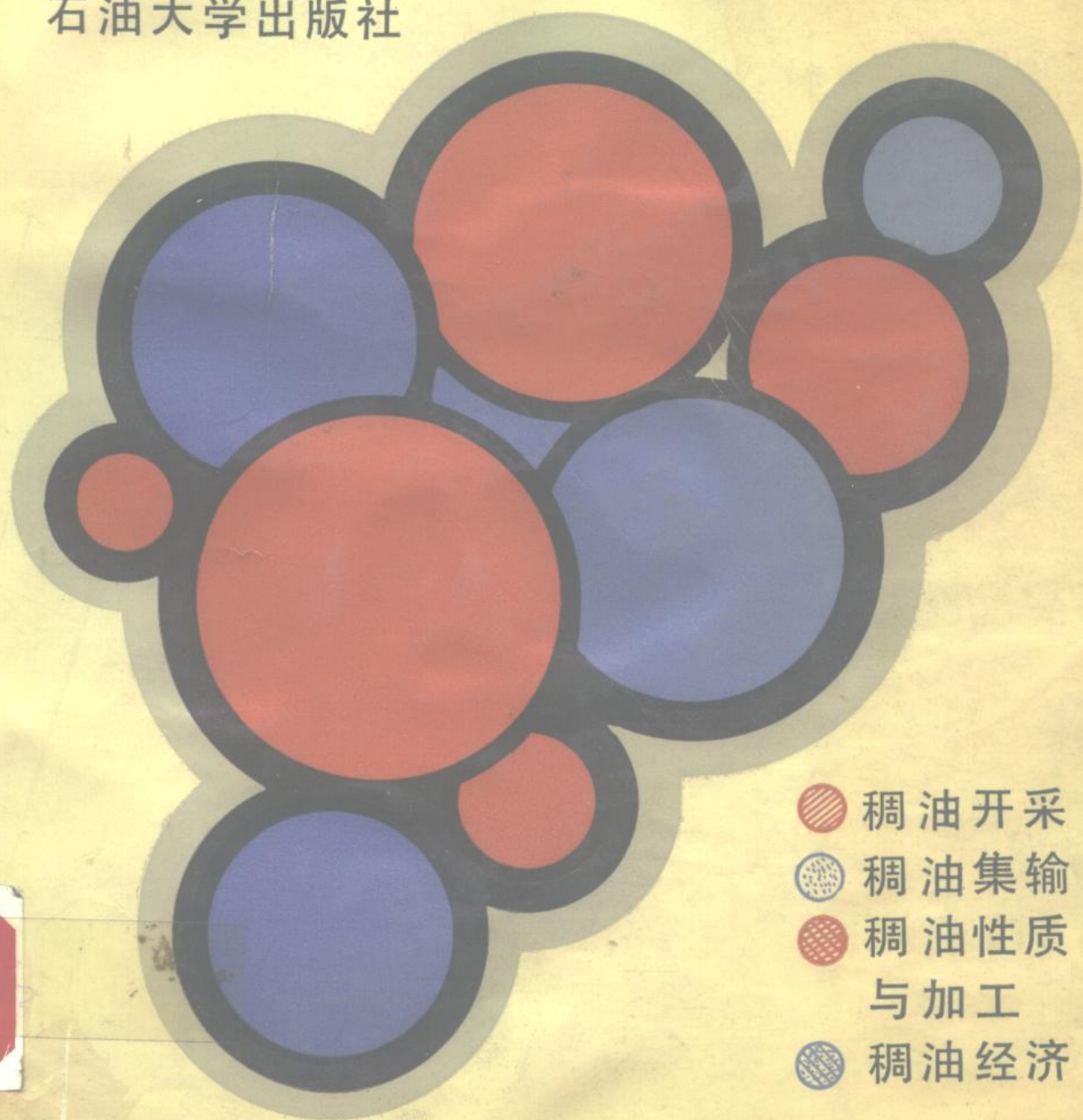


石油大学

稠油研究论文集

COLLECTED WORKS OF HEAVY
CRUDE OIL

石油大学出版社



- 稠油开采
- 稠油集输
- 稠油性质
与加工
- 稠油经济

学(北京)

145

103

46405

石 油 大 学
稠 油 研 究 论 文 集

主 编 杨光华

副主编 范耀华 杨 劲



00299725



200418967



石油大学出版社

内 容 简 介

该书是石油大学在国家“七五”计划期间以稠油为中心的综合研究论文集。石油大学从稠油的采-输-炼一体化着眼，通查分析、计划之后，从稠油开采、稠油集输、稠油性质与加工、稠油经济等四大方面都进行了研究。本文集共收集了这四大方面的研究论文26篇，按专业性质划分编排。其中有彩色显微摄影10多张，插图150余幅，还配有英文目录及各篇的英文提要。内容翔实，数据可靠，资料较完整。对稠油研究与规划、管理者来说，是应时的也是应该具备的专业用书；对稠油生产、加工部门来说是很有参考价值的。

00-58-12

稠油研究论文集

杨光华 范耀华 杨 劲

石油大学出版社出版

山东省 东营市

山东省新华书店发行

石油大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 16.5印张 2插页 425千字

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数 精1—100册 平1—1700册

ISBN 7-5636-0107-4/TE·22

定价：精18.90元

平13.90元

前 言

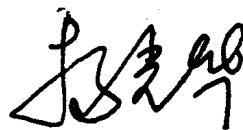
这本论文集是我校在稠油热采技术这一国家“七五”科技攻关项目下所承担的“胜利单家寺油田蒸汽驱开采试验研究”任务（合同号为75-14-02-02）方面的主要研究成果。这一攻关任务，由我校开发系、机械系、炼制系、重质油研究所、管理工程系等单位共同完成。执行这一攻关任务时，采取校部由一名校级领导人负责组织，科研处归口，任务按子项目下达到校内有关教研室、研究室，定期检查工作进度和质量的工作方式，同时，经费按任务的难易程度及工作量的大小统一分配。这一工作方式比较能发挥我校多学科的优势，充分调动参加工作单位的积极性，可以作为今后承担重大科技项目的一种有效方式。

