

文章编号: 1006-6616 (2014) 01-0094-09

石油工程水平最大地应力分析技术

陈朝伟¹, 杨向同², 王 刚¹, 袁学芳²,

刘军严², 周鹏遥², 巴 旦²

(1. 中国石油集团钻井工程技术研究院, 北京 100195;

2. 中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘 要: 系统总结了应用井壁破坏信息计算水平最大地应力的基本原理, 在此基础上, 编制了水平最大地应力分析流程。具体实例分析表明, 该方法理论依据扎实可靠, 分析流程清晰明确, 操作过程简便易行。建议在我国石油工业推广应用。

关键词: 地应力; 水平最大地应力; 井壁成像; 石油工程; 分析流程

中图分类号: P553

文献标识码: A

水平最大地应力在石油工程地质力学研究和应用中非常重要。但由于不能直接测量, 所以水平最大地应力是地应力所有分量中最难确定的一个。目前, 石油工程中常用的计算水平最大地应力的方法包括水力压裂法^[1-2]、构造应力系数法^[3]和井壁破坏分析法^[4-7]等。水力压裂法最适用于相对较浅(一般约2 km或更浅)、应力和温度均较低、岩石较坚固的井中, 所以在石油行业中该技术应用受到局限^[7]。构造应力系数法计算水平最大地应力在实际应用中构造应力系数不容易确定。随着井壁成像测井技术的发展, 根据井壁破坏信息(井壁崩落和井壁诱导裂缝)确定水平最大地应力的方法在国外得到了广泛的应用^[8-12]。

本文系统介绍了应用井壁破坏信息分析水平最大地应力的基本原理, 包括井壁围岩应力分布特征、井壁破坏信息与水平最大地应力的关系和应力四边形, 以此为基础编制了由井壁破坏信息计算水平最大地应力的分析流程, 并通过现场实例, 展示了该分析技术的具体过程。

1 基本原理

1.1 井壁应力集中

在各向同性弹性介质中, 与垂直主应力平行的直井井壁围岩的有效应力分布公式为^[7]:

$$\sigma_{\theta\theta} = S_{H_{\max}} + S_{h_{\min}} - 2(S_{H_{\max}} - S_{h_{\min}}) \cos 2\theta - 2P_p - \Delta P \quad (1)$$

$$\sigma_{rr} = \Delta P \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = S_v - 2\nu(S_{H_{\max}} - S_{h_{\min}}) \cos 2\theta - P_p \quad (3)$$

收稿日期: 2013-07-18

基金项目: 塔里木油田科研课题“库车山前基于地质力学研究的压裂效果评价”(201012110339)

作者简介: 陈朝伟(1979-), 男, 博士, 中国石油集团钻井工程技术研究院高级工程师, 主要从事石油工程岩石力学研究。E-mail: chenwzdri@cnpc.com.cn

式中, $\sigma_{\theta\theta}$ ——环向有效应力, MPa; S_{Hmax} ——水平最大主应力, MPa; S_{Hmin} ——水平最小主应力, MPa; θ ——偏离水平最大地应力方向的角度, ($^{\circ}$); P_p ——孔隙压力, MPa, ΔP ——井底液柱压力 P_m 与孔隙压力之间的压差; σ_{rr} ——径向有效应力, MPa; S_v ——垂直应力, MPa; ν ——地层泊松比, 无量纲。

当 $\theta = 0^{\circ}, 180^{\circ}$ 时, 由式 (1) 可得井壁环向有效应力的最小值:

$$\sigma_{\theta\theta}^{\min} = 3S_{Hmin} - S_{Hmax} - 2P_p - \Delta P \quad (4)$$

当 $\theta = 90^{\circ}, 270^{\circ}$ 时, 由式 (1) 可得井壁环向有效应力的最大值:

$$\sigma_{\theta\theta}^{\max} = 3S_{Hmax} - S_{Hmin} - 2P_p - \Delta P \quad (5)$$

