

稠油与高凝油热力开采 问题的理论与实践

任瑛 梁金国 等编著

石油工业出版社



稠油与高凝油热力 开采问题的理论与实践

任 瑛 梁金国 杨双虎 等编著
杨乃群 徐明海 张 巍

石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面系统地论述了井筒中的传热及多相流的压力损失、油层中的渗流及驱替原理,着重讨论温度对井筒工况的影响,分析了蒸汽吞吐轮次效益问题,蒸汽吞吐与井筒加热的衔接、热力驱油问题,特种油藏的开发以及高凝油藏早期注冷水伤害的形成和消除。在考虑热力学和传热学的基础上研究多相流的举升、气举、抽油杆的断脱、水平井采油、电加热等有关问题。

本书可供石油工程及热工方面的工程技术人员、研究人员及相关院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

稠油与高凝油热力开采问题的理论与实践/任瑛等编著.

北京:石油工业出版社,2001.2

ISBN 7-5021-3104-3

I. 稠…

II. 任…

III. ①粘性原油-热力采油-基本知识

②原油,高凝固点油-热力采油-基本知识

IV. TE355.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 47022 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 264 千字 印 1—2000

2001 年 2 月北京第 1 版 2001 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3104-3/TE·2374

定价:20.00 元

前 言

我学习的专业是蒸汽动力，毕业后一直在北京石油学院从事热工教学。这是一门技术基础课，是无缘接触到采油方面的问题的。1969年，迁校到胜利油田，油井就在家门口。胜利油田有的区块原油特稠，有的含蜡特高，这些都给生产带来困难；抽油机的抽油杆悬挂器在井口的撞击、抽油杆的断脱、油管中的蜡堵减产以及打捞、作业等，耳濡目染，常常不自觉地联系到自己所从事教学的学科，于是开始试算了油井生产时油管中的温度分布，并试图用井筒加热的方法作为稠油、高凝油井某些故障的防治方法。推荐给油田，果然见效。于是更深入地进行了稠油、高凝油开采中的热力问题研究并逐渐组成了一个课题小组，名之曰“热力采油”课题组。其实，早在60年代，美国、加拿大等国已经进行热力采油的研究，并用于生产，只是他们多着眼于油层的加热，而我们则开始于井筒的加热，至80年代后期，我们也进入了油层的加热研究。

本书实际上是十多年来本科研小组在稠油、高凝油开采方面所进行的部分课题的总结，其中大部分是本小组中研究生的课题研究成果。本书共分九章，绪论与第一、二、三、五章由任瑛编写，第六章由任瑛、梁金国编写，第四章及第八章由梁金国编写，第七章由黄善波、徐明海编写，第九章是热力采油在现场的实践，有四部分内容，分别由杨双虎、徐明海、梁金国、张巍、杨乃群编写，全书由任瑛、梁金国统稿审定。

无论在课题研究的实践中或本书的编写中，都得到了辽河油田、胜利油田、大港油田的大力支持，也得到了石油大学热工组的老师们、采油教研室的老师们的帮助，作者们对上述单位和个人表示衷心的感谢。

由于作者们水平所限，书中不免有错误，热切希望读者批评指正。

任 瑛
2000年8月

目 录

绪论	(1)
第一章 井筒里的传热	(4)
第一节 井筒中的能量平衡及流体流过井筒时沿井深的温度分布	(4)
第二节 油管中流体至地层的传热系数 k_l 和地层热阻 R_{lt}	(6)
第三节 井筒加热	(7)
第二章 井筒中的压力损失和压力分布	(25)
第一节 一般概念	(25)
第二节 压力梯度方程式	(26)
第三节 溶解气油比及气液两相流的出现	(27)
第四节 多相流中的油、气、水的粘度及混合物的粘度	(29)
第五节 流动参数的计算	(30)
第六节 多相流的形成及流型的划分	(31)
第七节 各流型的多相流压力损失	(33)
第三章 油井生产的工况及其受井筒加热的影响	(46)
第一节 自喷井	(46)
第二节 抽油井	(49)
第四章 井筒注汽与举升优化设计	(61)
第一节 注汽井注汽优化目标函数的建立及实现	(61)
第二节 井筒内汽水两相管流的计算	(63)
第三节 电加热井筒举升优化目标函数的建立及实现	(69)
第四节 电加热井筒举升加热功率的优化与抽油杆柱设计	(70)
第五节 优化设计计算结果分析	(71)
第六节 结论及建议	(72)
第五章 向油层注入热流体以传送热能和蒸汽吞吐问题	(73)
第一节 能量平衡方程式	(73)
第二节 Marx-Langenheim 理论	(75)
第三节 Marx-Langenheim 方法的一般情况	(79)
第四节 蒸汽吞吐	(80)
第五节 蒸汽吞吐的计算	(81)
第六章 热力驱油	(90)
第一节 一般概念	(90)
第二节 热流体驱油的数学描述	(91)
第三节 物理模拟	(95)
第四节 数值模拟	(99)
第五节 稠油蒸汽驱分析	(104)

第七章 注蒸汽地面管网系统优化设计	(112)
第一节 注蒸汽系统简介	(112)
第二节 数学模型的建立	(113)
第三节 数学模型的求解	(117)
第四节 注汽管线的水力、热力计算	(120)
第八章 水平井蒸汽辅助重力泄油解析求解方法及其改进	(124)
第一节 引言	(124)
第二节 蒸汽辅助重力泄油产量的理论预测	(124)
第三节 水膜层厚度与泄水率的求解方法	(127)
第四节 水油界面处原油温度的求解方法	(128)
第九章 热力采油的实践	(131)
第一节 辽河油田曙 175 块蒸汽驱试验研究	(131)
第二节 辽河油田沈 95 块高凝油油藏热水驱	(134)
第三节 辽河油田超稠油 SAGD 技术的现场试验研究	(143)
第四节 科尔沁油田马家铺地区庙 5 块油藏间歇蒸汽驱开采的研究	(147)
参考文献	(158)

