

中-加科技合作交流资料

用高温泡沫和凝 胶改善波及特性

中国石油天然气总公司
石油勘探开发科学研究院

一九九一年四月一日

用高温泡沫和凝胶改善波及特性

摘要

在实验室和油田都广泛地进行过用泡沫使蒸汽从驱扫区分流的试验。另外，用凝胶堵塞非产层的想法多数用于普通的或较低的温度。本项研究的目的是发展改善泡沫在储层中长距离传播的方法并评价热采时凝胶在井区的应用。

泡沫区发育的主要制约条件包括发泡率低和气泡传输较差。在人造砂层中进行了蒸汽驱条件下的流动试验，以制定通过予泡沫降低驱扫区残余油饱和度来提高生成泡沫的方案。结果表明，予泡沫的概念可与低界面张力的化学剂或溶剂小型段塞一起使用，可显著地改善泡沫的传播速度。确定泡沫形成后传播特性的研究表明气泡的传输对油饱和度很敏感但对注入流体的速度和液体体积比不甚敏感。

同样，还进行了室内试验来测试在 100–300℃ 的范围内凝胶在孔隙介质中的特性。虽然温度升高时凝胶的强度降低，但在 300℃ 的高温下仍观察到蒸汽流度明显降低温度上升时，凝胶在孔隙介质中能长时间地承受中等压力梯度。高温时使用泡沫和凝胶的优缺点也将进行讨论。

引言

注蒸汽是应用最广的采收重油的方法。但是有些因素，例如蒸汽的成沟效应、重力分异及油藏的非均质，常常使产油层与蒸汽接触不好，因而导致低的采收率。一种已经引起高度重视的波及控制方法就是使用表面活性剂泡沫。它的作用是降低蒸汽的流动度，特别是在低含油饱和度区。已有大量实验室及油田成功使用蒸汽-泡沫研究的报告⁽¹⁻³⁾。但泡沫也存在着一些缺点，如必须连续注入活性剂以保持泡沫和泡沫的稳定性对油层中的油、粘土及二价离子很敏感。

凝胶是波及控制的补充方法，它一般更宜于用于井的附近。凝胶的一个优点是：一旦被注入地下，就不需要继续注入。另外，它也不像泡沫对地层条件那么敏感。但是据迄今为止的报道，凝胶用于波及控制的大部分工作是考虑低温用于气田或普通的油田。因为现有的凝胶配方在高温下不稳定。最近，已研制出以蒸汽为基础的重油采收方法所要求的高温稳定的商业化凝胶配方⁽⁴⁻⁸⁾。在本报告进行的工作中，已经研究出化学剂予泡沫注入来克服有原油存在时泡沫形成无效的方法，并且在填砂器中考查了一些决定泡沫传播的因素，如残余油饱和度、流体速度和液体体积比。另外，还进行了室内试验来评价凝胶在孔隙介质中的特性与温度、压降和残余油饱和度的函数关系。

实验材料

冷湖沥青取自艾伯塔油砂研究院油砂样品库。140/200 目的砂子（凝胶研究）和 -200 目的砂子（泡沫研究）从渥太华砂中筛出。SD1020 和 LTS-18 分别从 Chevron 和壳牌公司 (Shell) 得到。C302 苯甲醛凝胶从 Borden 化学公司得到。氯化钠和氯化钙从

Fisher 公司买到。所有试验中都使用去离子（软化）水。

泡沫研究

图 1 为泡沫测试用的试验装置示意图。一包有外壳的容器（直径 2.5 厘米，长 60 厘米）中装有干砂并用二氧化碳清洗以排出空气，然后用除过气的水饱和。用这种方法处理过的填砂器的绝对渗透率为 2 达西，用 1.5 孔隙体积 (PV) 的原油驱扫产生残余油饱和度，然后用后压为 0.7MP_a 的蒸汽进行强化驱扫。通过对产出流体的分析确定平均残余饱和度。沿岩心的压力降由 Rosemount 压力传感器监控，注入流体及沿岩心的温度由热电偶监控。所有试验中产生温度都保持在 180°C 左右。每次运行结束时，先用甲苯，然后用异丙基酒精冲洗。最后，使几倍孔隙体积 (PV) 的水流过岩心，再对填砂器抽真空使其干燥，然后用二氧化碳冲洗，为下一轮试验作好准备。

