



潘家华

油气储运工程著作选集

第四卷

石油工业出版社

内 容 提 要

本卷汇集了油气储运工程技术专家潘家华撰写的论文和专著 24 篇,介绍了我国能源的主要结构,老龄化管道的管理、维护及安全运行,管道用钢及高强度管材的发展,我国管道工业的发展前景,以及对西气东输工程中管道止裂问题的思考等。本选集理论精湛、资料翔实,可供从事油气储运工作的管理人员、技术人员,以及高等院校相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

潘家华油气储运工程著作选集·第4卷/潘家华编著.
北京:石油工业出版社,2009.7
ISBN 978-7-5021-7239-8

- 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(2009)第 101497 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523546 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

850×1168 毫米 开本:1/32 印张:6.125

字数:163 千字

定价:26.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

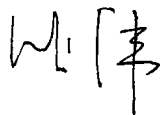
潘家华教授是我国石油天然气储运领域有很高威望的专家,他经历了我国油气储运事业发展的许多重要活动,亲身参加东北输油管网和我国第一座5万立方米浮顶储油罐设计和施工建设,参与了我国大部分油气储运重点工程建设。他曾作为管道科技的领导者,组织开展了了一大批油气储运重大科技攻关项目,取得了丰硕成果,提升了我国油气储运水平。他勤于探索,深入研究了大型储油罐、油气长输管道管材强度,断裂失效、管道运行安全、油气储运工程建设发展等重要问题。他的研究成果或被设计和施工规范所采用,或被高等院校教材所采用,一些研究成果还被用于其他行业。这些研究成果至今仍被作为相关研究的基础资料 and 重要参考文献。

多年来,潘家华教授始终持续不断地跟踪国际油气储运技术发展动态,与国外相关机构和专家保持紧密联系,以他深厚的科学素养、学术造诣、丰富的实践经验和敏锐的眼光,提出了很多我国油气储运工程建设需要关注和解决的问题。之后,这些问题多数成为社会关注的热点,被列入研究项目。他关心国家发展,联系国情,对我国油气储运事业发展中一些重要问题进行了预测和发展趋势判断,提出了一批非常有价值的建议,有些建议已被政府和企业所采纳。

潘家华油气储运工程著作选集已出版发行了三卷,这次出

版的第四卷是潘家华教授 2001 年以来的研究成果。纵观四卷内容可以看到,潘家华教授对我国油气储运的问题进行了较全面的思考,以辩证唯物主义的观点分析和认识问题,研究深入,见解独到,眼光长远,所提出的观点、方法和发展思路始终紧密结合我国油气储运事业的发展 and 需求。相信《潘家华油气储运工程著作选集第四卷》的出版必会给油气储运界带来很多启迪和帮助。

潘家华教授现担任中国石油管道公司高级顾问,我们常在一起交谈,他勤于思考的作风,探索求真,热爱管道事业的精神,爱国、奉献的思想品德,深深地感动着我。他提出的建议和意见给了我很大帮助,他是我尊敬的师长。在此,我衷心地感谢潘家华教授对我的支持,祝愿他健康、长寿,青春常在。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters. The characters appear to be '王立' (Wang Li).

2009 年 6 月

目 录

我国能源结构的改变与管道工业的发展	(1)
关于西气东输工程中管道止裂问题的思考	(9)
关于输气管道的止裂研究	(24)
21 世纪前十年我国管道工业发展预测	(40)
我国原油产需矛盾及战略储备库建设	(50)
未来十年我国油气管道用钢管发展中的几个课题	(56)
我国近期油气储运事业的发展及几点建议	(60)
我国管材及制管工业的发展趋势	(70)
以经济效益为中心大力发展我国油气储运事业	(80)
我国管道工业当前发展中的一些重要课题	(92)
我国能源战略及油气储运工业的探讨	(99)
全面提高我国油气储运事业的整体水平	(105)
中国的能源问题和国家石油储备	(117)
我国天然气工业的发展前景	(122)
高强度管线钢发展中的几个重要课题	(129)
未来十年我国管道工业的发展态势	(133)
21 世纪能源的转换及天然气管道工业	(141)
关于老龄管道的安全运行	(146)
全球能源变换及管线钢的发展趋势	(151)

