

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM XXXX—XXXX

油气储层裂缝地质力学定量预测技术规范

Technical specification for geomechanical quantitative prediction of fractures in oil
and gas reservoirs

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发布

目 次

前言 III

1 范围 4

2 规范性引用文件 4

3 术语和定义 4

4 单井裂缝识别与综合表征 4

 4.1 岩心裂缝识别与表征 4

 4.2 成像测井裂缝识别与表征 5

 4.3 微观裂缝表征 5

 4.4 裂缝期次划分 5

5 岩石力学参数 6

 5.1 岩石力学实验方案设计 6

 5.2 岩石力学实验结果分析 6

 5.3 单井岩石力学参数表征 6

 5.4 三维岩石力学参数反演 7

6 古构造应力场数值模拟 7

 6.1 不同时期地质模型构建 7

 6.2 不同时期力学模型构建 7

 6.3 不同时期数学模型构建 7

 6.4 古构造应力场模拟结果可靠性分析 7

7 现今应力场数值模拟 7

 7.1 井点现今地应力大小和方向的确定 7

 7.2 现今地质模型构建 8

 7.3 现今力学模型构建 9

 7.4 现今数学模型构建 9

 7.5 现今应力场模拟结果可靠性分析 9

8 储层裂缝三维分布预测 9

 8.1 储层裂缝参数计算模型 9

 8.2 储层裂缝三维分布规律 11

 8.3 储层裂缝预测结果对比验证 12

 8.4 裂缝三维分布规律图 12

附录 A（资料性） 岩心裂缝观察统计表 13

附录 B（资料性） 单井裂缝发育综合柱状图 14

附录 C（资料性） 岩石力学实验设计表 15

附录 D（资料性） 现今应力场实测与模拟结果对比 16

附录 E（资料性） 储层裂缝发育参数实测与模拟结果对比表 17

附录 F（资料性） 储层裂缝三维分布规律图	18
-----------------------------	----

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟标准工作委员会归口。

本文件起草单位：中国地质大学（武汉）、中国石油天然气股份有限公司冀东油田分公司、中国矿业大学、成都理工大学、中国石油大学（华东）、中国科学院武汉岩土力学研究所、中国石油集团川庆钻探工程有限公司。

本文件主要起草人：刘敬寿，沈传波，李聪，施宁，蒋恕，孟祥瑞，鞠玮，何建华，邹娟，王淼，商琳，田博涵，马存飞，杨亚东，葛翔，罗洋，刘贺娟，钱超，李珍赟，时贤，李海东，高永亮，冒海军，李彦泽，鲁远红，马立民，李子颐，王祥，冯靓，赵健凯，段彬，吴海涛，缪聪，唐志潭。

本文件为首次发布。

油气储层裂缝地质力学定量预测技术规范

1 范围

本文件规定了油气储层裂缝地质力学定量预测的单井裂缝识别与综合表征、岩石力学参数评价、古构造应力场数值模拟、现今应力场数值模拟和裂缝三维分布预测等。

本文件适用于油气储层勘探开发阶段，油气区块构造裂缝地质力学定量预测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 23561（所有部分）煤和岩石物理力学性质测定方法

