



石油高等院校特色教材

现代完井技术

刘瑞文 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

资助项目

石油高等院校特色教材

现代完井技术

刘瑞文 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统阐述了完井工程基础、油气井完井方法、分支井与膨胀管技术、射孔、地层测试、油气井防砂、现代固井技术和套管的损坏及修复等内容，并介绍了国内外新型的完井方法和完井工具。

本书内容简练，可作为本科及高职石油工程专业的教材，也可作为油田企业培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代完井技术 / 刘瑞文主编.

北京: 石油工业出版社, 2010. 8

石油高等院校特色教材

ISBN 978-7-5021-7925-0

I. 现…

II. 刘…

III. 完井—高等学校—教材

IV. TE257

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 146908 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523579 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京华正印刷有限公司

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 10.25

字数: 258 千字

定价: 16.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

完井是衔接钻井和采油而又相对独立的工程，完井方式的优劣直接关系到油气井的长期稳产、高产和油田的整体开发效益。完井不是孤立的工艺技术，它是包括地质、油藏、钻井、采油、电子、机械等工程的一项系统工程。在油田开发方案的制订阶段，应根据相关资料，科学优化完井方案，以达到最优的开采效果。

随着科学技术的不断进步，与完井相关的新理论、新工艺及新型完井工具不断涌现，并在油田得到了广泛应用，加快了由传统的完井工艺向现代完井技术的转变。

为培养石油工程专业学生的创新能力，适应现场对学生专业知识的要求，在参阅国内外最新研究成果和相关资料的基础上，编写了此教材。教材初稿完成后，在石油工程专业“现代完井技术”课程中进行了试用，并进行了多次修改。

全书共分8章，包括完井工程基础、油气井完井方法、分支井与膨胀管技术、射孔、地层测试、油气井防砂、现代固井技术、套管的损坏与修复等和完井工程相关的内容，并介绍了国内外新型的完井方法和完井工具。

本书编写过程中，管志川、步玉环、王瑞和等教授对书稿进行了全面审阅，并提出了许多宝贵意见和建议。书中参考和吸收了万仁溥主编的《现代完井工程》，张均、余可让主编的《海上油气田完井手册》，步玉环、王德新主编的《完井与井下作业》，陈庭根、管志川主编的《钻井工程理论与技术》等书籍的内容，收集和整理了有关专家、学者发表的相关资料，在此向他（她）们表示衷心感谢！在石油教材出版基金的评审过程中，兄弟院校的老师提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中可能存在不当和错误之处，恳请广大读者批评指正。

刘瑞文

2010年5月于中国石油大学（华东）

目 录

第 1 章 完井工程基础	1
1.1 油气藏类型及储层流体特性	1
1.2 油气藏的岩石类型及物性参数	5
1.3 完井所需资料收集与完井设计	8
1.4 岩心分析及油气层敏感性评价	10
思考题	12
第 2 章 油气井完井方法	13
2.1 完井的井底结构	13
2.2 直井完井方式	15
2.3 水平井完井方式	25
2.4 水平井常规完井方式的不足及改进措施	33
2.5 完井方式的选择	37
思考题	41
第 3 章 分支井与膨胀管技术	42
3.1 分支井完井	42
3.2 膨胀管技术	47
3.3 智能完井技术	52
思考题	54
第 4 章 射孔	55
4.1 射孔器	55
4.2 射孔工艺	60
4.3 射孔产生的污染及对套管和水泥环的影响	66
4.4 射孔参数与油气井产能的关系	68
思考题	71
第 5 章 地层测试	72
5.1 地层测试的基本原理及分类	72
5.2 测试工具类型及测试程序	75
5.3 高压气井的测试	85
5.4 海洋深水测试	86
思考题	91
第 6 章 油气井防砂	92
6.1 油气井出砂的类型及原因	92
6.2 出砂的预测方法	95
6.3 地层砂的粒径分析	96
6.4 常用的防砂方法	98

第 1 章 完井工程基础

完井是衔接钻井和采油而又相对独立的工程，是从钻开油层开始，到下套管注水泥固井、射孔、下生产管柱、排液，直至投产的系统工程。完井的目的是建立生产层和井眼之间的美好连通，并能使油气井长期稳产、高产。油气藏类型、储层的渗流特征、岩石的力学性质和储层内的流体性质与完井工程密切相关，是选择完井方式和防止油层损害的理论依据。

1.1 油气藏类型及储层流体特性

1.1.1 油气藏的构造类型

油气藏按几何形态可分为块状、层状、断块和透镜体油气藏等几大类。

(1) 块状油气藏

块状油气藏包括构造突起油气藏、侵蚀突起油气藏和生物成因突起油气藏。这类油气藏的油层有效厚度大（大于 10m），有气顶、底水，油气藏具有统一的水动力系统和良好的连通性，底水具有一定的补给能力。在选择完井方式时，要考虑其有无气顶、底水，井眼是否稳定，是否出砂等。

