

高等学校教學用書

油 层 物 理 实 驗

苏联 R.Γ. 奥尔金等著

石 油 工 业 出 版 社

油 层 物 理 实 驗

苏联 К·Г·奥尔金 П·К·庫欽斯基著

陳鎔源 邱璧基等譯

苏联高等教育部批准作为高等石油学校和石油系教材

石 油 工 业 出 版 社

內 容 提 要

本書系苏联石油学院“油层物理学”課程的輔助教材。書中敘述測定生产层和地下液体的主要物理性質的各種方法；同时对实验用的仪器也作了較詳細的描述。

本書除可供石油学院作教材外，还可供石油学校师生和實驗室工作人員参考。

К. Г. ОРКИН И П. К. КУЧИНСКИЙ
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ
“ФИЗИКА НЕФТЯНОГО ПЛАСТА”

根据苏联国立石油燃料科技書籍出版社(ГОСТОПТЕХИЗДАТ)

1953年莫斯科版翻譯

統一書号：15037·345

油 层 物 理 实 驗

陈鎔源 邱肇基等譯

*

石油工业出版社出版 (社址：北京六鋪炕石油工業部內)

北京市書刊出版業營業許可證出字第 089 號

北京市印刷一厂排印 新华書店发行

*

850×1168 $\frac{1}{2}$ 开本 * 印張7 $\frac{5}{16}$ * 172千字 * 印1—800册

1958年3月北京第1版第1次印刷

定价(11)1.20元

序 言

本書是根据 1949 年苏联高等教育部批准的“油層物理学”教学大綱編写的，适合“油气田开发”專業教学计划中所規定的授課时数。

本書供学习上述專業的高等学校学生之用，但也可供研究含油岩石及含油岩石中液体物理性質的實驗室工作人員参考。

上述的要求和規定的时数，限制了教学大綱中規定的实验作業所要研究的問題的范围。但本書除談到这些实验之外，还要叙述一些至今还未普遍采用但对研究含油岩石極有价值的另一些实验。

实验作業的指导者可按現有仪器的情况和当地的条件，从实验大綱和实验方法中选择某些作業和方法。

本書作者在叙述測定岩石和一部分液体的主要物理性質的实验方法时，主要是以苏联石油工業工厂制造的仪器、仪表的使用条件和所推荐采用的实验方法为依据。作者們还利用了他們在格罗茲內石油学院油層物理實驗室中所研究过和使用过的方法及仪器。

作者欢迎一切改善本書的批評和建議。

目 录

序言

第一章 岩心的选取、准备和研究	1
进行和佈置实验的说明	1
选取岩心的简单说明	1
岩心的选取、描述和包装	3
研究岩心的程序	5
岩样中所含液体(油、水)的排除、岩石中液体含量的估计及 测定岩石物理性质的准备	6
用金和斯达尔克仪器测定岩心中水的含量	8
岩心含油饱和率的测定	9
岩心含水饱和率的测定	12
用ПТ-4型扎克斯仪器测定岩心含水和含油饱和率	13
第二章 含油岩石的主要物理性质以及其中碳酸盐与氯化物含量的测定	15
孔隙率的测定	15
渗透率的测定	38
岩心颗粒大小组成的测定	64
沉速分析法(沉积法)的机械分析的理论前提〔25〕	68
粒状岩石比面的测定	85
岩石碳酸盐含量的测定	88
岩心中氯化物含量的测定	93
第三章 标准状况下地层水和地下原油主要物理性质的测定	96
在大气压下测定液体比重	96
液体粘度的测定	101
表面张力的测定	110

測定石油中水和污物的数量以及用离心法脫乳	122
第四章 地層中地下液体性質的研究	125
測定地下原油試样的基本原理	126
第五章 液体、气体和固体的相互作用	164
選擇性潤湿和潤湿接觸角的測定	164
毛細管内液体上昇高度的測定	170
多孔介質中石油毛細上昇高度的測定	178
測定岩心中殘余水飽和率和毛細管压力的关系以及岩样中孔 隙大小(弯液面的半徑)及其分布的估計	185
岩心采收率的測定	192
利用地層实验模型測定水和气以及重力作用驅油的效率	194
非膠結岩石比面的測定	206
附录	209
用分析天平称量的規則〔3〕	209
量度單位	211
物理学計量及所得結果之整理〔28〕	213
参考文献	227