绪 论

所谓热力采油是指将热工学的理论基础——热力学和传热学的理论应用于石油的开采工程。这是 20 世纪 60 年代以来为了开发稠油而发展起来的热工与采油相结合的学科，它对于高含蜡、高凝固点油藏的开发，具有指导意义。

在油藏开发中，有热交换现象同时存在：产出的石油通过井筒流向井口过程中沿途向地层散热，向油层注入冷水时则在油层中也会发生热交换。对于低含蜡、低凝固点、低粘度的石油来说，这种热交换对石油的生产没有多大的影响。但对于高含蜡、高凝固点、高粘度油藏来说，将给石油生产带来很大的困难。这是由于石油本身的物性造成的。

稠油中含有大量的胶质和沥青，相对密度大 (>0.934)，粘度高，一般在 $5000 \sim 10000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，甚至有远高于此值的，但是，稠油的粘度对温度非常敏感，与温度呈对数关系。Walther 将粘度、温度关系描述为如下的方程：

$$\lg[\lg(\mu + 0.7)] = m \lg(t + 273) + b$$

式中 b ——代表特定原油的常数；

m ——随原油性质变化的斜率。

绘制在直角坐标上，如图 1 所示。

石蜡能溶解于液态碳氢化合物中，其溶解度与温度有关，当温度下降时，石蜡在液态碳氢化合物中的溶解度下降。蜡是正烷烃，其分子式为 $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ，石蜡的 n 值在 $16 \sim 64$ 之间， n 值愈大的，凝固点愈高。石油中的含蜡量越高，蜡的相对分子质量越大，则这种石油的凝固点也越高。含蜡量高于 8% 的原油即为高含蜡原油，而含蜡高于 30% 的称为特高含蜡原油。高含蜡原油降低温度至析蜡点，蜡晶开始析出。随着温度的降低，蜡晶也不断增多，待蜡晶已足够多时，蜡晶从分散相转变为连续

相，而形成网络。当所形成的蜡晶网络的结构强度足以抵抗一定的外力时，已观察不到原油的流动，则认为已达到了结构凝结，此时的对应温度即为原油的凝固点。这里所说的凝固只是一种条件性的凝聚，而非指原油已凝成固态物质。如果对凝固油作用外力且外力加大，则又能观察到原油的流动，若降至更低的温度，则会再次出现凝固。

当温度高于析蜡点时，原油为单相，这时原油的粘度是很低的，且随温度的降低，粘度也只略有增加，在析蜡点与凝固点之间，随着温度的降低，粘度则有较多的增加。这时原油中已含有固相蜡晶，而这时的粘度实际上是一种结构粘度。至温度低于凝固点时，则要使原油产生一点运动，就必须破坏网络结构，所以表现出来就是粘度急剧的增加。

稠油和高凝油的上述特性，在产出的原油流过井筒时，由于散热降温而导致流动阻力大

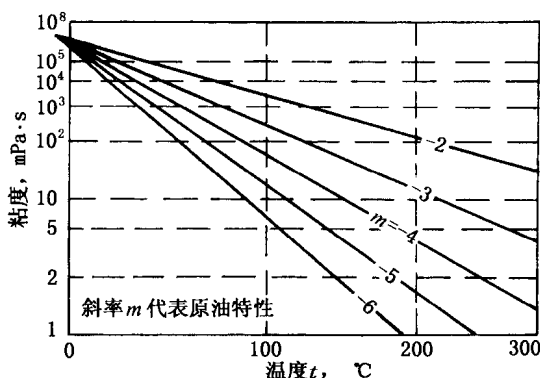


图 1 稠油的粘—温关系

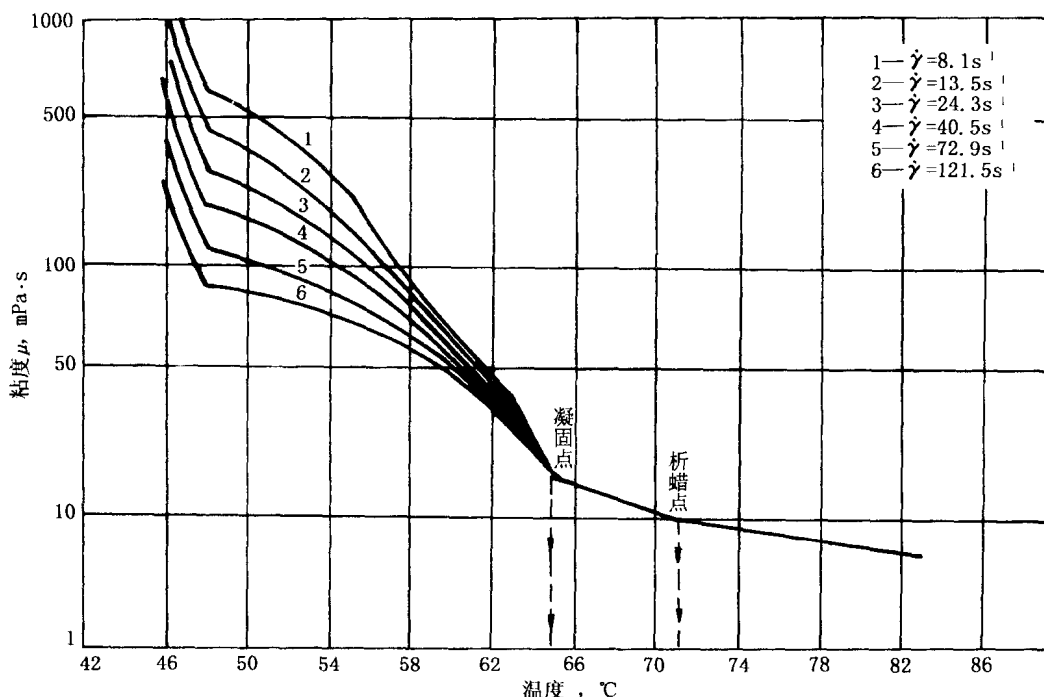


图2 沈阳油田高凝油的粘—温关系

大增加。通常的注冷水入油层也将降低油层温度而使高凝油在油层中发生析蜡，堵塞油层孔隙。但是，采用热力方法则有助于克服上述不利情况。世界上一些拥有大量稠油资源的国家如美国、加拿大、委内瑞拉等 30 多年来热力采油的实践和我国 10 多年来的实践，充分说明了热力采油是开发高粘度油藏的有效而且经济上合理的方法。我国应用热采方法开发高含蜡、高凝固点油藏，证明也是有效的。

