

地应力预测研究及应用

安东石油技术（集团）有限公司

2024年2月

目 录

- 一、地应力概述及研究意义**
- 二、地应力预测及建模技术**
- 三、地应力在实践中的运用**

一、地应力概述及研究意义

(一) 地应力概述-历程



80年代进入石油工业，因在降低非生产时间和提高产量方面的实用性和有效性，获得国际石油公司的认可。可为苛刻环境下钻井和提高产量提供支持。

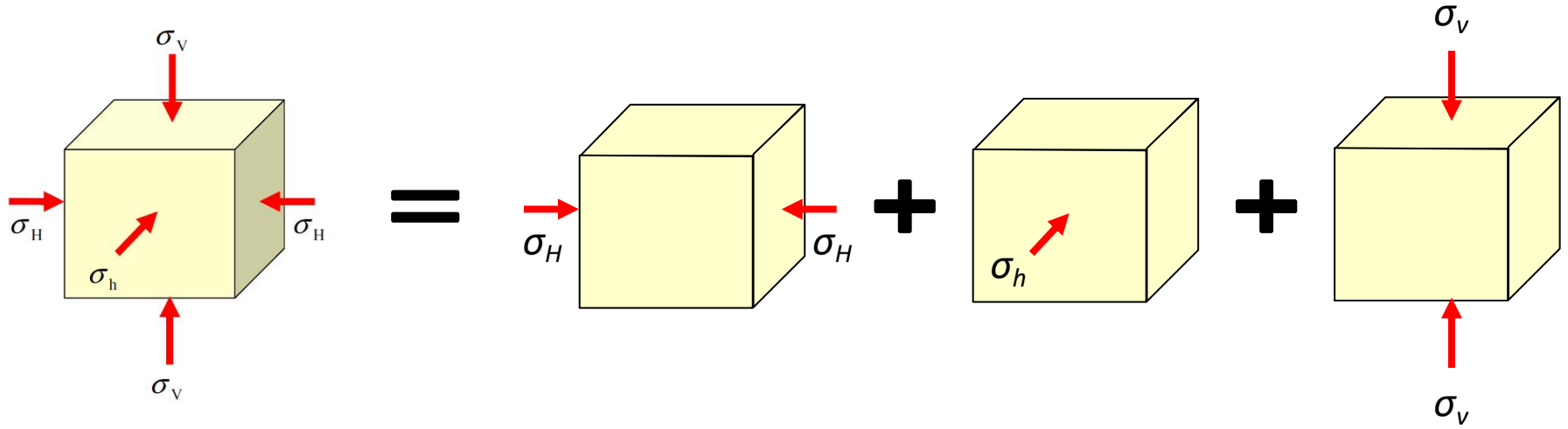
一、地应力概述及研究意义

(一) 地应力概述-定义

地应力是存在于地壳中的应力，即由于岩石形变而引起的介质内部单位面积上的作用力。它一般包括三部分：（1）由覆盖岩石的重量引起的**垂向应力**；（2）由邻近地块或底部传递过来的**构造应力**；（3）温度场变化引起的**热应力**。

State of stress in the earth

- σ_v - vertical or overburden stress
- σ_H - maximum horizontal stress
- σ_h - minimum horizontal stress
- The stresses are always mutually perpendicular
- The vertical stress is frequently, but not always, the largest
- The stresses in the earth are also known as in situ stresses or far field stresses



一、地应力概述及研究意义

(一) 地应力概述-基本概念

1、有效应力与孔隙压力

- **有效应力**：岩石骨架所承受的地应力。
- **孔隙压力**：孔隙流体所承受的力，也称为地层压力。

Terzaghi: $\sigma = \sigma' + P_p$

Handin: $\sigma = \sigma' + \alpha P_p$

α ：孔隙弹性系数，反应地层孔隙压力对骨架应力的影响程度。

一、地应力概述及研究意义

(一) 地应力概述-基本概念

2、古地应力与现今地应力

- **古地应力**：地质历史时期中某个时间的应力状态。
- **现今地应力**：目前地应力状态，是岩层在地质历史中经过多期变形、破裂后（应力集中、释放）到目前还“剩余”的应力。

工程研究主要应用现今地应力

一、地应力概述及研究意义

(一) 地应力概述-基本概念

3、重力应力、构造应力及热应力

- **重力应力**：由于上覆岩层的重量引起的地应力分量。
- **构造应力**：构造运动在岩体中引起的应力。地质力学中常把构造应力叫地应力，指导致构造运动、形成各种构造行迹的那部分应力。

构造应力只有两个水平主应力，属于水平的平面应力。
挤压构造力引起挤压构造应力，拉涨性构造应力引起拉张构造应力。
- **热应力**：由于地层温度发生变化在其内部引起的内应力增量，主要与温度的变化和岩石刚度和热学性质有关。

一、地应力概述及研究意义

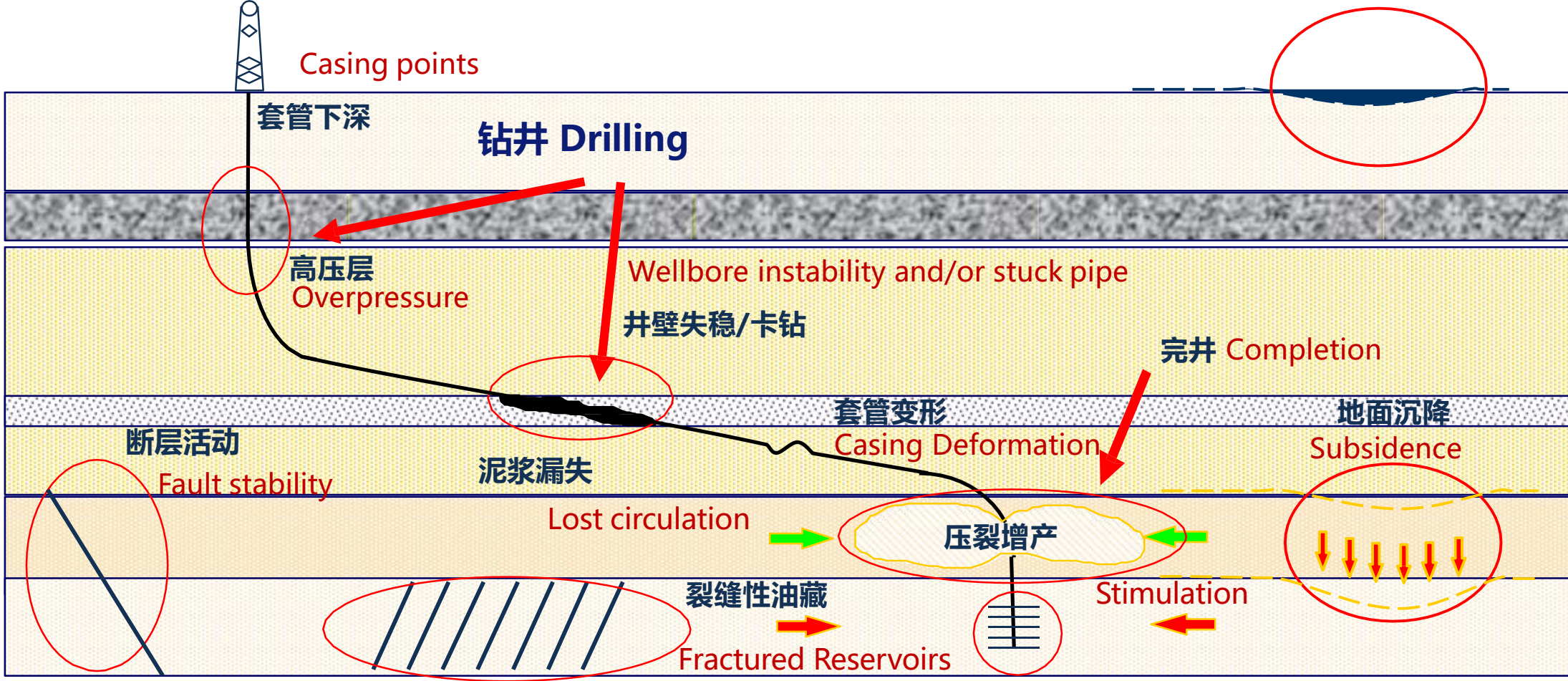
(一) 地应力概述-分类

地应力分类(据李志明, 张金珠)

分类依据	分类	定义	
地质年代	古地应力	泛指燕山运动以前的地应力, 有时也特指某一地质时期以前的地应力	
	现今地应力	目前存在或正在变化的地应力	
成因	原地应力	重力应力	指由于上覆岩层的重力引起的地应力分量, 特别指由于上覆岩层的重力所产生的应力
		构造应力	在构造地质学研究中, 构造应力是指导致构造运动、产生构造变形、形成各种构造行迹的那部分应力。在油田应力场的研究中构造应力常指由于构造运动引起的地应力的增量 构造应力是导致水平方向两个主应力不相等的根本原因
		热应力	由于地层温度发生变化在其内部引起的内应力增量, 热应力主要与温度的变化和岩石热学的性质有关
		扰动应力	是指由于地表和地下加载或减载及开挖等, 引起原地应力发生改变所产生的应力。在油田应力场的研究中, 是指钻井、油气开采、注水、注气等在地层中产生的地应力增量
应力方向	垂向应力	地壳中主要由重力应力构成、基本上呈垂直向的主应力	
	水平应力	主要由地壳中岩石侧向应力和水平向构造应力构成, 基本上呈水平向的主应力	

一、地应力概述及研究意义

(二) 研究意义



目 录

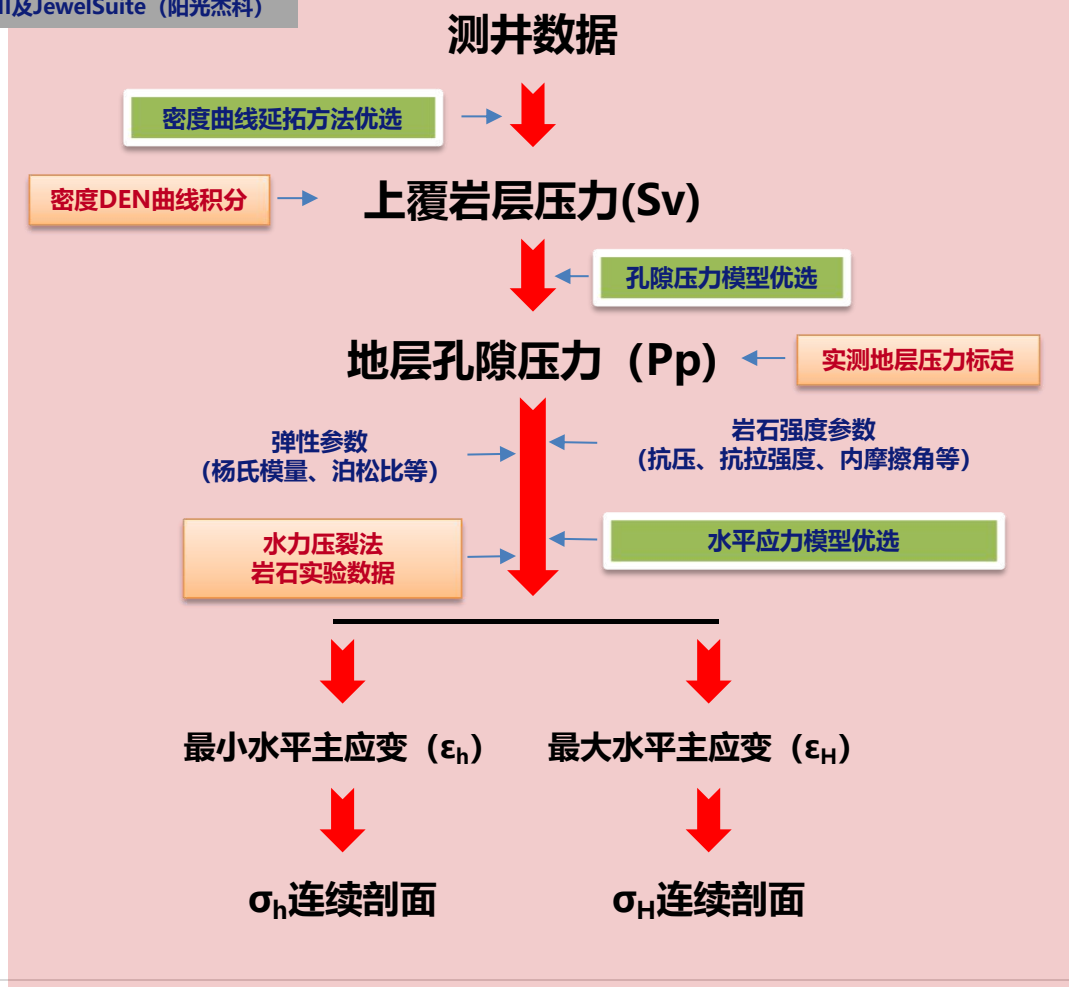
- 一、地应力概述及研究意义
- 二、地应力预测及建模技术**
- 三、地应力在实践中的运用**

二、地应力预测及建模技术

一维地应力建模软件

- ◆ Techlog (斯伦贝谢)
- ◆ GMI及JewelSuite (阳光杰科)

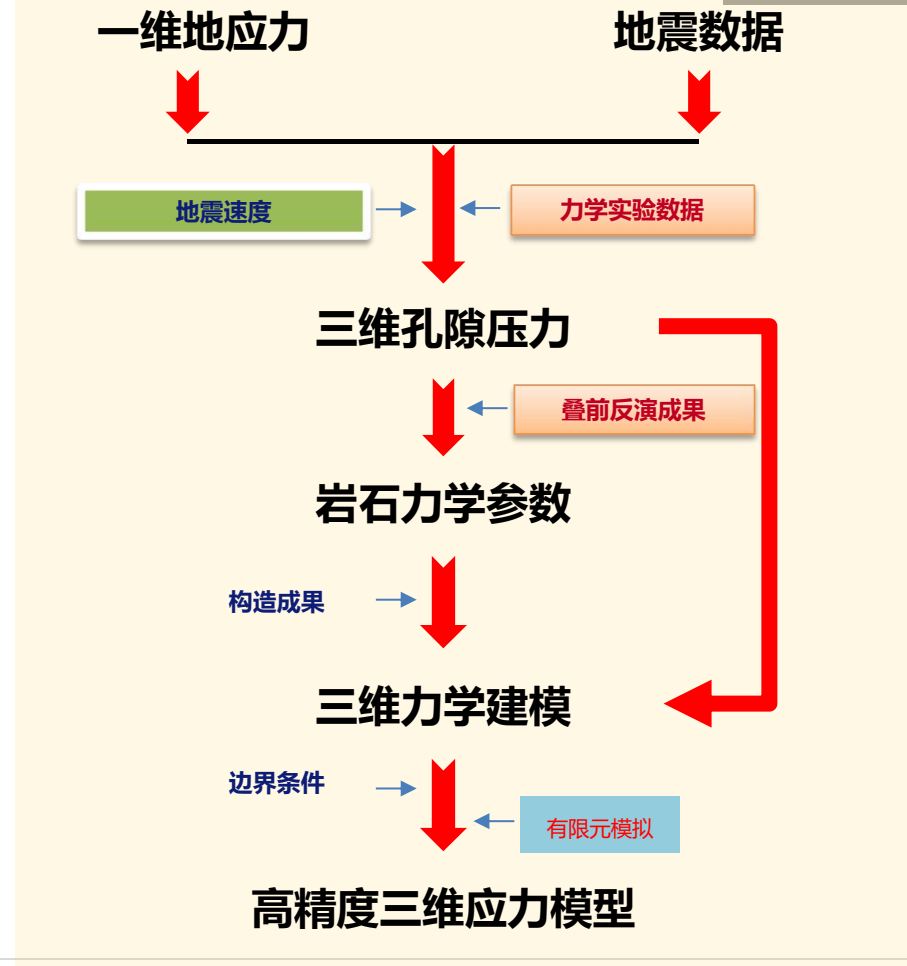
一维地应力建模



三维地应力建模

三维地应力建模软件

- ◆ Petrel, Visage (斯伦贝谢)
- ◆ JewelSuite (阳光杰科)

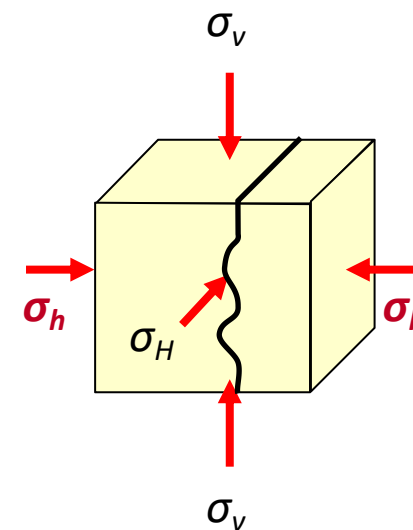
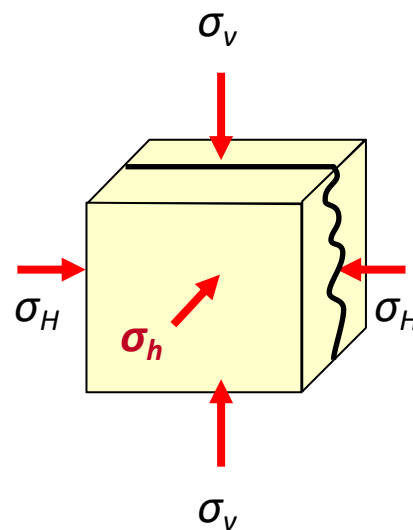
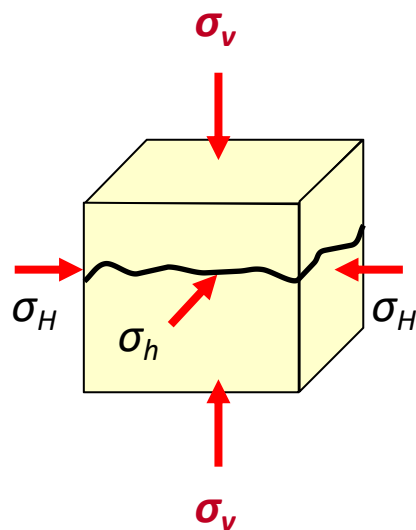


(一) 地应力方向

1、水力压裂法

裂缝延伸方向总是垂直于最小水平主应力，确定水力压裂裂缝延伸方位就可以确定地应力的方向。

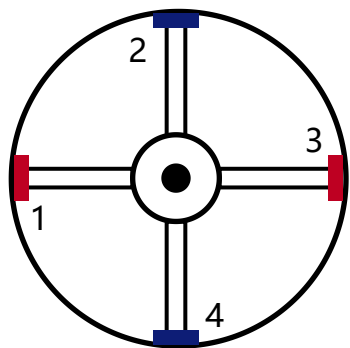
- 当垂向应力 σ_z 最小，形成水平裂缝
- 当为水平应力 σ_h 时，形成垂直裂缝



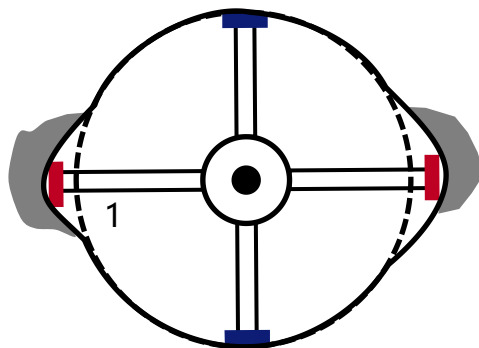
(一) 地应力方向

2、井壁崩落法

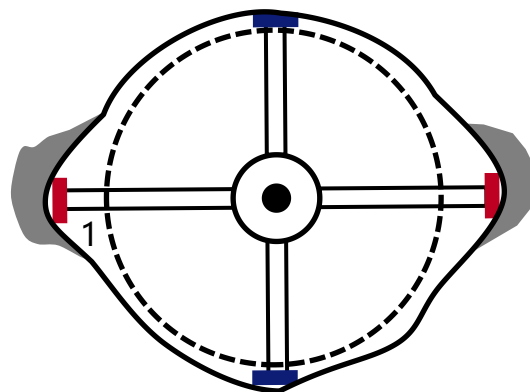
四臂、六臂井径测井分析，解释井壁崩落形成的椭圆井眼方位确定地应力方向。



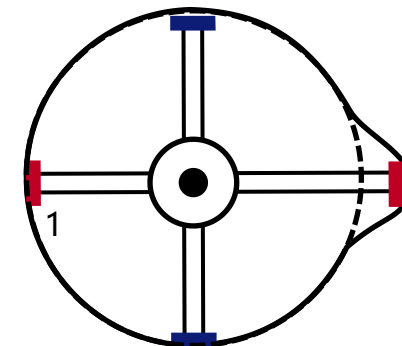
标准井筒



应力性井壁崩落



泥浆冲刷井壁崩落



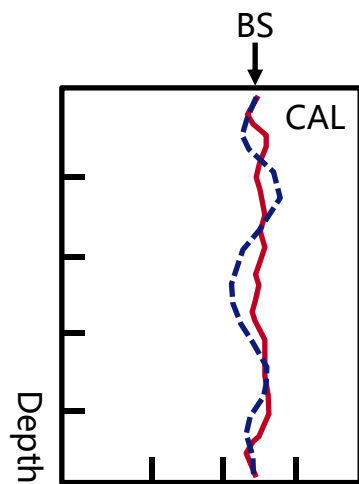
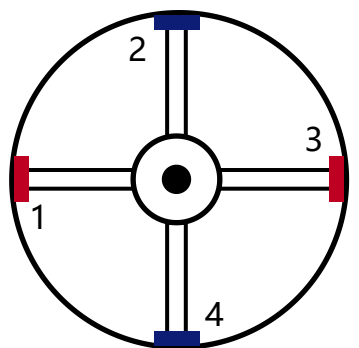
键槽

二、地应力预测及建模技术

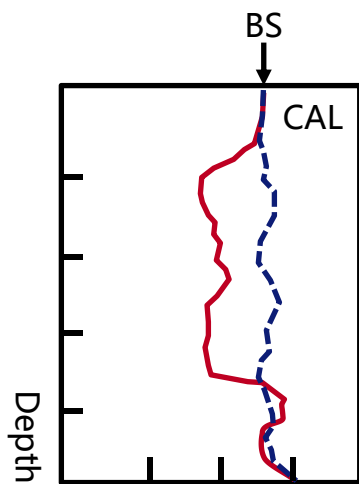
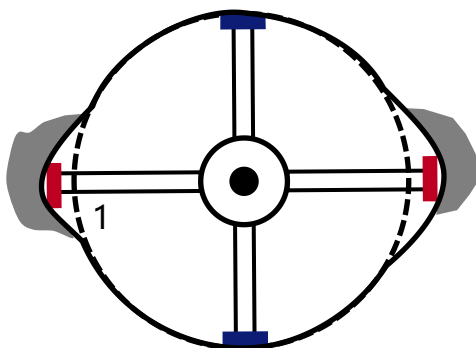
(一) 地应力方向

