热采锅炉烟道气辅助稠油开采技术

Technology for Boiler Flue Gas Assisted Heavy Oil Recovery

李兆敏

中国石油大学（华东）

前 瞻

2015巴黎气候大会上习近平主席向世界庄严承诺：将于2030年左右使二氧化碳排放达到峰值并争取尽早实现，2030年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%－65%。

中美两国将在陕西延长油田开展CCUS项目，利用二氧化碳提高采收率。

二氧化碳捕集、利用与封存（CCUS）是目前低碳发展的必然选择，但高能耗与高成本制约该技术的发展，亟需形成新型的CCUS技术理论体系。

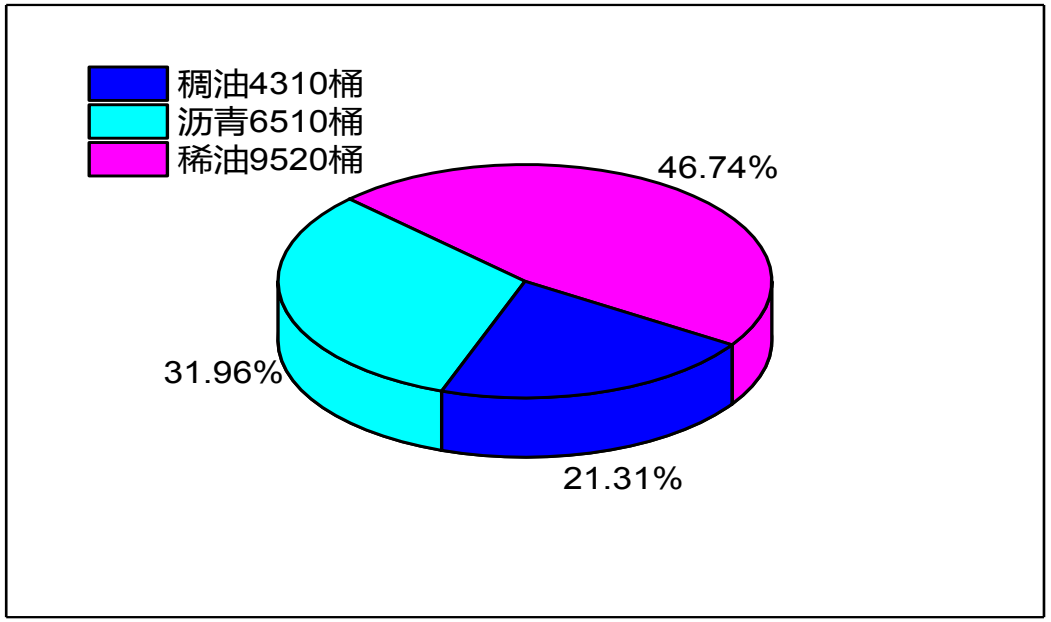
目 录

- 一、稠油开发概况(Overview)
- 二、开采机理研究(Mechanism)
- 三、开发技术研究(Technology)
- 四、结论及认识(Conclusion)
- 五、研究基础(Foundation)
- 六、研究展望(Prospective)

一、稠油开发概况

世界稠油资源状况

- 稠油是一种重要的石油资源，世界稠油、超稠油和天然沥青的储量约为4000-6000亿吨，**储量超过常规稀油的储量**；
- 我国探明的稠油地质储量约为20.6亿吨，占石油资源总量的20％以上，已成为**我国原油开采生产重要的组成部分。**

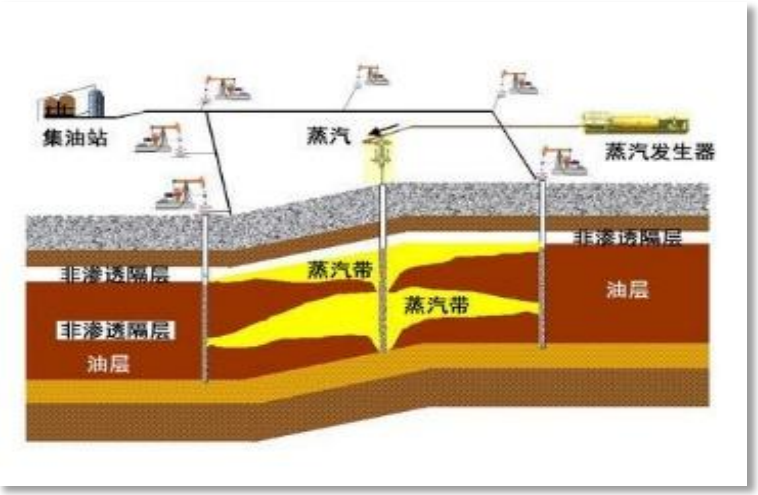


世界探明石油剩余可采储量组成

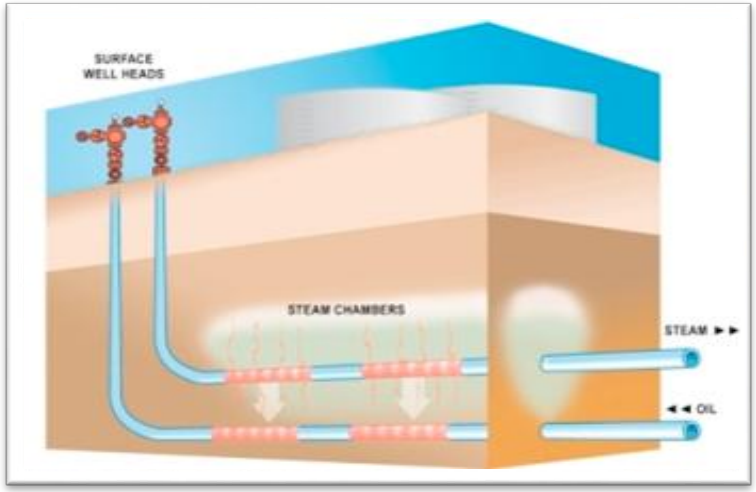
一、稠油开发概况

稠油开发技术

- 稠油在油层中的粘度高，流动阻力大，因而用常规技术难以经济有效地开发；
- 稠油自上个世纪60年代开始工业化生产，稠油开采技术发展较快，可分为**热采和冷采**两类，其中以蒸汽吞吐、蒸汽驱、火烧油层、SAGD等热力开采为主。



稠油蒸汽吞吐开发工艺

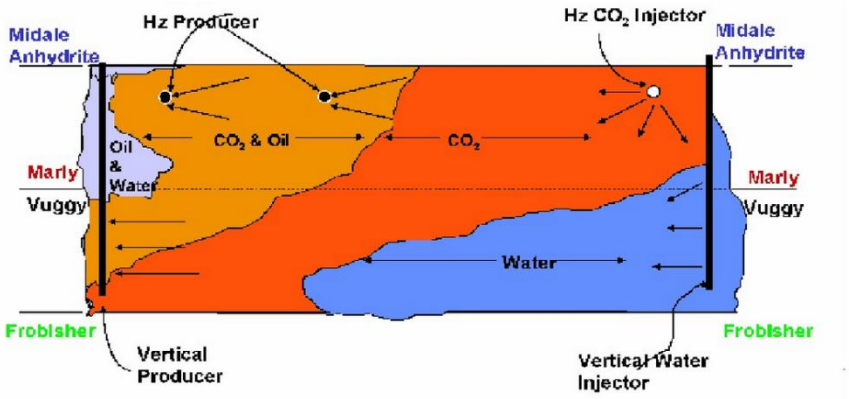


稠油SAGD开发工艺

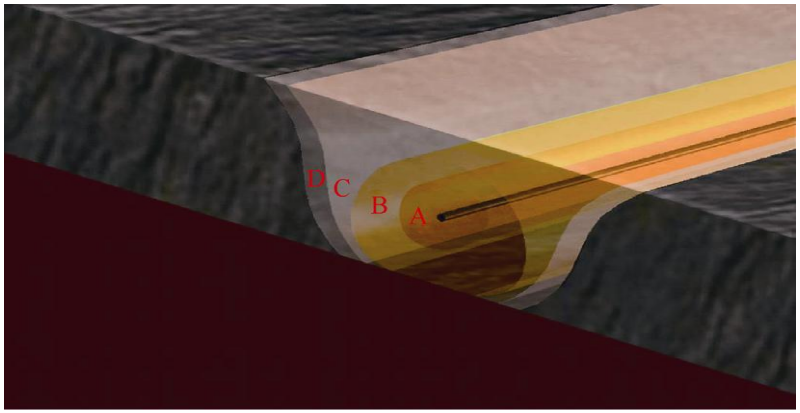
一、稠油开发概况

稠油开发存在的问题

- 传统热采方式在稠油开发中发挥了显著作用，但是对深层、薄层稠油和特超稠油难以有效开发，并且投入较高，经济效益较差；
- CO_2、N_2辅助稠油开发技术(HDCS、HDNS、SAGP)能大幅改善稠油油藏的开发效果，可有效解决制约稠油持续稳产的瓶颈问题，为新型CCUS技术的应用提供了可行性。



