

中-加科技合作交流资料

加有表面活性剂和氮气的
蒸汽驱的 90cm 模拟器
Athabasca 油砂试验 RD004

中国石油天然气总公司
石油勘探开发科学研究院

一九九一年六月一日

编者提要：

该文主要结论之一是在注入 4 年内多个段塞效果不及单个段塞,并认为随段塞数增加活性剂对岩石的吸附量增加。

编者认为:第一,泡沫剖一般都具有带屈服的宾汉式假塑性流变学特性。因此多个段塞的多次启动往往产生更大的注入压差,有利于蒸汽转向。第二,吸附一般符合朗格谬尔方程,总吸附量应与单个段塞相同。认为由于岩石对活性剂的吸附造成在水相中的损失增大作者未予论证。如果以上两机理在数模中给予考虑,可期望多个段塞的数模效果变好。

编者提要

本文所述的 90cm 模拟器，即模拟的主体人造砂层长 90cm。文中介绍了装备、样品制备、操作方法，叙述之详，足可供做同类试验的人员仿照操作。

试验结果表明，表面活性剂在注入井附近和残油饱和度低的部位，即蒸汽窜流通道严重的地方效果明显，发泡率高，堵塞孔道，使蒸汽分流，提高驱油效果。试验采收率为 51.1%。温度在 100℃ 时效果最好，高达 235℃ 时也还有效。

本试验的目的有二个：注蒸汽与注蒸汽加表面活性剂的采油效果比较，已证明加表面活性剂的效果比纯注蒸汽好；其次，为模拟复杂的蒸汽驱过程的数值模拟器提供基本参数，该目的已达到，已用物理模拟的数据建立了数据库。

今后研究的方向，应试验能使表面活性剂充分起作用的临界残油饱和度，并尽量减少热损失对系统的影响。

加有表面活性剂和氮气的 蒸汽驱的 90cm 模拟器 Athabasca 油砂试验 RD004

摘 要

本报告中的物理模拟试验结果是研究用工业表面活性剂改进蒸汽驱动态研究的组成部分。该结果还将用于建立一个检验数值模型的数据库。本文描述了大比例物理模拟表面活性剂蒸汽, N_2 试验, 得到了以下的结果。

- 成功地进行了试验, 并且建立了一个用于检验 ARC 数值模型的数据库。
- 蒸汽驱中的原油采收率与试验层温度强相关, 因为在先期的试验中物理模拟器的热损失对采油方法的效率起主导作用。
- 泡沫引起蒸汽分流的迹象在温度曲线和试验之后的含油饱和度中可以看到。

一、前 言

在蒸汽驱过程中, 大部分蒸汽流经低含油饱和度的高渗层带而浪费掉了, 而大家公认表面活性剂在蒸汽驱过程中可以明显提高油砂岩心的沥青采收率。采收率的提高是由于在高渗层带中泡沫的形成。泡沫降低了高渗层带的有效渗透率从而减少了富含油的油砂与高渗透通道之间渗透率的差异。这就使注入的蒸汽较大部分流到油砂中, 提高了油的采收率。图 1 为该工艺过程的简图。本文所述试验的目的就是要确定相似的方案可否应用于蒸汽驱在生产井突破的情况。在这种情况下蒸汽扫过的层带变得就象高渗透带一样, 这是因为它的低含油饱和度, 而不是因为它具有较高的绝对渗透率。图 2 是此过程的简图。如果在蒸汽驱扫过的层带形成的泡沫能够降低渗透率的话, 理论上讲会有更多的蒸汽分流进入未枯竭的油砂中。这就会扩大蒸汽波及层带的范围, 改善蒸汽驱过程的效率。

二、试 验

1. 材料

用于本试验的油砂材料是高品位的 Athabasca 油砂, 它是从 Fort McMurray 附近的 Suncor 地区采来的。试验前用手工分拣除去大块岩石或粘土团块。在分拣过程中取出六个样品, 分析沥青、水和砂的含量。六个样品的平均分析值是: 15.0% 的沥青、1.5% 的水和 83.5% 的砂 (重量百分比)。

2. 容器的准备

把 90cm 长的容器装配在一个特殊的平台上, 在这个平台上容器可以垂直放置或者水平放置。图 3 是 90cm 模拟器的说明。容器垂直放置, 用气动填塞工具把高品位的

Athabasca 油砂填入。在填充之前先把一口注入井、热电偶棒、加热器和压力敏感元件装在容器中心。当容器充填到离顶部 10cm 时，把热电偶棒从容器底部穿过油砂向上提。在安装热电偶棒的同时还安装了两个三点放压孔。一旦热电偶棒装好了，就把容器顶部 10cm 用油砂填上。把一个带有生产井的钢隔板装配好并安置覆盖在油砂上面。为了防止出砂，在生产井上使用了一个有 0.010 英寸开缝的楔形金属过滤器。当隔板安置到位时，用螺栓把容器的顶罩栓上，并用氮气在 7MP_a 下试压，模拟上覆地层压力。填砂时捕集在容器里的游离气体可以从生产井放出去，然后把试验台放置一整夜，使尽可能多的气体跑掉。

3. 注入设备

本试验使用了四种注入流体设备：

- 用于加热元件升温的低压蒸汽。
- 高压采油过程的蒸汽。
- 氮气注入的气流。
- 表面活性剂的注入。

(1) 加热元件

加热元件（钢管）安装在从注入井到生产井里边 5cm 处的试验台正中央。实验的最初两小时，低压蒸汽在加热元件中循环以帮助维持连接注入井和生产井的热区。加热元件内的蒸汽压力控制在 310KPa（绝对）下，以使加热元件的温度能维持在 135℃。

(2) 高压采油过程的蒸汽

从 4.0MP_a 的主供气管线得到注入蒸汽。蒸汽在流过一个测量和控制注入流速的小孔及控制阀门系统之前就被加热到 375℃。用高压蒸汽管线把注蒸汽的管线套上，直至注入井的混合三通。利用控制套内蒸汽压力把注入蒸汽的温度控制到大约过热 5 度。蒸汽在 5kg/小时下连续注入。蒸汽注入系统的简图如图 4 所示。

(3) 气体的注入

氮气做为非冷凝气随蒸汽共同注入。氮气由高压气瓶提供，而且在经过流量计和控制阀系统之前把压力调到 4MP_a。把控制阀的出口连到混合三通上，以 100gm/小时的流速注入氮气。氮气注入系统的简图包括在图 4 中。

