



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

石油工程综合设计

• 步玉环 谷建伟 薛建泉 编 著 •



中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

石油工程综合设计

步玉环 谷建伟 薛建泉 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

石油工程综合设计/步玉环,谷建伟,薛建泉编著.

—东营:中国石油大学出版社,2011.12

ISBN 978-7-5636-3647-1

I. ①石… II. ①步… ②谷… ③薛… III. ①石油工程—设计 IV. ①TE

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 272176 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名:石油工程综合设计

作 者:步玉环 谷建伟 薛建泉

责任编辑:高 颖(电话 0532—86981531)

封面设计:友一广告传媒有限公司

出 版 者:中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址:<http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱:shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者:青岛星球印刷有限公司

发 行 者:中国石油大学出版社(电话 0532—86981532,0546—8392563)

开 本:180 mm×235 mm 印张:10.5 字数:209 千字

版 次:2012 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:16.00 元

前 言

《石油工程综合设计》主要包括油藏工程设计、钻井工程设计和采油工程设计三部分内容,涵盖了油田开发设计的主要内容。石油工程综合设计是油气田经济、高效、长期稳产的基础,合理的石油工程设计可以有效地延长油气井的生产寿命,提高油气采收率。本书较系统地阐述了油藏工程设计、钻井工程设计、采油工程设计的理论依据和设计方法。

“石油工程综合设计”是石油工程专业本科学生的必修课,是石油工程专业本科生进入现场前的实践训练。课程的基本模式为:在学习基本设计方法的基础上,学生根据所提供的油田基本数据和设计要求,独立完成设计内容。课程的目的是使学生掌握油田工程设计中开发方案设计、钻井工程设计、采油工程设计和油藏工程评价等的设计方法和设计步骤,训练学生工程设计的能力,培养学生综合运用所学基础知识和专业知识解决实际生产问题的基本技能。

为了使“石油工程综合设计”这一实践教学课程达到预期目的,中国石油大学(华东)石油工程学院组织有关教师就该设计的教学形式、训练内容、设计要求及教材的编写内容等进行了大量的研讨工作。在《石油工程综合设计指导书》(校内胶印教材)的基础上重新编写和完善了设计的内容,形成即将出版的《石油工程综合设计》教材。本教材的油藏工程设计部分由谷建伟执笔,钻井工程设计部分由步玉环执笔,采油工程设计部分由薛建泉、董长银、齐宁执笔。本教材的内容中,油藏工程设计涵盖了油藏评价、开发层系划分、注水开发方式确定、注水开发指标预测、注水开发采收率估算等内容;钻井工程设计涵盖了井身结构设计、钻头选型及钻进参数设计、钻具设计及钻机选型、钻井液设计、水力参数设计、套管柱设计、注水泥计算及固井工艺设计等内容;采油工程设计涵盖了完井工程设计、射孔参数优化设计、有杆抽油泵系统设计、防砂工艺选择及施工参数设计等内容。

在本教材的编写过程中,得到了许多老师的关心指导,其中史玉才对钻井工程设

计部分的内容进行了充分的修改,并提出了许多建设性的意见,在此对各位老师的帮助表示由衷的感谢!

由于编写时间仓促,加上作者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,欢迎广大读者批评指正。

作 者

2011年9月

• 目 录 •

第一部分 油藏工程设计	1
1 油藏工程综合设计方法	1
1.1 油藏评价	1
1.2 油藏工程设计	12
2 油藏工程综合设计实例	26
2.1 油藏实例基本情况介绍	26
2.2 室内试验资料	32
2.3 矿场测试资料	40
3 油藏工程综合设计书写作要求	43
附录	46
第二部分 钻井工程设计	48
1 地质资料及基本数据	48
1.1 基本数据	48
1.2 地质资料录取要求	50
1.3 故障提示	51
1.4 关于地质资料的说明	51
2 井身结构设计	51
2.1 井身结构设计原则及依据	51
2.2 井身结构设计内容	51
2.3 井身结构设计方法	52
2.4 钻井液密度确定	56
2.5 设计要求及注意事项	56
3 钻头选型及钻进参数设计	57

