

# 在役 X52 输气管线钢塑性和韧性研究

朱天寿<sup>1</sup> 胡兴民<sup>1</sup> 黄淑菊<sup>2</sup> 郭生武<sup>2</sup>

(1. 中国石油长庆油田分公司第一采气厂 2. 西安交通大学“金属材料及强度”国家重点实验室)

朱天寿等. 在役 X52 输气管线钢塑性和韧性研究. 天然气工业, 2006, 26(3): 117-120.

**摘要** 陕北某气田输气干线由进口 X52 纵焊管段经现场焊接而成。输送的介质中, H<sub>2</sub>S 含量为 500~1000 mg/L, CO<sub>2</sub> 含量为 5% 左右, 同时还有少量凝析水, 该环境下潜伏着氢损伤危险。为此, 测试了该输气干线 X52 钢的延伸率和 J 积分值, 研究了经过 NACE 溶液中的浸泡、焊缝质量和残余应力等对延伸率和 J 积分值的影响。结果表明, 输送含 H<sub>2</sub>S 的 X52 输气管线随着服役时间的延长, 其延伸率和 J 积分值会有所下降, 并且焊缝及其附近延伸率降低的幅度大于母材。

**关键词** 陕北气田 含硫天然气 X52 钢 输气管线 延伸率 J 积分 影响

氢损伤的表现形式之一是引起钢材塑性和韧性降低, 这意味着管线脆性爆破倾向日益增大<sup>[1-3]</sup>。为避免管线的脆性爆破, 管道用钢对延伸率( $\delta$ )有最低要求。根据 API SPEC 5L 标准, X52 钢的  $\delta \geq 26\%$ 。而输气干线经过 6~7 a 工作后, 个别管段的  $\delta$  已低于规定的最低值; 个别管段焊接缺陷的  $\delta_{\min}$  值仅有 10.5%; 环焊缝含焊道裂纹管段的  $\delta$  接近 0。所以输气干线的塑性、韧性变化程度, 引起塑性和韧性下降的原因以及这两个指标发展的趋势等问题关系重大。本研究从同一条干线上截取 10 段不同外部环境下有代表性的管段, 测试了这些管段典型部位的  $\delta$  和 J 积分值, 探讨了经过 NACE 溶液的浸泡、焊缝质量、残余应力和金相组织等对  $\delta$  和 J 积分值变化的影响。

## 一、试验条件

### 1. 试样

为了探讨管线不同部位  $\delta$ , 从干线的纵焊缝、环焊缝和母材上, 截取轴向母材、环向母材、含环向焊缝、含纵向焊缝、沿环焊缝、沿纵焊缝和含交叉焊缝(简记为 A、B、C、D、E、F 和 G)的拉伸试样, 试样形状和尺寸以及取样部位示于图 1、表 1 和图 2。

另外沿环焊缝(4<sup>#</sup> 和 6<sup>#</sup> 管段)和沿纵焊缝(3<sup>#</sup> 管段)及截取焊缝、母材和热影响区 J 积分试样。E、F 和浸泡 NACE 溶液的用小试样, 其余用大试样。J 积分试样尺寸和形状示于图 3 和表 2。

**作者简介:** 朱天寿, 1956 年生, 高级工程师; 1983 年毕业于原西南石油学院采油工程专业; 长期从事油气田开发管理及腐蚀与防护的研究工作。地址: (710021) 陕西省西安市长庆兴隆园小区。电话: (029) 86590910, 13995083315。E-mail: zts1\_cq@petrochina.com.cn

图 1 试样的尺寸和形状

表 1 拉伸试样尺寸表 mm

试样	B	W	C	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	R
小试样	12.0	24.0	管壁厚	50	160	40	25
大试样	38.1	50.2	管壁厚	100	340	120	50