(4) 表面活性剂的注入

把表面活性剂（Sun Tech IV，太阳石油化学公司）存放在一个玻璃大罐里。如果需要的话，这个罐可以被连续搅拌和加热。用一个容积式泵把表面活性剂泵入三通。从 t=802 分到 t=1451 分共注了 613 分钟表面活性剂溶液。注入的速度是 333cc/小时，溶液的浓度是 5g/L。表面活性剂注入系统的简图也包括在图 4 中。

4. 生产情况

用一个双收集器采出系统维持系统的回压和产出流体样品。该系统的简图示于图 5。产出流体流过一个热水热交换器，在那里把流体冷却到大约 80℃。然后流体通过一个三通阀到管柱 A 或者 B。每个管柱都是一个浮动活塞收集器。活塞下边的压力用一个氮气压力控制系统通过 Mighty Mite 回压减压阀来控制。在计算机的控制下设定氮气回压，而

且可以设定压力为时间的任意函数。在试验开始时，这两个收集器全都是空的，活塞都在顶部。流体首先通过三通阀直接流到管柱 A 里面，当柱 A 里的活塞触到底部时，流体自动地转向柱 B。然后把柱 A 降压取样。因为每一种样品都可以充满收集器，所以产出气体体积可以由收集器的体积减去产出液体的体积计算出来。

5. 数据记录

全过程的点经过多路扫描器连接到 PDP11/44 计算机系统上，每 15 秒钟扫描一次并记录成一个趋势文件。把安装在试验层上的热电偶棒连接到一个 AUTODATA-9 多路扫描器上，该扫描器每两分钟一次用 PDP11/44 计算机扫描并记录到扫描文件中。过程及温度点也被操作连机系统显示在 ISC 彩色屏上。

6. 试验层的座标系统

用于记录温度、压力和岩心样品位置的座标系统示于图 6。把数据点的位置确定在直角座标中，点 (0, 0, 0) 是注入井穿透油砂填充物的中心点。正的 Z 方向是以厘米为单位，从法兰边缘算起的距离。x 方向是以厘米为单位，在水平方向上从容器的中心线算起的距离。y 方向是以厘米为单位，在垂方向上从容器的中心线算起的距离。

7. 试验步骤

用从 Suncor 附近 Fort McMurray 采集的高品位的 Athabasca 油砂充填 90cm 的容器。用气动填塞工具把油砂填充到容器中去。填充好之后加 7MP_a 的上覆压力过一夜，游离气从填充容器的顶部放空，此时容器仍然处在垂位置上。把容器倒下放置在水平位置上并用玻璃纤维绝缘材料缘绝。然后把容器搬到位并把注入井和生产井都连接上。接下来按下面的时间表进行实验：

- 3月3日, 9: 48 把生产位置的回压控制在3.3MP_a，打开试验层和生产位置之间的隔离阀门。
- 3月3日, 10: 35 接通流向加热元件的蒸汽，加热元件是从注入井向生产井穿过试验层铺设的。加热系统的回压保持在 310KP_a 绝对压力下以使加热元件的温度维持 135℃。
- 3月3日, 10: 35 开始向油砂中注蒸汽。把蒸汽流量设置在5.0kg/小时。(t=0.0分)。
- 3月3日, 10: 35 氮气开始注到油砂中。把氮气流量设置在100g/小时。(t=0.0分)。
- 3月3日, 12: 35 关上流向加热元件的蒸汽。(t=120分)。
- 3月3日, 23: 57 以333cc/小时的流速开始注表面活性剂。(t=802分)
- 3月4日, 1: 41 在产出流体中见到表面活性剂 (t=906分)
- 3月4日, 7: 30 为了重新装填泵料暂停注表面活性剂 (t=1255分)。
- 3月4日, 7: 43 以333cc/小时的流速重新开始注表面活性剂溶液 (t=1268分)。
- 3月4日, 10: 10 对余下的试验停止注入表面活性剂溶液。溶液的总注入量是3348cc (t=1415分)。

3月4日, 16: 59 停止注氮气 ($t=1824$ 分)

3月5日, 14: 10 关闭试验层与生产位置之间的隔离阀门。在降低的流速下注2小时蒸汽以保持试验层的压力, 因此可使冷却期间试验层里的蒸汽闪蒸量降至最低限度 ($t=3095$ 分)。

三、试验结果

1. 产出的流体

每换一次产出物管柱就取一次产出流体样品。调整管柱使它们每充满一次就换一次, 这样就可以取到恒体积的样品了。每个样品的总体积是 4800cc。记录每个样品的液相重量, 并分析油和水的含量。从收集器体积和样品的液体体积之差计算出产出气体的体积。附录 I, 表 1 包括了产出流体的实验室分析结果。表中包括的数据有:

- (1) 样品号;
- (2) 开始注蒸汽的时间 (分);
- (3) 样品中产出水的重量 (克);
- (4) 样品中产出油的重量 (克)。

附录 I, 表 2 包括了产出流体的速度。该表包括的数据有:

- (1) 样品号;
- (2) 开始注蒸汽的时间 (分);
- (3) 采样期间的总产出速度 (油 / 水 / 气) $\text{cm}^3 / \text{分}$;
- (4) 油的产出速度 (克 / 分);
- (5) 水的产出速度 (克 / 分);
- (6) 在 3.3MP_a 下气的产出速度 ($\text{cm}^3 / \text{分}$)。

图 7 至图 10 划出了这些数据的曲线。

附录 I, 表 3 包括了累计采出流体的数据。表中所包括的数据是:

- (1) 样品号;
- (2) 开始注蒸汽的时间 (分);
- (3) 累计产油量 (千克);
- (4) 累计产水量 (千克);
- (5) 瞬时的油 / 水比;
- (6) 累计的油 / 水比。

图 11 至图 14 划出了这些数据的曲线。

2. 工艺过程的变量

试验期间每 15 秒钟扫描并记录一次工艺过程的变量。附录 II 包括了整个试验的数据点对时间的关系曲线。在与产出流体样品相关的时间间隔里还对这些数据点进行了平均。已经平均过的数据点是:

- FM120 蒸汽注入流速 ($\text{kg} / \text{小时}$);
PT420 注入井压力 (MP_a);

TE420 注入井温度 (C);

PT525 生产井压力(MPa);

TE470 生产井温度 (C);

PDT421 试验层两端的压降(KPa);

FM250 氮气注入速度 (标准升/分)。

附录 II, 表 4 包括了对每个点取的平均数据。

3. 压降的数据

在试验层中的 9 个点上测定试验层的压力。这些点的位置示于图 15。计算结点间的压降, 并把它们的值按时间做图并制成附录 III 中的表 5a 和 5b。

4. 温度的数据

试验之前先在试验层上安装大约 25 个 8 点热电偶棒。热电偶棒间距 10 厘米。试验过程中每 2 分钟扫描和纪录一次温度。用此数据导出试验过程中在选定的时间间隔内试验层的水平和垂方向上的等温度图。

