

211636

高等学校教学用书

油气田开发与开采

北京石油学院采油教研室編



中国工业出版社

前 言

本書是为高等石油院校的地质勘探、测井、鑽井、矿場机械、工业經濟等专业的学生學習“油、气田开发与开采”課程的教学用書。也可以作为石油中等技术学校师生及从事石油及天然气工业的地质和工程技术人员参考用書。

本書除緒論外，共包括油、气层物理基础；油、气向井流动的力学基础；油田开发理論基础；油（气）井完成及投产、自噴—气举开采法；深井泵开采法；增产方法；油、气井修理；提高油层采收率；气田开发及开采；矿場油、气集輸及处理等十一章。

本書的内容基本上是以教学时数較多的石油工业經濟专业及石油地质专业的需要为依据，和照顧了其他专业的要求而編写的。例如对經濟及鑽井等专业，因学习油、气田开发的需要，而适当地加强了油田开发理論基础一章；对鑽井专业，因为学时較少，該章可作一些縮減而对于石油地质勘探专业，如专门開設了地下水力学及油、气田开发的課程，就可以刪去这一章。而油、气层物理基础一章，則是按石油地质专业的要求編写的，这一章在对其他专业講授时应该适当地簡化。其他各章在教学中也应按不同专业要求及学时安排加以增減。若学生曾参加矿場劳动实习或曾进行現場教学，那么，在講授到有关章节，特别是像工艺施工，机械設備部分时就应当尽量簡化，一部分应通过直观或电化教学方式進行講授。

本書在系統及內容安排上与国内类似教科書和我們过去的講義大同小異；不同的地方，一是为了保証油、气田开发一章講授时有足夠理論基础，所以該章在闡述时还同时注意油、气的地下流动基本規律之介紹。二是把过去“試井及地层研究”的內容分別在向井流动力学基础、自噴、深井泵开采法三章中进行講授，使試井、地层研究与开发、油井分析和油井管理等工作的要求緊密結合。三是按当前生产技术发展及实际需要，把过去气举采油法一章取消，併为自噴气举开采法一章和作为誘流措施来加以介紹，刪去比較复杂的工艺計算。四是把作为維持地层压力及人工驅油方法的注水注气的內容，再补充上近年来国内外正在試驗推广的其他提高采收率的方法，如混相驅、火烧油层等、合併为提高油层采收率一章。矿場自动化及劳动組織、技术安全等也未作介紹，建議在教学时作必要补充。

本書在編写时力求做到以講述基本內容为主，尽量避免繁瑣的敘述，并考虑到几年来我国石油工业大跃进的成就和生产发展的要求，对国内外有关采油的新技術方法，在各有关章节中做了若干补充。由于篇幅有限及各专业教学要求又有所不同，在联系实际方面，本書着重介紹实际工作所需要的开发及开采知識，对于我国現場实例和先進技术方法設備工具的革新等等沒有过多介紹，建議按教学情况的需要及可能，随时加以补充和丰富。

本書的編写和审閱工作，由于思想及业务水平的限制，時間仓促，經驗不足，錯誤和不安的地方在所难免；我們热誠地希望各校有关教师同学，或其他讀者提出寶貴的批評和意見，以便及时修改。

参加本書編写工作的有王鴻助、張朝琛、胡靖邦、樊營、王謙身、李昆三、張鉄麟、朱恩灵、董映珉等人，此外在出版及編校工作中还得到我院采油专业部分同学的协助。

本書最后由北京石油学院鑽采系主任周世尧同志为首的审核組通过定稿；緒論部分还承政治理論工作室陈景霖等同志审閱。

目 录

前言

緒論	1
第1节 开发及开采油、气田的目的、任务和內容	1
第2节 学习本课程的目的与方法	2
第3节 祖国石油及天然气工业发展簡况	2
第一章 油层物理基础	5
第1节 自然界的儲藏(气)层	5
第2节 油(气)层岩石的物理性質	8
第3节 烴类气体的物理性質	15
第4节 地下流体的物理性質	23
第5节 石油——气体——水——岩石系統内分子表面性質	30
第二章 油、气向井流动的力学基础	37
第1节 地层能量及在油、气藏内作用的力	37
第2节 油、气藏的排出方式	39
第3节 油、气藏内流体向井流动的規律	2
第4节 穩定排出法試井	47
第5节 穩定試井結果的处理	48
第6节 不穩定方式下的試井	58
第7节 地层研究	61
第8节 油井采油定額的确定	63
第三章 油田开发理論基础	65
第1节 油田开发設計方法	65
第2节 开发設計中油层条件的簡化	68
第3节 水压驅动油藏油井产量和压力的計算	71
第4节 油藏注水設計	83
第5节 溶解气驅油藏的开发設計	89
第6节 弹性驅动油藏的开发設計	90
第7节 油田开发方案的实施	93
第8节 油田开发的經济分析	95
第四章 油(气)井的完成和投产	99
第1节 鑽开油层	99
第2节 油井完成及井底设备	101
第3节 滤管、滤器和堵塞器	104
第4节 套管射孔	109
第5节 油、气井的誘流	113
第6节 一井同时分采多层时的井下裝置	117
第7节 小井眼无油管井的井下裝置	122
第五章 自噴——气举开采法	125