第一章 岩心的选取、准备和研究

进行和佈置实验的說明

实验課开始时指导者应簡單地談談：(1)有关完成实验作業的一般意見；(2)对学生实验报告的要求；此外，还应將別班学生写得好的—些报告給学生看看，并介紹应完成的实验作業大綱和完成这些实验的系統的程序。

为了完成一定量的实验和必要的实验手續，学生必須預先在課外時間研究实验的方法和完成一部分实验的工作手續。

如果学生事先已經画好仪器草圖并將实验的主要情况記入自己的練習本中，那就可节省很多的时间。因此，指导者每一次都应该預先告訴全班下一課他們所要作的实验，并应經常注意使实验的佈置不要落后于課程进度。

实验报告应该用鋼笔写成。

实验时通常把班分成两个組（視現有仪器的数量和进行实验时同时观察的难易和次数而定），每个組还可以再分成两三个人的小組。

把仪器交給小組时，应同时告訴学生进行实验的方法、仪器的構造、操作程序和計算結果用的公式。

因为井所鑽穿的岩層的岩心（岩心应非常完整）是測定岩石物理性質时所要研究的主要对象，所以下面我們对岩心的选取、描述、包裝和运输簡單地加以說明。

选取岩心的簡單說明

在所有的生产井內，即使只在产油層範圍內进行全面取心工作，也是一件非常繁重的任务。因此，在研究油層性質时，最好

根据在油層上分佈相当均匀的各口估价井来作綜合性的研究，以確定測井曲綫数据与按岩心分析直接測定的儲油層性質之間的对比关系。

这种綜合研究工作應該包括：（1）用不同電極距进行电測；（2）机械測井的数据，即在开采層中鑽井时按鑽进深度确定的鑽进速度；（3）用井徑仪測井，确定剖面上的泥質夾層；（4）在估价井剖面的产油層部分进行全面取心。

有了上述資料后，就能更精确地解釋測井曲綫，一直到繪成地質柱狀剖面圖。

如基準井測井曲綫的解釋可靠，那末，对于其他各井就只須研究其測井曲綫；因为按現有的对比規則，我們能对这种曲綫作出相当精确的解釋。

选取岩心时必须做到在井的剖面上每隔 1 公尺至少取三、四个可供分析的典型岩样。只有在这种情况下才有可能对每一口基準井作出岩心記錄，从而根据油層厚度判断儲油層性質的变化情况。因为井剖面上各个夾層的参数可能彼此相差几十倍甚至几百倍（特别是渗透率）[14]，所以仅根据岩層的一两个岩样来評價油層，只会歪曲油層的产油性能。

如果在很硬而深度不大的岩層上单独取岩心，并且每更換一次鑽头的进尺不大，可在鑽进时采用帶有不可換取心器的 ДКШ 型取心鑽头[2]。

ДКШ 型鑽头是一种六牙輪鑽头，其中三个牙輪用来切削井底的外环形面，使成井壁，而其他三个牙輪則用来切削井底的內环形面，使成岩心的周边。岩心抓为卡簧式的。泥漿繞过岩心筒进入牙輪水眼中。在每次鑽进之后，將岩心、鑽桿和鑽头一起提昇上来。

如在很深且軟的岩層中全面取心或取心进尺很大时（即一个鑽头磨損以前的进尺很大时），采用帶有可換取心器的繩式取心

鑽具能大大节省起下鑽头的時間。因为这时可以借助特殊絞車用鋼繩把取心器从鑽桿中提昇到地面上来。这样就不必要为取出岩心而把鑽桿提昇到地面。等把岩心从岩心筒中取出后，再把岩心筒放回鑽桿中，鑽井和取心工作即可繼續进行。应该使取出的岩心长度等于鑽进的进尺，这样，井的整个剖面就可完全显示出来了。

帶有可換取心器的取心鑽头，是由底座、三翼鑽头（它可以卸下来用牙輪鑽头代替）和岩心筒組成的；筒上附有打撈头，系在鋼繩上的打撈筒即將此打撈头抓住把岩心筒提昇到地面。取样筒的下端連接着一个圓筒銑刀，銑刀内部裝有岩心抓。

岩心的选取、描述和包裝[4]

