键,促进裂纹前沿位错的发射。在加载时,裂纹尖端发生塑性变形并形成微孔,这些微孔的形成和连接,以及位错发射滑移带的综合作用使得裂纹尖端始终存在并发生裂纹扩展行为(图7)。

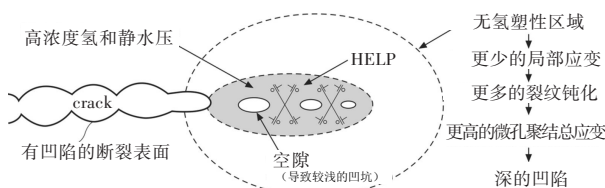


图6 HELP机制引起的材料失效示意图^[58]

Fig. 6 Material failure caused by HELP mechanism^[58]

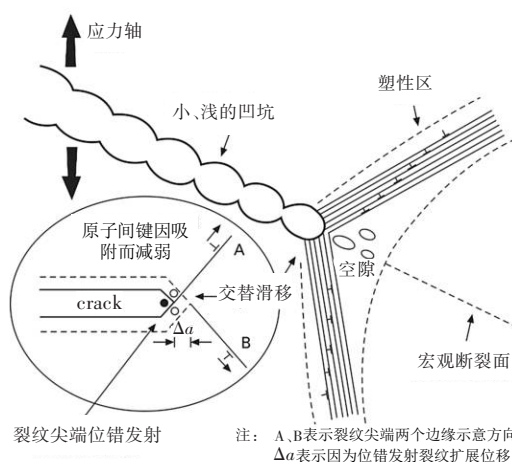


图7 AIDE机制引起的材料失效示意图^[58]

Fig. 7 Material failure caused by AIDE mechanism^[58]

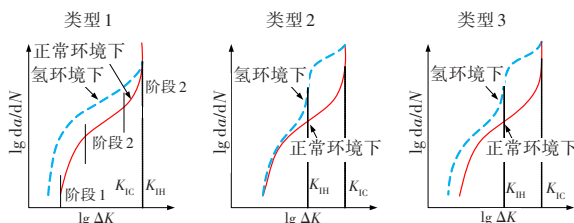
2 氢脆影响下金属材料的疲劳裂纹扩展

2.1 氢气作用下的疲劳裂纹扩展行为

裂纹扩展是金属材料疲劳断裂过程的重要阶段。在氢环境下,金属材料吸收并积累氢原子,这些氢原子在外部应力的作用下,向材料内部原有的缺陷处扩散并聚集。这一过程会显著加剧裂纹的扩展速率,相较于空气或惰性气体环境,氢环境下的裂纹扩展更为迅速,进而导致金属材料在更低的应力水平下即发生断裂。如前文所述,氢脆会导致单调载荷下的亚临界裂纹的扩展,并增大疲劳裂纹扩展的速率。

前人已经对氢环境下的金属材料疲劳裂纹扩展行为进行了许多研究。陈兴阳等^[59]对氢环境下的2205双相不锈钢进行了疲劳裂纹扩展速率试

验,通过对比5 MPa氢气和氮气下材料的疲劳裂纹扩展速率,发现氢环境下的材料扩展速率比氮环境下的快18倍。白光乾等^[60]通过动态充氢慢拉伸试验研究了氢气对X52管线钢疲劳性能的影响,同时开展了疲劳裂纹扩展试验,结果表明充氢电流密度为1.0 mA/cm²时,氢气作用下的X52管线钢的疲劳裂纹扩展速率约为空气中的1.4倍。根据WEI等^[61]的分类,氢气作用下的材料疲劳裂纹扩展行为与正常环境下的差异可以分为3种类型,这3种类型的裂纹扩展速率变化如图8所示。由图8可以看出,在类型1中,材料在氢气作用下的单调裂纹扩展阈值 K_{IH} (材料在氢环境下受到静态负载作用时出现亚临界裂纹扩展的应力强度界限)基本上与正常环境下的单调裂纹扩展阈值 K_{IC} 相等,这表明此时材料实际上可能不受氢气的影响,且不稳定裂纹扩展的临界应力强度 K_{IC} 等于 K_{IH} 。当材料在氢环境下承受动态负载时,疲劳裂纹扩展所需的应力强度会降低,材料容易受到氢脆效应的影响,此时则会发生类型2所示的疲劳失效。部分材料在低于不稳定裂纹扩展的临界应力强度 K_{IC} 时,可能会受到氢脆效应和该效应下裂纹扩展的影响,这时会发生如类型3所示的裂纹扩展速率变化。



注: ΔK 为应力强度因子范围; a 为裂纹长度; N 为疲劳循环次数。

图8 氢环境下可能的裂纹行为变化^[61]

Fig. 8 Possible changes in crack behavior in hydrogen environments^[61]

氢环境下金属材料的裂纹扩展还受很多因素的影响,如在高压氢气和变化的加载频率下,金属材料的疲劳裂纹扩展行为也存在显著不同。以下是对前人关于不同参数对氢环境下疲劳裂纹扩展行为影响研究的总结。

2.2 不同参数对疲劳裂纹扩展的影响

2.2.1 应力比对疲劳裂纹扩展的影响

疲劳裂纹扩展速率主要由裂纹尖端应力强度水平决定,也可能受应力比 R (最小应力强度 S_{min} 与最大应力强度 S_{max} 的比值)等测试变量的影响,对

此有学者进行了不同的研究。

DEY等^[62]通过试验研究了在恒定的应力强度因子范围 ΔK 条件下,充氢对7075 T6铝合金的疲劳裂纹扩展速率的影响。该研究考虑了频率和应力比等不同参数对裂纹扩展速率的影响,发现在高频负载下氢脆引起的裂纹扩展速率要比在空气中的大得多,但是应力比的影响不明显。这可能是由氢脆的相反机制或氧化引起的裂纹闭合效应导致的。

HOLBROOK等^[63]研究了加压氮气和氢气中应力比对疲劳裂纹扩展的影响。因为应力强度因子范围 ΔK 与最大施加应力强度因子 K_{max} 相关,两者的关系如式(3)所示:

$$\Delta K = (1 - R) K_{max} \quad (3)$$

在给定 ΔK 下,当应力比 R 增加时,最大施加应力强度 K_{max} 将更大。在氢气中的疲劳测试表现出的行为与在氮气中的显著不同。当 R 为0.1~0.4时,疲劳裂纹扩展速率基本保持不变。然而,当 R 大于0.4时,氢环境下疲劳裂纹扩展速率的增长幅度比在氮气中的更大,这是因为氢脆引起材料断裂韧性降低,使得类型3(图8)疲劳裂纹过早发生。

DADFARNIA等^[64]通过试验研究了在不同应力比下,含有氢气与天然气混合物的输送管道的疲劳裂纹扩展性能。在6.9 MPa的氢气压力下,对X42管线钢进行了应力比分别为0.1和0.8的疲劳试验,同时与在氮气环境中进行的相同条件的试验对比,如图9所示。由图9可以看出,相较于氮气,当 $R = 0.1$ 时,氢气会增加疲劳裂纹扩展速率;当 $R = 0.8$ 时,疲劳裂纹扩展速率随着 ΔK 的增大

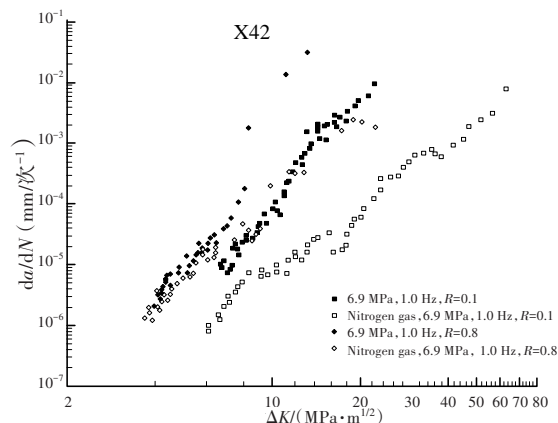


图9 X42管线钢在氢气和氮气下的疲劳裂纹扩展速率^[64]

Fig. 9 Fatigue crack growth rate of X42 pipeline steel measured in hydrogen and nitrogen environments^[64]

而增大。

从前人的一些研究来看,在氢气环境下,应力比对疲劳裂纹扩展速率的影响各有不同,这可能是由试验条件和其他参数的影响引起的。但是可以看出,在氢气环境下,高应力比下的疲劳裂纹扩展速率有所上升,具体量化分析后续还须开展进一步的试验研究。

2.2.2 氢气压力对疲劳裂纹扩展的影响

在高压情况下,氢分子更容易吸附在材料表面并渗透到材料内部,使得氢脆现象加剧,氢原子的扩散速率增加,且氢原子在材料内部的分布更加均匀,最终导致金属材料的疲劳裂纹扩展速率增加。ZHANG 等^[65]测试了 4130X 钢分别在 45.0、70.0、87.5 和 100.0 MPa 氢气压力下的裂纹扩展速率,结果表明,疲劳裂纹扩展速率随着氢气压力的增加而增加,但是疲劳裂纹扩展速率加速度在 87.5 MPa 时达到阈值,这可能与材料表面氢吸收的极限有关。

苟金鑫等^[66]通过对 X80 管线钢进行高压氢气环境下的拉伸和疲劳裂纹扩展试验,分析了氢气对材料的疲劳性能和裂纹扩展速率的影响,并建立了相应的疲劳裂纹扩展模型,结果如图 10 所示。由图 10 可知,当氢气压力为 3.0 MPa 时,管线钢的疲劳裂纹扩展速率为相同压力氮气环境中的 10 倍。

SLIFKA 等^[67]分别对 X100 和 X52 两种型号的管线钢合金进行了疲劳裂纹扩展试验,测试了这种型号的管线钢在 1.7、7.0、21.0 和 48.0 MPa 压力

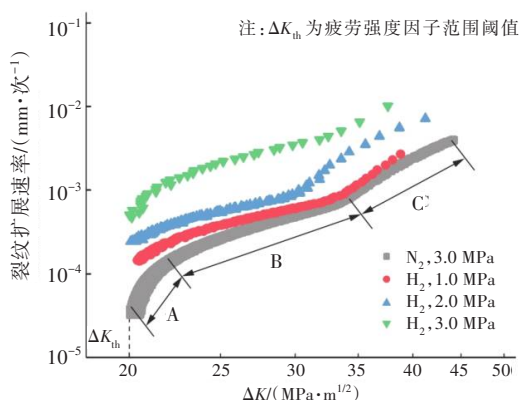


图 10 在不同氢气压力下 X80 管线钢的疲劳裂纹扩展速率曲线^[66]

Fig. 10 Fatigue crack growth rate curves of X80 pipeline steel under different hydrogen pressures^[66]

下的疲劳裂纹扩展速率,该试验采用的负载比为 0.5,加载频率为 1.0 Hz。结果表明,氢环境下的扩展速率要比空气中的高 1~2 个数量级,对于 X100 管线钢而言,疲劳裂纹扩展速率增长率的提高与压力相关,但是 X52 管线钢的裂纹扩展速率增长率似乎与压力无关。

