

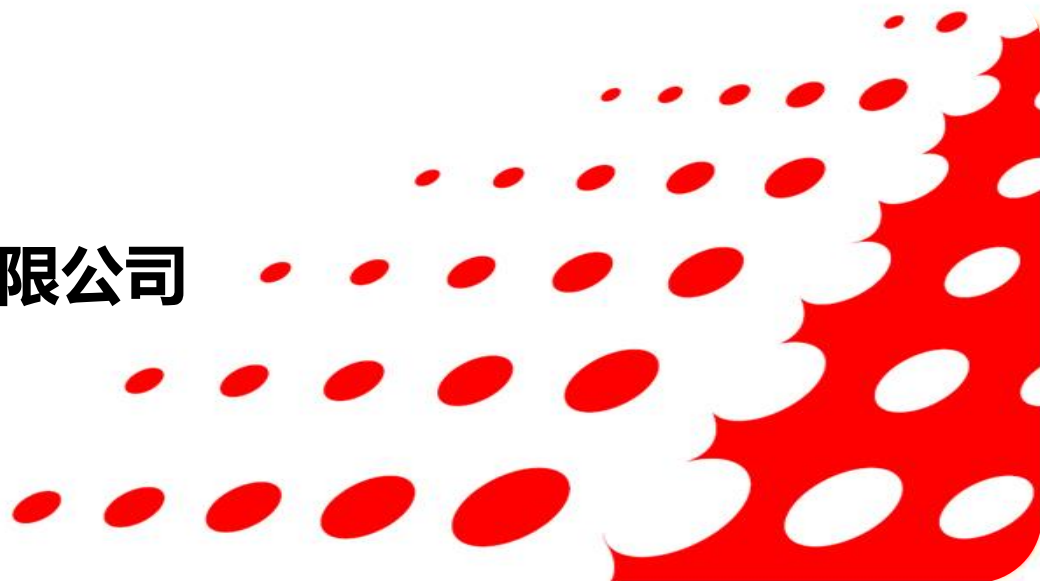


中石化CO₂捕集、输送及驱油封存 关键技术与工程实践

陆诗建 博士

中石化节能环保工程科技有限公司

2017年06月27日





汇报提纲

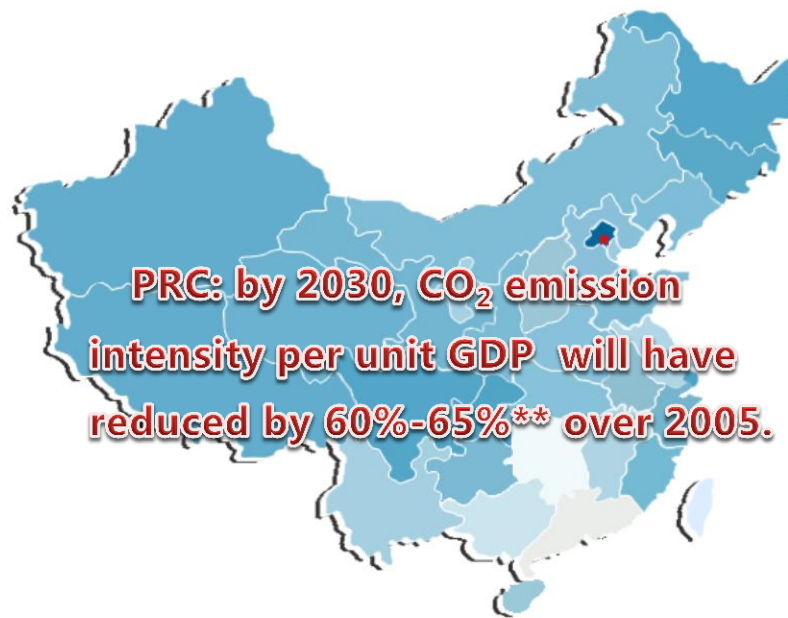
一、CCUS技术背景

二、CCUS技术成果

三、CCUS工程实践

一、CCUS技术背景

全球气候变化问题日益严峻，已经成为威胁人类可持续发展的主要因素之一，削减温室气体排放以减缓气候变化成为当今国际社会关注的热点。

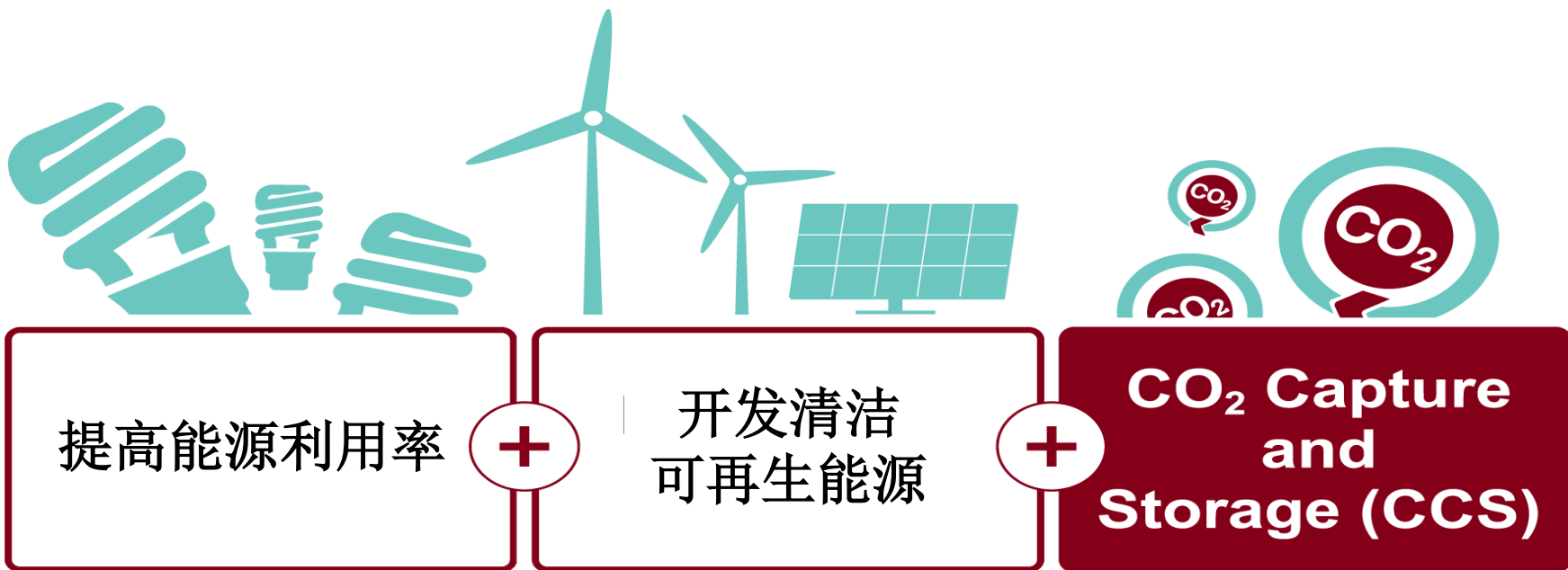


*2009年12月，《联合国气候变化框架公约》第15次缔约方会议，《哥本哈根协定》

**2015年11月，巴黎气候变化大会

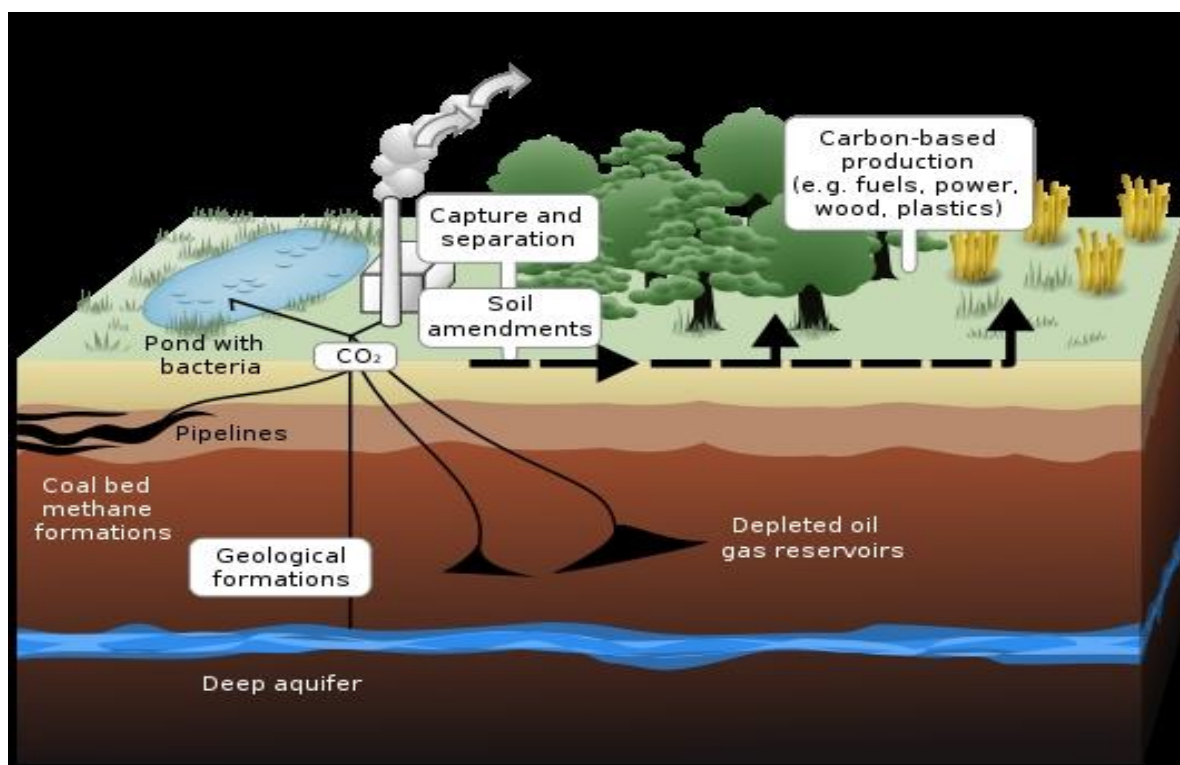
一、CCUS技术背景

二氧化碳减排的主要途径有三种：

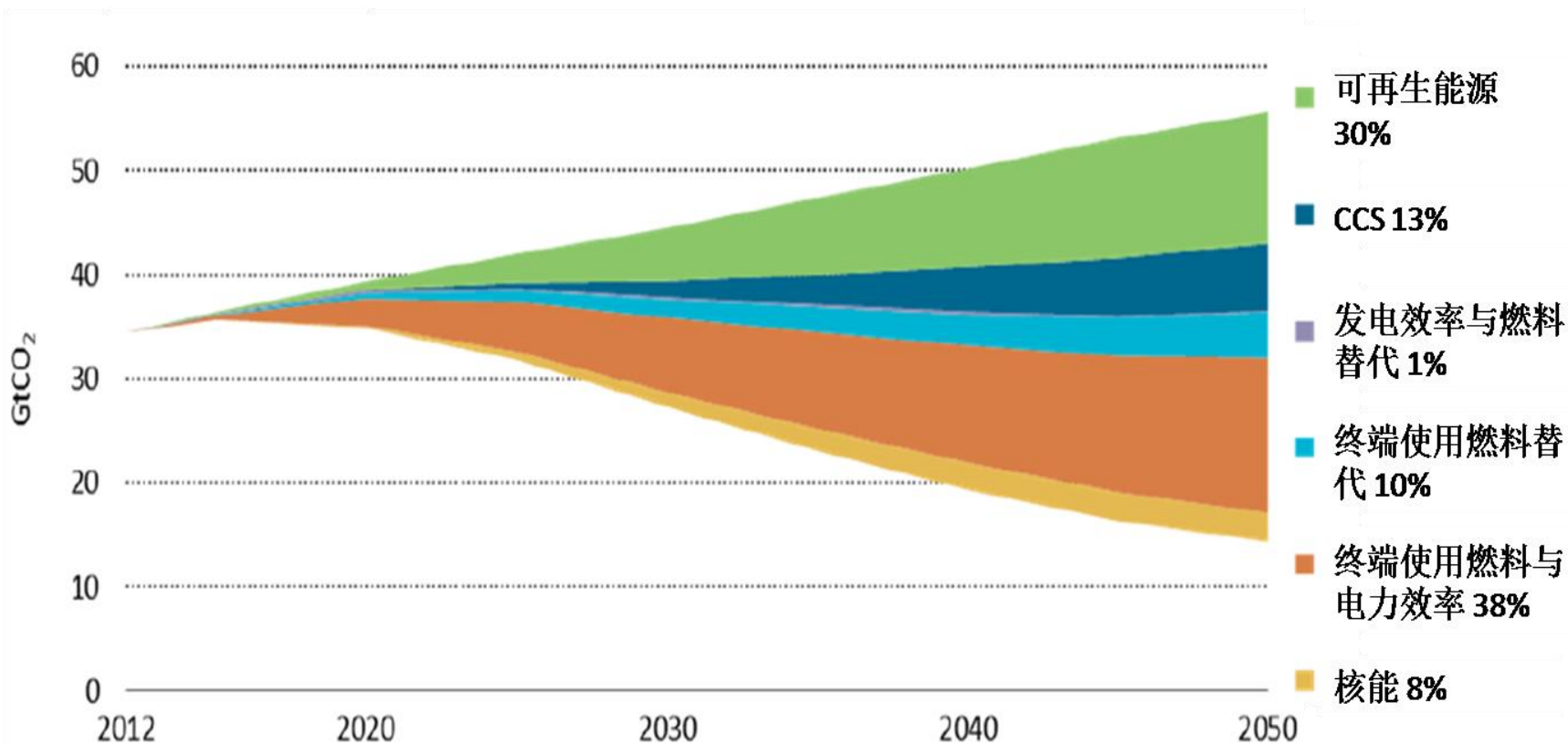


一、CCUS技术背景

CCS具有减少整体减排成本,以及增加实现温室气体减排灵活性的潜力*, 当前主要减排主要途径之一。



一、CCUS技术背景



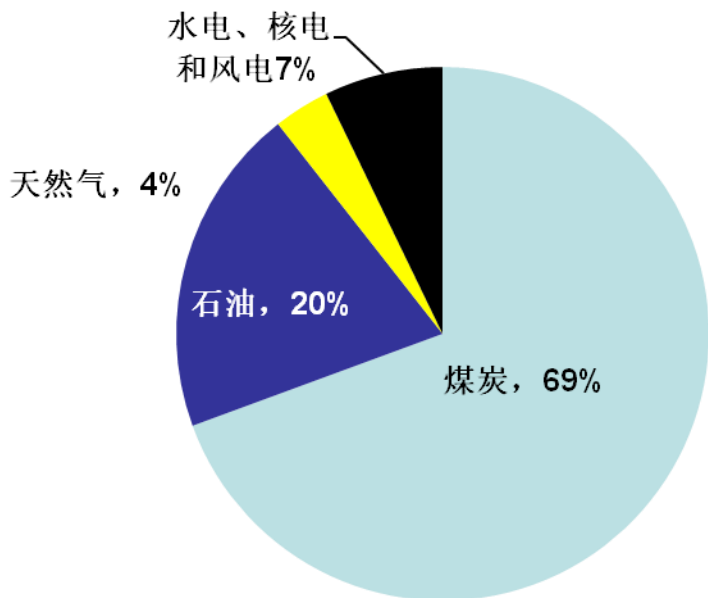
根据2015年国际能源署（IEA）的模拟分析，目标是在2050年将全球气温升高限制在2摄氏度内，以及实现温室气体减排50%，CCS技术将为此贡献13%的CO₂减排量。



一、CCUS技术背景

中国是发展中国家，结合本国国情提出CCUS，U可部分抵消CO₂的捕集成本甚至创造额外的经济效益。中国是能源消耗大国，能源消费结构以煤碳为主，CCUS技术对实现我国减排目标意义更为重大。

2007年中国能源消费结构*



各类能源的CO₂排放系数*, **

项目	CO ₂ 排放系数 (t/tce ^{***})
煤炭	2.745
石油	2.146
天然气	1.629
水电、核电	0.0

* 数据来源于《2007年统计公报》

** 国家发展和改革委员会能源研究所，2003

*** tce是1吨标准煤当量,是按标准煤的热值计算各种能源量的算指标。

一、CCUS技术背景

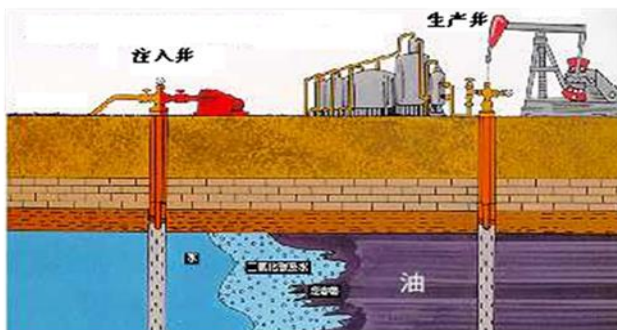
中石化自觉践行“每一滴油都是承诺”的企业社会责任理念，紧密结合自身企业特点，在国内外率先开展了以燃煤电厂烟气为CO₂捕集气源、CO₂驱油为主要资源化利用及封存方式的CCUS技术研发及应用示范，实现了原油开采的“绿色无碳”。

燃煤电厂CO₂捕集



+

驱油+封存



CO₂减排—绿色低碳

环境效益

生态效益

CCUS=CCS+EOR

CO₂驱油—提高采收率

经济效益

CCUS* : Carbon Capture Utilization and Storage

* 经概算，消耗1吨原油产生约3吨CO₂，在低渗透油田应用CCUS技术，每注入封存4吨左右CO₂，可以增产原油1吨，消耗这部分原油CO₂净产生量为负值。



汇报提纲

一、CCUS技术背景

二、CCUS技术成果

三、CCUS工程实践



二、CCUS技术成果

依托国家及集团公司重点科技攻关课题，自2007年以来，CCS研究组开展了多项相关研究，形成了CO₂捕集、输送与驱油封存核心技术，进行了工程实践。

年度	课题来源	课题名称
2008	国家“十一五”科技支撑	烟气CO ₂ 超重力法捕集纯化技术及应用示范
2011	国资委示范工程	特低渗透油藏CO ₂ 驱大幅度提高采收率示范工程
2012	国家“十二五”科技支撑	大规模燃煤电厂烟气CO ₂ 捕集、驱油及封存技术开发及应用示范
2013	中欧NZEC国际合作项目	胜利百万吨电厂烟气CO ₂ 捕集、驱油及封存全流程示范工程
2007	集团公司课题（重大先导）	低渗透油藏注CO ₂ 提高采收率先导试验
2010	集团公司课题	高含水期CO ₂ 驱注采输系统腐蚀结垢控制技术研究
2011	集团公司课题（十条龙）	燃煤电厂烟气CO ₂ 捕集纯化及应用技研究
2012	集团公司课题	二氧化碳管道输送技术
2013	集团公司课题	CCUS全流程工程技术与工艺包开发
2015	集团公司课题	大规模CO ₂ 捕集传质传热研究及反应器开发



二、CCUS技术成果



CO₂捕集技术



CO₂管道输送技术



CO₂油藏工程技术



CO₂注采工程技术



CO₂驱地面集输腐蚀控制技术



CO₂驱采出气循环回收技术



CO₂驱油封存环境监测技术



CCUS全流程经济评价技术

(一) CO₂ 捕集技术

1、发明了回收低分压CO₂的新型吸收剂

针对电厂烟道气低CO₂分压、低浓度、组分复杂等特点，通过小试-模试-中试的研究途径，开发了新型高效、低能耗燃煤电厂烟气CO₂吸收溶剂。申报发明专利5项。

室内小试：从10种配方溶剂中筛选高效捕集溶剂

室内模试：评价溶剂吸收及解吸性能

工业中试：评价溶剂在工业条件下的吸收解吸性能，并优化配套工艺参数



小试装置



模试装置 (12Nm³/h)