CO_2辅助稠油开发工艺



超稠油HDCS开发工艺

一、稠油开发概况

烟道气开采稠油

烟道气通常含有80%-85%的N_2和10%-15%的CO_2，气源充足，完全能满足油田非烃类气驱的用气需求。

注汽站10台23t/h注汽锅炉

一、稠油开发概况

我国烟道气资源量丰富

- 火力发电厂是烟道气最主要的来源；
- 注汽锅炉和其它工业锅炉是烟道气的重要来源：据统计，辽河油田、胜利油田、新疆油田、河南油田有工业注汽锅炉400台左右；
- 根据测算，某分公司热采锅炉烟道气排放量预计达到66亿Nm^3

某分公司热采锅炉注汽量及烟道气排放量

注汽量/10^4t	燃油消耗/10^4t	烟道气排放量/10^8Nm^3
316	19.592	29.388
372	23.064	34.596
477	29.574	44.361
——	0	0
559	34.658	51.987
712	44.144	66.216

一、稠油开发概况

烟道气辅助稠油开采技术：

- 优势一：稠油热采锅炉烟道气资源量丰富；
- 优势二：烟道气注入地层可减少CO_2排放；
- 优势三：烟道气注入可以提高稠油采收率。

是一项具有生命力的CCUS新技术！

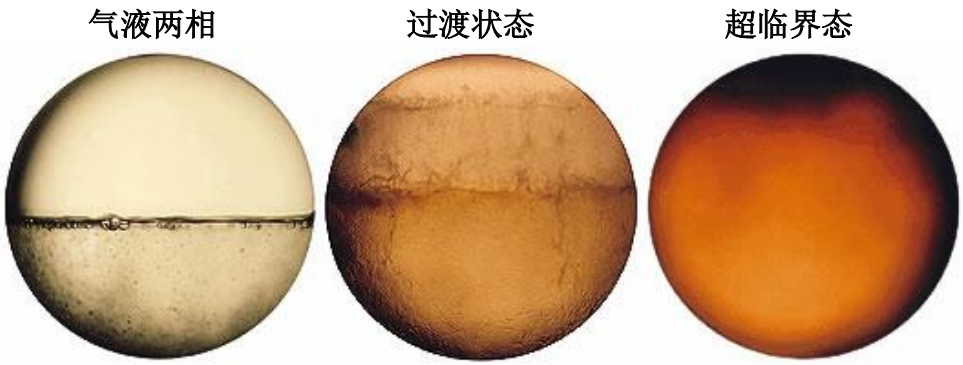
目 录

- 一、稠油开发概况(Overview)
- 二、开采机理研究(Mechanism)
- 三、开发技术研究(Technology)
- 四、结论及认识(Conclusion)
- 五、研究基础(Foundation)
- 六、研究展望(Prospective)

