

含杂质二氧化碳管道输送

PIPELINE TRANSPORTATION OF CARBON DIOXIDE
CONTAINING IMPURITIES

【美】Patricia Seevam Kamal K.Botros 编著
Brian Rothwell Claire Ennis Mo Mohitpour

赵帅 张建 李清方 刘海丽 陆诗建 刘建武 译

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

含杂质二氧化碳 管道输送

Patricia Seevam Kamal K. Botros

[美] Brian Rothwell Claire Ennis 编著

Mo Mohitpour

赵 帅 张 建 李清方 译
刘海丽 陆诗建 刘建武

中国石化出版社

内 容 提 要

本书介绍了含杂质 CO₂ 的管道输送技术, 包含 CO₂ 的基本物性、含杂质 CO₂ 的状态方程 (Equation of State)、CO₂ 的管道输送工程设计、输送管材选择和断裂控制、CO₂ 管道输送所需的动设备、管道的运行和维护、风险评估和完整性管理、含有杂质的 CO₂ 管道泄漏分析以及发生事故时的紧急响应等内容, 提出了 CO₂ 管道输送系统的发展前景和未来挑战。可供从事节能减排、环境监测、气体处理等相关领域的科技人员和研究人员参考。

著作权合同登记 图字: 01-2014-2575

Pipeline Transportation of Carbon Dioxide Containing Impurities

ISBN 978-0-7918-5983-4

Original Edition (in English), Copyright 2012 by ASME, Two Park Avenue, New York, NY 10016, USA. ASME is pleased to offer China Petrochemical Press the Chinese-language rights for the translation, publication, and distribution of a Chinese edition of this book.

ASME 非常愿意向中国石化出版社提供这本书的中文翻译、出版和销售权利。

版权© 2012 归美国机械工程师协会 (美国纽约派克大街 3 号) 所有 (网址 www.asme.org)。

图书在版编目 (CIP) 数据

含杂质二氧化碳管道输送/(美) 莫西特普尔 (Mohitpour, M.) 等编著; 赵帅等译. —北京: 中国石化出版社, 2014. 4

书名原文: Pipeline Transportation of Carbon Dioxide Containning Impurities
ISBN 978-7-5114-2713-7

I. ①含… II. ①莫… ②赵… III. ①二氧化碳-管道输送-气体输送 IV. ①TQ022.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 056206 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 24.5 印张 613 千字

2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

定价: 88.00 元

《含杂质二氧化碳管道输送》 翻 译 组 成 员

成 员 （按姓氏拼音排序）

刘海丽 刘建武 李清方 陆诗建
陆胤君 孙广领 尚明华 于惠娟
张 建 赵 帅 张媛媛

版权© 2012 归美国机械工程师协会(美国纽约派克大街3号)所有(网址 www.asme.org)。

保留所有权利。本书在美国境内出版发行。除非得到 1976 美国版权法案的允许, 未经出版商事先书面许可, 不得对部分章节或全书进行复制, 或以任何形式或方式传播、存储在数据库或检索系统。

本书中所含信息已被美国机械工程师协会通过可靠途径获得。但无论美国机械工程师协会、本书作者或编辑都不能就本书内容的准确性和完整性做出任何保证。美国机械工程师协会、本书作者和编辑均不对因使用本书信息引起的任何过失、遗漏或损失承担责任。需要注意的是, 美国机械工程师协会、本书作者和编辑通过本书提供信息, 但并不提供任何工程技术或专业服务。如果需要此类工程技术或专业服务, 请咨询合适的专业人员。

美国机械工程师协会不对文章或其出版物中的陈述或观点负责(B7.1.3)。法规细则中的声明。

要获得版权法案中规定的正当用途以外的以内部或个人用途对材料进行复印的授权, 请联系版权审批中心(CCC), 地址: 马萨诸塞州丹佛斯 Rosewood Drive 222 号, 邮编: 01923, 电话: 978-750-8400, 网址: www.copyright.com。

若申请特殊批准或大批复印本书, 应与美国机械工程师协会出版部联系, 或登陆网址: <http://www.asme.org/Publications/Books/Administration/Permissions.cfm>

