

中一加科技合作交流资料

高温泡沫

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

概 要

在实验室砂管中泡沫的形成及其稳定性已经做了大量的研究。但是，在多孔介质中，在高温下（大于 200°C ）和距离超过 1 米的情况下，泡沫的形成及增长和传播性能相对报导得很少。本报告表述了一台在 300°C 温度和长度为 4 米情况下研究泡沫剂的设备，并介绍一些初步的实验结果。

这套装置是由四根内径 0.8cm，长 1 米的砂管组成。每根砂管都装满砂子并安装在烘箱里。沿着岩心的内部泡沫的发生、增长、破灭的性能靠监视通过根管子的压差获得，以研究温度和流体体积分数的影响。

泡沫的形成和增长是在管内压力为 7MPa，温度为 $25-268^{\circ}\text{C}$ 范围内。超过 200°C 时，流度减小系数逐渐变小，说明形成较弱泡沫。接近饱和温度时，注入的氮气具有使大量的水蒸发的趋势，并且在极端的情况下，泡沫破灭。低于 200°C 时，特别是在更高的流体体积分数时，形成非常坚固的泡沫，比在 200°C 或超过 200°C 所观察到的流度减小系数大一个数量级。

目 录

概要	
摘要.....	(1)
附图和表格.....	(1)
1. 引言	(2)
2. 实验部分	(2)
2.1 材料	(2)
2.2 设备和操作程序	(2)
3. 结果	(2)
4. 讨论	(3)
4.1 方向性的影响	(3)
4.2 在高温下的泡沫性能	(3)
4.3 具有高流度降低系数的泡沫剂 (MRF)	(4)
5. 结论	(4)
6. 下一步研究建议	(5)

附图和表格

附图

图 1. 砂管装置示意图	(6)
图 2. 实验 1 压差特性 ($LVF=0.1$, $T=25^{\circ}\text{C}$)	(7)
图 3. 实验 3 压差特性 ($LVF=0.1$, $T=200^{\circ}\text{C}$)	(8)
图 4. 实验 4 压差特性 ($LVF=0.1$, $T=240^{\circ}\text{C}$)	(9)
图 5. 实验 5 压差特性 ($LVF=0.1$, $T=260^{\circ}\text{C}$)	(10)
图 6. 实验 9 压差特性 ($LVF=0.3$, $T=200^{\circ}\text{C}$)	(11)
图 7. 实验 10 压差特性 ($LVF=0.3$, $T=268^{\circ}\text{C}$)	(12)
图 8. 实验 6 压差特性 ($LVF=0.3$, $T=25^{\circ}\text{C}$)	(13)
图 9. 实验 2 的压差特性 ($LVF=0.3$, $T=100^{\circ}\text{C}$)	(14)
图 10. 实验 7 压差特性 ($LVF=0.3$, $T=100^{\circ}\text{C}$)	(15)
图 11. 实验 8 压差特性 ($LVF=0.3$, $T=150^{\circ}\text{C}$)	(16)
图 12. 流度降低系数 (MRF) 随温度的变化	(17)

表格

表 1. 实验的操作条件和总压差	(18)
表 2. 基础压差和发泡压差	(19)
表 3. 流度降低系数	(20)

高温泡沫

M. Kirk Green

E. Eddy Isaacs

摘要

最初的一系列发泡剂实验在一根细长的砂管中进行,所选用温度是在 250°C — 270°C 范围内,两种不同的流体体积分数为 0.1 和 0.3,所用的表面活性剂是 Sun Tech IV,浓度为 1g/L 。

除了在流体体积分数为 0.1 和在接近 270°C 时,大部分水被蒸发情况之外,在所有条件下发泡是容易达到的。高于 200°C 时,与高的温度相关联的是弱泡沫的形成。低于 200°C 时,观察到非常坚固的泡沫形成。在流体体积分数为 0.3,温度为 100°C 是,呈现出一最大值。坚固的泡沫所表现的特性是指所观察到的流度减小系数比其它情况下的流度减小系数高一个数级。并且在泡沫前沿之后沿着岩心的压差呈现出不断上升的趋势。本文总结了到目前为止所获得的结果,并对所观察到的趋势加以讨论。

1. 引言

在多孔质中表面活性剂的发泡性能已经成为流行的研究课题,表面活性剂浓度,非凝结气体的注入,盐及残余油的影响已经做了多方面的研究^[1-4]。温度的影响也得到检验。虽然 Alberta 的油砂开采计划是在 250°C — 300°C 范围内进行,但目前已经做过的温度超过 200°C 以上的泡沫研究工作相对还很少。

实验室实验中,在低于 200°C 时,一些表面活性剂在发泡和提高原油采收率方面已经显示是有效的。然而,随温度上升,表面活性剂临界胶束浓度和膜降解速率增加的情况下,估计泡沫的稳定性降低。在最近的一次研究中,检测了大量的表面活性剂,发现超过 200°C 时只有极少数表面活性剂具有有效的发泡性能。

在相对较短的砂管和岩芯内实验,实验室的研究大部分都受到限制(通常在小于 1 米的管子中)。由于现场的泡沫驱替距离比此装置大,更感兴趣的问题是泡沫怎样在更长的距离中增殖。

