

中一加科技合作交流资料

为研制相对渗透率设备(2)

而进行的试验

中国石油天然气总公司
石油勘探开发科学研究院
一九九一年七月

提要

TE31/032

由于对蒸汽—空气实验过程的一些改变,决定不在岩心评价试验装置(CETE)上继续蒸汽—空气实验而在相对渗透率设备 2(RPEF2)上进行。总的来说,RPF2 设备功能是令人满意的。但是仍在对这套设备作改进以满足实验过程的需要。

这里报告了 5 个实验。前 4 个是只注蒸汽实验(RP201—RP204),第 5 个(RP205)是注蒸汽—空气实验。其结果证实了 CETE 蒸汽—空气实验的结果:

1. 空气和蒸汽一起注入使实验后沥青饱和度降低(从 19.4—22.6%降到 15.7%)。
2. 空气使通过岩心的压降加倍。
3. 空气的注入增加了沥青的粘度,酸值,和沥青质含量(达到 25.8%)。空气也使所产出的水乳化物的硫酸根和醋酸根含量明显增加。
4. 空气使水乳化物的 PH 值降低到 3 以下,因此增加了固体物质变为亲油的趋势。

TE31/2

目 录

摘要	(1)
1. 引言	(1)
1.1 RPF2 实验过程	(1)
1.1.1 设备试运行和 CEFF107 的验证	(2)
1.1.2 蒸汽干度的效应	(2)
1.1.3 初始原油饱和度的效应	(2)
1.1.4 温度的影响	(2)
1.1.5 空气浓度的影响	(2)
1.1.6 空气与氧气与氮气比值关系	(2)
1.1.7 油砂类型的影响	(2)
2. 实验设备和程序	(2)
2.1 设备	(2)
2.1.1 注入系统	(2)
2.1.1.1 过热蒸汽管线	(3)
2.1.1.2 注水管线	(3)
2.1.1.3 注气体添加剂管线	(3)
2.1.2 油砂岩心和覆盖层	(3)
2.1.3 生产系统	(4)
2.1.4 数据的采集	(4)
2.2 程序	(4)
2.2.1 样品分析	(4)
3. 实验结果	(5)
3.1 通过岩心的的压力降	(5)
3.2 有效渗透率	(5)
3.3 实验后沥青饱和度	(5)
3.4 沥青产量和采收率	(5)
3.5 油乳化物中的沥青产量	(5)
3.6 实验后沥青和砂子的性质	(5)
3.7 产出水分析	(5)
3.8 产出气组分	(5)
4. 概要	(5)
5. 结论	(5)
6. 建议	(5)

表 目 录

- 表 1:“蒸汽干度的影响”试验系列
- 表 2:“原始油饱和度的影响”试验系列
- 表 3:“温度的影响”试验系列
- 表 4:“空气浓度的影响”试验系列
- 表 5:“空气与氧气与氮气比值关系”试验系列
- 表 6:“油砂类型”试验系列
- 表 7:RP201—RP205 实验前的岩心性质
- 表 8:RP201—RP205 的实验条件
- 表 9:压降和渗透率值
- 表 10:沥青饱和度总结
- 表 11:油砂 Deam Stark 结果
- 表 12:初始沥青,产出沥青和最终沥青
- 表 13:实验后沥青和砂子的性质
- 表 14:在 RP201—RP205 中的产出水
- 表 15:产出气组分(在收集器 2 里,摩尔百分数)

图 目 录

- 图 1. 相对渗透率 2 流程图
- 图 2. 相对渗透率设备岩心架
- 图 3. 岩心支持器的绝缘和热电偶位置
- 图 4. 从上堵头注入(向下流动)时的压力和压降测量
- 图 5. 只注蒸汽试验 RP201—RP204 压降对比
- 图 6. 只注蒸汽(RP204)与注蒸汽空气(RP204)的压降对比
- 图 7. RP201—RP205 实验沥青产量对比
- 图 8. RP201—RP205 实验沥青采收率对比

