

X60、X70 管线钢及其焊接接头 氢脆敏感性的对比研究

王万里^{1,2}, 陈烨³, 占先强³, 刘俊建^{1,2}, 汤文明^{3*}

(1.大唐锅炉压力容器检验中心有限公司, 合肥 230088; 2.大唐华东电力试验研究院,
合肥 230088; 3.合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘要: 目的 开展电解渗氢管线钢及其焊接接头显微组织和力学性能研究, 为掺氢天然气管线服役安全可靠
性评估提供支持。方法 X60、X70 管线钢及其焊接接头试样在 100 mA/cm² 下进行 24 h 电解渗氢后, 开展有、
无渗氢情况下相关试样的显微组织结构、氢热脱附、拉伸力学性能与断口形貌测试分析, 揭示渗氢对 X60、
X70 2 种管线钢及其焊接接头氢脆敏感性的影响规律。结果 X60 及 X70 管线钢以细小多边形铁素体为主,
其焊缝和热影响区以粗大的粒状或板条贝氏体为主。相对于 X70 管线钢, 其焊接接头具有更高的氢渗透性
和稳定性。渗氢导致 X60、X70 管线钢及其焊接接头试样的强度与塑性降低, 渗氢 X70 焊接接头力学性能
衰减最为明显, 拉伸断口呈准解理断裂特征。结论 X70 管线钢的氢脆敏感性高于 X60 管线钢, 管线钢焊接
接头的氢脆敏感性高于母材。

关键词: 管线钢; 焊接接头; 电解渗氢; 热脱附; 氢脆敏感性

中图分类号: TG404 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2024)04-0117-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.04.011

Comparative Study on Hydrogen Embrittlement Susceptibility of X60 and X70 Pipeline Steels and Their Welded Joints

WANG Wanli^{1,2}, CHEN Ye³, ZHAN Xianqiang³, LIU Junjian^{1,2}, TANG Wenming^{3*}

(1. Datang Boiler and Pressure Vessel Testing Center Co., Ltd., Hefei 230088, China;

2. Datang East China Electric Power Test and Research Institute, Hefei 230088, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: Surface damages, e.g., hydrogen embrittlement or hydrogen-induced crack, of the pipeline steel usually take place during long-term service in the hydrogen-contained environment. In this paper, microstructures and mechanical properties of X60 and X70 pipeline steels and their welded joints with/without hydrogenation were studied to provide a support for the hydrogen damage and safety reliability estimation of the hydrogen-contained natural gas pipeline.

All samples of the X60 and X70 pipeline steels and their welded joints were electrolytically hydrogenated at a current of 100 mA/cm² for 24 h. Microstructures, thermal desorption spectrum (TDS) characteristics, tensile mechanical properties and fractographies of the samples with/without hydrogenation were comparatively studied to reveal different effects of hydrogen permeation on their microstructures and mechanical properties. Further, the hydrogen embrittlement susceptibility of the X60

收稿日期: 2022-12-16; 修订日期: 2023-05-08

Received: 2022-12-16; Revised: 2023-05-08

引文格式: 王万里, 陈烨, 占先强, 等. X60、X70 管线钢及其焊接接头氢脆敏感性的对比研究[J]. 表面技术, 2024, 53(4): 117-124

WANG Wanli, CHEN Ye, ZHAN Xianqiang, et al. Comparative Study on Hydrogen Embrittlement Susceptibility of X60 and X70 Pipeline Steels and Their Welded Joints[J]. Surface Technology, 2024, 53(4): 117-124.

*通信作者 (Corresponding author)

and X70 pipeline steels and their welded joints was evaluated.

The X60 and X70 pipeline steels were mainly composed of fine polygonal ferrites, and their welding seams and heat affected zones mainly consisted of coarse granular and lath bainites with more prior austenite grain boundaries and the carbide/matrix interfaces. Therefore, the base metals of the pipeline steel welded joints may have higher mechanical properties than the welding seams and heat affected zones of them.

Taking the X70 pipeline steel and its welded joint as examples, the compositions and microstructures of the welded joint were more complicated than those of the X70 base metal. As a result, when the hydrogen thermal desorption curve of the welded joint sample arrived at its peak, the peak still sustained for a long time to form a hydrogen thermal desorption platform ranged from 125 °C to 200 °C. It indicated that more hydrogen atoms were absorbed in the welded joint samples, and thus resulted in a higher hydrogen embrittlement susceptibility of them.

Electrolytic hydrogenation resulted in simultaneous reduction of strength and plasticity of the X60 and X70 pipeline steels and their welded joints. The strength reduction ratios of all samples were roughly the same, but the specific elongation reduction ratios of them were very different. The elongations of the X60 pipeline steels and their welded joints were almost unchanged, on the contrary, those of the X70 pipeline steels and their welded joints were decreased by more than 21%, suggesting a very high hydrogen embrittlement susceptibility of the X70 pipeline steels and their welded joints. Electrolytic hydrogenation resulted in decrement of the dimple aggregation plastic fracture characteristics of the samples during tensile test, and that was more apparent for the X60 and X70 welded joints. Above all, the degradation of the X70 welded joints was the most remarkable, and the hydrogenated area of the X70 welded joints was in a quasi-cleavage fracture mode, rather than a ductile fracture one.

The hydrogen embrittlement susceptibility of the X60 and X70 welded joints is higher than that of their base metals. The hydrogen embrittlement susceptibility of the X70 pipeline steel and its welded joint is higher than that of the X60 pipeline steel and its welded joint. The damage more likely takes place in the surface hydrogen permeation layer at the heat affected zone of the welded joints.