2、井壁崩落法

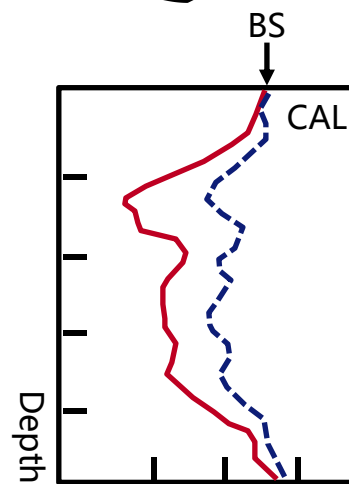
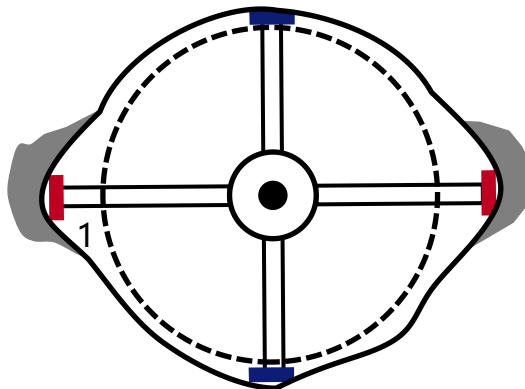
标准井筒



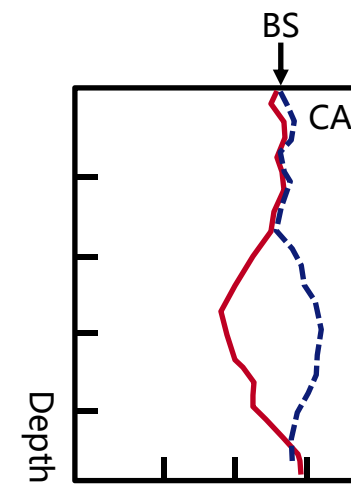
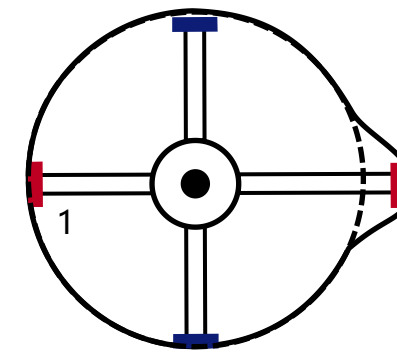
应力性井壁崩落



泥浆冲刷井壁崩落



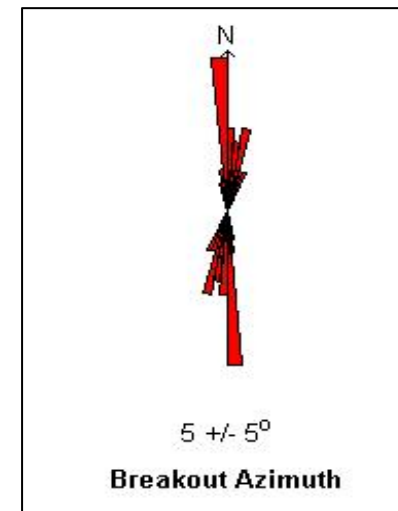
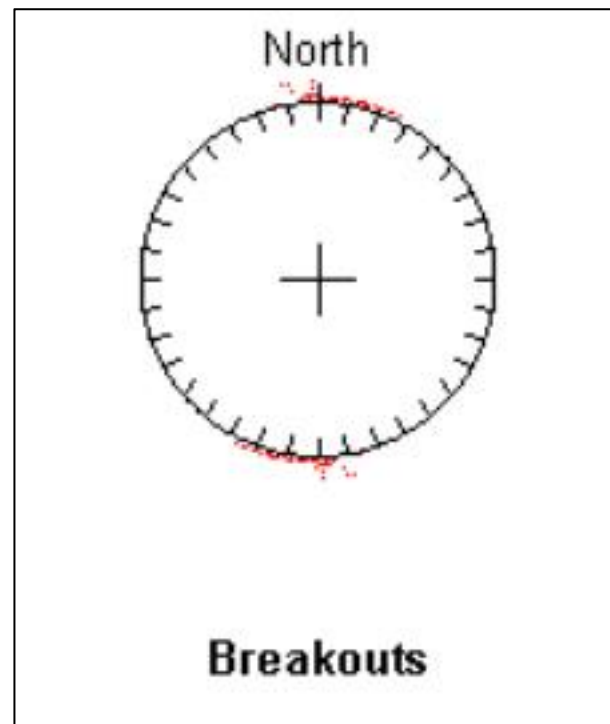
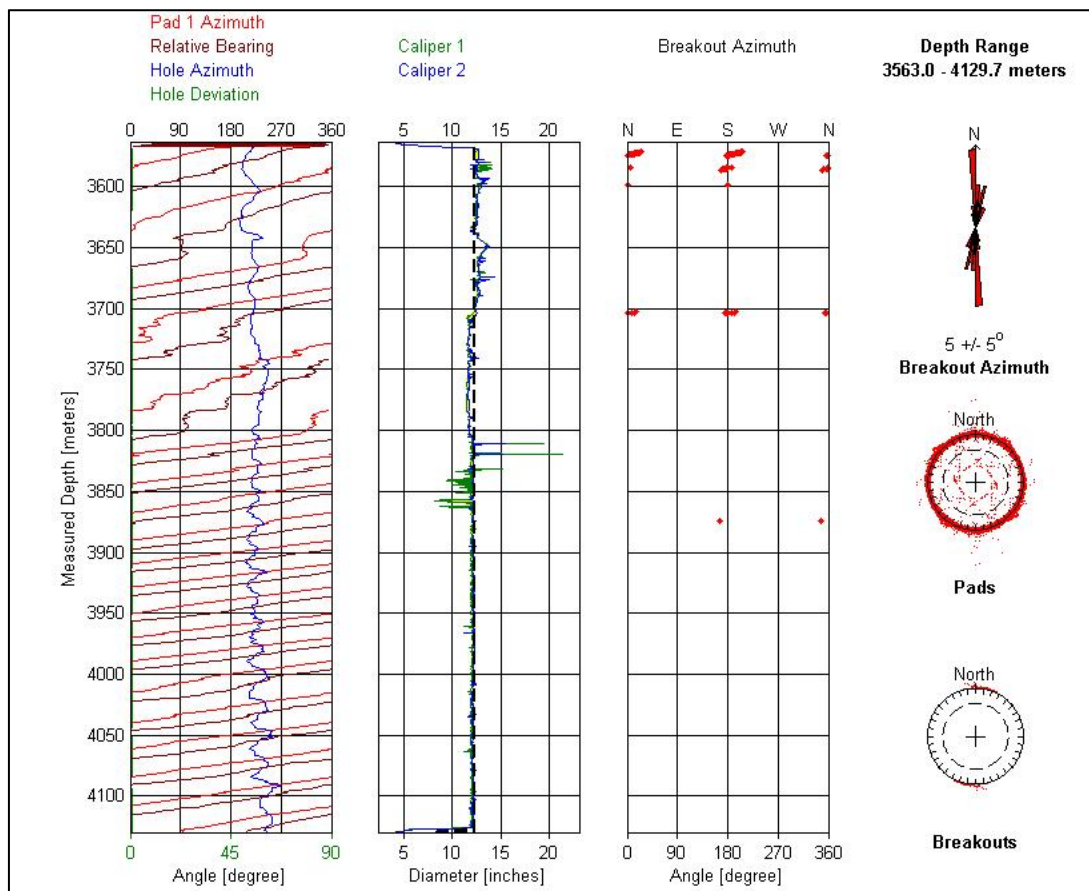
键槽



(一) 地应力方向

2、井壁崩落法

根据双井径分析井壁垮塌，确定井壁崩落方位平均 5° ，地应力方向为 85° 。

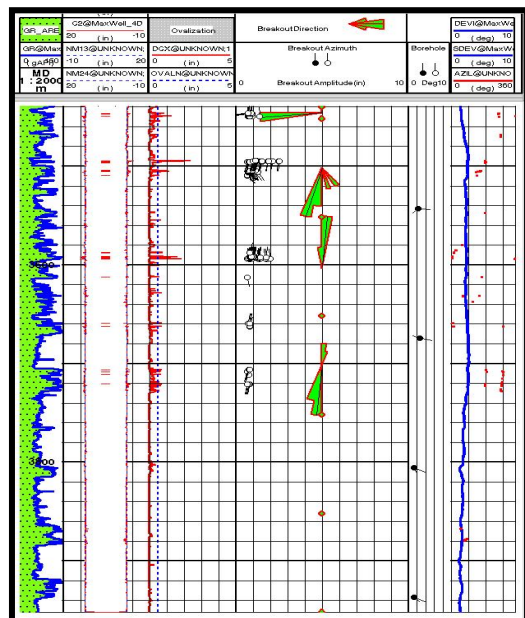


二、地应力预测及建模技术

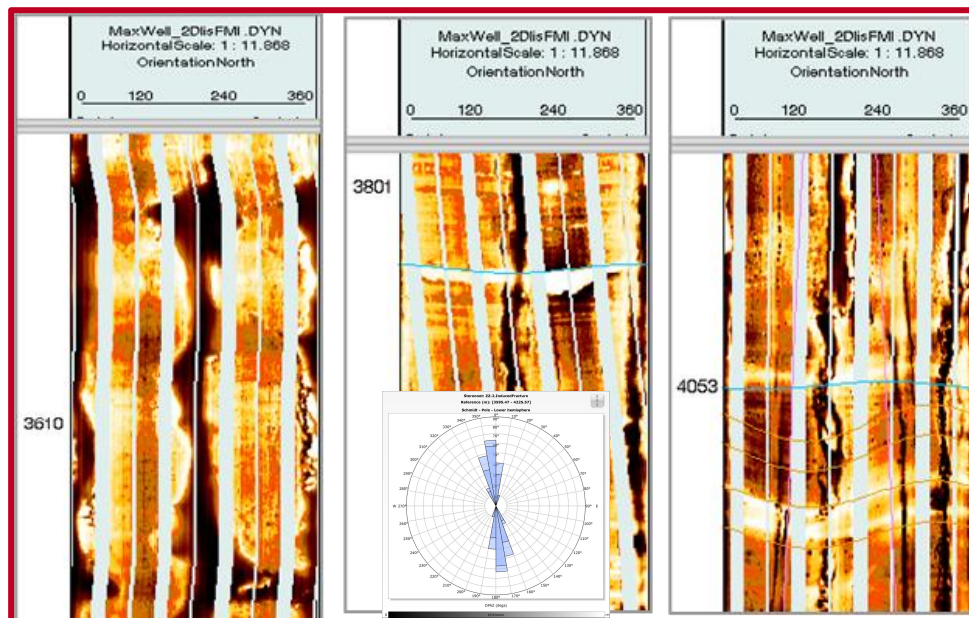
(一) 地应力方向

3、井壁崩落法

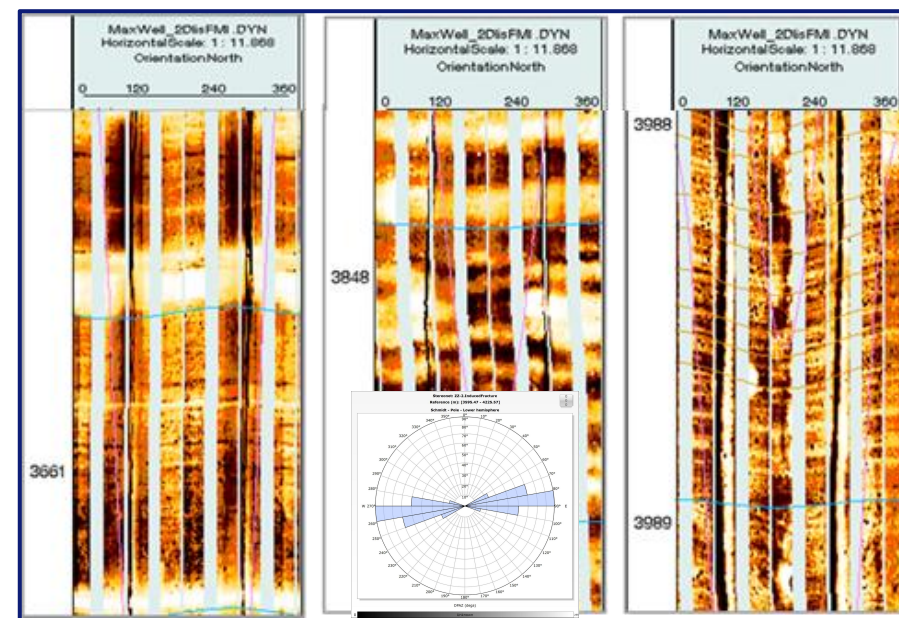
成像解释井壁崩落或者钻井诱导缝，确定崩落或诱导缝方位确定地应力的方向。



成像解释成果



井壁崩落图像

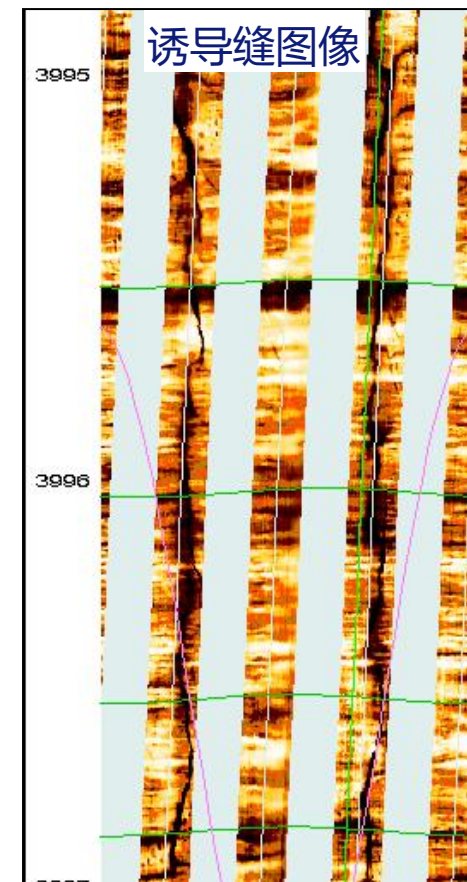
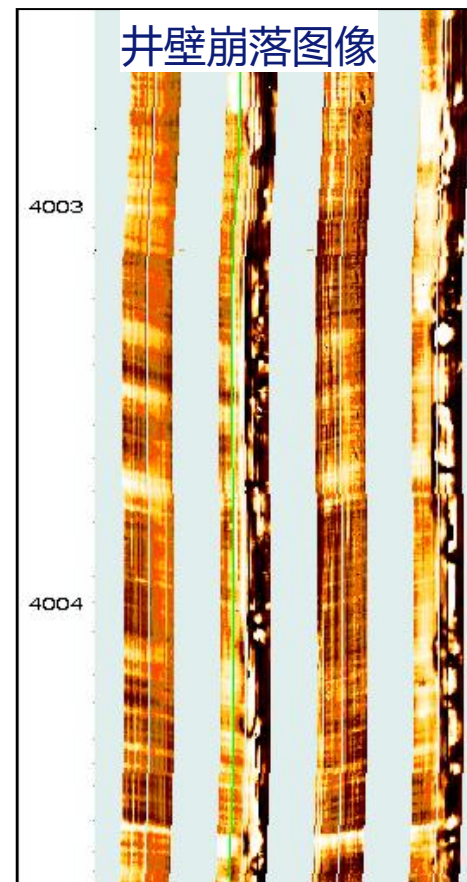
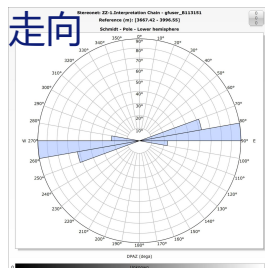
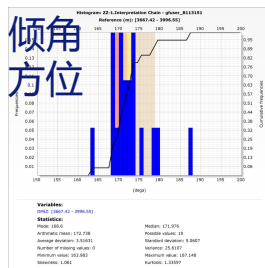
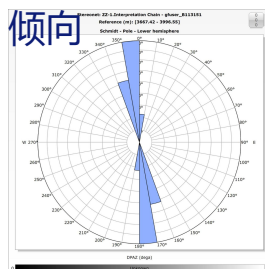
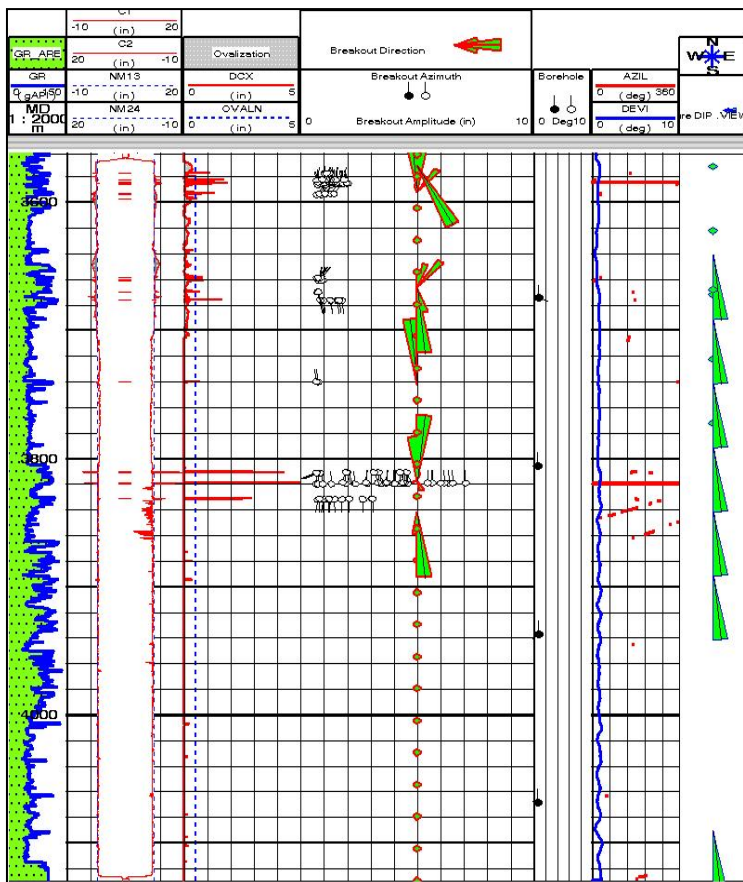


