

文章编号: 1000-0747(2018)01-0105-06 DOI: 10.11698/PED.2018.01.10

## 减氧空气驱适用范围及氧含量界限

廖广志<sup>1</sup>, 杨怀军<sup>2</sup>, 蒋有伟<sup>3</sup>, 任韶然<sup>4</sup>, 李党国<sup>5</sup>, 王连刚<sup>1</sup>,  
王正茂<sup>1</sup>, 王伯军<sup>3</sup>, 刘卫东<sup>3</sup>

(1. 中国石油勘探与生产分公司, 北京 100120; 2. 中国石油大港油田公司, 天津 300000; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266000; 5. 清华大学机械学院, 北京 100083)

**摘要:** 依托长庆、大庆和大港等油田进行的减氧空气驱试验, 开展了减氧空气驱机理、爆炸极限、腐蚀防控等实验, 明确了减氧空气驱爆炸极限、减氧界限、腐蚀防控条件等技术问题。研究表明: 油藏温度大于等于 120 °C 时, 氧气与原油反应剧烈, 可充分利用氧气的低温氧化作用, 直接进行空气驱提高采收率; 油藏温度小于 120 °C 时, 氧气消耗极少, 放热量少, 难以产生热效应, 适合进行减氧空气驱, 充分利用 N<sub>2</sub> 为主的空气非混相驱提高采收率。减氧空气驱适用于低渗透、注水开发“双高”、高温高盐 3 类油藏, 为防止爆炸, 确保减氧空气驱技术安全可控, 临界氧含量可控制在 10% 以内; 空气减氧后, 管柱氧腐蚀有所减缓; 无水条件下地面管线和注入井无需考虑氧腐蚀问题, 有水时可采用特殊管材、特殊管柱结构或加入缓蚀剂等方法来降低腐蚀速度。空气/减氧空气是低成本的驱替介质, 可用于对低渗透等特殊条件油藏实施能量补充及吞吐、驱替等方式开发, 是未来 20 年具有发展潜力的战略性技术。图 6 表 4 参 14

**关键词:** 减氧空气驱; 爆炸极限; 减氧界限; 低温氧化; 氧腐蚀防控

中图分类号: TE357 文献标识码: A

### Applicable scope of oxygen-reduced air flooding and the limit of oxygen content

LIAO Guangzhi<sup>1</sup>, YANG Huaijun<sup>2</sup>, JIANG Youwei<sup>3</sup>, REN Shaoran<sup>4</sup>, LI Dangguo<sup>5</sup>, WANG Liangang<sup>1</sup>,  
WANG Zhengmao<sup>1</sup>, WANG Bojun<sup>3</sup>, LIU Weidong<sup>3</sup>

(1. PetroChina Exploration & Production Company, Beijing 100083, China; 2. PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300000, China; 3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 4. China University of Petroleum, Qingdao 266000, China; 5. School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The mechanisms of oxygen-reduced air flooding (ORAF) and the explosion limit and the corrosion control approaches were studied based on the pilots of oxygen-reduced air flooding (ORAF) in Dagang, Changqing and Daqing oil fields in China. On the foundation of indoor investigations and pilots, the explosion limits, oxygen reduction limits and corrosion control approaches were clarified. When the temperature of reservoir is equal to and higher than 120 °C, there is a violent reaction between oxygen and crude oil, that means the effect of low temperature oxidation would be fully taken use of to enhance oil recovery by air flooding directly; nitrogen dominated immiscible flooding with oxygen-reduced air should be applied in cases where reservoir temperature is below 120 °C with little oxygen consumption and little heat generated. The oxygen-reduced air flooding is suitable for 3 types of reservoirs: low permeability reservoir, water flooding development reservoir of high water-cut and high temperature and high salinity reservoir. In the process of development, in order to ensure safety, the oxygen reduction limits should be controlled fewer than 10%, while oxygen-reduced air can obviously reduce the corrosion rate of pipes; The surface pipelines and injection wells don't need to consider about oxygen corrosion with no water, special materials and structure of pipe or corrosion inhibitor can be applied to the surface pipelines and injection wellbores with water. Air/oxygen-reduced air is a low-cost displacement medium and it could be applied in many special conditions of low permeability reservoir for energy supplement, huff and puff and displacement, that means oxygen-reduced air flooding has become the most potential strategic technology in 20 years.