3.1	设计原则及设计方法	57
3.2	钻头类型及推荐参数	57
3.3	钻进参数设计及进尺预测	62
3.4	钻头选型设计要求及注意事项	64
4	钻具设计	65
4.1	钻具选用原则及设计方法	65
4.2	推荐常用钻具组合(胜利油田用)	66
4.3	钻具设计	66
4.4	井斜控制方法及设计	74
4.5	设计要求及钻铤设计过程中的注意事项	75
5	钻机选型及钻井主要设备	76
5.1	钻机选择的主要技术依据	77
5.2	钻机的选择	77
5.3	设计要求	78
6	钻井液设计	78
6.1	设计原则及设计内容	78
6.2	设计方法	79
6.3	钻井液用量及材料储备	81
6.4	固控设备要求	82
6.5	保护油气层要求	82
6.6	钻井液材料消耗	82
6.7	设计要求	83
7	水力参数设计	83
7.1	设计原则	83
7.2	泵的选择	83
7.3	喷嘴的选择及常用流量	85
7.4	设计内容及系数选择	85
7.5	水力参数设计方法与步骤	85
7.6	设计过程中的注意事项	91
8	套管柱设计	92
8.1	设计内容	92
8.2	套管强度设计原则及设计方法	92
8.3	等安全系数法的基本设计思路与步骤	95
8.4	套管串下部结构设计	98

8.5 设计要求及注意事项	100
9 油气井压力控制	100
9.1 各次开钻井口装置节流管汇及压井管汇示意	100
9.2 各次开钻井口装置试压要求	101
9.3 井控主要措施	101
10 注水泥计算及固井工艺设计	104
10.1 设计内容	104
10.2 固井主要工艺要求	104
10.3 注水泥设计计算	106
10.4 设计要求	110
附录	111
1 地层压力及地层破裂压力曲线	111
2 附表	112
第三部分 采油工程设计	117
1 完井工程设计	117
1.1 完井方式选择	117
1.2 生产管柱尺寸选择	119
1.3 射孔完井工艺参数优选	121
1.4 完井工程设计训练	128
2 常规有杆泵抽油生产系统设计	128
2.1 常规有杆泵抽油生产系统设计原理	128
2.2 油井流入动态计算	131
2.3 流体物性参数计算	132
2.4 井筒温度场计算	135
2.5 井筒压力分布计算	136
2.6 抽油杆柱设计	143
2.7 抽油机校核	146
2.8 泵效计算	147
2.9 常规抽油机井设计训练	149
3 防砂工艺选择及施工参数设计	151
3.1 机械防砂工艺技术	151
3.2 地层砂粒度分析方法	152
3.3 砾石尺寸选择方法	153

第一部分

油藏工程设计

1 油藏工程综合设计方法

油藏工程研究是一门综合技术学科,油藏工程综合设计包含的内容广泛,在油气藏开发过程中针对油藏进行的一系列研究和分析均属于油藏工程设计的内容。下面主要针对即将开发的油气藏,介绍基本的油藏工程设计方法。

1.1 油藏评价

油藏评价是通过地震细测、地质综合分析、钻探评价井、录井、测井、试油、试采、测试、取心、分析化验、生产试验区获取油藏各方面的信息,并在此基础上进行多学科综合研究之后,形成对油藏的一个全面认识。其中,储层性质、流体性质和渗流特征是油藏评价的主要内容。

1.1.1 油气藏概况

介绍油气藏概况的目的是使研究者对油气藏的勘探开发过程有一个基本的了解。在该部分内容中要交代油气藏的地理位置,勘探开发历史,油藏所属地区的气候、交通、人文及经济状况。

例如,某油田位于山东省东营市垦利县境内,东经 $\times\times^\circ$,北纬 $\times\times^\circ$,地处黄河入海口北侧的滩涂地带,在区域构造上位于 $\times\times$ 坳陷 $\times\times$ 凹陷的东北部 $\times\times$ 潜山披覆构造带的南端,东南靠 $\times\times$ 凸起,西南为 $\times\times$ 洼陷,与 $\times\times$ 洼陷相邻。该油田于 $\times\times$ 年开始进行地震勘探工作,完成 $300\text{ m}\times 300\text{ m}$ 共18条地震测线178.2 km的采集及处理, $\times\times$ 年 $\times\times$ 月完成了 $600\text{ m}\times 600\text{ m}$ 测网野外采集和室内处理,提供 Ng_F 和 Es_1 两层构造图,发现该地区为一个形态完整的潜山披覆构造。 $\times\times$ 年 $\times\times$ 月,钻打A和B两口探井,在井深1 096.8~1 983.2 m发现明化镇组、馆陶组、沙河街组三