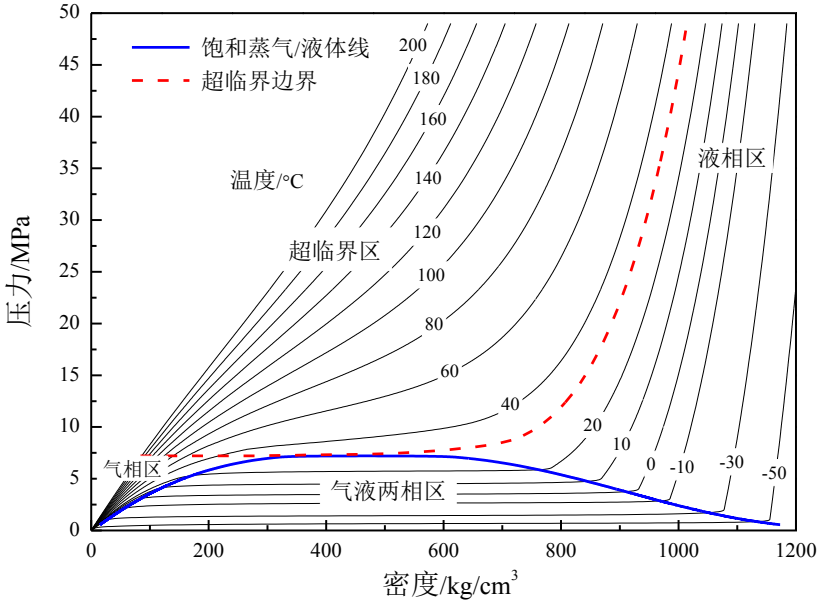
二、开采机理研究

2.1 CO_2作用机理

- 降低原油粘度
- 原油体积膨胀
- 降低界面张力
- 改善地层渗透率
- 混相效应



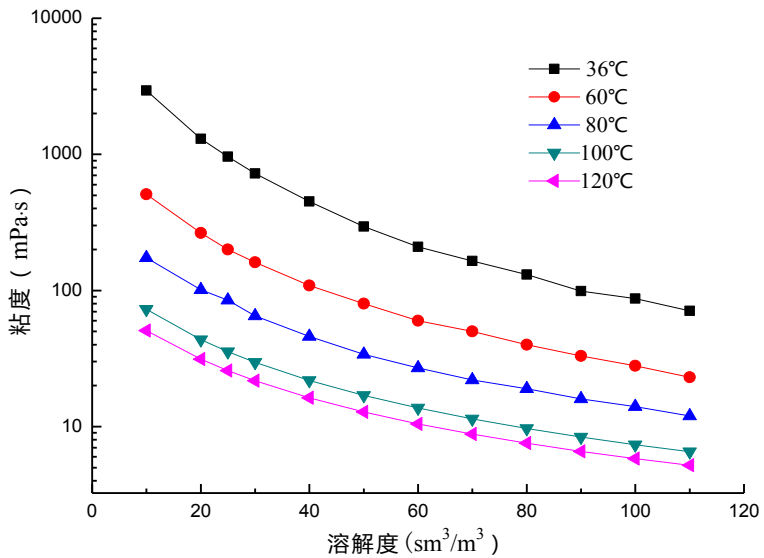
CO_2相态变化特征



二、开采机理研究

2.1 CO_2作用机理

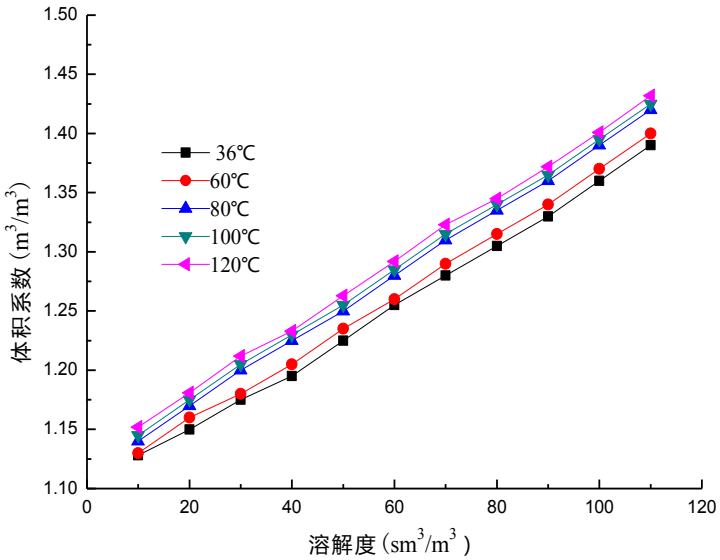
□ 降低原油粘度



不同温度下CO_2溶解度与粘度关系曲线

随着CO_2溶解度的增大，原油粘度逐渐降低，且温度越高，原油粘度越低

□ 原油体积膨胀



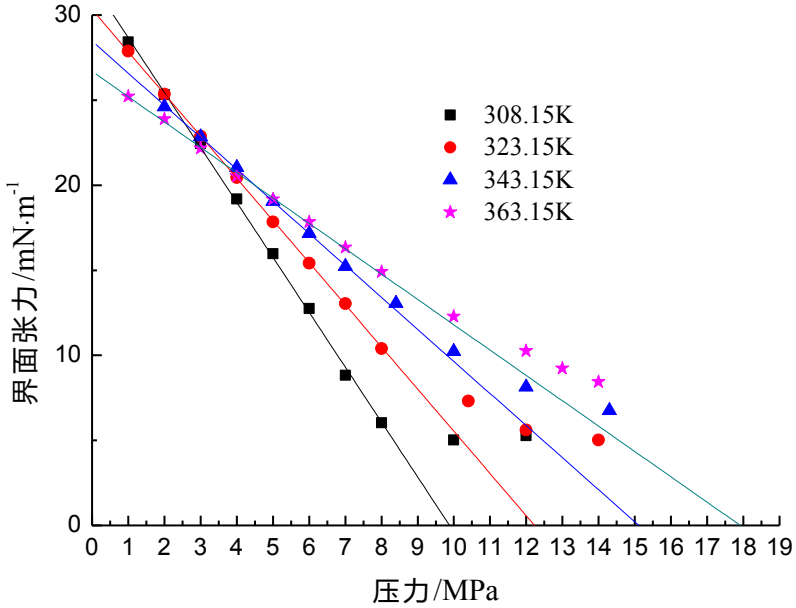
不同温度下CO_2溶解度与体积系数关系

稠油溶解CO_2后体积系数随CO_2溶解度增加线性增加，随着温度的升高而略有增加

二、开采机理研究

2.1 CO_2作用机理

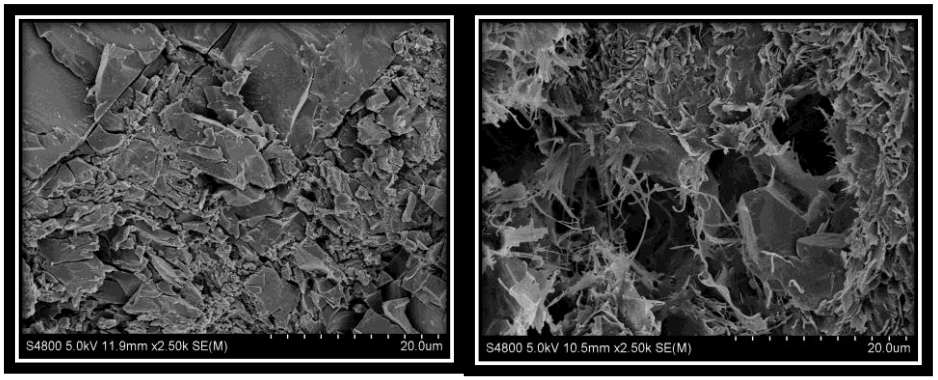
□ 降低界面张力



CO_2-稠油界面张力随压力变化曲线

CO_2-稠油界面张力随压力增加逐渐减小,且温度越高,界面张力相对较大

□ 改善地层渗透率



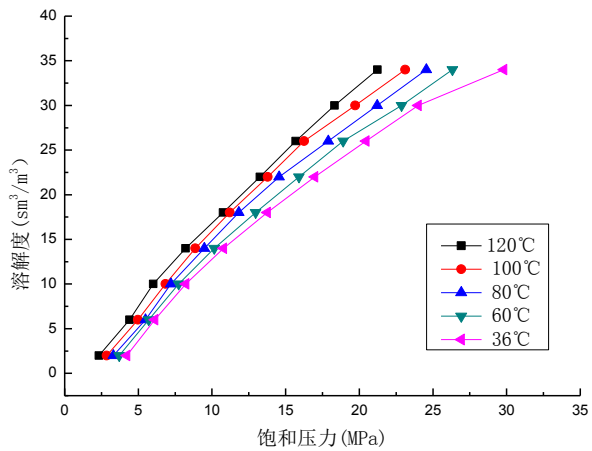
放大倍数为2500倍的扫描电镜图

CO_2作用前	CO_2作用后
✓岩石颗粒胶结致密	✓岩石颗粒疏松
✓粒间孔隙发育差	✓粒间孔隙发育充分
✓连通性差	✓连通性变好

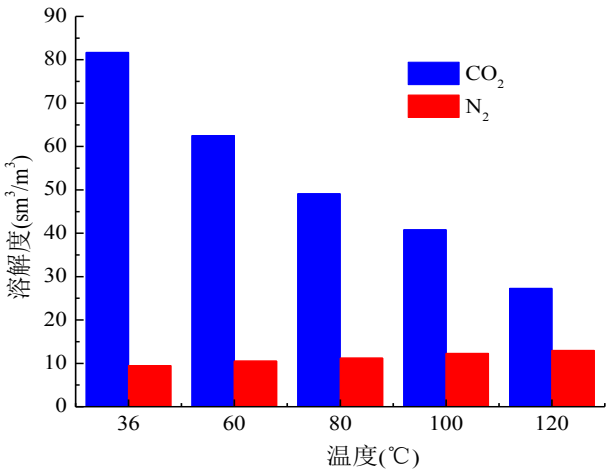
二、开采机理研究

2.2 N_2作用机理

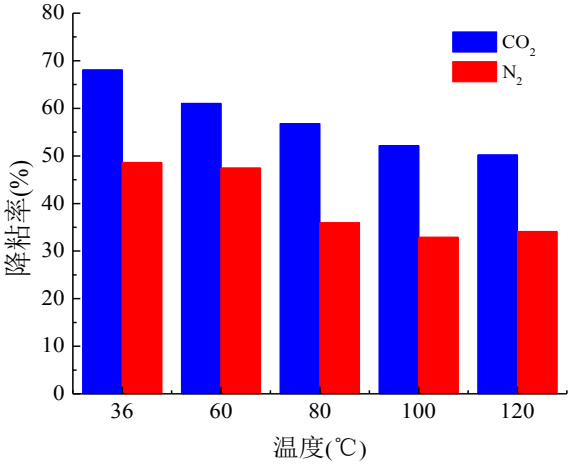
□ 降低原油粘度



不同温度下CO_2溶解度与饱和压力关系曲线



不同温度下CO_2与N_2溶解度对比图(8MPa)



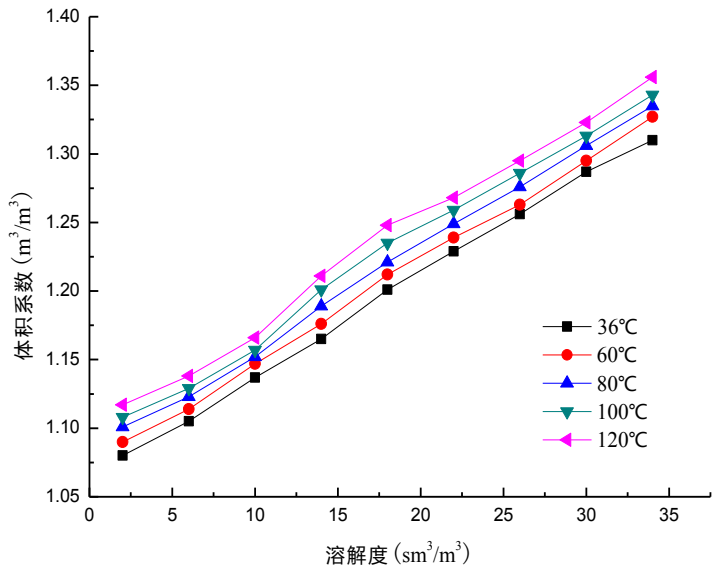
不同温度下CO_2与N_2降粘率对比图(10sm³/m³)

- ✓相同压力条件下，CO_2在原油中的溶解性要优于N_2
- ✓ N_2溶于原油，可以降低原油粘度，但是在相同溶解度相同条件下，CO_2降粘效果更好

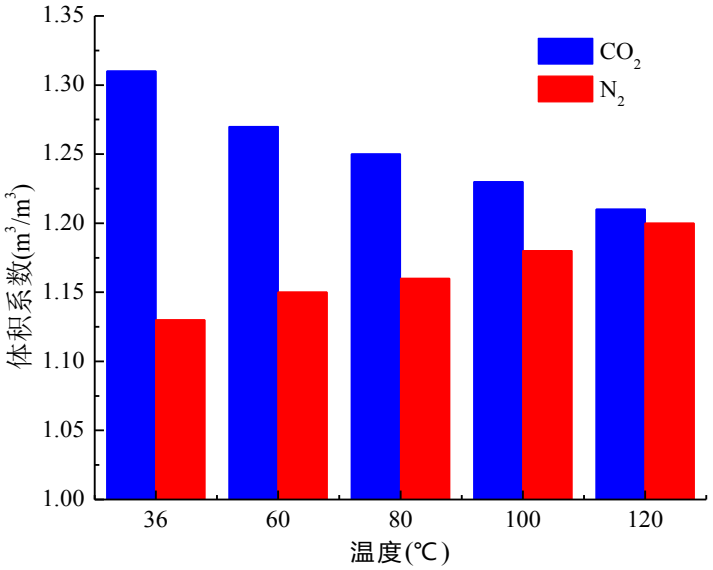
二、开采机理研究

2.2 N_2作用机理

□ 原油体积膨胀



不同温度下N_2溶解度与体积系数关系



不同温度下CO_2与N_2体积系数对比图(8MPa)

- ✓N_2溶于原油，使得原油体积膨胀。
- ✓由于N_2在原油中的**溶解度小于**CO_2，在相同压力条件下，体积膨胀量较小

二、开采机理研究

2.3 烟道气作用机理

几种燃料对应的烟气成分表

燃料	烟气组成 (w,%)				
	CO_2	N_2	O_2	H_2O	SO_2
重油	17.15	71.54	3.60	7.42	0.29
柴油	11.05	73.48	3.25	12.22	0.012
天燃气	13.84	71.96	1.99	12.21	—
混烧燃料	11-17	64-74	4-6	9-15.5	—