从水平最大地应力方向至水平最小地应力方向, 井壁压缩作用逐渐增大。

1.2 由井壁崩落确定水平最大地应力

当井壁环向有效应力达到岩石的抗压强度 C 时, 井壁发生压缩破坏, 破坏范围记为 w_{bo} , 称为崩落宽度 (见图 1)。

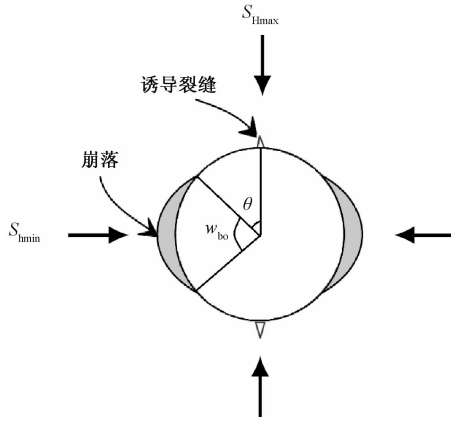


图 1 井壁应力集中

Fig. 1 Wellbore stress concentration

令 $\theta = \theta_b$, 式 (1) 满足:

$$\sigma_{\theta\theta} = C \quad (6)$$

由此可得由井壁崩落宽度计算水平最大地应力的公式^[5]:

$$S_{Hmax} = \frac{(C + 2P_p + \Delta P) - S_{Hmin}(1 + 2\cos 2\theta_b)}{1 - 2\cos 2\theta_b} \quad (7)$$

式中, $\theta_b = (\pi - w_{bo})/2$, ($^{\circ}$)。

实际上, 也可以采用其他不同的强度准则, 由此得到相应的计算水平最大地应力的公式形式。

1.3 由井壁诱导裂缝确定水平最大地应力

由式 (4) 可以看出, 提高钻井液液柱压力, ΔP 不断增大, 环向有效应力不断减小, 最终从压应力过渡到拉应力状态。当拉应力满足岩石的抗拉强度时:

$$\sigma_{\theta\theta}^{\min} = -T_0 \quad (8)$$

式中, T_0 ——岩石抗拉强度, MPa。

将 (8) 式代入式 (4), 可得由钻井诱导裂缝确定水平最大主应力的公式^[7]:

$$S_{Hmax} = 3S_{Hmin} - 2P_p - \Delta P - T_0 \quad (9)$$

如果忽略抗拉强度和压差，(9) 式简化得：

$$S_{Hmax} = 3S_{hmin} - 2P_p \tag{10}$$

1.4 摩擦断层理论

在地壳内部，断层、裂缝和不连续面广泛分布。临界方向断层（位于最易于滑动的角度）处于摩擦极限时，主有效应力 σ_1 和 σ_3 满足^[13]：

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_1 - P_p}{S_3 - P_p} = [\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu]^2 \tag{11}$$

式中， S_1 ——最大主应力，MPa； S_3 ——最小主应力，MPa； μ ——不连续面的摩擦系数，无量纲。

式（11）表明，深部地应力大小受到不连续面的摩擦强度约束，称之为摩擦断层理论。此时的地应力处于摩擦平衡状态，如果断层的剪应力与有效正应力之比超过滑动摩擦系数，断层则沿着优势方向滑动^[7]。根据 Anderson 断层分类体系， S_v 、 S_{hmin} 和 S_{Hmax} 三者不同的大小关系，产生 3 种断层机制，即正断层（NF： $S_{hmin} < S_{Hmax} < S_v$ ）、走滑断层（SS： $S_{hmin} < S_v < S_{Hmax}$ ）和逆断层（RF： $S_v < S_{hmin} < S_{Hmax}$ ）。在不同的应力模式下，上述约束方程具有不同的表达式^[7]。

正断层应力状态，应力满足：

$$\frac{S_v - P_p}{S_{hmin} - P_p} = [\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu]^2 \tag{12}$$

走滑断层应力状态，应力满足：

$$\frac{S_{Hmax} - P_p}{S_{hmin} - P_p} = [\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu]^2 \tag{13}$$

逆断层应力状态，应力满足：

$$\frac{S_{Hmax} - P_p}{S_v - P_p} = [\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu]^2 \tag{14}$$

根据摩擦断层理论，可在水平最小地应力和水平最大地应力的平面图上建立应力四边形（见图 2），用于约束地应力^[8~9]。 $S_{Hmax} \geq S_{hmin}$ 要求应力状态位于斜率为 1 的斜线上方，通过 $S_{Hmax} = S_{hmin} = S_v$ 一点的垂直和水平线将上部分分成 3 个区域，分别对应正断层、走滑断层和逆断层应力状态。应力四变形的边线由式（12）、（13）和（14）确定，其中垂直线 1 由式（12）确定，表示方程 S_{hmin} 的下限；水平线 3 由式（14）确定，表示 S_{Hmax} 的上限；斜线 2 由式（13）确定，表示 S_{Hmax} 与 S_{hmin} 的关系。另外，另一边线由方程 $S_{Hmax} = S_{hmin}$ 确定。这 4 条线组成了可能应力的外边界，也就是说，深部应力总是处于多边形范围之内，如果应力状态处于摩擦平衡状态，则应力状态位于多边形边线上。当然，位于哪条边线取决于应力状态是属于正断层、走滑断层还是逆断层。