热力采油研究的主要内容大体上包括下列三个方面。

1. 井筒加热

井筒加热最主要的目的是补偿井筒向地层的散热，从而保持通过井筒的石油在一定的温度，以控制其析蜡和粘度的增加，使石油得以顺利产出。井筒加热适用于原油能够从油层进入井底，而在从井底向井口的上升的过程中由于井筒向地层的散热而发生原油大幅度的析蜡和增加粘度的情况。例如，沈阳油田某区块油层深 2000m，油层温度 80℃，原油含蜡 51%，凝固点 67℃，析蜡点 78℃。在油层温度下，原油粘度只有 10mPa·s，故原油从油层流入井筒是很容易的，但从井底流向井口，由于散热，温度不断下降，至井口时，温度只有 35℃左右，可见，在井筒中部某个高度，温度就降至析蜡点，在析蜡点的高度往上，井筒中将发生结蜡堵塞的可能，在这种情况下，显然，进行井筒加热，将有助于恢复正常生产。

对于原油能流入井底的稠油、高凝油，采用井筒加热的方法来维持正常生产，比注蒸汽和火烧油层的方法简单而且节省得多。

2. 注热水和注蒸汽驱动——注热流体驱动

注水的目的是将油层中的原油驱向邻井，但注入冷水于高凝油层则要引起析蜡堵塞油层孔隙，注入冷水于稠油层则使稠油粘度更加增高而更难于流动，而注入热流体——热水或蒸汽则效果好得多。对于 10000mPa·s 左右的稠油油层，注入 330℃ 左右的高压蒸汽，可将油

层温度升高至 160℃ 左右，而稠油粘度将降至 20mPa·s 左右，这时，流动性便大大改善了，因而有利于采出。对于高凝油层则与稠油不同，如前所述沈阳油田的油层温度为 80℃，那里原油本来具有很好的流动性，注入的热流体，只要不冷却油层，就可保持高凝油的流动性。因此，只要注入热水，使其到达井底时，温度不低于油层温度或不至于使油层中原油析蜡即可，这比注蒸汽要容易而且节省得多。

3. 蒸汽吞吐或蒸汽激励

蒸汽吞吐是指把生产井周围有限区域加热以降低稠油的粘度，同时清除井底周围油层孔隙中的粘土、钻井液等沉淀物来提高井底附近地带的渗透率。不论是降低粘度或清除粘土、钻井液对孔隙的堵塞都对提高产能有利。蒸汽吞吐每次包括两个阶段：第一阶段，注入蒸汽，随后是 2~4d 的关井，又称焖井，其目的是使注入的蒸汽充分与油层换热，并使水蒸汽凝结；第二阶段，吐出，开井采油。这一阶段时间相当长，约为几个月至半年多，甚至有注入蒸汽一次能连续生产一年以上者。后者往往属于油的粘度不甚高而解堵明显的情况。当焖井后初次开井恢复生产时，水油比很高，但迅速下降，而且油产量达最大值。随着油层逐渐变凉，产量下降而趋于稳定在一个较低的水平。稳产阶段过去以后，产量下降到从经济观点来看不宜于继续生产时，可进行第二次蒸汽吞吐、第三次蒸汽吞吐等，但蒸汽吞吐的效果是递减的，通常可进行少则三四次，多则五六次，以后就要转入蒸汽驱了。

除上面所列的几种热力采油方法外，尚有火烧油层或火驱，也是一种重要的热力采油方法。火烧油层，不需要昂贵的隔热管，也省去了地面高压蒸汽管线和井筒中的热损失而具有较高的能量利用率。从 50 年代以来，火烧油层的试验研究已经进行了许多次，但成功的例子却不多。我国也进行过若干次火烧油层的工业试验，但迄今尚未得到规模生产上的应用。因此，本书暂不收入。井筒加热已在若干油田产生效益，高凝油热水驱，稠油蒸汽驱均已进入应用规模，且显示出经济效益，在本书第九章中均有实践介绍。第九章中还介绍了蒸汽辅助重力泄油（SAGD），这是近年来出现的一种用水平井注汽和水平井生产的开采稠油的新途径，将有发展前景。

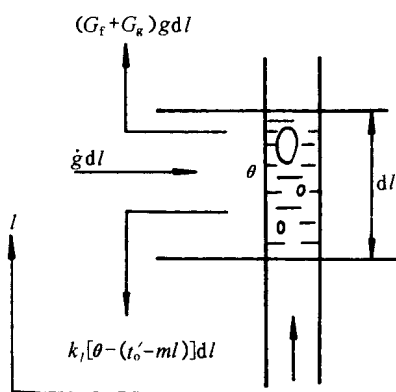
我国有相当数量的稠油和高凝油资源，相信我国的热采事业必将进一步得到发展。

本书承辽河油田、胜利油田、大港油田及其他单位提供了许多资料，在此表示衷心感谢。由于作者水平所限，谬误之处，尚希读者提出指正和批评。

第一章 井筒里的传热

在稠油和高含蜡、高凝固点石油的开采中，井筒里的传热具有重要的作用，因为这类石油的流动性对其本身的温度极为敏感；稠油的温度每上升 10°C ，粘度大约就要减半；反之，若降低 10°C ，粘度就将增加一倍。高含蜡、高凝固点石油，若温度高于析蜡点，粘度非常低，不过在 $10\text{mPa}\cdot\text{s}$ 左右；一旦温度降至析蜡点以下，油中含蜡便要析出，附着于油管内壁，大大增加了产出原油的流通阻力，甚至整个油管的流通截面将被堵死。对于注水井，同样也有井筒中传热的问题。对于稠油往往采用注入高压蒸汽驱动，井筒的散热使得注入油层的热量减少，这是一项可观的损失。井筒中的传热还将影响自喷井的生产工况，抽油井的抽汲工况和油层中的驱替的效果。