在天然气此类需要管道输送的能源工程中,氢气往往是作为一小部分掺杂在其中,而该类运输管道通常采用氢脆敏感性较高的高强度低合金钢。因此,氢气分压对此类钢种的疲劳裂纹扩展行为的影响成了各学者的研究方向。张一苇等^[68]在总压为 12.0 MPa,氢气体积分数分别为 0%、1.0%、2.2% 和 5.0% 的条件下,开展了 X80 钢螺旋焊管的疲劳裂纹扩展速率试验。结果表明,在氢气体积分数为 1.0% 的环境下,疲劳裂纹扩展速率显著增加,但氢气体积分数继续增大带来的影响不太明显,如图 11 所示。HOLBROOK 等^[69]评估了在循环加载频率为 0.1 Hz 和应力比为 0.25 时,氢气压力对 X42 钢中氢脆辅助的疲劳裂纹扩展的影响。研究发现,在氢气中的疲劳裂纹扩展速率与在氮气中的疲劳裂纹扩展速率之比随着氢分压的增大呈幂函数增长趋势。根据 Sieverts 定律,在平衡条件下,钢中溶解氢的浓度应与氢气压力的平方根成正比^[70]。

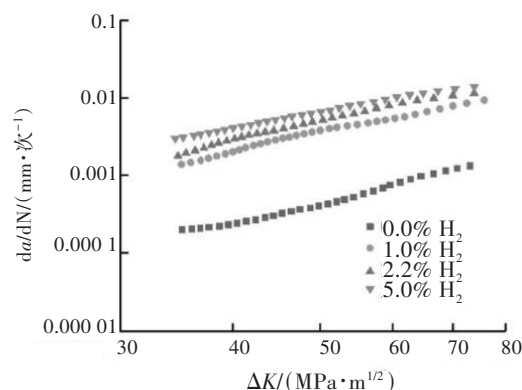


图 11 不同氢气体积分数下 X80 钢的疲劳裂纹扩展速率^[68]

Fig. 11 Fatigue crack growth rate of X80 steel under different hydrogen volume fractions^[68]

氢气对于疲劳裂纹扩展速率的影响似乎存在一个压力阈值,在该阈值下疲劳裂纹扩展速率与气压无关,这可能与材料中氢气的最大溶解度或损坏区域中的临界氢气浓度有关。此外,因不同参数之间存在相互作用,故对不同氢气压力作用

下的金属材料疲劳裂纹扩展速率的影响需要进一步研究,以探索其与其他参数之间的关系。

2.2.3 加载频率对疲劳裂纹扩展的影响

由于氢引起的损伤是一种传输限制现象,氢原子必须吸附并扩散到高应力区域,因此氢引起的损伤程度可能对加载频率有一定的依赖性。加载频率较低的时候,应力循环周期长,这使氢原子有充足的时间扩散到裂纹尖端并聚集(图12),从而对金属材料的疲劳裂纹扩展行为影响更加显著^[71]。FASSINA等^[72]研究发现氢原子能够在低频下迁移到裂纹尖端,从而加剧了氢对金属材料疲劳裂纹扩展行为的影响。对此,部分研究人员结合不同频率和压力进行了氢环境下金属材料的疲劳裂纹扩展测试研究。

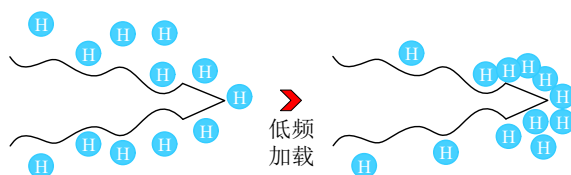


图12 低频加载下氢原子在裂纹尖端聚集的示意图

Fig. 12 Hydrogen atoms gathering at crack tip under low-frequency loading

SUN等^[73]研究了15-5PH马氏体不锈钢在氢气压力为0.09、0.90、9.00 MPa下的疲劳裂纹扩展行为,同时在0.9 MPa氢气压力下,将加载频率从20.0 Hz降到0.2 Hz,测试加载频率对疲劳裂纹扩展行为的影响,研究结果如图13所示。结果表明,不仅高压氢气会提高裂纹扩展速率,而且中压低加载频率也会提高裂纹扩展速率。

MATSUNAGA等^[74]对氢环境下钢材疲劳裂纹扩展的加速机制及其影响因素进行了研究。结果表明,在高频区域(如0.1~10.0 Hz),氢导致的疲劳裂纹扩展加速比率随着加载频率的降低而逐渐增加,直至达到顶峰。

MATSUOKA等^[75]通过不同频率的拉伸疲劳试验,研究了氢和加载频率对SCM435钢疲劳行为的影响。通常,在氢气作用下,材料疲劳裂纹扩展速率会随着加载频率的降低而增加并存在上限,但是该研究发现氢环境中的SCM435钢的疲劳裂纹扩展的加速度也存在上限。

在氢环境下,加载频率对金属材料的疲劳裂纹扩展速率的影响较为复杂。在低加载频率下,

若发生延性断裂,则疲劳裂纹扩展速率减小;若发生准解理断裂,则疲劳裂纹扩展速率增加^[76]。氢环境由加载频率所造成的金属疲劳裂纹扩展速率增加且存在一个极限,这个极限由影响金属疲劳的氢脆效应和加载情况共同决定,具体还须开展试验测定。

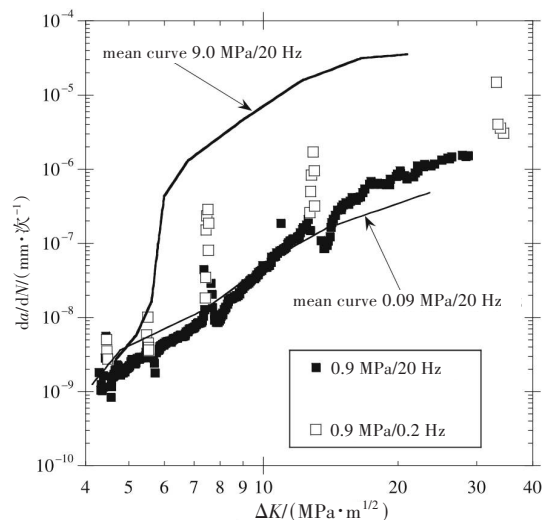


图13 氢环境下不同压力和加载频率下疲劳裂纹扩展速率的变化^[73]

Fig. 13 Changes in fatigue crack growth rate under different pressures and loading frequencies in hydrogen environments^[73]

2.2.4 温度对疲劳裂纹扩展的影响

氢环境下金属材料的疲劳裂纹扩展行为对温度也有依赖性。通常,温度会影响氢原子在材料内部的扩散。由位错传输理论^[77]可知:温度过低或过高时,位错对氢原子的捕捉效果均会减弱,进而降低了材料的氢脆敏感性。部分研究指出,在环境温度上升的情况下,氢致疲劳裂纹扩展速率会降低,且疲劳裂纹扩展行为对温度的依赖性还受其他因素的影响,如当氢气压力增加到一定程度时,这种高温效应逐渐变得不那么明显。

YAMABE等^[78]在氢气压力为0.1~90.0 MPa、试验频率为0.001~10.000 Hz的组合条件下,进行了温度为室温、363 K和423 K下的疲劳裂纹扩展试验。随着测试温度的升高,氢气中疲劳裂纹扩展加速开始时的应力强度因子范围 ΔK 会移动至更大的 ΔK 。

对于纯铁材料而言,晶界的断裂是低应力强度范围内氢致疲劳裂纹扩展的主要原因,其扩展速率随着氢气压力的增大、测试温度的升高而增大。OGAWA等^[79]在不同压力和温度组合的气态

氢环境中对纯铁进行了疲劳裂纹扩展试验。试验结果表明:在特定温度下,材料的疲劳裂纹扩展速率会随着氢气压力的升高而增大,对晶界断裂的影响更明显;在气压固定的情况下,温度的升高可以削弱这种影响,结果如图 14 所示。

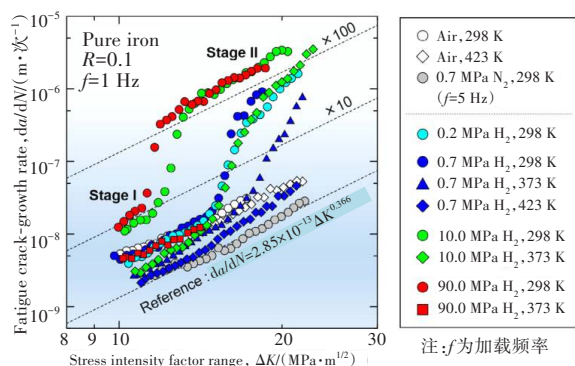


图 14 不同气体环境、气压和温度组合条件下的疲劳裂纹扩展速率^[79]

Fig. 14 Fatigue crack growth rate under different combinations of gas environment, air pressure, and temperature^[79]

TAKAKUWA 等^[80]分别在室温和 423 K 的气态氢环境下,对铁素体-珠光体钢进行了疲劳裂纹扩展测试,并通过扫描电子显微镜进行裂纹分析。其结果表明,温度升高能够减缓解理裂纹的扩展,并减小裂纹尖端附近的塑性变形,同时降低裂纹扩展的加速度。由此可见,当温度上升到一定程度时,疲劳裂纹扩展速率也会受到一定影响。

金属材料在氢环境下的疲劳裂纹扩展行为源于疲劳损伤和裂纹尖端富氢量之间复杂的相互作用,这一过程取决于压力比、氢压力、加载频率、温度和应力强度因子水平等诸多因素。除了上述这些因素的影响,材料本身的成分和性能也会影响氢环境下疲劳裂纹扩展行为。目前,不同参数下的氢致金属疲劳裂纹扩展行为均通过具体试验测试,根据已有数据进行模型表达是未来研究的方向。

2.3 氢环境下疲劳裂纹试验的方法

2.3.1 充氢方法

金属材料中氢的来源主要有两种,一种是材料在冶炼、热加工和热处理及后续加工过程中吸收的氢;另外一种则是材料在氢环境下工作过程中吸收的氢。当金属表面或内部存在裂纹或缺陷时,外部氢就会进入金属内部显微组织,并通过位

错、非金属夹杂物和析出物等缺陷进行累积,聚集在缺陷和金属基体之间的氢原子使得金属材料的脆性增加,从而产生氢脆效应,加速裂纹的萌生和扩展。

目前,氢环境下疲劳裂纹试验通常采用电化学充氢方法,如 KANEZAKI 等^[81]在研究氢对奥氏体不锈钢疲劳裂纹扩展行为的影响时,通过 pH 为 3.5 的硫酸溶液中的铂电极以 27 A/m² 的电流密度对试样进行阴极充电,硫酸溶液须每周更换一次,以避免由于水蒸发引起的浓度变化。白光乾等^[60]在探讨 X52 管线钢抗氢性能时,采用的也是电化学充氢方法,如图 15 所示。该充氢方案以试样作为阴极,铂电极作为阳极,电解液采用浓度为 0.5 mol/L 的硫酸溶液,还加入了浓度为 1.85 mmol/L 的 Na₄P₂O₇ 作为毒化剂,以防止吸附在金属表面的氢原子结合成氢气溢出。MURAKAMI 等^[82]则是将所研究的 SCM435 不锈钢浸泡在硫氰酸铵(NH₄SCN)溶液中,通过阴极充电对其进行充氢。

