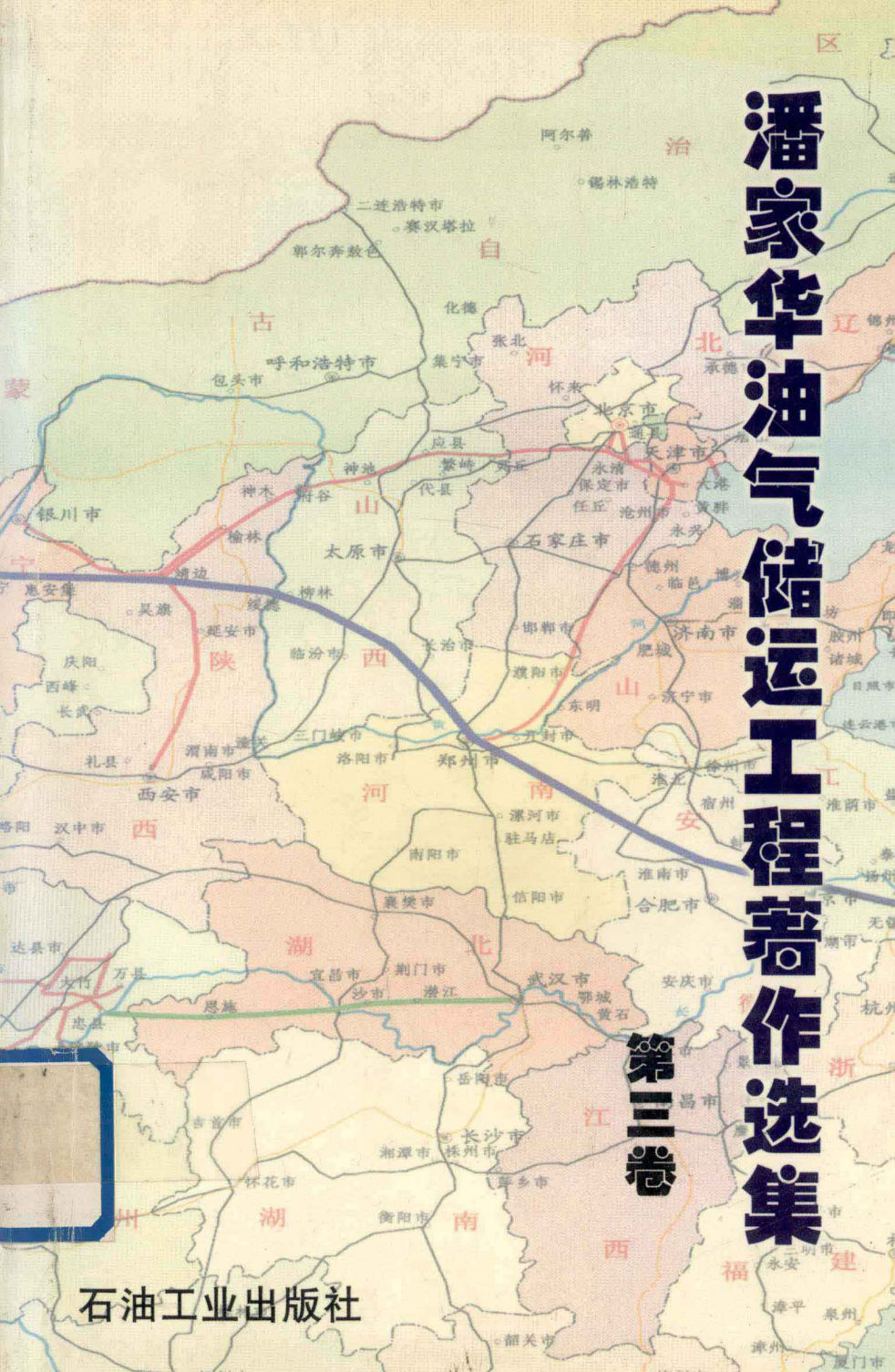


潘家华油气储运工程著作选集

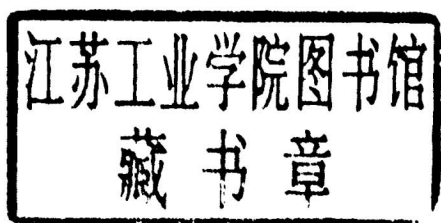
第三卷



石油工业出版社

潘家华油气储运工程著作选集

第三卷



石油工业出版社

内 容 提 要

本卷汇集了著名的油气储运工程技术专家潘家华撰写的论文和专著 12 篇,主要概括反映了我国管道工业用钢及钢管的发展历史、前景和方向;输气管道氢致裂纹的研究、输气管道的风险分析及原油管道改输天然气应关注的问题以及圆柱形金属油罐设计等内容进行了较详细的论述。该选集理论精湛、资料翔实,是一部集科学性、实用性、指导性和可读性于一体的科技文献。

选集不仅适用于油气储运界的技术人员和有关高等院校的师生阅读,而且对我国即将开工的西气东输管道的建设提供了有益参考。

图书在版编目(CIP)数据

潘家华油气储运工程著作选集.第3卷/潘家华著.

北京:石油工业出版社,2001.3

ISBN 7-5021-3261-9

I. 潘…

II. 潘…

III. 石油与天然气储运-文集

IV. TE8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 80875 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省廊坊市特教印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 11.625 印张 280 千字 印 1—2000

2001 年 3 月北京第 1 版 2001 年 3 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3261-9/TE·2472

定价:38.00 元

序

潘家华教授的油气储运工程论文,是中国石油管道事业宝贵的理论财富,第二卷、第三卷所收录的内容,涉及管道用钢、管道安全运行以及管道工业发展的各个方面,是他近十年来潜心研究成果的撷英,必将对管道事业发展产生重要影响。

