

X60 螺旋缝埋弧焊管在湿 H₂S
环境中的腐蚀行为

冯耀荣^{1,2}, 李铁虎¹, 李国兴³, 霍春勇², 颜 峰²

(1. 西北工业大学 材料科学与工程学院, 西安 710072; 2. 中国石油天然气集团公司管 材研究所
石油管力学和环境行为重点实验室, 西安 710065; 3. 中油股份西气东输管道分公司, 北京 100724)

摘 要: 采用自行设计的焊管实物管段腐蚀试验方法和装置研究了内胀成形和外控成形两种 X60 螺旋缝埋弧焊管在含 H₂S 的 NACE 溶液中的腐蚀行为。结果表明, 焊管在 H₂S 介质中的损伤表现为母材表面氢鼓泡及应力腐蚀裂纹; 随着施加应力的提高及残余应力的增大, H₂S 腐蚀倾向增大; 在 H₂S 介质中和外加应力及残余应力的共同作用下, 焊管的氢损伤机理既有氢致开裂, 又有氢致应力腐蚀, 应力不但促进氢致应力腐蚀, 同时也促进氢致开裂过程; 试验结果说明改进焊管焊缝表面质量、降低残余拉应力、控制工作应力是改善和控制焊管 H₂S 腐蚀的重要措施。

关键词: 油气输送管; 焊接钢管; 应力腐蚀; 氢致开裂; 残余应力

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2002)05-77-04



冯耀荣

0 序 言

随着石油工业的发展, 石油天然气的输送量不断增加, 输送范围越来越广, 输送压力不断增大, 输送介质越来越复杂。尤其是高压输送和高钢级管材的选用及酸性介质的输送, 对管道材料的性能包括耐腐蚀性能提出了更高的要求^[1,2]。大量管道失效案例表明^[3,4], H₂S 应力腐蚀和氢致开裂是其早期失效的一个重要原因。关于焊管材料在 H₂S 介质中的氢致开裂和应力腐蚀行为, 国际上开展了大量的研究, 得出了许多有价值的研究结果, 已广泛用于酸性环境中管道的设计、选材、质量控制、检验验收和失效预防等方面。但现有的试验大多数是采用焊管材

料小试样进行的, 不能反映焊管的整体状况, 特别是对我国大量使用的螺旋缝埋弧焊管, 采用模拟焊管实际受力状态与试验研究更少。为此选用实际焊管段进行焊管在 H₂S 腐蚀介质中的应力腐蚀和氢致开裂试验研究, 为焊管的质量改进和选用提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料为 250 mm 长的管状实物试样, 采用含 Nb、V、Ti 的低碳微合金化控轧钢制成(质量分数, % C 0.08; Si 0.20~0.28; Mn 1.30~1.50; S 0.007; P 0.010~0.014; Mo 0~0.12), 试样情况, 内表面残余应力和力学性能见表 1。

表 1 试样情况、残余应力及力学性能

Table 1 States of test samples residual stress and mechanical properties

No.	Outside diameter× wall thickness t/mm	Forming process	Inter surface average residual stress σ _r /MPa	Pipe body yield strength σ _{t0.5} /MPa	Tensile strength σ _b /MPa	Ratio of yield to tensile σ _{t0.5} /σ _b	Elongation δ(%)
1	660×7.1	Over-bending	34	482	594(body); 620(weld)	0.81	34.6
2	660×7.1	Under-bending	-242	485	588(body); 635(weld)	0.82	39.9
3	660×8.7	Over-bending	-14	427	540(body); 582(weld)	0.79	41.7

由于管道实际使用中承受的内压在试验过程中难以实现和试样尺寸太大难以全部浸泡, 所以采用

简化的试验条件对焊缝周围 200 mm 左右的内表面局部进行模拟试验。试验按照 NACE TM01-77 标准要求进行, 浸泡溶液采 5% NaCl + 0.5% CH₃COOH + 饱和 H₂S 溶液。溶液 pH 值维持在 3.0

~4.2 之间, 试验温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 试验时间为 168 h。试样的加载方式采用在管内安装加载杆, 向外对管体施加外力, 造成内焊缝周围受拉应力来模拟管道实际受力状况, 应力选取材料的 $0.6\sigma_y$ 、 $0.8\sigma_y$ 、 $1.0\sigma_y$ (σ_y 为标准规定的 X60 钢级的最低屈服强度) 三个水平, 采用应变片法控制施加应力。全部浸泡结束后, 采用表面宏观检查和内部金相分析, 以表面和内部裂纹、氢鼓泡的数目大小和直径作为评价各试样抗 H_2S 腐蚀敏感性的指标。