1. 岩心应该在用失水量低的優質泥漿洗井时采取。

如采取岩心的目的是为了測定油層中的含水飽和度和氯化物，則此种岩心应当在用石油洗井或油基泥漿洗井时鑽取。

2. 最好用較低的速度把岩心从井內提昇到地面上来。

3. 在井場上以机械方法用木棒从岩心筒中取出岩心时，一定要有地質師在場。

4. 把岩心提到地面以后，要及时从岩心筒中把岩塊取出，并依次放入特制的木槽中。然后用破布或紙擦去这些岩塊上的泥漿并加以檢驗。根据檢驗結果，編写岩心的描述，同时指出岩心中岩石的均匀程度和特征，顆粒的粗細和圓度，摻杂粘土顆粒的程度，膠結物的性質，膠結程度，層理的特性，节理，包裹体，顏色，含油显示，岩層傾角等。在岩心說明書上要註明所取岩样的号碼，取样的間隔深度和厚度等。

記錄的格式如表 1。

5. 岩心檢驗完畢以后就确定供實驗室研究用的岩样，并繪制地質柱狀剖面簡圖，在圖上相当的地方註明供實驗室研究用的岩

岩 心 說 明 書

表 1

地区 _____ 井号 _____ 岩層 _____

岩層深度和 岩石名称	剖面及 測井特性	岩 样		描 述
		№	深度井段	

描述岩心的日期 _____

說明書編写者签名 _____

样号碼和尺寸。准备用来研究的岩样，应很快锯开或切开，塗以石蜡(浸入溶解了的石蜡中)并附上註有岩样号碼、井号和取心深度間隔的标籤，在已塗上石蜡的岩样的上端标出記号。然后把从井中取出岩心的外表觀測結果以及为分析而用的岩样选取工作編写成文据(其格式見后)，其中应包括岩層和井眼的主要資料：鑽穿岩層和取心的条件，岩心的状态和有关取样地点的一些情况。为使研究工作达到必需的精确度，一段岩心的直徑应不小于 60 公厘，其長度应不小于 110—120 公厘。从每一均匀的長度为 1 公尺的間隔中应取出兩三段这种岩塊。

6. 把取出的塗过石蜡的岩样包上蜡紙，并在蜡紙上附以适当的标籤，然后裝入帶有密封盖子的 75×140 公厘的特制金屬容器中。裝好后把金屬容器放入 $65 \times 65 \times 15$ 公分的木箱中，箱上有可以抽出的盖。最后把木箱运送到實驗室去。

为避免石蜡外皮在运送过程中受损伤，岩样和容器應該用碎紙、破布或其他合适的东西墊襯放入箱中。在實驗室中要先檢查石蜡外皮是否完整，如有损伤，就得重新塗蜡。也可以用地蜡来代替石蜡作为含油岩石的塗料。

7. 再將选出岩样后所剩下的一部分岩心标上标籤，保存在托拉斯的地質处。标籤上要註明取心的日期、矿場、托拉斯、公

司、井場號碼、取样深度、地層層位、所取岩心的長度等。標籤上的字必須用普通黑鉛筆書寫。應將標籤卷在蜡紙內。

文 据

我們_____对从_____号井中取出的岩心的外表觀測和从岩心中选取供實驗室分析用的岩样的工作編寫了这份文据。

岩心系 19____年在_____托拉斯_____矿場_____地区_____号井_____岩層中取出。取心井段_____, 岩心長度_____, 岩心所在井段的深度_____。

鑽井时采用_____泥漿, 泥漿的比重_____, 粘度_____, 失水量_____, 泥漿經過_____的化学处理。

鑽头上的軸向荷重_____, 泵上的表压_____, 泵量_____。

取心时的鑽井時間_____, 轉盤的轉數_____, 油層压力_____, 溫度_____。

周圍油井內的石油比重_____。

从井底把岩心提昇到地面花去的時間_____。

鑽井时發現的一些特殊情况_____。

取心鑽头为_____, 岩心的長度_____, 收获率_____。

岩心取到地面后的情况_____。

对岩心外表进行觀測后确定_____。

从取出的岩心中选取_____岩样。

文据拟訂人:

1. _____ 2. _____ 3. _____ 4. _____

19____年于_____市

研究岩心的程序

分析岩心时应按照下列程序进行[4]。从岩样上剝掉石蜡和受泥漿冲刷的岩心表層(至少5公厘), 然后在岩样中部切取4公分長的一段, 再沿这一段的軸綫把它鋸成兩半(圖1)。

