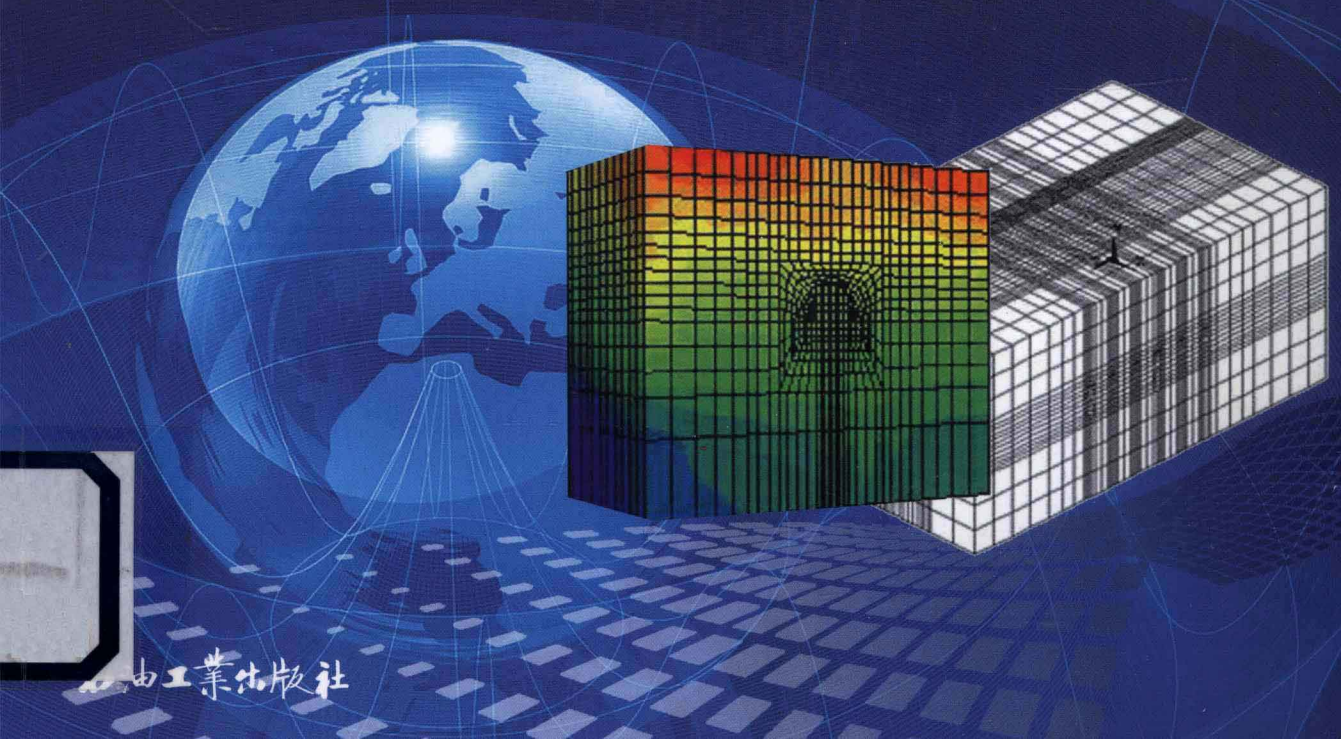


海拉尔盆地 三维地应力模拟评价研究

杨 野 著



HAILAER PENDI
SANWEI DIYINGLI MONI PINGJIA YANJIU



石油工业出版社

海拉尔盆地三维地应力 模拟评价研究

杨 野 著

石油工业出版社

内 容 简 介

本书针对海拉尔盆地希3区块南屯组和布达特储层,系统地阐述了三维地应力数值模拟的基本方法、模拟过程及其意义。三维地应力数值模拟研究内容主要包括岩石物理力学性质实验、地应力大小和方向的测定、地层力学纵向剖面研究、三维地应力模拟研究。通过室内岩心测试,结合测井曲线确定了单井纵向上的地应力分布,在此基础上应用数值模拟软件,模拟了在地质构造条件约束下的井间地应力分布。上述成果可作为油藏模拟、水力压裂设计、井壁稳定分析、出砂分析、套管损坏机理分析的基础数据。

本书可供从事油田地质及高等院校相关人员参考应用。

图书在版编目(CIP)数据

海拉尔盆地三维地应力模拟评价研究/杨野著.