第1节	油、气沿管上升的流动规律	125
第2节	地层排出与油管工作的协调	132
第3节	自喷井的试井	135
第4节	自喷井生产的分析及管理	142
第5节	特殊生产情况下的自喷井	144
第6节	自喷井的井口装备	148
第7节	气举开采法及其装备	151
第8节	降低启动压力 and 改善气举工作条件	153
第9节	间歇气举开采法	157
第六章	深井泵开采法	161
第1节	深井泵的工作原理	161
第2节	深井泵的生产率	162
第3节	抽油杆与油管的弹性伸缩	165
第4节	抽油杆柱悬点上的载荷	167
第5节	抽油杆柱的选择	170
第6节	活塞冲程的计算	172
第7节	抽油设备	174
第8节	抽汲方式的确定和设备的选择	178
第9节	抽油井的试井和用动力仪检查泵的工作	181
第10节	出水井、小产量井的抽汲方式	185
第11节	无杆泵	185
第七章	增加油井产量的方法	191
第1节	酸处理	191
第2节	热酸处理	197
第3节	井下爆炸	199
第4节	地层的水力压裂	203
第八章	油(气)井的修理	210
第1节	修井设备和工具	210
第2节	起下油管、抽油杆和深井泵	220
第3节	油井的防砂和清砂	226
第4节	油井防蜡和清蜡	234
第5节	油井的堵水	240
第6节	打捞井内落物	244
第7节	套管的修整	248
第8节	回采上下层和井的报废	249
第9节	气井的修理	250
第九章	提高油层采收率的方法	252
第1节	油层注水	253
第2节	油层注气	267
第3节	互溶混相驱开采法	269
第4节	火驱开采法	272
第5节	坑道开采法	275
第6节	其它提高采收率的方法	277

第十章 气田及凝析气田的开发与开采	279
第1节 气田开发与开采的特点	279
第2节 气田开发的计算	279
第3节 气井的开采	287
第4节 凝析气田开发与开采	294
第十一章 矿场油、气的集输和处理	297
第1节 油、气集输的原则及流程	297
第2节 油井产物的分离及设备	300
第3节 油、气集输管路	305
第4节 矿场上油、气的储存	311
第5节 矿场上油、气的计量	314
第6节 矿场上油、气的初步处理	317
附录 科技符号及足码说明	322
参考文献	324

緒 論

石油工业是在国民經济建設中佔主要地位的重工业部門之一。正如“人民日报”社論中指出的：“如果石油工业不能跟上工农业生产前进的速度，就会严重地影响国家社会主义工业化、农业机械化、国防現代化事业的发展……。”由此可見，石油工业对社会主义建設和国防建設的发展及巩固有重大的意义。

石油工业包括：地質勘探、鑽采、儲运、加工、机修及經济管理等一系列密切相关的生产部門。而开采工作是中心环节，勘探、鑽井机修等都是为了采出更多的石油及天然气，为加工工业提供丰富的原料，因此，要做好开采工作必須依靠勘探、鑽井、机修、計划管理各部門协作配合。

发展我国年輕的石油工业为社会主义建設提供更多的原油和成品，是每个石油工作者的光榮任务。

第1节 开发及开采油、气田的目的、任务和內容

在探明油、气藏的工业价值以后，根据对矿藏地質物理性質及流动規律的了解，通过按一定几何形状及距离分布的井網，鑽开地层使油、气流入井內，然后繼續依靠自然或人工能量將油、气采出地面。

油、气田开发及开采的任务是按一定的經济目的，采用各种技术及方法把地下矿藏中的油、气开采出来。由于社会制度不同，社会主义和資本主义国家开发矿藏的目的及方法也就迥然相反。在社会主义国家，地下資源属于全民所有，开发矿藏的目的是把油、气田作为整体出发，在保护和充分利用自然資源的前提下，合理开发油、气田，最大限度的滿足建設和保卫社会主义祖国的需要，以及日益增长的人民物質生活的需求。例如苏联在十月革命后，石油工业有了突飞猛进的发展，开发了許多巨大的油、气田。原油产量从十月革命前年产一千万吨左右，增长到今天的一亿三千多万吨，并創建了完整的先进的油田开发理論体系及新的技术方法，使采收率也大为提高。与此相反，在帝国主义及一切資本主义国家，石油資源及开采权是属于垄断資本集团私有，資產阶级追求最大利潤的貪婪本質，就决定了它采取掠夺競爭、垄断等手段，也决定了它在石油生产上受动盪的資本主义市場所左右。因此，在油、气田开发及开采上，資本主义国家的油、气开采工业只可能有局部的、技术性的改进，無論是布井、制訂油、气田及油、气井的工作方式，还是矿場的机械化、自动化，其目的不外乎是企图攫取更多的利潤，沒有也不可能对于油、气区及油、气田的合理开发、布置和設計，因而地下資源的浪费非常惊人，据統計，資本主义国家已开发油、气田的采收率仅佔16—17%左右。除了受石油工业发展初期生产技术水平低下的影响外，不能不看到，这种浪费資源的現象具有深刻的社会根源。

合理开发油、气田的任务是，在全面認識油、气田的地質物理性質、掌握地下油、气流动和生产規律的基础上，布置井位，确定油、气层的工作制度，預計油、气田及井的产量和开采年限；作出若干可能的实施方案，然后进行技术經济分析，选择最合理的开发方案。

