

输氢管道采用 X80 管线钢的设计建议^{*}

李为卫¹, 刘炜辰², 李嘉良³, 封 辉¹ 编译

- (1. 石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室, 西安 710077;
2. 中国石油测井公司国际事业部, 北京 102200;
3. 中移系统集成有限公司, 成都 610041)

摘 要: 高强度管线钢常被用于长距离、大输量天然气管道输送, 然而目前的输氢管道采用低强度管线钢, 以避免氢脆的产生。为了探究大直径 X80 管线钢输送加压氢气的能力, 对 X80 管线钢试样进行了拉伸、韧性、裂纹扩展和圆片破裂试验。根据试验结果, 分析了输氢管道压力对试样缺陷临界尺寸的影响, 从而对 X80 输氢管道的设计提出了建议。研究表明, 在一定输送能量下, 氢的运输成本可能比天然气高出数倍。此外, 尽管低强度钢的氢脆敏感性更低, 但使用高强度钢建造输氢管道比使用低强度钢可带来 10%~40% 的成本效益。

关键词: 高钢级管线钢; X80; 氢气输送; 氢脆

中图分类号: TG115.5

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.07.011

Recommendations on X80 Steel for the Design of Hydrogen Gas Transmission Pipelines

Translated by LI Weiwei¹, LIU Weichen², LI Jialiang³, FENG Hui¹

- (1. State Key Laboratory of Performance and Structural Safety for Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, Xi'an 710077, China; 2. International Business Department of CNPC Logging Corporation, Beijing 102200, China; 3. China Mobile System Integration Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: High strength pipeline steel is often used for long distance and large volume natural gas pipeline transportation, but at present, low strength pipeline steel is used in hydrogen pipeline to avoid hydrogen embrittlement. In order to explore the ability of large diameter X80 pipeline steel to transport pressurized hydrogen, tensile, toughness, crack propagation and disc rupture tests were carried out. According to the test results, the influence of hydrogen pipeline pressure on the critical size of the sample defect was analyzed, and some suggestions for the design of X80 hydrogen pipeline were put forward. Studies have shown that hydrogen transport costs can be several times higher than natural gas for a given amount of transport energy. In addition, although low strength steel is less sensitive to hydrogen embrittlement, construction of hydrogen transport pipelines using high strength steel can be 10 to 40 percent more cost-effective than using low strength steel.

Key words: high grade pipeline steel; X80; hydrogen transmission; hydrogen embrittlement

^{*} 基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“中长距离管道纯氢/掺氢输送关键技术研究”(项目编号 2021DJ5002)。

0 前 言

氢能作为能源载体之一,可有效缓解温室效应,并确保能源供应。经过多项论证性研究,到2050年,全球输氢管线长度预计达到15 000~35 000 km。目前,全球约有3 000 km输氢管线,最大服役压力为10 MPa,主要为化学或石油工业提供氢气,这些输氢管道的管体钢级通常不超过X52。由于氢的能量密度较低,管道能承受15~20 MPa的压力,结合管线建设的经济性,可使用高强度管线钢管,以减少管道壁厚,从而降低成本。

本研究介绍了X80钢在空气介质中的特性,并对氢气环境下X80钢的力学性能进行了试验,包括拉伸试验、圆片试验、断裂韧性试验以及疲劳裂纹扩展试验,试验结果能够为X80输氢管道设计提供参考。

1 X80 管材在空气环境中的性能

试验用 $\Phi 914.4 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ 规格X80钢管由欧洲管网提供,其化学成分见表1,显微组织如图1所示,微观组织主要由带状分布的铁素体-珠光体(F-P)组成。

表1 X80 钢管的化学成分

| $w(\text{C})$ | $w(\text{Mn})$ | $w(\text{Si})$ | $w(\text{Nb})$ | $w(\text{V})$ | $w(\text{Cu})$ | $w(\text{P})$ | $w(\text{S})$ | $w(\text{Fe})$ |
|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| 0.075 | 1.86 | 0.35 | 0.05 | <0.01 | 0.22 | 0.015 | <0.003 | 余量 |