为研制相对渗透率设备(2)而进行的试验

J. Ivory

M. DeRocco

摘 要

本报告讨论了在 RPF2 设备上做的 4 个只注蒸汽的和 1 个注蒸汽—空气实验的结果。总的来说这些结果与在 CETF 上的蒸汽—空气实验 CETF107 是一致的。特别是它们说明空气与蒸汽一起注入：(1)使实验后沥青饱和度从 19.4%—22.6%降低到 15.7%，(2)使通过岩心的压降加倍，(3)使沥青的粘度、酸值和沥青质含量以及所产出的水乳化液的硫酸根和醋酸根含量明显增加，(4)使水乳化液的 PH 值降低到 3，因此为亲油砂粒和油包水乳化物创造了一个合适的环境。

1. 引 言

在 Alberta Research Council 所做的实验(2,5,6)中已看出蒸汽—空气和蒸汽—氧气的处理方法是具有前途的。这些处理方法的显而易见的好处包括：(1)加快沥青的采出，(2)降低驱替后的原油饱和度，(3)改善波及程度。已发表的报告(4)中包括了蒸汽—空气处理方法的综合性文献回顾。

蒸汽—空气工艺方法的最初研究(6)是在岩心评价试验设备(CETF)上作的。这些实验的结果可概括如下：

1. 实验后的沥青饱和度从 19%降至 14%。
2. 通过岩心的压降加倍。
3. 实验后沥青粘度增加了一个数量级。
4. 实验后沥青的酸值加倍。
5. 实验后沥青中沥青质含量明显增加(从 17.3%—20.0%增至 24.5%)。
6. 为使实验后沥青中沥青质析出所需要的正戊烷体积明显减少。
7. 实验后固体中焦炭含量加倍(从 1.1%—1.4%增至 2.4%)。
8. 所产出的水乳化物的 PH 值降至 3.4。这主要是硫酸根含量从 7mg/L 增到 196mg/L 所致。
9. 在蒸汽—空气实验过程中产出气体中没有检测到 CO 和 CO₂。
10. 注入氧气的大约一半被氧化反应所消耗

1.1 RPF2 实验程序

决定用 RPF2 设备而不用岩心评价试验设备(CETF)做蒸汽—空气实验，其理由在附录 A 中讨论。RPF2 实验程序细分为 7 个步骤。下面按其执行顺序列出：

1. 设备的试运行和 CETF 蒸汽—空气实验(CETF107)的验证。
2. 蒸汽干度的影响。
3. 初始原油饱和度的影响。
4. 温度影响。
5. 空气浓度的影响。
6. 空气与氧气与氮气比值关系的影响。
7. 油砂类型的影响。

1.1.1 设备试运行和 CETF107 的验证

这一报告总结了第一个 RPF2 实验系列,即设计这些实验用以:(1)试验修改过的相对渗透率设备和(2)验证 CETF 蒸汽—空气实验。

1.1.2 蒸汽干度的影响

蒸汽干度实验(表 1)是为了说明空气的注入在注热水(干度为 0%)和注饱和蒸汽(干度为 83%)过程中的作用。这些实验还将指出空气的注入怎样影响油藏的不同部分(蒸汽条件不同)。

1.1.3 初始原油饱和度的影响

在注蒸汽—空气或蒸汽—氧气过程中,必须决定什么时候注入空气/氧气。如果注得太早,地层可能被堵塞。如果空气/氧气加入得太晚,可能没有足够的沥青留在枯竭区使空气起作用。因此,想要从这一系列实验(表 2)中得到有助于确定空气何时注入为好的资料。

1.1.4 温度影响

温度不仅影响低温氧化反应(LTO)的速度,也影响 LTO 产出物的相对百分数(例如 CO , CO_2 , 羧酸, 醛)。因此温度对注蒸汽—空气或蒸汽—氧气过程有很大的影响。表 3 中列出所提议的实验。

1.1.5 空气浓度的影响

Cram 和 Redford(2)以前在 APC 所做的实验指出,在蒸汽—空气注入到一个有连通通道的油砂试验层中时存在一个最优空气浓度(使沥青系收率最高)。当考虑到蒸汽—空气工艺过程的复杂性时,这一点并不奇怪。Cram 和 Redford 的实验中最优空气浓度约为 4 质量百分数空气($=0.2\text{MSCF/bbl}=35(\text{dm})^3/\text{kg}$ 蒸汽)。空气浓度明显地影响到氧化速度和压降(总气体流速随空气浓度增加)。因此,空气的浓度将影响渗透率,驱替后的原油饱和度等,而这些影响将被研究。这一实验系列概括在表 4 中。