KEY WORDS: pipeline steel; welded joint; electrolytic hydrogenation; thermal desorption; hydrogen embrittlement susceptibility

为早日实现“双碳”目标,我国传统煤电正逐渐被可再生能源及燃气轮机联合循环发电所取代^[1]。目前,将可再生能源转化为电能并储存利用的一个最优方案是利用电解水制氢,实现电能与氢能的相互转换,这是一项高效、清洁的技术,符合清洁环保的能源发展方向^[2-4]。国家发改委、能源局印发的《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》中也明确指出,要大力发展氢气的储运与利用技术^[5]。在现有氢能储运技术中,利用已有天然气管网,以掺氢天然气的形式输送氢气最具经济性^[6]。

在掺氢天然气输送过程中,氢向管线钢内部扩散,导致管材显微结构劣化、力学性能衰减,产生氢脆(Hydrogen Embrittlement, HE),降低了其长期服役安全可靠^[7]。为此,有必要开展渗氢状态下典型天然气管线钢材显微组织与力学性能的变化及其氢致损伤机理的研究,用以评价其氢脆敏感性。目前,国内外就渗氢状态下管线钢材显微结构与力学性能演变已开展了较多的研究工作^[8-12]。Araújo等^[13]对比研究了X60、X80钢在氢气环境下的拉伸行为。发现相比于空气环境,X60钢试样在氢气环境中拉伸时屈服强度下降,变形量增大,出现软化现象,无氢脆敏感性;而在相同环境中拉伸,X80钢试样的强度、塑性均下降,氢脆敏感性较大。Chatzidouros等^[14]对比

研究了原位掺氢前后X52、X70管线钢及其焊接接头试样断裂韧性(J 积分)的变化。发现掺氢后管线钢母材的塑性均下降,且降幅随着充氢电流的增大而增大,母材及热影响区中的铁素体-珠光体带是其具有较高氢脆敏感性的内在结构因素。Zhou等^[15]研究了内部氢及表面吸附氢对X80管线钢氢脆行为的影响。表面吸附氢对X80管线钢试样的氢脆行为影响较大,其氢脆敏感性随着应变速率的增大而减小,表明位错对氢的捕获行为是决定该钢氢脆敏感性的主要原因。其他研究还表明,掺氢天然气环境中管线钢的抗疲劳性能降低,裂纹敏感性增大,服役管材因此存在过早失效的风险^[16]。上述研究主要以管材为研究对象,但在输气管道铺设过程中,管材焊接必不可少,因此,涉及渗氢环境下管线钢焊接接头氢损伤行为及其力学性能的研究也具有十分重要的价值。但迄今为止,相关研究还比较欠缺,有必要针对渗氢环境下不同级别管线钢焊接接头的显微组织和力学性能开展更多的研究工作,为全面开展管线钢及其焊接接头服役安全可靠评估提供数据支持。

目前,我国城镇天然气管线大多采用X60、X52、X42及20等低强钢,而天然气长输干线多采用X70、X80乃至更高等级的高强钢管材。研究表明,在掺氢天然气环境中,X60等低等级管线钢的显微结构与力

学性能往往更加稳定^[17]。此外,在金属材料渗氢实验研究中,一般采用高压气体渗氢和电解渗氢 2 种方式。前者与管材的实际服役状态较为符合,但需要昂贵的专用设备,且渗氢速度慢、深度小、氢溶解量低。相比而言,电解渗氢无需特定的设备,简便易行,且渗氢速度较快,深度较大,氢溶解量更高^[18]。因此,本文选用 X60 及 X70 2 种常用的管线钢焊接接头,采用电解渗氢方法,对其进行渗氢处理,进而开展氢脱附行为及其拉伸力学行为研究,评价其氢脆敏感性。

1 实验材料及方法

1.1 材料

国产 X60、X70 管线钢管的规格分别为 $\phi 607\text{ mm}\times 12.1\text{ mm}$ 和 $\phi 711\text{ mm}\times 12.7\text{ mm}$,采用药芯焊丝单面

电弧焊工艺制备 X60、X70 管线钢焊接接头。主要的焊接工艺参数:焊接电流 180~260 A,电压 23~36 V,焊接速度 15~32 cm/min。采用 MAX07-F 型直读光谱仪检测 X60、X70 管线钢及焊接接头焊缝的化学成分,如表 1 所示。X60、X70 管线钢母材成分符合 GB/T 9711—2017《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》的要求。

1.2 试样制备

根据 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》的要求,在 X60、X70 管线钢管焊接接头上分别在母材及焊缝区域沿轴向线切割加工非标矩形截面拉伸试样(图 1),试样总长 100 mm,工作段标距为 17.5 mm。试样经 200#、400#、600#、800#、1000#的 SiC 砂纸逐级打磨后,再用丙酮超声清洗,冷风吹干。

表 1 管线钢及焊接接头焊缝的化学成分
Tab.1 Chemical compositions of pipeline steels and welding seams

Samples	wt. %								
	C	Si	Mn	Al	P	S	Nb	Ti	Fe
X60	0.090	0.21	1.21	0.034	0.011	0.003	0.042	0.016	Bal.
X60 Welding seam	0.093	0.091	1.17	0.97	0.004	0.001	1.66	0.005	Bal.
X70	0.094	0.38	1.67	0.033	0.011	0.000 6	0.041	0.018	Bal.
X70 Welding seam	0.099	0.12	1.30	0.83	0.004	<0.000 2	0.000 8	0.005	Bal.

