



闵豫

编者按 作者闵豫同志是我国著名的石油地质学家。在大庆油田开发中，他为开创出中国注水开发油田的道路，做出了突出贡献。20世纪70年代末80年代初，他担任石油工业部副部长，负责全国油田开发生产工作，为奠定中国正规、科学开发油田作了开创性工作。

闵豫同志是中国石油学会创始人之一，生前十分关心石油科普工作。在他译完L·F·埃金斯的《油田开发实例——油藏和气藏》之后，于1981年初写了《油气田的开发和开采》一文。这篇短文虽然写于20多年前，但今天读来仍觉得有价值。原文涉及石油与石油用途、油藏与油田开发、油气地质研究、二次采油与油藏研究、三次采油、油气集输、油气藏评价、钻井工程、油气井生产测试及海上油田开发等内容。

本刊有幸获得闵豫同志尚未公开发表的系统介绍油气田开发与开采的科普文章，在他逝世四周年之际，予以发表，以缅怀这位油田开发大师对中国油田开发所作出的突出贡献。

文中小标题为编者后加

### 石油与石油用途

‘石油’一词的含意和应用范围并不确切。最初人们把自然界喷出的油状液体矿物称为石油，把可燃气体称为天然气，把固态可燃油质矿物称为沥青。随着对这些矿物的深入研究，认识到它们在成因上互有联系，在组成上均属烃类化合物，固之将它们统称为‘石油’。正如最近世界石油大会上提出，石油是包括自然界中地下存在的气态、液态、固态的烃类化合物为主的，并含有少量杂质的复杂混合物。这样，石油一词的含意与原先的内容已不相同。可是，在工业界日常应用中，往往仍然只指液态油矿物而言。

石油天然气是重要的能源。从石油中提炼出各种现代运输工具所需的燃料油品，提炼出机械工业广泛需要的各种润滑油品，提炼后剩下的沥青是公路和建筑的重要材料。由于石油燃烧时放出的能量比相同重量的标准煤要高50%，加上运输方便和污染程度较轻，在电力工业和其他工业部门中都利用更多的油

气代替煤炭作为燃料。天然气和液化气更是城市民用的优质燃料。近年来石油化学工业的发展，石油和天然气已成为化肥、纤维、塑料、橡胶以及其它化学品的原料。为此石油天然气已成为一种极其重要的经济矿物，在世界各国的经济发展中起着重要的作用。

在军事上，飞机、坦克、舰艇、火箭以及其它航天器，都需要大量的石油燃料。石油在现代化战争中极为重要，成为军事上重要的战略物资之一。

### 油藏与油田开发

石油具有如此重要的地位，使世界各国都重视加快油气的勘探和开采。二次世界大战以后的几十年内，随着石油工业和有关科学技术的发展，探明的油气储量和年度开采量猛增，石油天然气在世界能源构成中已超过煤炭而居首位。

到目前为止，尽管地下烃类化合物的来源、成因及其运移和聚集的机理，还没有完全认识，还有各种不同的学说和理论上的争论，但是已经发现和开发的三万多个油气田的实际资料已充分说明，原来分散着的油气，在地下岩层中由各种地质作用所形成的空隙系统中渗流，当遇到一定的遮挡条件时在各种形状的圈闭中聚集起来，从而形成富集程度不等的油气藏。地壳发生变动时，地下岩层形状、空隙分布、磁力场和温度场发生变化，其中所包含的油气聚集也相应地重新分布，使油气藏不断变化。一旦由于地质作用的原因，或者由于人们挖掘坑洞和钻击井孔，使地下含油气的空隙系统与地面相连通时，地下油气就能流出或喷出。

石油天然气可以在岩层空隙系统中流动的特性，是与所有其他矿藏不同的特点。人们正是利用了这个特点，发展了一系列与开采其他矿藏所不同的开采方法。不必开掘大直径的竖井和坑道，不必把人送到地下矿层中去开挖，只要建成直径较小的井，让油气流入井内或直接流出地面。由于采用这种方法，人们有可能去开采较深的、压力温度相当高的油气藏。目

前开采油气藏的最大深度已达到7000米。这种开采方法使得开采人员始终不能直接观察到和接触到油气藏，使得开采过程中的所有各种作业都通过几千米深的井眼去实施，使得油气田开发和建设的很大部分是地下工程，这些都大大增加了油气藏开采的复杂性和难度。开采人员运用各种下入井的仪器和工具去鉴别、测定和研究油气藏，去控制地下油气水各种流体的流动，去影响、改造油气藏和建设、维修各项地下工程。从而发展了一套独特的、技术难度较大的工艺技术，也发展了一套相应的油气田开发和开采的科学理论。