1.1.6 空气与氧气与氮气的关系

空气与蒸汽一起注入增加了压降,其原因是:(1)氧化反应和(2)气体流动速度增加。设计了一系列实验(表 5)来确定这些影响中的每一个的相对重要性。

1.1.7 油砂类型的影响

氧化反应的速度和产物的分布取决于参加反应的物质(沥青,固体,氧气)。因为沥青和固体的组分本身依赖于油藏类型,因此研究注蒸汽—空气或蒸汽— O_2 对不同油藏的影响是重要的,而在此类油藏中有可能用这种方法。

在一系列的实验(表 6)中对高质量的,中等的和低质量的采出 Athabasca 油砂作了试验。另外,也对合成的 Athabasca 油砂(Ottawa 砂+抽提的 Athabasca 沥青+盐溶液)作了测

试。另一种选择方案是合成的和实际的 Cold Lake 油砂。Ottawa 砂(石英)和选择的 Cold Lake 沥青能用来做合成 Cold Lake 油砂。可用露头砂(带有复杂的矿物)代替石英砂制成第二种合成 Cold Lake 油砂。可以预期当用“露头”Cold Lake 油砂时固体物质会严重地氧化,而用“石英”Cold Lake 油砂不会这样。也因为露头砂有更多种类的矿物,它有更大的催化作用来加速沥青的氧化。

2. 实验设备和程序

2.1 设备

实验是在相对渗透率装置(RPF2)上做的,图 1 为该装置略图。这套装置主要由以下四部分组成:

1. 注入系统,
2. 岩心,压力容器,和覆盖层系统,
3. 生产系统,和
4. 数据收集和控制系统。

2.1.1 注入系统

注入系统主要由以下三部分组成:

1. 过热蒸汽管线,
2. 水管线,
3. 注入气体添加剂管线。

2.1.1.1 过热蒸汽管线

用 Ruska 泵打入未脱氧的 MilliQ 水,通过一个 1 千瓦的 ARI 过热器。ARI 加热器提供了足够的热量以保证过热蒸汽温度(TE125)在与冷却水汇合之前(在顶部堵头的上边的一点或在顶部堵头里)高于饱和温度 5~10℃。在过热器和压力容器之间的管线是隔热的。

2.1.1.2 注水管线

饱和蒸汽在 RP201 和 RP202 中是在顶部堵头上方面而在 RP203—RP205 中是在顶部堵头里把冷却过的未脱氧的水加到过热蒸汽中而产生的(见图 2)。由于碳钢堵头良好的导热性,在堵头里混合以前要同时保持过热蒸汽和冷却过的水是很困难的。在注水管线中用了 ISCOLC—5000 泵。水在流经 206—211℃的烘箱时被加热,岩心压力容器是放在这个烘箱里的。

2.1.1.3 注气体添加剂管线

在实验 RP205 中,空气从 Ruska 泵的泵筒经 PRI 回压调节器流入,该回压调节器使 Ruska 泵中的空气压力保持在 2.7MPag。空气在将要进入烘箱之前与水混合,混合物从顶部堵头里加入到过热蒸汽中。用保持恒定的 Ruska 体积流速和 Ruska 泵筒气体压力的方法使空气的质量流速保持不变。在蒸汽—空气注入的 4 小时期间 Ruska 泵筒中的空气温度在 24℃—26℃范围内。

2.1.2 油砂岩心和覆盖层

油砂岩心(直径 3.8cm,长度 22.5cm)是由高质量的 Athabasca 油砂构成的,这些油砂被

高压空气压实后装在薄壁(壁厚 0.5mm)铜套里。RP201—RP205 所用的岩心的一些性质在表 7 中给出。套筒和岩心放在一个碳钢的压力容器中(图 2)。用支架压力把容器固定在一个 Blue M 机械对流的烘箱里,烘箱温度维持在岩心出口端上蒸汽饱和温度(215℃)以下 5—10℃。这样做的目的是要防止当生产压力不适当地降低时在岩心中闪蒸。

对 RP205 实验,压力容器是用包在其外壁的 2 英寸的硅酸钙涂层以及在顶部和底部的绝热来隔热的(见图 3)。在 RP204 中用了临时性玻璃纤维隔热。在 RP201—RP203 中压力容器没有隔热,因为最初认为由于烘箱温度高不必要隔热。计算通过隔热层稳定状态幅射热损失是 4.5kJ/h。在这一热损失速度和注入蒸汽干度为 75% 时,估计岩心出口端的蒸汽干度为 73%。