(2) 层状油气藏

层状油气藏多属背斜圈闭，构造完整，具有统一的水油界面。油层在纵向剖面上分层性好，层数多。各单层的有效厚度小，单层厚度 5~10m 为厚层状，1~5m 为中厚层状，小于 1m 为薄层状，层间渗透率可能差异较大。这类油气藏的边水驱动能量较弱，在注水开发过程中应充分应用分层注水、分层压裂、分层堵水等工艺调整注采剖面，提高注水效率，故一般采用射孔完井方式。我国大庆萨尔图油田、胜利胜坨油田、长庆马岭油田均属此类油气藏。

(3) 断块油气藏

这类油气藏断裂十分发育，构造被切割成为许多大小不等的断块。有些断块面积小于 0.5km²，纵向上含油层系多，含油井段长，每个断块甚至同一断块内，不同油层不但有不同的油水界面，而且油气的富集程度、油层的物理性质、天然驱动能量的大小差异都可能较大。其中封闭型的断块，初期依靠弹性能量开采，后期宜采用选择性的点状注水。开启型的断块宜采用边缘或边外注水。由于这类油气藏油层层系多，层间差异大，一般都采用射孔完井方式。我国胜利东辛油田、中原文明寨油田均属此类油藏。

(4) 透镜体油气藏

砂体几何形态的地质描述一般以长宽比划分，长宽比小于或等于 3:1 的砂体称为透镜体，透镜体呈零星分布，大面积为尖灭区。透镜体相互交错叠合时，含油井段纵向上就出现

多个油层。

1.1.2 油气藏的储、渗类型

按照油气储集空间和流体流动主要通道的不同，可将油气藏划分为下述几种类型。

(1) 孔隙型油气藏

孔隙型油气藏以粒间孔隙为油气存储空间和渗流通道，故也称为孔隙性渗流。砂岩储油层、砾岩储油层、生物碎屑岩储油层均属于此类。

(2) 裂缝型油气藏

裂缝型油气藏的裂缝既是主要的储油空间又是渗流通道，称为裂缝性渗流。此类油气藏中可能不存在原生孔隙或有孔隙而不连通、不渗透。碳酸盐岩储油层、泥页岩储油层都可能形成这类油气藏。

(3) 裂缝—孔隙型油气藏

裂缝—孔隙型油气藏以粒间孔隙为主要储油空间，以裂缝为主要渗流通道，称为双重介质渗流，其裂缝往往延伸较远而孔隙渗透率却很低。我国任丘的碳酸盐岩油田、美国的斯普拉柏雷油田均属此类油气藏。

(4) 孔隙—裂缝型油气藏

孔隙—裂缝型油气藏的粒间孔隙和裂缝都是储油空间，又都是渗流通道，也称为双重介质渗流，其裂缝发育而延伸不远，油层孔隙度较低。

(5) 洞隙型油气藏

洞隙型油气藏的溶洞、孔洞、孔隙和裂缝既是储油空间，又是渗流通道。储油层均属可溶性盐类沉积层，基本上没有原生孔隙，只有后生孔隙。

1.1.3 储层流体的性质

储层中的流体充填于岩石的孔隙或裂缝中，包括油、气、水三大类。研究流体性质对于制订合理的开发方案、油水井工作制度、完井设计及增产措施等均具有重要意义。

(1) 原油的特性参数

原油主要由碳、氢两种元素组成，主要化合物为烷烃、环烷烃、芳香烃等烃类。除上述烃类外，在原油中一般会含有其他化合物。不同地区的原油其物理和化学性质变化相当大。原油的重要物理特性参数包括密度、粘度、凝点、溶解性和原油的含蜡量等。

1) 密度 (Density)。密度是单位体积内所含物质的质量，以 ρ 表示，单位为 g/cm^3 。常压下在温度为 20°C 与 4°C 纯水的相对密度被规定为石油和液体石油产品的标准密度，以 D_{20}^{20} 表示。

美国常用 API 度表示石油的密度，换算关系如下：

$$\text{API 度} = \frac{141.5}{60^\circ\text{F} (15.6^\circ\text{C}) \text{ 时的密度}} - 131.5$$

随着密度增加，API 度反而减小。

2) 粘度 (Viscosity)。粘度是指液体 (或气体) 分子之间做相对运动时所产生的摩擦力，粘度的单位是 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ，原油的粘度变化范围很宽。原油的粘度与其组分有关，相对分

子质量越大，油的粘度越大。

3) 凝点 (Codifying Point)。原油在一定条件下失去流动性的最高温度称为原油凝点。原油的含蜡量越高，原油的凝点就越高。

(2) 地层水

地层水是天然出现在岩石中，并且在钻井以前就已存在的原生水。原生水是至少在地质时期的大部分时间中已经同大气失去接触的化石水。在大多数的油藏中均含有水。

在油藏中含有的水多半是有一定矿化度的水，含有各种可溶的无机和有机化合物，经常存在的主要元素是钠、钙、镁、氯、碳酸氢根和硫酸根。地层水的性质可用水的类型、矿化度、pH 值等表述。水的类型有氯化钙型、氯化镁型、硫酸盐型和重碳酸盐型等。