根据井壁破坏信息计算水平最大地应力的方法可以在应力四边形中描述。取 $\mu = 0.6$ ，由式（13）得：

$$\frac{S_{Hmax} - P_p}{S_{hmin} - P_p} = (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2 = 3.1 \tag{15}$$

式（15）可改写为：

$$S_{Hmax} = 3S_{hmin} - 2P_p + 0.1(S_{hmin} - P_p) \tag{16}$$

由于式（16）最后一项 $(0.1(S_{hmin} - P_p))$ 非常小，式（16）和式（10）几乎相等。

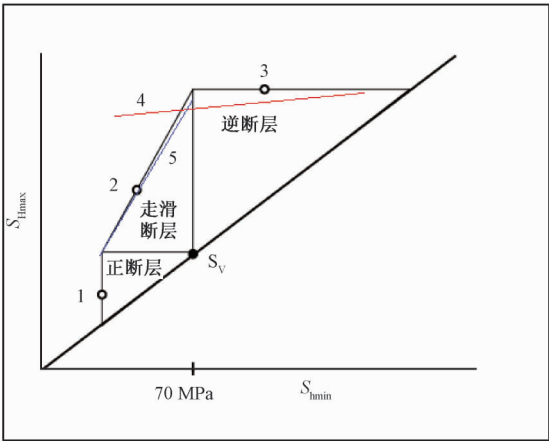


图 2 应力四边形

Fig. 2 Stress polygon

因此，根据式（9）所做的直线，在应力四边形中是一条接近于 2 号线的斜线（见图 2 中 5 号线）^[7]。

类似地，在应力四边形中，根据式（7）所做的直线是一条接近水平的直线（见图 2 中 4 号线）^[7]。

2 分析流程

从前文可看出，水平最大地应力计算涉及到水平最小地应力、孔隙压力、垂直应力、岩石单轴抗压强度和钻井液液柱压差等。在此基础上，结合石油工程中的实际资料，编制了具有可操作性的水平最大地应力计算分析流程（见图 3）。

①分析成像测井资料，识别井壁破坏信息：分析井壁成像，确定井壁破坏（井壁崩落和诱导裂缝）的深度、方位和崩落宽度等。常用的成像技术有 2 种，一种是超声波成像技术，根据声波脉冲到达井壁的时间（已知井内流体的波速），确定井壁详细的剖面形状，从而分析井壁崩落和诱导裂缝；另一种是电成像测井技术，该仪器工作时，推靠器将极板推向井壁，使安装在极板上的多排钮扣电极与井壁接触，电极向井壁发射电流，能够获得接触电阻，由于电极与井壁直接接触，因此，这类仪器能够建立精度较高的井壁光滑度的图像，从而能准确地反映层理面、裂缝以及钻井诱导的井壁拉伸裂缝等。对于井壁崩落区域，井壁和极板接触差，成像模糊。另外，在任何深度上井壁崩落或诱导裂缝都是成对出现，且崩落的平均方位差为 90°，这是识别井壁破坏的重要依据。

②分析常规测井资料，获得地层孔隙压力剖面，确定井壁破坏点孔隙压力：通过处理声波、密度、电阻率与自然伽马等测井数据，根据泥岩地层欠压实理论，采用伊顿法、比值法和等深度等方法进行孔隙压力的检测，获得孔隙压力剖面；再根据地层孔隙压力实测数据进行校验和修正，建立准确的地层孔隙压力剖面。根据井壁破坏的深度确定该点的地层孔隙压力值。