按照油、气田合理开发方案的战略布置，必須相应的运用各种工艺技术方法，实现开

采油、气的任务。为此，就必须进一步研究地层和井的协同工作规律，选择和监督油、气井在合理的工艺制度下进行生产。为了保证油、气井能长期的正常生产还应当选择符合地层及井工作特性的工艺措施及装置。如油、气井的鑽开方法和井下结构。井身设备，地面装置，工作机械及开采方法等。为了清除油气井的水、砂、蜡及其它故障并儘力增加产量，还应当掌握各种先进、有效的修井方法、设备及增产措施。随着技术的进展及遵循合理利用资源的原则；目前既有可能，也有必要探讨提高油层采收率的方法及新技术方向。

解决上述一些问题的理论基础及方法，就构成本书讲述的内容。

第2节 学习本课程的目的与方法

应当强调指出，从事石油及天然气开采工业各岗位的人员，其共同目的是按社会主义建设总路线精神，又快又省地为生产更多更好的石油和天然气而奋斗。无论是地质勘探，鑽井，矿场机械，还是工业企业的经济计划人员从工作需要出发，必须在不同程度上掌握油、气田开发及开采的知识。

地质勘探是开发及开采工作的依据，地层和井的地质物理性质的研究是合理开发油、气田、制定井的工作制度，及进行地层和井生产动态分析的基础。掌握开发及开采知识，将使拟订的确保油、气田合理开发及开采的措施，更符合生产实际；并且通过对生产资料的分析，也有助于做出更接近实际的地质结论。

井是开发油、气资源的通路，鑽井的速度及质量直接影响合理开发措施的执行及油、气井的生产。明确开发及开采对鑽井工作的要求，进一步提高鑽井质量，是确保油、气田能否高速度、高质量投入开发的关键。

对矿场机械专业来说，随着开采生产技术的发展，对采油机械的设计、制造和维修提出了更高的要求。修井工作机械化和减轻繁重的体力劳动；设计和制造高压高排量的符合注水、压裂、注气的泵及压缩机，研究新的机械采油设备，提高现有设备的抗腐蚀、抗磨、抗压强度都需要掌握生产要求才有可能切合实际。

石油及天然气开采工业是大型的綜合企业，生产的組織管理、开发方案的经济分析，劳动生产率的提高、生产计划的制订及分析等经济工作等，都必须全面掌握油、气田开发及开采知识，才能确保经济计划的贯彻，节省原材料、设备和劳动力，有力的促进生产及組織生产。

由于油、气层性质及具体地区条件不同，因此应特别重视遵循及执行党的工业建设的各项方针政策，联系实际，灵活的应用所学习的油、气田开发及开采理论和方法。

“油、气田开发及开采”一课是一门综合性的包括技术基础理论和工艺技术的课程，和其它专业课和技术基础课程有着密切联系；故在学习本门课程时，需要有一定的地质学、水力学、地下水力学和物理化学等基础知识。

第3节 祖国石油及天然气工业发展概况

石油及天然气的发现、开采及利用，在我国有着光辉的历史。根据史籍记载，早在秦汉时，我国劳动人民就开始认识和发现了石油及天然气，在两千多年前汉代班固著“汉书”中就曾写道：“高奴县有洧水，肥可燃”。高奴就是今陕北延安一带的古地名。从晋、唐各代起，就已从甘肃酒泉、玉门、古龟兹国（今新疆库车一带）及古悦般国（今新

疆准噶尔盆地西部)各地,发现有可燃的“石漆”“石硫黄”等(瀝青及石油之类)的物质,並曾在經濟生活中作为車軸潤滑剂、藥物之用,甚至还作为战争中攻城御敌的工具。例如,宋朝沈括在“夢溪筆談”中曾談到用陝北石油焚燬制墨。明代“蜀中广記”的作者曹学佺也曾記載四川等地从井中采油的情况。著名医藥家李时珍的科学著作“本草綱目”中,也述及石油的产地、产状和医疗作用。这些都生动地說明了我国古代开采和利用石油資源的成就。

我国不仅是世界上最早凿井采取地下宝藏的国家,而且是利用天然气最早的国家。远在一千七百年前的东汉时代,我国最先鑽成了世界上第一口天然气井,并利用天然气来熬盐,比欧洲利用煤气点灯最早的国家——英国(1668年)还要早十几个世紀。我国又是第一个用管道輸送天然气的国家,不但历史上有管道輸气的記載,就是今天四川自流井一带还用竹管接成的管綫担負着輸气任务。远在没有鋼鉄、无縫鋼管、水泥、鑽探机的条件下,我国就創造发明了以竹木代替无縫鋼管作为防止地层塌陷和隔絕地下水的套管,以桐油石灰代替水泥补救井内岩层的塌陷,以竹木井架代替鋼骨井架。在没有地質科学精密仪器的古代,我国人民根据自己劳动的經驗,掌握了分析地質資料和了解岩层分布的本領,并創造发明了許多符合科学原理的工具和技术;例如制成各种灵便的打撈工具,并应用了測量井径、試气、堵漏等方法。这些生产技术的发明創造,对推动社会前进都起了积极的作用。我国古代石油及天然气开采和利用等方面的成就,确实是值得我們繼承和发揚的。

近百年来,首先是由于清代封建統治者的腐朽和殘酷剝削及帝国主义的侵略和掠夺;而后又由于官僚資產阶级与帝国主义的勾結,把我国变成了帝国主义石油产品的傾銷市場。法、德、日、英、美等帝国主义国家除了千方百計妄图攫取我国各地石油的勘探及开采权外,并散布我国“貧油”的謠言;都使我国石油及天然气工业长期处于落后的一穷二白的状况下。

