

文章编号: 1000-8241(2022)03-0302-09

X80 钢组织状态对 CO 抑制氢脆作用的影响

王琴¹ 李文昊² 伍奕¹ 李小双² 谢萍¹ 赵卫民²

1. 管网集团(新疆)联合管道有限责任公司; 2. 中国石油大学(华东)材料科学与工程学院

摘要: CO 可抑制氢分子在管道内壁的吸附,有效降低输氢管道发生氢脆的风险,是保证在役管道安全输氢的潜在方式,但 CO 对氢脆指数的影响度与钢材的材料组织状态有关。以 X80 钢为研究对象,针对母材、预应变母材及两种根焊缝,通过在氮气、氢气、氢气+0.1% CO(分压,下同)3种环境中进行慢应变速率拉伸实验,研究不同状态管体的氢脆指数及 CO 影响度。结果显示,母材、预应变母材、自动焊缝、手工焊缝在 12 MPa 纯氢中的氢脆指数分别为 35.75%、43.72%、39.28%、33.66%,均具有极高的氢脆失效风险;加入 CO 可显著降低材料的氢脆敏感性,0.1% CO 可使上述 4 类试样的氢脆指数分别降低至 15.66%、17.54%、23.16%、25.33%,其中手工焊缝的降低程度最小,是实验对象中受 CO 影响程度最小的一类。建议后续针对手工焊缝区域,研究不同氢分压下足以抑制氢脆发生的最低 CO 加入量。(图 6,表 3,参 35)

关键词: X80 钢; 输氢管道; CO; 氢脆; 焊缝

中图分类号: TE832

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The effect of X80 steel microstructure on CO inhibition of hydrogen embrittlement

WANG Qin¹, LI Wenhao², WU Yi¹, LI Xiaoshuang², XIE Ping¹, ZHAO Weimin²

1. PipeChina (Xinjiang) United Pipeline Co. Ltd.;

2. College of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum (East China)

Abstract: Carbonic oxide (CO) can effectively reduce the risk of hydrogen embrittlement (HE) of hydrogen pipelines by inhibiting the adsorption of hydrogen molecules on the inner wall, which provides a potential solution to ensure the safe hydrogen transportation by the in-service pipelines. However, the influence of CO on HE index is related to the microstructure of steel materials. A case study was carried out to X80 steel, for which slow strain rate tension tests were conducted on the base material, pre-strained base material and two different types of root weld under the conditions of nitrogen, hydrogen and hydrogen + 0.1% CO (by partial pressure, the same below), so as to study the HE index and CO influence degree of pipe body in different states. According to the results, the HE indexes of the base material, pre-strained base material, automatic weld and manual weld under the condition of 12 MPa pure hydrogen are 35.75%, 43.72%, 39.28% and 33.66%, respectively, showing a very high risk of hydrogen embrittlement. However, the hydrogen embrittlement sensitivity could be reduced greatly with the addition of CO. Specifically, adding 0.1% CO can lower the HE index of the four kinds of specimens to 15.66%, 17.54%, 23.16% and 25.33%, respectively. Among them, the HE index of manual weld has the minimum reduction, which is least affected by CO among the studying objects. Therefore, it is recommended to study the minimum CO addition that could inhibit the HE at various hydrogen partial pressures for the manual weld area in future. (6 Figures, 3 Tables, 35 References)

Key words: X80 steel, hydrogen pipeline, CO, hydrogen embrittlement, weld

各类含氢气体运输方式中,管道输送价格最低,运输距离适应性广,但新建氢气专输管道的建设成本高、

审批困难^[1-3]。利用已有成熟的天然气管道设施,在不必对设备设施进行专门处理和改造的前提下注入氢

气,有望实现氢气的大规模输送,大幅降低氢气输送成本,提高管道输氢的经济性^[4]。但氢气、注氢天然气、含氢煤制气等的输送将使管道服役于高压临氢环境之中,环境中的氢气将在管道表面吸附、分解、扩散后进入管线钢内部,导致临氢管线钢出现氢致脆化现象^[5-7],严重威胁管道安全。

控制管道氢脆风险有 3 个可选方案:①研发抗氢钢^[8-9],提高钢自身抗氢脆能力;②通过表面处理,在钢表面形成阻碍氢渗透的保护膜^[10-11],即阻氢涂层;③通过改变氢的作用环境,影响氢的吸附、解离过程,减少扩散氢含量。对于在役管道,更换钢种以及现场制备阻氢涂层不具备可行性,因此,只能通过改变氢的作用环境来控制管道氢脆风险。研究显示,CO 可占据氢气在铁表面的吸附位,从而起到抑制氢脆的作用^[12-13]。实验证实 10 MPa 氢气中加入 0.001 MPa CO 后,X80 钢的氢致塑性损失率从 42.25% 降至 11.56%^[14],CO 具有类似缓蚀剂的作用,少量加入即可抑制氢脆的发生。目前,有关 CO 抑制氢脆的研究均针对管线钢母材开展^[12-14]。实际上,管线钢在服役过程中存在不同的组织状态,如根焊缝与母材之间存在成分与组织差异^[15-17]、弯管区域存在预应变等,CO 与氢的竞争吸附行为可能随之发生变化,进而影响 CO 降低氢致塑性损失的程度,需针对受 CO 影响最弱(即同样 CO 加入量下抑制氢脆效果最差)的组织状态开展研究,得到足以抑制氢脆的 CO 最小加入量,以有效降低管道各部分的氢脆风险。因此,明确受 CO 影响最弱的组织状态是整个研究的首要工作。以 X80 钢为研究对象,制备母材、预应变母材及根焊缝试样,研究组织状态在 CO 抑制钢材环境氢脆作用方面的影响,以 CO 影响度最低的区域作为最危险工况,用于后续研究不同氢压下足以抑制氢脆失效的最低 CO 浓度。相关研究成果对于利用 CO 气体抑制输氢管道氢脆的安全设计具有指导意义。