在完成这一科研任务中，我校科研人员提出了“稠油采-输-炼一体化”的方案，即稠油超临界溶剂抽提、硬沥青乳化燃烧产生蒸汽、蒸汽用于稠油热采及稠油加工过程的新构想；对井筒热流体循环采油方法、蒸汽驱原油产量预测模型、单家寺稠油水包油乳化输送、稠油脱水脱盐、重质油的化学组成与结构、稠油超临界溶剂萃取热改质、稠油减粘裂化、重质油催化裂化、我国稠油价格等进行了研究。这一新构想和这些研究，对我国稠油的开发与利用均将作出有益的贡献。

本研究工作得到了胜利石油管理局有关单位的大力协同与无私帮助，在此表示感谢。

本研究工作是在中国石油天然气总公司科技开发部的帮助和指导下完成的，对此也表示感谢。

石油大学石油加工教授



1989年11月16日

编 者 的 话

1. 该文集的主要内容是石油大学承担的“胜利单家寺油田蒸汽驱开采试验研究”任务（合同号为75-14-02-02）方面的研究论文。为了更全面地反映石油大学近几年来在稠油研究方面的情况，还收集了一些自然科学基金研究项目等的研究论文。还有一些很有学术价值的论文，因截稿时间所限，没有收入。

2. 论文的次序是按专业性质划分编排的。

3. 计量单位制的统一有一时间过程。目前，国际上某些专业会议的论文尚未将计量单位统一于国际单位制，本文集引用的资料，尊重其原用计量单位制。

4. 本书的技术设计由石油大学出版社刘志光同志完成，文内插图由石油大学出版社郑华、齐月玲同志绘制，在此表示谢意。

5. 该文集的编辑出版时间很紧，加之编辑学识有限，书中若有不当甚至错误之处，诚希读者不吝指正。

1990年6月

目 录

稠 油 开 采

井筒热流体循环采油方法的研究	任 璞 陈天忠 (1)
蒸汽吞吐井生产能力的预测及其生产方式的确定	陈月明 张 璞 舒郑应 张宗源 (13)
空心抽油杆热载体循环采油工艺研究	梁金国 任 璞 王弥康 (27)
蒸汽驱原油产量预测模型的研究	陈月明 刘慧卿 (34)
注蒸汽稠油生产井泵下掺稀油开采工艺研究	梁金国 王弥康 任 璞 沈 琛 范永昌 (46)
稠油蒸汽吞吐井地面管线及井筒热力计算	沈惠坊 (55)
温度对油汽水三相相对渗透率影响的计算方法研究	陈月明 (65)

稠 油 集 输

单家寺稠油输送方式的研究	杨筱蘅 张劲军 李传宪 (78)
单家寺原油/水乳状液流变性的研究	张劲军 严大凡 (87)
水包油乳状液流变性测量方法的研究 ——同心圆筒粘度计中的滑移及其修正	张劲军 严大凡 (94)

稠油性质与加工

重质原油加工改质	范耀华 (107)
单家寺稠油脱水脱盐研究	郭亚男 徐梅清 杨 劲 田宗延 (118)
我国稠油减压渣油的化学组成	梁文杰 阙国和 陈明珠 (133)
单家寺道路沥青化学组成的研究	阙国和 张艳芳 刘晨光 陈明珠 梁文杰 (140)

单家寺稠油重交通道路沥青的生产和使用性能的研究	张昌祥 张玉贞 陈继军(147)
粘稠原油溶剂萃取改质的初步研究	贾生盛 王仁安 范耀华 杨光华(156)
稠油改质的新探索	
——溶剂存在下的热解抽提改质	贾生盛 陈胜利 罗运华 范耀华(162)
单家寺稠油超临界抽提改质	
	贾生盛 陈胜利 罗运华 刘观义 杨光华(169)
渣油催化裂化反应生焦物理化学模型	
	莫伟坚 林世雄 王光坝 杨光华(182)
单家寺稠油轻质化技术研究	
——采用热载体预处理-催化裂化联合工艺的可行性	王 湛 罗建强 林世雄 王光坝(190)
单家寺稠油的减粘裂化	
	马 宏 贾生盛 范耀华(203)
辽河欢喜岭稠油减压渣油的热转化	
	杨家谟 陈月珠 梁文杰(211)
单家寺混合稠油脱盐脱水工业试验	
	汤洪昌 朱洪亮 蔡银锁 郭亚男 刘以红(220)

稠 油 经 济

单家寺稠油一体化经济评价方法与应用研究	卢爱珠 姜增素(227)
有关我国稠油价格问题的探讨	王亚禧 贾士超(241)
稠油热采蒸汽吞吐注汽系统优化	王亚禧 贾士超(249)

COLLECTED WORKS OF HEAVY CRUDE OIL

CONTENTS

PRODUCTION

Hot Fluid Circulation in Wellbores

..... *Ren Ying Chen Tianzhong* (1)

Prediction of Productivity and Determination of Productive

Methods for Steam Soak Well

..... *Chen Yueming Zhang Qi Shu Zhengying Zhang Zongyuan* (13)

Study on Hollow Rod Oil Production Technology with Hot Fluid

Circulation

..... *Liang Jinguo Ren Ying Wang Mikang* (27)