在解放以前,我国石油及天然气开采基地寥寥无几,除了台湾的油、气田长期为日寇所霸佔外,抗日战争时期,1938年曾在苏联的援助下开发独山子油田,而后由于反动派的反苏反共政策,到1943年又陷于停頓;在这一阶段,值得提出的是1937年开始勘探老君庙油田,并于1941年投入生产,是我国当时产量最大、初具規模的一个油田。古老的延長油矿在紅軍长征到达延安以后,才开始获得新生,并且为抗日战争及解放战争做出了贡献。气田除古老的自流井构造外,只有巴县的石油沟等少数气田。

解放前,我国石油产量极少,1931年全国采油量仅为130吨,而进口石油則达107万吨。1947年我国进口石油約达200万吨,但是全国的年采油量却只有6万吨,仅佔进口油量的3%;从1907年到1948年的42年中間累积产油量也仅278万吨而已。解放前夕,在国民党反动統治下,由于英美帝国主义的傾銷掠夺政策及反动派的进一步投靠帝国主义国家,这些油气基地都几乎瀕于絕境,奄奄一息。

1949年全国解放后,在党和毛主席的正确领导下,在社会主义建設总路綫的光輝照耀下,同时由于苏联和其他兄弟国家的无私援助,我国的石油工业特别是石油及天然气的开采工业,有了飞速的发展。已經从无到有的建立起完整的石油工业体系。无论从地質勘探、鑽井、采油(气),儲运、炼制、人造石油、石油机械设备的制造及修理、气体的加工利用到科学研究、专业教育各部門,不但都有了发展生产的物质基础,更重要的是通过各种方式培养和壮大了一支发展石油工业所必須的队伍及技术力量。我国石油产量的

增长也非常迅速，从1950年到1956年七年中全国产油量达448万吨，相当于以往历史上42年累积产量的1.61倍。第一个五年计划的石油工业成就如下表所示：

第一个五年计划期间我国石油工业的发展成就

项 目	单 位	1952	1953	1954	1955	1956	平 均 年 增 长 率
原油产量	万 吨	43.6	62.2	78.9	96	120	28.1%
鑽井进尺	万 米	4.8	10.0	13.0	19.0	47.5	53%
劳动生产率	%	100	123	140	181	228	24.9%

在第二个五年计划期间，石油工业也和其他部门一样，连续三年的大跃进，提前两年完成第二个五年计划规定的原油生产指标，使我国石油工业也跨进了新的发展阶段。

目前，老君庙油田已改建和扩建成一个近代化的油田联合企业和培养人材的基地。油田从过去盲目的破坏性的开采转入了合理的开发；采用和创造了很多新的工艺技术，及注水、压裂等提高产量和采收率的先进措施。

解放后，我国石油工业的发展情景，充分证实了社会主义制度的无比优越性，体现出解放了的中国人民在党的领导下，正以无穷尽的潜力创造着光辉的业绩。

第一章 油 层 物 理 基 础

第 1 节 自然界的儲油（气）层

石油和天然气是聚集在油、气层 岩石顆粒之間的孔隙，縫隙及孔穴中。世界上絕大多數油、气田都是由沉积岩构成的，如砂层、砂岩、裂縫性及孔穴性石灰岩和白云岩等都是。有时在火成岩的裂縫及孔隙里会发现石油，但是这种蘊藏一般沒有工业开采价值。

儲集层是由尺寸較小而又相互連通的孔隙或裂縫所构成。这些孔隙和裂縫不仅可以儲存油、气，同时也是油、气流向井中的通道。但对于泥岩及頁岩，由于它們孔道断面非常小，液、气体由于受到岩石分子力的作用而失去流动性，这种岩层实际上是不可渗透的。因此不能做为油、气儲集层，只能作为油、气层的复盖层。

油、气藏一般位于多孔岩层組成的构造的頂部，并且被上述不渗透岩层所包围，这就是所謂“圈閉”。天然的油、气儲集层（圈閉）按成因及几何形状來說是极不相同的，它們的詳細分类在石油及天然气地質学課程中研究。最簡單的构造圈閉是穹窿背斜。

根据构造条件以及地下油、气数量的比例和油、气的相态，可分为：純气藏；凝析气藏；油气藏（带有气頂的油藏）以及气体已溶于油内而沒有气頂的油藏。

油、气、水在油藏内是按重力分布的。气体位于上部，油、水位于构造下部。

虽然能够含油、含气部分的生产中得到完全不含水的油和气，但是在这部分地层孔隙中并不只是被油和气所占据。除了油和气以外还会有水，这是在油、气藏形成时残留在地层中的水。前面已經提到，絕大部分油、气儲集层的岩石都是沉积岩；而油、气层中的石油和天然气是在其他地层（生油层）中生成以后，逐漸运移过来聚集在目前开采的儲油、气层中的。在运移过程中，油、气不可能將儲油层孔隙中的水全部替出。原因是含油岩石孔隙結構复杂，且大部分是亲水的；因此仍有部份水以滴状残存油层内細小的孔隙中，或以薄膜状存在于岩石顆粒接触及表面上。这些水通称束縛水。

