

中 — 加科技合作交流资料

热采试采区水的解释
方案VI — 辅助
注蒸汽采油期间预测
油藏温度的地温计的校准

中国石油天然气总公司
石油勘探开发科学研究院

一九九一年一月

编者提要

热力辅助采油过程中，必然引起储层某些矿物的分解，并可能生成 CO_2 和硫的氧化物。这些生成物溶于水并改变水的化学性质。一般来说，溶于水的矿物质能堵塞储层孔隙，腐蚀采油设备和结垢，造成有害的影响；另一方面，测定采出水的化学性质变化和矿物的沉淀速度，据此推测油藏温度，分析油藏受热动态。本报告标定了 SiO_2 和 Na/K 比，用此数据估测油藏温度准确度较高，即所谓的地温计。此外，研究玉髓，无定形硅，方英石 (cristobalite)， Na/Li ， Mg/Li 和 Na-K-Ca 等的沉淀速率和比值，也可作为某些油藏热采的地温计。

总之，研究矿物受热的变化，是热力采油工艺应当重视的课题之一，通过研究，避害取利，提高，热采效率。

热采试采区水的解释方案VI

—— 辅助注蒸汽采油期间预测油藏温度的地温计的校准

William D. Gunter, Brian Wiwehar, Larry Holloway

摘 要

受热油藏中产出的水中溶解的二氧化硅和钠/钾 (Na/K) 浓度常常用作油藏温度的指示器, 即大家所知的地温计。艾伯塔 (Alberta) 油砂中循环辅助注蒸汽采油的生产水中溶解的二氧化硅和钠钾浓度也以一定的形式变化, 因此也能反映油藏温度的变化。所以, 如果水的组成经过适当地校准, 是有潜力在热力采油中用产出水的化学性质来监测井筒附近的温度。

本文进行了一系列地温计校准的高压釜试验。利用冷湖清水组油砂的溶解试验分别在 100, 150, 200℃ 下进行 8, 16, 32, 64 天。石英控制试验在 100℃ 下进行, 试验时间相同。清水组油砂试验中溶解的二氧化硅浓度随着时间延长而增加, 直到达到稳态值, 得到的时间~溶解的二氧化硅曲线与石英控制试验类似。对于油砂二氧化硅地温计, 每一个稳态浓度值都可以做为一个校准点。在清水组油砂试验中, 最终的稳态溶解二氧化硅值高于碳的平衡浓度, 但低于玉髓二氧化碳的平衡浓度。当外推到油藏条件时, 可以在大约一天的时间内达到这样的稳态浓度。对清水组油藏, 二氧化硅地温计可表达为:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 1201 / (5.01 - \log(\text{SiO}_2)) - 273$$

根据这些实验 T 值在 100~25℃ 之间。

另外, 将利用 Peace 河油砂, Wabasca 油砂, Athabasca 油砂及冷湖油砂在 200℃ 和 250℃ 下进行的一月高压釜试验中收集到的历次数据以及 100~265℃ 间从岩心实验中得到历次数据与受热油藏中得到的地温计校准值相似。不管这些油砂的矿物学性能怎样, 油砂数据都在石英地热温度计和玉髓二氧化硅地热温度计之间。

在所考察的试验中, 将测量的钠/钾浓度作为温度的函数并没有发现有用的关系, 因此, 我们并不推荐将钠/钾地温计用于所试验的油藏。所以, 二氧化硅地温计是唯一可靠的, 它可用来监测辅助注蒸汽热力采油中井筒附近油藏的温度。监测采出水的二氧化硅浓度对井下热电偶测量值是个补充。

引 言

近来许多研究者(Saltuklaroglu, 1985; Abercrombie 和 Hjtcheon, 1986; Gunter 等, 1988)利用地温计来估计注蒸汽辅助热力采油中的油藏温度。所用的地温计是为大部分热采油藏研制的。它们都是基于油藏热流体中溶解组分的浓度是由油藏温度和存在于油藏中的矿物组合来控制的这一基本原则。理论上, 任何一种其浓度是由温度反应而控制的矿物组分都可以用作地温计。因此, 只要水的组成能反映油藏中取决于温度的矿物的溶解度, 地温计就能用来补充井下热电偶的测量值。

将地温计用于油藏得引入另外几个假设。假设油对地温计校准没有影响。利用循环注蒸汽或蒸汽驱油从油藏中采出的水流径的路线占受热油藏的大部分。水流在油藏中停留时间较短, 水流由注入水和原生水组成, 其在油藏中的温度梯度要高得多。尽管有这许多不确定性, 但与直接温度测量值相比, 几种地温计还是能给出合理的温度估计值。

本报告的目的就是试验和校准用于油砂油藏的地温计。考察了从一系列高压釜试验和岩心流体试验得到的最终水的化学性质, 估计的地温计温度同实验的条件温度进行了比较。

地温计的类型

Perkins 和 Gunter (1987) 总结了早期报告中较通用的地温计的特点。有一系列的化学地温计被开发出来并应用于受热油藏。钠/锂地温计 (Fouillac 和 Michard, 1981) 和 Mg/Li 地温计 (Kharaka 和 Marier, 1988) 可用于沥青油砂的热力采油操作中, 但由于产出水中锂和镁的浓度低而不能检验。气体地温计 (Giggenbach, 1980) 和同位素地温计 (Truesdell 和 Hulston, 1980) 可能没有太大的用处, 因为由于蒸汽的注入使得其难于解释。