管道老龄化问题及其应对措施	(158)
我国的天然气及天然气管道工业	(161)
我国天然气管道工业的发展前景	(166)
我国的能源战略及石油天然气的输送	(173)
非常规天然气及其管道输送	(183)

我国能源结构的改变与 管道工业的发展

摘 要:对世界经济发达国家近一个世纪能源结构变化的过程进行了回顾,并对世界和我国能源结构中主要能源所占的比例进行了比较。认为随着经济的发展,能源结构发生变化是一种必然的趋势,其中尤以石油、天然气逐步替代煤炭最具代表性。对我国能源结构的改变与管道工业的发展的关系做了阐述。针对输气管道建设,提出了投资风险分析、输送压力、管材等级与钢管、内外防腐层等9项重大技术课题,认为妥善解决这些课题,将对我国西气东输工程具有重要的战略性意义。

一、经济发展促进能源结构的变革

伴随着经济的发展,世界上所有经济发达国家都经历过一场能源结构的改变,随着时期的不同,能源结构发生了相应的变化。在早期以柴薪为主,中期以煤炭为主,近代以石油、天然气逐渐代替了煤炭,近若干年出现了天然气增长速度远超过原油的趋势。在能源结构中,1929年,煤占的比例为76%,1950年为61%,1999年为27%,这三种比例均为当年的世界平均值。在亚洲地区,日本、韩国、泰国和印度以煤为能源所占的比例分别为17.6%、19.2%、13.5%和56.9%。表1为1998年的统计资料。

表1 世界及我国能源结构比较

国家	煤所占比例 %	石油所占比例 %	天然气所占比例 %	水电所占比例 %
世界	22	43	25	10
中国	74	19	2	5

中国是最早以煤为燃料的国家。20世纪80年代初我国经济开始起飞时,在能源结构战略上采用了以自给自足为指导思想、以煤为主的战略,但这一战略产生了以下严重后果。

(1)空气污染严重。虽然我国近若干年经济发展迅速,但空气污染已相当严重。据统计,SO₂年排放量为 2730×10^4 t,酸雨面积已达到 1.09×10^6 km²(占国土面积11.4%),全国已有30%~40%的面积上落下过酸雨;烟尘年排放量为 2100×10^4 t,CO₂+NO_x为 1500×10^4 t。在全世界10个污染严重的城市中,中国就占5个,污染物绝大部分来自煤。

(2)低热效率。以煤发电,由于中间环节多,造成设备投资费用高,运营费用高。

再以化工工业为例。全世界约有5%的化工工业以煤为基础,中国则约有60%的化工工业以煤为基础。

若在化工工业上以天然气为原料,则能耗减少30%~50%,投资减少10%~30%。以天然气或液体燃料代替煤可大幅度提高热效率。

随着经济的发展,能源结构必须有相应的调整,这是一个客观规律。我国已进行了能源结构调整,对煤炭企业实行限产,关闭效益低的小煤矿。1996年煤产量为 13.74×10^8 t,实耗 13.02×10^8 t,库存 1.89×10^8 t。1997年对煤实行限产,当年产量为 13.3×10^8 t,库存 2×10^8 t。

