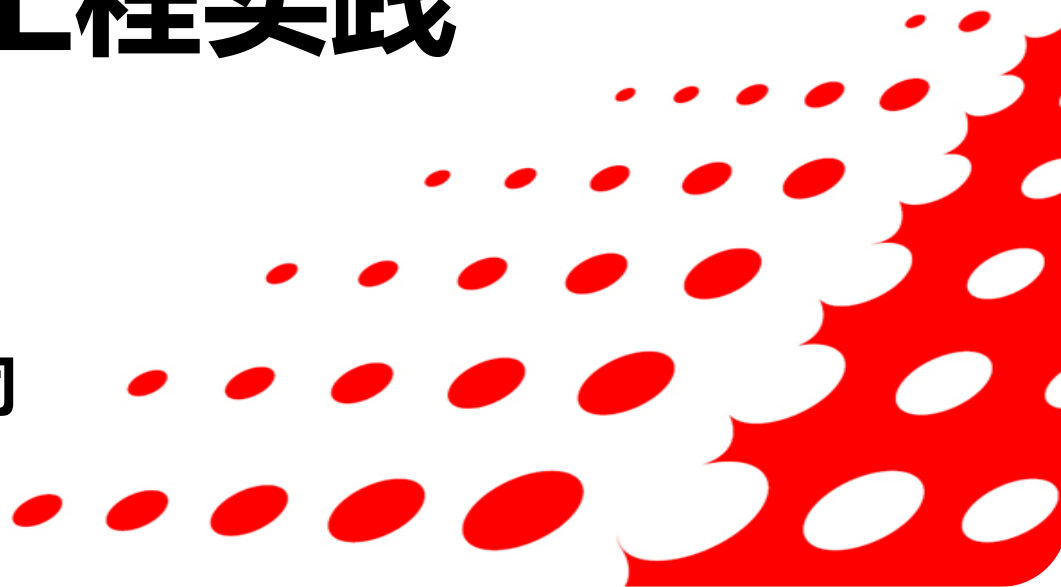




中国石化CO₂管道输送技术 及工程实践

中石化石油工程设计有限公司
二零一六年三月 陈霖



提 要

一 CO₂管道输送概况

二 CO₂管道输送技术研究成果

三 CO₂管道输送工程实践

四 CO₂管道输送面临的挑战和前景

一、CO₂管道输送概况

(1) CO₂输送方式

- ◆ CO₂的输送状态可以是**气态、超临界状态、液态、固态**，但是从大规模运输的可行性来看，流体态（气态、超临界状态和液态）CO₂更便于大规模的运输。
- ◆ 目前已经实践的输送方式主要有**罐车输送、轮船输送和管道输送**。



中短距离、小容量的运输，其运输相对灵活
分为公路罐车和铁路罐车两种



大容量、超远距离，靠近海洋或江河的运输
船舶运输还处在起步阶段，世界上只有4艘现行的轮船投入运行，用于食品加工领域

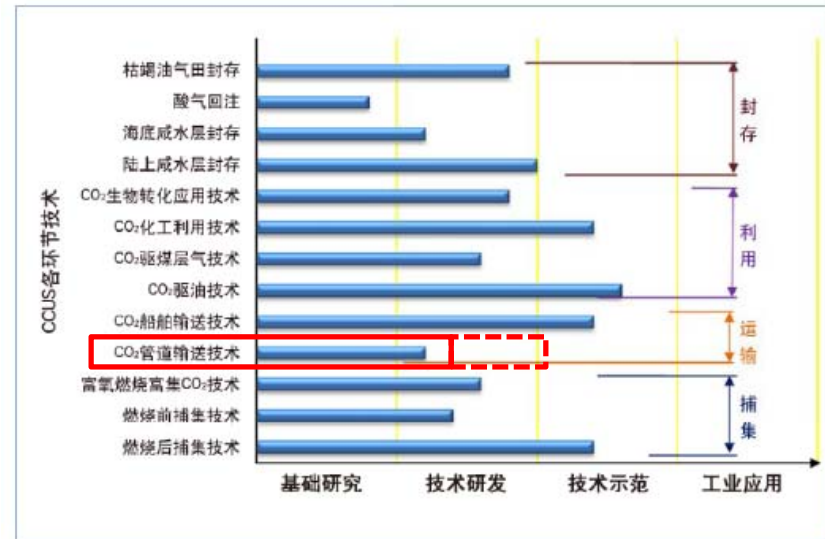
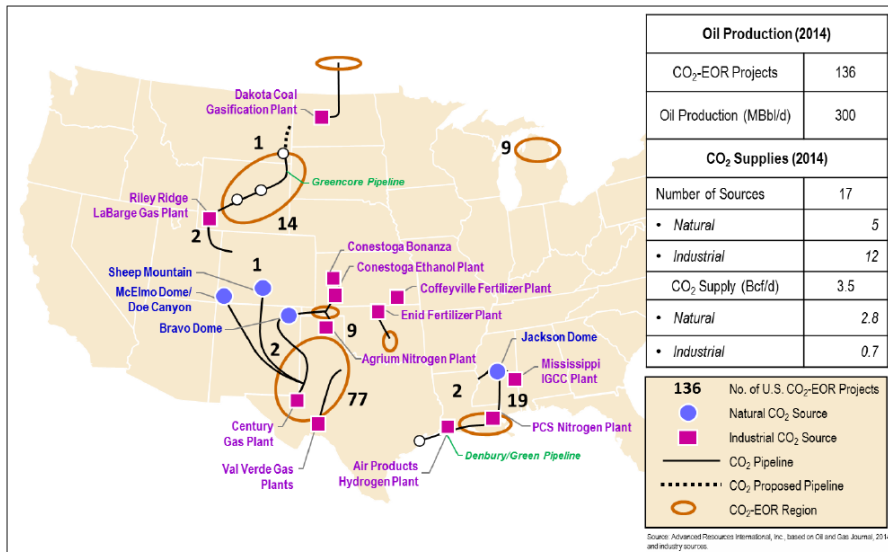


大容量、长距离、负荷稳定的定向输送
管道运输是目前应用最广泛的大规模运输方式

一、CO₂管道输送概况

(2) CO₂管道输送现状

国际上在CO₂管道输送方面已有多年、大量的工程实践，大部分位于美国，正在运营超过50条独立的CO₂管道（包括专线、干线、支线以及洲际与州内的），管网的长度超过7200km，总输量达到6.8×10⁸吨/年。目前，中国CO₂的运输主要以低温储罐公路运输为主，CO₂管道输送方面的技术研究起步较晚。



美国现有CO₂-EOR运营与基础设施*

中国CCUS各环节技术发展水平**

*引自U.S.DOE/NETL（美国能源部国家能源技术实验室），A Review of the CO₂ Pipeline Infrastructure in the U.S. 2015.4.21

**引自《中国碳捕集、利用与封存技术发展路线图研究》，2011.09.



一、CO₂管道输送概况

(2) CO₂管道输送现状

世界上主要的CO₂长输管道

| 管道 | 管道地点 | 运行者 | 输量 (Mt/y) | 长度 (km) | 管径 (in) |
|----------------------|--------|-------------------|-----------|---------|----------|
| Cortez | 美国 | Kinder Morgan | 19.3 | 808 | 30 |
| Sheep Mtn | 美国 | Oxy Permian | 8.8 | 657 | 24 |
| Bravo | 美国 | Oxy Permian | 5.6 | 351 | 20 |
| Canyon Reef Carriers | 美国 | Kinder Morgan | 3.3 | 274 | 16 |
| Central Basin | 美国 | Kinder Morgan | 3.3 | 182 | 16 |
| Greencore | 美国 | Denbury Resources | 10.7 | 370 | 22 |
| Green Pipeline | 美国 | Denbury Resources | 13.8 | 505 | 24 |
| Delta | 美国 | Denbury Resources | 8.8 | 174 | 24 |
| NEJD | 美国 | Denbury Resources | 5.3 | 295 | 20 |
| Bati Raman | 土耳其 | 土耳其石油 | 1.1 | 90 | Dodan 油田 |
| Weyburn | 美国/加拿大 | 美国北达科他州气化公司 | 5 | 328 | 气化厂 |
| Snøhvit | 挪威 | StatoilHydro | 0.7 | 153 | |



一、CO₂管道输送概况

● Cortez Pipeline

| | | | |
|--------|-------------------|--------------------|----------------------|
| 管长 | 808km | 运行压力 | 96-186bara (最高温度43℃) |
| 管径 | 30" | N ₂ 限制 | 4% (摩尔分数) |
| 壁厚 | 17.5-25.4mm | 烃类限制 | 5% (摩尔分数) |
| 输量 | 19.3 MT/yr | 允许含水量 | 257ppm wt |
| 增压/减压站 | 3个减压站、1个增压站、2个计量站 | H ₂ S限制 | 0.002% (摩尔分数) |
| 管材 | API-5LX-65 | 止裂器 | 需要、间距300m |

● Sheep Mountain Pipeline

| | | | |
|--------|---------------------------------|-------|------------------|
| 管长 | 656km | 运行压力 | 83-195 bara |
| 管径 | 20"(296km)、24"360km) | 截止阀间距 | 19-32 km |
| 壁厚 | 最大19.1mm | 外涂层 | 2.4mm玻璃纤维增强煤焦油磁漆 |
| 输量 | 6.3 MT/yr (20")、9.2 MT/yr (24") | 允许含水量 | 500ppm |
| 增压/减压站 | 需要减压站 | 止裂器 | 需要 |
| 管材 | API Grade 5LX-70 | 计量 | 涡轮流量计、插入式密度计 |
| 法兰盘 | ANSI1500 | 控制 | SCADA系统 |

大规模、长距离CO₂输送管道都是将CO₂压缩至8MPa以上的压力，以避免二相流和提升CO₂的密度，因而便于运输和降低成本。



提 要

一 CO₂管道输送概况

二 CO₂管道输送技术研究成果

三 CO₂管道输送工程实践

四 CO₂管道输送面临的挑战和前景



二、CO₂管道输送技术研究成果

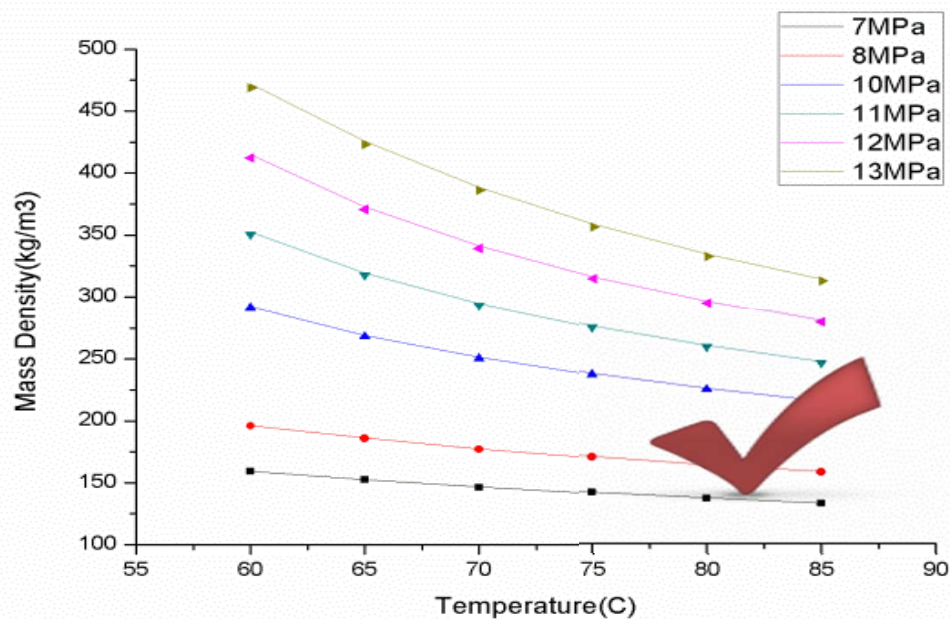
(1) 完成了CO₂相平衡及物性的理论研究，建立了相平衡计算模型

在进行CO₂临界点、密度、粘度、比热、焓等参数计算时，由于每种数学模型都有特定的适应条件，需对计算数学模型进行选择。通过理论计算和实验研究数据对比分析，确定选择采用PR方程进行CO₂物性参数计算。