诱导缝图像

二、地应力预测及建模技术

(一) 地应力方向

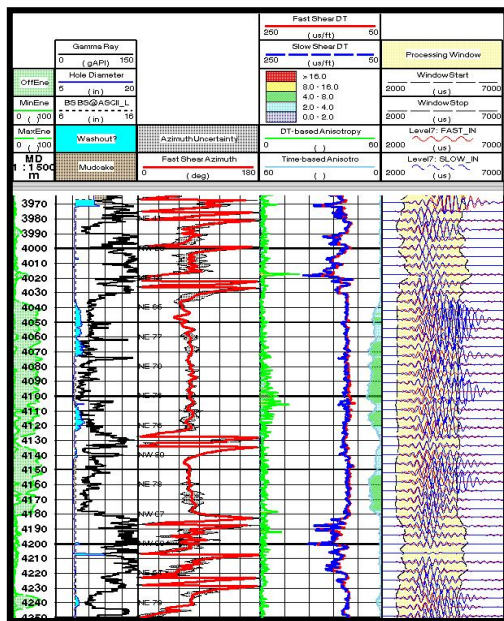
根据成像解释井壁垮塌及诱导缝，确定地应力方向为85°。



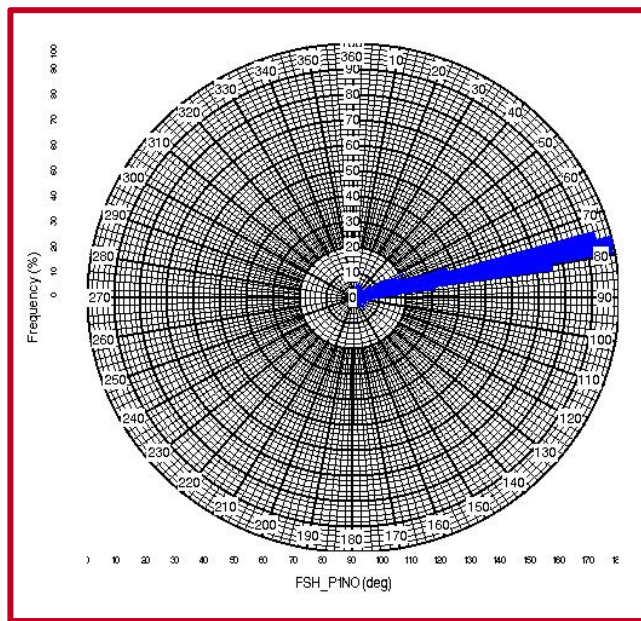
(一) 地应力方向

4、声波各向异性法

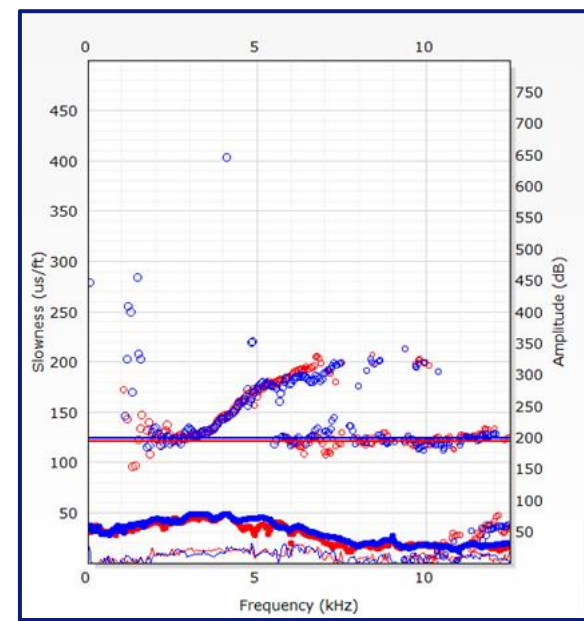
声波在岩石中传播有明显各向异性，解释快横波方位确定地应力的方向。



声波各向异性成果



快横波方位



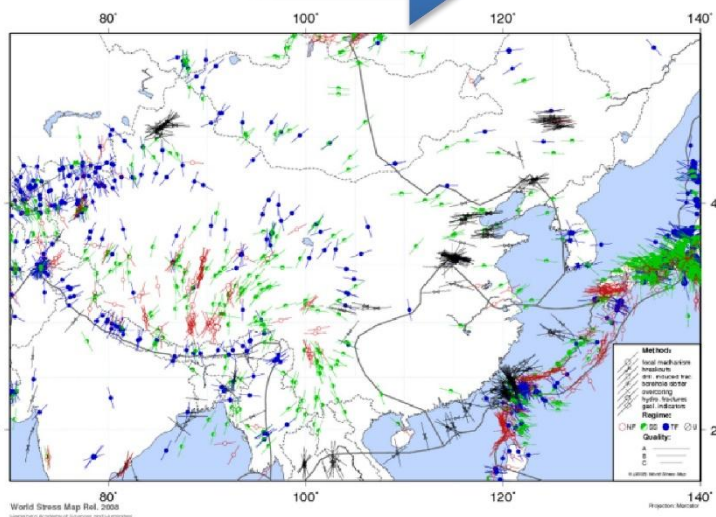
频散效应图

(一) 地应力方向

5、多尺度判别法

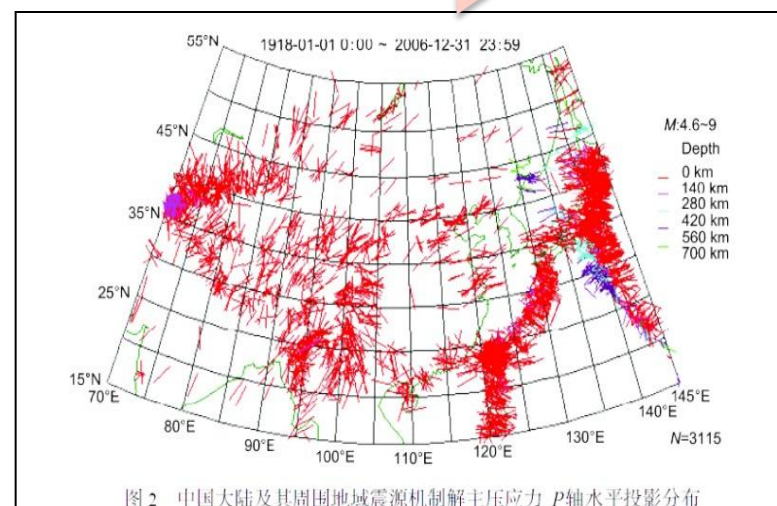
基于全球板块应力分布及天然地震确定的应力方位进行多尺度多方法地应力方向判定。

◆ 全球地应力共享系统



考虑了全球板块之间的应力分布和耦合关系。

大尺度

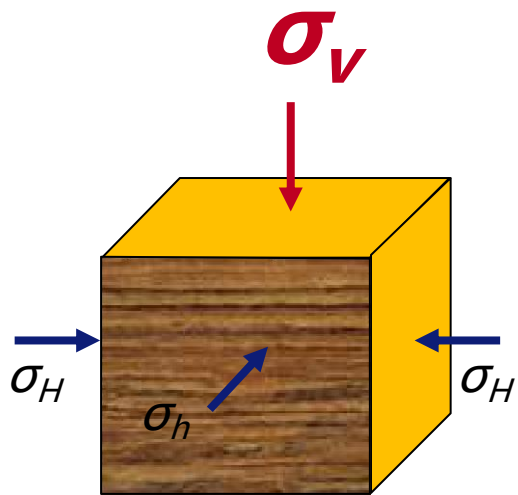


利用天然地震确定的应力方位，考虑了区域应力特征。

(二) 地应力大小

1、上覆地层压力

地下某一深处的上覆岩层压力就是指该点以上至地面**岩石骨架和孔隙流体总重力**，通过密度积分方法计算。



密度延拓方法	优势	缺点
三点外插法	适应性较强，拟合效果好	需不断调试参数
Amoco法	北美常用经验公式	不适合国内油田
Miller法	密度趋势拟合需考虑孔隙度	全井段孔隙度曲线

$$\rho_{extrapolated} = \rho_{mudline} + A_0 * (TVD - AG - WD)^e$$

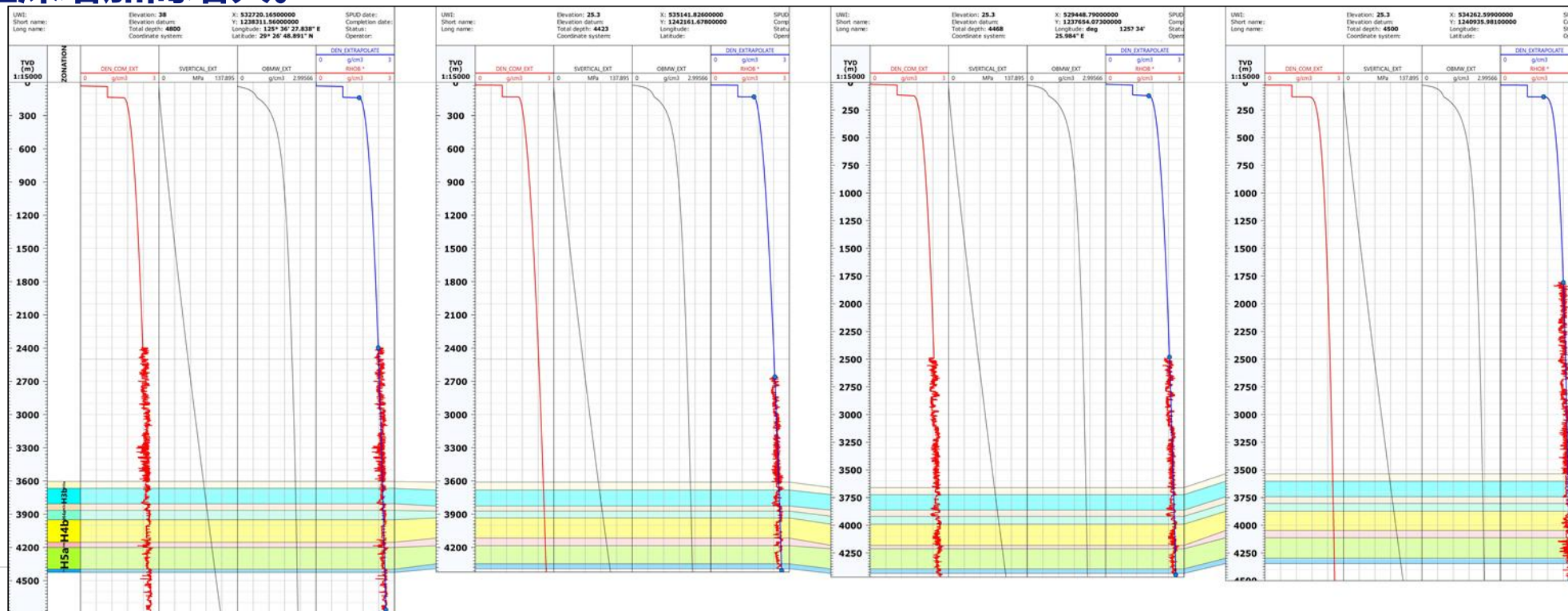
$$\sigma_v = \int_0^{TVD} \rho(h) \cdot g \cdot dh$$

二、地应力预测及建模技术

(二) 地应力大小

1、上覆地层压力

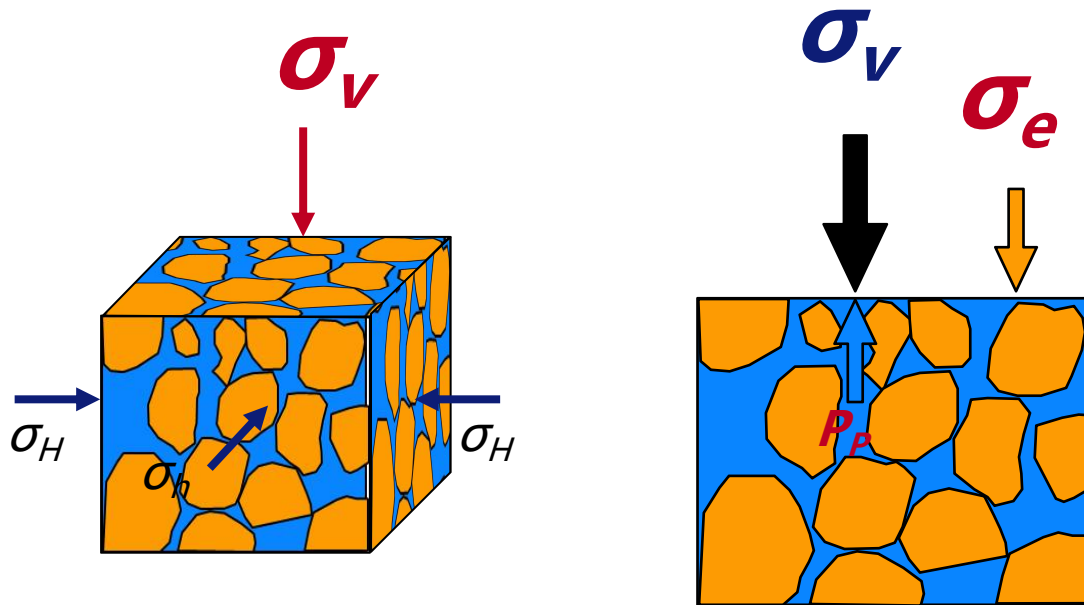
上覆地层压力范围0~108.2MPa，等效泥浆比重0~2.31g/cm³。上覆地层压力随埋深增加而增大。



(二) 地应力大小

2、孔隙压力

地层孔隙或裂缝中流体(油、气、水)所具有的压力。



有效应力:

$$\sigma_e = \sigma_v - \alpha P_p$$

α : Biot系数

(二) 地应力大小

2、孔隙压力

针对不同沉积地层特征，结合实际测试压力数据**优选孔隙压力预测方法。**

方法	模型	优势	缺点
Bowers法	$P_p = \sigma_v - \left(\frac{V_i - V_0}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$	需要层速度、声波时差预测有效应力，拟合效果好 (一维、三维孔隙压力)	经验参数需利用实测数据反复拟合
Eaton(伊顿)法	$P_p = \sigma_v - (\sigma_v - P_{p\text{norm}}) * \alpha * \left(\frac{R}{R_{\text{norm}}} \right)^n$	利用声波时差、电阻率预测孔隙压力 (一维孔隙压力)	画泥岩趋势线，个人经验影响预测精度
Fillippone法	$P_p = \left(\frac{V_{\text{max}} - V_i}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} \right) * C * \sigma_v$	简单快捷，可迅速求取三维孔隙压力	初始骨架速度Vmax和流体速度Vmin不好获取，精度不高

(二) 地应力大小

2、孔隙压力

目的层实测孔压范围在37.6~ 51.6MPa，当量泥浆密度1.03~ 1.3g/cm³，孔隙压力压力随埋深增加有增大趋势。

- 欠压实理论；
- Eaton时差法预测；
- 根据DST、MDT地层压力资料，气田上部的龙井组、花港组H₁-H₃各气藏压力系数为1.0084-1.0377，属于正常压力气藏；下部H₄-H₆各气藏压力系数为1.1246-1.3185，属于异常高压气藏。

实测压力表

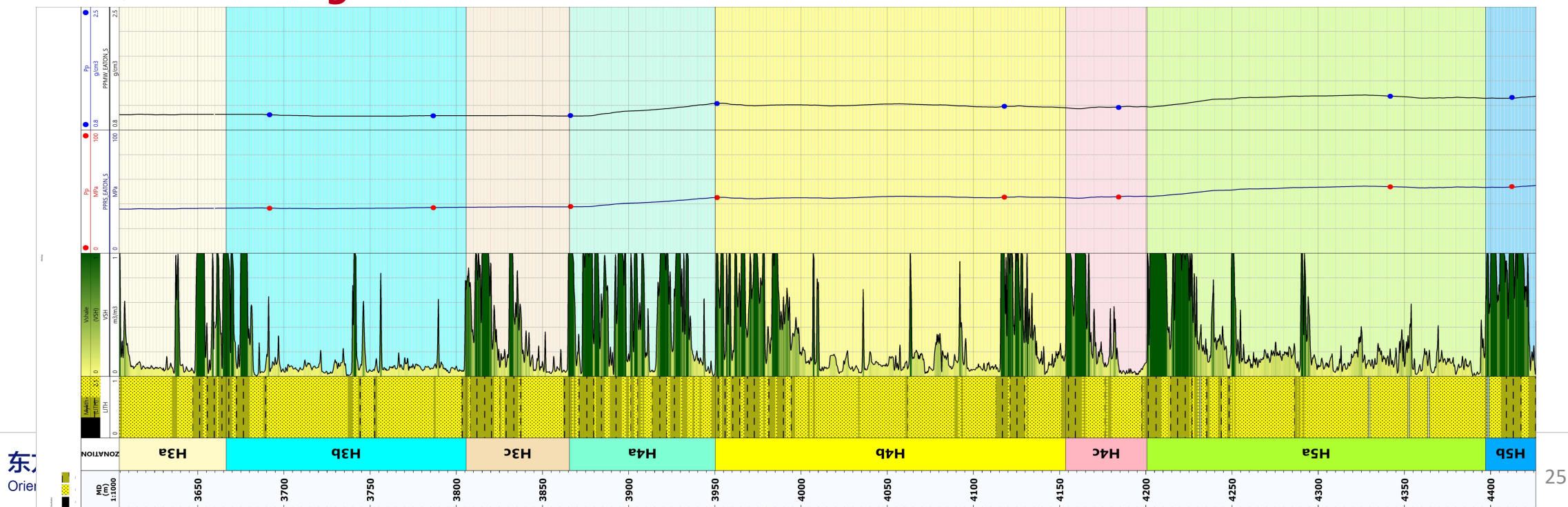
层位	TVDSS (m)	地层压力 (Mpa)
H3a	3653.7	36.64
H3b	3748.7	37.05
H3c	3828.3	37.95
H4a	3913.3	45.25
H4b	4080	45.57
H4c	4146.3	45.7
H5a	4303.8	53.99
H5b	4374.4	54.14

(二) 地应力大小

2、孔隙压力

采用Eaton时差法预测孔隙压力：Z井目的层孔压范围在35.7~54.9MPa，当量泥浆

密度1.0~1.28g/cm³。

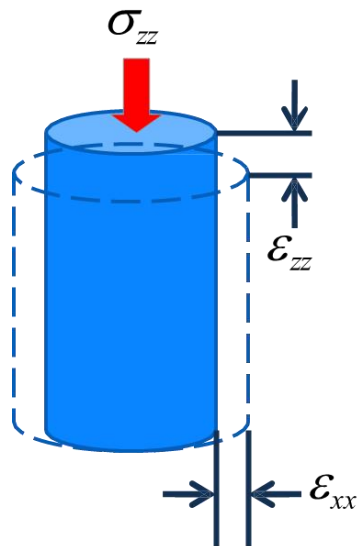


(二) 地应力大小

3、弹性参数

杨氏模量：材料在外力作用下产生单位弹性变形所需要的应力；

泊松比：材料在单向受拉或受压时，横向正应变与轴向正应变比值之绝对值。



$$E = \frac{\sigma_{zz}}{\epsilon_{zz}}$$

$$\nu = \frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{zz}}$$

$$E_{dyn} = \frac{\rho_b}{\Delta t_s^2} \cdot \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2}$$

$$\nu_{dyn} = \frac{R_{SP}^2 - 2}{2R_{SP}^2 - 2}$$

二、地应力预测及建模技术

(二) 地应力大小

3、弹性参数

实验数据



井号	层位	长度 (mm)	直径 (mm)	密度 (g/cm ³)	井深	弹性模量 (GPa)	泊松比
Z1	H3	48.88	24.96	2.49	4029.31	29.93	0.16
Z1	H3	49.56	25.2	2.32	3858.76	19.43	0.22
Z2	H3	50.12	24.72	2.46	3703.6	32.6	0.11
Z2	H3	47.5	24.82	2.49	3710.1	28.82	0.21
Z3	H5	47.16	24.82	2.47	4290.3	22.5	0.18
Z3	H5	48.64	24.84	2.54	4294.6	28.63	0.21

动态模量参数计算公式

剪切模量 $G_{dyn} = (13474.45) \frac{\rho_b}{(\Delta t_{shear})^2}$

体模量 $K_{dyn} = (13474.45) \rho_b \left[\frac{1}{(\Delta t_{comp})^2} \right] - \frac{4}{3} G_{dyn}$