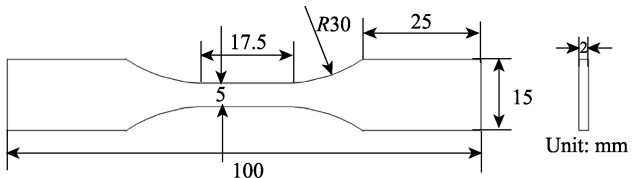


图 1 管线钢及其焊接接头拉伸试样的尺寸
Fig.1 Dimensions of tensile samples of pipeline steels and their welded joints

1.2 电解渗氢

将图 1 的矩形截面试样一端及试样渗氢工作段单表面裸露,无需涂覆,分别用作与电源连接的夹持端及电解渗氢表面,其他部位表面均用环氧树脂涂覆。对于焊接接头试样,要求焊缝居于工作段的中间位置,工作段内红色部位为焊缝,蓝色部位为热影响区(Heat Affected Zone, HAZ),白色为母材,如图 2 所示。

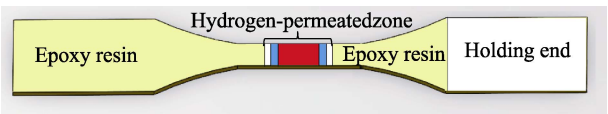


图 2 管线钢及其焊接接头拉伸试样表面涂覆示意图
Fig.2 Schematic diagram for painting tensile samples of pipeline steels and their welded joints

试样的电解渗氢在室温电解槽中进行。以石墨棒为阳极,拉伸试样为阴极,渗氢部位正对着石墨电极,电极间距为 10 mm。采用 DDZ-3 电镀直流电源供电,电流密度为 100 mA/cm²,渗氢时间为 24 h。采用 0.5 mol/L H₂SO₄+2 g/L 硫脲的去离子水溶液作为电解液,其中,硫脲的作用是增加试样表面氢原子浓度,阻碍氢原子结合成氢分子,促进氢原子扩散进入试样中^[19-20]。

1.3 测试

在 X60、X70 管线钢焊接接头的母材、热影响区及焊缝处线切割切取 10 mm×10 mm×5 mm 的方块试样,用 SiC 砂纸逐级打磨至 2000 目后抛光,再用 4% (质量分数)的硝酸酒精溶液腐蚀,去离子水清洗后冷风吹干,在 MR-3000 型金相显微镜下观察显微组织。采用 TPD WorkStation 型热脱附谱分析仪对有、无电解渗氢处理的试样进行氢脱附(TDS)测试, Faraday Cup 型四极质谱仪记录脱附的氢气流量, K 型热电偶测量试样温度。TDS 测试温度范围为室温至 400 ℃,升温速率为 10 ℃/min。采用 MX-0580 型微机控制电子万能材料试验机对有、无电解渗氢的管线钢及其焊接接头试样进行室温拉伸性能测试,横梁位移速率为 0.3 mm/min。每种状态测试 3 根平行试样,

求平均值。采用 JSM-6490 型扫描电镜 (SEM) 观察试样的拉伸断口形貌。根据文献[21], 渗氢试样的氢脆敏感性可用式 (1) 的脆化指数来表示。

$$I_{EI} = (A_0 - A_{H_2}) / A_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_0 、 A_{H_2} 分别为未渗氢及渗氢试样的断后伸长率。为了减少渗氢试样中氢的溢出, 在渗氢后 5 h 内完成相关测试。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

X60、X70 管线钢均属于低碳或超低碳微合金化钢。供货态 X60 管线钢管为正火态, 由块状铁素体和珠光体构成。其中, 珠光体含量少, 沿铁素体晶界分布, 组织细小 (图 3a1)。供货态 X70 管线钢管一般采用控温控冷 (TMCP) 工艺制备, 由多边形铁素

体、粒状贝氏体及少量的针状铁素体构成, 其显微组织比 X60 更加细小 (图 3a2)。X60 焊接接头热影响区为针状铁素体、板条状贝氏体和粒状贝氏体的混合组织, 相对于母材, 组织比较粗大 (图 3b1)。X70 焊接接头的热影响区则由粒状贝氏体和少量的针状铁素体构成, 组织粗大 (图 3b2)。而 X60、X70 焊接接头的焊缝组织均主要由板条状贝氏体构成, 可能还含有很少量的针状铁素体, 与热影响区的尺寸相当。可见, X60 及 X70 焊接接头焊缝和热影响区的组织组成均以粗大的粒状贝氏体为主, 拉伸断裂裂纹易沿针状铁素体与贝氏体基体界面扩展, 导致其强度、塑性降低。相对而言, X60 及 X70 焊接接头的母材组织以多边形铁素体为主, 晶粒细小, 从而赋予其较高的强度和塑性。因此, 相较于焊缝及热影响区, X60 及 X70 管线钢焊接接头母材的显微组织更优, 具有更优良的综合力学性能。

