

CHINA INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE

CIPC 2013

2013年中国国际管道会议

论文集

PROCEEDINGS

OPPORTUNITIES & CHALLENGES

机遇与挑战

石油工业出版社

2013 年 中国国际管道会议论文集

中国国际管道会议组委会 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书为2013年中国国际管道会议论文集,主要内容包括管道输送与储存,管道节能与环保,大型油气管网可靠性与优化运行,管道及设备完整性管理,管道设备与自动化,管道检测,评价与维修,管道安全监测,管道腐蚀防护,管道设计,施工与项目管理,管道材料与焊接,管道标准,管道投产与运行等,反映了我国油气储运领域近年来的最新研究成果及研究方向。

本书适合于从事油气储运专业相关的输油气生产单位、科研院所、高等院校的科研、生产管理人员及师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

2013年中国国际管道会议论文集/中国国际管道会议组委会编.

北京:石油工业出版社,2013.9

ISBN 978-7-5021-9745-2

I. 2...

II. 中...

III. 管道工程-国际学术会议-文集

IV. U172-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第203202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)64523598 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2013年9月第1版 2013年9月第1次印刷

889×1194毫米 开本:1/16 印张:27.75

字数:847千字

定价:170.00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

目 录

站场安全距离标准对比及爆炸模型量化分析	宋兆勇, 赵云峰, 苏奇, 等 (1)
我国煤层气长输管道现状	冯伟 (5)
CCUS 技术在中国管道输送的发展趋势	赵青, 李玉星 (8)
基于遗传算法的天然气管道运行参数的优化模型	曾力波, 朱小丹 (12)
管道溢油应急标准体系研究	姚学军, 吴凯旋, 郑娟, 等 (16)
中国石油管道企业面临的低碳形势及对策分析	田望, 张玉志, 钱成文, 等 (21)
国内外油库水体污染防控体系与标准对标研究	郑娟, 刘艳双, 郭晓瑛 (25)
流量计在输油管道中的应用现状及国产化进展	张丽穗, 裴爱东, 李柏松, 等 (30)
油气管道标准采标状况及策略分析	刘冰, 税碧垣, 吴凯旋 (34)
CO ₂ 输送工艺对 X65 管道腐蚀的影响	蒋秀, 宋晓良, 张艳玲, 等 (41)
兰郑长阳逻支线非设计功能混油切割控制方法	邢建文, 关卫红, 李伟 (44)
大型压缩机站燃驱改电驱技术的可行性	吴东旭, 史航, 代小华, 等 (47)
油气储运术语标准化进程及其思考	潘腾, 刘冰, 曹燕, 等 (50)
双层改性环氧液体涂料管道现场补口新工艺	孙卫松 (54)
浮顶储罐密封间的可燃气体监测新技术	肖兰 (58)
天然气长输管道压缩机远程控制技术	许彦博, 赵小川, 张麟, 等 (61)
高寒冻土区管道维抢修方法及实践	蔡永军, 马涛, 李增彬, 等 (65)
顺序输送润滑油基础油的必要性及主要技术	胡志勇, 朱昌成, 吴明, 等 (68)
高寒冻土区管道地质灾害监测及防治技术	蔡永军, 赵迎波, 马云宾, 等 (74)
基于 GIS 的长输油气管道气象与地质灾害预警平台	贾韶辉, 郭磊, 周利剑, 等 (79)
清管器天然气管道清管过程中的损伤分析	张新宇, 赵晓利, 李博, 等 (83)
牙哈气田天然气管道冲刷腐蚀研究	刘磊, 姜平超, 李晓白, 等 (87)
基于可靠性设计与评价方法在天然气管道中的应用	张振永, 张金源, 余志峰, 等 (94)
X80 管线钢近中性 pH 土壤应力腐蚀开裂敏感性试验	赵新伟, 张广利, 罗金恒, 等 (102)
管道完整性管理在中俄(漠大)管道上的应用	赵迎波, 蔡永军 (107)
天然气压缩机自动控制技术研究	高钊, 刘德俊, 王英, 等 (110)
高含水油气集输管道内腐蚀行为与综合检测技术	田利, 郭妍娟, 曹维国, 等 (113)
起伏管道水联运投产排气模拟实验研究	陈媛媛, 宫敬, 于达, 等 (117)
典型新型破乳剂对油水乳状液流变性影响	韩洪升, 崔琳琳, 董静宇 (122)
AutoPIPE 在天然气增压站中的应用	许强, 黄坤, 卢弘方, 等 (127)
基于 WCF 的成品油管道在线异机调度技术	姜夏雪, 张妮, 梁永图 (130)
成品油物流研究进展	李敏, 倪少权, 邱小平 (134)

罗罗压缩机组干气密封放空压差过高原因及处理方法分析	徐晓波 (140)
基于 OLGA 的 CO ₂ 腐蚀模拟研究	赵学清, 王志强, 董静雅 (144)
盾构水封隧道内管道缺陷补强修复技术的应用	武英杰, 王泽明, 张煜坤, 等 (147)
高凝高含蜡原油输管工艺选择及研究	徐敏航, 胡文杰 (151)
雷击对川气东输通信系统的影响及防雷措施	林刚, 冯培春 (154)
某站场法兰根部泄漏失效原因分析	蔡克, 罗金恒, 刘迎来, 等 (161)
忠武管道山区段管道敷设方式与地质灾害关系	邓清禄, 谭剑, 王学平, 等 (166)
油气管道阀室设备的阴极保护现状	沈光霖 (171)
阴极保护技术最新研究进展	杜艳霞, 路民旭 (174)
泄漏音频信号特征量提取与滤波方法研究	刘光晓, 李玉星, 刘翠伟, 等 (180)
含氧煤层气低温液化-分馏流程的安全性分析	马文华, 孙恒, 刘丰, 等 (187)
天然气管道阀门内漏声场特征分析及应用研究	张海峰, 李振林, 姬忠礼, 等 (190)
在役长输油气管道管体凹陷检测评价研究进展	李明菲, 周利剑, 任重, 等 (194)
渤海某海底复杂流动管道运行安全研究	于达, 段瑞溪, 张帆, 等 (201)
油气管道失效数据库现状分析与展望	王婷, 玄文博, 周利剑, 等 (206)
国产化轴流式调压器结构改进及流场分析	张兴, 李柏松, 林嵩, 等 (209)
温度对高含蜡原油蜡沉积厚度的影响	王鹏宇, 官敬, 周元欣 (214)
漠大线 RTU 阀室柴油机组切换时间优化研究	李柏松, 赵洪滨, 杜春龙, 等 (220)
基于有限元的含凹陷 X60 管道极限压力研究	刘啸奔, 张宏, 唐凯, 等 (224)
X70 管线钢自保护药芯焊丝焊缝金属组织性能研究	杨柳青, 隋永莉, 尹长华, 等 (229)
离心式压缩机出口管道振动原因分析及防治措施	常海军, 张鹏, 张宏, 等 (234)
管道内检测现场配合工作及风险分析	戴联双, 冯庆善, 张海亮, 等 (242)
管道完整性管理系统高可用性架构设计与实现	任武, 周利剑, 韩文超, 等 (246)
管道设计与完整性管理失效控制案例分析	董绍华, 韩忠晨, 张余 (252)
面向管道完整性管理的巡检系统集成	余海冲, 袁泉, 周利剑, 等 (260)
科氏流量计流体粘度测量机理及误差分析	李柏松, 谭东杰, 张平, 等 (264)
油气站场工艺管道完整性管理技术与实践	张华兵, 周利剑, 燕冰川, 等 (270)
某输油管道与陕京三线并行敷设方案分析	王奉生, 秦玉新, 孟少辉, 等 (273)
天然气管道可靠性设计方法分析	杨鹏, 余志峰, 李程, 等 (277)
超声平板导波技术在立式储罐缺陷检测中的应用	王维斌, 杨津瑜, 朱子东, 等 (282)
国内外油气管道标准体系现状分析及启示	税碧垣, 张妮, 刘冰, 等 (286)
基于风险的压气站完整性管理体系研究	朱喜平, 张来斌, 梁伟 (292)
含蜡原油降温流动数值模拟	周元欣, 官敬, 王鹏宇 (295)
Fracture control technology and development for modern high-strength gas transmission pipelines	Zhu Xiankui (303)
Liquid pipeline design-designing for optimal balance between CAPEX, OPEX, safety and operability	Wang Hoshu, Song Fei, Hu Xinjiang (319)