1 实验材料与方法

X80 钢母材厚度 18.4 mm,开单面 V 形坡口,钝边高度为 1 mm,坡口角度为 44°,采用现场施工常用的两种根焊工艺制备焊缝:①自动焊缝采用 ER70S-G 焊丝进行表面张力过渡焊接,焊接电流 120~130 A,焊接电压 17~18 V,焊接速度 3.18 mm/s;②手工焊缝采用 E7016 焊条进行手工电弧焊,焊接电流 80~100 A,焊接

电压 22~24 V,焊接速度 1.35 mm/s,焊后利用光谱法分析母材及两种焊缝的化学成分(表 1)。

表 1 X80 钢母材及两种焊缝化学成分表

材料类型	质量分数					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
母材	0.060%	0.270%	1.810%	0.011%	0.002%	0.020%
自动焊缝	0.080%	0.910%	1.520%	0.013%	0.012%	0.017%
手动焊缝	0.080%	0.600%	0.940%	0.020%	0.012%	0.030%

材料类型	质量分数					
	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Al
母材	0.300%	0.310%	0.280%		0.015%	
自动焊缝	0.004%	0.005%	0.100%	0.003%	0.003%	0.002%
手动焊缝	0.012%	0.007%	0.029%	0.016%	0.004%	0.008%

材料类型	质量分数					
	B	Sn	Co	Nb	W	Fe
母材				0.070%		96.852%
自动焊缝	0.001%	0.003%	0.008%	0.007%	0.075%	97.237%
手动焊缝	0.002%	0.004%	0.014%	0.007%	0.045%	98.170%

将 X80 钢母材与两种焊缝分别加工成棒状拉伸试样(图 1)。随后,取部分母材试样进行预应变。李守英等^[18]通过第一性原理计算,研究了应变对 CO 抑制氢吸附作用的影响,发现拉应变对降低氢在 Fe(110) 面的覆盖有不利作用,且拉应变越大,不利作用越明显。为明确 CO 抑制氢脆作用最弱的组织状态,采用 X80 钢允许发生的最大拉应变作为预应变。取 3 个母材拉伸试样,遵照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》的规定,在 WDW-300e 型万能试验机上进行拉伸,获得相应的载荷-位移曲线,确定 3 个试样开始发生颈缩时的变形量分别为 3.614 79 mm、3.978 34 mm、3.875 84 mm,为避免后续制备预应变试样过程中出现颈缩,取 3.5 mm 作为 X80 钢最大允许变形量,拉伸速率取 2 mm/min,达到预变形量后卸载,对应预应变量为 11.67%。

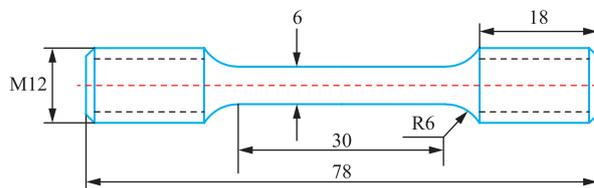


图 1 X80 钢母材及两种焊缝的棒状拉伸试样尺寸图(mm)

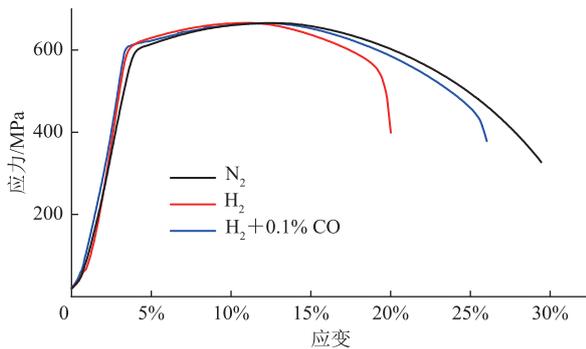
选用 CORTEST 高温高压慢应变速率拉伸试验机,针对两种焊缝试样与预变形前后的母材试样,在氮气、12 MPa 氢气、12 MPa 氢气+0.1% CO(分压,下同)3 种环境中进行慢应变速率拉伸实验,实验温度为 40 °C ± 1 °C,应变速率为 1 × 10⁻⁵ s⁻¹。遵照 ASTM G142-1998 (2016)《测定高压、高温或者两者条件下含氢环境中金

属脆化敏感性的标准试验方法》进行氢气环境的慢应变速率拉伸实验并获取应力-应变曲线,同种试样、相同环境的实验重复3次,以消除结果的随机性。试样断裂后,使用JSM-7200F扫描电子显微镜观察断口形貌。