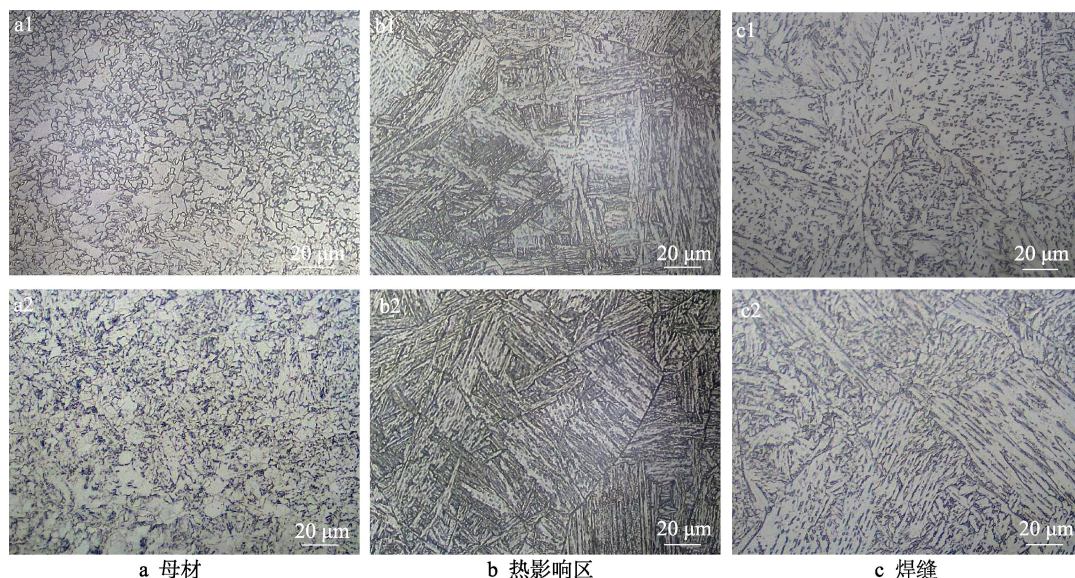


图 3 X60 (a1, b1, c1) 与 X70 (a2, b2, c2) 管线钢焊接接头的显微组织

Fig.3 Optical cross-sectional images of X60 (a1, b1, c1) and X70 (a2, b2, c2) pipeline steel welded joints:
a) base metals; b) HAZs; c) welding seams

2.2 氢热脱附

未渗氢及 24 h 电解渗氢的 X70 管线钢及其焊接接头试样的氢热脱附测试结果, 如图 4 所示。未渗氢 X70 管线钢及其焊接接头试样的 TDS 谱图几乎平直, 无明显的氢原子脱附过程。这表明该试样在制备过程中几乎没有氢原子吸附于试样表面或渗入试样内部。电解渗氢 24 h 后, X70 管线钢及焊接接头的 TDS 谱图在 75~225 °C 出现了一个宽化的氢热解吸峰, 峰值位于 125 °C 左右, 对应于试样表面吸附氢的脱附行为。温度达到 125 °C 左右时, X70 管线钢及其焊接接头中位错、晶界和相界等缺陷位置捕获的氢原子也释放出来, 导致试样中氢的热解吸达到极值。在随后的加热过程中, X70 管线钢中上述缺陷位置捕获的氢

原子逐渐脱附殆尽, 氢热解吸峰强度逐渐减弱^[22]。然而, X70 焊接接头试样氢脱附曲线在 125~200 °C 出现了一个平台, 且氢热解吸峰强度大于渗氢 X70 管线钢试样。其原因主要是该焊接接头试样内部的显微组织更加复杂, 缺陷更多, 故在电解渗氢过程中, 试样内部可捕获更多的氢原子, 氢原子的稳定性也更高。在图 4 中还可以看到, 在约 275 °C 后, 渗氢 X70 管线钢及焊接接头试样的热脱附曲线又开始逐渐上升, 形成一个新的氢热解吸峰。Peng 等^[23]研究发现, 电解渗氢 X70 管线钢氢热脱附 TDS 图谱在 400 °C 附近的热解吸峰对应不可逆捕获位点 (夹杂物、第二相等) 捕获氢的脱附过程。本文的试验结果与此一致, 即电解渗氢 X70 管线钢焊接接头母材及焊接接头中的夹杂物、第二相等缺陷处吸附的氢原子比其表面吸

附的氢原子稳定性更高,需要在更高的温度下才能发生氢解吸脱附。

2.3 拉伸力学性能

由图 5 可见,有、无渗氢 X60、X70 管线钢及其焊接接头试样的拉伸应力-位移曲线均未发生明显屈服,符合低碳低合金钢拉伸变形的一般特征。由于 X70 管线钢含有细小的粒状贝氏体、针状铁素体等强化组织,因此具有比 X60 管线钢高得多的强度。同时,有、无渗氢的 2 种管线钢焊接接头试样拉伸断裂位置均在热影响区,焊缝热影响区的成分和显微结构与母材相关,因此,X70 管线钢焊接接头的屈服强度 ($R_{p0.2}$) 及抗拉强度 (R_m) 指标也较高(表 2~3)。

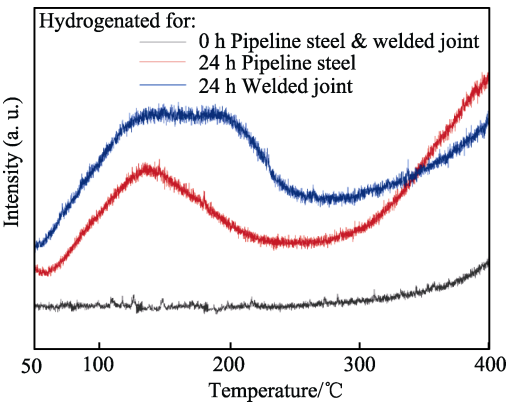


图 4 X70 管线钢及其焊接接头试样的 TDS 图谱
Fig.4 TDS patterns of X70 pipeline steel and welded joint samples