地层水的 pH 值受碳酸氢盐体系的控制，碳酸钙和铁的化合物的溶解度在很大程度上取决于 pH 值。pH 值越高，结垢趋势就越大；pH 值降低，结垢趋势减小，但腐蚀性增大。大多数油田水的 pH 值在 4~8 之间。

地层水的总矿化度（总溶解固体量）是指在给定已知体积的水中所溶解物质的总量。高矿化度水（如中原油田地层水矿化度达 $30 \times 10^4 \text{mg/L}$ ）腐蚀性强，套管损害严重，在生产过程中油管结盐常堵死油管。

阳离子中的 Ca^{2+} 可形成 CaCO_3 或 CaCO_3 垢， Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 也可形成硫酸盐垢。 Cl^- 含量高表明腐蚀性大。完井的生产管柱应考虑防垢、防腐的问题。

地层水与油、气、岩石或矿物共生，具有相同或相似的演化历史，因此，在石油勘探开发中，水分析资料具有重要的价值，其应用范围有：

- 1) 化学组成分析，可帮助判别油井出水来源。
- 2) 油田注水开发，根据油层水的性质选择注入水。
- 3) 测地层水电阻率，求取油气层的含水饱和度。
- 4) 根据溶解在水中的有机质和无机盐的分析，判断含油气性。
- 5) 判断结垢类型及趋势，以及与钻井液、完井液、压裂液、酸液的配伍性。

根据水中溶解盐类的不同组合，可将水型划分为四种基本类型，表 1-1 列出了地层水的划分标准。

表 1-1 原生水型的特性系数及分类

水 型	以“mg/L”为单位表示的浓度比		
	$\frac{\text{Na}^+}{\text{Cl}^-}$	$\frac{\text{Na}^+ - \text{Cl}^-}{\text{SO}_4^{2-}}$	$\frac{\text{Cl}^- - \text{Na}^+}{\text{Mg}^{2+}}$
氯化钙型	<1	<0	>1
氯化镁型	<1	<0	<1
重碳酸钠型	>1	>1	<0
硫酸钠型	>1	<1	<0

1.1.4 油气藏的分类

根据储层流体性质（粘度、密度）的不同一般把油气藏分为常规油藏、稠油油藏、高凝油油藏和天然气藏。

(1) 常规油藏 (Normal Oil Bed)

在油层温度下的脱气原油粘度小于 $50\text{mPa}\cdot\text{s}$ 时称为常规油藏。常规油藏一般原油含轻质成分多, 流动性较好, 开采相对容易。

(2) 稠油油藏 (Heavy Oil Bed)

在油层温度下的脱气原油粘度不小于 $50\text{mPa}\cdot\text{s}$ 时称为稠油油藏。稠油是沥青基原油, 我国通称稠油, 国际上通称重油。由于各国稠油成因不尽相同, 因而划分标准时也略有差异。我国和国际划分标准见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 我国稠油的分类

稠油分类		主要指标 粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$	辅助指标 相对密度	目前的开采方式
名称	级别			
普通稠油	I-1	$50^{\text{①}}\sim 150^{\text{①}}$	>0.9200	常规或注蒸汽
	I-2	$150^{\text{①}}\sim 10000$	>0.9200	注蒸汽
特稠油	II	$10000\sim 50000$	>0.9500	注蒸汽
超稠油 (天然沥青)	III	>50000	>0.9800	注蒸汽

注: ①指油层条件下粘度, 其他指油层温度下脱气原油粘度。

普通稠油中的 I-1 类大多可用注水或稠油冷采技术进行开发, I-2 类应用注蒸汽开发或稠油冷采技术开发。特、超稠油一般必须采用注蒸汽开发。例如, 辽河、新疆和胜利的某些特、超稠油油藏采用的都是注蒸汽开发。

由联合国训练研究署 (UNITAR) 推荐的重质原油及沥青分类标准见表 1-3。

表 1-3 UNITAR 推荐的重质原油及沥青分类标准

分类	第一指标	第二指标	
	粘度 ^① , $\text{mPa}\cdot\text{s}$	密度 (60°F), g/cm^3	API 度 (60°F)
重油	$100\sim 10000$	$0.934\sim 1.0$	$20\sim 10$
沥青	>10000	>1.0	<10

注: ①指在油层温度下的脱气原油粘度。

我国的稠油资源相当丰富, 约占石油资源的 20%。已探明的稠油资源主要分布在新疆、辽河、胜利和渤海湾地区。稠油油藏的油层大多胶结疏松, 油层易出砂。目前, 我国稠油油藏主要采取注蒸汽等热采方式, 但普遍存在着出砂、气窜和成本高的问题。同时, 由于油层薄、厚度比低或者原油粘度太高, 仍有相当数量的稠油资源无法投入开发, 严重地制约着我国的稠油开发。