The role of minor cyclic loading in crack growth of pipeline steel exposed to near-neutral pH environment	Mengshan Yu, Weixing Chen, Richard Kania, et al(331)
The content lifecycle for engineering standards	Kelly Marx(340)
Preparation and performance evaluation of polymer based nanocomposites as DRA	Dai Xiaodong, Guo Xu, Guo Haifeng, et al(344)
Case study of AC interference on 20 km buried pipeline: Field test and mitigation design	Zitao Jiang , Yanxia Du, Minxu Lu, et al(348)
Study on AC interference mitigation design methods for buried pipelines	Yanxia Du ,Liyang Wang, Zitao Jiang , et al(357)
A direct assessment of failure pressure of high-strength steel pipelines with considerations of the synergism of corrosion defects, internal pressure and soil strain	Luyao Xu , Y. Frank Cheng(363)
A proposal of AC corrosion mechanism of carbon steel in cathodic protection condition	Andrea Brenna, Luciano Lazzari, Marco Ormellese(373)
Dynamic pitting analysis in liquid and wet-gas petroleum pipelines	Zhenjin Zhu, Patrick J. Teevens, Tesfaalem Haile, et al(388)
HIC resistance of heritage pipelines exposed to mildly sour environments	Viviane C.M. Smith, John W. Martin, Gareth Hinds, et al(397)
DC interference testing and mitigation of new electrically isolated pipelines installed within congested existing pipeline network	Saleh Al-Sulaiman, Hasan Sabri, Amer Jaragh, et al(408)
A real-time AC/DC measurement technique for investigation of AC corrosion of pipelines and its effect on the cathodic protection effectiveness	Luyao Xu ,Y. Frank Cheng(416)
Pitting in the water/hydrocarbon boundary region of pipelines - effect of corrosion inhibitors	Guenter Schmitt, Gilda Karbasi, Srdjan Nešić, et al(424)
A new copper/copper sulfate reference electrode for external corrosion monitoring of buried pipelines	Sérgio E. Abud Filho, Zehbour Panossian(432)

站场安全距离标准对比及爆炸模型量化分析

宋兆勇 赵云峰 苏奇 陈晓虎

中国石油管道公司, 河北廊坊 065000

摘要:介绍了美国得克萨斯州炼油厂爆炸事故案例,探讨了安全距离的概念。通过对比分析国内标准及俄罗斯、国际标准化协会的有关标准,探讨了国内外标准中对安全距离设置的异同。结果显示,各个标准均是从建筑设施的防火距离和防爆区域距离进行规定,均没有考虑火灾爆炸事故后果的影响范围。以天然气站场设施泄漏为模型,计算了气体泄漏后的扩散范围和泄漏量,对火灾爆炸后的伤害范围进行了量化分析,基于其风险评价结果确定站场安全距离,并且提出了将站场内普通玻璃更换为防爆玻璃的建议。

关键词:站场;安全距离;安全隐患;失效原因;对策措施

中图分类号:TE832

文献标识码:A

doi: 10.6047/c.cipc.2004-0005.2013.09.001

Compare of safe distance specified in the standards about oil & gas station and the quantitative analysis of explosion model

Song Zhaoyong, Zhao Yunfeng, Suqi, Chen Xiaohu

PetroChina Pipeline Company, Langfang, Hebei, 065000

Abstract:The concept of safe distance has been discussed and the domestic and international standards about the safe distance setting have been contrast analyzed on the basis of the explosion accident case of the American Texas refinery. The diffusion scope of the gas leakage is calculated, and the fire damage after explosion is quantitatively analyzed on the basis of the leaking model of natural gas yard facilities. As a result, suggestions are given that the risk assessment results should be considered to determine the yard safe distance, and the common glass should be replaced by explosion-proof class at the station for explosion protection.