甚至在油、气藏开采过程中所形成的巨大压力梯度下，大部分束縛水并不流动。束縛水的含量变化范围很大，由佔孔隙体积的10%到70%不等；一般是在20—30%左右。应当指出，岩层的孔道愈小，粘土物質含量愈多，則束縛水含量愈大。束縛水的含量直接关系到油田的儲量。岩层束縛水的含量，可在实验室中通过对油层岩心直接测定，或用电测等地球物理方法测出。

在油藏中，含气区（气頂），含油区和含水区（边水或底水）之間并没有一个清晰的界面。由于受到毛细管力的作用，形成了一个油、水及一个油、气过渡带。束縛水的含量，过渡带的厚度主要取决于油、气、水的性質，油层孔隙直径的大小及粘土含量的多寡，如果孔隙直径較小，粘土含量較多，过渡带的厚度就会大些。通常过渡带的厚度可达到3—5米以上。油藏中油、气、水饱和度沿地层厚度的变化特征如图1—1所示。

儲油层内油、气、水及油层本身，都处于一定压力之下，这个压力称为地层压力。

地层压力是一个很重要的参数，它表征了地层能量的大小，并影响流体在地下的性質及气藏内气体的儲量。

油田未开发前的地层压力称作原始地层压力。实践证明：原始地层压力的大小与油藏的深度有关。一般接近于静水柱压力，通常可用下式近似估算：

$$P_{yD} = (0.8-1.2) \frac{H_D}{10} \quad (1-1)$$

式中 P_{yD} ——原始地层压力，大气压；

H_D ——油层埋藏深度，米。

由于气体的比重很小，所以在气藏上各处的地层压力的差别很小，但在油藏内，尤其是当倾角很大时，油藏各部份的地层压力并不相同：翼部最大而顶部最小，如图 1—2 所示：

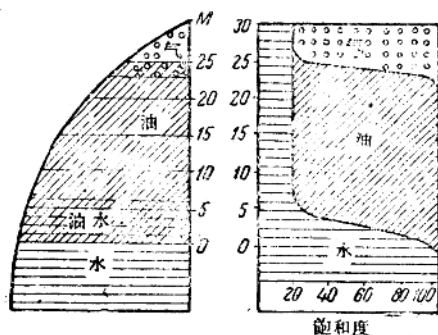


图 1—1 油藏中油、气、水的分布图

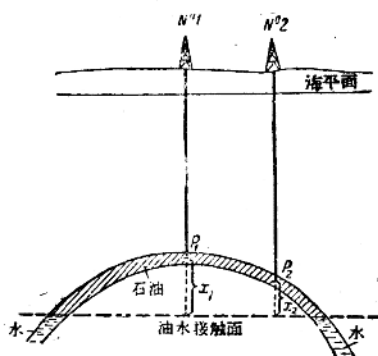


图 1—2

因为油藏中各处的压力随其深度而改变，如果采用直接测得的地层压力来研究整个油藏在开发过程中压力的变化将是十分麻烦的事，因此常把油藏中各点实测的地层压力值折算到某一平面上（通常是海平面或原始油水接触面）。经过折算后的各点压力称为折算地层压力。

在油田开采以前，油层中各点的折算地层压力是一样的。在开采一段时期后，油田各点的折算压力将发生变化。根据这种变化，可以了解油田开发的状况。

图 1—2 中 1 井和 2 井的实测地层压力是 P_1 和 P_2 ，则折合到原始油水接触面的折算压力为：

$$P_{zh.D.1} = P_1 + \frac{x_1 r}{10} \quad (1-2)$$

$$P_{zh.D.2} = P_2 + \frac{x_2 r}{10} \quad (1-3)$$

式中 x_1 和 x_2 ——自井底到油水接触面的距离，米；

r ——地层液体的比重；

$P_{zh.D}$ ——折算地层压力，大气压。

地层压力可用不同结构的井底压力计测量。在油矿上广泛使用的是自动记录深井压力

計。如图1—3所示。

压力計的主要部件是螺旋狀的液压弹簧管—包氏管3，其下端与弹簧夹持器及传压器1牢固连接。在弹簧管上部自由端紧连着一个笔尖，当弹簧包氏管受压扭轉时，笔尖將作水平旋轉，將压力綫畫在紧卡在托架2內的卡片紙上。托架可沿行程螺桿在垂直方向移动。螺桿是由鐘表机构4带着轉动的。在压力計的最下部是装最大溫度計5的小室。外界压力

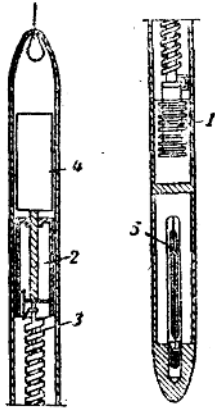


图 1—3 MIT型自动记录深井压力計示意图

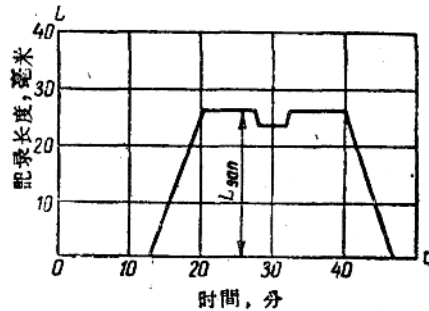


图 1—4 压力計卡片

作用在传压器1上，通过毛細管传给包氏管。当压力升高时弹簧管伸长，压力下降时就收缩。因此当压力計在井中下放，停止和上起時間内，笔尖就在压力計卡片上画出相应于压力上升、稳定和下降的曲线，曲线的形状如图1—4所示。将这个卡片图轉90°就是它在压力計中的状态。