已经证明最成功的地热温度计系列是基于产出水中 SiO_2 的浓度和 Na/K 比的地温计 (Henley 等, 1984)。 SiO_2 系列地温计取决于控制溶解 SiO_2 量的固体二氧化硅多晶矿物之一的溶解度(如石英, 玉髓 SiO_2 , 蛋白石, 方石英或无定型 SiO_2 , Fournier 和 Rowe, 1966, Fourniel, 1981), 每一种多晶型矿物都有不同的溶解度~温度关系(见表 1 和图 1a)。在沥青油砂中, 通常都存在有石英和玉髓, 但蛋白石很少。这两种矿物都控制产出水中 Si_2 的浓度。Kharaka 和 Mariner (1988) 推荐在 $40\sim 70^\circ\text{C}$ 间用玉髓 SiO_2 温度计, 在 $70\sim 250^\circ\text{C}$ 之间用石英温度计。但在 200°C 以上时, 这两种温度计都要谨慎使用, 因为 SiO_2 在上升到地面的过程中开始沉淀, 无定形 SiO_2 在地面温度下在水中会形成过饱和, 由于溶解的 SiO_2 损失, 计算的温度要低些。另一方面, 如果水在流向地面的过程中有沸腾现象的话, 溶解的 SiO_2 会变得更浓。如果有这样的凝滤的话, 可以进行绝热计算而不是进行假设没有发生沸腾的传导计算。

钠钾地温计补充了 SiO_2 地温计。以其最简单的形式, 钠钾温度计仅取决于产出水中的 Na/K 比 (图 1b), 而在高温下 Na/K 比被认为是 Na/K 同碱金属长石的交换控制的, 低温下是 Na/K 同粘土矿物的交换控制的。与 SiO_2 温度计不同, 因为 Na/K 地温计是单价离子比 (表 1), 它不受沸腾的影响。但水中含有较多的钙或镁时, 它就不适用

了。在这种情况下,可以用另一种包括了钙和镁的影响的钠钾地温计(表1, Fournier 和 Truesdell, 1973, Fournier 和 Potter, 1979)。其表达式对沸腾是敏感的,因为描述这种地温计的方程是二价和单价离子比的混合物。还有,有水存在于油藏中时,包括钙和镁就使得地温计对骤冷反应更为敏感。例如方解石的沉淀就会降低水中 Ca 和 Mg 的浓度,使得不可能使用 Ca 或 Mg 型的地温计。近来的一些试验也发现在利用 Na/K 地温计中还有一些另外的复杂性。Pope 等 (1987) 发现在 100~500℃ 之间,高压釜试验中对流纹岩,利用 0.1 摩尔的 NaCl 或 0.01 摩尔的 NaHCO_3 的 Na/K 地温计,估计的温度就较低。Potter 和 Dibble (1986) 利用钾长石(如微斜长石)和钠长石(如奥长石)的机械混合物在流动管式反应器中于 90℃ 和 200℃ 下试验,利用 100ppm NaCl 的进口流体,即使流速小到 0.001ml/分,也不能达到 Na/K 平衡比例。在较高的流速 (70.1ml/分) 时,可以达到最大的稳态值,并与流速无关。

很清楚, Na/K 地温计的校准对油藏的矿物学性能和工艺条件是相当敏感的,因此不如 SiO_2 地温计那样有用。我们认为,没有先验性的原则使得人们可以用来选择地温计,他们应该对于所用的每一个油藏进行校准。

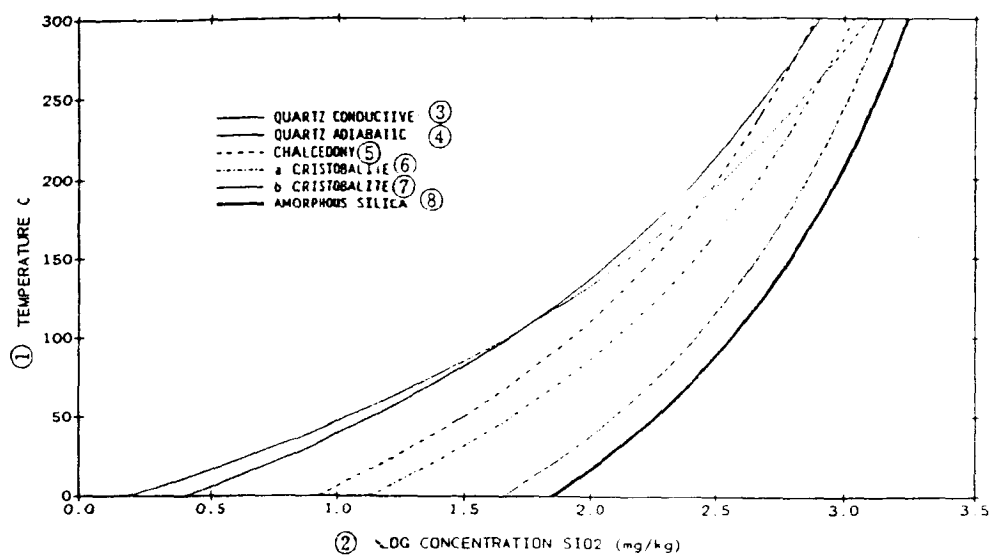


图 1 (a) SiO_2 地温计的校准, (Fourmier, 1981)