美国机械工程师协会出版社书籍可大量订购并享受优惠作为奖励或公司培训用书。更多信息请联系促销部, 网址: infocentral@asme.org

国会图书馆在版编目数据

含杂质二氧化碳管道输送/Mo Mohitpour 等著。

包括参考文献和索引。

ISBN 978-0-7918-5983-4

1、输气管道, 2、二氧化碳输送, I. Mohitpour, Mo. TA660. P55P59 2011
665.7'44—dc23

2011042723

前 言

本书是对美国机械工程师协会2000年出版发行的管道输送技术指南的修订。此

(1) 管道设计手册——美国标准 (Molins, John, 1997年, 第三版, 1997年)

(2) 管道设计手册——美国标准 (Molins, John, 1997年, 第三版, 1997年)

献 辞

谨以此书记念一位伟大的管道研究科学家 Wojciech Studzinski 博士(专业工程师)。他开创性的科学研究推动管道输送技术取得了巨大进步。

二、管道输送技术(CO₂)是通过对管道中的CO₂并输送以提供能源(BOE)

或将其封存,从而减少温室效应(CO₂)的排放。

在管道输送的CO₂过程中,管道输送是最安全的方法。然而,在管道内CO₂的输送

和输送水平(+)输送,以及某些管道输送设计在小的管道输送设计输送水平(+)输送

下CO₂管道输送的输送。

最大的CO₂管道网络位于北美(大部分位于美国),其中最早的管道位于1997年(De-

long管道长85km, Camanche管道从密西西比州一直延伸到路易斯安那州)。这些管道主要

将自然形成的地下煤层中的CO₂(地下水)输送到用于提高石油采收率的CO₂的

利用。其中一个管道长324m的管道(2000年投入使用),它将从CFL(位于美

国北达科他州)输送到位于明尼苏达州的城市。

因此,在管道输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

输送CO₂输送管道设计方面,管道输送设计在管道输送CO₂输送

前 言

本书是对美国机械工程师协会 2000 年首次出版发行的管道系列丛书的续篇与扩充。此系列丛书有：

- (1)《管道设计与施工——实用方法》，Mohitpour、Golshan 和 Murray，第三版，2007 年；
- (2)《管道作业与维护——实用方法》，Mohitpour、Van Hardeveld、Peterson 和 Szabo，第二版，2010 年；
- (3)《能源供应与管道运输——挑战与机遇》，Mohitpour，2008 年；
- (4)《管道泵送与压缩系统——实用方法》，Mohitpour、Botros 和 Van Hardeveld，2008 年；
- (5)《管道完整性保证——实用方法》，Mohitpour、Murray、McManus 和 Colquhoun，2010 年。

减少人类活动产生的二氧化碳(CO_2) (化石燃料燃烧产生的副产品)是使环境更加清洁的重要一步。

二氧化碳捕集与储存(CCS)是通过提取烟道中的 CO_2 并输送以提高原油采收率(EOR)或将其封存，从而减少温室气体(GHG)的排放。

在运输捕集的 CO_2 过程中，管道系统是最安全的途径。然而，含杂质的 CO_2 气流相态对杂质水平十分敏感，反过来这些杂质会影响管道设计及在不影响设备设计与输送条件情况下 CO_2 管道应用的范围。

最大的 CO_2 管道网络位于北美(大部分位于美国)，其中最早的管道建于 1963 年(Denbury 管道长达 82km，Cranfield 管道从密西西比州一直延伸到路易斯安那州)。这些管道主要将自然形成的地下储层中的 CO_2 (脱水并处理后)输送到油田用于提高原油采收率与 CO_2 的封存。其中一个特例是长达 324km 的韦本管道(2000 年投入生产)，它将从气化厂(位于美国北达科他州)烟道中捕集的 CO_2 输送到位于萨斯喀彻温省韦本市的油田。

因此含多种杂质的 CO_2 输送管道设计与作业经验十分有限且没有得到广泛传播。本书描述了管道与设备网络设计与运行所需的所有参数，从而能够安全运输含杂质 CO_2 而不对人类或环境产生危害。

本书各章节均就某一主题独立成章，无需参考其他章节。在本书中，同时使用了英制单位与公制单位。这样比较合理，因为行业中可以交替使用单位制。本部分包括一个换算表以供参考。

本书作者努力确保本书内容的正确性、对其他出版物的肯定、版权许可及所参考文件和姓名的准确性。本书中的具体技术、案例或应用不可照搬用于总包应用情况。读者应在使用前检查并评估所有详细资料。本书作者和美国机械工程师协会欢迎读者对本书内容进行更正和增补，并将在下一版本中注意，且对投稿人予以致谢。