2 结果与讨论

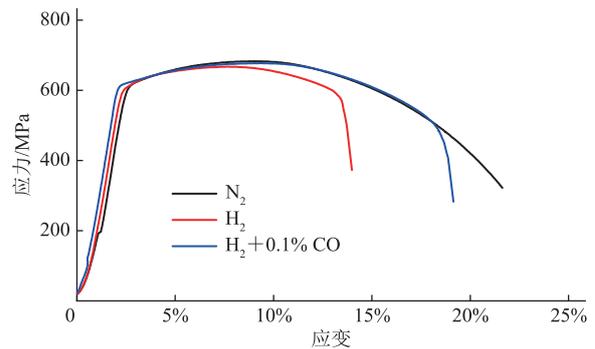
2.1 应力-应变曲线

由4种试样在3种气体环境中进行的慢应变速率

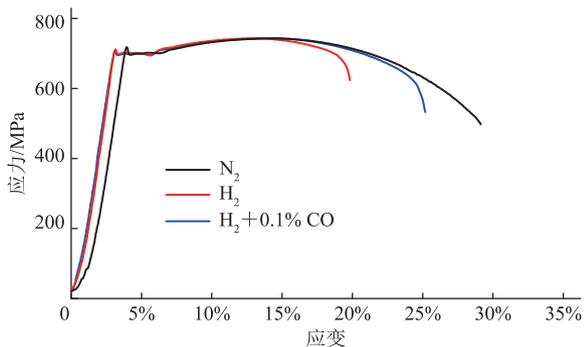


(a) 母材

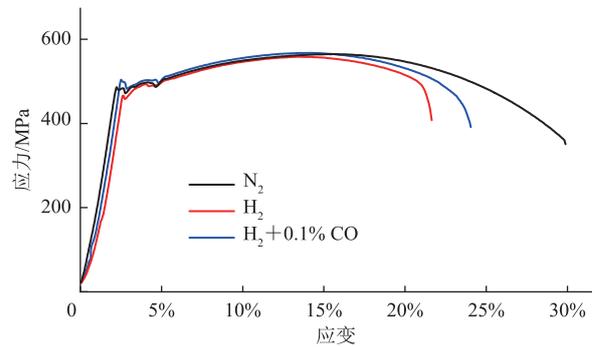
拉伸实验所得的应力-应变曲线(图2)可知:预应变前后母材的应力-应变曲线均不存在屈服平台,而焊缝试样的应力-应变曲线存在明显的屈服平台;各试样在各实验环境中呈现出相似的变化规律,气体环境的变化主要影响材料的总应变变量与静力韧度(曲线包络面积),对拉伸试样颈缩前的力学行为影响很小。材料在氮气环境中具有最好的塑性及韧性,而氢气环境导致总应变变量及静力韧度显著减小,加入CO可使材料的塑性及韧性得到明显恢复。



(b) 预应变母材



(c) 自动焊缝



(d) 手工焊缝

图2 X80钢4种试样在3种气体环境中进行慢应变速率拉伸实验所得的应力-应变曲线

2.2 力学性能参数

氢致塑性损失的常用评价指标是延伸率、断裂应变或断面收缩率,若充氢后塑性指标的改变量很小,也可用抗拉强度的变化评价氢脆敏感性^[19]。提取试样在实验气体环境中的抗拉强度值,测算断后伸长率及断面收缩率(表2),可知:预应变使X80钢的断后伸长率、断面收缩率、抗拉强度稍有降低,重复实验的结果互有交叉,无一致性规律,说明预应变对X80钢的常规力学性能影响不明显;在4类试样中,自动焊缝的强度最高、塑性最差,手工焊缝的强度最低,但塑性优于自动焊缝。

所有实验结果均显示氢的存在将显著降低塑性指标,而加入CO可使塑性得到不同程度的恢复。选用

断面收缩率衡量材料的氢脆敏感性,相对氮气环境,氢环境降低材料断面收缩率的程度可用氢脆指数 F ^[20-22]表示:

$$F = (X_N - X_H) / X_N \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_N 、 X_H 分别为同种试样在氮气、氢气环境下的断面收缩率。

以CO加入前后氢脆指数的变化率表示加入CO使材料塑性恢复的程度,称为CO影响度 I :

$$I = (F_H - F_{H+CO}) / F_H \times 100\% \quad (2)$$

式中: F_H 、 F_{H+CO} 分别为同种试样在纯氢、加有CO的氢气中的氢脆指数。

根据式(1)、式(2),计算得到试样在氢环境中的氢脆指数及CO影响度(表3)。张大磊等^[23-25]依据

表 2 X80 钢 4 种试样在 3 种气体环境中的力学性能参数表

试样	环境	断后伸长率	断面收缩率	抗拉强度/MPa	
母材	N ₂	21.00%	78.14%	665.83	
		21.73%	78.60%	701.18	
		24.47%	78.61%	619.73	
	H ₂	19.87%	47.89%	705.69	
		13.67%	48.49%	631.17	
		14.00%	54.84%	666.17	
		20.00%	66.98%	665.13	
		H ₂ +0.1% CO	16.67%	65.07%	652.31
			14.67%	66.45%	652.31
预应变母材	N ₂	24.80%	74.37%	624.23	
		20.00%	80.62%	683.16	
		17.67%	79.78%	660.63	
	H ₂	13.93%	39.40%	667.21	
		15.00%	44.88%	673.11	
		14.53%	47.84%	684.89	
	H ₂ +0.1% CO	16.60%	57.65%	708.81	
		15.00%	58.17%	677.26	
		19.33%	59.48%	686.62	
自动焊缝	N ₂	19.21%	66.17%	742.77	
		19.24%	64.99%	732.37	
		18.53%	65.01%	728.56	
	H ₂	12.80%	41.58%	728.22	
		14.93%	37.60%	737.23	
		14.00%	39.94%	743.47	
	H ₂ +0.1% CO	16.56%	55.34%	734.11	
		19.00%	54.27%	743.47	
		16.67%	52.16%	756.64	
手工焊缝	N ₂	20.17%	72.14%	589.57	
		20.13%	71.60%	564.62	
		24.07%	74.17%	557.34	
	H ₂	16.13%	49.37%	558.38	
		18.00%	48.46%	586.11	
		14.47%	46.73%	561.15	
	H ₂ +0.1% CO	15.60%	56.05%	555.95	
		16.67%	56.04%	567.74	
		15.07%	55.35%	570.51	

表 3 X80 钢 4 种试样在氢环境中的氢脆指数及 CO 影响度表

试样	环境	氢脆指数	CO 影响度
母材	H ₂	35.75%	
	H ₂ +0.1% CO	15.66%	56.20%
预应变母材	H ₂	43.72%	
	H ₂ +0.1% CO	25.33%	42.07%
自动焊缝	H ₂	39.28%	
	H ₂ +0.1% CO	17.54%	55.35%
手工焊缝	H ₂	33.66%	
	H ₂ +0.1% CO	23.16%	31.19%