**Key words:** oxygen-reduced air flooding; explosion limit; oxygen-reduction limit; low temperature oxidation; oxygen corrosion control

引用: 廖广志, 杨怀军, 蒋有伟, 等. 减氧空气驱适用范围及氧含量界限[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 105-110.  
LIAO Guangzhi, YANG Huaijun, JIANG Youwei, et al. Applicable scope of oxygen-reduced air flooding and the limit of oxygen content[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 105-110.

## 0 引言

国内已开发低、特低渗透油藏储集层孔喉细小<sup>[1-2]</sup>,

注水开发存在注不进、采不出等突出问题, 而气体比较容易注入该类储集层, 是驱油和补充地层能量的良好驱替介质。以空气为介质的空气驱技术具有易注入、

气源充足、低成本、环保等明显优势,国外空气驱技术现场应用取得了较大成功,且经济效益较高<sup>[3-5]</sup>。国外油藏储集层物性相对均质,气窜风险很低,因而采取直接注空气的方式<sup>[6]</sup>。国内陆相沉积油藏非均质性严重,气窜风险较大,采用直接注入方式,空气与天然气在井筒和地面管线中混合,容易引起爆炸<sup>[7]</sup>;目前解决该问题的主要方法是注入起泡剂进行封堵,但该方法存在氧气与水接触后对管柱腐蚀作用强烈的问题<sup>[8]</sup>。为了降低爆炸风险和管柱腐蚀,可以实施减氧空气驱,但该方法适用于何种地质条件的油藏及注入空气中氧含量界限仍未得到很好解决,是目前阻碍减氧空气驱推广应用的技术难点,急需深化研究。

## 1 减氧空气驱适用范围

### 1.1 减氧空气驱提高采收率机理

空气驱采油综合了多种驱油机理,每种机理的作用也各不相同,包括:①保持或提高油藏压力;②原油低温氧化生成 $\text{CO}_2$ ,产生烟道气驱效应、原油溶胀效应、降黏度效应;③原油低温氧化生热,产生热膨胀、热降黏效应及轻质组分的抽提作用<sup>[9]</sup>。

各种机理作用的大小取决于油藏的具体情况,在高温高压条件下各种机理的作用都会有所增强。氧化反应的强弱与氧气含量关系不大,而主要与温度和氧气分压的高低相关。空气驱采油,高压提高了混相能力,高温提高了氧的利用率,因而高温、高压油藏中的驱油效果较好;低温低压油藏中,温度不能有效累积而且压力低于最小混相压力,此时空气驱就是典型的非混相气驱,相当于烟道气驱,驱油效率偏低;直接点火形成火驱时,空气驱又表现为火驱的生产动态。因此,不同的地层条件下空气驱可以具有不同的机理且表现为不同的生产动态,驱替效果差异较大。

### 1.2 减氧空气驱油藏温度适用条件

为明确减氧空气驱低温氧化作用机理,采用高压近绝热量热法开展减氧空气低温氧化动力学实验研究,装置和方法参照文献<sup>[10]</sup>,实验按“加热—等待—搜寻”模式运行。

#### 1.2.1 实验设计

实验材料与参数:①大庆海塔原油;②空气和减氧空气(氧含量10%);③实验压力5 MPa。

实验步骤:①“加热”阶段,温度按设定的 $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 加热幅度升高;②“等待”阶段,通过控制器保持绝热炉内的温度处于均匀平衡状态;③“搜寻”阶段,比较试样升温速率与设定敏感度(一般为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ),

前者小于等于后者,自动进入下一个“加热—等待—搜寻”循环,前者大于后者,量热仪自动转为“放热”方式,控制器根据绝热炉各个区域温度与样品测试系统的温度差异进行调节,维持绝热炉温度与样品测试系统温度的一致。

#### 1.2.2 实验结果

对于空气,实验中温度低于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 、时间小于900 min时,未观测到氧气消耗及 $\text{CO}_2$ 产生,同时未监测到温度累积,表现为加氧反应。温度继续上升,大于等于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 时监测到放热现象,温度随时间缓慢上升,至 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 前,观测到氧气有极缓慢的消耗,并伴随微量的 $\text{CO}$ 与 $\text{CO}_2$ 产生(见图1)。