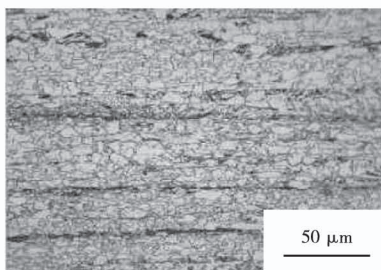


图1 X80 钢的F-P带状显微组织

在钢管周向45°、90°、135°和180°位置取样并进行力学性能试验。结果显示,四处位置的拉伸性能、夏比冲击韧性和硬度没有明显的差异,钢管纵向试样的屈服强度和抗拉强度平均值分别为510 MPa和689 MPa,环向试样的屈服强度和抗拉强度平均值分别为596 MPa和707 MPa,夏比冲击值在127~134 J/cm²范围。此外,测定了钢管TL方向上的J曲线,韧性 $J_Q = 210 \text{ kJ/m}^2$ 。试验结果表明,该X80钢管性能满足天然气输送的要求。

2 X80 管材在高压氢气中的力学性能

2.1 圆片试验

圆片试验(disc test)根据ISO 11114-4《可运输气瓶 气瓶和瓶阀材料与盛装气体的相

容性 第4部分:选择抗氢脆钢的试验方法》中方法A进行,用来评价材料对输送气体的适用性。通过比较圆片试样在氢气环境中和在其他气体环境中爆破压力的差异,确定材料的脆化指数。本研究脆化指数在加压速率0.01~100 MPa/min范围内,氢气爆破压力与氢气爆破压力的比率,如果该指数值小于2,则这种材料符合氢气的输送要求。将圆片试样在氢气和氢气环境下加压破裂,试验结果如图2所示,同时试验结果存在显著差异,脆化指数在1.2~2.5之间变化,因此,很难断定这种X80材料对氢气的敏感性。此外,一些圆片试样是开裂而非爆裂,尤其是在较低的加压速率下,如图3所示。