分别采用SRK方程、PR方程、PRSV方程、BWR5方程计算密度等部分参数

将国内外学者实验结果数据拟合成多条连续曲线，与计算结果进行对比

优选适合CO₂相态和物性的计算数学模型



PR方程计算结果与实验结果对比图

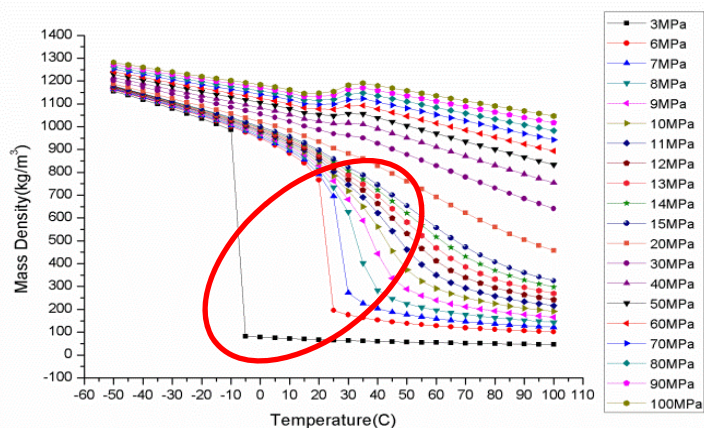


二、CO₂管道输送技术研究进展

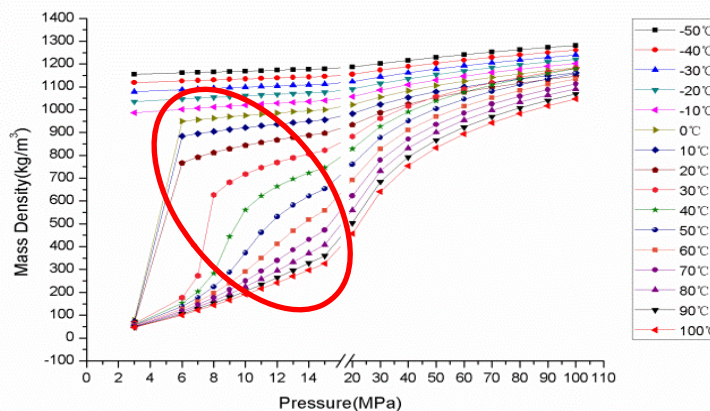
(1) 完成了CO₂相平衡及物性的理论研究，建立了相平衡计算模型

采用PR方程计算不同温度压力下纯CO₂密度、粘度等。

密度计算

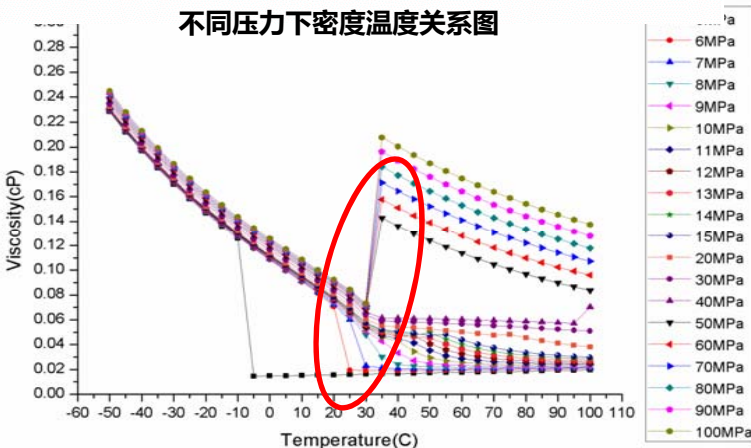


不同压力下密度温度关系图

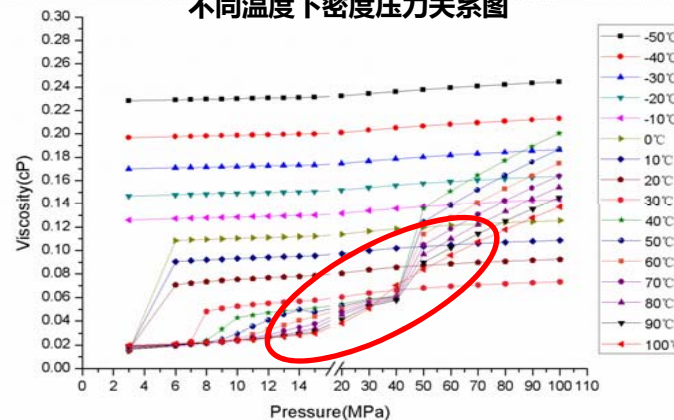


不同温度下密度压力关系图

粘度计算



不同压力下粘度温度关系图

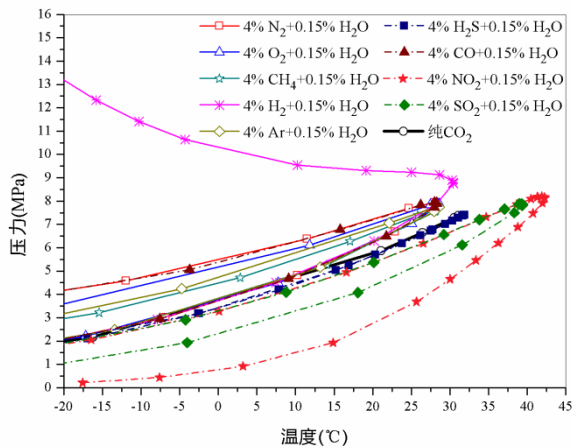


不同温度下粘度压力关系图

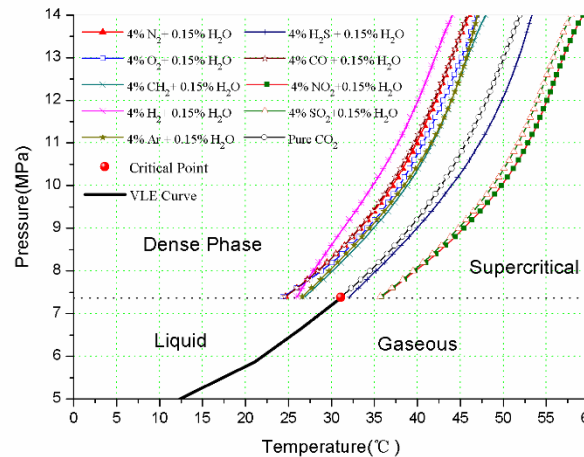
CO₂管道设计时要注意避免CO₂物性突变区。

二、CO₂管道输送技术研究进展

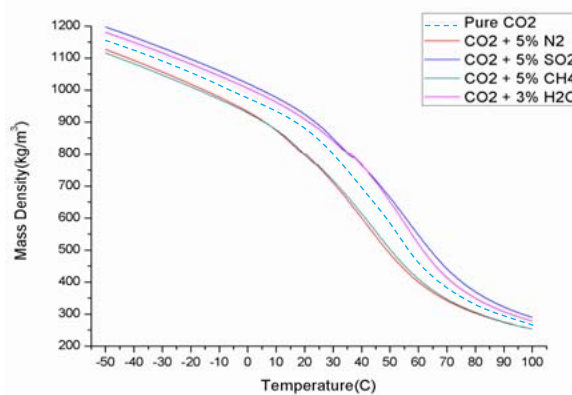
◆ 杂质对CO₂相平衡、临界点、密度、粘度、比热和导热系数等物理性质的影响



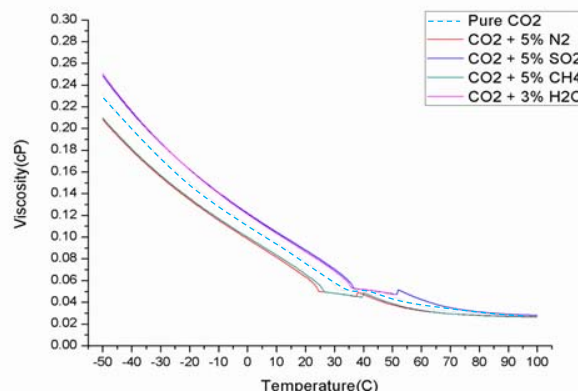
杂质对相平衡影响



杂质对临界点影响



不同杂质对密度影响



不同杂质对粘度影响

杂质对相平衡、临界点、密度、粘度、比热等都有一定影响，在管道设计时，首先要对上游介质组分进行相应的物性计算分析，明确管输CO₂相图中的关键参数，确保输送过程中不发生相变，以指导实际工程设计与运行管理。