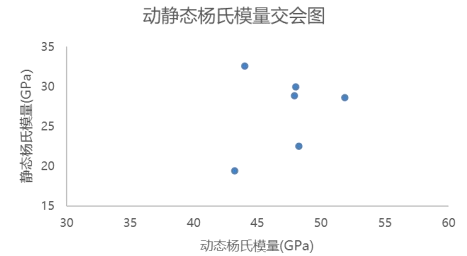
杨氏模量

$$E_{dyn} = \frac{9G_{dyn} \times K_{dyn}}{G_{dyn} + 3K_{dyn}}$$

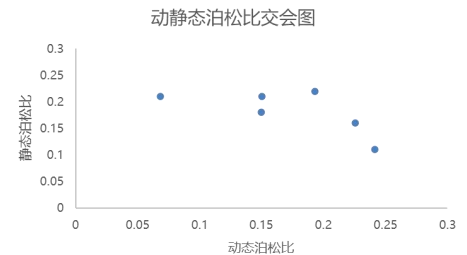
泊松比

$$\nu_{dyn} = \frac{3K_{dyn} - 2G_{dyn}}{6K_{dyn} + 2G_{dyn}}$$

动静态模量转换关系



动静态模量关系



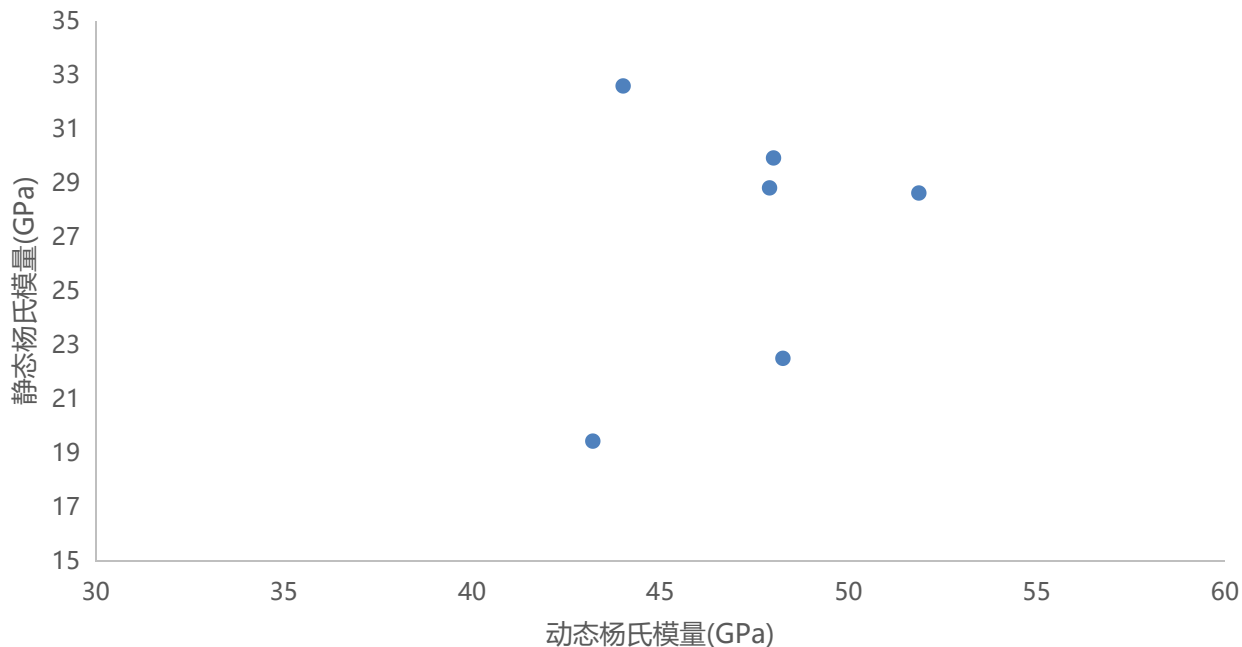
动静态泊松比关系

二、地应力预测及建模技术

(二) 地应力大小

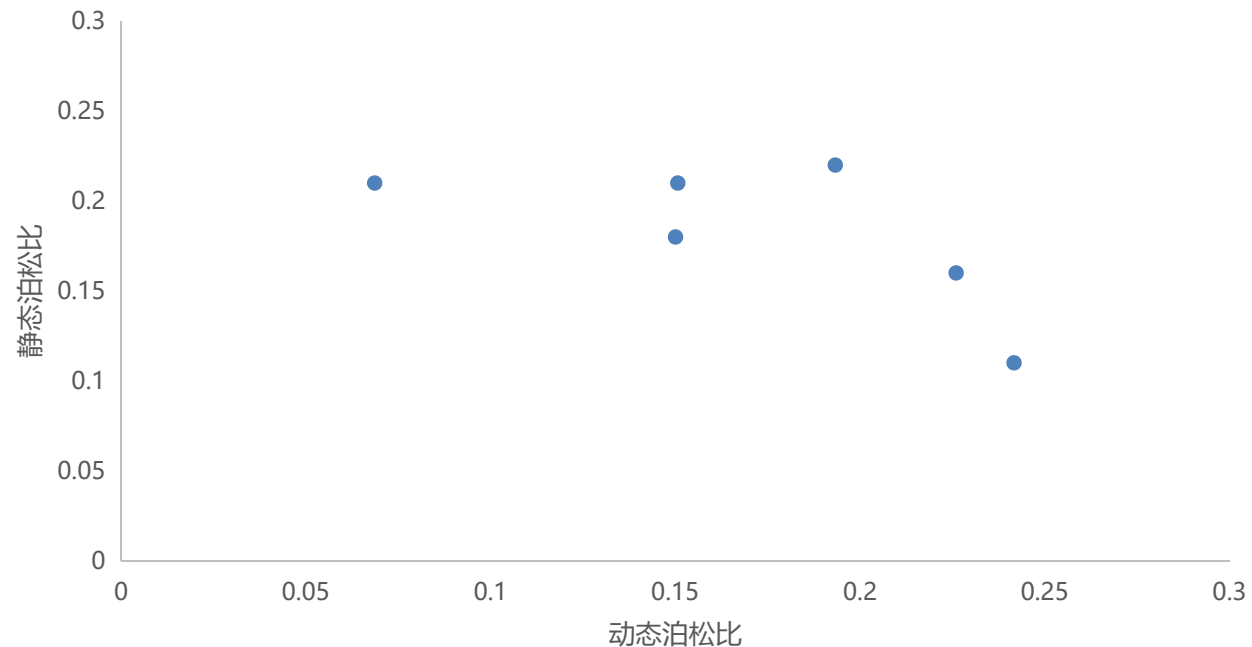
3、弹性参数

动静态杨氏模量交会图



$$YME_STA = 0.57 * YME_DYN$$

动静态泊松比交会图



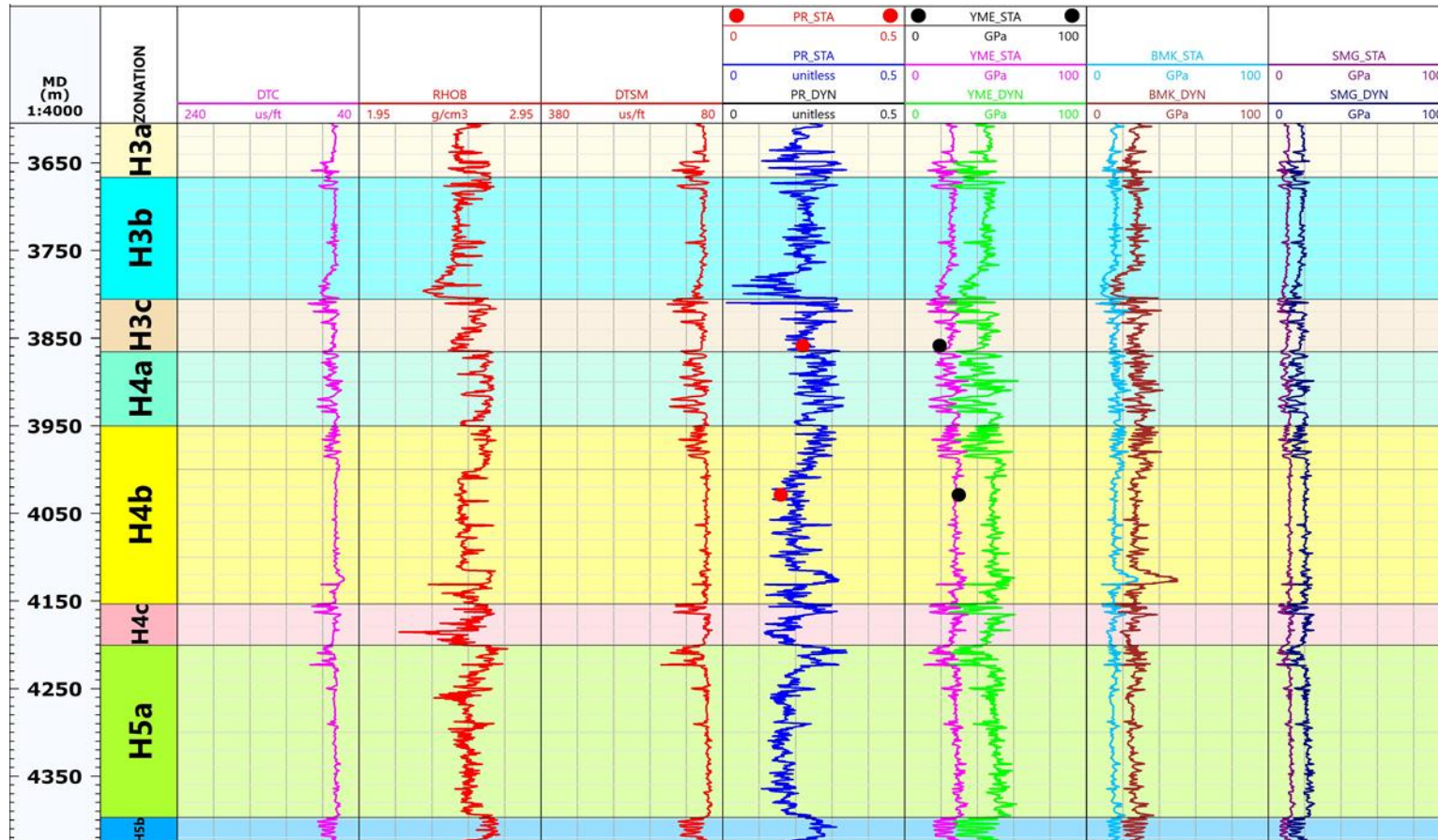
$$PR_STA = PR_DYN$$

二、地应力预测及建模技术

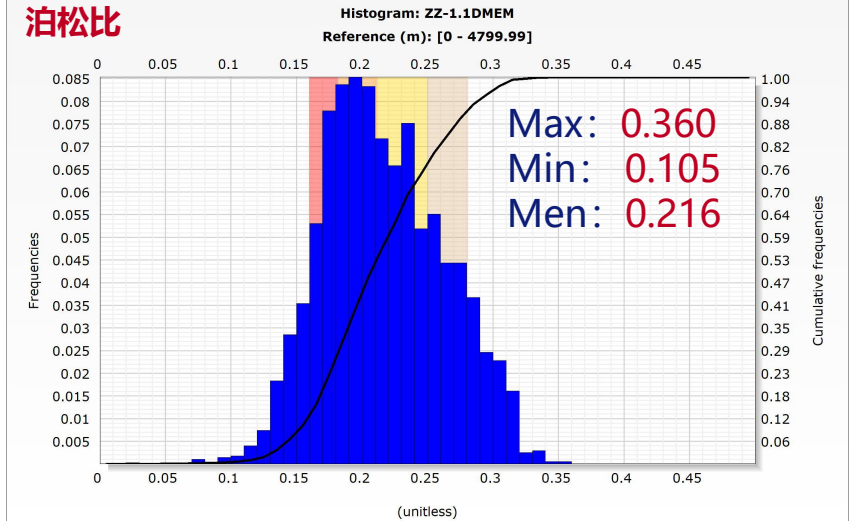
(二) 地应力大小

3、弹性参数

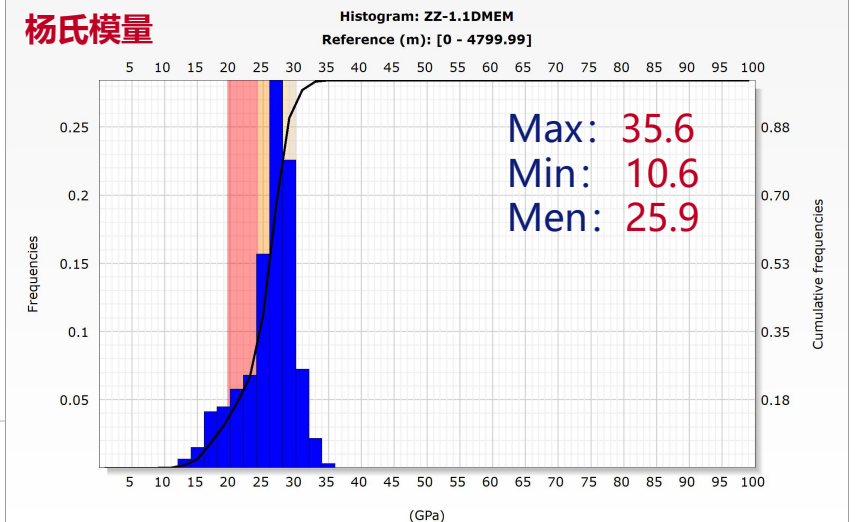
Z2井弹性参数计算成果图



泊松比



杨氏模量



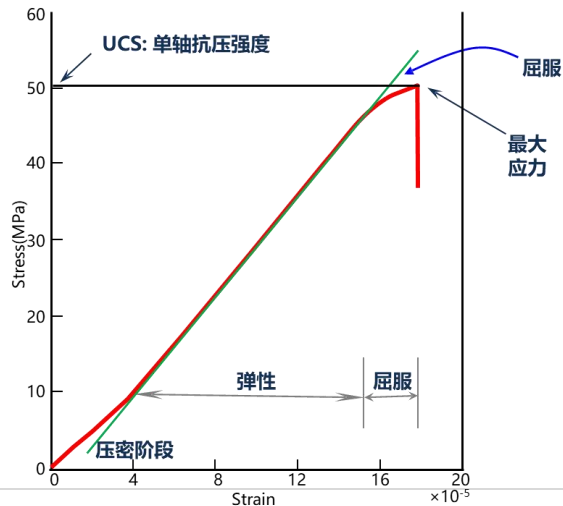
(二) 地应力大小

4、强度参数

抗压强度：岩石试样受单向压应力作用下能够承受的最大压应力；

抗拉强度：岩石试样在单轴拉伸下能够承受的最大拉应力；

抗剪强度：是指岩石试样在一定法向压应力作用下能够承受的最大剪应力。



岩石受力变形至破坏可分为三个阶段：

裂隙压密阶段：曲线斜率随应力增加而增加；

弹性形变阶段：应力与应变之间呈线性关系；

塑性、裂隙扩展阶段：岩石变形不再恢复，裂隙扩展，直至岩石破坏。

(二) 地应力大小

4、强度参数

抗压强度：通过利用实验数据进行回归拟合计算，或者利用已有的经验公式进行计算

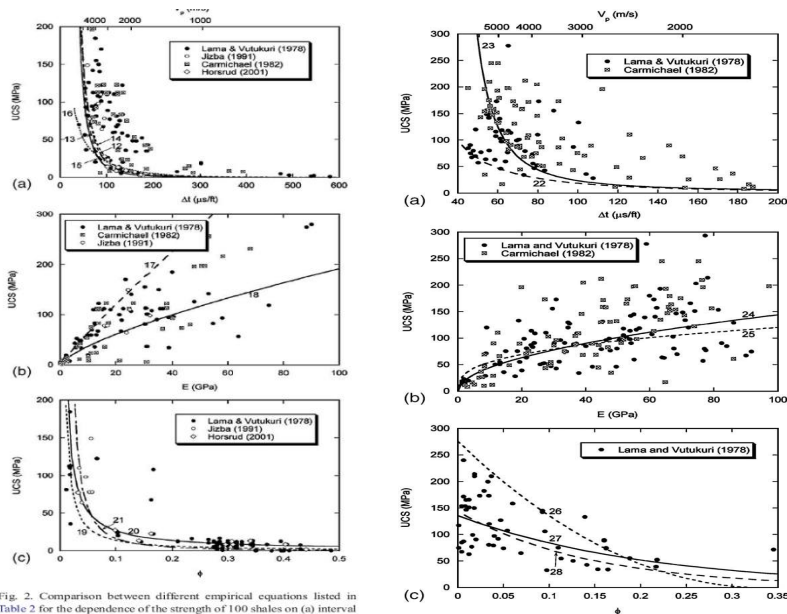


Fig. 2. Comparison between different empirical equations listed in Table 2 for the dependence of the strength of 100 shales on (a) interval

Table 1

Empirical relationships between unconfined compressive strength (UCS) and other physical properties in sandstone

Eq. no.	UCS (MPa)	Region where developed	General comments	Reference
(1)	$0.035 V_p - 31.5$	Thuringia, Germany	—	Freyburg (1972)
(2)	$1200 \exp(-0.036 \Delta t)$	Bowen Basin, Australia	Fine grained, both consolidated and unconsolidated sandstones with all porosity range	McNally (1987)
(3)	$1.4138 \times 10^7 \Delta t^{-3}$	Gulf Coast	Weak and unconsolidated sandstones	Fjaer et al. (1992)
(4)	$3.3 \times 10^{-20} \rho^2 V_p^4 [(1+\nu)/(1-\nu)]^2 (1-2\nu) [1+0.78 V_{clay}]$	Gulf Coast	Applicable to sandstones with UCS > 30 MPa	Fjaer et al. (1992)
(5)	$1.745 \times 10^{-9} \rho V_p^2 - 21$	Cook Inlet, Alaska	Coarse grained sandstones and conglomerates	Moos et al. (1999)
(6)	$42.1 \exp(1.9 \times 10^{-11} \rho V_p^2)$	Australia	Consolidated sandstones with $0.05 < \phi < 0.12$ and UCS > 80 MPa	—
(7)	$3.87 \exp(1.14 \times 10^{-10} \rho V_p^2)$	Gulf of Mexico	—	—
(8)	$46.2 \exp(0.027 E)$	—	—	—
(9)	$2.28 + 4.1089 E$	Worldwide	—	Bradford et al. (1998)
(10)	$254 (1 - 2.7\phi)^2$	Sedimentary basins worldwide	Very clean, well-consolidated sandstones with $\phi < 0.3$	Vernik et al. (1993)
(11)	$277 \exp(-10\phi)$	—	Sandstones with $2 < \text{UCS} < 360 \text{ MPa}$ and $0.002 < \phi < 0.33$	—

Empirical relationships between unconfined compressive strength (UCS) and other physical properties in shale

Eq. no.	UCS (MPa)	Region where developed	General comments	Reference
(12)	$0.77 (304.8 / \Delta t)^{2.93}$	North Sea	Mostly high porosity Tertiary shales	Horsrud (2001)
(13)	$0.43 (304.8 / \Delta t)^{3.2}$	Gulf of Mexico	—	—
(14)	$1.35 (304.8 / \Delta t)^{2.6}$	Globally	Pliocene and younger	—
(15)	$0.5 (304.8 / \Delta t)^3$	Gulf of Mexico	—	—
(16)	$10 (304.8 / \Delta t - 1)$	North Sea	Mostly high porosity Tertiary shales	Lal (1999)
(17)	$7.97 E^{0.91}$	North Sea	Mostly high porosity Tertiary shales	Horsrud (2001)
(18)	$7.22 E^{0.712}$	—	Strong and compacted shales	—
(19)	$1.001 \phi^{-1.143}$	—	Low porosity ($\phi < 0.1$) high strength (~79 MPa) shales	Lashkaripour and Dusseault (1993)
(20)	$2.922 \phi^{-0.96}$	North Sea	Mostly high porosity Tertiary shales	Horsrud (2001)
(21)	$0.286 \phi^{-1.762}$	—	High porosity ($\phi > 0.27$) shales	—

(二) 地应力大小

4、强度参数

抗压强度： 通过利用实验数据进行回归拟合计算， 或者利用已有的经验公式进行计算

抗压强度

$$UCS = 2.24 \times 10^{-4} \left(\frac{G_{dyn}}{40} \right)$$

内摩擦角

$$FANG = -0.1875 * GR + 42.5$$

抗拉强度

$$TSTR = UCS/10$$

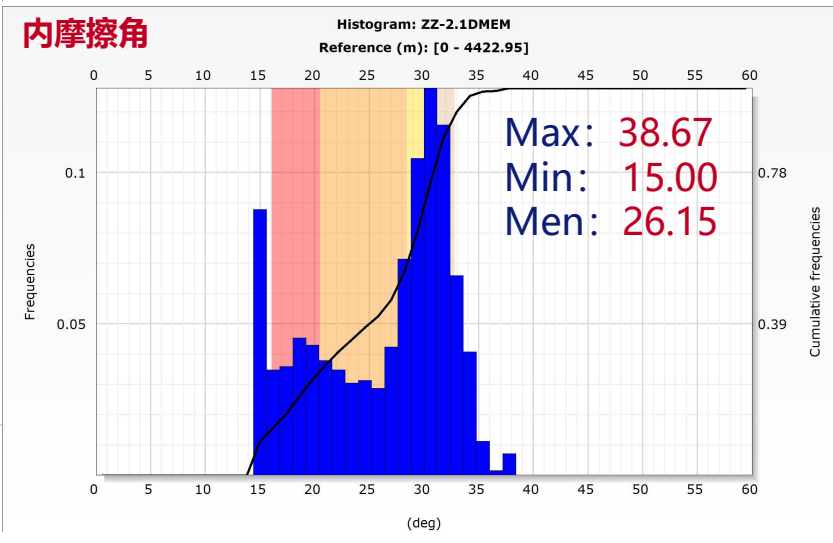
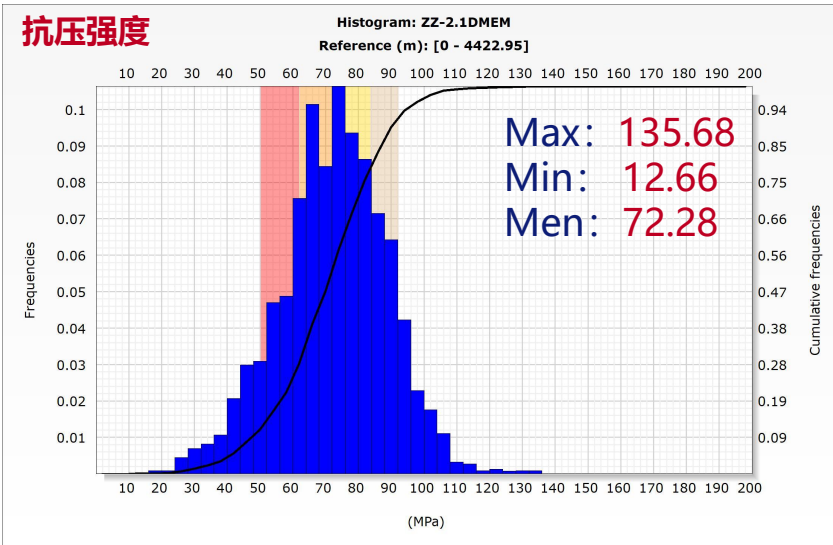
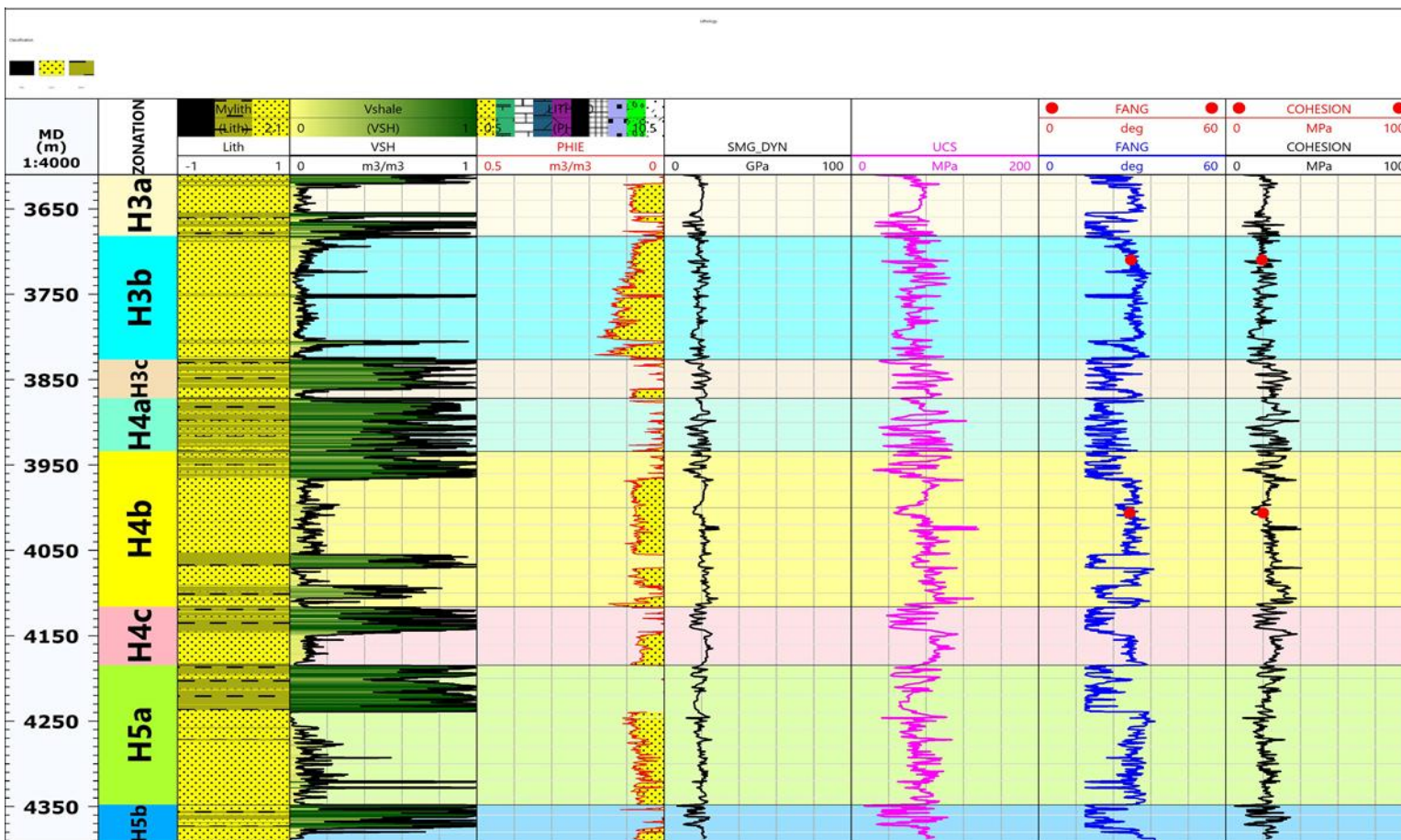
井号	层位	深度	内摩擦角 (°)	内聚力 (MPa)
Z2	H3	3710.1	29.68	19.37
	H4	4006.3	29.31	20.1
Z3	H5	4294.6	26.74	21.44