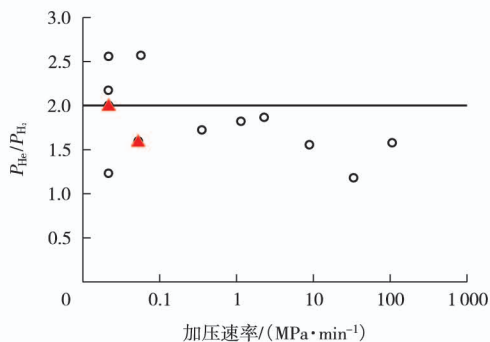


图2 X80 管材圆片试验结果

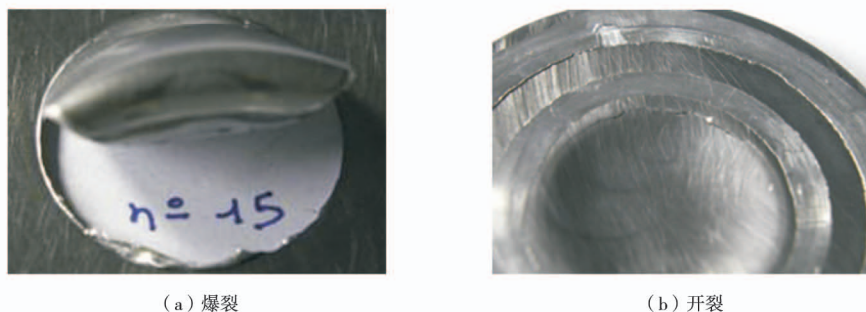


图3 按 ISO 11114-4 方法 A 试验后圆片试样形貌

2.2 拉伸试验

在 MTS 伺服液压试验机上对轴对称光滑和缺口试样进行拉伸试验, 试验在充满氢气或氮气的压力容器中进行, 气体压力为 35 MPa, 两种气体的纯度均为 6.0。在氢气环境下进行所有力学性能试验之前, 试样在 30 MPa 氢气环境下保持 30 min。图 4 显示了不同应变速率和气体环境下光滑试样的拉伸试验结果, 由图 4 可以看出, 材料的力学行为不受氢气的影响, 但观察到总伸长率降低, 且应变速率越低, 这种效应越明显。然而, 有相关研究表明, X80 钢通过阴极电解引入氢后, 屈服强度随着氢浓度的增加而降低。本研究的试验情况, 考虑到 30 MPa 压力的氢气环境, 氢气的溶解度较低, 约为 4.5×10^{-9} , 不足以影响材料的屈服强度; 另一方面, 在氢气中进行试验后, 塑性损失是明显的, 拉伸试样整个标距的表面可以看见裂纹。此外, 氢气压力从 10~30 MPa 的变化不会引起塑性的显著变化。事实上, 氢气压力从 0.1 MPa 到约 5 MPa, 其影响是增加的, 然后趋于稳定。

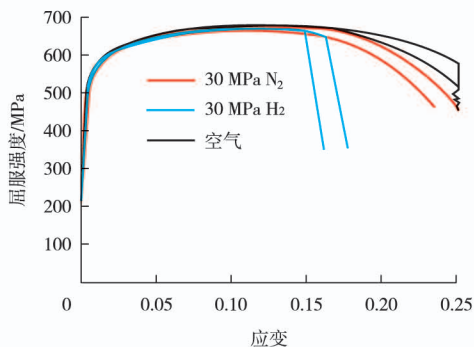


图4 在不同气体环境中光滑试样的拉伸曲线

为了量化材料的氢脆程度, 测量拉伸试样在氢气中与空气中相应面积的减少量来定义氢脆系数 F , 即

$$RA = 1 - S_{\text{fin}}/S_0 \quad (1)$$

$$F = \frac{(RA)_{\text{air}} - (RA)_{\text{H}_2}}{(RA)_{\text{air}}} \quad (2)$$

式中: RA ——在空气与在氢气条件下试验后试样面积的平均减少量;

S_{fin} ——拉伸试验断裂后试样的截面积;

S_0 ——试样的初始截面积。

根据该定义, $F=0$ 表示无氢脆, 而 $F=100\%$ 表示脆性最大, 即完全失去塑性。在 30 MPa 氢气环境下试验的 X80 材料脆性系数 F 接近 70%。

采用含缺口轴对称试样在 30 MPa 压力的氮气和氢气下进行试验, 研究了应力三轴度对脆性的影响。试样缺口半径 r 有两种尺寸: 0.1 mm 和 0.8 mm (如图 5 所示), 对应于试验开始时 1.6 和 1.4 的局部三轴度。氢的影响仍然是降低整体塑性, 此外, 在高的三轴度条件下, 可观察到最大载荷的降低 (如图 6 所示)。

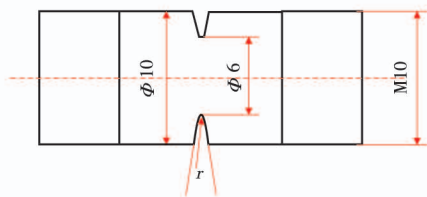


图5 含缺口轴对称试样的尺寸 (单位: mm)

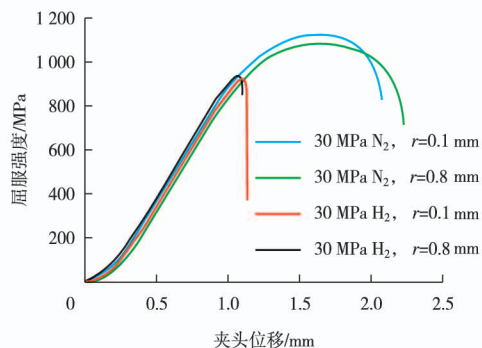


图6 在氢气和氮气中缺口试样的拉伸曲线 (0.05 mm/min)