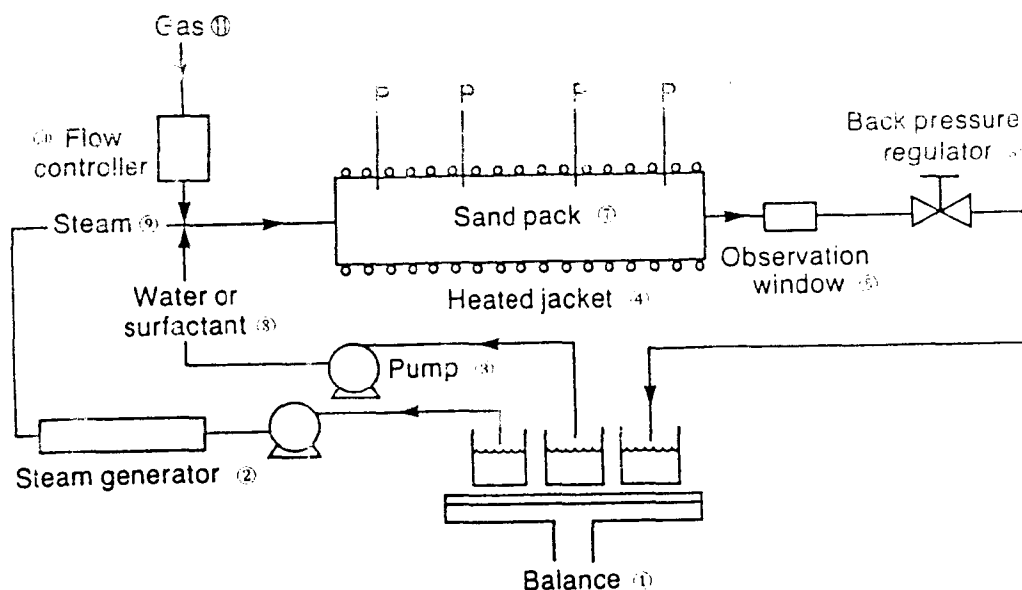


图 1 蒸汽-泡沫试验填砂器装置示意图

凝胶研究

图 2 为凝胶研究用的装置示意图。流管（直径 0.94 厘米，长 21 厘米）用砂充填并装在炉子内。充填物的渗透率约为 4 达西。穿过每根管子的压力降由 Rosemount 压力传感器监控。先用凝胶溶液冲洗注入管线，慢慢向填砂器中注入测定体积的凝胶溶液。随后用水冲洗注入管线并把凝胶向填砂器中向前推进一小段距离。然后把装置在所需的固化温度下放置一夜使凝胶形成。凝胶形成后把炉温调到所需的运行温度，然后开始注入水并监测

凝胶塞的状态。装置或者以恒流方式进行操作，监测压力降；或者以压力降不变的方式，即压力降保持给定值，监测用以保持恒定压力降的流量。在用油进行试验时，用前面所述的方法产生残余油饱和度。