Mo Mohitpour，加拿大不列颠哥伦比亚省白石镇

Patricia Seevam，英国伦敦西南

Kamal K. Botros，加拿大阿尔伯塔省卡尔加里

Brian Rothwell，加拿大阿尔伯塔省卡尔加里

Claire Ennis，加拿大阿尔伯塔省卡尔加里

2011 年

特别感谢

由衷地感谢英国纽卡斯尔大学 Martin Downie 教授和 Julia Race 博士，感谢他们在二氧化碳捕集和储存(CCS)及相关输送系统方面做出的重要研究。这项研究也促成了本书第二、三、四章的编写。他们对此行业做出的贡献以及对我们努力的支持是难以估量的。谢谢你们。

Mo Mohitpour

Patricia Seevam

Kamal K. Botros

Brian Rothwell

Claire Ennis

致 谢

本书灵感来自于在巴西石油大学主办的巴西萨尔瓦多第二届碳捕集和地质封存国际研讨会(CCGS)(2008年9月9日至11日)上与 Andrew Cosham 博士、Patricia Seevam 博士以及 John Tiratsoo 的讨论。

讨论的结果是要将含杂质 CO_2 运输管道的设计与操作情况中的所有概念展示在一份资料中,直至今日,针对此话题仍有大量研究与评估及设计备选方案讨论。

感谢 Cosham 博士的深刻见解,以及 John Tiratsoo(来自英国 Scientific Surveys 有限公司)几年来在许多有关管道技术问题(包括和美国得克萨斯州休斯敦 Clarion 技术出版社的出版商 BJ Lowe 合作完成的《管道工程杂志》中的主题)论文出版中的大力支持。

感谢我们的同事,他们以不同的方式鼓励我并对此书原稿进行检查、更新、修改、增补和提供材料。作者希望向所有同事表达诚挚的感谢并感谢他们宝贵的贡献。他们是:

Arne Dugstad 博士,挪威能源技术研究所(IFE);

Beryl Edmunds 博士,英国 INFOCHEM 公司;

Charles E Fox,专业工程师,金德摩根 CO_2 有限合伙公司(KMCO₂);

Michel Berghmans 博士,NOVA 化学公司;

Chris Foy,专业工程师,NOVA 化学公司;

Alan Glover 博士,专业工程师;

Hossein Golshan 博士,横加管道有限公司;

John Kazakoff,专业工程师,银狐工程顾问公司;

Robert McBrien 博士,专业工程师,NOVA 化学公司;

Stewart Midwinter,专业工程师,国际能源技术公司(ESI);

Tony Moorwood,英国 INFOCHEM 公司;

Hal Oliver,项目工程师;

Tony Oosterkamp 博士,挪威 Polytec 公司;

英国 Penspen 有限公司;

Julia Race 博士,英国纽卡斯尔大学;

Connell Rader,美国 Denbury 公司;

Marco Roncal,金德摩根 CO_2 有限合伙公司(KMCO₂);

J. H. (Jim) Russell,专业工程师,员工前 Enbridge 公司;

英国斯伦贝谢公司;

挪威 SPT 集团;

Charlie B Wallace。

我们同时也感谢美国机械工程师协会出版社的领导、管理及一贯的支持以及美国机械工程师协会出版社员工的帮助。

感谢 Philip DiVietro 先生、Mary Grace Stefanchik 女士和 Tara Collins Smith 女士对本书给予的极大鼓励、贡献、承诺,以及最重要的一点,对本书完稿的耐心。没有美国机械工程师

协会的努力，就不会有我们今天的成就。感谢 Annette Missouri 和 John Yelavich 以及全体员工几年来对本书及本书销售的大力支持。谢谢你们。

Mo Mohitpour 博士，项目工程师，专业工程师，F. I. 机械工程师，FASME，FEIC

邮箱：mo. mohitpour@ shaw. ca

Patricia Seevam 博士，特许工程师

邮箱：Patricia. Seevam@ uk. bp. com

Kamal K. Botros 博士，专业工程师

邮箱：botrosk@ novachem. com

Brian Rothwell，专业工程师

邮箱：brian. rothwell@ shaw. ca

Claire Ennis，受训工程师

邮箱：enniscj @ novachem. com

许可致谢

作者感谢所有允许在本书中使用和复印其图表、数据及其他材料的组织及个人。其中有些来自他们的网站和论文，因此会在参考文献中列出。对于未列出的参考资料所有者我们致以歉意。