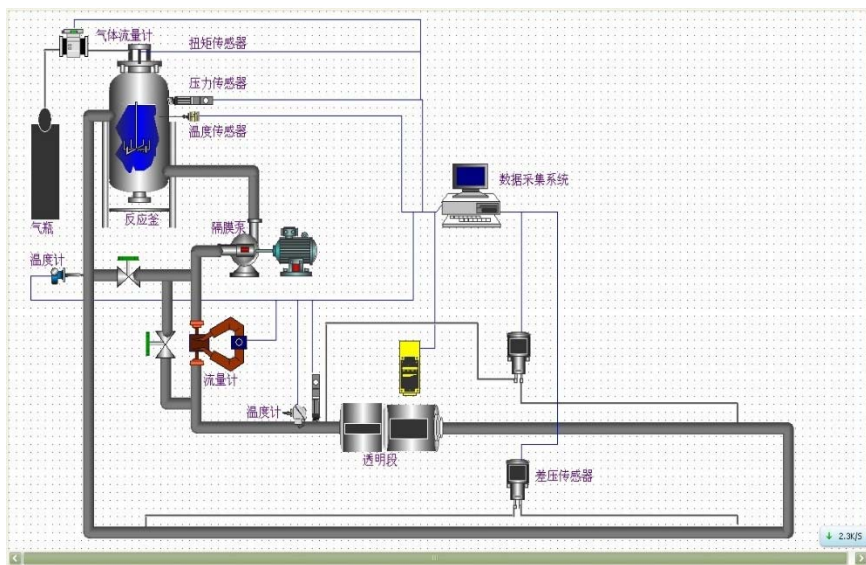
二、CO₂管道输送技术研究进展

(2) 完成了CO₂管输水力、热力特性理论计算模型及实验验证

实验模拟气相、液相和超临界输送温度和压降

采用计算HYSYS软件对以上实验工况进行计算

对比分析实验结果和软件计算数据



CO₂输送环道实验装置



反应釜（混合器）



高压隔膜泵

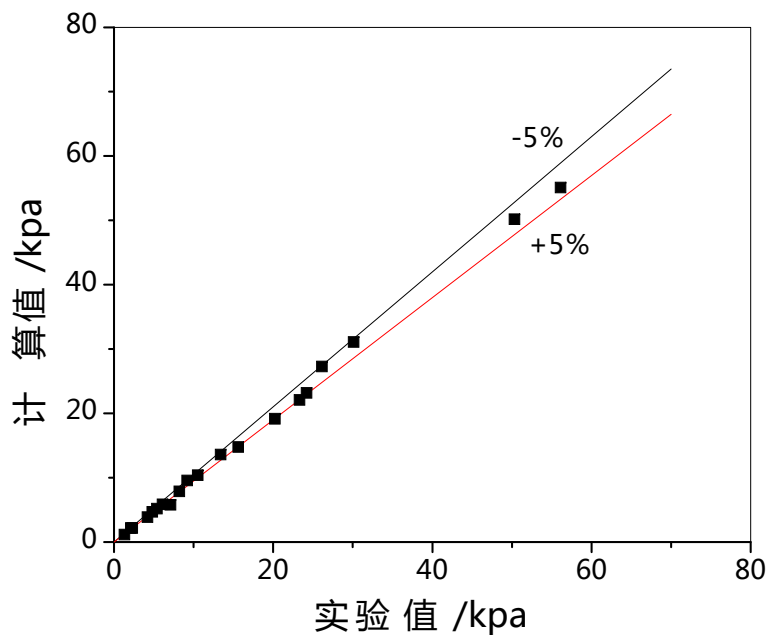


流通环道

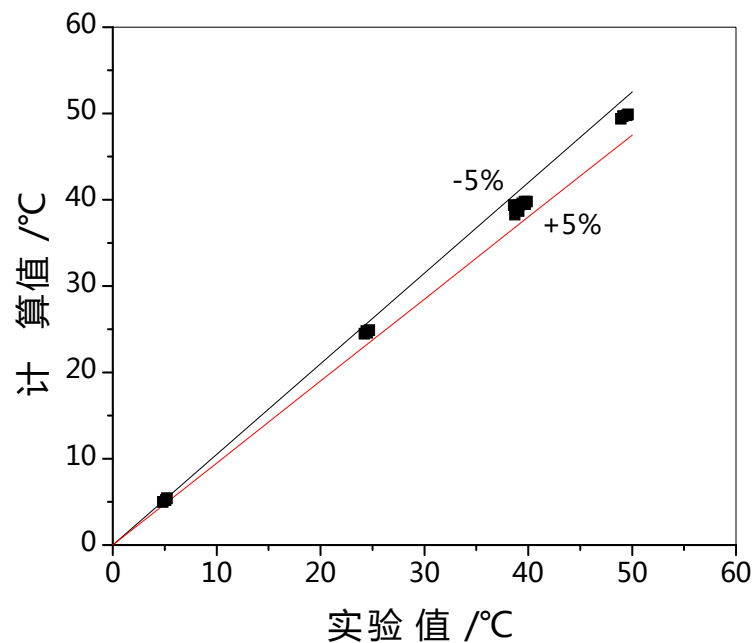


二、CO₂管道输送技术研究进展

理论模拟与实验结果校验



压降误差分布图



温降误差分布图

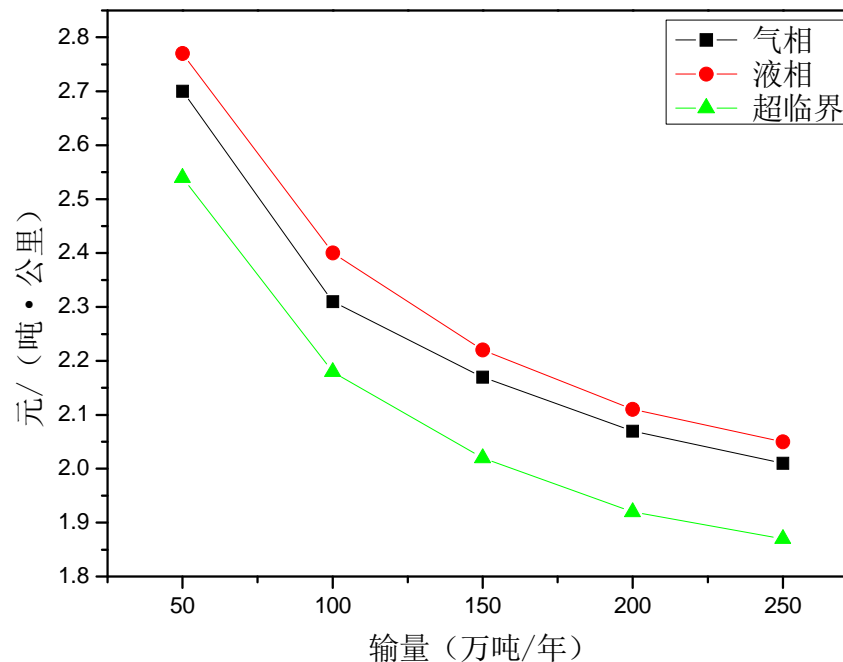
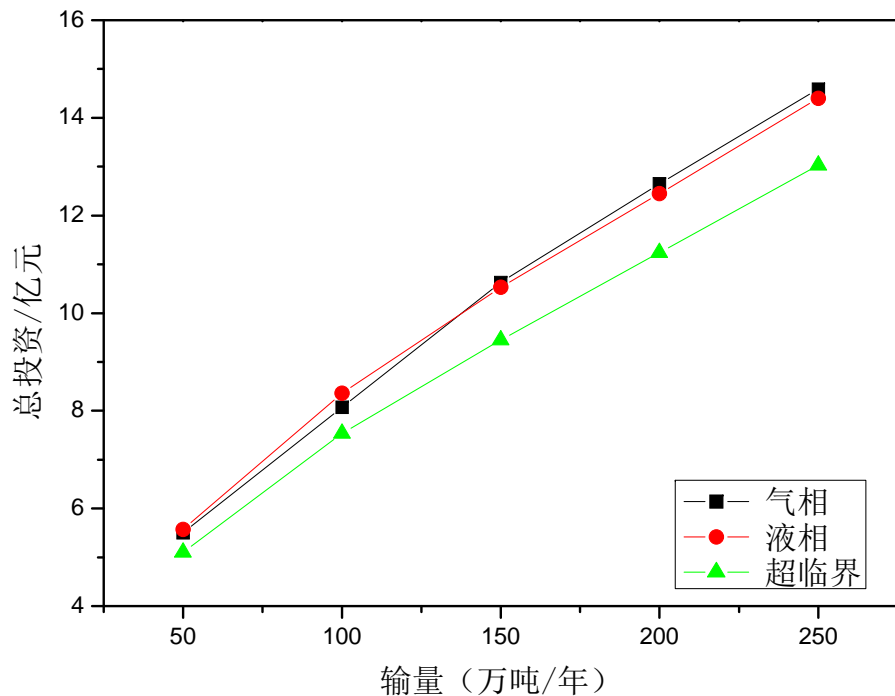
通过分析，CO₂管道输送的压降和温度软件计算结果与实验结果的最大正偏差4.96%，最大负偏差4.97%，误差范围在±5%之内。



二、CO₂管道输送技术研究进展

(3) 确定了不同输送工艺的技术边界条件

不同输量各输送状态投资和总成本

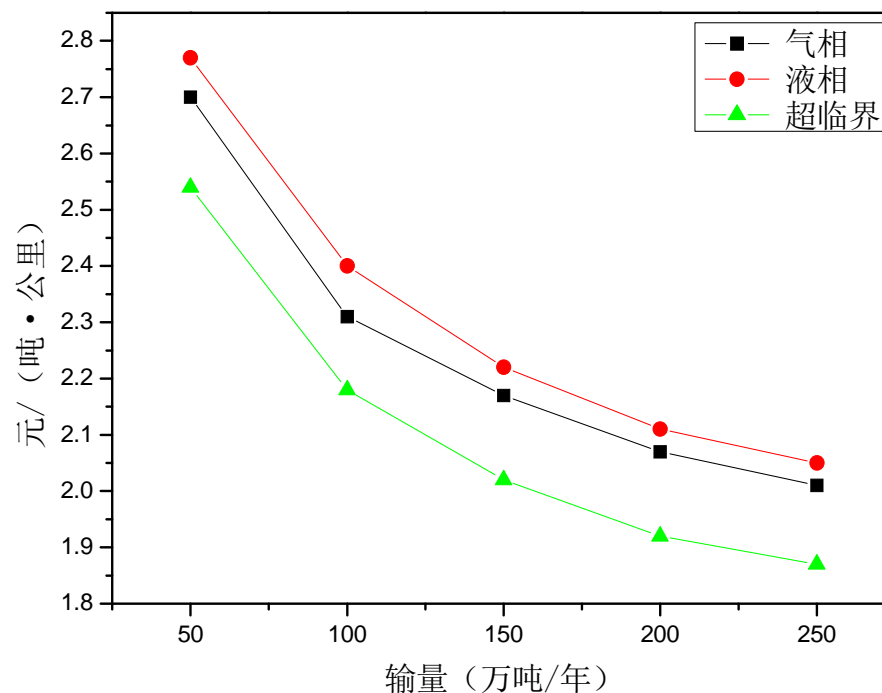
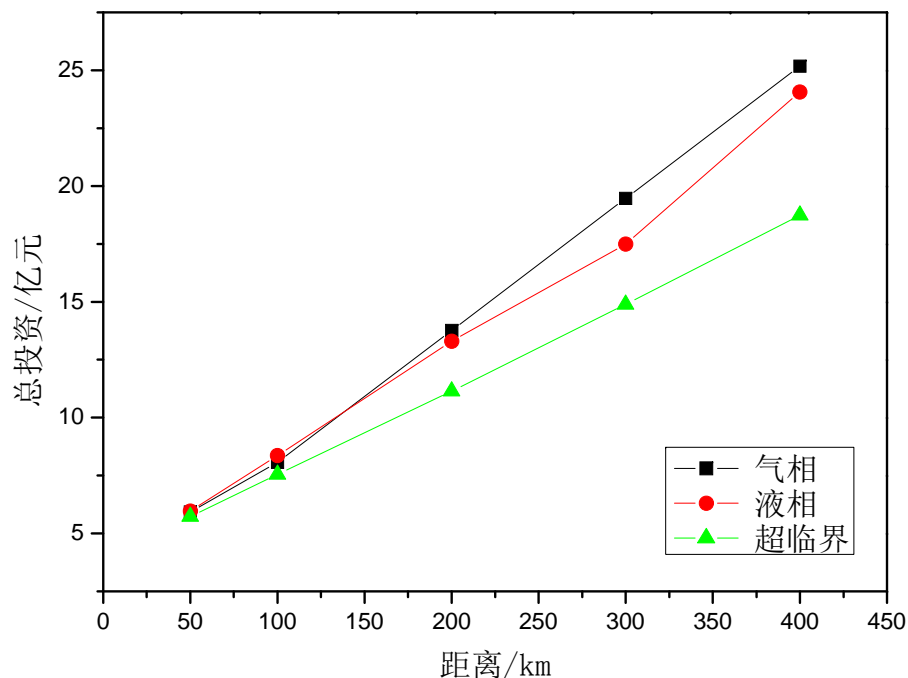