套含油气层系,油气层总厚度达 105.4 m,分别获得高产工业油气流,标志着××油田的发现。

该地区气温在×~×℃,冬季干旱少雨,夏季降雨量较多,但由于地处黄河滩涂,交通不便,居住人口较少。

1.1.2 构造特征分析

构造特征分析主要包括构造形态研究、圈闭分析和断层系统研究三个方面,研究成果主要是形成反映构造特征的顶、底面构造图和必要的不同方向的剖面图。在构造形态研究中需要确定油藏圈闭类型、长短轴及其比值、构造走向、构造顶面平缓度等;在圈闭分析中主要确定圈闭的溢出点、闭合面积、闭合高(幅)度等参数;在断层系统研究中主要确定断层走向、倾向及倾角、延伸范围、断距及断开层位、断层类型及其密封特性等。

例如,××区域为一向东北方向抬升的单斜构造,构造比较平缓,地层倾角为 3°左右,区内多发育陡立的断层,主要以北西方向为主,个别南北向,级别大的断层多伴随着多条次级断层,平面上断层之间的间距 60~100 m,落差不大,一般在 10~20 m 左右,多延伸不长,一般在 2~10 km 之间,如图 1-1-1 所示。

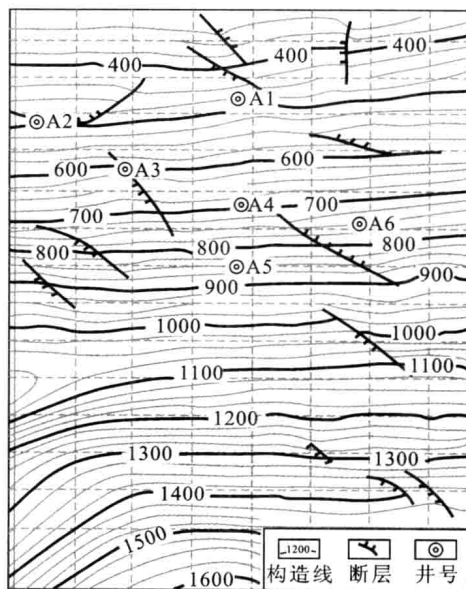


图 1-1-1 ××地区××系××面构造图

1.1.3 油层特征评价

油层特征评价主要是采用测井资料对油层的平面分布延展规律和纵向油层分布进行分析,主要成果为小层平面图、综合柱状图和必要的剖面图。由于岩石沉积过程

和成岩过程复杂,造成含油层系分布也十分复杂,尤其河流相沉积的油藏更是如此。目前一般按照储层的沉积旋回和韵律及油层之间的连通性将油层划分为小层、砂岩组、油层组和含油层系,然后逐一描述它们的形态、厚度、分布和连通关系等。油层之间由隔层分开,隔层与油层相伴而生。通过测井资料和其他资料可以确定隔层厚度、延伸范围、隔层岩性、隔层类型、隔层物性和隔层分布频率及隔层在油藏中所起的作用等。

1.1.4 储层特征评价

油气藏形成于储集岩石层中,储集层性质的好坏直接影响岩石储集油气的能力和流体在其中的渗流能力。通过储层特性评价主要确定岩石性质、物性特征和非均质状况,具体包括岩石矿物组成、岩石粒度组成和分选程度、胶结物、胶结类型、胶结程度、磨圆度、成熟度、粘土矿物含量、孔隙类型、孔隙结构、孔隙度及渗透率分布、渗透率变异系数等。在以上参数研究的基础上,还需要对储集层进行分类。

例如,A油藏储层岩石电阻率为 $2.1 \Omega \cdot m$,储层岩石颗粒粒度分布见表 1-1-1。该储层渗透率变异系数为 $0.3 \sim 0.4$,为中等非均质储层。由图 1-1-2 所示的粒度分布可以看出,该碎屑岩为含粗砂的细一中砂岩。

表 1-1-1 A 油藏储层岩石颗粒粒度分布统计表

粒径范围/mm	>10	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.01	<0.01
含量/%	0.52	1.95	3.01	3.65	11.52	35.78	31.20	8.52	3.85