- ① 温度 ② SiO_2 浓度的对数 ③ 石英, 传导计算 ④ 石英, 绝热计算
⑤ 玉髓 ⑥ a 方英石 ⑦ b 方英石 ⑧ 无定形 SiO_2

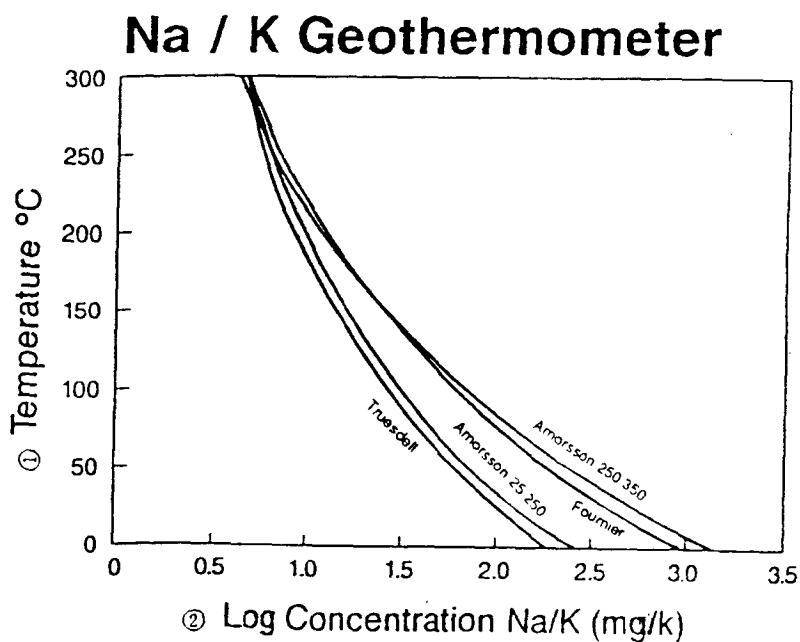


图 1 (b) Fournier, Truesdell 及 Amorrison 的 Na / K 地温计的校准。

- ① 温度 ② Na / K 浓度的对数

表 1 修正的地温计方程

RP227:	122.2 小时的蒸汽-空气 24 小时的蒸汽-N ₂ 23.8 小时的水
RP228:	144 小时的蒸汽-N ₂ 120.2 小时的水
RP229:	145.5 小时的蒸汽-空气 47.8 小时的水
RP230:	144 小时的蒸汽-N ₂ 28.2 小时的水
RP231:	144 小时的蒸汽-N ₂ (PH = 2.3) 24 小时的水
RP232:	144 小时的蒸汽-N ₂ 24 小时的水
RP233:	168 小时的 N ₂
RP234:	168 小时的空气
RP235:	60.8 小时的蒸汽-空气 37.5 小时停电 71.6 小时的蒸汽-空气 96.2 小时的空气

Alberta 油砂中 SiO₂ 地温计的校准

Boon(1980)和 Boon 等 (1982) 用统计试验方法研究了主要的 Alberta 油砂矿中的矿物-水反应。在他的因素设计中, 他在间歇高压釜试验中考察了温度, 盐度, 沥青和 PH 值对 Grand 区 Athabasca 油藏中 MCMurray 地层的油砂, Peace 河油藏中 Gething 地层的油砂以及冷期油藏中清水地层的油砂的影响。

在 Boon 的试验中, 实验温度为 200~250℃。实验是在有油存在和无油存在两种条件下的蒸馏水和 0.1 摩尔 NaCl 中进行 26 天, 水砂比为 20: 1。利用无缓冲液的中性水流液和以硼砂为缓冲液的碱性水流液。我们决定不考虑硼砂实验因为它引入地层中原来并不明显存在的另外的组分 (如硼酸盐)。这种人为的大量溶解的硼酸盐除了可以缓冲溶液的 PH 值外, 还可以改变油砂的 PH 值范围通常为 6~8, 因此仅在中性 PH 范围内校准并不影响 SiO₂ 的地温计校准的应用。还有, 在我们的图中, 并没有发现盐度和蒸馏水实验之

间有溶解的 SiO_2 浓度的倒置现象, 两个图中使用相同的符号。

与这些因素实验相连系的实验误差是按下列方法估计的, Boon 重复了许多实验。利用石英地温计, 对 Gething 油砂, 一次重复温度差为 9°C , 对 Grand Rapids 油砂三次重复温度差为 16°C 。对 Clear water 油砂进行了 8 次重复。根据全部 16 次清水试验, 将 250°C 下预测的石英温度扣除 50°C , 归一化到 200°C 来计算校准偏差。因为在重复试验中数据的发散性与非重复性试验是一样大的, 所以这种非正常的处理程序是合理的。校准偏差定为 13°C 。