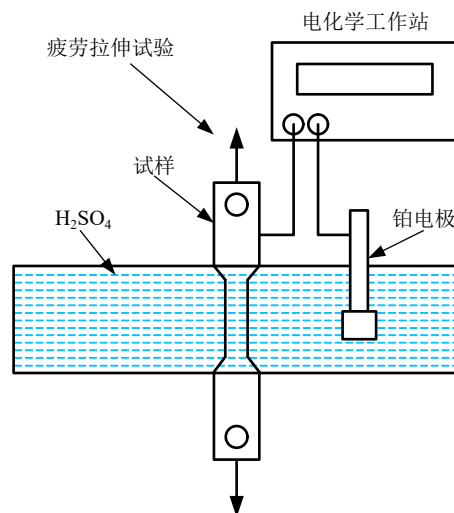


图 15 充氢方案示意图^[60]

Fig. 15 Hydrogen charging scheme^[60]

除上述电化学充氢方法外,一些含氢化合物在高温高压下或通过化合反应也能产生氢气,对于需求量小的试验比较适用。近些年来,学者们开发了一种新的原位充氢装置。该装置通过双壁结构室将电解质与试样的背面隔离,可在真空条件下进行原位充氢,并且基于扫描电子显微镜技术,当氢扩散到样品表面时可同时实现微观结构观察和机械测试,不仅可以连续追踪氢引起的微

观结构变化,而且不会造成表面电解质污染。此外,在测试高压氢气对于金属材料疲劳裂纹扩展的影响时,还需要配备带有高压氢气室的伺服液压试验机进行试验。

2.3.2 疲劳裂纹扩展试验方法

通常,对金属材料进行疲劳裂纹相关试验之前,须先在室温条件下预制裂纹,再通过试验设备加载以获得测试结果。慢应变拉伸试验是研究氢环境下金属材料疲劳性能的一种常见方法。对试样进行预充氢后,再采用恒定变化的加载来研究材料的变形行为,这样能够耦合疲劳载荷和外部氢的劣化作用的影响,使其更贴合现实情况,更好地反映材料的氢脆效应。

在研究氢气压力对金属材料疲劳裂纹扩展行为的影响时,通常需要特殊设备来营造压力环境。苟金鑫等^[66]采用一种带有高压气体釜的加载试验机来研究氢气压力对 X80 管线钢疲劳裂纹扩展行为的影响,该试验装置示意图如图 16 所示。试验时固定拉杆,高压气体釜随下拉杆一起移动,给釜内试件加载。

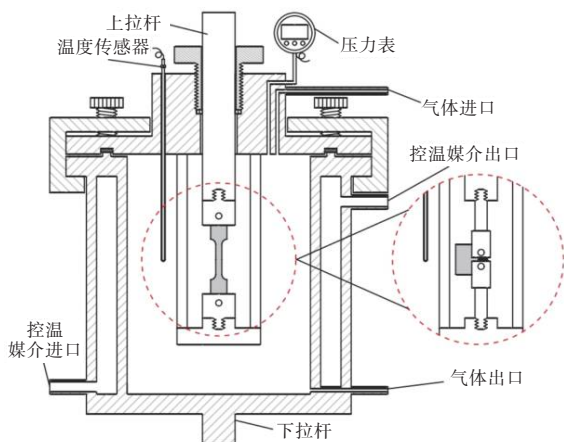


图 16 高压氢气釜拉伸及疲劳试验装置示意图^[66]

Fig. 16 Tension and fatigue test equipment for hydrogen autoclave^[66]

NGUYEN 等^[83]采用了一种最高压力可达 120 MPa 的高压釜,并将其安装在伺服液压测试框架上,可同时对多个试件进行加载,如图 17 所示。

除了氢气压力,温度也是氢环境下疲劳裂纹扩展试验常提及的一个参数,魏连峰等^[84]通过 MTS809 25 kN 的电液伺服材料试验系统进行了不同温度下的疲劳加载试验,该加载系统如图 18

所示。

为了避免在电充氢和机械疲劳测试的间隔期间氢气扩散释放,FASSINA 等^[72]将试样浸入温度 $T \leq 196^\circ\text{C}$ 的液氮中,并采用 100 kN 的 MTS 伺服液压加载架进行疲劳试验。同时,通过乙醇浴加热充氢样本至测试温度,尽量减少材料中氢的损失。



图 17 高压氢气下金属材料疲劳裂纹扩展的机械系统^[83]

Fig. 17 Mechanical system for fatigue crack growth of metal materials under high-pressure hydrogen^[83]

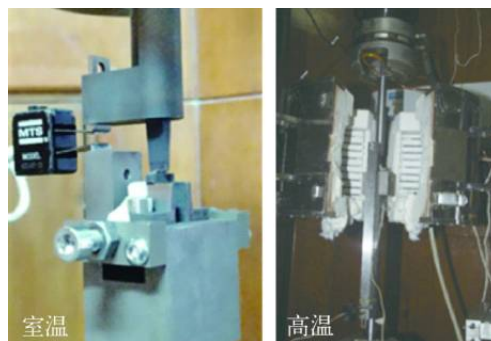


图 18 疲劳裂纹扩展速率试验加载系统^[84]

Fig. 18 Loading system for fatigue crack growth rate test^[84]

通常,氢环境下金属材料的疲劳试验都较为简单,一些普通疲劳试验机即可满足条件。但当对一些特定影响因素(如高温、高压和高浓度氢等)开展研究时,还需要特殊或专门定做的设备进行疲劳试验。

3 氢环境下金属材料的疲劳寿命预测

3.1 氢脆对材料疲劳性能的影响

随着氢能源的开发与利用,众多学者对氢脆影响金属材料的疲劳特性、敏感性分析和裂纹扩

表 2 氢脆影响金属材料疲劳性能研究的总结

Table 2 Research on effect of hydrogen embrittlement on fatigue properties of metal materials

研究文献编号	研究对象	研究方法	主要发现
[85]	4130X 钢	疲劳试验+数值模拟	高压氢气下的断裂韧性较空气中的直线下降
[86]	BCC 钢	统一力学理论	提出 BBC 钢在氢脆机制的协同作用下产生熵的结果
[83]	X70 管线钢	疲劳寿命评估分析程序	1.0% H ₂ 混合气体条件下,母材和焊缝金属的断裂抗力显著下降
[87]	SA-372J 级钢	疲劳裂纹扩展测试、断裂韧性测试;半椭圆疲劳裂纹深宽比演变的方法	疲劳性能测试中均有氢拐点的存在,拐点前后裂纹扩展速率变化明显
[81]	SUS316L	X 射线衍射检测	疲劳裂纹尖端附近的马氏体转变增加了氢的局部扩散,从而提高了裂纹的扩展速率

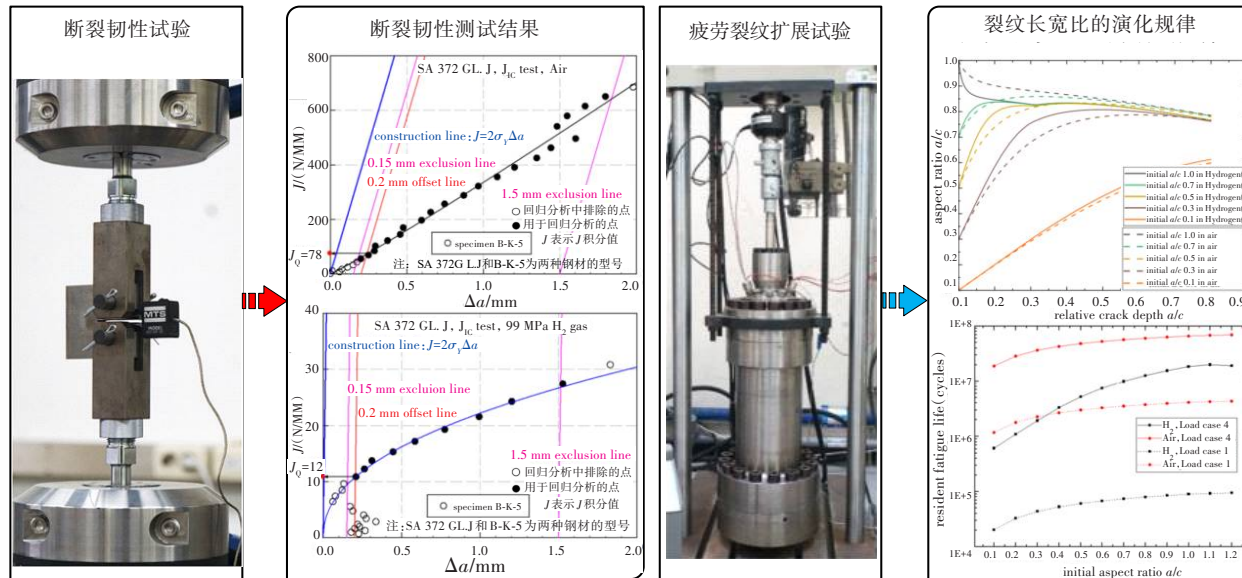
注:氢拐点指当氢浓度较低时,金属材料性能退化且裂纹变化不太明显;当氢浓度较高时,其对金属材料特性变化和疲劳裂纹扩展的影响显著。

展等内容进行了相关研究。表 2 总结了近些年来有关氢脆影响材料疲劳性能的一些研究。

在氢脆效应的影响下,金属内部通常发生两种类型的断裂,即沿晶断裂和穿晶断裂。沿晶断裂是脆性断裂的一种,裂纹在材料中高速扩展,而穿晶断裂则发生在晶界之外^[88]。

在大多数情况下,氢气会降低金属材料的强度和延展性,从而使金属材料疲劳裂纹萌生和扩

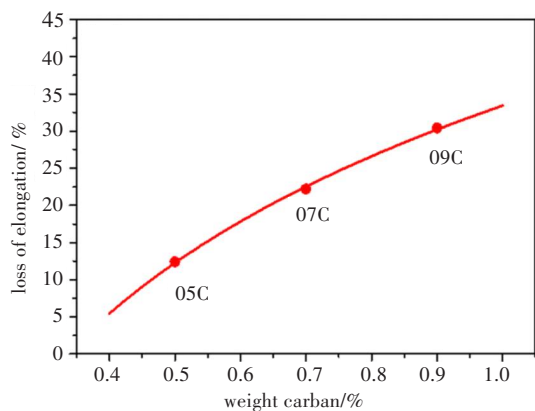
展直至断裂的行为更容易发生。DWIVEDI 等^[89]详细阐述了氢脆导致材料机械性能(如延展性、韧性和强度等)退化的过程。但是,在氢脆导致材料性能退化的过程中,材料性能的变化是非线性的。LEE 等^[87]通过疲劳裂纹扩展测试、断裂韧性测试(图 19)和有限元分析了高压氢气对 SA-372J 级钢压力容器的影响,结果表明在这些测试中都有氢拐点的存在。

图 19 断裂韧性和疲劳裂纹扩展试验^[87]Fig. 19 Fracture toughness and fatigue crack growth test^[87]