5. 试验后的岩芯分析

完成试验后, 在试验层上取岩芯分析样品中的沥青、水和固体。把试验层分为如图 6 所示的 11 个层。在每一层如图 17 所示取 17 块岩芯。用分析结果计算残余油饱和度。为了这一计算设定以下常数:

油的密度	1020.5kg/m^3
水的密度	1000.0kg/m^3
固体密度	2293.6kg/m^3
孔隙度	0.3604

附录 IV 中的表 6 包括了实验室的分析及计算结果。

四、讨 论

1. 油的采收率

试验 RD004 是一次蒸汽、氮和表面活性剂试验, 它进行了 51.5 小时, 在此期间一共注了 240kg 或者 3.46 倍孔隙体积的蒸汽。填充的油砂总体积是 0.192m^3 , 重 359.8kg。原始含油量为 54.0kg。试验结束时若采出了 27.6kg 或者 51.1% 的油。图 8 就是一条按时间的采油速度曲线。曲线把试验分为四个部分, 这四部分是:

- (1) 蒸汽和氮;
- (2) 蒸汽、氮和表面活性剂;
- (3) 蒸汽和氮气;
- (4) 纯蒸汽。

在试验的第一阶段里, 当注入蒸汽和氮气时, 油的产出速度很高但是平稳地下降。当第二阶段注表面活性剂时, 因为注入井周围的层带的增压, 采油速度下降了。一旦注入井

周围层带压力增上来了采油速度就回升到注表面活性剂之前的水平。有一段很短的时间，速度高于注表面活性剂之前。这个波动存在时间很短，而且或许是在试验层增压时积累下来的油。在表面活性剂注入过程中，产油速度继续下降到大约与注表面活性剂之前相同的速度。当停止注表面活性剂时，产油速度看不出变化或者呈下降趋势。在试验的第四阶段停止注氮气，在这一点产油速度显著下降到大约是注氮气前的一半。

2. 热力交流与热损失

用蒸汽加热插在填充的容器中央的加热元件开始了注入井和生产井之间的热交流。试验初期开始注蒸汽的头 2 小时，产生的温度达到 100°C 时注入井和生产井之间的热交流进行得较好。3 小时以后，产生的温度达到最大值 235°C 。就在那个时候生产井的温度开始下降，直到试验结束温度达到 180°C 。图 18 是一条累计采油量与试验层平均温度的关系曲线。从这里我们可以观察到试验层温度对采收率的强依赖关系。由于油的流动及其被蒸汽驱替，热水能够渗透到预先饱和了油的层带，从而提高了它的平均温度。图 19 是试验层平均温度与时间的关系曲线。试验结束时温度已停止上升，这表明热损失与热输入相平衡，限制了油的采收率。

3. 压力下降的数据

在注表面活性剂期间观察到了从整个试验层测得的压力降的明显变化。这种情况的一个实例是在注入井附近的压力下降及生产井附近的压力下降。图 20 是从注入井到生产井与注入井之间的中点的压力下降曲线。图 21 是从中点到生产井之间的压力下降曲线。从这些图中我们可以看到表面活性剂的作用集中在注入井的附近，而对生产井周围地带很少或没有作用。

4. 温度的数据

图 22 是 5 个不同的时间通过试验层的垂直和水平切面的温度等值线。温度等值线是 230°C 、 220°C 、 210°C 和 200°C 。时间是蒸汽注入后 540、780、1020、1260 和 1380 分钟。在时间 $t=540$ 分和 $t=780$ 分时，只有蒸汽和氮气注入试验层中。从等值线我们可以看到，这些点的加热带增长得非常缓慢。在 $t=802$ 分时开始注表面活性剂。在 $t=1020$ 分上我们可以看到加热带在试验层顶部和底部稍有增长而在试验层中央处已有点儿冷下来了。这种趋势在整个注表面活性剂过程中持续着，而且在 $t=1380$ 分结束注表面活性剂时，试验层中心地带已经明显变冷而试验层的较高和较低部分却变得较热。从这些等温线得到的数据还用来绘制图 23 中的试验层温度变化等值线。在这种情况下，把 $t=780$ 分的温度用做温度分布的基线。图 23 所示的等温线表示了相对于 $t=780$ 分时的温度变化。从这些线中我们可以看出，当注表面活性剂时，实验层中心处的层带冷却得相当快。

5. 试验后的油饱和度等值线

将试验后所取的岩芯数据用于计算残余油饱和度并将其列于附录。这些数据还用于计算划在图 24、25 和 26（原文有误—译注）中的含油饱和度等值线。 $Z=12\text{cm}$ 和 $Z=20\text{cm}$ 处的等值线平面显示出注入井周围的油几乎是对称地减少。另外，在这个范围里还可以看

到含油饱和度很低。对比只注蒸汽时观察到的最小值 16%，这个范围测到的饱和度低到只有 9%。蒸汽的超复现象也不象只注蒸汽时那么普遍。而且从试验层的下半部分采出了相当数量的油。

五、结论和建议

本试验的目的是提供一个对比基础，即把注蒸汽的采油过程与注蒸汽/氮气/表面活性剂的采油过程做对比，并为检验 ARC 的三维数值模拟器建立基础数据。检验进行得很成功而且建立起了用于数值模拟的数据库。

从大量的试验过程测定中能够发现注表面活性剂的效应。温度数据表明了注入井和生产井之间的热传递通道逐渐冷却而试验层的上部与下部的温度逐渐上升。试验层的测压孔表明了有泡沫形成的注入井附近有很高的压力降而在没有泡沫形成的生产井的区域里作用则很小。试验后的岩心分析说明注入井周围的残余油饱和度非常低。另外还观察到这种低的残油饱和度分布很对称。这个观察结果与在其它试验中看到的结果是一致的，在那些试验中观察到了临界饱和度，而在临界饱和度之上不会形成泡沫。这将表明，为了使表面活性剂使用得更好应该采取一些措施，而这些措施将减小被堵塞地带的残余油饱和度。

注表面活性剂对产油速度的影响不可能很好观察到。当试验层已经采得十分枯竭时，注入表面活性剂对采油有好的效果。还有，在开始注表面活性剂时，从模拟器得到的热损失已变得非常大，而且或许在过程中占主导地位。由于容器的复杂热损失带来的复杂性，在充分评价试验时不得不使用数值模拟。