- ✓ 烟道气主要由N_2和CO_2组成
- ✓ 它的驱油机理主要为N_2和CO_2驱油机理的综合作用，烟道气可充分利用N_2和CO_2各自的驱油优势

二、开采机理研究

2.3 烟道气作用机理

- 保持油藏压力

烟道气中的氮气在原油及地层水中的溶解性较差且具有良好膨胀性，有利于保持油藏的压力，提高原油的采收率。

- 混相/非混相效应

由于烟道气中二氧化碳的浓度不高，混相驱的机理所起的作用不是很强，主要是利用烟道气的非混相驱机理。

- 酸化作用

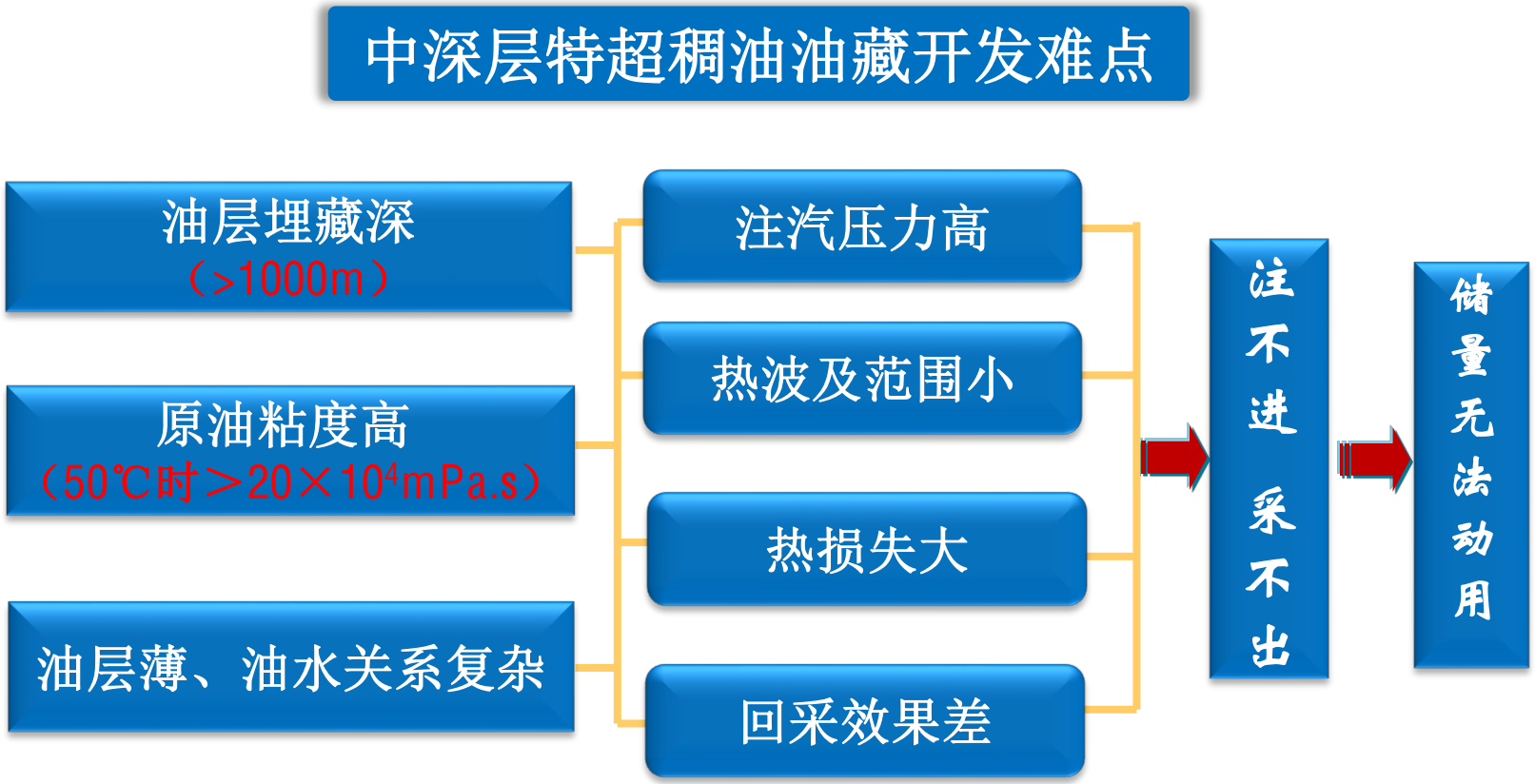
二氧化碳溶于地层水中可形成碳酸，它的酸化作用会使岩石中的一些矿物成分被溶蚀，增强了岩石的渗流能力。

目 录

- 一、稠油开发概况(Overview)
- 二、开采机理研究(Mechanism)
- 三、开发技术研究(Technology)
- 四、结论及认识(Conclusion)
- 五、研究基础(Foundation)
- 六、研究展望(Prospective)

三、开发技术研究

3.1 特超稠油HDCS强化采油技术



三、开发技术研究

3.1 特超稠油HDCS强化采油技术

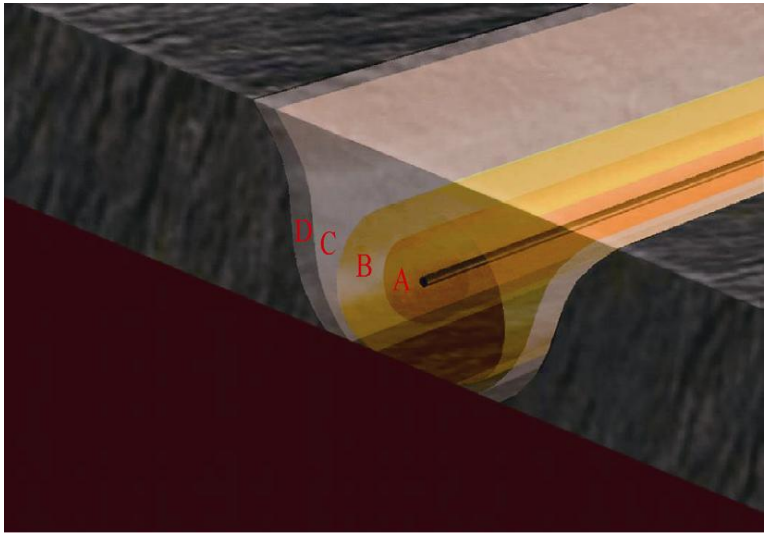
超稠油HDCS强化采油技术

H -- 水平井(Horizontal well)

D -- 降粘剂(Dissolver)

C -- CO_2(Carbon dioxide)

S -- 蒸汽(Steam)



HDCS注入模型示意图

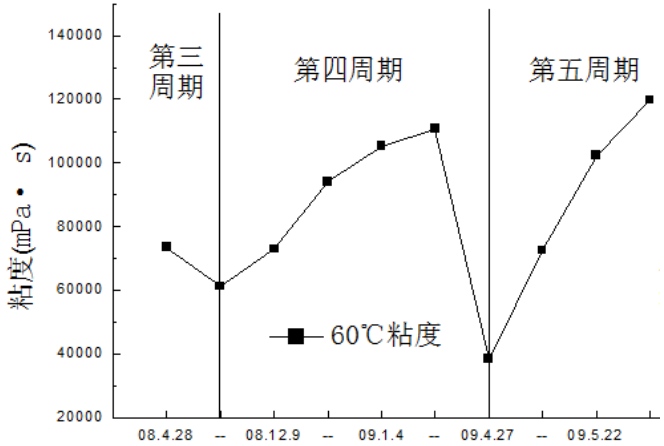
- HDCS强化采油技术，采用高效油溶性复合降粘剂和CO_2辅助水平井蒸汽吞吐➡协同降粘、混合传质及增能助排➡降低注汽压力、扩大热波及范围
- 能实现50℃地面脱气原油粘度在20×10^4mPa·s以上、埋深大于1000m特超稠油油藏的有效开发

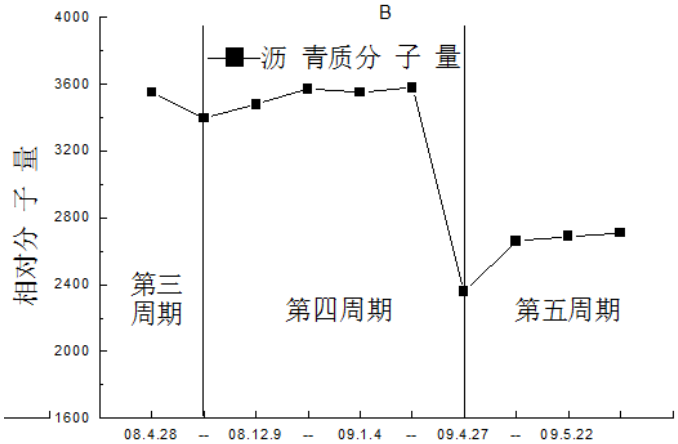
三、开发技术研究

3.1 特超稠油HDCS强化采油技术

现场应用：2009年中国石油化工集团科技进步一等奖

二氧化碳辅助超稠油复合吞吐工艺已在胜利油区的三大油藏类型7个区块得到广泛推广应用，包括以郑411、草109、单113、草104为主的中深薄层特超稠油区块，以坨826为主的强边底水影响的中深厚层特超稠油油藏，以草705、草南为主的中浅薄层特超稠油油藏。开发动态呈现以下特点：





