

郑锋辉 靳保军 唐汝众 著

EERDUOSIPENDI DANIUDI QITIAN

鄂尔多斯盆地大牛地气田

SHUIPINGJING YALIEJISHU JINZHAN

水平井压裂技术进展

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

责任编辑：潘向阳

封面设计：张琳娜

EERDUOSIPENDI DANIUDI QITIAN SHUIPINGJING YALIEJISHUJINZHAN

鄂尔多斯盆地大牛地气田水平井压裂技术进展



ISBN 978-7-80229-679-4



9 787802 296794 >

定价：55.00 元

鄂尔多斯盆地大牛地气田 水平井压裂技术进展

郑锋辉 靳保军 唐汝众 著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书针对目前低渗透油气藏水平井缺乏完井和压裂设计理论指导的矛盾,系统的介绍了水平井完井管柱设计理论以及完井管柱受力分析方法、射孔及其对完井管柱设计的影响、水平井压裂设计理论、水平井压裂工艺。大牛地气田水平井压裂完井与压裂改造实践表明了低渗透水平井压裂具有很好增产能力。

本书可供油气田开发工作者学习参考,也可作为石油院校辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

鄂尔多斯盆地大牛地气田水平井压裂技术进展/郑锋辉,
靳保军,唐汝众著. —北京:中国石化出版社, 2008.

ISBN 978-7-80229-679-4

I. 鄂… II. ①郑… ②靳… ③唐… III. 鄂尔多斯盆地-
气田-油层水力压裂-研究 IV. P618.13 TE357.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 108565 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

东营石大博雅印务有限公司排版印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 12 印张 208 千字

2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷

定价:55.00 元

前 言

鄂尔多斯盆地大牛地气田是中国石油化工股份有限公司的油气勘查区块,2004年以来利用直井通过压裂改造开采产能较高的盒2、盒3等层系,但对太原组、山西组等产能较差的层系,压裂直井的产能不够理想。鉴于近年来低渗透油气田水平井年来在国内应用的良好形势,2005年开展了水平井压裂改造技术的攻关与试验,并在DP35-1井进行了机械封隔器进行了分段压裂。

第1章介绍了大牛地气田地质特征,包括地层特征、构造特征、沉积特征、储层特征、气藏特征等。

第2章研究了区块岩石力学及地应力特性,为水平井完井及压裂设计提供需要的关键参数。第3、4、5、6章主要是水平井完井过程的管柱设计、受力分析以及射孔优化的理论方法,提出了一套水平井套管柱设计与受力分析的系统方法;第7、8、9章根据水平井压裂管柱特点,建立了压裂过程中的管柱受力分析方法,上述理论方法均进行了实例计算分析。

第10章介绍了针对大牛地气田的特点初步配套的水平井压裂现场施工技术,包括分段压裂工具、压裂工作液体系、压裂设计与诊断等;最后介绍DP35-1井小井眼水平井压裂完井及工具分段压裂设计与实施情况。

低渗透气藏的水平井必须进行分段压裂改造才能发挥低渗透水平井的增产优势。水平井分段压裂工艺采用工具分段与限流压裂相结合的方式,提高了压裂效率,保证了多层段的有效造缝。本书针对水平井完井及压裂提出的设计方法和观点尽管由于在实践中应用还不够完善,但从现场试验来看水平井压裂具有很好的应用前景。