中国石油管道由1970年东北“八三”会战开始,已经走过了三十年的光辉历程。随着国家“西部大开发”战略的实施,涩宁兰天然气管道、兰成渝成品油管道、忠武天然气管道相继开工建设,特别是“西气东输”工程即将动工,标志着管道事业进入了新的发展时期。三十年来,管道事业从无到有,从小到大,凝聚了无数科技工作者的心血和汗水,潘家华教授就是广大科技工作者的杰出代表。他以身作则,潜心研究,不仅解决了生产上的许多技术难题,而且带动了一大批有志投身管道事业的青年人,为丰富油气储运工程理论、为管道事业进一步发展奠定了基础。

潘家华教授忠诚于管道事业,尽管已经七十高龄,仍兼任中国石油管道系统技术顾问,兼任天津大学、上海交通大学、石油大学、解放军后勤工程学院等几所高等学府教授。他对管道发展战略以及钢材、管材、焊接、安全等方面技术问题极为关注,进行了大量研究,多次向国家有关部门提出自己的建议,并得到国家有关部门的重视与采纳。在国内许多企业和大型会议上做过学术报告,每每听者芸芸,均感受受益匪浅。潘家华教授的文集,无论是在对在役管道的运营,还是新管道建设,都提出了自己独到的观点。他的学术观点是建立在大量的实践与科学研究基础上的,目前国内外许多同行、专家、学者都与他保持密切联系。他的书桌、案头经常摆放世界最新的管道发展动态,他的研究成果始终相接于世界前沿水平。

潘家华教授是既有实践经验又有理论建树的管道专家,他任中国石油天然气管道局总工程师时,我任副局长,他既是我的同事,更是令我敬佩和尊重的老师。我任管道局局长时,他已经到退休年龄,但仍为管道事业的发展无私奉献着自己的智慧和学识。我感谢潘老对我的支持和帮助,也感谢他对管道事业的忠诚与奉献。

衷心祝愿潘家华教授健康、长寿,愿他为中国乃至世界管道事业的发展不断做出新的贡献。

中国石油天然气股份有限公司

西气东输项目经理部 陈吉庆

2000年12月30日

序

潘家华教授是原中国石油天然气管道局总工程师,是天津大学等多所高校的兼职教授。1952年毕业于天津大学机械系。早年曾从事炼油厂机械与设备的教学和设计工作,70年代初我国开始大规模建设长距离输油管道——东北输油管网时,潘家华同志即投身于管道建设,从设计工程师成为局的总工程师。他特别注重从工程实践中发现问题,从理论上寻找原因,并吸收国外的经验,从而找出解决问题的途径。他在油气储运工程的实践中,第一个将断裂力学的理论用于管道和储罐的选材及设计工作,并不断修改完善有关的设计、施工技术规范。