- 注汽压力明显下降，注汽质量大幅提高
- 周期产油量、油汽比等开发指标大幅上升，开发效果明显提高
- 回采原油粘度明显降低，且始终作用于生产全过程

三、开发技术研究

3.2 特超稠油HDNS强化采油技术

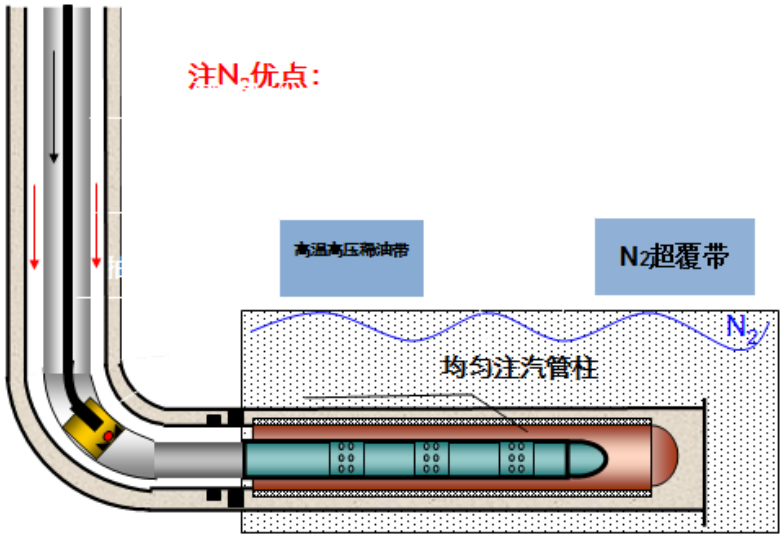
浅薄层特超稠油HDNS技术

H -- 水平井(Horizontal well)

D -- 降粘剂(Dissolver)

N – 氮气（Nitrogen)

S -- 蒸汽(Steam)



HDNS注入示意图

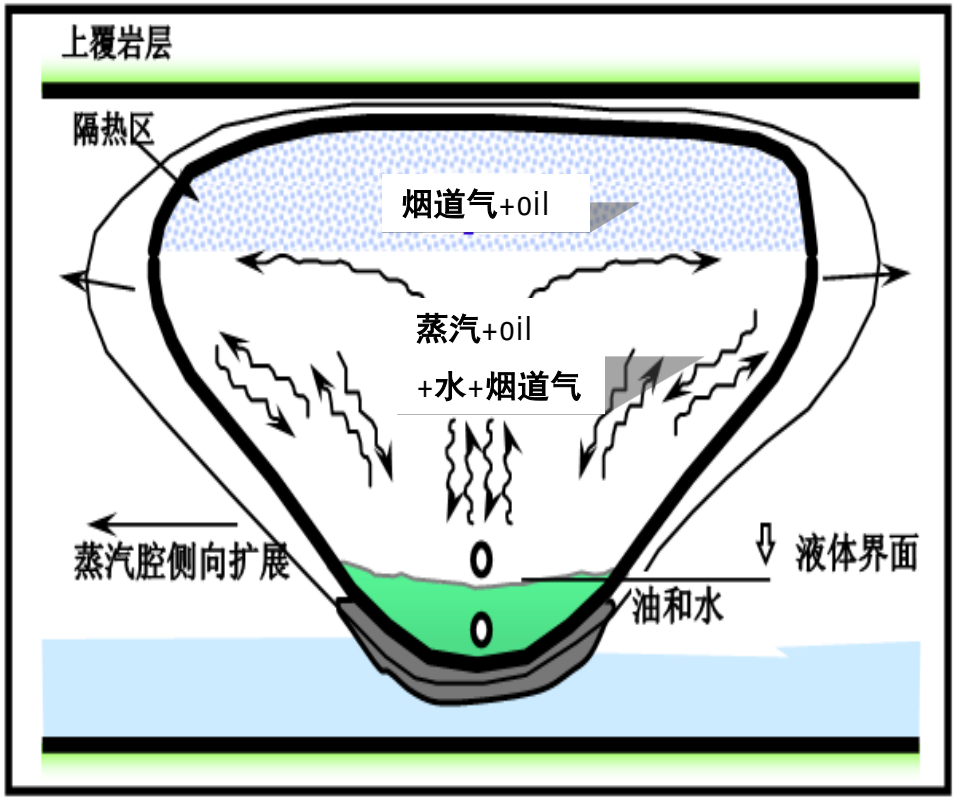
- HDNS强化采油技术是经过理论与实践，逐步形成的针对新疆等浅薄层特超稠油开发技术。
- 与CO_2相比，氮气或烟道气的溶解降粘作用降低，但是弹性能增加，助排作用增强

三、开发技术研究

3.3 烟道气辅助SAGD开采技术

烟道气辅助SAGD技术原理

- 烟道气辅助SAGD技术是在SAGD过程中加入非凝析气体烟道气，注入的烟道气在油层的上部聚集
- 降低热损失，降低蒸汽用量，提高油汽比



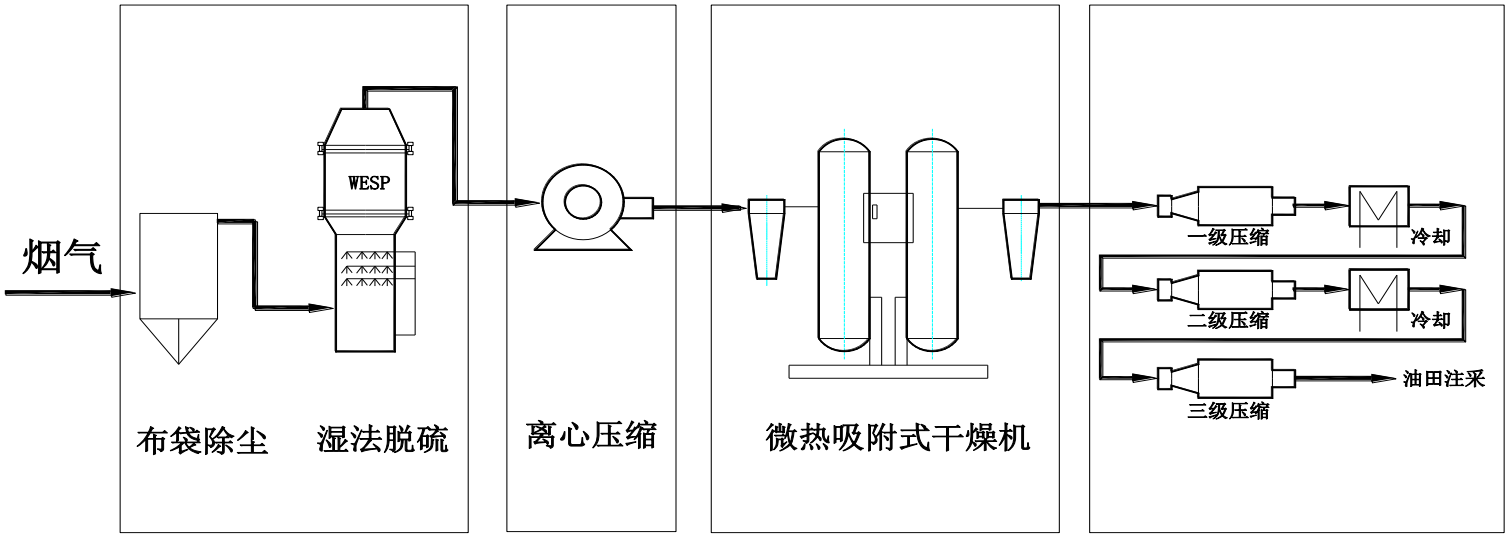
双水平井烟道气辅助SAGD技术原理图

三、开发技术研究

3.3 烟道气辅助SAGD开采技术

设计了热采锅炉烟道气处理与压缩系统

完成了烟气压缩中试方案的设计与选型



烟气预处理单元　离心压缩单元　脱水单元　活塞压缩单元

系统特点与优势：

- 湿式静电装置，实现烟气的深度净化
- 两级压缩，初级压缩实现污染物的迁移和净化，后级压缩增压至所需压力
- 深度脱水，避免后续压缩机的腐蚀和堵塞

三、开发技术研究

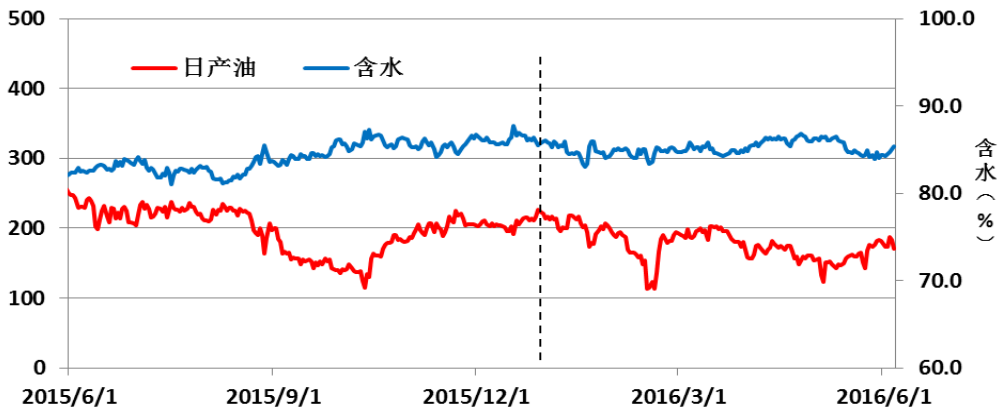
3.3 烟道气辅助SAGD开采技术

烟道气辅助SAGD应用

优选先导试验区开展现场试验，日注烟道气量4.43万标方，累注261.3万标方。截至目前对比常规SAGD**节约注汽量9.2万吨**，油汽比由**0.16提高到0.2**。