不同试样缺口几何形状的氢脆系数 F 随着应力三轴度的增加而增加, 这证实了应力三轴度和氢脆之间的交互作用。

2.3 断裂韧性试样

钢管上的缺陷是影响氢气输送安全裕度的关键问题。采用多试样法 CT 拉伸试样 ($W=40$ mm、 $B=10$ mm、 $B_0=8$ mm) 在空气和 30 MPa 氢气环境中进行了材料韧性测试, 预制裂纹参数见表 2, 拉伸试验结果见表 3。试验前, 试样 ($a/W=0.55$) 在空气中进行裂纹预制, 深度约 22 mm, 然后开侧槽。试验过程中, 载荷与裂纹张开位移

(COD) 关系曲线如图 7 所示, 由图 7 可知, 在等效 COD 下, 试样在氢气中的载荷大幅降低, 与图 8 中显示的在空气和氢气中等效 COD 裂纹的扩展形貌吻合。根据试验得出的 J - R 曲线如图 9 所示, 由图 9 可知, 氢对材料韧性的影响显著, 特别是当裂纹扩展量为 0.2 mm 时, 材料在空气中的韧性为 210~250 kJ/m², 而在 30 MPa 氢气中的韧性仅为 15 kJ/m², 这与文献中 PRAXAIR 的试验结果相似。本试验发现, 化学成分、管体和试样几何形状、气体纯度方面的差异导致氢对材料韧性的影响更加明显。

表 2 30 MPa 氢气条件下 CT 试样预制裂纹参数

| 试样编号 | B_0 /mm | $K_{max}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ | $K_{final}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ | F_{max}/kN | F_{final}/kN | n_b/cycles |
|-------|-----------|---|---|---------------------|-----------------------|---------------------|
| CT-51 | 8.01 | 43.09 | 25.01 | 8.56 | 4.42 | 26, 127 |
| CT-52 | 8.00 | 33.62 | 19.99 | 6.65 | 3.52 | 55, 773 |
| CT-53 | 8.04 | 42.95 | 25.10 | 8.64 | 4.43 | 33, 034 |
| CT-54 | 8.09 | 33.62 | 20.02 | 6.73 | 3.53 | 58, 398 |
| CT-55 | 8.06 | 33.54 | 20.07 | 6.68 | 3.53 | 54, 559 |
| CT-56 | 7.96 | 33.37 | 20.04 | 6.68 | 3.54 | 53, 804 |

表 3 30 MPa 氢气条件下 CT 试样拉伸试验结果

| 试样编号 | a_0/mm | F_{max}/kN | $\text{COD}_{final}/\text{mm}$ | a_f/mm | $\Delta a/\text{mm}$ |
|-------|-----------------|---------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------|
| CT-51 | 21.96 | 11.75 | 1.26 | 26.55 | 4.59 |
| CT-52 | 21.94 | 11.65 | 1.00 | 25.95 | 4.02 |
| CT-53 | 21.73 | 11.72 | 0.50 | 23.62 | 1.89 |
| CT-54 | 21.94 | 9.60 | 0.30 | 22.48 | 0.54 |
| CT-55 | 21.88 | 10.90 | 0.40 | 23.21 | 1.34 |
| CT-56 | 21.87 | 8.40 | 0.25 | 22.28 | 0.41 |