- ✓ 总投资与管输量成正比；总成本与管输量成反比；
- ✓ 当低输量不同输送相态的项目总投资相差不大，大输量输送时，超临界状态输送优势较为明显。



二、CO₂管道输送技术研究进展

不同长度各输送状态投资和总成本



- ✓ 总投资随着输送距离的增加而增加；总成本随输送距离的增加而降低；
- ✓ 超临界投资和管输费最低，气相和液相投资和管输费较高；
- ✓ 当短距离输送时，不同输送相态的项目总投资相差不大，远距离输送时，超临界状态输送优势较为明显。



二、CO₂管道输送技术研究进展

通过工艺可行性、安全性和经济性等指标综合评估，对不同输送相态进行适应性分析研究。

不同输送相态的适应性分析研究

| 输送方式 | 适用性 |
|----------|--|
| 气相输送 | <ul style="list-style-type: none">1) 运行压力较低，操作安全性高；2) 管道不需要保温，对不同输量适应性强，管径大，投资高；3) 适用于小输量、短距离长输管道，介质来源属于气相的工况、且与超临界相比更适合于人口密集区域。 |
| 一般液体输送 | <ul style="list-style-type: none">1) 运行压力较低，管道需要保冷，投资费用高2) 适用于小输量、短距离的油田内部集输管道，介质来源属于液相的工况。 |
| 超临界/密相输送 | <ul style="list-style-type: none">1) 运行压力高，投资较低，管道不需要保温，对不同输量适应性强；2) 适用于大输量、长距离的长输管道，介质压力较高；3) 国外已建管道基本采用超临界输送，且管道沿线人口密集度较低。 |



二、CO₂管道输送技术研究进展

(4) 确定了CO₂管道输送时对杂质含量要求

考虑满足EOR混相驱油的要求，并基于腐蚀性能实验研究，对CO₂浓度、N₂、CH₄等不凝气含量以及O₂、SO₂、NO₂、H₂O等腐蚀性杂质进行明确。

推荐CO₂管道中的组分要求

| | 组分 | 浓度限制 | 备注 |
|----------------------|--------------------------------------|--------|-----------|
| 满足终端用户需求 (最低混相压力) | CO ₂ | ≥95% | 满足EOR混相要求 |
| | N ₂ 、CH ₄ 等不凝气 | ≤4% | |
| 腐蚀控制及安全性 | O ₂ | 需要严格明确 | |
| | SO ₂ | | |
| | NO ₂ | | |
| | H ₂ O | | |

其他微量杂质含量应满足国内现有相关类似标准规范要求。



二、CO₂管道输送技术研究进展

(5) 确定阀室间距

| 参考标准 | 设置情况 |
|---------------------------------|--|
| 世界能源协会 | 根据管道的位置，阀间距通常为16~32km（10~20英里），在关键地点如公路、河流跨越和城市内，间距应减小。 |
| CAS-Z662-7 | 按照人口密集程度划分为四个地区等地，其中一级地区不设阀室，二、三、四级地区阀室间距设置为15km。 |
| GB50253（液态、超临界态） GB50251（气态） | 按照地区等级划分：一级地区不大于32km、二级地区不大于24km、三级地区不大于16km、四级地区不大于8km。 |

国内标准规范的要求是根据国外CO₂管道阀室间距的设置调研情况，结合国内类似工程标准规范以及国内人口密集程度进行确定。

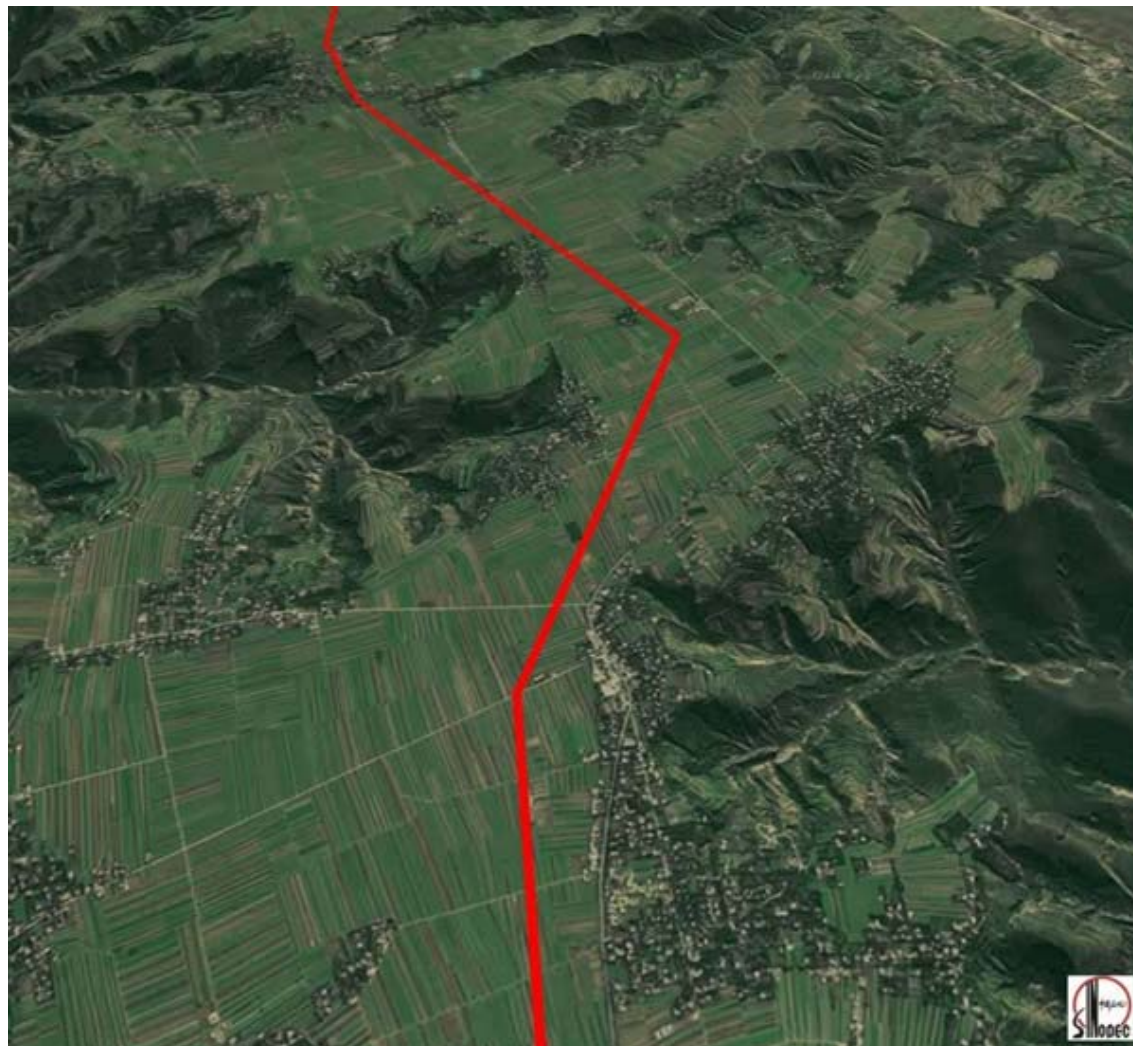


二、CO₂管道输送技术研究进展

(6) 基于地理信息数据的二氧化碳管道设计与优化

基于地理信息数据平台开展管道路由三维设计。

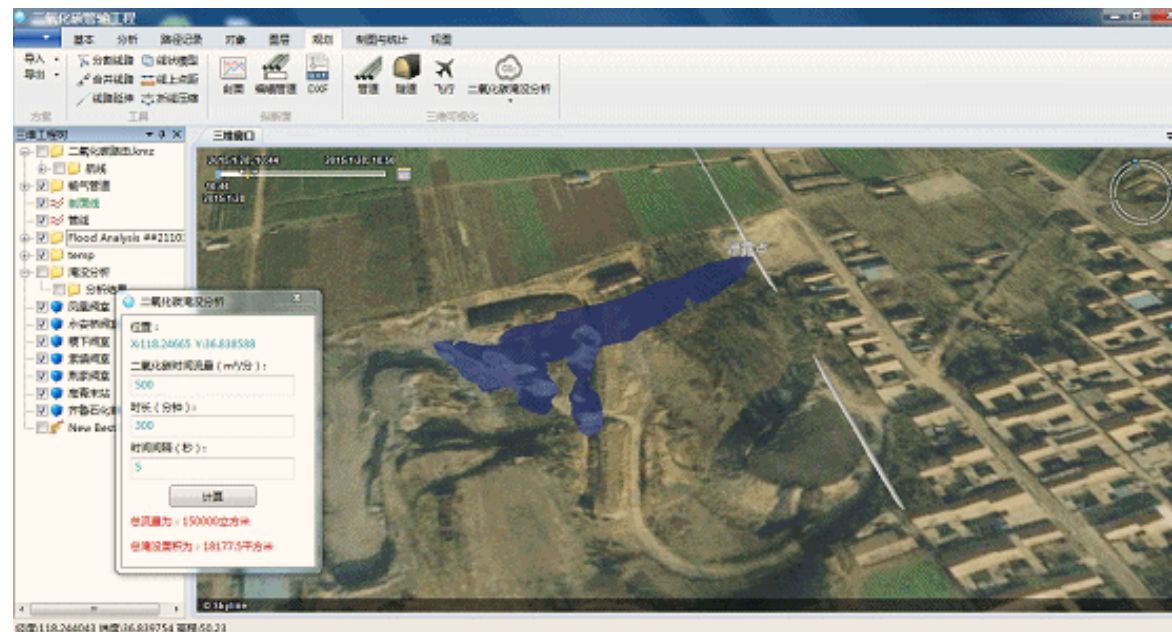
依托三维设计平台中的影像与高程数据，开展管道沿线的路由设计，可以满足数字化、智能化管道建设的数字化移交要求。