烟道气辅助SAGD生产效果对比表

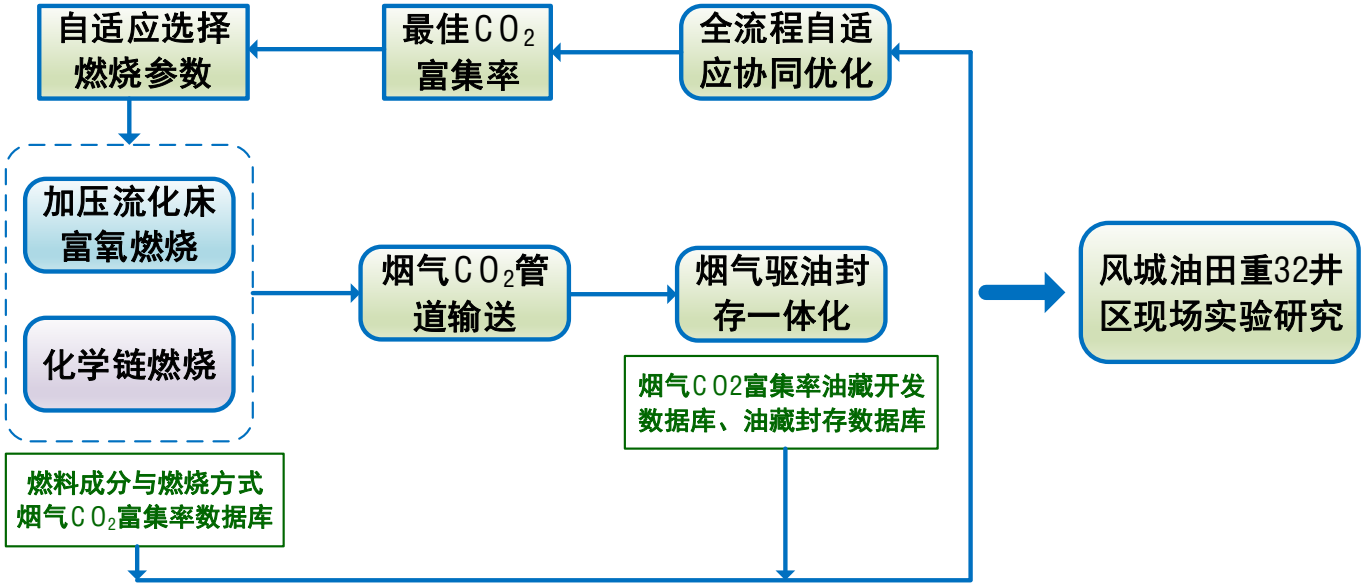
类别	天数	注汽量	产液量	产油量	含水
烟道气辅助	158天	900	1194	177	85.2
氮气辅助	158天	1098	1271	186	85.4
同期SAGD	158天	1480	1657	234	85.9

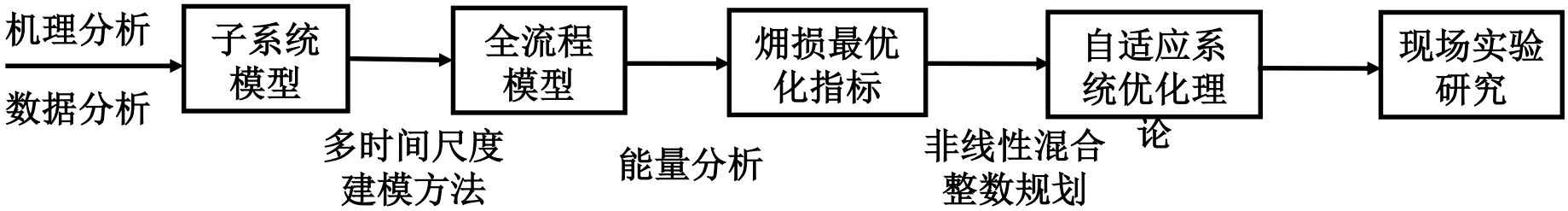


烟道气辅助SAGD区域生产曲线

三、开发技术研究

3.4 基于能量的全流程自适应协同优化





基于能量分析，运用智能优化原理，建立基于CO_2富集率的全流程自适应协同优化理论。

目 录

- 一、稠油开发概况(Overview)
- 二、开采机理研究(Mechanism)
- 三、开发技术研究(Technology)
- 四、结论及认识(Conclusion)
- 五、研究基础(Foundation)
- 六、研究展望(Prospective)

四、结论及认识

- CCUS捕集、埋存及资源化利用的研究工作是油气工作者和环保人士关注的焦点，且注汽锅炉烟道气全利用技术是目前科技工作者十分关注的低成本稠油开采技术；
- CO_2驱提高采收率技术应用在混相驱和低渗、低粘度油藏；SC-CO_2在稠油、敏感性油藏、断块油气藏、页岩气等的开发中必将发挥更加重要的作用；
- 加强油藏注CO_2降低混相压力技术、极难混相油藏的非混相和近混相驱技术、注气流度调整技术的研究；
- 加强烟道气全过程优化设计。

目 录

- 一、稠油开发概况(Overview)
- 二、开采机理研究(Mechanism)
- 三、开发技术研究(Technology)
- 四、结论及认识(Conclusion)
- 五、研究基础(Foundation)
- 六、研究展望(Prospective)

五、研究基础

烟气/二氧化碳净化压缩试验台（课题组）

五、研究基础

大型三维热采物理模拟装置

研发了热/化学/气体辅助稠油开发三维物理模拟实验装置，研究热化学复合体系注入过程中降粘剂、CO_2的扩散规律，气体对降粘剂扩散的影响，流体性质的变化等。

五、研究基础

发明专利　授权发明专利18项

（1）一种测量二氧化碳在饱和油岩心中扩散系数的方法，　ZL 201210307962.2
（2）一种测量二氧化碳在岩石中扩散系数的方法，　ZL 201210222193.6
（3）一种测量二氧化碳在岩石中扩散系数的装置，　ZL 201210223105.4
（4）一种测量二氧化碳驱油过程滞留率的装置及方法，　ZL 201410747382.4
（5）一种基于CO_2辅助SAGD开采超稠油油藏的CCUS系统及方法，ZL 201310175405.4
（6）一种地层渗流条件下稠油降粘剂降粘效果评价方法及装置，　ZL201310414311.8
（7）一种评价气溶性表面活性剂起泡性能的装置及其应用，　ZL201410212430.X
（8）气溶性表面活性剂用于二氧化碳驱油流度控制中的方法，　ZL 201410212430.X
（9）热化学辅助强化蒸汽驱油方法，　ZL200810015696.X
（10）一种测量并联岩心泡沫驱气相分流量的装置及方法，　ZL2012103091045.0
（11）一种测量并联岩心泡沫驱气相饱和度的装置及方法，　ZL201210307944.4
（12）一种测量单管岩心泡沫驱气相饱和度的装置及方法，　ZL 201210307965.6
（13）一种泡沫驱油用粘土稳泡复合剂及其制备方法与应用，　ZL201410004181.5
（14）一种油气田用添加纳米颗粒的复合泡沫体系及其制备方法，　ZL201210223060.0
（15）一种测定表活性在超临界CO_2和水两相分配系数的方法，　ZL201510170515.0
（16）一种测定CO_2乳液在渗流过程中表活剂浓度的装置及方法，　ZL201510169961.X
（17）超临界CO_2乳液稳定性评价装置及方法，　ZL201410064839.1
（18）泡沫调驱剂、驱油体系以及驱油方法，　ZL 200810128146.9