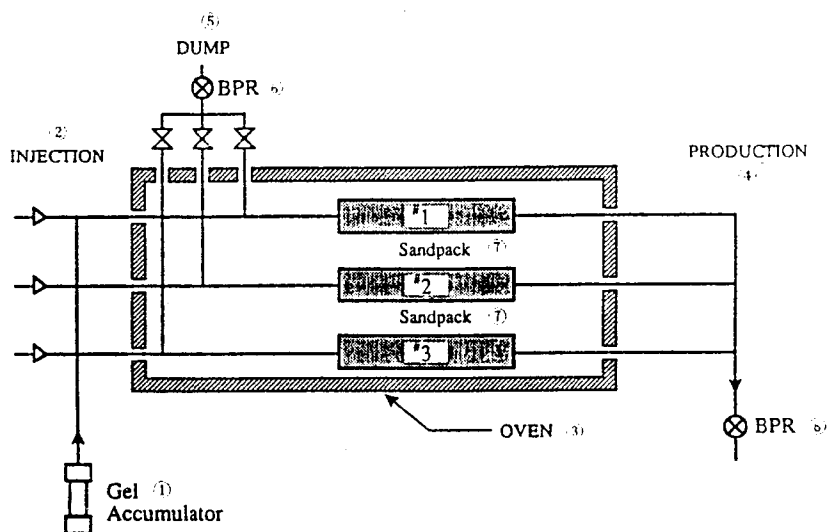


图2 凝胶实验填砂装置示意图

结果及讨论

油的作用

我们已经知道，在要施行流动控制的区域，残余油饱和度的存在对泡沫的形成有决定性的影响^(9, 10)。重要的是，即使在泡沫形成的条件下，油的存在实质上使传播速度降低（见如下）。

与原油对泡沫的流动特性有很强影响相反，原油对苯甲醛凝胶的形成及其阻挡特性影响很小或没有影响。如图3所示，图中为净砂和有残余饱和度的砂岩中，对100℃热水的有效渗透率成胶后与成胶前（100℃的成胶时间为19小时）有效渗透率比与运行时间的关系图。可以从凝胶降低渗透率的能力看到凝胶的有效性，当凝胶的有效就位完成后，渗透率降低了三个数量级。无油和有残余油之间没有很大的差别并且在可重复范围内。对有残余油的填砂器，最初渗透率比的增加反映了通过凝胶塞的高压力梯度致使余油活动并移动。很明显，在这些条件下，整个两次运行的试验过程中凝胶塞都保持稳定。

予泡沫塞技术

有原油时凝胶的稳定性明显优于使用泡沫。但是凝胶不具有泡沫的自我校正流动的特性，也不具有单位体积处理价格的优越性。为了使泡沫在油藏中的应用更为有效，需要一

些新技术来补偿泡沫对油的敏感性。更耐油的商业活性剂的发展及注入策略的改进大大改善了泡沫在油藏中的成功应用。我们实验室中注入策略的发展包括注入一个予泡沫塞来调动残余油，并使泡沫迅速形成。作为一个例子，图 4 比较了在渗透率为 2 达西，并含有冷湖沥青的填砂器中进行的 4 次蒸汽泡沫试验，蒸汽驱扫过的沥青残余饱和度为 S_{or} 。在没有予泡沫塞的情况下，即使使用了耐油表面活性剂（Chaser SD1020），泡沫仍占据了 10 倍的孔隙体积（PV）来生成泡沫。注入 0.25PV 的柴油溶剂或表面活性剂（IFT）-降低-表面活性剂大大加速了泡沫的形成。柴油溶剂可与残余油溶混，降低其粘度，因而使其更易于被蒸汽推动。低表面张力（IFT）塞是设计用来在试验温度下把油/水表面张力降低到 10^{-2} 毫牛顿/米以下，从而推动残余油（图 4）。