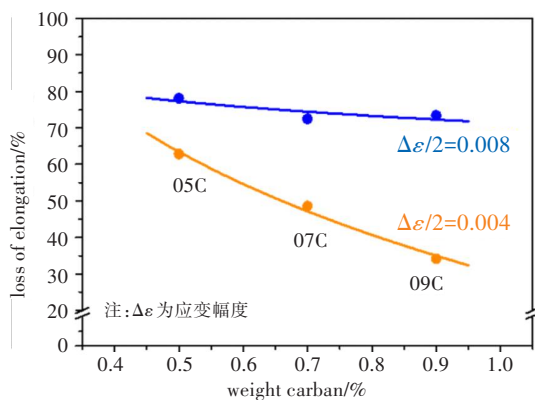
除了氢气浓度,氢环境下金属材料的疲劳性能还会受其他因素(如外部载荷的加载频率、材料本身的元素和氢脆敏感性等)的影响。在疲劳失效的情况下,加载频率越低,氢进入金属的时间就越充裕,对金属材料性能退化的影响就越严重^[90]。ROY 等^[91]通过疲劳强度测试发现,在低应力强度

因子下,氢损伤相当高,且随着载荷频率的下降,疲劳裂纹扩展率增加。除加载频率外,材料的含碳量对材料的疲劳性能也有很大影响。SONG 等^[92]发现碳含量会极大地影响了试件的拉伸性能、显微组织、屈服应力、极限拉应力和总伸长率,碳含量的增加会使试件的延伸率损失增大,疲劳

寿命损失减小,如图20所示。通常,高强度材料具有优异的强度和较高的延展性,但是氢的存在会影响材料的局部滑移行为以及晶界的性质,材料会发生准解理型断裂,这会降低材料的强度和延展性。为了提高抗氢脆性能,需要添加不同类型的合金元素(如Al、Mn)并细化晶粒^[93]。



(a) 延伸率损失



(b) 疲劳寿命损失

图20 充氢后不同碳含量下Fe-17Mn-xC钢延伸率和疲劳寿命损失^[92]

Fig. 20 Loss of elongation and fatigue life of Fe-17Mn-xC steel under different carbon contents after hydrogen charging^[92]

不同金属材料对于氢气有着不同的敏感性。氢脆敏感性较低的奥氏体钢对于氢储存和运输系统是非常有吸引力的。奥氏体钢具有非常低的氢扩散率和高氢脆耐受性,但当Ni和Mo等奥氏体稳定元素的含量减少时,其机械稳定性会降低。因此,在奥氏体向马氏体发生转变时,原奥氏体钢的氢脆抗力可能会降低^[94-95]。为了评估材料对氢脆影响的耐受性,学者们提出了不同的氢脆指数,如相对缺口拉伸强度比、相对收缩面积和总伸长损失等。对于奥氏体钢而言,最初Ni当量指数被引

入用于评估奥氏体在化学方面的稳定性^[96-98]。由于马氏体比奥氏体具有更低的氢溶解度和更高的氢扩散率,在奥氏体转变为马氏体的过程中,其氢脆抗力会大大降低。因此,后来采用30%变形量形成50%马氏体时的 M_{d30} 温度(马氏体相变稳定的温度)来估计奥氏体的机械稳定性。KANG等^[99]建议对Ni当量进行修改并将其作为预测氢脆指数的指标,同时研究了在高压氢气环境下Ni当量与氢脆指数之间的关系。此外,IZAWA等^[100]研究了奥氏体不锈钢的 M_{d30} 温度与材料抗氢脆性之间的关系,以 M_{d30} 温度代替传统Ni当量,促进马氏体形成之外的控制参数的识别。

氢环境下金属材料疲劳性能下降和疲劳扩展速率的加快使其设计疲劳强度远低于在空气时的疲劳强度,实际疲劳寿命也远低于设计疲劳寿命。因此,合理预测氢环境下的金属材料疲劳寿命是一个重要课题。通过疲劳性能测试所得的断裂参数可作为氢环境下疲劳寿命预测的输入,进而通过相关寿命预测方法求得预测值。下面将介绍前人在该领域的一些研究。

3.2 氢脆作用下金属材料的疲劳寿命预测

由于氢能源是近几十年刚刚兴起的绿色能源,有关氢环境下金属材料疲劳寿命预测的理论大多处于初级阶段,相关研究多数也是通过具体试验来分析氢气对于材料疲劳寿命的影响,如表3所示。

氢环境下金属材料疲劳寿命主要取决于其抗氢脆性和裂纹扩展行为。根据前文内容,不同的材料有着不同的氢脆敏感性,且这个敏感性最终体现在疲劳裂纹的扩展上。一般来讲,氢脆会加快疲劳裂纹扩展的速率,缩短材料的疲劳寿命。因此,在裂纹扩展阶段,常见的基于断裂力学的疲劳寿命预测方法是氢环境下疲劳寿命的主要研究方法。

3.2.1 基于断裂力学的疲劳寿命预测方法

断裂力学在疲劳裂纹扩展阶段有着广泛的应用,重点研究材料在循环载荷作用下的裂纹尖端应力场的变化。断裂力学可以通过计算应力强度因子预测疲劳裂纹扩展的速率,同时可以综合考虑材料的物理性质和力学性能,这使得其在预测裂纹扩展行为时有着很高的准确性,故在疲劳裂

表 3 氢环境下疲劳寿命预测研究的总结

Table 3 Research on fatigue life prediction in hydrogen environments

研究文献编号	研究对象	研究方法	主要发现
[86]	BCC 钢	统一力学理论	研究了不同浓度预充氢情况下的超声振动疲劳寿命
[83]	X70 管线钢	疲劳寿命评估分析程序	在 1.0% H ₂ 混合气体条件下,结构管道的预计疲劳寿命比在空气条件下的短得多
[101]	304 不锈钢	疲劳试验	在高应力幅下,氢环境导致的疲劳寿命下降明显
[85]	Cr-Mo 钢	疲劳试验	氢压循环载荷下共面裂纹容器的疲劳寿命比液压循环下的降低 90.0%
[102]	不同含镍量的不锈钢	疲劳试验	镍含量高的不锈钢受氢的影响小,其疲劳寿命变化不大
[103]	奥氏体不锈钢	疲劳试验	预充氢样品的疲劳寿命和未充氢的疲劳寿命差不多
[104]	高强度钢	线弹性断裂力学	疲劳寿命取决于夹杂物的尺寸和氢浓度,且随着它们的增加而降低

纹扩展寿命预测中被广泛应用。Paris 公式就是其中最为经典的方法,其公式如下所示:

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

式中: da/dN 为裂纹扩展速率; C 、 m 为 Paris 常数; ΔK 为应力强度因子范围。上述方程是初始裂纹长度和最终裂纹长度之间的积分。初始裂纹长度可近似估计为

$$a_i = (\Delta K_{th}/2S_e)^2/\pi \quad (5)$$

式中: a_i 为初始裂纹的长度; S_e 为材料的持久强度; ΔK_{th} 为长裂纹应力强度因子范围的阈值。

后来陆续有学者对 Paris 公式进行了修改,用以评估裂纹扩展阶段的疲劳寿命。为研究载荷比对疲劳裂纹规律的影响, WALKER^[105] 在 Paris 公式中输入了应力比 $R = S_{min}/S_{max}$, 公式(4)变为

$$da/dN = C[(1-R)^m K_{max}]^n = C[(1-R)^{m-1} \Delta K]^n \quad (6)$$

式中: n 、 m 、 C 均为 Paris 常数; K_{max} 表示最大应力强度因子。

后来 ELBER^[106] 提出了裂纹闭合概念, 几十年来吸引了大多学者的研究。该相关研究通常用有效应力强度因子范围 ΔK_{eff} 表示疲劳裂纹扩展规律, 如式(7)所示:

$$da/dN = C(\Delta K_{eff})^n = C(U \cdot \Delta K)^n \quad (7)$$

其中,

$$U = \frac{S_{max} - S_{op}}{S_{max} - S_{min}} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} = \frac{1 - K_{op}/K_{max}}{1 - R}$$

式中: S_{op} 为裂纹张开时的名义应力; K_{op} 为疲劳裂纹张开时的应力强度因子。

公式(4)也是线弹性断裂力学中常用到的疲

劳裂纹扩展速率计算公式^[107]。线弹性断裂力学是较早用于预测疲劳裂纹扩展长度的方法, 一些学者也将其运用于疲劳寿命的预测中。BOUTET 等^[108] 考虑了三类疲劳裂纹模型中所需数据的不确定性, 基于线弹性断裂力学建立了疲劳寿命评估模型, 并通过裂纹扩展测试验证了所建模型的准确性。MARKHAM MATTHEW 等^[109] 结合在疲劳裂纹扩展阶段广泛应用的线弹性断裂力学方法和多轴疲劳中的临界平面法, 提出了一种用于混合式小裂纹的疲劳寿命预测方法。

线弹性断裂力学的理论还可用于描述断裂特性对疲劳加载结构失效概率的影响。YAZDANI 等^[110] 研究了概率线弹性断裂力学在公路桥梁盖板检查间隔预测中的应用。MALJAARS 等^[111] 使用线弹性断裂力学理论开发了概率模型, 相对于其他基于线弹性断裂力学的疲劳评估研究, 他们的研究解释了由一个较大应力循环导致的疲劳断裂可在任意时刻发生, 故金属结构承受疲劳载荷时的失效概率可以结合所有时间间隔上的失效概率来计算。

除了线弹性断裂力学, 弹塑性断裂力学也是金属材料疲劳裂纹扩展阶段常见的一种疲劳寿命预测方法。该方法多用于物理上小裂纹的扩展, 其表达式如式(8)所示^[112]:

$$da/dN = B(\Delta \varepsilon_p \sqrt{\pi a})^m - \Xi \quad (8)$$

式中: B 、 m 为材料常数; $\Delta \varepsilon_p$ 为应变范围; Ξ 为裂纹状态的阈值。

在线弹性断裂力学中, 应力强度因子被定义为与施加应力、样本几何形状和裂纹长度相关的

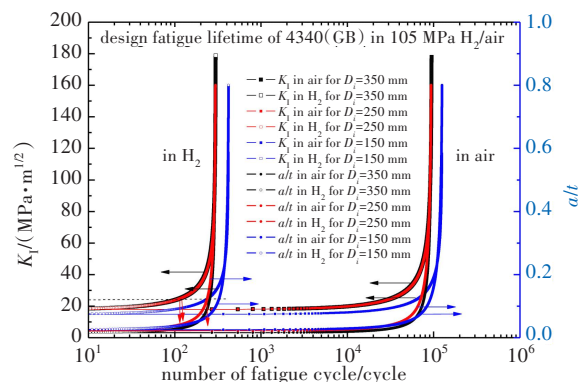
函数,但是当裂纹尖端塑性区的尺寸与裂纹长度之比变大时,线弹性断裂力学就会失效。弹塑性断裂力学可用于描述裂纹尖端附近材料的非线性变形行为,故可用于微动疲劳裂纹等小裂纹的疲劳寿命预测中。NORAPHAIPHAKSA等^[113]先通过有限元分析法评估了不锈钢材料接触区域附近的应力应变分布,以及微动疲劳裂纹萌生位置和路径,然后通过弹塑性断裂力学方法预测了微动疲劳寿命,相比线弹性断裂力学的方法,其结果与试验结果更加吻合。BAHLOUL等^[114]在弹塑性断裂力学的框架内提出了一种用于裂纹扩展分析的机械驱动力参数,并用于评估7075-T6铝合金在各种载荷条件下的残余疲劳裂纹扩展寿命。