氢脆指数从经验上进行了安全性划分,认为管线钢的氢脆指数高于 35%,将发生氢脆失效;氢脆指数为 25%~35%,材料存在发生氢脆失效的风险;低于

25%则视为安全。由于各试样在 H₂ 环境中的氢脆指数均超过 33%,因此具有极高的氢脆失效风险,说明 X80 钢不适用于输送纯氢。加入 0.1% CO 后,各试样的氢脆指数均明显降低,因此 CO 可在一定程度上降低管道发生氢脆失效的风险,CO 降低材料氢脆指数的程度与材料状态有关,手工焊缝的 CO 影响度显著低于其他试样。

2.3 断口形貌

观察各试样在 N₂、H₂ 及 H₂+0.1% CO 环境中的断口宏观形貌(图 3),可知:在 N₂ 中,各试样均为典型的杯锥状断口,存在中心纤维区(A 区)和周边剪切唇区(B 区),且有明显的颈缩现象,断面收缩明显;在 H₂ 环境中,断口面积较大,断面收缩不明显,且预变形前后的母材试样中均出现了二次裂纹;加入少量 CO 后,断口面积有所减小,但预变形前后的母材断口中仍存在二次裂纹。需要说明的是,在氮气环境下拉伸,试样的裂纹萌生于试样中部,由内向外扩展;而在含氢环境下拉伸,裂纹萌生于试样外表面(非断口表面存在裂纹),由外而内扩展,因此含氢环境下的拉伸断口与氮气环境下的相比存在较大差异。各断口中均未发现放射区花样,这种现象在塑性较好或极脆材料的材料断口中均有可能出现^[26]。

对 CO 影响度最小的手工焊缝断口放大观察(图 4)。为分析简便,将手工焊缝试样在含氢环境下断口的中心区域标示为 C 区,周边区域根据形貌不同分别标示为 D、E 区(图 3k、图 3l)。可知:手工焊缝试样的中心区域均具有典型的韧窝结构(图 4a、图 4c、图 4f),该部分材料具有良好的塑性变形能力。气体环境的影响主要体现在试样的边缘区域,在 N₂ 环境中,试样的边缘区域仍为韧窝形貌(图 4b);在 H₂ 环境中,试样的 D、E 区均为脆断区域,其中 D 区极为平坦,无撕裂棱特征(图 4d),而 E 区出现有小解理刻面的脆性断口特征(图 4e);加入 CO 后,E 区消失,D 区出现了一些小的撕裂棱(图 4g)。

2.4 讨论

不同管体状态试样的力学性能指标、氢脆指数以及 CO 影响度不同,其出现差异的原因在于各试样化学成分及组织状态的不同。基于母材及两种焊缝的化学成分(表 1),应用 API 5L-2000《管线钢管规范》给出的公式计算碳当量,母材、自动焊缝、手工焊缝的碳当量分别为 0.200%、0.198%、0.162%。通常,碳当量