五、研究基础

发明专利　另申请发明专利9项

（1）一种基于微观可视技术的超临界二氧化碳溶解性能测定装置及方法，	CN201510227074.3
（2）一种测量CO_2从水相向油相扩散系数的装置及其工作方法，	CN201410778874.X
（3）一种测量CO_2从水相向油相扩散过程中扩散系数和平衡浓度的方法，	CN201410777991.4
（4）一种气体扩散速度测定装置及应用，	CN201410488108.X
（5）一种基于蒸汽引射的油田注汽锅炉烟气资源化利用系统及其应用，	CN201510226820.7
（6）一种测量烟气对井下管柱腐蚀速率的装置及其应用，	CN201410188271.4
（7）一种基于水力引射技术的蒸汽、烟气辅助稠油开采系统及工艺方法，	CN201510227342.1
（8）一种可降低二氧化碳与原油最小混相压力的超临界二氧化碳微乳液，	CN201510053933.1
（9）一种中低渗稠油油藏水平井分段压裂蒸汽吞吐方法，	CN201510504698.5

授权实用新型专利5项

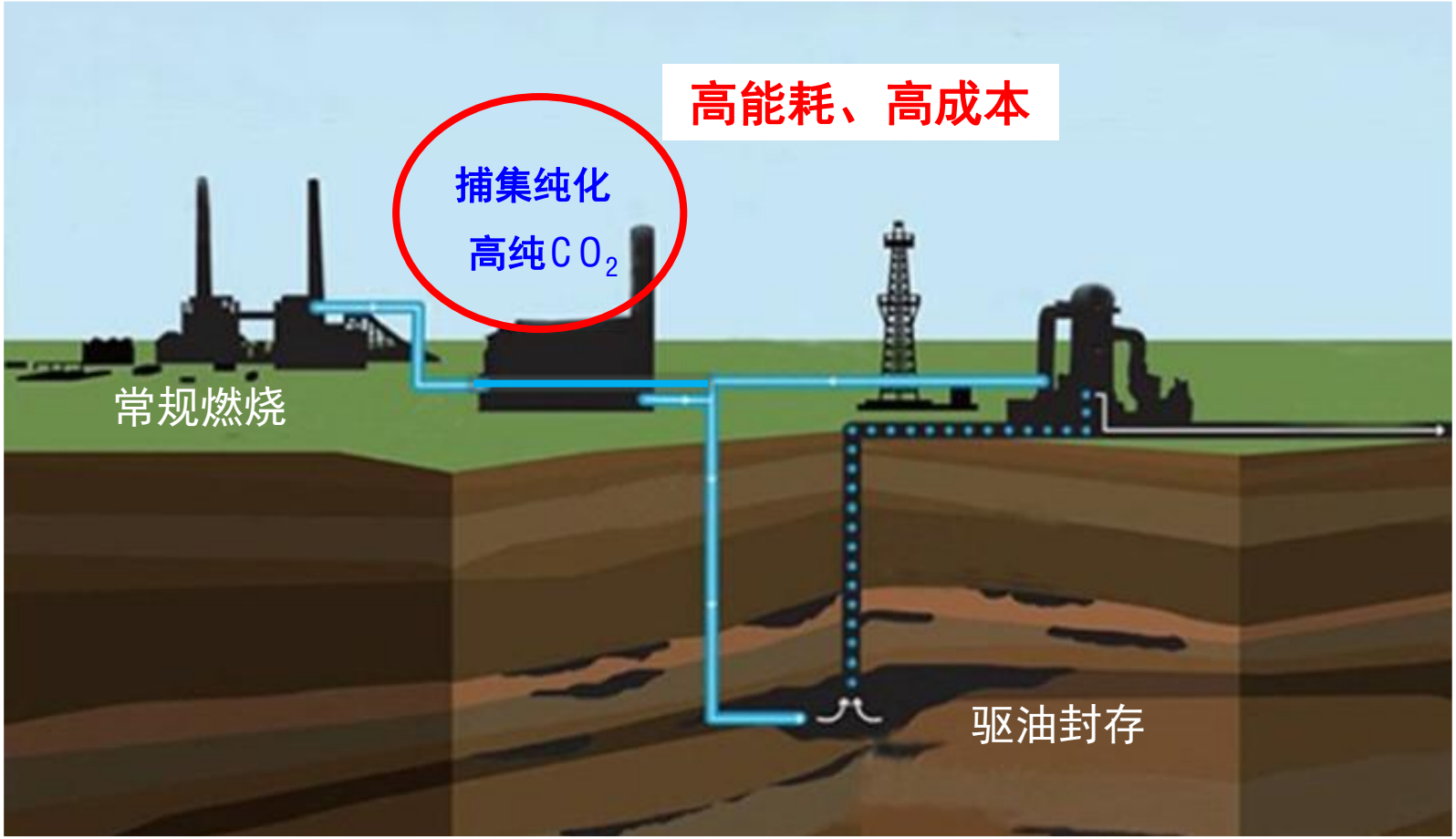
（1）一种油田注采用烟道气压缩净化装置，	ZL 201320320293.2
（2）高温高压即时取样大型三维物理模型，	ZL 201020265252.4
（3）油田污水与锅炉烟气混浴双向净化装置，	ZL 201420091106.2
（4）同炉蒸汽烟气混注热力采油装置，	ZL 201420040406.8
（5）泡沫发生器，	ZL200420097112.5

目 录

- 一、稠油开发概况(Overview)
- 二、开采机理研究(Mechanism)
- 三、开发技术研究(Technology)
- 四、结论及认识(Conclusion)
- 五、研究基础(Foundation)
- 六、研究展望(Prospective)