为了进一步试验，建议以下述方法修改物理模拟器，即尽量减少热损失对系统的影响。

吴 湘 译
范从武 校

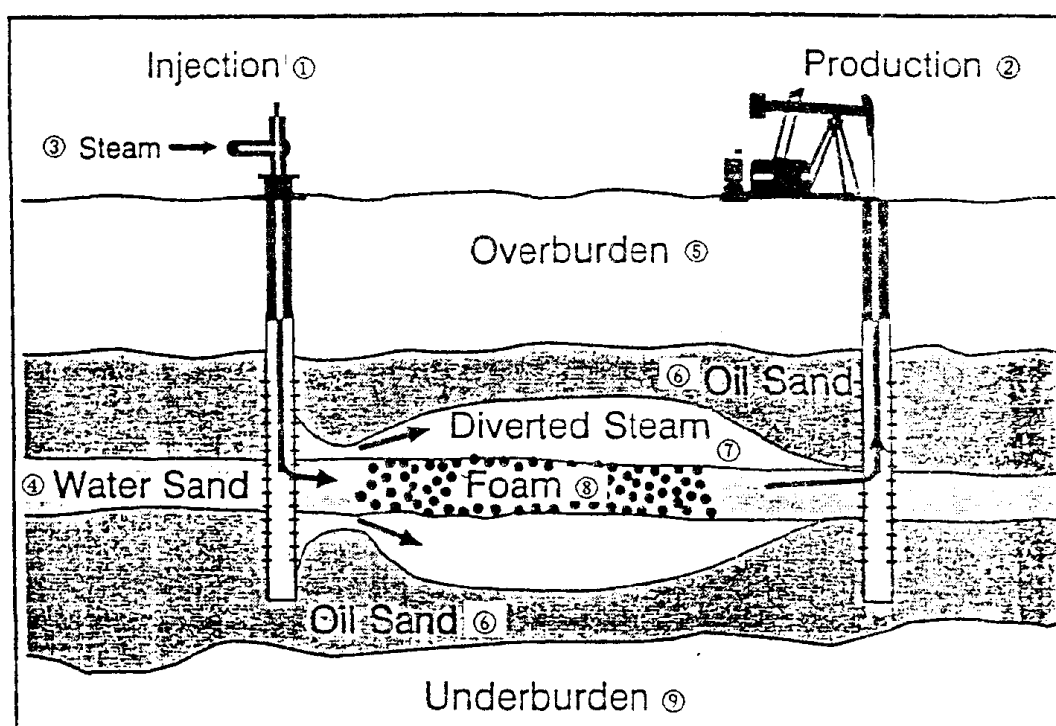


图 1 用泡沫改善蒸汽驱动态

①注入井②生产井③蒸汽④含水砂层⑤上覆岩层⑥油砂⑦分流的蒸汽⑧泡沫⑨下覆岩层

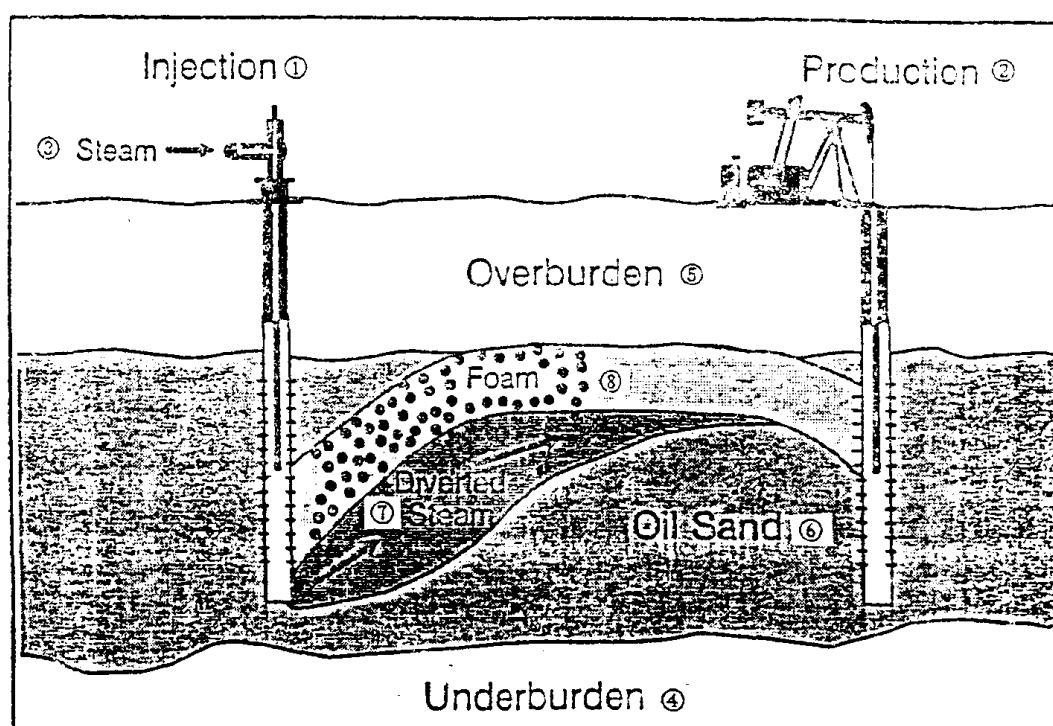


图 2 用泡沫分流蒸汽