Bird 等人 (1986) 提出的石英溶解的速度定律为:

$$\log \left[\frac{1 - c / c_{eq}}{1 - c_0 / c_{eq}} \right] = -k - (A / M) t$$

式中, t 是时间, C 是溶解的 SiO_2 浓度, C_{eq} 是与石英的平衡浓度, C_0 是 $t=0$ 时的浓度, A 是石英颗粒的表面积, M 是水的质量, k 是沉淀速度常数。这个定律可以用来估计近似的平衡。假定油砂是 100% 的石英, 石英的表面积为 $0.4 \text{ 米}^2 / \text{克砂}$ (参见 Bird 等, 1986 和 Gunter 和 Bird, 1988), 水 / 砂比为 20 / 1, 那么 A / M 为 $20 \text{ 米}^2 / \text{公斤水}$ 。石英的溶解量作为时间的函数就可计算了。还假设硅酸盐的合成反应并不消耗从石英上释放出的溶解的 SiO_2 , 200°C 下, 热水与石英在不到 20 天的时间内达到平衡。其它类型的 SiO_2 多晶矿物的溶解遵从相同的速度定律, 但平衡浓度 C_{eq} , 表面积和 A / M 值不同。因此, 对 Boon 的试验, 26 天试验时间足以达到平衡。

对于冷湖清水油砂, 我们通过一系列间歇高压釜试验将数据扩展到较低温度。油砂同脱离子水一起装到小体积的不锈钢高压釜中。水 / 砂重量比为 4.33 / 1, 温度分别为 100, 150, 200°C 。对于石英, 达到平衡的试验时间用 Bird 等提出的速度定律计算。假定石英的表面积为 $0.4 \text{ 米}^2 / \text{克砂}$, A / M 为 $100 \text{ 米}^2 / \text{公斤水}$, 在 200°C 下热水与石英在不到 4 天的时间内达到平衡。预计这些试验比 Boon 的试验达平衡要快, 因为 A / M 值要大五倍左右。在 150°C 下, 4 天后水中石英饱和度达 83%, 8 天后上升到 97%, 32 天后最终达到平衡。但在 100°C 时, 4 天以后水的石英饱和度仅为 22%, 8 天后为 39%, 32 天后为 86%, 64 天试验结束后饱和度为 98%。因此, 为确保达到平衡, 对溶解试验, 其试验时间分别选择为 8, 16, 32 天。

此外, 在过去年 15 年里, 艾伯塔研究院还对冷湖清水油砂进行了一系列流动反应器试验。这些数据也用来校准 SiO_2 地温计。

(1) 冷湖清水组油砂

冷湖清水油藏油砂矿物学性能是所有沥青油砂油藏中最复杂的, 其矿物学特性已很好地描述过, (参见 Putnam 和 Pedskalny, 1983; Kirk 等, 1987; Harrison 等, 1981; Visser 等, 1985)。碎石英和长石 (包括斜长石和碱性长石) 是主要的矿物, 其量在 15~30% 之间。石质碎片占 20~50%, 约有 15% 的岩石碎片可归属于燧石 (例如大块的玉髓)。闪石, 辉石, 黑云和其它形式的 SiO_2 , 如蛋白石-CT 也可能少量存在。粘土含量通常在 3~10% 之间, 主要由蒙脱石, 伊利石, 绿泥石和高岭土组成。主要碳酸盐有菱铁矿, 方解石或白云石, 其量从 0~25%, 变化较大。对于给定存在的矿物, 是什么控制矿物在水中溶解 SiO_2 的量呢? 石英 (Gunter 等, 1988) 和玉髓 (Abercrombie 和 Hutcheon, 1986) 地温计被用来估计清水油藏中的温度。

表 2 XRD 测定的清水地层的全岩样和粘土矿物学

样品	1	2	3
石英	54	59	60
长石	38	27	35
粘土	4	12	5
针铁矿	3	0	0
菱铁矿	1	2	0
粘土			
蒙脱石	42	35	33
伊利石	9	15	11
高岭土	48	43	55
绿泥石	1	7	1

1. #号 6B-28, 478.5 米

2. #号 10D-29, 470 米

3. #号 6B-32, 575 米

注： 清水组砂岩中一个重要组分就是岩石碎片。XRD表明石英和长石碎片与岩石碎片中的石英和长石没有差别。

为了决定石英和玉髓温度计, Calgary 大学的 Lan Hutcheon 博士从 Husky 油田的 Tucker 湖度采区的清水地层中得到了三种抽提油砂的样品。表 2 是 Hutcheon 用 XRD 测定的组成。石英是主要成份, 再就是长石。将矿土作为部分伊利石碎片或作为离散的骨架颗粒进行丰度计算并没差别。粘土含量从 4~12%, 三种样品分成等重份数, 制成混合样品来进行计划的实验。也获得了以前, G.W. Bird 博士在他的动力学实验 (Bird 等, 1986) 中所用的纯石英砂的校准样品。