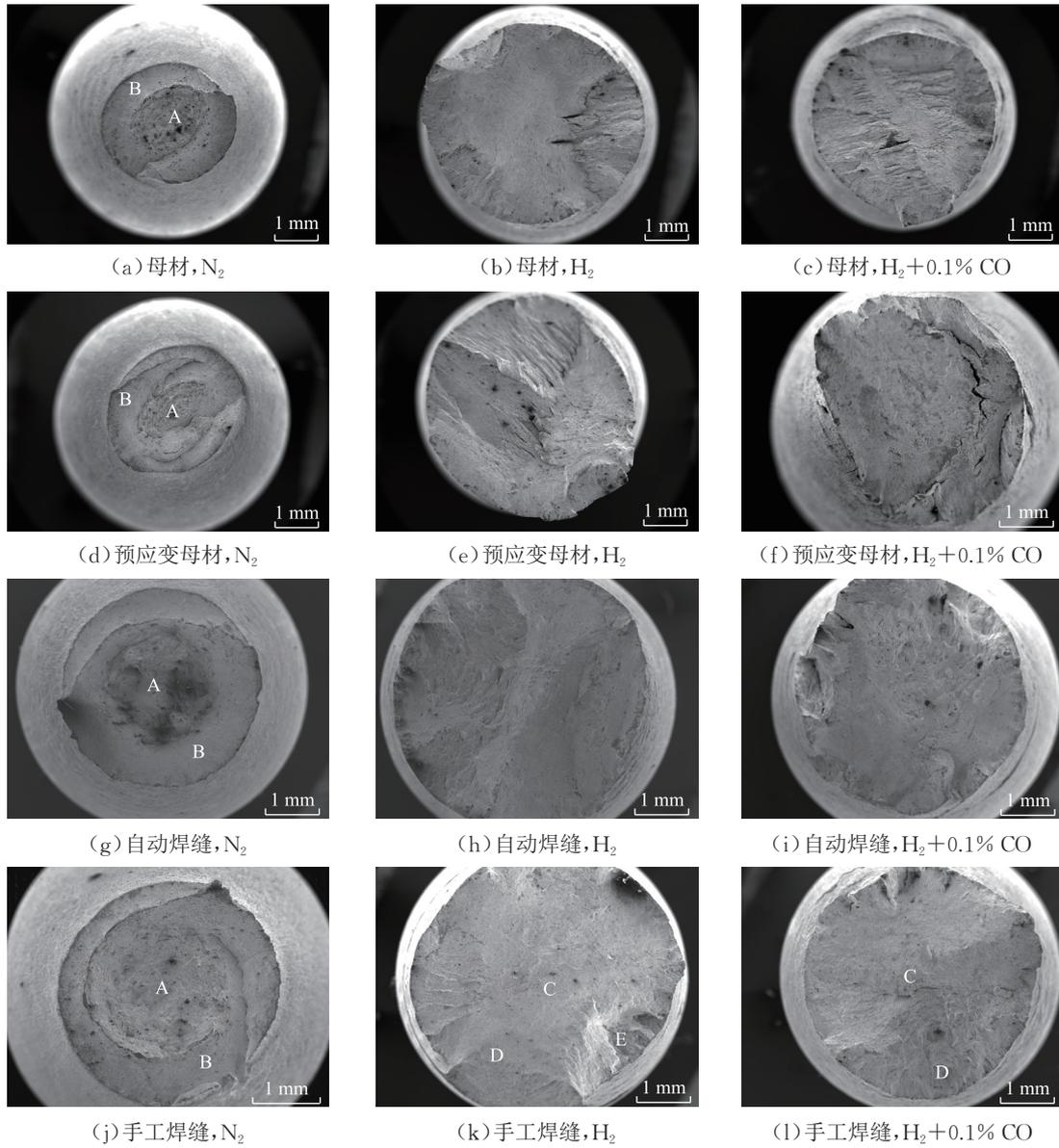


图3 X80钢4种试样在3种气体环境中的断口宏观形貌图

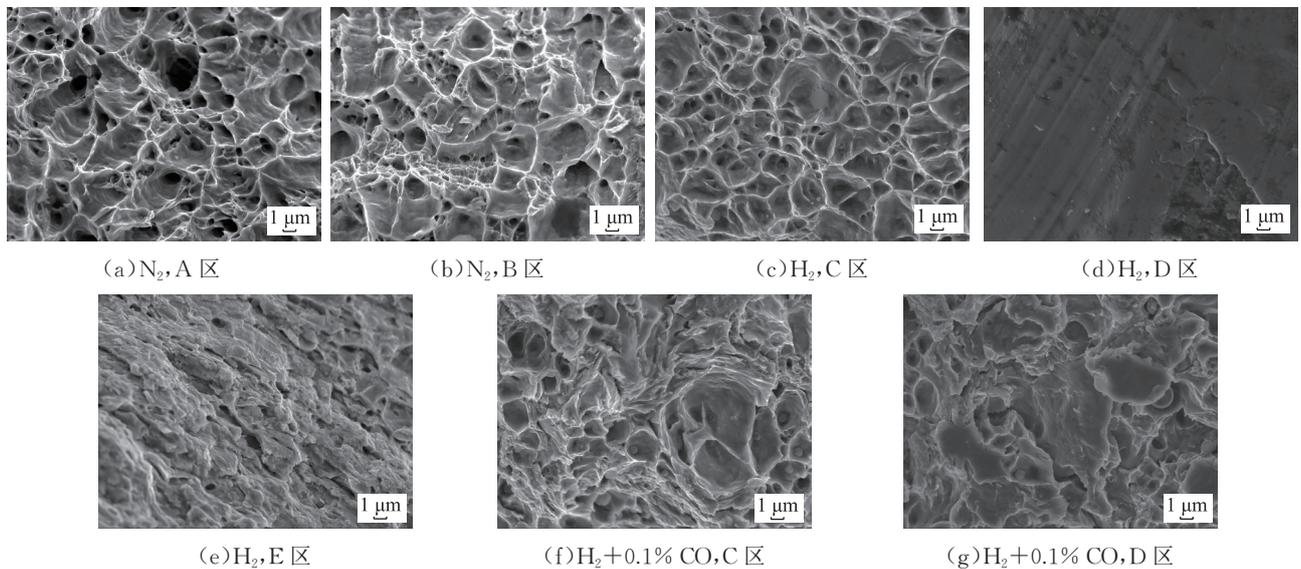


图4 X80钢手工焊缝试样在不同气体环境中的断口微观形貌图

越低,材料的强度越低、塑性相对越好;反之,碳当量越高,材料的强度越高、塑性相对越差。而由表 2 可知:强度由高至低排序为自动焊缝、母材、手工焊缝,而塑性由高至低排序为母材、手工焊缝、自动焊缝。显然,材料强度及塑性的变化与碳当量的变化顺序并不一致,因此组织状态对其有更为显著的作用。

观察各试样的显微组织(图 5):母材为针状铁素体、准多边形铁素体及少量弥散分布的 M-A 组元,晶粒细小;预应变母材组织仍以针状铁素体为主,未发生

明显变化;自动焊缝组织有明显的先共析铁素体,但细小针状铁素体的比例更高;手工焊缝主要由多边形铁素体组成,晶粒较为粗大,但组织较为均匀,其多边形铁素体组织的位错密度^[27]、晶界密度均较低,位错强化与晶界强化作用弱。手工焊缝碳当量低,固溶强化与析出强化的作用弱,因此其强度最低。但是,位错、晶界均是氢陷阱,较低的位错、晶界密度可降低材料受氢影响的程度,实验中手工焊缝氢致塑性损失较小的结果印证了这一观点,后续可针对这一机理继续深入研究。