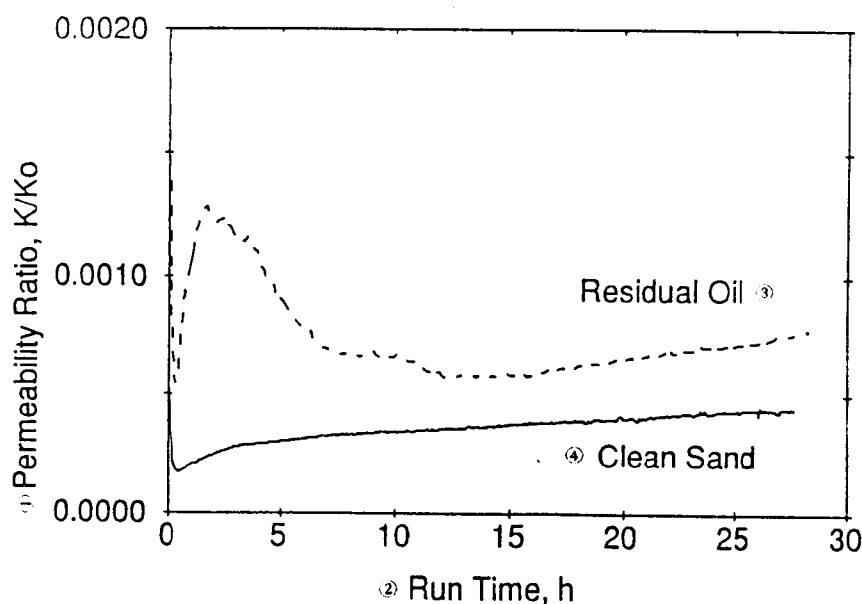


图 3 残余油对 200℃ 凝胶塞的影响

泡沫和凝胶的流动阻力

泡沫在油层中是通过“形成”和“破裂”两个过程来流动的。由于泡沫的分散特性，泡沫表现出低流动度，流动度取决于泡沫的结构（泡沫的大小和分布），而泡沫结构又与注入条件和油层条件有关^[12]。为了使泡沫成功地发挥作用，它必须能适应各种条件并仍能保持其聚和性和流动阻力特性。所以对一定的表面活性剂和油层类型，考虑气体和液体的速度范围和液体体积比（LVF）是很重要的。

图 5 为 2 达西的含残余油填砂器，用 180℃ 的蒸汽驱扫（15 倍孔隙体积）后，恒定液体速度下气体速度对气体相对渗透率（ K_{rg} ）的影响。 K_{rg} 是泡沫流动阻力的度量； K_{rg} 越

高，泡沫阻力越低。显然，泡沫流动阻力随气体速度的增加而降低。因为液体速度保持不变，注入泡沫的液体体积比（LVF）（在括号中给出）是变化的。当 LVF 降低时，泡沫变得更干并且流动阻力降低。

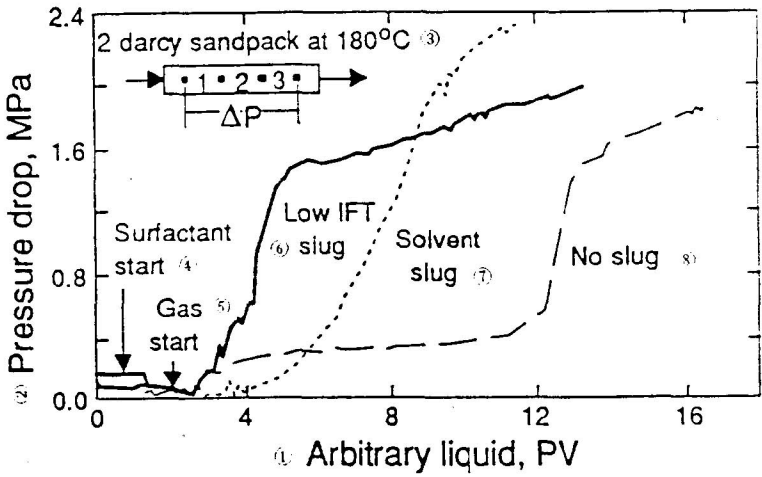


图 4 泡沫形成前注入的予泡沫塞对泡沫传播速度的影响

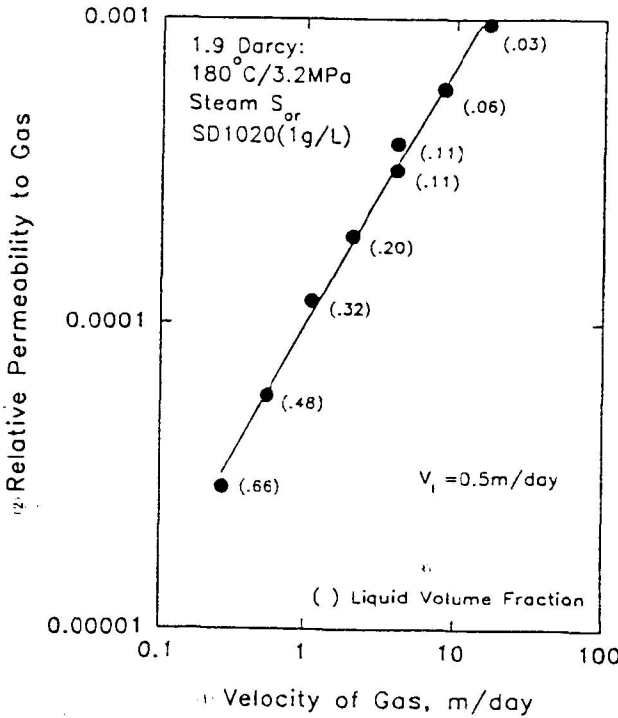


图 5 气体速度对泡沫流动阻力的影响

图 6 为相反的情况，即气体速度不变而液体速度变化。可以看出，泡沫阻力 (K_{rg}) 随液体速度的增加而增加。正如前面所说，泡沫越湿 (LVF 高)，流动阻力越大。显然当按 K_{rg} -LVF 的关系画图时 (图中没有) 泡沫流动阻力不是 LVF 的唯一函数。这与 Persoff 等人作的工作是一致的。