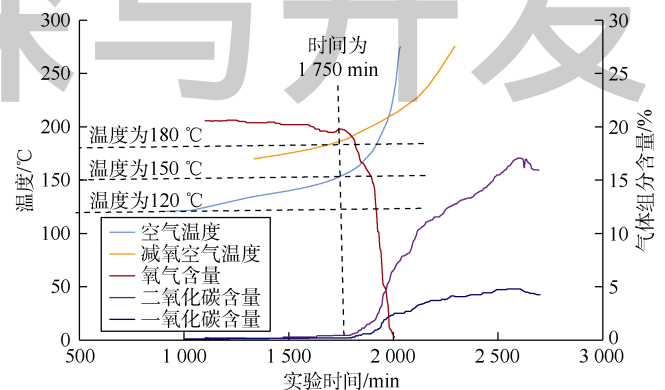


图1 实验温度及气体组分含量监测曲线

温度继续上升,逐渐累积到 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,实验时间大于1750 min时,温度上升较快,氧化反应较剧烈,氧气消耗加快,产出部分 $\text{CO}$ 和 $\text{CO}_2$ ;实验温度进一步提高,上升到 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,放热加速特征更明显,温度急剧上升,此时产生大量的 $\text{CO}$ 和 $\text{CO}_2$ ,原油氧化反应逐渐由放热较少的加氧反应向大量放热的裂键反应转变。

由此可见,实验温度在 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 以下时,氧化反应以加氧反应为主,裂键反应为辅;当实验温度在 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时,氧化反应以裂键反应为主,加氧反应为辅;当实验温度在 $120\sim 180\text{ }^\circ\text{C}$ 时,加氧反应和裂键反应并存,加氧反应和裂键反应的拐点温度在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。而减氧空气在相同实验条件下氧化,当温度累积到 $170\text{ }^\circ\text{C}$ ,才观察到氧气消耗,高温阶段的氧化也不如空气和原油剧烈。

因此,油藏温度小于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ ,氧气消耗极少,放热量少,难以产生热效应,适合开展减氧空气驱;油藏温度大于等于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ ,原油氧化剧烈,氧气消耗量大,热效应明显,适合开展空气驱;除此之外在选择空气泡沫驱或者气水交替驱时,由于液体的注入,降低了油藏温度,此时更适于减氧空气驱,避免因氧气

无法有效消耗导致安全风险。

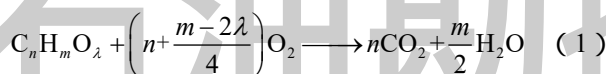
## 2 减氧空气驱氧含量界限

### 2.1 氧含量爆炸界限

国内外现场经验表明，虽然空气驱未发生过因氧含量超标引起安全事故，但其安全风险确实存在，也一直是人们关注的焦点，氧含量的爆炸边界条件是采取相应安全控制措施的重要依据，是空气驱提高采收率技术必须要解决的技术难点。

#### 2.1.1 临界氧含量的理论计算

可燃性气体（液体蒸汽）与氧气发生完全燃烧时，化学反应式<sup>[11]</sup>如下：



式中  $m$ ——氢原子数，个； $n$ ——碳原子数，个； $\lambda$ ——氧原子数，个。

当可燃性气体（液体蒸汽）体积分数为爆炸下限时，此时反应为富氧状态，理论临界氧含量（也叫理论最小氧体积分数）可表达为：

$$C_o = LN \quad (2)$$

其中

$$N = n + \frac{m-2\lambda}{4}$$

式中  $C_o$ ——可燃性气体的理论临界氧含量，%； $L$ ——可燃性气体的爆炸下限，%； $N$ ——每摩尔可燃气体完全燃烧时所需要的氧分子数，个。

可燃气体在爆炸上限时，其临界氧含量等于混合

气中的实际氧含量，如无具体实验作依据，可采用可燃性气体的爆炸下限达到完全燃烧时所需要的氧分子个数（即最小氧体积分数）来估算临界氧含量。表1为采用（2）式计算烷烃爆炸下限对应的理论临界氧含量，可以看出在同类烷烃物质中甲烷的理论临界氧含量低于其他烷烃类化合物；对多数石油类烷烃而言，常温常压下，理论临界氧含量为12%，低于这个值，即使遇明火也不会发生爆炸。

表1 烷烃爆炸下限时的理论氧含量

成分	$L_{25}/\%$	$N/\text{个}$	$C_o/\%$	成分	$L_{25}/\%$	$N/\text{个}$	$C_o/\%$
甲烷	5.0	2.0	10.0	己烷	1.2	9.5	11.4
乙烷	3.0	3.5	10.5	庚烷	1.1	11.0	11.6
丙烷	2.1	5.0	10.5	辛烷	1.0	12.5	11.9
丁烷	1.8	6.5	11.7	壬烷	0.9	14.0	11.9
戊烷	1.4	8.0	11.2	癸烷	0.8	15.5	11.9

