

CO₂ 输送管道工程设计标准的探讨

黄 辉 周 晶 栗科华

中国石化石油勘探开发研究院

黄辉等.CO₂ 输送管道工程设计标准的探讨.天然气工业,2014,34(12):131-134.

摘 要 我国碳排放总量目前已位居世界首位,但国内 CO₂ 输送管道的建设尚处于起步阶段,设计建设经验较少。为此,介绍了国内外 CO₂ 输送管道工程建设现状,研究了相关标准的制订情况。分析结果表明,国内外对于 CO₂ 输送管道设计标准较少,由于输送介质物性差异,在 CO₂ 输送管道设计中沿用现有油气管道设计标准会带来诸多问题,如对防爆要求过高,缺少针对窒息、溶胀等危险因素的防范措施,增加了工程建设投资和存在安全隐患等。从而提出了 CO₂ 输送管道工程标准的编制原则和技术思路,并建议以国外标准中 CO₂ 有关内容为基础,利用国内外 CO₂ 输送领域的最新研究成果,参照国内的油气管道标准模式,编制 CO₂ 输送管道设计标准。同时还对标准编制过程中所需要特别注意的问题进行了探讨,结论指出目前编制的 CO₂ 管道标准仅适用于陆上 CO₂ 输送管道工程设计,适用气相、液相两种输送相态;随着超临界相在国内的建设与其技术的发展,今后应将其内容补充进标准中。

关键词 CO₂ 输送管道 设计标准 相态变化 超临界相 溶胀 安全距离 气相 液相

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2014.12.019

A discussion on the establishment of CO₂ pipeline engineering design criteria

Huang Hui, Zhou Jing, Su Kehua

(Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing 100191, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 34, ISSUE 12, pp.131-134, 12/25/2014. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The total carbon emissions in China now tops the first in the world, but the CO₂ pipeline construction is still at the initial stage, so few such design experience will be available at present. In view of this, we first introduced the current situation of CO₂ pipeline projects and construction as well as the formulation of related criteria at home and abroad. For lack of valuable reference and due to different physical properties of various media to be transported, CO₂ pipeline design will have to face up with many problems if the existing oil & gas pipeline design criteria are still adopted. For example, there will be an overly high anti-explosion requirement; there will be no prevention countermeasures for such hidden hazards like suffocation, swelling, etc.; and both engineering & construction cost and potential safety risk will be increased. From this perspective, we presented the principles and technical approaches for the establishment of CO₂ pipeline engineering criteria. We also suggested that such design criteria should be formulated based on the foreign criteria about CO₂ transportation, taking good advantage of the latest research results in the field of CO₂ transportation and also referring to the domestic oil & gas pipeline criteria. Meanwhile, we discussed some special issues needed to be highlighted in the formulation process and pointed out that our focus is now only on the CO₂ continental transportation at gas phase and liquid phase, however, in the future the CO₂ transportation in supercritical dense phase should be added into the related criteria.

Keywords: CO₂ pipeline, design criteria, phase behavior change, supercritical phase, swelling, safety distance, gas phase, liquid phase

基金项目:中国石化石油勘探开发研究院科研项目“CO₂ 输送管道工程设计推荐做法”(编号:G5800-14-ZS-YK003-3)。

作者简介:黄辉,1961 年生,高级工程师,博士;现任中国石化石油勘探开发研究院地面工程研究所所长;主要从事油气田地面工程的规划和研究工作。地址:(100191)北京市海淀区北四环中路 267 号。电话:(010)82311966。E-mail:huanghui.syky@sinopec.com

我国碳排放总量目前已位居世界首位。作为最主要的一种温室气体,对 CO₂ 大规模利用(如驱油^[1-2]、驱气^[3-4]、压裂^[5]等)和储存的需求催生了全球特别是欧美地区 CO₂ 输送管道的发展^[6-8],而国内 CO₂ 输送管道的建设尚处于起步阶段。

目前,我国尚未制订针对 CO₂ 输送管道的建设设计标准。已建或在建 CO₂ 输送管道工程大多参考油气领域相关标准,但由于 CO₂ 独特的物理化学性质,CO₂ 输送管道与天然气管道存在较大差别。因此,亟待制订 CO₂ 输送管道工程设计标准。

1 国内外 CO₂ 输送管道现状

1.1 国外 CO₂ 输送管道工程现状

国外 CO₂ 输送管道工程建设始于 20 世纪 60 年代,早期建设的管道主要用于将 CO₂ 输往油田进行驱油以提高原油采收率,后期则随着对温室气体排放的重视,部分管道被用于向地下封存其他装置产生的 CO₂ 以减少碳排放。