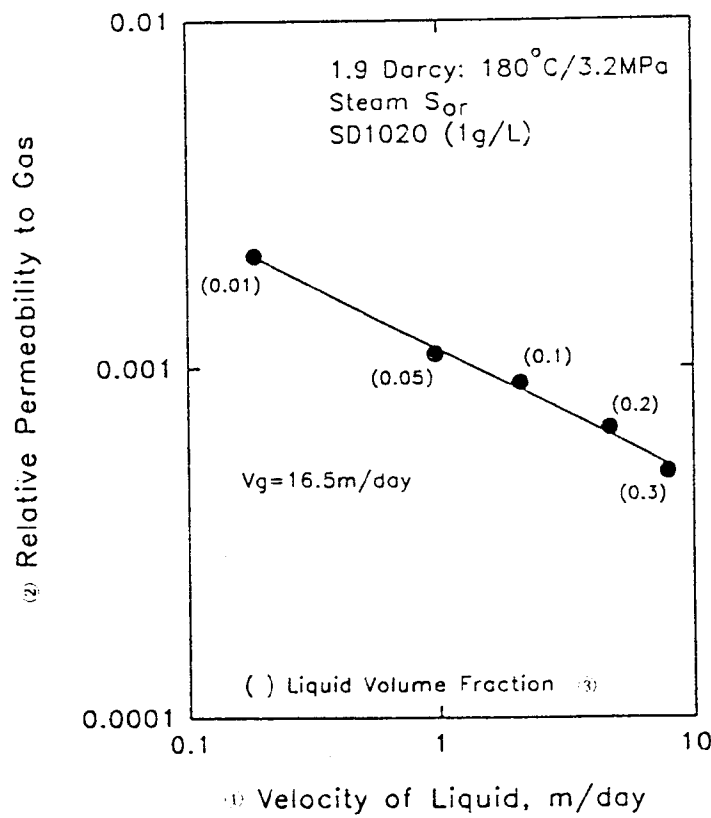


图 6 液体速度对泡沫流动阻力影响

图 7 表明 LVF 保持不变时气体和液体瞬时变化的影响，图中为两种活性剂浓度下 K_{rg} 和流体速度的关系。在高速时有一个与流动泡沫有关的剪切冲淡 (Shear Thinning) 效应；而在低速下，泡沫具有成为被“捕获”的泡沫的倾向，对流动的阻力也越大。正如图 7 的照片中所描绘的，“流动”泡沫与“捕获”泡沫的不同就在于结构的不同。表面活性剂的浓度越高，泡沫在各种流速下的阻力也越大。这样，如果需要，可以用表面活性剂的浓度来

补偿流动速度的影响。同样很清楚的是泡沫能承受流体速度的急剧变化，并泡沫的速度曲线完全是油层中所要求的。也就是说在流速高的注入井附近阻力较低，再向前深入油层则阻力更高。