本研究旨在阐明在 200 — 300°C 温度范围内,4 米长无油的石英砂管中泡沫的特性。

2. 实 验 部 分

2.1 材料

管内所用砂子是 120—140 目的渥太华砂子, Sun Teeh IV 表面活性剂, 靠 Sun Oil 公司和炼油公司提供。氮气获得来自 Linde。

2.2 设备和操作程序

实验设备是由 4 根内径为 0.8cm, 长 1 米的不锈钢管组成。首尾相接地连接起来, 在每段都接有压力指示 (附图 1), 整个管子被弯成 S 型放在烘箱里, 所以流体通过交替部分时总是先上后下。管内用 120—140 目的砂子填充, 孔隙度为 0.36, 平均渗透率为 7.3 达西 (变化范围 6.8—7.7)。沿着管子的压差和进、出口的绝对压力用 Rosemount 压力传感器监测。表面活性剂溶液的注入使用一台 ISCO 注射泵。氮气注入是用一台 Brooks 质量流量控制器。整个系统依靠两个 Mitcy Mite 回压调节器串联连接使岩心回压压力恒定在 7MPa (1000Psi)。在后来的实验中, 一条充满水的延迟线安装在岩心和回压调节器之间用来阻止产生汽进入调节器, 干扰压力控制。

首先用表面活性剂溶液饱和岩心。之后, 气体开始注入到蒸汽中。当流动达到稳定状态之后, 实验开始进行。用两种流体的体积分数 0.1 和 0.3 (LVF, 实验温度下注入流体的体积分数)。应该指出, 这里定义的 LVF 没有考虑到进入到汽态中水的蒸发作用, 而这种状态分布变化在高温下是相当大的 (看表 1)。在室温下岩心压力为 7MPa 时, 被注入流体总的流速大约为 $0.65\text{cm}^3/\text{min}$ (20m/day), 表面活性和气体被连续地注入直到达到一稳定的状态或者注入压力增加到质量控制达到操作极限这一点。

3. 结 果

表 1 概述了实验的操作条件和所观察到的所有泡沫压差。实验条件下的气相质量 (氮气+蒸汽的体积/总体积), 用 Reng-Robinson 状态方程 (相平衡软件包) 计算。当温度接近饱和温度时 (286℃), 泡沫的质量迅速增加, 所以当温度大于 260℃时, 由于不存在液相, 要做 LVF=0.1 的实验是不可能的。除了 260℃和 LVF=0.1 的条件, 其它情况下都能观察到稳定的发泡。两种类型的发泡特性被观察到。首先, 实验 1 (图 12) 的压差历史说明, 在第一段里直到泡沫前部到达第二段的时候, 压差是以直线上升的, 当第二段压差开始以线性上升时, 通过第一段的压差趋于平稳直到实验终止。当泡沫运动到后续段时, 就会重复这种现象。除 100℃实验 (实验 1 和实验 3—5, 图 3—5) 和 LVF=0.3, 大于 150℃以外 (实验 9 和 10, 图 6 和 7) 都呈现出这种特性。通常通过头一段的压差总要比通过后一段的压差小一些。实验 1 是最极端的例子表现, $-\Delta P_1$ 大约是其它压差的一半。从压差与时间关

系曲线的斜率看各段都是类似的，而且在第一段压差趋于平稳和第二段压差开始上升之间有一时间差。看起来可能是泡沫在第一段的后半部破灭，在第二段里再生，或是岩心的装填缺陷使泡沫窜流穿过第一段的后半部。另一方面，其它一些实验中第一段的压差与时间关系曲线的斜率明显地变小，表明通过这段的泡沫较弱。在第一段中这种不规则的特性，泡沫是在哪里再生的，也许与方向性有关。（下面论述）

在其它一些实验里，实验初期 ΔP 的性能是相似的，但在实验期过程中开始建立泡沫前沿之后的 ΔP 。这种情况可由实验 6（图 8）的压差历史说明。第一段的压差开始增加很慢，然后在按较快速度上升，直到泡沫的前方到达第二段。同样，第二段的压差连续上升直到泡沫的前方进入第三段以后，最后以非常快的速度上升直到氮气供给停止。这种特性在 $LVF = .1$, 100°C 时（实验 2，图 9），和 $LVF = .3$ 低于 200°C 时（实验 7 和 8，图 10 和 11）条件下仍可看到。实验 8（图 11）实际上呈现出性能的两个类型：在一长的时期里泡沫正常地增殖，到实验的后期性能开始转变到第二类。

讨 论

4.1 方向性的影响

正如前面指出的，四段管子的流动方向交替升高和下降，即一、三段上升，二、四段下降。表二列出了各段在不同的温度和 LVF 值下加入表面活性剂和不加表面活性剂两种情况下的 ΔP 值。从所观察到的 ΔP 看，方向效应是显而易见的。相对于基础值 $LVF = 0.3$ 情况。第二、四段的 ΔP 值明显地上升了。说明所观察到的 ΔP 值与流动方向的依赖关系是明显的。这种方向的依赖性尚未作出清楚解释。对 $LVF = 0.1$ 情况的基础压差可解释为由于前方缺少水变成了气水前沿。但是，泡沫剂压差的变化是非常大的。我们原期望与重力相反流动各段的流体饱和度要稍微高一些。但是实际观察结果难于此相联系。表 3 总结了所计算的流度降低系数 (MRF/S , $\Delta P_{\text{有}}/\Delta P_{\text{无}}$)。沿着岩芯的 MRF 值在两种 LVF 的情况下显示出了较大的变化。在向下流动段中 $LVF = 0.3$ 时， MRF 值更高一些。要详细说明泡沫剂压差的方向效应需要更多的实验数据。