Key words: oil&gas station; safe distance; potential safety hazard; failure cause; counter plan

2005年3月23日下午13时20分,英国石油公司(BP)位于美国得克萨斯州炼油厂的异构化装置在开车过程中发生火灾爆炸,共造成15人死亡、170人受伤,经济损失超过 15×10^8 美元。死亡人员全部是在场内临时停放的拖车内的工作人员,这些拖车用作维修工和承包商的临时办公室,事故发生时,拖车距离发生爆炸的放空烟囱45.7m。通过案例分析可以看出,在发生大型爆炸事故时,45m无法达到安全距离要求。目前,国内石油化工有关标准中,站场内生产设施与人员值班场所的最小距离限定在 $15 \sim 25\text{m}^{[1]}$,远低于大型爆炸后的人员伤害影响范围。由此可见,分析研究石油天然气站场内人员场所与工艺装置之间的安全距离,是降低安全风险的关键因素之一。

1 安全距离的概念分析

安全距离是指“安全防护距离”,在大于安全距离区域,生产设施一旦发生火灾爆炸事故,仍然可能对人员、建筑、设备、设施等造成伤害,但是通过设定安全距离,能够将风险控制在可接受范围内。油气站场的安全距离通常包括防火间距、爆炸区域间距和安全间距。

防火间距是防止着火建筑的辐射热在一定时间内引燃相邻建筑,且便于消防扑救的间隔距离^[2],其主要与建筑物的耐火等级以及辐射热的强度有关。例如,储油罐之间的防火间距规定,固定顶罐间距为 $0.6D$,浮顶罐为 $0.4D$,该距离是从单个储油罐发生火灾后,防止引燃周边储油罐的角度考虑而规定的。

爆炸区域间距的确定原则主要是从防止爆炸性气体被引燃的角度进行考虑,将点火源与释放源隔开,并保持一定距离。在油气站场中,站控室、化验室、办公室等场所为非防爆区域,电气设施也不属于防爆型,故成为站场中的点火源。释放源是指可释放出爆炸性混合物的物质所在的位置或地点,油气站场中的工艺阀组区、收发球区、压缩机和泵机组区、其他工艺设备房间以及含油污水处理设施等可能释放油气的区域均属于释放源。根据有关规范要求,释放源与点火源的爆炸危险区域最小间距为15m^[3]。因此,在油气站场相关设计规范中,大多是依据该原则,从防止泄漏油气被非防爆场所引燃的角度,将控制室与工艺装置区的最小防火间距确定为15m。

安全间距主要是指设施发生火灾爆炸事故后,场

内人员不会造成伤亡,建筑物不会严重受损的空间距离。确定安全间距的数值要从火灾爆炸事故导致的喷射火、辐射热或者爆炸冲击波对周边环境中的人员和设施的损伤角度考虑,通常需要进行数据计算,经过综合风险分析后确定。

2 国内外标准对比

国内外关于站场内安全距离的标准详见表1。由国内外标准中对于安全距离规定内容的对比分析可以看出,各个标准均是从建筑设施的防火距离和防爆区域距离进行规定的。若要进一步降低石油天然气站场人员区域的安全风险,还应参考火灾爆炸事故后果模拟计算出的影响范围。

表1 国内外安全距离相关标准规定

标准	安全距离规定
GB 50183—2004《石油天然气工程设计防火规范》	(1)一至四级油气站场控制室与工艺装置的安全距离为25 m; (2)五级站场的安全距离是22.5 m; (3)面向工艺区的墙壁为防火墙,距离可缩小,但不能小于15 m
GB 50160—2008《石油化工企业设计防火规范》	控制室、机柜间、化验室等距离甲类可燃气体和液体的安全距离不小于15 m
IEC 60079-10 2002《危险区域划分》	(1)输油泵和天然气阀组区周边安全距离是15 m; (2)收发球筒周边安全距离是3 m; (3)在危险区域内不应建设其他设施
GB 50153—2009《石油与石油品仓库消防标准》	输送石油及石油产品的管道与办公楼或者居民楼的基础距离: (1)当管道压力小于2.5 MPa时,最小水平距离为12.5 m; (2)当压力大于2.5 MPa时,最小水平距离为25 m
API RP505 1998《炼油厂仪表和控制系统安装手册》	(1)一般控制中心与控制单元的最小距离是30.48 m; (2)某些许可与管架的距离缩短为15.24 m

3 安全间距的模拟计算

以某天然气站场发生气体泄漏为模型,模拟计算站场设施与人员值班场所的安全间距。设定参数为管径600mm,压力2.5MPa,裂口为管径的60%,宽度2mm,泄漏时风速为5m/s。

3.1 天然气泄漏后果定性分析

天然气泄漏后与空气混合,可燃性气体达到燃烧极限时,遇到点火源则会发生燃烧或爆炸。根据起火的时间不同存在两种情形^[4]:一是立即起火。气体泄漏后立即被点燃而不形成可燃气体云团,主要是扩散燃烧,由于设施内部压力较大,会形成喷射性扩散火焰。二是滞后起火。天然气泄漏后首先与空气混合形成较大规模的可燃气体混合云团,该云团在风力等外界条件作用下发生漂移,遇火源发生燃烧,这种燃烧会引发云团内的可燃混合气的爆轰,造成较大范围内人

员的损伤和设施的破坏,也是最为危险的燃烧形式。

3.2 天然气泄漏扩散及泄漏量计算

天然气从设施中泄漏后会在风力的作用下周围大气扩散(图1),影响天然气在大气中扩散的主要因素包括风速、大气稳定度、地面情况(建筑物、树木等)、泄漏高度、泄漏物的初始状态。

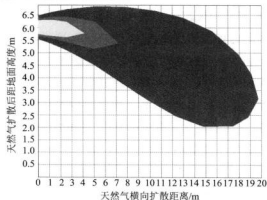


图1 天然气泄漏后的扩散模拟图

可燃气体泄漏量可由式(1)计算^[5]:

$$Q_0 = C_d A \sqrt{\frac{M \gamma}{RT} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (1)$$

式中: Q_0 为泄漏速度, kg/s; M 为分子质量, kg/mol; R 为普适气体常数, 取 8.314 J/(mol · K); C_d 为裂口形状系数, 圆形取 1.0, 三角形取 0.95, 长方形取 0.9; A 为小孔的面积, m²; T 为气体温度, K; p 为气体压力 MPa; γ 为绝热指数。

3.3 泄漏可燃气体的火灾爆炸及其危害

天然气泄漏扩散形成混合云团后, 该区域天然气的最小浓度均大于天然气最小燃烧极限, 只要遇到点火源, 如明火、高温炽热物体、摩擦或静电火花等, 便会引发混合气体燃烧, 燃烧速度快, 温度高。国内外大量研究表明^[6], 这类混合燃烧的危害主要有两种方式: 一部分可燃气体发生混合燃烧, 体积约为混合气体总量的 90%, 其危害主要通过热辐射进行; 另一部分可燃气体产生气体爆炸, 约占混合气体总量的 10%, 其危害主要来源于爆炸冲击波对周边目标的伤害, 由于爆炸时能量的释放速度远高于混合燃烧, 使其对周围设备、人员的毁伤能量远大于混合燃烧。

气体云团燃烧时, 不同距离处的辐射热剂量可由式(2)计算:

$$q(x) = \frac{\eta_r H_d m T_c}{4\pi x^2} \quad (2)$$

式中: $q(x)$ 为距火球中心 x 处辐射热剂量, J/m²; η_r 为效率因子, 天然气燃烧取 1, 油池火灾取值与蒸汽压有关; H_d 为天然气燃烧热, 取 5.56×10^7 J/kg; m 为混合气体质量, 包括泄漏天然气量和氧气量, kg; T_c 为热传导系数; x 为目标与火球中心的距离, m。

