

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.05.002

# 4130X 在 50 MPa 氢环境下的 断裂力学性能试验研究

顾超华, 姚彦辰, 赵益明, 马凯, 匡继勇\*, 张睿明, 刘亚宇, 花争立, 彭文珠

(浙江大学 化工机械研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**广泛用于大容积无缝高压储氢容器制造的铬钼钢 4130X, 在高压氢环境下面临着因高压氢脆引起的力学性能劣化现象, 对 4130X 储氢容器的安全运行产生极大威胁。课题组利用研发的高压氢环境材料耐久性试验装置, 对 4130X 在 50 MPa 氢环境下的疲劳裂纹扩展速率和断裂韧度开展试验研究。结果表明: 相比于空气下, 4130X 在 50 MPa 氢环境下的疲劳裂纹扩展速率加快了约 10~16 倍, 断裂韧度降低了约 71.1%。4130X 储氢容器的疲劳设计应考虑高压氢脆对材料断裂力学性能的劣化作用。

**关键词:**4130X; 高压氢脆; 疲劳裂纹扩展速率; 断裂韧度

中图分类号: TH142 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2021)05-0008-06

## Experimental Study on Fracture Mechanical Properties of 4130X in 50 MPa Hydrogen Environment

GU Chaohua, YAO Yanchen, ZHAO Yiming, MA Kai, KUANG Jiyong\*,  
ZHANG Ruiming, LIU Yayu, HUA Zhengli, PENG Wenzhu

(Institute of Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Chromium molybdenum steel 4130X is widely used in the manufacture of large volume seamless high pressure hydrogen storage vessels, however, 4130X may face the deterioration of mechanical properties caused by high-pressure hydrogen embrittlement in high-pressure hydrogen environment, which is a great threat to the safe operation of 4130X hydrogen storage vessels. The fatigue crack growth rate and fracture toughness of 4130X in 50 MPa hydrogen environment were studied by using the designed high pressure hydrogen environment material durability test device. The results show that the fatigue crack growth rate of 4130X in 50 MPa hydrogen environment is 10 – 16 times faster than that in air, and the fracture toughness is reduced by 71.1%. The fatigue design of 4130X hydrogen storage vessel should consider the deterioration of high pressure hydrogen embrittlement on the fracture mechanical properties of materials.

**Keywords:** 4130X; high pressure hydrogen embrittlement; fatigue crack growth rate; fracture toughness

氢能具有来源多样、清洁低碳、灵活高效及应用场景丰富等特点, 被认为是 21 世纪最具发展潜力的能源之一。世界各国都对氢能的发展高度重视, 氢能产业的发展方兴未艾。铬钼钢具有良好的淬透性和抗高温回火脆性能力, 且综合性能良好, 被广泛用于大容积无

缝储氢容器的制造。然而, 作为体心立方晶格结构的材料, 铬钼钢在高压氢环境下会面临因高压氢脆引起的疲劳裂纹扩展速率加快和断裂韧度降低等断裂力学性能劣化的现象, 对铬钼钢储氢容器的安全运行产生威胁<sup>[1-3]</sup>。目前, 国外针对其常用铬钼钢材料 SA372

收稿日期: 2020-04-13; 修回日期: 2021-05-25

基金项目: 国家重点研发计划(2019 YFB150530); 浙江省重点研发计划项目(2019C01154); 先进能源科学与技术广东省实验室佛山分中心(佛山仙湖实验室)开放基金(XHD2020-004)。

第一作者简介: 顾超华(1963), 男, 浙江杭州人, 硕士, 研究员, 博士生导师, 主要从事先进能源(氢能、天然气)承压设备、极端承压设备研究。通信作者: 匡继勇(1969), 男, 四川成都人, 博士, 副教授, 主要从事氢能承压设备以及检测装置的研究。E-mail: cekuangy@zju.edu.cn