总而言之,断裂力学这类裂纹扩展阶段常见的疲劳寿命预测方法主要是基于理论或经验公式预测金属材料在疲劳加载下的寿命,是通过判断材料是否满足某些疲劳破坏准则的定性分析,是唯象的理论,通常需要大量疲劳试验数据。除此之外,基于微观机理的疲劳寿命预测方法在金属材料中也有所应用^[115-116],该方法需要对材料的力学性能、应力应变循环历程和数值模拟开展研究,以获取准确的参数和模型,进而提高疲劳寿命预测的准确性和可靠性。但是,无论是唯象的理论还是基于机理的方法,它们都存在模型建立困难,求解效率不高等问题,这也是在疲劳寿命预测方法领域亟待解决的问题。

3.2.2 断裂力学方法在氢环境下的应用

基于断裂力学的方法为后续疲劳寿命预测方法的发展奠定了基础,且在输氢管道、核系统、海上结构等领域中的氢致开裂问题上都有应用。不同尺寸的结构在氢环境下的疲劳寿命会有所不同,ZHOU等^[117]基于断裂力学的方法,分别分析了在氢气和空气两种环境中的不同内径圆柱模型的疲劳寿命(图21),指出在空气环境下模型的设计疲劳寿命随内径的增加略有增加,而在氢环境下的寿命则比在空气环境下的短得多。同时,他们还基于断裂力学的方法讨论了极限拉伸强度、压力和氢脆敏感性等对疲劳寿命的影响,并指出氢气对材料疲劳寿命的影响随着压力和极限拉伸强度的降低而降低^[118]。除了基础断裂力学的方法,基于线性弹性断裂力学的方法也已应用在氢环境

下的金属疲劳寿命预测中。RAJABIPOUR等^[119]通过裂纹前沿氢扩散所降低的材料断裂韧性来估算氢脆辅助下的疲劳裂纹扩展速率,再使用基于线性弹性断裂力学的方法估计受腐蚀点蚀和氢致疲劳开裂影响的管道的使用寿命。



注:GB表示国标; K_I 表示所研究I型容器的应力强度因子; a/t 表示裂纹深度和壁厚之比; D_i 为压力容器内径。

图21 不同内径的4340(GB)压力容器在105 MPa下的设计寿命^[117]

Fig. 21 Design life of 4340 (GB) pressure vessels with different inner diameters at 105 MPa^[117]

NGUYEN等^[83]采用断裂力学的方法,计算了X70输氢管道在内表面存在缺陷时的剩余疲劳寿命。在根据设计寿命计算时,假设裂纹扩展从第一个压力循环开始,当裂纹扩展率处于中间扩展速率状态时,每个周期疲劳裂纹扩展量和应力强度因子范围之间的关系可由式(4)描述,其中, ΔK 可写为

$$\Delta K = F \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

式中: $\Delta \sigma$ 和 F 分别为裂纹模型的应力范围和边界修正系数。应力强度因子范围 ΔK 定义为裂纹尖端处的最大应力强度因子与最小应力强度因子的差。因此,式(4)可以写为

$$da/dN = C \left(F \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \right)^m \quad (10)$$

$$\int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{a^{m/2}} = C F^m (\Delta \sigma)^m \pi^{m/2} \int_0^{N_f} dN \quad (11)$$

$$N_f = \frac{2}{(m-2)CY^m(\Delta \sigma)^m \pi^{m/2}} \left[\frac{1}{(a_0)^{(m-2)/2}} - \frac{1}{(a_f)^{(m-2)/2}} \right] \quad (12)$$

式中: a_0 为初始裂纹深度; a_f 为最终裂纹深度; N_f 为疲劳寿命; t 为壁厚; Y 为材料常数。

NGUYEN 等建议所取的初始裂纹深度 a_0 取决于壁厚 t , 即当 $t \leq 16.0$ mm 时, $a_0 = 0.5$ mm; 当 $16.0 < t \leq 51.0$ mm 时, $a_0 = 1.1$ mm; 当 $t > 51.0$ mm 时, $a_0 = 1.6$ mm。初始裂纹纵横比(深度/长度)假设为 1/3, 且在裂纹扩展期间应保持恒定。此外, 裂纹纵横比在裂纹扩展过程中可能连续变化, 文献[83]指出, 在后续研究中可以分析长宽比值的影响, 以确保所得结果的可靠性。

NAGAISHI 等^[101]测定了环向缺口型 304 不锈钢分别在空气和氢气环境下的疲劳裂纹扩展速率, 并通过断裂力学方法求得疲劳寿命, 试验结果表明, 氢环境下金属材料疲劳寿命受应力幅度的影响, 在高应力幅下, 氢环境下不锈钢疲劳寿命较空气环境下的显著减小, 但在低应力幅下, 304 不锈钢在氢气和空气下的疲劳寿命几乎没有差异。像断裂力学这类基于牛顿力学的疲劳寿命预测模型, 都是利用测试获得的应力、应变或耗散滞后应变能等变量的数据, 来建立经验性的退化函数。近些年随着统一力学的发展, 牛顿的普遍运动定律和热力学第二定律在最开始的层面上得到了统一^[86]。LEE 等^[86]通过统一力学的方法, 推导了预氢脆 BCC 钢在高周疲劳下的热力学基本方程, 提出了新的模型并采用该模型对 BCC 钢进行疲劳寿命评估数值模拟。统一力学的方法能够综合考虑载荷类型, 并且有处理多尺度效应和非线性行为的能力, 在金属材料疲劳寿命预测和氢脆建模中有较好的应用前景。

从上述前人的研究来看, 现有的氢环境下金属材料疲劳寿命预测方法主要还是一些传统方法, 以试验测试居多, 只有少数研究从微观力学角

度出发, 结合宏观损伤或其他力学理论进行综合探讨。材料的疲劳性能是指材料在疲劳加载下的整体表现和特征, 包括材料的疲劳寿命、疲劳强度、疲劳断裂韧性等方面的内容。现有的氢环境下金属材料疲劳的研究内容大多聚焦在探讨氢脆对材料疲劳强度和断裂韧性的影响方面, 有关疲劳寿命预测的内容还有很大的发展空间。相关机器学习方法已经在一些疲劳问题中取得较大进展, 这或许会成为氢环境下金属疲劳寿命预测的新方向。

3.3 机器学习法在氢环境下的应用

机器学习法是一种改进的数据分析方法, 可以加速或简化材料设计和开发, 降低开发成本和风险、缩短开发时间, 还能在复杂的数据集中获得深刻的见解。最近, 机器学习法已经成功应用于金属材料疲劳特性的预测中, 对氢环境下的金属材料也有所应用。不同长度的疲劳裂纹扩展取决于多个损伤控制参数, 而机器学习的疲劳损伤建模方法能够同时考虑大量损伤参数, 故其在疲劳裂纹扩展分析中受到了众多学者的关注。MORTAZAVI 等^[120]建立了一种径向基函数的神经网络模型来预测疲劳裂纹扩展中短裂纹和长裂纹的状态, 其结构框架如图 22 所示。在经过试验数据验证后发现, 所提模型具有良好的差值能力, 可准确描述长短裂纹扩展的非线性。BHOWMIK 等^[121]结合极限梯度提升算法和代理模型, 通过计算不同裂纹长度和深度的应力强度因子, 进而估计疲劳损伤和寿命, 该模型相比基于物理或模拟的模型更高效。

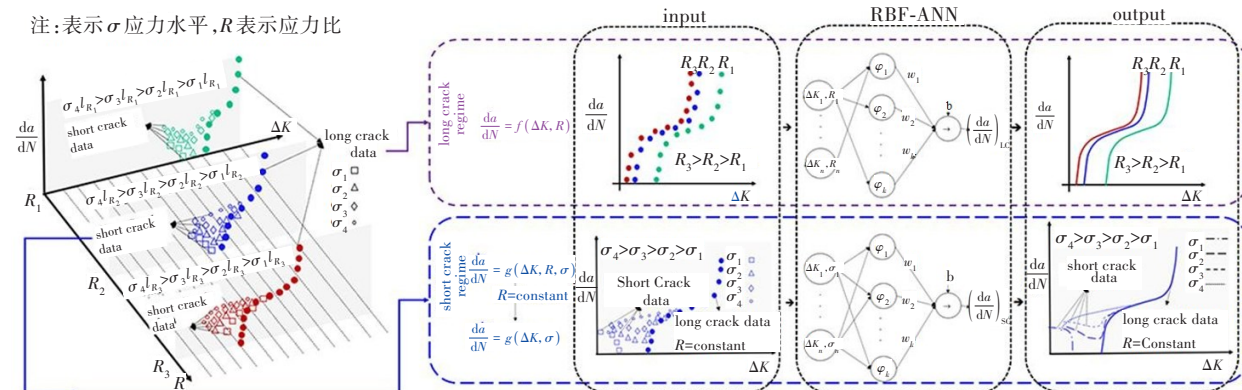


图 22 基于径向基神经网络的长短裂纹预测框架^[120]

Fig. 22 Long and short crack prediction framework based on radial basis neural network^[120]

从前文氢脆对材料疲劳性能的影响可知,材料成分及氢脆敏感性对材料疲劳寿命有着重要影响,准确描述其间的关系是众多学者的研究目标。NARAYANA等^[122]设计了一种神经网络模型来拟合 18Cr-12Ni-Mo 奥氏体不锈钢成分、温度与其力学性能之间的复杂关系。KIM等^[123]通过机器学习法预测合金元素,以及分析测试条件对奥氏体钢氢指数的影响,其研究工作流程如图 23 所示。相关分析结果表明,Ni 和 Mo 是影响奥氏体钢氢脆指数的主要元素,另外评估了 4 种代表性机器学习模型在处理不同顶级特征数量函数的性能,并指出在各模型中随机森林模型的准确率最高。

目前,拉伸试验和疲劳试验是研究氢环境下金属材料疲劳寿命的主要方法,但也有少数学者将神经网络等机器学习法应用于与氢相关的疲劳寿命预测中。GUO等^[124]根据氢脆效应、应力因素和疲劳寿命之间的高度非线性关系,建立了基于神经网络的 GS80A 水下高强度钢疲劳寿命预测模型,经验证该模型的预测结果合理,且与灰色理论模型的预测结果一致。ZHAO等^[125]结合遗传算法和反向传播神经网络,实现了快速评估金属氢化物反应堆的蠕变疲劳寿命。



图 23 用于预测奥氏体钢氢环境脆化的机器学习方法的工作流程^[123]

Fig. 23 Workflow of machine learning-based methods for predicting hydrogen embrittlement of austenitic steel^[123]