在开始注入前油砂被预先加热到 200℃ 以上。对 RP201—RP203 实验,预热时间是 80 分钟。而对 RP204 和 RP205,因为在压力容器周围有绝热层,岩心和压力容器预热需要一晚上。

包含空气和水的覆盖压力开始时用手动泵加压。过剩的压力通过一个可调的出流阀释放。在 RP203 实验以后,安装了一个更稳定的系统,使压力由氮气,气体调节器和减压阀来控制。

2.1.3 生产系统

产出的流体流入有三个收集器的网络中,其回压用氮气—PRI 回压调节器系统维持在 2.07MPa 不变。最初产出的流体收集在收集器 1 中,接下来流体直接进入收集器 2,最后进入收集器 3。用这种方式可以得到 3 个点的采收率曲线。

在蒸汽—空气实验中(RP205):

1. 只注蒸汽阶段产出流体收集在收集器 1 中。
2. 在开始注入蒸汽—空气(实验 2 小时)后,产出的流体进入收集器 2。这一方法使精确确定试验中蒸汽—空气同时注入阶段的沥青采收率成为可能。
3. 收集器 3 用来收集在蒸汽—空气注入阶段后只注蒸汽时所有产出物。

2.1.4 数据采集系统

一台 DECPDP11/44 计算机被用来记录实验过程中的数据。各类数据也显示在 ISC 彩色仪器板上。大部分变量测量的位置可在图 1 中看到。所有的热电偶都是 K 型(铬镍合金)。水—空气混合物的温度是用热电偶 TE200 记录的。过热蒸汽温度用 TE125 测定。对实验 RP203—RP205 注入流体的温度是在顶部堵头的底部附近用 TE600 记录的。对 RP201 和 RP202 实验,TE600 测量了顶部堵头上面一点的饱和蒸汽温度。

在实验 RP203—RP205 中底部堵头以上 5.6cm 处和顶部堵头以下 5.6cm 处的温度分别用 TE710 和 TE720 测定。在实验 RP201 和 RP202 中没有记录岩心温度。

计量通过岩心中部 12.5cm 的压降的测压孔位于离每个堵头 5cm 处(见图 4)。测压孔被连接到三个平行的有不同范围的 Rosemount 压力传感器上(PDP700, PDP720, 和 PDP730)。另外,在注入压力(PT600)和出口压力(PT800)之间的压降是用 PDT750 测定的。PT700 记录覆压。

2.2 程序

RPF2 的典型实验条件列在表 8 中。在实验之前,要维持 11.7MPa 的覆压一个小时以压紧岩心。在实验过程中覆压维持在 5.5MPa。

在所有实验中,饱和蒸汽以 96g/h 的速度注入岩心顶端。在每一实验过程中维持不变的

生产回压(2.07MPa),而没有压力下降。在蒸汽—空气实验中(RP205),先注2小时蒸汽以后得到在空气注入之前只注蒸汽时蒸汽驱后的沥青饱和度。另外,还希望在注空气以前得到一个稳定的压降以至可看出空气注入对此变量的影响。在注蒸汽—空气结束后重新开始只注蒸汽,所记录的压降能确定在空气停止注入后有效渗透率的变化是否继续存在。

2.2.1 样品分析

对在三个收集器中和生产管线中的产出的液体做了沥青百分数和水百分数分析。也测定了在所有收集器中的水的PH,TIC(Dohrman 碳分析器),硫酸根含量(离子色谱),和醋酸根含量(离子排斥色谱)。

对用过的岩心做了沥青百分数,水百分数和固体物质百分数的分析。抽提过的砂岩中焦炭(甲苯不可溶)的质量百分数是用把抽提过的砂岩样品加热到540℃一个晚上之后的质量损失来测定的。在75℃和125℃条件下测定了实验后沥青的粘度(Brookfield Cone 和 Plate 粘度计)。同时得到了从岩心中提取的沥青的酸值和沥青质含量。酸值是中和1克原油中的酸所需的氢氧化钾的毫克数。

3. 实验结果

作为本报告所讨论的5个实验过程对该实验系统所作的发展的结果,在这些实验中引入了一些变量。然而,更重要的是所得到的结果,这些结果说明了空气和蒸汽一起注入在岩心中产生的物理和化学变化。