Study on the Production Model of Steam Drive

..... *Chen Yueming Liu Huiqing* (34)

Study on the Technique of Producing Heavy Oil from

Steam Injection Well by Adding Light Oil under Pump

..... *Liang Jinguo Wang Mikang Ren Ying Shen Chen Fan Yongchang* (46)

Thermodynamic Calculation of Ground Pipeline and Wellbore

for Cyclic Steam Well of Heavy Oil

..... *Shen Huifang* (55)

The Study of Calculation Method of the Effect of Temperature

on Oil Steam and Water Relative Permeability

..... *Chen Yueming* (65)

PIPE TRANSPORTATION

Experimental Study on Pipelining Shanjiasi Heavy Oil

..... *Yang Xiaoheng Zhang Jingjun Li Chuanxian* (78)

Rheology of Shanjiasi Heavy Crude/Water Emulsions

..... *Zhang Jingjun Yan Dafan* (87)

Rheological Measurement of Oil-in-Water Emulsions; Wall Slip

and Its Correction for Concentric Cylinder Viscometer

..... *Zhang Jingjun Yan Dafan* (94)

PROPERTIES AND PROCESSING

Upgrading of Heavy Crude Oil

..... *Fan Yaohua* (107)

- Study on Desalting and Dewatering of Shanjiassi Heavy Crude Oil
..... Wu Yanan Xu Meiqing Yang Jin Tian Zongyan(118)
- Chemical Composition of Residues from Heavy Crude Oil
..... Liang Wenjie Que Guohe Chen Yuezhu(133)
- Study on Chemical Composition of Shanjiassi Paving Asphalt
.....Que Guohe Zhang Yanfang Liu Chengguang Chen Yuezhu Liang Wenjie(140)
- The Manufacture and Properties of Paving Asphalt from Shanjiassi
Heavy Crude Oil
.....Zhang Changxiang Zhang Yuzhen Chen Jijun(147)
- A Preliminary Study on Crude Oil Upgrading by Solvent Extraction
.....Jia Shengsheng Wang Renan Fan Yaohua Yang Guanghua(156)
- New Route to Upgrade Heavy Crudes: Solvent Thermal Cracking
Extraction
..... Jia Shengsheng Chen Shengli Luo Yunhua Fan Yaohua(162)
- Upgrading of Shanjiassi Heavy Crude Oil by Supercritical Solvent
Deasphalting
.....Jia Shengsheng Chen Shengli Luo Yunhua Liu Guanyi Yang Guanghua(169)
- Physicochemical Model for Coke Formation in Resid Catalytic
Cracking
..... Mo Weijian Lin Shixiong Wang Guangxun Yang Guanghua(182)
- Upgrading of Shanjiassi Heavy Oil: The Feasibility
of Residual Oil Pretreating-Catalytic Cracking Combined Process
..... Wang Zhan Luo Jianqiang Lin Shixiong Wang Guangxun(190)
- Visbreaking of Shanjiassi Heavy Crude Oil
..... Ma Hong Jia Shengsheng Fan Yaohua(203)
- Thermal Conversion of Vacuum Residue from Huanxiling Crude Oil
in Liaohe Oilfield
..... Yang Jiamo Chen Yuezhu Liang Wenjie(211)
- The Desalting and Dewatering of Shanjiassi Heavy Crude Oil on
a Commercial Plant
..... Tang Hongchang Zhu Hongliang Cai Yinsuo Wu Yanan Liu Yihong(220)

ECONOMIC

- Study on the Method and Application of Economic Evaluation of
Normalization for Shanjiassi Heavy Crude Oil
..... Lu Aizhu Jiang Zengsu(227)
- On Heavy Crude Oil Pricing in China
..... Wang Yaxi Jia Shichao(241)
- Optimization of Cyclic Steam Injection System in Heavy Oil Production
..... Wang Yaxi Jia Shichao(249)

稠油开采

井筒热流体循环采油方法的研究

任 瑛 陈天忠

(机械系) (辽河油田)

提要 石油生产过程中,沿井筒深度的温度分布对高含蜡、高凝固点、高粘度原油的生产具有很大的影响。热流体循环将提高井筒中原油的温度,改善原油的流动性并减少流体的流动压降。本文介绍了常规采油和应用热流体循环时自喷井、游梁抽油机井及水力活塞泵井原油沿井深的温度分布及其影响因素;两相垂直管流的压力损失和稠油自喷井的工况;稠油游梁抽油机井的临界冲次。此外,还介绍了热流体循环在生产井上试用的效果。

关键词 稠油开采;热流体循环

一、前言

我国大部分高含蜡、高凝固点、高粘度原油埋藏较深,较高的地层温度和压力造成了这些原油在地层中流动性较好的有利情况:原油可以从油层中流入井筒,具有较好的供液能力,尤其是在油藏开采的前期更是如此。这类油藏开采的困难主要在于因井筒散热而导致的稠油粘度和流动阻力的急剧增加或高含蜡高凝固点原油的大量析蜡甚至最终堵死油管。作者认为,解决这一问题的关键在于提高井筒中产出油、气的温度和减少其流动的压力损失,而井筒中的热流体循环则是达到这一目的的重要手段。

油井中流体的流动是两相垂直管流。开采石油时,油藏、井筒和地面集输部分的总压力损失中,井筒占有主要部分^[1]。近年来发表的涉及两相流动的文献逐渐增多,理论也日趋完善,但他们的分析多限于等温流动、流体物性不变的情况。然而,石油从井底流向井口时沿井筒不断散热、脱气、降温而导致流体的物性(如比热、密度、粘度及气体在石油中的溶解度)不断随温度、压力的变化而变化,尤其是粘度的变化更为显著,甚至超过两个数量级。因此,对井筒加热,将改变井筒中流体的物性和流态,其结果必将影响到自喷井的工况和抽油井的临界冲次。