4.2 在高温下泡沫的性能

图 12 描绘了 LVF 为 0.3 和 0.1 时 MRF 平均值与温度的函数关系，都在同一条线上。根据观察，可以断定，本研究所包含的有限 LVF 和蒸发相比例下， LVF 和蒸汽相不影响泡沫剂性能。

图 12 中数据点的一般趋向表明尽管当温度高于 200°C 时，由于泡沫减小，流度降低比变小，在 300°C 时泡沫仍能有效地减小流度比。在 $LVF = 0.1$ ，温度为 260°C 时（实验 5，图 5），似乎泡沫过一段时间就要破灭，这可能是由于泡沫的质量极高（0.999，表 1）——液相不足以支撑泡沫或使表面活性剂保持溶液状态。流度降低减小趋势随温度变化的原因难

以完全确定。看起来与蒸汽比例、泡沫质量没有很大关系。因为两个 LVF 在相同的温度下给出了非常不同的蒸汽比例值（表 1）和相似的流度降低值。随温度 MRF 值的降低很可能与系统中一些组份的物理性质的变化有关，如水的粘度。由于液相粘度减小增进了膜的流动使泡沫剂气泡的聚结随温度的升高而增加。图 12 所显示的曲线是重叠的。在 150—270℃ 温度范围内，MRF 的变化同水的粘度变化紧密相关。在此还应指出，Robin 在关于添加剂的报告中提出过：水的粘度的增加改进了表面活性剂的高温性能。

4.3 高流度系数降低泡沫剂（强泡沫）

高 MRF 泡沫的发生没有固定模式。在 $LVF=0.3$ ，100℃ 情况下（实验 7，图 10），在气体注入到岩心的入口，高 MRF 泡沫在第一段内就会立即形成，但泡沫不会增殖。在实验 2 和 6 里（图 9 和 8），高 MRF 泡沫不能立即形成，而是出现在第二段内，并且能够增长。如上所述，在 $LVF=0.3$ ，150℃ 下实验（实验 8，图 11）高 MRF 泡沫只能在实验最后出现，开始发生在第三段，随运动进入到第四段里。这里应说明，一旦非常坚固的泡沫在岩芯内形成，在其它地方的泡沫因为堵塞降低了流速会受到压缩，还由于高泡沫堵塞使气泡数的聚合（Colesend）被抑制。

这些结果提出了高 MRF 泡沫的最佳条件是 $LVF=0.3$ ，温度为 100℃。在这种条件下，高 MRF 泡沫剂显示了最愉和最坚固的发泡性能。然而，是什么引起这些高 MRF 泡沫的形成，这种形成是否和方向/泡沫质量影响有关，到目前仍不清楚。泡沫从低到高 MRF 的转变在图 9 里很清楚地显示出来，说明了气泡形成类型之间的转化。Ransohoff 和 Radke 在玻璃珠岩芯内研究泡沫的形成，以区分下面两种机理。“leave behind”的形成靠气体被系统吸入后遗留的液相所形成，在这里膜层近似地与流动方向一致。“Snap-off”的形成靠气体通过孔喉通道形成，其膜层与流动方向正交。第一种机理的 MRF 值大约为 5，而第二种机理有较高的 MRF 值。“snap-off”发生在一临界毛细管现象数值上，而且较高的速度，较低的渗透率、较高的气体饱和度和较长的管子下对“snap-off”是有利的。Fall 等人称“Snap-off”和“leave-behind”两种机理形成的泡沫分别被称为“非连续性气体”和“连续性气体”泡沫。本研究所实现的最高压差（~5Mpa/m）可粗略地设想为在所研究的岩心截面的每一个孔喉都被“泡”堵塞所应出现的情况。

5. 结 论

1. 在浓度为 1g/L 下的 Sun Tech IV 值到 270℃，在 7 达西的无油砂管内是可以发泡的，所给出流度降低系数为 5—10。

2. 高于 150℃ 时，流度降低系数随温度的增加而减小，它所减小的值同水的粘度减小有关系。

3. 低于 200℃ 时，特别是本研究的较高的流体体积分数（LVF）下能够形成非常坚固的泡沫。而且实际的 MRF 系数超过仪器所测范围。在一些情况下，可以观察到泡沫从弱到强