二、CO₂管道输送技术研究进展

(6) 基于地理信息数据的二氧化碳管道设计与优化

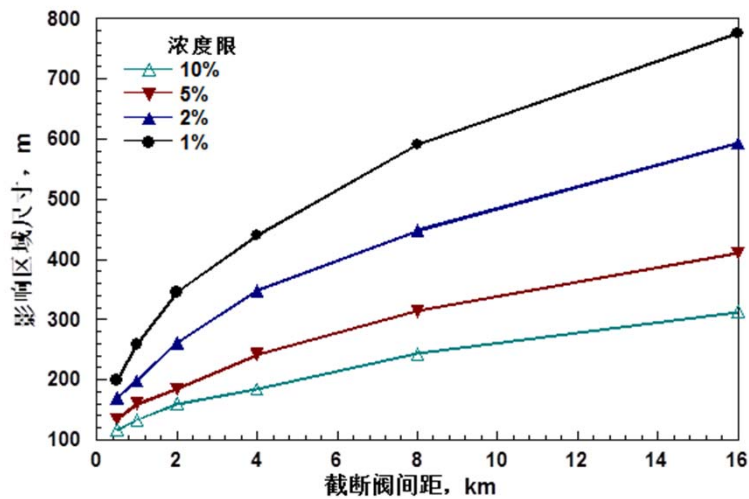
同时可依托三维设计平台中的二氧化碳淹没分析模块以及高程数据，开展管道沿线重点敏感区域（高后果区）的二氧化碳淹没分析，能够较为准确的分析管道泄漏时的危险区域，满足管道完整性管理的要求，为二氧化碳管道的安全运营及事故抢维修提供设计技术保障。



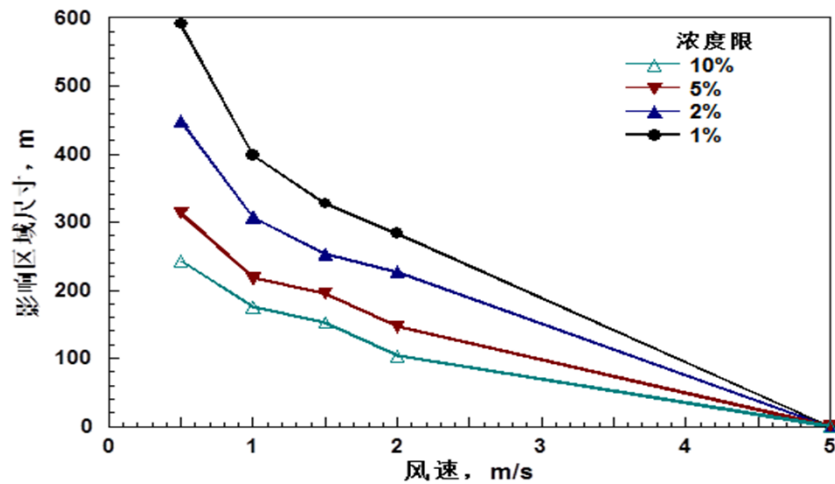
二、CO₂管道输送技术研究进展

(7) 输送状态的安全性评估

通过HYSPLIT4.8污染物迁移软件、ANSYS等对CO₂泄漏及放空时的扩散动态影响区域进行模拟预测分析，对多种输送方案的安全性进行评估。



超临界输送阀室间距对不同浓度限影响区域的影响
(典型气象场A, 0.5m/s)



超临界输送时风速对不同浓度限影响区域尺寸的影响
(阀室间距: 8000m)

- 阀室间距不是浓度限的影响范围的主导因素，阀室间距越大影响的持续时间将越长。
- 风速是泄漏场区浓度限影响范围的主导因素，风速越大，浓度限影响范围越小。

二、CO₂管道输送技术研究进展

(8) 对管道延性断裂扩展控制

二氧化碳管道与天然气管道相比，二氧化碳管道具有较宽的减压波平台，并且介质杂质组分一般较多，不同组分对于减压波的影响不同，给管道延性断裂扩展控制带来影响更大。因此，二氧化碳管道的延性断裂扩展更值得关注。

一般采用Battelle双曲线法确定CO₂管道的止裂韧性要求，其模拟计算结果与介质组分、钢级、压力、温度、管径、壁厚等因素都有关系，尤其是杂质含量、管径、钢级和温度等。

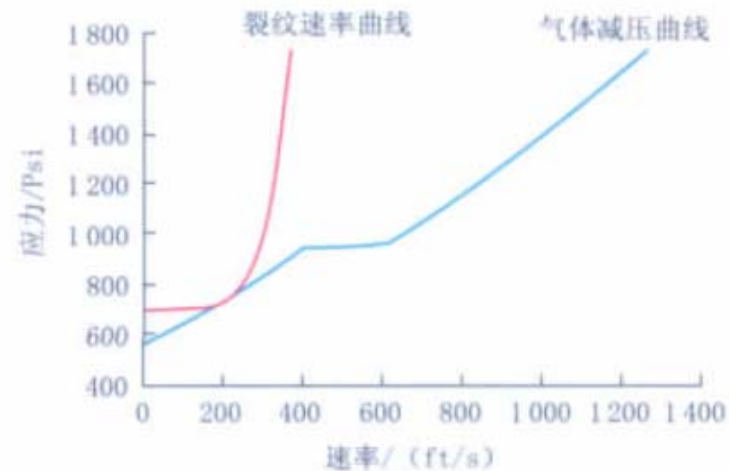
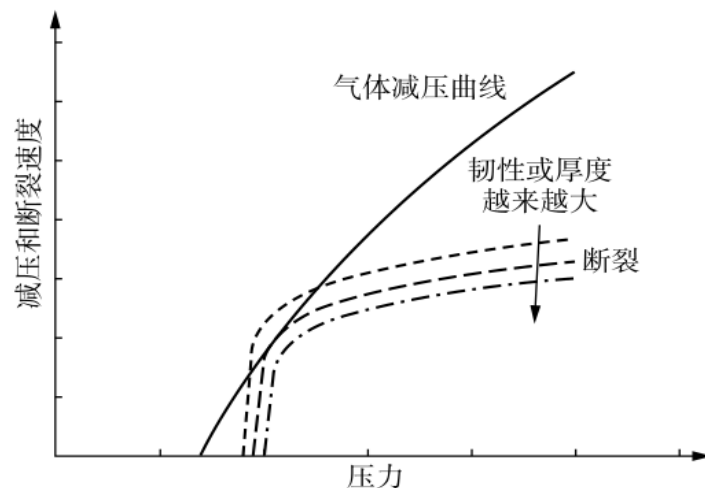
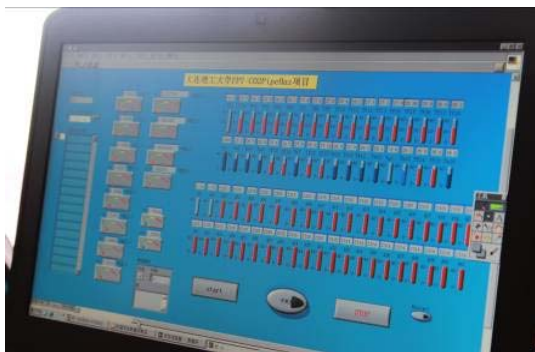
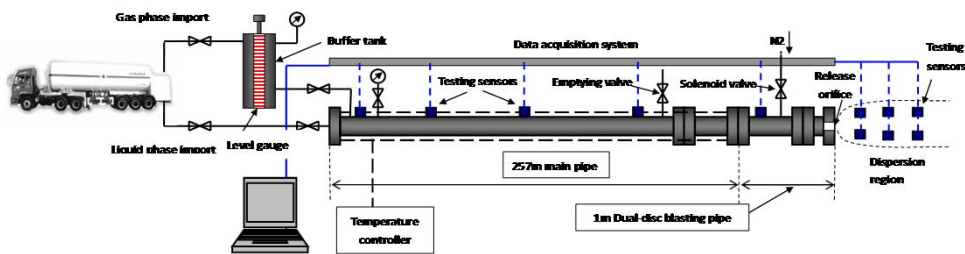


图1 Battelle 双曲线模型

二、CO₂管道输送技术研究进展

(9) 完成了CO₂管道泄放试验研究

国内开展了工业规模的现场试验：开展了CO₂管道泄漏模拟分析。



数据采集系统

爆破口

爆破装置



二、CO₂管道输送技术研究进展

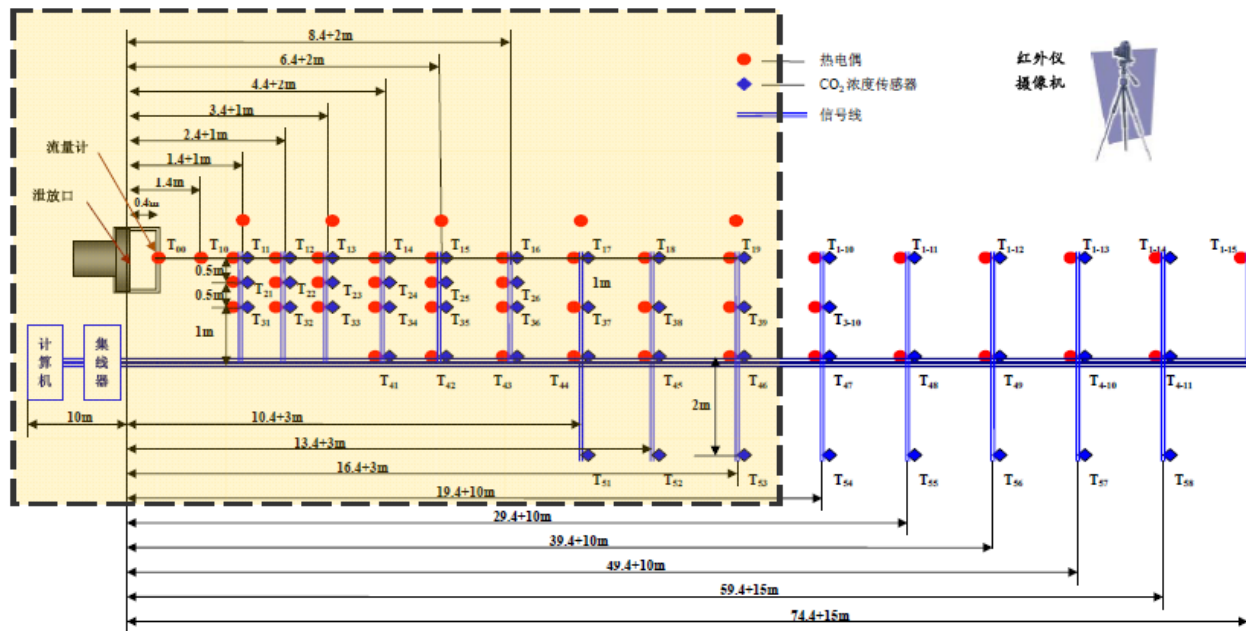
泄放试验

| 序号 | 相态 | 泄漏位置 | 泄放口径 | 实验次数 | 备注 |
|--------------------------------|--------------------------|------|--------------------|------|------------|
| 1 | 气相, 压力不高于4MPa, 温度10-50℃ | 水平 | 10mm/25mm | 2 | |
| 2 | | 向上 | 10mm | 1 | |
| 3 | 密相, 压力不低于8MPa, 温度20℃ | 水平 | 10mm/25mm | 2 | |
| 4 | | 向上 | 10mm | 1 | |
| 5 | 超临界, 压力不低于8MPa, 温度不低于40℃ | 水平 | 10mm/25mm/50mm/全口径 | 4 | |
| 6 | | 向上 | 10mm | 1 | |
| 7 | | 水平 | 杂质/10mm/25mm | 4 | 氮气含量1%, 4% |
| 以上三种相态工况中需各选择一个做重复性实验, 验证实验准确性 | | | | 3 | |
| 共计 | | | | 18 | |

