二氧化碳驱提高石油采收率数值模拟研究 *

关振良[1,2]　谢丛姣[1,2]　齐 冉[2]　Martin Blunt[2]
（1.中国地质大学资源学院　2.英国帝国理工学院地球科学与工程系）

关振良等.二氧化碳驱提高石油采收率数值模拟研究.天然气工业,2007,27(4):142-144.

摘　要　人类大量排放的 CO_2 温室气体使全球气候变暖,其幅度已经超出了地球本身自然变动的范围,对人类的生存和社会经济的发展构成了严重的威胁。CO_2 的地质处置最有效的方式就是注入油气田,不但封存了二氧化碳,而且还可提高油气田的采收率。针对这一问题,应用 Eclipse 软件对某油田注入 CO_2 进行水气交替驱等 6 套开发调整方案进行了数值模拟对比研究。结果表明,该方法可提高石油采收率 5%～10%,相当于增加了 20 亿美元的经济效益;地质储存 CO_2 共计 55×10^4 t,相当于一个 500 万人口的大城市一年排出的温室气体总量,其环境保护的意义是巨大的。研究结果还表明,水平井水气交替驱是地质储存 CO_2、提高石油采收率的最优方法,该方法累计产油量最大,储集的 CO_2 也最多。这一结论为其他类似油田三次采油提供了技术参考,也可为我国在 2012 年后执行京都议定书减排 CO_2 提供依据。

主题词　CO_2　地质　处置　水气交替　驱替　石油　采收率　数值模拟　环境保护

我国温室气体(其中主要是 CO_2)排放总量目前居世界第二位,预测 20 年后很可能成为世界第一。因此,开展温室气体处置技术研究很有必要[1]。

一、CO_2 的地质处置

CO_2 的地质处置方式主要有三种[2-4](图 1):①枯竭的油气田,不仅可以地质处置 CO_2,还可以通过气驱(CO_2 驱)方式来提高该油气田的采收率,全世界有大量的枯竭油气田储存空间可用于处置 CO_2;②深部咸水层或深部含水层,1000 m 以下的地层具有储存 CO_2 的压力条件和巨大的空间;③不适宜开采的煤层,CO_2 可置换煤中吸附的甲烷,从而将 CO_2 储存在煤中。由于它们有极大的容积和较广的适应性,天然的 CO_2 气田也证明了深部地层完全可以成为储存 CO_2 的容器,该方法对消减 CO_2 具有极其重要的前景。目前,比较成熟的处理技术是将 CO_2 储存在距地面 800 m 以下的地方,地热梯度为 25～35 ℃/km,压力梯度为 10.5 MPa/km,分离的 CO_2 将处于超临界状态,它的浓度变化范围为 440～740 kg/m^3。因此,在可渗透的多孔岩层中,不需要特别的压力条件就可以储藏 CO_2。

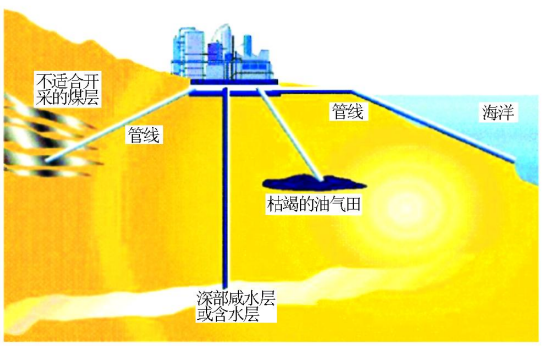

图 1　CO_2 地质处置方式示意图

国外对 CO_2 的地下储存非常重视。英国政府每年拨专款给 Shell、BP 等石油公司从事 CO_2 的地质储存,石油公司与高校合作开展 CO_2 驱提高石油采收率研究,三方已形成互惠互利的良性循环机制[5]。从 1996 年开始,在挪威北海的 Sleipner 油田每年把 100×10^4 t CO_2 注入到 900 m 深处的盐水饱和沙层中。加拿大从 2000 年 10 月开始,每天通过管道把大约 5000 t CO_2 从美国 North Dakota 州的火力发电厂输送到位于 Williston Bsain 盆地的 Weyburn 油田,并灌注到早石炭世碳酸盐岩储层中,用以提高石油采收率,同时又使部分 CO_2 被永久地储存于地下。这些实例表明,CO_2 的地下储存是减少 CO_2 排放极具潜力、并能在经济开发与环境保护上实现双

* 本文受到湖北省“油气勘探开发理论与技术”重点实验室开放基金资助(编号:YQ2006KF03)。

作者简介:关振良,1963 年生,教授;现主要从事高含水油气田开发及数值模拟研究工作。地址:(430074)湖北省武汉市中国地质大学资源学院石油与天然气工程系。电话:(027)67883067。E-mail:guanzl@cug.edu.cn