①注入井②生产井③蒸汽④下覆岩层⑤上覆岩层⑥油砂⑦分流的蒸汽⑧泡沫

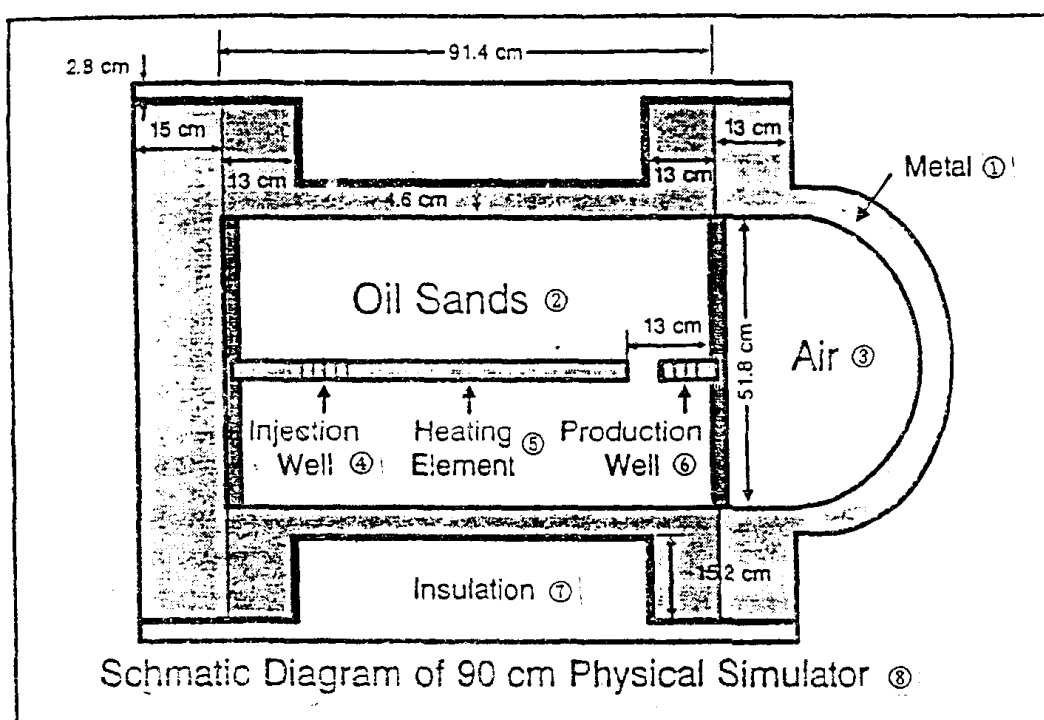


图 3 90cm 的模拟器

①金属②油砂③空气④注入井⑤加热元件⑥生产井⑦绝热材料⑧90cm 物理模拟器的简图

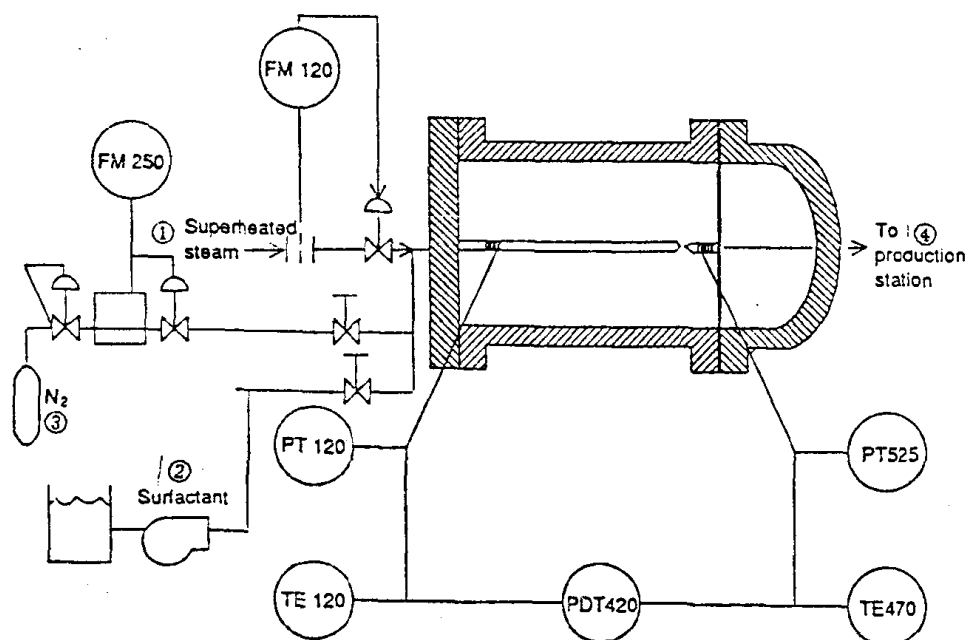


图 4 蒸汽、气体及表面活性剂的注入系统