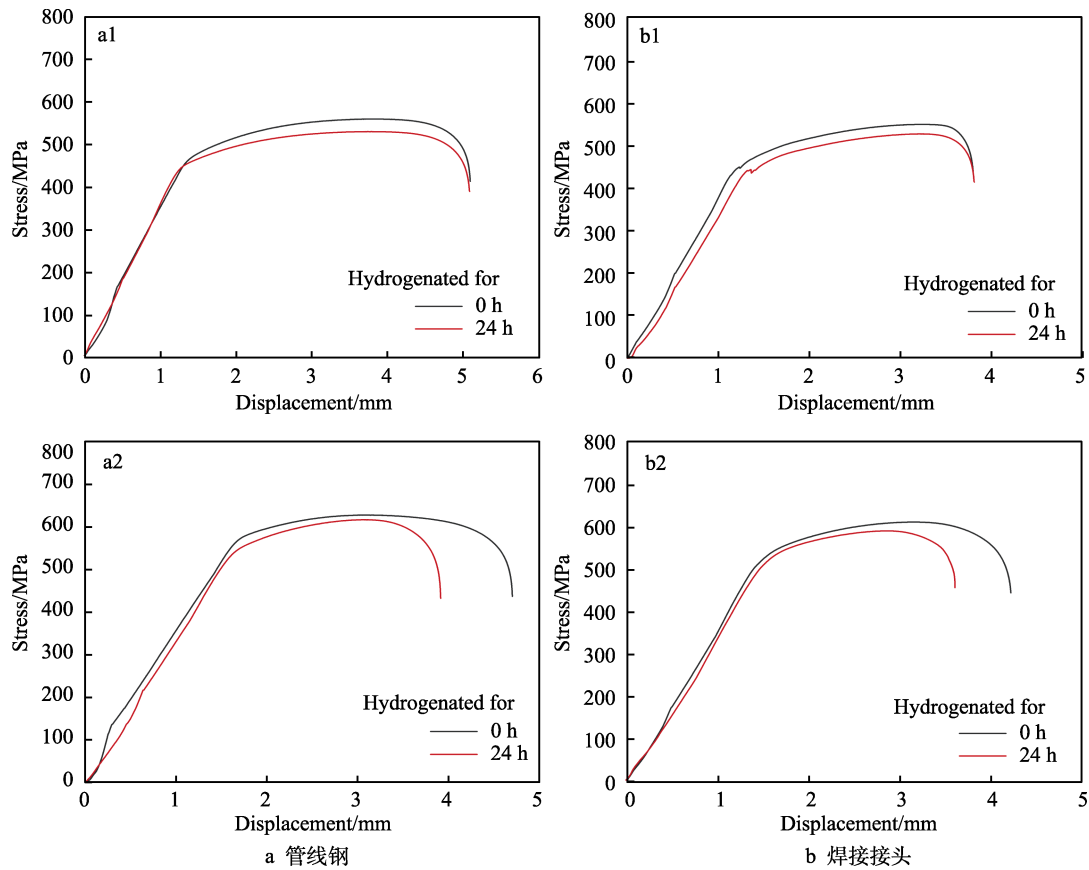


图 5 X60 (a1, b1)与 X70(a2, b2)管线钢及其焊接接头试样的拉伸应力-位移曲线
Fig.5 Tensile stress-displacement curves of X60 (a1, b1) and X70 (a2, b2) pipeline steel and their welded joint samples: a) pipeline steels; b) welded joints

表 2 有、无渗氢 X60 管线钢及其焊接接头试样的拉伸力学性能
Tab.2 Tensile properties of X60 pipeline steel and welded joint samples with/without hydrogenation

Samples	Conditions	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	I_{EI} /%	Fracture position
Pipeline steel	Non-hydrogenation	467.2±6.8	564.0±4.9	23.1±0.3	—	—
	Hydrogenation	454.3±5.7	534.5±9.4	23.0±0.2	0.4	—
Welded joint	Non-hydrogenation	453.7±8.8	553.6±11.6	15.5±0.4	—	HAZ
	Hydrogenation	447.5±6.2	531.3±5.7	15.0±0.2	3.2	HAZ

表 3 有、无渗氢 X70 管线钢及其焊接接头试样的拉伸力学性能
Tab.3 Tensile properties of X70 pipeline steel and welded joint samples with/without hydrogenation

Samples	Conditions	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$I_{EI}/\%$	Fracture position
Pipeline steel	Non-hydrogenation	579.0±5.3	631.9±4.6	19.4±0.7	—	—
	Hydrogenation	547.3±11.7	621.1±1.9	15.3±0.3	21.1	—
Welded joint	Non-hydrogenation	521.9±8.3	611.9±10.0	17.3±1.1	—	HAZ
	Hydrogenation	518.2±6.9	598.9±8.1	13.5±0.5	22.0	HAZ

基于表 2、3 中的数据, 计算得到在渗氢后 X60 管线钢及其焊接接头试样的 R_m 和 $R_{p0.2}$ 分别下降了 5.2%、2.8%和 4.0%、1.3%; 同时, 渗氢对试样的断后伸长率 (A) 值影响很小, 仅分别下降了 0.4%和 3.2%。至于文献[13]报道的 X60 钢试样在氢气环境中拉伸时变形量增大, 出现软化的研究结果, 则主要是由于试样在氢气环境中拉伸时, 氢原子仅吸附于试样表面, 而未进入试样内部导致的。可见, X60 管线钢及其焊接接头在渗氢后的力学性能均有所降低, 强度的降幅较大, 塑性的变化不明显, 氢脆敏感性很小。相比而言, 渗氢 X70 管线钢及其焊接接头试样的 R_m 和 $R_{p0.2}$ 比未渗氢试样分别下降了 1.7%、5.5%和 2.1%和 0.7%。但更为显著的是, 渗氢导致 X70 管线钢及其焊接接头试样的 A 值分别大幅下降了 21.1%和 22.0%, 大大超过 X60 管线钢及其焊接接头试样的 A 值降幅, 氢脆敏感性显著增加。