本书的编写过程中得到了中国石油大学、胜利油田、长庆油田的专家们的热情指导,其中包括张士诚教授、闫相祯教授、邓金根教授等,同时现场

试验倾注了华北分公司工程界各路专家和协作单位的共同努力；出版社的工作人员对文字及图表进行了详细绘制与校对，在此对他们付出的辛勤劳动深表感谢。

目 录

第1章 气田地质特征	1
1.1 地层特征	2
1.2 构造特征	3
1.3 沉积特征	4
1.4 储层特征	5
1.5 气藏特征	6
第2章 岩石力学及地应力特征	7
2.1 区块岩石力学特征研究	7
2.1.1 杨氏模量和泊松比	7
2.1.2 岩芯强度	9
2.1.3 地层强度和弹性参数的测井计算	13
2.2 地应力大小	16
2.2.1 室内测定地应力大小	17
2.2.2 测井资料计算地应力剖面	21
2.2.3 地应力横向分布规律	22
2.3 地应力方向分布	24
第3章 低渗透气藏水平井井身结构优化设计模型及理论	28
3.1 水平井井身结构设计要求	28
3.2 水平井井身结构优化设计模型	29
3.2.1 水平井套管柱强度优化	29
3.2.2 水平井井身结构总费用优化	29
3.3 水平井井身结构优化设计方法	31
第4章 水平井完井管柱下入摩阻及受力分析	35
4.1 井眼轨迹数据处理	35
4.2 完井管柱下入过程摩阻力计算模型	37

4.2.1 水平井段	37
4.2.2 垂直井段	37
4.2.3 弯曲井段	37
4.3 计算实例	45
4.3.1 二维刚性模型计算结果	45
4.3.2 三维刚性模型计算结果	48
4.3.3 刚度力模型计算结果	49
4.3.4 整体计算模型计算结果	52
第5章 地应力变化对套管损坏的影响机理	54
5.1 地应力概述	54
5.2 影响油气田地应力变化因素	55
5.2.1 地质构造对地应力的影响	55
5.2.2 地层埋藏深度对地应力的影响	55
5.2.3 油气田开发活动对地应力的影响	56
5.3 三维分层地应力模型与井眼岩石破裂准则的建立	58
5.4 分层地应力软件计算模型	62
5.4.1 测井曲线计算	62
5.4.2 岩石力学参数计算	62
5.4.3 分层地应力参数计算	63
5.5 非均匀地应力对套损的影响	65
5.5.1 非均匀地应力作用下套管应力分析	66
5.5.2 非均匀载荷作用下套管强度分析	77
5.5.3 非均匀地应力作用下套管强度设计	79
第6章 射孔对套管强度影响的规律研究	82
6.1 射孔层段套损井现状分析	82
6.2 套管射孔强度分析研究的基本理论及方法	83
6.2.1 基本理论	83
6.2.2 套管研究类型确定	86
6.2.3 数值模拟计算方法	86
6.2.4 射孔区最大应力值及射孔强度影响系数分析	87
6.2.5 套管压屈服条件下外挤压力变化情况	91
6.3 模拟仿真靶位与套管抗非均匀外载模拟试验	93

6.3.1	模拟仿真靶位试验	93
6.3.2	套管抗非均匀外载试验	95
第7章	油气井射孔工艺设计原理研究	99
7.1	射孔参数对油气层产能影响规律的研究	99
7.1.1	损害程度及损害半径	99
7.1.2	负压差设计	102
7.1.3	射孔参数对产能比的影响	106
7.2	射孔参数的优化设计	107
7.2.1	Tariq 理论	107
7.2.2	有限元优化理论	107
第8章	低渗透油气藏水平井产能预测研究	108
8.1	低渗透水平井产能预测方法	108
8.1.1	稳态解	108
8.1.2	拟稳态解	109
8.1.3	部分打开水平井的产能预测	110
8.2	低渗透压裂水平井产能计算方法	111
8.2.1	渗流模型的建立	111
8.2.2	公式推导	111
8.2.3	压裂水平井的产能分析	113
8.3	气藏水平井压裂产能计算实例	114
8.3.1	水平井压裂产能预测计算实例	114
8.3.2	水平井压裂产能敏感性分析	117
第9章	水平井压裂管柱受力分析方法	118
9.1	下入过程管柱的受力与变形分析	118
9.2	锚定过程管柱的受力与变形分析	119
9.2.1	活塞效应引起压裂管柱的应力与变形	119
9.2.2	横向效应引起压裂管柱的应力与变形	119
9.2.3	压裂管柱锚定时应力与变形	120
9.3	坐封过程管柱的受力与变形分析	120
9.4	压裂过程管柱的受力分析	121
9.4.1	活塞效应引起压裂管柱的应力	121
9.4.2	横向效应引起压裂管柱的应力	121