注: 试样的两个大表面为管壁的内外表面, 不进行机加工。

图 2 拉伸试样取样位置示意图

图 3 J 积分试样的尺寸(见表 2)和形状

表2 J积分试样的尺寸表 mm

地名	管号	线切割深 $a$	$a_p = a + a_r$	$B$	$W$
大弯	3 <sup>#</sup>	6.0	9.6	8.0	16.0
郭家洼子	6 <sup>#</sup>	4.0	7.2	6.0	12.0
马家梁	4 <sup>#</sup>	4.0	7.2	6.0	12.0

注： $a_r$ 表示预制疲劳裂纹深。

### 2. NACE 溶液浸泡试验条件

拉伸试样在 NACE 溶液中浸泡 168 h、504 h 和 840 h 后再进行拉伸试验。J 积分试样浸在 NACE 溶液中 504 h 后进行 J 积分试验。NACE 溶液成分：5% NaCl + 0.5% CH<sub>3</sub>COOH，每天 4 次向溶液通 H<sub>2</sub>S，每次通 H<sub>2</sub>S 的时间为 0.5 h。试验进行到选定的时间后，取出试样，清洗，尽快进行拉伸试验。

## 二、拉伸试验结果

由 36 组干线取样的拉伸测试结果整理出  $\delta_{max}$ 、 $\delta_m$ 、 $\delta_{min}$  以及  $\delta$  分散度与取样位置的关系示于表 3，A、B、C 和 D 共 4 种取样位置(大试样)的  $\delta$  值示于图 4，由图表所示的结果得出以下认识。

表3 不同位置取样的  $\delta$  值和其分散性 %

位置	$\delta_m$	$\delta_{max}$	$\delta_{min}$	$(\delta_{max} - \delta_{min}) / \delta_{max}$
A	36.2	41.0	33.0	19.5
B	35.3	41.0	29.5	28.0
C	27.7	34.0	≈0.0	≈100.0
D	27.1	30.0	23.0	23.3
E	19.0	24.5	10.5	57.1
F	20.5	21.5	19.5	9.3
G	25.5	28.5	19.5	31.6

图4 管线 4 个取样位置  $\delta$  值的比较图

注：4 最小值；5 平均值；6 最大值

- (1) 焊缝试样的  $\delta$  值低于母材的  $\delta$  值。
- (2) 对于含焊缝试样而言，环焊缝和纵焊缝的  $\delta_m$

值相近，交叉焊缝的  $\delta_m$  值最低。

(3)  $\delta_{min}$  的最低值出现在环焊缝，其值接近 0； $\delta$  值分散度最大的也是环焊缝，接近 100%。

## 三、在 NACE 溶液中浸泡后的 $\delta$ 值

在 NACE 溶液中经过不同时间的浸泡，4 种位置取样的强度和  $\delta$  值列于表 4。表中结果的平均值和与之相同尺寸，但未经 NACE 溶液浸泡试样的测试结果比较示于图 5。由表 4 和图 5 的结果可得出以下认识。

表4 NACE 溶液浸泡和未浸泡的  $\delta$  值表

位置	时间 (h)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	$\delta_m$ (%)	$\delta_{max}$ (%)	$\delta_{min}$ (%)
C	168	415	508	16.5	18.5	14.5
	504	410	505	16.3	19.0	13.5 <sup>1)</sup>
	840	490	545	15.3	16.0	14.0
D	168	490	543	15.0	16.0	14.0
	504	503	555	12.5	14.0	11.5
	840	510	530	7.8	13.5	2.0 <sup>1)</sup>
B	168	440	503	25.0	26.6	25.0
	504	443	520	24.8	26.5	23.0
	840	435	500	25.3	24.5	26.0
A	168	450	490	27.0	27.0	27.0
	504	450	500	26.3	26.5	26.0
	840	423	483	28.0	28.5	27.5

注 1)：断在焊缝或焊缝/热影响区交界处。

图5 在 NACE 溶液中浸泡后对  $\delta$  的影响

(1) 经过 NACE 溶液浸泡后，母材  $\delta$  值降低的幅度明显小于含焊缝试样  $\delta$  值降低的幅度。

(2) 含纵焊缝试样  $\delta$  值下降幅度大于含环焊缝  $\delta$  值下降幅度。

(3) 在 NACE 溶液中浸泡 168 h 期间内  $\delta$  值降低明显。含纵焊缝试样  $\delta$  值随着浸泡时间增长而下降，延长浸泡时间对其它试样  $\delta$  值的影响较小。

