

初始含油饱和度对注蒸汽—空气 驱替过程的影响

中国石油天然气总公司
石油勘探开发科学研究院

一九九一年十一月

(北京)

38

目 录

前 言	(2)
一、实验设备和实验程序	(2)
1. 设备	(2)
(1) 注入系统	(2)
1) 注蒸汽系统	(2)
2) 气体添加系统	(3)
(2) 油砂岩心和围压	(3)
(3) 生产系统	(3)
(4) 数据采集	(3)
2. 实验过程	(4)
(1) 样品分析	(4)
二、实验结果	(4)
1. 岩心两端的压差	(4)
2. 有效渗透率	(5)
3. 实验后的沥青饱和度	(6)
4. 沥青的产出	(6)
5. 油包水乳化液的产出	(6)
6. 沥青特性	(7)
7. 砂子特性	(7)
8. 产出水分析	(7)
9. 产出气的组分	(7)
三、小结	(8)
四、结论	(8)
五、建议	(9)

概 要

这篇报告总结了一系列旨在确定初始含油饱和度对注蒸汽—空气驱替过程影响的试验。在注空气之前,先对岩心进行蒸汽驱处理 0 小时、2 小时、7 小时,以此来获得不同的初始含油饱和度。这篇报告论述了一次注入纯蒸汽和六次蒸汽—空气混注实验,这些实验的结果总结如下:

1. 对于实验时间为 24 小时的实验,如果用纯蒸汽注入 0~2 小时后再进行空气和蒸汽的混注,则导致实验后沥青饱和度减少(从 25.7% 降到 15.5%~18.6%),沥青饱和度的减少部分原因是由于沥青中焦炭和一氧化碳气体的形成。纯蒸汽注入 7 小时后再注入空气,导致实验后更低的沥青饱和度 12.7%。

2. 从实验一开始就进行空气与蒸汽混注,则引起高压差,并且在空气停注时仍保持这个高压差。

3. 纯蒸汽注入 2 小时后再进行空气与蒸汽混注,通过岩心的压差暂时增大,但在注空气结束以前压差又下降了。

4. 注纯蒸汽 7 小时后与蒸汽一起注入空气对压差的幅度影响很小。

5. 如果空气是在实验开始后的 0~2 小时注入,则纯水注入过程中的压差(实验结束时)大约是空气注入时的四倍。当空气注入推迟到 7 小时以后,则注水对压差几乎没有影响。

6. 通过创造更得利于油润湿的条件,空气增加了形成水滴的趋势,并变成了产出油乳液的一部分。结果在实验的最初 1.75 小时内,油乳液的质量和该油乳液中水的百分含量都增加了。

7. 空气的注入大大增长了实验后沥青的酸值,然而,由于纯蒸汽的注入实验中的沥青含量(22.9%)和粘度(120℃下为 907 CP)已经很高,实验的结果表明,注空气对这些特性几乎没有影响。

8. 空气的注入大大提高了产出水乳化物中磺酸盐和醋酸盐的含量。然而,产出的水乳化物中磺酸盐的浓度在蒸汽—空气驱中比在以前的水—空气混驱中少(5)。这是蒸汽—空气实验中磺酸盐基本上是在低流量冷凝相中(16 克/小时)输送的一个主要结果,而在水—空气实验中,水的流量为 96 克/小时。

9. 空气降低了水乳液的 PH 值,但与注水—空气实验中典型 PH 值为 3 相比,注蒸汽—空气实验中水乳液的 PH 值在 4 以上。这是注蒸汽—空气实验中磺酸盐浓度比较低的结果。

10. 产出气的分析表明,产出气体中 CO_2 的含量大约是 CO 的四倍。注入 O_2 中大部分参与了反应。注蒸汽—空气实验中产出气中 H_2S 的浓度非常小(小于 0.2% 质量),没有检测到 SO_2 的存在。

初始含油饱和度对注蒸汽—空气驱替过程的影响

J. Ivory

L. Schmidt

摘 要

本报告报道了在相对渗透率装置上(RPF2)所做的一个注纯蒸汽和六个注蒸汽—空气实验结果。这些结果表明空气和水注入:(1)大大降低了实验后沥青饱和度(部分原因是由于沥青变成了焦炭,CO₂和CO),(2)产出油乳液中水的质量增加了两倍,(3)大大增加了实验后沥青的酸值,以及产出水乳液中磷酸盐和醋酸盐的含量,和(4)降低了水乳液的PH值。和注水—空气实验(5)一样,产出气中CO₂含量为CO的四倍。