注: a_0 为预制裂纹长度; a_f 为最终裂纹长度。

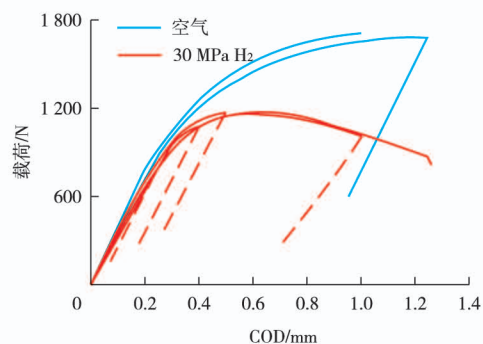
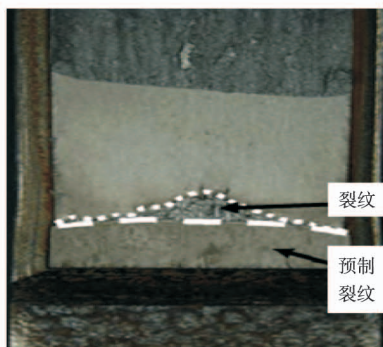
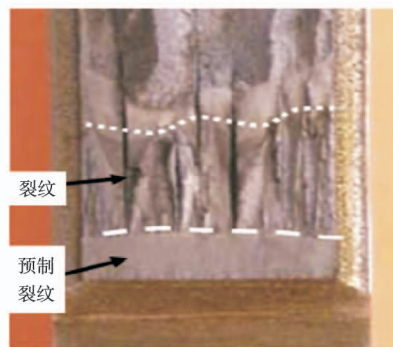


图 7 不同环境下试样裂纹张开位移与载荷的关系

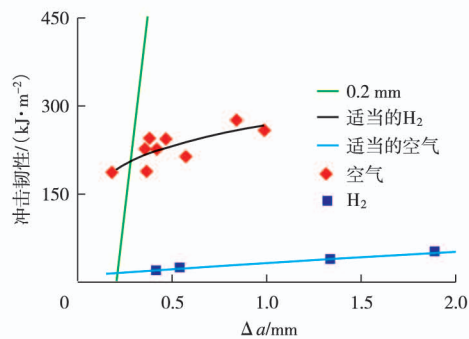


(a) 空气中



(b) 氢气中

图 8 在空气和氢气中等效 COD 为 1.25 mm 时的裂纹扩展形貌



2.4 疲劳裂纹扩展

经过调查发现，材料在氢气环境中疲劳行为的研究目前还有待加强。考虑到要制定氢气管道设计安全指南的目标，本项目采用紧凑拉伸(CT)

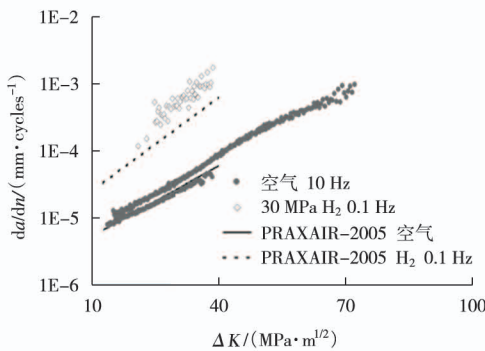
试样 ($W=40\text{ mm}$, $B=10\text{ mm}$) 进行疲劳裂纹扩展试验，试验数据见表 4。由表 4 可知，空气中的加载频率为 10 Hz ，氢气中的加载频率为 0.1 Hz 。

将试验结果与文献中 PRAXAIR 给出的建议进行对比，结果如图 10 所示。根据图 10 可知，当在压力为 30 MPa 的氢气环境中进行循环应力加载时，裂纹增长速率明显增大。为了模拟实际服役环境，通过降低加载频率提高氢对材料疲劳裂纹扩展的影响，由此得到 Paris 定律见式 (3)，式中 da/dn 以 $(\text{mm}/\text{cycles})$ 表示， ΔK 以 $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ 表示。

$$\begin{cases} \frac{da}{dn}=5\times10^{-9}\Delta K^{3.1} & (\text{空气、}10\text{ Hz}) \\ \frac{da}{dn}=2\times10^{-9}\Delta K^{4.4} & (30\text{ MPa H}_2\text{、}0.1\text{ Hz}) \end{cases} \quad (3)$$