③分析常规测井资料，获得岩石力学参数剖面，确定破坏点深度岩石力学参数：确定岩石力学参数的最直接的方法是做岩心试验，但是，在成像测井识别的井壁崩落和诱导裂缝中

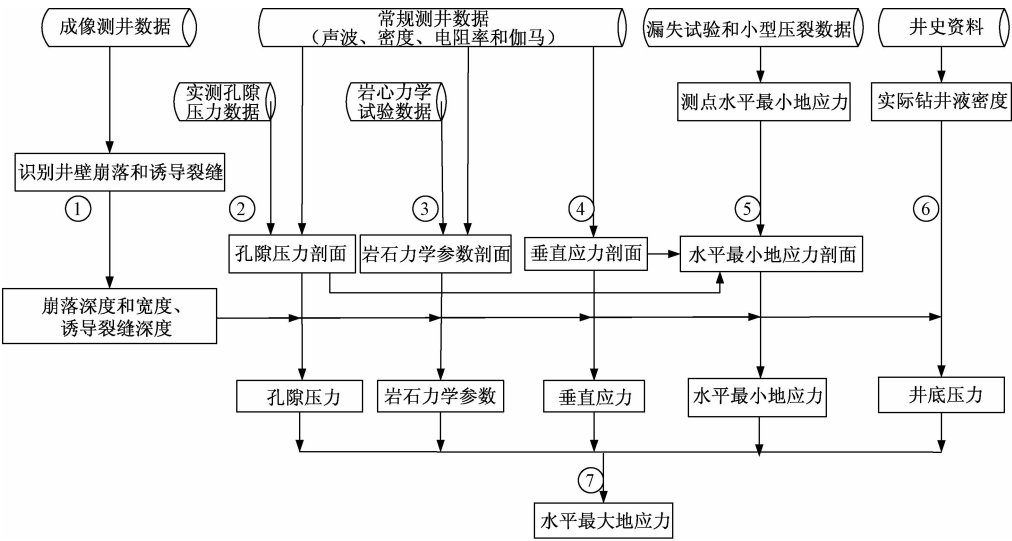


图3 水平最大地应力分析流程图

Fig. 3 Analysis procedure chart for horizontal maximum principal stress

的深度，常常没有取心。为此，需要建立地球物理测井参数与岩石力学之间的关系，形成岩石力学参数剖面，进而用岩心强度实验数据进行校核。根据岩石力学参数剖面，可以确定发生井壁崩落处的岩石力学参数。

另外，基本所有岩石的抗拉强度都很低，如果岩石中已存在裂痕，抗拉强度几乎为零。

④建立垂直应力剖面，确定破坏点深度垂直应力：通过对密度测井数据做积分处理，获得垂直应力剖面。

⑤分析地破试验资料，建立水平最小地应力剖面，确定破坏点深度水平最小地应力：若干形式的水力压裂试验，是目前直接测量水平最小地应力的有效方法。首先，通过水力压裂试验确定试验深度点水平最小地应力。其次，根据试验点的水平最小地应力实测值、孔隙压力和上覆岩层压力的相应值，计算该点的有效应力比：

$$K_i = (S'_3 - P'_p) / (S'_v - P'_p) \tag{17}$$

由于有效应力比在深度剖面上相对恒定^[7]，因此，结合地层孔隙压力剖面和上覆岩层压力剖面，可建立水平最小地应力剖面：

$$S_3 = K_i (S_v - P_p) + P_p \tag{18}$$

最后，根据水平最小地应力剖面，确定井壁破坏处的水平最小地应力。

⑥查阅井史资料，获得实钻钻井液密度，确定井壁破坏点的井底压力。

⑦分析水平最大地应力，根据已获得的各参数，在应力四边形中分析井壁破坏点水平最大地应力数值。

3 应用实例

本文以塔里木油田 X 井作为实例，通过对 X 井的 FMI 成像测井分析，识别出在 6463.5 m 深度，发生钻井诱导裂缝，在 6531.5 m 深度，发生井壁崩落，崩落宽度为 45°（见图 4）。