的变化，坚固的泡沫建立在发泡前沿之后，这种转变可以代表泡膜壳层形成机理的变化。

4. 流体的方向效应在泡沫形成和增长方面可能是重要的。

进一步研究建议

1. 仅为解释将来的结果，原来每段不同方向的 0.8cm 内径的管子需要用各段内径 1.1cm 的盘绕管子取代，这样，方向效应将被取消。

2. 已经观察到高温下 MRF 和水的粘度有关。添加一种已掌握的方法可控制的化学剂以改善液相粘度，进一步检验 MRF 与粘度的关系。

3. 由于 Robin 对高温下不同的表面活性剂性能提出一很宽的选择范围，用其它表面活性剂进行实验也是有益的。

4. 为了对高 MRF 泡沫所需要的条件得到进一步的了解，特别是在较低的 LVF 和存在残余油情况下，获得更多的 MRF 的数据是有用的。

译者：朱 汇

校者：王建设

复校：范从武

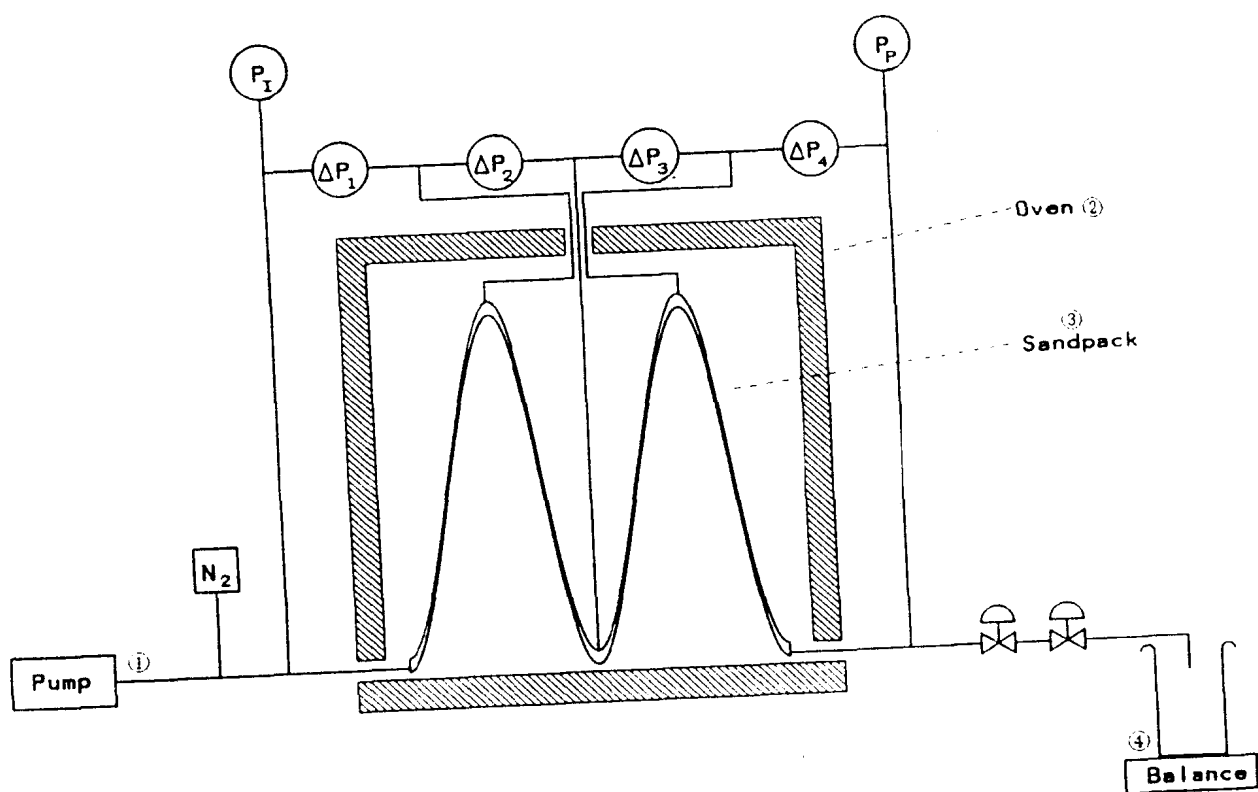


图 1 岩芯装置示意图

1. 泵
2. 烘箱
3. 岩芯
4. 天平

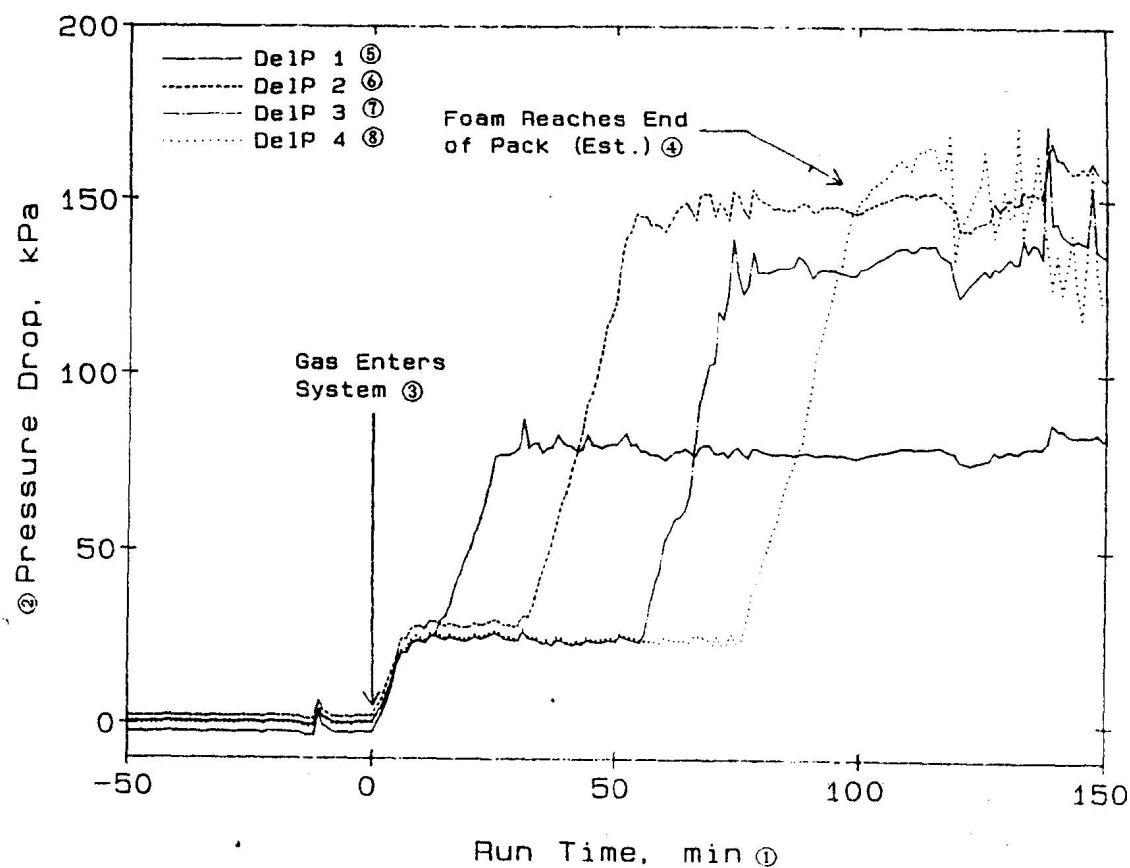


图2 实验1 压差变化 (LVF=0.1, T=25℃)

1. 实验时间, 分
2. 压差, KPa
3. 气体注入到系统中
4. 泡沫到达砂管的终端 (估计的)
5. 第一段压差曲线
6. 第二段压差曲线
7. 第三段压差曲线
8. 第四段压差曲线

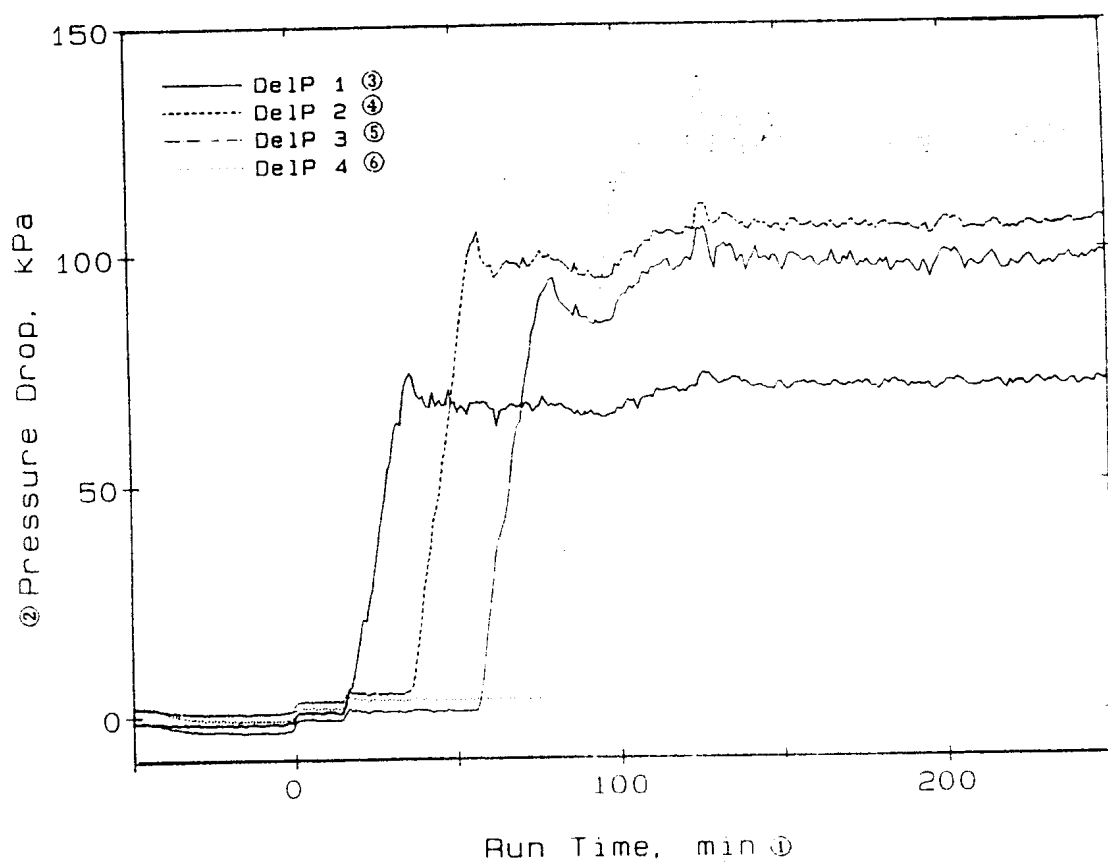


图 3 实验 3 的压差变化' (LVF=0.1, T=200℃)