Nanninga 等^[17]的研究表明, 随着管线钢等级的提高, 其氢脆敏感性也相应提高。李均平^[24]的研究也表明, 电化学渗氢 X70 管线钢的 R_m 变化不超过 3%, 而 A 降低了 21.4%, 与本研所得结果基本相同。Hardie 等^[25]研究了 X60、X80 和 X100 3 种不同强度等级管线钢的氢致损伤行为。发现氢原子在铁素体-珠光体晶界处偏聚, 拉伸时试样在晶界产生微裂纹, 导致试样发生氢脆, 且裂纹的数量随着钢强度等级的提高而增多。在本研究中, X60 管线钢及其焊接接头的氢脆敏感性指数均远低于 X70 管线钢及其焊接接头。此外, X60 和 X70 管线钢焊接接头较相应母材具有更高的氢脆敏感性, 这可能与焊接接头热影响区具有更高的氢扩散系数和更低的氢溶解度等的因素有关^[26]。

2.4 断口形貌

未渗氢 X60 管线钢试样拉伸断口呈现典型的韧窝聚集型韧性断裂特征, 韧窝呈等轴状, 密度大, 大小均匀 (图 6a1)。未渗氢 X70 管线钢试样拉伸断口形貌与图 6a1 类似, 但因 X70 组织的均匀性不如 X60 (图 3a1~a2), 导致 X70 管线钢试样拉伸断口上的韧窝大小不均匀, 大的韧窝底部有较大尺寸的夹杂物颗

粒, 且韧窝大小、深浅不一 (图 6a2)。与 X60 相比, X70 管线钢试样的塑性变形协调性较低, 塑性较差 (表 2、3, 图 5a1、a2)。如图 6b1~b2 所示, 渗氢后的 X60、X70 管线钢试样拉伸断口仍然呈现韧窝聚集型韧性断裂特征, 但塑性变形能力明显降低, 断面较图 61a~a2 平整, 塑性降低 (表 2、3, 图 5a1、a2)。由于本文仅针对拉伸试样进行单面电解渗氢, 渗氢部位与未渗氢部位的强度与塑性变形能力存在差异, 导致拉伸变形过程中试样有效截面上的应力分布不均匀, 因而, 韧窝沿三维方向的生长不均匀, 渗氢管线钢试样断口上不能形成像图 6a1~a2 那样的等轴韧窝, 而是存在剪切韧窝。由于 X60 管线钢试样的渗氢程度较低, 渗氢试样拉伸时剪切塑性变形小, 因此, 渗氢 X60 管线钢试样拉伸断口上韧窝的形态变化也较渗氢 X70 管线钢试样小。

有、无渗氢 X60 管线钢焊接接头试样拉伸断裂位置均位于热影响区。如图 3b1 所示, X60 管线钢焊接接头热影响区为针状铁素体、板条状贝氏体和粒状贝氏体的混合组织, 未渗氢 X60 管线钢焊接接头试样拉伸断裂裂纹易沿热影响区中的针状铁素体与贝氏体基体界面结合处扩展^[27]。由于在铁素体与原奥氏体界面上析出的碳化物尺寸更大, 所以形成一系列较大尺寸的韧窝 (图 6c1 上虚线所示), 导致试样变形协调性明显降低, 相对于 X60 管线钢试样, 其焊接接头试样的断后伸长率下降约 6% (表 2)。X70 管线钢焊接接头的热影响区由粒状贝氏体和少量的针状铁素体构成 (图 3b2), 针状铁素体的量少, 其对热影响区塑性变形均匀性的影响也较小, 因此, 未渗氢 X70 管线钢焊接接头试样拉伸断口上的等轴韧窝大小与分布均匀, 其断后伸长率比 X70 管线钢试样也仅下降约 2% (表 3, 图 6c2)。电解渗氢分别在 X60、X70 管线钢焊接接头试样的热影响区形成一定深度的氢脆区 (图 6d1~d2)。氢脆区域的塑性变形能力显著降低, 脆性明显增大, 尤其是渗氢 X70 管线钢焊接接头试样, 其氢脆区断口已呈现明显的准解理断裂特征。可见, 电解渗氢对 X70 及以上等级管线钢焊接接头试样热影响区的影响最为显著, 应作为充氢天然气输送管线重点关注的部位。