北京:石油工业出版社,2010.10

ISBN 978-7-5021-8052-2

I. 海…

II. 杨…

III. 海拉尔盆地-三维-地应力-评价

IV. P315.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第189685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) 64523736

发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2010年10月第1版 2010年10月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:10.25

字数:258千字 印数:1—1000册

定价:40.00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

地应力是油气资源评价、油藏模拟、油气井工程设计和施工的重要基础资料之一。井壁不稳定、套管损坏、生产出砂等都是地应力局部集中的结果。而岩体稳定性受控于地应力作用下形成的各种结构面和现今地应力场与岩体的相互作用。地应力不仅是决定区域稳定性和岩体稳定性的重要因素，而且对油气藏开发有重大影响。地层岩石所处的地应力必然成为控制储层特性和勘探开发效益的重要因素。油气勘探开发的众多问题与地应力密切相关，如：地质构造形成与演化、油气运移和聚集、钻井过程中井壁的稳定、水平井的设计、采油过程中的出砂、油层改造和注水开发中井网的布置等。在高应力区打井会引起一系列与应力释放相联系的变形和破坏现象，其后果不但会恶化井眼的工程地质条件，而且使测井、固井质量受到影响。油井出砂是另一井眼不稳定现象，给生产带来诸多困难。采油过程中诸多生产制度的变化，都会导致地应力的变化，反过来地应力的变化，又使储层孔渗饱等物性参数发生变化，直接影响着油井产量和采收率。可见，油气勘探开发中进行地应力研究及应用已经受到国内外石油界的普遍重视。从某种意义上讲，油气勘探开发过程要解决的就是地下岩体渗流场、应力场、温度场的耦合问题（李志明，1997）。

地应力是在地质构造运动和岩体重力等作用下形成的。地应力形成后，许多局部因素又使其发生变化，因而地应力的分布往往是十分复杂的，局部应力和区域应力之间有相当大的差异，这种差异的主要原因之一在于不同尺度的断裂构造的发育。工程实践和地应力测量结构表明，在各种尺度的断裂附近，地应力的大小和方向都发生一定程度的变化。因此，可以通过实验测量地应力的大小和方向以及有限元数值计算方法分析构造区域内地应力的分布规律。

在本书的编写过程中，得到了中国石油大学（华东）的程远方教授和大庆采油工程研究院王群嶷博士、冯立博士、王远涛工程师、才庆工程师、张晶明助理工程师的大力帮助，在此向他们表示衷心的感谢。

目 录

§1 岩石物理力学性质实验	(1)
1.1 实验目的	(1)
1.2 实验原理与实验仪器	(1)
1.3 岩石物理力学性质实验结果	(4)
1.4 希3区块测试数据合理选用值	(24)
1.5 岩石力学性质变化规律及影响因素分析	(25)
§2 古地磁岩心定向及波速各向异性实验	(29)
2.1 古地磁定向实验原理	(29)
2.2 古地磁定向实验仪器	(30)
2.3 古地磁定向岩样制备	(31)
2.4 古地磁定向实验步骤	(31)
2.5 定向实验结果与分析	(32)
2.6 波速各向异性测量地应力方向	(38)
§3 差应变地应力测试实验	(49)
3.1 实验原理及方法	(49)
3.2 实验岩样制备	(49)
3.3 实验结果	(50)
3.4 实验结果分析	(58)
§4 地层力学参数纵向剖面研究	(61)
4.1 概述	(61)
4.2 海拉尔希3区块地层力学参数纵向剖面	(68)
§5 海拉尔希3区块三维地应力场数值模拟研究	(72)
5.1 油田地质概况	(72)
5.2 地应力场模拟方法简介	(74)
5.3 海拉尔希3区块三维地应力场有限元研究	(76)
§6 地应力场在开发过程中应用	(137)
6.1 希3区块测试数据合理选用值	(137)
6.2 裂缝分布预测	(138)
6.3 水力压裂	(143)
6.4 射孔参数对压裂压力及裂缝形态的影响	(152)
6.5 出砂预测	(153)
6.6 注采井网布置	(155)
参考文献	(156)