1. 实验时间, 分
2. 压差, KPa
3. 第一段压差曲线
4. 第二段压差曲线
5. 第三段压差曲线
6. 第四段压差曲线

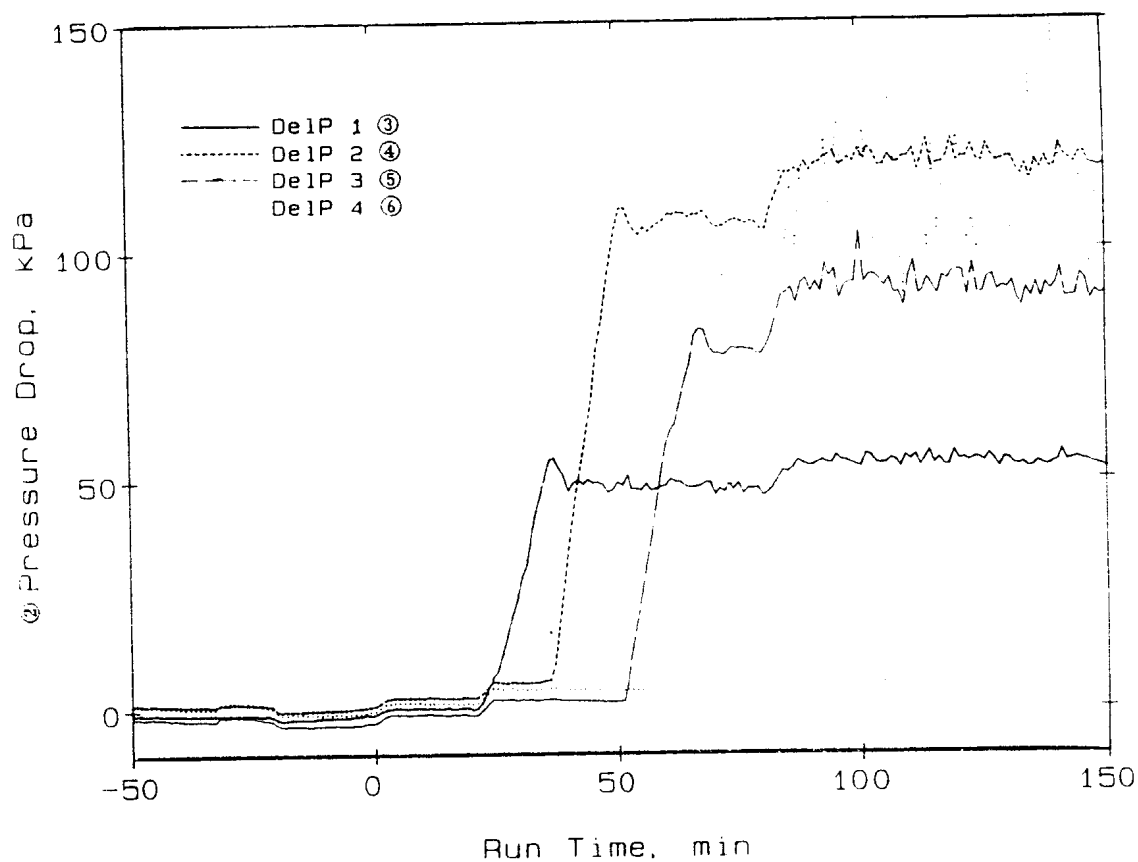


图 4 实验 4 的压差变化 (LVF=0.1, T=240℃)

1. 实验时间, 分
2. 压差, KPa
3. 第一段压差曲线
4. 第二段压差曲线
5. 第三段压差曲线
6. 第四段压差曲线

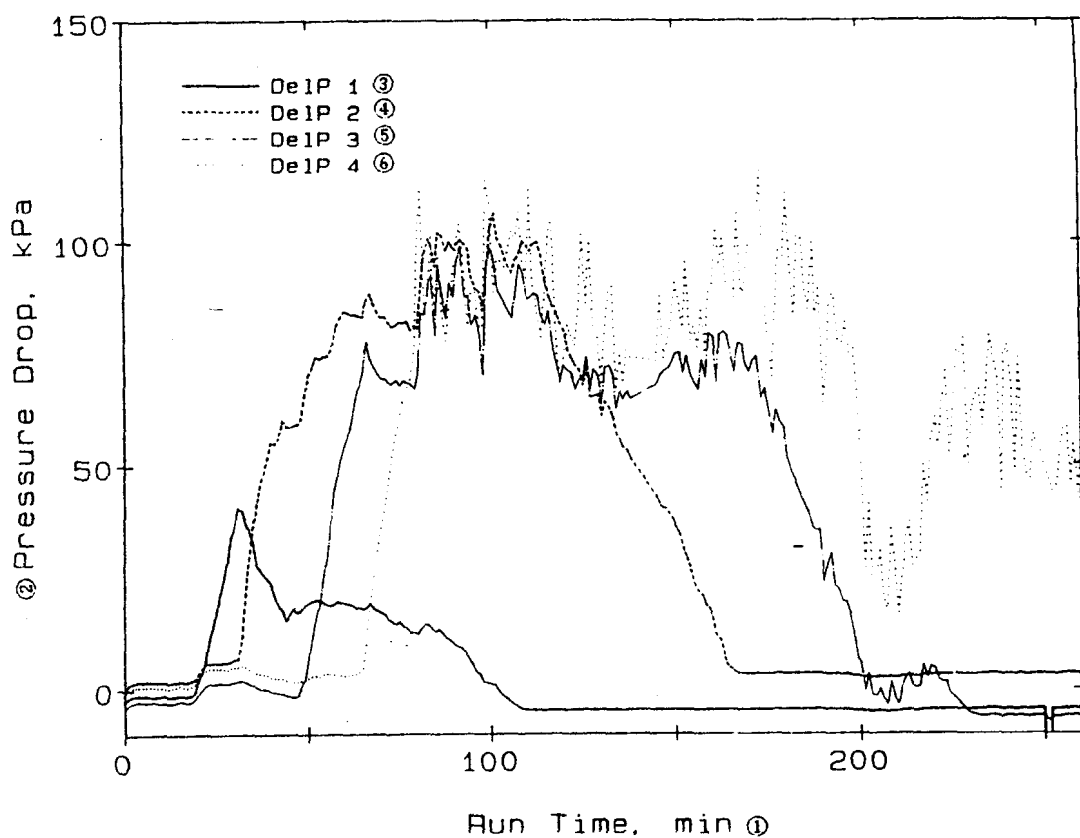


图 5 实验 5 的压差变化! (LVF=0.1, T=260℃)