当注入空气时,空气对岩心压差的影响取决于岩心中沥青的含量。当在实验一开始就与蒸汽一起加入空气,将出现高的压差,甚至当停止注空气时这一压差仍能持续下去。在注两小时纯蒸汽后接着注蒸汽—空气造成压差增高,但在注空气结束以前又下降了。注7小时纯蒸汽后接着注蒸汽—空气引起了瞬时压差值的波动,但是压差的大小基本上不因注入空气而变化。

前 言

本报告中所给出的实验结果是一系列实验中的一部分,其旨意是确定空气/氧气与蒸汽一起注入后对所试验的油砂样品物理及化学特性的影响。关于蒸汽—空气注入工艺的文献报道已在前面的报告(3)中进行了综述。本研究项目中其它一些注蒸汽—空气实验的结果也已经给予了报道(4~6)。本报告的重点是用于评价初始含油饱和度对注蒸汽—空气工艺过程影响的实验结果。讨论了一个只注蒸汽和六个注蒸汽—空气实验的结果。

一、实验设备和实验程序

1. 设备

实验是在如图1所示的相对渗透率装置(RPF2)上进行的。装置由四个主要部分组成:

- ① 注入系统;
- ② 岩心,压力容器以及加围压系统;
- ③ 生产系统;
- ④ 数据采集和控制系统。

(1) 注入系统

注入系统由两个主要的部分组成:

- ① 注蒸汽系统

在顶端盖处(见图 2)将 16 克/小时的脱气温水(烘箱温度)加到 80 克/小时的过热蒸汽中得到 83%干度的饱和蒸汽。用 Ruska 泵将脱气后的 MilliQ 水送到 1 千瓦 API 的过热加热器内而得到过热蒸汽。ARI 加热器供给足够的热量,确保过热蒸汽的温度比在顶端盖处与温水混合前的饱和温度高 10℃。过热加热器与压力容器之间的管线均有隔热措施。在注水管线上采用 ISCO LC-5000 型泵。当水在 210℃~211℃ Blue M 机械对流烘箱(内装岩心和压力容器)内流动时即被加热。

② 气体添加系统

在注蒸汽—空气实验中,空气从 Ruska 泵缸体中流经 PRI 加压阀,以此保持空气在 Ruska 泵缸体中有 7.10 MPa 的恒定压力。空气在进入顶端盖(混合点是 TE125 的上游)以前与过热蒸汽混合。用下列方式维持恒定的空气质量流量:① 恒定不变的 Ruska 体积流量;② Ruska 泵缸体中气体压力恒定。Ruska 泵缸体中的气体温度为室温,实验过程中通常保持在 24℃。

(2) 油砂岩心和围压

油砂岩心(直径为 3.8 厘米,长度为 22.5 厘米)由高质量的 Athabasca 油砂(通常含有 13.2%重量的沥青)所组成,用气压捣实并且包在薄壁(壁厚 0.5 mm)铜套中。典型的岩心特性列于表 1 和表 2。铜套和岩心均装在一个用碳素钢制成的压力容器中(图 2)。压力容器放置在烘箱中。

压力容器用 2 英寸厚的硅酸钙层对压力容器周围隔热,压力容器的顶部和底部用绝热带隔热(见图 3)。

如围压时用空气和水作介质,用手泵加压到 11.7 MPa,维持一小时。采用高压对岩心压缩后基本上排除了装岩心过程中进入的空气。一小时后,围压由 N₂ 气提供,用气体调节阀和泄压阀控制在 5.5 MPa。

油砂在进行注入试验之前预热一晚上,加热温度在烘箱温度上下 5℃内变化。

(3) 生产系统

产出液流入到装有三个集液器的钢管中,集液器由 N₂ 气—Mite 回压调节装置维持 2.07 MPa 的压力。首先产出液在集液器 1 中收集,然后流体直接流到集液器 2,最后流入集液器 3。用这种方式,可以得出三点采收率曲线。在实验 RP221 中,所有的产出液都直接流入集液器 3。这样消除了由一个集液器转换到另一个集液器所导致的压差波动。

(4) 数据采集

用 DEC PDP11/44 计算机记录实验过程中的数据。在 ISC 彩色仪表屏幕上也显示各种数据的值。大部分变量的测点位置可以从图 1—3 看出。所有的热电偶都是 K 型(镍铬—镍铝合金)。温水的注入温度由热电偶 TE200 记录。进入顶端盖以前的过热蒸汽温度由 TE125 测出。TE130 记录预顶端盖处与温水混合之前的过热蒸汽温度。饱和蒸汽的注入温度由 TE600 在顶端盖下部附近测出。