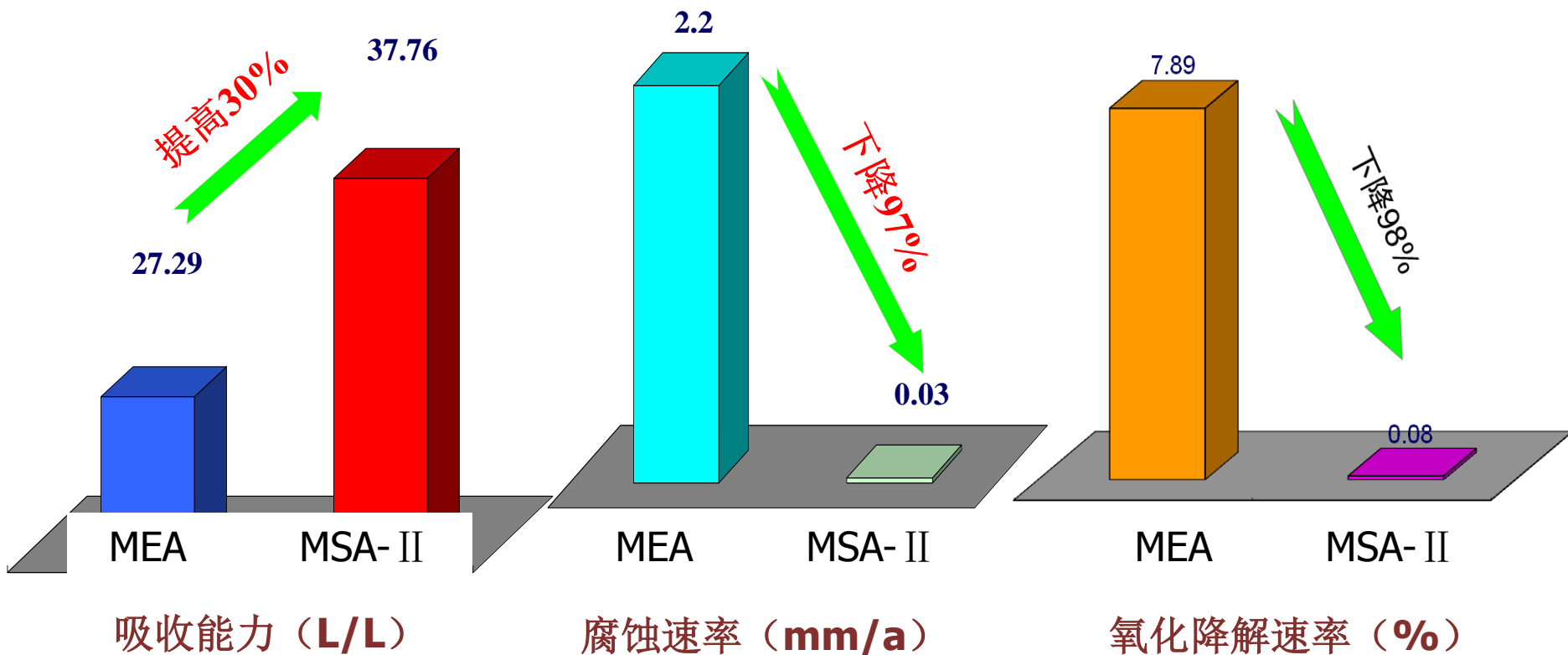


中试装置
(20000Nm³/h)

(一) CO₂ 捕集技术

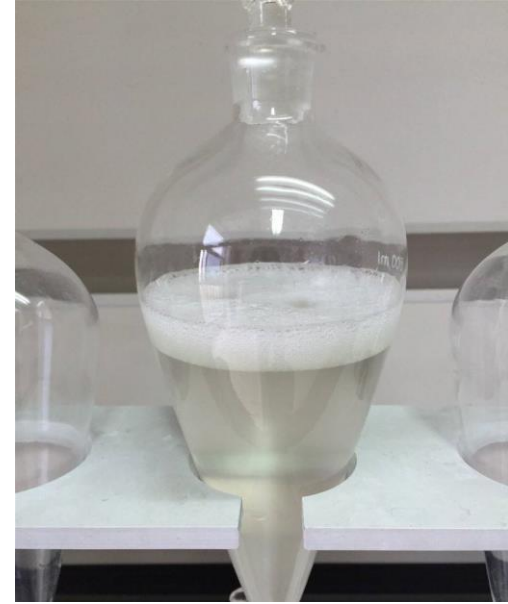
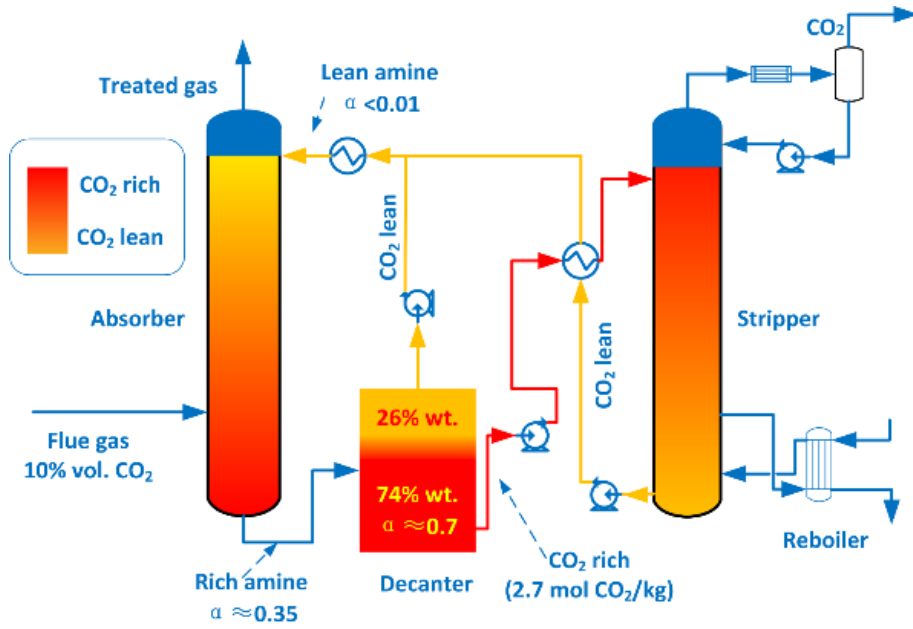
1、发明了回收低分压CO₂的新型吸收剂-复合胺吸收剂

开发的二代高效MSA-II溶剂较MEA吸收能力大幅提高，腐蚀速率和降解速率大幅下降。



(一) CO₂ 捕集技术

1、发明了回收低分压CO₂的新型吸收剂-相变吸收剂

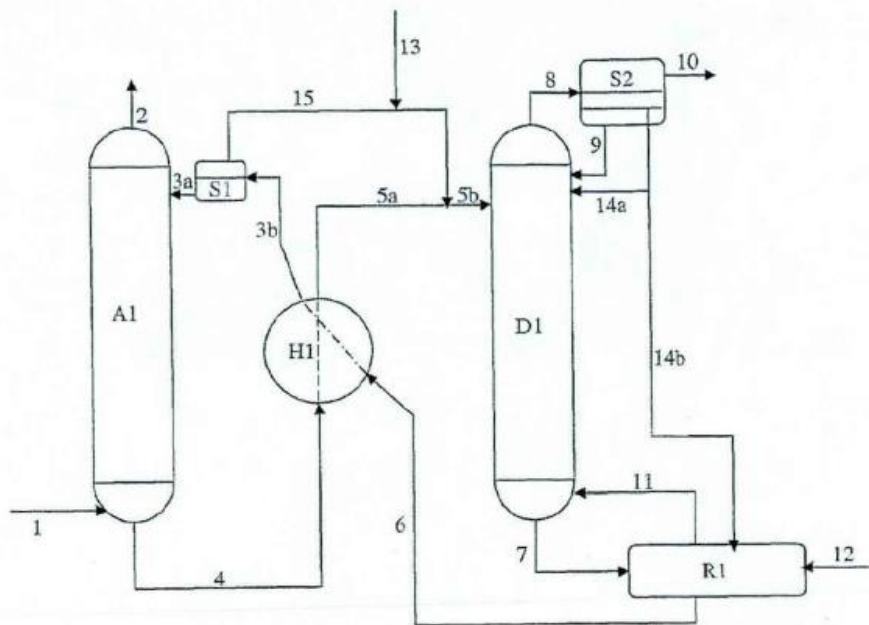


新型两相吸收剂，通过吸收剂分相实现部分浓相吸收剂再生，大幅度降低再生能耗。再生能耗可降至**2.5GJ/tCO₂**以下。

(一) CO₂ 捕集技术

1、发明了回收低分压CO₂的新型吸收剂-无水吸收剂与有机酸复合体系

探索了无水吸收体系和加酸复合体系。无水吸收体系采用醇、醚酯类等替代传统的水基溶液，沸点高，有效降低了再生过程水的潜热；加酸再生促进体系是在再生塔前向富液中加入一种有机酸(氨基酸及它们的混合物)，促使酸性气体的平衡向气相侧移动，从而使解吸塔中气体的分压增大，以此来促进再生。



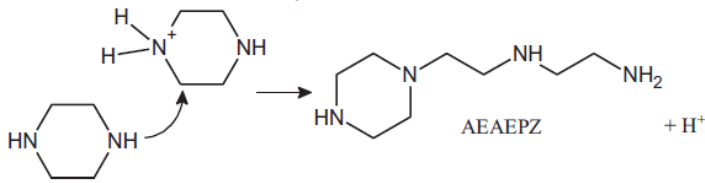
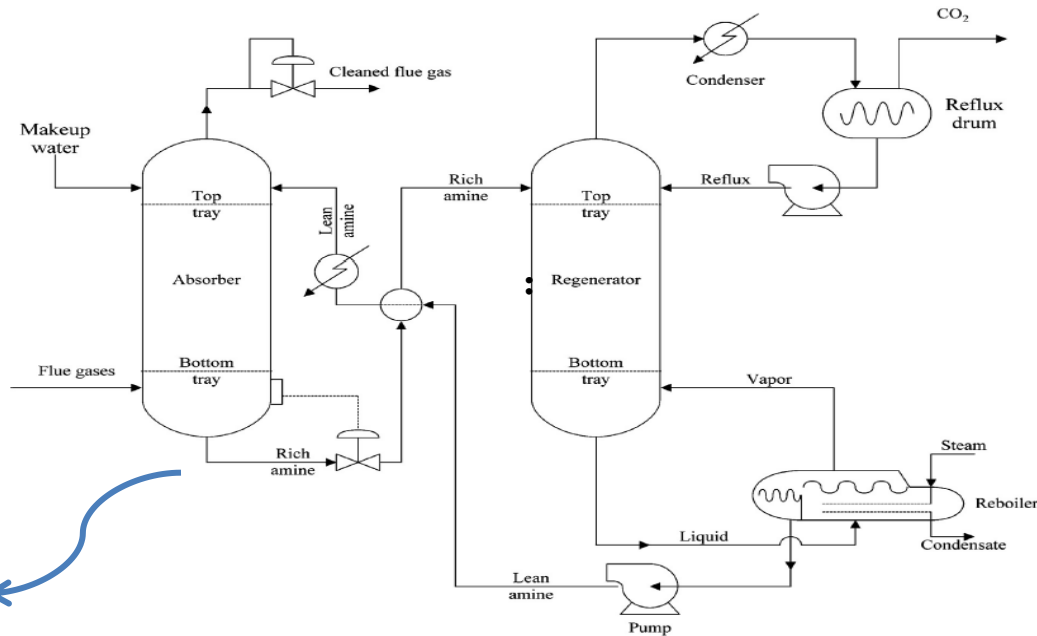
加酸再生促进系统流程图

- 主组分有机胺，伯胺 (R-NH₂)、仲胺 (R-NH-R)
- 溶剂醇 (R-(OH)_n)、醚 (R-O-R)、酯 (R-COO-R)、叔胺 (R₃-N) 类
 - 解吸率高，可达90%以上
 - 能耗低 (沸点高)
 - 缺点：粘度大，传质性能弱，吸收容量小

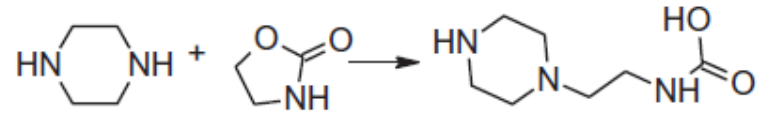
(一) CO₂ 捕集技术

1、发明了回收低分压CO₂的新型吸收剂-无水吸收剂与有机酸复合体系

降解不可逆，是烟气CO₂捕集过程中的重要问题。对热降解、氧化降解和金属催化降解进行了分析研究，开发了高性能的降解抑制剂。



PZ开环反应生成AEAEPZ的过程



PZ与MEA降解产物的热降解反应



(一) CO₂ 捕集技术

2、研发了回收EOR采出气/伴生气的CO₂吸收剂

开发适用于CO₂-EOR采出气及油田伴生气CO₂回收的吸收剂，包括活化MDEA和改良本菲尔两类吸收体系。

活化
M
D
E
A
吸
收
剂

吸收剂	吸收/反应热测试实验				再生实验	
	温度 (°C)	压力 (MPa)	浓度 (wt%)	转速 (r/min)	温度 (°C)	转速 (r/min)
MDEA+AEP	50	1.2	0.34:0.01	200	104	600
	50	1.2	0.32:0.03	200	104	600
	50	1.2	0.3:0.05	200	104	600
MDEA+DEA	50	1.2	0.34:0.01	200	104	600
	50	1.2	0.32:0.03	200	104	600
	50	1.2	0.3:0.05	200	104	600
MDEA+PZ	50	1.2	0.34:0.01	200	104	600
	50	1.2	0.32:0.03	200	104	600
	50	1.2	0.3:0.05	200	104	600
MDEA+AMP	50	1.2	0.34:0.01	200	104	600
	50	1.2	0.32:0.03	200	104	600
	50	1.2	0.3:0.05	200	104	600
MDEA+TETA	50	1.2	0.34:0.01	200	104	600
	50	1.2	0.32:0.03	200	104	600
	50	1.2	0.3:0.05	200	104	600
.....						

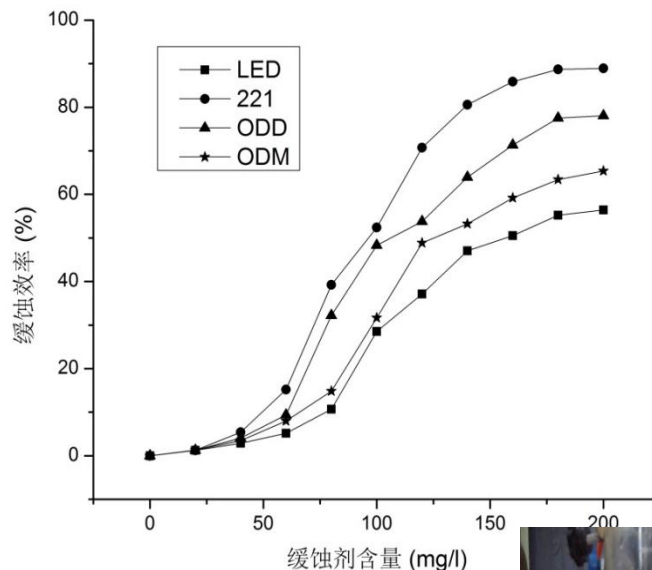
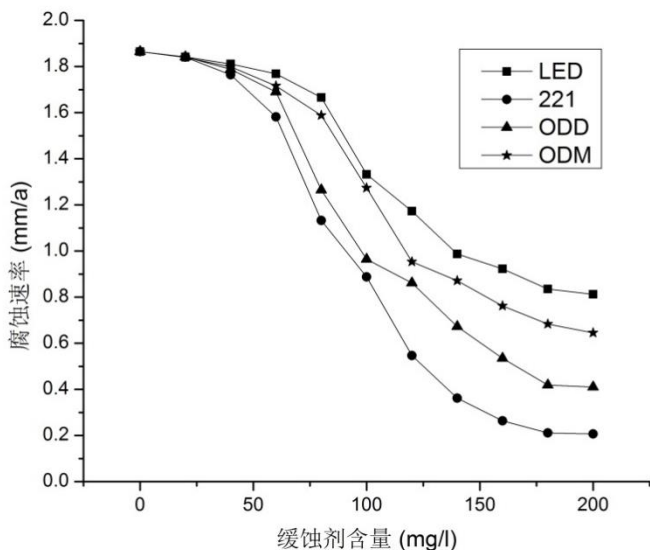
改良本菲尔
吸
收
剂

吸收剂	吸收/反应热测试实验				再生实验	
	温度 (°C)	压力 (MPa)	浓度 (wt%)	转速 (r/min)	温度 (°C)	转速 (r/min)
K ₂ CO ₃ +DEA+PZ	50	1.2	32:3:0	200	104	600
	50	1.2	32:2:1	200	104	600
	50	1.2	32:1:2	200	104	600
K ₂ CO ₃ +DEA+AMP	50	1.2	32:3:0	200	104	600
	50	1.2	32:2:1	200	104	600
	50	1.2	32:1:2	200	104	600
K ₂ CO ₃ +DEA+DEEA	50	1.2	32:3:0	200	104	600
	50	1.2	32:2:1	200	104	600
	50	1.2	32:1:2	200	104	600
K ₂ CO ₃ +DEA+AEP	50	1.2	32:3:0	200	104	600
	50	1.2	32:2:1	200	104	600
	50	1.2	32:1:2	200	104	600
.....						

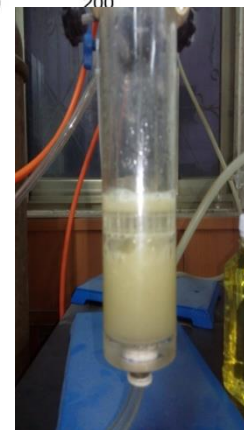
(一) CO₂ 捕集技术

2、研发了回收EOR采出气/伴生气的CO₂吸收剂

针对活化MDEA和改良本菲儿两大吸收体系，开发了缓蚀剂和消泡剂，缓释效率达到80%以上，消泡时间降低85%以上。

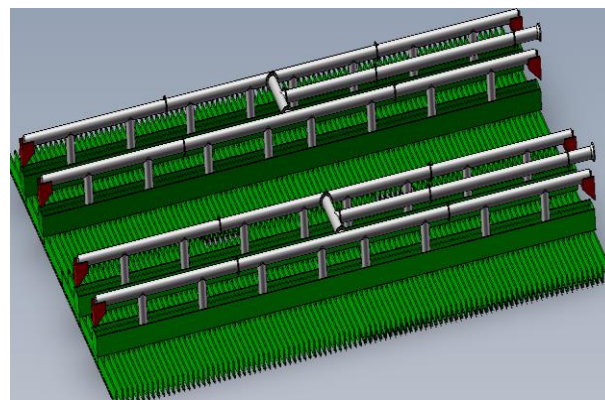
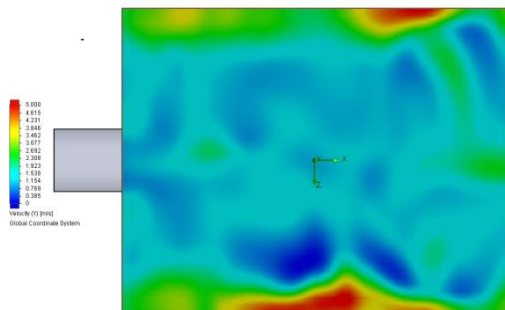
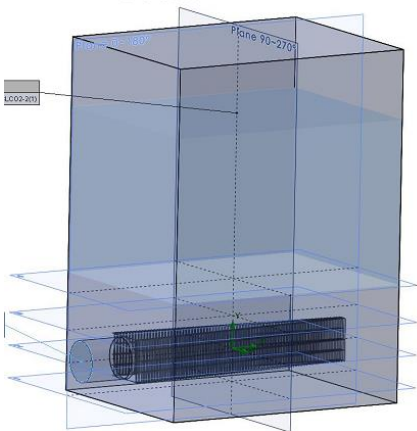
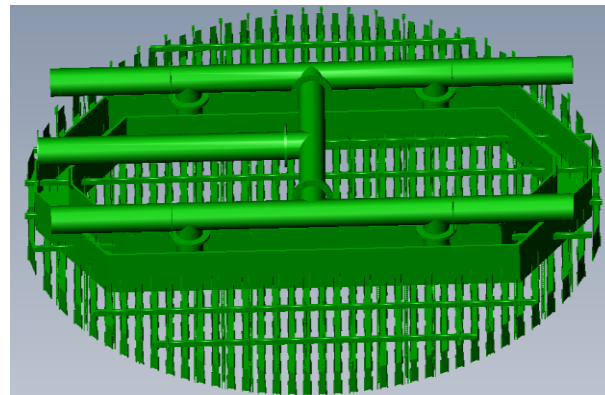
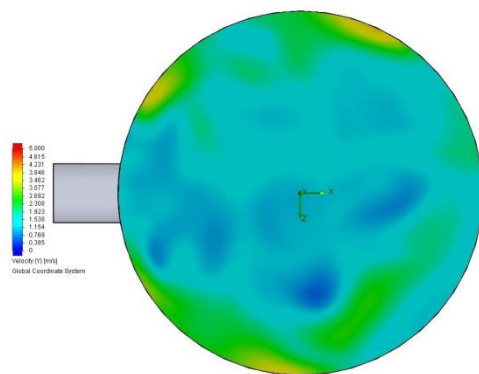
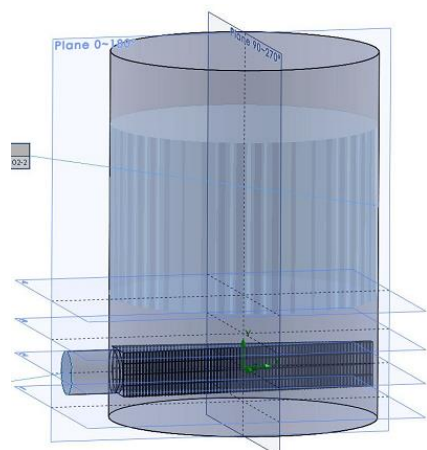


溶液组份	成份	泡沫高度 (mm)	消泡时间 (s)
活化MDEA	新配制	101	8.3
	富液	154	14.5
本菲儿	新配制	142	13.1
	富液	193	18.2