1. 实验时间, 分
2. 压差, KPa
3. 第一段压差曲线
4. 第二段压差曲线
5. 第三段压差曲线
6. 第四段压差曲线

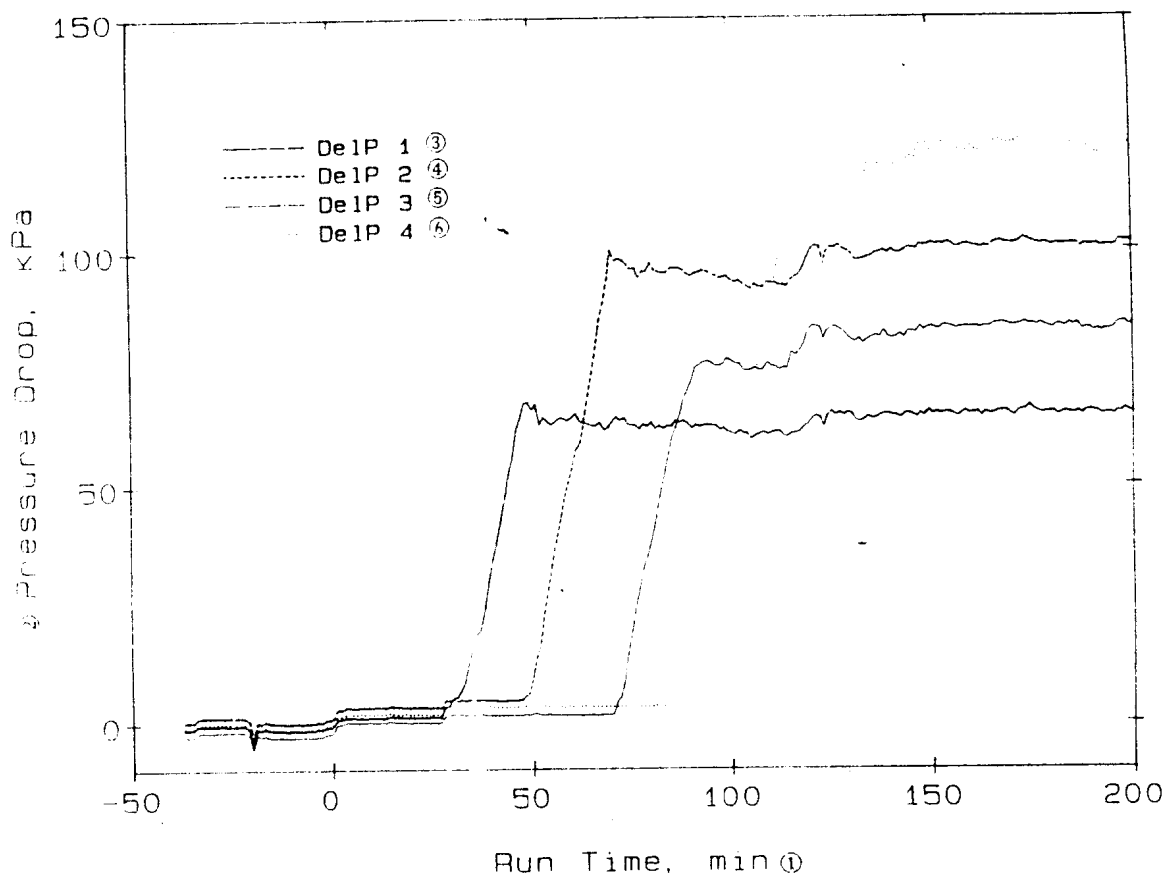


图 6 实验 9 的压差变化 (LVF=0.3, T=200℃)