在未来20年内,我国能源结构将会发生一定变化,总的趋势将是煤所占比例下降,石油天然气所占比例上升。未来能源结构预测结果见表2。

表2 未来能源结构预测

年份	煤,%	石油,%	天然气,%
2010年	64	20.6	6.2
2020年	58	21.8	9.7

在能源需求量方面,预测结果相关较大,原国家计委能源研究所预测的数字列于表3。

表3 能源需求量预测结果

年份	石油需求量,10 ⁸ t	天然气需求量,10 ⁸ m ³
2000年	1.65	300
2010年	2	1250~1300

由于我国能源结构的调整,天然气需求量的增加必定促进我国管道工业,主要是天然气管道的高速发展。

二、项目分析

1. 关于投资风险分析

在可行性研究中要解决两大问题,即技术可行性和经济可行性研究。在计划经济体制下,对于后者的研究,与国外尚有很大差距。

(1)经济界线的分析。管道到达门站的气价按下式计算:

$$A = B + C \quad (1)$$

式中 A ——天然气到达门站的气价,元/m³;

B ——井口气价,元/m³;

C ——天然气到达门站的运费,元/m³。

从国内外统计数字看,油管道运价占总价的5%~10%。而对于气价一般占40%~50%,甚至更高。由此看出,降低运价对经济是否可行是举足轻重的。

C 值可按下式计算:

$$C = L \cdot F \quad (2)$$

式中 C ——到达门站的气价,元;

L ——运距, km;

F ——天然气的运价, 元/($\text{m}^3 \cdot \text{km}$)。

A 值必须小于或等于目的地可接受的价格。当 L 值比较大时, F 值必须小, 以便使 C 值小。

F 值与多种因素有关, 但主要与运量和综合水平有关。当运量 Q 上升时, F 值下降; 当综合水平上升时, F 值下降。

实际上, 当 Q 小于一定值时, 经济上是亏损的, 此输量称为最低经济输量 Q_{\min} 。当 Q 确定后, 也可求出最大经济运距, 或称经济半径(km)。

(2) 对天然气资源进行评估。计算公式如下:

$$\text{探明储量 } Q_r > Q \cdot G$$

式中 G ——年限, 各公司取法不完全相同, 如 10 年, 15 年不等。

(3) 对市场进行评估。要与用户单位签订“照付不议”合同, 合同中包括“照供不误”条款。

2. 关于输送压力

1820 年世界最早的输气管道压力为 2.5MPa, 20 世纪 70 年代为 6.5 ~ 8MPa, 80 年代为 8 ~ 10MPa, 90 年代为 10 ~ 12MPa。个别管道的压力更高, 如 Zeepipe (挪威—比利时), 压力为 15.7MPa; Flags 为 14MPa。将于 2000 年 10 月投产的 Alliance 管道被认为是代表当代水平的天然气管道, 管道全长为 3700km, 输量为 $137 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 材质为 X70, 管径为 914mm。

提高输送压力可得到以下经济效益:

(1) 压力 p 上升可使管径 d 下降。实践证明, 管材费、施工费、运费等均可减小, 即一次投资减少。

(2) 当压力 p 和气体密度上升时, 流速、摩阻和运营费下降。

(3) 当压力 p 上升时, 气体压缩系数、压缩机站功率和运营费下降。

(4)在同样输量下,当压力 p 上升时,管径 d 减小,壁厚 t 增加,使管道的安全性提高。

为说明上述问题,将1970—1986年荷兰、比利时、法国、德国、意大利、英国六个国家共 97×10^4 km管道的事故统计数字列于表4。

表4 事故率与壁厚的关系

壁厚,mm	事故率,次/(km·a)
<5	0.00144
5~10	0.00051
10~15	0.00021
15~20	0.00006

在诸多事故中,第三方破坏及腐蚀是最主要的原因。因为当壁厚 t 增加时, d/t 减小,而管道刚性增加。当壁厚 t 增加时,同样腐蚀率支持时间增加,腐蚀点易被发现而消除隐患。但当 t 超过某一限度时,则会走向反面,即 t 增加,材质不均匀性增加,产生缺陷(如夹渣、分层、气孔)的概率也增加,故受压力容器、油罐以及管壁厚度受到限制,如油罐一般规定 $t < 38$ mm,管壁通常不大于24mm。