第一节 井筒中的能量平衡及流体流过井筒时沿井深的温度分布



油层产出的油气混合物从井底上升时，历经散热、脱气及气体膨胀、析蜡等过程。在井筒上截取 dl 长的微元（图 1—1），并取坐标 l 的正方向向上，进行能量平衡的分析。假设脱气及气体膨胀做功与油气的举升相抵消，又假设析蜡放出的热均匀分布于全井筒，并作为内热源，则可写出能量平衡方程式：

$$k\pi d[\theta - (t'_o - ml)]dl + (G_f + G_g)gdL - qdl = - (G_f C_f + G_g C_g)d\theta$$

又可简化为：

$$k_l[\theta - (t'_o - ml)]dl + (G_f + G_g)gdL - qdl = - Wd\theta \quad (1-1)$$

图 1—1 井筒截取微元的能量平衡

式中 k_l ——从油管中的流体至地层间单位管长的传热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ， $k_l = k\pi d$ ， k 也是传热系数，但针对 1m^2 油管表面积而言， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ；

θ ——油管中油气混合物的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t'_o ——井底原始地层温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

m ——地温梯度， $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，通常， $m = 0.03 \sim 0.035^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ；

l ——从井底至井中某一深度的垂直距离；

q_l ——通过油管的石油析蜡时放出的熔解热，分摊于全井筒，作为内热源，对于含蜡很高的原油，内热源作用不应忽略， W/m ；

G_f ， G_g ——相应为产出石油和伴生气通过油管的质量流率， kg/s ；

$(G_f + G_g)gdL$ ——油气混合物的举升功，实际上可忽略不计；

$W = G_f C_f + G_g C_g$ ——称为水当量，而 C_f ， C_g 相应为石油及伴生气的比热， $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

在忽略举升功后，式（1—1）的解为：

$$\theta = Ce^{-\frac{k_l}{W}l} + (t'_o - ml) + \frac{Wm + q_l}{k_l} \quad (1-2)$$

式（1—2）的边界条件是，在井底， $l=0$ ， $\theta=t'_o$ ，而

$$C = -\frac{Wm + q_l}{k_l}$$

$$\theta = \frac{Wm + q_l}{k_l}(1 - e^{-\frac{k_l}{W}l}) + (t'_o - ml) \quad (1-2a)$$

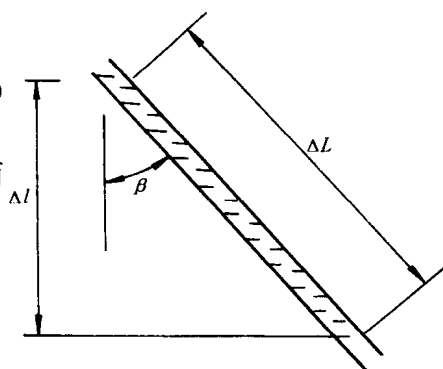


图 1—2 斜直井微元

实际上，一般情况下，原油中含蜡量不超过 30% 时，析蜡影响亦可忽略不计，而得：

$$\theta = \frac{Wm}{k_l}(1 - e^{-\frac{k_l}{W}l}) + (t'_o - ml) \quad (1-2b)$$

对于斜直井，井筒中产出流体温度分布仍按式（1—2a）计算，仍取垂直方向长度 l 为自变量，但同样垂直长度，倾斜的井筒散热面积要比垂直的大，这可在传热系数上加以修正，即用 k_L 代替 k_l ，这里 $k_L = \frac{k_l}{\cos\beta}$ 。同理，水平井的弯曲段可以把它分为若干个倾斜的直线段，分段按斜直井的方法计算温度的变化。斜直井和水平井弯曲段微元如图 1—2，图 1—3 所示。