§ 1 岩石物理力学性质实验

1.1 实验目的

岩石物理力学性质主要是指岩石的密度、含水量、波速、弹性模量、泊松比、强度等参数。在油气勘探开发过程中,许多研究课题都需要这些参数,如油藏数值模拟需要体积压缩系数,出砂预测需要抗剪强度等。因此,开展岩石物理力学性质参数的测定具有重要意义。

利用伺服控制岩石力学三轴实验系统对大庆油田海拉尔希3区块南一段油层及布达特群油层95块岩心进行了多种物理力学参数的测定工作,其中包括密度、弹性模量、泊松比、单轴抗压强度、单轴抗拉强度、三轴抗压强度、内聚力和内摩擦角等。

1.2 实验原理与实验仪器

岩石的弹性参数是指岩石的弹性模量和泊松比,通常由静力法测定。即通过岩样在准静态载荷条件下的应力—应变关系曲线,求取弹性参数,这些参数通常称为静态弹性参数。

通过岩石纵横波速度、容积密度求取的弹性参数称为动态弹性参数。动态弹性参数不同于静态弹性参数,二者之间存在着一定的依存关系。

实验的目的是进行动静态参数的同步测试,用以建立动、静态弹性参数之间的关系,使得利用测井资料解释地层力学参数成为可能。

如果测得岩石纵波和横波的传播速度及岩石密度,由下述关系可求得岩石的弹性参数,称为动态弹性参数。

动态泊松比:

$$\nu_d = \frac{0.5 (v_p/v_s)^2 - 1}{(v_p/v_s)^2 - 1} \quad (1-1)$$

式中 ν_d ——动态泊松比;

v_p ——纵波波速, m/s;

v_s ——横波波速, m/s。

动态弹性模量:

$$E_d = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} \times 10^3 \quad (1-2)$$

式中 E_d ——动态弹性模量, MPa;

ρ ——岩样密度, g/cm³。

1.2.1 试样的制备方法

研究岩石的变形与破坏是工程岩石力学的重要内容，只有知道了岩石的变形特征和破坏类型，才能正确地选择破坏准则，为地下结构的应力分析打好基础。

要测量岩石的力学性能，首先就要制备符合标准的试件。按以下步骤制备试件：

- (1) 用下料机将现场取得的岩心切成一定高度的岩心柱。
- (2) 用取心钻头钻取直径为 25.4mm 的岩心。
- (3) 用磨床或车床加工岩心端面，使其保持平行。
- (4) 用研磨机将端面及周边修整光滑。

具体标准参见国际岩石力学学会推荐标准。

1.2.2 实验设备及实验原理

测量岩心密度、纵波与横波波速、单轴抗压强度、单轴抗拉强度、三轴强度所用仪器设备分别介绍如下。

(1) 岩心密度。

采用量积法测量岩心的密度。测量圆柱形岩心的高度 h 和直径 d 各 3~5 次，取平均值；然后用电子天平测量试样的质量。用下式计算岩心密度 ρ ：

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h} \quad (1-3)$$

式中 m ——岩心的质量，g；

d ——岩心直径，cm；

h ——岩心的高度，cm。

(2) 岩心纵波、横波波速。

图 1-1 为岩心超声波波速测试原理示意图。为了模拟地层的原始压力环境，测试时利用岩石力学三轴实验系统给岩心加载，用超声波参数测定仪测定岩心试件的纵横波时差。然后，利用下式计算纵波、横波波速：