他是将风险管理的理论和方法引进我国油气储运工程的首创者。他所著的“油罐及管道强度设计”等专著,不仅是高等院校储运专业的教材,也是设计、施工人员的重要工具书。近年来,他作为原总工程师和现高级顾问,更是从我国能源发展战略的高度,对我国油气管道的发展方向和应注意的问题,以及油气战略储备的规划等发表了重要的论证。

继1993年出版了第一本潘家华油气储运工程论文集以来,这第二、第三两卷选集荟萃的论文正是潘总根据我国油气管道工业不断发展的新形势,在管材选用、焊管质量,管道断裂事故分析、管道运行安全及风险管理等方面进行科学研究及工程实践经验的总结,不仅适用于油气储运界的工程技术人员和高等院校师生,对石油化工、燃气输配、热力管网、煤及矿浆管道等行业的技术人员也有重要参考价值。

当前我国的油气管道建设正面临一个新的高潮,连绵近4000千米的西气东输工程即将开工建设,中俄油气管道工程也正在规划之中,城市输配气管网正在迅速发展,相信这两本选集的出版无疑是一场及时雨。

梁翥章 严大凡

2000年12月30日

目 录

关于输气管道氢致裂纹的研究	(1)
我国管道用钢及钢管的发展前景	(10)
我国管道钢管发展方向	(19)
油气管道的风险分析	(29)
我国油气管道用钢及焊管的发展方向	(67)
从我国能源发展战略看输气管道的发展	(74)
管道工业发展与冶金技术进步	(80)
ERW 钢管的历史与发展前景	(87)
我国管道工业的回顾及展望	(93)
原油管道改输天然气应关注的几个问题	(97)
西气东输工程	(106)
圆柱形金属油罐设计	(114)
本书所用非法定计量单位的换算	(352)

关于输气管道氢致 裂纹的研究

摘 要 输气管道用钢氢致裂纹的研究源于两个方面：输送压力的提高，造成硫化氢的分压 $p_{\text{H}_2\text{S}}$ 的提高，使得氢致裂纹问题突出；世界范围内的天然气需求量增加，许多含硫化氢较高的气田正在开发之中，客观上促进了此项研究和抗氢致裂纹钢材研究的开展。认为减少氢致裂纹发生的可能性，应在两个大的方面采取措施：(1) 输送介质脱硫、脱水；避开产生氢致裂纹的输送温度；输送介质的 pH 值应大于 5。(2) 提高管材起裂时最低氢含量 C_{th} ，控制锰(Mn)和磷(P)含量，以减少管材偏析。

我国粗钢产量占世界第一位，然而管道用钢基本上依靠进口。原材料、能源及技术含量为生产钢材的三大要素。普通钢及管道钢原材料及能源消耗大体相同，但两者价格相差甚远，一般差 40% 左右，这是由于技术含量不同之故。

管道用钢的技术要求在全球钢材中要求是最高的，一个国家管道钢生产的能力大体反映了该国家冶金工业的技术水平。我国应当大力发展高技术含量产品，在冶金行业应大力发展管道用钢。

1995 年宝山钢铁集团先后向国内陕京输气管道等三条重要管道提供了 X65、X60、X52 三种管道钢，质量优良，达到了国际水平，成功地迈出了我国冶金工业生产优质管道钢的第一步，这是值得庆贺的。但这毕竟只是第一步，今后还有很长的一段路要走，生产抗氢致裂纹的管道钢就是其中重要的一步。

一、HIC 的研究及其背景^[1,2]

HIC 为 Hydrogen Induced Crack 的缩写，我国一般译为“氢致

裂纹”(以下简称 HIC)。

近年来,对 HIC 的研究不断深化,抗 HIC 管材亦有较快的发展,其发展背景主要有两个方面。

(1)由于输送压力 p_o 的提高,造成硫化氢的分压 p_{H_2S} 的提高,从而使 HIC 更为突出。

在防腐方面,国际上广泛采用美国防腐学会标准,简称 NACE (American National Association of Corrosion Engineers)标准,该标准划定酸气及甜气的范围如下:

$$\begin{aligned} p_{H_2S} > 0.35 \text{ kPa} & \quad \text{酸气} \\ p_{H_2S} \leq 0.35 \text{ kPa} & \quad \text{甜气} \end{aligned} \quad (1)$$