①过热蒸汽②表面活性剂③氮气④到生产点

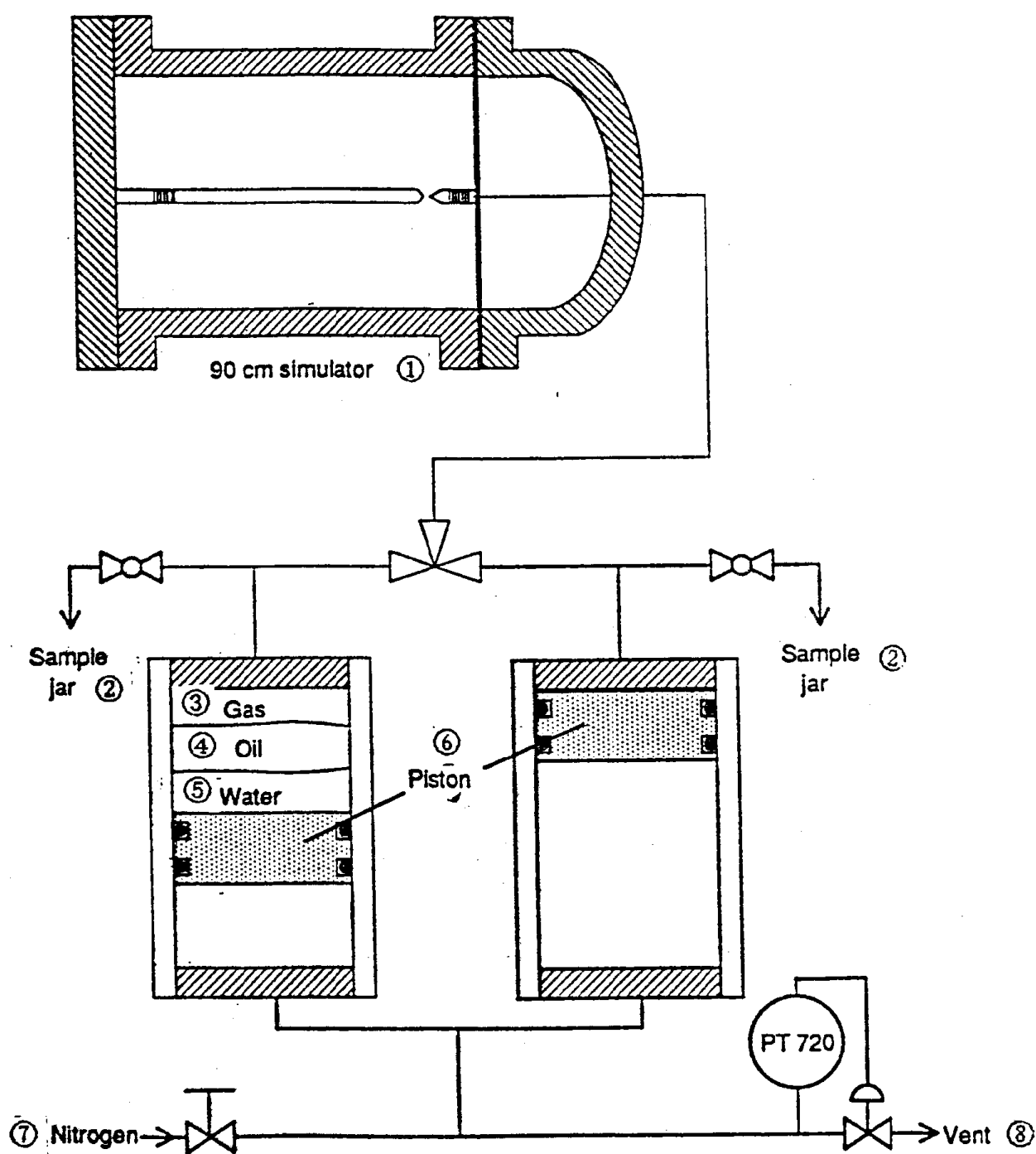


图 5 90cm 模拟器的产出系统
①90cm 模拟器②样品瓶③气④油⑤水⑥活塞⑦氮⑧排出

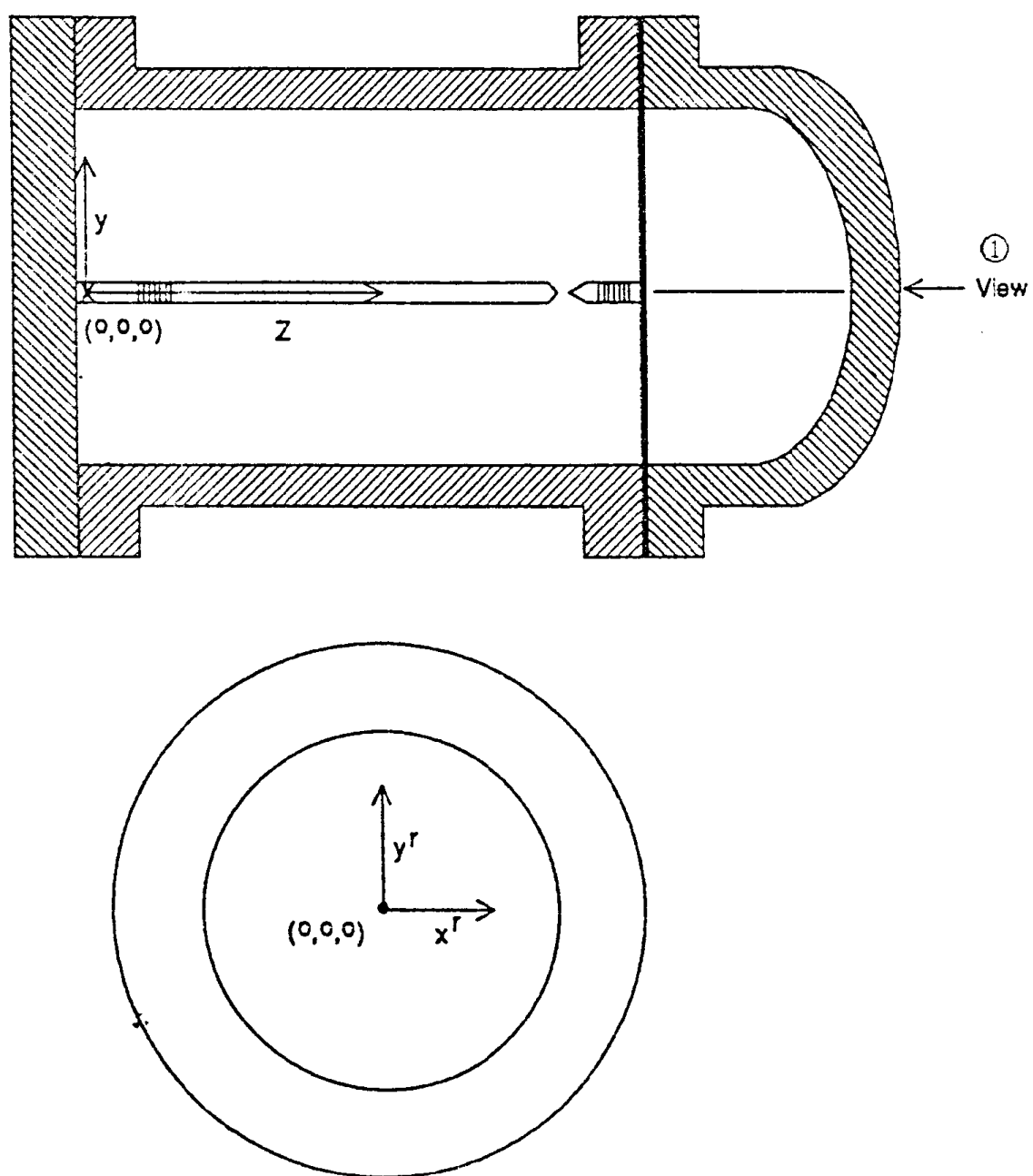


图 6 试验台的座标系统

① 视点

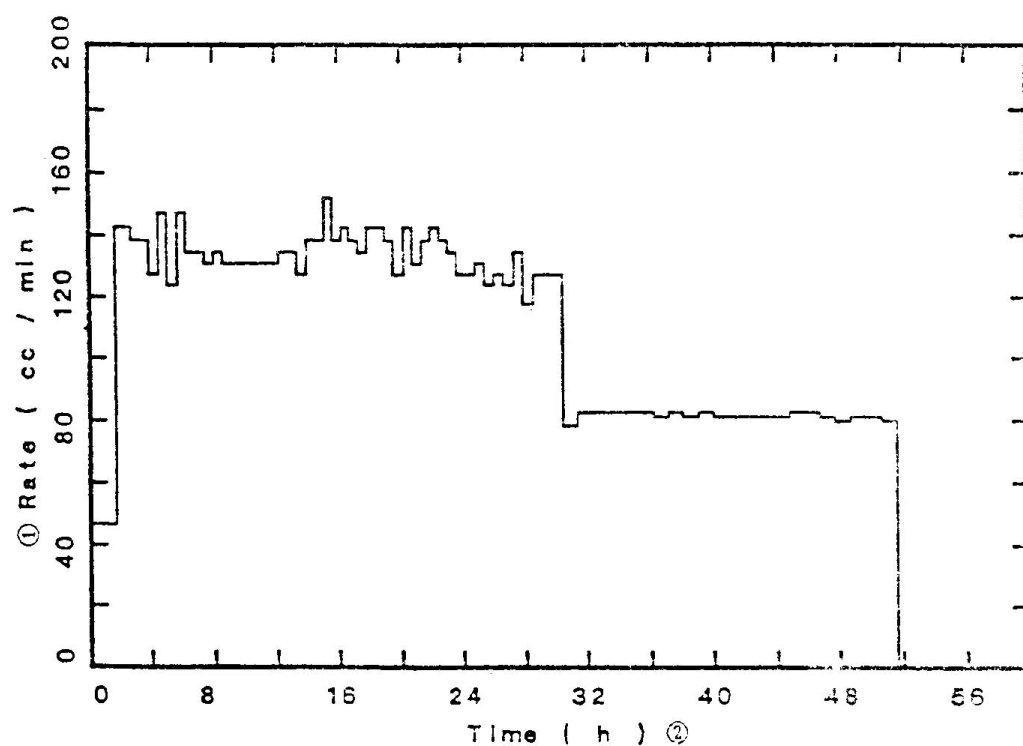