对于注水井，在注入热水时，井筒中的温度分布规律又将如何？这时，取地表面温度为 t_o ，取坐标方向向下如图 1—4。

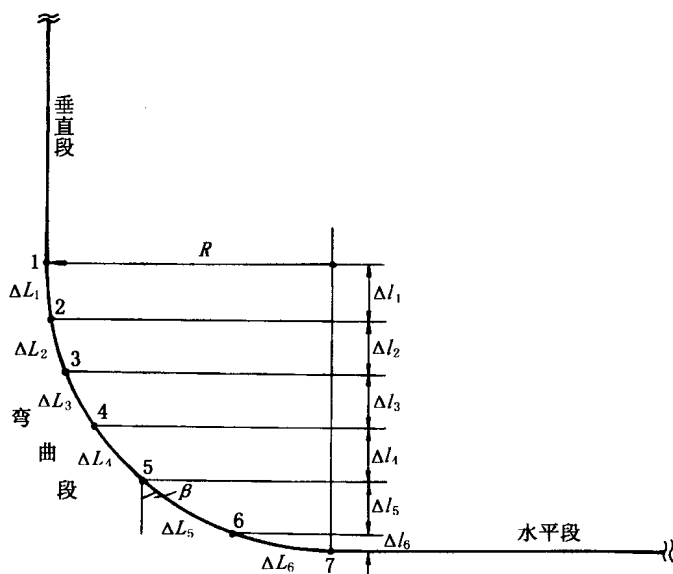


图 1—3 水平井的结构

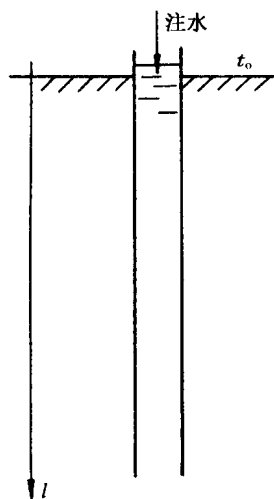


图 1—4 注水井筒

第二节 油管中流体至地层的传热系数 k_l 和地层热阻 R_{l_i}

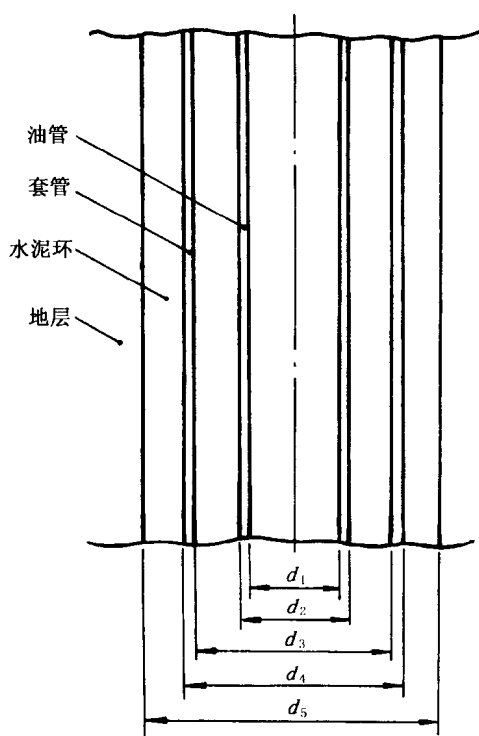


图 1—5 井筒结构

如图 1—5 所示，为一最常见的井筒及周围地层的结构。套管外有一层水泥环，将套管固定在地层中，套管内安装油管，油管是产出油气混合物流通和输出的通道。油管和套管之间的环形空间通常是封闭的，但可以通过它进行一些生产参数的测试。

油管中流过的油气混合物通过油管壁、油套管之间的环形空间、套管壁、水泥环而至地层散热，每处都有热阻，而总热阻是一系列热阻的总和：

$$\sum R_l = R_{l_1} + R_{l_2} + R_{l_3} + R_{l_4} + R_{l_5} + R_{l_i} \quad (1-3)$$

按传热学的概念，各热阻之表达式为：

$R_{l_1} = \frac{1}{\alpha_1 \pi d_1}$ ，油管内对流换热热阻， $\text{m} \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$ ， α_1 是油气混合物与油管内壁间的对流换热系数， $\text{W} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$R_{l_2} = \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}$ ，油管壁导热热阻， $\text{m} \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$ ， λ_1 是油管壁材料的导热系数， $\text{W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$R_{l_3} = \frac{1}{2\pi\lambda_e} \ln \frac{d_3}{d_2}$ ，油套环形空间对流热阻，但以导热方式处理， $\text{m} \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$ ， λ_e 是环形空间流体的当量导热系数，按有限空间自然对流公式计算求得；

$R_{l_4} = \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_4}{d_3}$ ，套管壁导热热阻， $\text{m} \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$ ， λ_2 是套管壁材料的导热系数， $\text{W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$R_{l_5} = \frac{1}{2\pi\lambda_{ce}} \ln \frac{d_5}{d_4}$ ，水泥环的导热热阻， $\text{m} \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$ ， λ_{ce} 是凝固水泥的导热系数， $\text{W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

R_{l_i} 为地层热阻，这是一项无界热阻，热阻的大小与加热（或冷却）的作用时间有关：

$$R_{l_i} = -\frac{1}{4\pi\lambda_f} \text{Ei}\left(-\frac{r^2}{4a\tau}\right) \quad (1-4)$$

$$\text{Ei}(-u) = C + \ln u - u + \frac{u^2}{2 \cdot 2!} - \frac{u^3}{3 \cdot 3!} + \cdots + (-1)^n \frac{u^n}{n \cdot n!} + \cdots$$

式中 r ——水泥环的外半径, m;
 a ——地层的导温系数或热扩散系数, m^2/s ;
 λ_f ——地层的导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
 τ ——加热(或冷却)作用的时间, s;
 C ——欧拉常数, $C=0.57721$;
 Ei ——指数积分函数, 是一个无穷级数。

Ei 可从数学手册的指数积分函数表中查得。对于油井的尺寸, 当作用时间超过一星期, 可近似地只取函数的前两项而误差仍可接受, 则地层热阻变为:

$$R_{l_f} = \frac{1}{2\pi\lambda_f} \left[\ln \frac{2\sqrt{a\tau}}{r} - 0.29 \right] \quad (1-4a)$$

从油管中油气混合物至地层的传热系数 k_l 是总热阻的倒数。

$$k_l = \frac{1}{\sum R_l} \quad (1-5)$$

第三节 井筒加热

1. 井筒加热的作用

常规采油, 由于地层的散热, 产出的油气混合物通过油管从井底流向井口的过程中, 温度不断下降、粘度不断上升; 而采用井筒加热, 则在流向井口时, 温度不断升高, 粘度不断下降。显然, 后者有助于增加产出油气混合物的流动性。这对于稠油、高凝油的生产是非常有利的。图 1—6 表示了某井两种工况对比: 在同样产量且井底温度都相同时, 常规采油与热流体循环井筒加热采油相比, 井筒油管中产出之油气混合物温度和粘度之差别, 随流动方向越来越明显, 而至井口时差别达最大。如图 1—6 所示的某稠油井井口处粘度比竟达 25 倍之多。

2. 所需加热深度

井筒加热并非都要从井底开始, 只要在油气混合物沿油管上升时温度的下降不致使原油大量析蜡或粘度过多增加, 从而影响流动性即可。合理的加热深度既与油品的物性, 如含蜡的多少、凝固点的高低, 粘度—温度间的关系有关, 又与产量的高低、油层的深浅有关。加热的深度不够, 会在加热深度以下一段距离内或因结蜡或因粘度过大而使流动阻力增加形成通过能力降低的