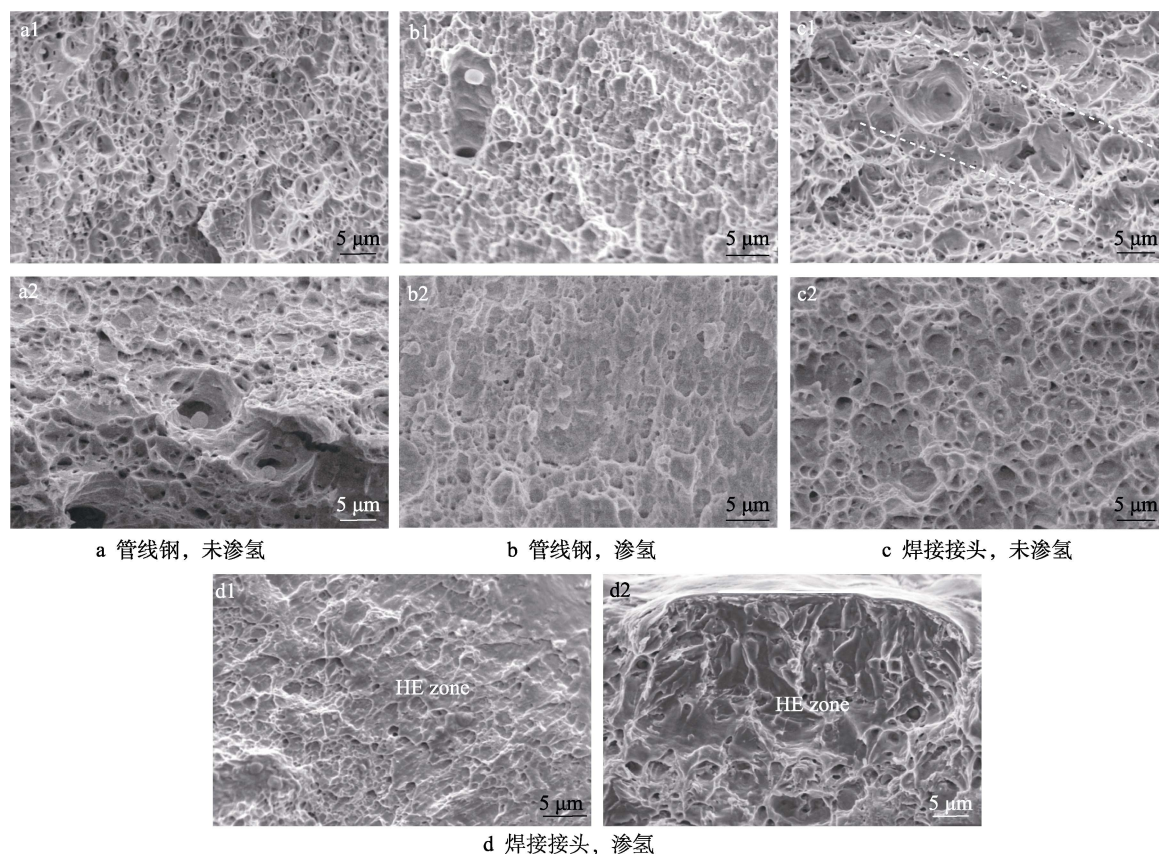


图 6 有、无渗氢 X60 (a1, b1, c1, d1) 及 X70 (a2, b2, c2, d2) 管线钢及其焊接接头试样的拉伸断口形貌

Fig.6 Tensile fractographies of X60 (a1, b1, c1, d1) and X70 (a2, b2, c2, d2) pipeline steel and welded joint samples with/without hydrogenation: a) pipeline steels, non-hydrogenation; b) pipeline steels, hydrogenation; c) welded joints, non-hydrogenation; d) welded joints, hydrogenation

3 结论

1) X60 及 X70 管线钢显微组织以细小多边形铁素体为主, 焊缝和热影响区的显微组织以粗大的粒状贝氏体为主, 焊接接头母材的显微组织更优, 因而具有更高的综合力学性能。

2) 电解渗氢 X70 管线钢及其焊接接头中位错、晶界和相界等缺陷位置捕获的氢原子在温度达到 125 °C 左右时脱附, 由于焊接接头试样内部的显微组织更加复杂, 缺陷更多, 渗氢焊接接头试样的氢脱附曲线在 125~200 °C 呈平台状, 氢脱附强度也较渗氢 X70 管线钢试样大, 表明其焊接接头试样中溶入了更多的氢原子。

3) 电解渗氢导致 X60、X70 管线钢及其焊接接头的力学性能均有所降低。相比较而言, 2 种管线钢焊接接头的氢脆敏感性较相应的母材高, 而 X70 管线钢及其焊接接头的氢脆敏感性又明显高于 X60 管线钢及其焊接接头, X70 焊接接头的氢脆敏感性最高。

4) 电解渗氢导致管线钢及其焊接接头试样拉伸断口形貌发生变化, 渗氢管线钢断口上分布着剪切韧窝, 在其焊接接头热影响区断口上可见一定深度的氢脆区, 渗氢 X70 焊接接头试样氢脆区呈现明显的准解理断裂特征。

参考文献:

- [1] 肖伟. “双碳” 战略下 传统煤电突围路径的思考与实践 [J]. 能源, 2022(8): 44-46.
XIAO W. Thinking and Practice of Traditional Coal-Electricity Breakthrough Path under the "Double Carbon" Strategy[J]. Energy, 2022(8): 44-46.
- [2] STILLER C, BÜNGER U, MØLLER-HOLST S, et al. Pathways to a Hydrogen Fuel Infrastructure in Norway[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(7): 2597-2601.
- [3] RIVAROLO M, MARMI S, RIVEROS-GODOY G, et al. Development and Assessment of a Distribution Network of Hydro-Methane, Methanol, Oxygen and Carbon Dioxide in Paraguay[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77: 680-689.
- [4] LYSENG B, NIET T, ENGLISH J, et al. System-Level Power-to-Gas Energy Storage for High Penetrations of Variable Renewables[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(4): 1966-1979.
- [5] 国家发展改革委, 国家能源局. 能源技术革命创新行动计划(2016-2030 年) [EB/OL]. (2016-06-01) [2022-12-16]. <http://www.gov.cn/xinwen/2016-06/01/5078628/files/d30fbc1ca23e45f3a8de7e6c563c9ec6.pdf>.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Action Plan for Innovation in