作者向以下允许本书引用、复印他们材料的组织表达诚挚的感谢：

英国地质调查局(BGS)；

化学工业管理与技术咨询公司，网址 www.chemicalLogic.com；

德莱赛兰公司；

DYNAMIS 和 ECOFYS 项目；

国际能源技术公司，Stewart Midwinter 专业工程师；

欧洲共同体；

挪威 GASSCO 公司；

通用电气石油天然气公司；

福斯公司；

政府间气候变化专门委员会(IPCC)，第三工作小组；

英国国际能源总署温室气体研究与开发计划机构(IEAGHG)；

荷兰佩滕联合研究中心能源研究所；

德国曼牌涡轮机；

英国国家电力供应公司；

石油工程师协会(SPE)；

UKCCSC(英国碳捕集与储存组织)。

序 1

横加管道有限公司序

21 世纪一个重大的工程学挑战是减少气体排放，主要是燃烧化石燃料产生的副产品二氧化碳(CO_2)的排放。

实现这个方法之一是提取烟道中的 CO_2 ，经过处理后输送到地下封存并用于提高原油采收率(EOR)。

管道系统在将捕集到的 CO_2 输送到远处封存地点的过程中起重要作用。然而，管道的液压设计与构造设计对 CO_2 产品流中的杂质水平十分敏感，这将影响 CO_2 输送管道在不影响终端产品输送条件下的安全作业。

本书描述了管道与设备网络设计与运行所需的所有参数，从而能够安全运输含杂质 CO_2 而不对人类或环境产生危害。

作者在管道行业颇有名气，之前出版过五本管道系列丛书，涵盖了管道设计、施工、作业、维护、能源供应、泵送与压缩以及管道完整性保证等方面，所有这些都在行业内产生了巨大影响。

我们非常乐意继续支持美国机械工程师协会出版社出版的此系列丛书，以及作者在研究整理作为 CO_2 输送过程中管道与设备安全设计与作业参考指南的重要信息方面做出的努力。

Andrew Jenkins, 专业工程师

横加管道有限公司副总裁

Martin Dowling 教授, Julia Rowe 博士

剑桥大学机械工程系

圣詹姆斯路千禧实验室

序 2

纽卡斯尔大学序

二氧化碳(CO_2)管道输送的主题已经变得越来越重要,因为碳捕集与储存(CCS)计划已从试验阶段转为实施阶段。尽管人们期望碳捕集与储存(CCS)管道输送网络的发展将基于天然气管道输送的可用技术和 CO_2 高压管道输送提高原油采收率(EOR)的已有经验,但仍然存在一些必须克服的新的挑战。

本书主要介绍含杂质 CO_2 或非 CO_2 气体的管道输送。管道输送面临的挑战之一,就是尽量减小 CO_2 气流的组成对输送系统发展的限制。理想情况下,在整个碳捕集与储存过程中,在健康、安全 and 环境因素的限制范围内,管道规格的选择应尽可能多。为了实现这一目的,在最近的管道设计、维护和作业的程序中需要足够的信心以保证这些方法可以安全的运用到 CO_2 管道输送基础设施中。许多此类注意事项在本书章节中有进一步讨论。

然而,也许最大的挑战是碳捕集与储存对改善气候变化做出有效贡献所需的全球基础设施的规模。对于大规模 CO_2 管道基础设施(使用不同捕集技术将含有多种气体成分的气源通过基础设施与陆上和海上储存地点相连)设计与作业方面遇到的问题,人们没有给予足够的注意与研究。除技术要求之外,此类基础设施的建设要求国家及国际政府做出合理的战略计划来建立安全、经济的网络,从而将对环境的影响降到最低。最后,要求建立健全的规章制度与财政激励机制。

作为一项产业,我们希望能够应对这些挑战并且这本专门介绍 CO_2 管道输送的书能够受到管道行业的欢迎。纽卡斯尔大学十分高兴能够为这项适时的、意义重大的工作的编制与审查工作做出贡献。