下端盖以上 5.6 厘米处和顶端盖以下 5.6 厘米处的温度分别由热电偶 TE710 和 TE720 测量。

沿岩心中间 12.5 厘米长度压差的测压点位于离每个端盖 5 厘米处(见图 4)。各测压点联接到三个平行的具有不同量程的 Rosemount 压力传感器(PT600、PDT720 和 PDT730)上。此外,注入压力(PT600)和生产压力(PT800)之间的压降由 PDT750 测量。岩心下部 5 厘米处

和下端盖之间的压降由 PDT800 测得。PT700 纪录围压。

2. 实验过程

实验 RPF2 的主要条件列于表 1 和表 2。实验之前,加 11.7 MPa 的围压并维持一小时经便压实岩心。实验过程中围压维持在 5.5 MPa。

在所有的实验中,83%干度的饱和蒸汽以 96 克/小时的速率注入岩心。每组实验中都维持恒定的生产回压,没有压力降低的现象。在实验 RP215~RP217 中,注入两小时的蒸汽以便得到纯蒸汽驱后的沥青饱和度,然后再注入空气。此外,也希望通过两小时的蒸汽驱获得注空气前稳定的压差,以便明显地反映出注空气后对压差变化的影响。在结束注蒸汽—空气时,又恢复注纯蒸汽并记录压差,以此方法来确定当停止注空气后有效渗透率是否有变化。此外,注入纯蒸汽后接着注十小时的纯水来确定不含气条件下水相的有效渗透率。

对实验 RP216,当在实验结束和生产阀门关闭时便停止注水。在 RP201~RP215 中也采用了这一操作程序。对实验 RP217~RP221,在 3 号生产阀门关闭后,继续注水大约十四分钟。这一方法用于维持岩心中具有高的压力,使得冷却期间可能发生的闪蒸量最少。

在实验 RP218 和 RP219 中,实验一开始便注入蒸汽—空气,从确定在高含沥青饱和度下注入蒸汽—空气时空气对实验的影响。实验 RP220 是一注纯蒸汽的基准实验。在实验 RP221 中,注入 7 小时的纯蒸汽后加入空气,以此方法来确定蒸汽—空气注入到高度枯竭油砂层中的压差反应。所有实验的注入方式由表 3 给出。

(1) 样品分析

对三个集液器中及生产管线中的产出液体进行了沥青含量及含水量的分析。所有集液器中水的 PH 值,TIC(Dohrman、碳元素分析)值,含硫(离子色层分析)和醋酸含量(离子筛析色谱法)也进行了测量。

对驱替后的岩心进行了沥青,水和固体含量的分析。驱替后砂岩中所含焦炭(不溶于甲苯)的质量百分数是通过将驱替后砂岩在 540℃ 温度下加热一夜后测量其质量的变化而得出的。实验后沥青的粘度是在 125℃ 时测量的(采用 Brookfield 锥板式粘度计测量)。还得到了驱替后沥青中的酸值和沥青质的含量。酸值是指中和 1 克原油的酸所需 KOH 的毫克数。

二、实验结果

实验 RP215 在实验 7 小时后,发现注入压力孔(PT600)有漏失时便放弃了。在实验前的压力调试中未发现漏失,而在实验前烘箱加热一夜中明显地出现了漏失。其它六个实验是另人满意的。

1. 岩心两端的压差

两个注蒸汽—空气实验(RP216 和 RP217)中压差(沿岩心 12.5 厘米中间段)随时间的变化由图 5 所示,其中空气是在注入两小时纯蒸汽后注入的。此图也包括了注纯蒸汽实验 RP220 的数据。在实验 RP220 开始时出现非常高的压差可能是由于岩石的短暂堵塞所导致的。

两个注蒸汽—空气实验(RP216 和 RP217)的压差具有相同的趋势。当开始注入空气时,

压差急剧上升,但在上升到最大值以前又迅速下降。压差最初的下降是由于开始注入空气时沥青饱和度降低。压差在达到最大值以后,甚至在停止注气前压差已经下降了。这就是说注入空气期间,沥青的产出和气体饱和度的增加(当岩心中气体饱和度高时,气体饱和度的增加将引起气体相对渗透率的大幅度增加)开始对沥青氧化作用所导致的压差升高具有阻尼效应。这就与前面的注蒸汽—空气实验 RP20 中的压差保持稳定的现象形成鲜明的对比(4)。然而,实验 RP205 中的压差值可能受到了由于疏忽造成的蒸汽注入速率降低的影响,在大约一小时的注空气期间,蒸汽注入速率由 96 克/小时降到 32 克/小时。