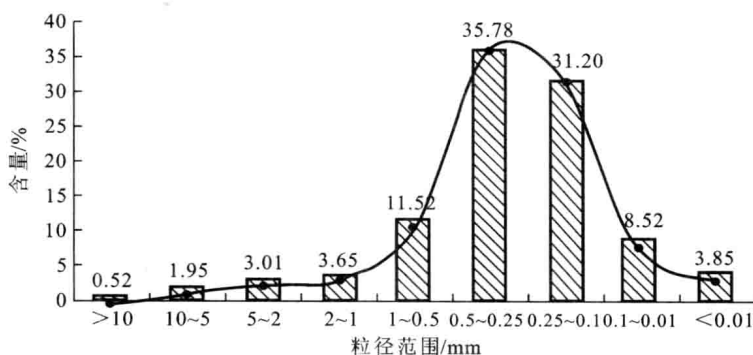


图 1-1-2 A 油藏粒度分布柱状图

再例如,B油藏岩石铸体薄片鉴定结果:储层砂岩疏松,风化蚀变程度中等,磨圆度为次棱角状,支撑方式为颗粒式,接触关系以点一线式为主;胶结类型以孔隙一接触式、接触式为主,胶结物主要是方解石,杂基为泥质,含量为 7.4%;陆源碎屑成分含量石英为 40.9%,长石为 32.2%,岩屑为 26.9%;岩屑成分以变质岩为主;成分成熟度、结构成熟度中等。59 块样品储层物性资料统计结果:平均孔隙度为 35.3%,渗



透率为 $3\,729.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属特高孔、特高渗储层, 碳酸盐含量为 5.1%。CT 资料分析结果: 储层岩性为绿黄色饱含油细砂岩, 物质均一, 孔隙直径为 0.05~0.07 mm, 分布均匀, 样品内部有直径 1 mm 左右连通大孔隙, 偶见直径 0.06 mm 高密度颗粒。压汞资料分析结果: 储层排驱压力、饱和度中值、毛管压力小, 最大连通孔喉半径、孔喉中值偏大, 毛管压力曲线中间的平缓段长。岩心样品扫描电镜分析结果: 粒间孔分布较均, 微孔隙发育, 填隙物主要有绿泥石、伊利石、伊蒙混层、石英。13 块样品全衍射矿物分析结果: 粘土矿物含量平均为 5.6%, 最大值为 9%, 最小值为 3%, 一般在 4%~7% 之间, 其中伊蒙混层含量为 74.9%, 伊利石含量为 13.73%, 高岭石含量为 5.09%, 绿泥石含量为 6.29%, 伊蒙混层中蒙脱石含量为 74.11%。

1.1.5 流体特征分析

在该部分内容中, 主要依据测试资料对油气藏中流体的分布规律和流体性质进行研究, 其中还包括分析油水界面位置、圈定含油面积、阐述油气水性质。例如, 流体常规物性主要包括地面脱气原油密度、粘度、凝固点、初馏点及馏分、含蜡量、含硫量、含水量、组成、胶质沥青质及灰分含量等; 天然气相对密度、组成等; 地层水密度、氯离子含量、矿物组成及矿化度、pH 值、水型等。流体高压物性主要包括油气水相态特征、饱和压力、粘温曲线、析蜡温度、溶解气油比、溶解系数、地层原油体积系数、地层和地面条件下的流体密度、地层条件下的流体压缩系数、气液相色谱分析、油气组成、凝析油含量和重烃含量、地层流体粘度等。

例如, T 油藏综合钻井、测井、地震资料确定油水界面深度为 1 035 m。地面原油分析结果: 原油性质比较好, 密度为 $0.78 \sim 0.80 \text{ g/cm}^3$, 粘度为 $1.39 \sim 1.79 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 但含蜡量较高, 主要区间为 6.16%~7.12%。A 井地层水化验分析结果: 总矿化度为 86 675 mg/L, 水型为 CaCl_2 型。T 油藏 A、B 和 C 井井间剖面图如图 1-1-3 所示。