二、CO₂管道输送技术研究进展

(9) 完成了CO₂管道泄放试验研究

泄放口装设扩散区域测试系统。





二、CO₂管道输送技术研究进展

(9) 完成了CO₂管道泄放试验研究



2016/3/30

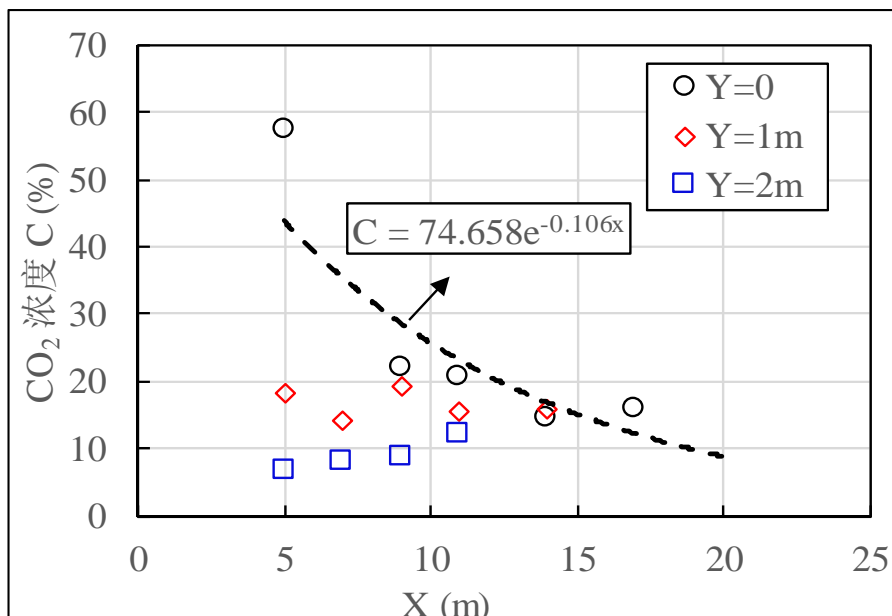
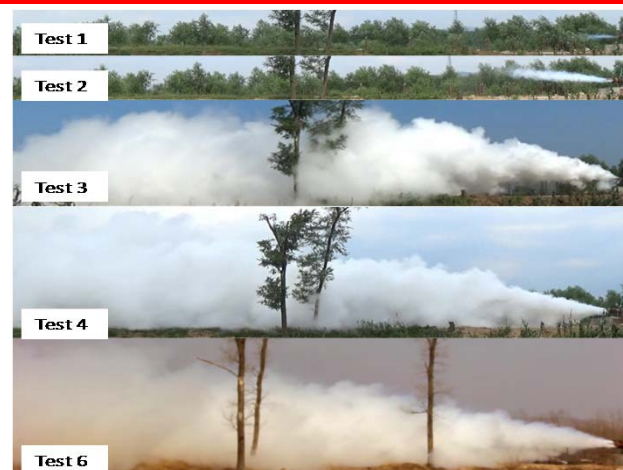
==•25•==

中石化石油工程设计有限公司

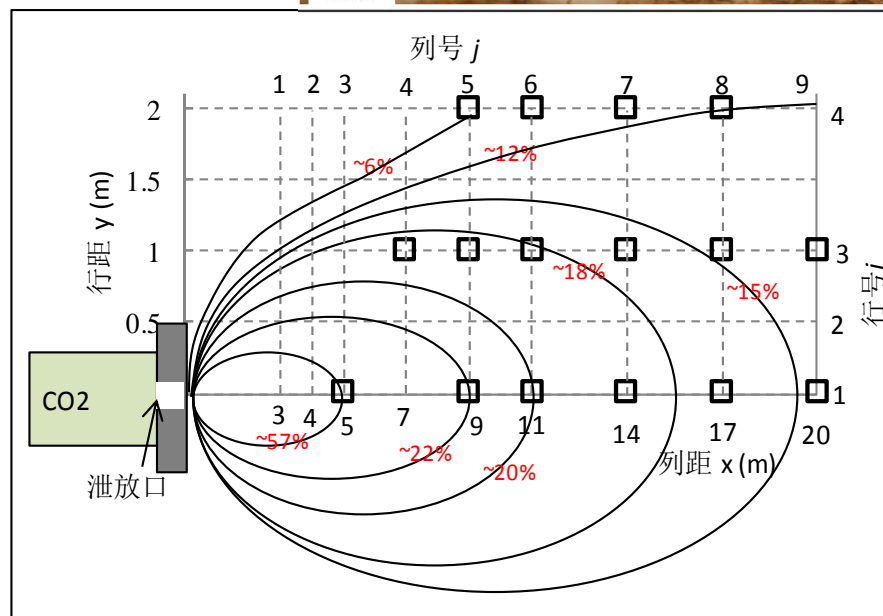
二、CO₂管道输送技术研究进展

(9) 完成了CO₂管道泄放试验研究

- ▶ 泄放口轴线方向CO₂浓度随距离呈指数关系衰减。
- ▶ 扩散区域内CO₂浓度分布呈现椭圆形。



50mm口径 密相泄漏浓度变化规律

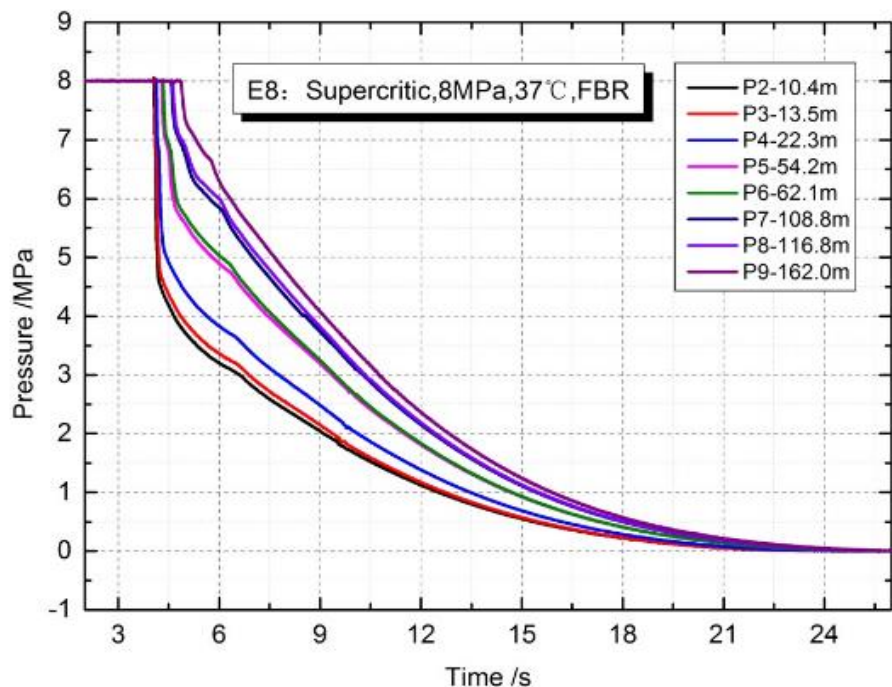


50mm口径 密相泄漏浓度分布特征

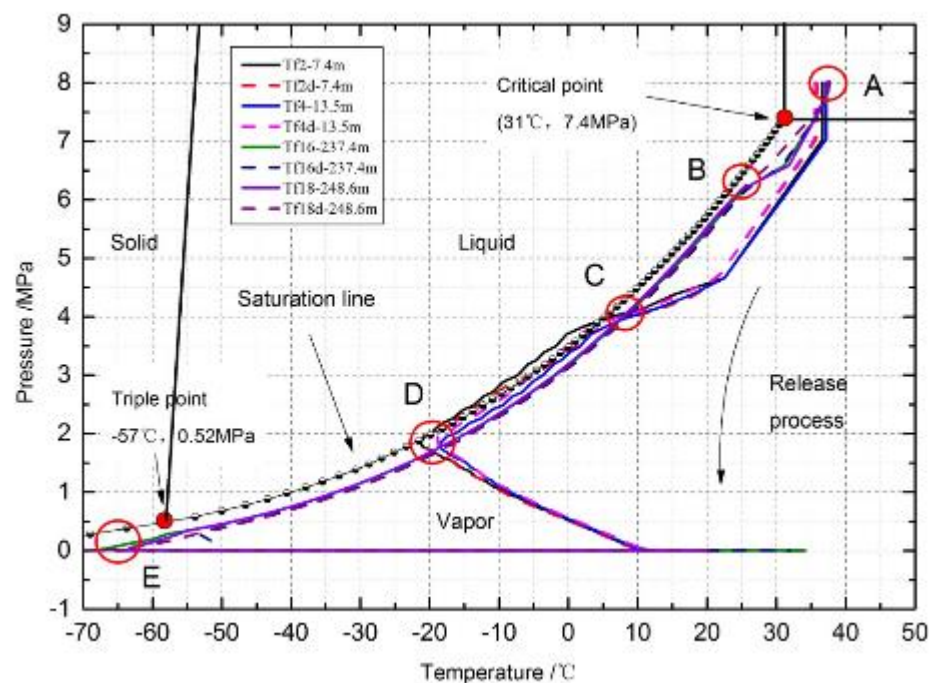
二、CO₂管道输送技术研究进展

(9) 完成了CO₂管道泄放试验研究

- ▶ 全口径泄漏：泄放开始，各测点压力随减压波传播依次降低，距离泄压口越近，压力泄放越快。随着泄放的进行，各测点的压力差逐渐变小，直到泄放结束才归零。
- ▶ 最大喷放长度达到100m以上；最大喷放宽度则达到30m以上。对管输的危害更大。