Martin Downie 教授与 Julia Race 博士
海洋科学与技术学院
英国纽卡斯尔大学

序 3

金德摩根公司序

编写关于 CO₂ 管道输送的这本书，作者已为行业做出许多贡献，并且我很高兴可以说我在他们努力之初提供了些许帮助。2006 年 Patricia 联系我寻求帮助，因为我参与编写了石油工程师协会专题论文“CO₂ 驱油实践”并且管理着世界上最大的 CO₂ 管道系统。我让他们与我公司的专家共同探讨并且祝他们好运。五年后，经过他们的艰苦努力，《含杂质二氧化碳管道输送》这本书已准备出版了。

在处理 CO₂ 提高原油采收率和碳储存领域工程师们的书架上，本书将处于显眼位置。这些技术包括 CO₂ 的捕集与生产、输送并最终注入地下以及管理 CO₂ 在地下的活动。直到现在，输送方面仍然被忽视，这是不正确的。有着不同背景与来自管道工程相关组织的的作者在本书中综合了科学技术的发展。

和其他公司一样，我们公司也存在人员流动现象，我们努力将 CO₂ 输送知识传达给新员工。拥有大量天然气、原油和精炼石油产品输送经验的人或许对 CO₂ 处理并不熟悉，而且在一开始需要帮助。参考本书将有助于专家操作我们的管道系统。我希望其他计划、设计或操作 CO₂ 管道的人参考本书并且好好利用。

Charles E. Fox

作业与工程部副总裁

金德摩根 CO₂ 有限合伙公司

译者的话

CO₂ 捕集与封存技术(CO₂ Capture and Storage, CCS)是一项新兴的、具有大规模 CO₂ 减排潜力的技术,得到了国际社会的广泛关注。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)已将针对燃煤电厂的 CCS 技术作为实现 2050 年温室气体减排目标的最重要的技术方向。

二氧化碳(CO₂)的输送是 CCS 系统的中间环节,承担着将捕集到的 CO₂ 运输到封存点的任务,是实现 CO₂ 源汇匹配的纽带,是实现 CCS 大规模工程化应用的关键技术环节。CO₂ 输送的相态可以是气态、超临界状态、液态或者固态,比天然气输送的相态复杂。为了降低 CCS 全链条系统的运行成本,输送环节 CO₂ 中会含有杂质。杂质的存在影响了 CO₂ 的物理性质,给输送环节的工程设计及实施增加了难度。

目前,国际上在 CO₂ 管道输送方面已有多年实践,取得了丰富的工程经验,有将近有 6000km 的管道正在活跃地运输 CO₂,大部分位于美国网络中;而中国 CO₂ 的运输主要以低温储罐公路运输为主,国内尚没有一条真正意义上的 CO₂ 长输管道,CO₂ 输送技术还处于研究探索阶段。为此,中石化石油工程设计有限公司组织了相关技术人员将《含杂质二氧化碳管道输送》(原文名称: Pipeline Transportation of Carbon Dioxide Containing Impurities)翻译成中文介绍给大家,供从事 CO₂ 管道输送研究人员及专业技术人员参考。

《含杂质二氧化碳管道输送》一书主要针对 CO₂ 的管道输送相关技术进行了系统介绍。全书共分十三章,内容包括 CCS 技术背景、CO₂ 输送技术现状、人为产生 CO₂ 的性质及适用于含杂质 CO₂ 的状态方程(Equation of State)概述、CO₂ 管道系统设计开发、CO₂ 管道的运行维护及风险安全评估等方面,着重阐述了 CO₂ 管道系统设计开发所涉及的技术内容。期望本书能够为读者系统地了解 CCS 及 CO₂ 管道输送技术提供帮助。

本书的翻译出版凝结了中国石化石油工程设计有限公司从事碳捕集技术研究人员集体的智慧。

李清方、刘海丽、陆诗建、尚明华、张媛媛、刘建武、孙广领、陆胤君、于惠娟等同志参与了本书的翻译和校审工作。其中,李清方翻译了第 1、2 章,刘海丽翻译了第 3、4 章,陆诗建翻译了第 5、6 章,尚明华翻译了第 7、10 章,张媛媛翻译了第 8、9 章,刘建武翻译了第 11 章,孙广领翻译了第 12 章,陆胤君、于惠娟参加翻译了第 13 章。张建教授级高工负责全书的统稿,赵帅教授级高工进行了全书的校审工作。

本书的翻译出版得到了“十二五”国家科技支撑计划课题“大规模燃煤电厂烟气 CO₂ 捕集、驱油及封存技术开发及应用示范”(2012BAC24B00)的支持,在此表示感谢。