图7 试验 RD004 的总生产速度
①速度(cc/分)②时间(小时)

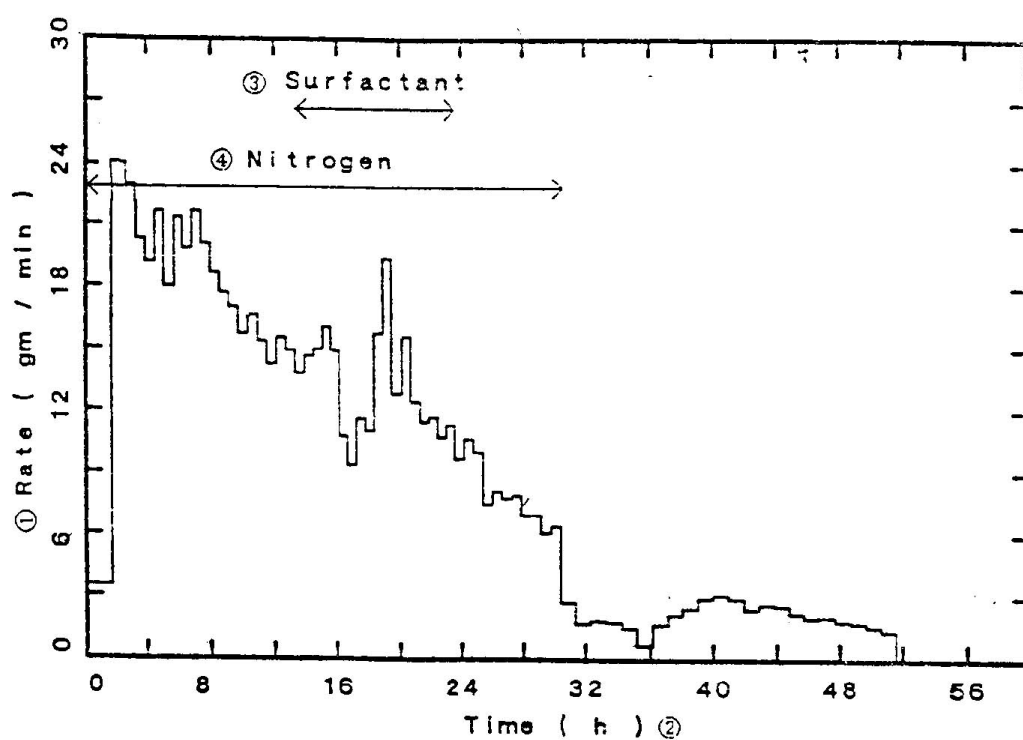


图8 试验 RD004 的产油速度
①速度(gm/分)②时间(小时)③表面活性剂④氮

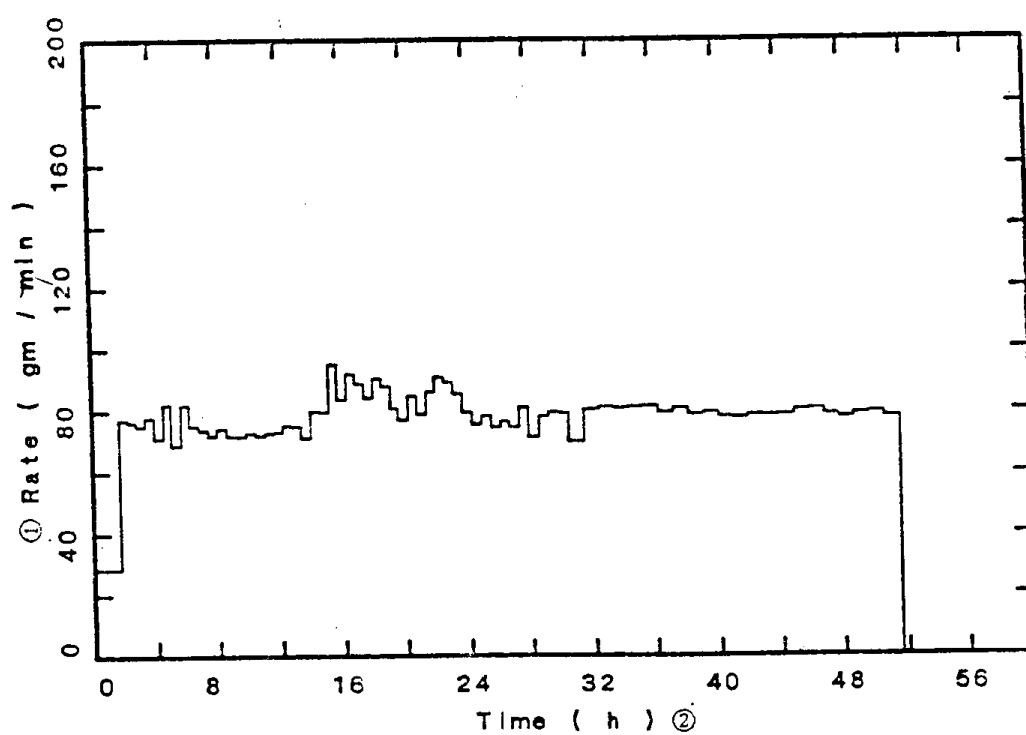


图 9 试验 RD004 的产水速度

①速度(gm / 分)②时间(小时)