(一) CO₂ 捕集技术

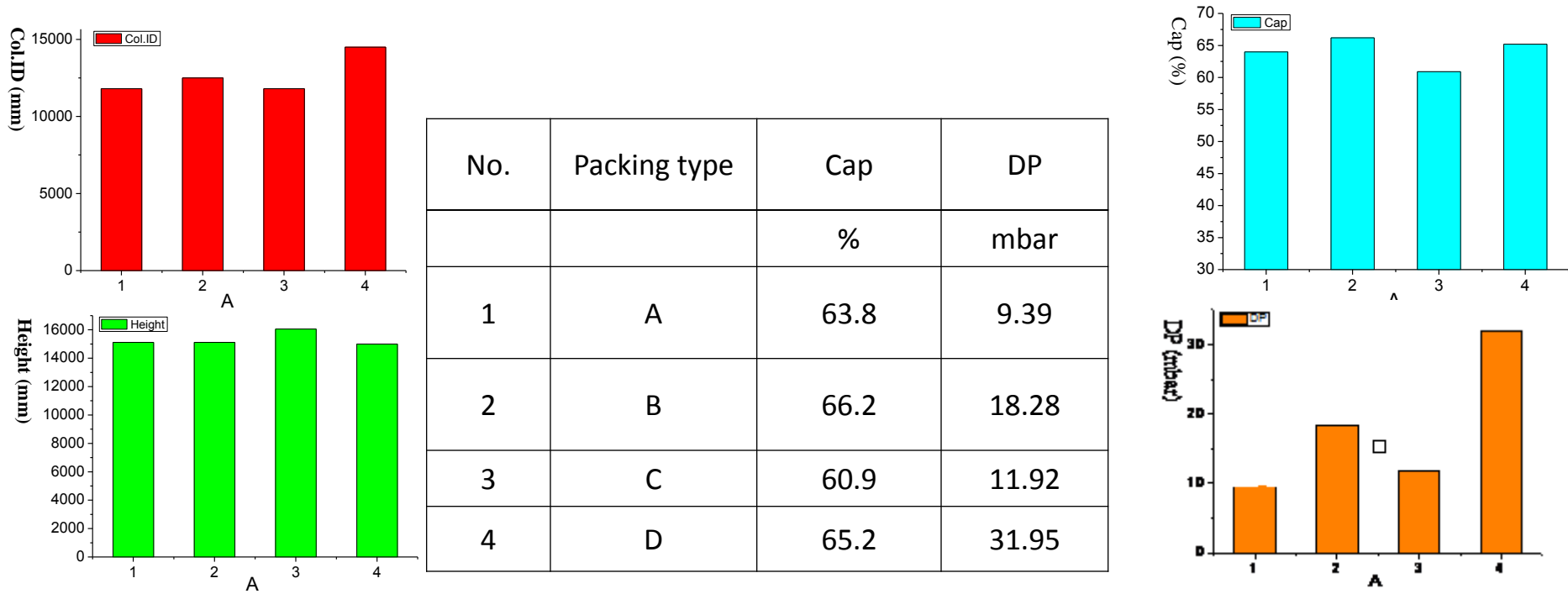
3、开发了高效反应器及内构件



包括：塔型、气体分布器、液体分布器、填料支撑桁架设计，申报发明专利6项。

(一) CO₂ 捕集技术

3、开发了高效反应器及内构件



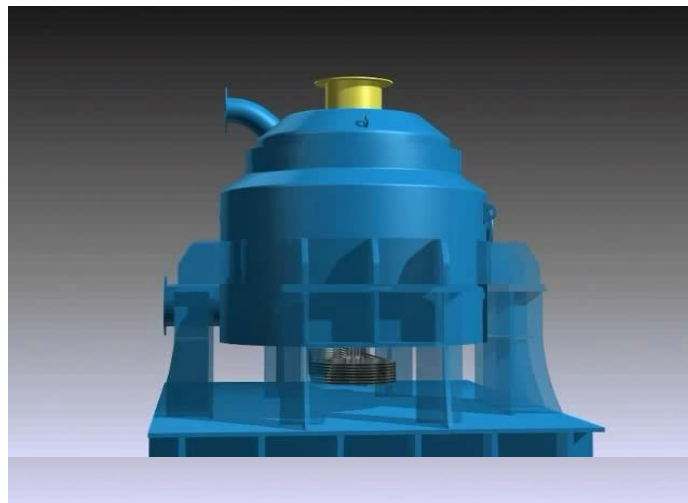
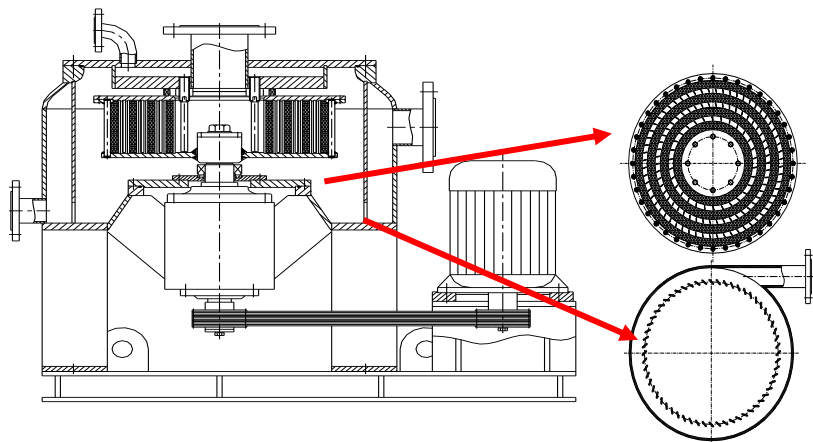
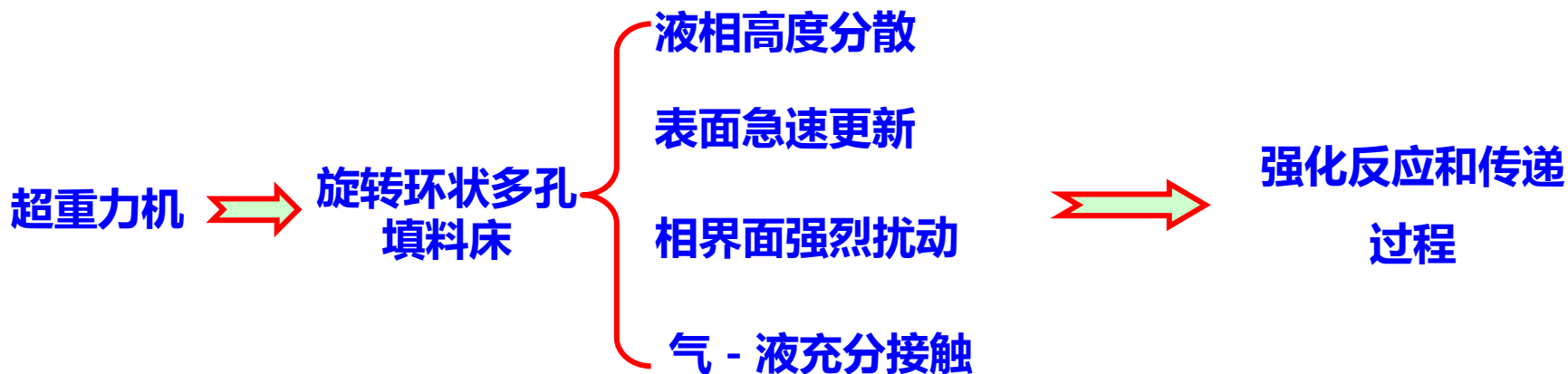
四种填料塔径、填料高度值、泛点率、压降的性能比较图

以百万吨CO₂捕集工程为设计规模，对4种填料进行对比分析，综合对比塔径、所需的填料高度、泛点率以及压降的对比，其中A、C两种填料塔径小、泛点率低、压降小，低适合脱除CO₂工程应用。

(一) CO₂ 捕集技术

3、开发了高效反应器及内构件

将超重力技术用于CO₂捕集



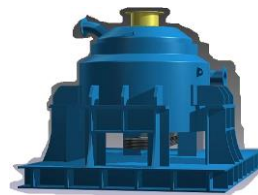
(一) CO₂ 捕集技术

3、开发了高效反应器及内构件

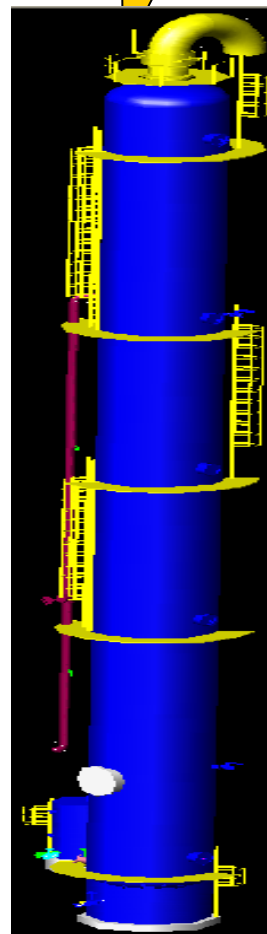
同等处理量塔器与超重力设备对比

项目	塔	超重力设备
占地	1	0.4
体积	1	0.2
重量	1	0.2
高度	1	0.05
投资	1	0.5

D=3m
H=4.3m



H=38m
D=3.0 m



(一) CO₂ 捕集技术

全景照片



解吸装置照片



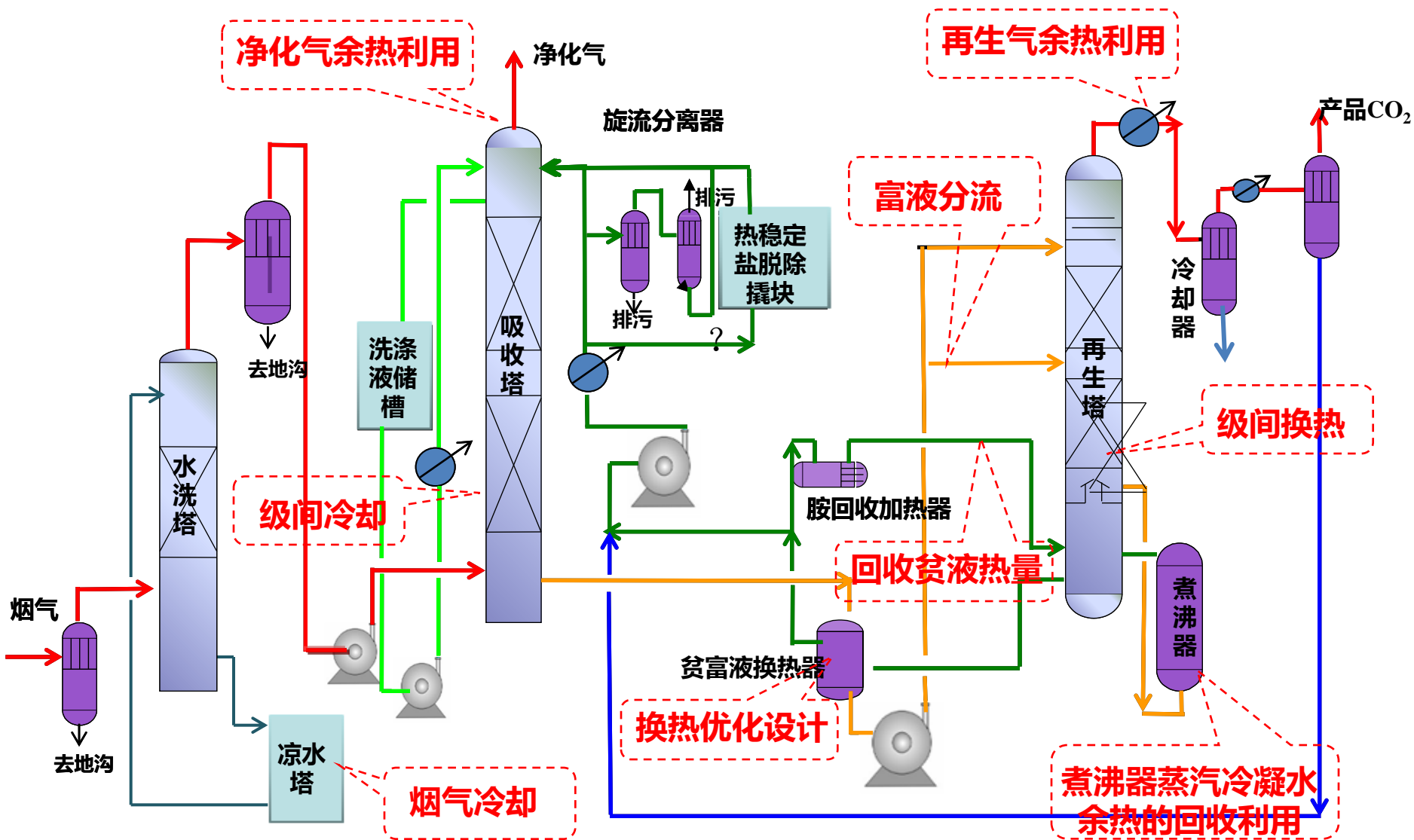
吸收装置照片



MSA-II化学吸收工艺；捕集率大于80%；CO₂纯度 $\geq 99.5\%$ 。

(一) CO₂ 捕集技术

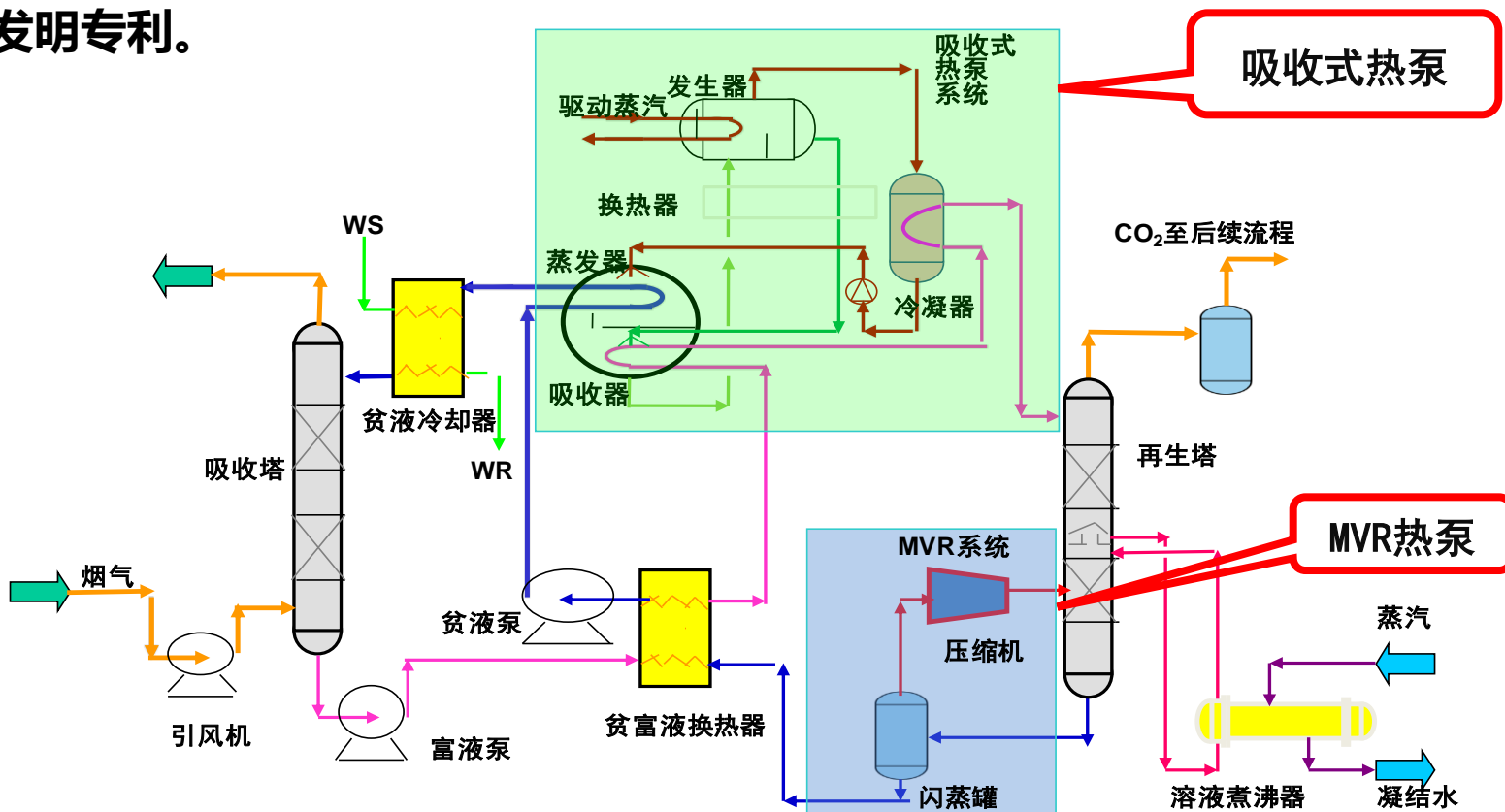
4、发明了高效低能耗CO₂捕集工艺—能流分析



(一) CO₂ 捕集技术

4、发明了高效低能耗CO₂捕集工艺

在能流分析基础上，发明了以“吸收式热泵+MVR”为核心的双热泵高效CO₂捕集工艺，实现了解吸溶液热能梯级利用，有效降低系统再生能耗和循环水用量。获得国家发明专利。

