

重质高粘原油的开采

(苏) И.М.阿梅托夫 И.Н.巴伊基科夫
Л.М.鲁津 И.А.斯皮里多诺夫



石油工业出版社

44885

重质高粘原油的开采

〔苏〕И.М.阿梅托夫 Ю.Н.巴伊基科夫

Л.М.鲁津 Ю.А.斯皮里多诺夫

陈宝来 卢学成 译 王福松 校



00291590



*44885+



200419083

石油工业出版社

内 容 提 要

本书研究重质高粘原油的开采特点和含这类原油的 油藏提高采收率的方法。首次证明高粘重质原油所特有的各种不平衡特性对油田的开发和开采指标有重大影响。介绍根据试验室和矿场研究结果确定这些特性的方法以及重质原油生产井的水动力学试井方法。

本书供从事重质高粘原油油田开发设计和开采 工作的工程技术人员参考。

И. М. Аметов, Ю. Н. Байдинов,
Л. М. Рузин, Ю. А. Спиридонов

ДОБЫЧА ТЯЖЕЛЫХ И ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ

Издательство "Недра", 1985 МОСКВА

*

重质高粘原油的开采

〔苏〕И. М. 阿梅托夫, Ю. Н. 巴伊基科夫,
Л. М. 鲁津, Ю. А. 斯皮里多诺夫
陈宝来 卢学成 译 王福松 校

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京顺义燕华营印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 32 开本 8 1/2 印张 187 千字 印 1—1,500

1990 年 1 月北京第 1 版 1990 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0443-7/TE·426

定价: 2.10 元

目 录

第一章	重质原油的流变特性	(1)
第一节	重质原油的松弛特性	(1)
第二节	重质原油渗流时的不平衡效应	(9)
第三节	传统的原油流变模型和渗流模型	(20)
第四节	原油的多相模型	(43)
第五节	松弛特性对流变研究结果的影响	(52)
第二章	重质混气原油的渗流	(55)
第一节	压力变化速度对原油脱气影响的试验研究	(55)
第二节	已确认的几种计算气体从原油中分离的不平衡 过程的方法	(60)
第三节	多孔介质内混气重质原油流动特性的试验研究	(65)
第四节	高粘混气液体的渗流模型	(70)
第三章	井和地层的水动力学研究	(80)
第一节	水动力学试井结果精度的评价	(80)
第二节	根据不稳定试井资料确定地层参数的决定因 素法	(83)
第三节	根据不稳定试井结果确定地层参数和原油的 松弛特性	(88)
第四节	根据压力恢复曲线判别渗流模型	(95)
第五节	含粘弹性原油油藏内的水文勘探	(101)
第六节	根据井口计量确定地层参数	(108)
第七节	重质原油生产井的试井工艺特点	(113)
第四章	重质原油的松弛特性对油田开发指标 的影响	(121)

第一节	多孔介质内驱替重质原油的试验研究.....	(121)
第二节	水动力学驱替模型.....	(131)
第三节	非均质地层内重质原油的驱替特性.....	(147)
第四节	重质原油油藏的物质平衡过程.....	(156)
第五章	重质原油开采工艺的特征	(170)
第一节	被抽液体的松弛特性对泵的充满系数的影响.....	(170)
第二节	被抽液体和灌注液体的松弛特性对泵工作的 影响.....	(183)
第三节	抽汲松弛原油的泵装置的特性.....	(187)
第四节	不同因素对有杆泵工作效果影响的研究.....	(194)
第五节	根据矿场资料确定松弛原油的合理抽汲制度.....	(204)
第六节	热力作用下井的出油剖面的变化.....	(206)
第七节	提高井底附近地带热力作用效果的几种新的可 能性.....	(210)
第六章	用热竖井法开发和开采亚列格油田的 分析.....	(221)
第一节	采用的开发系统.....	(221)
第二节	不同因素对油田开发指标影响的研究	(228)
第三节	油田最佳开发方案的论证及工业性实施	(235)
第四节	根据矿场资料对开采工艺指标的分析	(240)
第七章	松弛液体在管道内的流动	(245)
第一节	试验装置的描述和研究方法	(245)
第二节	紊流状态下的水力阻力	(248)
第三节	溶解气对紊流状态下压头损失的影响	(251)
第八章	利用原油和体系的松弛特性提高采油 效果.....	(254)
参考文献		(263)