表 4 疲劳裂纹扩展试验数据

| 试样 | | | | 裂纹扩展试验 | | | | |
|----|-----------------|-------------------|---|---------------------|-------------------|---------------|---|---|
| 编号 | a_0/mm | 最终载荷/ kN | 最终 $K_{\text{max}}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ | 气体 | 加载频率/ Hz | a/mm | 初始 $\Delta K/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ | 最终 $\Delta K/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ |
| 50 | 24 | 3.7 | 25 | 空气 | 10 | 32.3 | 21.9 | 11.1 |
| 57 | 8 | 4.7 | 10 | 空气 | 10 | 30.0 | 9.0 | 78.0 |
| 59 | 9.7 | 6.8 | 15 | 30 MPa H_2 | 0.1 | 15.8 | 14.2 | 21.3 |



3 X80 管道设计建议

3.1 改进方法

假定管道存在纵向缺陷，可预估管道破裂压力，分别在天然气和氢气环境中估算其破裂压力并进行比较。根据给定的最大压力和相同的缺陷几何形状确定钢管的尺寸，具体可参照两种管道直径：小直径 323.9 mm 和大直径 914.4 mm 。

以管道内外表面产生的纵向缺陷为例，缺陷长度为 $2c$ ，相对深度为 alt ， a 为裂纹深度， t 为钢

管壁厚，缺陷长度与深度的关系如图 11 所示。

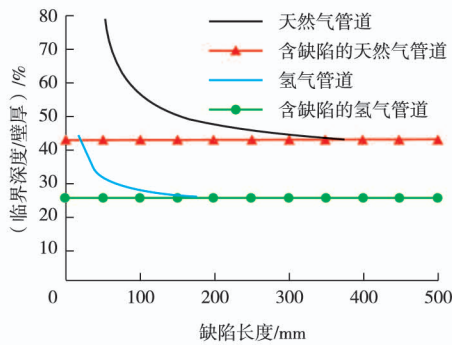
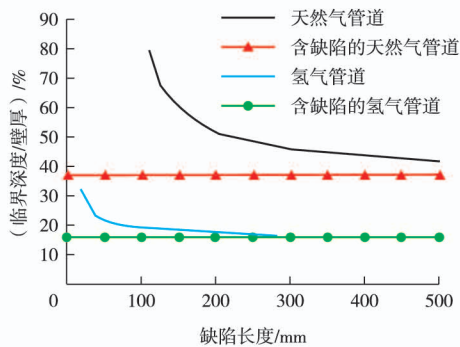


图 11 12 MPa 压力下管道缺陷的相对临界深度与长度的关系

由于外表面缺陷和内表面缺陷都会受到氢的影响,而外表面缺陷通常会被“低估”,事实上,外表面缺陷并未与氢气直接接触,而仅与渗透管道管壁处的氢接触。当外表面的氢浓度边界条件为 0 时,氢是如何影响该侧缺陷的性能尚不清楚。缺陷的临界尺寸根据 API 579 标准进行计算。

3.2 缺陷临界尺寸

根据 2006 年 8 月 4 日发布的法国法令,并考虑到大型管道的尺寸,通过式 (4) 获得最高工作压力,即

$$P_{ms} = \frac{\alpha R_{0.5} t}{\Phi/2} \approx 12 \text{ MPa} \quad (4)$$

式中: α ——载荷系数;

$R_{0.5}$ ——0.5%的总应变时的材料屈服应力;

t ——钢管的壁厚, mm;

Φ ——钢管的外径, mm。

为了估算缺陷的临界尺寸,试样分别采用 $\Phi 914.4 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ 和 $\Phi 323.9 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 两种规格的钢管,试验环境参数见表 5。

表 5 计算缺陷临界尺寸的试验环境参数

| 空气中 | | | 氢气中 | | |
|------------------------|--------------------|---|------------------------|--------------------|---|
| $R_{0.5} / \text{MPa}$ | R_m / MPa | $J_c / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$ | $R_{0.5} / \text{MPa}$ | R_m / MPa | $J_c / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$ |
| 596 | 707 | 248 | 596 | 707 | 15 |