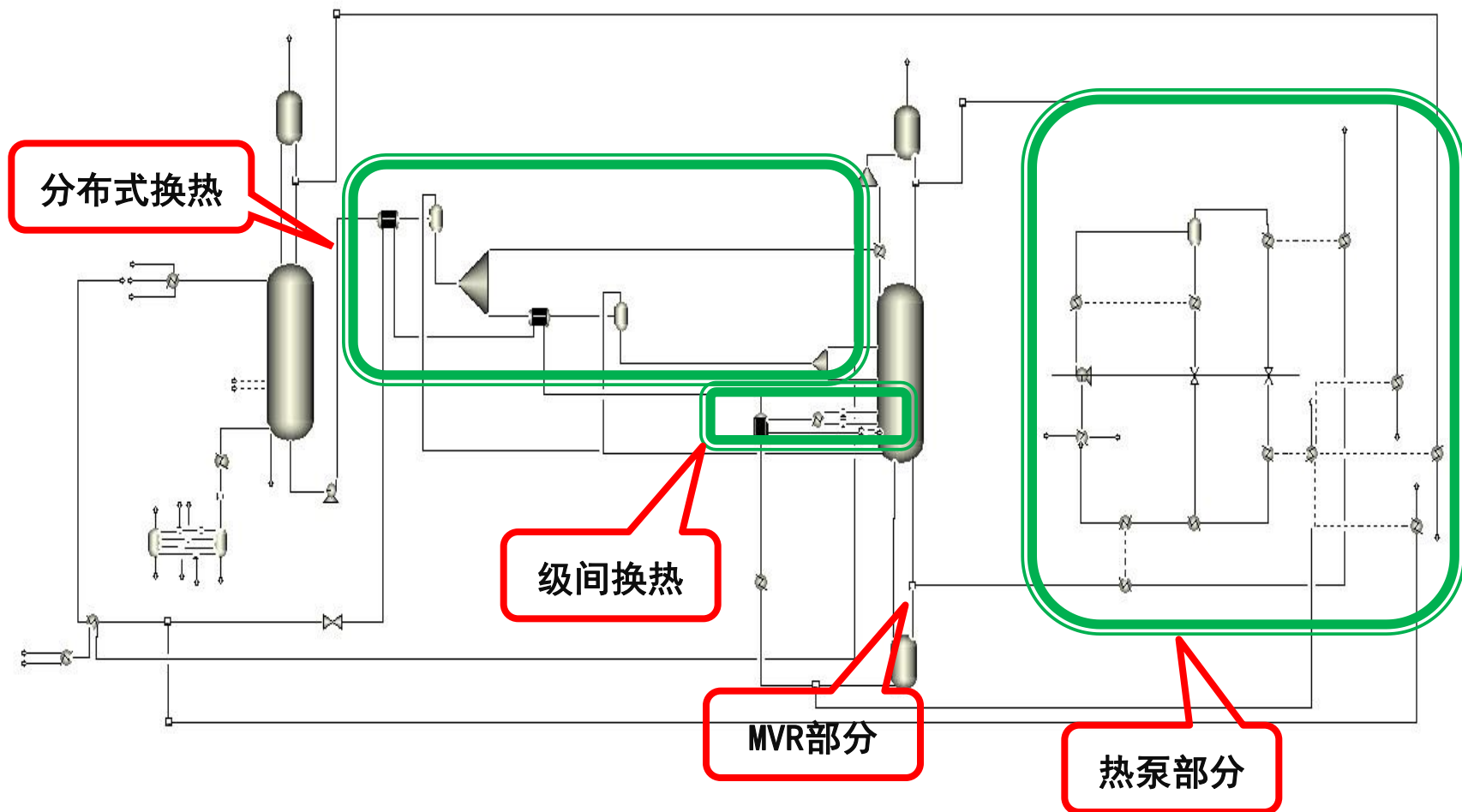


双热泵耦合CO₂捕集工艺

(一) CO₂ 捕集技术

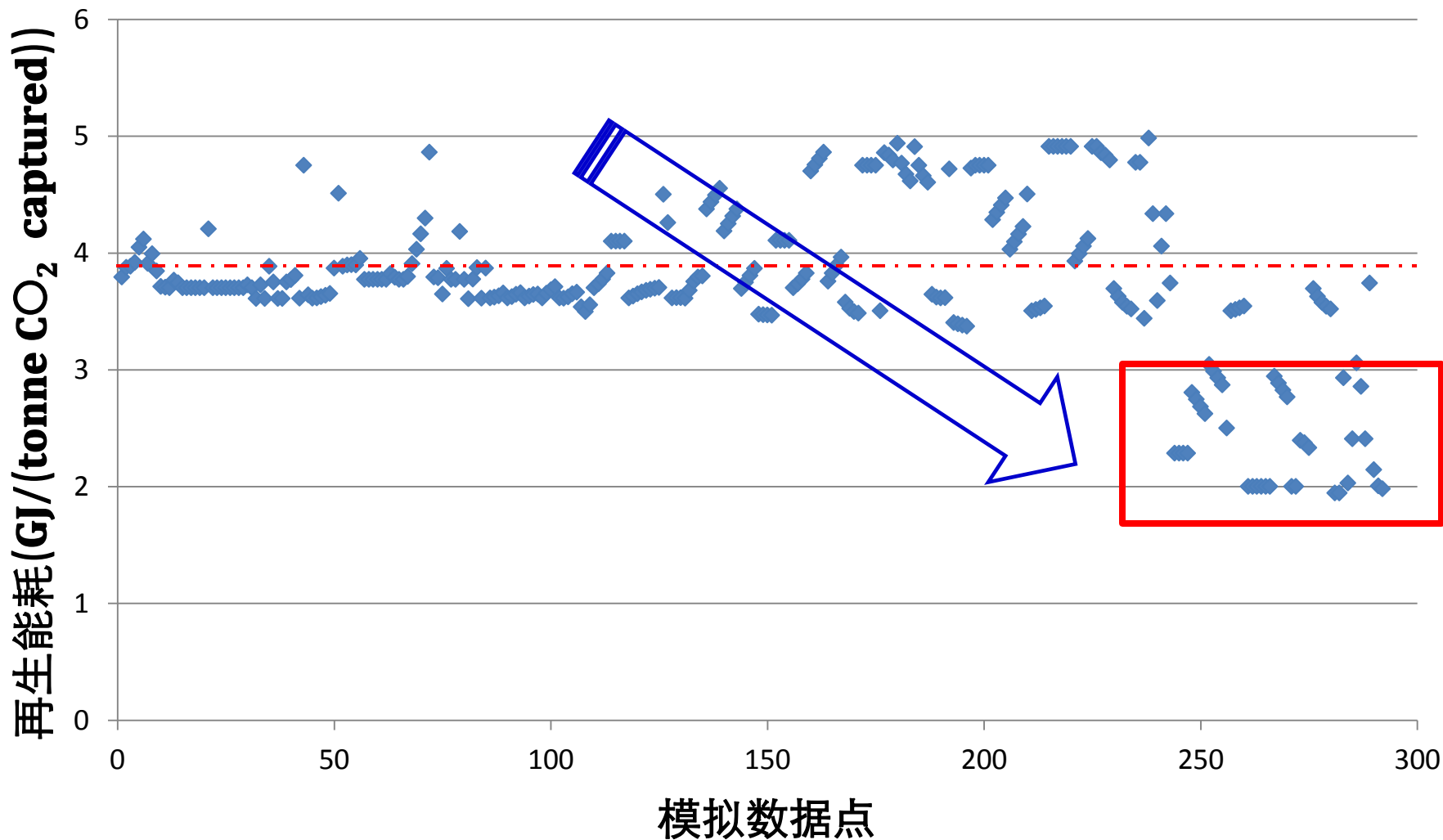
4、发明了高效低能耗CO₂捕集工艺

利用ASPEN PLUS建立模型，采用“以传递现象速率为基础的蒸馏模拟技术”
(Rate-Based Distillation Simulation Technology) 为计算方法，进行节能工艺研究。



(一) CO₂ 捕集技术

4、发明了高效低能耗CO₂捕集工艺



(一) CO₂ 捕集技术

4、发明了高效低能耗CO₂捕集工艺

现场中试研究表明，再生能耗低至2.3GJ/tCO₂，相比常规MEA法，降低45%。

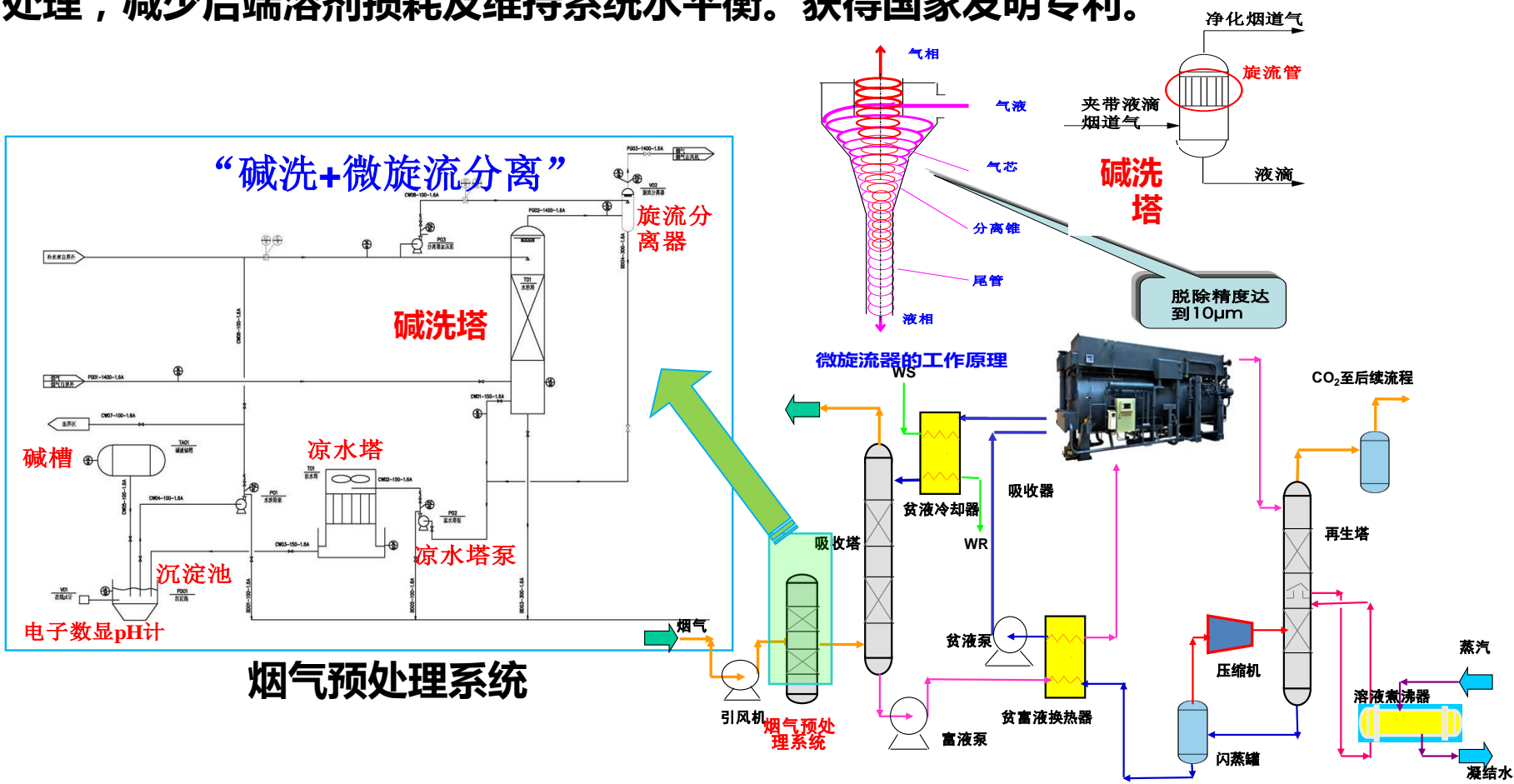


装置监控画面

(一) CO₂ 捕集技术

5、发明了烟气预处理技术

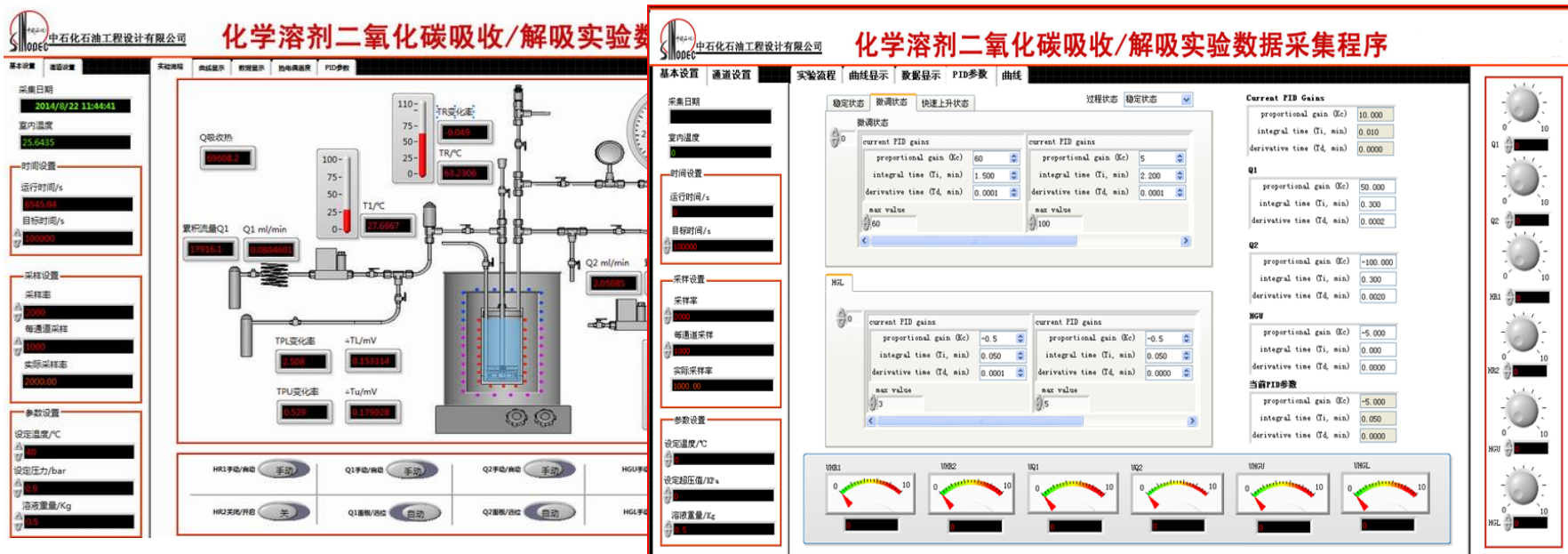
创新形成了“碱洗+微旋流”烟气预处理技术，对进入捕集系统前的烟气进行预处理，减少后端溶剂损耗及维持系统水平衡。获得国家发明专利。



(一) CO₂ 捕集技术

6、开发了CO₂捕集反应热及反应动力学测试技术

- **开发了国内首台气体吸收反应热测试仪**，可进行可进行CO₂、H₂S、SO₂等气体的吸收反应热测量。已申报国家发明专利和美国专利。



特点：有效防止热传导与热辐射的设计理念，实现了仪器的绝热测试环境。

(一) CO₂ 捕集技术

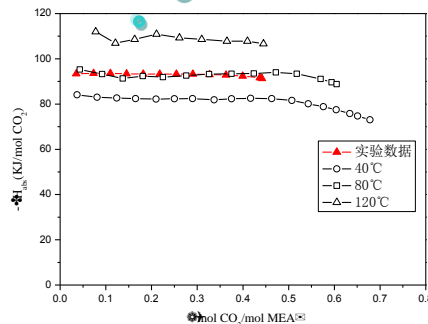
6、开发了CO₂捕集反应热及反应动力学测试技术

- 反应热测试仪具有优异的精度与性能：反应温升测试精度达到0.02℃，纯水比热容测试误差小于0.5%，基准吸收剂MEA（一乙醇胺）吸收反应热测试误差小于1%。

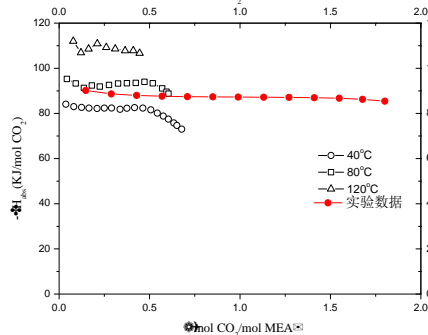
测试值与文献数据统计对比

作者	仪器	MEA浓度 wt%	温度K	压力 bar	吸收 热	方差 %
Mathonat1998	C80	30%	313-393	20-100	81-102	7
Carson2000	自主设计	10%-30%	298	2.65	81-83	4
Kim2007	CPA12 2	30%	313-393	1-3	84-110	3
Hugues2011	C80	30%	322.5- 372.9	5-30	83-96	5
本课题实验	自主设计	30%	313-351	3	87-93	3

$$Q_{吸} + \int \rho dt \approx C_{MEA} m_{MEA} \cdot (T + H_o) \cdot T$$



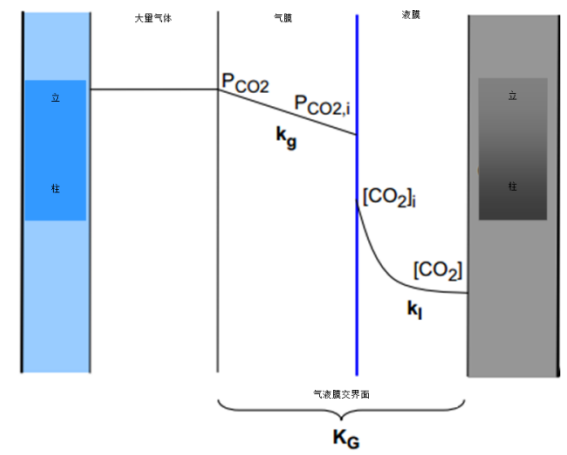
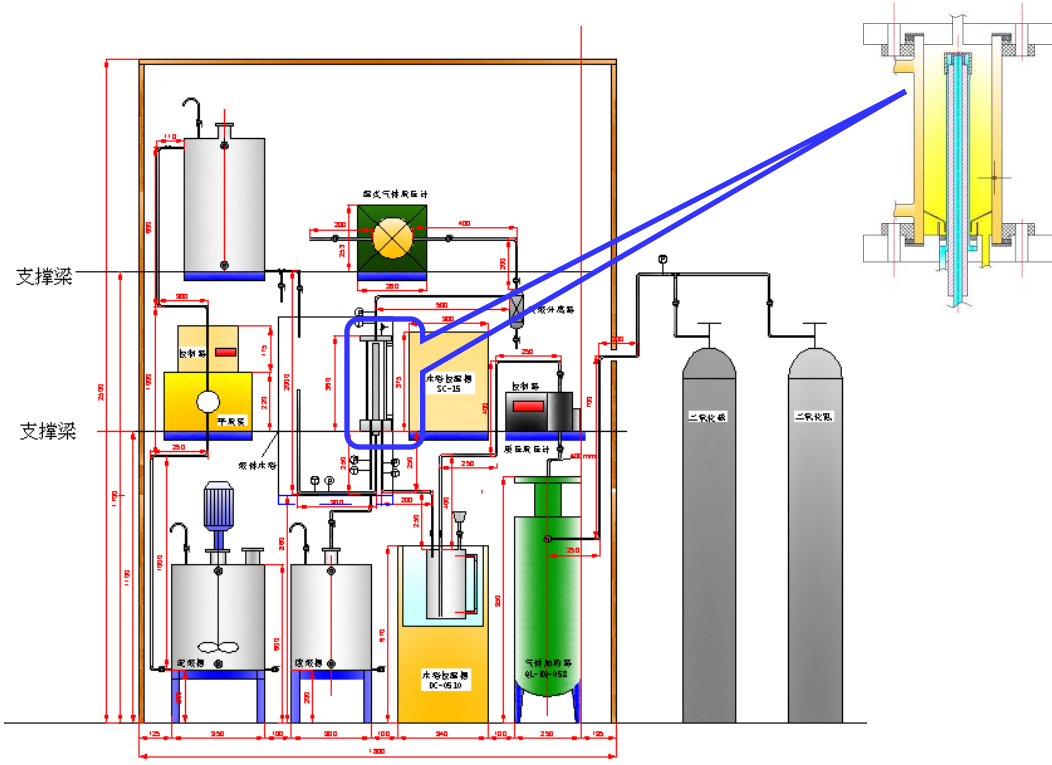
1bar实验数据与Kim
测试数据对比



3bar实验数据与Kim
测试数据对比

(一) CO₂ 捕集技术

6、开发了CO₂捕集反应热及反应动力测试技术



$$N_{CO_2} + k_g (P_{CO_2,bulk} - P_{CO_2,i}) + k_l (c_{CO_2,i} - c_{CO_2,bulk})$$

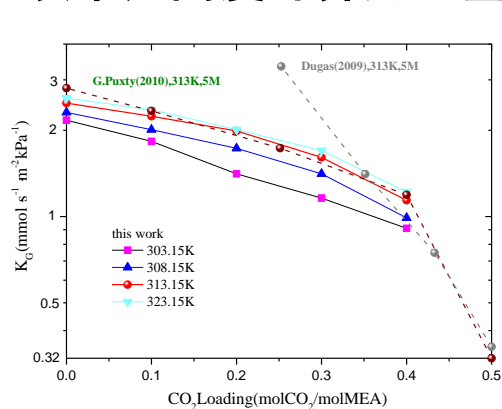
湿壁塔局部气液传质过程示意图

设计开发了新一代反应动力学测试仪，可进行CO₂、H₂S、SO₂等气体的反应级数、活化能及反应速率的测量。已获国家发明专利2项。

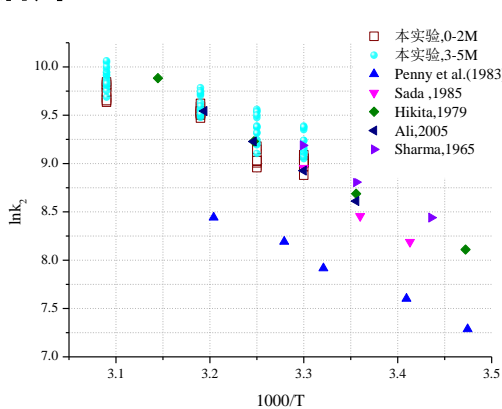
(一) CO₂ 捕集技术

6、开发了CO₂捕集反应热及反应动力测试技术

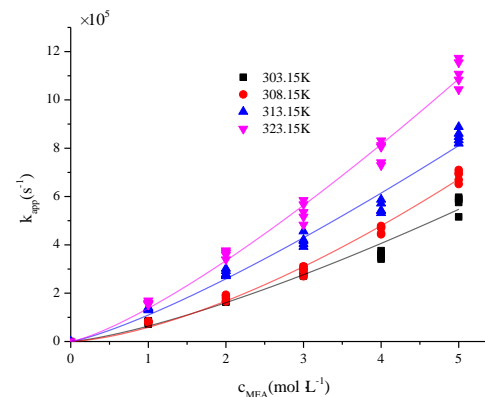
研究测试了不同配方吸收剂的反应速率、传质系数与反应级数，为反应器传质单元高度计算建立基础数据库。