目前,国外 CO₂ 输送管道主要分布在美国。据不完全统计,美国 CO₂ 输送管道长度在 2008 年就已经

超过了 5 800 km,年输送量 5 000×10⁴ t,大部分采用超临界相输送,以满足长距离大输送量要求。其中,Cortez 管道是目前最长的 CO₂ 管道,全长 808 km,管径为 762 mm,压力为 13.8 MPa,年输气量为 1 930×10⁴ t。挪威 Snohvit 管道则是世界首条海底 CO₂ 管道,150 km 管道位于 330 m 深的海底,输气压力为 20 MPa,年输气量为 70×10⁴ t。用于将岸上 LNG 液化厂生产的 CO₂ 返注回油田。国外主要 CO₂ 输送管道统计情况见表 1。

1.2 国内 CO₂ 输送管道工程现状

与国外相比,我国的 CO₂ 管道输送技术起步较晚、规模小,尚无成熟的长距离输送管道。个别油田利用自身距 CO₂ 气源点较近的优势,采用气态或液态将 CO₂ 输送至注入井的井场,达到提高油田采收率的目的。如大庆、胜利、吉林等油田先后开展了 CO₂ 驱油的工程建设项目。

国内 CO₂ 输送管道特点:①主要分布在油田周边,用于 CO₂ 驱油,提高采收率;②输送距离短、输量小;③输送工艺以气相输送为主。国内 CO₂ 输送管道相关数据见表 2。

表 1 国外主要长距离 CO₂ 输送管道统计结果表^[6-7,9-10]

管道名称	位置	经营者	输气量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	长度/ km	建成 时间	气源地	输送 工艺
Cranfield	美国	Denbury	288	82	1963	Jackson Dome	—
Canyon Reef Carriers	美国	Kinder Morgan	520	225	1972	Gasification Plant	超临界
Sheep Mountain	美国	BP	950	660	1983	Sheep Mountain	超临界
Bati Raman	土耳其	Turkish Petroleum	110	90	1983	Dodan Field	超临界
Cortez	美国	Kinder Morgan	1 930	808	1984	McElmo Dome	超临界
Bravo	美国	BP	730	350	1984	Bravo Dome	超临界
Central Basin	美国	Kinder Morgan	2 000	278	1985	Denver City Hub	—
NEJD	美国	Denbury	1 150	293	1986	Jackson Dome	—
Val Verde	美国	Petrosource	250	130	1998	Val Verde Gas Plants	超临界
Weyburn	美国/加拿大	North Dakota Gasification	500	328	2000	Gasification Plant	超临界
Free State	美国	Denbury	670	138	2005	Jackson Dome	—
Delta	美国	Denbury	770	49	2008	Jackson Dome	—
Snohvit	挪威	Statoil	70	295	2008	LNG Plant	液态

注:未检索到部分管道的输送相态,但根据输送量判断,采用气相输送的可能性较小

表 2 国内主要 CO₂ 输送管道统计表

管道名称	位置	输气量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	管道长度/ km	建成时间	输送工艺
齐鲁二化厂至正理庄油田 CO ₂ 管道	胜利油田	62.1	70	待建	气态
长深 4—黑 59 输 CO ₂ 管道	吉林油田	50	8	2008	气态
徐深 9—树 101 联合站 CO ₂ 管道	大庆油田	10	15	2013	气态
徐深 9—芳 48 CO ₂ 管道	大庆油田	4.8	20	2013	气态
榆树林液态 CO ₂ 管道	大庆油田	7	5~6	2009	液态
黄桥液态 CO ₂ 管道	华东局黄桥		5.4×2	2004	液态

2 国内外 CO₂ 管道相关标准

2.1 国外 CO₂ 管道相关标准

目前国际上没有统一的 CO₂ 输送管道行业标准。国外涉及 CO₂ 的管道标准共有 4 部,其中美国、欧洲、

加拿大在现有标准修订时增加了有关 CO₂ 的技术规定,挪威船级社编制了《CO₂ 管道的设计与操作》DNV-RP-J202,对 CO₂ 管道的设计和操作提出了一些基本的建议和要求,但均不涉及工艺计算、安全距离等内容。国外 CO₂ 管道相关标准见表 3。

表 3 国外 CO₂ 管道相关标准统计表^[11-12]

国家和地区	标准名称	适用性分析
美国	《液态烃和其他液体管道输送系统》ASME B31.4	2012 版新增 CO ₂ 章节,提出了 CO ₂ 管道的应急预案
欧洲	《石油和天然气工业.管道输送系统》BS EN 14161	涉及 CO ₂ 管道的防腐要求
加拿大	《油气管道系统》CAS-Z662-7	涉及 CO ₂ 管道系统,包括陆上管道和设备、调压站和计量站,但不包括输送工艺
挪威	挪威船级社《CO ₂ 管道的设计与操作》DNV-RP-J202	专门针对 CO ₂ 管道的推荐做法,但不包括工艺计算