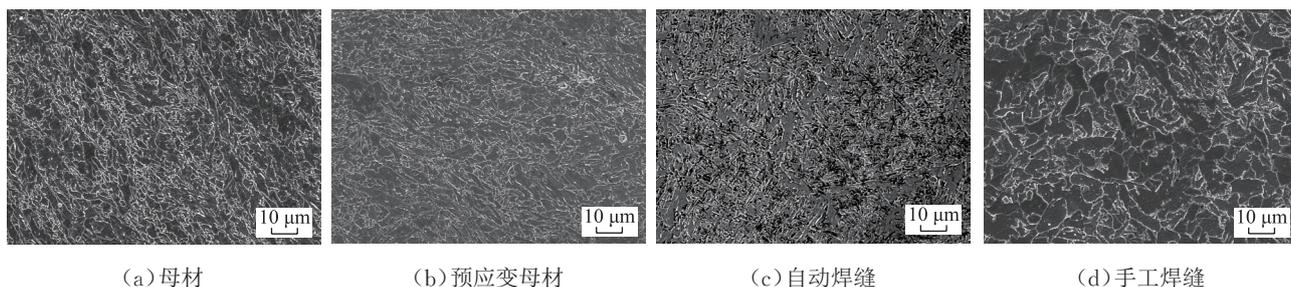


图 5 X80 钢 4 种试样的显微组织形貌图

对于自动焊缝,虽然其碳当量与母材基本一致,但其含有大量细小的针状铁素体,针状铁素体内含有高密度位错以及大量弥散分布的点状析出相^[27],位错强化、析出强化以及晶界强化作用强,虽然先共析铁素体的硬度低,但是细小针状铁素体的影响超过了先共析铁素体的影响,因此其强度最高。析出强化、位错强化均会降低材料的塑性,同时,先共析铁素体的韧性较差^[28],导致自动焊缝塑性较差。

母材的应力-应变曲线表现出无屈服平台的连续屈服现象,而焊缝的应力-应变曲线存在屈服平台,这与母材是轧制态而焊缝是铸造态组织有关。轧制后,弛豫温度降低促进奥氏体向铁素体转变,形成铁素体+M-A 组元(少量)的多相组织,形变硬化率明显增大,表现为连续屈服现象^[29]。焊缝试样在变形过程中,位错反复被溶质原子钉扎、挣脱束缚,在此过程产生明显屈服,所以导致焊缝试样的应力-应变曲线与母材试样相比出现更明显的屈服平台与锯齿状屈服^[30-31]。

材料的氢脆敏感性与其强度及组织有关^[32]。诸多研究显示,高强钢的氢脆敏感性随其强度的升高而升高^[19]。在研究对象中,预应变母材试样的氢脆敏感性最高,其原因是预应变使试样中产生大量位错,而位错是氢陷阱,氢进入钢中钉扎位错,导致材料的塑性变形能力降低。

导致钢发生氢脆的氢,既可以是金属结构成型过程中引入的氢,也可能是服役过程中渗入的氢。环境中的氢分子无法直接渗入金属,必须首先解离成为氢原子。在慢应变速率拉伸实验中,环境中的氢分子做布朗运动,在冲撞试样的过程中首先发生物理吸附,随后解离成氢原子,由表及里逐渐渗入金属内部。试样近表面的氢浓度高于内部浓度,而材料的氢致塑性损失随着氢浓度的升高而增大^[19,33-35],这就是氢环境下拉伸试样的周边区域发生脆化而中心区域仍具有良好塑性的原因(图 4)。另外,试样在颈缩过程中将出现大量滑移台阶与位错、空位等晶格缺陷,氢原子容易吸附在洁净表面以及存在晶体缺陷的高能表面,因此,氢的作用主要体现在材料发生颈缩后的非均匀塑性变形阶段(图 2)。

加入 CO 后, H₂ 与 CO 分子在钢铁材料表面存在竞争吸附。金属材料均具有一定的表面能,材料体系的能量越低状态越稳定。第一性原理计算的结果表明, CO、H₂ 在铁表面的吸附能均为负值,两者的吸附为放热过程,吸附后会降低体系能量^[14]。CO 在 Fe(110) 表面所有优先吸附位的吸附能都更负,说明 CO 吸附后体系的能量更低, CO 可优先占据 H₂ 的吸附位,从而阻碍 H₂ 吸附在金属表面,抑制原子氢的渗入,减少钢铁材料的塑性损失。材料表面存在大量气体吸附位,当 CO 含量很少时, CO 仅能占据少量吸附位;随

着 CO 含量升高, 占据的吸附位增多, 导致氢覆盖度迅速降低。氢的覆盖度越高, 能够渗入金属内部的氢越多, 金属的氢脆敏感性越高, CO 通过降低氢覆盖度降低材料的氢脆敏感性。由不同应变作用下 10 MPa 氢气中 CO 分压与氢覆盖度之间关系曲线(图 6)^[18]可知: 拉应变使 CO 分压与氢覆盖度的关系曲线右移, 致使同样 CO 加入量下的氢覆盖度升高, 与预应变试样的 CO 影响度弱于母材试样的实验结果相符。目前, 尚未有针对不同组织状态的相关文献报道, 可以推测晶界密度、位错密度、析出相等的变化引起曲线移动, 致使同一 CO 加入量抑制不同类型试样氢致塑性损失的程度不同。

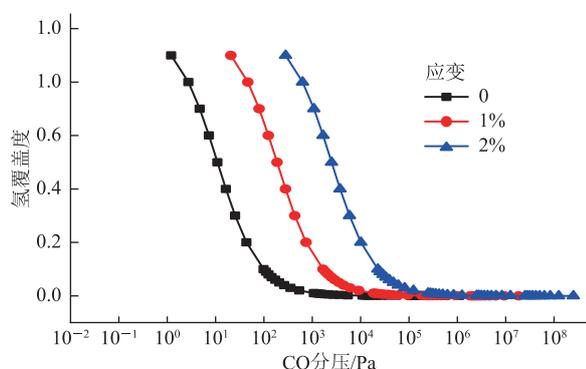


图 6 不同应变作用下 10 MPa 氢气中 CO 分压与氢覆盖度关系曲线

3 结论

(1) X80 钢母材、焊缝在 12 MPa 纯氢中的氢致塑性损失率均超过 33%。在氢环境中, 各试样的总应变与静力韧度均显著减小, 使用在役管道输送高压氢气存在极高的氢脆失效风险。在氢气中加入 0.1% CO 即可显著降低材料的氢脆指数, 改变气体组成以抑制氢脆, 是使用在役管道安全输氢的可行方案。

(2) 在 CO 添加量相同的情况下, 不同组织状态的同种材料, 其氢脆指数及其降幅不同, 其中手工焊缝的氢脆指数及其降幅均最小, 这可能与其位错、晶界密度较低有关, 后续可针对这一现象继续深入研究。