二、常规采油时井筒沿深度的流体温度分布

油气混合物从井底上升时,经历着散热、脱气及气体膨胀、析蜡等过程。今在井筒上截取 dl 微元进行分析(见图1),并假设脱气及气体膨胀作功正好消耗于油、气的举升,又假

设析蜡放出的热均匀分布于全井筒，则可写出能量平衡方程：

$$K_1[\theta - (t'_0 - ml)]dl + g(G_f + G_g)dl - \dot{q}dl = -Wd\theta \quad (1)$$

式中 K_1 ——井筒不加热时两侧介质间的传热系数， $W/m^{\circ}C$ ；

θ ——油管中油气混合物的温度， $^{\circ}C$ ；

t'_0 ——某一深度下地层的温度， $^{\circ}C$ ；

m ——地温梯度， $^{\circ}C/m$ ；

l ——沿井深方向的长度， m ；

G_f 、 G_g ——液体、气体流量， kg/s ；

$\dot{q}$ ——热源强度， W/m ；

W ——油气混合物的水当量， $W/^{\circ}C$

在井底， $l=0$ ， $\theta=t'_0$ ，解上式，得井筒中流体温度分布

$$\theta = \frac{Wm + \dot{q} - g(G_f + G_g)}{K_1} (1 - e^{-\frac{K_1}{W}l}) + (t'_0 - ml) \quad (2)$$

实际上，举升油气混合物及析蜡对温度分布影响不大，可忽略不计，因而：

$$\theta = \frac{Wm}{K_1} (1 - e^{-\frac{K_1}{W}l}) + (t'_0 - ml) \quad (3)$$

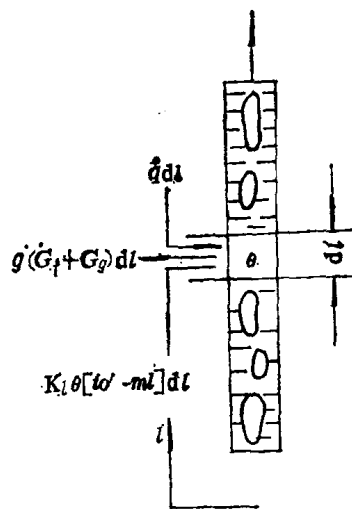


图1 井筒中的能量平衡

三、混合式热流体循环

混合式热流体循环分正循环和反循环两种，如图2所示，其中a、b为反循环，c为正循环。混合式反循环是油井产出的油气经过加热、并把分离出的部分脱气原油送回油井的套管环形空间，流向深处。同时加热油管，然后在井底或在油井的某一深度进入油管并与产出之油气混合，再一起流向地面。这种热流体循环适用于自喷井，也适用于抽油井。混合式反循环的能量平衡方程组如下[4]：

$$\left. \begin{aligned} -Wd\theta &= K_{11}(T - \theta)dl \\ -W_2dT &= K_{11}(T - \theta)dl + K_{13}[T - (t_0 - ml)]dl \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中符号见图2标出。

边界条件：当 $l=0$ 时， $T=T_i$ ；当 $l=l_f$ 时， $T=T_f$ ，同时， $W_1(t_0 + ml) + W_2T_f = W\theta_f$ ，且 $W = W_1 + W_2$ 。图3是根据式(4)解出的油管及套管中流体沿井深的温度分布。图4表示改变循环量对沿井深温度分布的影响。从图中曲线可以看出：

1. 循环流体是通过油管返回地面的，它不但占用了一部分油管的通过能力，而且地层的能量除去要举升产出的油、气外，还要负担举升循环流体的任务。当地层能量不是相当充足时，就可能举升不了那么多的原油。

2. 低循环量时，对油管中的油、气的加热效果仅限于近地面处的数百米。加大循环量后，加热效果逐渐改善，但也提高了套管环形空间的液面，这就加大了作用于井底的压力，从而减小了生产时油层与井底的压差，降低了油层向井筒的供液能力，严重时甚至使自喷井