全口径泄漏不同测点管道内压力随时间变化

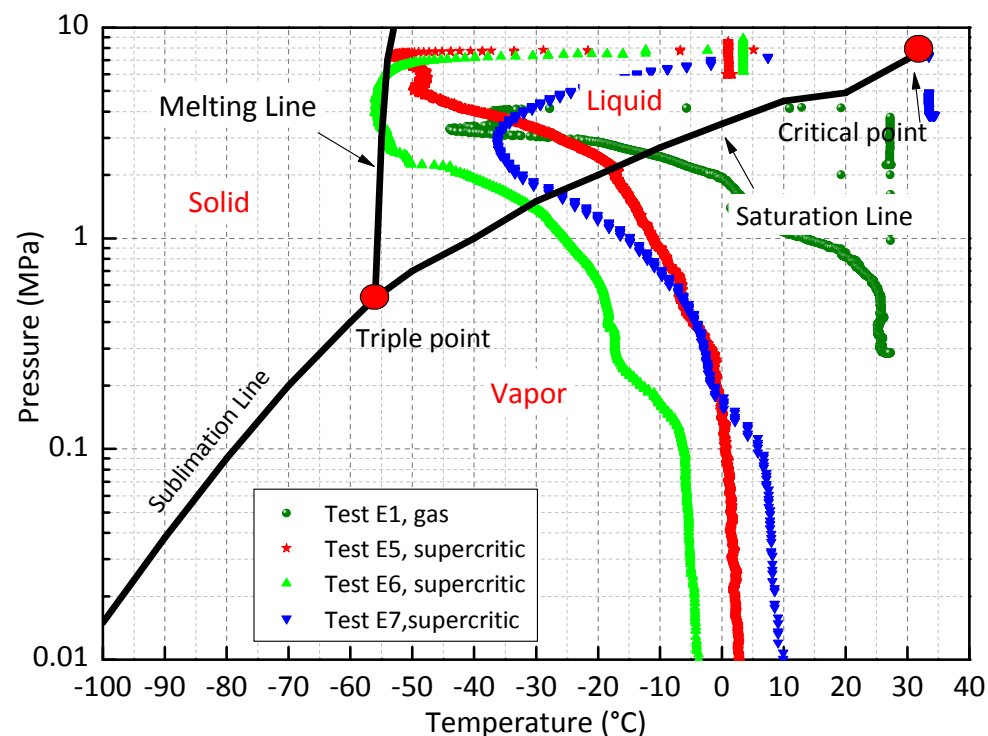
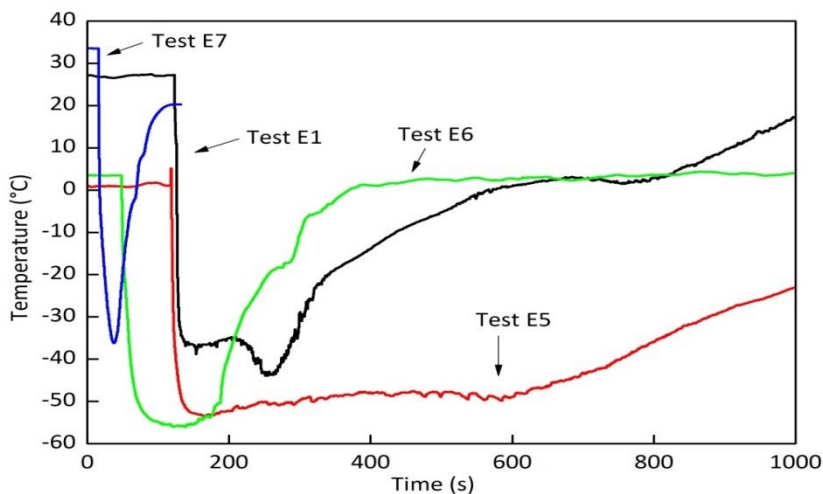


全口径泄漏管道内压力、温度变化曲线

二、CO₂管道输送技术研究进展

(9) 完成了CO₂管道泄放试验研究

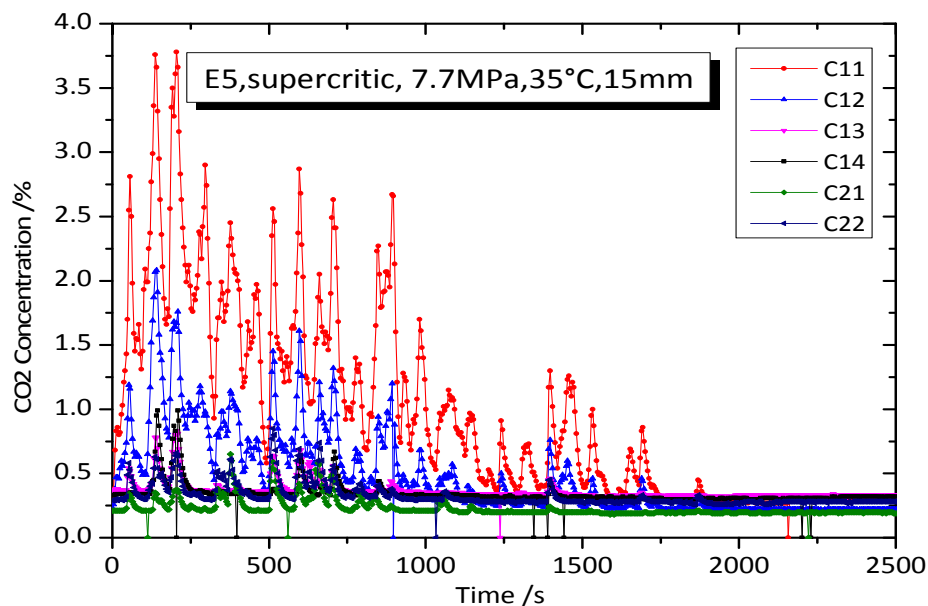
- 所有试验，泄放口温度能够降至-40~-60℃。
- E6（超临界，100mm泄放），有干冰生成，但在冲击力作用下无法阻塞泄放口。



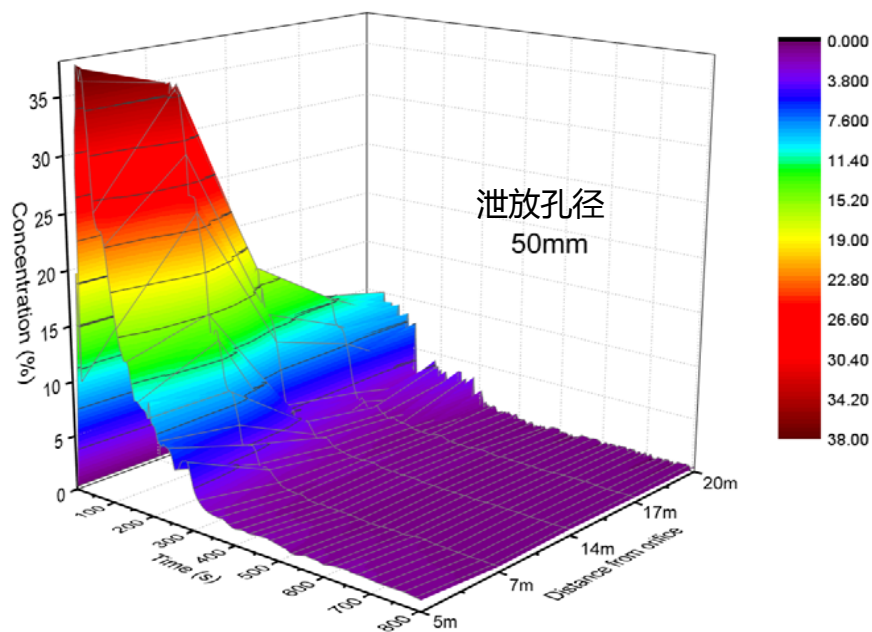
二、CO₂管道输送技术研究进展

(9) 完成了CO₂管道泄放试验研究

通过实际泄放试对CO₂泄放时扩散区域浓度分布进行验证。



超临界CO₂泄放时扩散区域浓度分布



泄放口外部区域CO₂浓度升高，5m处浓度达到38%，20m处浓度达到10%

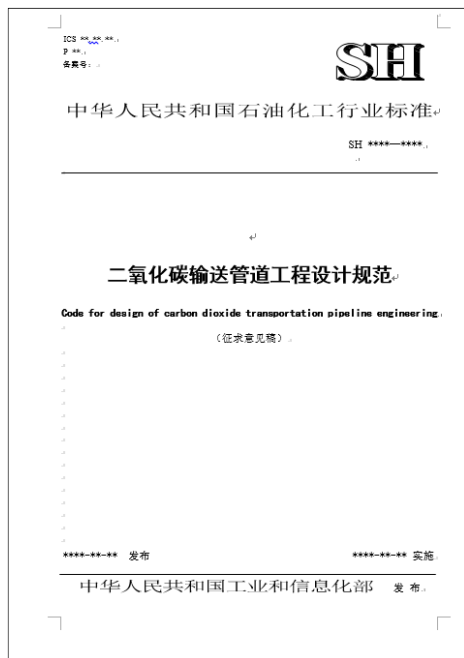
- 泄漏口径越小，浓度受环境因素影响越大，造成的浓度曲线波动越剧烈。
- 随着风速的增大，各种浓度限的影响范围和持续时间都迅速减小。无风危害最大。



二、CO₂管道输送技术研究进展

(10) CO₂管道输送规范及译著

在国家科技部的支持下，结合研究成果，我公司作为主编单位完成了石化行业标准《二氧化碳输送管道工程技术规范》征求意见稿初稿。中国石油大学（华东/北京）、大连理工大学、中科院岩土力学所、中国石化天然气分公司和中石化华东油气分公司等参与标准编制工作。此外，完成《含杂质二氧化碳的管道输送》译著并出版。



目 次

| | |
|-------------------------|-----|
| 前 言..... | III |
| 1 范围..... | 1 |
| 2 规范性引用文件..... | 1 |
| 3 术语和定义..... | 1 |
| 4 基本规定..... | 3 |
| 4.1 二氧化碳的输送相态和组分要求..... | 3 |
| 4.2 系统的压力控制和超压保护..... | 3 |
| 4.3 放空..... | 5 |
| 5 管道系统设计..... | 5 |
| 5.1 输送相态及输送工艺..... | 5 |
| 5.2 线路..... | 8 |
| 5.3 站场..... | 13 |
| 5.4 自动化控制与检测系统..... | 16 |
| 5.5 辅助系统..... | 17 |
| 6 管道材料和防腐..... | 20 |
| 6.1 管道选材..... | 20 |
| 6.2 管道强度和稳定计算..... | 20 |
| 6.3 管道组成件..... | 22 |
| 6.4 管道的抗延性断裂扩展..... | 23 |
| 6.5 防腐..... | 23 |
| 7 焊接与检验、清管与试压、干燥..... | 23 |
| 7.1 焊接与检验..... | 23 |
| 7.2 清管与试压..... | 24 |
| 7.3 干燥..... | 24 |
| 附录 A..... | 27 |
| 条文说明..... | 28 |



提 要

一 CO₂管道输送概况

二 CO₂管道输送技术研究进展

三 CO₂管道输送工程实践

四 CO₂管道输送面临的挑战和前景



三、CO₂管道输送工程实践

经过这几年的探索与研究，我公司在CO₂捕集、分离提纯、井场注入和管道输送技术的理论研究和工程设计建设方面取得了一定成果。

目前项目主要包括：正理庄油田高89区块CO₂管道工程、齐鲁石化CO₂输送及驱油封存示范工程、胜利电厂百万吨CCUS-EOR项目、华东油气田CO₂驱工业化应用输送管道工程等。



小试装置



模试装置



中试装置



工业装置



三、CO₂管道输送工程实践

(1) 正理庄油田高89块CO₂管道工程

该工程是配合中石化集团总公司提高采收率的重点**先导性试验项目**。该工程主要一条20km二氧化碳管线，一期设计规模4万吨/年，二期设计规模8.7万吨/年，**采用气相输送，设计压力6.3MPa，管径为DN150。**