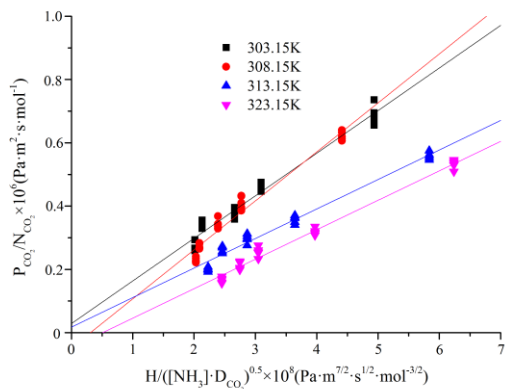
总传质系数与负载的变化关系



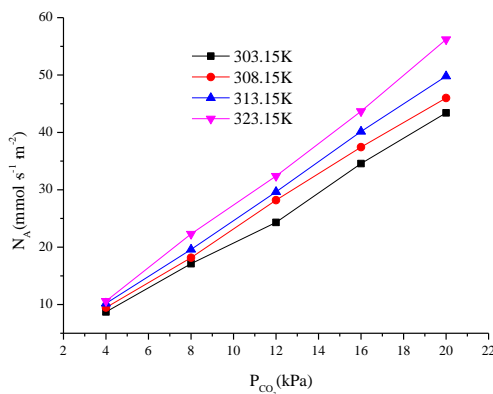
胺溶液速率值与文献数据对比



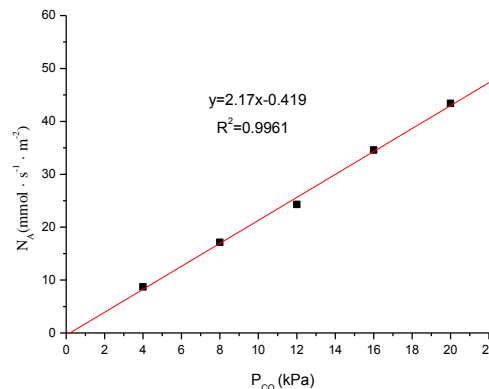
k_{app} 值与胺浓度关系图



传质阻力验证



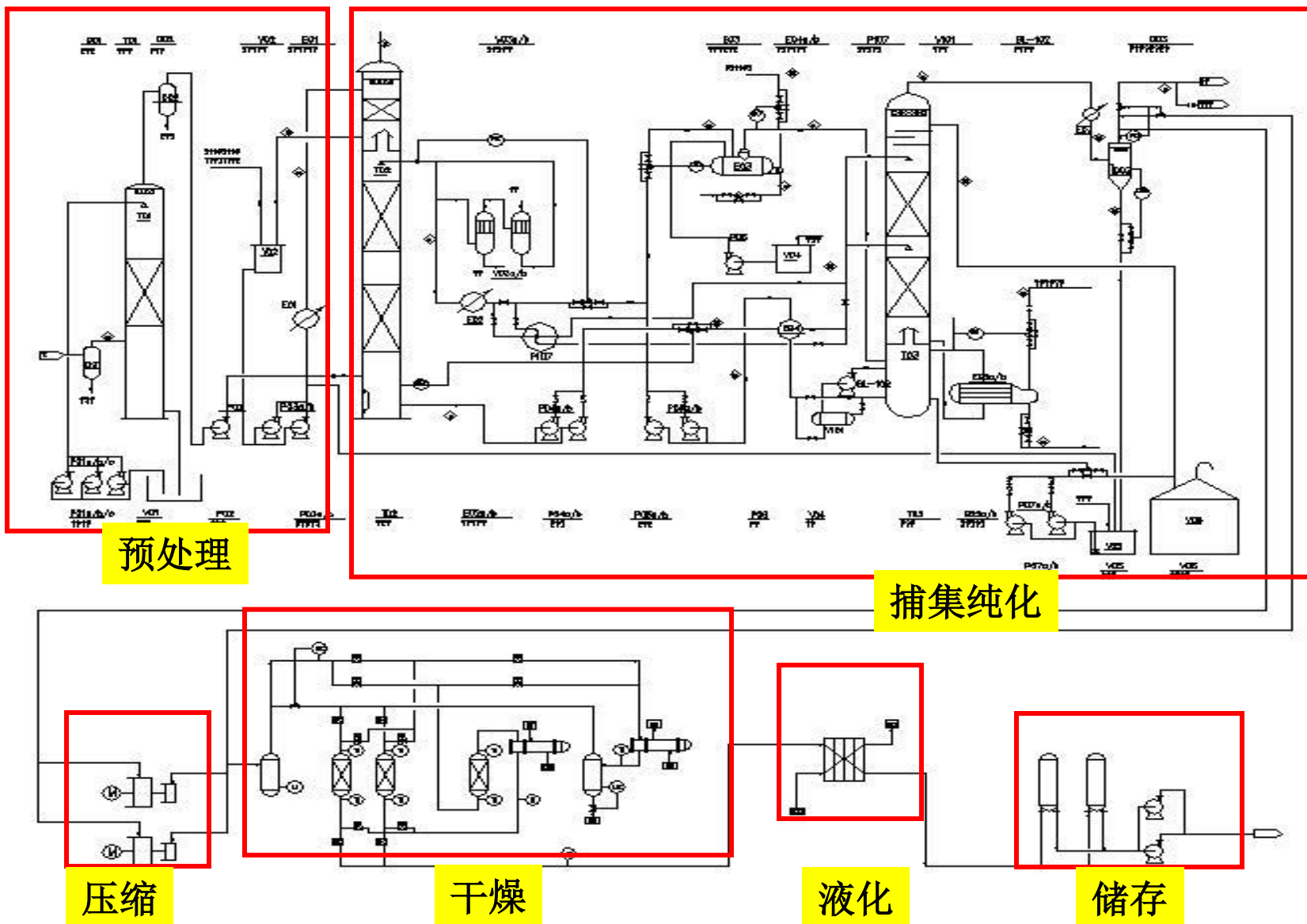
吸收速率与分压的关系 (α = 0)



吸收速率与分压的关系 (303.15K)

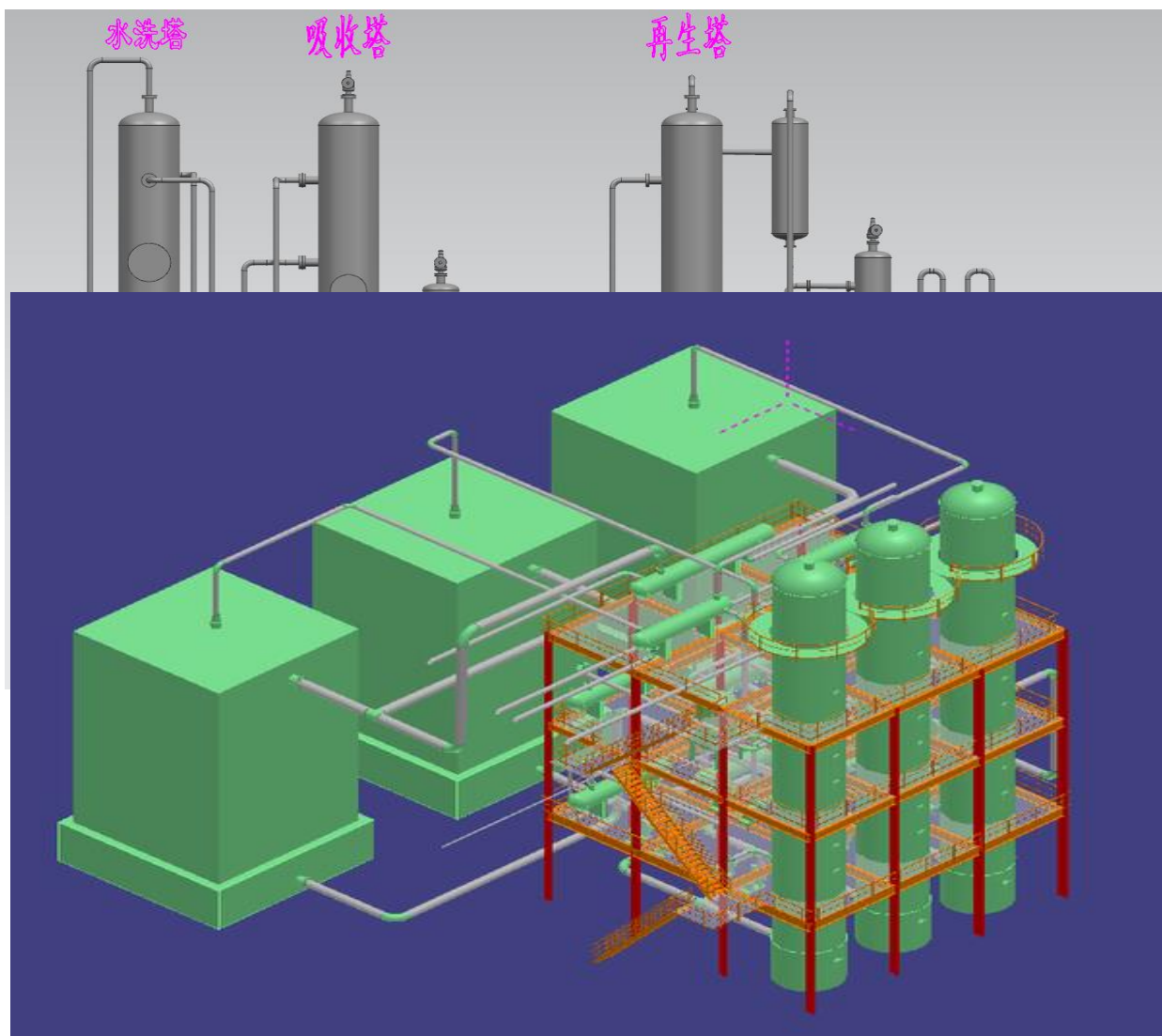
(一) CO₂ 捕集技术

7、形成了模块化CO₂捕集设计与总包技术



(一) CO₂ 捕集技术

7、形成了模块化CO₂捕集设计与总包技术



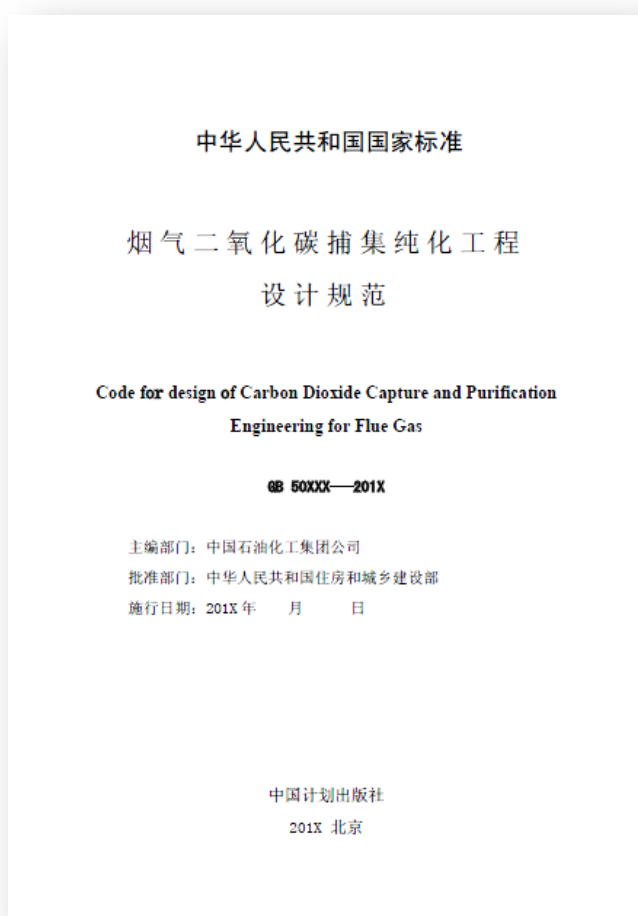
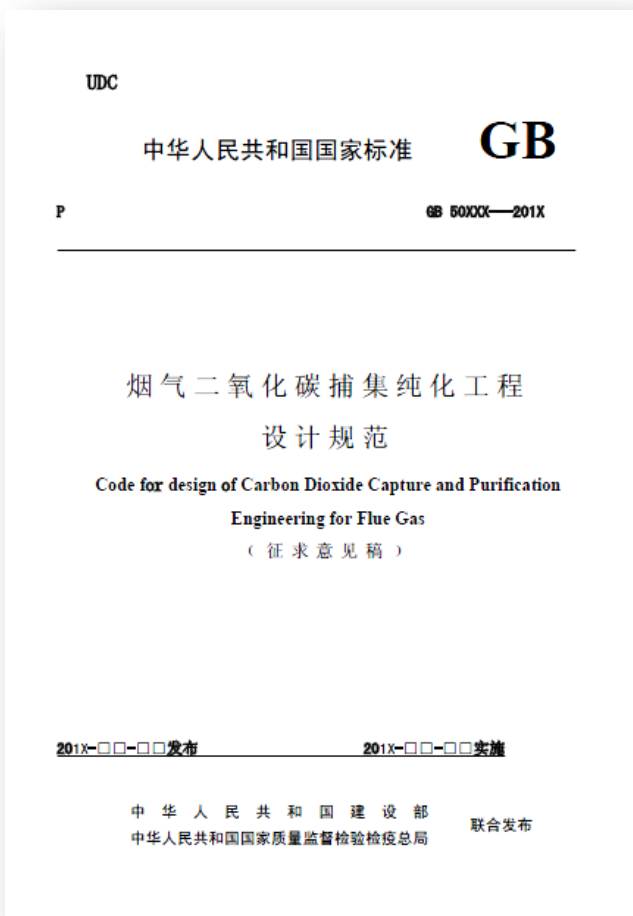
- 模块化
- 橇装化
- 集成化
- 紧凑化



(一) CO₂ 捕集技术

8、承担了烟气CO₂捕集纯化工程国标编制工作

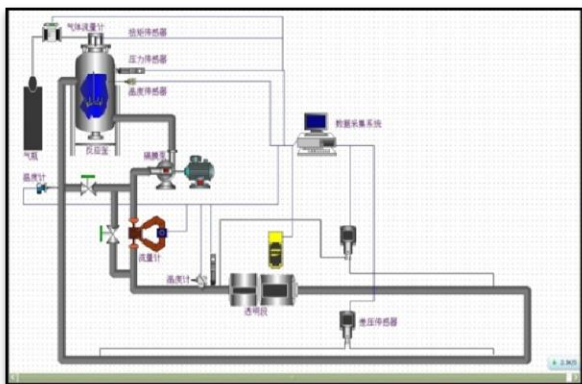
作为牵头单位联合华能、中电投等单位共同编制了烟气二氧化碳捕集纯化工程国家标准，目前已完成征求意见稿。



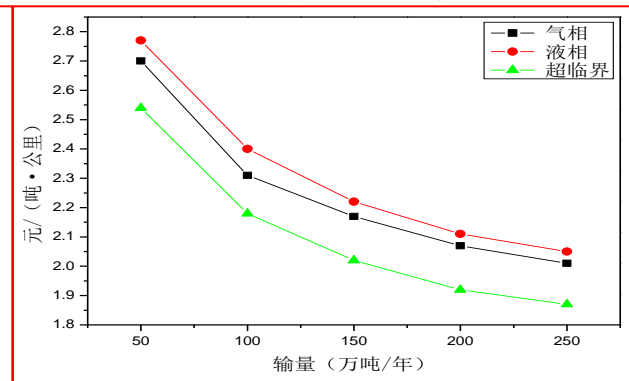
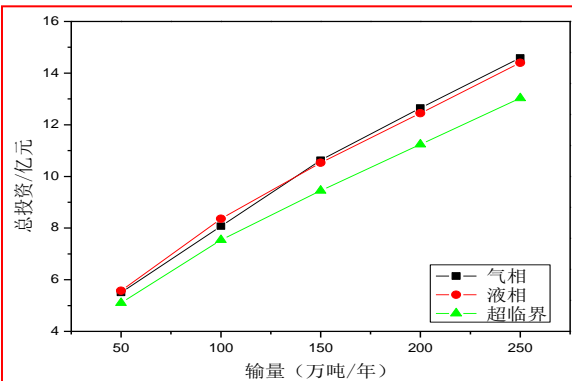
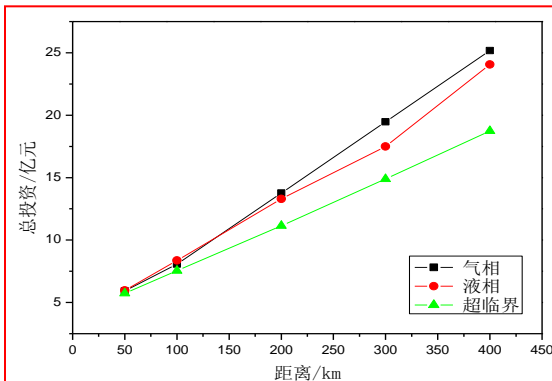
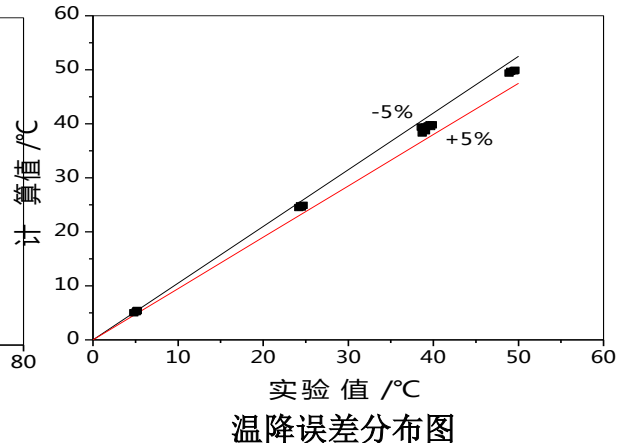
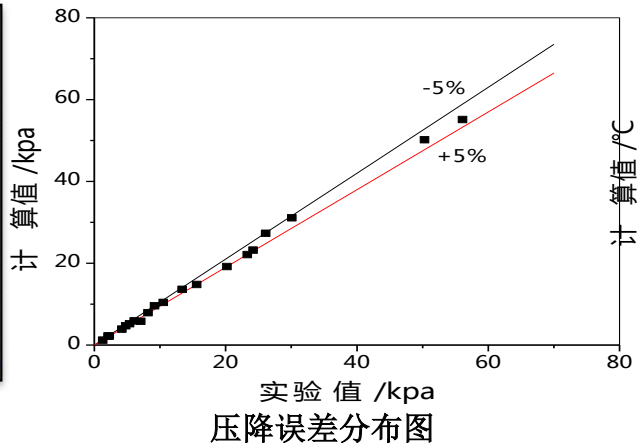
(二) CO₂管道输送技术

1、形成了CO₂管道输送工艺设计技术

开发了CO₂管道输送工艺设计技术，可准确进行大输量、长距离CO₂管道的工艺分析，确定管输工艺参数。



CO₂输送环道实验装置



不同输送相态经济性分析

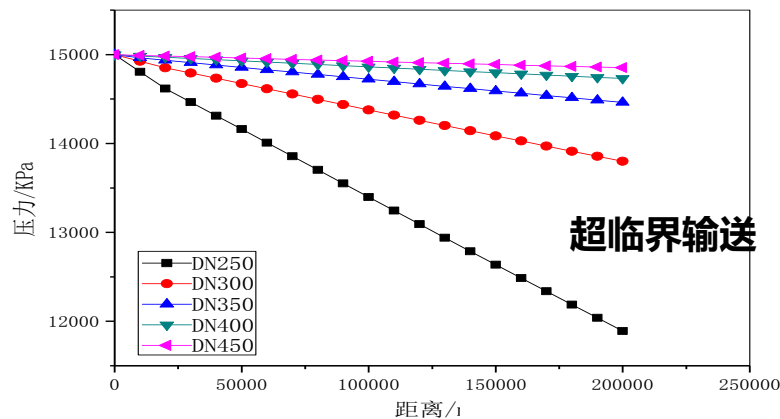
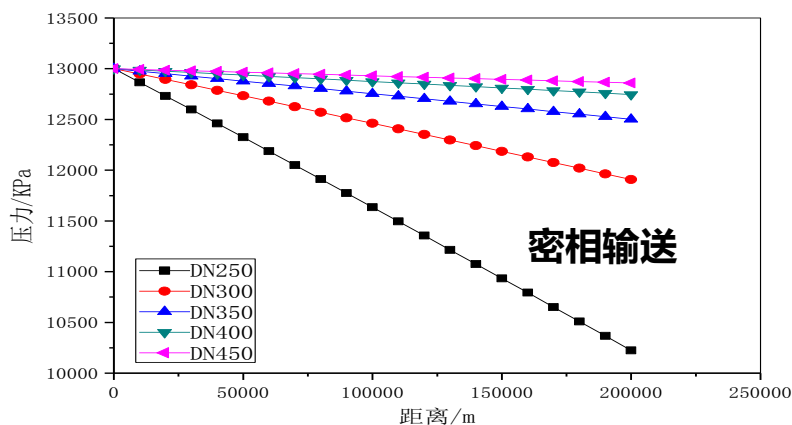
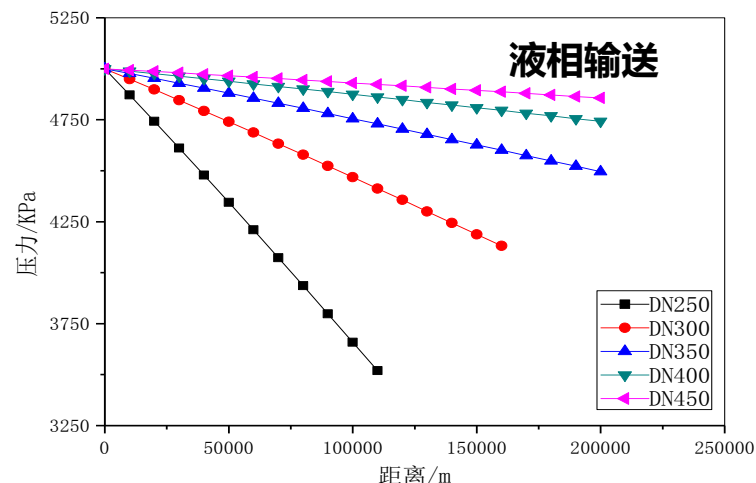
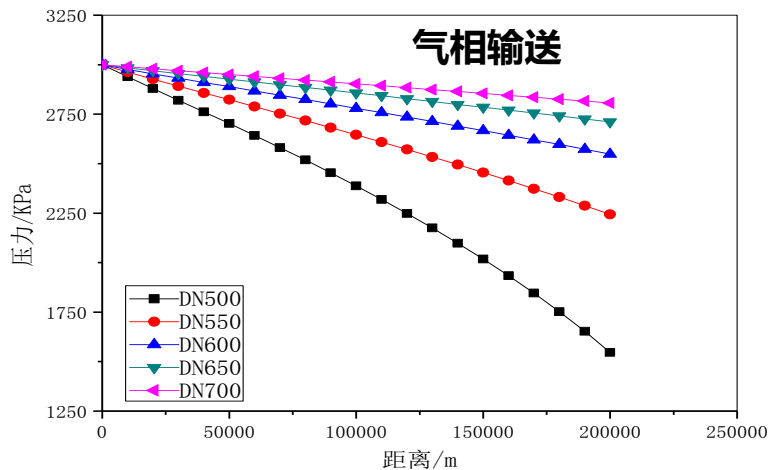