第一章 重质原油的流变特性

第一节 重质原油的松弛特性

目前，在研究钻井、采油和输油时所用的不同流体体系的松弛特性方面，特别是在研究苏联不同油田原油的松弛特性方面，已经积累了相当丰富的试验资料。因此没有必要对原油的松弛特性再作详细的研究。我们将研究在各向压缩和剪切流动条件下所进行的主要的、最有代表性的试验。根据这些试验所得的资料就能确定松弛特性的存在并估算其相应的特征参数。

确定松弛特征的方法已在文献中，例如文献〔11, 50〕中作了足够完整的描述，而针对研究原油的这些问题已在文献〔27〕中作过研究。

在两种类型的形变中，即在各向压缩和剪切流动条件下，原油的松弛特性表现得最为明显。大家所熟悉的分散体系和聚合物溶液的体积蠕变就是在下述试验中表现出来的〔18, 23, 39〕。如果使这种体系受到恒定的体积压缩，那么在该系统所占据的体积内压力将下降到一定水平。相反，如果受到恒定的体积扩张，则压力将增大。重质原油也表现出类似的特性。这种原油的特点是沥青胶质组分含量高〔25, 26, 34, 46〕。类似的松弛效应与长时间不断发生的内部结构的重新排列有关〔8〕。

研究原油体积松弛特性的装置（图1—1）包括高压容器1、高压压力机2和恒温器3。高压容器由移动的活塞5所分隔的两个空腔所组成。空腔4用油充满并用油管线与高压压力机联接，空腔6用管线9充满所研究的原油。为排除游离气的影响，原油用真空泵抽真空，真空泵通过真空管线7与空腔6联接。用标准压力表8测量容器内的压力。在高压容器上安装恒温水套10。

试验按如下方法进行。将原油装进密闭容器内，并在一

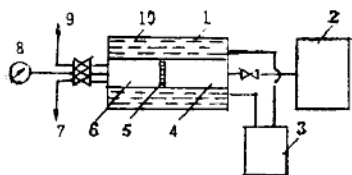


图1—1 研究脱气液体不平衡特性的装置

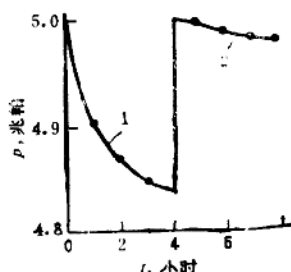


图1—2 承压时密闭体积内的压力变化

1——一次压缩；2——二次压缩

定的温度下保持几小时以达到平衡。在压力高于试验压力条件下，事先用水对系统试压以确定系统的密封性。在系统内建立热动力平衡后，用压力机在几秒钟之内将压力提高到规定值。接着在系统固定的体积下观察压力的变化——在长时间内系统内的压力单调地下降（图1—2）。

液体具有“记忆”是这类试验的特点。在这种情况下，这种特性表现如下。如果在稳定之后用快速压缩的方法使压力重新提高到初始水平，那么压力下降比一次压缩后的将要

小得多（图1—2中线段2）。通常在三、四次压缩之后压力不再下降。另一方面，如果稳定之后，压力重新降低到大气压（该系统完全卸压），并使停顿时间不短于压力下降时间，然后将压力重新提高到初始值，则下一次压力下降的特征将与曲线1相符（图1—2）。随着停顿时间的缩短，压力下降也同样减小（图1—3）。

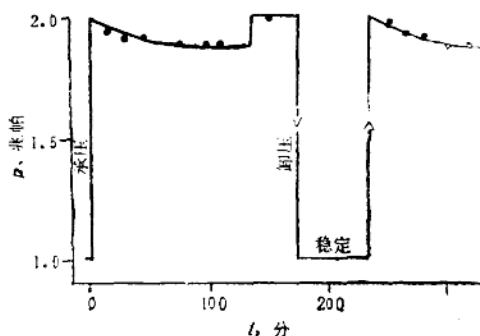


图1—3 在温度 $t=15^{\circ}\text{C}$ 时多次承压下的压力变化

因此，在这种条件下，压力变化便决定于一个特征时间参数，这一参数称为松弛时间。

为了快速估算松弛时间，可根据汤姆逊-波义金哥(Томсон-Пойтинг)〔11〕粘弹体机械模型来处理试验结果。根据这种模型，系统内的压力变化可用下面的方程描述：

$$p_1 - p_t = (p_1 - p_0) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-1)$$