注： $L_{25}$ 表示25℃时可燃性气体的爆炸下限

实际油藏中，储集层具有高温、高压特征。氧含量界限受压力、温度、惰性气体等因素影响，与常温、常压下临界氧含量有较大差异，因此，必须开展实验研究确定。

#### 2.1.2 临界氧含量物理模拟

##### 2.1.2.1 产出气组分对爆炸临界氧含量的影响

国内部分适合空气驱常规油井产出气组分分析结果<sup>[5]</sup>显示，产出气中甲烷含量均小于96%（见表2）。据此配制了4个有代表性的不同组分的模拟可燃气体，在温度20℃、压力0.4MPa条件下开展4个组分可燃气体及纯甲烷气的临界氧含量爆炸对比实验。

表2 实验用可燃气体及油井产出气组分

气体	模拟实验气体组分体积分数/%				大庆油田		长庆安塞油田	华北油田	江汉油田
	实验1	实验2	实验3	实验4	港2-54-1井	港2-57-3井	高52井	任北压气站	王场气站
CO <sub>2</sub>							0.18	4.61	2.00
N <sub>2</sub>					0.295	1.102	6.16	2.48	5.84
C <sub>1</sub>	75	80	90	95	95.220	89.013	73.04	66.28	37.95
C <sub>2</sub>	5	15	10	5	3.812	8.053	11.24	7.31	10.85
C <sub>3</sub>	5	5			0.451	1.424	6.61	9.25	21.19
iC <sub>4</sub>	15				0.121	0.039	0.76	2.39	6.70
nC <sub>4</sub>					0.054	0.237	1.29	2.53	7.84
iC <sub>5</sub>					0.032	0.110	0.24	0.80	3.00
nC <sub>5</sub>						0.007	0.27	1.96	1.49
C <sub>6+</sub>					0.015	0.015	0.14		

实验结果表明（见图2），纯甲烷的爆炸上下限含量为4.13%、13.5%，可燃气体中含有C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>时，甲烷含量相应降低，爆炸临界氧含量上升；而随着C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>含量的降低，甲烷含量上升，爆炸临界氧含量下降；纯甲烷的爆炸临界氧含量最低，为10%。由此说明，该氧含量临界值为常规油井产出气发生爆炸的最低界限。适合空气驱的中国陆上油田，油井产出气甲烷含量均小于96%，其爆炸临界氧含量不会低于纯甲烷的

界限，只要空气驱中氧含量低于10%，就不可能发生爆炸。

##### 2.1.2.2 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>含量对爆炸临界氧含量影响

实施空气驱、空气泡沫驱提高采收率过程中，注入空气中的氧气与储集层中的原油发生氧化反应产生CO<sub>2</sub>，随N<sub>2</sub>共同完成驱替过程。混合气体中存在的CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>对爆炸临界氧含量同样会产生一定的影响，对此开展的实验结果表明（见图3），随着N<sub>2</sub>含量的增加，爆

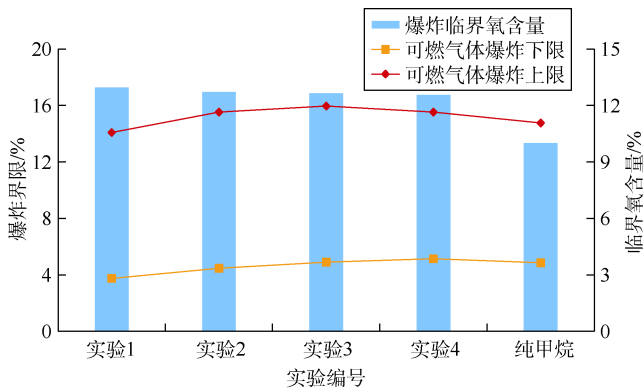
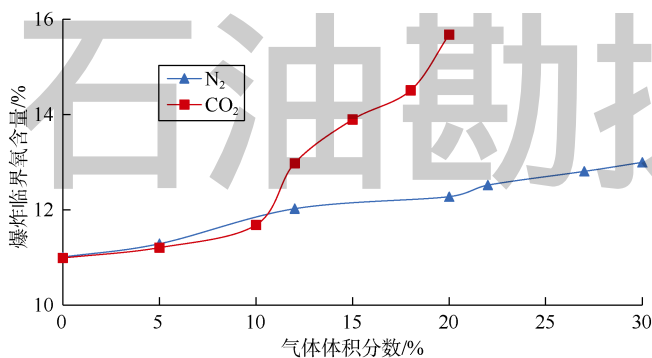