二、地应力预测及建模技术

(二) 地应力大小

4、强度参数

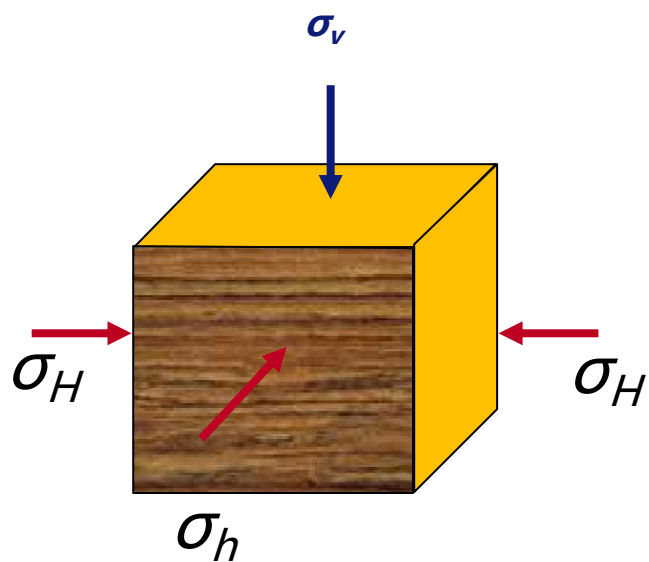
Z2井强度参数计算成果图



(二) 地应力大小

4、水平两向主应力

最大、最小水平主应力指地层中水平方向上两个相互垂直的正应力。



序号	模型	计算公式	特点
1	Mattens & Kelly模型	$\sigma_H - P_p = \sigma_h - P_p = K_i(\sigma_v - P_p)$	未查到理论推导过程; K_i 需要反算; K_i 的物理意义不明确
2	Terzaghi模型	$\sigma_H - P_p = \sigma_h - P_p = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - P_p)$	认为水平方向应力仅来源于上覆岩层压力; 未考虑构造应力 具有严格的理论推导过程
3	Anderson模型	$\sigma_H - \alpha P_p = \sigma_h - \alpha P_p = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha P_p)$	认为水... 具有严格的理论推导过程
4	Newberry模型	$\sigma_h - P_p = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha P_p)$	针对低渗透且有微裂缝地层提出; 适用于弱构造运动地层; 未查到理论推导过程
5	黄荣樽六五模式	$\sigma_H = \left(\frac{\nu}{1-\nu} + \xi_1\right)(\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p$ $\sigma_h = \left(\frac{\nu}{1-\nu} + \xi_2\right)(\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p$	水平方向地应力来源于上覆岩层压力和构造应力; 计算上覆岩层压力产生的应力, 有理论依据和推导过程; 计算构造应力时, 假定构造应力与上覆岩层的有效应力成正比, 属于经验性质, 缺乏理论依据; 构造应力系数需要反算
6	黄荣樽七五模式	$\sigma_H = \frac{1}{2} \left[\frac{\xi_1 E}{1-\nu} + \frac{2\nu(\sigma_v - \alpha P_p)}{1-\nu} + \frac{\xi_2 E}{1+\nu} \right] + \alpha P_p$ $\sigma_h = \frac{1}{2} \left[\frac{\xi_2 E}{1-\nu} + \frac{2\nu(\sigma_v - \alpha P_p)}{1-\nu} - \frac{\xi_1 E}{1+\nu} \right] + \alpha P_p$	各岩层水平方向应变相等的假设在构造运动剧烈地区受到一定的限制, 对... 力系数需要反算... 较大的误差累积效应
7	葛洪魁1996年模型	$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha P_p) + K_H \frac{EH}{1+\nu} + \frac{\alpha^T E \Delta T}{1-\nu}$ $\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha P_p) + K_h \frac{EH}{1+\nu} + \frac{\alpha^T E \Delta T}{1-\nu}$	缺少理论基础, 带有较多的经验色彩; 地应力系数、温度引起的膨胀系数确定困难; 模型中参数较多, 由于各参数本身的计算误差, 易产生较大的误差累积效应
9	DSA差应变法、Kaiser效应实验	岩心实验测试	相对准确; 但实验数据离散, 成本高, 时效性差

水平两向应力相等计算模型

水平两向应力不相等计算模型

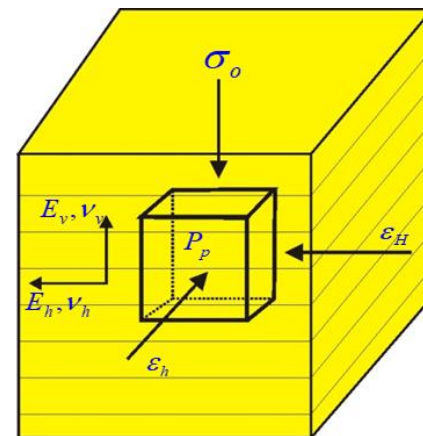
(二) 地应力大小

4、水平两向主应力

最大、最小水平主应力指地层中水平方向上两个相互垂直的正应力。

多孔弹性介质应变模型

$$S_{h\min} = \frac{\nu}{1-\nu} S_V + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_x + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_y$$
$$S_{H\max} = \frac{\nu}{1-\nu} S_V + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_y + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_x$$

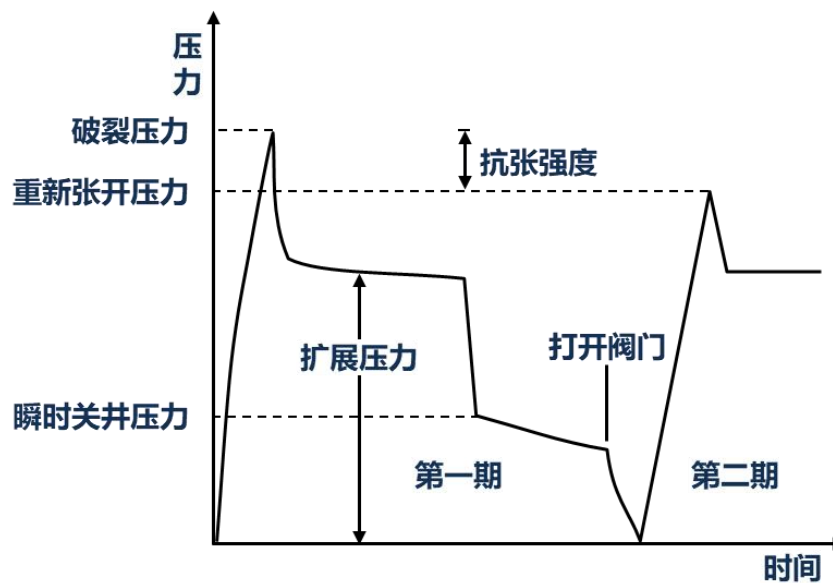


二、地应力预测及建模技术

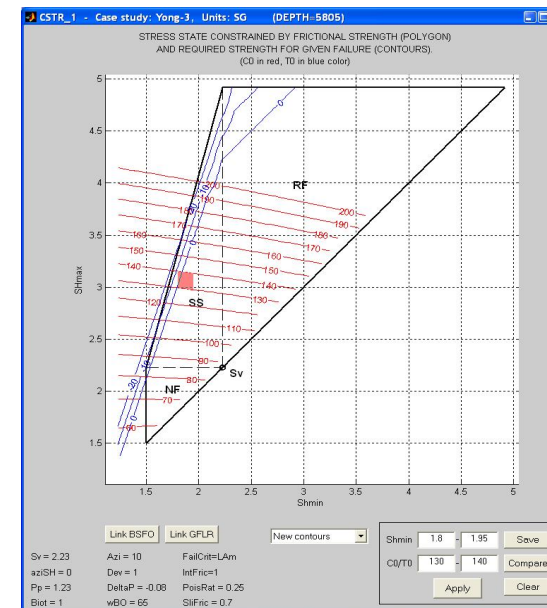
(二) 地应力大小

4、水平两向主应力

依据应力实验、采用瞬时停泵压力ISIP、闭合压力等数据进行校核最小水平应力，结合应力四边形成反演水平最大主应力，然后运用多孔弹性介质应变模型构建应力系数。



水力压裂压力典型图



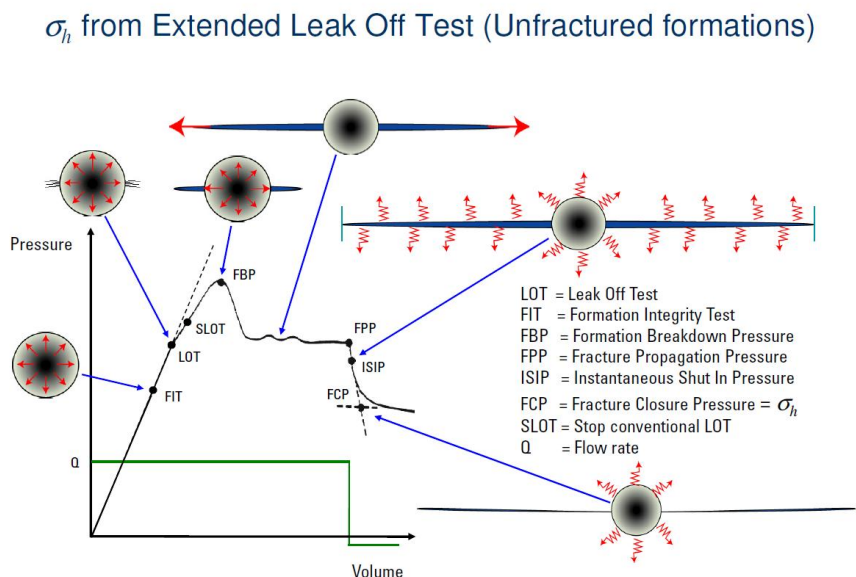
应力四边形

二、地应力预测及建模技术

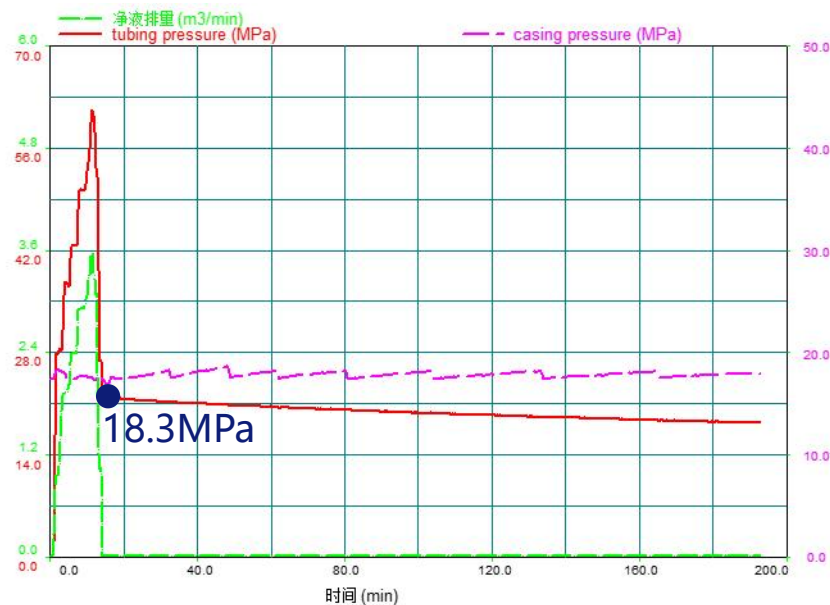
(二) 地应力大小

4、水平两向主应力

水力压裂法计算地应力的原理：水平最小主应力应该是瞬时停泵压力加上静水柱压力。依据小型压裂施工曲线确定瞬时停泵压力(ISIP)，经停泵压力换算井深4079.6m处最小水平应力为58.28MPa。



Ref: Edwards, S.T., Bratton, T.R., and Standifird, W.B.; *Accidental Geomechanics – Capturing in-situ stress from mud losses encountered while drilling*, SPE/ISRM 78205, 2002.

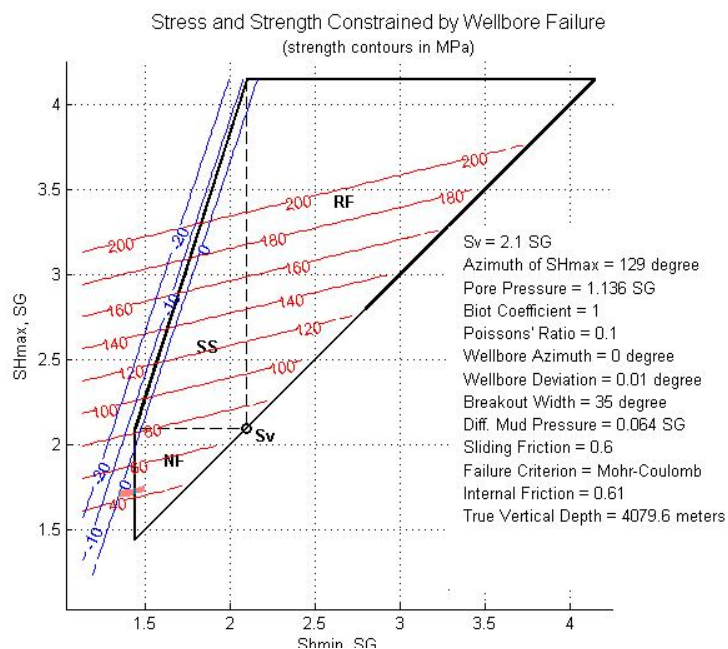


二、地应力预测及建模技术

(二) 地应力大小

4、水平两向主应力

应用井筒破损约束反演法，并结合应力四边形计算，求取了最大水平应力的大小并模拟井筒形态。

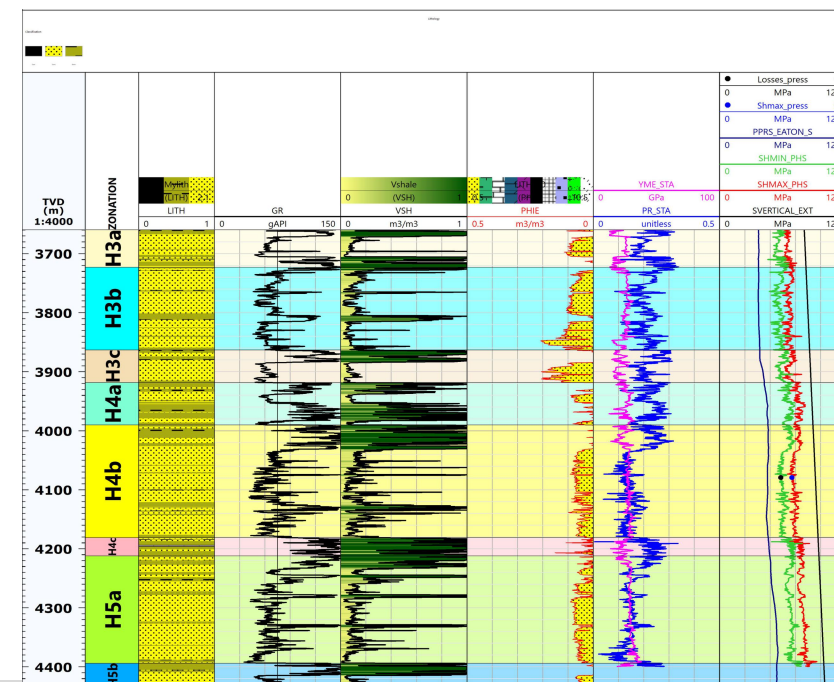


4079.6m 应力机制：正断层
 $S_{hmin} < S_{Hmax} < S_v$

水平主应力校核数据

深度 (m)	停泵换算压力 (MPa)	反演换算压力 (MPa)
4079.6	58.28	68.85

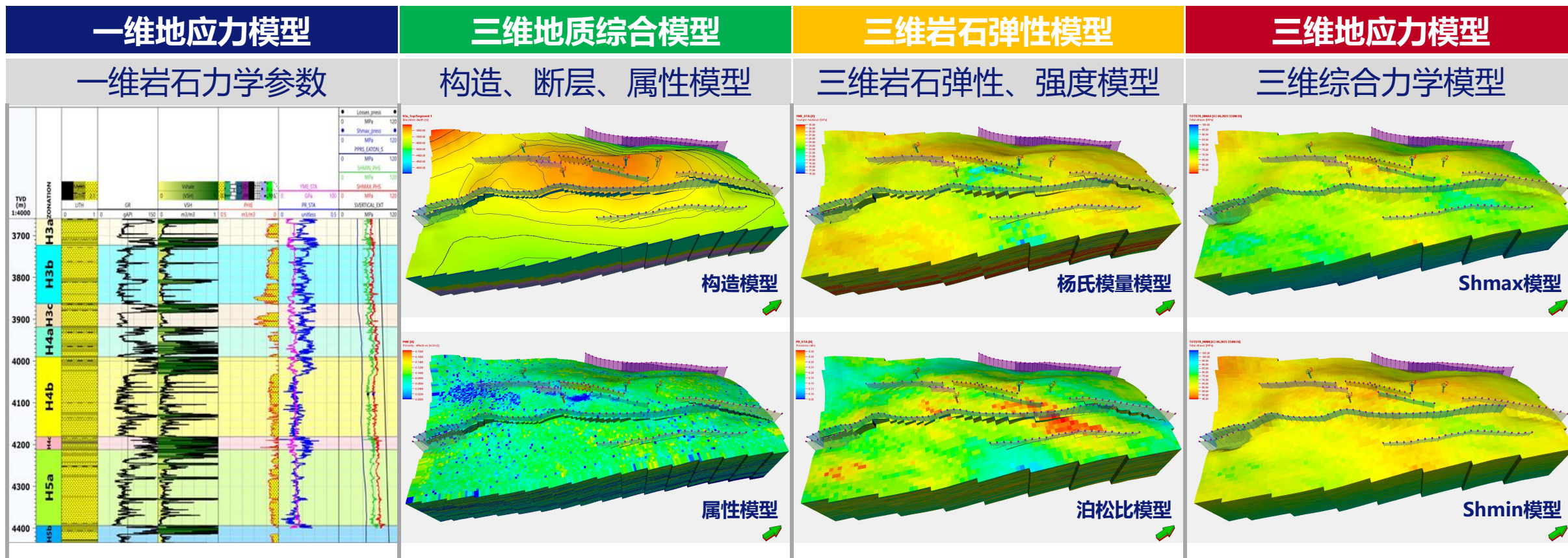
Z3井应力计算成果图



二、地应力预测及建模技术

(二) 地应力大小

5、地应力建模

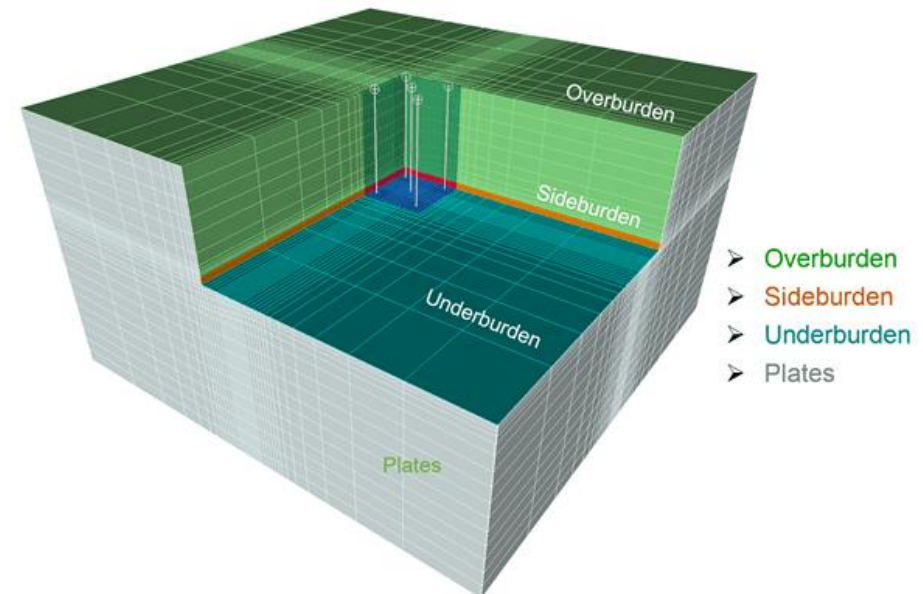


(二) 地应力大小

5、地应力建模

有限元模拟：利用数学近似的方法对真实物理系统（几何和载荷工况）进行模拟。利用简单而又相互作用的元素（即单元），就可以用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统。

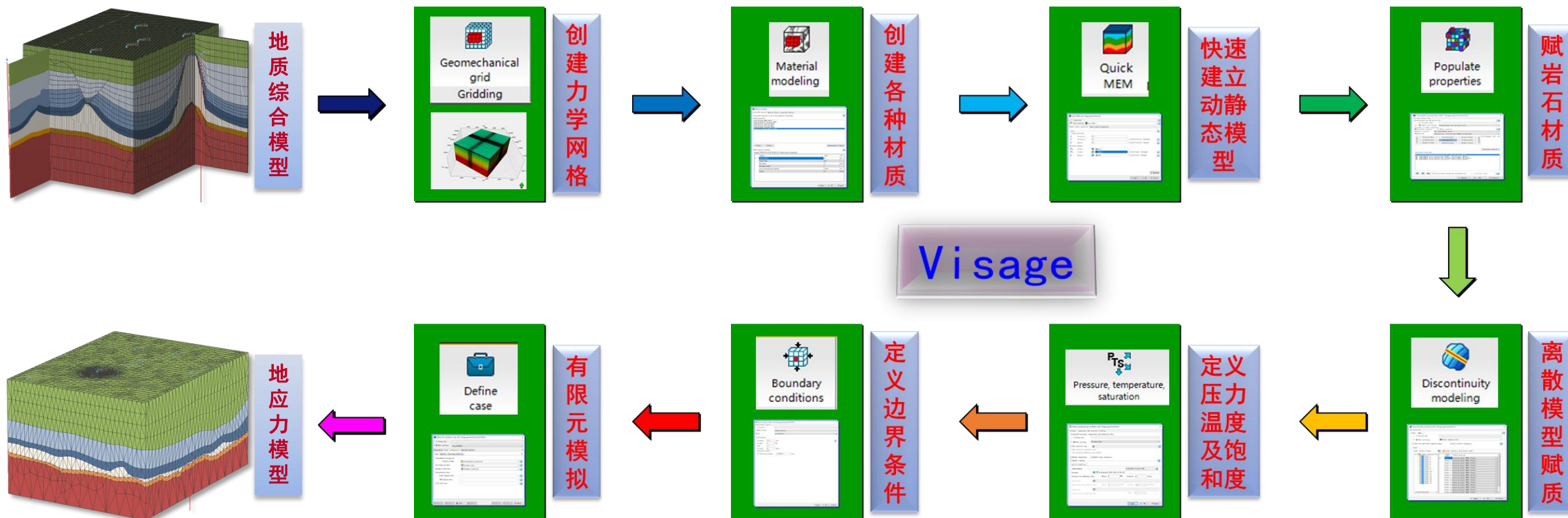
$$\delta\Delta E = \delta\Delta W - \delta\Delta L = 0$$
$$\Delta W = \frac{1}{2} \int \{\Delta\epsilon\}^T \{\Delta\sigma\} dVol$$
$$\Delta L = \int \{\Delta d\}^T \{\Delta F\} dVol + \int \{\Delta d\}^T \{\Delta T\} dSrf$$