目前二氧化碳管道输送技术的研究部分成果已成功应用于该工程，为管道的安全运行提供了技术支持。该工程投产后已安全稳定运行2年多。





三、CO₂管道输送工程实践

(2) 齐鲁石化CO₂输送及驱油封存示范工程

CO₂气源来自于齐鲁石化煤制气装置的低温甲醇洗单元，CO₂浓度为91%，设计输量50万吨/年，长度70km，采用气相输送，设计压力4.5MPa，管径DN400。CO₂用户为采油厂，采油厂在接收低纯度CO₂后，进行液化提纯，然后增压后分配至井口，用于EOR驱油。该项目已完成初步设计。



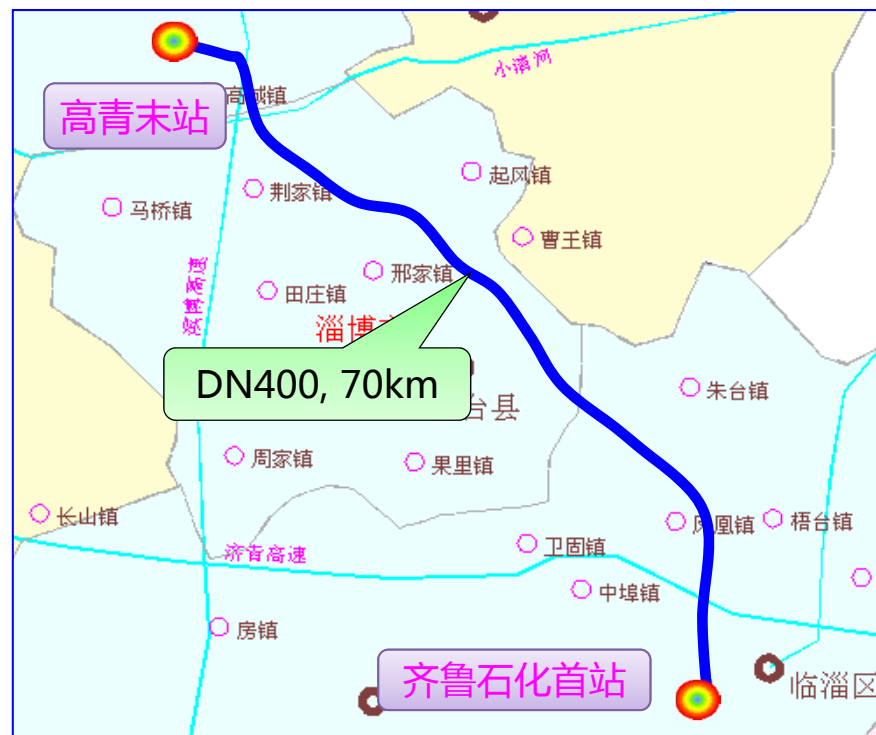
齐鲁煤制气高浓度CO₂

↓管输70km

低温精馏工艺提纯

50万吨/年 ↓

胜利CO₂驱油区块





三、CO₂管道输送工程实践

(3) 胜利电厂百万吨CCUS-EOR项目

CO₂气源来自于胜利电厂III期低浓度CO₂ (CO₂浓度为14%) , 经过捕集、脱水、增压后 (CO₂浓度为99.5%) 外输至高青区域, 管道全长80km。设计输量100万吨/年。采用超临界输送, 设计压力10MPa, 管径DN250。本工程CO₂用户为胜利油田采油厂, 采油厂在接收CO₂增压后分配至井口, 用于EOR驱油。该项目已完成可研设计。



胜利电厂III期, 低浓度
CO₂(CO₂ 14%)

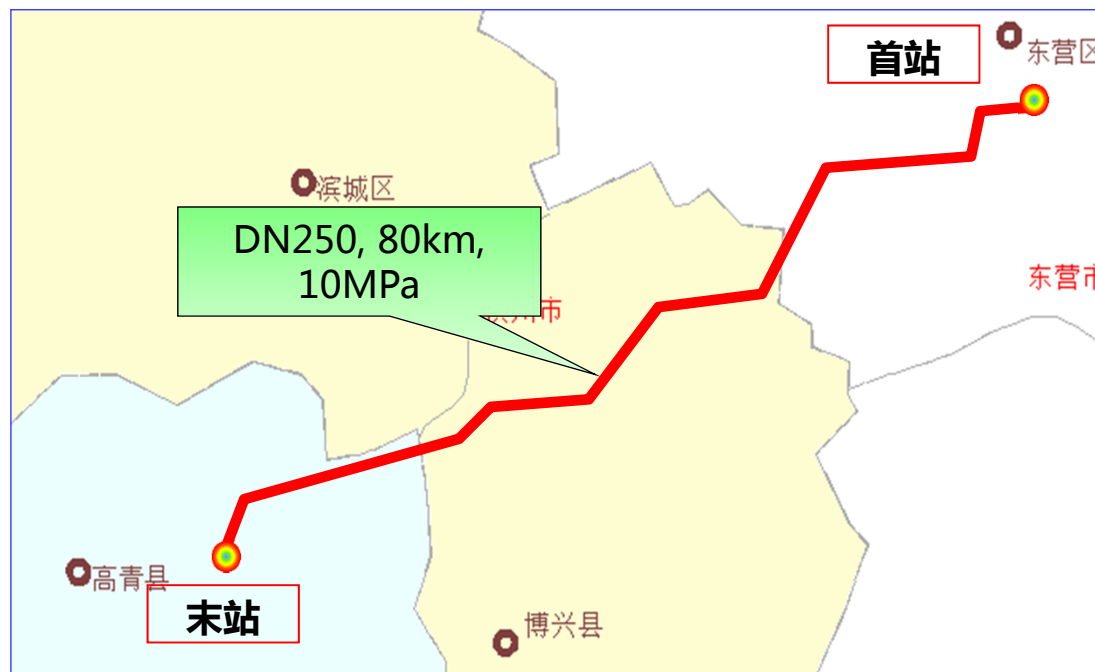


化学吸收工艺(CO₂ 99.5%)



100万吨/年 管输80km

胜利CO₂驱油区块





提 要

一 CO₂管道输送概况

二 CO₂管道输送技术研究进展

三 CO₂管道输送工程实践

四 CO₂管道输送面临的挑战和前景

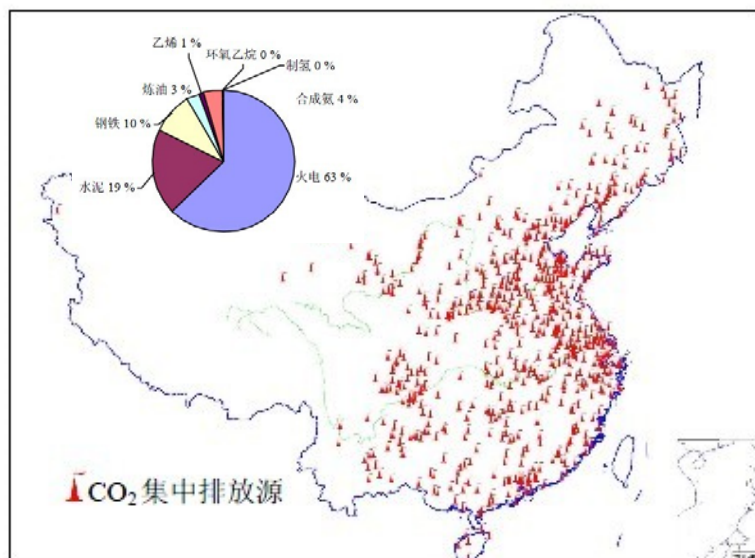
四、CO₂管道输送面临的挑战和前景

(1) CO₂管道输送挑战

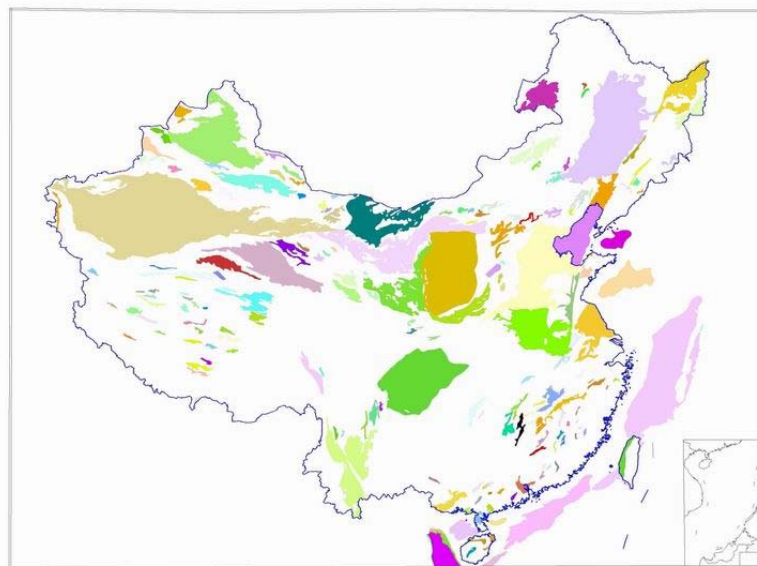
□ 源汇匹配问题

对于大规模CCUS来说，CO₂管道输送是最经济的。通过源汇匹配优化，建立合理的CO₂输送管网，可以大幅降低CO₂管道输送成本，从而使CCUS更具可行性。

在澳大利亚、欧洲等，大规模的CO₂输送管网正在被提议或开发。对于我国，这项工作刚刚起步，源（CO₂排放源）与汇（CO₂封存或利用地点）的匹配优化成为管网发展的重点。



中国8类CO₂集中排放源分布图*



中国主要沉积盆地分布图*



四、CO₂管道输送面临的挑战和前景

(2) CO₂管道输送前景

□ 国际CO₂管道输送管网

根据平均的源汇距离以及运输系统的优化水平，IEA估算了运输管道的部署潜力。2020年和2050年，全球CO₂输送管道建设总长度将分别为1万公里及20万公里，管道投资需求分别为150亿美元及8250亿美元。

| 类别 | 2020年CO ₂ 输送管线数量 | 2020年CO ₂ 输送管线总长 (KM) | 2010-2020年管道投资需求 (10亿美元) | 2050年CO ₂ 输送管线情况 | 2050年CO ₂ 输送管线总长 (KM) | 2010-2050年管道投资需求 (10亿美元) |
|----------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 经合组织 北美 | 25-30 | 2800-3500 | 5.5 | 250-450 | 38000-65000 | 160 |
| 经合组织 欧洲 | 10-15 | 1200-1600 | 1.8 | 125-220 | 20000-35000 | 70 |
| 经合组织 太平洋 | 5-7 | 700-850 | 0.8 | 110-200 | 17000-31000 | 70 |
| 中国和印度 | 17-20 | 2100-2700 | 3.0 | 360-660 | 55000-100000 | 275 |
| 非经合组织 | 20-25 | 3900-3700 | 3.8 | 460-840 | 70000-130000 | 250 |
| 全球 | 77-97 | 10700-12350 | 14.9 | 1305-2370 | 200000-361000 | 825 |

=38=

谢谢!