为了比较天然气与氢气管道的设计建议,这两种气体选择了相同的安全系数(等于 1)。缺陷临界深度与长度的关系如图 11 所示,由图 11 可知,对于大管道,在天然气中的相对深度比在 H_2 中的相对深度高 2.3~3.3 倍,对应小管道则高 1.7~2.2 倍,相对深度具体取决于缺陷长度。

3.3 管道设计

管道在压力为 12 MPa 的天然气环境下会产生缺陷,为了保证管道能承受住氢环境中类似这样缺陷而不发生断裂,须计算输氢管道的厚度。大直径管道 12 MPa 压力下输氢/输气的厚度比以及载荷系数如图 12 所示,图 12 表明,对于大直径管道,输氢管道的壁厚必须增加到天然气管道的 1.6~1.9 倍,壁厚取决于缺陷的长度,载荷系数介于 0.38~0.45 之间,而天然气管道的载荷系数为 0.73,低钢级的输氢管道的载荷系数为 0.4。

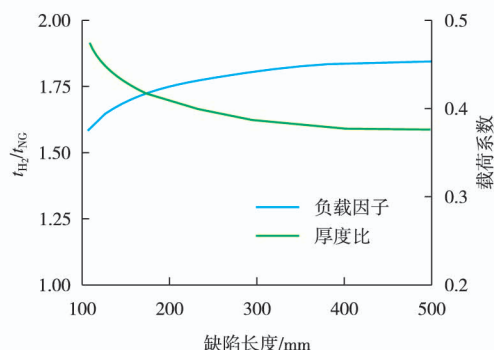


图 12 大直径管道 12 MPa 压力下输氢/输气的厚度比以及载荷系数

按照相同方法,小直径管道的载荷系数在 0.46~0.54 之间,这些值可与 ASME B31.12 规范推荐的等效材料在 20 MPa 气压下的载荷系数进行比较。在该规范中,载荷系数包括设计系数和材料性能系数,取值范围为 0.21~0.27,具体取决于管道地区等级。

综上所述,对于 X80 钢,假设焊缝与母材在氢气环境中的性能相似,建议在氢气压力 < 30 MPa 的环境条件下服役时的载荷系数为 0.35,这在近期进行的 ANR CESTAR 项目中得到部分解决。而根据译者的试验数据和观点认为,焊缝的成分、组织和力学性能与母材差异很大,存在缺陷的几率更高,尺寸更大,尤其是氢环境下的塑性和韧性的下降比母材更大,这种假设偏于危险,应引起设计者和研究者的关注。

3.4 成本估算

通过输送相同能量的天然气与氢气,计算管道的运行成本。在 ANR 项目准备中,据估计,对于确定的直径,压力必须增加 2.5 个系数,以便氢气管道输送与天然气管道相同的能量。对于直径为 914.4 mm、厚度为 12.7 mm 的 X80 天然气管道,其载荷系数为 0.73,可在 11.2 MPa 的气体压力下服役,当氢气管道输送相同能量时,相同直径下的输送压力应为 28 MPa。根据上一章节所提到的载荷系数,当氢气压力为 28 MPa 时,管道的厚度应为 65.9 mm。对于特定的钢材,成本与其质量成反比,可以按照式 (5) 估算输氢管道与输气管道的成本。

$$\frac{C_{H_2}}{C_{NG}} = \frac{t_{H_2} (\Phi - t_{H_2})}{t_{NG} (\Phi - t_{NG})} = 4.88 \quad (5)$$

式中: C_{H_2} ——输送氢气的管道成本;

C_{NG} ——输送天然气的管道成本;