2.2 国内 CO₂ 管道相关标准

国内尚无涉及 CO₂ 管道输送的相关设计标准;已建 CO₂ 输送管道工程大多参考 GB 50350《油气集输设计规范》和 GB 50251《输气管道工程设计规范》等标准,但现有标准基于易燃易爆气体,在防火间距、安全等级上要求较高,而且未考虑 CO₂ 物性对输送工艺、管线材质、防腐工艺等方面的影响。国内 CO₂ 管道相关标准见表 4。

表 4 国内 CO₂ 管道相关标准统计表

标准名称	适用性分析
GB 50251《输气管道工程设计规范》	适用于陆上长距离输送天然气管道工程设计,在输送工艺、相态计算、管材及附件选用、管壁计算等方面没有针对 CO ₂ 的特性进行考虑
GB 50350《油气集输设计规范》	适合于陆上油气田内油、气井采出原油、天然气的集输、处理和输送工程设计,在 CO ₂ 特殊物理化学性质、CO ₂ 输送工艺、相态计算等方面没有考虑

3 标准编制的原则和技术路线

3.1 编制原则

CO₂ 输送管道工程设计标准的编制,应贯彻国家的有关法规和方针政策,统一技术要求,做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。根据我国 CO₂ 输送管道发展现状,标准的适用范围为陆上 CO₂ 输送管道工程设计。在标准编制时,应遵循保护环境、及时吸收采用国内外先进技术、尽量优化设计方案的原则。

标准内容应充分考虑 CO₂ 与天然气的物理化学性质差异,以物性差异带来的管道设计不同为重点,通过规范计算方法、警示危险因素、明确安全措施等手段,来对 CO₂ 输送管道设计建设过程进行指导,以达到降低建设投资,增加建设运行过程的安全性,促进我国 CO₂ 输送管道发展的目的。

3.2 技术路线

首先应对国内外工程现状和相关标准进行研究,认识掌握 CO₂ 输送管道的特点和现有标准的不足之

处;然后针对调研中发现的问题进行分析,确定哪些问题需要重点研究,哪些问题可以直接采用国内外现有标准;对于需要重点研究的问题,通过组织技术力量进行攻关,或吸收利用国内外科研单位的相关研究成果的方式加以解决。在此基础上,编写征求意见稿。经过与科研、设计、建设、运行单位结合讨论修改后,最终形成 CO₂ 输送管道工程设计标准。

4 标准需探讨的问题

1)标准涵盖的相态范围。CO₂ 的管道输送存在气相、液相、超临界 3 种输送相态,在标准编制前需要首先研究相态与输送量、管长的关系,明确是针对 3 种相态单独制订标准,还是结合多种输送相态编制统一标准。

2)CO₂ 的纯度标准。与天然气类似,采用管道输送时需要对 CO₂ 的纯度以及 CO₂ 中杂质的种类、含量等进行规定,只有当气体组成满足输送工艺要求,不发生相变和堵塞,不含有危害管道和设备正常运行的杂质时才能允许通过管道输送。

3) 确定工艺计算方法。与常规油气管道不同, CO_2 存在多种输送相态, 不同相态间的密度、黏度、比热等物性相差极大, 在特定条件下相态间能互相转化^[13]。因此, 需要明确现有的气液状态方程和水力学方程是否适用于对应相态下的 CO_2 计算, 并与其他计算方法对比计算精度和计算难易程度, 优选出不同相态下的 CO_2 状态方程和水力学计算方法, 从而对 CO_2 输送管道的设计进行指导和规范。

4) 研究 CO_2 输送管道正常运行工况下的流动保障手段。不论采用何种相态输送, CO_2 对组分变化和温压条件变化均比较敏感。因此, 在标准中需要给出相应的保障措施, 比如增加温度、压力、组分传感器布置密度等。

5) CO_2 特有的危险因素。对在天然气管道输送中不会出现, 但 CO_2 管道输送时则可能发生的危险因素进行警示。如超临界 CO_2 会溶胀橡胶和塑料导致密封失效, 气相 CO_2 放空时可能会形成干冰堵塞管阀件等。

6) CO_2 输送管道的经济性问题。 CO_2 不具有可燃性和爆炸性, 仅具有窒息性, 比天然气相对安全。但国内 CO_2 管道设计时大多参照天然气管道的安全距离, 如某油田 CO_2 输送管道两侧的设计安全距离即沿用了 30 m 的天然气管道标准要求。对于这一问题, 标准应在国内外相关研究的基础上, 通过数值模拟和室内、现场试验等多种形式, 确定适用于 CO_2 输送管道的安全距离, 并在标准中体现。