机器学习法是一种可以简化传统疲劳寿命预测和疲劳分析的新方法,能够从实际试验的复杂数据集中获取额外的信息。该方法具有降低开发成本和风险,以及缩短开发时间等优点,但也存在过拟合、解释性差和泛化能力不强等缺点。这也是制约其在疲劳寿命预测领域发展的因素,未来可从该方向寻求机器学习法在疲劳寿命预测方面的突破。此外,基于机器学习的氢环境下疲劳寿命预测较少,未来还有很大的应用空间。

4 总结

本文调查了氢环境下金属材料疲劳寿命预测的研究主题,对氢脆作用下金属材料疲劳裂纹扩展行为的研究进行了总结,分析了各参数对疲劳裂纹扩展速率的影响。在高应力比、高氢气压力、低加载频率和低温等情况下,氢脆的影响加剧,疲劳裂纹扩展速率上升。但从前人的试验研究来看,这些参数对疲劳裂纹扩展速率的影响存在阈值,且受其他参数的共同作用。基于断裂力学的方法在金属疲劳寿命预测中使用较为广泛,特别是在裂纹扩展寿命方面的应用,也是在氢环境下使用较多的方法。在通过试验获得疲劳裂纹扩展速率后,即可通过断裂力学及其相关方法进行寿命预测,但这些方法存在过于依赖经验公式、模型建立困难和求解效率不高等问题。总的来说,有关氢环境下金属材料疲劳寿命预测的研究虽然取得了一定的进展,但是在一些方面仍需要开展更深入的研究:

1) 在氢环境下,部分学者已经通过试验探讨了不同参数对各类金属材料疲劳裂纹扩展速率的影响,但结果存在差异,如部分学者的研究表明高应力比会加快疲劳裂纹扩展的速率,而部分学者则通过试验发现应力比对疲劳裂纹扩展没有太大影响。氢环境下金属材料疲劳裂纹扩展行为通常受多个参数的共同影响,这可能也是已有试验结果存在差异的原因。此外,不同参数对氢脆作用下材料疲劳裂纹扩展速率的影响也存在上限。如何量化各个参数及其组合对疲劳裂纹扩展速率的影响是后续研究需要解决的问题。

2) 基于断裂力学的疲劳寿命预测方法可以通过计算材料的应力、裂纹长度和裂纹扩展速率等参数来预测疲劳寿命,且在氢环境下被广泛使用。但是,在此类疲劳寿命预测的过程中存在很多不确定性。基于断裂力学的方法主要考虑材料在单一应力状态下的裂纹扩展行为,但在实际中,金属材料的裂纹扩展还受应力比、压力、频率和温度等多个参数的影响。此外,试验数据的误差、模型参数估计的误差等都会影响预测结果的精度。未来的研究可多关注不确定性分析和建模,进而提高

疲劳寿命预测的精度。

3) 机器学习模型能够利用高维和异构数据,从数据中学习并自动、持续地更新自身,有效地补充对该过程的物理理解。常见的如断裂力学的方 法虽然能够合理捕捉疲劳响应和裂纹扩展行为,但由于难以纳入像加工硬化等特殊因素的影响,这些方法存在一定的局限性。机器学习因不需要输入和输出之间有任何显式表达,故该方法在金属疲劳寿命预测方面有巨大优势,并且已经被广泛用于各类疲劳问题中。但是,氢环境下金属材料的疲劳寿命预测却鲜有运用机器学习法,若能将前人的试验数据进行总结并通过数据增强的方法进行扩充,再运用机器学习模型进行寿命预测,将有效提高求解效率和预测精度。

[参考文献]

- [1] LIAO D, ZHU S P, KESHTEGAR B, et al. Probabilistic framework for fatigue life assessment of notched components under size effects[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 181: 105685. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105685.
- [2] WANG H, CHEN X, YANG S, et al. A dehydration kinetic model of calcium silicate hydrates at high temperature[J]. *Structural Concrete*, 2023, 24(2): 1997-2008. DOI: 10.1002/suco.202200038.
- [3] LIU X, LI T R, ZHOU Z H, et al. An efficient multi-objective reliability-based design optimization method for structure based on probability and interval hybrid model[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, 392: 114682. DOI: 10.1016/j.cma.2022.114682.
- [4] LIU X, GONG M, ZHOU Z H, et al. An improved first order approximate reliability analysis method for uncertain structures based on evidence theory[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2023, 51(7): 4137-4154. DOI: 10.1080/15397734.2021.1956324.
- [5] ZHU S P, LEI Q, HUANG H Z, et al. Mean stress effect correction in strain energy-based fatigue life prediction of metals[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2017, 26(8): 1219-1241. DOI: 10.1177/1056789516651920.
- [6] SCHIJVE J. Significance of fatigue cracks in micro-range and macro-range[M]. Pennsylvania: ASTM International, 1967, 415-459.
- [7] SHANG D G. A new approach to the determination of fatigue crack initiation size[J]. *International Journal of Fatigue*, 1998, 20(9): 683-687. DOI: 10.1016/s0142-1123(98)00035-8.
- [8] MUGHRABI H. Microstructural mechanisms of cyclic deformation, fatigue crack initiation and early crack growth[J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2015, 373(2038): 20140132. DOI: 10.1098/rsta.2014.0132.
- [9] LI H F, WEI J L, LI S H, et al. Fatigue life prediction of high-speed train bearings based on the generalized linear cumulative damage theory[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2023, 46(6): 2112-2120. DOI: 10.1111/ffe.13984.
- [10] GAN L, WU H, ZHONG Z. Multiaxial fatigue life prediction based on a simplified energy-based model[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 144: 106036. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106036.
- [11] WANG H J, LI B, XUAN F Z. Fatigue-life prediction of additively manufactured metals by continuous damage mechanics (CDM)-informed machine learning with sensitive features[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 164: 107147. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107147.
- [12] CHAN K S. Roles of microstructure in fatigue crack initiation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(9): 1428-1447. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2009.10.005.
- [13] MURAKAMI Y, TAKAGI T, WADA K, et al. Essential structure of S-N curve: prediction of fatigue life and fatigue limit of defective materials and nature of scatter[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 146: 106138. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106138.
- [14] SADANANDA K, NANI BABU M, VASUDEVAN A K. A review of fatigue crack growth resistance in the short crack growth regime[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 754: 674-701. DOI: 10.1016/j.msea.2019.03.102.
- [15] 陈标,何建军,程庆阳,等. 风机叶片根部连接螺栓的弯曲疲劳试验研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(3): 105-110. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.03.013.
- CHEN Biao, HE Jianjun, CHENG Qingyang, et al. Experimental research on bending fatigue of connecting bolts at blade root of wind turbine[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18(3): 105-110. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.03.013.
- [16] PATRA S, CHANDRA K P, LI W, et al. Performance study of cooling plates with single and double outlets for lithium-ion battery thermal management system based on topology optimization[J]. *International Journal of Green Energy*, 2023: 1-19. DOI: 10.1080/15435075.

- 2023.2253886.
- [17] YANG S Y, HE Z Y, CHAI J B, et al. A novel hybrid adaptive framework for support vector machine-based reliability analysis: a comparative study [J]. Structures, 2023, 58: 105665. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105665.
- [18] ZHU S P, YU Z Y, CORREIA J, et al. Evaluation and comparison of critical plane criteria for multiaxial fatigue analysis of ductile and brittle materials [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 112: 279-288. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.03.028.
- [19] HU Y N, WU S C, WITHERS P J, et al. The effect of manufacturing defects on the fatigue life of selective laser melted Ti-6Al-4V structures [J]. Materials & Design, 2020, 192: 108708. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108708.
- [20] WANG Z L, WEN Y, WANG Z H, et al. Resilience-based design optimization of engineering systems under degradation and different maintenance strategy [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2023, 66(10): 219. DOI: 10.1007/s00158-023-03671-0.
- [21] ZHANG D Q, ZHANG N, YE N, et al. Hybrid learning algorithm of radial basis function networks for reliability analysis [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2021, 70(3): 887-900. DOI: 10.1109/TR.2020.3001232.
- [22] ZHU S P, NIU X P, KESHTEGAR B, et al. Machine learning-based probabilistic fatigue assessment of turbine bladed disks under multisource uncertainties [J]. International Journal of Structural Integrity, 2023, 14(6): 1000-1024. DOI: 10.1108/ijsi-06-2023-0048.
- [23] GAVRILJUK V G, SHYVANIUK V M, TEUS S M. Hydrogen in engineering metallic materials [M]. Switzerland: Springer Chem, 2022.
- [24] GAO T R, JING J P, CHEN C M, et al. A practical nonlinear damage accumulation method to predict the life and crack propagation of blade subjected to multilevel cyclic fatigue loads [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2020, 55(3/4): 86-98. DOI: 10.1177/0309324719900598.
- [25] MA H, ZHU S P, GUO Y Q, et al. Residual useful life prediction of the vehicle isolator based on Bayesian inference [J]. Structures, 2023, 58: 105518. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105518.
- [26] ZHU S P, HUANG H Z, PENG W W, et al. Probabilistic physics of failure-based framework for fatigue life prediction of aircraft gas turbine discs under uncertainty [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 146: 1-12. DOI: 10.1016/j.ress.2015.10.002.
- [27] LIU R J, DENG Y, LI Z. The maximum entropy negation of basic probability assignment [J]. Soft Computing, 2023, 27(11): 7011-7021. DOI: 10.1007/s00500-023-08038-7.
- [28] GUO P, LIU Q, YU S, et al. A transformer with layer-cross decoding for remaining useful life prediction [J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(10): 11558-11584. DOI: 10.1007/s11227-023-05126-1.
- [29] SU X Y, GUAN X F, XU Z H, et al. A new decision making method based on Z-decision-making trial and evaluation laboratory and ordered weighted average and its application in renewable energy source investment [J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 978767. DOI: 10.3389/fenrg.2022.978767.
- [30] HE J C, ZHU S P, GAO J W, et al. Microstructural size effect on the notch fatigue behavior of a Ni-based superalloy using crystal plasticity modelling approach [J]. International Journal of Plasticity, 2024, 172: 103857. DOI: 10.1016/j.ijplas.2023.103857.
- [31] 熊中义, 任延杰, 甘浪, 等. MoS₂/Ti₃C₂T_x复合材料的制备及其析氢催化性能研究 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(3): 40-49. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.004.
- XIONG Zhongyi, REN Yanjie, GAN Lang, et al. Study on preparation of MoS₂/Ti₃C₂T_x composite material and its hydrogen catalytic properties [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(3): 40-49. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.004.
- [32] ZHANG D Q, SHEN S S, JIANG C, et al. An advanced mixed-degree cubature formula for reliability analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, 400: 115521. DOI: 10.1016/j.cma.2022.115521.
- [33] MARTIN M L, CONNOLLY M J, DELRIO F W, et al. Hydrogen embrittlement in ferritic steels [J]. Applied Physics Reviews, 2020, 7(4): 041301. DOI: 10.1063/5.0012851.
- [34] MASOUDI NEJAD R, SINA N M, MA W C, et al. Artificial neural network based fatigue life assessment of riveted joints in AA2024 aluminum alloy plates and optimization of riveted joints parameters [J]. International Journal of Fatigue, 2024, 178: 107997. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107997.
- [35] MENG D B, YANG S Y, DE JESUS A M P, et al. A novel hybrid adaptive Kriging and water cycle algorithm for reliability-based design and optimization strategy: application in offshore wind turbine monopile [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2023, 412: 116083. DOI: 10.1016/j.cma.2023.116083.
- [36] 李凤侠, 张俊, 赵呈刚. 基于文献计量学的氢脆研究