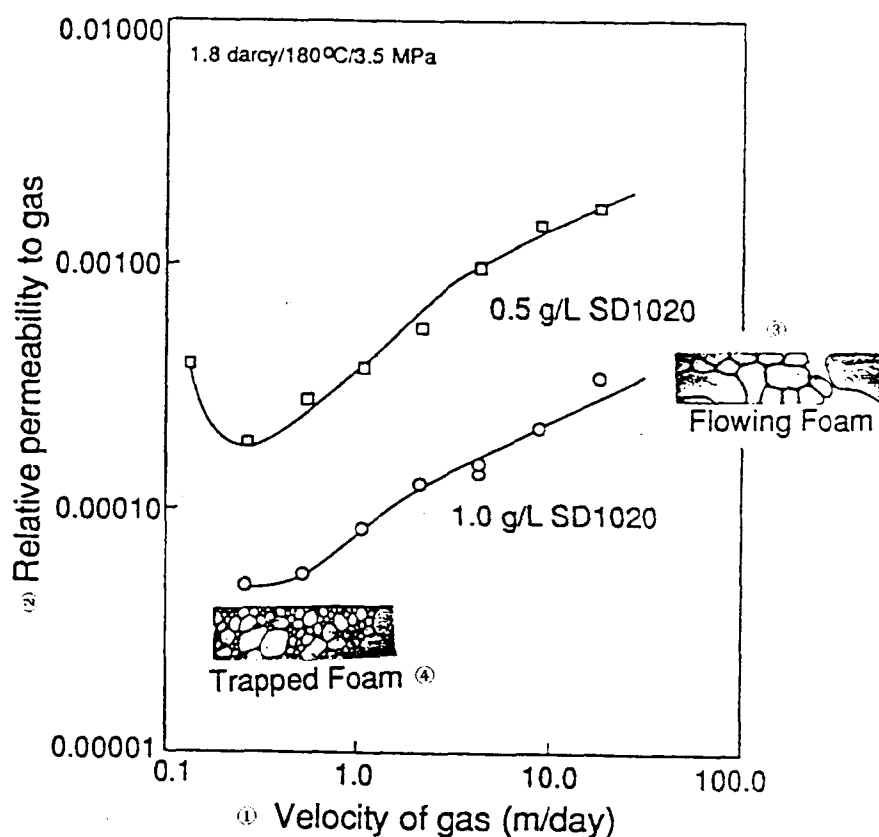


图7 表面活性剂浓度和恒定 LVF 时流体速度对泡沫流动阻力的影响

与泡沫在孔隙介质中的流动性质不同，凝胶表现出更长久的阻挡效应。实际上凝胶的流动度降低能力与“捕获”泡沫中观察到的是同一数量级。图8表明压力降对凝胶塞对注入200℃热水的阻力的作用。在第一个25小时内，压力降一步步从15KPa变化到90KPa，然后又回到15KPa，但对渗透率比的影响很小或没有影响。凝胶阻力的逐渐下降(K/K₀从0.01到0.02)可能是由于热损失。压力降在120KPa以上时，凝胶的强度开始很快衰减，说明有大量的剪切性破坏。从油层方面来看，机械应力和遇到的温度对凝胶的就位是有决定意义的。

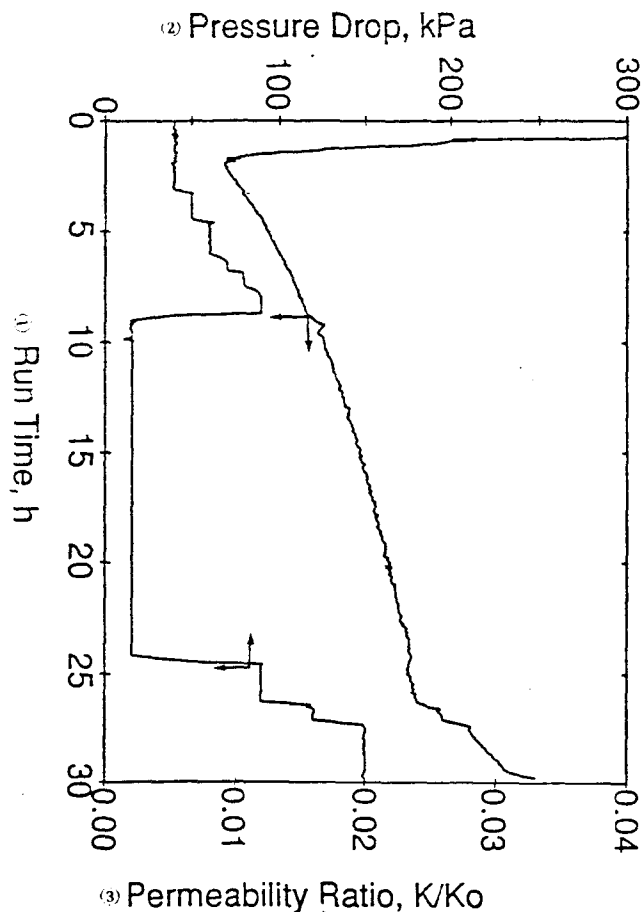


图 8 200℃时凝胶的稳定性与压降的关系

温度稳定性

蒸汽-泡沫法中使用的磺化 moitiex 表面活性剂的温度稳定性已经了解得很清楚了^(13,14)。破坏机理包括水解，酸对这种破坏起自动催化的作用。在 PH 值为中性和碱性的条件下，甚至在温度高于 250℃ 时磺化表面活性剂在几个月内都是稳定的。