在注蒸汽—空气实验(RP216 和 RP217)中注纯水阶段结束时的压差(15 KPa 和 18 KPa)大大高于注纯蒸汽阶段的压差值 4 KPa。这一现象可能是由于实验 RP216 和 RP217 中氧化反应所产生的永久性变化,或者是由于实验结束时注 10 小时纯水期间岩心中仍然存在着残留的空气。

图 6 表明在实验(RP218 和 RP219)一开始就将空气和蒸汽一同注入可以获得更高的压差。当停止注空气时基本上还能维持高的压差值。与实验 RP218 相比,实验 RP219 中更高的压差值可能表明 RP219 中更多的沥青被氧化。这也可能是由于在实验 RP219 开始的 10 分钟内过热蒸汽的流量为 0 克/小时(而不是 80 克/小时)。这样就可能造成实验 RP219 开始时驱出的沥青比实验 RP218 相同时间内驱出的沥青量少。实验 RP220 开始四小时期间具有较高的压差值可能是由于绝对渗透率较低或者沥青饱和度较高(事先假设在注纯蒸汽的实验中沥青的驱替速度较低)。

图 7 中,对四个注蒸汽—空气实验(RP216~RP219)进行了对比。在实验 RP218 和 RP219)一开始就注入空气获得了最高的压差值,这时有更多的沥青可供氧化。每个实验中最后注纯水阶段的压差值大约为 17 KPa。

在实验 RP221 中,空气应在注纯蒸汽 6 小时以后加入。然而由于空气管线中出现明显的堵塞,在实验开始 7 小时后才注入空气。必须在实验 6 小时后打开 Blue M 号烘箱,拿走引起堵塞问题的单流阀。这就引起了压差曲线中短暂的下降。图 8 中显然注入的空气引起了压差信号的波动,但没有影响其幅度的大小。此外,实验 RP221 结束时注纯水阶段的压差只有 5 KPa,和注蒸汽(实验 RP220)后注纯水所得出的压差值基本上相同。这就说明水驱过程中岩心中几乎没有残留的空气。这意味着注蒸汽—空气实验 RP216~RP219 中注纯水阶段的高压差值是由于沥青的氧化所引起的,而不是由于残余空气饱和度所引起的。

2. 有效渗透率

在下列时刻计算了水相和气相有效渗透率:① 实验进行 2 小时;② 注蒸汽—空气期间压差值达到最大值时;③ 注蒸汽—空气结束时;④ 注纯蒸汽结束时;⑤ 注纯水结束时。计算值列于表 4。这些计算出的渗透率值是基于岩心中蒸汽干度 83%这一假设的。偏离这一干度值将导致估算注蒸汽期间渗透率的误差很大。还假设水相与干蒸汽—空气的流动是互不相干的(11)。如果水滴分布在蒸汽相中,则可以认为通过岩心的流动为一相。

在注纯蒸汽实验中,初始压差非常高(渗透率低)。这样甚至在注蒸汽后期(13 小时和 14 小时实验时间之间)用该实验估算的 K_w 和 K_g 值低于某些注蒸汽—空气实验。然而,在实验(RP216~RP219)开始的 0~2 小时期间注入空气成功地使 K_w 值减少,到实验结束时 K_w 值减少四倍。当注纯蒸汽 7 小时后注入空气,则 K_w 值只下降 20%。

3. 实验后的沥青饱和度

实验后的沥青饱和度列于表 5。注纯蒸汽实验的(RP220)的沥青饱和度为 25.7%，大大高于 5 个注蒸汽—空气实验在相同时间内的沥青饱和度值(12.7%~18.6%)。在注蒸汽—空气实验 RP215 中得出的高沥青饱和度值 20.8%是由于实验 7 小时后测压管漏失而中途停止所致。

注纯蒸汽实验后的沥青饱和度(25.7%)大大低于以前报道(5)的注纯水得出的值(32.4%~35.2%)。然而,在注蒸汽—空气实验中得出的剩余沥青饱和度值(12.7~18.6%)与注水—空气实验(5)中得出的剩余沥青饱和度值的范围(14.8~17.4%)相近。在注水—空气实验中空气以下面的方式降低了沥青饱和度值:① 驱替一些沥青,因为空气和沥青都是非润湿性流体;② 使一些沥青转化为焦炭和一氧化碳气体。在注蒸汽—空气实验中,由于蒸汽注入的结果使得气体饱和度已经很高,因而空气不能驱替太多余的沥青。事实上,在注蒸汽—空气实验中沥青饱和度降低的大部分是由于沥青转化成了焦炭和一氧化碳气体。