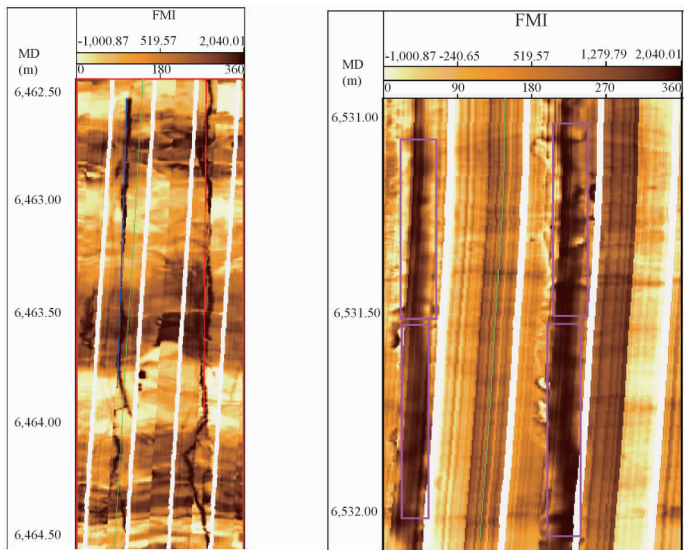


图 4 X 井 FMI 成像

Fig. 4 FMI imaging of Well X

对 X 井声波、密度和电阻率曲线做正常趋势分析，并结合实测孔隙压力，得到 X 井的地层孔隙压力剖面（见图 5）。由此确定 6463.5 m 和 6531.5 m 深度的孔隙压力取值分别为 1.77 SG 和 1.78 SG（见表 1）。值得说明的是，钻井工程中常用比重描述与压力、应力和密度相关的物理量。将压力或应力除以相应的深度和重力加速度，换算成当量密度，而比重则为当量密度与水密度的比值。

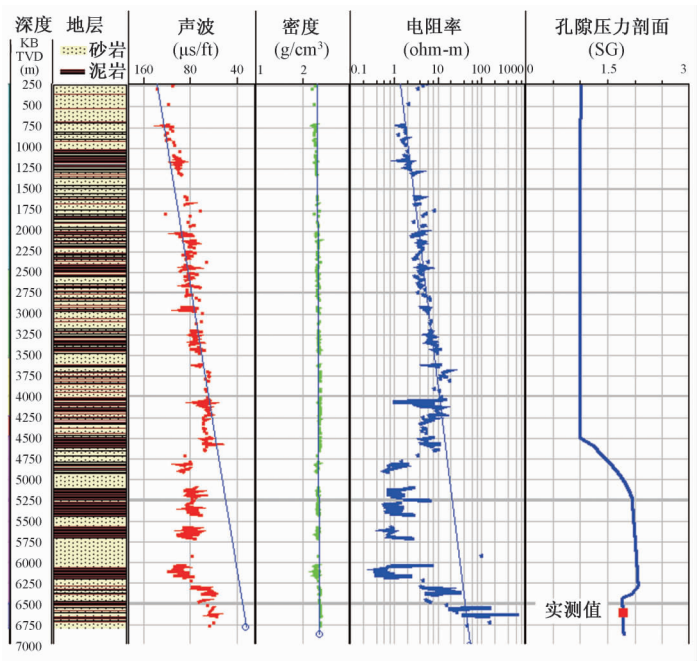


图 5 X 井孔隙压力剖面

Fig. 5 Pore pressure profile of Well X

表 1 X 井 6463.5 m 及 6531.5 m 深度数据

Table 1 Data of 6463.5 m and 6531.5 m depths for the Well X

深度/m	输入数据					输出数据
	孔隙压力/ SG	岩石单轴抗 压强度/MPa	垂直应力/ SG	水平最小地 应力/SG	液柱压力/ SG	水平最大地 应力/SG
6463.5	1.77		2.43	2.14	1.99	2.644 ~ 2.910
6531.5	1.78	50 ~ 60	2.44	2.15	1.92	2.605 ~ 2.729

根据测井资料分析，并结合岩心试验结果，得到岩石单轴抗压强度剖面（见图 6），由此确定 6531.5 m 深度的岩石力学参数为 55 MPa，为了降低测井曲线带来的计算误差，该点岩石强度取 50 ~ 60 MPa 的范围（见表 1）。

对 X 井密度测井资料进行分析，得到该井的垂直应力剖面（见图 7）。由此确定 6463.5 m 和 6531.5 m 深度的垂直应力取值分别为 2.43 SG 和 2.44 SG（见表 1）。

水平最小地应力主要由地破试验来约束。X 井在 6498.92 m TVD 进行了地破试验，通过对该地破实验的泵压和泵入量曲线进行详细分析和解释之后，确定井漏压力为 13.5 MPa，相当于 2.15 SG 当量钻井液密度。结合地层孔隙压力剖面和垂直应力剖面，得到水平最小地应力剖面（见图 8）。由此确定 6463.5 m 和 6531.5m 深度的水平最小地应力取值分别为 2.14 SG 和 2.15 SG（见表 1）。