硫化氢的分压 p_{H_2S} 决定于操作压力 p_o 及硫化氢的含量(见式(2)):

$$p_{H_2S} = p_o \times V_{H_2S} \quad (2)$$

式中 p_{H_2S} ——硫化氢分压, kPa;

p_o ——操作压力, kPa;

V_{H_2S} ——在输送介质中硫化氢的体积百分比。

由式(2)看出,在 V_{H_2S} 不变的情况下, p_o 越高则 p_{H_2S} 也越高,从而越容易产生 HIC。近十余年来, p_o 的选取有增高的趋势,如我国早期建设的四川省的输气管道 p_o 约在 2 000~2 500 kPa 之间,而近年来国外输气管道 p_o 多数在 8 000~10 000 kPa 之间,预计拟议中的俄中输气管道压力也将在 8 000~10 000 kPa 范围内。由图 1 可清楚地看出酸气与甜气的划分与 p_o 之间的关系。

从图 1 看出:

$p_o = 1\ 000 \text{ kPa}$, $V_{H_2S} > 0.04\%$ 为酸气;

$p_o = 2\ 000 \text{ kPa}$, $V_{H_2S} > 0.02\%$ 为酸气;

$p_o = 5\ 000 \text{ kPa}$, $V_{H_2S} > 0.008\%$ 为酸气;

$p_o = 10\ 000 \text{ kPa}$, $V_{H_2S} > 0.004\%$ 为酸气。

只有将酸气变为甜气才允许输送,在 p_o 较高时,通常采用加强天然气脱硫设备的能力及采用抗 HIC 管材两种手段,两者要求

到何种程度应根据优化原则确定。气管道输送压力的增加是抗 HIC 钢发展的动力。

(2) 由于天然气需求量的增加, 在世界范围内一些含硫化氢 (H_2S) 较高的气田正在开发中, 这也促进了对 HIC 的研究及抗 HIC 钢材的发展。

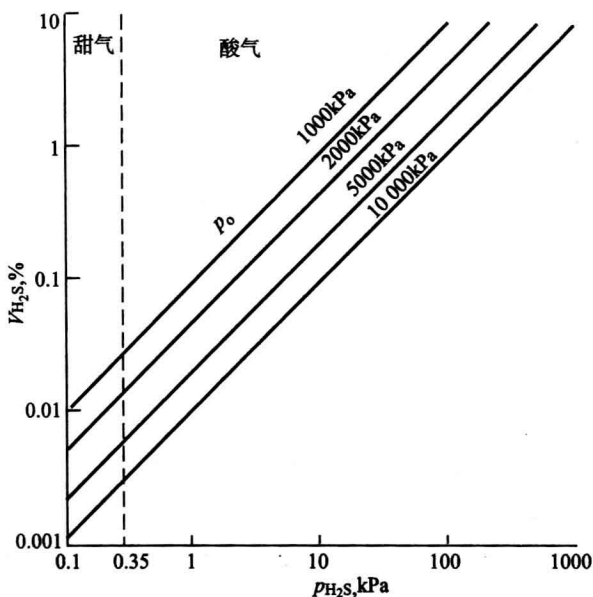
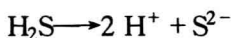


图 1 NACE 标准 MR-01-75-88 给出的酸气定义

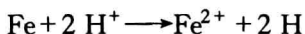
二、HIC 产生的机理

HIC 产生的机理按以下 6 个步骤进行(见图 2)。

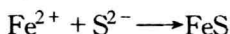
(1) 天然气中的水附着于钢管的内表面, 硫化氢 (H_2S) 在水中形成硫及氢的离子:



(2) Fe 夺取 H 的正电荷, 成为 Fe^{2+} 及 H 原子:



(3)形成硫化铁(FeS):