(3) 塑性拉应变可显著提高 X80 钢的氢脆指数, 这一现象与氢覆盖度及位错密度升高、氢的吸附与捕集被促进有关。在实际工程中, 材料多受拉应力, 对此现象应重点关注。

(4) 建议后续针对手工焊缝, 研究不同氢分压下足以抑制氢脆发生的最低 CO 加入量, 以确定实际应用

时足以抑制氢脆的 CO 最小加入量, 保证利用现有管道输送氢气的安全性。

参考文献:

- [1] HANLEY E S, DEANE J P, Ó GALLACHÓIR B. The role of hydrogen in low carbon energy futures - a review of existing perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82(Part 3): 3027-3045.
- [2] SYRI S, LEHTILÄ A, EKHOLM T, SAVOLAINEN I, HOLTINEN H, PELTOLA E. Global energy and emissions scenarios for effective climate change mitigation—deterministic and stochastic scenarios with the TIAM model[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, 2(2): 274-285.
- [3] PAGE S, KRUMDIECK S. System-level energy efficiency is the greatest barrier to development of the hydrogen economy[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(9): 3325-3335.
- [4] MESSAOUDANI Z L, RIGAS F, HAMID M D B, CHE HASSAN C R. Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: a critical review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(39): 17511-17525.
- [5] ZHAO W M, ZHANG T M, ZHAO Y J, SUN J B, WANG Y. Hydrogen permeation and embrittlement susceptibility of X80 welded joint under high-pressure coal gas environment[J]. *Corrosion Science*, 2016, 111: 84-97.
- [6] ZHANG T M, ZHAO W M, DENG Q S, JIANG W, WANG Y L, WANG Y, et al. Effect of microstructure inhomogeneity on hydrogen embrittlement susceptibility of X80 welding HAZ under pressurized gaseous hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(39): 25102-25113.
- [7] DENG Q S, ZHAO W M, JIANG W, ZHANG T M, LI T T, ZHAO Y J. Hydrogen embrittlement susceptibility and safety control of reheated CGHAZ in X80 welded pipeline[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(4): 1654-1663.
- [8] 李龙飞. 钒对 X80 级管线钢抗氢腐蚀及力学性能影响研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- LI L F. Effects of vanadium on resistance to hydrogen corrosion and mechanical properties in X80 pipeline steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.

- [9] 史显波,严伟,王威,单以银,杨柯. 新型含 Cu 管线钢的抗氢致开裂性能[J]. 金属学报, 2018, 54(10): 1343-1349.
- SHI X B, YAN W, WANG W, SHAN Y Y, YANG K. Hydrogen-induced cracking resistance of novel Cu-bearing pipeline steels[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(10): 1343-1349.
- [10] ZHANG T M, ZHAO W M, ZHAO Y J, OUYANG K, DENG Q S, WANG Y L, et al. Effects of surface oxide films on hydrogen permeation and susceptibility to embrittlement of X80 steel under hydrogen atmosphere[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(6): 3353-3365.
- [11] 王玫,牛栋华,胡琪,辛延波,时洪亮,黄安平. 二维材料调控阻氢涂层研究进展[J]. 化工学报, 2017, 68(增刊 1): 9-17.
- WANG M, NIU D H, HU Q, XIN Y B, SHI H L, HUANG A P. Progress of hydrogen permeation barrier adjusted by two-dimensional materials[J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(S1): 9-17.
- [12] HOLBROOK J H, CIALONE H J, COLLINGS E W, DRAUGLIS E J, SCOTT P M, MAYFIELD M E. Control of hydrogen embrittlement of metals by chemical inhibitors and coatings[M]//GANGLOFF R P, SOMERDAY B P. Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012: 129-153.
- [13] STAYKOV A, KOMODA R, KUBOTA M, GINET P, BARBIER F, FURTADO J. Co-adsorption of CO and H₂ on an iron surface and its implication on the hydrogen embrittlement of iron[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(50): 30265-30273.
- [14] 李守英. 临氢管线 X80 钢氢吸附扩散机理及控制研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- LI S Y. Study on hydrogen adsorption/diffusion mechanism and control of X80 steel hydrogen pipeline[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [15] ZHAO W M, YANG M, ZHANG T M, DENG Q S, JIANG W, JIANG W C. Study on hydrogen enrichment in X80 steel spiral welded pipe[J]. *Corrosion Science*, 2018, 133: 251-260.
- [16] 张体明,王勇,赵卫民,唐秀艳,杜天海,杨敏. 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, TANG X Y, DU T H, YANG M. Hydrogen permeation parameters of X80 steel and welding HAZ under high pressure coal gas environment[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(9): 1101-1110.
- [17] 张体明,赵卫民,蒋伟,王永霖,杨敏. X80 钢焊接残余应力耦合接头组织不均匀下氢扩散的数值模拟[J]. 金属学报, 2019, 55(2): 258-266.
- ZHANG T M, ZHAO W M, JIANG W, WANG Y L, YANG M. Numerical simulation of hydrogen diffusion in X80 welded joint under the combined effect of residual stress and microstructure inhomogeneity[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 55(2): 258-266.
- [18] 李守英,赵卫民,乔建华,王勇. CO 与 H₂ 在应变 Fe(110) 表面的竞争吸附[J]. 物理学报, 2019, 68(21): 270-276.
- LI S Y, ZHAO W M, QIAO J H, WANG Y. Competitive adsorption of CO and H₂ on strained Fe(110) surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(21): 270-276.
- [19] 褚武扬,乔利杰,李金许,宿彦京,岩雨,白洋,等. 氢脆和应力腐蚀[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 243-246.
- CHU W Y, QIAO L J, LI J X, SU Y J, YAN Y, BAI Y, et al. Hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking[M]. Beijing: Science Press, 2013: 243-246.
- [20] MORO I, BRIOTTET L, LEMOINE P, ANDRIEU E, BLANC C, ODEMER G. Hydrogen embrittlement susceptibility of a high strength steel X80[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(27/28): 7252-7260.
- [21] TAKASAWA K, IKEDA R, ISHIKAWA N, ISHIGAKI R. Effects of grain size and dislocation density on the susceptibility to high-pressure hydrogen environment embrittlement of high-strength low-alloy steels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(3): 2669-2675.
- [22] BRIOTTET L, BATISSE R, DE DINECHIN G, LANGLOIS P, THIERS L. Recommendations on X80 steel for the design of hydrogen gas transmission pipelines[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(11): 9423-9430.
- [23] 张大磊. 热镀锌钢材在海洋大气中的氢渗透行为及脆化研究[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2009.
- ZHANG D L. Hydrogen permeation behavior and embrittlement of hot-dip galvanized steel in marine atmosphere[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2009.
- [24] KONG D J, WU Y Z, LONG D. Stress corrosion of X80 pipeline steel welded joints by slow strain test in NACE H₂S