二、地应力预测及建模技术

(二) 地应力大小

5、地应力建模

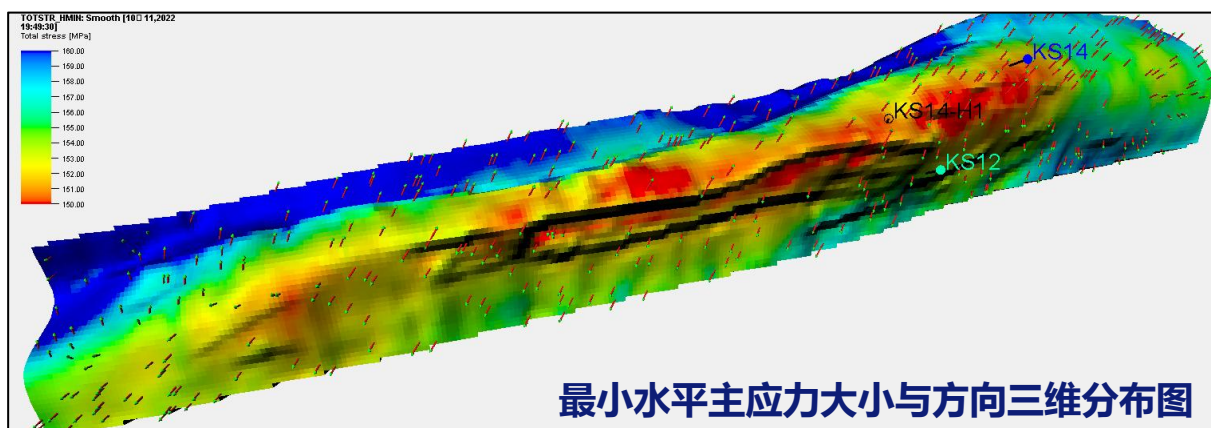
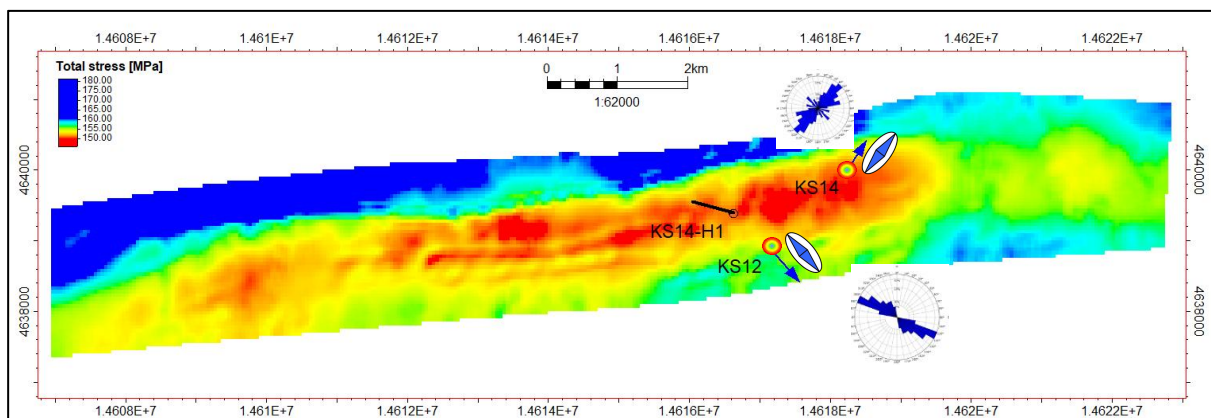


二、地应力预测及建模技术

(二) 地应力大小

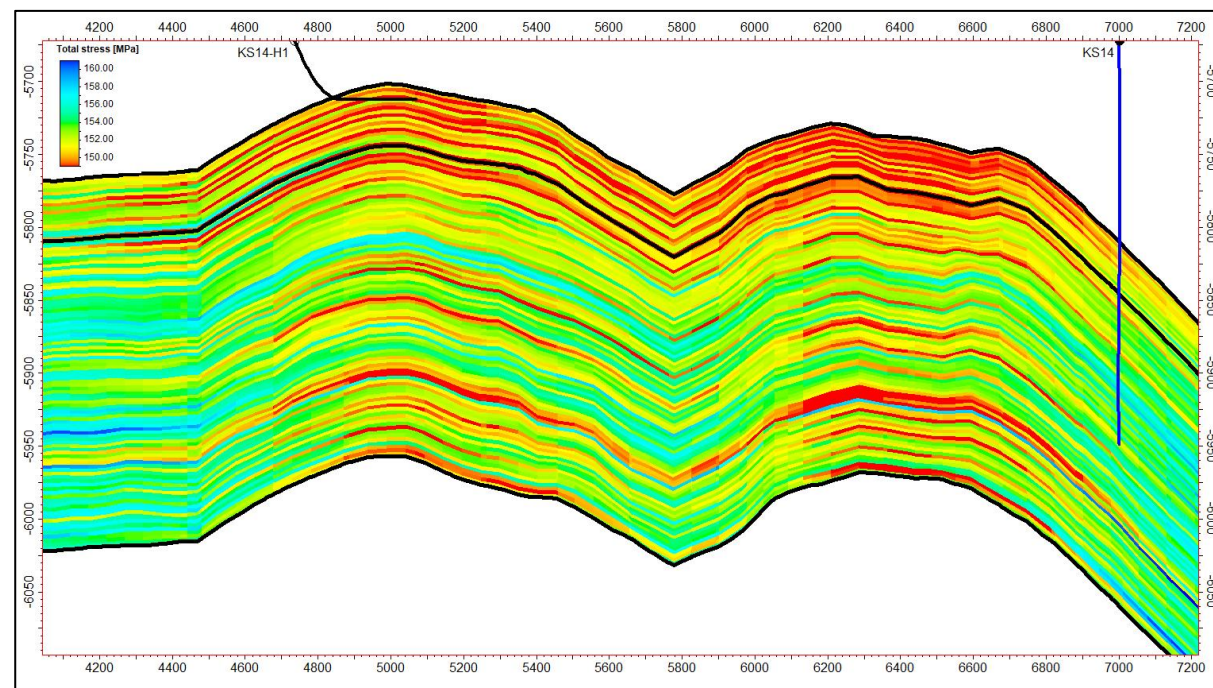
5、地应力建模

最小水平主应力与主应力方向



最小水平主应力大小与方向三维分布图

最小水平主应力剖面



构造应力平面上高部位应力低，低部位应力高；纵向上分布多层高应力夹层，内部应力非均质性强。

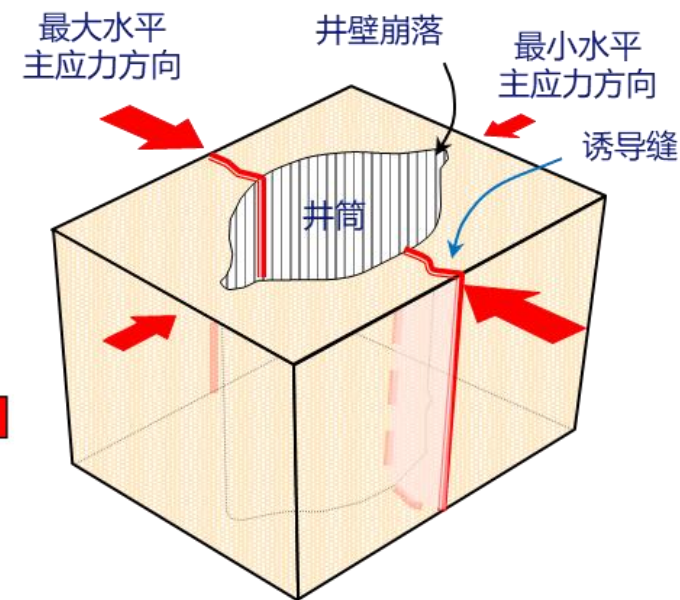
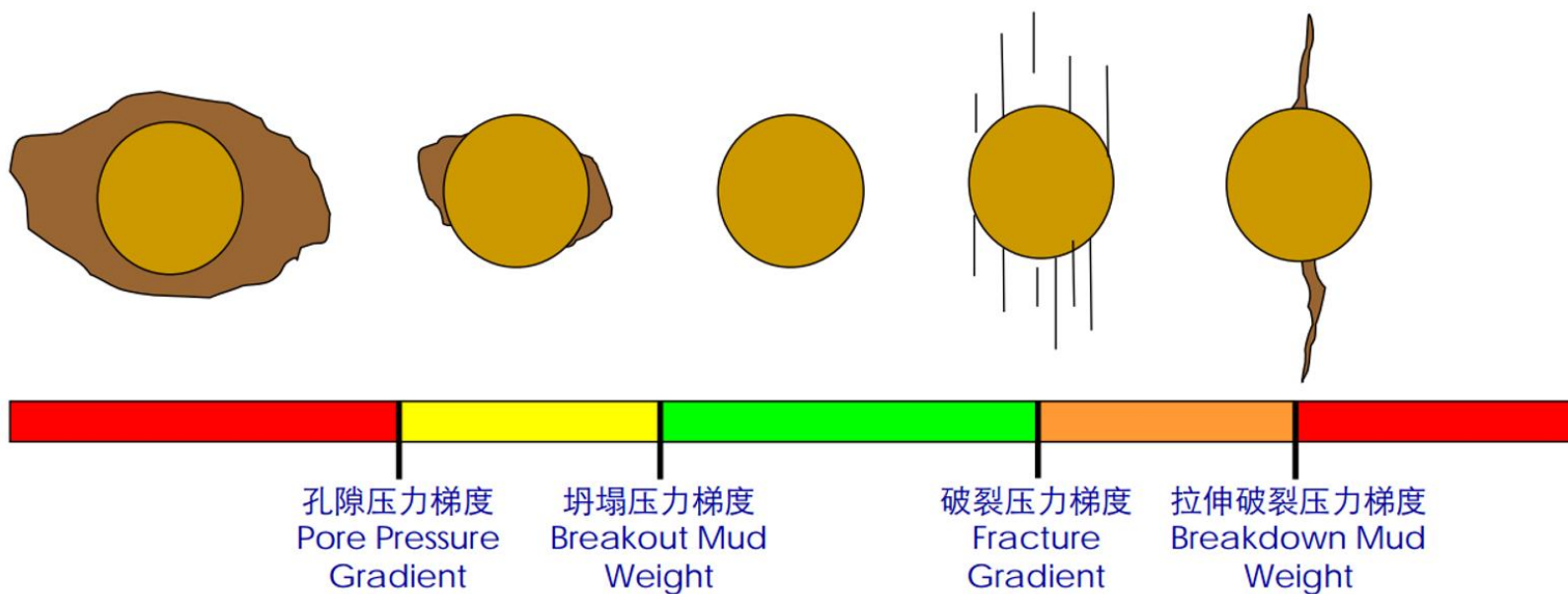
目 录