小塊1与2用来測定含水飽和率、含油飽和率、孔隙率、氯化物含量、碳酸鹽含量和湿润性。

用小塊3測定出油率和滲透率, 以及残余飽和率与毛細管压

力間的关系。

用小塊 3 与 4 测定机械組成和岩石成分。

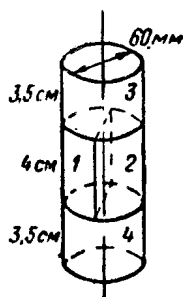


圖 1 鋸開岩
样的簡圖

对于不立即研究的一部分岩样，应立刻再用石蜡封好。

岩样中所含液体(油、水)的排除、岩石中液体含量的估計及測定岩石物理性質的準備

为了測定孔隙率、絕對滲透率、粒度組成及碳酸鹽含量，就必須要有干燥的即不含任何油与水的岩样。要从岩石孔隙中排除这些物質，最好把岩样放在沙克斯列特仪器中提取^①。

沙克斯列特仪器的描述和操作

沙克斯列特仪器(圖 2)(OCT 10075-39)是由平底玻璃燒瓶、提取器和球形回流冷凝器組成的。冷凝器为單向流动冷凝，因此，冷凝器下端弯管与給水管相連，而上端弯管則与排水管相連。

仪器的三个組成部分都順序地互相紧密相連。操作开始以前，应在这些連接面上塗一層稀薄的凡士林。

为了能在提取器中放置直径为4—5公分的岩样，在岩心分析时多半使用帶有寬口提取器(5—6公分)的沙克斯列特仪器。

加热时，燒瓶中热溶剂(通常为四氯化碳或苯)的蒸气就会沿小管上升至提取器的上部，然后进入冷凝器，并在其中冷凝。为了使其与热絕緣，小管最好用石棉片包住。冷凝液在流入紙套时溶解岩样中的石油。逐漸聚集在一起的冷凝液自动地沿着虹吸管从提取器流回到燒瓶中。这样循环一周后，再順序重复操作。

^① 如果岩石的湿潤性已大致測定，則在排除石油后，必須用碳酸鈉溶液和三氯甲烷洗滌岩样。

燒瓶應該用水槽或密閉型的電爐加熱。

實驗工作

岩樣用小刷刷淨，裝入用濾紙制成的紙套中過秤。紙套是這樣做成的：把濕紙卷在直徑稍小於提取器口徑的圓柱形木棒上，在木棒圓頭的一端將紙整齊地折好，作為紙套的底部，然後再在恆溫器中以 $102-105^{\circ}\text{C}$ 的溫度把紙套烘乾。

為了避免紙套的濕度增高和落入其他物質，應把紙套存放在乾燥器中。

把裝有岩樣的紙套放入提取器內。最好在提取器的底部墊一玻璃圈，使整個紙套能更好地被溶劑洗滌，並且當有微粒從紙套中流出時，即可立刻發現。待溶劑濾去後，將微粒和紙套一起過秤，秤得的重量應加入提取過的和烘乾了的岩樣重量中。

把溶劑注入燒瓶中，溶劑的體積約為燒瓶的 $\frac{3}{4}$ ，亦即相當於虹吸管能從提取器中汲回的溶劑體積再加上 50 毫升。

通常以四氯化碳 CCl_4 （比重為 1.632， $t_{\text{кип}} = 76.6^{\circ}\text{C}$ ）或苯^① C_6H_6 （比重為 0.879， $t_{\text{кип}} = 80^{\circ}\text{C}$ ）[13]作為溶劑；也可以使用苯與酒精的混合物或苯與丙酮的混合物作為溶劑。然後把儀器裝好，再將水引入冷凝器（自下而上），即開始將燒瓶加熱。

當從提取器流至燒瓶中的溶劑經過多次循環呈完全透明，而不再使濾紙染色時，岩樣的提取工作就算結束。

提取工作可以延續 6—24 小時，而對於顆粒細小的致密岩石

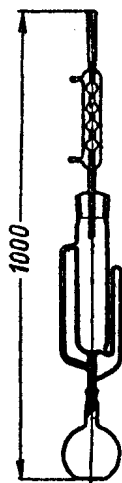


圖 2 沙克斯列特儀器

① 應注意到苯與四氯化碳不同，苯是一種易燃的液體，因此使用時應特別小心。

還要長些。

提取工作結束後，應使儀器冷卻。然後把它拆開，從提取器中取出裝有岩樣的紙套，並將岩樣放在烘箱中於溫度 $102-105^{\circ}\text{C}$ 下將其烘乾至恒重。