和 SCM435 等的临氢断裂力学性能已开展了诸多试验研究, Somerday 等<sup>[4]</sup>对 SA372 Grade J 钢在 100 MPa 氢环境下开展了疲劳裂纹扩展速率试验, 结果表明材料在氢环境下的疲劳裂纹扩展速率约为惰性气体环境下的 100 倍。Wada<sup>[5]</sup>在 45 MPa 和 90 MPa 氢环境下的试验表明高压氢气使得 SCM435 的疲劳裂纹扩展速率加快 10 倍以上。Iijima 等<sup>[2][20],[3][22]</sup>对 SA372 Grade J 在 45 MPa 氢环境下的断裂韧性进行了研究, 结果表明高压氢气能够显著降低材料抵抗裂纹开裂的能力。此外, 诸多学者还针对铬钼钢氢脆性能的影响因素开展了研究。Wada 等<sup>[6]</sup>通过试验研究发现当氢气压力从 1 MPa 增加至 90 MPa 时, SCM435 的疲劳裂纹扩展速率增加了约 30 倍。Somerday 等<sup>[7]</sup>在 103 MPa 氢环境下通过 SA372 Grade J 和 SA372 Grade L 的断裂韧性测试研究了材料强度的影响, 结果表明强度越高, 材料的断裂韧性越低。我国常用铬钼钢材料为 4130X, 其化学成分、力学性能等与 SA372、SCM435 等材料有所不同。张鑫等<sup>[8]</sup>对国产 4130X 在高压氢环境下的疲劳裂纹扩展速率进行了测试, 结果表明 92 MPa 氢环境下 4130X 的疲劳裂纹扩展速率相比于空气环境下加快了约 30~50 倍。目前, 针对国产 4130X 在高压氢环境下的断裂力学性能的相关研究仍然相对匮乏。

课题组利用浙江大学研发的高压氢环境材料耐久性试验装置, 对 4130X 在 50 MPa 氢环境下的疲劳裂纹扩展速率和断裂韧性开展试验研究, 获得了高压氢气对材料断裂力学性能的影响规律, 并对高压氢气的影响机理进行了探究。

## 1 高压氢环境材料耐久性试验装置

针对金属材料面临的高压氢环境氢脆, 浙江大学

成功研发了我国首台高压氢环境材料耐久性试验装置, 如图 1 所示。该装置能够实现金属材料在高压氢环境下的慢应变速率拉伸、疲劳裂纹扩展速率、断裂韧性以及低周疲劳试验。



图 1 高压氢环境材料耐久性试验装置  
Figure 1 Durability test device for high pressure hydrogen environmental materials

高压氢环境材料耐久性试验装置主要由高压氢环境箱系统、置换及供气系统、加载系统和总控系统组成, 如图 2 所示。高压氢环境箱为试验提供密闭的高压氢环境空间, 具备稳压和温控功能, 并能够实现试样的快速更换。置换及供气系统用于获得试验所需的高压气体环境, 由空压机、油水分离器、管道、控制阀、真空泵和氢气压缩机等组件组成; 该系统可实现对环境箱和管路系统抽真空、气体吹扫以及增压等功能。加载系统为试验机进行材料力学性能试验提供动力源, 主要由油源、试验机控制器和试验机主机等组成。总控系统对各系统和模块进行控制协调, 主要包括远程控制系统、测量记录系统和泄漏监控系统。

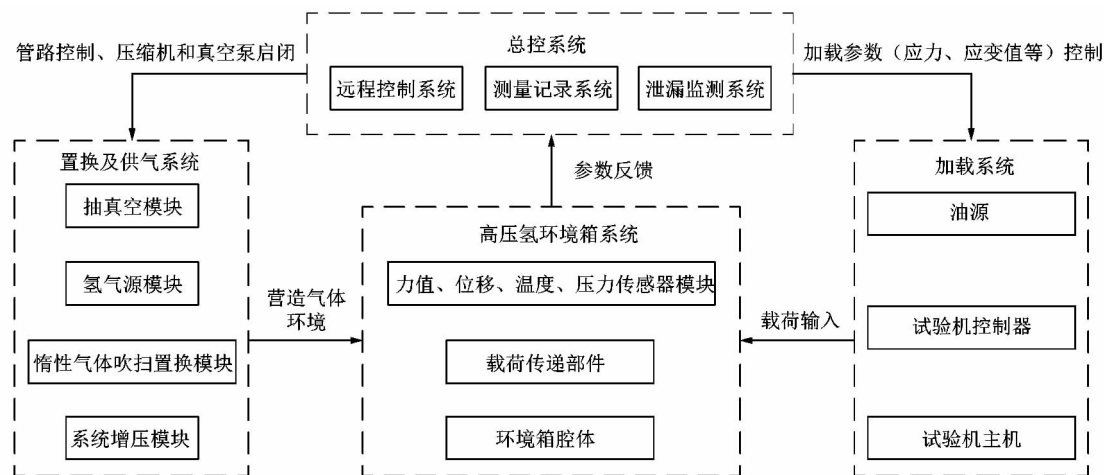


图 2 高压氢气环境材料耐久性试验装置系统示意图

Figure 2 Schematic diagram of durability test device system for high-pressure hydrogen environmental materials