- 的演进、热点和趋势分析[J]. 材料导报, 2019, 33(增刊2): 488-496.
- LI Fengxia, ZHANG Jun, ZHAO Chenggang. Research progress, hotspots and trends of hydrogen embrittlement based on bibliometrics [J]. Materials Reports, 2019, 33(sup 2): 488-496.
- [37] 肖娜, 惠卫军, 张永健, 等. 真空渗碳处理齿轮钢的氢脆敏感性[J]. 金属学报, 2021, 57(8): 977-988. DOI: 10.11900/0412.1961.2020.00363.
- XIAO Na, HUI Weijun, ZHANG Yongjian, et al. Hydrogen embrittlement behavior of a vacuum-carburized gear steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(8): 977-988. DOI: 10.11900/0412.1961.2020.00363.
- [38] 李金许, 王伟, 周耀, 等. 汽车用先进高强钢的氢脆研究进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 444-458. DOI: 10.11900/0412.1961.2019.00427.
- LI Jinxu, WANG Wei, ZHOU Yao, et al. A review of research status of hydrogen embrittlement for automotive advanced high-strength steels [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 444-458. DOI: 10.11900/0412.1961.2019.00427.
- [39] LI K D, TANG B, ZHANG M Q, et al. Hydrogen diffusion behavior within microstructures near crack tip: a crystal plasticity study [J]. Mechanics of Materials, 2024, 195: 105032. DOI: 10.1016/j.mechmat.2024.105032.
- [40] ZHANG W, BAO Z M, JIANG S, et al. An artificial neural network-based algorithm for evaluation of fatigue crack propagation considering nonlinear damage accumulation[J]. Materials, 2016, 9(6): 483. DOI: 10.3390/ma9060483.
- [41] PESTANA M S, KALOMBO R B, FREIRE R C S J, et al. Use of artificial neural network to assess the effect of mean stress on fatigue of overhead conductors [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2018, 41(12): 2577-2586. DOI: 10.1111/ffe.12858.
- [42] GAN L, WU H, ZHONG Z. Fatigue life prediction considering mean stress effect based on random forests and kernel extreme learning machine[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 158: 106761. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106761.
- [43] BARBOSA J F, CORREIA J A F O, JÚNIOR R C S F, et al. Fatigue life prediction of metallic materials considering mean stress effects by means of an artificial neural network [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 135: 105527. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105527.
- [44] GLASSER I, PANCOTTI N, AUGUST M, et al. Neural-network quantum states, string-bond states, and chiral topological states [J]. Physical Review X, 2018, 8: 011006. DOI: 10.1103/physrevx.8.011006.
- [45] CHENG G, WANG X L, CHEN K Y, et al. Probing the effects of hydrogen on the materials used for large-scale transport of hydrogen through multi-scale simulations [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 182: 113353. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113353.
- [46] MALEKI E, UNAL O, SEYEDI SAHEBARI S M, et al. Application of deep neural network to predict the high-cycle fatigue life of AISI 1045 steel coated by industrial coatings [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(2): 128. DOI: 10.3390/jmse10020128.
- [47] ZHANG X C, GONG J G, XUAN F Z. A deep learning based life prediction method for components under creep, fatigue and creep-fatigue conditions [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 148: 106236. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106236.
- [48] JIA Y F, FU R, LING C, et al. Fatigue life prediction based on a deep learning method for Ti-6Al-4V fabricated by laser powder bed fusion up to very-high-cycle fatigue regime [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 172: 107645. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107645.
- [49] YANG J Y, KANG G Z, KAN Q H. A novel deep learning approach of multiaxial fatigue life-prediction with a self-attention mechanism characterizing the effects of loading history and varying temperature [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 162: 106851. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106851.
- [50] DUAN H Y, HE H, YUE S Q, et al. Analysis of high-cycle fatigue life prediction of 304 stainless steel based on deep learning [J]. JOM, 2023, 75(11): 4586-4595. DOI: 10.1007/s11837-023-06042-8.
- [51] ZHOU R Z, XING Z G, WANG H D, et al. Prediction of contact fatigue life of AT40 ceramic coating based on neural network [J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2020, 67(1): 83-100. DOI: 10.1108/acmm-10-2019-2190.
- [52] HAN S T, WANG C, KHATIR S, et al. A deep neural network approach combined with Findley parameter to predict fretting fatigue crack initiation lifetime [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 176: 107891. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107891.
- [53] VENEZUELA J, ZHOU Q J, LIU Q L, et al. Hydrogen trapping in some automotive martensitic advanced high-strength steels [J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(1): 1700468. DOI: 10.1002/adem.201700468.
- [54] ATRENS A, LIU Q L, ZHOU Q, et al. Evaluation of

- automobile service performance using laboratory testing [J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 34: 1893-1909. DOI: 10.1080/02670836.2018.1495903.
- [55] DE GUZMAN J J. The influence of hydrogen on MS980, MS1180, MS1300 and MS1500 martensitic advanced high strength steels used for automotive applications [D]. Brisbane: The University of Queensland, 2017. DOI: 10.14264/uql.2017.799.
- [56] PRADHAN P K, ROBI P S, ROY S K. Micro void coalescence of ductile fracture in mild steel during tensile straining [J]. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 2012, 6(19): 51-60.
- [57] 安腾. 氢气环境 X80 管线钢疲劳损伤行为研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. DOI: 10.27643/d.cnki.gsybu.2018.000019.
- AN Teng. Study on the fatigue damage behavior of X80 pipeline steel in hydrogen environment [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018. DOI: 10.27643/d.cnki.gsybu.2018.000019.
- [58] RAJA V S, SHOJI T. Stress corrosion cracking: theory and practice [M]. London: Elsevier, 2011.
- [59] 陈兴阳, 马琳琳, 赵峰霆, 等. 氢气环境下 2205 双相不锈钢的氢致开裂研究 [J]. *材料保护*, 2023, 56 (3): 35-40. DOI: 10.16577/j.issn.1001-1560.2023.0057.
- CHEN Xingyang, MA Linlin, ZHAO Fengting, et al. Hydrogen-induced cracking of 2205 duplex stainless steel in hydrogen environment [J]. *Materials Protection*, 2023, 56 (3): 35-40. DOI: 10.16577/j.issn.1001-1560.2023.0057.
- [60] 白光乾, 王秋岩, 邓海全, 等. 氢环境下 X52 管线钢的抗氢性能 [J]. *材料导报*, 2020, 34(22): 22130-22135. DOI: 10.11896/cldb.19070188.
- BAI Guangqian, WANG Qiuyan, DENG Haiquan, et al. Hydrogen resistance of X52 pipeline steel under hydrogen environment [J]. *Materials Reports*, 2020, 34 (22): 22130-22135. DOI: 10.11896/cldb.19070188.
- [61] WEI R, SIMMONS G. Environment enhanced fatigue crack growth in high-strength steels [R]. Washington: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 1973.
- [62] DEY S, SIVAPRASAD S, DAS N, et al. Influence of hydrogen on fatigue crack growth in 7075 aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 32(2): 782-792. DOI: 10.1007/s11665-022-07119-2.
- [63] HOLBROOK J, COLLINGS E, CIALONE H, et al. Hydrogen degradation of pipeline steels: final report [R]. Ohio: Battelle Columbus Labs, 1986.
- [64] DADFARNIA M, SOFRONIS P, BROUWER J, et al. Assessment of resistance to fatigue crack growth of natural gas line pipe steels carrying gas mixed with hydrogen [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(21): 10808-10822. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.216.
- [65] ZHANG R M, MA K, PENG W Z, et al. Effects of hydrogen pressure on hydrogen-assisted fatigue crack growth of Cr-Mo steel [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, 129: 104202. DOI: 10.1016/j.tafmec.2023.104202.
- [66] 苟金鑫, 聂如煜, 邢潇, 等. 临氢 X80 管线钢量化氢压作用的疲劳裂纹扩展模型 [J]. *油气储运*, 2023, 42(7): 754-762.
- GOU Jinxin, NIE Ruyu, XING Xiao, et al. Fatigue crack growth model of X80 pipeline steel in hydrogen environment for quantification of hydrogen pressure effect [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(7): 754-762.
- [67] SLIFKA A J, DREXLER E S, NANNINGA N E, et al. Fatigue crack growth of two pipeline steels in a pressurized hydrogen environment [J]. *Corrosion Science*, 2014, 78: 313-321. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.10.014.
- [68] 张一苇, 顾超华, 李炎华, 等. 煤制天然气中氢对 X80 钢螺旋焊管力学性能的影响 [J]. *压力容器*, 2020, 37 (3): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4837.2020.03.001.
- ZHANG Yiwei, GU Chaohua, LI Yanhua, et al. Effects of hydrogen in synthetic natural gas on mechanical properties of X80 steel spiral welded pipe [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2020, 37 (3): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4837.2020.03.001.
- [69] HOLBROOK J, CIALONE H, MAYFIELD M, et al. Effect of hydrogen on low-cycle-fatigue life and subcritical crack growth in pipeline steels [R]. Ohio: Battelle Columbus Labs, 1982.
- [70] GASKELL D R, LAUGHLIN D E. Introduction to the thermodynamics of materials [M]. London: CRC press, 2017.
- [71] 周池楼, 何默涵, 郭晋, 等. 高压氢环境奥氏体不锈钢焊件氢脆研究进展 [J]. *化工进展*, 2022, 41(2): 519-536. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-0575.
- ZHOU Chilou, HE Mohan, GUO Jin, et al. Review on hydrogen embrittlement of austenitic stainless steel weldments in high pressure hydrogen atmosphere [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41 (2): 519-536. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-0575.
- [72] FASSINA P, BRUNELLA 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: 10-25. DOI: 10.1016/j.