9.4.3 温差效应引起压裂管柱的热应力·····	122
9.4.4 摩阻效应引起压裂管柱的应力·····	122
9.4.5 压裂时管柱的轴向载荷·····	124
9.5 压裂过程封隔器的轴向载荷分析·····	124
9.6 压裂管柱力学分析实例·····	125
第10章 水平井压裂现场施工技术·····	130
10.1 水平井分段压裂工具·····	130
10.1.1 分段压裂方式·····	130
10.1.2 水平井分段压裂工艺管柱·····	134
10.1.3 主要配套工具·····	135
10.1.4 中间试验·····	140
10.1.5 工具强度校核·····	146
10.2 水平井压裂射孔优化·····	149
10.3 水平井压裂工作液研究·····	153
10.3.1 HPG 水基压裂液·····	153
10.3.2 VES 压裂液·····	154
10.4 水平井压力降落诊断·····	156
第11章 水平井完井及压裂现场实践·····	165
11.1 分段压裂工艺选择·····	166
11.2 射孔方案与压裂管柱·····	167
11.2.1 射孔方案·····	167
11.2.2 压裂施工管柱·····	168
11.3 现场压裂施工·····	171
11.4 压后效果分析·····	175
参考文献·····	178

第1章 气田地质特征

大牛地气田位于内蒙古自治区伊金霍洛旗、乌审旗与陕西省榆林市交界地区(见图 1-1), 属于中国石化鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区油气勘探区块。该地区人烟稀少, 自然地理条件较差, 地表为沙漠、低缓沙丘和草原, 常年干旱缺水, 最高气温达 40°C , 最低气温达 -30°C , 平均年气温为 7.2°C , 平均年降水量为 275mm 。区内有 210 国道, 乡间公路成网, 交通比较便利。

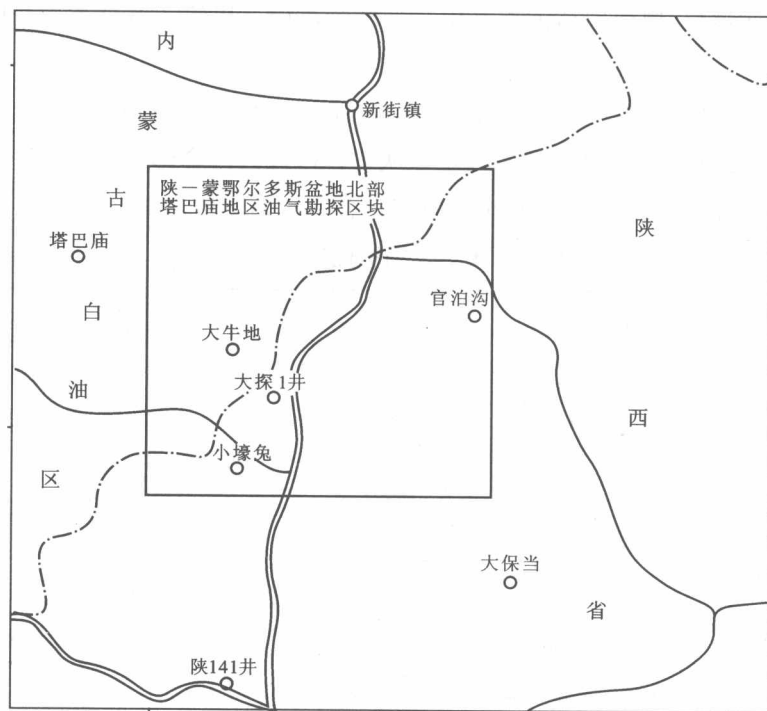


图 1-1 大牛地气田开发井区地理图

1.1 地层特征

大牛地气田钻井平均揭露地层厚度 3000m, 自上而下有第四系, 白垩系志丹群, 侏罗系安定组、直罗组、延安组, 三叠系延长组、二马营组、和尚沟组、刘家沟组, 二叠系石千峰组、上石盒子组、下石盒子组、山西组, 石炭系太原组、本溪组, 奥陶系上马家沟组。其中, 二叠系下石盒子组、山西组, 石炭系太原组为主要目的层。表 1-1 为大牛地气田地层层序。