高压氢环境材料耐久性试验装置的最高工作压力可达 140 MPa,最高工作温度为 100 ℃,最大静态和动态试验力分别为 ±120 kN 和 ±100 kN,最小应变速率为 10<sup>-7</sup> s<sup>-1</sup>,加载频率为 0.001 ~ 10.000 Hz。课题组可通过位移、载荷以及应变 3 种模式控制试验。

## 2 4130X 的临氢断裂力学性能试验研究

### 2.1 材料及试样

研究所用 4130X 试样取自设计压力为 50 MPa 的大容积无缝储氢容器,容器结构尺寸如图 3 所示,容器在旋压成型后进行淬火加回火的热处理。4130X 的化学成分满足 GB/T 33145—2016 的要求<sup>[9]</sup>,力学性能满足 T/CATSI 05003—2020 的要求<sup>[10]</sup><sup>3-4</sup>,化学成分和力学性能分别见表 1 和表 2。

表 1 4130X 的化学成分

Table 1 Chemical composition of 4130X

名称	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	%
4130X	0.280	0.860	0.270	0.007	0.003	1.000	0.230	
GB/T 33145—2016	0.250 ~ 0.350	0.400 ~ 0.900	0.150 ~ 0.350	≤0.020	≤0.010	0.800 ~ 1.100	0.150 ~ 0.250	

表 2 4130X 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 4130X

名称	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	断后伸长率/%	冲击吸收功(-40 ℃)/J
4130X	583	757	0.77	22.3	86
T/CATSI 05003—2020	-	≤880	≤0.86	≥20.0	≥47

疲劳裂纹扩展速率试验和断裂韧性试验均采用紧凑拉伸试样,如图 4 所示。两种试样均在筒体中部近内表面处沿着 T-L 方向(载荷方向为环向、缺口方向为容器轴向)取样。

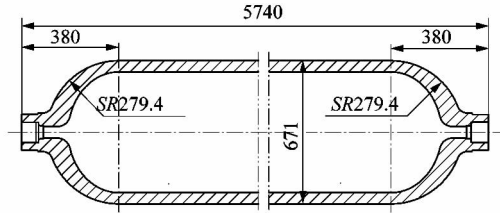
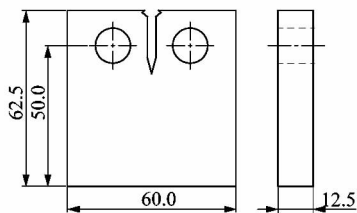
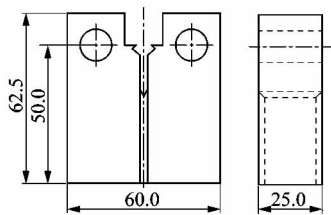


图 3 50 MPa 大容积无缝储氢容器结构尺寸

Figure 3 Structural dimension diagram of large volume hydrogen storage vessel



(a) 疲劳裂纹扩展速率试样



(b) 断裂韧性试样

图 4 试验所用试样

Figure 4 Samples used in test

### 2.2 试验方法

疲劳裂纹扩展速率试验和断裂韧性试验均依据 GB/T 34542.2—2018 《氢气储存输送系统 第 2 部分 金属材料与氢环境相容性试验方法》进行。

#### 2.2.1 疲劳裂纹扩展速率试验

当承受疲劳载荷作用时,载荷每循环一次对应的裂纹扩展量即为疲劳裂纹扩展速率,记为 da/dN。测试 da/dN 的关键在于疲劳裂纹长度的测量,文中采用柔度法,柔度计算公式为

$$U_x = \left\{ \left[ \frac{EBV_x}{P} \right]^{0.5} + 1 \right\}^{-1} \quad (1)$$

式中: B 为试样厚度, E 为材料的弹性模量, V<sub>x</sub> 为测量点的位移, P 为载荷。

柔度与归一化裂纹长度关系为

$$\frac{a}{W} = C_0 + C_1 U_x + C_2 U_x^2 + C_3 U_x^3 + C_4 U_x^4 + C_5 U_x^5 \quad (2)$$