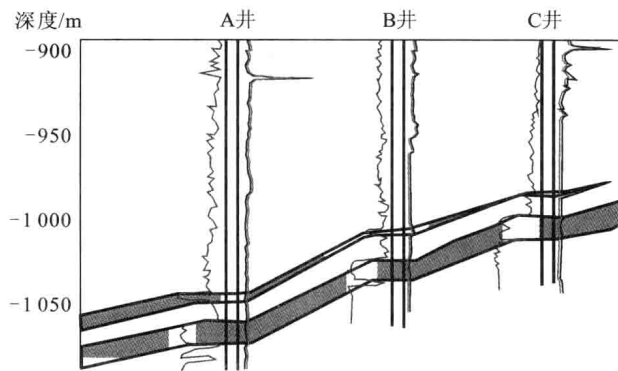


图 1-1-3 T 油藏 A、B 和 C 井井间剖面图

1.1.6 油藏渗流特征分析

储层岩石的微观特征多样性决定了储层具有不同的渗流物理特征,这些特征对水驱过程影响显著。根据室内岩心分析资料,需要对岩石润湿性特征、相渗曲线、毛管压力曲线、驱油效率和“六敏”(水敏、速敏、酸敏、碱敏、盐敏、应力敏感性)等特征进行分析。

通常需要综合润湿角测定、吸油吸水测试、相渗曲线特征对岩石润湿性进行分析。 $\times\times$ 亲油、亲水岩石相渗曲线特征见表 1-1-2。由表中数据可以看出,油藏岩石润湿性差异影响了油水在地层中的分布规律,进而影响了油水相对渗透率曲线的特征。

表 1-1-2 $\times\times$ 亲油、亲水岩石相渗曲线特征

特 征	亲 水	亲 油
束缚水饱和度	一般大于 20%~25%	一般小于 15%
等渗点含水饱和度	大于 50%	小于 50%
最大水相相对渗透率	一般小于 30%	一般大于 50%

在相对渗透率的评价与应用中,应该掌握岩心相对渗透率的求取方法,以及相对渗透率曲线的应用。根据油藏的相对渗透率曲线,利用式(1-1-1)可以初步估算水驱油效率;依据一维油水两相渗流理论,利用式(1-1-2)可以计算分流量曲线,求取水驱前缘含水饱和度;结合波及系数图版,可以计算见水时刻的无水采收率。

$$E_D = \frac{1 - S_{wc} - S_{or}}{1 - S_{wc}} \quad (1-1-1)$$

$$f_w = \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} \left[1 + \frac{\lambda_o A \left(\frac{\partial p_c}{\partial x} - \Delta \rho g \sin \alpha \right)}{q_t} \right] \quad (1-1-2)$$

式中 E_D ——驱油效率;

S_{wc}, S_{or} ——分别为束缚水饱和度和残余油饱和度;

f_w ——分流量;

λ_w, λ_o ——分别为水相的流度和油相的流度;

A ——过流截面积;

p_c ——毛细管力;

$\Delta \rho$ ——油水密度差;

g ——重力加速度;

α ——地层倾角;

x ——驱替方向上的距离;