- 一、地应力概述及研究意义
- 二、地应力预测及建模技术
- 三、地应力在实践中的运用**

三、地应力在实践中的运用

(一) 井壁稳定性分析

井眼不稳定性类型：剪切破坏及拉伸断裂。

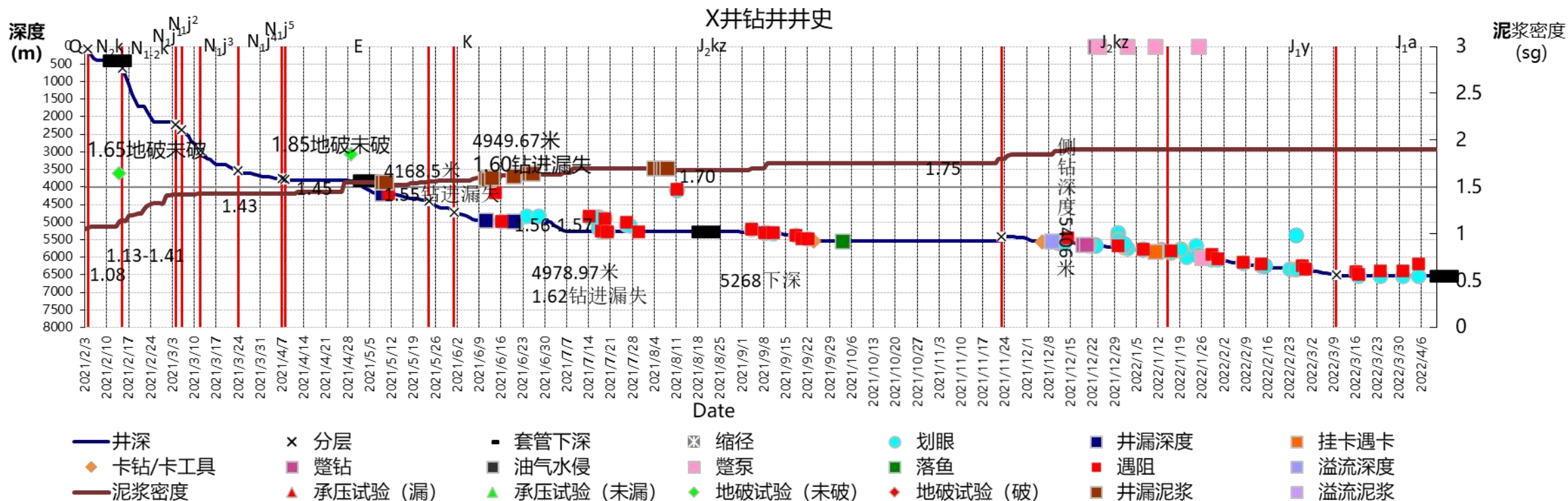


三、地应力在实践中的运用

(一) 井壁稳定性分析

1、随钻复杂分析

钻井过程中复杂频繁：如遇阻、遇卡、井漏、侧钻等。

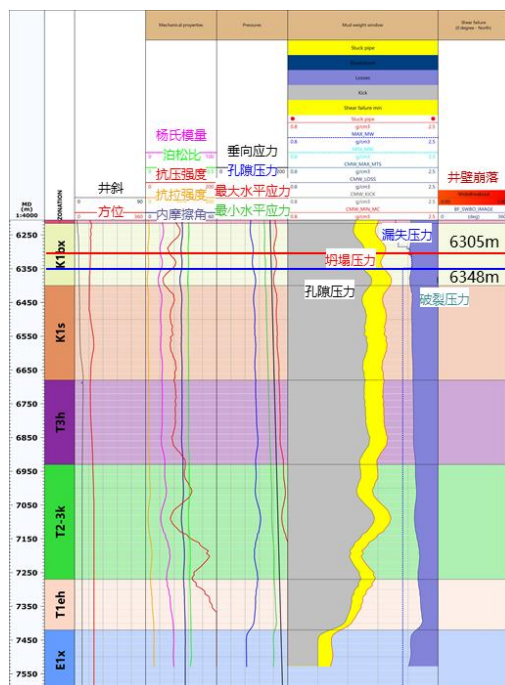


三、地应力在实践中的运用

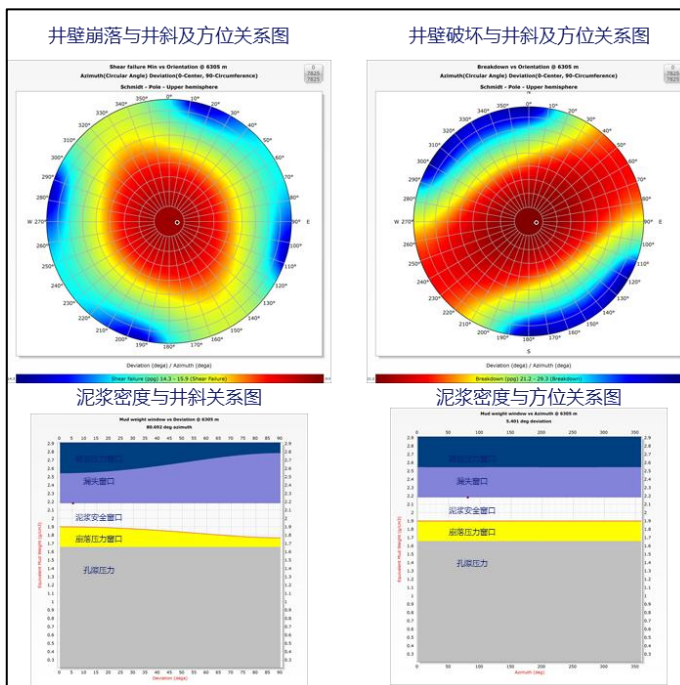
(一) 井壁稳定性分析

1、随钻复杂分析

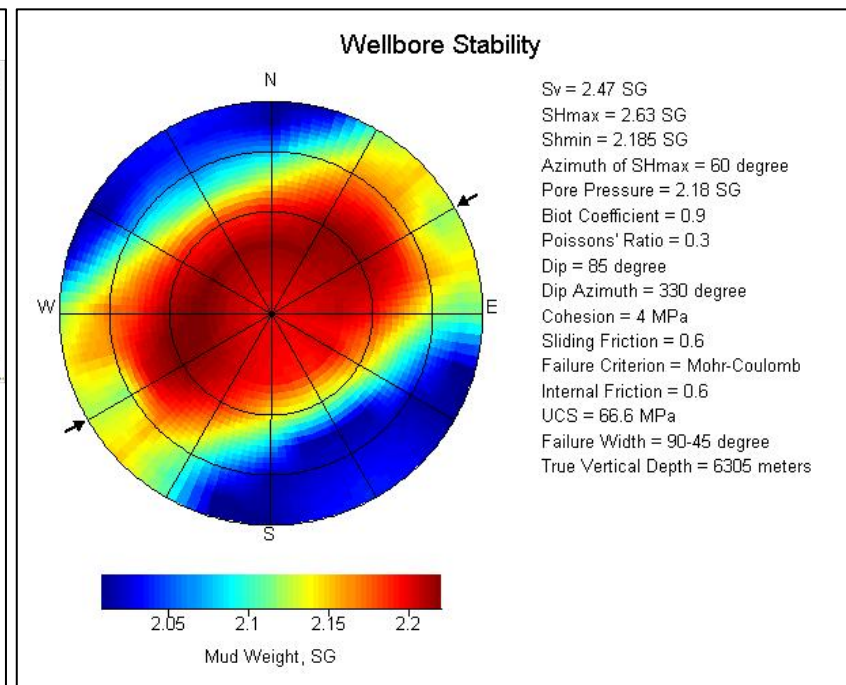
钻井过程中复杂频繁：如遇阻、遇卡、井漏、侧钻等。



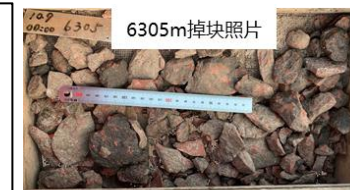
X井壁稳定性分析成果图



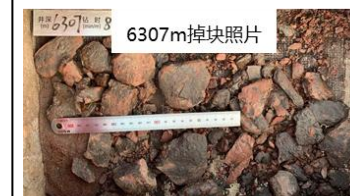
X井6305m玫瑰图
泥浆密度与井斜、方位关系图



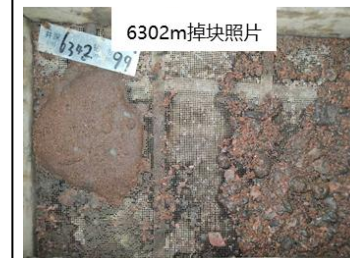
X井裂缝井壁稳定性分析玫瑰图



6305m掉块照片



6307m掉块照片



6302m掉块照片

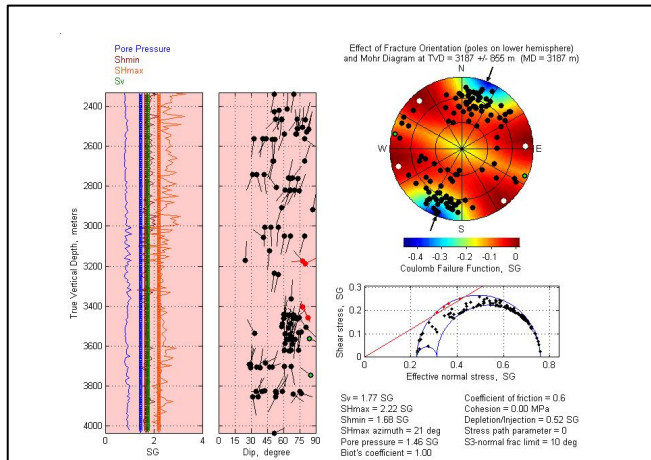
X井掉块

三、地应力在实践中的运用

(一) 井壁稳定性分析

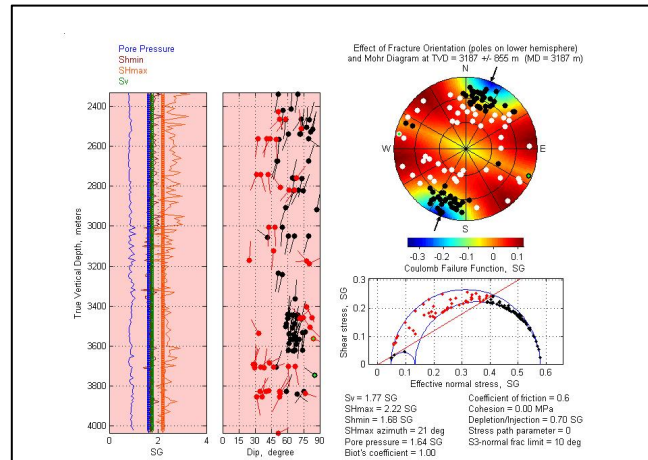
2、裂缝力学特征评价

天然裂缝开启压力：模拟不同注入压力条件下天然裂缝开启程度。



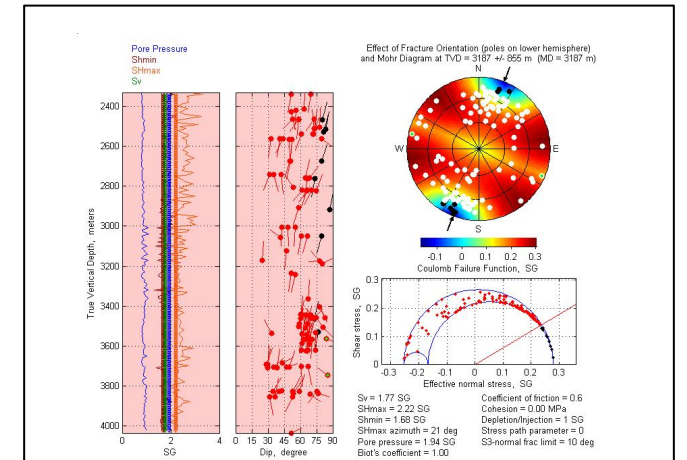
注入压力1.46

裂缝开启率 $4/117=3.4\%$
总裂缝条数：117条



注入压力1.64

裂缝开启率 $36/117=41\%$
总裂缝条数：117条



注入压力1.94

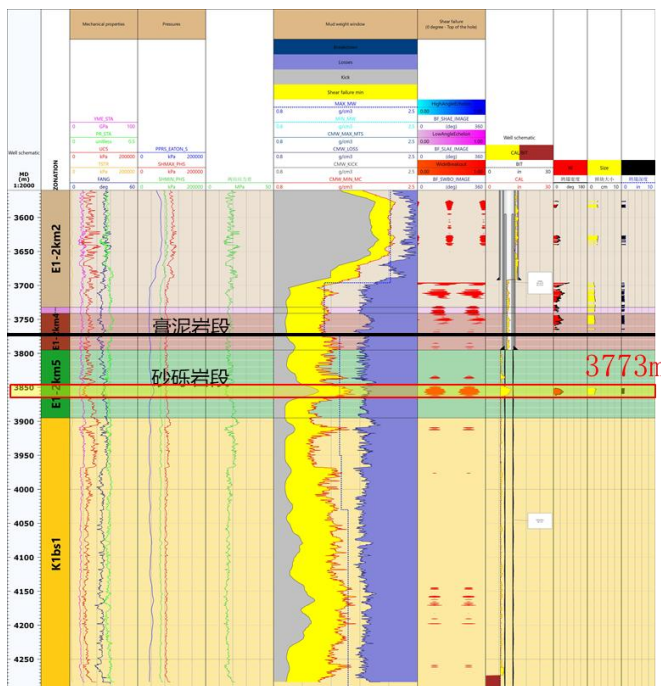
裂缝开启率： $108/117=92\%$
总裂缝条数：117条

三、地应力在实践中的运用

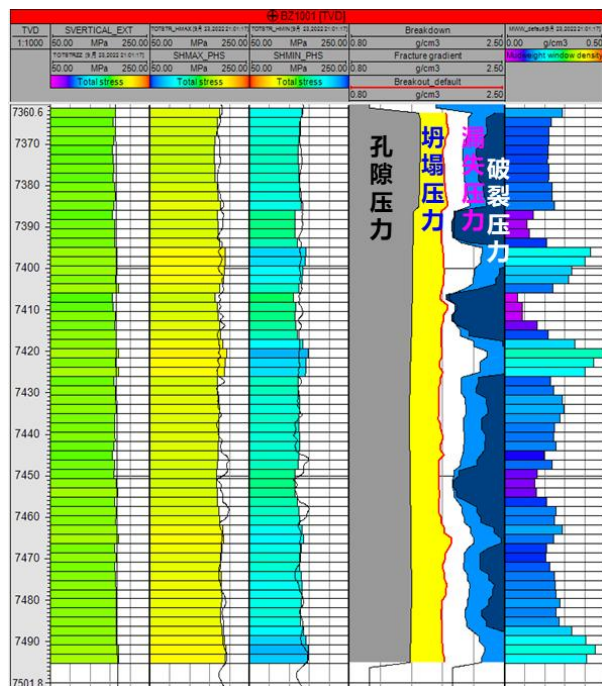
(一) 井壁稳定性分析

3、钻井液安全窗口预测

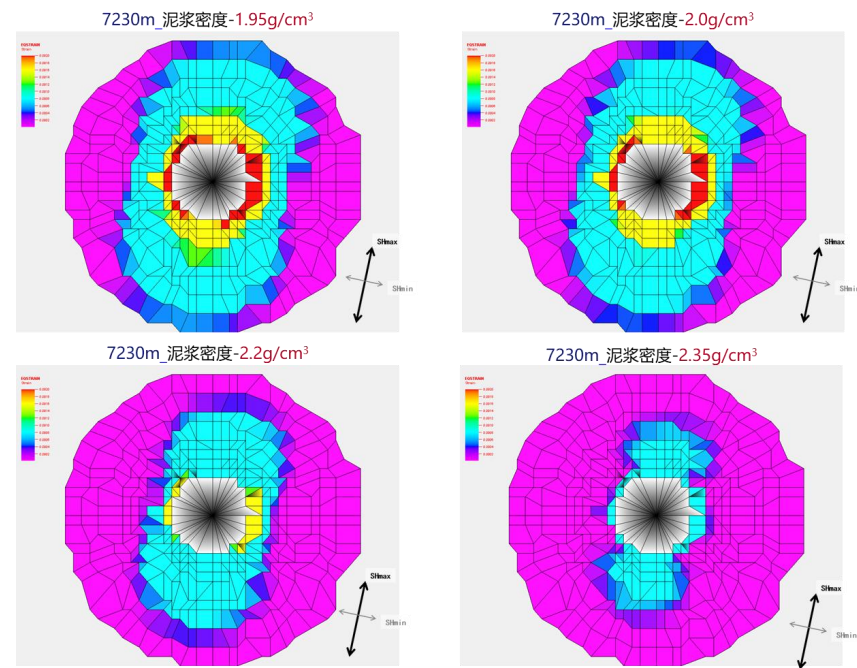
一维、三维力学模型结合：模拟不同泥浆密度下井筒形态，准确预测钻井液窗口宽度。



X2井一维钻井液安全窗口成果图



X2井三维模型钻井液安全窗口成果图



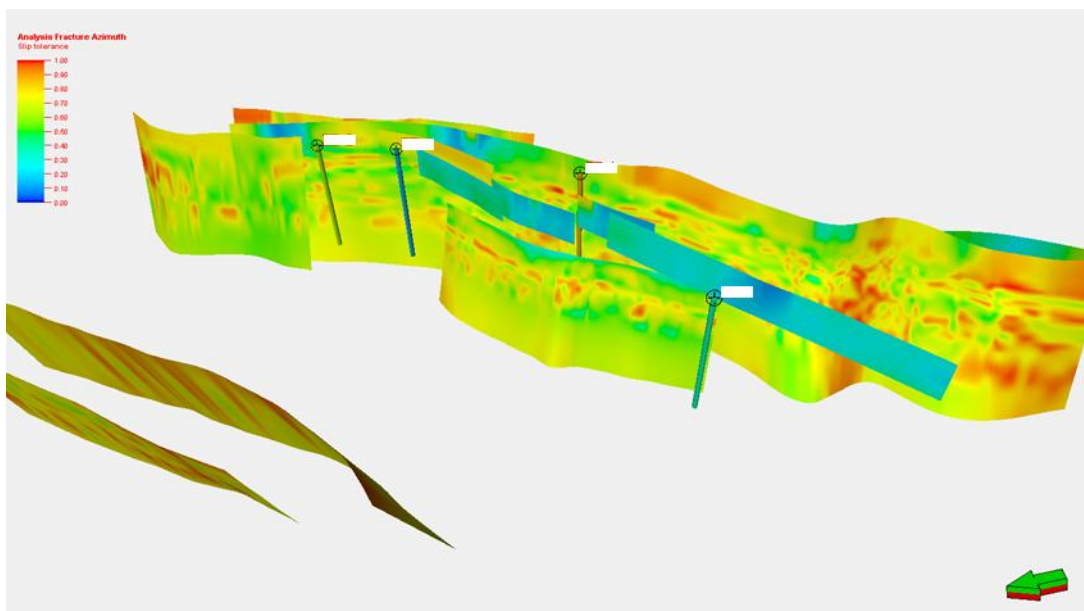
X2井不同钻井液井筒模拟成果图

(二) 断裂稳定性分析

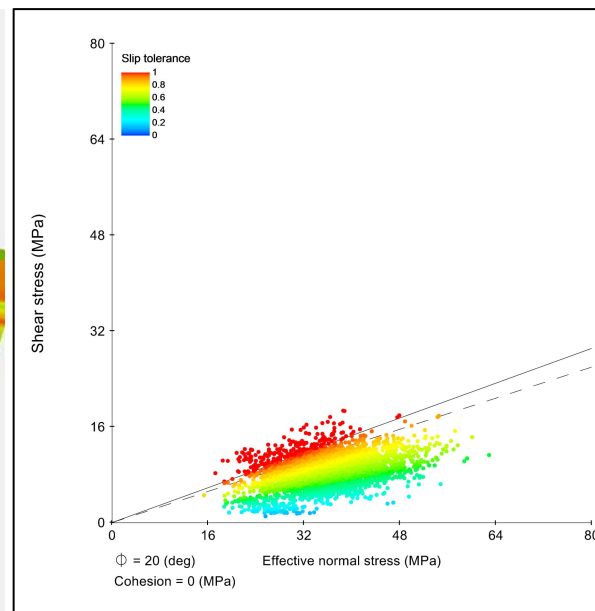
1、断层活动性分析

基于摩尔库伦准则，根据法向有效应力、剪应力、内聚力以及内摩擦角计算断层面的滑动容限

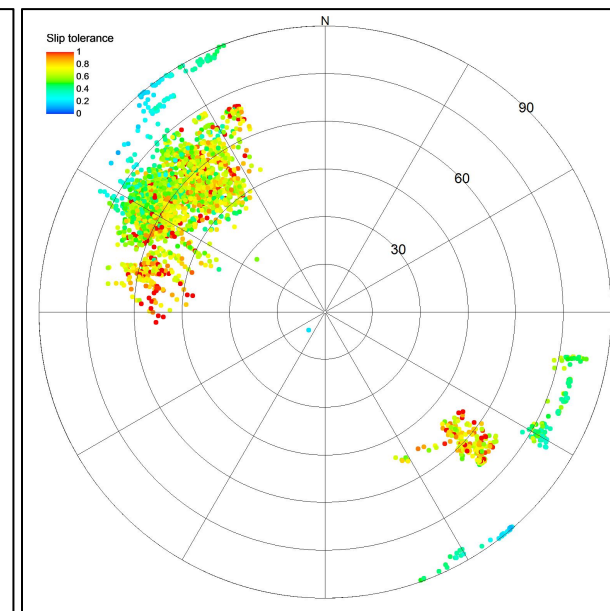
断层活动性平面分布图



断层 σ - τ 关系图



断层滑动容限与倾角-方位角关系图



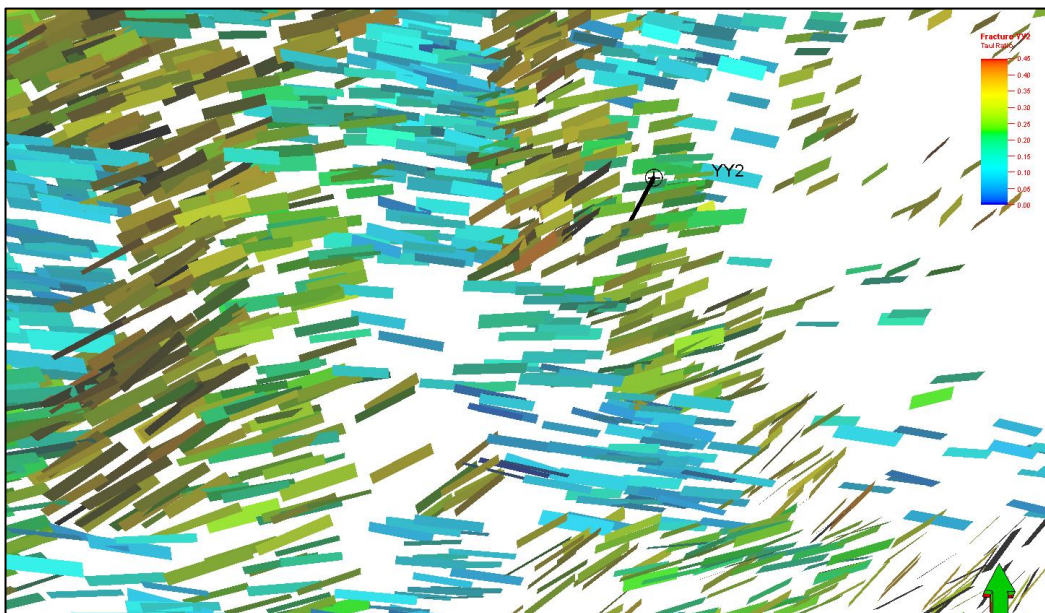
三、地应力在实践中的运用

(二) 断裂稳定性分析

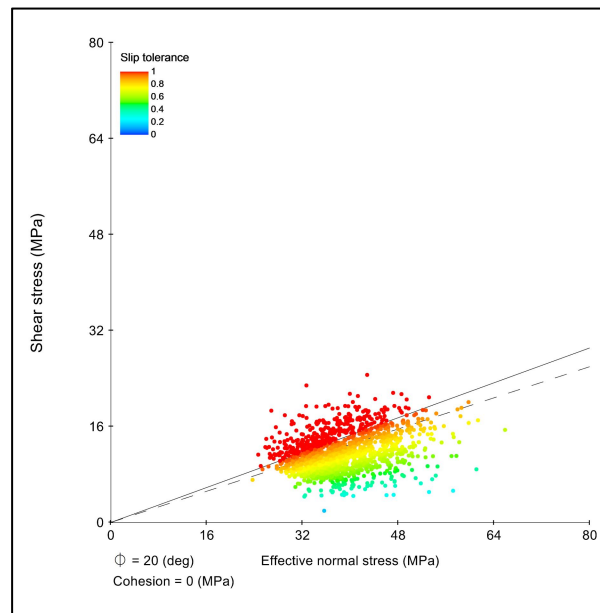
2、裂缝活动性分析

基于摩尔库伦准则，根据法向有效应力、剪应力、内聚力以及内摩擦角计算裂缝面的滑动容限

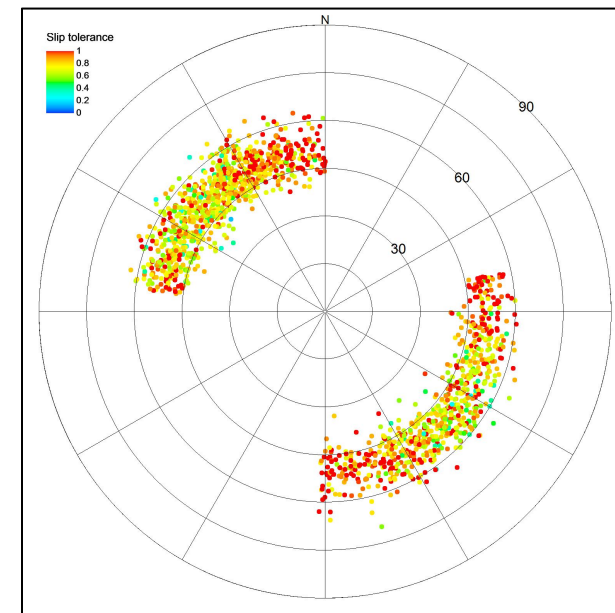
天然裂缝活动性平面分布图



裂缝 σ - τ 关系图



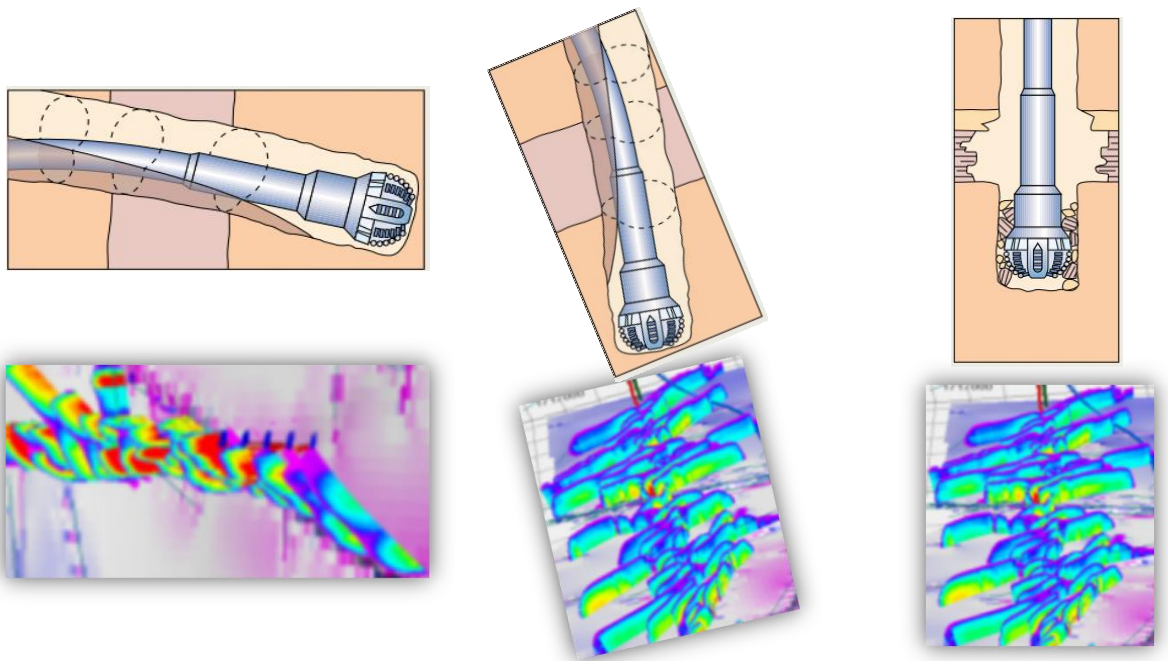
裂缝滑动容限与倾角-方位角关系图



三、地应力在实践中的运用

(三) 一体化压裂优化设计

1、水平井部署方位

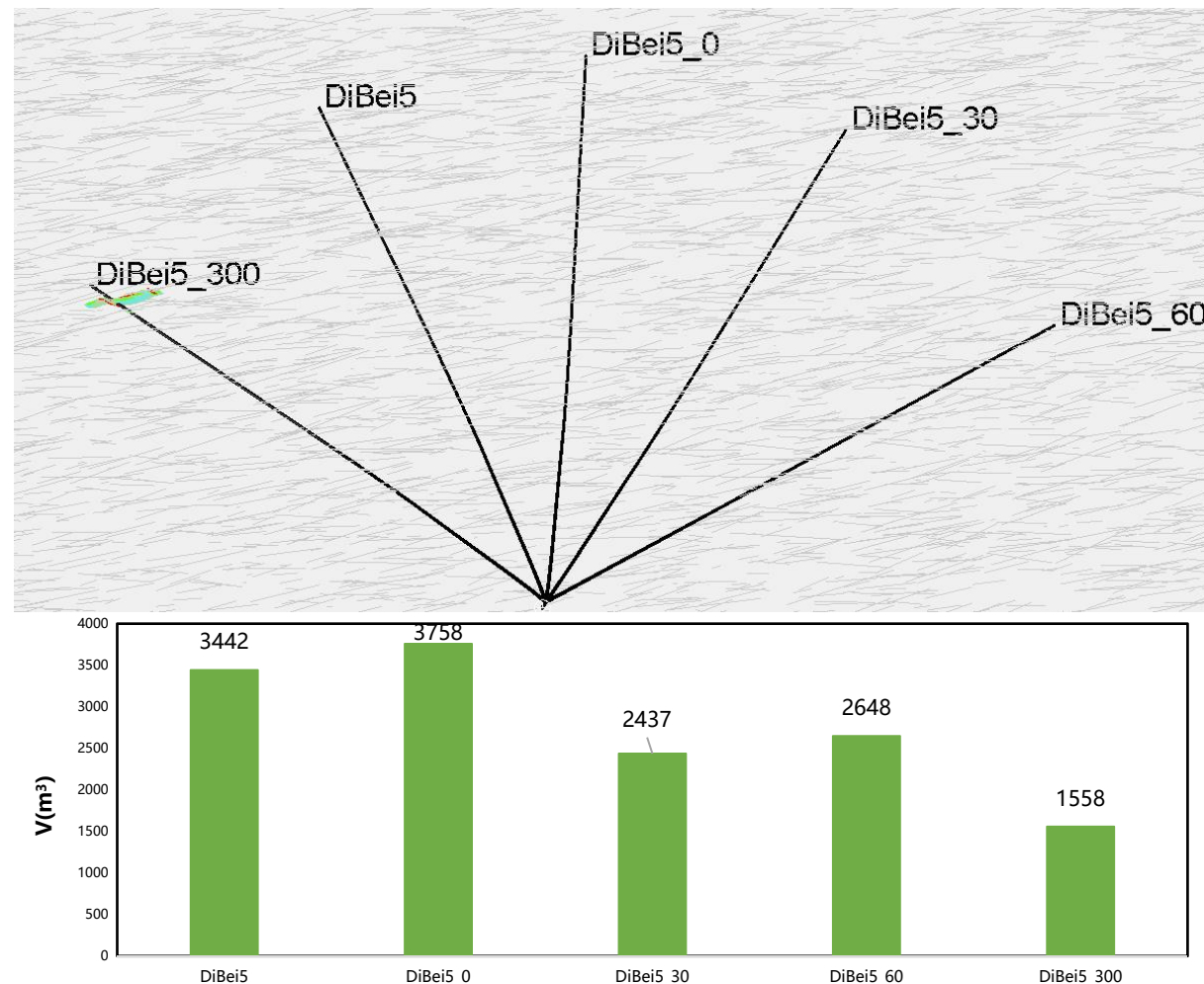


钻井方向平行于最大水平主应力方向

优化钻井方向和轨迹

钻井方向平行于最小水平主应力方向

体积压裂-7段/每段3簇-三维缝网模拟动画

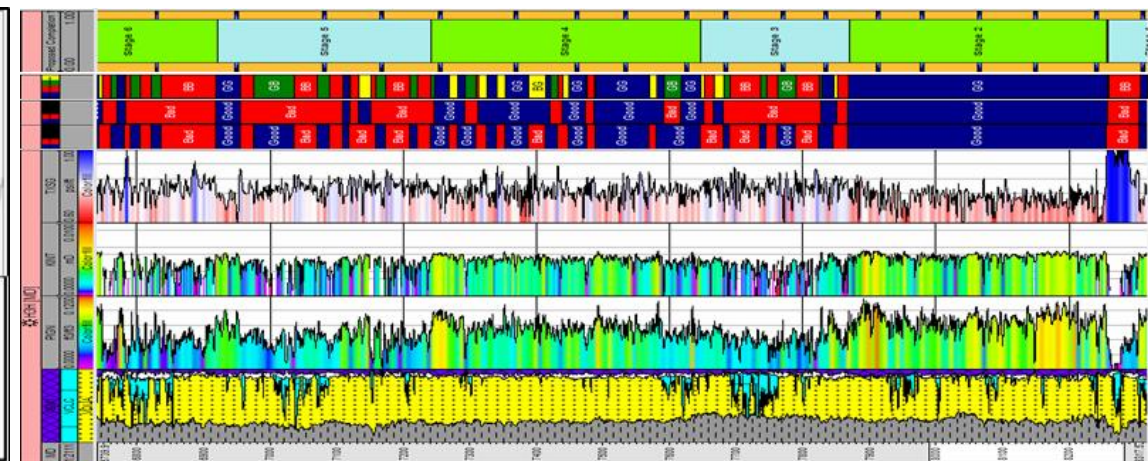
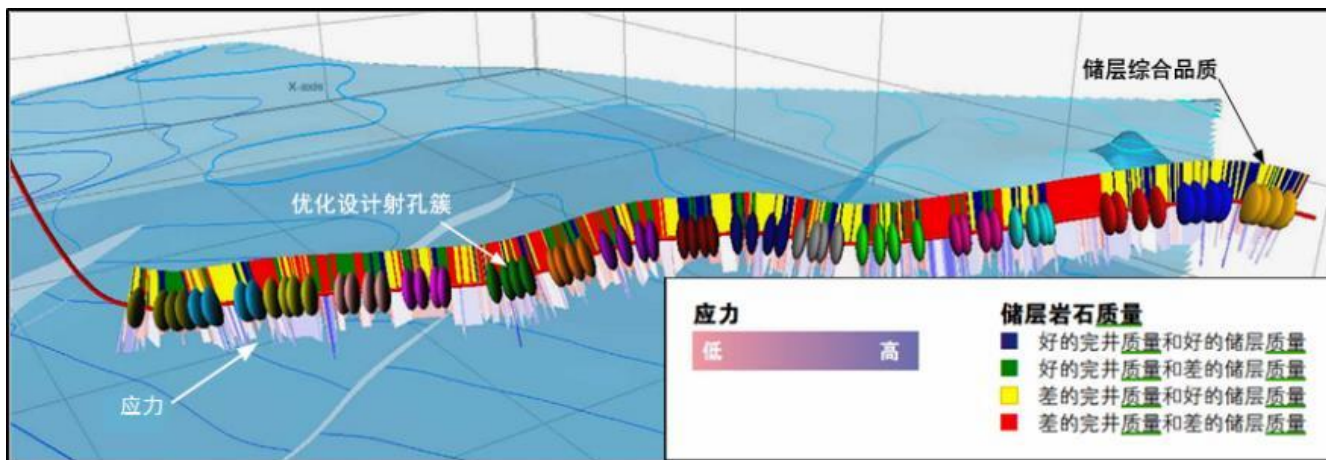
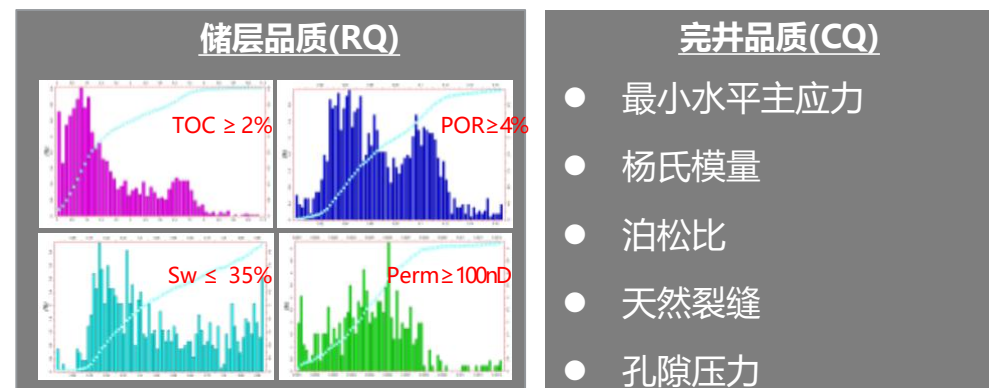