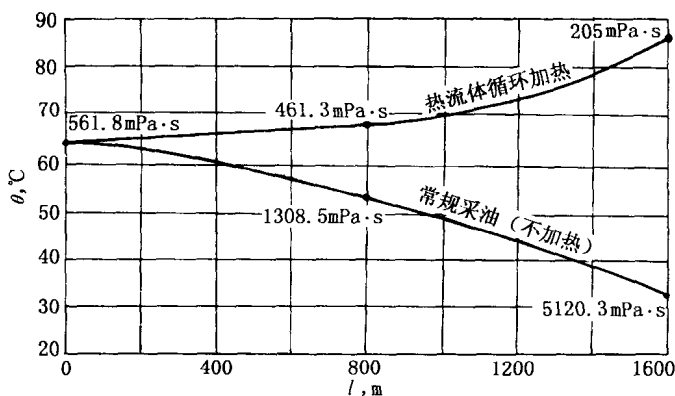


图 1—6 井筒加热与不加热时沿井深温度及粘度分布对比

“瓶颈效应”, 而过大的加热深度则不但增加了加热设施的费用同时还增加了能耗和运行费用。图 1—7 表示了不同产量时所需的井筒加热的不同深度。例如, 某油井, 按原油物性要

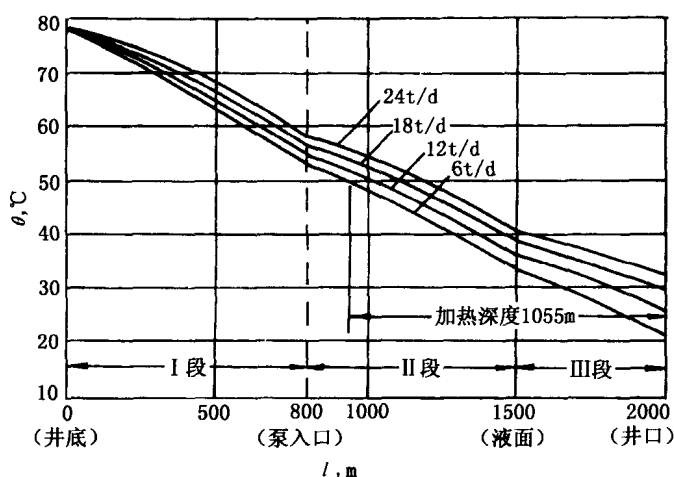


图 1—7 某常规油井在不同产量时沿井深的温度分布

环。从油管采出的原油和伴生气经过加热炉加热升温后引至分离器，分出一部分脱气原油送回油套环形空间，靠重力流向井底，并与油层中产出的油气在井底混合，再次上升到井口。而进入分离器的其余部分原油和伴生气则通过管道外输。根据混合式热流体循环的物理现象，可写出其能量平衡方程组如下：

$$\begin{cases} -Wd\theta = k_{l_1}(t - \theta)dl & (1-6) \\ -W_2dt = \{k_{l_1}(t - \theta) + k_{l_3}[t - (t_o + ml)]\}dl & (1-7) \end{cases}$$

式中 k_{l_1} , k_{l_3} ——分别为油管内外流体间、环形空间流体与地层间的传热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$;

W_2 ——循环流体的水当量, $W/^\circ C$;

W ——从油管引出流体的水当量, $W/^\circ C$;

t ——循环热流体的温度, $^\circ C$;

θ ——从油管产生的油气混合物（其中包含了循环热流体）的温度, $^\circ C$ 。

方程组之解为：

$$\theta = C_1 e^{r_1 l} + C_2 e^{r_2 l} + (t_o + ml) - \left[\frac{W_2}{k_{l_3}} - W \left(\frac{1}{k_{l_1}} - \frac{1}{k_{l_3}} \right) \right] \quad (1-8)$$

$$t = \left(1 - \frac{W r_1}{k_{l_1}} \right) C_1 e^{r_1 l} + \left(1 - \frac{W r_2}{k_{l_1}} \right) C_2 e^{r_2 l} + (t_o + ml) - \frac{m(W - W_2)}{k_{l_3}} \quad (1-9)$$

$$r_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_{l_1}}{W} - \frac{k_{l_1} + k_{l_3}}{W_2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{k_{l_1}}{W} - \frac{k_{l_1} + k_{l_3}}{W_2} \right)^2 + \frac{4k_{l_1}k_{l_3}}{W_2 W}} \right] \quad (1-10)$$

求，需维持油管中温度在 $50^\circ C$ 以上，则从图中经坐标 $50^\circ C$ 作一水平线，可得当产量为 $6t/d$ 时，加热深度需 $1055m$ 。同理，不难求得其他产量时所需的加热深度。

3. 开式热流体循环

开式热流体循环又可分为开式热流体反循环和开式热流体正循环两种。

1) 开式热流体反循环

开式热流体反循环的井筒结构和流程如图 1—8 所示，适用于自喷井或游梁抽油机井从油管采油的循

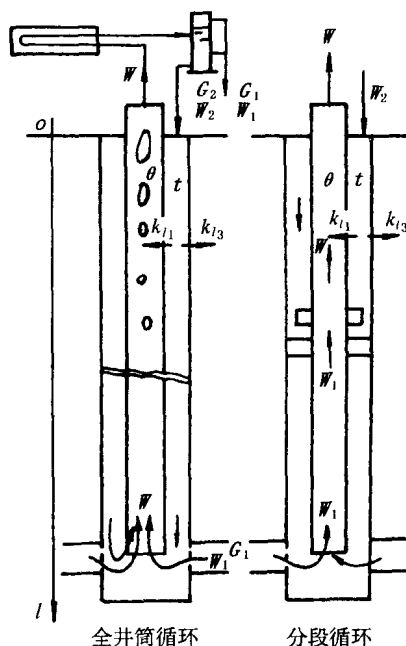


图 1—8 开式热流体反循环

式中 r_1 取正号, r_2 取负号, C_1 和 C_2 由边界条件定。图 1—7 表示了这种热流体循环的加热效果。在低循环量时, 加热效果仅限于近地面处的一段, 长度大约在 400m 以下。在循环量加大时, 油气混合物的温度最低点向井筒深处延伸, 整个井筒中产出的油气混合物温度都在提高。因此, 对于原油粘度很大或凝固点很高的油井, 要采用大循环量才能起到防蜡降粘的作用。对照图 1—9 与图 1—7 可见, 热流体反循环的应用, 有效地提高了井筒中上部原油的温度, 亦即大幅度降低了原油的粘度, 并能防止结蜡, 从而有效地降低抽油机的悬点载荷, 改善抽油杆的断脱状况。