根据计算得到的热辐射剂量值与伤害半径的对应关系(表 2), 即可确定该生产区域的安全距离^[7]。

表 2 热辐射剂量与伤害半径对应关系

瞬间人体可承受的辐射热剂量值 (kJ · m ⁻²)	伤害半径 /m	伤害程度
375	11.7	三度烧伤
250	12.3	二度烧伤
125	20.3	一度烧伤
65	28.2	皮肤疼痛

气体云团爆炸释放出的总能量可由式(3)计算:

$$Q_d = m_d \Delta H_d \quad (3)$$

式中: Q_d 为气体爆炸释放出的总能量, J; m_d 为形成爆炸的天然气质量, 为天然气泄漏总量的 10%; ΔH_d 为

天然气爆炸时释放的燃烧热, 取 5.56×10^7 J/kg。

通过对爆炸总能量进行 TNT 质量换算, 可以得到爆炸发生区域内不同距离点的冲击波超压情况(表 3、表 4)。

表 3 冲击波超压对人体的伤害作用

冲击波超压 /MPa	伤害半径 /m	伤害作用
>0.10	8.4	大部分人员死亡
0.05 ~ 0.10	9.7	内脏严重受损或死亡
0.03 ~ 0.05	13.6	听觉器官损伤或骨折
0.02 ~ 0.03	18.0	轻微损伤

表 4 冲击波超压对建筑物的破坏作用

冲击波超压 /MPa	伤害半径 /m	伤害作用
0.2 ~ 0.3	5.52	大型钢结构破坏
0.1 ~ 0.2	6.94	钢筋混凝土破坏, 小房屋倒塌
0.02 ~ 0.03	17.82	墙裂缝
0.005 ~ 0.006	45.98	门窗玻璃破损

根据上述计算结果, 在设定条件下, 天然气站场设施泄漏后, 混合气体的 90% 处于燃烧状态, 瞬态燃烧将导致 28.2m 范围内的人员皮肤疼痛; 10% 的混合气体发生爆炸, 在 18.0m 范围内将导致人员伤害, 并导致 45.98m 范围内的门窗玻璃破碎, 但由于破碎的玻璃具有二次伤害作用, 因此应考虑降低破损玻璃造成的人员伤害。据 BP 炼油厂爆炸事故调查报告显示, 得克萨斯州炼油厂的部分受害者就是由于受到爆炸碎片冲击而死亡的。

4 结论与建议

(1) 国内外技术标准中关于石油天然气站场生产设施与人员值班场所的安全距离多是从防火间距和爆炸危险区域距离方面考虑设定, 规定值明显低于根据量化数据计算得出的安全距离。但是结合当前实际情况, 由于受用地指标限制等因素影响, 短期内提高站场安全距离设定标准的可能性不大。

(2) 在用地指标允许的情况下, 建议先利用量化风险评估(QRA)确定站场内部和外部的合理安全间距, 根据计算结果进行站场总图布置, 进一步降低油气泄漏造成的风险。

(3) 对于安全距离满足现行国家标准, 但人员值班场所与生产设施直线距离较近的站场, 建议将门窗玻璃更换为防火防爆玻璃, 确保爆炸产生的冲击波不会对人员造成二次伤害, 从而降低值班人员的安全风险。

参考文献:

- [1] 云成生, 韩景宽, 章申远, 等. GB 50183-2004 石油天然气工程设计防火规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [2] 经建生, 倪照朋, 马恒, 等. GB 50016-2006 建筑设计防火规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [3] 化学工业部. GB 50058-1992 爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [4] 姜焕勇, 韩丽, 邵勇, 等. 输气站场泄漏事故后果模拟与定量风险评估 [J]. 油气储运, 2009, 28(9): 23-26.
- [5] 蔡凤英, 谭宗山, 孟赫, 等. 化工安全工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 徐亚博, 钱新明, 刘振翼. 天然气输送管道泄漏事故危害定量分析 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(1): 146-148.
- [7] 汪元辉. 安全系统工程 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.

作者简介:宋兆勇, 工程师, 1975 年生, 2006 年毕业于中国石油大学(华东)油气储运专业, 现主要从事油气管道安全生产管理工作。

电话: 0316-2170269; Email: Songzhy@Petrochina.com.cn

文章编号: CIPC2013002

我国煤层气长输管道现状

冯伟

中国石油管道科技研究中心·中国石油天然气集团公司油气储运重点实验室, 河北廊坊 065000

摘要:煤层气是一种清洁能源,我国可开采储量非常丰富。近年来我国煤层气管道建设逐渐获得发展,目前已经建设了多条管道,但多集中分布于山西、陕西及河南等煤炭主产区,且已与一些天然气管道连接成网、互相调气。在收集了大量资料的基础上,描述了我国煤层气管道的分布特点和发展趋势,并选取了几条具有代表性的已建及在建管道逐一进行了介绍,包括管道的起止地点、长度、管径和输量等参数。鉴于煤层气可以与天然气进行混输的特性,建议邻近煤田的新建天然气长输管道在规划过程中,要考虑今后煤层气外输的可能性,为以后煤层气的开采外输提供前期基础。

关键词:煤层气;长输管道;现状

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/c.cipc.2004-0005.2013.09.002

Present situation of long-distance CBM pipeline in china

Feng Wei

PetroChina Pipeline R&D Center, CNPC Key Laboratory of Oil&Gas Storage and Transportation, Langfang, Hebei, 065000

Abstract: The coal bed methane (CBM) is a clean resource which its recoverable reserves is very large in China. In recent years the CBM pipeline are developing increasingly. At present there are many pipelines which mainly distribute in major coal-producing areas such as Shanxi, Shaanxi and Henan province, and join to some gas pipelines for safety. Based on gathering huge amounts of data describing the pipeline distribution and developing trend, this article individually introduces the typical existing and building long-distance CBM pipeline including the parameter such as the starting and ending location, the length, the diameter and the transportation and so on. For the property that the CBM and gas can be mixed to transport in pipeline, at last this article suggests that the new gas pipeline in the plan go through the coal field for the possibility that the CBM export later.