(3) 高凝油油藏 (High Solidifying Oil Bed)

通常把凝点在 40°C 以上, 含蜡量高的原油称为高凝油。高凝油为蜡基原油。我国原油凝点大于 25°C 的约占 90%, 其中 15% 大于 30°C , 还有不少凝点大于 40°C 。某些油田的原油凝点高达 60°C 以上。高凝油油田的开采关键是原油的流温必须高于凝点, 才能维持正常生产, 一般需要利用高温或化学降凝方法进行开采和输送。

(4) 天然气藏 (Natural Gas Bed)

天然气是存在于地下岩石储集层中以烃为主体的混合气体的统称, 包括油田气、气田气、煤层气、泥火山气和生物生成气等。天然气的主要成分是甲烷, 通常占 85%~95%;

其次为乙烷、丙烷、丁烷、戊烷等和较重的烃类。非烃气体包括 N_2 、 CO_2 、 H_2S 、He 气等。天然气在油田呈几种状态存在，包括伴随原油产出的溶解气、气顶产出的游离气和纯天然气藏。

硫化氢是天然气的常见成分。当含有一定量的 H_2S 和 CO_2 酸性气体时，它会危及操作人员的安全，对油、套管防腐设计、井口装置、天然气处理及输送都应有特殊的要求。

由于环保对清洁能源需求的加大，加之受高油价的影响，天然气产业已成为一个新的经济增长点，天然气在能源需求总量中所占比重将不断增加。

由于天然气藏的高压、高产、腐蚀和有毒性气体的存在等特点，对天然气藏的完井提出了更高的要求。目前对高压、高产和含有 H_2S 的裂缝型气层的开发还有许多问题需要研究。

以上介绍了油气藏类型和储层流体的特点，它们对完井方式有直接的影响，但并不是选择完井方式的唯一依据，还必须综合考虑油层特性、开采方式等多方面条件。油层特性主要包括油层岩性、油层渗透率及层间渗透率的差异、油层压力及层间压力的差异、原油性质及层间原油性质的差异，以及有无气顶、底水等。这些都是选择完井方式的重要依据。

1.2 油气藏的岩石类型及物性参数

油气藏岩石的类型、矿物组成及物性参数是影响油田开发方案的重要因素，也是完井方式选择的重要依据。

1.2.1 油气藏的岩石类型

一般认为生油岩石是沉积岩，主要包括碎屑沉积岩、化学沉积岩和生物沉积岩三大类。其中泥岩和石灰岩是主要的生油岩。但在生油岩中形成的油气不一定存储在生油岩中，经裂缝或孔隙可能运移到附近具有储存条件的岩石中。目前，分布最广的储藏岩石类型是各类砂岩、砾岩、石灰岩、白云岩、礁灰岩，此外还有少量的火山岩、变质岩、泥岩。要经济高效地采出油气，必须研究油层性质，使钻井、完井能够最大限度地发挥油层的潜力。

(1) 碎屑岩

碎屑岩主要包括各种砂岩、砂砾岩、砾岩、粉砂岩等碎屑沉积岩，它们是我国目前最重要的储集层类型。碎屑岩的物质成分主要由颗粒、基质和胶结物三部分组成。

(2) 碳酸盐岩

碳酸盐岩主要由碳酸盐矿物方解石、白云石组成，岩石的主要类型是石灰岩和白云岩。碳酸盐岩在我国约占沉积岩总面积的 55%，特别是在西南和中南地区。据估计，世界石油储量的一半左右在碳酸盐岩中。我国除华北的碳酸盐岩古潜山油藏外，大部分碳酸盐岩主要作为储气岩，如四川盆地、新疆塔里木盆地和陕甘宁盆地等。

碳酸盐岩在很多方面不同于砂岩。油气主要由动物和植物（藻类）的遗体演化而成，并且几乎是存在和生长在同一地方。碳酸盐矿物易被水溶解，所以在沉积之后的成岩作用过程中被溶解和重结晶是常见的。碳酸盐岩比砂岩脆得多，裂缝较发育，裂缝的储渗作用也较重要。

(3) 其他岩石类型

其他岩类的储层是指除碎屑岩和碳酸盐岩之外的各种岩类储层，如岩浆岩、变质岩、粘

土岩和煤层等。我国及国外均发现了这种类型的油气藏，对其研究不可忽视。

1.2.2 油层的物性参数

油层物性是评价储集能力的基本参数，孔隙类型、喉道类型及孔隙—喉道的配合关系与储集性密切相关，它们是多孔介质岩石的重要组成部分。油层物性与孔隙结构研究对于钻井、完井液设计，完井方式的选择及开发方案的制定均有十分重要的意义。

(1) 孔隙度 (porosity)