3.1 通过岩心的压降

对三个只注蒸汽的实验(RP202—RP204)通过岩心中部12.5cm 的压降随时间的变化表示在图5中。在该图中的 RP201的数据代表通过整个岩心和堵头的压降。RP203的高的压降可能是在顶部的岩心测压孔和顶部岩心热电偶之间的焊接处出现渗漏的结果。

RP204被选为只注蒸汽实验的基线,注蒸汽—空气实验的压降数据将与它比较。这主要是因为 RP204和 RP205中安装了岩心夹持器,而在 RP201—RP203中没有安装。图6表示了 RP204和 RP205的压降数据。

从 RP205的曲线可以看出,开始注入空气(在实验进行了2小时)时引起压降的降低。这个初始下降可能是由下述原因引起的:(1)在空气开始注入时因为饱和温度的降低使岩心温度降低(2—3℃),或者(2)沥青被空气从岩心中驱替。在空气注入后30分钟,由于岩心中的氧化反应、气体流动速度的提高和气体饱和度的增加使压降开始增加。

从实验时间4.9小时到6.1小时,由于疏忽停止了过热蒸汽流线的流动。结果,在整个此段时间内,以32g/h 的速度注入热水代替了以96g/h 的速度注入饱和蒸汽。压降从170KPa 降到40KPa,但是在饱和蒸汽流动重新开始时又升至280KPa。因此,空气注入引起了压降从空气注入前的160KPa 增加了近一倍。

从图6中可看出,在蒸汽—空气实验结束时的压降大约是只注蒸汽实验结束时的3倍。从图6中也可以看到,RP205的压降在空气停止注入后只注蒸汽时保持了一个半小时。压降保持的原因可能是由于氧化反应在岩心中产生了永久性的变化以及在岩心里存在有捕集气。从实验4.9小时到6.1小时水流速度的降低也可能有影响。

3.2 有效渗透率

计算了下列时刻对水和对气的有效渗透率:(1)在只注蒸汽2小时后,(2)在注蒸汽—空气结束时(RP205),(3)实验结束时,计算的数据列在表9中。 K_w 和 K_g 的典型值分别为 $0.01(\mu\text{m})^2$ 和 $0.05(\mu\text{m})^2$ 。由于这样低的渗透率,所以一块油砂岩样被抽提并确定了它的粘土百分数。它主要是高岭土,带有一些伊利石。没有发现蒙脱石和绿泥石。因此低的渗透率值看来是由于粘土膨胀所致。在325目的堵头行筛网上没有细粒的堵塞,因此可认为所记录的高的压降可能不是由于孔隙喉道被细粒堵塞而造成的。这一低的水渗透率与 Bennion 等人(1)对一个保存的 Sparky 油田岩心水驱到残余油饱和度时所得到的相似。抽提残余油后,Sparky 岩心的绝对渗透率测得是 $3.6(\mu\text{m})^2$ 。高的绝对渗透率说明在 Bennion 研究中水的有效渗透率低也不是由于粘土膨胀或者细粒运移。因此水的有效渗透率低只是由于沥青的存在而引起的水流通道弯曲。

Kwan 等人(7)在未受干扰的重新充填的高质量 cold Lake Clearwater 岩心(沥青质量百分数为12,细颗粒10%)上做的一系列细粒运移实验中也得到了低的渗透率值。他们的报告指出:保存的岩心的绝对渗透率(典型值为1至3达西之间)在用淡水代替盐水(NaCl 或 CaCl_2)注入时没有受到严重的影响。但是,对重新充填的沥青砂岩心初始时绝对渗透率低得多,而且渗透性易于破坏,在暴露在淡水中时会发生整体堵塞。在重新充填过程中岩心物质所受的干扰可能引起细颗粒的重新排列并使天然的流动路径受到破坏。不论沥青砂的沥青是在充填前或充填后抽提,充填的岩心对流动过程中渗透性的大量降低是敏感的。

虽然 Kwan 等人的实验指出较高的渗透率值是用保存的岩心的结果,但是 Gibson(3)表明用重新充填的油砂得到的沥青采收率比用保存下来的 Athobasca 油砂油田岩心所得的更均匀。尤其是在用油田岩心时,如果所取的岩样有较少的可见层理,粒度大,分选好且粘土含量低所得的沥青采收率就高。