式中 p_1 , p_t ——分别为平衡压力和瞬时压力；
 p_0 ——系统内的初始压力；
 t ——瞬时时间；

τ ——松弛时间。

方程 (1—1) 可以改写为

$$\ln \frac{p_1 - p_i}{p_1 - p_0} = - \frac{t}{\tau} \quad (1-2)$$

用坐标系处理试验关系式 $p_i = f(t)$ (1—2)，得到一直线，根据斜率确定松弛时间 τ 。

在改变压力和温度的条件下，特别是改变温度的影响，有可能依靠原油的含气饱和度调节原油的松弛特性，这是很有意义的。按所述的方法，在不同温度下用亚列格 (Ярег) 油田的脱气原油和具有地下原油相应参数的含气原油进行了试验 (图1—4)。由图看出，随着温度的增加，松弛特性减弱。同时，松弛特性也随气体饱和度发生变化。在低温区二

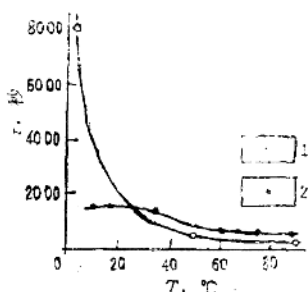


图1—4 原油的松弛时间与温度的关系

1—含气原油； 2—脱气原油

者的差异很大，随着温度的增加，差异变小。应当指出，对于这种原油，尽管气体饱和度导致松弛时间的增加，但这并不是一个普遍规律。例如，用乌萨 (Уса) 油田的原油做类似的试验时观察到相反的效应。然而，在任何情况下，用改变气体饱和度的方法是可以调节原油松弛特性的。

根据提曼-伯朝拉 (Тимано-Печора) 省一些油田高粘原油在密闭容器内系统压力升高后的研究数据，用松弛时间公式 (1—2) 计算的结果列于表1.1。所研究原油的松弛时间

表 1.1 根据原油受到各向体积压缩时的研究数据确定松弛时间 τ 的结果

油田 井号	原油	$t_{\text{исп}}$ °C	一次加压		二次加压		三次加压		卸 压
			$p_{\text{исп}}, \text{兆帕}$	$\tau, \text{分}$	$p_{\text{исп}}, \text{兆帕}$	$\tau, \text{分}$	$p_{\text{исп}}, \text{兆帕}$	$\tau, \text{分}$	$p_{\text{исп}}, \text{兆帕}$ $\tau, \text{分}$
乌萨, 3	脱气原油	20	0.49—9.81	30	8.76—9.81	32	—	—	—
萨柳卡, 6	脱气原油	30	0—9.81	19	9.15—9.81	40	—	—	—
沃泽, 75	脱气原油	30	0—5.1	73	4.39—5.1	54	—	—	—
	的混合物								
乌萨, 102	脱气原油	15	0—4.90	30	3.88—4.9	41	—	—	—
乌萨, 102	脱气原油	30	0—4.90	43	4.12—4.9	17	—	—	—
乌萨, 102	脱气原油	15	0—0.49	60	0.35—0.49	49	—	—	—
乌萨, 102	地层原油	15	1.47—14.78	25	13.04—14.78	36	—	14.45—1.50	7
乌萨, 102	地层原油	15	0.98—4.97	35	4.42—4.97	30	—	—	—
乌萨, 102	地层原油	70	9.81—27.47	6	25.96—27.47	32	—	27.07—9.81	6
乌萨, 102	脱气原油	90	0—24.48	41	22.81—24.48	25	24.17—24.48	18	—
帕季梅, 3	脱气原油	53	0.49—14.91	5	14.05—13.79	3	—	14.79—0.49	7.9

在5~73分钟之间变化。根据萨柳卡 (Салюка) 油田6井和乌萨油田101井原油 (脱气原油和饱和压力为 1.0 兆帕和6.6 兆帕的原油) 在密闭体积内二次承压后的压力变化数据, τ 值大于一次承压后的值。