石炭系太原组: 滨海相沉积, 厚度为 25~82m, 平均 50m, 埋藏深度 2690~2970m。岩性主要为深灰色、黑色泥岩、炭质泥岩、煤层与灰白色中—粗砂岩互层, 局部夹灰岩透镜体, 可分为太一、太二段。

二叠系山西组: 三角洲平原、滨岸沼泽沉积, 厚度为 78~126m, 平均 106m, 埋藏深度 2640~2940m。岩性主要为灰色中—粗粒砂岩、砂砾岩、砾岩与黑色、深灰色泥岩、黑色炭质泥岩互层, 下部含煤层、煤线。可分为山一段和山二段。

二叠系下石盒子组: 河流相沉积, 厚度为 99~173m, 平均 139m, 埋藏深度 2540~2840m。岩性主要为浅灰、灰白色砂砾岩、含砾粗砂岩、中粗砂岩与灰色、棕褐色泥岩互层。可分为盒一、盒二、盒三段。

表 1-1 大牛地气田地层层序

新生界	第四系			喜马拉雅运动	干旱河湖 与风成相
	第三系				
中生界	白垩系	下统	志丹组 K _{1z}	燕山运动	河湖相
	侏罗系	中统	安定组 J _{2a}		
			直罗组 J _{2z}		
		下统	延安组 J _{1y}		
			富县组 J _{1f}		
	三叠系	上统	延长组 T _{3y}	印支运动	
		中统	纸坊组 T _{2z}		
		下统	和尚沟组 T _{1h}		
			刘家沟组 T _{1L}		

续表

古生界	二叠系	上统	石千峰组 P _{2sh}	海西运动	海陆交互相
			上石盒子组 P _{2s}		
		下统	下石盒子组 P _{1x}		
			山西组 P _{1s}		
	石炭系	上统	太原组 C _{3t}		
		中统	本溪组 C _{2b}		
	奥陶系	上统	背锅山组 O _{3b}	加里东运动	海相碳酸盐相
		中统	平凉组 O _{2p}		
		下统	上马家沟组 O _{1sm}		
			下马家沟组 O _{1xm}		
			亮甲山组 O _{1L}		
			冶里组 O _{1y}		
	寒武系				

1.2 构造特征

鄂尔多斯盆地(图 1-2)为一不对称的向斜盆地,向斜轴部位于天池—环县南北狭窄区域,东翼所辖地区构成了盆地的主体,为一西倾大单斜,地层倾角小于 1°。根据盆地演化史和构造形态,盆地内部可以划分为六个一级构造单元:伊盟隆起、渭北隆起、西缘冲断带、晋西挠褶带、天环坳陷和陕北斜坡。

大牛地气田位于盆地的北东部,其构造位置在陕北斜坡北部,区块内构造、断裂不发育,总体为一北东高、西南低的平缓单斜,平均坡降 6~9m/km,地层倾角 0.3°~0.6°。局部发育鼻状隆起,未形成较大的构造圈闭。该区主压应力轴方向不集中,优势方位以 45°~80°居多,主拉应力优势方位以 301°~350°居多,应力作用方向以 NEE 向为主,其次 NWW 向,最小主应力值在 23~50MPa 之间。