利用抽提的清水组油砂在 100℃, 150℃ 和 200℃ 下试验的结果列于图 2a 和表 3。除了 200℃ 时 17 天的数据点外, 在每个温度下, 溶解的 SiO_2 浓度随着时间逐渐增加, 直至接近最大限定稳态值。这个最大值就是 SiO_2 地温计的校准点, 大概也就代表了砂的成分- SiO_2 相的饱和。我们认为, 图 2a 中 200℃ 的数据点的不正常是因为误差造成的。在 100℃ 时, 以同样的时间进行了石英控制试验。象预计的那样, 64 天以后, 石英达到了饱和。在图 2b 中, 将石英溶解的预计浓度-时间曲线与石英控制试验进行了对比。在所有三个温度下清水组砂样的 SiO_2 溶解的浓度-时间曲线的性状是类似的, 并能很好地与图 2a 中的石英控制曲线对比。为了强调这一点, 将清水组砂样的这些数据再作图, 见图 3a, 并与 Bird 等人 (1986) 的石英溶解速度定律所预计的 SiO_2 释放量进行了比较。再者, 预测曲线的形状与实测曲线的形状十分相似, 但两条曲线并不重复。在相同的温度下, 测量的曲线与预测的曲线相比处于较高的溶解 SiO_2 值。从这种比较我们可以得出, 在这些试验中, SiO_2 从复杂的清水组油砂中的释放量可以用上面描述的简单的速度定律来模拟, 但溶液中控制溶解的 SiO_2 量的 SiO_2 相比石英要稍微易溶些。所有三个温度下溶解 SiO_2 浓度的稳态值作图(图 3b)。这些 SiO_2 饱和值比石英饱和值高但比玉髓 SiO_2 饱和值低。如果用 Fourniel 的石英地温计, 则估计的地温温度要高 120℃, 如果用 Fiurniel 的玉髓 SiO_2 地温计则温度高低 8~17℃。

表 3 清水组砂样动力学溶解试验, 骤冷水相的化学分析

样品编号	温度℃	时间.天
------	-----	------

Clearwater Experiments

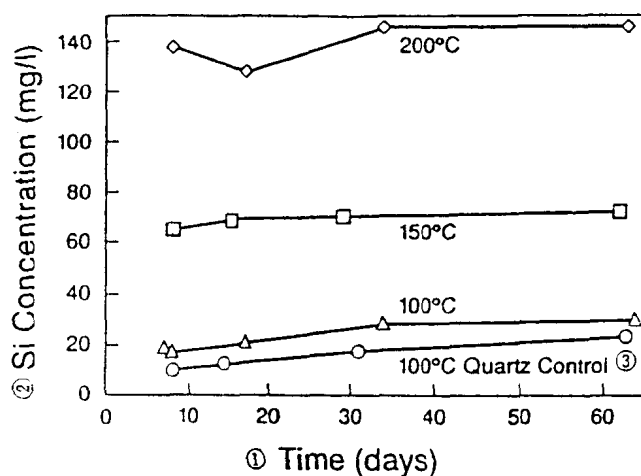


图 2a 清水组砂样和石英控制高压釜试验的 SiO_2 释放量

① 时间(天) ② Si 浓度(mg / e) ③ 石英控制

Quartz Kinetics

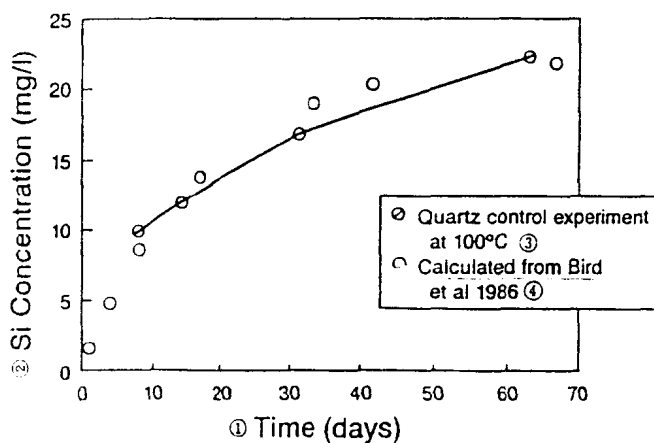


图 2b 高压釜石英控制试验中 SiO_2 释放量与 Bird 等人的动力学方程预计的 SiO_2 释放量的比较

① 时间(天) ② Si 浓度(mg / e)
③ 100°C 石英控制试验 ④ Bird 等人的计算值

Clearwater Kinetics

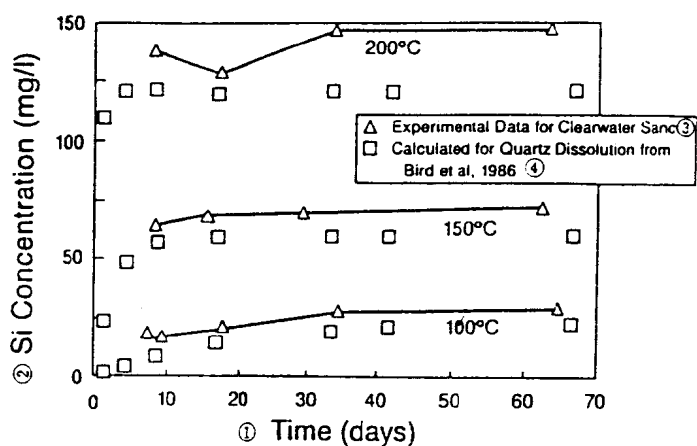


图 3a 清水组岩样 SiO_2 释放值与 Bird 动力学方程预计的石英释放量的比较

①时间(天)