表 6 总结了 7 个实验的 Dean stark 结果。可以看出实验前样品中含沥青的质量百分数为 12.2%到 13.5%。注纯蒸汽实验(RP220)后的沥青含量(4%)大大高于注蒸汽—空气实验得出的沥青含量值。

注纯蒸汽实验后的沥青质量为 21.8 克,比注蒸汽—空气实验 RP216~RP219 后沥青质量平均值 13.2 克高出 8 克。实验前油砂样品中含有 460 克干砂子,其中 0.63%是焦炭。这样实验前焦炭的质量为 $0.0063 \times 460 = 2.9$ 克。注纯蒸汽实验后(砂子中)焦炭的质量百分数为 1.7%,注蒸汽—空气实验后一般为 2.3%。这样当注入空气后,实验后焦炭质量为 $0.023 \times 460 = 10.6$ 克。换句话说,在注蒸汽—空气过程中,油砂中焦炭的含量增加了 $10.6 - 2.9 = 7.7$ 克。在注纯蒸汽的实验中,砂子中焦炭的含量增加了 $0.017 \times 460 - 2.9 = 4.9$ 克。这样注蒸汽—空气实验中焦炭的含量比注纯蒸汽实验中增加了 3 克多。此外,注蒸汽—空气实验中产生的一氧化碳气体中含有大约 0.5 克的碳。这样,注蒸汽—空气实验中,实验后沥青饱和度降低值中大约 50%是由于产生的焦炭和一氧化碳气体。

4. 沥青的产出

沥青的产出数据由表 7 和图 9 所示。注纯蒸汽实验(RP220)中沥青的产出与注蒸汽—空气实验中沥青的产出是相类似的。在实验 RP221 中,空气是在注纯蒸汽 7 小时后注入的,沥青产出量越高,实验后剩沥青饱和度越低。

5. 油包水乳化液的产出

注纯蒸汽实验 RP220 中产出沥青中绝大部分(99.6%)是以油乳液的形式产出的。这一值甚至高于注蒸汽—空气实验中相应的油乳液所占比例的范围(87.7~99.4%)。然而正是由于空气可望增加油乳液中产出沥青的百分数,所以这一结果大概正是实验结果不同的原因。

采用可观察的微观模型,Jamaluddin 和 Butler(7)研究了油包水乳化物的形成过程。他们推测到“当蒸汽在蒸汽—油界面上凝结时,形成小水滴,这些水滴被油包围便形成了油包水乳化物”。他们的理论模型表明,从能量上讲“在亲油系统中比亲水系统中更容易形成油包水

乳化物”。

在他们的注蒸汽实验中产出流体由冷凝水和油包水的乳化物所组成。这也是 RPF2 实验中的典型现象。

当在实验一开始(RP218 和 RP219)就将空气和蒸汽一同注入时,产出端 1 中油乳液中水的质量增加了两倍,而在这些乳液中沥青的质量基本上保持不变(见表 8)。这样,空气似乎有增加水滴在沥青中形成的趋势。这一结果也可以通过增加砂子颗粒的油润湿性来取得,或者通过产生沥青薄膜(由分散的沥青液滴)使得沥青和冷凝蒸汽有更大的接触表面来取得。油乳液中水含量的增加导致更高的乳液粘度,结果产生更高的压差。

6. 沥青特性

实验后沥青的特性示于表 9。注蒸汽—空气实验后沥青的酸值大约是注纯蒸汽实验 RP220 的三倍。使人感到惊讶的是,注纯蒸汽实验后沥青的粘度比所有注蒸汽—空气实验(除 RP217 以外)后沥青的粘度值高。除了实验 RP219,所有注蒸汽—空气实验中,实验后沥青中沥青质的含量都高于注纯蒸汽实验。

7. 砂子特性

在所有的注蒸汽—空气实验中,在实验期间砂子中焦炭的含量都有显著的增加。对所有这些实验,实验后砂子中焦炭含量范围为 2.0~3.0%,本次注纯蒸汽实验后焦炭含量为 1.7%,高于以前注纯蒸汽后的焦炭含量(0.6~1.4%)。