岩石中孔隙的体积与岩石总体积的百分比称为岩石的孔隙度，常用符号 F 表示。孔隙度有绝对孔隙度和有效孔隙度之分。绝对孔隙度是指岩石中全部孔隙的体积与岩石总体积之比。有效孔隙度是指岩石中互相连通的孔隙的体积与岩石总体积之比。岩石的孔隙度按大小一般分为高、中、低三大类：高孔隙度 ($F > 25\%$)；中孔隙度 ($F = 10\% \sim 25\%$)；低孔隙度 ($F < 10\%$)。

一般砂岩的孔隙度较高，在砂质岩石中易形成孔隙性的油气藏。泥页岩、碳酸岩等岩石的孔隙度一般都较低，易形成裂缝性油藏。与砂岩相比，虽然碳酸岩裂缝孔隙度不高，但在裂缝发育好的地区易形成高压高产的油气藏，如我国的四川和塔里木地区的某些油气田，形成了以裂缝为主的高产油气田。

决定砂岩孔隙度的主要因素是碎屑颗粒的大小以及分选程度好坏。从我国的砂岩储油层来看，良好的储层主要是中粒和细粒砂岩石，粗砂岩和粉砂岩大都较差。胶结物含量增加，常使孔隙度降低，泥质胶结的砂岩孔隙度又比碳酸盐矿物胶结的砂岩要高。

碳酸盐岩油气层，除生物格架碳酸盐岩外，颗粒碳酸盐岩的孔隙发育情况与砂岩相似，也受颗粒大小、分选、形状及胶结物含量等因素的影响。碳酸盐中的裂隙（缝）孔隙度普遍较低，范围在 $0.01\% \sim 6\%$ ，超过 2% 的较少。

(2) 渗透率 (Permeability)

在一定压差条件下，岩石能使流体通过的性能称为岩石的渗透性。岩石渗透性的好坏以渗透率的大小来描述，常用符号 K 表示，单位是 μm^2 ，岩石渗透性大小可由实验求得。根据流体流动特性的不同，储层岩石的渗透率分为绝对渗透率（或物理渗透率）、有效渗透率和相对渗透率。

1) 绝对渗透率 (Absolute Permeability)：当只有任何一相（气体或单一液体）在岩石孔隙中流动而与岩石没有物理化学作用时所求得的渗透率。通常则以气体渗透率为代表，又简称渗透率。

2) 有效渗透率 (Equivalent Permeability)：多相流体共存和流动时，其中某一相流体在岩石中的通过能力的大小，就称为该相流体的有效渗透率。

3) 相对渗透率 (Relative Permeability)：有效渗透率与绝对渗透率的比值。

根据渗透率的大小，地层的渗透率可分为高、中、低三种类型：高渗透地层 ($K \geq 0.5\mu\text{m}^2$)；中渗透地层 ($0.01\mu\text{m}^2 < K < 0.5\mu\text{m}^2$)；低渗透地层 ($K < 0.01\mu\text{m}^2$)。

影响孔隙度的地质因素也直接影响渗透率的大小。渗透率的大小与孔隙度、粒径、分选状况和排列方式关系密切。孔隙度大的岩石，渗透性一般均好；孔隙度低的岩石，渗透性能较差。对砂岩而言，孔隙度与渗透率关系密切，相关性显著。裂缝性岩石的渗透性是流体流过裂缝的能力。它与裂缝的宽度和裂缝间的连通性有关。一条宽度为 0.1mm 的裂缝，其渗

透性相当于 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}^2$ ，因此，裂缝的渗透性是相当好的。表 1-4 为我国碎屑岩类储集层油田开发储层分类标准。

由于大多沉积岩地层具有层状结构，并且在不同方向上所受的应力不同，表现出各向异性，因此，在不同方向上岩石的渗透性具有一定的差异。

表 1-4 碎屑岩类储集层油田开发储层分类标准

储层类型	名称	孔隙度, %	渗透率, μm^2
I	特高孔特高渗	>30	>2
II	高孔高渗	25~30	0.5~2
III	中孔中渗	15~25	0.1~0.5
IV	低孔低渗	10~15	0.01~0.1
V	特低孔特低渗	<10	<0.01

1.2.3 储层岩石特性对完井方式的影响

储层岩石主要分为砂岩（砂砾岩）、碳酸盐岩，以及火成岩、变质岩等共三类。

(1) 砂岩（砂砾岩）

砂岩的胶结物主要为硅质、钙质、粘土等，有时为原油胶结，在各种作业过程中易被损害。而且，我国的砂岩油藏多为层状，压力偏低，以中低渗为主，在开发中采用多层同井合采、分层注水等增产措施，因此多数采用套管（或尾管）射孔完井。但对产层相对单一、不需要压裂改造的产层或稠油层，可考虑采用衬管完井或裸眼完井方式，同时根据需要可利用水平井进行开发，这样不但连通性能好，而且减少了固井对产层的污染，延缓了水锥的形成。