②Si 浓度(mg / e)

③清水砂实验数据

④Bird 方程计算的石英溶解值

Clearwater Experiments

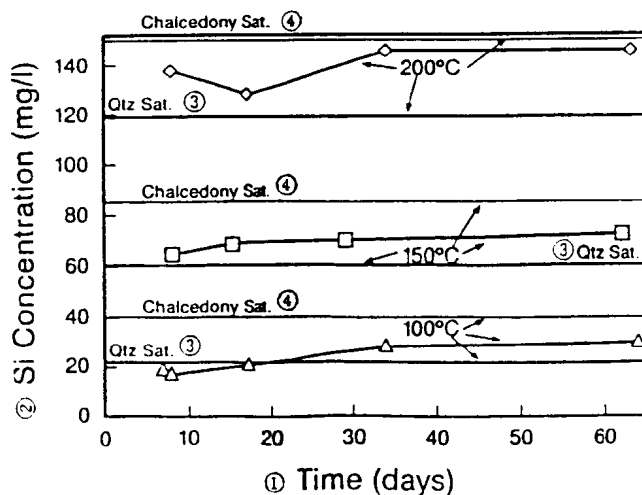


图 3b 清水组砂样 SiO_2 释放曲线与石英和玉髓 SiO_2 饱和值的比较

①时间 (天)

②Si 浓度 (mg / e)

③石英饱和

④玉髓 SiO_2 饱和

稳态或称平衡的溶解 SiO_2 浓度与从简单的石英控制试验得到的期望值明显地一样。为进一步检验石英温度计所得实验数据的差异大小，将这些数据按下列方式作图。在图 4a 中，将正确的温度（如实验温度）与假设试验中水相与石英平衡时得出的溶解 SiO_2 浓度进行了对比。曲线是根据固体 SiO_2 相，石英，玉髓，方英石，蛋白石-CT 和无定形 SiO_2 与水成平衡，利用表 1 中 Fournier 校准画出的。如果控制溶解 SiO_2 浓度相是石英，则曲线通过原点，斜率为 1。其余曲线位于石英曲线以上，因为石英是所有 SiO_2 相中溶解度量最小的。无定形 SiO_2 最易溶。如果水与无定形 SiO_2 成平衡的话，根据石英地温计估计的温度要高 125°C 左右。玉髓是除了石英以外第二个难溶的物相，在较低温度下差别仅为 30°C 左右，在 250°C 以上时与石英曲线相交。因此，如果利用油砂油藏试验，其溶解 SiO_2 浓度达到了平衡值，并在石英曲线上作图，那么石英就是用于该油藏的正确地温计。可是，如果曲线位于石英曲线之上，则另一种 SiO_2 相控制着 SiO_2 的溶解，应该利用不同的校准。例如，Boon 的关于冷湖清水组油砂的数据（表 4）可以扩展到 250°C 时的地温计校准（图 4b）。但在 250°C 时，这此数据不符合石英温度计。

Quartz Temperatures

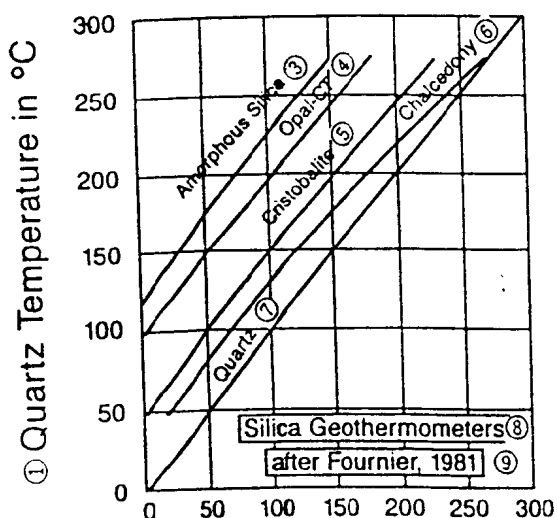


图 4a 假定与石英平衡的预计温度和平衡的实际温度。

- | | | | |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| ① 石英温度 $^\circ\text{C}$ | ② 正确温度 $^\circ\text{C}$ | ③ 无定形 SiO_2 | ④ 蛋白石 |
| ⑤ 方英石 | ⑥ 玉髓 | ⑦ 石英 | ⑧ SiO_2 地温计 |
| ⑨ 取自 Fournier, 1981 | | | |