GB/T 33685 地震勘探数据处理技术规程

NB/T 10842 页岩地应力方向测定方法 粘滞剩磁—波速各向异性法

SY/T 6451 探井测井资料处理与解释规范

SY/T 7617 海相页岩地质力学评价规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

岩石力学参数 rock mechanics parameters

定量描述岩石在构造应力场作用下力学行为的指标。

3.2

古构造应力场 tectonic stress field

构造活动时期作用在地壳某一地区并控制构造变形和构造单元演化的应力总和。

4 单井裂缝识别与综合表征

4.1 岩心裂缝识别与表征

4.1.1 裂缝识别准备

识别岩心裂缝前，应将岩心按深度顺序摆好，明确井斜角和井斜方位角。

4.1.2 裂缝识别

岩心张裂缝应具有裂缝面粗糙不平，矿脉厚度变化大，绕过砾石和结核发育的特点；岩心剪裂缝应具有裂缝面平滑，矿脉厚度均匀，切穿砾石和结核发育的特点。

4.1.3 岩心裂缝参数的记录

识别岩心裂缝时应统计裂缝深度、岩性、产状、缝长、缝高、开度、力学性质、充填性、擦痕/阶步等参数，并将裂缝参数填入记录表内，见附件A。

4.1.4 岩心裂缝表征

识别的岩心裂缝应进行数据分析，表征裂缝的产状、充填性、力学性质和发育程度，绘制单井裂缝发育综合柱状图，见附件B。

4.2 成像测井裂缝识别与表征

4.2.1 未充填裂缝识别

未充填裂缝在成像测井图像上应表现为暗色或黑色的正弦条纹曲线，连续性好。

4.2.2 充填裂缝识别

充填裂缝在成像测井图像上应表现为亮黄色或白色的正弦条纹曲线。

4.2.3 溶蚀裂缝识别

裂缝发生溶蚀时，在成像测井图像上应表现为沿正弦条纹曲线分布不规则暗色斑点。

4.2.4 裂缝产状的计算

裂缝倾向应为成像测井图像正弦曲线波谷对应的方位角；裂缝倾角应按公式（1）计算：

$$\alpha = \arctan(H/D) \dots \dots \dots (1)$$

式中：

α ——裂缝倾角，单位为度(°)；

H ——正弦曲线振幅，单位为毫米(mm)；

D ——井径，单位为毫米(mm)。

4.2.5 裂缝开度的计算

裂缝开度应按公式（2）计算：

$$W = a * A * R_{XO}^b * R_M^{(1-b)} \dots \dots \dots (2)$$

式中：

W ——裂缝开度，单位为米(m)；

A ——由裂缝造成的电导异常面积；

R_{XO} ——地层电导率，单位为欧姆·米($\Omega \cdot m$)；

R_M ——泥浆电阻率，单位为欧姆·米($\Omega \cdot m$)；

a 、 b ——与仪器有关的常数。

4.2.6 成像测井裂缝表征

识别的成像裂缝应进行数据分析，表征裂缝产状、充填性、裂缝密度和裂缝开度。

4.3 微观裂缝表征

4.3.1 薄片裂缝识别

薄片中的张裂缝应呈不规则锯齿状或阶梯状边缘，不切割矿物颗粒，充填物晶粒方向杂乱；薄片中的剪裂缝应呈平直边缘，可切穿矿物颗粒，充填矿物定向排列。薄片裂缝识别应记录充填矿物类型。

4.3.2 CT 岩心扫描裂缝识别

CT 岩心扫描图像中黑色区域应为低密度岩石或有裂缝分布区域，灰色及亮白色区域应为岩石骨架。

4.4 裂缝期次划分

4.4.1 根据裂缝交切关系划分

两组相交裂缝中，裂缝被切割时，应为早期裂缝，裂缝被限制时，应为晚期裂缝，裂缝相互切割时，应为同期共轭裂缝。

4.4.2 根据充填物同位素年龄划分

裂缝充填物应记录同位素年龄，每个同位素年龄应代表一期构造运动对应的裂缝形成期次。

4.4.3 根据声发射实验划分

声发射实验应识别声发射计数率突增点，每个突增点应代表一期构造运动对应的裂缝形成期次。

4.4.4 根据流体包裹体实验划分

流体包裹体应分析记录均一温度，每个均一温度峰值应代表一期构造运动对应的裂缝形成期次。

5 岩石力学参数

5.1 岩石力学实验方案设计

岩石力学实验应还原岩石地下原位的赋存条件，明确岩石力学实验时应施加的围压大小，岩石力学实验方案设计中应包括岩石弹性力学参数和岩石强度力学参数实验设计，同时进行岩石应力测试，实验类型及参数见附件C。

5.2 岩石力学实验结果分析

岩石力学实验结果应符合不同岩性岩石力学参数的常规区间，不符合分布区间的实验数值应剔除。

5.3 单井岩石力学参数表征

5.3.1 动态岩石力学参数的计算

动态岩石力学参数应按下列公式计算：

a) 单井动态杨氏模量按公式（3）计算：

$$E_d = 10^{-3} \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \dots\dots\dots (3)$$

b) 单井动态泊松比按公式（4）计算

$$\mu_d = \frac{V_p^2 - V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \dots\dots\dots (4)$$

c) 单井动态内摩擦角按公式（5）计算

$$\varphi = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\pi}{12} \left[2 \left(1 - \frac{\mu_d}{1 - \mu_d} \right) + 1 \right] \dots\dots\dots (5)$$