Φ ——管道直径, mm;

t_{H_2} ——氢气管道的壁厚, mm;

t_{NG} ——天然气管道的壁厚, mm。

同样的方法也适用于在 0.8 MPa 气体压力下服役的小直径 ($\Phi=314.4$ mm) 管道。此外, 氢气管道成本与天然气管道成本比值约为 5。

另一方面, 对比高钢级 (X80) 与典型低钢级 (A42) 的输氢管道成本。A42 钢级管道的载荷系数为 0.4, 屈服强度为 596 MPa; 而 X80 钢级管道的载荷系数为 0.35, 屈服强度为 250 MPa, 可以根据外径与压力之间的函数关系估算在相同外径下的相对成本。考虑到 X80 钢管比 A42 钢管的成本高约 1.25 倍, 两种钢级管道的成本比按公式 (6) 计算, 结果见图 13。

$$\frac{C_{X80}}{C_{A42}} = 1.25 \times \frac{0.4R_{t0.5}^{A42} \left(1 - \frac{P_{ms}/2}{R_{t0.5}^{X80}}\right)}{0.35R_{t0.5}^{X80} \left(1 - \frac{P_{ms}/2}{R_{t0.5}^{X80}}\right)} \quad (6)$$

式中: C_{X80} ——X80 钢级输氢管道成本;

C_{A42} ——A42 钢级输氢管道成本;

$R_{t0.5}^{X80}$ ——X80 钢的屈服强度;

$R_{t0.5}^{A42}$ ——A42 钢的屈服强度。

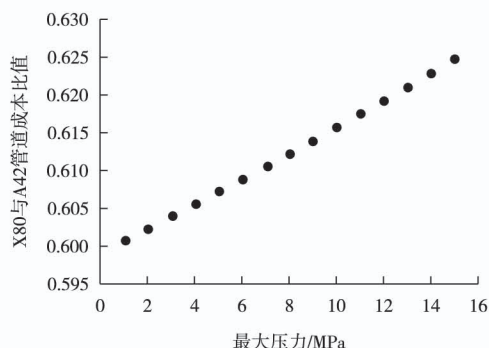


图 13 同样外径的管道 X80 与 A42 的成本比与最大运行压力的关系

根据图 13, 对于运行压力 0.1 MPa~1.5 MPa 的输氢管道, X80 钢级管道的建造成本比 A42 钢级节约费用约 40%, 特别对于中长距离的氢

气输送, 成本差异显著。

4 结 论

(1) 采用 ISO 11114-4 标准方法 A 对 X80 高钢级管线钢在高压氢气环境下的力学性能进行表征, 结果表明, 在氢环境下 X80 高钢级管线钢的屈服强度和拉伸性能不变, 而断裂伸长率和塑性发生变化, 相比之下, 其韧性大幅下降, 疲劳裂纹扩展速率增大。这也表明很难明确定义适用于气态氢管道或储存装置的“通用”脆化指数, 需要一个适用于此类承压结构的标准。

(2) 根据氢气压力环境下的试验结果, 估算了氢气管道的成本。根据 API 579 标准, 天然气管道的临界裂纹深度应当比氢气管道高 2~3 倍, 因此, 建议高钢级管道的载荷系数为 0.35, 而低钢级和中等钢级管道的载荷系数为 0.4。为了在相同时间内输送相同的能量, 输氢管道成本似乎比输送天然气的管道高约 5 倍; 另一方面, 使用高钢级材料可产生超 30% 的成本收益, 特别是在低压条件下使用大直径管道时, 其成本效益更高。事实上, 当压力从 10 MPa 降至 3 MPa 时, 高钢级材料的氢脆敏感性降低。

(3) 研究表明, 在氢气环境中, 焊缝和母材的力学性能相似, 但必须检测焊缝在氢气压力环境中的性能。

译自: BRIOTTET L, BATISSE R, DINECHIN D G, et al. Recommendations on X80 steel for the design of hydrogen gas transmission pipelines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(11): 9423-9430.

译者简介: 李为卫 (1965—), 男, 高级工程师, 现主要从事油气输送管道材料研究及标准化工作。

收稿日期: 2022-01-13

返回修改日期: 2022-05-13

编辑: 董 超