Batch Reactor Data

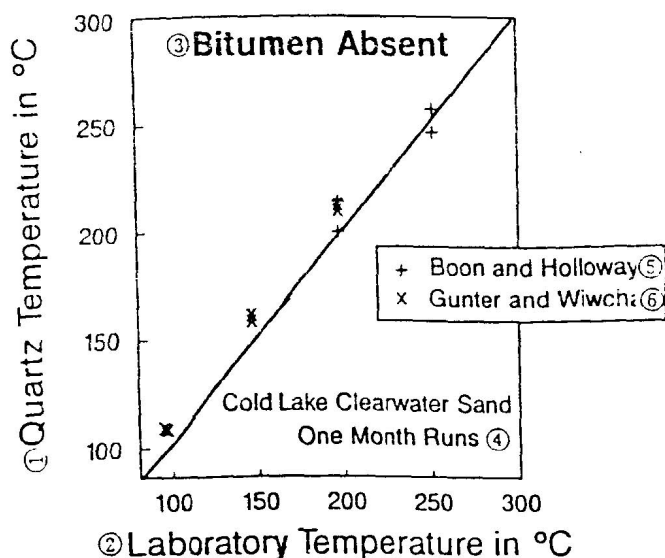


图 4b 利用抽提清水组油砂对高压釜实验进行的石英温度预计。

① 石英温度 $^{\circ}\text{C}$

② 实验室温度 $^{\circ}\text{C}$

③ 无沥青

④ 冷湖清水油砂,实验时间一个月

⑤ Boon 和 Holloway 的结果

⑥ Gunter 和 Wiwchar 的结果

以上描述的间歇反应器试验比岩心流动或流动反应器操作上要简单些。明显地,后者能更近似的描述油藏的开采过程。在地温计校准中,我们希望两类试验得出相同的校准值。我们利用 Alberta 研究院实验室 15 年来利用冷湖清水组岩芯收集到的历次岩芯数据检验了这一点。与间歇反应器试验相比,水-矿物平衡时间要短得多,因为水砂比小得多(约为 0.2)而导致动力学溶解方程中 A/M 的值要大。(图 5)。例如,对于 100 天的间歇反应器试验,流动反应器试验的停留时间大约是间歇试验的 $1/100$,即 1 天。流动反应器的结果见表 5 和图 6a。尽管这些试验中所用岩芯是从冷湖清水组不同的油藏中得到的,稳态 SiO_2 溶解浓度表示出与温度有很强的关系,主要落在石英曲线上。每一个数据点都代表一个不同的岩芯流体。与利用抽提油砂的间歇反应器试验相对照,大多数流动试验都使用含沥青岩芯。对于这些试验,我们不能排除 SiO_2 浓度的不确定性,因为这些试验是设计用来解决其它问题的。溶解 SiO_2 浓度表观上降低,与间歇反应器试验相比导致利用石英温度计估计的温度偏低,这可能是由于试验误差,沥青的存在,流动或者是清水组油藏中矿物学性能的一些小差别。但估计温度的偏差不是很大。

Batch Reactor

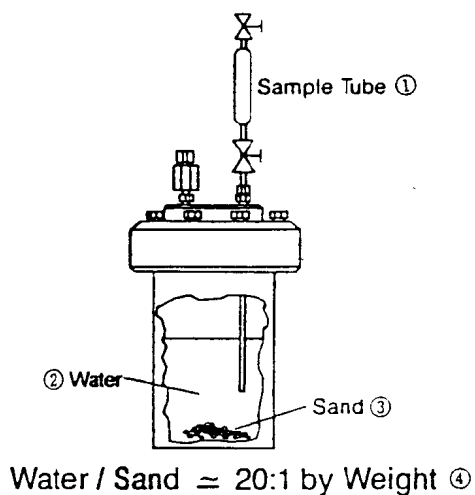
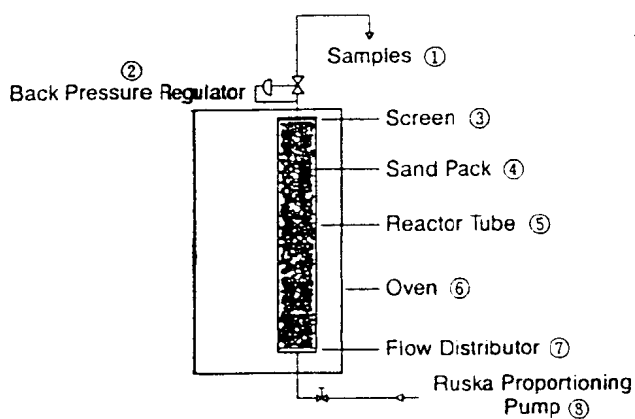


图 5a 高压釜试验装置

- ① 试样管 ② 水 ③ 砂 ④ 水 / 砂比 = 20.1(重量比)

Simple Flow Reactor



Water / Sand $\approx$ 1:5 by Weight ⑨

图 5b 简单的岩芯流动试验装置

- | | | |
|---------|-------------|---------------------|
| ① 样品 | ② 背压调节器 | ③ 隔板 |
| ④ 砂床 | ⑤ 反应管 | ⑥ 炉子 |
| ⑦ 流动分布板 | ⑧ Ruska 比例泵 | ⑨ 水 / 砂比 = 1:5(重量比) |