但是, 混合式热流体反循环也存在着严重的问题: 循环的热油是通过油套环形空间、油管、油嘴进行循环的, 它不但占用了油管、油嘴的一部分通过能力, 而且影响了油层中产出伴生气的举升能力。伴生气少的油井, 就可能举不上那么多的原油, 甚至使自喷井停喷。再则, 油套环形空间的循环热油液柱的压力直接作用于井底, 减少了油层与井底的压差及流入井筒的原油产量。为了改善这一状况, 有的油井采用了分段热流体循环或称短井筒热流体循环, 如图 1—8 (b) 所示。它与全井筒循环不同的是: 在循环深度上安装一个封隔器, 封隔器之上再加装一个单向阀进油器。循环的热流体从环形空间向下流到封隔器前, 通过单向阀进入油管, 再与产出的油气一起上升到井口。这样, 就减轻或消除了油套环形空间液柱作用于油层上的压力, 这在抽油井上是用得比较成功的。

将混合式热流体反循环应用于蒸汽吞吐开采稠油的后期来延长采油期是近年来热采技术上的一个新发展。一些油田用蒸汽吞吐法开采特稠油, 产油高峰期过去以后, 由于地层温度逐渐下降和产量逐渐减少, 整个油管中的温度下降而原油粘度上升, 造成悬点载荷不断加大, 最后将导致抽油杆柱断脱, 迫使过早地结束这一轮蒸汽吞吐周期, 虽然这时油层尚有原油可以流入井筒。

混合式热流体反循环还可以同掺稀油并用, 即用粘度较低的外来原油加热后作为循环的热油导入油套管环形空间流至井底与从油层流入井筒的稠油相混合。这时, 既有稀释作用又有加热降粘作用, 效果是很显著的。值得指出的是, 掺入的热稀油与产出的原油相混合后应以不降低原油的品质为原则。如果含有胶质沥青的产出原油与含蜡的高凝固点原油相掺混, 虽然也可解决井筒中的加热降粘问题, 但却不利于以后的原油加工。

2) 开式热流体正循环

开式热流体正循环的井筒结构如图 1—10 所示, 循环的热油从油管进入井筒流向油井深处与产出原油混合, 经油套环形空间返回地面。它适用于自喷井 [图 1—10 (a)] 或水力活塞泵抽油井 [图 1—10 (b)]。混合式热流体正循环的能量平衡方程组如下:

$$\begin{cases} -W_2 dt = k_{l_1}(t - \theta)dl & (1-11) \\ -Wd\theta = k_{l_1}(t - \theta)dl - k_{l_3}[\theta - (t_o + ml)]dl & (1-12) \end{cases}$$

方程组的解为:

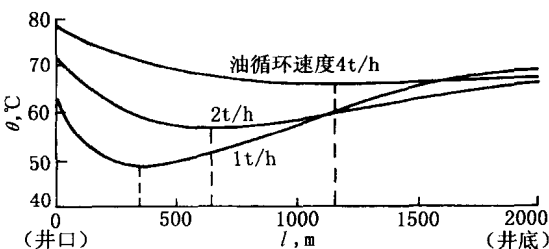


图 1—9 混合式热流体反循环
循环量对加热效果的影响

$$\left\{ \begin{aligned} t &= C_1 e^{r_1 l} + C_2 e^{r_2 l} + (t_o + ml) + m \left[\frac{W}{k_{l_3}} - \frac{W_2}{k_{l_1}} - \frac{W_2}{k_{l_3}} \right] \end{aligned} \right. \quad (1-13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \theta &= (1 + \frac{r_1 W_2}{k_{l_1}}) C_1 e^{r_1 l} + (1 + \frac{r_2 W_2}{k_{l_1}}) C_2 e^{r_2 l} + (t_o + ml) + \frac{m(W - W_2)}{k_{l_3}} \end{aligned} \right. \quad (1-14)$$

式中

$$r_{1,2} = \frac{1}{2} \left[- \left(\frac{k_{l_1}}{W_2} - \frac{k_{l_1} + k_{l_3}}{W} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{k_{l_1}}{W_2} - \frac{k_{l_1} + k_{l_3}}{W} \right)^2 + \frac{4k_{l_1}k_{l_3}}{W_2 W}} \right] \quad (1-15)$$

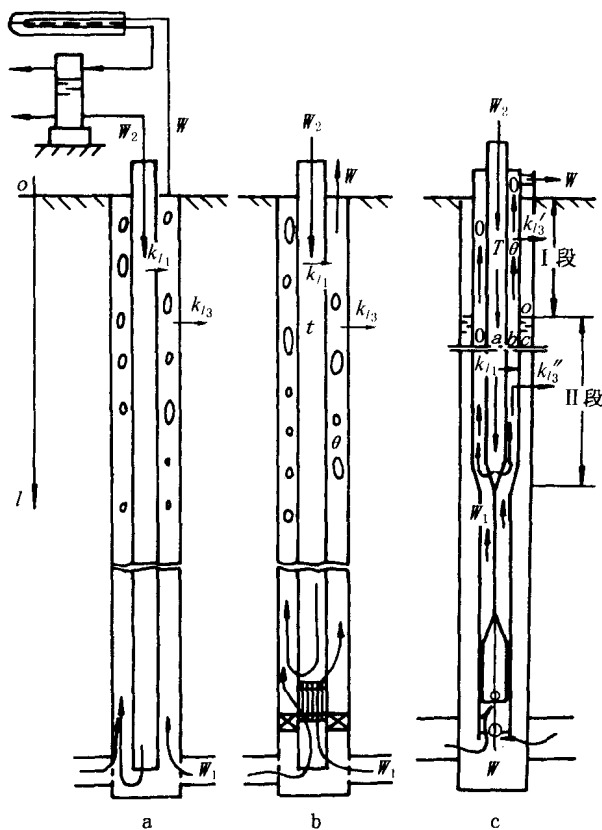


图 1—10 开式热流体正循环

a—自喷井；b—水力活塞泵井；c—空心抽油杆井

式 (1—15) 中根号前的符号, r_1 取正, r_2 取负。 C_1 与 C_2 由边界条件定。

由于热流体处于井筒中心, 热损失比反循环小, 故加热效果略优于反循环。使用水力活塞泵的热流体正循环不宜用于开采稠油, 因为过高的水力活塞泵的活塞往复运动频率降低了泵效。此外, 使用水力活塞泵的热流体正循环需要配置一个高压的热流体 (动力液) 地面流程, 而建设和运行这样一个高压的热流体地面流程所需技术要求和费用均较高, 尤其是使用本井产出的高凝油作为循环流体时, 不允许中断工作。如果遇到故障, 必须在规定时间内处理完毕并恢复运行, 否则将造成地面管线的冻结, 乃至油井的中上部凝死, 而处理这种事故的代价是很大的。