### 油气田地质研究

油气贮存在地下岩层的空隙中。不同的地质作用形成不同的空隙，包括组成岩石的矿物颗粒间和碎屑颗粒间的各种孔隙、岩石裂缝中的裂隙，以及溶蚀风化作用形成的洞隙，以前两者为主。孔隙一般与沉积作用有关而沿沉积层位分布，裂隙多半与构造形变有关而按构造形迹分布，洞隙往往与沉积间断和侵蚀面有关而分布，可是后期成岩作用又不同程度地改造着这些空隙的分布。空隙大小有较大差别。空隙中油气含量也有较大差别。确定含油气部分的空隙容积和特征，其中油气水分布和含油气饱和程度，以及油气藏的空间分布范围，是估算油气储量的依据。这是油气田地质研究的主要内容。

油气藏中的能量推动油气向井内流动。油气藏周围水体中具有地表水流补给条件下的静水源头，周围封闭性水体的弹性膨胀作用，油气藏本身在压力降落中的弹性膨胀，压力降落使溶解在油中的气体脱出时的膨胀，具体气顶时随压力降低过程气顶气的膨胀，以及重力排油作用，都是天然存在的驱动油气的能量。因而油气藏一旦被钻井钻开，油气流入井内，能量充足时可喷出井口，能量不足时只能流到一定高度，靠各种人工举升措施把油流采出地面。

## 二次采油与油藏研究

除了具有补给的边水驱动能量之外，其它各种天然能量都随着油气采出而消耗，使油藏压力很快降低，油井产能较快递减。油田产油量的高峰期很快过去，随之是产量的大幅度降低。直到开采结束时只能产出地下原油原始储量的10~20%。除了边水驱动可产出能量的30~40%或更多以外，地下剩有大部分的原油采不出来。针对这个情况，在四十年代内，发展了人工补充油藏能量的方法，用高压泵通过专门的井往油藏中注水或注气，可以继续驱动油流，使采收率提高到30~40%或更多，又可提高油藏压力使油井增加产能。这种方法往往在产量已经大幅度降低后采用，需要再次钻井和地面注入装置建设的第二次投资，可以获得第二个产量高峰，称之为二次采油。把原先靠天然能量开采的阶段称为一次采油。此后这种开采方法进而发展在油田开发早期甚至在开始开发时就注水注气，并保持油藏压力，大大加快了开采速度，增高油井产能，使采收率达到30~40%或更多。在油藏地质及物理特征有利的条件下，可采出50%以上，显著地改善了开采效果。

无论孔隙、裂隙和洞隙分布都是不均匀的，空隙系统在空间的分布是极复杂的。在不同的孔隙结构中，注入的驱替流体的流动也是很不均匀的。为了使二次采油达到最佳效果，提高采收率，必须尽可能使驱替流体在油藏的平面上和垂向上都达到最大的驱替程度。这就大大提高了对油藏进行深入的地质和油藏工程研究的要求。从而发展了运用沉积相、构造力学和成岩作用理论研究空隙系统的宏观分布和微观结构的方法。发展了研究空隙结构中流体分布、流动特征及空隙壁表面物理化学特性的影响的油层物理学理论和方法，发展了详细的油藏地质模型以及应用油藏工程学方法进行开采数字模拟的新技术，可以研究油藏各种开采方法的全过程。综合以上各方面的成果，研究最有效的井网密度和注采系统的布置，取得最高的采收率。此外，应用高分子聚合物来提高注入水的粘度，减小注入水和被驱替原油的粘度的差别，也可提高驱替程度从而提高采收率。

即使如此，由于地下空隙系统是极其分散的微小孔隙的系统，极大的表面积导致相当大的界面张力，加上孔隙中油气水三相流动时，水饱和度高的孔道中严重影响着油流的渗透能力。所以注气或注水开采之后，油藏中还剩下几乎大于一半的原油储量不能采出。

## 三次采油

为了进一步采出剩余原油，近年来各国普遍开展三次采油的研究和试验。为使界面张力尽可能降低，发展了胶束微乳液驱油、混相驱油等化学驱开采方法。针对注入剂来源供应的可能性，可用CO<sub>2</sub>混相、液化气混相、高压干气混相或轻烃混相。并加上扩大驱扫体积的保护段塞保证混相驱段塞的有效推进。对于粘度很大的稠油，发展了注高压蒸汽驱油和油层地下燃烧等热采方法。热采法已投入工业性应用，采收率可以达到50~60%或更高。其他各种方法尚在试验阶段。不少新油田在开始时就应用这些新的采油方法，因此“三次采油方法”这个名词也并不恰当，又称为“强化开采法”或“提高采收率方法”。