所画的长度L是按一定比例表示的某一深度的最大压力。所画的阶梯相当于按规定从井底上起压力計时的记录。压力計是用装在汽車上的小絞車以直径1.6到2毫米的鋼絲通过井口盘根盒下放到井里的(图1—5)。这种压力計的测量范围在300大气压以内，最大誤差是0.2%。

随着地层埋藏深度的增加，地层的温度不断增高。这个增长值可以用地温級率表示，也就是温度每增加1℃所增加的深度。平均說来深度每增34米温度增加1℃，但世界上各个油田以及各油区的地温級率是不相同的。

有时亦利用地温梯度的数值，它是表示每深入地下100米的温度(℃)变化。

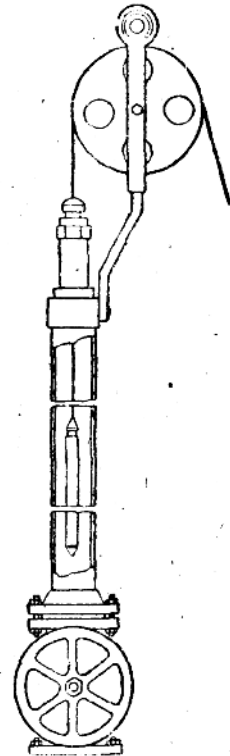


图 1—5 井口导輪及盘根盒(防噴管)

由于油层中油、气、水是处在较高的压力和温度下，所以它们的性质和在地面大气条件下有很大差别。为了掌握油、气、水在地层中的流动规律，我们就必须了解流体和岩石的物理性质，特别是在地层条件下的性质。岩石的物理性质包括：孔隙性；渗透性；压缩性；岩石的颗粒组成；岩层中的油、气、饱和度；比面及岩层中的碳酸盐含量。油、气、水的物理性质包括：油、气、水的组分、粘度、比重、气体溶解度及表面性质等。

第2节 油(气)层岩石的物理性质

一、岩石的孔隙性

油、气储存在岩石孔隙中并在其中流动。因此，岩石的孔隙性及其连通情况关系到油、气储量及油、气在孔隙中流动所发生的一切过程，通常用孔隙率来表示岩石中孔隙体积所占的比例。

岩石总孔隙率（或绝对孔隙率） m 是指岩石孔隙的总体积 V_K 与岩石视体积 V_0 的比值。

即：

$$m = \frac{V_K}{V_0} \quad (1-4)$$

岩石的孔隙率以小数或百分比来表示。

总孔隙率除用来估计石油、天然气的绝对储量外，可做为对比不同油、气层或同一层各个区域的岩性的一种参数。

地下岩石中流体流动的特性在很大程度上与孔道的结构及大小有关。油层孔道依其大小可分为三类：

- 1) 超毛细管孔道——孔道直径大于0.5毫米；
- 2) 毛细管孔道——孔道直径介于0.5—0.0002毫米之间；
- 3) 微毛细管孔道——孔道直径小于0.0002毫米。

油、气、水在超毛细管孔道中的运动是很自由的，和在一般的管道内的流动相似。液、气沿着毛细管孔道运动时，毛细管力的影响很大，有时必须在建立足以克服毛细管阻力的压差，液体才能流动。而在微毛细管孔道中，由于孔道壁之间的距离非常小，其中的液体被岩石分子力紧紧地拉住，在自然条件可能造成的压差下，液体是不能流动的。

除了微毛细管孔道以外，在隔绝的孔道里的液体也是不能流动的。

在自然条件下，当有压差存在时，不是所有的孔隙都能让流体渗入，因而引出有效孔隙率的概念。有效孔隙率 m_{ys} 就是流体能够渗入的岩石有效孔隙体积 V_{ys} 与其视体积 V_0 的比值：

$$m_{ys} = \frac{V_{ys}}{V_0} \quad (1-5)$$

在油矿上，为了表征含油岩石的孔隙特性，还应用流动孔隙率的概念。

流动孔隙率 m_{LD} ，当岩石孔隙完全被液体充满时，其中能够流动的液体体积 V_{LD} 与岩石视体积 V_0 的比值：

$$m_{LD} = \frac{V_{LD}}{V_0} \quad (1-6)$$

表 1—1

岩石名称	以%表示的孔隙率	
	从	到
頁岩	0.54	1.4
泥岩	6	50
砂层	6	52
砂岩	3.5	29
石灰岩及白云岩	0.65	33

它和有效孔隙率不同，它不仅不考虑无效的孔隙，而且也不考虑有效孔隙中岩石颗粒接触处及表面被不流动的液膜占据的体积。因此流动孔隙率不仅与岩石性质有关，还与地层内液体的物理化学性质及造成液体流动的压力梯度有关。

对于气田来说，由于气体分子相互间的作用很微弱，所以甚至在微毛细管孔隙中它也能自由的流动。因此岩石的全部孔隙中除去水的或油（某些情况下）的体积和闭塞孔隙的体积外，就是气层岩石的有效流动孔隙