赢的有效办法。

国内中原油田采油一厂利用 CO_2 单井吞吐在文 38-16 井上进行了矿场试验。该技术利用 CO_2 易溶于原油使原油体积膨胀、降低原油黏度、降低油水界面张力，抽提原油中的轻质烃类（C_2～C_{30}），从而降低残余油饱和度的机理，增加油藏动用储量，提高采收率，矿场试验证明 CO_2 单井吞吐是可行的，随着工艺技术的不断完善，该技术将成为今后最具有潜力的三次采油技术之一[2]。

二、CO_2 驱提高石油采收率

据美国权威杂志《SPE》发布的世界范围内提高采收率方法所占比例是：热采 41%，注烃驱油 25%，氮气驱 19%，聚合物/化学驱 8%，CO_2 驱 7%。

注 CO_2 提高原油采收率技术的研究与应用起始于 20 世纪 50 年代。国内外大量研究结果和矿场试验已经证明，以 CO_2 作为驱油剂注入油藏，可以大幅度地提高原油采收率。例如，美国的 Wasson San Anros 油田利用 CO_2 混相和非混相驱，使原油采收率在水驱基础上提高了 12.2%。CO_2 驱在我国石油开采中有着巨大的应用潜力。据“中国陆上已开发油田提高采收率第二次潜力评价及发展战略研究”结果，仅在参与本次评价的 101.36×10^8 t 常规稀油油田的储量中，适合 CO_2 驱的原油储量约为 12.3×10^8 t，预计利用 CO_2 驱可增加可采储量约 1.6×10^8 t。另外，对于我国现已探明的 63.2×10^8 t 的低渗透油藏原油储量，尤其是其中 50% 左右尚未动用的储量，CO_2 驱比水驱具有更明显的技术优势。但是，CO_2 驱技术在我国至今尚未成为研究和应用的主导技术，其原因除了我国油藏和原油条件特殊性所导致的技术难点外，关键是缺少 CO_2 气源。因此，对地球环境造成恶劣影响的工业废气将成为我国改善油田开发效果、提高原油采收率的重要资源。

油田注入 CO_2 后，由于超临界 CO_2 具有极强的抽提效果，与油层中的油滴混合后大大降低油滴的黏度，达到驱油的目的，提高石油采收率。注氮气驱、天然气驱等已在胜利油田、中原油田成功实施，另外，富气、干气、液化石油气、氮气和烟道气等气体溶剂驱已通过了先导实验。

1.CO_2 混相驱先导实验

胜利油田樊 124 块通过理论公式计算最小混相压力为 31.6 MPa，室内实验分析为 28 MPa，数值模拟结果为 30 MPa，均低于油层压力（目前地层压力 32 MPa），可实现 CO_2 混相驱。

2.注氮气驱先导试验

江汉油区注氮气先导试验发现动液面上升，地层能量恢复。地层压力由 17.26 MPa 上升到 19.19 MPa，上升了 1.93 MPa。部分油井开始见效，注氮气井组产量趋于上升。平均单井日产油从 4 t 上升到 6 t，含水从 84% 下降到 71%。

3.水气交替注入先导试验

江汉拖市特低渗油田采用气水脉冲或水气交替注入可使最终采收率达到 47.2%。

4.天然气驱先导试验

20 世纪 80 年代以来，中原油田开展了天然气驱、二氧化碳混相驱，氮气驱等气驱技术研究和部分矿场试验，于 2005 年 6 月国内首次注天然气驱油技术试验成功，7 月份正式进入生产阶段。

中原油田有 1/3 以上的地质储量为低渗、特低渗透油藏，目前的注水工艺技术不能满足开发要求，主要依靠天然能量开发，采收率仅达 20%，二次采油开发效果极差。最近，中原油田石油化工总厂建成了利用炼油废气生产液态二氧化碳的装置，其年生产能力达 2×10^4 t。这些 CO_2 将全部用于中原油田进行 CO_2 驱油，预计可提高原油采收率 5%～10%，年增产原油逾 5×10^4 t。

大庆油田利用炼油厂加氢车间的副产品——高纯度 CO_2（96%）进行 CO_2 非混相驱矿场试验。虽然该矿场试验由于油藏的非均质性导致的气窜影响了波及效率，但总体上还是取得了降低含水率、提高原油采收率的效果。

三、CO_2 驱提高石油采收率数值模拟

数值模拟是地质处置 CO_2 研究和 CO_2 驱提高石油采收率研究的重要手段，也是最经济的研究方法之一[5]。笔者应用 Eclipse 软件对某油田进行 CO_2 驱、水气交替驱（WAG）等六套开发调整方案进行数值模拟，取得好的应用效果。