六、研究展望

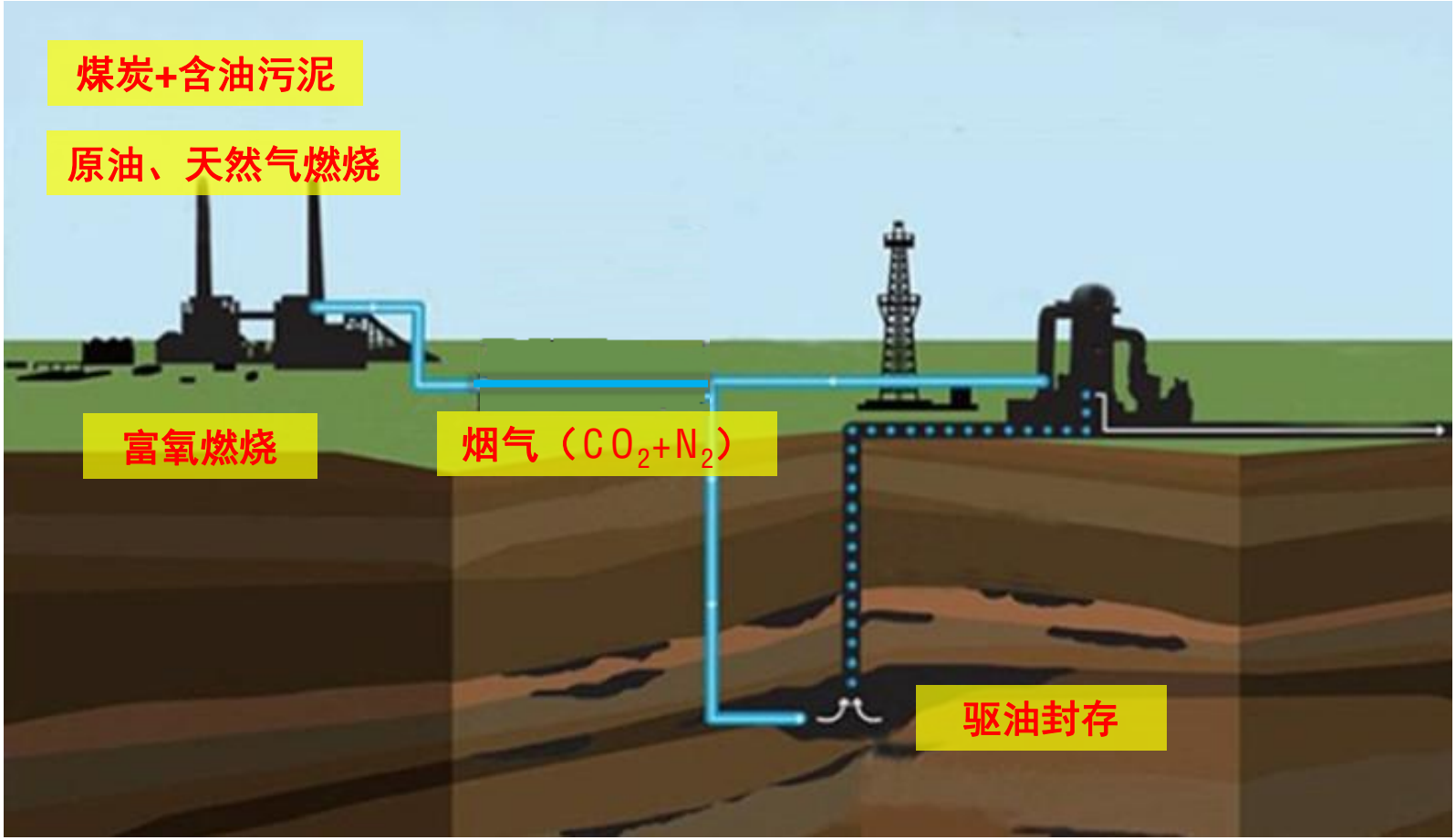
◆传统CCUS技术



六、研究展望

◆新型CCUS技术理念：

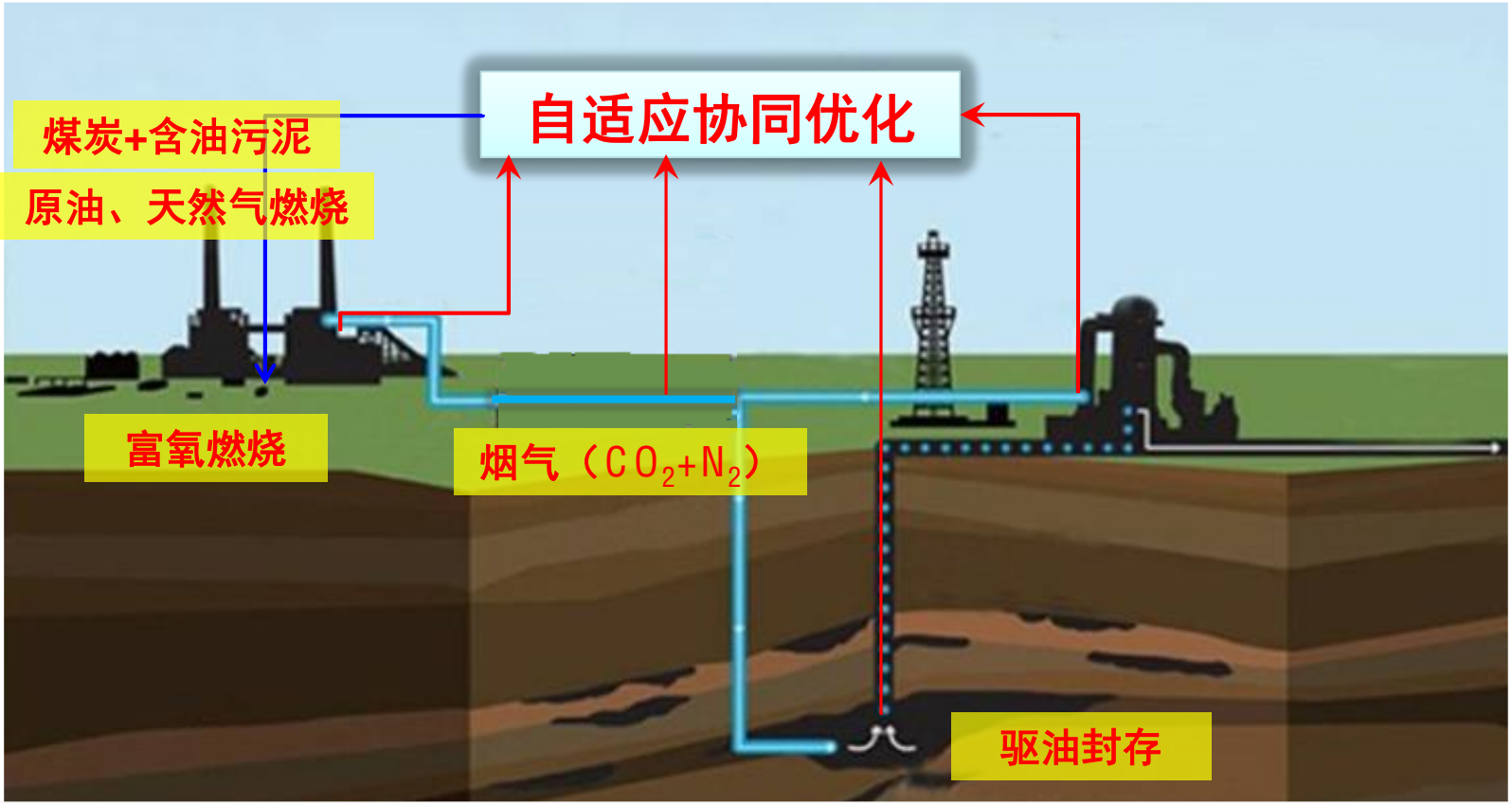
烟气（CO_2+N2）+EOR



六、研究展望

◆新型CCUS技术理念：

烟气（CO_2+N2）+EOR



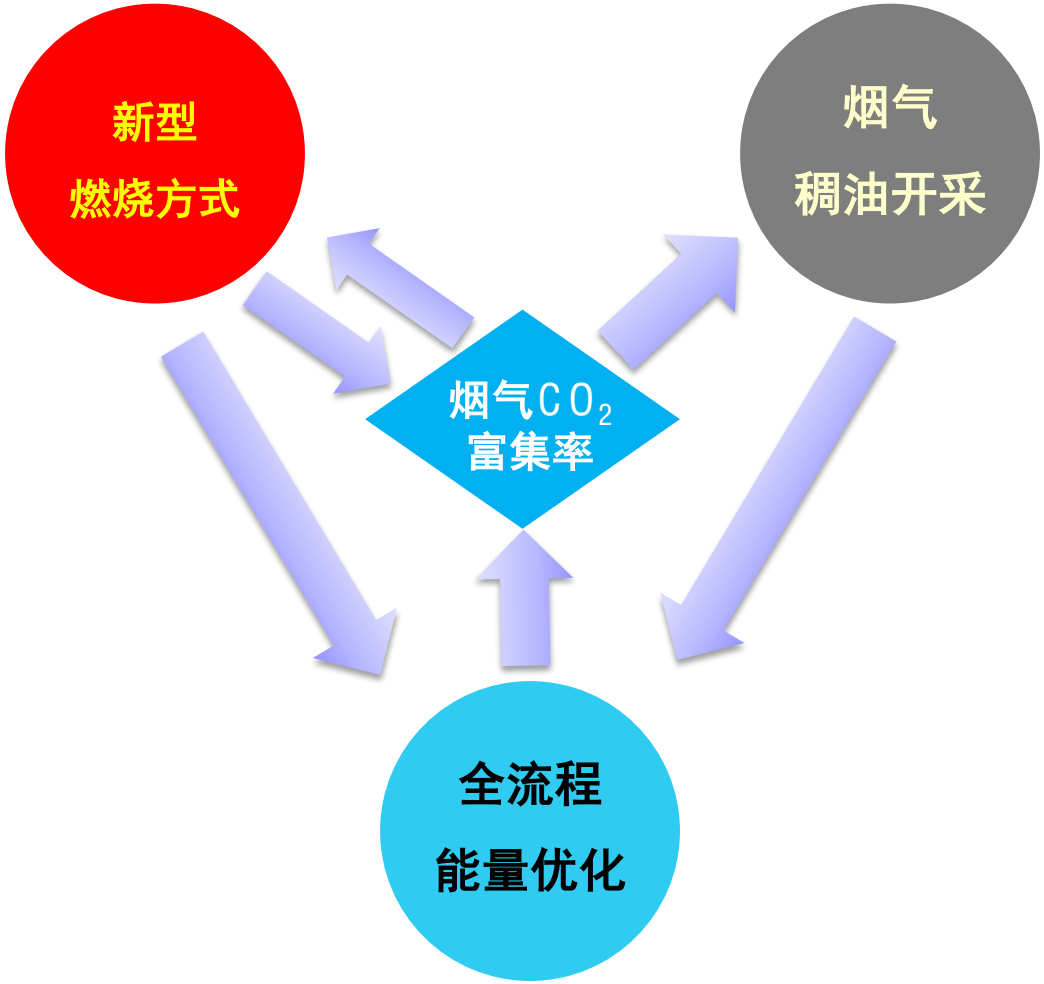
通过燃烧、输送、驱油封存各子系统的能量优化，以㶲损最低为目标，确定烟气中CO_2和N_2的比例，指导燃烧运行参数。

六、研究展望

1、基于加压富氧燃烧等新型燃烧方式实现烟气中CO_2富集浓度的可调节；

2、建立烟气驱油效率、CO_2封存率与烟气CO_2富集率的对应关系；

3、基于全流程能量优化，确定最佳烟气CO_2富集率，进而指导燃烧及驱油封存。



形成适度捕集的新型CCUS技术！

欢迎各位专家提出宝贵意见

谢谢

新疆油田公司工程技术研究院—中国石油大学(华东)

烟气辅助稠油开采联合实验室

ENGINEERING AND TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE OF XINJIANG OIL FIELD-CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM
JOINT LABORATORY ON FLUE GAS ASSITED HEAVY OIL RECOVERY

联系方式

lizhm@upc.edu.cn

中石化节能环保工程科技有限公司
中国石油大学(华东)化学工程学院

CCUS联合实验室