$$v_p = \frac{L}{t_p - t_{p0}} = \frac{L}{\Delta t_p} \quad (1-4)$$

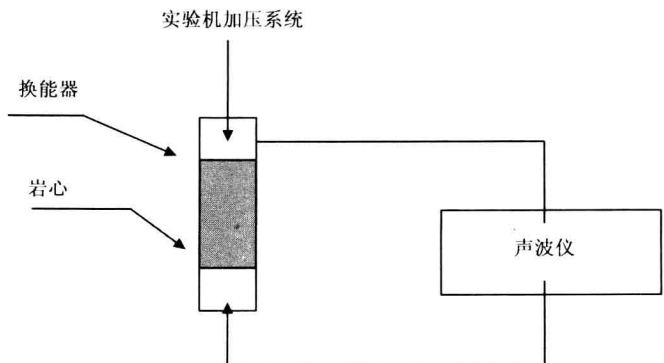


图 1-1 岩心超声波波速测试原理示意图

$$v_s = \frac{L}{t_s - t_{s0}} = \frac{L}{\Delta t_s} \quad (1-5)$$

式中 L ——岩心高度, m;

Δt_p ——纵波在岩样中的传播时间, μs ;

t_{p0} ——纵波开始传播的时间点;

Δt_s ——横波在岩样中的传播时间, μs 。

t_{s0} ——横波传播结束的时间点。

岩石力学三轴实验系统为伺服控制三轴岩石力学实验系统, 它可以模拟地层的温度、压力条件进行多种岩石力学实验。其技术指标如下:

轴向力 $1.0 \times 10^7 kN$; 围压 100MPa; 孔隙压力 60MPa; 温度 150℃。

通过伺服控制系统可以按事先设定的程序给岩样加轴压、围压和孔隙水压。

岩石超声波测定仪为美国泛美公司 (PANAMETRICS) 的产品 (Model 5058PR), 包括信号发生器、示波器及发射探头和接收探头 (换能器)。仪器采用脉冲工作方式, 每秒钟向所测岩心发射超声脉冲, 并在指定地点接收声波信号。

测试时在换能器和岩样之间加上耦合剂, 以保证岩心与换能器间的耦合, 使声波能较好地进入岩样。

(3) 单轴抗压强度。

有关岩石单轴抗压强度实验原理示意图, 如图 1-2 所示。

利用下式计算岩心单轴抗压强度:

$$\sigma_c = \frac{P_c}{A} \quad (1-6)$$

式中 σ_c ——单轴抗压强度, MPa;

P_c ——破坏时的载荷, N;

A ——岩样的截面积。



图 1-2 岩石的单轴抗压强度实验原理示意图

(4) 单轴抗拉强度。

岩石的单轴抗拉强度通常通过巴西实验获得。图 1-3 是巴西实验示意图, 岩石单轴抗拉强度计算公式如下:

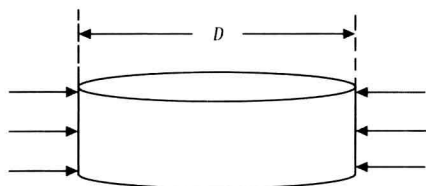


图 1-3 巴西实验示意图

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi DL} \quad (1-7)$$

式中 σ_t ——单轴抗拉强度, MPa;

p ——岩石破坏时的载荷, N;

D ——岩心的直径, mm;