3.3 实验后的沥青饱和度

实验后的沥青饱和度在表10中给出。在蒸汽—空气实验中所得到的实验后沥青饱和度为15.7%,明显低于4个只注蒸汽实验所得的值19.4%—22.6%。但是应该指出蒸汽—空气实验的初始沥青饱和度60.6%低于只注蒸汽实验的相应值71.6%—83.0%。表11表明在RP205实验之前油砂包含9.9%沥青(质量百分数),而只注蒸汽实验沥青含量的范围是12.3%到13.6%。

3.4 沥青产量和采收率

沥青产量和采收率数据在表12以及图7和图8中给出。从图7可以看出蒸汽—空气实验的产量值低于只注蒸汽所得到的值。另一方面,图8中蒸汽—空气实验的沥青采收率值是最高的。这看来矛盾的现象是由于蒸汽—空气实验的初始沥青饱和度低引起的。然后由于大部分沥青在空气注入前已被采出,所以空气对沥青采收率没有显著的影响。在注蒸汽—空气的4小时中的沥青产量只有2.3g,而实际上低于只注蒸汽实验 RP202和 RP204在同一时期中得到的产量,其原因也是岩心中初始沥青饱和度低。

3.5 油乳化物中回收的沥青

空气对于油乳化物中的沥青回收百分数没有明显的影响。只是因为只注蒸汽的4个实验这一百分数已高达94.6%—98.6%。

3.6 实验后沥青和砂子的性质

实验后的沥青和砂子的性质列在表13中。只注蒸汽时粘度(在75℃时测定)从923CP增加到4090—9500CP。当空气与蒸汽一起注入时,实验后沥青粘度增至14000CP。类似的影响可以在125℃时测定的粘度上看到。因此空气的注入使沥青粘度与只注蒸汽时相比增加了约一倍。粘度的增加是由于LTO反应把氧原子和碳氢化合物分子连接起来,形成了分子量较高的物质。特别是因为原油被氧化形成树脂状沉淀,这些物质接下来又被氧化形成沥青质。在RP205用过的油砂中的沥青其沥青质的含量高达25.8%。

在只注蒸汽时酸值只有中等程度的增加,从2.8到3.4,但在注蒸汽—空气时增加了约一倍。这一增加看来是由于在沥青中形成了酸基。

对3个做了分析的只注蒸汽的实验和注蒸汽—空气实验,其用过的砂子中焦炭的含量基本相同。这与CETF实验结果是矛盾的,在CETF实验中空气使估计的焦炭的含量加倍。在RFT₂实验中焦炭可能形成了,但是接下来通过在出口端325目的筛网。在后来的实验(RP218),对从堵头分配器得到的沉淀物的分析表明这些物质中29%是焦炭。这些焦炭是在岩心中形成的还是沥青滞留在堵头中的仍是未知的。

3.7 产出水的分析

产出的水的PH值,硫酸根,醋酸根和TIC含量列在表14中,由于加入了空气PH值基本上由5.7降至3.5,在空气停止注入后甚至进一步降至2.1。由于空气的注入硫酸根含量增加了一个数量级达345mg/L,醋酸盐从小于2增至64—79mg/L。另一方面,看来空气对无机碳总量没有影响。

3.8 产出气体的组分

在实验RP204和RP205中,测定了第二收集器中的产出气体(是在实验2小时至6小时之间收集的)组分。其结果列在表15里。对蒸汽—空气实验(RP205)烃类气体的组分低得多,其原因是N₂浓度高(N₂是在空气中被注入的,接着又被产出)。

蒸汽—空气实验产出的气体中N₂对O₂的比是16.3,而空气的这一比值为3.3。这表明注入的氧气中约有四分之三参加反应。在蒸汽—空气实验中CO₂对CO的比是4.4,这意味着大部分燃烧反应是完全的。

4. 概 要

注入空气的效果可概括如下:

1. 实验后的沥青饱和度从19.4—22.6%降到15.7%。
2. 通过岩心的压降大约增加了一倍。
3. 实验后沥青粘度约增加了一倍。
4. 实验后沥青酸值约增加了一倍。
5. 实验后沥青中沥青质含量明显增加(从19.2%—19.6%增至25.8%)。
6. 实验后固体物质中焦炭含量不变。这与以前的蒸汽空气实验相反(6),以前的实验焦炭含量加倍了。还将做更多的蒸汽—空气实验,这些实验将会指出在RP205中得到的低的焦炭含量是否是不正常。