近年来有些油田开始用空心抽油杆结合掺入热流体开采稠油和高凝油, 图 1—10 (c) 所示是一种使用游梁抽油机的正循环, 只是热流体由空心抽油杆引入, 而在某一深度上流出, 与从油管通过采出的原油一同流向井口。在这种情况下, 油套环形空间的流体是静止的,

实际上起着保温层作用。因此, 使用空心抽油杆的热流体正循环的 k_{l_3} 较小, 油管中和井口产出的原油温度较高, 因而允许使用较低的循环量, 如图 1—11 所示。

使用空心抽油杆结构, 混合式热流体正循环也可应用于掺蒸汽的循环, 在蒸汽吞吐开采稠油的后期使用。这多用于较浅的油层, 掺入的是中低压水蒸汽。由于蒸汽在空心抽油杆中凝结, 它可以使套管保持在可以承受的温度范围内, 而又能较多地提高产出原油的温度, 并保持原油中掺入最少的水量。空心抽油杆掺入蒸汽开采稠油的工艺中, 空心抽油杆的上部是蒸汽凝结放热, 至蒸汽全部凝结, 蒸汽的干度 $X = 0$ 。以下就变为热水的冷却放热, 其计算

方式与开式热流体正循环一样，只是 k_{l_3} 值小一些而已。井筒上部的蒸汽冷凝段按下面的能量平衡方程组计算：

$$\begin{cases} k''_{l_1}(t_s - \theta)dl = -M_2 r dX & (1-16) \\ k''_{l_1}(t_s - \theta)dl - k'_{l_3}[\theta - (t_o + ml)]dl = -Wd\theta & (1-17) \end{cases}$$

式中 M_2 ——空心抽油杆中掺入的蒸汽量，kg/s；

r ——蒸汽的汽化潜热，J/kg；

k''_{l_1} ——空心抽油杆中蒸汽至油管中流体的传热系数，W/(m·℃)；

k'_{l_3} ——油管中液体跨越油套环形空间至地层的传热系数，W/(m·℃)；

t_s ——蒸汽的饱和温度。

方程 (1-16)，(1-17) 的通解如下：

$$\begin{cases} X = C_1 \exp\left(\frac{k''_{l_1} + k'_{l_3}}{W}l\right) + \frac{k''_{l_1} k'_{l_3} m}{2M_2(k''_{l_1} + k'_{l_3})}l^2 \\ \quad + \frac{k''_{l_1} k'_{l_3}}{M_2 r(k''_{l_1} + k'_{l_3})}\left(\frac{Wm}{k''_{l_1} + k'_{l_3}} - t_s + t_o\right)l + C_2 & (1-18) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta = \left(1 - \frac{k'_{l_3}}{k''_{l_1}}\right) \frac{M_2 r}{W} C_1 \exp\left(\frac{k''_{l_1} + k'_{l_3}}{W}l\right) + \frac{k'_{l_3} ml + k''_{l_1} t_s}{k''_{l_1} + k'_{l_3}} \\ \quad + \frac{k'_{l_3}}{k''_{l_1} + k'_{l_3}}\left(\frac{Wm}{k''_{l_1} + k'_{l_3}} + t_o\right) & (1-19) \end{cases}$$

确定积分常数 C_1 和 C_2 的边界条件是：在井口，蒸汽的干度是已知的， $X = X_0$ ，但 I 段的长是未知的。在 I 段末端，蒸汽全部凝结成水， $X = 0$ 。需要知道井口的蒸汽压力、干度和流量作一初步估计，然后进行迭代计算。空心抽油杆杆内及油管中（空心杆外）介质沿深度的温度分布如图 1-12 所示。

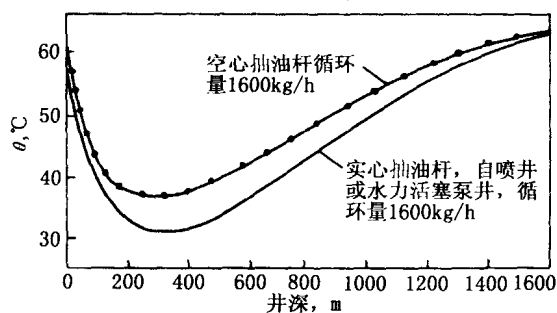


图 1-11 不同井筒结构，热流体正循环，沿井深的温度分布

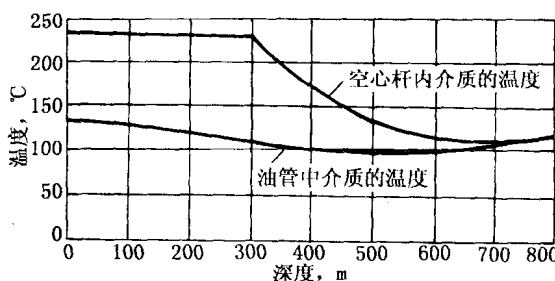


图 1-12 空心抽油杆掺蒸汽沿井筒温度分布
(产油量 30t/d，含水 10%，掺汽量 7t/d)

4. 闭式热流体循环

闭式热流体循环又称分程式热流体循环。与开式热流体循环不同的是：循环热流体与从油层采出的原油不相掺混，因而解决了由于热流体施加于油层压力而导致的油井停喷问题。在若干闭式热流体循环的井筒结构中，最为通用的为如图 1-13 所示的加热管同心安装，从