这样输送压力实际上受限于钢材等级。

3. 关于钢材等级

近年来由于 p 上升, t_{\max} 又受到限制,故多选用较高钢级的管材。在20世纪50年代,以X52、X56为主,60—70年代以X60为主,80年代以X65为主,90年代以X65、X70为主。

据国际上粗略统计,在20世纪90年代,X60管材占9.46%,X65管材占41.67%,X70管材占42.73%。

4. 关于压比

压比为出站压力与下一站进口压力之比。在早期, $p =$

5.5 ~ 7.5MPa, 压比为 1.5。在近代, $p = 10 \sim 12\text{MPa}$, 压比为 1.25。

近年来由于 p 增大, 压比下降, 因此全线均在较高压力下运行。由于压比小, 全线在较高压力水平下运行, 因此能耗减少。在同样条件下, 压比由 1.4 减至 1.25, 能耗减少 35%。虽然压比小, 压缩机站数增加, 但多增加的投资一般在 1.5 ~ 2.5 年内可收回。

5. 关于内涂层

目前输气管道水力计算多采用 panhandle 公式。早期 panhandle 取管内壁粗糙度为 0.02mm, 后来发现运营一段时间后粗糙度有所增加, 在公式中又增加管效率系数加以修正。当 $D < 500\text{mm}$ 时, 修正系数 $E = 0.78 \sim 0.85$, 相当表面粗糙度为 0.024 ~ 0.027mm; $D \geq 500\text{mm}$ 时, 修正系数 $E = 0.85 \sim 0.90$, 相当表面粗糙度为 0.022 ~ 0.024mm。

在加施内涂层后, 管道粗糙度可减至 0.01mm 左右。建议研究内涂层的应用涂敷技术。

6. 关于储气库

储气库是保证实现“照供不误”条款所必需的措施, 一般先做出用户的实际负荷曲线, 并据此做出储气库方案。日调峰依靠管道本身完成, 季调峰、紧急气源靠储气库完成。

7. 关于螺旋钢管与直缝钢管

世界上多数国家不赞同在高压输油气管道上选用螺旋钢管。究其原因, 主要是因螺旋管无扩径工艺而使内应力偏高, 且螺旋管相对直缝管而言, 容易焊偏, 产生缺陷的概率高, 漏检的概率也高, 焊缝外形流线较差, 焊缝容易超高等。

估计无论是“西气东输”还是“北气南送”, 均将大力吸收外资参加, 预计外方恐难接受我国的螺旋钢管方案。

建议以市场为导向, 紧跟世界科技发展潮流, 在天然气工业发展过程中大力发展我国的冶金工业, 提高管道用钢的材质等

级(如 X65、X70、X75 钢级)。与此同时,改进、提高轧制技术,为直缝埋弧焊管提供宽、厚钢板,并积极支持国内制管业开发直缝埋弧焊管技术。

8. 关于管道的外防腐覆盖层

早期管道外防腐覆盖层所采用的石油沥青、煤焦油磁漆以及冷缠胶带等已逐渐走下坡路,并开始退出国际市场。近期国外新兴的双层环氧粉末覆盖层值得注意,国外一些新建管道采用了这种技术,如前面谈到的 Alliance 管道。

双层环氧底层即为目前常用的单层环氧,外面用增塑性环氧粉末,以增加其抗机械损伤的能力,两者总厚度约为 650 ~ 1000 μm 。今后新管道可考虑采用单、双层环氧粉末热喷涂(FBE)相结合的方案,在一般地区采用单层 FBE,在可能受到机械冲击的地区可采用双层 FBE。

外层为聚乙烯的三层防腐结构也有许多优点,但底层环氧粉末喷涂的厚度必须得到保证。

9. 关于止裂

在世界管道工业发展史上,早期曾出现过脆性断裂扩展。由于已经认识了脆性断裂的机理,且由于冶金工业的进步,目前能做到韧脆转变温度(FATT)远低于防止脆性断裂所需要的温度,因而近几十年脆性断裂已近于绝迹。