L ——岩心的厚度, mm。

(5) 三轴抗压强度实验。

岩石三轴实验装置如图 1-4 所示, 将岩样放置在高压釜内, 通过液压油给岩心施加侧向

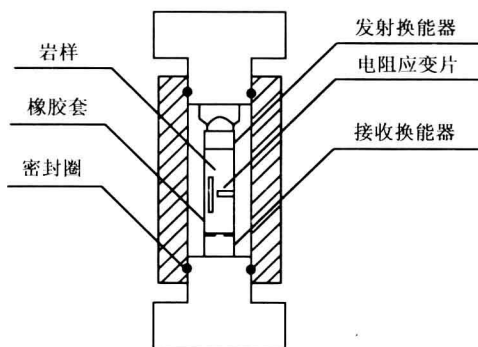


图 1-4 岩石三轴实验高压釜示意图

压力（围压），通过压机液缸给岩心施加轴向应力。实验过程中保持围压恒定，逐渐增加轴向载荷，直到岩石破坏。这样可得到岩心加载过程中轴向应变、轴向应变随轴向应力的变化曲线，同时得到岩心破坏时轴向应力 σ_1 和围压 σ_3 值。

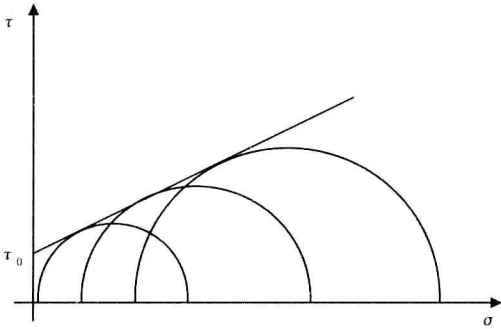


图 1-5 库仑—摩尔破坏准则

实验结束后，在 $\sigma-\tau$ 坐标系中可画出岩石破坏应力圆（图 1-5）。用相同的岩样在不同侧向压力 σ_3 下进行三轴实验，可以得到一系列岩石破坏时的 σ_1 、 σ_3 值，可画出一组破坏应力圆。这组破坏应力圆的包络线，即为岩石的抗剪强度曲线。

库仑—摩尔破坏准则是目前岩石力学最常用的一种强度准则。该准则认为岩石沿某一面发生破坏，不仅与该面上剪应力大小有关，而且与该面上的正应力有关。岩石并不沿最大剪应力作用面产生破坏，

而是沿剪应力与正应力达到最不利组合的某一面产生破坏。即：

$$|\tau_f| = \tau_0 + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \phi \tag{1-8}$$

$$f = \operatorname{tg} \phi \tag{1-9}$$

式中 $|\tau_f|$ ——岩石剪切面的抗剪强度，MPa；

τ_0 ——岩石固有的剪切强度，MPa；

σ_n ——剪切面上的正应力，Pa；

f ——内摩擦系数；

ϕ ——内摩擦角（°）。

在 $\sigma-\tau$ 坐标系下，库仑—摩尔破坏准则可以用如图 1-5 所示的一条直线来表示。

1.3 岩石物理力学性质实验结果

1.3.1 原始岩心数据

对大庆油田海拉尔希 3 区块大磨拐河组、南一段及布达特群层位不同岩性的岩心试样进行了密度、弹性模量、泊松比、峰值强度、抗拉强度、抗压强度等参数的测试，岩心的原始数据见表 1-1。

表 1-1 希 3 区块岩心的原始数据

岩样组	岩心号	井名	层位	井深 (m)	岩性	高度 (mm)	密度 (g/cm ³)
1	A1	希 3 井	南一段	2407.50	灰色泥岩	45.15	2.42
	A2	希 3 井	南一段	2407.50	灰色泥岩	45.88	2.41
	A3	希 3 井	南一段	2407.50	灰色泥岩	47.41	2.43
	A4	希 3 井	南一段	2407.50	灰色泥岩	48.98	2.42