硫化铁 FeS 为红褐色物体,附着于钢管的内表面,清管时可清除下来并通过收球器排出管外。

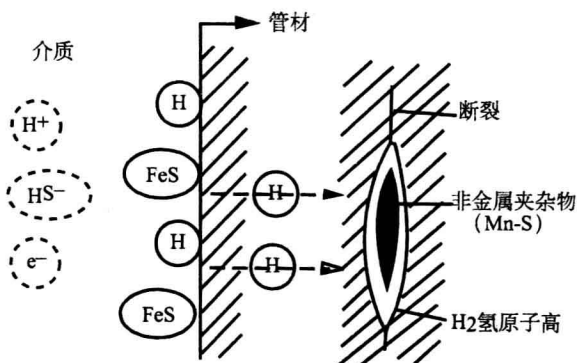


图2 HIC产生机理示意图

(4)H 原子体积很小,根据其分压大小向钢中扩散。H 原子首先聚集于非金属夹杂物、气孔及偏析中。

(5)在存留处,H 原子变成氢气(H_2)分子,体积增大 20 倍:



(6)体积增大过程中,存留处压力急剧增加,如超过金属起裂应力时会造成裂纹扩展;如存留处在管内表面,则形成鼓泡;如在内部则形成平行于金属表面的裂纹,这些裂纹通常成阶梯状。

以上为典型的情况。在个别情况下,H 原子与钢中的碳生成 CH_4 ,而 CH_4 在缺陷中或晶界处聚集并造成裂纹,此时在裂纹扩展处的钢中有脱碳现象^[3]。在另一种情况下,H 原子可侵入晶格,使钢材松、脆并导致破坏。

三、解决 HIC 的构思

解决 HIC 的构思详见示意图 3。

图 3 中的纵坐标表示钢中吸收的氢的浓度,横坐标表示环境

状况,向左表示和缓,向右表示苛刻。

C_o 表示由环境中钢吸收氢的含量。由 C_o 曲线可以看出,环境和缓时,如 p_{H_2S} 较低等,对应的 C_o 值也低,随着环境的苛刻, C_o 值上升。

C_{th} 表示钢材起裂时所需要的最低氢含量,亦即表示管材的抗 HIC 能力。抗 HIC 能力强,则钢中要达到很高的氢含量才会起裂,亦即才会产生 HIC,反之则吸收较低的氢就开始起裂,亦即就开始产生 HIC。

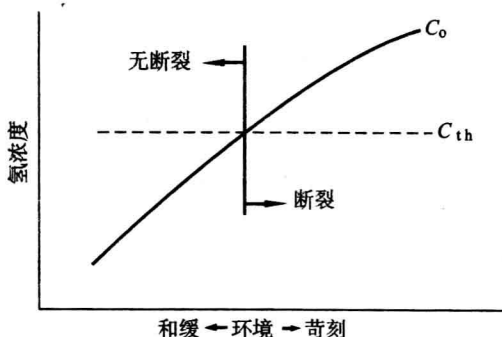


图3 解决 HIC 的构思

C_o 与 C_{th} 的交点是一个分界线(见图3),分界线的左侧不产生 HIC,右侧产生 HIC。

当管材抗 HIC 能力强时, C_{th} 向上移,与 C_o 曲线的交点亦沿曲线向上移,这表明这种钢在环境条件较严峻时亦不产生 HIC。反映在横坐标上,交点坐标沿横坐标向右移。从另一个方面,可采取脱硫、脱水等措施,使环境改善,使对应于 C_o 上的各点沿曲线向左下方移动。

总之,应从两个方面做努力,其一是采取脱硫等一系列措施,使 C_o 上的点向左移;另外,从冶金学上想办法,提高管材抗硫化氢(H_2S)能力,使 C_{th} 向上移,最终使对应于操作状态的 C_o 上的坐标点落在 C_o 与 C_{th} 交点的左侧,这样则不产生 HIC。最终的取值决定于经济上的优化及一定的安全度。

四、关于 C_0

为减少 HIC 发生的可能性,希望 C_0 沿曲线向左移动,通常采用以下方法。

1. 对输送的介质脱硫和脱水

这是传统的、最有效的方法,然而随着操作压力 p_0 的提高,对 V_{H_2S} 要求越来越低,这意味着脱硫设备及脱水设施的投资及其操作费用的大幅度提高,这是有效的方法,但并非惟一的手段。