当前的主要问题是延性断裂扩展。研究表明,延性断裂扩展起裂以后,止裂的最可行的办法是提高管材的冲击韧性。在 20 世纪 70 年代,许多研究单位做了大量的工作,如 Battelle 研究所(BMI)、AISI、British Gas、British Steel 以及日本的 Sumitomo 等。多数专家认为,BMI 的方法既有严格的理论推导,又有大量试验的验证,推荐采用该方法。BMI 推荐的止裂所需的最小夏比冲击值可按下式计算:

$$CVN = 3.57 \times 10^{-5} \sigma^2 (Rt)^{1/3} \quad (3)$$

式中 CVN ——为得到止裂所需的最小夏比冲击值, J;

σ ——环向应力, MPa;

R ——半径, mm;

t ——厚度, mm。

近年来, 由于输送压力和相应的钢材等级的提高, 实际已超出了式(3)理论推导和试验所包容的范围。为此, 近若干年 Battelle 对式(3)在 CVN 值超过 94J 时又加以修正:

$$[CVN]_a = (CVN)_{BMI} + 0.00269(CVN)_{BMI}^{2.04} - 15.62 \quad (4)$$

式中 $[CVN]_a$ ——当按式(3)求出的数值超过 94J 时, 经过修正得出的夏比冲击值;

$(CVN)_{BMI}$ ——按式(3)求得的夏比冲击值。

以上计算方法只用于干气 (Lean Gas)。对于富气, 如 Alliance 管道, 还需重新评价所需的夏比冲击值。

无论“西气东输”还是“北气南送”, 近十多年国外所做的止裂方面的工作已将其包容进去。当前不是重复别人的工作, 而是对他们的工作进行消化、吸收, 为我所用。

关于西气东输工程中管道 止裂问题的思考

摘 要:管道的断裂分为脆性断裂和延性断裂两大类,随着理论研究的深入和冶金工业的发展,脆性断裂问题已基本解决。而在输送压力和钢材等级提高以后,延性断裂及其止裂成为主要的研究领域。对于止裂问题,着重阐述了缺陷的允许值及临界裂纹长度与起裂、管道止裂的 Rudinger 试验、Battelle 止裂试验和止裂条件,以及定货规范中对 CVN 值的要求等理论问题。根据我国目前有关止裂问题的理论与实际研究现状,提出了深入开展止裂研究的若干重大建议以及管道试压介质选择必须注意的问题。

随着我国能源结构的转变,我国天然气管道工业将进入大发展的时期。西气东输工程建设是我国开发西部的重大举措。为此,在工程开始之前,必须细致地做好一切准备工作,其中在技术上解决天然气管道止裂的问题是一切准备工作中的重中之重,也是广大管道工作者、冶金工作者以及钢管生产者最为关切的问题之一。管道的断裂分为脆性断裂和延性断裂两大类。目前,脆性断裂问题基本上已得到解决,相反,随着管道输送压力及钢材等级的提高,延性断裂已成为主要的研究对象。

一、缺陷的允许值及临界裂纹长度与起裂

材料力学的奠基人伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642年)在其论著中首先做出两点基本假设,即材料的连续性和均匀性假设,在以后的几百年直到今日,材料力学仍沿用此假设。所谓连续性和均匀性即假设材料无气孔、夹渣、裂纹、偏析等缺陷,当然这是与实际不相符的,但受当时的数学水平所限,只有做这样的假设,材料力学才得以建立及发展。

在 20 世纪中期曾发生了一系列的飞机、桥梁、管道、海船、受压容器等因原始缺陷扩展,达到某一临界值时而产生断裂的事故。生产力发展的需求以及 20 世纪科学技术的高速进步,在固体力学领域内出现了断裂力学的分支。

断裂力学在管道上的应用在 20 世纪 70 年代已趋于成熟,在美国燃气协会 AGA (American Gas Association) 召开的第五次和第六次管道钢管研讨会上,几乎全部内容都是管道断裂方面的^[1,2]。