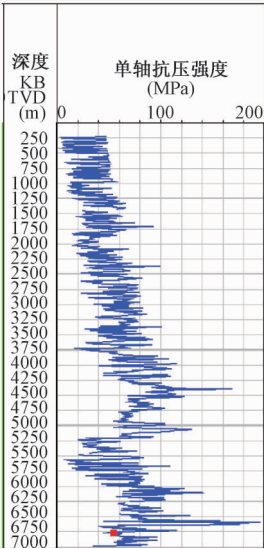


图 6 X 井单轴抗压强度
Fig. 6 Uniaxial compressional strength profile of Well X

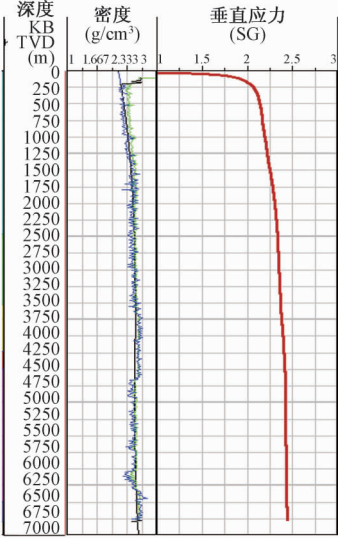


图 7 X 井垂直应力
Fig. 7 Overburden stress profile of Well X

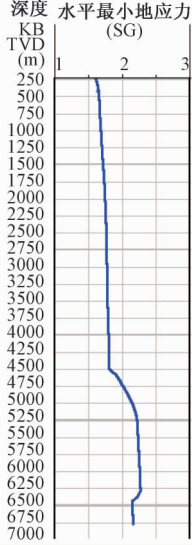


图 8 X 井水平最小地应力
Fig. 8 Horizontal minimum principal stress profile of Well X

查阅井史资料，在 6463.5 m 深度，最大钻井液密度为 1.99 SG，在 6531.5 m 深度，钻井液密度为 1.92 SG。

在 6463.5 m 深度发生了钻井诱导裂缝，在应力四边形（见图 9）中，蓝色斜线表示岩石抗拉强度为零，斜线上方表示能够产生钻井诱导裂缝的所有应力。由于水平最小地应力取值为 2.14 SG，因此，水平最大地应力取值范围为 2.644 ~ 2.910 SG（见表 1），其上限由断层摩擦理论确定。在 6531.5 m 深发生井壁崩落，在应力四边形（见图 10）中，红色斜线表

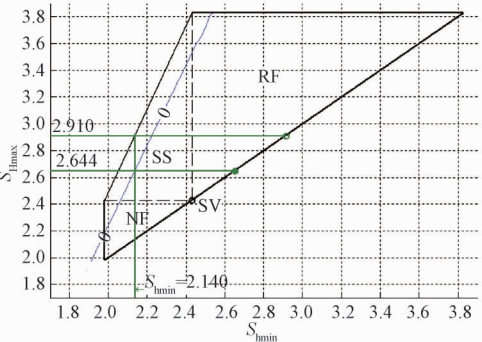


图 9 由钻井诱导裂缝计算水平最大地应力
Fig. 9 Determination of horizontal maximum principal stress from drilling induced fracture

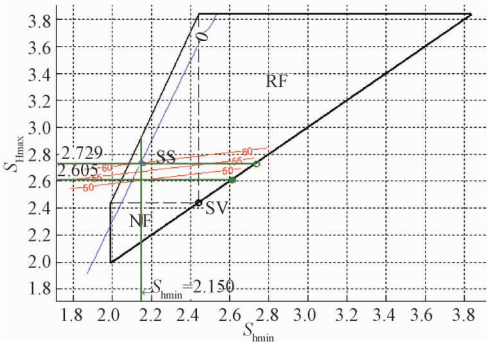


图 10 由井壁崩落宽度计算水平最大地应力
Fig. 10 Determination of horizontal maximum principal stress from wellbore breakout

示岩石单轴抗压强度的范围，由于水平最小地应力取值为 2.15 SG，水平最大地应力取值为 2.605 ~ 2.729 SG（见表 1）。

4 结论

应用井壁破坏信息分析水平最大地应力的方法理论依据扎实可靠，分析流程清晰明确，操作过程简便易行。实例分析表明，该方法可应用于深层水平最大地应力分析，应用范围广泛。

水平最大地应力计算精度与水平最小地应力、孔隙压力、垂直应力、岩石单轴抗压强度等有关，通过不断提高这些参数的计算精度，能够不断提高水平最大地应力的计算精度。

致谢 本文实例分析中应用了美国贝克休斯公司的 GMI 软件，在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] 葛洪魁, 林英松, 王顺昌. 水力压裂地应力测量有关技术问题的讨论 [J]. 石油钻采工艺, 1998, 20 (6): 53 ~ 56, 62.
GE Hong-kui, LIN Ying-song, WANG Shun-chang. Discussion on technical problems related to measurement of earth stress through hydraulic fracturing [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 20 (6): 53 ~ 56, 62.