(二) CO₂管道输送技术

2、开发了不同输送相态工艺、适应性分析方法

针对CO₂的相态特性，分别对气相、液相、密相及超临界输送方式进行模拟，得出输送压力、输送温度随输送距离的变化关系。

不同管径各输送方式模拟

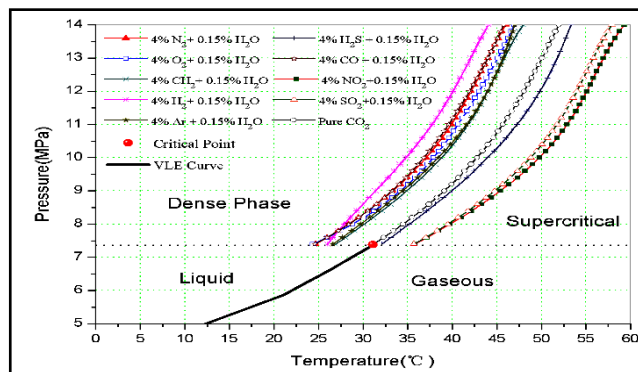
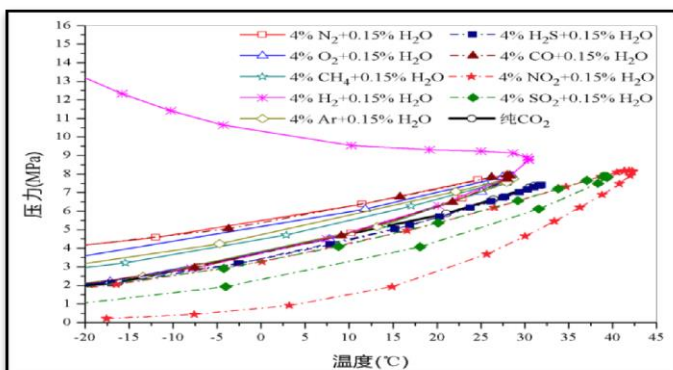


(二) CO₂管道输送技术

3、开展了CO₂管道输送安全控制技术研究

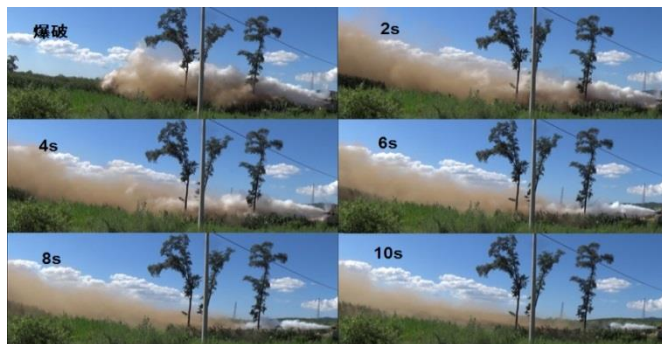
启动了CO₂管道输送安全技术研究，包括杂质对管输的影响分析、管道、放空、泄漏时扩散影响区域模拟计算方法等，可为CO₂管道安全设计及评价提供支撑。

杂质对相平衡的影响



杂质对准临界区的影响

二氧化碳实验现场

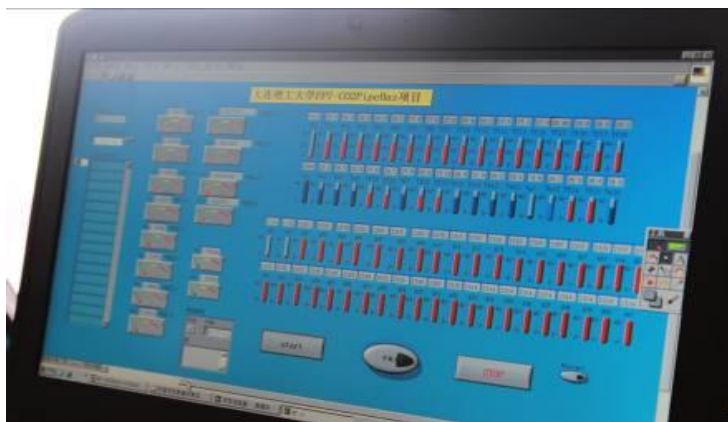
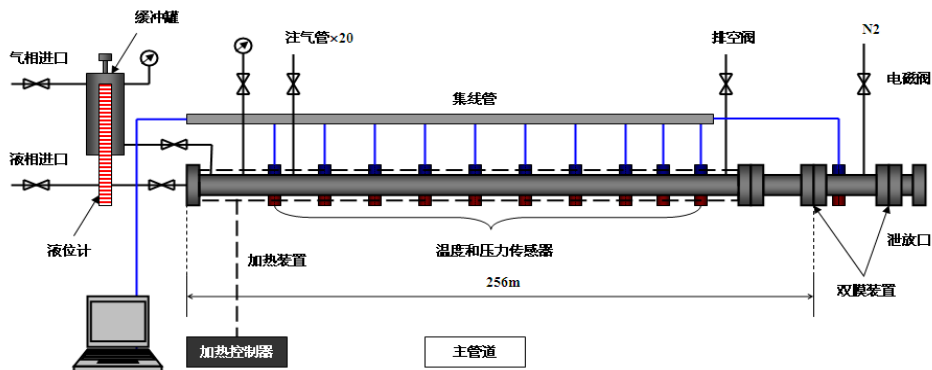


二氧化碳管道淹没分析

(二) CO₂管道输送技术

3、开展了CO₂管道输送安全控制技术研究

进行了 CO₂管道泄放现场试验，研究了管道内CO₂相态变化、射流膨胀、重气扩散、干冰升华等过程。



数据采集系统

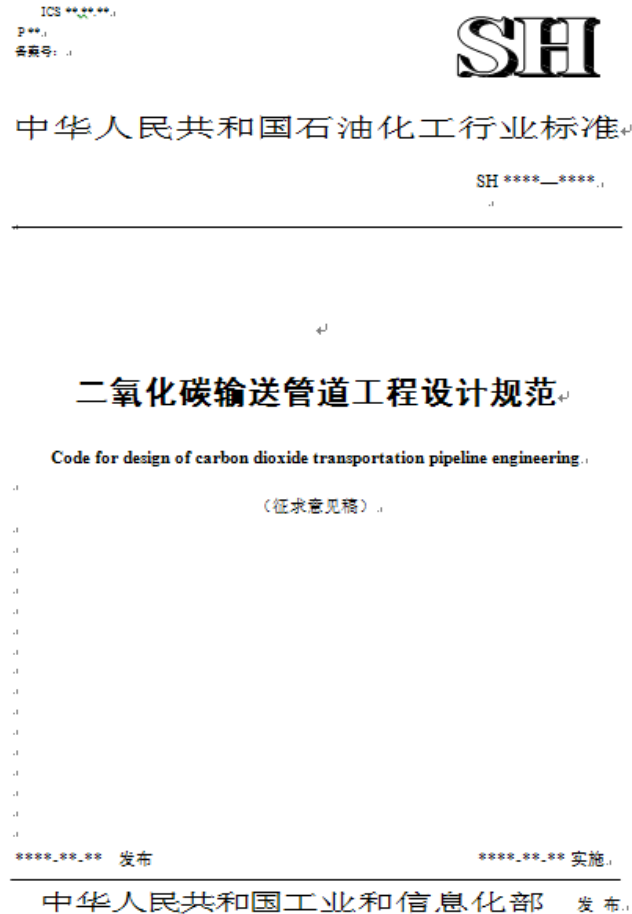


(二) CO₂管道输送技术

3、开展了CO₂管道输送安全控制技术研究



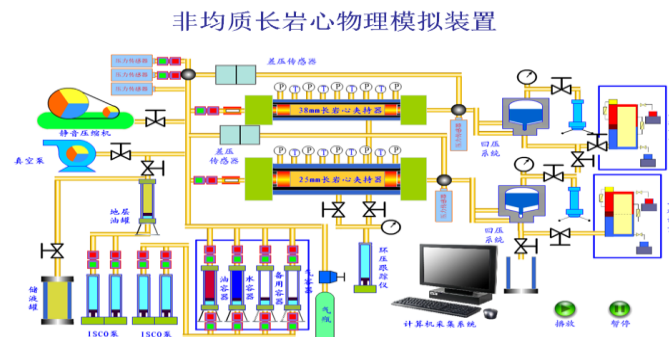
- 开展的CO₂管道泄漏和放空安全控制提供支撑，编制规范，填补了国内空白。



置和管
设计

(三) CO₂油藏工程技术

- 建立了CO₂驱油藏评价标准
- 揭示了CO₂与原油动态混相的微观机理
- 研制了CO₂驱非均质长岩心物理模拟装置
- 研究了CO₂驱产出气回注对驱油效果的影响

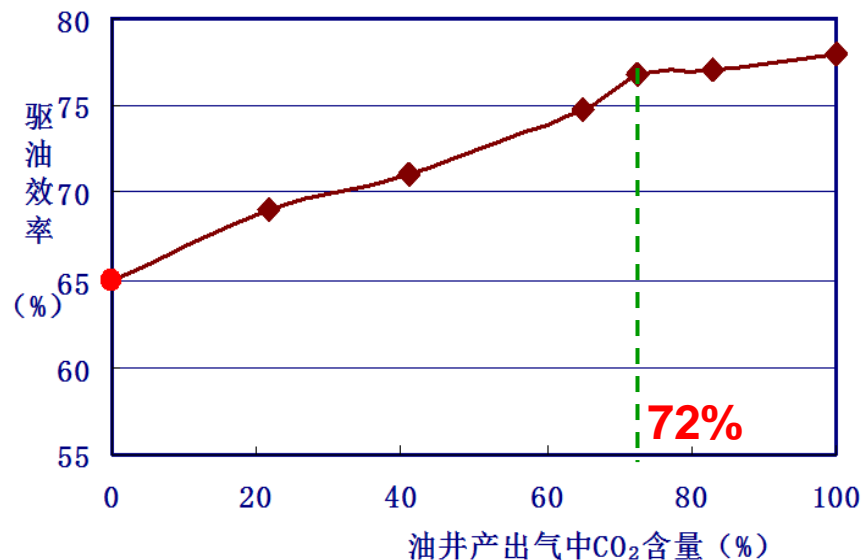


价格为同类进口产品的1/2

CO₂驱提高采收率油藏适应性评价标准表

评价参数		评价标准
关键参数	混相能力	≥ 1 (混相驱) 0.8~1 (近混相驱)
	渗透率, mD	> 0.5
参考参数	油藏条件下原油粘度, mPa·s	< 12
	油藏条件下原油密度, 10 ³ kg/m ³	< 0.8762
	剩余油饱和度, %	> 25
	单储系数, m ³ / (km ² ·m)	> 39000
	油层深度, m	> 2000
	地层温度, °C	< 145

产出气回注时CO₂含量对驱油效率的影响



• 胜利油区适合CO₂驱的储量4.19亿吨。(混相驱储量2.3亿吨, 近混相驱储量1.9亿吨)

(四) CO₂注采工程技术

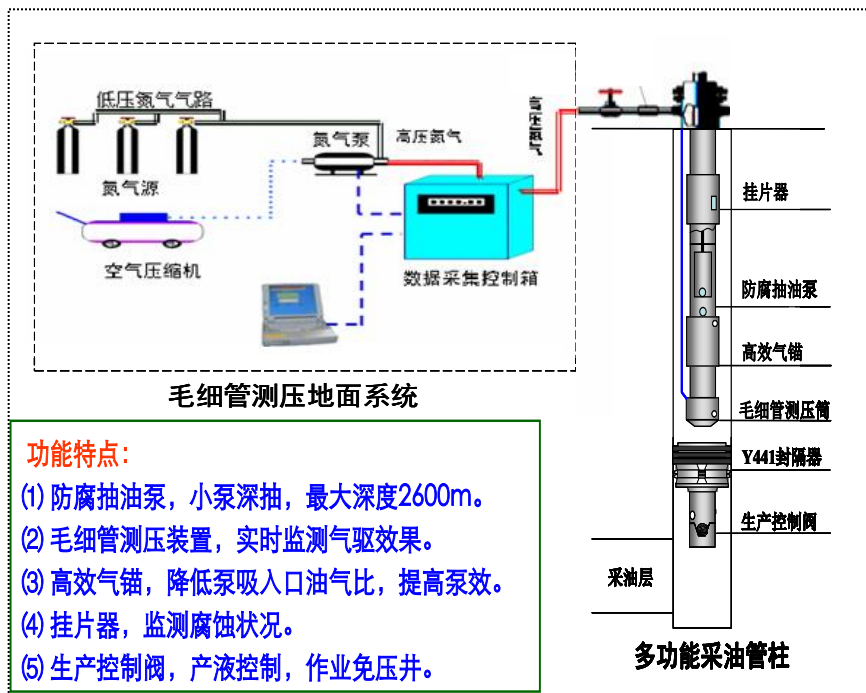
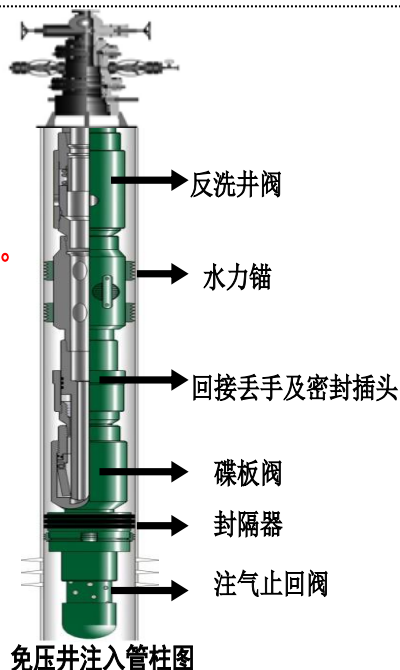
研制了CO₂驱免压井安全注气管柱及多功能采油管柱，保证了高压注入和高气油比生产及实时监测。

主要功能：

- ▶ 停注时防返吐，注气安全
- ▶ 起管柱时免压井，作业安全且保护油层。

主要技术指标：

- ▶ 适用井径：5 1/2"
- ▶ 最高耐温：150℃
- ▶ 最大密封压差：40MPa



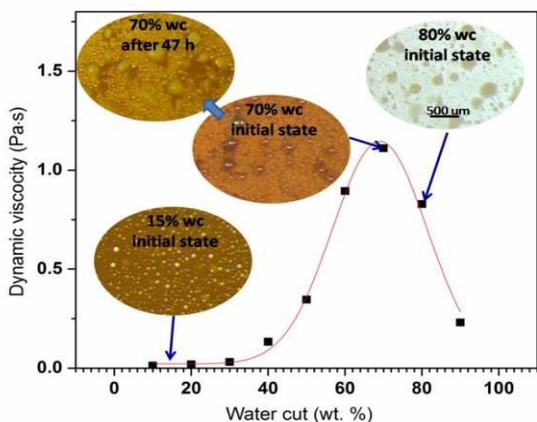
功能特点：

- (1) 防腐抽油泵，小泵深抽，最大深度2600m。
- (2) 毛细管测压装置，实时监测气驱效果。
- (3) 高效气锚，降低泵吸入口油气比，提高泵效。
- (4) 挂片器，监测腐蚀状况。
- (5) 生产控制阀，产液控制，作业免压井。

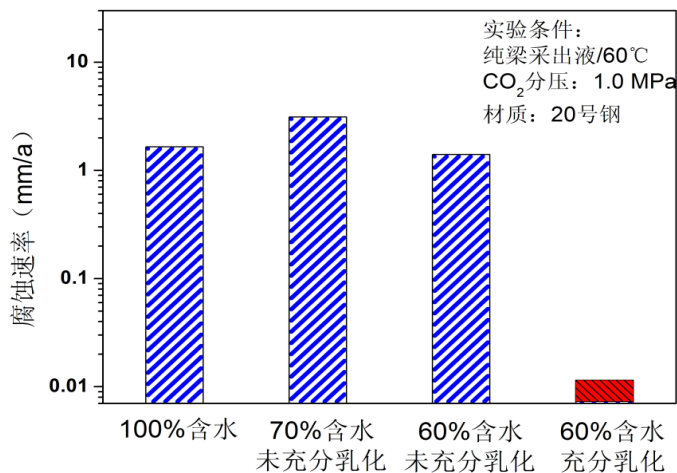
(五) CO₂驱地面集输腐蚀控制技术

1、提出了油气水乳化防腐设计理念

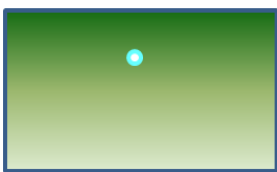
研究发现强制乳化可完全抑制管道电化学腐蚀，确定了临界混输速度计算方法，给出了油气水混输工艺防腐临界条件。



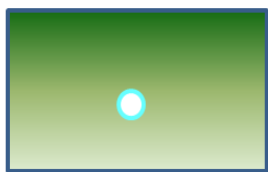
不同温度下转相点



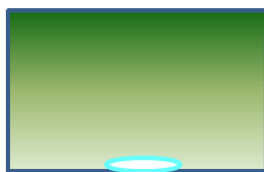
高压釜测试20号钢在不同油水状态下腐蚀速率



初始状态



水滴聚结沉降



到达底部形成腐蚀

乳状液腐蚀风险预测模型

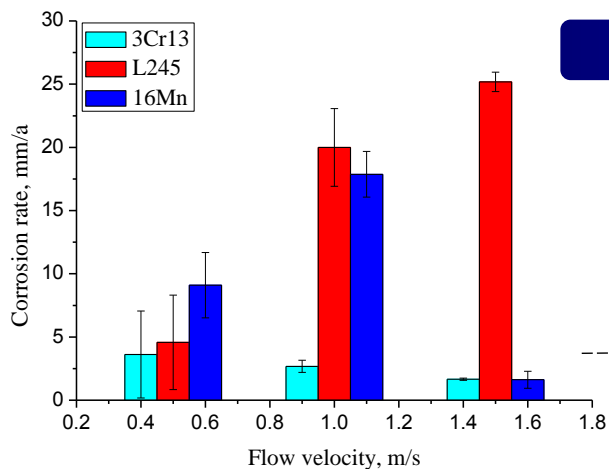
主要内容已在线发表于
Corrosion Science杂志

主编剑桥大学Burstein教授 较高评价: An interesting approach.
同时得到专业审稿人认可。

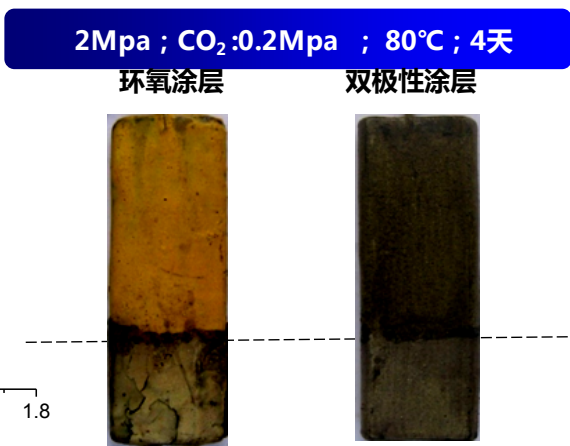
(五) CO₂驱地面集输腐蚀控制技术

2、形成了CO₂驱腐蚀控制技术

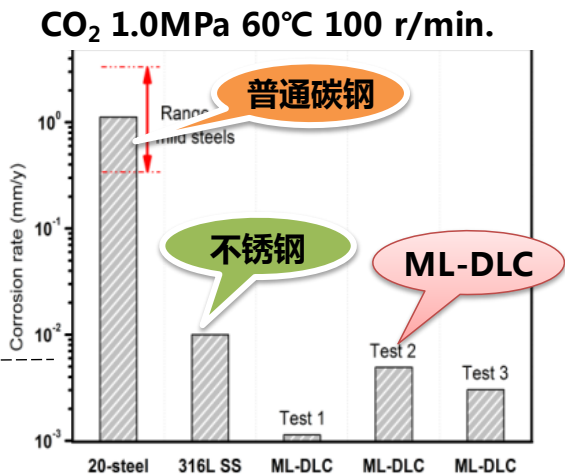
研发了CO₂驱腐蚀控制单项技术，包括材质优选、缓蚀剂研发及涂镀层开发。



防腐材质优选评价



双极性涂层防腐性能评价



高压釜测试腐蚀速率对比

类金刚石镀膜耐蚀性能评价

澄清了低Cr钢与普通碳钢腐蚀机理差异，已发表于Corros Sci，被广泛引用。

开发出兼具防腐阻垢功能的DLC镀膜，已在线发表于Corros Sci杂志

(五) CO₂驱地面集输腐蚀控制技术

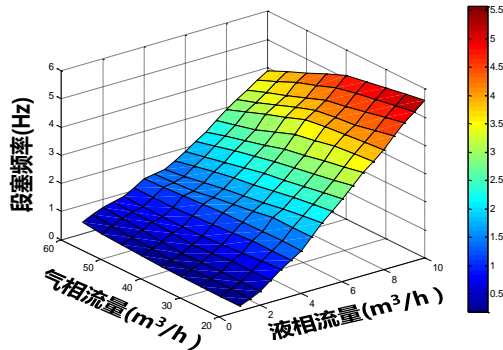
3、建立了CO₂驱集输系统腐蚀模拟装置

可实现不同油气水配比、流态、流速、水质、CO₂分压对不同材质的腐蚀影响，研究多相流腐蚀规律。这是全世界仅有的几套CO₂多相流腐蚀实验台架之一。获发明专利授权。

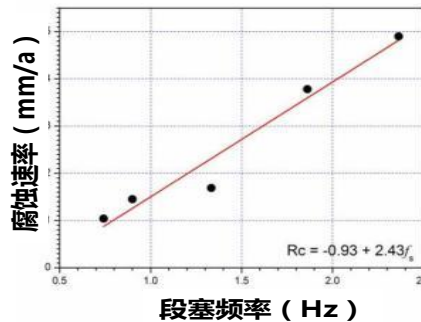
多相流腐蚀台架



国际同行认为，胜利油田是国际上极少数成功运行CO₂驱油气水多相流腐蚀模拟实验的单位。



流型段塞频率统计分析



腐蚀速率与段塞频率关系

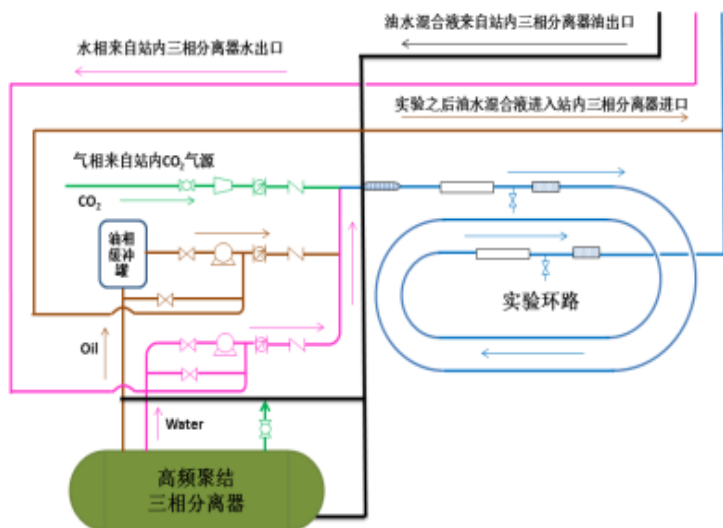
含油 < 5%
模拟CO₂驱溶液
CO₂分压
0.5MPa
温度 60°C
测试周期12 h