設提取前岩樣的重量（無紙套）為 G_2 ，提取後的重量為 G'_2 ，則岩樣中液體（水和油）的含量等於：

$$G_{\text{ж}} = G_2 - G'_2$$

或以對最初重量 G_2 的百分數表示：

$$G'_{\text{ж}} = \frac{G_2 - G'_2}{G_2} 100\%.$$

用金和斯達爾克儀器測定岩心中水的含量

岩心中以及各種石油產品中水的含量可用金和斯達爾克儀器測定。

金和斯達爾克儀器(OCT 7872)(圖 3)是由容積為 500 立方公分、瓶口直徑為 35 公厘的金屬燒瓶 3，帶刻度的容積為 10 立方公分的玻璃捕集管 2 和玻璃回流冷凝器 1 組成的。

實驗工作

把去了蠟的淨岩塊秤一秤，最好使它的重量不小於 25 克（精確度為 0.01 克），然後將它裝入金和斯達爾克儀器的燒瓶中。

向燒瓶中注入 200 立方公分的無水甲苯 $\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{CH}_3$ （比重為 0.867, $t_{\text{кип}} = 111^{\circ}\text{C}$ ）[13] 或直餾汽油；由直餾汽油中可提取沸點達 95°C 的輕餾分(OCT 7872, М.И.19а-35)。

儀器應該按照圖 3 所示的那樣安裝起來。為了使儀器不透氣，要在軟木塞上塗以火棉膠。

將水從冷凝器下端的側支管引入，借助橡皮管把水從上端的側支管導至排水管。然後向密閉型的電爐通電，把燒瓶逐漸加

热，使溶剂沸腾，直到每一秒钟从冷凝器的管口滴下2—4滴液体为止。

当捕集管中水的体积不再增加，水面上的一层溶剂变得完全透明时，岩样中水份的蒸馏过程就算结束。

如果操作将近结束时冷凝器小管中的水滴滴不下来，那么可用小玻璃棒把水滴推入捕集管，然后算出水的体积 V_B (立方公分)。

在进行精确研究时，最好用微量滴定管检验捕集管的每一刻度，这样就能将捕集管中水的体积的可靠读数编成一个表格。

如果装在金和斯达尔克仪器中的岩样的重量为 G_1 克，而算出来的捕集管中水的体积为 V_B 立方公分，水的比重为 γ_B 克/立方公分 (通常 γ_B 假定为 1)，则岩样中水的重量百分比

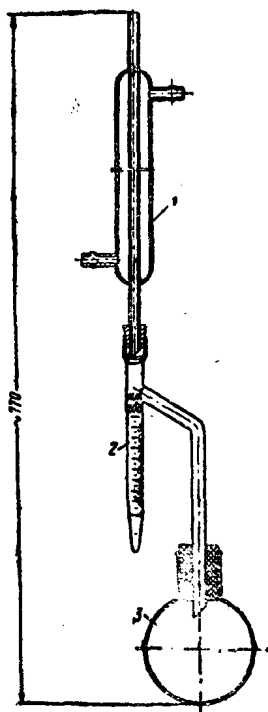


圖 3 測定含水量的儀器

$$\frac{V_B \gamma_B}{G_1} \times 100\%.$$

岩心含油飽和率的測定

岩样中石油的体积与同一岩样中孔隙总体积之比叫做含油饱和率。

要计算这种饱和率必须具有下列各值：

γ_H ——实验温度下石油的比重 (自原来的或邻近井中取得的石油)，克/立方公分；

$G_{\text{岩}}$ ——所提取岩样中水和石油的含量，克；

G_1 ——裝在金和斯达尔克儀器的燒瓶中的岩樣的重量,克;

G_2 和 G'_2 ——代表的意義和上面解釋的相同,克;

V_B ——金和斯达尔克儀器捕集管中水的體積,這種水是由重量為 G_1 的岩樣中分離出來的,立方公分;

γ_B ——實驗溫度下水的比重,克/立方公分;

V'_H ——重量為 G_1 的岩樣中石油的體積,立方公分;

m ——岩樣的絕對孔隙率,為無因次值,小數①;