与泡沫相反，对水基环境中苯甲醛的热温定性和破坏机理了解得很少。图 9 表明温度 (100–300℃) 对于 4 厘米³/小时的恒定水流下予置凝胶“阻挡”特性的影响。100℃ 时，凝胶似乎无限期的稳定。到 250℃ 时，流动阻力随时间逐步降低。而到了 300℃，阻力开始迅速下降，然后性能比较稳定。多次这种试验后对填砂器的检查表明，当温度高于 250℃ 时凝胶破碎为小颗粒，这些小颗粒就像细砂一样堵塞在孔隙的咽喉部。图 9 300℃ 时的振荡现象就是这种特性的反映。显然，大约在 250℃ 以下时，凝胶损失的连接破碎机理大大削减。在这些试验的时间尺度上，凝胶由系列的大结块所组成，每块包裹几个孔隙。

图 10 为注入热水 28 小时后确定的温度对 K/K_0 的影响。图 11 为同样数据的 Arrhenius 图。线性的 $\ln(K/K_0) - 1/T$ 图使我们计算出大约 40 焦耳/克分子的视活化能量。这个比较低的数值说明除了简单的连接破坏机理外，可能还有水解的破坏机理。

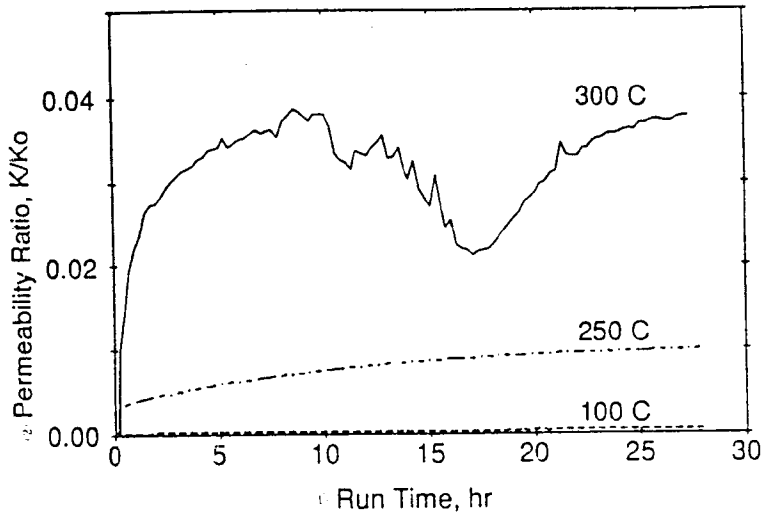


图9 温度对渗透率比变化的影响

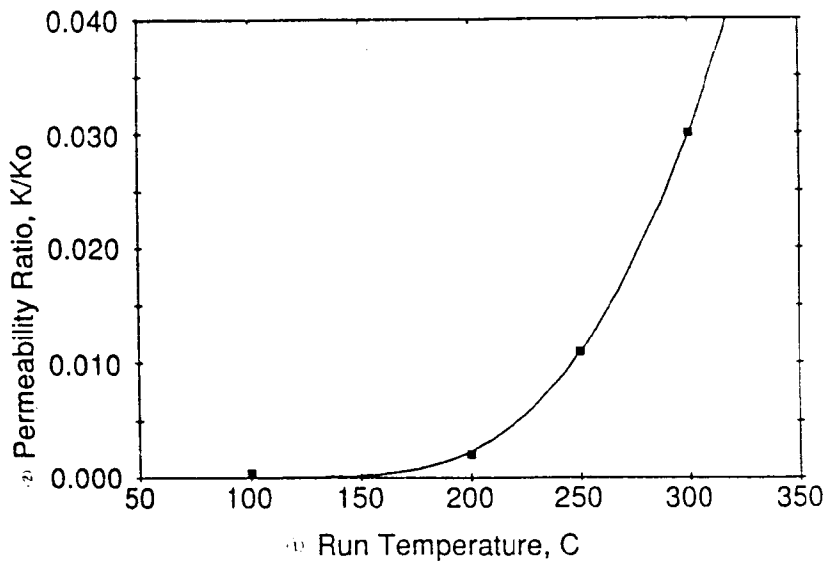


图10 渗透率比与温度的关系
(运行时间 28 小时)