- solutions[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2013, 20(1): 40-46.
- [25] 张体明, 王勇, 赵卫民, 吴倩. 模拟煤制气环境下 X80 管线钢及 HAZ 的氢脆敏感性[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 43-46.
ZHANG T M, WANG Y, ZHAO W M, WU Q. Hydrogen embrittlement susceptibility of X80 steel substrate and HAZ in simulated coal gas environment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(9): 43-46.
- [26] 田燕. 焊接区断口金相分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991: 8-13.
TIAN Y. Metallographic analysis of fracture in welding zone[M]. Beijing: China Machine Press, 1991: 8-13.
- [27] 魏邦. 低碳微合金钢针状铁素体组织和性能的研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2016.
WEI B. Research of microstructural characteristics and properties of acicular ferrite in high-strength micro-alloy steels[D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2016.
- [28] 黄安国, 王永生, 李志远. 低合金钢焊缝中先共析铁素体组织数量的控制[J]. 电焊机, 2003, 33(10): 9-14.
HUANG A G, WANG Y S, LI Z Y. Prediction of PF volume fraction in low-alloy steel welding seam[J]. Electric Welding Machine, 2003, 33(10): 9-14.
- [29] 张帅, 任毅, 王爽, 刘文月, 高红. 轧制与冷却工艺对高强度管线用宽厚钢板组织与性能的影响[J]. 上海金属, 2019, 41(5): 53-58.
ZHANG S, REN Y, WANG S, LIU W Y, GAO H. Influence of rolling and cooling processes on microstructure and performance of high-strength wide and heavy steel plate for pipeline[J]. Shanghai Metals, 2019, 41(5): 53-58.
- [30] 许道奎, 李传强, 韩恩厚, 王磊. 金属材料中“塑性不稳定现象”的研究进展[J]. 中国材料进展, 2016, 35(3): 219-226.
XU D K, LI C Q, HAN E H, WANG L. Research progress on the plastic instability phenomenon of metal materials[J]. Materials China, 2016, 35(3): 219-226.
- [31] 姚金池, 陈立佳, 刘凯, 朱庆岩. 不同热处理状态 Al-3.5Mg-0.2Sc 合金的动态应变时效行为[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(7): 36-41.
YAO J C, CHEN L J, LIU K, ZHU Q Y. Dynamic strain aging behavior of Al-3.5Mg-0.2Sc alloy under different heat treatment states[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(7): 36-41.
- [32] 张圣柱, 程玉峰, 冯晓东, 魏利军, 王如君, 多英全, 等. X80 管线钢性能特征及技术挑战[J]. 油气储运, 2019, 38(5): 481-495.
ZHANG S Z, CHENG Y F, FENG X D, WEI L J, WANG R J, DUO Y Q, et al. Performance characteristics and technical challenges of X80 pipeline steel[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(5): 481-495.
- [33] ZHANG T M, ZHAO W M, LI T T, ZHAO Y J, DENG Q S, WANG Y, et al. Comparison of hydrogen embrittlement susceptibility of three cathodic protected subsea pipeline steels from a point of view of hydrogen permeation[J]. Corrosion Science, 2018, 131: 104-115.
- [34] 谢萍, 伍奕, 李长俊, 贾文龙, 张皓, 吴瑕. 混氢天然气管道输送技术研究进展[J]. 油气储运, 2021, 40(4): 361-370.
XIE P, WU Y, LI C J, JIA W L, ZHANG H, WU X. Research progress on pipeline transportation technology of hydrogenmixed natural gas[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(4): 361-370.
- [35] 李敬法, 苏越, 张衡, 宇波. 掺氢天然气管道输送研究进展[J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 137-152.
LI J F, SU Y, ZHANG H, YU B. Research progresses on pipeline transportation of hydrogen-blended natural gas[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 137-152.
- (收稿日期: 2021-08-20; 修回日期: 2022-01-17; 编辑: 张腾)
-
- 基金项目:** 管网集团(新疆)联合管道有限责任公司项目“CO 对天然气管道混氢输送氢脆控制影响研究”, XB22-2020-022。
- 作者简介:** 王琴, 女, 1984 年生, 高级工程师, 2010 年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事长输油气管道仿真与运行控制方面的研究工作。地址: 新疆乌鲁木齐市新市区天津北路西五巷 99 号中石油大厦, 831000。电话: 0991-7683099。Email: wangqin02@pipechina.com.cn
- 通信作者:** 赵卫民, 女, 1970 年生, 副教授, 2004 年博士毕业于西安交通大学材料科学与工程专业, 现主要从事金属结构环境敏感断裂及防控方面的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号, 266580。电话: 18266639639。Email: zhaowm@upc.edu.cn