(2) 碳酸盐岩

碳酸盐岩层大多坚硬、致密，储渗空间为裂缝或基质孔隙，有时也可能存在底水、气顶。对渗透性好的储层可采用裸眼或衬管完井，如塔里木地区的高压气井目前大多是水平井和衬管完井方式；对渗透性较差储层，开采过程中需要采取酸化或压裂处理等增产措施时，可采用射孔完井，也可在裸眼压裂后进行衬管完井；对于孔隙性的碳酸盐岩其完井方式可按砂岩油层来对待，增产措施可以采用酸化、前置液酸压或加砂压裂；裂缝性古潜山碳酸盐岩可用裸眼完井，也可利用套管射孔完井方式，这样有利于控制底水和进行增产措施。

(3) 火成岩及变质岩等

这类油藏大都为次生古潜山油藏，岩石本身是致密的，存在裂缝或孔隙溶洞等，这类油藏大多将不整合面的风化壳钻开后采取裸眼完井，也可射孔完成。

1.2.4 油层层间压力及渗透性的差异

我国的油层分类，将油层划分为特高渗透率、高渗透率、中渗透率、低渗透率和特低渗透率五种类型。但在选择完井方式中，国外仅对渗透率做出高的或低的较粗略的划分，即把 $0.1 \mu\text{m}^2$ 作为孔隙型油层高渗透或低渗透的区分标准，把 $0.01 \mu\text{m}^2$ 作为裂缝型油层高渗透或低渗透的区分标准。一般地说，高渗透油层井产量较高，原油入井的流速较快，选择完井方式时需考虑这一特点。

(1) 层间渗透性的差异

层间渗透性的差异在砂岩层状油藏中是常见的。我国层状油藏层间渗透率差异有的可以

达到几十倍，甚至更大。在选择完井方式时，国外对层间渗透率差异的划分原则是，若各层之间的渗透率变化范围不超出下面六个等级中的一个，则认为层间渗透率差异不大，可以同井合采，否则需按两套层系开发：

- 1) $K > 1 \mu\text{m}^2$;
- 2) $K = 0.5 \sim 1 \mu\text{m}^2$;
- 3) $K = 0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}^2$;
- 4) $K = 0.05 \sim 0.1 \mu\text{m}^2$;
- 5) $K = 0.01 \sim 0.05 \mu\text{m}^2$;
- 6) $K < 0.01 \mu\text{m}^2$ 。

(2) 油层层间压力的差异

在选择完井方式时，国外对油层层间压力差异的划分是，若各分层之间的压力变化范围不超出下面四个等级中的一个，则认为层间压力差异不大：

- 1) $G > 0.13 \text{MPa}/10\text{m}$;
- 2) $G = 0.11 \sim 0.13 \text{MPa}/10\text{m}$;
- 3) $G = 0.09 \sim 0.11 \text{MPa}/10\text{m}$;
- 4) $G < 0.09 \text{MPa}/10\text{m}$ 。

国内对层间压力差异尚无一个量化的标准。在处理层间压力差异的矛盾时，一般可采用双油管分采、单管下封隔器分采或者在高压层装井下油嘴将高压层的流压降至与低压层压流接近等三种方法。如果用这些办法无法调整层间矛盾，则只能分层开发。层间差异中主要矛盾是层间压力的差异。

1.3 完井所需资料收集与完井设计

完井设计是根据储层性质、油气田的开发方案和采油工艺要求等，确定打开储集层的方式，提出完井的井底结构、油层套管的下入层位及下入深度和生产层与井筒的连通方式，制定完井测试方案和采油管柱尺寸等一系列完井的参数。

1.3.1 完井所需资料的收集

1) 完井设计所需油藏地质资料：

- ①油藏类型及地质构造资料；
- ②储层及岩性资料（包括矿物成分、粒度分析及有关防砂分析资料）；
- ③储层流体资料。

2) 完井设计所需油藏开发资料：

- ①油藏开发方案；
- ②射孔方案；
- ③增产措施。

3) 采油工艺技术资料。

4) 试油和测井资料。

5) 钻井工程资料：

- ①已完钻各类开发井的钻井资料（包括探井、评价井转为开发井）；
 - ②未钻各类开发井的钻井方案；
 - ③探井、评价井的有关资料；
 - ④邻井完井特殊作业提示。
- 6) 油气层保护技术资料。
 - 7) 完井设计遵循的各种标准。

1.3.2 完井设计遵循的原则

- 1) 满足开发、采油工程方案要求；
- 2) 与钻井、固井和井下作业协调一致；
- 3) 符合油层保护及改造措施的要求；
- 4) 尽量减少投产后的井下作业工作量；
- 5) 完井方案与当前的工艺技术水平相适应；
- 6) 满足作业安全、高效及环保要求的原则。