体积。

天然岩层的孔隙率与颗粒直径组成及其不均性、胶结物、盐类的沉积物等等有关，不同岩石的孔隙率变化范围如表 1—1 所示：

有工业价值的储油层的孔隙率一般在这些范围内：

砂层	25%
砂岩	10%—30%
碳酸盐岩石	10%—25%

岩石的孔隙率沿水平方向和垂直方向可以有很大的变化。为了确定岩石中油、气的储量以及进行油、气田开发的水动力学计算中，需要知道油层平均孔隙率的大小。

如果已知油层是由几个厚度为 H_1 、 H_2 H_n 相应的孔隙率为 m_1 、 m_2 m_n 的夹层组成，则此区域油层的平均孔隙率为：

$$m_D = \frac{H_1 m_1 + H_2 m_2 + \dots + H_n m_n}{H_1 + H_2 + \dots + H_n} = \sum_{i=1}^n \frac{H_i m_i}{H_i} \quad (1-7)$$

二、岩石的颗粒（机械）组成

岩石的机械分析就是测定岩石中各种不同大小颗粒的含量。

颗粒组成是一个十分重要的参数，多孔介质的许多重要的性质如孔隙率、渗透率、比面等都与它有关。

机械分析是研究沉积岩成因尤其是油、气田成因的资料之一。根据岩石的颗粒组成可以判断地层沉积的地质和古地理条件。

在油、气田开采过程中，根据机械分析可以选择油井井底防砂装置、确定合理冲洗砂堵的方式等等。

大部份含油岩石主要是由 1 至 0.01 毫米的颗粒组成的。矿场上岩层的机械组成通常是用筛析的方法来确定的。最大的筛眼尺寸是 1.651 毫米。机械组成是以每种大小的砂粒在总量中所占的重量百分比来表示。

为了更详细地分析通过最小筛子后的砂粒，可用沉降分析法。这种方法的原理是根据斯托克定律测定不同大小的砂粒在液体中的沉降速度。

所求得的岩石颗粒组成结果可用表格的形式以及重量累积百分数曲线和各种大小岩石颗粒分布图来表示。

圖1—6是顆粒組成的重量累積百分數曲線。縱軸是累積重量百分數，橫軸是顆粒直徑的對數值。

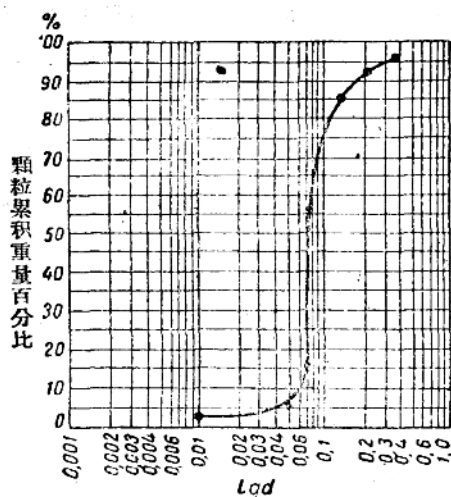


圖 1—6 累積重量曲線

比值 $\frac{d_{60}}{d_{10}}$ 表示砂層的不均勻係數。

這裡 d_{60} 是累積重量為 60% 的顆粒直徑， d_{10} 是累積重量為 10% 的顆粒直徑。一般油、氣層岩石的不均勻係數在 1.1 至 20 之間。

三、岩石的滲透率

油層的滲透性也就是岩石允許流体通過的能力。它是表征油、氣田工業價值的一個重要參數。

在開發油、氣田時，多孔介質內的油、氣、水或是它們的混合物將發生流動。但是同一岩石對於不同的流体，有着不同的滲透率。因此不僅要確定表征岩石性質的滲透率，而且還要確定那些

能同時表征流體的物理化學性質及其運動特征的滲透率。因而就相應地引出了絕對滲透率、有效（相）滲透率、相對滲透率的概念。

絕對滲透率是當只有單相存在（氣體或單一液體）和在孔隙中流動，並且液體和岩石之間沒有物理化學作用時多孔介質的滲透率。絕對滲透率只表明岩石的性質。實際上，因為流體的物理化學性質對岩石的滲透率值有影響，通常都把實驗室用氣體通過岩心所測得的滲透率作為岩石的絕對滲透率。

所謂有效（相）滲透率就是當岩石內有兩種以上的流体或成多相流動時，岩石對氣體或液體的滲透率。有效（相）滲透率不僅與岩石及流體的物理化學性質有關，還與其中液體或氣體的飽和度有關。