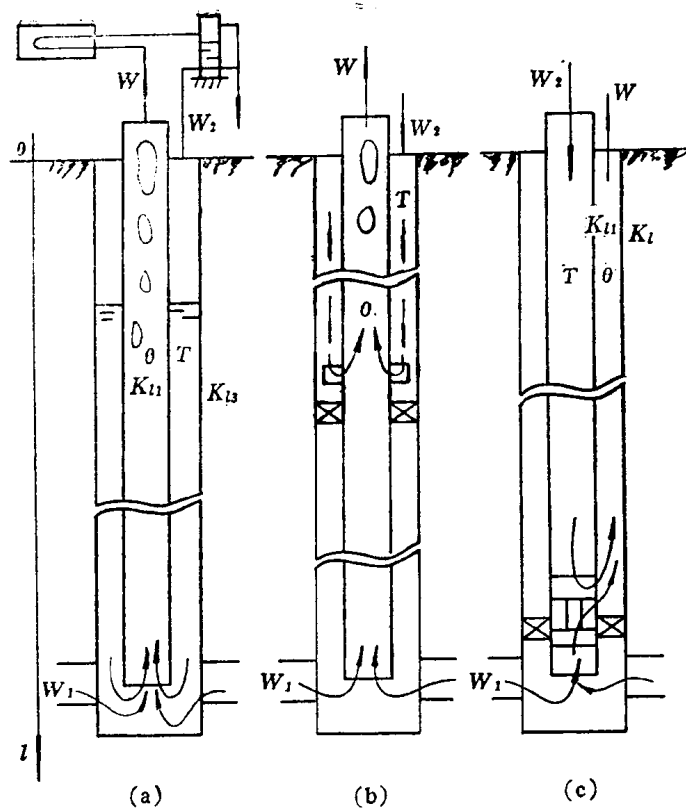


图2 混合式热流体循环

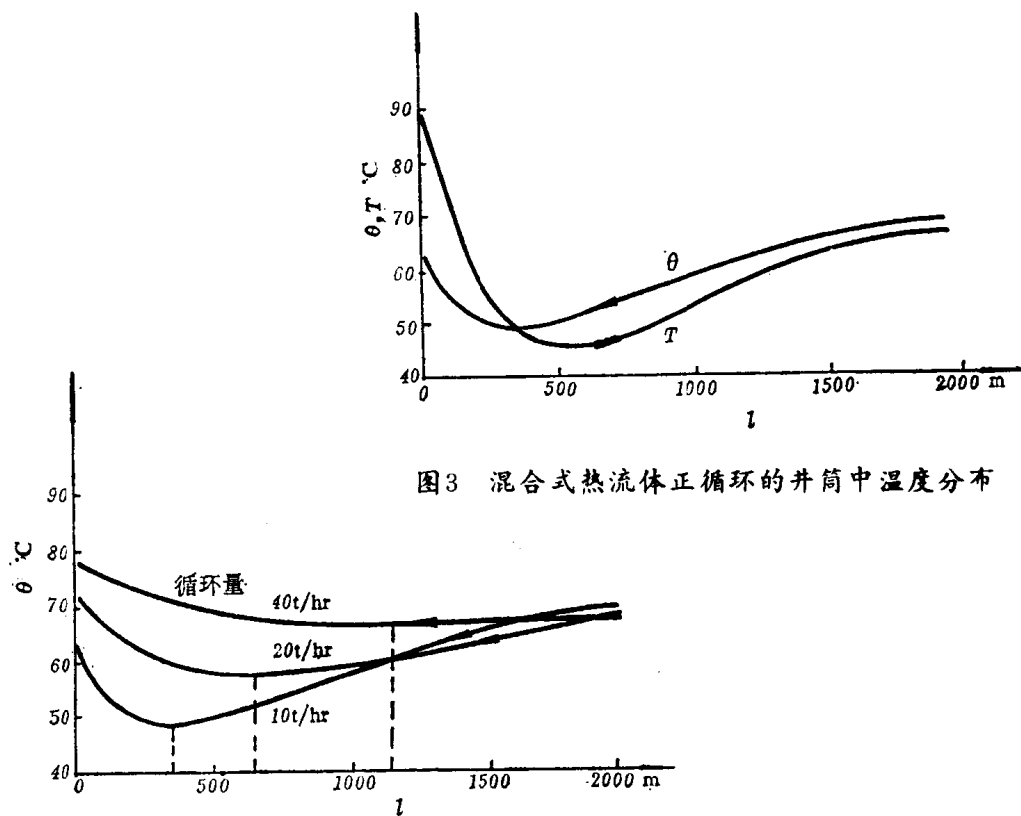


图3 混合式热流体正循环的井筒中温度分布

图4 混合式热油循环改变循环量对沿井深温度分布的影响

停喷，使抽油井产不出油而变成热流体空循环。为了改善这一问题，有的抽油井采用了如图

(2-b) 的结构, 即在某一深度的封隔器上面安装一单向阀进油器, 使从套管环形空间进入的循环流体经单向阀流到抽油泵的上面的油管中, 而消除了对油层的压力影响。

图 (2-c) 的混合式正循环多用于水力活塞泵, 只是以热流体作动力液而已。混合式正循环的能量平衡方程组如下:

$$\left. \begin{aligned} -W_2 dT &= K_{11}(T - \theta) dl \\ -W d\theta &= K_{11}(T - \theta) dl - K_1 [T - (t_0 + ml)] dl \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

边界条件: 当 $l = 0$ 时, $T = T_i$; 当 $l = l_f$ 时, $W\theta_f = W_1(t_0 + ml) + W_2 T_f$; 且 $W = W_1 + W_2$ 。

解式 (5) 可得油管中动力液及套管环形空间中产生的油、气与动力液的混合物温度分布。

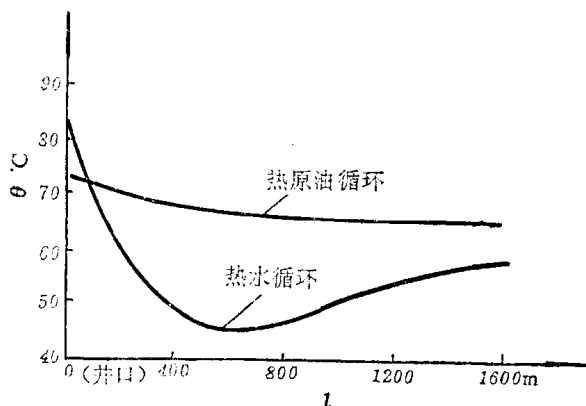


图5 水力活塞泵井以热水和热原油作动力液时温度分布对比

值得提出的是, 循环流体的性质会影响混合物的温度分布。当采用水作动力液时, 由于水对管壁的对流换热甚强, 虽然水的比热比原油几乎高一倍, 仍将使动力液所携带的热量在距地面几百米内散失殆尽而无多余热量传到井筒深处, 使井筒中部一段处于低温。对于高含蜡高凝固点油井, 在此中部将结蜡。这时井口产出的混合物温度高, 但不理想, 实际上井筒深处的温度远低于井口。若用油作动力液, 虽然井口产出的混合物温度较低, 但在井筒中部加热升温的效果却较好。水力活塞泵井以