1. 实验时间, 分
2. 压差, KPa
3. 第一段压差曲线
4. 第二段压差曲线
5. 第三段压差曲线
6. 第四段压差曲线

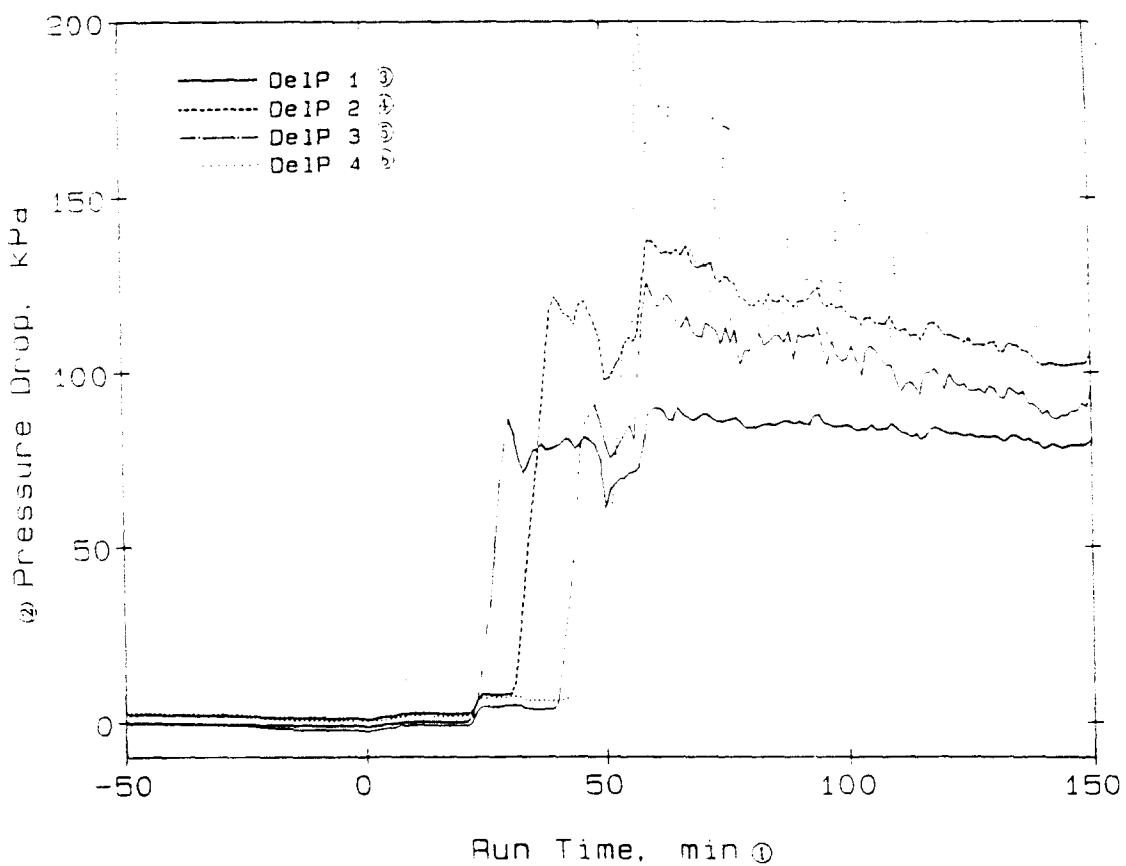


图 7 实验 10 的压差变化 (LVF=0.3, T=268℃)

1. 实验时间, 分
2. 压差, KPa
3. 第一段压差曲线
4. 第二段压差曲线
5. 第三段压差曲线
6. 第四段压差曲线

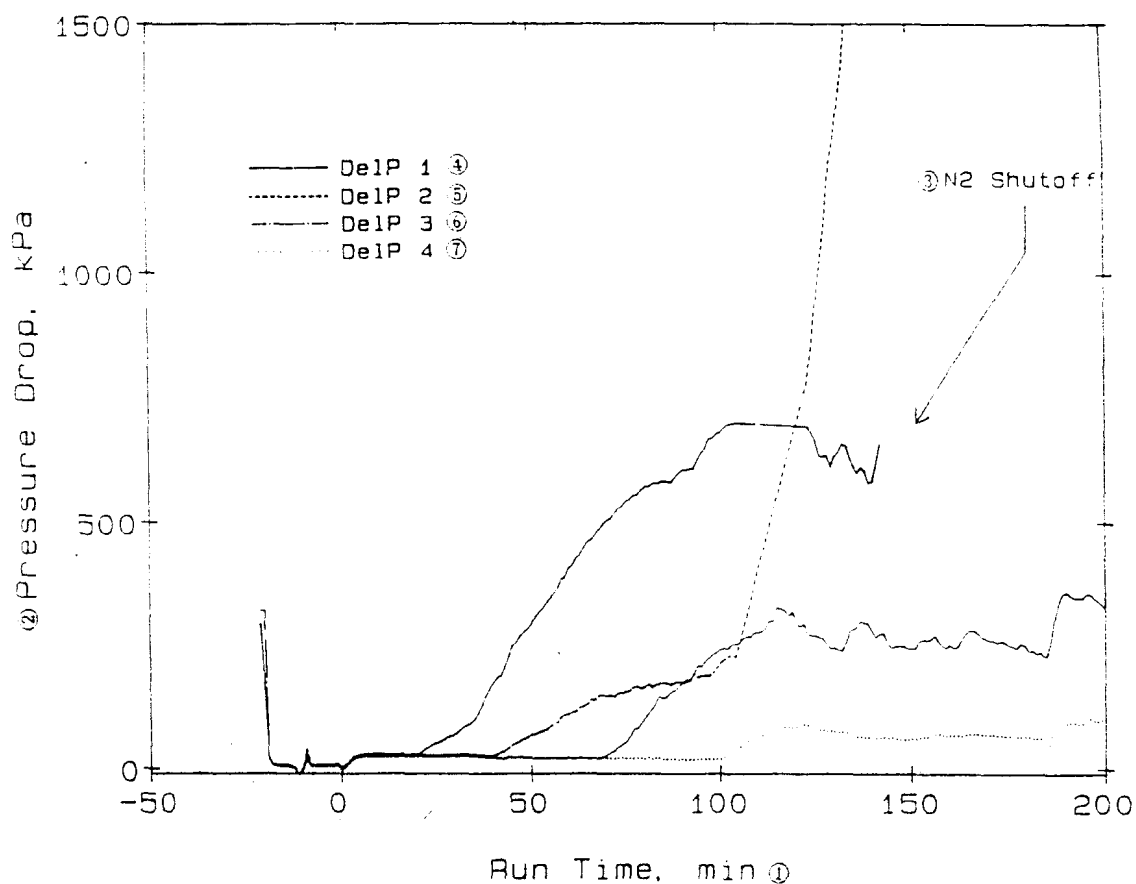


图 8 实验 6 的压差变化 (LVF=0.3, T=25℃)

1. 实验时间, 分
2. 压差, KPa
3. 关闭氮气
4. 第一段压差曲线
5. 第二段压差曲线
6. 第三段压差曲线
7. 第四段压差曲线