续表

岩样组	岩心号	井名	层位	井深 (m)	岩性	高度 (mm)	密度 (g/cm ³)
2	B1	希3井	南一段	2409.50	灰色砂砾岩	48.66	2.42
	B2	希3井	南一段	2409.50	灰色砂砾岩	48.79	2.43
	B3	希3井	南一段	2409.50	灰色砂砾岩	48.19	2.44
	B4	希3井	南一段	2409.50	灰色砂砾岩	48.51	2.43
	B5	希3井	南一段	2409.50	灰色砂砾岩	43.3	2.42
3	C1	希3井	南一段	2417.10	灰色砂岩	49.83	2.30
	C2	希3井	南一段	2417.10	灰色砂岩	49.12	2.31
	C3	希3井	南一段	2417.10	灰色砂岩	49.78	2.30
	C4	希3井	南一段	2417.10	灰色砂岩	50.36	2.29
4	D1	希3井	南一段	2425.20	灰色砂砾岩	48.35	2.47
	D2	希3井	南一段	2425.20	灰色砂砾岩	49.07	2.46
	D3	希3井	南一段	2425.20	灰色砂砾岩	49.78	2.46
	D4	希3井	南一段	2425.20	灰色砂砾岩	50.36	2.74
5	E1	希3井	南一段	2429.20	粉砂岩	48.6	2.33
	E2	希3井	南一段	2429.20	粉砂岩	49.61	2.32
	E3	希3井	南一段	2429.20	粉砂岩	48.61	2.32
	E4	希3井	南一段	2429.20	粉砂岩	48.64	2.33
6	F1	海参5井	大磨拐河	2634.60	灰色粉砂岩	45.27	2.55
	F2	海参5井	大磨拐河	2634.60	灰色粉砂岩	48.45	2.55
	F3	海参5井	大磨拐河	2634.60	灰色粉砂岩	42.71	2.54
	F4	海参5井	大磨拐河	2634.60	灰色粉砂岩	46.89	2.54
7	G1	希5井	南一段	2699.88	灰色砂岩	48.7	2.41
	G2	希5井	南一段	2699.88	灰色砂岩	48.15	2.41
	G3	希5井	南一段	2699.88	灰色砂岩	48.86	2.40
	G4	希5井	南一段	2699.88	灰色砂岩	32.88	2.40
8	H1	希5井	南一段	2709.08	含油砂岩	48.61	2.18
	H2	希5井	南一段	2709.08	含油砂岩	49.65	2.20
	H3	希5井	南一段	2709.08	含油砂岩	49.51	2.17
	H4	希5井	南一段	2709.08	含油砂岩	48.5	2.16
9	I1	希5井	南一段	2716.88	粉砂岩	49.38	2.48
	I2	希5井	南一段	2716.88	粉砂岩	48.14	2.46
	I3	希5井	南一段	2716.88	粉砂岩	48.92	2.48
	I4	希5井	南一段	2716.88	粉砂岩	48.59	2.46
10	J1	希5井	南一段	2721.13	粉砂岩	50.11	2.32
	J2	希5井	南一段	2721.13	粉砂岩	50.09	2.32
	J3	希5井	南一段	2721.13	粉砂岩	49.24	2.33

续表

岩样组	岩心号	井名	层位	井深 (m)	岩性	高度 (mm)	密度 (g/cm ³)
10	J4	希 5 井	南一段	2721.13	粉砂岩	38.23	2.32
	J5	希 5 井	南一段	2721.13	粉砂岩	37.36	2.31
11	K1	希 5 井	布达特群	2812.53	灰黑色泥岩	49.51	2.64
	K2	希 5 井	布达特群	2812.53	灰黑色泥岩	48.99	2.66
	K3	希 5 井	布达特群	2812.53	灰黑色泥岩	50.04	2.64
	K4	希 5 井	布达特群	2812.53	灰黑色泥岩	50.48	2.64
	K5	希 5 井	布达特群	2812.53	灰黑色泥岩	49.98	2.64
12	L1	希 5 井	南一段	2607.50	灰色泥岩	49.56	2.43
	L2	希 5 井	南一段	2607.50	灰色泥岩	50.12	2.44
	L3	希 5 井	南一段	2607.50	灰色泥岩	50.20	2.44
	L4	希 5 井	南一段	2607.50	灰色泥岩	50.15	2.43
	L5	希 5 井	南一段	2607.50	灰色泥岩	50.08	2.44