式中：

E_d ——动态杨氏模量，单位为吉帕(GPa)；

ρ ——岩石密度，单位为克/立方厘米 (g/cm³)；

V_p ——纵波速度，单位为米/秒(m/s)；

V_s ——横波速度，单位为米/秒(m/s)；

μ_d ——动态泊松比，无量纲；

φ ——动态内摩擦角，单位为度(°)。

5.3.2 动静态岩石力学参数转换

对于单井计算的岩石力学参数，应明确岩石力学实验测定样品深度，计算测井中对应的动态岩石力学参数，结合岩石力学实验测定的静态参数拟合动静参数转换模型，将动态岩石力学参数转换至不同岩性岩石的真实力学参数区间。

5.4 三维岩石力学参数反演

5.4.1 叠前地震反演三维岩石力学参数

基于叠前地震反演三维岩石力学参数，应进行叠前地震纵波反演、横波反演和密度反演，应根据反演得到的纵横波和密度反演三维岩石力学参数，再利用井震数据结合进行参数校正，反演得到的三维岩石力学参数应与静态岩石力学参数进行对比，误差不应大于20%。

5.4.2 叠后地震反演三维岩石力学参数

基于叠后地震反演三维岩石力学参数，应利用井震数据结合实现三维地震纵波阻抗反演，应根据反演得到的纵波阻抗进行三维岩石力学参数的反演，反演得到的三维岩石力学参数应与静态岩石力学参数进行对比，误差不应大于20%。

6 古构造应力场数值模拟

6.1 不同时期地质模型构建

不同时期地质模型构建应明确关键构造运动期次，收集不同构造运动期次的古地貌图和断层演化图，将地貌图和断层演化图数字化成三维点云进行不同时期地质模型构建。

6.2 不同时期力学模型构建

不同时期力学模型应进行三维岩石力学参数反演，反演过程见本文件5.4三维岩石力学参数反演，三维岩石力学参数应包含密度、杨氏模量、泊松比、抗张强度、抗压强度、内摩擦角和内聚力，不同时期力学模型的构建应明确岩石力学参数的演化规律，恢复不同时期力学模型的岩石力学参数。

6.3 不同时期数学模型构建

不同时期数学模型的构建应明确构造运动的应力特征，明确古构造应力的方向和大小，确定模型施加的边界条件，模型有限元网格划分时，网格尺寸应满足模拟精度要求，并加密断层周围的网格。

6.4 古构造应力场模拟结果可靠性分析

古构造应力场模拟结果应根据岩石声发射实验结果进行验证，误差不应大于20%，模拟结果的应力状态应符合构造运动时期的应力状态，若模拟结果误差大于20%时，应调整边界条件至符合误差范围；古构造应力场断层附近应呈高地应力，构造低部位地应力变高。

7 现今应力场数值模拟

7.1 井点现今地应力大小和方向的确定

7.1.1 井点现今地应力大小计算

井点现今地应力应按下列公式计算：

a) 对于岩石声发射实验数据，井点现今地应力应按下列公式计算：

$$\sigma_h = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sqrt{1 + \tan^2 2\alpha} \quad (6)$$

$$\sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sqrt{1 + \tan^2 2\alpha} \quad (7)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (8)$$

$$\sigma_V = \sigma_\perp \quad (9)$$

式中：

σ_H ——现今水平最大主应力，单位为兆帕(MPa)；

σ_h ——现今水平最小主应力，单位为兆帕(MPa)；

σ_V ——现今垂向主应力，单位为兆帕(MPa)；

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——声发射水平样品测得的三个应力值，单位为兆帕(MPa)。

b) 对于声波测井数据，井点现今地应力宜采用组合弹簧模型，按下列公式计算：

$$\sigma_v = \int_0^z \rho g dz \quad (10)$$

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E\xi_h}{1-\mu^2} + \frac{E\xi_H}{1-\mu^2} + \alpha P_p \quad (11)$$

$$\sigma_H = \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E\xi_H}{1-\mu^2} + \frac{E\xi_h}{1-\mu^2} + \alpha P_p \quad (12)$$