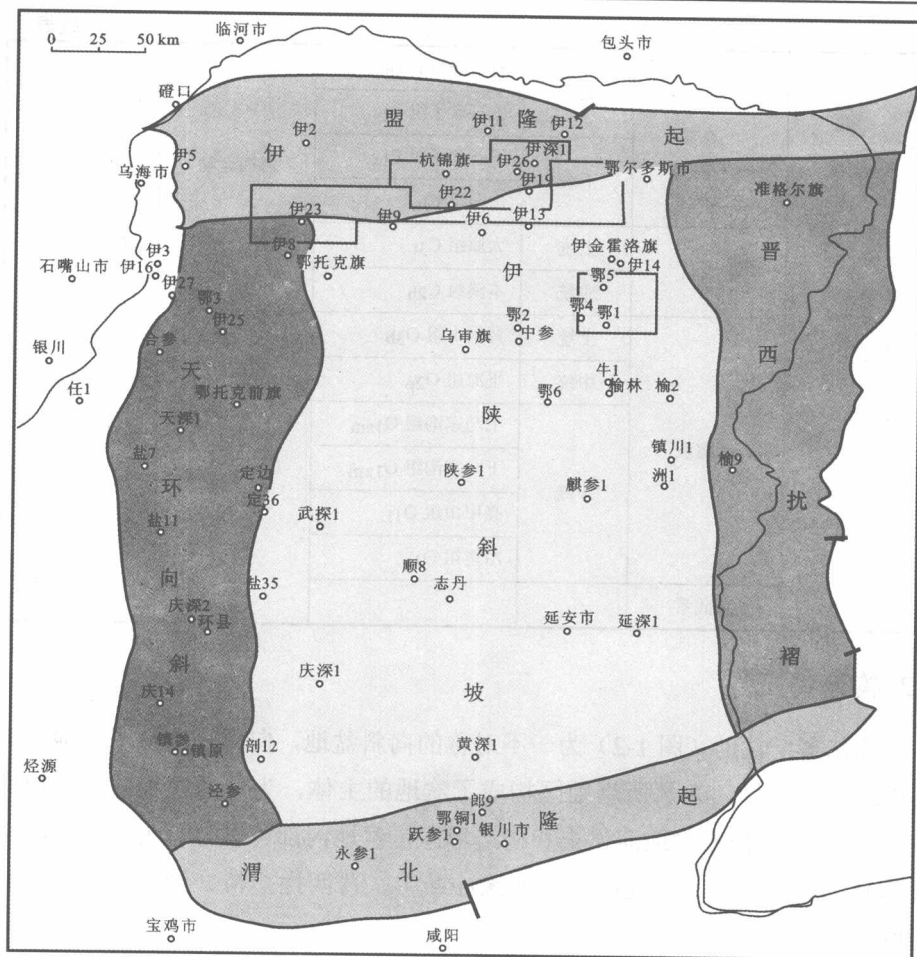


图 1-2 大牛地气田区域构造特征

1.3 沉积特征

通过野外露头观察、岩心分析,结合测井相分析及区域沉积相划分研究成果,大牛地气田太原期-下石盒子期为-套海相-海陆过渡相-陆相的沉积,其中太原组为具障壁的滨海相沉积,山西组为三角洲相沉积,下石盒子组为河流相沉积。盒 2、盒 3 气层的沉积相在平面上总体呈 4 条辫状河道展布,方向为北东~南西向或近南北向,在纵向上 4 条河道错落叠置,并且由西向东,河流规模减小,以目前的试气成果来看,产气层主要分布在西边两条河道砂中。

1.4 储层特征

大牛地气田上古生界储层岩石粒度以中、粗粒为主,碎屑岩石英含量 67%~90.5%,长石含量 0.7%~3.8%,岩性以岩屑砂岩、岩屑石英砂岩和石英砂岩为主。山西组与下石盒子组砂岩储层岩石特征相似,碎屑颗粒含量平均为 87.65%~89.0%,其中石英平均含量 68%~75%,长石平均含量 1.4%~2.4%,岩屑平均含量 24%~30%。但在胶结物的成分和含量上有明显差别,下石盒子组中绿泥石、石英、高岭石含量高;山西组胶结物中普遍发育菱铁矿、白云石等自生矿物,而下石盒子组中则不发育,表明二者的沉积、成岩环境有明显差别。

太原组储层岩石特征明显不同于下石盒子组及山西组,突出表现在碎屑颗粒石英含量较高,平均 90.5%,而下石盒子组、山西组平均 67%~75%;太原组在长石、岩屑含量上则远低于下石盒子组、山西组。从泥质杂基的含量上对比,太原组则与下石盒子组的盒 2 气层组相近,平均含量为 1.7%~2.5%,而盒 1 气层组与山西组的泥质杂基则平均为 4.3%~7.1%;从胶结物的成分和含量上,太原组与山西组接近,均含有菱铁矿、褐铁矿和白云石等自生矿物,而下石盒子组未见,石英胶结物的含量明显高于下石盒子组和山西组。