- engfracmech.2012.09.023.
- [73] SUN Z, MORICONI C, BENOIT G, et al. Fatigue crack growth under high pressure of gaseous hydrogen in a 15-5PH martensitic stainless steel: influence of pressure and loading frequency [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, 44(3): 1320-1330. DOI: 10.1007/s11661-012-1133-5.
- [74] MATSUNAGA H, TAKAKUWA O, YAMABE J, et al. Hydrogen-enhanced fatigue crack growth in steels and its frequency dependence [J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2017, 375(2098): 20160412. DOI: 10.1098/rsta.2016.0412.
- [75] MATSUOKA S, TANAKA H, HOMMA N, et al. Influence of hydrogen and frequency on fatigue crack growth behavior of Cr-Mo steel [J]. *International Journal of Fracture*, 2011, 168(1): 101-112. DOI: 10.1007/s10704-010-9560-z.
- [76] NISHIKAWA H A, ODA Y, NOGUCHI H. Loading-frequency effects on fatigue crack growth behavior of a low carbon steel JIS S10C in hydrogen gas environment [J]. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2011, 5(2): 104-116. DOI: 10.1299/jmmp.5.104.
- [77] LECKIE H P, LOGINOW A W. Stress corrosion behavior of high strength steels [J]. *Corrosion*, 1968, 24(9): 291-297. DOI: 10.5006/0010-9312-24.9.291.
- [78] YAMABE J, YOSHIKAWA M, MATSUNAGA H, et al. Effects of hydrogen pressure, test frequency and test temperature on fatigue crack growth properties of low-carbon steel in gaseous hydrogen [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2016, 2: 525-532. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.068.
- [79] OGAWA Y, UMAKOSHI K, NAKAMURA M, et al. Hydrogen-assisted, intergranular, fatigue crack-growth in ferritic iron: influences of hydrogen-gas pressure and temperature variation [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 140: 105806. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105806.
- [80] TAKAKUWA O, OGAWA Y, OKAZAKI S, et al. A mechanism behind hydrogen-assisted fatigue crack growth in ferrite-pearlite steel focusing on its behavior in gaseous environment at elevated temperature [J]. *Corrosion Science*, 2020, 168: 108558. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108558.
- [81] KANEZAKI T, NARAZAKI C, MINE Y, et al. Effects of hydrogen on fatigue crack growth behavior of austenitic stainless steels [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(10): 2604-2619. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.02.067.
- [82] MURAKAMI Y, MATSUOKA S. Effect of hydrogen on fatigue crack growth of metals [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, 77(11): 1926-1940. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2010.04.012.
- [83] NGUYEN T T, HEO H M, PARK J, et al. Fracture properties and fatigue life assessment of API X70 pipeline steel under the effect of an environment containing hydrogen [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(4): 1445-1455. DOI: 10.1007/s12206-021-0310-0.
- [84] 魏连峰, 崔光顺, 包陈, 等. 温度及氢化物对 Zr-Sn-Nb 合金焊缝疲劳裂纹扩展行为的影响研究 [J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(3): 527-533. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0267.
- WEI Lianfeng, CUI Guangshun, BAO Chen, et al. Effect of temperature and hydride on fatigue crack growth behaviour of Zr-Sn-Nb alloy welded seam [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, 55(3): 527-533. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0267.
- [85] MA K, ZHENG J Y, HUA Z L, et al. Hydrogen assisted fatigue life of Cr-Mo steel pressure vessel with coplanar cracks based on fatigue crack growth analysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(38): 20132-20141. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.034.
- [86] LEE H W, DJUKIC M B, BASARAN C. Modeling fatigue life and hydrogen embrittlement of bcc steel with unified mechanics theory [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(54): 20773-20803. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.02.110.
- [87] LEE S M, PARK S Y, BONG BAEK U, et al. Evaluation of the residual fatigue lifetime of a semi-elliptical crack of a low-alloy steel pressure vessel under high-pressure gaseous hydrogen [J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 176: 107875. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107875.
- [88] OKONKWO P C, BARHOUMI E M, BEN BELGACEM I, et al. A focused review of the hydrogen storage tank embrittlement mechanism process [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(35): 12935-12948. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.252.
- [89] DWIVEDI S K, VISHWAKARMA M. Hydrogen embrittlement in different materials: a review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(46): 21603-21616. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.201.
- [90] SUN X Y, ZHOU T G, SONG K, et al. An image recognition based multiaxial low-cycle fatigue life prediction method with CNN model [J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 167: 107324. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107324.

- [91] ROY A, MANNA I, CHATTORAJ I. Anomalies in hydrogen enhanced fatigue of a high strength steel [J]. International Journal of Fatigue, 2014, 59: 14-22. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.10.002.
- [92] SONG S W, KIM J N, SEO H J, et al. Effects of carbon content on the tensile and fatigue properties in hydrogen-charged Fe-17Mn-xC steels: the opposing trends [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 724: 469-476. DOI: 10.1016/j.msea.2018.03.117.
- [93] KOYAMA M, AKIYAMA E, LEE Y K, et al. Overview of hydrogen embrittlement in high-Mn steels [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(17): 12706-12723. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.02.214.
- [94] MCGUIRE M F. Stainless steels for design engineers [M]. Ohio: ASM International, 2008.
- [95] RICHARD P G, BRIAN P S. Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies: the problem, its characterisation and effects on particular alloy classes [M]. Sawston: Woodhead Publishing, 2012.
- [96] ZHOU C S, HONG Y J, ZHANG L, et al. Abnormal effect of nitrogen on hydrogen gas embrittlement of austenitic stainless steels at low temperatures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(31): 13777-13785. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.100.
- [97] ZHANG L, WEN M, IMADE M, et al. Effect of nickel equivalent on hydrogen gas embrittlement of austenitic stainless steels based on type 316 at low temperatures [J]. Acta Materialia, 2008, 56(14): 3414-3421. DOI: 10.1016/j.actamat.2008.03.022.
- [98] TAKAKI S, NANBA S, IMAKAWA K, et al. Determination of hydrogen compatibility for solution-treated austenitic stainless steels based on a newly proposed nickel-equivalent equation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(33): 15095-15100. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.193.
- [99] KANG J H, NOH H S, KIM K M, et al. Modified Ni equivalent for evaluating hydrogen susceptibility of Cr-Ni based austenitic stainless steels [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 696: 869-874. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.12.061.
- [100] IZAWA C, WAGNER S, DEUTGES M, et al. Relationship between hydrogen embrittlement and M_{430} temperature: prediction of low-nickel austenitic stainless steel's resistance [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(45): 25064-25075. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.179.
- [101] NAGAISHI N, YOSHIKAWA M, OKAZAKI S, et al. Evaluation of fatigue life and fatigue limit of circumferentially-notched type 304 stainless steel in air and hydrogen gas based on crack-growth property and cyclic stress-strain response [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 215: 164-177. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.05.005.
- [102] MICHLER T, NAUMANN J, SATTTLER E. Influence of high pressure gaseous hydrogen on S-N fatigue in two austenitic stainless steels [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 51: 1-7. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.01.010.
- [103] GIBBS P J, SAN MARCHI C, NIBUR K A, et al. Comparison of internal and external hydrogen on fatigue-life of austenitic stainless steels [C]// Proceedings of ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference. Vancouver: ASME, 2016: PVP2016-63563. DOI: 10.1115/PVP2016-63563.
- [104] YANG Z G, LI S X, LI Y D, et al. Relationship among fatigue life, inclusion size and hydrogen concentration for high-strength steel in the VHCF regime [J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(3): 559-564. DOI: 10.1016/j.msea.2009.10.056.
- [105] WALKER K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum [M]. West Conshohocken: ASTM International 100, 1970: 1-14. DOI: 10.1520/stp32032s.
- [106] ELBER W. The significance of fatigue crack closure [M]. West Conshohocken: ASTM International 100, 1971: 230-242. DOI: 10.1520/stp26680s.
- [107] SKELTON R. Energy criteria and cumulative damage during fatigue crack growth [J]. International Journal of Fatigue, 1998, 20(9): 641-649. DOI: 10.1016/s0142-1123(98)00027-9.
- [108] BOUTET P, HILD F, LEFEBVRE F. Probabilistic Prediction of Fatigue Life of Cracked Parts: linear Elastic Fracture Mechanics based Approach [J]. Procedia Engineering, 2013, 66: 343-353. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.12.089.
- [109] MARKHAM MATTHEW J, ALI F. Multiaxial fatigue life predictions of additively manufactured metals using a hybrid of linear elastic fracture mechanics and a critical plane approach [J]. International Journal of Fatigue, 2024, 178: 107979. DOI: 10.1016/J.IJFATIGUE.2023.107979.
- [110] YAZDANI N, ALBRECHT P. Probabilistic fracture mechanics application to highway bridges [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 37(5): 969-985. DOI: 10.1016/0013-7944(90)90021-8.
- [111] MALJAARS J, STEENBERGEN H M G M, VROUWENVELDER A C W M. Probabilistic model for fatigue crack growth and fracture of welded joints in

- civil engineering structures[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 38: 108-117. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.11.008.
- [112] CUI W C. A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2002, 7(1): 43-56. DOI: 10.1007/s007730200012.
- [113] NORAPHAIPHAKSA N, MANONUKUL A, KANCHANOMAI C, et al. Fretting fatigue life prediction of 316L stainless steel based on elastic-plastic fracture mechanics approach[J]. Tribology International, 2014, 78: 84-93. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.04.029.
- [114] BAHLOUL A, BOURAOUI C, BOUKHAROUBA T. Prediction of fatigue life by crack growth analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9): 4009-4017. DOI: 10.1007/s00170-017-0069-8.
- [115] TANG X S, WEI T T. Microscopic inhomogeneity coupled with macroscopic homogeneity: a localized zone of energy density for fatigue crack growth[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70: 270-277. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.10.003.
- [116] TANG X S. Scatter of fatigue data owing to material microscopic effects[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2014, 57(1): 90-97. DOI: 10.1007/s11433-013-5333-9.
- [117] ZHOU C L, LI Z Y, ZHAO Y Z, et al. Effect of inside diameter on design fatigue life of stationary hydrogen storage vessel based on fracture mechanics[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(25): 13634-13642. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.02.108.
- [118] ZHOU C L, LI Z Y, ZHAO Y Z, et al. Design fatigue life evaluation of high-pressure hydrogen storage vessels based on fracture mechanics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2016, 230(1): 26-35. DOI: 10.1177/0954408914537485.
- [119] RAJABIPOUR A, MELCHERS R E. Service life of corrosion pitted pipes subject to fatigue loading and hydrogen embrittlement[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(17): 8440-8450. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.063.
- [120] MORTAZAVI S N S, INCE A. An artificial neural network modeling approach for short and long fatigue crack propagation[J]. Computational Materials Science, 2020, 185: 109962. DOI: 10.1016/j.commatsci.2020.109962.
- [121] BHOWMIK S, SUN T J. Pipeline fatigue damage monitoring during hydrogen transportation [C]// Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference (OTC), 2023: OTC-32500-MS. DOI: 10.4043/32500-ms.
- [122] NARAYANA P L, LEE S W, PARK C H, et al. Modeling high-temperature mechanical properties of austenitic stainless steels by neural networks[J]. Computational Materials Science, 2020, 179: 109617. DOI: 10.1016/j.commatsci.2020.109617.
- [123] KIM S G, SHIN S H, HWANG B. Machine learning approach for prediction of hydrogen environment embrittlement in austenitic steels[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 2794-2798. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.06.046.
- [124] GUO C, LIU S G, ZOU Y, et al. Fatigue properties and life prediction of GS80A steel under the effect of hydrogen-rich environment[J]. Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2023, 75(4): 1306-1318. DOI: 10.1007/s11837-022-05688-0.
- [125] ZHAO P, ZENG X G, KOU H, et al. A kind of numerical model combined with genetic algorithm and back propagation neural network for creep-fatigue life prediction and optimization of double-layered annulus metal hydride reactor and verification of ASME-NH code[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 54(8): 1251-1263. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.284.

(责任编辑:刘平;校对:彭三军)