8. 产出水分析

产出水的 PH 值、磷酸盐含量,无机碳含量(TIC 含量)由表 10 表示。在注蒸汽—空气实验中,磷酸盐含量达到大约 400 毫克/升,该数量级高于注纯蒸汽实验中得出的最大值。但 these 实验中的磷酸盐含量低于注水—空气实验中的值(5)。由于在注蒸汽—空气实验中的蒸汽干度高,只有流量大约为 16 克/小时的液态水溶解并携带磷酸盐。然后这部分液相水被生产管线和集液器中冷凝的蒸汽所稀释。在注水—空气实验中,基本上所有以 96 克/小时流量注入的水都可以用于溶解磷酸盐,并将其带出岩心。

注入空气也大大增加了醋酸盐的含量。换句话说,空气对总的无机碳(TIC)含量没有影响。空气对产出水的磷酸盐浓度、醋酸盐浓度以及无机碳(TIC)浓度的影响同以前的注空气实验得出的结果是类似的(4~6)。

几乎所有的注蒸汽—空气实验中产出水的 PH 值都降低了,而在注纯蒸汽实验中产出水的最低值为 6.4。在注蒸汽—空气实验中,PH 值都大于 4,而在以前的注水—空气实验(5)中 PH 值低到 3。这一现象可以用注水—空气实验中高的磷酸盐浓度来解释。

9. 产出气的组分

从生产集液器 2 中产出气的组分列于表 11 中。生产集液器 2 中各种气体的摩尔数计算结果列于表 12。从表 11 可以看出,产出气中碳氢气体的组分非常少。对注水—气实验(5)而言,CO₂ 与 CO 的比值大约为 4。Clark 等人(1)得出的结论是,从油砂中产出的 CO 是通过水—气—转化—反应(WGSR)转化为 CO₂ 的。



油砂中的矿物以及金属容器对水气转化反应起了催化作用。这样,铜制的岩心夹持器可能对产出气中 CO_2/CO 比值有影响。产出气中非常高的 N_2/O_2 比值表明大部分注入氧气都参与了反应。

三、小 结

空气和蒸汽起注入的影响归纳如下:

1. 当注入 0~2 小时纯蒸汽后注入空气,实验后沥青饱和度从 25.7% 降到 15.5~18.6%。沥青饱和度的降低部分原因是由于从沥青中产生了焦炭和一氧化碳气体。
2. 注 7 小时纯蒸汽后注入空气甚至可以将沥青饱和度降低到 12.7%。
3. 当在注两小时纯蒸汽后,蒸汽与空气混注引起岩心中压差的增加,但随后甚至在停止注空气前压差已开始下降了。
4. 当在实验一开始就与蒸汽一起注入空气时,产生了高压差,并且当停止注空气时还能维持高压差值。这样在实验一开始就注入空气,似乎有足够的沥青供氧化,从而对压差生长时间的影响。
5. 注七小时纯蒸汽后注入空气不会引起压差的大幅度增高。
6. 空气的注入使在最初的 1.75 小时实验中产出油乳液中水的质量增加了二倍。很明显,空气增加了形成水滴并被沥青所包围的趋势。乳化液的粘度增高大概是含水量增加的结果。
7. 实验后沥青中酸值和沥青含量大大提高。然而,空气注入不会引起实验后沥青粘度的增加。
8. 产出水乳液的 PH 值降低,磷酸盐和醋酸盐浓度大幅度提高。然而,由于蒸汽中的气体相没有携带硫酸根离子,所以产出水的磷酸盐含量较低,并且注空气—蒸汽实验中的 PH 值高于注水—空气中的 PH 值。
9. 注蒸汽—空气实验在产出气中检测出 CO 和 CO_2 ,其比值为每 1 摩尔 CO 对应 4 摩尔 CO_2 。产出气中有 H_2S 气体存在,但没有检测到 SO_2 。

四、结 论

根据这一组实验得出的结论归纳如下:

1. 空气和蒸汽一起注入降低了实验后沥青饱和度。然而,沥青饱和度的降低至少有一部分原因是由于一些沥青转化为焦炭和一氧化碳气体。
2. 如果油饱和度大于残余油饱和度,则只有注入空气使压差大大提高。此外,如果要维持高的压差值,在注入空气时必须具有足够高的油饱和度。
3. 空气增加了产出油乳液中水的百分含量,结果,乳化液的粘度也随之增加。
4. 空气的注入提高了实验后沥青的酸值和沥青质含量。空气还提高了产出水乳液中磷酸盐和醋酸盐的含量。
5. 空气降低了水乳液的 PH 值,这样就增加了固体相变为润湿的趋势。