7. 所产出的水乳化物的 PH 值降低到 2.1。这主要是因为硫酸盐含量从 36mg/L 增至 345mg/L, 和醋酸根浓度从小于 2mg/L 增至 64—79mg/L。

8. 在蒸汽—空气实验过程中测定了产出气中的 CO 和 CO₂, 其比值为每克分子 CO 有 4.4 克分子 CO₂。这意味着在收集气体样品时的大部分燃烧反应是完全的。

5. 结 论

总的来说, 从这一系列实验所得到的如下结论与以前的实验的结论(6)是类似的:

1. 空气和蒸汽一起注入使实验后的沥青饱和度降低。
2. 空气有一种作为流度控制剂的潜在作用, 因为它能被用来增加通过油藏的枯竭区域的压降。
3. 空气的注入增加了沥青的粘度、酸值和沥青质含量。它也使产出的水乳物中硫酸根和醋酸根含量增加了。
4. 空气使水乳化物的 PH 值低于 3, 同时增加了固体变为亲油的趋势。

6. 建 议

实验前填充的岩心和实验后的岩心的绝对渗透率都应该测定, 以便确定在蒸汽—空气实验和只注蒸汽实验期间绝对渗透率是否有大的变化。

表1 “蒸汽干度影响”试验系列

试验材料:	高品位的 Athahasca 油砂
烘箱温度:	210℃
蒸汽干度:	0%和83%
氧化剂:	空气
氧化剂浓度:	4%(质量百分数)

表2 “初始原油饱和度影响”试验系列

试验材料:	高品位的 Athahasca 油砂
烘箱温度:	210℃
蒸汽干度:	83%
氧化剂:	空气
氧化剂浓度:	4%(质量百分数)
注入方式:	(1)只注蒸汽2小时+注蒸汽—空气 8小时+只注蒸汽4小时+只注水10 小时 (2)注蒸汽—空气8小时+只注蒸汽 6小时+只注水10小时

表3 “温度影响”试验系列

试验材料:	高品位的 Athahasca 油砂
烘箱温度:	150℃, 210℃, 250℃
蒸汽干度:	83%
氧化剂:	空气
氧化剂浓度:	4%(质量百分数)
注入方式:	(1)2小时只注蒸汽+8小时注蒸汽 —空气+4小时只注蒸汽+10小时 只注水

表4 “空气浓度影响”试验系列

试验材料:	高品位的 Athahasca 油砂
烘箱温度:	210℃
蒸汽干度:	83%
氧化剂:	空气
氧化剂浓度:	2%, 4% 和 8% (质量百分数)
注入方式:	(1) 2小时只注蒸汽 + 8小时注蒸汽 — 空气 + 4小时只注蒸汽 + 10小时 只注水

表5 “空气—氧气—氮气比值关系”试验系列

试验材料:	高品位的 Athahasca 油砂
烘箱温度:	210℃
蒸汽干度:	83%
气体添加物:	O ₂ (与最好的空气实验中 O ₂ 流速相同) N ₂ (与最好的空气实验中空气流速相同)
氧化剂浓度:	4% (质量百分数)
注入方式:	2小时只注蒸汽 + 8小时注蒸汽—空气/O ₂ /N ₂ + 4小时只注蒸汽 + 10小时只注水

表6 “油砂类型”试验系列

试验材料:	中品位矿场油砂 低品位矿场油砂 合成的 Athahasca 油砂 Cold Lake 岩心
合成 Cold Lake 油砂:	...Otaawa 砂子 + 沥青 + 合成水 ...Outcrop 砂子 + 沥青 + 合成水
烘箱温度:	210℃
蒸汽干度:	83%
氧化剂:	空气

氧化剂浓度: 4%(质量百分数)
 注入方式: 2小时只注蒸汽+8小时注蒸汽—空气/O₂/N₂+4小时只注蒸汽+10小时只注水

表7 RP201—RP205试验前岩心性质

	RP201	RP202	RP203	RP204	RP205
油砂质量(g)	550.5	556.7	557.3	548.4	548.3
加覆压前密度(g/ml)	2.04	2.07	2.04	2.04	2.04
加覆压后密度(g/ml)	2.08	2.12	2.09	2.05	2.06
加覆压后油砂体积 (ml)	264.7	263.0	266.4	268.6	271.2
孔隙体积(ml)	92.7	91.7	99.0	96.4	96.2