根据帕季梅 (Падиме) 油田3井和乌萨油田 120 井原油 (地层原油样品) 卸压后系统内压力变化的数据, 松弛时间为6~8分钟。

用不同的非牛顿异相液体作了类似的试验。阿尔兰 (Арлан) 油田的原油 ($\tau=2\sim3$ 小时) [37] 和聚合物溶液的研究结果 ($\tau=2\sim6$ 小时) 证明, 随着系统内初始压力的增加, 松弛时间稍有降低, 但是在所有的试验中松弛时间都超过2小时。К. А. 阿赫梅多夫 (К. А. Ахмедов) 曾经确定了丘罗夫达格 (Кюровдаг) 油田第一层高粘原油的松弛时间 $\tau \approx 2$ 小时。在类似的试验中研究了加入 2 % 聚异丁烯的苏腊汉 (Сурахан) 油田轻质原油, 其松弛时间为40分钟。

用微乳液在不同温度下所作的试验结果证明, 温度越高松弛时间越短 [28]。

温度, °C	30	50	70
松弛时间, 小时	3.2	2.1	1.4
微乳液的组成: %			
煤油	47		
水	49		
сепарол-25	3		
聚乙烯醇	0.96		
聚丙烯酰胺	0.04		

分析试验结果时, 必须考虑到急剧膨胀 (焦耳-汤姆逊效应) 时可能出现绝热冷却对试验的影响。但是这个因素并

不起支配作用，因为正如图1—4所看出，松弛时间随温度的增加而减少。如果系统内的压力变化完全取决于上述效应的话，那么这种关系就观察不到（图1—5）。在这种情况下，当温度改变时，松弛时间大致保持不变，可由公式直接得出〔15〕

$$\Delta T = \frac{3Ta}{c_p} \Delta p$$

式中 ΔT ——当绝热压力
提高 Δp 时温
度的升高；

T ——绝对温度；

a ——热膨胀系数；

c_p ——恒压下的热容。

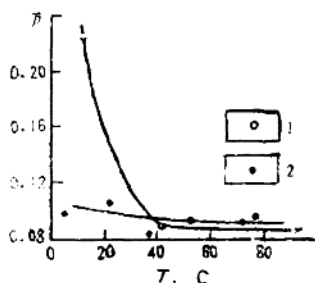


图1—5 压力的相对变化与温度的关系

1—含气原油；2—脱气原油

这种温度的变化使相应的压力变化为 $\Delta p'$ ，

$$\Delta p' = \frac{a \Delta T}{\beta} = \frac{3Ta^2}{c_p} \Delta p$$

式中 β ——压缩系数。

由此相对压力变化等于

$$\Delta p' / \Delta p = 3Ta^2 / c_p$$

因此，随着温度的变化，比值 $\Delta p' / \Delta p$ 的变化不超过20%，比试验值小一个数量级。但是必须考虑温度的校正，特别是在高温区。

A. X. 米尔扎贾扎杰 (A. X. Мирзаджанзаде) 等人曾经发现，由于压力对原油的周期性作用（气压处理），原油的流变参数改变，其中包括粘度系数和极限剪切应力的降低〔24〕。C. B. 谢穆科夫 (C. B. Семукон) 对乌萨油田重油

进行气压处理，获得了类似的结果。

在试验中对取自乌萨油田3井和107井的原油实施了十次“加压—卸压”作用，原油粘度平均下降10~15%。

下面我们研究重质原油剪切流动的主要特点。在剪切流动过程中出现法向应力是这类液体的特征。特别是已知的韦塞别尔哥 (Вайссенберг) 效应，其实质是〔11〕：当旋转内筒时，内外两个圆筒之间同轴间隙内的原油油面在靠近内筒处升高 (图1—6)，而普通液体则被排向外筒壁。这种效应的存在可作为评价所研究液体存在松弛特性的一种快速方法。