Key words: coal bed methane (CBM); long-distance pipeline; present situation

我国煤炭资源蕴藏丰富,煤层气储量巨大。开采煤层气既可以降低煤矿瓦斯泄漏导致的矿难风险,又可以利用煤层气中蕴含的大量甲烷。目前,我国已经建设了多条煤层气长输管道,将对主要管道进行详细介绍。

1 概述

煤层气又称瓦斯,煤矿常因其开采不当而导致矿难。其实煤层气是一种以吸附状态为主,生成并储存于煤层及其周围岩层中的气体,同时也是一种热值很

高的优质、清洁、高效能源,由于处理后的气体组分与天然气相近,可以与天然气在管道内进行混输。

数据显示,我国煤层气资源丰富,2000m 浅煤层的煤层气资源储量约为 $36.7 \times 10^{12} \text{m}^3$,仅次于俄罗斯和加拿大,居世界第三位。95%的煤层气资源分布在晋陕、内蒙古、新疆、冀豫皖和云贵川渝等含气区,山西省的煤层气资源约为 $10 \times 10^{12} \text{m}^3$,约占全国的 $1/3^{[1]}$ 。

开发利用煤层气意义重大;可以改善煤矿安全生产条件,提高经济效益;在一定程度上改善我国的能源结构,增加洁净的气体能源;有效减排温室气体,改善大气环境;开发利用煤层气也将拉动相关产业的发展。

2 煤层气管道介绍

2011年12月31日,国家能源局发布《煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十二五”规划》,规划指出要加快管网等基础设施建设,坚持就近利用、余气外输的原则。目前我国已经建设多条煤层气管道,但多集中在山西、陕西、河南等省区,其中尤以山西最为密集,主要是围绕富含丰富煤层气资源的沁水盆地及吕梁山周边地区向外辐射多条管道,且已与途经山西省的西气东输、陕京天然气管道、榆济天然气管道连接成网,部分管道为天然气与煤层气混输(表1)。

2.1 西气东输山西煤层气管道

我国第一条煤层气管道,将来自沁水盆地的煤层气通过压缩机增压后注入西气东输主干线。该管道起点在山西沁水县端氏镇金峰村,终点为西气东输沁水增压站,全长35km,管径610mm,设计压力6.3MPa,设计输量 $30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2009年9月份投产运行。

2.2 山西煤层气管道

该管道是目前我国线路最长、规模最大的煤层气管道工程,由山西国际电力燃气产业集团有限公司(简称山西燃气集团)投资建设,中国石油天然气管道局承建。其主干线位于山西西部吕梁山区,由北向南贯穿山西省,起点为五台县,经神池、保德、吕梁、临县、柳林、石楼、大宁,终点为临猗县,其中临县以南管径为508mm,临县以北管径为400mm。另外,该工程还包括从煤层气干线、陕京二线、陕京三线、西气东输管道接出的11条支线,全长1682km,管径为250~508mm,设计压力6.3MPa,设工艺站场35座、阀室60座。2011年12月20日,纵贯整个吕梁山脉的山西煤层气管道项目一期350km余线路主管道顺利通气。

2.3 端氏—晋城—博爱煤层气管道

该管道是我国第一条跨省区的煤层气主干长输管道,由山西通豫煤层气输配有限公司投资和运营。起自山西省的沁水县端氏镇,途经山西省阳城县、泽州县,河南省沁阳市,终点为河南省的博爱县磨头镇,横跨太行山。管道全长98.2km,其中山西境内76.2km,河南境内22km,管径559mm,设计压力6.3MPa,设计输量为 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2011年10月正式投入运营,目前已经成功向河南焦作、济源等地区的用户稳定输送煤层气^[2]。

2.4 韩城—渭南—西安煤层气管道

该管道是陕西省第一条煤层气长输管道,由中石油渭南煤层气管输有限责任公司负责建设及运营管理。气源为韩城煤层气田,管道首站位于韩城市嵬东乡花池村,末站位于西安高陵县鹿苑镇,全长194km,管径559mm,设计输量 $19.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,设计压力4.0MPa,项目共设置7座站场、6座阀室以及其他附属工程^[3]。目前,该管道仍在建设中。

2.5 晋城—侯马煤层气管道

该管道由山西煤层气(天然气)集输有限公司投资建设,位于山西省晋城市和临汾市境内,途经沁水、翼城、曲沃、侯马,全长140km,管径610mm,设计压力4.0MPa,输气能力可达 $4.95 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,并可实现天然气与煤层气混输。一期工程为侯马至曲沃、翼城输气管道,2010年9月已经建成投产,翼城经沁水至晋城端氏段目前正在建设中。

2.6 晋城—长治煤层气输气管道

该管道由长治市三晋新能源发展有限公司负责投资建设和管理,以沁水煤田的矿并瓦斯气为气源,起点为晋城市北石店镇,终点为长治县苏店镇,管道设6个阀室,3个调压站,2个阴极保护站。工程主管道长81.7km,设计压力4.5MPa,设计输量 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,远期将达到 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。已于2011年5月投产通气。

2.7 太原—和顺—长治煤层气(天然气)管道

该管道由山西国化能源有限责任公司负责投资建设,是山西省“四气”规划建设的“三纵”管网东干线的天然气为主要气源,途经太原、晋中、长治3市,全长460km,设计压力6.3MPa,管径508mm,设计输量 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,设置站场13个,工程总投资 20×10^8 元。已于2012年2月投产通气。

2.8 铁岭市综合利用铁法矿务局矿并瓦斯气示范工程

该工程位于辽宁省铁岭市,管道起始于调兵山市东南的首站,使用沈阳气体压缩机厂生产的4台压缩机将压力升至0.6MPa,在银州站经加奥和调压送往银州区的中压系统和开原、清河。管道全长71km,其中调兵山首站至银州区为28km,钢管管径300mm;银州区至开原为37km,钢管管径250mm;开原至清河为6km,球墨铸铁管管径为150mm^[4]。目前已建成运行10年时间。

表 1 我国煤层气长输管道参数情况

管道名称	途经省区	长度 /km	管径 /mm	压力 /MPa	设计输量 / $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	投产日期
西气东输山西煤层气管道	山西	35	610	6.3	30	2009 年 09 月
山西煤层气管道	山西	1 682	250 ~ 508	6.3	4.98	在建
端氏—晋城—博爱煤层气管道	山西、河南	98.2	559	6.3	20	2011 年 10 月
韩城—渭南—西安煤层气管道	陕西	194	559	4.0	19.7	在建
晋城—侯马煤层气管道	山西	140	610	4.0	4.95	在建
晋城—长治煤层气管道	山西	81.7	508	4.5	3.85	2011 年 05 月
太原—和顺—长治煤层气(天然气)管道	山西	460	508	6.3	20	2012 年 02 月
铁岭市综合利用铁法矿务局矿井瓦斯气示范工程	辽宁	71	300/150	0.6	0.75	2002 年

3 展望与建议

目前我国煤层气长输管道运行总里程还比较少,制约了煤层气的开发利用。这种状况将在“十二五”期间有所改变,在煤层气输送和利用方面,沁水盆地、鄂尔多斯盆地东缘及豫北地区将建设 13 条输气管道,总长度 2054km,设计输气能力 $120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

由于煤层气可以与天然气进行混输,建议邻近煤田的新建长输天然气管道在规划过程中,要尽量考虑途经煤层气产地,为以后煤层气的开采外输提供前期基础。

参考文献:

- [1] 王爱国. 山西省煤层气开发利用现状 [J]. 山西煤炭管理干部学院学报, 2010(3): 164-165.