1.3.2 纵波、横波波速测定结果

对上述岩心首先测试了岩石的容积密度，然后在每一组中选出一块或两块具有代表性的岩样进行不同围压条件下的纵波、横波速度测试。海拉尔希 3 区块岩心的纵波、横波波速结果如表 1-2 所示。

表 1-2 海拉尔希 3 区块纵波、横波波速测试结果

井号	岩心号	井深 (m)	围压 (MPa)	轴压 (kN)	纵波波速 (m/s)	横波波速 (m/s)
希 3	A1	2407.5	0	0	3063.09	1674.246
			5	3	3026.14	1649.378
				5	3026.14	1649.378
				8	3063.09	1674.246
				11	3100.96	1699.719
			10	6	3063.09	1674.246
				8	3100.96	1699.719
				11	3100.96	1699.719
				14	3139.78	1725.816
			15	9	3139.78	1725.816
				11	3139.78	1725.816
				13	3179.58	1752.56
				16	3179.58	1752.56
			20	12	3179.58	1752.56
				14	3220.40	1779.973
				16	3220.40	1779.973
				18	3264.64	1809.661

续表

井号	岩心号	井深 (m)	围压 (MPa)	轴压 (kN)	纵波波速 (m/s)	横波波速 (m/s)
希 3	A1	2407. 5	25	15	3264. 64	1809. 661
				17	3264. 64	1809. 661
				19	3264. 64	1809. 661
				21	3307. 69	1838. 526
			30	17	3307. 69	1838. 526
				19	3307. 69	1838. 526
				21	3351. 89	1868. 136
				23	3351. 89	1868. 136
希 3	B4	2409. 5	0	0	4682. 43	2773. 284
			5	3	4682. 43	2773. 284
				5	4682. 43	2773. 284
				8	4765. 23	2827. 076
				11	4851. 00	2882. 603
			10	6	4851. 00	2882. 603
				8	4851. 00	2882. 603
				11	4851. 00	2882. 603
				14	4851. 00	2882. 603
			15	9	4851. 00	2882. 603
				11	4851. 00	2882. 603
				13	4939. 92	2939. 947
				16	4939. 92	2939. 947
			20	12	4939. 92	2939. 947
				14	4939. 92	2939. 947
				16	4939. 92	2939. 947
				18	4939. 92	2939. 947
			25	15	4939. 92	2939. 947
				17	4939. 92	2939. 947
				19	5032. 16	2999. 195
				21	5032. 16	2999. 195
			30	17	5032. 16	2999. 195
				19	5032. 16	2999. 195
				21	5032. 16	2999. 195
				23	5032. 16	2999. 195

续表

井号	岩心号	井深 (m)	围压 (MPa)	轴压 (kN)	纵波波速 (m/s)	横波波速 (m/s)
希 3	C4	2417.1	0	0	3506.96	1962.736
			5	3	3259.55	1798.646
				5	3461.17	1932.444
				8	3643.99	2053.133
				11	3795.03	2152.305
			10	6	3692.08	2084.763
				8	3744.24	2119.013
				11	3847.21	2186.451
				14	3900.85	2221.482
			15	9	3900.85	2221.482
				11	3900.85	2221.482
				13	3956.01	2257.431
				16	4012.75	2294.331
			20	12	4012.75	2294.331
				14	4012.75	2294.331
				16	4074.43	2334.354
				18	4074.43	2334.354
			25	15	4012.75	2294.331
				17	4012.75	2294.331
				19	4074.43	2334.354
				21	4074.43	2334.354
			30	17	4134.65	2373.327
				19	4134.65	2373.327
				21	4134.65	2373.327
				23	4134.65	2373.327