岩石有效（相）滲透率與絕對滲透率的比值稱為岩石的相對滲透率。

為了在數量上確定岩石的滲透率，可以用達西直線滲濾定律。根據這個定律，液體在多孔介質內的滲透速度與壓差成正比與粘度成反比：

$$V = \frac{Q}{F} = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (1-8)$$

式中 Q ——單位時間內通過岩石的體積流量；

V ——直線滲濾速度；

μ ——液體的動力粘度；

F ——滲濾面積；

L ——多孔介質長度；

Δp ——岩樣兩端的壓差；

k ——比例係數，即滲透率。

由式（1—8）得：

$$K = \frac{Q_{uL}}{F \Delta p} \quad (1-9)$$

如果采用气体来测渗透率则公式将改写为

$$k = \frac{\bar{Q}_{uL}}{F \Delta p} \quad (1-10)$$

式中 $\bar{Q}$ ——在沿岩样长度的平均压力为 P_p 下气体的体积流量。

实际上岩样的长度都较短。故平均压力为

$$P_p = \frac{p_1 + p_2}{2}$$

式中 p_1 及 p_2 分别为气体在岩样入口及出口处的压力。

假如气体通过岩样时的膨胀过程是等温的，则按波义尔—马略特定律可写成

$$\bar{Q} = \frac{2Q_0 p_0}{p_1 + p_2} \quad (1-11)$$

式中 Q_0 ——在大气压力 p_0 下气体的体积流量。

公式各参量的因次在公制时如下：

$[Q]$ ——厘米³/秒；

$[\mu]$ ——泊=达因秒/厘米²；

$[L]$ ——厘米；

$[F]$ ——厘米²；

$[\Delta p]$ ——达因/厘米²。

因此，在 C、G、S 制中渗透率的因次是

$$\begin{aligned} k &= \frac{[Q][\mu][L]}{[F][\Delta p]} \\ &= \frac{\frac{\text{厘米}^3}{\text{秒}} \cdot \frac{\text{达因秒}}{\text{厘米}^2} \cdot \text{厘米}}{\text{厘米}^2 \cdot \frac{\text{达因}}{\text{厘米}^2}} \\ &= \text{厘米}^2 \end{aligned}$$

即渗透率具有面积的因次，其物理意义是：渗透率是表示流体在多孔介质渗透时当量的孔隙通道截面积的大小。

以 1 平方厘米作为渗透率的单位，在实际计算时太大；常把通过岩样在渗透面积为 1 平方厘米、长度为 1 厘米、压差为 1 大气压、液体粘度为 1 厘泊、流量为 1 立方厘米/秒时的渗透率作为多孔介质渗透率的单位。这个单位称为达西。通常是用它的千分之一即千分达西来表示油层渗透率。

因为 1 厘泊 = 0.01 泊；1 大气压 = 1013.3×10^3 达因/厘米²，因此

$$1 \text{ 达西} = \frac{1}{1013.3 \times 10^3} \approx 10^{-6} \text{ 厘米}^2$$

油层渗透率是不均一的，即使是同一油层也可能有很大的变化，根据渗透率的大小可以人为地将油层分成：低渗透性油层（低于100千分达西）；中等渗透性油层（100—500千分达西）；高渗透性油层（高于500千分达西的）。多数油气层的渗透率是几百千分达西。

含油岩石在各方向的渗透率也是不同的，通常岩层水平方向渗透率比垂直渗透率高。通常含粘土及含泥质的岩层其水平渗透率与垂直渗透率的差异更大。而未胶结的砂子的各个向渗透率是均一的。

碳酸盐质的油气层孔隙率不大，但其渗透率却很高，因为岩层中具有高渗透性的溶解裂缝或洞穴。根据计算，宽度为0.1毫米的裂缝的渗透率可达800达西以上；直径为0.1毫米的圆形孔道的渗透率可以达到300达西。因此流体在上述孔道中的流动规律与孔介质中是不同的。

实际油层中常为多相流动，岩层对各相的渗透率与它们的饱和度有关。

当存在二相流动时，岩层对气体和液体的相对渗透率与水饱和度的关系可用实验方法确定，如图4—7是砂层对水（右边的曲线）与对气（图中左边的曲线）的相对渗透率与水的饱和度的关系曲线。

当岩层存在油或油、水二相流动时，相对渗透率与另一相饱和度的关系与此相仿。如果岩石表面是亲水的，那么在油、水渗滤时，油相的曲线就相当于左面气体的曲线；当油、气渗滤时，油相的曲线则相当于右面水的曲线。

从曲线上可以看到：当岩石内含水饱和度低于20%时，岩层中的水以束缚水形式残存于地层中，在较小的压差下是不能流动的，但是它却降低孔道内液体流通面积，从而降低岩层对油的渗透能力。随着含水饱和度的增加，油的相对渗透率将继续下降，而水的相对渗透率则急剧增加。当含水饱和度达到30%时，油已经停止流动，只有水能渗滤了。

上述曲线关系定性地告诉我们：在油田开采过程，若油层过早遭受水淹或剧烈降低地层压力，使气体大量从油中分离出来，都将使岩层对油的相对渗透率降低导致油井减产和采收率的降低。

在岩层内更普遍的是存在油、气、水三相流动。这方面的实验结果说明当岩层内各相饱和度不同时，可以出现单相、两相、三相流动（如图1—8）。图中三角形诸顶点相当于三相中任一相饱和度为100%的情况；顶点的对边相当该相在岩层中的饱和度为零的情况。在三角形边平行的诸等分线代表相应相在岩层中的饱和度的变化（从0到100%）。图上划分出单相、两相和三相流动的区域。单阴影线的区域表示两相流动；双阴影线区域表示三相流动。

由图中曲线可以看出：当气体饱和度超过35%时，仅有气体流动；当气体饱和度小于10%，油饱和度小于23%，则只有水的流动；如含水量为20—30%时，气体饱和度为10—18%时，只有油渗滤。当油饱和度从23—50%，水33—64%，气14—30%时，出现三相流动；在其它条件下，则出现二相流动；当含水饱和度低于20%，则水就不能流动，油低于23%，则油不能流动，气低于18%时，则气就不能流动。

上述曲线是在不胶结的砂子中得到的，只能定性地说明问题。

最后应当指出的是：岩层的有效及相对渗透率不仅取决于岩层内各相饱和度，同时与流体的物理化学性质（粘度、表面张力等）也有着一定的关系。这些问题在最近一些科学研究著作中有专门论述。