Flow Reactor Data

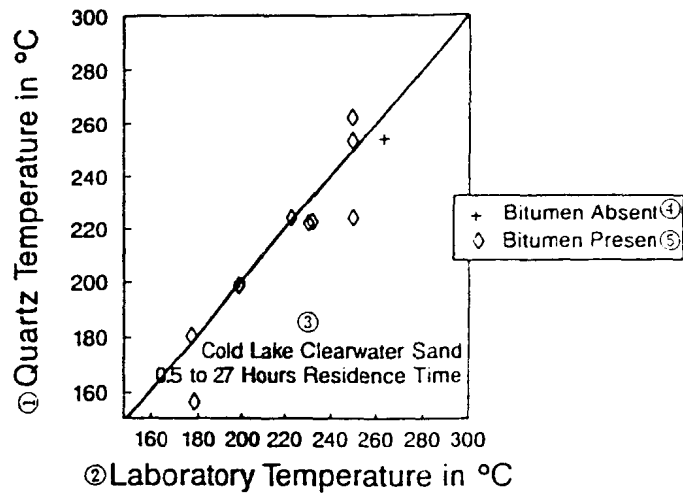


图 6a 利用清水组油砂岩芯流动预计的石英温度

- ① 石英温度℃ ② 试验室温度℃ ③ 冷湖组油砂,0.5~27 小时停留时间
④ 无沥青存在 ⑤ 有沥青存在

Boon Factorial

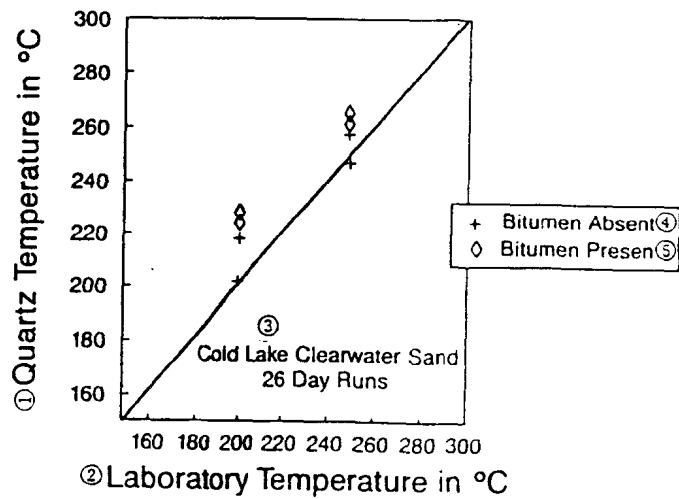


图 6b 利用清水组油砂高压釜试验预计的石英温度(Boon 的数据)

- ① 石英温度℃ ② 试验室温度℃ ③ 冷湖组油砂,26 天实验
④ 无沥青存在 ⑤ 有沥青存在

图 6b 中 Boon 关于冷湖清水组油砂的数据可以用来区分有无沥青对温计校准的影响, 沥青存在时预计的石英温度偏差最大, 这种偏差与岩芯流动数据的结果相反。在实验的再现性试验中, 这种偏差可能会消除。但考虑 Boon 用其它油砂作的其余试验时, 可以得出沥青的存在并不影响 SiO_2 地温计校准的结论。似乎是油砂颗粒同水自由地反应。在沥青中存在一些通道, 意味着在 Boon 的试验中, 油砂是保持水浸湿状态的。

以这些试验为基础, 对 Tucker 湖清水组油藏可用 SiO_2 地温计, 对于冷湖的所有清水组油藏, 适合于下列方程:

$$T = \frac{1201}{5.01 - \log(\text{SiO}_2)} - 273$$

T 是温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。这种校准较大程度地强调了我们的间歇反应器试验, 唯一的一组试验是设计用于检验用于特定的清水组油藏—Tucker 湖油藏的 SiO_2 地温计的校准的。它可能没能用于那些石英起着较强控制作用的其它清水组油藏。这两者预计的温度之间的差别不是很大。因此, 如果对某一特定的油藏没有进行校准地话, 在热力采油中, 石英温度计可以作为估计油藏温度的一般指导。

(2) Athabasca McMurray 油砂

Boon 关于 Athabasca McMurray 油砂的石英试验(图 7a)除了 250°C 一个有油的数据点外, 全部落在实验误差范围内, 这个偏离较大的数据点少在石英曲线以下 70°C 。因为 200°C 时沥青不影响等价试验, 在沥青存在时反应速度较慢, 我们认为这一点的组成反应了平衡态组成。它可以用一些未考虑到的方法上的误差来解释。我们认为石英温度计可以用于 Athabasca McMurray 油砂。

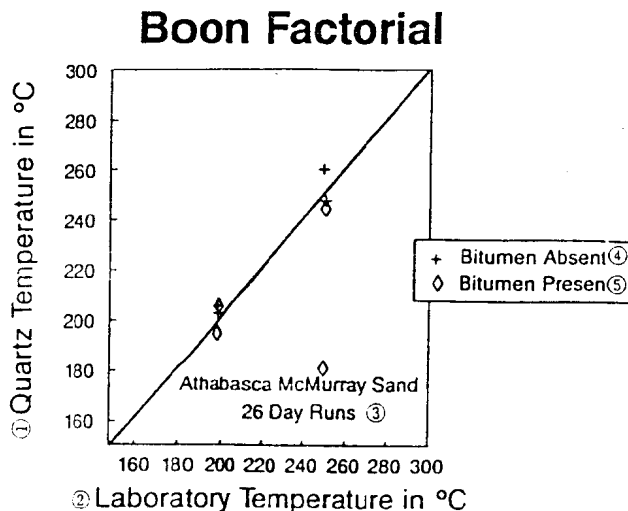


图 7a 利用 McMurray 油砂, 高压釜试验预计的石英温度

① 石英温度 $^{\circ}\text{C}$

② 实验室温度 $^{\circ}\text{C}$

③ Athabasca McMurray 油砂 26 天实验

④ 无沥青