γ_H ——岩石的比重(帶有孔隙的岩石的比重為視比重),克/立方公分②。

依照所採用的符號,在重量為 G_1 的岩樣中的石油體積可用下式[4]確定:

$$V'_H = \frac{1}{\gamma_H} \left(\frac{G_{\text{ж}} G_1}{G_2} - V_B \gamma_B \right).$$

式中 $G_{\text{ж}} = G_2 - G'_2$ 為提取前和提取并烘干后岩樣的重量差,此差值即是重量為 G_2 的岩樣中石油與水的總重量。以 G_2 除此總重量即得飽和岩樣單位重量中油與水的重量,再乘以 G_1 ,即可求出金和斯达尔克儀器燒瓶內岩樣 G_1 中的油量和水量。以 V_B 乘 γ_B ,可求得金和斯达尔克儀器捕集管中水的重量。從 $\frac{G_{\text{ж}} G_1}{G_2}$ 中減去 $V_B \gamma_B$,可求得岩樣 G_1 中石油的重量,再除以 γ_H ,即得重量為 G_1 的岩樣中的石油體積。

含油飽和率 S_H (以小數表示的無因次值)用下式求出:

$$S_H = \frac{V'_H}{V''_H} = \frac{V'_H G_2 \gamma_H}{m G_1 G'_2} \left[\frac{\text{立方公分} \times \text{克} \times \text{克}}{\text{克} \times \text{克} \times \text{立方公分}} \right],$$

式中 V''_H ——重量為 G_2 的岩樣中的孔隙容積;

V'_H ——重量為 G_2 的岩樣中石油的體積。

以 G_1 除 V'_H ,可得岩樣中石油的比容,即岩樣單位重量中石油的體積。若乘以 G_2 ,即可得重量為 G_2 的岩樣中石油的體積。

① 求 m 和 γ_H 的方法見第16頁和22頁。

以岩石的視比重 γ_{π} 除岩石的重量 G'_2 ，即 $\frac{G'_2}{\gamma_{\pi}}$ ，可得干燥岩样的体积；以此商数乘以 m ，即可求得岩样的孔隙容积 $\frac{G'_2 m}{\gamma_{\pi}}$ ；以 $\frac{G'_2 m}{\gamma_{\pi}}$ 除 $\frac{V'_H G_2}{G_1}$ ，则可求得岩石孔隙容积中所含的石油体积，即含油饱和率。

在研究膠結不好的含油岩石时，由于提取过的岩样是粉碎的，要测定它们的視比重就比较困难；所以应相应地求未經提取的岩塊的重量 G'_2 和体积 V'_2 （將岩塊塗上石蜡并在空气和水中过秤）。

在这种情况下，含油饱和率(以小数表示)可用下式表示。

$$S_H = \frac{V'_H G'_2}{m G_1 V'_2} \left[\frac{\text{立方公分} \times \text{克}}{\text{克} \times \text{立方公分}} \right]$$

以 G_1 除 V'_H ，再乘以 G'_2 ，即可求得重量为 G'_2 的岩样中石油的体积。

以該岩样的体积 V'_2 乘以孔隙率 m ，即可求得岩样孔隙的容积 mV'_2 。

以 mV'_2 除 $\frac{V'_H G'_2}{G_1}$ ，可求得岩样孔隙容积中所含石油的体积，即含油饱和率。

实例 設 $G_2=100$ 克， $G'_2=92$ 克， $G_1=50$ 克， $V_2=2$ 立方公分， $m=0.25$ ， $\gamma_H=0.9$ 克/立方公分， $\gamma_B=1$ 克/立方公分， $\gamma_{\pi}=2.0$ 克/立方公分，則可得：

$$V'_H = \frac{1}{\gamma_H} \left(\frac{G_H G_1}{G_2} - V_B \gamma_B \right) = \frac{1}{0.9} \left[\frac{(100-92) \times 50}{100} - 2 \times 1 \right] = 2.22 \text{ 立方公分};$$

$$s_H = \frac{V'_H G'_2 \gamma_{\pi}}{m G_1 G'_2} = \frac{2.22 \times 100 \times 2}{0.25 \times 50 \times 92} = 0.386 \text{ 或 } 38.6\%.$$

所求得的含油饱和率 s_H 說明在常压上和温度为 20°C 时石油