2. 关于介质温度

试验表明,介质温度在 $20\sim 40^\circ\text{C}$ 之间易产生 HIC。随着温度的提高,硫化氢(H_2S)的饱和浓度下降,但腐蚀率的最大值仍在此温度范围内。为此,美国的 NACE 标准及英国的 BP 标准均选 $25\pm 3^\circ\text{C}$ 为试验温度,如有可能应使介质温度避开这一温度范围。

3. 关于 pH 值

试验表明,pH 值大于 5,氢向管材的扩散量显著减少,这是因为铜(Cu)原子可在管材表面形成稳定的保护膜;而 pH 小于 5 时,Cu 无法形成保护膜;以致在此情况下,氢向管材的扩散量增加。

4. 关于管材中 Cu 的含量

试验表明,在管材中 Cu 含量大于 0.30% 时,Cu 可在管材表面形成稳定的 Cu 保护膜,但当 Cu 小于 0.30% 时,则保护膜为多孔的,起不到防止氢向管材扩散的作用。如上所述,即使 Cu 含量大于 0.30%,形成了稳定的保护膜,而当 pH 小于 5 时,此保护膜就会被酸性破坏,因而是无效的。

五、关于 C_{th}

C_{th} 的高低表明管材抗 HIC 能力的强与弱。为提高 C_{th} ,通常采用以下办法。

(1)减少非金属夹渣物,改变非金属夹渣物的形状。非金属夹渣物主要是硫化锰(MnS),它是 H 存留的主要去处。锰(Mn)是

支持管材强度的主要元素,而硫却有百害而无一利,一般抗 HIC 管材要求硫(S)含量不大于 0.002%。

环形非金属夹渣物抗起裂能力远高于长形非金属夹渣物。为此,减少非金属夹渣物的同时要改变其形状,使之由长条形变成球形,采用 Cu 处理可改变其形状,由长形变为球形。实践表明,Cu/S \approx 2 为佳,Cu 过高反而形成 Cu—O—S 链状物。

(2)减少管材中的偏析。冶金工作者的实践经验表明,将 Mn 与 P 加以控制可以减少偏析,通常取:

$$\text{Mn}\% < 1.5\%, \quad \text{P}\% < 0.015\%$$

(3)均匀、细化显微组织可减少马氏体硬块。

六、关于管材抗 HIC 能力的判定

目前国际上通用两种标准,一为美国 NACE 标准,一为英国 BP 标准。

NACE 标准,其试验溶液为 0.5% 醋酸,5% 氯化钠(NaCl)及饱和硫化氢(H₂S),其 pH 值为 2.8~3.5,浸泡 96 h,观察是否有裂纹、氢渗透量及起泡的情况。

BP 标准,其试验溶液准人造海水及饱和硫化氢(H₂S),其 pH 值为 5.1~5.3,浸泡 96 \times h,观察是否有裂纹、氢渗透量及起泡情况。

为确定裂纹的严重程度,用断裂长度比(CLR)、断裂厚度比(CTR)、断裂面积比(CSR)表示,其定义见图 4。

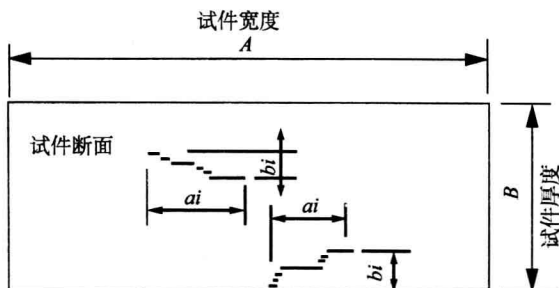


图 4 HIC 裂纹敏感性判断

计算 CLR、CTR、CSR 的公式如下：

$$CLR = \sum ai/A \quad (3)$$

$$CTR = \sum bi/B \quad (4)$$

$$CSR = \sum ai bi/(AB) \quad (5)$$

关于判定方法,有些学者提出不同意见,认为试验方法与实践情况尚有一定差距。

(1)对于管材来说,腐蚀只来自内表面,外表面无 HIC 问题,而试验则是来自两个方面,与实际情况有较大差距。

(2)在试验状态下,溶液是静止的,因而铜的保护膜不会被腐蚀;而在实际运行中,急速流动的气流会把铜保护膜部分破坏,因而在试验中往往对铜保护膜的作用估计过高。

总之,管道工作者应对试验与实际状况之差异做到心中有数。到目前为止还无更好的方法代替以上方法。

七、关于 HIC 问题的断裂力学分析^[4,5]