(五) CO₂驱地面集输腐蚀控制技术

4、开发了高含CO₂油气集输管道腐蚀模拟技术

研发出多相流腐蚀仿真模拟装置，真实反映油气集输环境，避免油水连续运行乳化问题，为集输系统内腐蚀评估提供可靠评估方法。

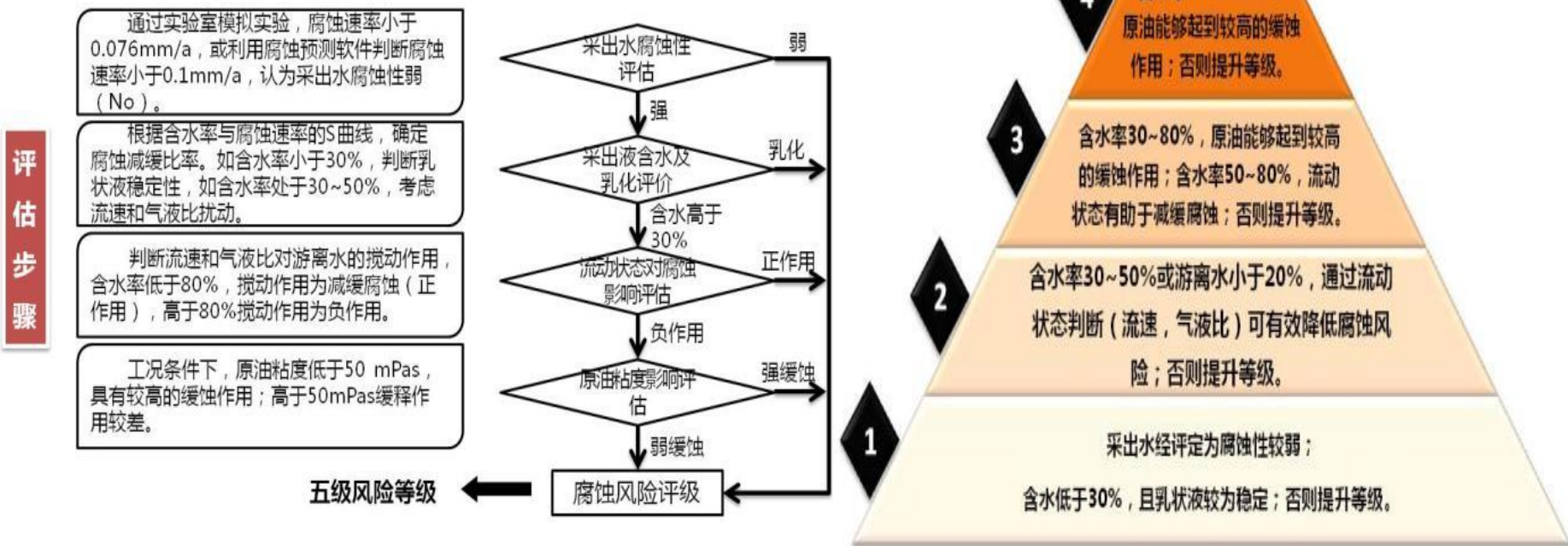
该装置已在滨二首站连续运行1月以上，详细评价了平方王区块高含CO₂采出液腐蚀规律。



(五) CO₂驱地面集输腐蚀控制技术

4、开发了高含CO₂油气集输管道腐蚀模拟技术

建立了多相流管道“五级”腐蚀风险评估方法，并在胜利油田平方王区块进行应用。

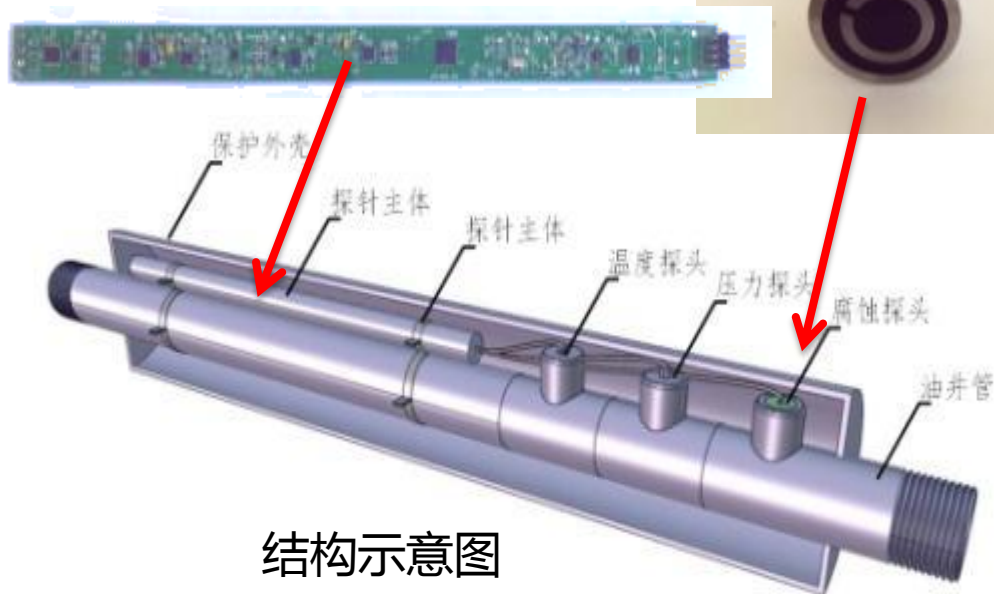


(五) CO₂驱地面集输腐蚀控制技术

5、研制了CO₂驱井下腐蚀在线监测装置

特点1：高温高压测试稳定(井下3000米)；特点2：适应井下狭小空间；特点3：实现数据实时传输。

依托于中石化科技攻关项目，与胜利油田测井公司合作研发。



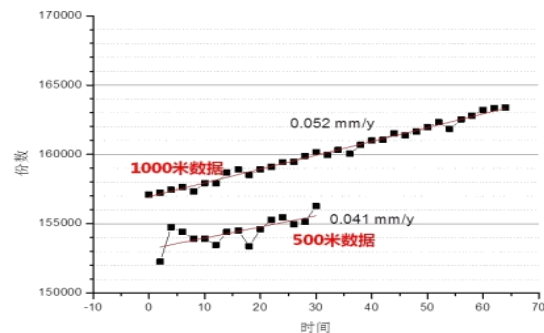
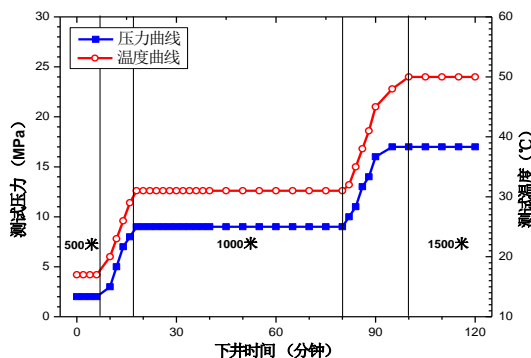
耐温125℃，耐压达60MPa
狭小空间安装
实时传输+井下存储
不影响流型，环形空间放置



(五) CO₂驱地面集输腐蚀控制技术

5、研制了CO₂驱井下腐蚀在线监测装置

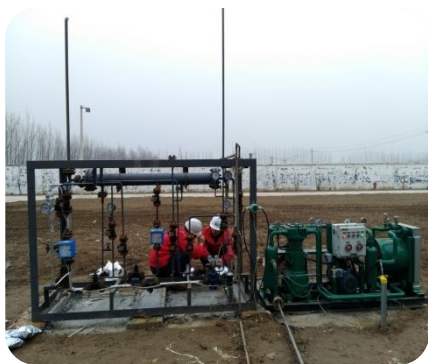
该装置在胜利油田辛11-37井（污水井）进行了试验研究，在井下500米和1000米实时监测腐蚀数据，下井作业顺利，腐蚀信号响应正常。





(六) CO₂驱采出气循环回收技术

针对CO₂驱油开发不同时期特点，开发了四种CO₂驱采出气CO₂回收技术，CO₂捕集率 > 80%，CO₂纯度 > 95%。



膜法脱碳系统

试验规模：1000Nm³/d



变压吸附脱碳系统

试验规模：1000Nm³/d



化学吸收脱碳系统

试验规模：30000Nm³/d



低温分馏脱碳系统

试验规模：75000Nm³/d

(六) CO₂驱采出气循环回收技术

1、30,000Nm³/d 采出气化学吸收CO₂回收装置

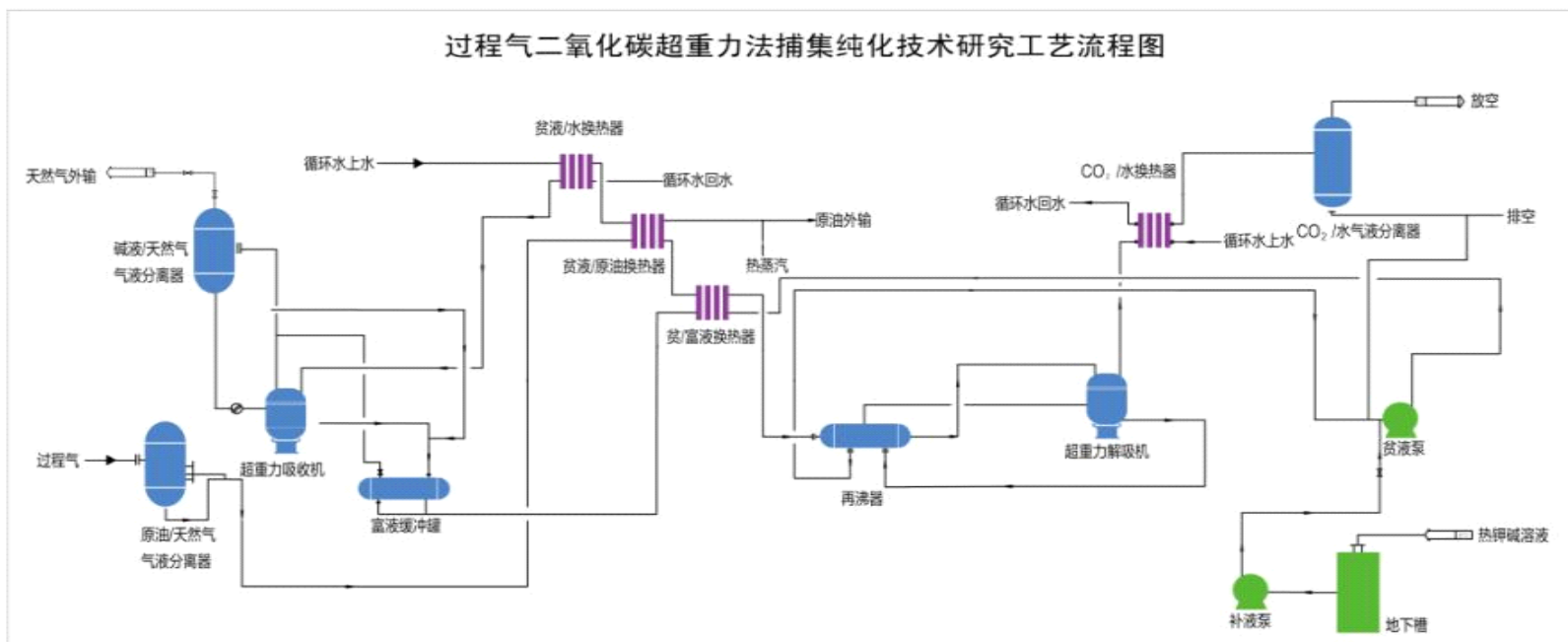
- 设计处理量：**3万标方/天**
- 进气压力：**0.2-0.6MPa**
- 过程气中二氧化碳含量：**80%**
- 吸收液循环量：**25-30m³/h**
- CO₂回收率：**>80%**

工艺： 化学吸收法

吸收液：**改性本菲尔溶液（发明专利）**

吸收温度：**75-85°C**

解吸温度：**120°C**



(六) CO₂驱采出气循环回收技术

1、30,000Nm³/d 采出气化学吸收CO₂回收装置



采出气处理能力为30000Nm³/d 超重力二氧化碳捕集纯化工业示范线



(六) CO₂驱采出气循环回收技术

2、1000Nm³/d 采出气变压吸附CO₂回收装置

变压吸附脱碳现场试验：



设计参数	数值
处理量	1000Nm ³ /d
工作压力	0.3-0.4MPa
设计压力：	0.6MPa
原料气温度	≤ 40℃
原料气CO ₂ 浓度	20-80%
操作弹性	110%
CO ₂ 纯度	≥95%
净化气中CO ₂ 浓度	≤5%
压力损失	≤60Kpa



(六) CO₂驱采出气循环回收技术

3、40,000Nm³/d 采出气低温精馏CO₂回收装置

低温分馏现场试验：

建设液化提纯装置将正理庄油田高89块的CO₂采出气进行脱水处理后，利用低温精馏工艺进行CO₂液化提纯，。

- 高89液化站
- 原料气中CO₂含量：80-90 (mol%)
- CO₂液化能力：120t/d；
- 生产的CO₂纯度：99 (mol%)



(七) CO₂驱油封存环境监测技术

1、建立了CO₂封存环境监测体系及方法：提出了高时效性环境风险识别预警方法和三等级（风险高、中、低）、三层次（空中、地面、地下）、三介质（气体、液体、固体）的环境监测体系。通过4年多的现场试验和监测分析，目前已具备对土壤气、大气、地下水、地面变形、植被遥感等环境介质进行监测分析的能力。



(七) CO₂驱油封存环境监测技术

环境监测技术

光合仪



地表水取样



安装气象站



浅层地下井



植被采样



注气站 CO₂ 浓度监测



CO₂ 通量



土壤气取样



角反射器

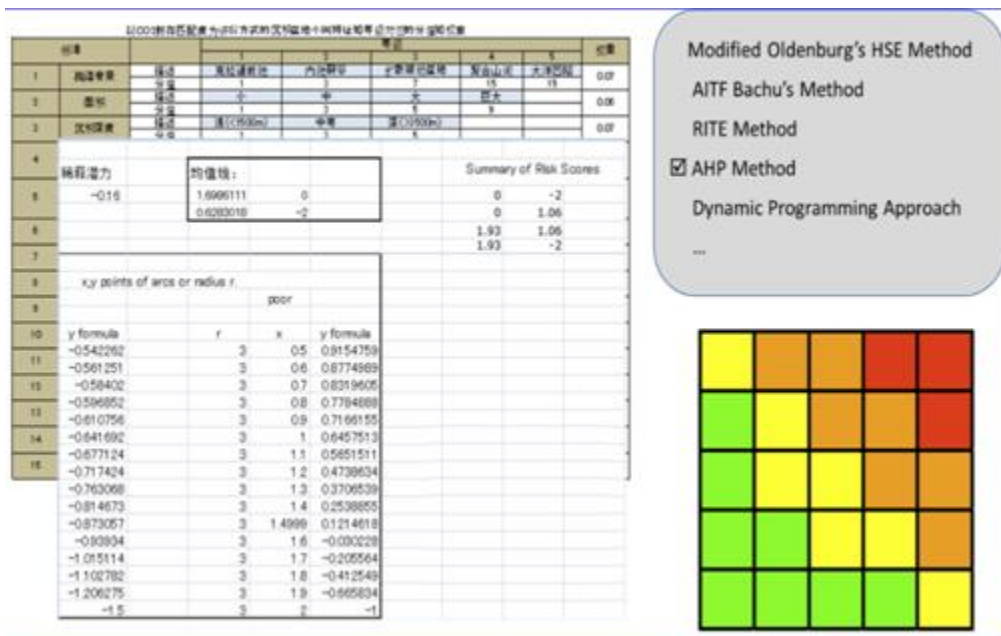


(七) CO₂驱油封存环境监测技术

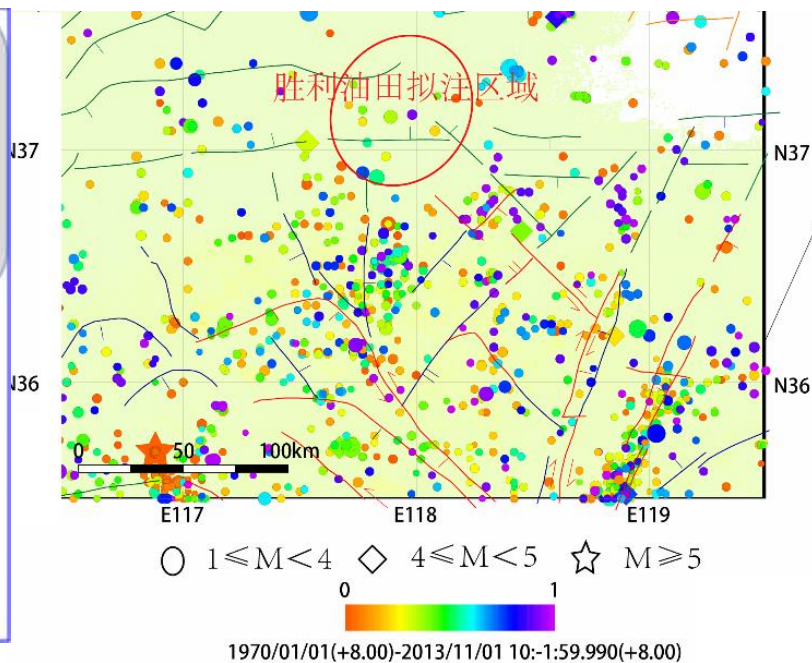
2、提出了CO₂驱油封存环境风险评价体系

提出关于CO₂-EOR示范工程项目的**环境影响评价矩阵**，建立CO₂驱油封存工程项目的**环境风险评价原形系统**。从CO₂输送和封存两个方面进行风险识别和分析。

环境风险评价原形系统



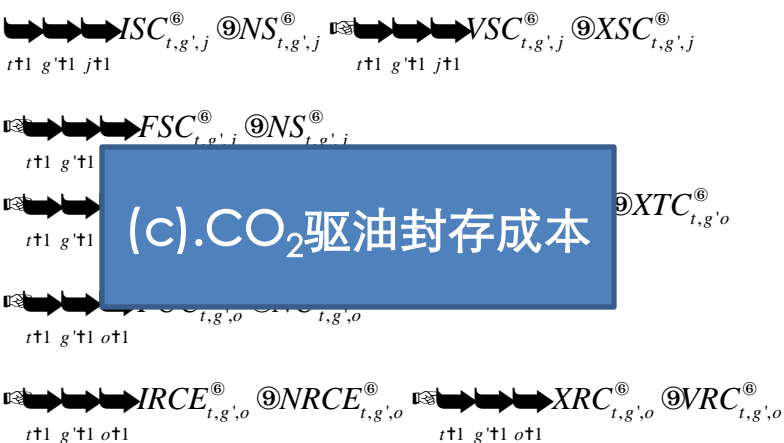
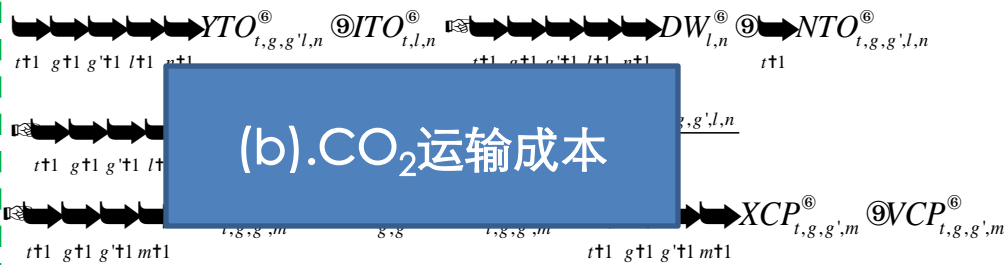
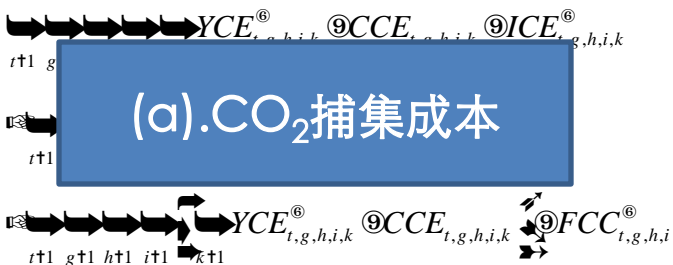
胜利油田拟注区域的风险分析