图2 不同组分实验气体爆炸临界氧含量关系

图3 N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 气体含量对爆炸临界氧含量的影响

炸临界氧含量缓慢上升, 实验中最高达 13.0%; 而随着 CO<sub>2</sub> 含量增加, 在低于 10% 时, 爆炸临界氧含量同样表现为缓慢上升, 但超过 10% 时, 爆炸临界氧含量表现为快速上升, 当 CO<sub>2</sub> 含量为 20% 时, 爆炸临界氧含量上升至 15.7%。由此可见, N<sub>2</sub> 含量增加对爆炸临界氧含量的影响较小, 而 CO<sub>2</sub> 的影响较大, 但随着两种气体含量增加, 爆炸临界氧含量呈上升趋势, 且大于纯甲烷的临界值。

空气驱技术中空气减氧的主要目的是在确保现场安全可靠的条件下尽可能降低成本, 减氧空气中氧含量是现场安全和成本的决定性参数。产出气组分、N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 等对爆炸临界氧含量影响的实验结果证实, 合理的爆炸临界氧含量为 10%, 将空气氧含量减至 10% 后注入油藏, 产出气中氧含量基本上在 5% 以下, 达不到爆炸临界值, 可以确保空气驱项目的安全运行。

## 2.2 氧含量腐蚀界限

注空气驱油的过程中, 注气井中氧的分压较高, 在潮湿高温的环境中, 主要发生氧的去极化反应, 会对注入井管壁造成严重的腐蚀<sup>[12-13]</sup>。国外油田空气驱过程中, 曾出现腐蚀垢脱落堵塞地层现象, 国内也发现空气泡沫驱或空气火驱注入井发生严重氧腐蚀。国内一些油田往往通过注入空气泡沫或者采用气水交替来抑制气窜, 在此过程中由于水的存在加速了油管的腐蚀, 使油管更容易被腐蚀穿孔。

## 2.2.1 管柱氧腐蚀实验

### 2.2.1.1 不同氧含量空气介质电化学腐蚀

采用大港油田空气泡沫驱现场用注入水与现场用油管挂片, 设置模拟实验温度为 100 °C, 实验压力 20 MPa, 进行 96 h 的腐蚀实验。

图 4 为不同氧含量条件下测得电流与电位关系曲线 (Tafel 曲线), 可以看出, 自腐蚀电位随着混合气体中氧含量的增加而负向移动, 同时阴阳极腐蚀电流显著增加; 氧气含量升高, 油管的腐蚀速率与氧含量之间呈现指数性增加趋势 (见图 5)。

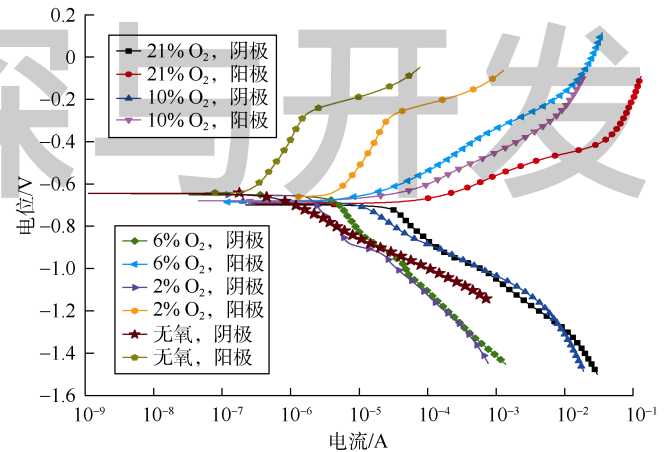


图4 腐蚀 Tafel 曲线

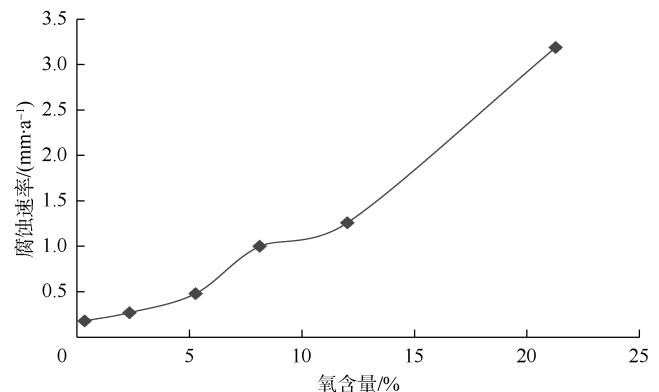


图5 腐蚀速率与氧含量关系

### 2.2.1.2 不同工况下空气腐蚀实验

模拟大港油田空气泡沫驱条件下, 研究注空气驱油过程中生产井的腐蚀工况, 进行失重法腐蚀分组实验 (见表 3)。其中, 20#钢为地面管线材质, N80 和 P110 为油田用油套管标准材质。