### 油气集输

油气采出地面后，通过集输系统使油气集中，并经过一系列处理装置进行油气分离、脱水、计量和输存、外输。必要时进行脱硫和脱盐处理。为了适应炼油和石油化学工业原料的质量要求，进而将甲烷、乙烷、丙丁烷、轻烃、凝析油、原油分别开来后外输。对这种不同组成和特征的原油也要分储分输，可炼制成不同的石油产品。二三次采油所用的驱油流体，随着原油采出后，也要进行分离回收净化处理，以便重新使用，即节省费用，又防止环境污染。

### 油气藏评价

油气藏的规模大小，产能高低，埋藏深度和储层性质有很大差别。有些低产低储和废的深层或中深层油藏，往往因经济收益差而暂时列为无工业价值的储量。因之在第一口探井发现油气层之后，必须钻一批评价井对油气藏进行全面研究和可行性评价，才能决定是否投入开发。由于初期少数井的资料，难以预测井间地质中的变化，所以难以全面认识油气藏的特征。油气藏越是复杂的，预计情况对实际情况的差别越大。为搞好油气藏评价，发展了一套新的工艺和技术。地震地层学原理和三维地震勘查方法研究地下储层的变化，测井新方法和岩心沉积构造描述相结合研究沉积特征，并根据沉积相成因与形态分布的联系来推测井间储层的宏观分布，从沉积相与结构特征推测空隙系统的微观变化趋势。最新发展的井下地层测验是对油气藏分层测试，并用试井理论解释井眼周围储层性质的变化；所有这些都大大提高了对油气藏评价的精度。

### 钻井工程

为了保证油气藏在开发后正常地采油，必须具有一套先进的开发技术。其中首要的是钻井工程技术，建成高质量的

长期耐用的油气井及各种注入井是确保油气藏正常采油的关键。钻凿较大的井眼，对于保证较大的原油渗滤面积和允许井内各种作业工具的下井活动，具有有利条件。然而切削井眼岩石体积增大就减慢了钻速，下入套管并用水泥固结可使井壁牢固耐用。然而需要扩大油层暴露面积以利于油井高产，钻进中为安全顺利作业必须用高比重泥浆压住高压油气层，然而泥浆滤失水量和粘土颗粒对油层孔道的污染堵塞是对油层严重的危害。这些矛盾的合理解决，是钻井工程学中的关键内容。

### 油气井生产测试

油气井在生产过程中，要用井下仪器测定分层油气水流量和注入量，掌握和控制各层中流体运动和压力温度变化状况，对致密储层进行水力压裂或各种酸处理等增加产能的改造措施，在井下进行封堵水层，修理井下出砂堵塞等作业，在油流不能喷出井口时，用各种井下泵或气举等办法把井内油流举出井口。这些都是采油工程学的内容。

### 海上油田开采

海上油气田开发和开采，与陆地上的油气田没有很大的不同。只是建造采油平台的工程耗资要大得多，而且采油平台的设计，要求对油气田范围及研究评价工作要更加重视和认真，必须准确地确定平台位置和开发井数。因为在平台建造之后进行钻井开发时，对开发井数井位和平台地点都已难以改变。如果对地下油藏认识不清或推断错误，就会造成较大的损失。为此要特别重视在评价井中尽可能应用最新技术来测定油层的各项参数，作出全面的研究。另外，海底采油井口，海底输油气管线或海上输油装置都有其特殊性，技术上更为复杂，保证油气正常采出并输送到各个地区。目前海上油气田开采的最大水深已超过200米。海上采油量已达到世界总采油量的20%左右。

我国发现和利用油气的历史悠久。世界上近代石油工业是从十九世纪五十年代前后发展起来的，至今只有一百二十多年的历史，石油天然气开采技术和科学理论有了相当大的发展。当今世界上还有不少地区尚未勘探或充分勘探，深层及海洋深水部分的油气勘探刚刚开始不久，还会发现更多的油气藏提供开采。已开发的油气藏中应用三次采油方法可以开采的原油数量也是相当大的。这些都预示着石油天然气开发和开采的科学技术将会有更大的发展，现代科学技术成就的应用，定能把它推进到更高的水平。