表8 RP201—RP205试验条件

岩心方向: 垂直
 蒸汽流速: 96g/小时(1倍孔隙体积/小时)
 空气流速: 4.00g/小时(=4%质量百分数)(对 RP205)
 生产压力: 2.07MPa(蒸汽饱和温度=214℃)
 烘箱温度: 206—211℃
 岩心直径: 3.81cm
 岩心长度: 22.5cm
 岩心孔隙体积: 94cm³
 岩心质量: 550g

表9 压降和渗透率值

	RP201	RP202	RP203	RP204	RP205
<u>只注蒸汽2小时后:</u>					
压降 ¹ (KPa)	52			100	160
K _w (μm) ² ×1000	2.55			0.736	0.457
K _r (μm) ² ×1000	127.7			36.7	22.2
<u>注蒸汽—空气结束时:</u>					

压降 ¹ (KPa)	60				
K _w (μm) ² ×1000	2.45				
K _g (μm) ² ×1000	3.32				
<u>实验结束时:</u>					
压降 ¹ (KPa)	40	60	140	80	276
K _w (μm) ² ×1000	3.31	1.23	0.528	0.922	0.263
K _g (μm) ² ×1000	163.7	61.5	26.8	46.3	12.4

- ¹ 对 RP201实验,压降是通过堵头和22.5cm 岩心的压降。
对 RP202—RP205实验测量的压降是通过12.5cm 岩心的压降

表10 沥青饱和度总结

	初始 ¹	实验后 ²	
RP201	79.6%	20.3%	只注蒸汽
RP202	77.6%	22.6%	只注蒸汽
RP203	71.6%	21.6%	只注蒸汽
RP204	81.3%	19.4%	只注蒸汽
RP205	60.6%	15.7%	蒸汽—空气

- ¹ 在室温下的沥青饱和度
² 在最终实验温度下的沥青饱和度

表11 油砂 Deam Stark 结果

	RP201	RP202	RP203	RP204	RP205
<u>实验前:</u>					
沥青质量百分数:		12.3	12.3	13.6	9.9
水质量百分数:		4.6	2.6	2.4	5.6
砂子百分数:		83.1	84.1	83.6	83.7
<u>实验后:</u>					
沥青质量百分数:	3.2	3.5	3.7	3.2	2.6
水质量百分数:	9.8	12.4	11.5	10.6	8.8
砂子百分数:	86.7	84.0	84.7	85.9	88.0

表12: 初始沥青,产出沥青和最终沥青

	RP201	RP202	RP203	RP204	RP205
岩心中初始沥青(g)	73.8	71.1	70.9	78.4	58.3
收集器1(g)	36.9	26.1	22.2	40.6	35.3
生产管线1(g)	14.6	15.0	15.5	10.0	5.4
收集器2(g)	0.0	0.2	1.2	1.1	1.0
生产管线2(g)	1.6	2.9	4.6	1.8	1.3
收集器3(g)	0.0	0.2	1.4	0.1	0.4
生产管线3(g)	0.0	2.5	4.0	1.1	0.5
套筒和堵头(g)	3.7	5.3	2.6	0.7	0.6
岩心中最终沥青(g)	17.0	18.8	19.4	16.9	13.7
在油乳化物中采出沥青的百分数(%)	94.3	97.5	96.3	98.6	95.9
生产时间(小时):					
	RP201	RP202	RP203	RP204	RP205
生产系统1	0—4	0—2	0—1	0—2	0—2
生产系统2	4—8	2—6	1—2	2—6	2—6
生产系统3	—	6—8	2—8	6—8	6—8

表13: 试验后沥青和砂子的性质

	粘度(CP)		酸值	沥青质含量(%)
	75℃	125℃		
实验前	923	60	2.75	18.1%
RP201	9500	327	3.46	19.6%
RP202	4090	202	3.37	19.2%
RP203	—	—	—	—
RP204	—	—	—	—
RP205	14000	535	6.5	25.8

焦炭(“不溶于甲苯”)

实验前	0.63%
RP201	0.62%
RP202	0.65%
RP203	—
RP204	—
RP205	0.56%