(八) CCUS全流程经济评价技术

开发了CCUS全流程数学模型，该模型是以CCUS系统总成本最小化为目标，主要包括CO₂捕集成本、运输成本、封存成本以及获得的收益。

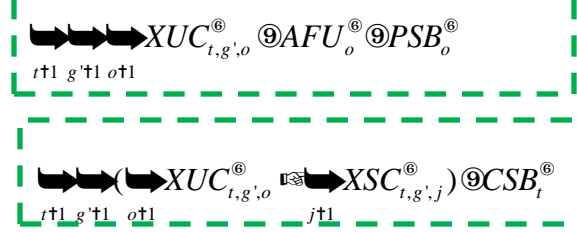


(1) 基准模型
 目标函数: $\text{Min } f^\pm = (a) + (b) + (c) - (d)$

(2) 情景模型: 设定碳价格等各种情景
 目标函数: $\text{Min } f^\pm = (a) + (b) + (c) - (d) - (e_1) - (e_2) - (e_3)$

(d).出售原油所得收益

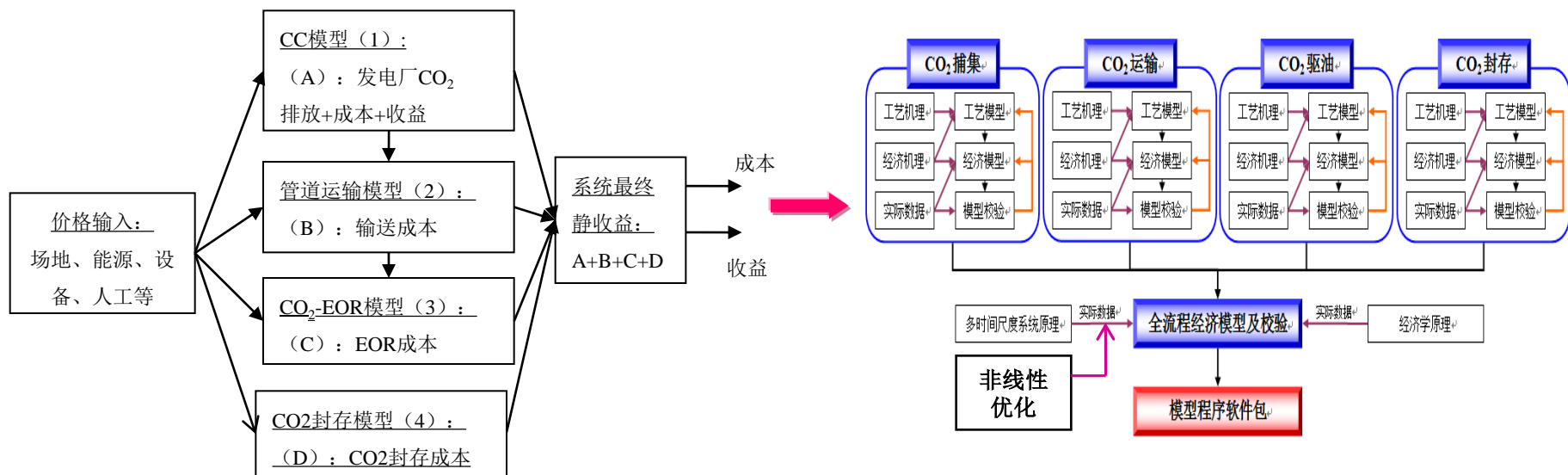
(e).碳价格、特别收益金减免等实施后CCS减排收益





(八) CCUS全流程经济评价技术

基于数学模型、工艺原理、经济原理建立了工艺模型、经济模型，并对模型进行校验，完成了CCUS（捕集、输送、驱油及封存）经济评价模型的建立。





汇报提纲

一、CCUS技术背景

二、CCUS技术成果

三、CCUS工程实践



三、CCUS工程实践

(一) 建成了4万吨/年燃煤电厂烟气CO₂捕集与驱油封存示范工程

胜利电厂4万吨/年烟气CO₂捕集纯化工程2010年投产运行，采用自主研发的技术，自主设计，EPC总承包模式运行。将胜利电厂烟气中的CO₂捕集出来，经过压缩、干燥、液化及存储后，通过罐车输送至油区用于CO₂驱油与封存。



捕集纯化



压缩



干燥



液化



储存装车

MSA化学吸收工艺

往复式三级压缩

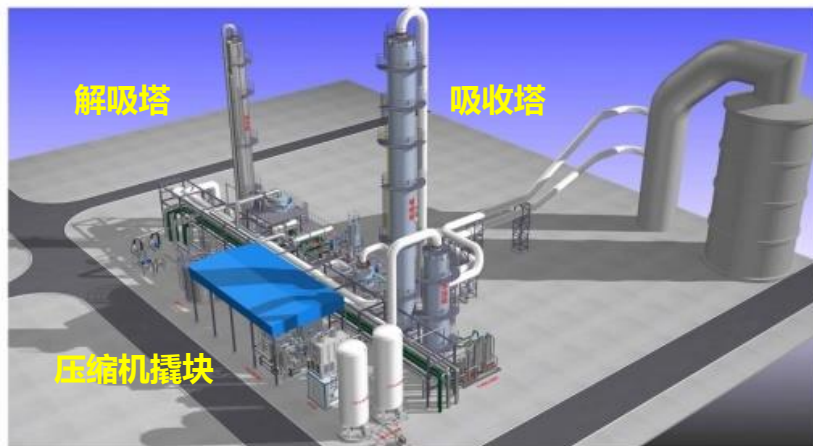
硅胶吸附

R-22氟利昂制冷剂

真空绝热储罐

三、CCUS工程实践

(一) 建成了4万吨/年燃煤电厂烟气CO₂捕集与驱油封存示范工程



三、CCUS工程实践

(一) 建成了4万吨/年燃煤电厂烟气CO₂捕集与驱油封存示范工程

捕集的CO₂运送至胜利油田高89-1块示范区用于驱油与封存，形成了捕集-注入-油藏-生产-采出气回收一体化的工程，这是国内外首个燃煤电厂烟气CO₂捕集、输送与驱油封存联用的CCUS全流程示范工程。



胜利电厂捕集纯化 → 压缩 → 干燥 → 液化 → 储存装车

罐车输送：80km ↓



采出气CO₂

油井产出

注入到油层

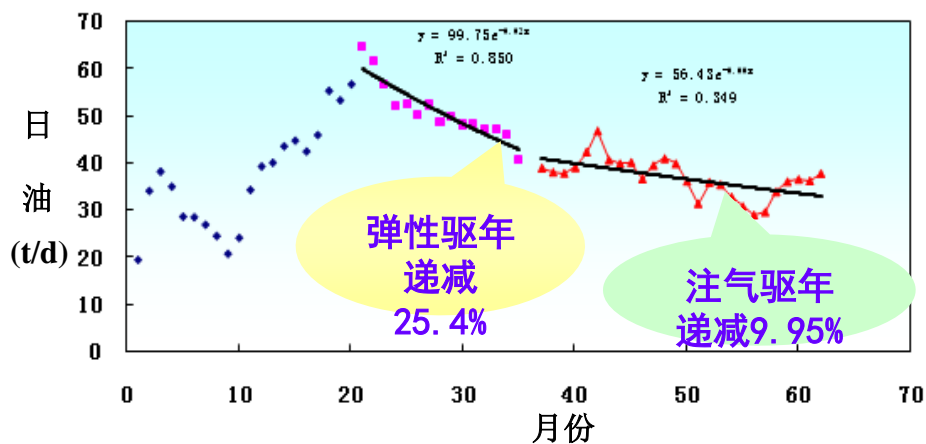
CO₂注入站

三、CCUS工程实践

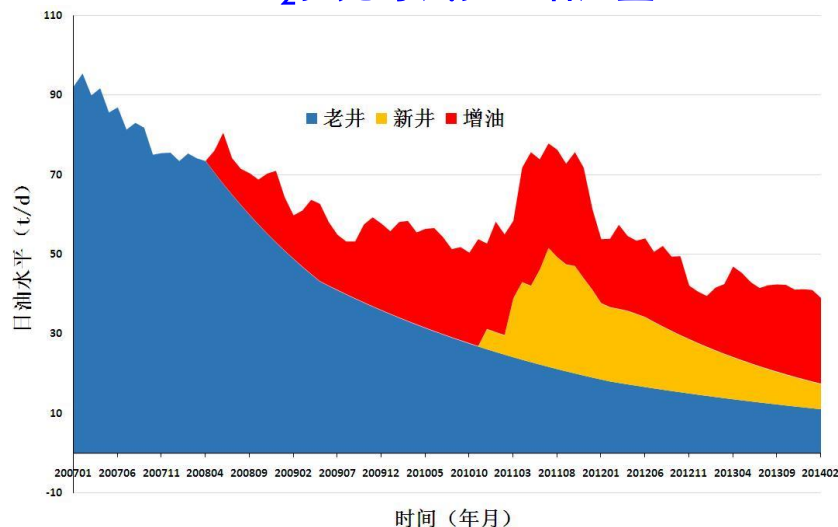
(一) 建成了4万吨/年燃煤电厂烟气CO₂捕集与驱油封存示范工程

现场CO₂驱油取得良好效果，截止目前，累注CO₂ **22.4万吨**，累增油**5.07万吨**，阶段换油率**0.23t/tCO₂**，CO₂动态封存率**86%**，实现CO₂减排封存的同时有效提高了原油采收率。

CO₂驱油井组递减变化曲线



CO₂驱先导试验区增油量



三、CCUS工程实践

(二) 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。**

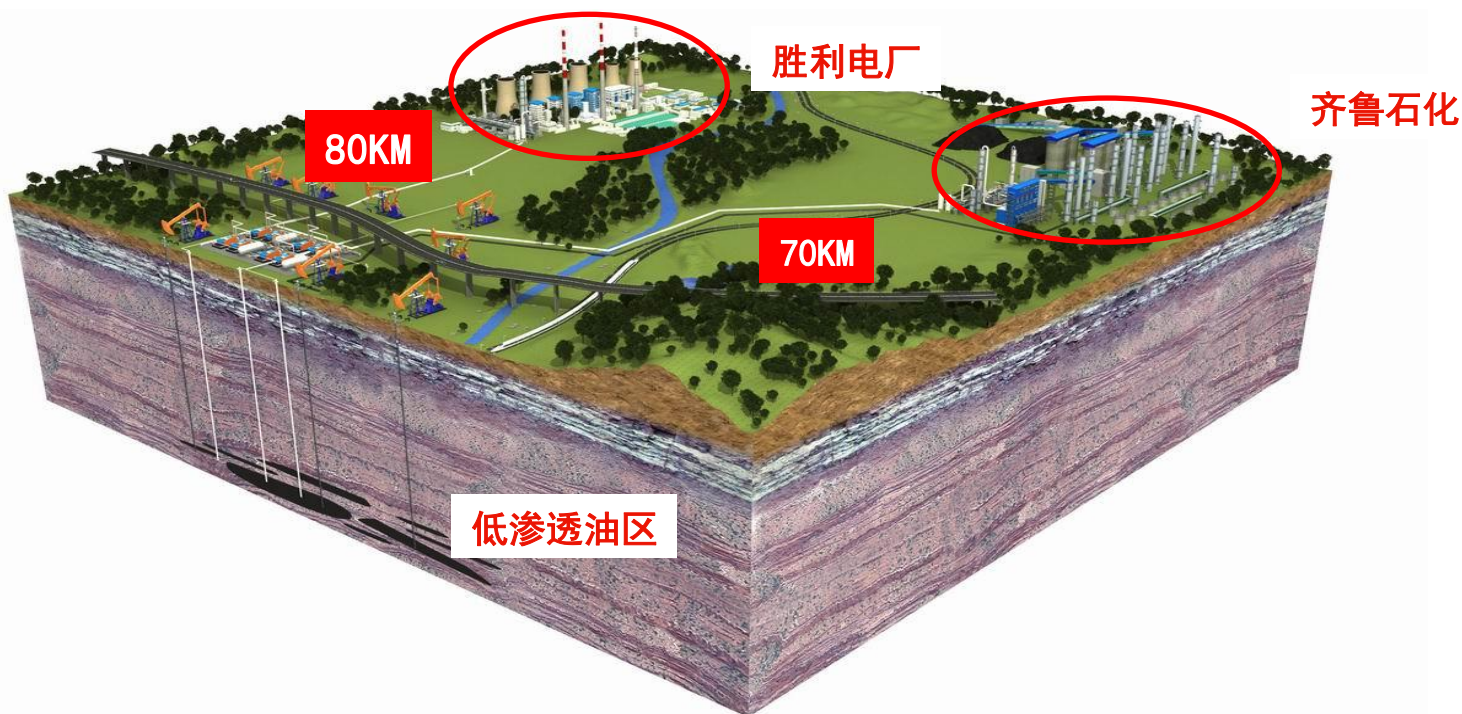
目前二氧化碳管道输送技术的研究部分成果已成功应用于该工程，为管道的安全运行提供了技术支持。该工程投产后已安全稳定运行3年多。



三、CCUS工程实践

(三) 开展了三项大规模CO₂捕集、输送及驱油封存工程项目前期设计

- 齐鲁石化煤制气50万吨/年CO₂捕集、输送与驱油封存工程，**初设**
- 胜利电厂烟道气100万吨/年CO₂捕集、输送与驱油封存工程，**可研**
- 华东68万吨/年CO₂捕集、输送与驱油封存工程，**预可研**



三、CCUS工程实践

(四) 开展的CCUS技术委托项目

- 延长石油集团36万吨/年CCUS工程示范项目，中美元首项目，**可研**
- 华润海丰电厂100吨/天电厂烟气CO₂捕集纯化工程，**可研咨询**



延长石油36万吨/年CCUS工程示范



华润海丰100吨/天CO₂捕集纯化工程示意

三、CCUS工程实践

(五) 开展了二氧化碳强化深部咸卤水开采项目规划

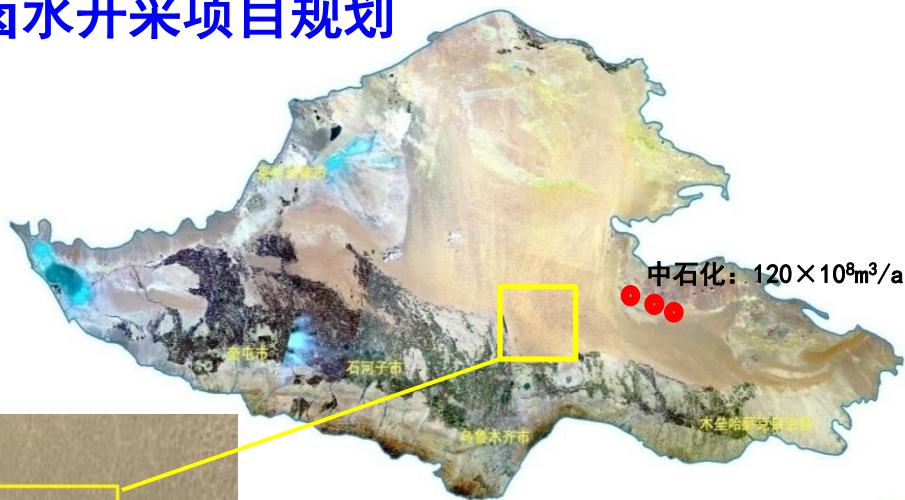


井深(m):660.4
井底深(m):56.53
套管深(m):508.0
套管下深(m):56.13

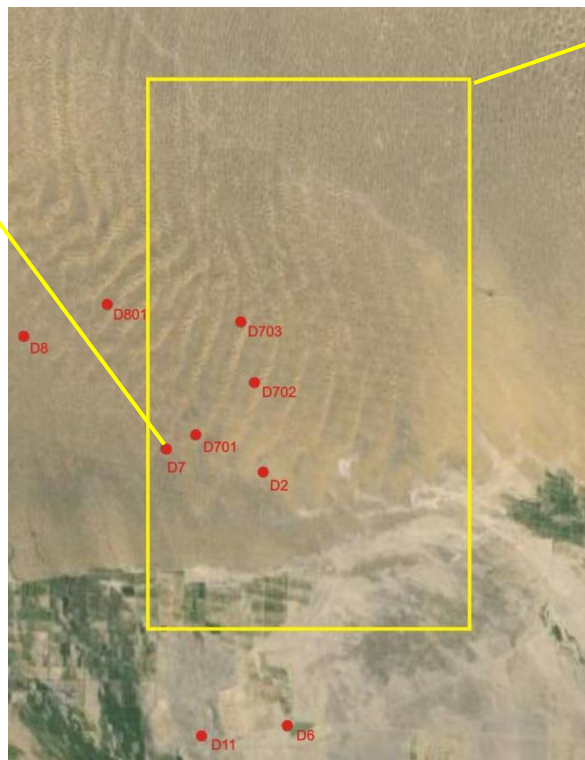
井径(mm):14.50
井底深(m):2.00
套管深(m):89.70
套管下深(m):600.25

二开:
井径(mm):311.20
井深(m):3920
套管外径(mm):244.50
套管下深(mm):3917.37

三开:
井径(mm):215.90
井深(m):5405.00
套管外径(mm):139.70
套管下深(mm):3750.00~5405.00



研究区位于准噶尔盆地南缘，在乌鲁木齐东北约100km。



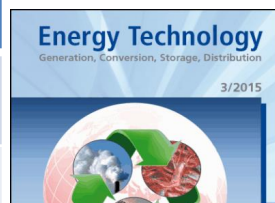
2017-2018年：开展CO₂-EWR单井小规模野外先导性试验，评价准噶尔盆地南缘工作区开展CO₂-EWR储存工程的可行性。

三、CCUS工程实践

知识产权

近年来，CCS研究组在CCUS领域发表论文70余篇，申报专利40余项，软件著作权2项，出版译著2本，编写CO₂捕集国家标准1项、CO₂管道输送行业标准1项，CO₂驱腐蚀防腐企业标准1项。

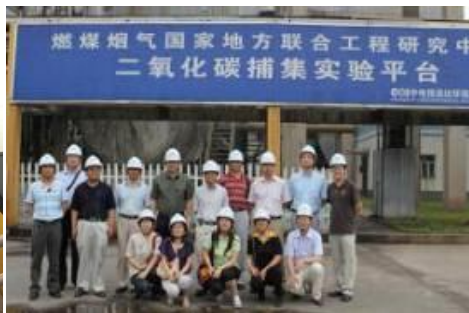
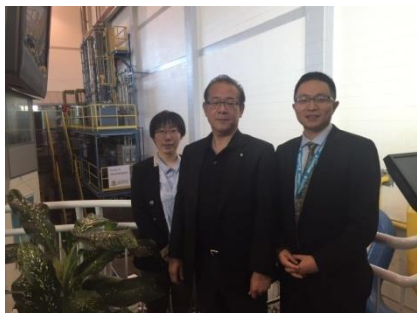
名称	类型	专利号/登记号
降低烟气CO ₂ 捕集系统能耗提高CO ₂ 回收率的装置	发明	ZL201210304297
烟气的预处理及二氧化碳捕集纯化回收装置	发明	ZL201310599678
用于体视显微镜原位腐蚀分析的电解池	发明	ZL20121006793.0
多功能环道式油气水多相流腐蚀模拟试验装置	发明	ZL20121006772.9
采出气回收和脱出CO ₂ 气体的脱碳溶液	发明	ZL201310070382.0
CCS-EOR经济成本与碳减排核算软件	软著	2015SR033370
烟气二氧化碳捕集纯化工程设计规范	标准	正在编制
二氧化碳输送管道工程 工程设计规范	标准	正在编制
.....



三、CCUS工程实践

团队建设

经过多年技术开发和工程实践，已在CO₂捕集与驱油封存领域培养了一批专业科技人才。另外，已与国内外多家高校、研究机构强强联合，组成了“产学研用”一体化的研究团队。



三、CCUS工程实践

国际合作与交流

研究组与SHELL Cansolv、DNV、西门子、Saskpower、ASPEN、斯伦贝谢等企业以及美国弗吉尼亚州立大学、肯塔基大学、俄亥俄大学等开展了战略合作和联合攻关，具备良好的国际合作交流基础。在国家科技部领导下，参加了中美气候变化工作组框架下的中美合作项目以及中欧NZEC项目，目前正在积极推进。



莱斯大学交流

Schlumberger



肯塔基大学交流



SIEMENS

JUPITER OXYGEN CORPORATION





合作共赢 开创未来

联系人：陆诗建

职务：项目经理

邮箱：lushijian88@163.com

电话：15154613657