实验表明在纯空气条件下, 20#、N80、P110 挂片几乎无腐蚀现象。在水与空气共存条件下, 随着井深度的增加 (或者温度和压力增大), N80、P110 挂片的腐蚀速率明显增大; 在相同的温度和压力下, 泡沫+空气对 N80 材质挂片的腐蚀远远小于水+空气; 相同工况条件下, P110 挂片的腐蚀程度小于 N80 挂片。综合

表3 不同温度压力条件下不同管材腐蚀速率实验数据

序号	材质	温度/ ℃	压力/ MPa	模拟井 深度/m	工况	腐蚀速率/ ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )
1	20#	40	20.0		空气	0.004 2
2	20#	60	20.0		空气	0.005 2
3	20#	80	20.0		空气	0.007 4
4	N80	35	21.4	500	空气	0.000 3
5	N80	35	21.4	500	水+空气	2.540 0
6	N80	65	23.3	1 500	水+空气	3.860 0
7	N80	95	25.5	2 500	水+空气	5.780 0
8	N80	95	25.5	2 500	泡沫+空气	2.960 0
9	P110	35	21.4	500	空气	0.000 1
10	P110	35	21.4	500	水+空气	2.170 0
11	P110	65	23.3	1 500	水+空气	3.360 0
12	P110	95	25.5	2 500	水+空气	5.690 0

以上结果,含水、高温、高压是腐蚀发生的重要条件。

同样,模拟了减氧空气泡沫驱条件下的腐蚀情况,腐蚀材料为N80挂片(见表4)。溶液中泡沫剂浓度为0.2%、缓蚀剂浓度为0.4%,分别以氧浓度10.0%、5.0%、2.5%进行实验,结果表明即使将空气氧含量降至安全值10.0%以下,两种缓蚀剂虽表现出较好的缓蚀效果,但不能从根本上解决腐蚀问题,基本没有达到行业标准水平的指标<sup>[14]</sup>要求。

表4 减氧对缓蚀剂缓蚀作用的影响

编号	氧含量/%	腐蚀速率/( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	评价结果是否达标
空白样	10.0	4.036 6	否
	10.0	1.976 1	否
缓蚀剂1#	5.0	1.025 7	否
	2.5	0.341 9	否
	10.0	0.300 9	否
缓蚀剂2#	5.0	0.109 4	否
	2.5	0.068 4	达标
行业标准		0.076 0	

注入井管柱腐蚀关系到注入井的使用周期与安全,套管一旦受到腐蚀,会产生变形、错断等情况,严重时会使注入井报废。腐蚀实验中氧含量减到2.5%时,仍然具有很强的腐蚀,减氧至2.5%与10.0%相比,运行成本将大大提高。因此,腐蚀防控无需制定减氧指标,而需要研制氧腐蚀预防方法。

#### 2.2.2 管柱腐蚀防控

空气驱油目前一般采用4种方法或综合措施进行管柱防腐:①采用13Cr、316、11Cr、18Ni、9Ti等特殊材质管柱,并钝化处理表面;②应用缓蚀剂,缓蚀效果与使用浓度及介质的pH值、温度、流速等密切相关,可根据防腐的对象、环境条件选择;③对空气进行脱水净化处理,干燥空气能大大降低油管腐蚀速率;④采用注干空气和注泡沫液管柱分开的特殊管柱结