1.3.3 完井设计的主要内容

(1) 完井方式的选择

根据储集层的岩石特点、油藏的开发方案、将来可能要采取的采油工艺和修井措施，提出完井井底结构的类型。

(2) 提出完井井段的井底结构参数

井底结构参数包括井径、打开生产层的长度与层数、口袋的长度等。

(3) 完井管柱的设计

完井管柱的设计包括油层套管的直径、下入深度、套管强度及防腐设计；筛管和衬管的有关尺寸的确定；采油管柱尺寸的确定等。

(4) 射孔的方案设计

对射孔完井，根据地层特性、开发方案要求、完井方式等因素，选择射孔工艺和工具，确定射孔参数。

(5) 防砂工艺的设计

对出砂井，根据产层特点和出砂特性制定具体的防砂方案；对工具防砂，设计防砂工具的结构参数；对砾石充填防砂，确定砾石的尺寸、质量要求及充填工艺等；对化学防砂，设计固砂液配方等。

(6) 完井测试方案设计

完井测试方案设计包括测试方案的制定、测试管柱设计等。

(7) 油气层保护方案及完井液的设计

根据产层特点和油气层敏感性评价，制定出整个完井过程中的产层保护方案，设计完井液体系和性能配方，提出完井液防腐措施等。

(8) 完井井口装置的设计

根据产层的压力级别和产出的油、气特性设计完井井口装置。

1.4 岩心分析及油气层敏感性评价

1.4.1 完井工程中岩心分析的内容及目的

岩心分析技术是指利用能揭示岩石本质的各种仪器设备来观测和分析油气层的特性的技术。岩心代表了地下岩石，岩心分析是认识和评价油气层的重要手段之一，也是完井工程设计和油气田勘探开发必不可少的依据。完井工程中的岩心分析主要包括常规物性分析、岩矿分析、孔隙结构分析、敏感性分析及配伍性评价等。

(1) 岩矿分析

岩矿分析中用得较多的是薄片分析、X射线衍射和扫描电镜等。薄片分析可以测定骨架颗粒、基质、胶结物及其他敏感性矿物的组分和分布，并能描述孔隙类型及成因。X射线衍射(XRD)是鉴定晶质矿物应用最广泛而有效的一项技术，通过XRD物相分析，不仅可以确定混层矿物的类型，还可以确定混层矿物中混层矿物的比例，对于确定粘土矿物的基本性质、绝对含量、粘土矿物类型及相对含量非常重要。扫描电镜分析(SEM)用于认识敏感性矿物的大小、产状分布、岩石的孔隙形状、喉道大小、颗粒表皮层和孔喉壁的结构等。因此，SEM分析也是在完井过程中实施油气层保护技术所需要的重要基础和手段。

(2) 孔隙结构分析

孔隙结构分析主要基于前述的铸体薄片和孔隙铸体分析，并结合岩心毛管压力曲线的测定，从而确定孔隙类型、孔隙结构特征、孔隙直径、喉道大小及分布规律。这对于研究固相颗粒在岩石孔隙中的运移规律，研究外来固相堵塞油气层的规律和机理，设计钻开油气层的屏蔽式暂堵技术是非常重要的。

(3) 粘土矿物分析

油气层中粘土矿物的组成、含量、产状和分布特征不仅直接影响到储集性质好坏和产能大小，而且也是决定油层敏感性特征的最主要因素。在分析粘土矿物的潜在损害时，重点应集中在粘土矿物的产状和种类上。产状不同、组成不同，对油气层产生的影响也不同。

1) 粘土矿物产状及其潜在的危害。

研究表明，从地层损害的角度出发，粘土矿物的产状比其成分的影响还要大。常见的有以下三种产状类型，如图1-1所示。

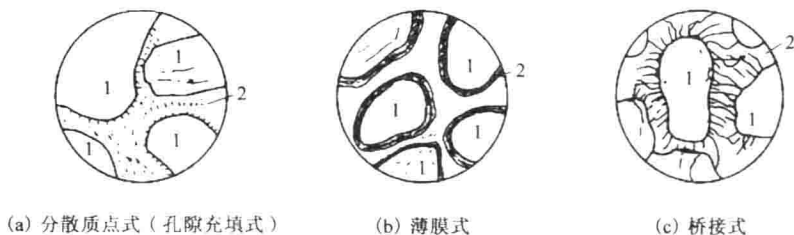


图1-1 常见粘土矿物产状示意图

1—骨架颗粒；2—粘土矿物

①分散质点式或孔隙充填式。粘土矿物呈分散状填集在颗粒之间的孔隙中，粘土与碎屑骨架附着力差，容易与入井流体一起在孔隙中运移，堵塞孔隙喉道。

②薄膜式。粘土矿物以薄膜形式包裹在骨架颗粒的表面。由于缩小了孔隙的有效半径和孔喉尺寸，最容易引起孔喉堵塞，是所有产状类型中潜在损害最大的一种。

③桥接式。粘土矿物在骨架颗粒之间搭接成“桥”，原始的粒间孔隙被这些粘土矿物所支离切割，成为粘土矿物晶体之间的微细孔隙。当高速流体在孔隙中流动时，极易冲碎成微粒而运移。

2) 不同粘土矿物的潜在损害。

在粘土矿物诸多物理化学性质中，其微粒性（即比表面）、阳离子交换容量及亲水性对油气层潜在损害和保护措施具有重要意义。不同的粘土矿物所导致的损害类型和损害程度实质上反映了粘土矿物之间的物理化学差异。