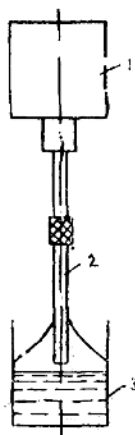


图1—6 原油的韦塞别尔哥效应试验装置示意图

1—电动机；2—玻璃管；
3—装有原油的玻璃杯

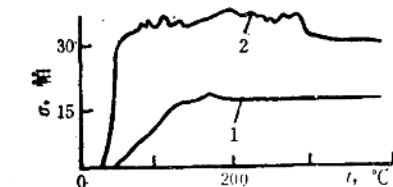


图1—7 乌萨油田重油剪切应力动态图

1—剪切速度, 0.11 秒^{-1} ;
2—剪切速度, 1.13 秒^{-1}

К. В. 木库克 (К. В. Мукук) 作了确定这种关系的试验，试验是用“РОТОВИСКО”仪器，当重油在“锥体—薄板”系统中流动时进行的。建立了恒剪切速度的流动，记录

了剪切应力随时间的变化。此值稳定之后流动瞬时停止，由此产生剪切应力松弛。由图1—7看出，当原油剪切流动时产生松弛过程。同时，视其试验条件的不同，松弛的持续时间为20~100秒。根据这些试验的结果得出，剪切应力变化发生的时间滞后于剪切速度变化发生的时间，而且滞后时间随剪切速度的降低而增加。

重油在毛细管内流动时，也观察到类似的滞后现象（图1—8）。试验是在两种压差下进行的，即 $\Delta p=0.2$ 兆帕（温度 $t=40^{\circ}\text{C}$ 时原油流量 $Q=0.143$ 克/秒， $t=60^{\circ}\text{C}$ 时 $Q=0.177$ 克/秒）和 $\Delta p=0.4$ 兆帕（ $t=40^{\circ}\text{C}$ 时 $Q=0.294$ 克/秒， $t=60^{\circ}\text{C}$ 时 $Q=0.354$

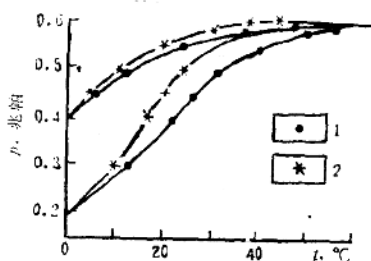


图1—8 恒定温度下长度为160厘米、内径为0.4厘米的毛细管内的压力恢复曲线
1— 40°C ；2— 60°C

克/秒)。正如看到的，恢复的时间约为1分钟，比按原油粘度计算的稳定时间（其阶为 $d^2\nu^{-1}$ ，式中 ν ——原油的运动粘度， d ——毛细管直径）高2个数量级。

在进行试验时，气体的存在对压力恢复过程的影响可以忽略不计〔13〕。

第二节 重质原油渗流时的不平衡效应

原油在多孔介质内的流动用渗流速度和压力梯度相互之间相关的渗流规律来描述。一般来说，这种固定的关系是以原油的粘性或粘塑性和原油与多孔介质相互作用为条件的。

在这种情况下，既存在线性渗流规律又存在非线性渗流规律。对重质原油在多孔介质内流动有重大影响的，在多数情况下甚至有决定性影响的是松弛特性，这种松弛特性决定着渗流线性的不平衡性。总的来说，可分为两种类型的渗流不平衡性，即微观范围的和宏观范围的不平衡性。第一种与重油在孔隙中的流动有关，第二种决定着整个渗流系统的不平衡性。

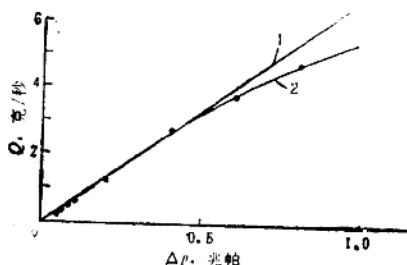


图1—9 毛细管内的流动

1—恒定截面；2—变化截面

我们先来研究微观范围不平衡性所决定的重油渗流特点。下面的试验在这方面有代表性。原油以恒定的粘度和稳定的方式在等温条件下通过直线毛细管流动，在这种情况下压降和流量之间的关系是一条通过坐标原点的直线。图1—9表明了乌萨原油在长度50厘米、内径0.3厘米的毛细管内(曲线1)的试验结果。然后改变试验，将原油压入变截面的毛细管(曲线2)。显然，随着流动速度的增加， $Q-\Delta p$ 关系偏离直线，这相当于出现的附加阻力。在试验条件下，雷诺数为几个单位，这样，附加阻力的出现与由于毛细管变截面而产生的惯性力无关。这种效应决定于液体的松弛特性〔50〕。