构,或采用双连续油管并联或者同心双连续油管模式气液分注(见图6)。

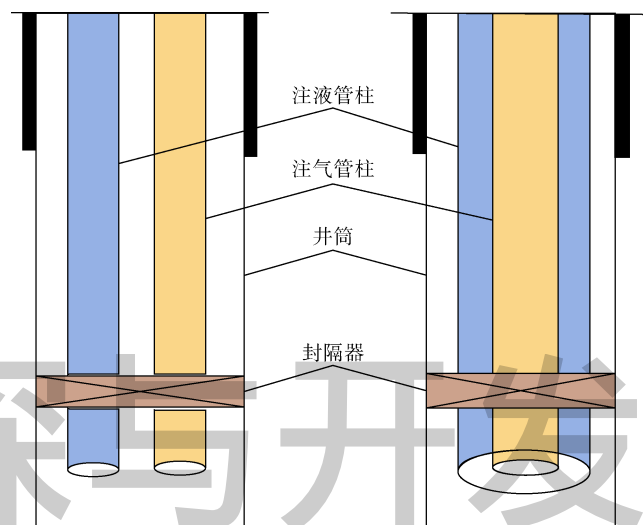


图6 空气泡沫驱气液分注管柱示意图

综上所述,临界氧含量主要与产出气组分、 $\text{N}_2$ 和 $\text{CO}_2$ 含量等有关,减氧对管柱防腐效果不理想,只能采用相应的措施进行预防。因此,综合理论计算氧含量爆炸极限和模拟爆炸实验结果,减氧空气氧含量10%,能够保证现场试验中不会发生氧与天然气混合气体的爆炸。

## 3 应用前景及存在问题

### 3.1 应用前景

三次采油技术的发展方向应是高效、低成本、绿色,空气/减氧空气是气介质中(二氧化碳、天然气、烟道气、氮气)低成本的驱替介质,非常符合这一要求。减氧空气驱技术可用于对低渗透等特殊条件油藏实施规模补充能量及吞吐、驱替等方式开发,应用前景广阔。在合适的油藏条件下,空气驱/减氧空气驱技术在未来20年将是具有发展潜力的战略性技术,可适用于3类油藏。

#### 3.1.1 低渗透油藏

对于该类油藏,采用注水方式开发,原油采收率只能达到10%~20%。经过长期的注水开发后,注入井的注入压力持续升高,可注入性变差,继续注水开发效果难以保证,转换为空气驱或泡沫辅助空气驱进行开发可大大提高采收率;对于注水比较困难的特低渗或水敏性低渗透油藏,油田开发的初期就应采取注气方式,减氧空气驱是目前较好的选择。

#### 3.1.2 注水开发“双高”油藏(含普通稠油油藏)

该类油藏储集层非均质严重,经历了长期的注水开发后,目前处于中高含水开发后期,采出程度在30%以上,常规的三次采油技术面临着成本和效果的挑战,

采用有效提高注水利用率与采收率的低成本三次采油技术,是这类油藏开发后期进一步提高采收率的迫切需求,开展泡沫辅助空气驱符合这一要求。

### 3.1.3 高温高盐油藏

该类油藏大部分具有埋藏深、储集层温度高、注入水(地层水)矿化度高的特征,不适合开展化学驱。从技术上讲,空气对温度没有上限要求,以空气驱或空气泡沫驱为主体的三次采油技术,将是这类油藏提高采收率的主要技术发展方向。

因此,对高含水、高采出程度、非均质严重的中高渗及低渗透油藏而言,空气驱/减氧空气驱提高采收率技术将具有巨大的推广应用潜力。

### 3.2 存在问题

尽管空气驱/减氧空气驱应用前景广阔,但大规模应用仍面临许多技术难题需要解决:①空气驱驱油机理及生产过程中动态特征需要深入研究;②对生产井产气动态及采油、地面工艺配套技术需加深认识,将目前适应含水采油的工艺技术转变为适合含气采油的工艺技术;③注气技术大规模应用后的产出气利用及处理问题,中国陆相油藏条件下实现注气技术大幅度提高采收率,需要大孔隙体积倍数的气体驱替,必然带来大量产气的问题,目前产出气的处理、回注等技术研究滞后。

## 4 结论

油藏温度大于等于 120 °C 时,氧气与原油反应剧烈,可充分利用氧气的低温氧化作用,直接进行空气驱提高采收率;油藏温度小于 120 °C 时,氧气消耗极少,放热量少,难以产生热效应,适合进行减氧空气驱,可充分利用 N<sub>2</sub> 为主的空气非混相驱提高采收率。

减氧空气驱适用于低渗透、注水开发“双高”、高温高盐 3 类油藏,为防止爆炸,确保减氧空气驱技术安全可控,极限氧含量应控制在 10% 以内;空气减氧后,管柱氧腐蚀有所减缓;无水条件下地面管线和注入井管柱无需考虑氧腐蚀问题,有水时可采用特殊管材、特殊管柱结构或加入缓蚀剂等方法来降低腐蚀速度。

空气/减氧空气是低成本的驱替介质,可用于对低渗透等特殊条件油藏实施能量补充及吞吐、驱替等方式开发,是未来 20 年具有发展潜力的战略性技术。

### 参考文献:

[1] 谷潇雨,蒲春生,黄海,等. 渗透率对致密砂岩储集层渗吸采油的微观影响机制[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 948-954.  
GU Xiaoyu, PU Chunsheng, HUANG Hai, et al. Microcosmic influence of permeability on spontaneous imbibition recovery for tight sandstone reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development,

2017, 44(6): 948-954.