热水和以热原油作动力液时沿井深的温度分布对比如图 5。

用热油作动力液还兼有改善润滑, 防止腐蚀与结垢, 以及减轻地面脱水困难的好处。但如以本井产出的高凝固点原油作动力液, 则不能随意停止泵的运行, 以防整个井筒凝死。水力活塞泵通常适用于油层供液能力较大的情况。当地层压力降低、供液能力减弱, 水力活塞泵的使用效果变差, 热动力液的耗量也将与井筒加热的要求发生矛盾。此外, 水力活塞泵对于抽吸稠油, 一般效果不好。

四、闭式热流体循环

闭式热流体循环的井筒结构如图 6 所示。这是一种循环流体与产生的油、气混合物不相混合而且不干扰油层的井筒加热方法。它可以用于自喷井、抽油井、高产井、低产井。循环流体基本上无损耗, 这就可能选用停产后容易起动的低凝固点、低粘度流体, 甚至柴油或水作动力液。因此它是一种适应性最强的井筒加热方法。只是井筒结构稍为复杂, 费用较大。在不考虑气流膨胀做功和析蜡影响时, 写出能量平衡方程组如下[4]:

$$\left. \begin{aligned} t' &= \frac{dt}{dl} = - \frac{K_{11}(t - \theta) + K_{12}(t - T)}{W_2} \\ T' &= \frac{dT}{dl} = - \frac{K_{12}(t - T) - K_{13}[T - (t_0 + ml)]}{W_2} \\ \theta' &= \frac{d\theta}{dl} = - \frac{K_{11}(t - \theta)}{W_1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 K_{11} 、 K_{12} 、 K_{13} 分别为油管对内环空、内环空对外环空、外环空对地层的传热系数。边界条件为：当 $l=0$ 时， $t=t_i$ ；当 $t=t_f$ 时， $t_f=T_f$ ，同时 $\theta=t_0+ml_f$ 。

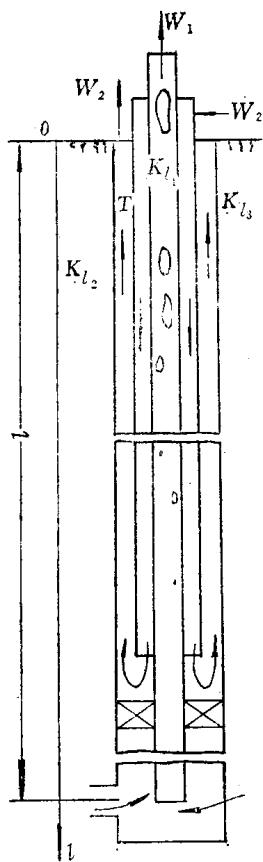


图6 闭式热流体循环

有若干因素影响闭式热流体循环的效果，最主要的是循环量和循环介质的种类。图8表明，同样以柴油为循环介质，且起始温度相同，不同循环量所导致的产出油、气混合物沿井深的温度分布是不同的。图9则表明了普通水、柴油和稠化水作为循环介质时的不同加热效果。

五、两相垂直管流的压力损失和自喷井的工况

1. 两相垂直管流的流态和压力损失，在不同的流态分区，滑脱和摩阻系数计算方法是不同的。

(1) 压力平衡方程式[1]、[6]、[6]

将能量方程式加以整理，就可得到压力梯度方程，即总压力梯度等于举升静水梯度、摩阻梯度、加速度梯度之和：

$$\left(\frac{dp}{dl}\right) = \left(\frac{dp}{dl}\right)_{st} + \left(\frac{dp}{dl}\right)_f + \left(\frac{dp}{dl}\right)_{acc} \quad (7)$$

或用液体静水梯度 $\rho_l \frac{g}{g_c}$ 的分数表示：

$$G = G_{st} + G_f + G_{acc} \quad (8)$$

由于从井底到井口，流体的状态参数、物性、流动参数及流态都在变化，所以只能将整

图7是方程组(6)针对某稠油井解出的结果。当然，我们主要关心的是油管中产生的油、气混合物温度沿井深的分布 θ ，图7曲线上的数字表示该温度下的原油粘度。 θ_b 是井筒不加热时按式(2)算出的温度分布。井口处两者原油粘度竟相差25倍！可见只要适当地对井筒加热就可以达到降粘减阻的目的。