式中: a 为裂纹长度, W 为试样宽度, C<sub>0</sub> ~ C<sub>5</sub> 为与测量位置有关的参数。

通过疲劳裂纹扩展速率试验可获得应力强度因子范围 ΔK 与 da/dN 的关系曲线,其中表征裂纹稳定扩展阶段的曲线通常采用 Paris 公式进行描述<sup>[12]</sup>:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

式中:  $C$  和  $m$  均为疲劳裂纹扩展参数,通过对试验数据进行拟合即可得到该参数。

### 2.2.2 断裂韧度试验

断裂韧度的测量采用  $J$  积分法,加载时采用引伸计直接测量加载线位移,并计算裂纹扩展量  $\Delta a$  及对应的  $J$  积分值,据此获得材料的裂纹扩展阻力曲线( $R$  曲线);亚临界开裂门槛值  $J_{IH}$  取 0.2 mm 偏置钝化线与  $R$  曲线的交点对应的  $J$  积分值,  $K_{IH}$  通过下式获得:

$$K_{IH} = \sqrt{\frac{J_{IH} E'}{1 - \nu^2}} \quad (4)$$

式中  $\nu$  为泊松比。

裂纹扩展量  $\Delta a$  和  $J$  积分通过卸载柔度法<sup>[13]</sup>测量并计算,试验过程中在特定时间间隔内对试样部分卸载再加载,在第  $k$  次卸载/再加载时的弹性柔度为

$$C_k = \left( \frac{\Delta q}{\Delta F} \right)_k \quad (5)$$

式中:  $\Delta F$  为力值变化量,  $\Delta q$  为加载线位移,每次卸载的裂纹长度为  $a_k$ 。

通过测量的柔度  $C_k$  可利用理论或者经验公式进行计算:

$$(a/W)_k = f(C_k) \quad (6)$$

疲劳裂纹扩展速率试验和断裂韧度试验均采用高压氢环境特制引伸计进行数据采集,该引伸计在空气环境下标定,但通过特殊的结构设计能够在高压氢环境下因氢气侵入而产生膨胀和分层,确保了高压氢环境下信号的稳定和正确<sup>[14]</sup>。

### 2.3 试验过程

装夹好试样后首先对氢气管路及环境箱抽真空,然后通入 2 MPa 氢气进行吹扫,之后利用增压系统对环境箱增压至 50 MPa,保压 30 min 后开始试验。疲劳裂纹扩展速率试验通过力控制方式加载,加载频率  $f$  为 1 Hz,力值比  $R$  为 0.1;断裂韧度试验采用位移控制加载,位移加载速率为 0.04 mm/min。2 种试验各进行 3 次平行试验,以确保试验结果准确有效。

### 2.4 试验结果及讨论

#### 2.4.1 疲劳裂纹扩展速率

$f$  为 1 Hz、 $R$  为 0.1,50 MPa 氢环境下 3 个疲劳裂纹扩展速率试验获得的  $da/dN-\Delta K$  曲线如图 5 所示,图中同时列举了文献中 4130X 的疲劳裂纹扩展速率<sup>[15]</sup>。可以看出高压氢气能够显著增加 4130X 的疲劳裂纹扩展速率,这与文献中的测试结果是一致的。与空气相比,50 MPa 氢环境下 4130X 的疲劳裂纹扩展速率加快了约 10~16 倍。此外,氢气对 4130X 疲劳裂

纹扩展速率的作用还与材料以及氢气压力等因素有关。通常情况下,材料强度越高,氢环境下的疲劳裂纹扩展速率越快,国外标准 ASME VIII-3—2019<sup>[16]</sup>、ISO 11120—2015<sup>[17]</sup> 以及国内标准 TSG 21—2019<sup>[18]</sup>、T/CATSI 05003—2020<sup>[10]3-4</sup> 等均规定了铬钼钢用于氢环境下时的抗拉强度上限,其中国外标准规定的上限通常为 950 MPa 左右,国内标准为 880 MPa。氢气压力也是重要的影响因素,氢气压力越高,材料的疲劳裂纹扩展速率越快,但研究表明存在一个压力阈值,当氢气压力达到该压力阈值时,氢气压力对材料疲劳裂纹扩展速率将不再产生影响<sup>[19]</sup>。