6. 产出气中 CO_2 的含量是 CO 的四倍。产出气中也有 H_2S , 但没有检测出 SO_2 气体。

五、建 议

必须尽快测定产出水乳液的 PH 值, 以便使获得的数值能准确代表液体产出时刻的 PH 值。

表 1

实验 RP206~RP214 的实验条件

岩心方位	垂直
流动方向	向上
蒸汽流量	96 克/小时(1 倍孔隙体积/小时)
空气流量	4.00 克/小时(=4%质量)
生产压力	2.07 MPag
烘箱温度	210℃~211℃
岩心直径	3.81 厘米
岩心长度	22.5 厘米
岩心孔隙体积	94 厘米 ³
岩心质量	550 克
噁初沥青质量	70 克

表 2

实验 RP215~RP221 中岩心性质

	RP215	RP216	RP217	RP218	RP219	RP220	RP221
油砂质量(克)	547.2	551.1	554.5	563.3	558.5	562.3	550.8
压实前密度(克/毫升)	2.05	2.06	2.07	2.11	2.08	2.08	2.05
压实后密度(克/毫升)	2.12	2.09	2.08	2.11	2.13	2.11	2.10
压实后油砂体积(毫升)	259.0	264.9	266.9	267.8	263.2	266.8	262.5
孔隙体积(毫升)	86.3	88.6	89.5	86.9	86.1	93.0	89.4
孔隙度(%)	33	33	34	32	33	35	34

表 3

实验 RP215~RP221 的注入方式

RP215:	2 小时纯蒸汽 5 小时蒸汽—空气
RP216:	2 小时纯蒸汽 8 小时蒸汽—空气 4 小时纯蒸汽 9.65 小时低干度蒸汽 2.65 小时纯水
RP217:	2 小时纯蒸汽 8 小时蒸汽—空气 4 小时纯蒸汽 10 小时纯水
RP218:	8 小时蒸汽—空气 6 小时纯蒸汽 12 小时纯水
RP219:	8 小时蒸汽—空气 6 小时纯蒸汽 10 小时纯水
RP220:	14 小时纯蒸汽 10 小时纯水
RP221:	7 小时纯蒸汽 5 小时蒸汽—空气 2 小时纯蒸汽 10 小时纯水

表 4

压差和渗透率值

	RP216	RP217	RP218	RP219	RP220	RP221	
压差 ¹ (KPa)	80.0	100.0	120.0	130.0	225.2	56.3	注入两小时后
Kw(μm) ² ×1000	0.915	0.734	0.607	0.562	0.323	1.327	
Kg(μm) ² ×1000	44.4	36.0	30.9	28.7	15.2	69.1	
时间(小时)	6	6	5	7	—	9	注蒸汽—空气过程中最大压差值时
压差 ¹ (KPa)	120	97	2.3	343	—	65	
Kw(μm) ² ×1000	0.613	0.764	0.360	0.189	—	1.144	
Kg(μm) ² ×1000	32.3	41.3	18.3	11.3	—	62.8	
时间(小时)	10	10	8	8	—	12	注蒸汽—空气结束时
压差 ¹ (KPa)	100	78	156	285	—	65	
Kw(μm) ² ×1000	0.739	0.945	0.472	0.256	—	1.144	
Kg(μm) ² ×1000	39.5	49.9	24.4	13.0	—	0.0628	
时间(小时)	14	14	14	13	13	13	注纯蒸汽结束时
压差 ¹ (KPa)	60	80	64	280	90	74	
Kw(μm) ² ×1000	1.23	0.922	1.15	0.259	0.820	1.001	
Kg(μm) ² ×1000	61.6	46.4	57.2	12.1	41.2	51.2	
时间(小时)	26.3	24	26	24	24	24	注纯水结束时
压差 ¹ (KPa)	18	15	14	19	4	5	
Kw(μm) ² ×1000	24.5	29.4	31.0	23.5	110.8	89.1	

1. 测定岩心中间 12.5 厘米长度的压差值。

2. 在注纯蒸汽实验 RP220 中注入 7 小时后的压差为 99 KPa。以此计算出的 Kw 为 $0.744 \times 10^{-3}(\mu\text{m})^2$ 和 Kg 为 $37.3 \times 10^{-3}(\mu\text{m})^2$ 。