当液体低速流过收缩和扩张的通道系统时，液体形变所产生的应力来得及松弛，因此与粘性阻力相比可以忽略。随着流动速度的增加，弹性应力来不及松弛，因此总的阻力增加。因此，除了雷诺数 Re 之外，流动可以用一个新的参数—杰鲍尔（Джебол）数 $D=\tau/T_{np}$ 〔49〕来补充表征。杰鲍尔数等于液体松弛时间与过程特征时间的比值。在杰鲍尔数小的情况下（ $D \leq 1$ ），松弛特性的影响可以忽略。由于松弛作用，当液体流动时，压力损失增加 $1 + A\left(\frac{\tau v}{R}\right)$ 倍，式中 τ 为松弛时间， v 为液体的流动速度， R 为截面变化的特征范围， A 是常数（约等于10）〔50〕。考虑到 $R/v = T_{np}$ ，用液体有效粘度表示的阻力的增加可由下式表示：

$$\mu_{\text{eff}} = \mu \left[1 + A \left(\frac{\tau v}{R} \right)^2 \right] = \mu [1 + AD^2] \quad (1-3)$$

式中 μ ——液体的粘度。

当原油流过孔道形状不规则的复杂系统的孔隙介质时，在其中产生弹性应力。与在直线毛细管内的流动相比，所产生的弹性应力将导致多孔介质内有效粘度的增加。根据公式 $r_n = \sqrt{8k/m}$ ，可以估算孔隙通道的特征尺寸。考虑到这种情况，对多孔介质内的有效粘度得

$$\mu = 1 + a \frac{\tau^2 v^2 m}{k} \quad (1-4)$$

式中 a ——与 A 是同一数量级的常数。

由此得出，在同一个流动速度下，原油的有效粘度随着多孔介质渗透率的降低而增加（表1.2）。

表1.2 根据乌萨油田11号井原油通过岩样渗流时粘度的相对增加计算松弛时间

$Q \times 10^{-3}$, 厘米 ³ /秒	$v \times 10^{-2}$, 厘米/秒	t , 分	Δp , 帕 $\times 10^3$	原油粘度 μ' , 帕 $\times$ 秒 (BB-DY型粘度计)	原油有效粘度 μ_e , 帕 $\times$ 秒 (在 Q 和 Δp 条件下)	μ	τ , 秒	附 注
0.511	0.0776	362	55.62	0.766	0.920	1.20	0.705	l 样品=2.92厘米 d 样品=2.9厘米
0.518	0.0738	530	84.16	0.766	1.150	1.50	1.08	
0.083	0.0126	425.5	10.69	0.766	1.087	1.41	6.1	$m=23\%$
0.083	0.0126	324	10.30	0.766	1.045	1.37	5.8	$\nu=5.34 \times 10^{-4}$
0.083	0.0126	447	13.93	0.766	1.420	1.85	8.5	厘米
0.058	0.0088	316	7.740	0.766	1.047	1.36	8.2	

上文已指出,随着温度的升高,原油的松弛特性减弱。因此,当原油通过不同渗透率的多孔介质流动时,随着温度的增加,原油的粘度差减小。为了验证这一假设,曾测定了乌萨原油在不同压差下通过不同渗透率的多孔介质渗流时的粘度(图1—10)。所得的结果指出,随着温度增加到约80°C,

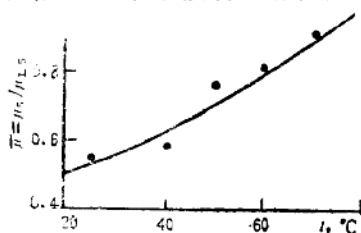


图1—10 渗透率为 $k=5 \times 10^{-12}$ 米²和 $k=1.5 \times 10^{-12}$ 米²的介质内粘度比与渗透率的关系

粘度比趋近于1。这就意味着,当原油流过不同渗透率的多孔介质时,由于原油松弛特性所引起的阻力差随着温度升高而消失。因此,当温度升高时,原油的松弛特性减弱,当达到80°C左右时,不再出

现对渗流的影响。