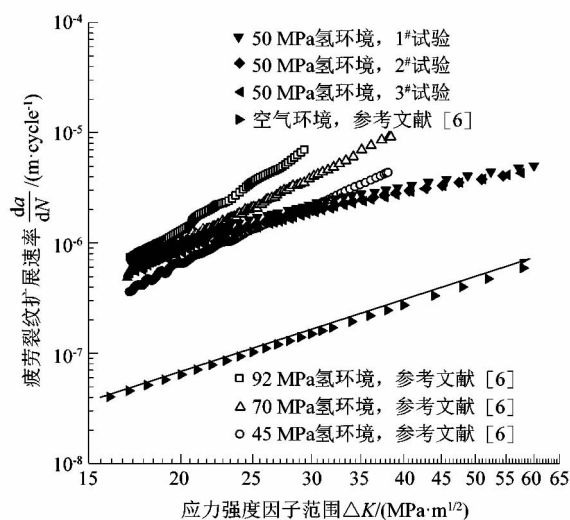


图 5 疲劳裂纹扩展速率试验的  $\Delta K-da/dN$  曲线

Figure 5  $\Delta K-da/dN$  curve of fatigue crack growth rate test

对于材料在高压氢环境下疲劳裂纹扩展速率的加快现象目前主要通过结合空气下材料的疲劳裂纹扩展行为<sup>[20]</sup>和 HELP 等氢脆理论进行解释。在空气下,裂纹尖端会在交变载荷作用下反复出现塑性钝化和锐化的现象,从而使得裂纹发生疲劳扩展<sup>[21]</sup>。然而,诸多研究对于高压氢环境下试样的疲劳裂纹扩展路径观测发现,氢环境下裂纹的扩展路径上出现了滑移在裂纹尖端的局域化分布现象<sup>[22-23]</sup>。HELP 理论认为氢会使得裂纹尖端产生局域化塑性变形,导致滑移的局域化,而在滑移的作用下,裂纹尖端在拉应力增加时难以像在空气下那样张开,而是持续向前扩展,也就是说氢阻碍了裂纹尖端的塑性钝化和锐化过程,使得一次加载时裂纹向前的扩展量大于空气下的扩展量,宏观表现为氢环境下材料疲劳裂纹扩展速率加快。

#### 2.4.2 断裂韧度 $K_{IH}$

采用增位法测试材料在速率为 0.04 mm/min、

50 MPa 氢环境下的断裂韧性,得出 3 个试样的载荷-加载线位移曲线和裂纹扩展阻力曲线,如图 6 所示。通过裂纹扩展阻力曲线可得亚临界开裂门槛值  $J_{IH}$ , 断裂韧性  $K_{IH}$  通过式(4)转换获得。4130X 在 50 MPa 氢气下的断裂韧性测试结果如表 3 所示。在文献[24]中已经测试了 4130X 在空气下的断裂韧性为  $232 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,可以看出,高压氢环境下 4130X 阻碍裂纹扩展的能力显著减低,其断裂韧性的降幅达到 71.1%。

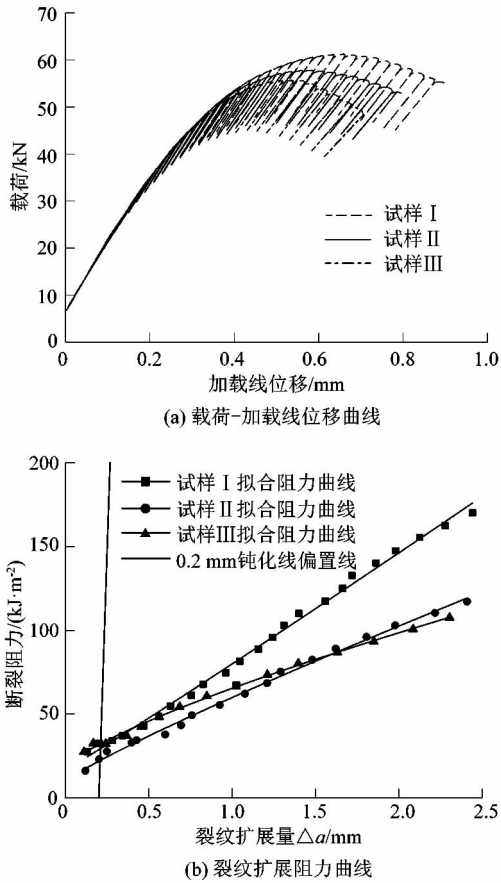


图 6 断裂韧性测试曲线

Figure 6 Curves of fracture toughness test

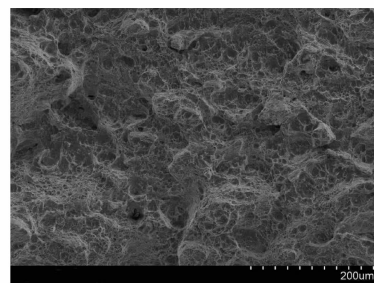
表 3 50 MPa 氢环境下 4130X 的断裂韧性测试结果

Table 3 Fracture toughness test results of 4130X under 50 MPa hydrogen environment