图2是该油田原始含油饱和度分布状况，从图

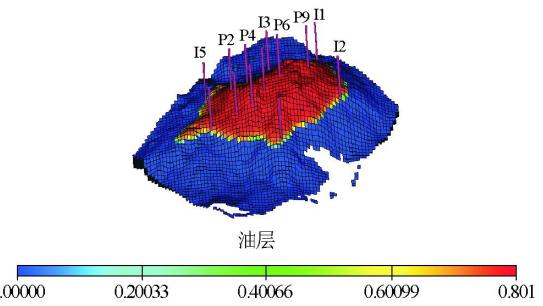

图 2　某油田原始含油饱和度分布图

中可以看出构造高部位原始含油饱和度较高且均匀分布,平均含油饱和度 72.51%。

该油田为典型的砂岩储集层海上油田,1999 年 10 月投入开发,储层平均孔隙度 17.3%,平均渗透率 $245\times10^{-3}\ mm^2$,地质储量 $5517.3\times10^4\ m^3$。投产初期利用天然能量开发,2005 年转入注水开发。

为研究 CO_2 的地质处置能力及二氧化碳驱中石油采收率提高幅度问题,设计了如下开发方案。

原方案:水驱。

方案 a:气驱。

方案 b:垂直井水气交替驱(早期水气垂直井注入到底层)。

方案 c:后期水气交替驱(生产 10 a 后开始注入)。

方案 d:水气交替驱(以不同的完井方式,水注到底层,气进入顶层)。

方案 e:水平井水气交替驱(水气水平井注入到底层)。

方案 f:水平井用不同的方向水气交替驱(水注入到底层,气由不同方向水平注入)。

在历史拟合结束后,对上述的方案进行了生产预测,预测从 2005 年 12 月之后的 20 a 的累计产油量和累计 CO_2 储置量。

累计产油量、累计 CO_2 储存量随时间的变化规律见图 3、4。从图 3、4 可以看出方案 d(水气交替驱)累计产油量最大,储集的CO_2也最多;方案e和方案 f(水平井注气驱)累计产油量和 CO_2 储集量次之,水平井注气驱不仅能减少气体循环还能提高石油采收率。

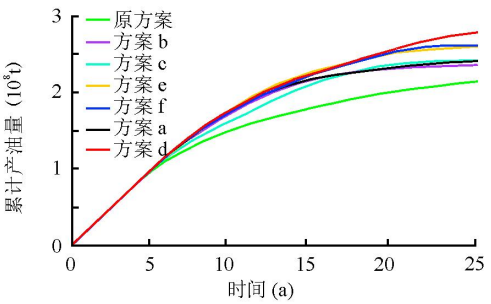

图 3　不同注入方案累计产油量随时间的变化规律图

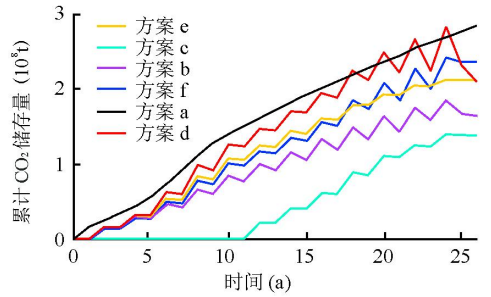

图 4　不同注入方案累计 CO_2 储存量随时间的变化规律图

四、结　论

该油田通过注入 CO_2,水平井水气交替驱提高石油采收率 5%～10%,相当于增加了 20 亿美元的经济效益;地质储存 CO_2 为 55×10^6 t,相当于一个 500 万人口的大城市一年排出的温室气体总量,其环境保护的意义是巨大的[4]。数值模拟研究表明,注 CO_2、水平井水气交替驱是地质储存 CO_2、提高石油采收率的最优方法,该方法累计产油量最大,储置的 CO_2 也最多。

从数值模拟结果还可知,应用 CO_2 驱提高采收率,采出 1 t 石油大概需要 10 t 的 CO_2。因此提高原油采收率对温室气体中 CO_2 的需求量是巨大的。可以预测,随着技术的发展和应用范围的扩大,我国在提高原油采收率应用中封存于油藏内的温室气体总量将逐渐增大,人类生存和社会经济环境将得到改善[6]。

笔者感谢在英国伦敦大学帝国理工学院做访问学者期间,地球科学与工程系 PERM 研究小组提供的研究资料和研究条件,以及在论文编写过程中给予的支持与帮助。

参 考 文 献

[1] 强薇,李义连,文冬光,等.温室性气体地质处置研究进展及其问题[J].地质科技情报,2006,25(2).

[2] 张洪涛,文冬光,李义连,等.中国 CO_2 地质埋存条件分析及有关建议[J].地质通报,2005,24(12).

[3] E I OBI, M J BLUNT. Streamline-based simulation of carbon dioxide storage in a North sea aquifer[J]. Water Resources Research, 2006, 42, W01202, doi: 10.1029/2004WR003347.

[4] BRANKO BIJELJIC, R QI. CO_2 research from pore-scale modeling of dispersion to field-scale simulation [J]. Progress in Mining and Oilfield Chemistry, 2001, 3.

[5] M BLUNT, F J FAYERS, F M ORR. Carbon dioxide in enhanced oil recovery [J]. Energy Conversion and Management, 1993, 34: 1197-1204.

[6] 递减产量对世界油田的影响[OL]. http://www.hubbertpeak.com/blanchard/.

(修改回稿日期　2007-02-07　编辑　居维清)