钢管中的缺陷 (defect) 由于疲劳 (由于压力波动、振动等原因)、应力腐蚀、氢致开裂 (HIC) 以及成核等诸多原因会产生稳定扩展,随之缺陷尺寸增大,当缺陷到达某一待定值时变为非稳定扩展,这一时刻称为起裂 (Fracture Initiation),起裂时的缺陷尺寸称为临界缺陷尺寸。

起裂时缺陷临界尺寸与材料的夏比冲击值 (CVN)、直径、厚度、钢材等级、缺陷的形成及方向等诸多因素有关。

世界各国管道的断裂力学研究工作所推荐的起裂临界尺寸,其计算方法大同小异,文献[3]中也有详细论述,此处不再赘述。

管道的完整性 (Integrity) 是近几年提出并为广大管道工作者普遍接受的概念,在 1995 年、1998 年和 2000 年三次国际管道会议上已成为最热门的话题^[4,5]。

从完整性概念出发,首先要合理确定钢管在制造过程中以及运输、下沟、回填、环焊等整个施工过程中所允许遗留在管道中的缺陷值。管道的缺陷在服役过程中由于种种原因会产生稳定扩展,如缺陷的允许值为 a_0 ,缺陷的临界值为 a_c ,管道在服役过程中,有些缺陷逐渐由 a_0 向 a_c 靠近,但希望直至管道使用的最后期限,或者说在管道的整个寿命当中, a_0 始终未能达到 a_c ,这样就不会起裂。

($a_0 - a_c$) 的数值越大,则这一期望值越高。当 a_c 确定后,为提高 a_0 与 a_c 的差值,只有减小 a_0 。然而, a_0 越小,钢管的费

用及施工费用越高,而且呈急剧上升的趋势,因而必须合理确定 α_0 值,对 α_0 的要求体现在钢管技术规范及施工技术规范中。

缺陷在管道中稳定扩展的过程在固体力学中属准静力学状态(Quasi - static Mechanics),它可能是疲劳裂纹扩展、应力腐蚀、氢致开裂、化学腐蚀以及电化学腐蚀等,这些均属于另一专门的科技领域,这里不做讨论。但应指出,对于这类缺陷一般是比较容易控制的,通常的做法是定期通过管道内检测器确定缺陷的大小及位置。由两次检测之间某缺陷的尺寸差可推算出其裂纹扩展速率,并进一步推断出其剩余寿命。处理缺陷的稳定扩展或减慢其扩展速率有两条途径:一是消除扩展原因或减轻其扩展幅度;二是在其接近临界尺寸之前更换局部管段,变抢修为计划检修,目前不停输更换管段的技术已十分成熟。

管道完整性遭到破坏最难以防止的因素是第三方破坏,或称外力破坏。第三方破坏主要来自在管道所在地区施工时,施工机具将管道碰坏。随着科技的进步,管道的事故率呈下降的趋势,但第三方破坏在总事故中所占的比例却呈上升的趋势,美国管道第三方破坏产生的事故占总事故次数的40%以上。美国管道工业发展较早,最老的管道寿命已达70年,随着时间的推移,当地的居民对地下有些管道已淡忘了。另外,管道在建设之时当地可能还是荒原(属一、二类地区),但美国工业发展迅速,当初的荒原逐渐得到开发,由当初的一、二类地区变为三、四类地区,在此过程中,频繁的机械化施工将管道破坏的概率是较高的。有些专家曾设想用提高钢管冲击能的办法来抵抗第三方破坏,即施工机械碰撞后,管道不致破裂。但研究表明,要达到这一要求,钢管的夏比冲击值就要在340J以上,这样的钢管在目前还无法达到。

西气东输工程管道长达4200km,其中沿途大部分为一、二类地区,估计有1600km处在人烟稀少的地区,但随着西部的开发,这些地区都会有很大的变化。国外的经验值得借鉴,在选线时不仅要看到当前,还要估计到将来。另外,管道所经之处要有