总体上,下石盒子组、山西组、太原组储层为低孔低渗,其中盒 3 段储层物性相对最好,平均孔隙度 10.27%、平均渗透率 $1.36 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;其次为盒 2、太 2 段储层,盒 2 平均孔隙度为 8.66%,平均渗透率 $0.73 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,太 2 平均孔隙度为 8.58%,平均渗透率 $0.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;而盒 1、山 2、山 1 段储层物性相对较差。

表 1-2 大牛地气田岩芯物性分析数据

层位	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
盒 3 段	<u>4.0~18.69</u> 9.5	<u>0.1~23.008</u> 1.357
盒 2 段	<u>4.0~16.99</u> 8.85	<u>0.109~25.1</u> 0.996
盒 1 段	<u>4.0~19.3</u> 8.37	<u>0.101~53.6</u> 0.484
山 2 段	<u>4.0~21.4</u> 8.18	<u>0.1~18.76</u> 0.575
山 1 段	<u>4.0~18.9</u> 7.41	<u>0.1~10.1</u> 0.743
太原组	<u>4.0~15.7</u> 8.32	<u>0.1~61.0</u> 1.118

上古生界储层孔隙类型有粒间孔(残余原生粒间孔、溶蚀粒间孔)、粒内溶孔、晶间微孔和微裂缝,其中主要孔隙类型为粒间孔。层内非均质性主要表现在层内渗透率的非均质性方面,盒3、盒2及太2气层组内各小层的层内非均质总体较弱,均质性较强,而盒1、山2、山1储层层内非均质性相对较差。

1.5 气藏特征

按照天然气划分标准,太2、山1、山2、盒1天然气类型为湿气,盒2天然气近干气型,盒3天然气类型为干气。气田不同部位、不同层位产出的原油组分、特征相近,地面原油密度均较低,平均值为 $0.74\sim 0.79\text{g/cm}^3$;运动黏度低,平均 $0.95\sim 1.33\text{mm}^2/\text{s}$;组分为 $\text{C}_6\sim\text{C}_{25}$ 烃类,不含蜡质、低含水、微含硫,属凝析油。根据目前水分析结果,太2、山1、山2、盒1水型均为氯化钙型,说明气藏是封闭系统。各层总矿化度差别较大,但总体而言,自下而上总矿化度逐渐降低。

按相态特征划分,山1、山2、盒1、盒2,盒3均为湿气。层位有下石盒子组、山西组和太原组,平均温度 $83.37\sim 88.22^\circ\text{C}$,上古生界气藏属于正常温度系统。对所有DST压力统计表明,气田平均地层压力系数 $0.89\sim 0.99$,为低压-常压系统。

根据气田的试气成果,结合气田产能特点,表明盒2、盒3气层组储层是气田的优质储层,为气田的高产层位;对于盒1、山2、山1等中低产层,则采用多层合采方式,提高单井产量,提高储量动用程度;太2气层则是近期大力开发的层位。所以在进行有利区块评价时,主要是通过优选有利沉积相带、气层发育区、物性好、含气好和产能分布高值区等气层最有利部位,圈定为盒2、盒3气藏高产区,多层叠合有利区和太2区。

第2章 岩石力学及地应力特征

大牛地气田属于低压低孔低渗致密气藏,水力压裂改造是大牛地气田投产的主要工艺措施,为了研究与气藏相适应的压裂工艺技术,进行了岩石力学特征、区块现今构造应力场分布特征的研究,为水平井完井及压裂改造提供了基础。

2.1 区块岩石力学特征研究

2.1.1 杨氏模量和泊松比

岩石力学特性参数是分析地应力以及水力裂缝扩展的基础参数。采用测井以及室内岩芯声波测定的方法,获取了该区块静态岩石力学参数。如果设纵、横波传播速度为 V_p 、 V_s ,岩石为弹性体,其动态杨氏模量为 E_d 、泊松比 μ_d 分别为:

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (2-1)$$

$$\mu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2-2)$$

式中, ρ 为岩石密度。

得到 E_d 、 μ_d 后,便可根据弹性理论的有关公式,导出其它一些弹性参数。对大牛地气田大25等10个井区的石盒子组、山西组和太原组三个地层的岩心通过声波测试实验,测定岩心的动态杨氏模量和动态泊松比,并转换为静态杨氏模量和静态泊松比,见表2-1和表2-2。