- [2] 李桂萍. 端氏—晋城—博爱煤层气输气管道工程 [EB/OL].

2010.4.13. http://www.jconline.cn/Contents/Channel_6370/2010/0413/318883/content_318883.htm.

- [3] 胡超. 韩晋西煤层气管道工程冲沟地段管道穿越施工的几种方法 [J]. 石油工程建设, 2012(4): 41-43.

- [4] 牟学军, 崔越. 铁岭市开发利用煤层气工程综述 [A]// 中国土木工程学会城市燃气分会输配专业委员会, 中国土木工程学会城市燃气分会输配专业委员会 2005 年会议论文集 [C]: 2005, 28-31.

作者简介: 冯伟, 工程师, 1985 年生, 2007 年硕士毕业于哈尔滨工业大学流体力学专业, 现主要从事油气储运相关研究工作。

电话: 0316-2312327; Email: kfjengwei@Petrochina.com.cn

CCUS 技术在中国管道输送的发展趋势

赵青 李玉星

中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266555

摘要: 为了减少 CO_2 等温室气体排放, 结合中国情, 在碳捕集与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 基础上增加了 CO_2 利用环节, 提出了 CCUS 技术。根据国外大型商业 CCS 项目运行经验, 该技术能有效减少 CO_2 排放。中国通过政府政策引导, 科研单位、高等院校共同参与, 企业建立示范项目实施的方法在国内发展 CCUS 技术。从示范项目建立运行情况来看, 虽然优势与劣势共存, 特别是超临界 CO_2 输送管网研究与安全控制技术较为薄弱, 但 CCUS 技术对减少 CO_2 排放仍然具有明显贡献。 CO_2 的运输在 CCUS 技术链中具有纽带作用, 根据工程运行经验, 采用超临界管道输送 CO_2 最为经济。因此, 在中国发展 CCUS 具有可行性, 在公众的认可与支持下, 政府制定相关标准与法规, 建立大规模长距离超临界 CO_2 输送管网, 可以实现发展经济与改善气候变化的双赢。

关键词: CCUS; 示范项目; CO_2 输送; 超临界管道

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/c.cipc.2004-0005.2013.09.003

Future trends of pipeline transportation on carbon capture, utilization and storage in China

Zhao Qing, Li Yuxing

College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266555

Abstract: China is developing carbon capture, utilization and storage (CCUS) combined with national conditions to reduce the greenhouse gas (GHG), mainly carbon dioxide (CO_2), emissions to atmosphere. According to the operation experience of large commercial carbon capture and storage (CCS) projects in the world, it can reduce the global carbon emissions effectively. By building demonstration projects under the joint effort of government departments, participating enterprises, research units, and colleges and universities, CCUS is developed in China. Based on the actual situation of demonstration projects, the superiorities and inferiorities co-exist in China. Especially, pipeline network design of supercritical CO_2 and safety control technology are relatively weak. However, CCUS has obviously contribution to CO_2 emission reduction. CO_2 transportation is a link in the CCUS technology chain. Supercritical CO_2 pipeline has been certified as an optimized choice over CO_2 transportation experience. Thus, CCUS development is feasible in China. By formulating standards and policy regulations, building large-scale and long-distance supercritical CO_2 pipeline network, and gaining agreement and support of public, CCUS will make China yield a win-win result between economy development and climate improvement.

Key words: CCUS; demonstration projects; CO_2 transportation; supercritical pipeline

近几十年来,化石燃料燃烧产生大量以 CO_2 为主的温室气体,人类将大量 CO_2 排放到大气中,致使全球气温逐渐变暖。2006 年公布的气候变化经济报告显示,如果人类继续现在的生活方式,到 2100 年全球气温将有 50% 的可能性会上升 4°C 以上^[1]。面对日益恶化的气候,世界各国积极采取行动。2009 年 12 月,《哥

本哈根协议》进一步明确了发达国家和发展中国家在“共同但有区别的责任”下分别承担的温室气体减排义务^[2]。不可否认,人类有必要大力开发新能源,但未来几十年内,化石燃料仍然将作为人类活动的主要能源之一,因此,碳捕集与封存 (CCS) 技术将成为减少 CO_2 排放和改善气候的重要选择。

中国对 CCS 技术高度重视,已将 CCS 技术列入国家中长期科技发展规划。2007 年 6 月,国家发改委公布的《中国应对气候变化国家方案》中强调重点开发 CO₂ 捕集与封存技术,并加强国际间气候变化技术的研发应用与转让^[3]。作为发展中国家,中国的首要任务是发展经济,CCS 技术面临高能耗和高成本,因此,结合国情,在捕集、运输和封存三大环节的基础上增加了 CO₂ 利用环节,提出了 CCUS 技术。2012 年 3 月,国家科技部启动“十二五”国家科技支撑计划——国内首个大规模燃煤电厂 CCUS 技术开发及应用示范项目;2013 年 3 月正式发布《“十二五”国家 CCUS 科技发展专项规划》;2013 年 5 月,国家发改委下发了《关于推动 CCUS 试验示范的通知》,要求根据《“十二五”规划纲要》中应对气候变化工作的整体要求,推动 CCUS 试验示范的相关工作任务,并提出将探索建立相关政策激励机制^[4]。CO₂ 的运输在 CCUS 技术链中具有纽带作用,与船舶、公路及铁路相比,管道输送被认为是一种最优的输送形式。

1 国外代表性 CCS 及 CO₂ 管道项目

CCS 技术可消除全球 20%~40% 的碳排放量^[5]。全球最具代表性的大型商业 CCS 项目有下列 3 个:

(1)挪威 Sleipner 深部盐水含水层封存,该项目自 1996 年 10 月开始,每日将约为 2700t CO₂ 注入海底以

下约 800m 深处的含盐水岩层中,这是世界上第一次商业规模的含水层封存工程。近 20 年的经验表明,CCS 技术在减少 CO₂ 排放及经济性方面是可行的。

(2)阿尔及利亚 In Salah 天然气项目,In Salah 的 Krecba 气田含有最多达 10% 的天然气伴生 CO₂,该项目将 CO₂ 通过 3 个深井注入 1800m 以下的砂岩储层中。