由上所述可知,HIC 的破坏系由于氢原子渗入钢中并聚集于非金属夹杂物等存留处。在存留处氢原子变成氢分子,体积扩大 20 倍,从而使存留处尖端应力加大。当此应力超过临界应力时,则产生裂纹扩展,扩展后压力减小,从而尖端应力减小,裂纹停止。如氢原子继续渗入,并继续转化为氢分子,则压力还会再增加,裂纹会再扩展。由以上看出,这完全是断裂力学问题。

目前,国外有些断裂力学专家正在研究这类课题,包括:

- (1)起裂的判定;
- (2)存留处的几何形状及所处的位置对起裂的影响;
- (3)形状因子 K_{IC} 的确定等。

相信这一研究成果将会有利于抗 HIC 技术的进步。

八、结束语

(1) HIC 不仅与输送介质中 V_{H_2S} (或硫 mg/m^3) 有关, 还与操作压力的高低有关。近若干年来所建设的管道从优化原则出发多选取较高的操作压力, 故在管道工业中 HIC 的问题就更加突出。

(2) 解决 HIC 的问题可有多种途径, 如加强脱硫、脱水, 提高管材的抗 HIC 性能, 加缓蚀剂以及加内覆盖层等。目前最常用的还是对输送介质脱硫、脱水和(或)选用抗 HIC 管材。

(3) 考虑到我国输气管道的发展和前景, 我国的冶金行业应积极研制抗 HIC 钢。

参 考 文 献

1. Barthold, G Bergmann, B Jungblut, H. A. . Reduction of hydrogen-induced cracking in line pipe steels. Aktiengesellschaft der Dillinger Hüttenwerke, 1990, April
2. Barthold G. Modern line pipe steels for sour service-Experience in applying TM-rolled and accelerated cooled plate, Technical Information, AG der Dillinger Hüttenwerke, 1989
3. 李记科等. 两起蒸气输送管的氢蚀爆裂分析. 石油专用管, 1996(4)
4. Gutierrez—Solana F., Elices, M. High pressure hydrogen behavior of a line pipe steel, American Society of Metals, 1982
5. Van Gelder, K. Cracking of metals in aqueous H_2S —containing environments, second international conference on sour service in the oil, gas and petrochemical industries, 1987

我国管道用钢及钢管的发展前景

摘 要 在未来十余年中将形成我国管道工业发展的新高潮,建议我国冶金行业及制管行业积极配合这一前景,争取在市场竞争中在管材及钢管的供应上占较大份额。在未来的十余年中,长输油气管道所用钢级仍以 X56、X65、X70 为主,并预计不会采用 X80、X100 钢级。包辛格效应是一个重要的塑性力学现象,管材应充分预计到这一现象,以免制成管后强度达不到规定的要求。详细地论述了氢致裂纹(HIC)的产生机理以及解决氢致裂纹的构思,在今后大量管道的建设中必定会选择抗氢致裂纹的钢材。指出应发展我国直缝埋弧管,并预计螺旋埋弧焊管在大型油气管道建设中将逐渐被淘汰。

随着东部油田包括大庆油田、辽河油田、胜利油田、大港油田、中原油田以及华北油田等油田的开发与发展,我国的管道工业自70年代以来形成第一个发展高潮,预计在未来的10年,在我国将形成管道工业发展的第二个高潮,管道工业的第二个发展高潮有以下特点。

(1)在第二个发展高潮中将兴建长距离大口径国际管道,如由哈萨克斯坦通过新疆阿拉山口进入我国的由西向东的输送原油管道及由北向南由俄罗斯进入中国的输气管道。

(2)所建管道尤其是国际管道,无论在技术上还是管理上包括所用的设备及钢管都将具有当代国际先进水平。

(3)在第一个发展高潮中,所建管道基本上都是原油管道,而第二个发展高潮中将是输送多种介质的管道,除原油外还将有天然气管道、输煤管道以及少量成品油管道,此外,在第二个发展高潮中除陆上管道外,还会有相当规模的海底管道。