3. 在实验 RP221 中注入 7 小时纯蒸汽后的压差值为 88 KPa。以此计算出的 Kw 为 $0.841 \times 10^{-3}(\mu\text{m})^2$ 和 Kg 为 $43.2 \times 10^{-3}(\mu\text{m})^2$ 。

表 5

沥青饱和度汇总

		初始值 ¹ (%)	实验后值 ² (%)
RP215	注蒸汽—空气	69.0	20.8
RP216	注蒸汽—空气	69.7	16.4
RP217	注蒸汽—空气	69.4	15.6
RP218	注蒸汽—空气	74.9	18.6
RP219	注蒸汽—空气	77.2	15.5
RP220	注纯蒸汽	78.0	25.7
RP221	注蒸汽—空气	76.6	12.7

1. 室温下的沥青饱和度。

2. 最终室验温度下的沥青饱和度。

表 6

油砂 Dean Stark 测定结果

		RP215	RP216	RP217	RP218	RP219	RP220	RP221
实验前	沥青质量(%)	13.2	13.7	12.2	13.7	13.5	13.2	12.8
	水质量(%)	3.3	3.9	2.7	3.0	2.7	3.6	2.9
	砂质量(%)	83.2	82.3	84.4	83.8	83.8	83.5	83.9
实验后	沥青质量(%)	3.2	2.4	2.3	2.7	2.2	4.0	1.9
	水质量(%)	7.3	11.2	11.7	11.1	13.1	12.6	13.6
	砂质量(%)	89.7	86.3	85.6	86.6	84.8	83.8	84.5

表 7

初始沥青量、沥青产出量和沥青剩余量

	RP215	RP216	RP217	RP218	RP219	RP220	RP221
岩心中初始沥青含量(克)	59.6	61.8	62.1	65.1	66.5	72.5	68.4
集液器 1(克)	34.1	32.1	35.5	39.2	32.6	36.4	48.7
生产管线 1(克)	7.7	8.1	7.9	3.8	3.1	5.7	6.9
集液器 2(克)	—	1.4	1.0	0.9	1.4	0.1	—
生产管线 2(克)	0.9	0.3	1.1	1.3	1.5	4.3	—
集液器 3(克)	—	2.0	1.8	1.6	4.8	0.1	—
生产管线 3(克)	—	0.6	1.2	0.9	1.1	2.8	—
岩心筒和端盖(克)	0.7	4.1	0.9	2.8	9.9	1.4	2.6
总沥青产量(克)	43.4	48.5	49.3	50.4	53.4	50.7	58.1
岩心中最终沥青量(克)	16.2	13.3	12.7	14.7	12.2	21.8	10.3
油乳液中产出沥青(%)	99.4	90.5	92.3	93.4	87.7	99.6	95.2
生产时间(小时)							
	RP215	RP216	RP217	RP218	RP219	RP220	RP221
生产管线 1	0~1.75	0~1.75	0~1.75	0~1.75	0~1.75	0~1.75	0~24
生产管线 2	1.5~7	1.75~8	1.75~6	1.75~6	1.75~6	1.75~6	—
生产管线 3	—	8~26.3	6~24	6~26	6~24	6~24	—

表 8

开始的 1.75 小时内产出的乳化液

	油乳液质量 (克)	油乳液中沥青 百分含量(%)	油乳液中水的 质量(克)	水乳液质量 (克)	水乳液中沥青 百分含量(%)
RP216	43.35	73.49	11.5	228.82	0.10
RP217	47.54	73.65	12.6	230.59	0.08
RP218 ¹	71.58	54.41	32.6	205.22	0.12
RP219 ¹	70.33	46.07	37.9	207.91	0.10
RP220	49.24	73.92	12.8	231.33	0.03
RP221 ²	—	—	—	—	—

1. 在实验 RP218 和 RP219 中,在开始的 1.75 小时期间空气和蒸汽同时注入。在其它实验中,开始 1.75 小时只注入纯蒸汽。

2. 在实验 RP221 的整个实验期间,产出流量收集在一个集液器中,这样就没有开始 1.75 小时的数据。

表 9

实验后沥青和砂的特性

	125℃时的粘度 (CP)	酸 值	沥青质含量 (%)	焦 炭 (不溶于甲基)
实验前	60	2.75	18.1	0.63
RP215	627	6.79	26.8	2.30
RP216	420	6.23	23.7	2.19
RP217	1530	5.16	28.8	2.22
RP218	391	6.41	25.9	2.70
RP219	350	7.83	22.7	3.00
RP220	907	2.29	22.9	1.70
RP221	661	5.76	24.2	2.01