在中国石化石油工程设计有限公司研究生工作站开展研究课题的中国石油大学(华东)2011 级研究生同学参与了本书的图表制作及部分章节翻译工作,一并表示感谢。

本书虽经过多次审稿、修改,但由于译者的水平所限,不妥及疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

目 录

第1章 CO ₂ 输送概况与挑战	(1)
1.1 介绍	(1)
1.2 CO ₂ 科学	(5)
1.3 CO ₂ 与气候变化	(7)
1.4 CO ₂ 来源、使用和安全问题	(10)
1.5 不纯 CO ₂ 的捕集技术	(13)
1.6 CO ₂ 封存	(17)
1.7 CO ₂ 输送	(20)
1.8 运输含杂质 CO ₂ 的管道输送技术	(23)
1.9 CO ₂ 的性质和相图	(30)
参考文献	(36)
第2章 碳捕集、运输和储存背景	(41)
2.1 碳捕集与储存	(41)
2.2 CO ₂ 的基本性质	(41)
2.3 CO ₂ 捕集技术	(43)
2.4 CO ₂ 封存	(49)
2.5 管道运输的意义	(56)
2.6 CO ₂ 捕集与储存中运输问题的背景介绍	(58)
参考文献	(59)
第3章 人为产生 CO ₂ 的性质	(64)
3.1 人为产生 CO ₂ 的组分	(64)
3.2 目前运行的 CO ₂ 管道中 CO ₂ 的质量	(65)
3.3 不同捕集技术对 CO ₂ 纯度的预计要求	(66)
3.4 CO ₂ 捕集与储存中 CO ₂ 管输规范的计划方案	(68)
3.5 目前运行的 CO ₂ 管道中的水含量	(69)
3.6 人为产生 CO ₂ 的捕集与储存	(74)
3.7 结束语	(74)
参考文献	(74)
第4章 适用于含杂质 CO ₂ 的状态方程(EOS)概述	(77)
4.1 适用于含杂质 CO ₂ 的状态方程(EOS)概述	(77)
4.2 物理性质—状态方程	(78)
4.3 物理性质模型概述	(78)
4.4 状态方程(EOS)	(79)
4.5 人为产生的 CO ₂ 混合物状态方程的评估	(83)

4.6	杂质对 CO_2 相位特性的影响	(86)
4.7	CO_2 管道作业范围	(90)
4.8	CO_2 捕集与储存中人为 CO_2 质量方案的相特性	(90)
4.9	CO_2 含水量规格	(93)
4.10	人为产生 CO_2 的相特性	(95)
4.11	杂质对 CO_2 储存及提高油气采收率的影响	(96)
	参考文献	(98)
第5章	CO_2 的管道运输	(102)
5.1	建立设计参数	(102)
5.2	确定 CO_2 管道压力	(103)
5.3	管道输送的 CO_2 产品质量	(113)
5.4	其他设计参数	(118)
5.5	典型管道系统设计	(121)
5.6	计量设施布置	(124)
5.7	管道阀门和放空	(125)
5.8	管线控制装置	(127)
5.9	管道和组成物料	(127)
5.10	标准/规范和规定	(129)
5.11	管道工艺路线	(131)
	参考文献	(132)
第6章	含杂质的 CO_2 中减压波速度特征	(136)
6.1	引言	(136)
6.2	背景	(136)
6.3	有关含杂质的 CO_2 的案例描述	(138)
6.4	纯 CO_2 中的减压波速度	(139)
6.5	$\text{CO}_2 + \text{N}_2$ 二元混合物的减压波速度	(145)
6.6	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 二元混合物的减压波速度	(147)
6.7	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4$ 二元混合物的减压波速度	(151)
6.8	$\text{CO}_2 + \text{H}_2$ 二元混合物中的减压波速度	(155)
6.9	$\text{CO}_2 + \text{CO}$ 二元混合物中的减压波速度	(158)
6.10	$\text{CO}_2 + \text{Ar}$ 二元混合物中的减压波速度	(161)
6.11	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ 二元混合气中的减压波速度	(163)
6.12	关于 CO_2 管道断裂韧性要求的启示	(168)
6.13	减压波速度的实验测定	(170)
6.14	富天然气混合物激波管试验结果示例	(176)
6.15	未来工作的几点建议	(179)
6.16	结束语	(180)
	参考文献	(180)
第7章	管材选择和断裂控制	(183)
7.1	概述	(183)