①蒙脱石。蒙脱石常出现在埋藏深度较浅的储层中，以薄膜形式贴附在碎屑颗粒表面或在孔隙喉道中形成桥接式胶结。当含量较高时，还可呈各种形态的集合体充填于孔隙中。蒙脱石的强亲水性和较高的阳离子交换容量决定了其具有强烈的水敏性，特别是富含钠的蒙脱石，遇水后体积可膨胀600%~1000%。显然，这种吸水膨胀可引起严重的油层堵塞和地层结构的破坏。

②高岭石。高岭石作为储层中最常见的粘土矿物，在不同的物理化学环境下，可以转变成其他粘土矿物，常呈书页状和蠕虫状充填于孔隙中。由于高岭石集合体内各晶片之间的结合力很弱，且与碎屑颗粒的附着力也很差，在高速流体的剪切应力作用下，很容易随孔隙流体运移堵塞孔喉，具有较强的速敏性。

③伊利石。伊利石是形态变化最多的粘土矿物，随储层深度增加，其含量也增加。常见的鳞片状伊利石以骨架颗粒薄膜产出，而毛发状、纤维状伊利石则在孔隙中搭桥生长、交错分布。前者可能在孔喉处形成堵塞，而后者则主要增加孔隙通道的迂曲度，降低储层的渗透性。

④绿泥石。绿泥石常出现在埋藏深的地层中，或以柳叶状垂直于骨架颗粒生长，或以绒球状集合体充填于孔隙中。由于绿泥石富含铁组分，因此具有较强的酸敏性。在对油层进行酸化作业时，绿泥石可能被酸溶解而释放铁离子，与其他组分化合生成粒度大于孔喉的氢氧化铁胶体沉淀。

在完井作业中，必须结合油层中粘土矿物的特点，设计完井方式、完井液和完井投产措施，以避免或减少地层损害。

1.4.2 油气层敏感性评价

油气层敏感性评价主要是通过岩心流动实验，考察油气层岩心与各种外来流体接触后所发生的各种物理化学作用对岩石性质，主要是对渗透率的影响及其程度。此外，对于与油气层敏感性密切相关的岩石的某些物理化学性质，还必须通过化学方法进行测定，以便在全面、充分认识油气层性质的基础上，优选出与油气配伍的工作液。

绝大多数油气层，总是或多或少地含有敏感性矿物，它们一般粒径很小（ $<20\mu\text{m}$ ），往往分布在孔隙表面和喉道处，处于与外来流体优先接触的位置。由于敏感性矿物的物理和化学性质稳定区间狭小，在完井作业中，当各种外来流体不可避免地侵入油气层后，最容易与其所含流体发生各种物理和化学作用，其结果是降低油气天然生产能力或注入能力，即发生

所谓的油气层损害。损害的程度可用油气层渗透率的下降幅度来表示，这也是室内敏感性评价的依据。

实践证明，在钻井、完井、增产措施、井下作业、注水和采油等作业过程中，都可能发生不同程度的地层损害，见表 1-5。而且，有些损害是永久性的、不可逆的。因此，油气层一旦受到损害往往难以消除。

表 1-5 建井和油田开采的不同阶段对地层损害的严重程度

问题类型	钻井 固井	完井	建井阶段 井下 作业	增产 措施	中途测试	油藏开采 阶段天然 能量开采	注水 开采
钻井液固相 颗粒堵塞	****	**	**	—	*	—	—
微粒运移	***	*****	****	*****	*****	***	*****
粘土膨胀	****	**	****	—	—	—	**
乳化堵塞/水锁	***	*****	**	*****	*	*****	*****
润湿反转	**	***	***	*****	—	—	*****
渗透率下降	***	***	*****	**	—	**	—
有机垢	*	*	***	*****	—	*****	—
无机垢	**	***	*****	*	—	***	***
外来颗粒堵塞	—	*****	***	***	—	—	*****
次生矿物沉淀	—	—	—	*****	—	—	***
细菌堵塞	**	**	**	—	—	**	*****
出砂	—	***	*	*****	—	***	**

注：*代表严重性程度；—代表无损害。

要通过油气层敏感性评价，找出油气层发生敏感的条件以及由于敏感造成的损害程度，为以保护油气层为目的的完井液设计及完井参数优化提供依据。

思 考 题

1. 何为完井工程？完井工程主要包括哪些内容？
2. 油气藏的储、渗类型分为哪几类？
3. 按储层内流体的性质划分，油气藏分为哪几类？常见的储层岩石类型有哪些？
4. 稠油油藏有何特点？
5. 储层的物性参数有哪些？何为高、低渗油气藏？
6. 碳酸盐油气藏有何特点？
7. 储层特性对完井方式有何影响？
8. 完井设计考虑的主要因素有哪些？如何综合考虑各因素间的关系？
9. 简述完井设计应遵循的原则。
10. 简述储层敏感性实验的内容与目的。