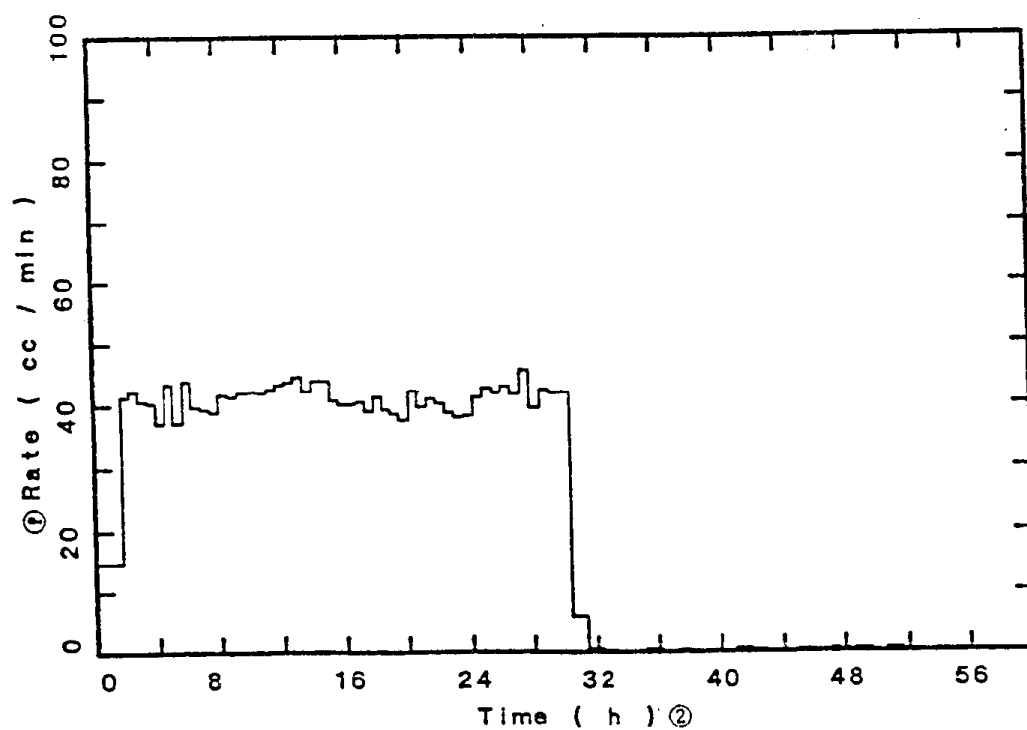


图 10 试验 RD004 的产气速度

①速度(cc / 分)②时间(小时)

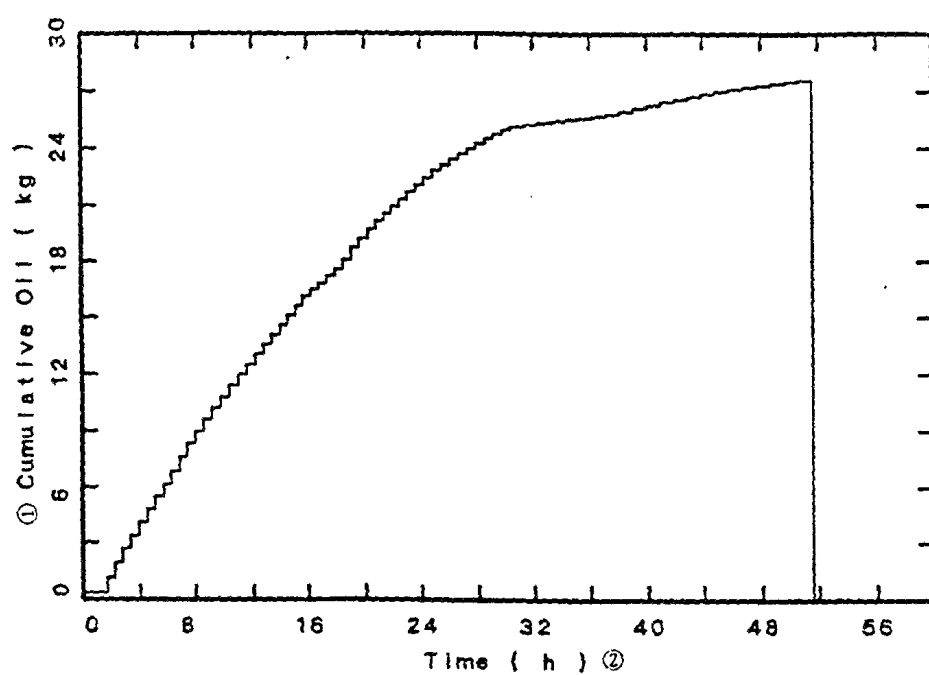


图 11 试验 RD004 的累积产油量

①累积油量(kg)②时间(小时)

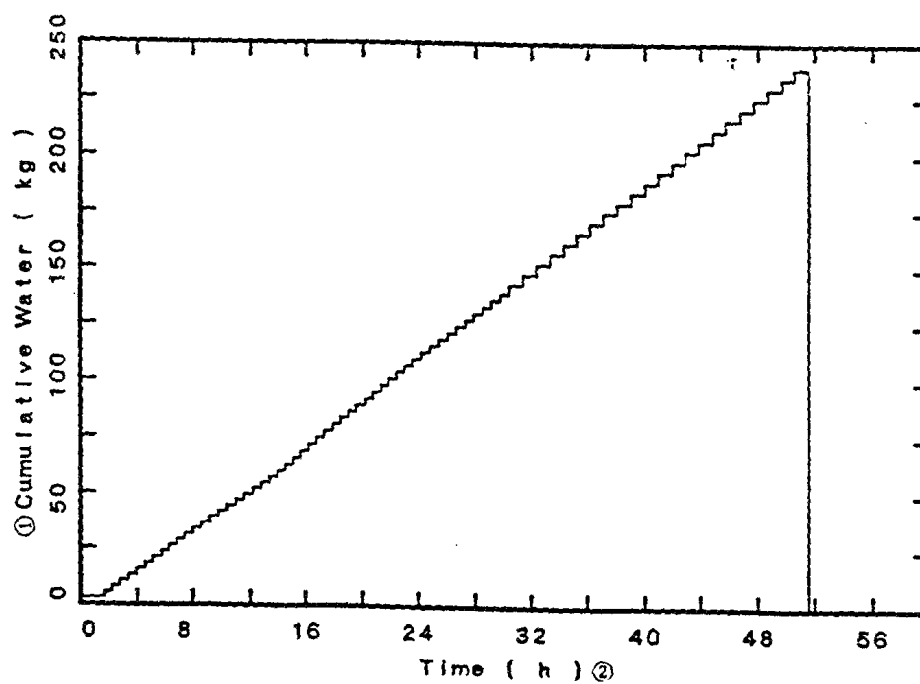


图 12 试验 RD004 的累积产水

①累积产水(kg)②时间(小时)