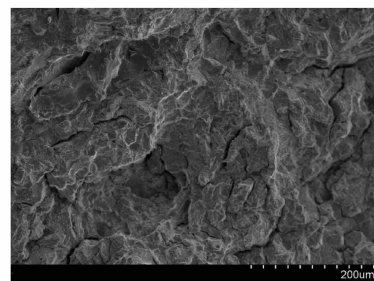
试样	$J_{IH}/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	$K_{IH}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
I	24.4	75.0
II	19.5	67.0
III	29.1	82.0

将完成试验的试样通过交变载荷沿着裂纹扩展方向拉断,利用扫描电子显微镜(SEM)观察试样的断面形貌,空气和 50 MPa 氢环境下 4130X 试样的断面形貌如图 7 所示。可以看出,空气环境下的试样断面上

分布着大量的韧窝和孔洞,说明 4130X 在空气环境下的断裂模式为微孔聚集断裂,但氢气环境下韧窝和孔洞明显减少,试样断面上可以观察到明显的二次裂纹,断裂模式变为了准解理断裂。目前,铬钼钢氢致断裂的机理尚不明确,但一般认为与塑性有关,Takeda 等<sup>[25]</sup>将低合金回火钢在氢气环境下的断裂机理称为塑性相关的氢致开裂(PRHIC)。该理论认为材料的氢致开裂包含了微裂纹的形成和微裂纹之间的合并 2 个阶段,前一个阶段由应力控制,后一个阶段由应变控制。这一特点与微孔聚集断裂相似,即宏观裂纹起源于应力控制的空洞等初始损伤,随后初始损伤在累积塑性变形的作用下发生扩展和合并,最终形成了宏观裂纹。Martin 等<sup>[26]</sup>认为氢致断裂过程中控制损伤形核的应力包括远程应力和局部应力。根据 HELP 理论,氢促进了位错运动,导致局域化塑性变形的产生,这加剧了基体和刚性夹杂物之间应变的不协调,使得有利于损伤形核的局部应力变大,在试样断面上表现为损伤形核颗粒的明显缺失。因此,氢的存在改变了局部应力与远程应力之间的关系,对于相同的远程应力,由于氢致局域化塑性变形的作用使得氢环境下的局部应力大于空气环境下的局部应力,相应的氢环境下产生损伤形核的局部应力阈值所对应的远程应力要比空气环境下小,这在宏观试验现象上即表现为氢环境下的断裂韧性降低。



(a) 空气环境下的断口形貌图



(b) 氢气环境下的断口形貌图

图 7 4130X 的 SEM 断口形貌

Figure 7 SEM fracture morphology of 4130X

通过上述 50 MPa 氢环境下 4130X 的疲劳裂纹扩展速率和断裂韧性试验研究可以看出,高压氢气能够使得 4130X 的断裂力学性能发生显著劣化,这有可能导致由该材料制成的临氢零部件发生疲劳失效,因此在对 4130X 储氢容器进行疲劳评定时应当考虑高压氢气对材料断裂力学性能的劣化影响。

### 3 结论

课题组利用浙江大学研发的高压氢环境材料耐久性试验装置,对 4130X 在 50 MPa 氢环境下的疲劳裂纹扩展速率和断裂韧性开展了试验研究。结果表明:相比于空气环境下,50 MPa 氢环境下 4130X 的疲劳裂纹扩展速率加快了约 10~16 倍,断裂韧性降低了约 71.1%。氢致局域化塑性变形可能阻碍了疲劳扩展过程中裂纹尖端的塑性钝化行为,改变了控制损伤形核的远程应力和局部应力之间的关系,造成了材料在氢环境下断裂力学性能的劣化。由 4130X 制成的临氢零部件的疲劳评定应当考虑高压氢气对材料断裂力学性能的劣化影响。