(4)在 NACE 溶液中浸泡后对强度没有规律性的影响。

## 四、J 积分试验结果

浸入 NACE 溶液的  $J_{0.05}$  值和相同尺寸试样,未浸 NACE 溶液的  $J_{0.05}$  值测试结果示于图 6。从图示的 3 个管段  $J_{0.05}$  值,以及浸 NACE 溶液和未浸 NACE 溶液  $J_{0.05}$  值的比较可得出以下认识。

图 6 在 NACE 溶液中浸泡对  $J_{0.05}$  的影响

(1)大弯 3<sup>#</sup> 管段  $J_{0.05}$  值明显高于马家梁 4<sup>#</sup> 管段和郭家洼子 6<sup>#</sup> 管段  $J_{0.05}$  值。

(2)焊缝  $J_{0.05}$  值低于母材和热影响区  $J_{0.05}$  值。

(3)在 NACE 溶液中浸泡,降低了管线  $J_{0.05}$  值,3<sup>#</sup> 管段  $J_{0.05}$  值降低的幅度更大。

## 五、脆化的原因

### 1. H<sub>2</sub>S 是诱发脆性的主要原因

气田输气干线内壁没有保护措施,虽然从气井采出的天然气经过了集气站脱水,但天然气在长距离输送过程中仍然有少量凝析水聚集在低洼地带。管线内天然气中含 500~1000 mg/L 的 H<sub>2</sub>S 和 5.0% 左右的 CO<sub>2</sub>。在这种环境下,溶于水中的 H<sub>2</sub>S 发生电离,生成的 H<sup>+</sup> 离子在阳极进行还原反应,部分还原的 H 原子浸入钢中。

众所周知,浸入钢中的 H 原子能引起氢脆,降低钢的塑性和韧性。H<sub>2</sub>S 具有促进 H 原子浸入钢中的毒化作用,即浸入含 H<sub>2</sub>S 的 NACE 溶液中,促进了对氢脆敏感部位的脆化。管线的焊缝及其附近部位,由于组织和内应力的不均一性高于母材,强氢陷阱多,所以经过 NACE 溶液浸泡后,焊缝降低延伸率的幅度大于母材。

对于受力作用的管线而言,当浸入钢中的氢在位错携同下向强氢陷阱迁移的量达到临界值时,在强氢陷阱处就萌生了硫化物应力腐蚀(SSC)裂纹。

随着管线工作时间延长,钢中 H 原子量增加。在氢和工作应力协同作用下,SSC 裂纹扩张。在截取的 10 个管段中位于下山墩的 1<sup>#</sup> 管段环焊缝焊道就存在扩展的 SSC 裂纹。同时含该裂纹的焊缝的局部硬度较高(焊道区  $HV \geq 240$ ),所以 1<sup>#</sup> 管段含焊道裂纹试样拉伸时,发生脆断,延伸率接近于 0。

### 2. 焊缝质量对塑性的影响

检测中发现,郭家洼子 2<sup>#</sup> 管段环焊缝局部存在深度达 1.5 mm 的下凹和 0.6 mm 的咬边,1<sup>#</sup> 管段焊缝的局部硬度高(如上所述),所以沿这两个环焊缝取样的延伸率就低于焊缝质量较好的 10<sup>#</sup> 管段取样的延伸率,见表 5。

表 5 沿 3 个管段环焊缝  $\delta$  值的比较表<sup>1)</sup> %

地名	管号	$\delta_n$	$\delta_{max}$	$\delta_{min}$	$(\delta_{max} - \delta_{min}) / \delta_{max}$
郭家洼	0 <sup>#</sup>	23.9	24.5	23.3	5
下山墩	1 <sup>#</sup>	17.3	19.5	15.0	21
郭家洼	2 <sup>#</sup>	16.5	22.5	10.5	53