(3)加拿大—美国 Weyburn CCS-EOR 项目,自 2000 年开始,美国北达科他州气公司将 CO₂ 通过约 330km 超临界管道运输至加拿大 Weyburn 油田,注入油层以提高采收率,日注入量约为 5000t,预计将增产 2.2×10¹²m³ 原油^[6]。

根据管道输送运行经验,采用超临界管道输送 CO₂ 最为经济。美国自 20 世纪 70 年代就有 CO₂ 管道运行,而今已建成一套跨越范围非常广的 CO₂ 基础管网。为了提高油田采收率,管道自 1972 年开始用于输送 CO₂,第一条 CO₂ 管道由美国 CRC(Canyon Reef Carriers)公司建设完成,该管道跨越 354km 将天然 CO₂ 输送到得克萨斯州 SACROC 油田^[7]。

据统计,全世界有超过 3500km 的 CO₂ 管道输送天然或人为气源的 CO₂。美国一些有代表性的长距离高压 CO₂ 管道^[8-11](表 1)在设计及运行过程中,要求符合两项美国交通部规定的安全标准:危险液体管道输送标准 CFR 49-195,天然气及其他气体管道输送安全联邦最低标准 CFR 49-192^[12-13]。

表 1 美国代表性长距离高压 CO₂ 管道运行数据统计

管道	投产时间	年输量/(10 ⁶ t)	距离/km	最大运行压力/MPa	气源	CO ₂ 含量%	杂质组分及含量
Canyon Reef Carriers	1972 年	5.2	354	14	人为气源	95	5% CH ₄ , 0.5% N ₂ , 100 g/L H ₂ S
Bravo	1984 年	7.3	350	16.5	天然气源	99.7	0.3% N ₂
Cortez	1984 年	19.3	808	18.6	天然气源	98.5	0.14% CH ₄ , 1.3% N ₂
Central Basin Pipeline	1985 年	20	278	17	天然气源	98.5	0.2% CH ₄ , 1.3% N ₂
Weyburn	2000 年	5	328	18.6(美国) 20.4(加拿大)	人为气源	96	0.7% CH ₄ , 300g/L N ₂ , 0.9% H ₂ S, 2.3% C ₂ +0.1% CO, 50g/L O ₂

2 中国 CCUS 技术发展

中国发展 CCUS 技术优势与劣势并存,优势包括:

(1)国内 CO₂ 大排量企业较多,如电力、水泥、钢铁、化工等行业,形成集中排放源,通过政府政策引导,技术推广难度低;(2)中国地域广阔,理论上存在诸多适宜封存的地质条件,如咸水层、枯竭油气藏、煤层等;(3)国内部分陆上油田生产原油 API 重度低,含硫高,劣

质化,为提高这些油田的采收率,需大力发展 CO₂ 驱油技术,其 CCUS 技术的推广前景与经济效益非常可观。同时,中国发展 CCUS 技术也存在诸多挑战:(1)区域经济发展不平衡,CO₂ 排放量较大企业多位于国土东部,而适宜封存地区多在西部;(2)CO₂ 管网配备不完善,长距离 CO₂ 输送管道未形成建设规模,缺少管道设计、长期运行经验,经济性与安全缺少规范评价;(3)人口较多,CO₂ 管道建设与输送安全要求更高,成本较

高;(4)地质条件复杂,CO₂封存技术要求相对高于国外,海洋地质封存难度更大。

针对CCUS技术发展的优势与劣势,在国家科技部、国家自然科学基金委员会等部门的综合部署下,中

国CCUS技术发展取得较大进步,政府指导、企业实施,科研单位与高等院校共同参与,近年来已经建成多个示范项目,诸多捕集、利用、封存能力大的示范项目也在进行前期筹备^[14](表2)。

表2 中国CCUS技术部分示范工程情况

项目名称	地点	规模/(t/a ⁻¹)	示范内容	现状
中国石油吉林油田CO ₂ -EOR研究与示范项目	吉林油田	封存量约10×10 ⁴	CCS-EOR	2007年投运
中科院龙CO ₂ 化工利用项目	江苏泰兴	利用量约0.8×10 ⁴	酒精厂CO ₂ 化工利用	2007年投运
中海油CO ₂ 制可降解塑料项目	海南东方市	利用量0.21×10 ⁴	天然气分离CO ₂ 化工利用	2009年投运
中国石化集团胜利油田CO ₂ 捕集和驱油示范工程	胜利油田	捕集和利用量4×10 ⁴	燃烧后捕集CCS-EOR	2010年投运
新奥集团微藻固碳生物能源示范项目	内蒙古达拉特旗	拟利用约2×10 ⁴	煤化工烟气生物利用	一期投产;二期在建;三期筹备
华能绿色煤电IGCC电厂捕集利用和封存示范工程	天津滨海新区	捕集量(6~10)×10 ⁴	燃烧前捕集CCS-EOR	2011年项目启动
中国石化集团煤制气CO ₂ 捕集和驱油封存示范工程	胜利油田	捕集利用量70×10 ⁴	煤制气捕集CCS-EOR	前期筹备
中国石化集团胜利油田CO ₂ 捕集和封存驱油示范工程	胜利油田	捕集利用量(50~100)×10 ⁴	燃烧后捕集CCS-EOR	前期筹备

3 管道输送趋势

CCUS技术对减少CO₂排放具有明显贡献,就中国而言,技术链各环节都具备一定的研发基础。但CCUS是一项多学科领域综合发展技术,技术链各环节需平衡发展,不仅技术层面需要创新,项目的协调管理也是一项挑战。

在中国CCUS各环节技术发展水平中,酸气回注与管道输送技术最为薄弱。酸气回注与井下设备、材料的耐腐蚀性相关,而管道输送技术薄弱还与管网系统设计不成熟、输送工艺标准规范缺乏有关。

中国土面积大,CO₂排放源距封存地跨度大,因此,采用大规模长距离管道输送CO₂成为高效可行的选择^[15-16]。天然气管道输送技术较成熟,CO₂管道输送与天然气管道相似,但经烟气捕集的CO₂难免含有N₂、O₂、H₂S、水蒸气、烷烃等杂质,输送不同纯度的CO₂,这对管道运行工艺的设计又提出了新的挑战。