### 参考文献:

- [1] MATSUNAGA H, YOSHIKAWA M, KONDO R, et al. Slow strain rate tensile and fatigue properties of Cr-Mo and carbon steels in a 115 MPa hydrogen gas atmosphere [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(16): 5739-5748.
- [2] IJIMA T, ITOGA H, AN B, et al. Fracture properties of a Cr-Mo ferritic steel in high-pressure gaseous hydrogen [C]// *Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference: Materials and Fabrication*. Boston, Massachusetts, USA: ASME, 2015: 19-23.
- [3] IJIMA T, ITOGA H, AN B, et al. Measurement of fracture properties for ferritic steel in high-pressure hydrogen gas [C]// *Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference: Materials and Fabrication*. Anaheim, California, USA: ASME, 2014: 20-24.
- [4] SOMERDAY B P, SAN MARCHI C. Measurements of fatigue crack growth rate for steels in hydrogen containment components [C]// *Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety*. Ajaccio, France: ASCE, 2009: 16-18.
- [5] WADA Y. Effect of cycle frequency on fatigue crack propagation behavior for steels in hydrogen storage [C]// *Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference: Materials and Fabrication*. Paris: ASME, 2013: 14-18.
- [6] WADA Y, TAKASAWA K, ISHIGAKI R, et al. Measurement of fatigue crack growth rates for steels in hydrogen storage [C]// *Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference: Materials and Fabrication*. Prague, Czech Republic: ASME, 2009: 215-224.
- [7] SOMERDAY B P, CAMPBELL J A, LEE K L, et al. Enhancing safety of hydrogen containment components through materials testing under in-service conditions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11): 7314-7321.
- [8] 张鑫. 高压储氢气瓶用 4130X 钢氢脆试验研究及裂纹容限评定 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 47-50.
- [9] 全国气瓶标准化技术委员会. 大容积钢质无缝气瓶: GB/T 33145—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 20.
- [10] 中国技术监督情报协会危化品储运装备技术与信息化工作委员会. T/CATSI 05003—2020. 加氢站储氢压力容器专项技术要求 [S]. 北京: 中国技术监督情报协会, 2020: 3-4.
- [11] 全国氢能标准化技术委员会. 氢气储存输送系统: 第 2 部分 金属材料与氢环境相容性试验方法: GB/T 34542. 2—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 1-6.
- [12] 王文健, 刘启跃. PD3 和 U71Mn 钢轨疲劳裂纹扩展速率研究 [J]. *机械强度*, 2007, 29(6): 1026-1029.
- [13] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料: 准静态断裂韧度的统一试验方法: GB/T 21143—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 55.
- [14] 周池楼. 140 MPa 高压氢气环境材料力学性能测试装置研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 128-130.
- [15] HUA Z L, ZHANG X, ZHENG J Y, et al. Hydrogen-enhanced fatigue life analysis of Cr-Mo steel high-pressure vessels [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(16): 12005-12014.
- [16] ASME. ASME VIII Division 3; alternative rules for construction of high pressure vessel [M]. [S. l.]: ASME, 2019: 136-140.
- [17] International Standard Organization. Gas cylinders-refillable seamless steel tubes of water capacity between 150 L and 3 000 L—design, construction and testing: ISO 11120: 2015 [S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2015: 14-15.
- [18] 国家质检总局特种设备安全监察局. 固定式压力容器安全技术监察规程: TSG 21—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 9.
- [19] GANGLOFF R P, Somerday B P. Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies: the problem, its characterisation and effects on particular alloy classes [M]. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2012: 1-840.
- [20] 钟群鹏, 赵子华, 张峰. 断口学的发展及微观断裂机理研究 [J]. *机械强度*, 2005, 27(3): 358-370.
- [21] RADHAKRISHNAN V M. Crack propagation in high stress level fatigue [J]. *International Journal of Fracture Mechanics*, 1971, 7(4): 468-470.
- [22] 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.
- [23] 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: 101-112.
- [24] 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.
- [25] TAKEDA Y, MCMAHON C J. Strain controlled vs stress controlled hydrogen induced fracture in a quenched and tempered steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1981, 12(7): 1255-1266.
- [26] MARTIN M L, FENSKE J A, LIU G S, et al. On the formation and nature of quasi-cleavage fracture surfaces in hydrogen embrittled steels [J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(4): 1601-1606.