用凝胶稳定的泡沫

在一定的储层条件下，泡沫比凝胶优越，反过来也是一样。综合泡沫和凝胶二者的长处则能为油层应用提供更好的技术。考虑到这一点，我们考查了产生更长久性的泡沫的可能性。理想地说，这种泡沫一旦形成，就不再需要补充表面活性剂。这种想法可以通过使分隔气泡的水化流体膜凝为胶冻的办法来实现。初步的试验说明这种想法是好的，并且用凝胶稳定的泡沫大大增加了泡沫的寿命。现在，此项工作受到专利保护。

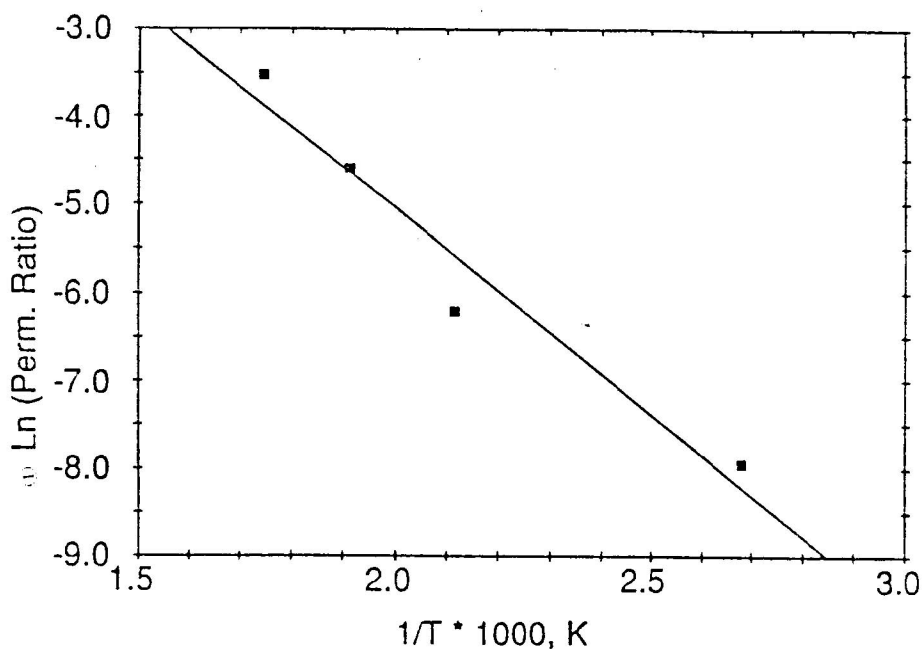


图 11 渗透率比的 Arrhenius 图

结 论

泡沫和凝胶是可用来在注蒸汽过程中进行波及控制的补充化学剂。虽然在高温下凝胶的强度降低，但在 300℃ 的温度下仍然观察到蒸汽流动度大大降低。

凝胶的主要优点是对油层的条件不甚敏感，并且，比方说，不受原油的影响。对蒸汽泡沫驱，主要担心的问题是气泡的敏感性，为稳定泡沫使用的表面活性剂和原油存在时的粘土和二价离子。以使用予泡沫塞为基础的注入策略有了发展并用来改进油敏感度问题，因而改善了泡沫在孔隙介中的延伸、传播速度。

泡沫一旦形成就能承受住许多注入生产过程中常遇到的典型组分流动比和流体速度的剧烈变化。这一点与处理单位体积的较低的价格相结合使泡沫适于在油藏中长距离传输。凝胶在高于一定的压力梯度限时更加敏感，因而会受到剪切破坏。

曾米兰 译
范从武 校