续表

井号	岩心号	井深 (m)	围压 (MPa)	轴压 (kN)	纵波波速 (m/s)	横波波速 (m/s)
希 3	D3	2425.2	0	0	4317.66	2491.088
			5	3	4317.66	2491.088
				5	4317.66	2491.088
				8	4387.74	2535.853
				11	4460.13	2581.944
			10	6	4460.13	2581.944
				8	4460.13	2581.944
				11	4534.95	2629.417
				14	4534.95	2629.417
			15	9	4534.95	2629.417
				11	4534.95	2629.417
				13	4612.32	2678.332
				16	4612.32	2678.332
			20	12	4612.32	2678.332
				14	4612.32	2678.332
				16	4696.91	2731.598
				18	4696.91	2731.598
			25	15	4696.91	2731.598
				17	4696.91	2731.598
				19	4696.91	2731.598
				21	4779.96	2783.679
			30	17	4779.96	2783.679
				19	4779.96	2783.679
				21	4779.96	2783.679
				23	4779.96	2783.679

续表

井号	岩心号	井深 (m)	围压 (MPa)	轴压 (kN)	纵波波速 (m/s)	横波波速 (m/s)
希 3	E4	2145.85	0	0	3659.89	2068.26
			5	3	3659.89	2068.26
				5	3764.71	2137.917
				8	3875.70	2211.458
				11	3935.28	2250.834
			10	6	3875.70	2211.458
				8	3935.28	2250.834
				11	3993.43	2289.2
				14	4053.33	2328.642
			15	9	4053.33	2328.642
				11	4115.06	2369.203
				13	4115.06	2369.203
				16	4115.06	2369.203
			20	12	4115.06	2369.203
				14	4178.69	2410.93
				16	4178.69	2410.93
				18	4178.69	2410.93
			25	15	4178.69	2410.93
				17	4248.03	2456.292
				19	4248.03	2456.292
				21	4248.03	2456.292
			30	17	4248.03	2456.292
				19	4248.03	2456.292
				21	4315.88	2500.567
				23	4315.88	2500.567

续表

井号	岩心号	井深 (m)	围压 (MPa)	轴压 (kN)	纵波波速 (m/s)	横波波速 (m/s)
海参5井	F2	2634.6	0	0	3971.31	2384.52
			5	3	3971.31	2384.52
				5	3971.31	2384.52
				8	4030.78	2429.093
				11	4095.52	2477.672
			10	6	4095.52	2477.672
				8	4095.52	2477.672
				11	4158.80	2525.21
				14	4158.80	2525.21
			15	9	4158.80	2525.21
				11	4224.06	2574.294
				13	4224.06	2574.294
				16	4224.06	2574.294
			20	12	4224.06	2574.294
				14	4291.41	2624.999
				16	4291.41	2624.999
				18	4291.41	2624.999
			25	15	4291.41	2624.999
				17	4291.41	2624.999
				19	4360.94	2677.401
				21	4360.94	2677.401
			30	17	4360.94	2677.401
				19	4360.94	2677.401
				21	4360.94	2677.401
				23	4360.94	2677.401

续表

井号	岩心号	井深 (m)	围压 (MPa)	轴压 (kN)	纵波波速 (m/s)	横波波速 (m/s)
希 5	G3	2699.88	0	0	3088.50	1707.26
			5	3	3122.04	1730.95
				5	3195.55	1782.92
				8	3274.80	1839.032
				11	3397.77	1926.259
			10	6	3355.77	1896.445
				8	3397.77	1926.259
				11	3440.85	1956.846
				14	3532.90	2022.277
			15	9	3485.02	1988.237
				11	3532.90	2022.277
				13	3579.49	2055.415
				16	3627.32	2089.455
			20	12	3627.32	2089.455
				14	3627.32	2089.455
				16	3676.45	2124.432
				18	3726.93	2160.382
			25	15	3726.93	2160.382
				17	3726.93	2160.382
				19	3781.73	2199.429
				21	3781.73	2199.429
			30	17	3781.73	2199.429
				19	3781.73	2199.429
				21	3835.16	2237.506
				23	3835.16	2237.506