2 试验结果

2.1 母材上的表面裂纹和氢鼓泡

各焊管试样在施加不同应力水平浸泡后, 试样表面出现了氢鼓泡和裂纹, 见表 2 及图 1。可以看出, 随着应力水平的提高, 鼓泡点分布区域扩大, 距焊缝根部距离也呈增大趋势, 鼓泡点直径也逐渐增大。而且, 随着应力水平的提高, 有的鼓泡点上产生了垂直于应力方向的裂纹, 应力水平越高, 出现裂纹的鼓泡点的数目也相应增多。

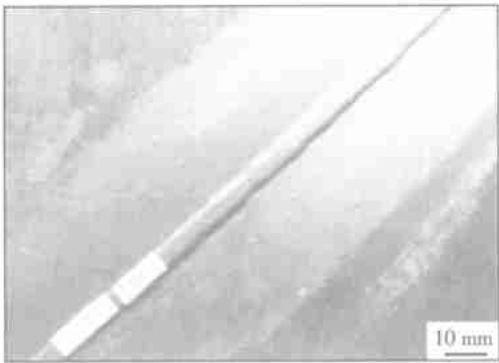


图 1 焊管表面氢鼓泡典型特征

Fig. 1 Blisters in surface of welded pipe

表 2 各焊管试样表面状况

Table 2 Surface situation of test welded pipe sections					
No.	Distribution range /mm×mm	Blister number Left/right	Maximum blister diameter d/mm	Parallel crack number	Perpendicular crack number
1-1	90×15	11/8	4.0	—	—
1-2	110×25	21/17	4.5	6	2
1-3	120×35	22/19	4.8	11	4
2-2	—	0	—	—	—
2-3	85×15	1	6.2	—	—
3-1	100×18	12/9	2.9	—	—
3-2	120×20	13/5	2.4	—	1
3-3	85×26	16/7	4.1	1	2

采用金相分析方法, 将鼓泡点沿试样轴向垂直表面剖开, 发现鼓泡点下是平行于试样表面的裂纹, 表面上鼓泡点直径越大, 其下的裂纹越长。对于鼓泡点上有垂直于外加应力方向裂纹的鼓泡点, 沿垂直裂纹方向剖开, 发现裂纹沿径向垂直于表面向内部扩展, 其下有与焊管内表面平行的裂纹, 典型特征见图 2。



图 2 典型氢鼓泡剖面裂纹特征

Fig. 2 Cross sectional crack feature of blister

2.2 焊缝表面上的应力腐蚀开裂

对焊管试样进行饱和 H_2S 溶液浸泡试验后, 发现在焊缝上有应力腐蚀裂纹存在, 见表 3。可以看出, 在饱和 H_2S 溶液中及应力的联合作用下, 在焊缝的薄弱部位, 尤其是在弧坑处产生了明显的应力腐蚀裂纹。焊缝上的应力腐蚀裂纹多以横向裂纹为主, 其次是弧坑裂纹, 纵向裂纹很少。图 3 是弧坑裂纹和横向裂纹的典型形貌。