- [2] 肖佃师,卢双舫,陆正元,等. 联合核磁共振和恒速压汞方法测定致密砂岩孔隙结构[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 961-970.  
XIAO Dianshi, LU Shuangfang, LU Zhengyuan, et al. Combining nuclear magnetic resonance and rate-controlled porosimetry to probe the pore-throat structure of tight sandstones[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 961-970.
- [3] KUMAR V K, FASSIHI M R, YANNIMARAS D V. Case history and appraisal of the medicine pole hills unit air injection project[R]. SPE 27792, 1995.
- [4] PARRISH D R, POLLOCK C B, NESS N L, et al. A tertiary COFCAW pilot test in the sloss field, Nebraska[J]. Society of Petroleum Engineers, 1974, 26(6): 667-675.
- [5] ERICKSON A, LEGERSKI J R, STEECE F V. An appraisal of high pressure air injection (HPAI) or in-situ combustion results from deep, high-temperature, high gravity oil reservoirs[C]. Wyoming: University of Wyoming, 1994.
- [6] FASSIHI M R, YANNIMARAS D V, WESTFALL E E. Economics of light oil air injection projects[R]. SPE 35393, 1996.
- [7] 任少云. 密闭空间内天然气混合及爆炸传播规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(11): 130-135.  
REN Shaoyun. Study on mixing and explosion propagation laws of natural gas in confined space[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(11): 130-135.
- [8] 孙永涛,程鹏,马增华,等. 高温多元热流体注采液中 N80 钢的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(3): 218-221.  
SUN Yongtao, CHENG Peng, MA Zenghua, et al. Corrosion behavior of N80 steel in high temperature multi-component thermal fluid for thick oil exploitation[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(3): 218-221.
- [9] FASSIHI M R, YANNIMARAS D V, KUMAR V K. Estimation of recovery factor in light-oil air-injection projects[R]. SPE 28733, 1997.
- [10] 唐君实,关文龙,梁金中,等. 热重分析仪求取稠油高温氧化动力学参数[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 775-779.  
TANG Junshi, GUAN Wenlong, LIANG Jinzhong, et al. Determination on high-temperature oxidation kinetic parameters of heavy oils with thermogravimetric analyzer[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 775-779.
- [11] KUMAR V K, GUTIERREZ D, MOORE R G, et al. High-pressure air injection and waterflood performance comparison of two adjacent units in Buffalo field[R]. Calgary, Alberta, Canada: The Petroleum Society's 8th Canadian International Petroleum Conference, 2007.
- [12] MONTES A R, GUTIÉRREZ D, MOORE R G, et al. Is high pressure air injection (HPAI) simply a flue-gas flood?[R]. SPE 133206, 2010.
- [13] 邓天洲. 油田气处理技术探讨[J]. 石油与天然气化工, 1984(3): 9-17.  
DENG Tianzhou. Discussion on casing-head gas treatment technology[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 1984(3): 9-17.
- [14] 国家能源局. 碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法: SY/T 5329—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.  
The National Energy Administration. Recommended water injection quality index of elastic rock reservoir: SY/T 5329—2012[S]. Beijing: China Standard Press, 2012.

第一作者简介: 廖广志(1965-), 男, 四川内江人, 博士, 中国石油勘探与生产分公司教授级高级工程师, 主要从事油田开发技术研究和管理工作。地址: 北京市东城区东直门北大街 9 号, 中国石油勘探与生产分公司, 邮政编码: 100007。E-mail: liaoguangzhi@petrochina.com.cn

联系作者简介: 刘卫东(1970-), 男, 河北唐山人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事提高采收率等方面的研究工作, 地址: 河北省廊坊市广阳区, 中国石油勘探开发研究院渗流流体力学研究所, 邮政编码: 065007。E-mail: lwd69@petrochina.com.cn

收稿日期: 2017-06-26 修回日期: 2017-12-13

(编辑 唐俊伟)