q_t ——产液速度。

五点井网波及系数与流度比的关系如图 1-1-4 所示。A 油田岩心相对渗透率曲线和计算的分流量曲线如图 1-1-5 所示。

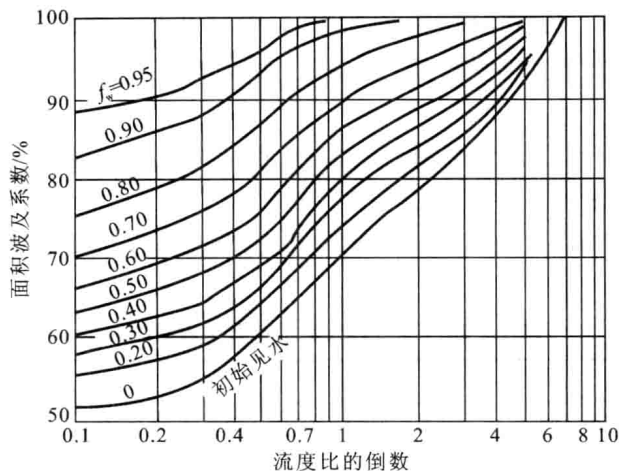


图 1-1-4 五点井网波及系数与流度比关系曲线

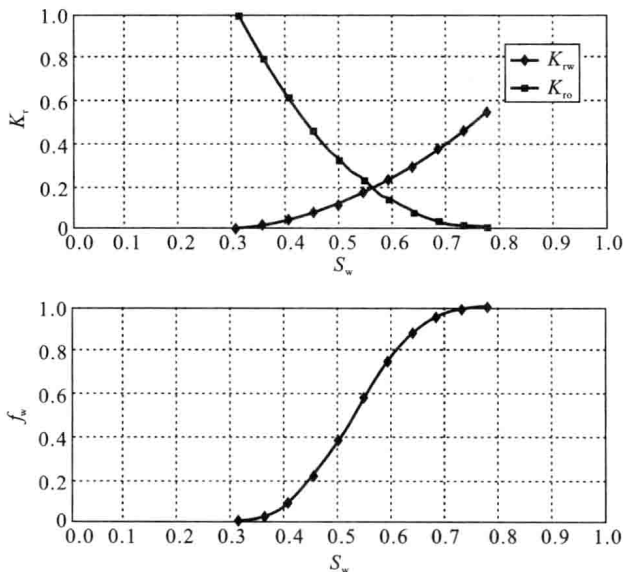


图 1-1-5 A 油田岩心相对渗透率曲线和计算的分流量曲线

利用压汞测量的毛管压力曲线,分析毛管排驱压力、饱和中值压力、最小湿相饱和度等参数,同时根据毛管压力曲线的形状判断岩石微观孔喉分布状况。A 油藏 A1 取心井岩心毛管压力曲线如图 1-1-6 所示。A 油藏毛管压力曲线分析结果见表 1-1-3。

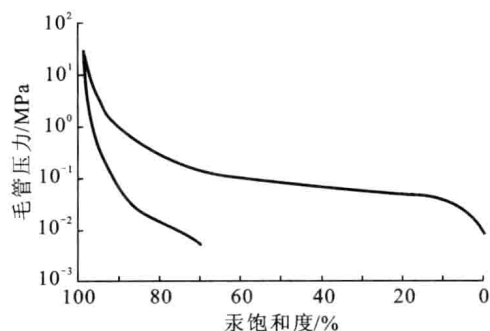


图 1-1-6 A 油藏 A1 取心井岩心毛管压力曲线

表 1-1-3 A 油藏毛管压力曲线分析结果

孔喉分布特征参数										喉道分选程度			连通性		
排驱压力 /MPa	最大 连通 喉道 半径 / μm	中值 毛管 压力 /MPa	孔喉尺寸/ μm			喉道尺寸/ μm				均质系数			退汞效率/%		
			最大 值	最小 值	平均 值	最大 值	最小 值	一般 范围	平均 值	最大 值	最小 值	平均 值	最大 值	最小 值	平均 值
0.019	75.1	0.27	25.1	0.32	10.5	30.6	1.29	8.8~ 16.4	12.8	0.4	0.09	0.19	60.2	25.5	36.4

1.1.7 油藏温度和压力系统

油气藏的温度系统是油藏评价的主要内容。温度常常是决定某种驱替剂是否有效的关键因素。矿场上需要确定的主要温度参数有油气藏原始地层温度、地温梯度。油气藏原始地层温度一般是在探井测井和测压时由附带的温度计测量得到的。应该指出的是,油气藏的温度主要受地壳温度控制,一般不受储层岩石和其所含流体的影响,因此任何地区的地层温度都是随深度线性增加的,可以用式(1-1-3)表示。

$$T = T_0 + \beta h \quad (1-1-3)$$

式中 T, T_0 ——分别为油气藏温度和地表平均温度, $^{\circ}\text{C}$;

β ——地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{m}$;

h ——油气藏深度, m 。

实际资料表明,由于地壳温度受构造断裂运动和岩浆活动的影响,不同地区的地温梯度有所不同,例如我国东部地区油气田的地温梯度一般为 $3.5 \sim 4.5^{\circ}\text{C}/(100\text{m})$ 。

油气藏压力是油气藏天然能量的重要标志。在压力系统评价中,主要需要确定油气藏的原始地层压力、地层压力系数、压力梯度、油气藏压力方程、地层破裂压力等参数,并进行油气藏压力系统分析、正常及异常压力状态分析。油气藏的地层压力经

常表示成式(1-1-4)的形式。

$$p_i = \alpha h / 100 \quad (1-1-4)$$

式中 p_i ——油气藏的原始地层压力,MPa;