- Energy Technology Revolution (2016-2030) [EB/OL]. (2016-06-01)[2022-12-16]. <http://www.gov.cn/xinwen/2016-06/01/5078628/files/d30fbc1ca23e45f3a8de7e6c563c9ec6.pdf>.
- [6] HANLEY E S, DEANE J, GALLACHÓIR B Ó. The Role of Hydrogen in Low Carbon Energy Futures—A Review of Existing Perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 3027-3045.
- [7] 中国城市燃气协会. 城镇燃气聚乙烯(PE)输配系统[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- CHINA Gas Association. Urban Gas Polyethylene (PE) Transmission and Distribution System[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [8] AHLUWALIA R K, HUA T Q, PENG J K. On-Board and Off-Board Performance of Hydrogen Storage Options for Light-Duty Vehicles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(3): 2891-2910.
- [9] ZHENG J Y, LIU X X, XU P, et al. Development of High Pressure Gaseous Hydrogen Storage Technologies[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(1): 1048-1057.
- [10] KANE M C. Permeability, Solubility, and Interaction of Hydrogen in Polymers—an Assessment of Materials for Hydrogen Transport: WSRC-STI-2008-00009[R]. Aiken: Savannah River Site, 2008.
- [11] SANJUAN R. Studies of Corrosion and Stress Corrosion Cracking Behavior of High-strength Pipeline Steels in Carbonate-bicarbonate Solutions[D]. Calgary: University of Calgary, 2008.
- [12] 赵颖, 王荣. X70 管线钢电化学充氢后的力学行为研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2004, 24(5): 293-296.
- ZHAO Y, WANG R. An Investigation on Mechanical Behaviors of Pipeline Steel X70 after Electrochemical Hydrogen Charging[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2004, 24(5): 293-296.
- [13] ARAÚJO B A, TRAVASSOS G D, ALMEIDA SILVA A, et al. Experimental Characterization of Hydrogen Embrittlement in API 5L X60 and API 5L X80 Steels[J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 478: 34-39.
- [14] CHATZIDOUROS E V, PAPAOGLOU V J, TSIOURVA T E, et al. Hydrogen Effect on Fracture Toughness of Pipeline Steel Welds, with in Situ Hydrogen Charging[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(19): 12626-12643.
- [15] ZHOU C S, YE B G, SONG Y Y, et al. Effects of Internal Hydrogen and Surface-Absorbed Hydrogen on the Hydrogen Embrittlement of X80 Pipeline Steel[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(40): 22547-22558.
- [16] 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.
- AN T. Study on the Fatigue Damage Behavior of X80 Pipeline Steel in Hydrogen Environment[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [17] NANNINGA N E, LEVY Y S, DREXLER E S, et al. Comparison of Hydrogen Embrittlement in Three Pipeline Steels in High Pressure Gaseous Hydrogen Environments[J]. *Corrosion Science*, 2012, 59: 1-9.
- [18] 滕越, 陈国宏, 魏金韬, 等. III型储氢气瓶内胆 6061-T6 铝合金的氢致损伤研究进展[J]. *装备环境工程*, 2021, 18(4): 103-108.
- TENG Y, CHEN G H, WEI J T, et al. Research Progresses of Hydrogen Induced Damage of the 6061-T6 Alloy Used as Liner of Type III Hydrogen Storage Cylinder[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(4): 103-108.
- [19] 顾弘, 周仲柏, 陶映初, 等. 氢在金属中的扩散——(III)硫脲及其衍生物在盐酸介质中对钢铁渗氢影响的研究[J]. *武汉大学学报(自然科学版)*, 1982, 28(2): 57-68.
- GU H, ZHOU Z B, TAO Y C, et al. Diffusion of Hydrogen in Metals: (III) Study on the Effect of Thiourea and Its Derivative on Hydrogen Penetration Rate in Iron-Steel in Hydrochloric Acid[J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 1982, 28(2): 57-68.
- [20] 蒲霞. N18 铝合金电解渗氢及渗氢后力学行为研究[D]. 成都: 西华大学, 2011.
- PU X. The Study on Electrolytic Hydrogenation of the N18 Zircaloy and the Mechanical Behaviors of the N18 Zircaloy Containing Hydrogen[D]. Chengdu: Xihua University, 2011.
- [21] MORO I, BRIOTTET L, LEMOINE P, et al. Hydrogen Embrittlement Susceptibility of a High Strength Steel X80[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(27/28): 7252-7260.
- [22] PÉREZ E D, DUPREZ L, ATRENS A, et al. Influence of Experimental Parameters on Thermal Desorption Spectroscopy Measurements during Evaluation of Hydrogen Trapping[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, 450(1-3): 32-41.
- [23] PENG Z X, LIU J, HUANG F, et al. Comparative Study of Non-Metallic Inclusions on the Critical Size for HIC Initiation and Its Influence on Hydrogen Trapping[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(22): 12616-12628.
- [24] 李均平. 电化学充氢条件下 X70 管线钢的力学性能研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2007.
- LI J P. Study on Mechanical Properties of X70 Pipeline Steel under Electrochemical Hydrogen Charging Condition[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2007.
- [25] HARDIE D, CHARLES E A, LOPEZ A H. Hydrogen Embrittlement of High Strength Pipeline Steels[J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(12): 4378-4385.
- [26] 张体明, 王勇, 赵卫民, 等. 高压煤制气环境下 X80 钢及热影响区的氢渗透参数研究[J]. *金属学报*, 2015, 51(9): 1101-1110.
- ZHANG T M, WANG Y, ZHAO W M, et al. Hydrogen Permeation Parameters of X80 Steel and Welding Haz under High Pressure Coal Gas Environment[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(9): 1101-1110.
- [27] MOHTADI-BONAB M A, MASOUMI M, SZPUNAR J A. A Comparative Fracture Analysis on As-Received and Electrochemically Hydrogen Charged API X60 and API X60SS Pipeline Steels Subjected to Tensile Testing[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 129: 105721.