注 1):1<sup>#</sup> 管段从不含裂纹处取样测试的结果。

### 3. 残余应力对脆化的影响

氢在受力作用钢中扩散的主要方式是位错携同其迁移<sup>[4]</sup>。焊缝附近存在焊接引进的残余应力,特别是纵焊缝,由于焊接和弯管的共同作用,引进的环向残余应力最高,达 170 MPa,见图 7。这表明,在管线工作中纵焊缝附近管壁承受了更大的应力。由于氢损伤的累积效应,经过 6~7 a 工作的纵焊缝附近可能存在更多的氢,导致了浸在 NACE 溶液中的纵焊缝试样延伸率降低幅度更大(见图 5)。

图 7 8<sup>#</sup> 管段 3 种焊缝附近的环向残余应力分布

### 4. 组织对脆化的影响

韧性是与钢的强度和塑性都有关系的性能。3 个管段拉伸性能的测试结果表明,大弯处 3<sup>#</sup> 管段的强塑性都高于马家梁 4<sup>#</sup> 管段和郭家洼子 0<sup>#</sup> 管段。

所以 3# 管段的韧性最高(图 6)。而 3# 管段之所以具有好的强、塑、韧的配合,则与钢的组织有关。

X52 管线钢基体组织都是铁素体加少量珠光体,但是弯头母材铁素体晶粒度比直管母材的约高 2 级,所以细化组织是提高管线钢强、塑、韧性的重要途径。

## 六、脆化趋势的分析

集气干线中输送的天然气中有水分和  $H_2S$  共存时, H 原子就有了源泉,即氢损伤就要累积和发展。从经过 NACE 溶液浸泡后  $\delta$  值和 J 值的变化趋势及工作 6 年后管段上的残余应力分布规律看出,随着管线工作时间的延长,焊缝附近的  $\delta$  值、J 值还会下降,并且纵焊缝的  $\delta$  值下降的幅度更大。所以输送流体中含  $H_2S$  介质的管线,焊缝及其附近不断脆化,焊缝及其附近爆管的倾向增大。笔者的研究结果与含硫的四川气田输气管线失效部位大部分发生在焊缝及其附近的结果相一致<sup>[5-7]</sup>。

## 七、结 论

(1) X52 管线钢输送含  $H_2S$  的天然气介质在运行 6~7 a 后,母材的  $\delta$  值和 J 积分值高于焊缝,沿环焊缝的  $\delta_m$  和  $\delta_{min}$  最小,分散度最大。

(2)  $H_2S$ 、残余应力、组织均一性和弥散度、焊接缺陷等影响钢的塑性和韧性。在含  $H_2S$  介质中,焊

缝及其附近部位由于残余应力较高、组织不均一和存在焊接缺陷,使该部位的塑性和韧性降低的幅度大于母材。

(3) 输送含硫及水分的天然气管线随着服役时间的延长,焊缝部位具有发生脆性爆裂的倾向。

## 参 考 文 献

- [1] 卢绮敏,等.石油工业中的腐蚀与防护[M].北京:化学工业出版社,2001:100-101.
- [2] 王健,郭成华.抗硫输气管道选材[J].天然气与石油,2003,21(4):13-15.
- [3] TIWARI S B, RAY A K, MITRA A, et al. Investigation on the mechanical degradation of a steel line pipe due to hydrogen ingress during exposure to a simulate sour environment [J]. Corrosion Science, 1995, 37(6):885-896.
- [4] 黄淑菊.金属腐蚀与防护[M].陕西西安:西安交通大学出版社,1988:114-115.
- [5] 王仪康,杨柯,单以银,等.高压输气管线用钢[J].焊管,2002,25(1):1-9.
- [6] 林雪梅.泸威输气管线破裂原因分析[J].天然气与石油,1997,15(1):22-26.
- [7] 王茂棠.大型输气管线选材中的几点看法[J].焊管,2000,23(3):32-43.

(修改回稿日期 2005-12-23 编辑 居维清)