在国内CO₂管输工程研究中,大连理工大学教授李昕^[17]、中石化青岛安全工程研究院蒋秀^[18]、中国石油大学张亮^[19]等学者从不同方面说明了管道在CCUS技术中的重要性。根据经验,大规模CO₂管道输送以超临界方式运行成本低且效率高,但中国的CO₂管道运输工程应用尚处于低压气体输送阶段,高压、低温和超临界输送方面都刚刚起步。为此,一些技

术应优先发展,如超临界CO₂流动特性与模拟研究、站场泄漏检测与安全保障技术、管网设计与输送标准规范研究等。具体来说,规模化管输基础理论研究包括:CO₂在不同相态及相态转换下的水力及热力模型;长距离CO₂管道输送水合物控制技术;CO₂管道输送全尺寸模拟中试装置建设及试验;CO₂管输数值模拟软件开发与应用;CO₂输送工艺参数优化设计方法;CO₂输送管道及站场安全监测方法。管输工程技术研究包括:研发CO₂大排量压缩关键设备;研究CO₂输送管道安全控制与监测技术;CO₂管道输送工程技术标准及规范;CO₂管道完整性研究。

输送技术环节,中国计划在2015年完成80km的超临界管道输送工程—年输送能力30×10⁴t/a的示范工程,2020年建成长度200km、输送能力大于100×10⁴t/a的CO₂输送管线示范工程及配套设备,到2030年完成CO₂输送干线长度不低于1000km的技术示范。除在CO₂输送管网技术研究方面做出努力外,在捕集、利用、封存环节也积极应对高投入、高成本、高能耗难题,同时扩大CCUS技术应用范围,发展专项经济。在缺少长期运行经验、经济性与安全规范评价的情况下,增强与发达国家的技术交流沟通,保证示范项目与其他项目的资金投入,制定安全运行行业标准。总之,通过CCUS技术,中国为未来世界CO₂减排与气候改善做出贡献。

4 结论

(1) 通过发展适合国情的 CCUS 技术, 中国实现发展经济与改善气候变化的双赢。

(2) 中国发展 CCUS 技术利弊共存, 通过参考国外项目经验, 建立国内示范项目, 可以使 CCUS 技术在中国科学发展。

(3) 中国 CCUS 技术链各环节发展不平衡, 特别是超临界 CO₂ 输送管网研究与安全控制技术存在较大差距。

(4) 发展 CO₂ 管道输送技术, 应在超临界 CO₂ 流动特性与模拟、站场泄漏检测与安全保障技术、管网设计与输送标准规范等方面优先进行研究。

(5) 要得到公众对 CCUS 技术的认可与支持, 相关标准规范与政策法规有待出台。

参考文献:

- [1] Greenhouse effect [EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/3198.htm>.
- [2] Copenhagen accord [EB/OL]. <http://unfccc.int/home/items/5262.php>.
- [3] China's national climate change program [EB/OL]. 2007-06-04. http://news.xinhuanet.com/politics/2007-06/04/content_6196300.htm.
- [4] CCUSIdeacarbon [EB/OL]. <http://ideacarbon.org/tag/ccus>
- [5] Refinery CO₂ management strategies [EB/OL]. [http://www.hydrocarbonpublishing.com/ReportP/CO₂ Cap.php](http://www.hydrocarbonpublishing.com/ReportP/CO2_Cap.php).
- [6] IEA-GHG, CCS R&D database [EB/OL]. 2009. <http://www.co2captureandstorage.info/co2db.php>.
- [7] Mohitpour M, Golshan H, Murray A. Pipeline design and construction-A practical approach[M]. 3rd ed. New York: ASME Press, 2007.
- [8] Gale J, Davison J. Transmission of CO₂-Safety and economic considerations[J]. Energy, 2004, 29(9-10): 1319-1328.
- [9] Seevam P N, Race J M, Downie M J. Carbon dioxide pipelines for sequestration in the UK-Engineering gap analysis[C]. Conference on Transmission of CO₂, H₂, and Biogas: Exploring New Uses for Natural Gas Pipelines. Clarion and Scientific Surveys, Amsterdam, 2007: 141-162.
- [10] Oosterkamp A. CO₂ Pipeline transmission-A broad state of the

art[R]. Polytech, 2008-11.

- [11] <http://www.docstoc.com/docs/43753551/Offshore-vindkraft-og-Polytec>.
- [12] Race J M, Seevam P N, Downie M J. Challenges for offshore transport of anthropogenic carbon dioxide[C]. 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, California, USA, 2007.
- [13] US DOT OPS (US Department of Transportation, Office of Pipeline Safety). Code of Federal Regulation (CFR) Title 49-Transportation of Hazardous Liquid by Pipeline[EB/OL]. 2010. <http://setonresourcecenter.com/49CFR/Docs/wcd00007/wcd000773.asp>.
- [14] Parfomak P W, Foldger P. Carbon dioxide (CO₂) pipelines for carbon sequestration: Emerging policy issues[EB/OL]. CRS Report for the US Congress, RL33971, 2007. [http://www.ica.com/ETAAC/ETAAC%20Handouts%208-8-07/CRS%20-%20Report%20CO₂%20Pipelines%20for%20CCS%20k%20Davis.pdf](http://www.ica.com/ETAAC/ETAAC%20Handouts%208-8-07/CRS%20-%20Report%20CO2%20Pipelines%20for%20CCS%20k%20Davis.pdf).
- [15] Carbon capture, utilization and storage technology development in China [EB/OL]. <http://www.acca21.org.cn/gest/etc/20110928.html>.
- [16] McCoy S T, Rubin E S. An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂ with application to carbon capture and storage[J]. Int. J. Greenh. Gas Con, 2008(2): 219-229.
- [17] Haugen H A, Eldrup N, Bernstone C, et al. Options for transporting CO₂ from coal fired power plants case Denmark[J]. Energy Procedia, 2009(1): 1665-1672.
- [18] 李昕. 二氧化碳输送管道关键技术研究现状[J]. 油气储运, 2013, 32(1): 10.
- [19] 蒋秀, 屈定荣, 刘小辉, 等. 超临界 CO₂ 管道输送与安全[J]. 油气储运, 2013, 32(4): 26.
- [20] 张亮, 孙强, 任韶然, 等. 东方 1-1 气田 CO₂ 长距离管道输送参数优化[J]. 油气储运, 2013, 32(3): 12.

基金项目: 国家科技支撑计划“大规模燃煤电厂烟气管道 CO₂ 捕集、输送及安全控制技术”研究, 编号: 2012BAC24B01。

作者简介: 赵青, 在读博士生, 1985 年生, 2011 年硕士毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 现主要从事油气长距离管道输送技术研究。电话: 18600502907; Email: zhaoping_petro@126.com