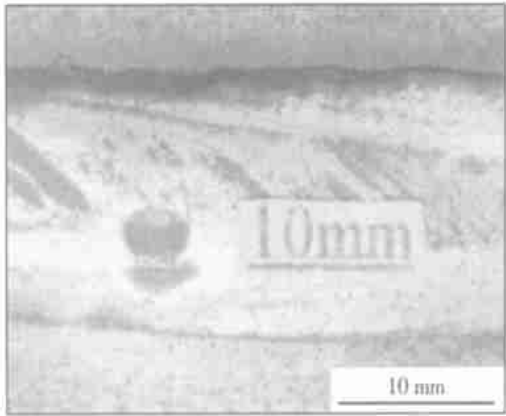


图 3 弧坑裂纹和横向裂纹形貌

Fig. 3 Features of crater cracks and transverse cracks

3 分析讨论

3.1 应力的影响

表 2 和图 4 给出了不同试样在三个外加应力水平下表面氢鼓泡的试验结果。可见随着施加应力的提高, 各试样的氢鼓泡数目增加, 直径增大, 裂纹数

目增多,说明外加应力对试样应力腐蚀的作用是较明显的。

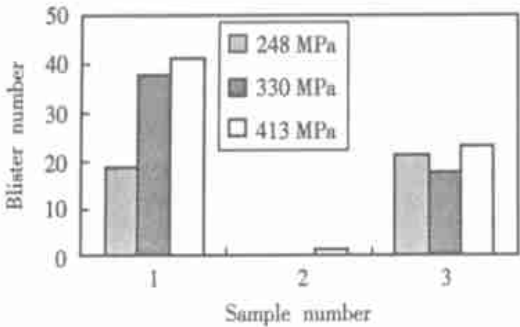


图 4 应力对应力腐蚀的影响

Fig. 4 Effect of stress on H₂S SCC of welded pipes

从图 4 和表 1、表 2 也可看出,残余应力对试样抗 H₂S 腐蚀能力有较大的影响,如当外加应力为 1.0 σ_y 、表面为较大的残余压应力时,应力腐蚀基本得到抑制(2 号试样);而当有残余拉应力存在时,应力腐蚀抗力明显下降(1 号试样)。这说明表面残余拉应力与外加拉应力和腐蚀介质的共同作用下,会使焊管的应力腐蚀敏感性大大提高。

表 3 各试样焊缝上的应力腐蚀裂纹

Table 3 Weld stress corrosion cracks of tested welded pipe sections

No	Crack type	Crack number	Maximum length /mm	Crack depth /mm
1—2	Transverse	4	3.62	—
	longitudinal	2	2.74	—
1—3	Transverse	2	2.40	—
2—2	Transverse	3	6.40	0.39
	arc pit	4	3.76	—
2—3	Longitudinal	1	5.20	0.34
3—1	transverse	2	2.60	—
	arc pit	2	—	—
3—2	Transverse	2	4.70	0.32
	arc pit	1	—	—
3—3	transverse	5	4.28	0.26

3.2 焊管 H₂S 腐蚀机理

从焊管 H₂S 应力腐蚀试验结果来看,试验后焊管的损伤形式表现为氢鼓泡、氢诱发裂纹和表面的应力腐蚀裂纹。氢诱发裂纹多在钢中沿轧制方向分布的条片状夹杂物如 MnS 周围形成,当氢致裂纹在接近材料表面的地方形成时,会在表面产生氢鼓泡。氢致开裂机理一般认为是氢压机制^[5]。即氢原子通过扩散进入材料中的氢陷阱(夹杂物、偏析、位错片等)中,再结合成氢分子,积累的结果造成很大的氢

压,导致材料内部开裂或表面产生氢鼓泡。一般认为,氢致开裂不需要外加应力^[5~8]。试验结果表明,随着外加应力的增大,氢鼓泡的数量增加,直径增大,说明当存在外加拉伸应力时,可促进氢致开裂的发展。分析其机理可能是在外加拉应力场中,原子氢通过应力诱导扩散向高应力区(夹杂物、偏析、位错片、晶界等处)富集,应力越高,金属内部的不连续处的应力集中越大,越容易形成氢的富集,即越容易产生氢致开裂。从试验结果也表明,当材料中存在较大残余拉应力时,氢鼓泡数目也急剧增加。分析认为,残余应力与外加应力具有相同的作用机理,它们与外加应力叠加作用加速或减缓氢致裂纹倾向,残余拉应力与外加应力叠加作用,可促进氢原子向氢陷阱内的扩散从而加速氢致开裂过程,残余压应力具有相反的作用效果。

关于表面上的裂纹可分为几种,一种是氢鼓泡上垂直于拉应力的纵向裂纹;另一种是焊缝表面的横向裂纹;第三种是焊缝表面的弧坑裂纹。纵向应力腐蚀裂纹的产生及其严重程度与外加拉应力及残余应力的大小有直接关系。焊缝横向裂纹除与外加应力有关外,还与焊缝本身存在较大残余拉应力有关(焊缝焊接后冷却过程中收缩会引起轴向拉应力)。焊缝表面的弧坑处是应力集中的地方,会成为氢的吸附型陷阱,同时焊缝金属中又有晶界、夹杂、位错等物理陷阱,陷阱周围可动位错携带进入金属中的氢原子通过应力诱导扩散而向这些晶界、夹杂、位错片等强陷阱中富集,当富集的氢浓度达到临界值 C_h 时,缺陷处的应力强度因子也达到临界值 K_{IH} ,便可萌生裂纹^[6,9]。