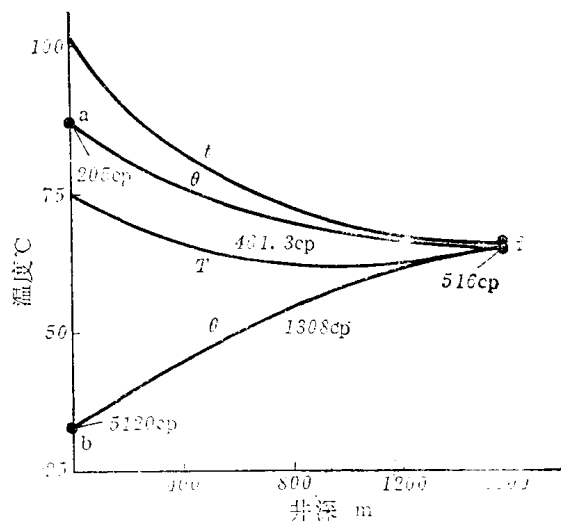


图7 闭式热流体循环的沿井深温度分布

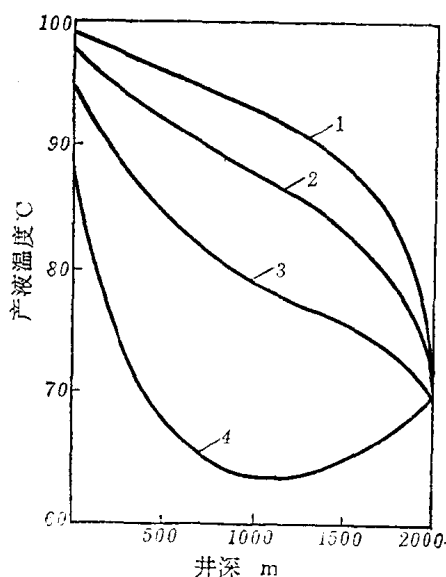


图8 循环量变化对油气混合物沿井深温度分布的影响

1. $W_2=7496 \text{ W/}^\circ\text{C}$,
 $Q=15 \text{ m}^3/\text{h}$;
2. $W_2=4997 \text{ W/}^\circ\text{C}$,
 $Q=10 \text{ m}^3/\text{h}$;
3. $W_2=2498 \text{ W/}^\circ\text{C}$,
 $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$;
4. $W_2=1249 \text{ W/}^\circ\text{C}$,
 $Q=2.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

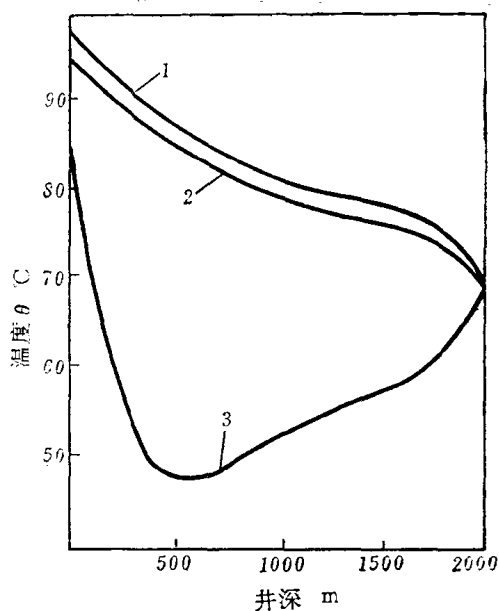


图9 不同循环介质对油气混合物沿井深温度分布的影响

1. 稠化水
 $W_2=5803 \text{ W/}^\circ\text{C}$,
 $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$;
2. 原油
 $W_2=2539 \text{ W/}^\circ\text{C}$,
 $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$;
3. 水循环
 $W_2=5803 \text{ W/}^\circ\text{C}$,
 $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$.

个井筒分为许多微元段，逐段求出压降然后求其总和，得到整个井筒的压力损失。计算每段终点压力及压降都用试算和迭代法进行。

(2) 静水压力损失 G_{st}

$$\frac{\left(\frac{dp}{dp}\right)_{st}}{\rho_L \frac{g}{g_c}} = \frac{\rho_m}{\rho_L} \quad (9)$$

式中： ρ_m 为油气混合物的密度， ρ_L 为液体密度， $\rho_m = \rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L)$ ， ρ_g 为气体密度， H_L 为液相存容比。将 ρ_m 等式代入式(9)，得到：

$$G_{st} = H_L + \frac{\rho_g}{\rho_L} (1 - H_L) \quad (10)$$

ρ_g 按真实气体状态方程求出。 ρ_L 除了与脱气原油密度有关外，还与该压力下的溶解油气比和原油的体积系数有关； H_L 则与该压力、温度下伴生气的粘度、含气原油粘度、原油及伴生气的表现速度、液体的表面张力、滑脱速度等有关。图10为流态分类分区图。图11为静水压降计算结果。