三、地应力在实践中的运用

(三) 一体化压裂优化设计

2、压裂段簇优化

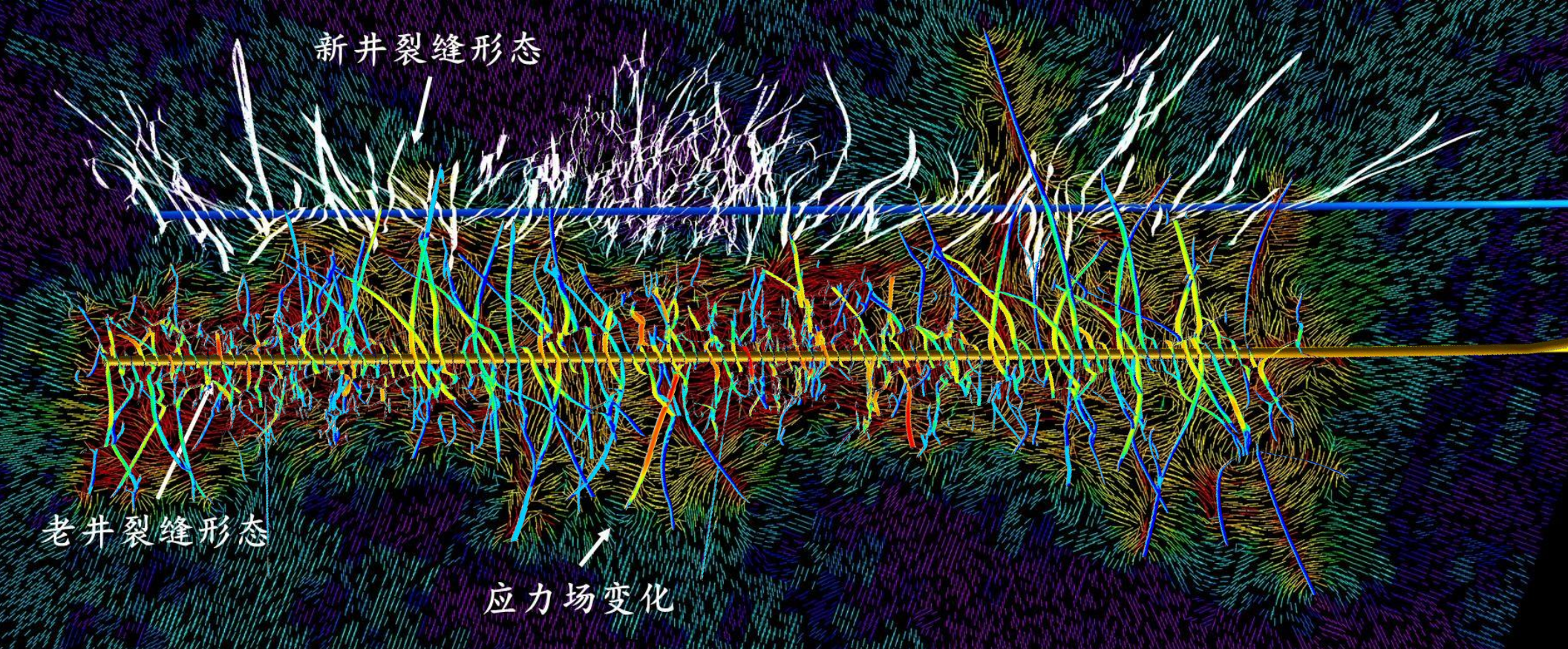
综合考虑**储层品质**和**完井品质**，结合地质构造与压裂施工条件限制，将储层物性和完井参数相近的层段划分为同一压裂段并优选射孔位置以降低压裂段内应力差异，打破常规“几何完井”设计方法的盲目性，最大程度增加储层压裂改造的均匀性与有效性



三、地应力在实践中的运用

(四) 四维应力模拟 (考虑老井压裂缝)

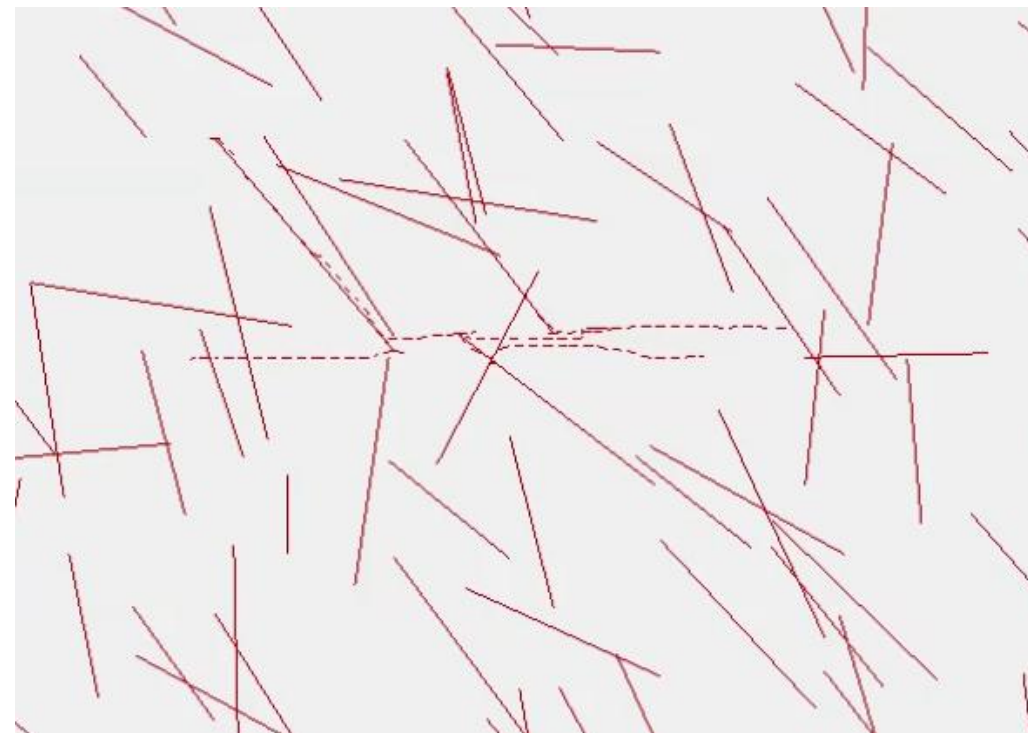
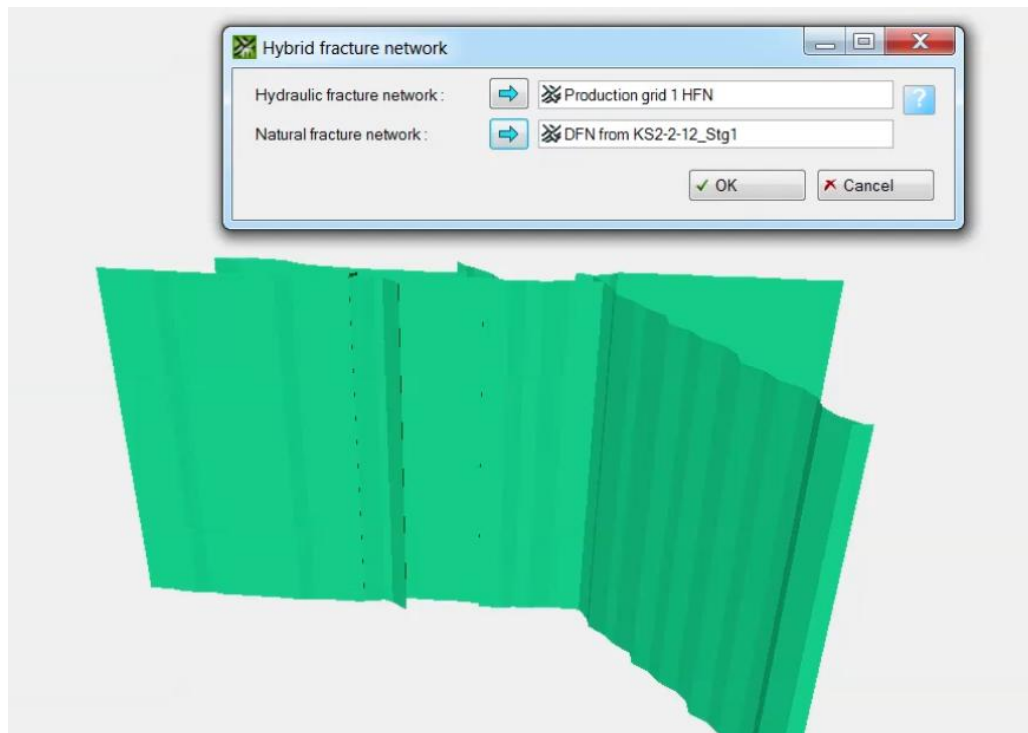
模拟压裂和生产过程中应力场四维变化为新井压裂设计及施工参数优化、老井重复压裂设计施工及加密新井优化 (水平段长、井网、井距等) 奠定基础。



三、地应力在实践中的运用

(四) 四维应力模拟 (考虑老井压裂缝)

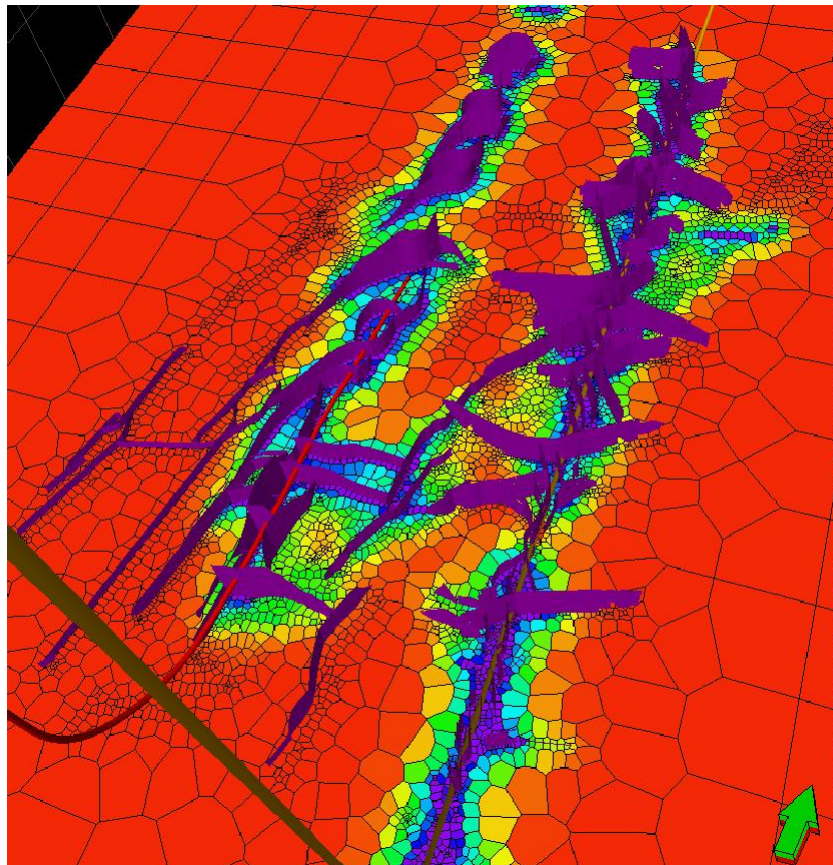
考虑压裂水力人工缝网形态与天然裂缝合并建立复杂裂缝模型



三、地应力在实践中的运用

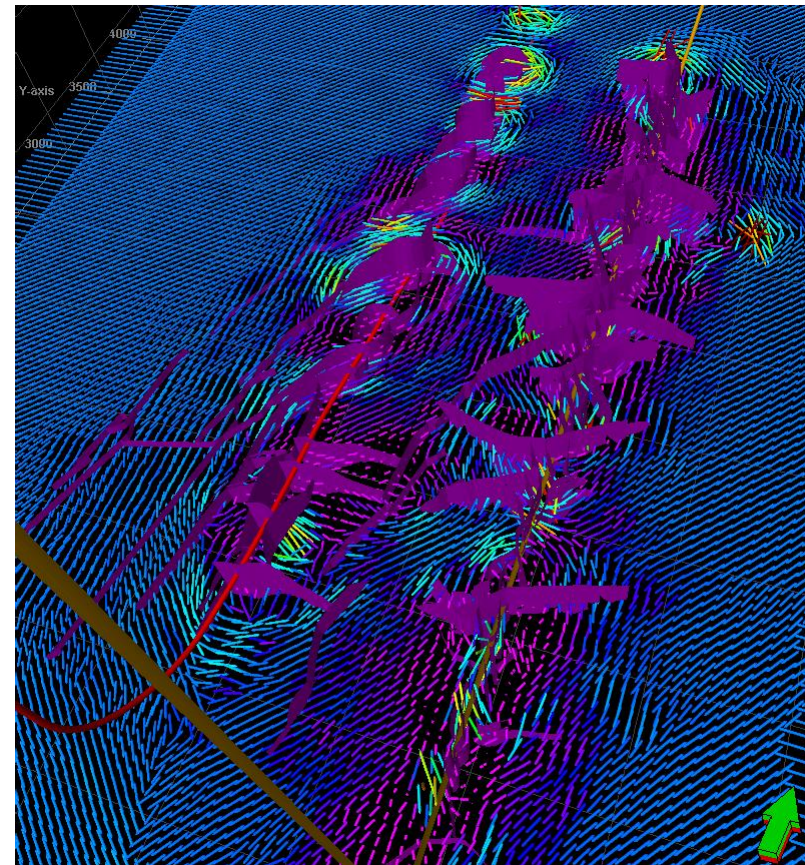
(四) 四维应力模拟 (考虑老井压裂缝)

考虑水力裂缝非结构化网格数值模拟



生产过程中油藏压力及水力裂缝净压力变化

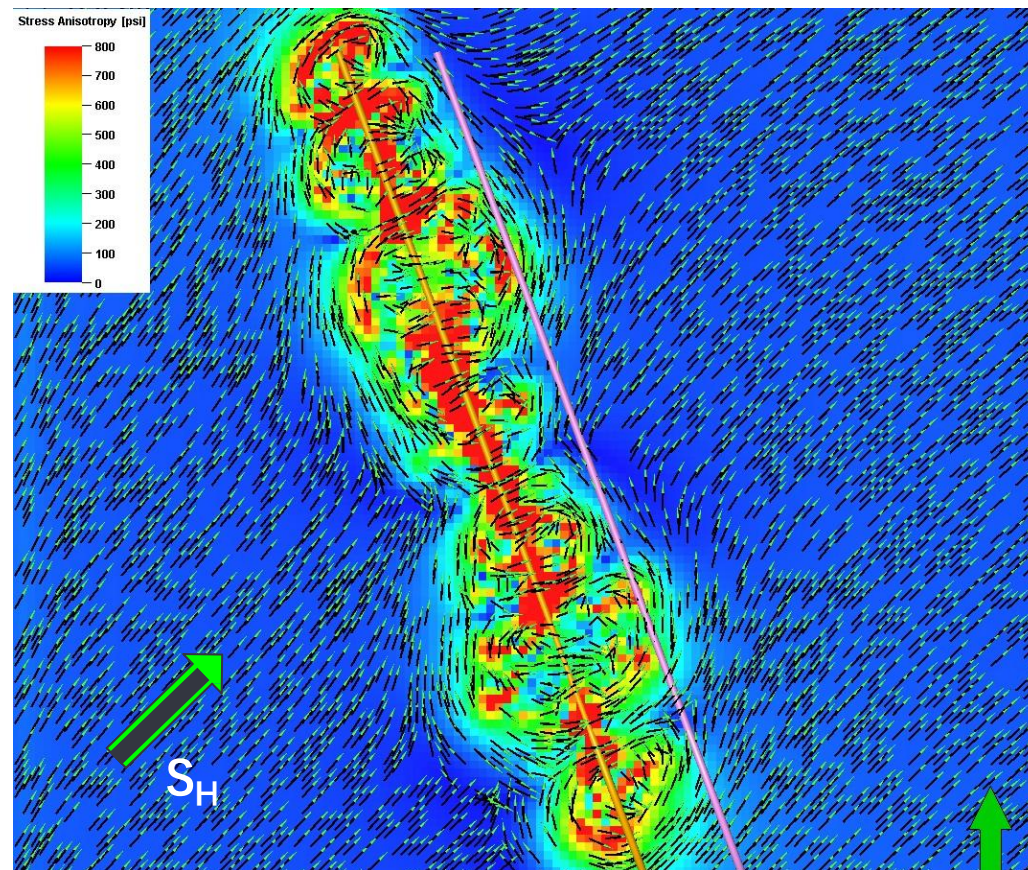
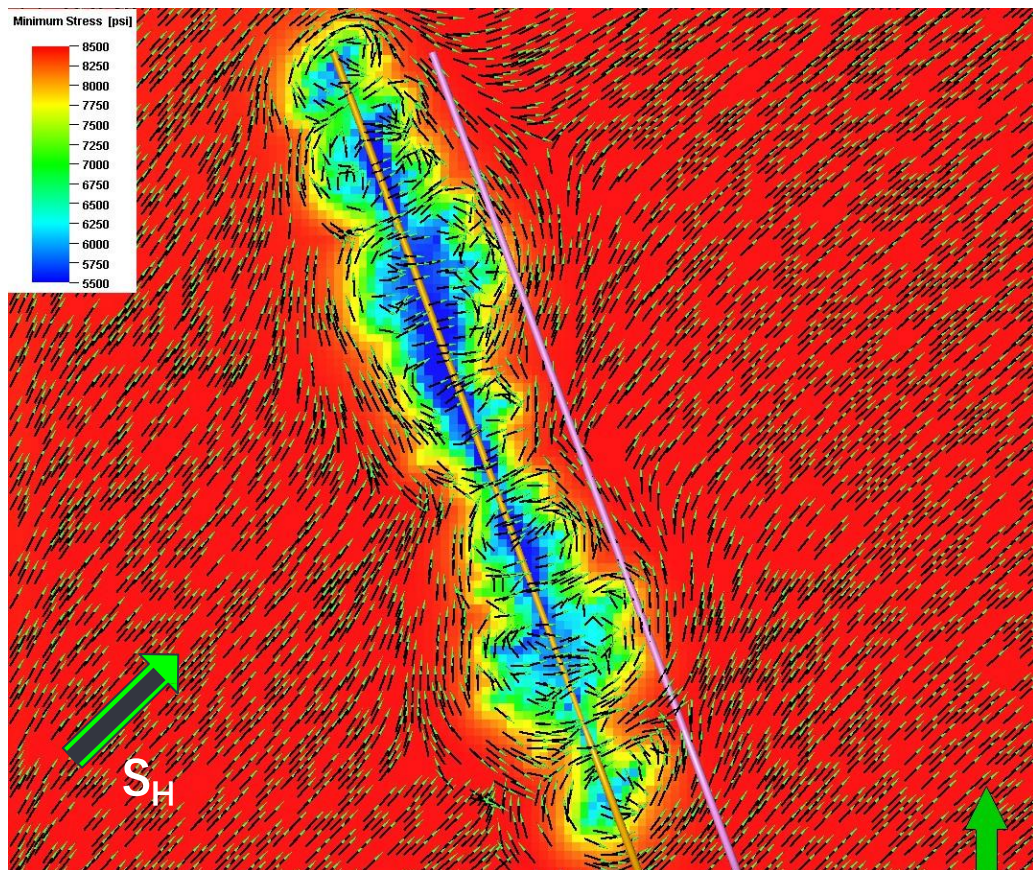
水力压裂和生产影响的三维地质力学模拟



在生产过程中变化的水平应力大小及方向

(四) 四维应力模拟 (考虑老井压裂缝)

地应力方向及应力差大小随压裂和生产而变化



ANTON 安東

人与环境高效、和谐发展的典范

帮助别人成功... ..