焊管实物管段 H₂S 腐蚀试验结果表明,在 H₂S 介质中和外加应力以及残余应力的共同作用下,焊管的氢损伤机理既有氢致开裂,又有氢致应力腐蚀,氢致开裂和氢致应力腐蚀两种机理联合作用会加速焊管的腐蚀失效。

从试验结果也可看出,改进焊管表面质量和降低残余拉应力及控制工作应力对提高焊管抗 H₂S 腐蚀能力的重要性。

4 结 论

(1) 焊管在 H₂S 介质中的损伤表现为母材表面氢鼓泡,母材表面应力腐蚀裂纹和内部氢致开裂等几种形态。

(2) 随着应力的提高,试样的氢鼓泡数目增加,直径增大,裂纹数目也增多。

(3) 焊管残余应力对试样抗 H₂S 应力腐蚀性能有较大的影响, 焊管表面为残余压应力的状态对焊管抗应力腐蚀极为有利. 焊管表面为较大的残余拉应力不利于抗应力腐蚀。

(4) 在 H₂S 介质中和外加应力及残余应力的共同作用下, 焊管的氢损伤机理既有氢致开裂, 又有氢致应力腐蚀, 应力不但促进氢致应力腐蚀, 同时也促进氢致开裂过程。

(5) 试验结果说明改进焊管焊缝表面质量、降低残余拉应力、控制工作应力是改善和控制焊管 H₂S 腐蚀的重要措施。

参考文献:

[1] 李鹤林. 天然气输送钢管研究与应用中的几个热点问题[J] . 中国机械工程, 2001, 12(3): 349~ 352.
[2] Ba Yang, Dianxiu Xia, Qingjin Wang. Failures in sour services of south-western china[C] . PVP Honolulu, Hawaii, 1995.
[3] Hovey Diane J , Farmer Edward J . Pipeline accident : failure probability determined from historical data[J] . Oil and Gas Journal,

12, 1993, 7(12): 104~ 107.
[4] Zheng W, Tyson W R, Revie R W, *et al*. Effects of hydrostatic testing on growth of stress-corrosion cracks[A] . International pipeline conference-Vol. 1[C] . ASME, 1998, 459~ 472.
[5] Burk J D. Hydrogen—induced cracking in surface production system: mechanism repair and prevention[C] . SPE Middle East Oil Technique Conference Exhibition, 1993.
[6] Akio Ikeda. Strength and environmental embrittlement of carbon steel [C] . The Sumitomo Search, Tokyo, 1992.
[7] Xiao Jimei. Methodology mechanism and measures for prevention of environmental cracking of metallic materials[A] . Proceedings of international conference on failure analysis and prevention[C] . Beijing, 1995.
[8] 褚武扬. 氢损伤与滞后断裂[M] . 北京: 冶金工业出版社, 1988.
[9] Malcolm Hay. Corrosion of laboratory HIC test and field sour gas environments using hydrogen permeation measurements[C] . Material Performance, Dec. , 1991, 43~48.

作者简介: 冯耀荣, 男, 1960 年 9 月出生, 教授级高工, 博士后。主要研究方向为石油专用管和油气输送管的力学行为、环境行为、安全评价及失效预测预防。获国家级、省部级二、三等奖 5 项, 发表论文 150 余篇。
Email: fengyr@tgc.org

《焊接学报》被《EI》收录的论文目次

2001 年第 4 期

自保护药芯焊丝熔敷金属韧化的机理	陈 铮 等
..... 栗卓新 等	CO ₂ 弧焊电流波形的多参数自寻优智能控制
未熔透熔池液面三维形态的数值模拟	 俞建荣 等
..... 何景山 等	基于回归分析理论的点焊质量监测模型
铝基复合材料 SiC _w /6061Al 的激光焊接	 张忠典 等
..... 刘黎明 等	熔化极脉冲电弧焊熔滴过渡特征光谱信息及其应用
基于视觉图像传感的精密脉冲 TIG 焊焊缝跟踪	 杨运强 等
..... 陈 念 等	神经网络在机器人焊接参数规划中的应用
玻璃与可阀合金的电场辅助阳极连接	 彭 湃 等