(3) 阻力损失 G_f

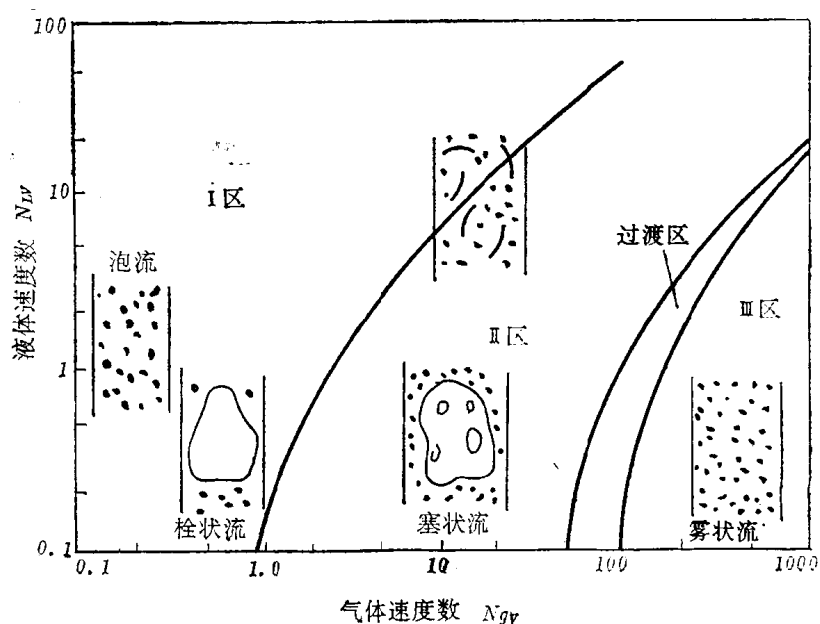


图10 流态分类分区

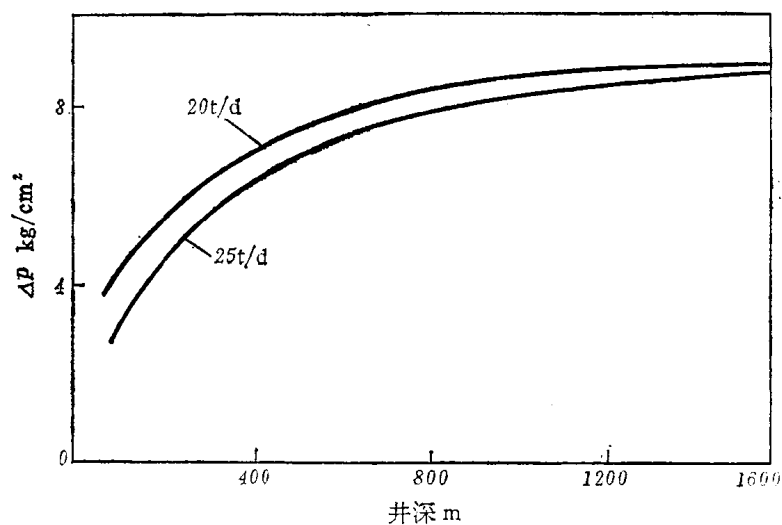


图11 不同产量时静水压降分布对比

$$G_f = 2f_w \frac{V_{SL}^2 \rho_L \left(1 + \frac{V_{sg}}{V_{SL}}\right)}{d} \quad (11)$$

式中，摩阻系数 f_w 除了考虑如尼古拉茨图所示的 R_1 、 ε/d 等因素外，还需考虑气液比的修正。算出的某井摩阻压降如图12所示。 V_{SL} 、 V_{sg} 分别为液体和气体的表观速度， d 为管径。

(4) 加速度压降 G_{acc} 和总压降 G

对于雾流：

$$G_{acc} = (\rho_L V_{SL} + \rho_g V_{sg}) \frac{V_{sg}}{p} G \quad (12)$$

除雾流外，其它流态可不考虑 G_{acc} 。

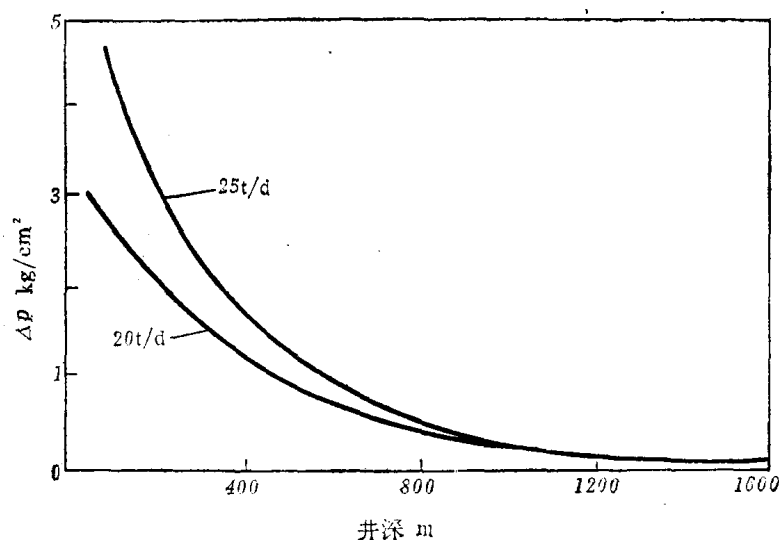


图12 不同产量时摩阻压降分布对比

总压降 G

I、II区:

$$G = G_{sL} + G_f \quad (13)$$

III区:

$$G = \frac{G_{st} + G_f}{1 - (\rho_L V_{sL} + \rho_g V_{sg}) \left(\frac{V_{sg}}{p} \right)} \quad (14)$$

在无热流体循环时,由于静水压降的变化与摩阻压降的变化互相抵消了一部分,在沿井深方向,总压力损失变化不大。但在有热流体循环时,由于井筒上部稠油的粘度显著降低而导致总压力损失量显著下降,如图13所示。采用热流体循环,特别是闭式热流体循环,对于稠油井所导致的压力损失减小主要集中于油井的上部。图14表示油井在不同产量时的压力损失,它并不随产量单调增加,而是在某一产量 Q 下有最小值。图14还表明,采用热流体循环时,由于粘度的降低,导致了总压力损失的减小。

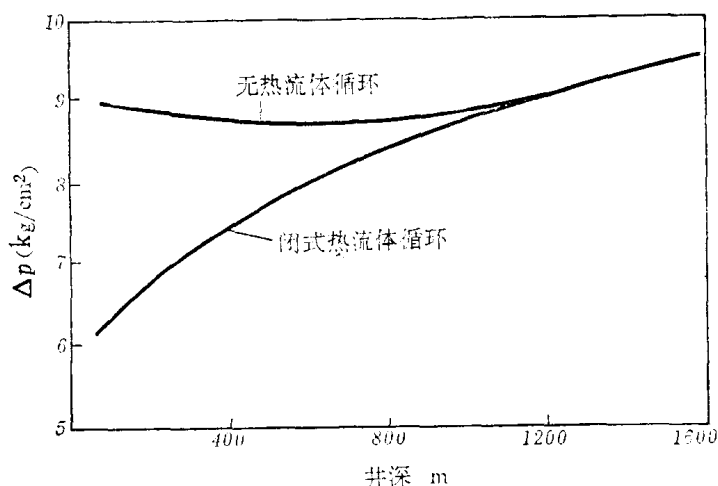


图13 井筒加热与不加热时总压力损失的对比

2. 自喷井的工况[7]、[10]

原油是从油层渗流到井底的。油井的产量随井底流压的降低而提高。另一方面,正是流压用来克服上述的诸压力损失才能将油、气举升到井口而达到平衡。这种平衡下的井底流