7) CO_2 输送管道的安全性问题。 CO_2 无色、无味, 其主要威胁是造成人员窒息、中毒。因此在 CO_2 管道设计中应采取一些安全措施, 如在管道沿线及站场设置 CO_2 气体泄漏检测和报警系统, 在管道中加入适量安全臭味剂等方法加以预防。

5 结论及建议

1) 根据我国 CO_2 输送管道工程设计及应用情况, 建议以国外标准中 CO_2 有关内容为基础, 利用国内外 CO_2 输送领域的研究成果, 参照国内的油气管道标准模式, 编制 CO_2 输送管道设计标准。

2) 通过分析研究, 建议目前编制的 CO_2 管道标准适用于陆上 CO_2 输送管道工程设计, 适用气相、液相两种输送相态。随着超临界相在国内的建设与其技术的发展, 再将其内容补充进标准中。

参 考 文 献

[1] 陈欢庆, 胡永乐, 田昌炳. CO_2 驱油与埋存研究进展[J]. 油田化学, 2012, 29(1): 116-121.

CHEN Huanqing, HU Yongle, TIAN Changbing. Advances in CO_2 displacing oil and CO_2 sequestered researches[J]. Oilfield Chemistry, 2012, 29(1): 116-121.

[2] 张烈辉, 杨军, 熊钰, 等. 不同注采方式下 CO_2 埋存与驱油效果优化评价[J]. 天然气工业, 2008, 28(8): 102-104.

ZHANG Liehui, YANG Jun, XIONG Yu, et al. Optimizing evaluation of CO_2 storage and flooding effect under different injection-production modes[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(8): 102-104.

[3] 孙扬, 杜志敏, 孙雷, 等. CO_2 的埋存与提高天然气采收率的相行为[J]. 天然气工业, 2012, 32(5): 39-42.

SUN Yang, DU Zhimin, SUN Lei, et al. Storage of CO_2 and improve the recovery of gas phase behavior[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(5): 39-42.

[4] 李向东, 冯启言, 刘波, 等. 注入二氧化碳驱替煤层甲烷的试验研究[J]. 洁净煤技术, 2009, 16(2): 101-103.

LI Xiangdong, FENG Qiyang, LIU Bo, et al. Study on displacement coalbed methane by carbon dioxide injection[J]. Clean Coal Technology, 2009, 16(2): 101-103.

[5] 宋振云, 苏伟东, 杨延增, 等. CO_2 干法加砂压裂技术研究与实践[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 55-59.

SONG Zhenyun, SU Weidong, YANG Yanzeng, et al. Experimental studies of CO_2 /sand dry-frac process[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 55-59.

[6] 喻西崇, 李志军, 郑晓鹏, 等. CO_2 地面处理、液化和运输技术[J]. 天然气工业, 2008, 28(8): 99-101.

YU Xichong, LI Zhijun, ZHENG Xiaopeng, et al. Carbon dioxide ground processing, storage and transportation[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(8): 99-101.

[7] 喻西崇, 李志军, 潘鑫鑫, 等. CO_2 超临界态输送技术研究[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 83-86.

YU Xichong, LI Zhijun, PAN Xinxin, et al. Research on CO_2 supercritical transportation technology[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 83-86.

[8] 李玉星, 刘梦诗, 张建. 气体杂质对 CO_2 管道输送系统安全的影响[J]. 天然气工业, 2014, 34(1): 108-113.

LI Yuxing, LIU Mengshi, ZHANG Jian. Impacts of gas impurities on the security of CO_2 pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1): 108-113.

[9] AARON M, JEFF M, ANDREW L. Pipeline transport of supercritical carbon dioxide[C]// 2012 Gas Machinery Conference (GMRC), 30 September - 3 October 2012, Austin, Texas, USA. Austin: GMRC, 2012.

[10] MO M, PATRICIA S, KAMAL K B. Pipeline transportation of carbon dioxide containing impurities [M]. New York: ASME, 2012.

[11] American Society of Mechanical Engineers. Pipeline transportation systems for liquids and slurries[S]. New York: ASME, 2012.

[12] Det Norske Veritas. DNV-RP-J202 Design and operation of CO_2 pipelines[R]. Veritasveien, Norway: DNV Rules and Standards, 2010.

[13] SVEND T M, CHRISTIAN B, SIGMUND C, et al. Combining thermodynamic and fluid flow modelling for CO_2 flow assurance[J]. Energy Procedia, 2013, 37(7): 2904-2913.