α ——地层压力梯度,MPa/(100 m);

h ——油气藏中部深度,m。

一般认为,当 α 小于0.8时,油气藏为异常低压油气藏;当 α 在0.8~1.2之间时,油气藏为正常压力油气藏;当 α 大于1.2时,油气藏为异常高压油气藏。

根据钻井测试资料可以获取地层的温度和压力资料,进而进行参数分析,得到相应的温度、压力与地层深度的关系。A油藏温度、压力与地层深度的关系如图1-1-7所示。

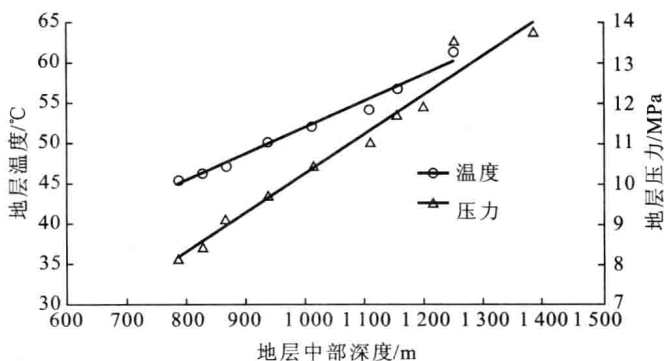


图 1-1-7 A 油藏温度、压力与地层深度的关系

1.1.8 试油试采数据分析

油井产能大小是通过单井产能测试资料分析确定的,矿场上通常将稳定试井资料或非稳定试井资料整理成产能曲线或 IPR 曲线,然后确定生产井采油指数。

A 油藏 A1 井试采测试数据见表 1-1-4。从测试数据可知,A1 井的采油指数为 7.3 t/(d·MPa)。如果在现场进行了多口井的测试,则可以计算每口井的采油指数,进而掌握地层的生产状况。

A 油藏 A1 井产油量与流压的关系如图 1-1-8 所示。

表 1-1-4 A 油藏 A1 井试采测试数据

测试日期	油嘴/mm	日产油量/(t·d ⁻¹)	日产水量/(t·d ⁻¹)	井底压力/MPa
2003-07-13	3	12.4	3.4	21.5
2003-07-14	3	16.4	0	
2003-07-15	3	16.3	0	

续表

测试日期	油嘴/mm	日产油量/(t·d ⁻¹)	日产水量/(t·d ⁻¹)	井底压力/MPa
2003-07-16	4	23.8	0	20.2
2003-07-17	4	23.7	0	
2003-07-18	4	23.9	0	
2003-07-19	6	34.2	0	19.1
2003-07-20	6	34.3	0	
2003-07-21	6	34.1	0	
2003-07-22	4	22.9	0	20.1
2003-07-23	4	22.7	0	
2003-07-24	4	22.9	0	
2003-07-25	4	22.8	0	

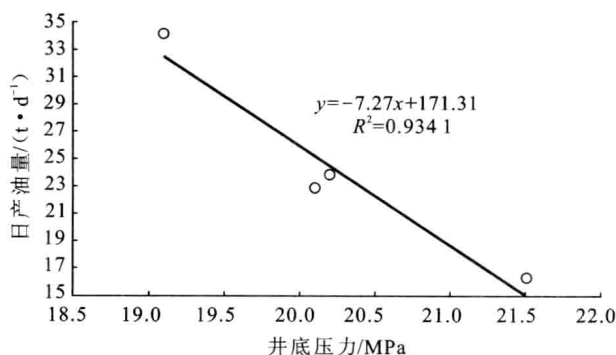


图 1-1-8 A 油藏 A1 井产油量与流压的关系

在试油试采工作结束之前,一般还要进行试井压力恢复测试。通过试井压力恢复测试,可以计算出地层有效渗透率、地层污染状况,同时还可以测试边界情况。利用 MDH 公式(式(1-1-5))可以计算出地层有效渗透率 k 和井底污染系数 S 。

$$p_{ws}(\Delta t) = p_{wf}(\Delta t = 0) + \frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{k h} \left[\lg \frac{k \Delta t}{\phi \mu C_1 r_w^2} + 0.9077 + 0.8686 S \right] \quad (1-1-5)$$

式中 $p_{ws}(\Delta t)$ —— Δt 时的井底压力,MPa;
 $p_{wf}(\Delta t = 0)$ —— Δt 为零时的井底压力,MPa;
 Δt ——关井时间,h;
 q ——关井前地面稳定产量,m³/d;
 μ ——流体粘度,mPa·s;