[2] 侯明勋, 葛修润, 王水林. 水力压裂法地应力策略中的几个问题 [J]. 岩土力学, 2003, 24 (5): 840 ~ 844.
HOU Ming-xun, GE Xiu-run, WANG Shui-lin. Discussion on application of hydraulic fracturing method to geostress measurement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24 (5): 840 ~ 844.

[3] 黄荣樽, 邓金根, 王康平. 利用测井资料计算三个地层压力剖面 [C] //中国石油学会测井专业委员会. 测井在石油工程中的应用论文集. 北京: 石油工业出版社, 1996: 43 ~ 44.
HUANG Rong-zun, DENG Jin-gen, WANG Kang-ping. Three Formation Pressure Profile determined by log information [C] //Petroleum Well Logging Commission of Chinese Petroleum Society. Proceedings of application of logging in petroleum engineering. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 43 ~ 44.

[4] Zoback M D, Moos D, Mastin L. Wellbore breakouts and in situ stress [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90 (B7): 5523 ~ 5530.

[5] Barton C A, Zoback M D, Burns K L. In-situ stress orientation and magnitude at the Fenton geothermal site, New Mexico, determined from wellbore breakouts [J]. Geophysical Research Letters, 1988, 15 (5): 467 ~ 470.

- [6] Zoback M D, Barton C B, Brudy M, et al. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40: 1049 ~ 1076.
- [7] Zoback M D. 储层地质力学 [M]. 石林, 陈朝伟, 刘玉石, 译. 北京: 石油工业出版社, 2011: 90 ~ 95, 118 ~ 121, 151 ~ 158.
Zoback M D. Reservoir geomechanics [M]. SHI Lin, CHEN Zhao-wei, LIU Yu-shi, Translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 90 ~ 95, 118 ~ 121, 151 ~ 158.
- [8] Zoback M D, Mastin L, Barton C. In situ stress measurements in deep boreholes using hydraulic fracturing, wellbore breakouts and Stonely wave polarization [C] //ISRM International Symposium. Stockholm: International Society for Rock Mechanics, 1987.
- [9] Moos D, Zoback M D. Utilization of observations of well bore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stresses: Application to Continental Deep Sea Drilling Project and Ocean Drilling Program boreholes [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95: 9305 ~ 9325.
- [10] Zoback M L, Zoback M D, Adams J, et al. Global patterns of tectonic stress [J]. Nature, 1989, 341: 291 ~ 298.
- [11] Zoback M L, Zoback M D. State of stress in the conterminous United States [J]. Journal of Geophysical Research, 1980, 85: 6113 ~ 6156.
- [12] Zoback M L, Zoback M D. Tectonic stress field of the conterminous United States [J]. GSA Memoir, 1989, 172: 523 ~ 539.
- [13] Jaeger J C, Cook N G W. Fundamentals of rock mechanics [M]. 2nd Edition. New York: Chapman and Hall, 1979.

ANALYTICAL TECHNIQUE OF HORIZONTAL MAXIMUM PRINCIPAL STRESS FOR PETROLEUM ENGINEERING

CHEN Zhao-wei¹, YANG Xiang-tong², WANG Gang¹, YUAN Xue-fang²,
LIU Jun-yan², ZHOU Peng-yao², BA Dan²

(1. Drilling Research Institute, CNPC, Beijing 100195, China;

2. Tarim Oilfield Company, CNPC, Kurlu 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Fundamental principles on determination of horizontal maximum principal stress from wellbore damage information were summarized systematically. On the basis, analysis procedure for horizontal maximum principal stress was established. A field example was analyzed, and the procedure showed that the method had a reliable theoretical evidence, clear analysis procedure, and simple operation. The promotion of its application to petroleum industry in China is recommended.

Key words: in-situ stress; horizontal maximum principal stress; wellbore imaging; petroleum engineering; analysis procedure