式中：

σ_v ——垂向主应力，单位为兆帕(MPa)；

Z ——深度，单位为米(m)；

ρ ——岩石密度，由密度测井曲线获取，单位为克/立方厘米(g/cm³)

g ——重力加速度，取值 9.8m/s²；

σ_h ——水平最小主应力，单位为兆帕(MPa)；

σ_H ——水平最大主应力，单位为兆帕(MPa)；

P_p ——孔隙压力，单位为兆帕(MPa)；

μ ——泊松比，无量纲；

E ——杨氏模量，单位为吉帕(GPa)；

α ——Biot 系数，无量纲；

ξ_h, ξ_H ——最小、最大主应力方向的应变变量，无量纲。

c) 对于水力压裂数据，井点现今地应力应按下列公式计算：

$$\sigma_h = P_{ISI} + P_w \quad (13)$$

$$\sigma_H = 3\sigma_h - P_r - P_0 \quad (14)$$

式中：

σ_h ——水平最小主应力，单位为兆帕(MPa)

P_{ISI} ——瞬时停泵压力，单位为兆帕(MPa)

P_w ——井口净水柱压力，单位为兆帕(MPa)

σ_H ——水平最大主应力，单位为兆帕(MPa)

P_r ——裂缝重张压力，单位为兆帕(MPa)

P_0 ——地层孔隙压力，单位为兆帕(MPa)

7.1.2 井点现今地应力方向的确定

井点现今地应力方向应按下列规定确定：

a) 对于成像测井资料，现今地应力方向宜根据呈近180° 对称分布的井壁崩落或钻井诱导缝确定，其中井壁崩落方位应为现今水平最小主应力的方向，钻井诱导缝平均走向为现今水平最大主应力的方向。

b) 对于声波测井资料，现今地应力方向应根据快慢横波方位确定，其中快横波方位指示现今水平最大主应力方向。

c) 对于微地震资料，现今地应力方向应根据微地震监测到的微裂缝走向确定，微裂缝走向应指示现今水平最大主应力的方向。

7.2 现今地质模型构建

对于地震解释得到的构造层位数据和断层数据，应进行精细构造解析，明确层位和断层的合理性，构建速度场模型，将构造层面和断层转换至深度域模型，对于地貌图和断层分布图，应将图件数字化为三维点云，利用点云进行现今地质模型构建。

7.3 现今力学模型构建

现今力学模型应进行三维岩石力学参数反演，反演过程见本文件5.4三维岩石力学参数反演，三维岩石力学参数应包含密度、杨氏模量、泊松比、抗张强度、抗压强度、内摩擦角和内聚力。

7.4 现今数学模型构建

现今数学模型应在获取现今地应力大小和方向的基础上，进行模型边界条件的设置，模型有限元网格划分时，网格尺寸应满足模拟精度要求，并加密断层周围的网格。

7.5 现今应力场模拟结果可靠性分析

7.5.1 现今应力场大小的分析

现今应力场模拟结果应根据井点地应力大小进行验证，误差不应大于15%，模拟结果误差大于15%时，应调整边界条件至符合误差范围，同时断层附近应呈现应力低值，构造低部位应呈现应力高值，模拟结果和实测结果应进行记录，见附件D。

7.5.2 现今应力场方向的分析

现今地应力方向在断层附近应出现偏转角度时，应根据断层填充物类型差异确定，断层为硬质材料充填时，断层附近应力方向应趋于垂直断层，断层为软质材料充填时，断层附近应力方向应趋于平行断层。

8 储层裂缝三维分布预测

8.1 储层裂缝参数计算模型

8.1.1 裂缝产状的计算模型

裂缝产状计算模型应符合下列规定：

a) 裂缝产状应借助裂缝面法向量确定在平面上的倾向和倾角，以岩石剪切破裂为例，在应力场坐标系中产生的两组裂缝面的单位法向量可用公式（15）表示：

$$\begin{bmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ 0 \\ \cos \theta \end{bmatrix} \text{ 或 } \begin{bmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ 0 \\ -\cos \theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

n'_x 、 n'_y 、 n'_z ——裂缝面单位法向量在大地坐标系中X、Y、Z坐标轴的分量，无量纲；

θ ——岩石破裂角，单位为度(°)。

b) 法向量转化为大地坐标系中3个分量 n_x 、 n_y 、 n_z 可用公式（16）表示：

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{11} & \cos \alpha_{21} & \cos \alpha_{31} \\ \cos \alpha_{12} & \cos \alpha_{22} & \cos \alpha_{32} \\ \cos \alpha_{13} & \cos \alpha_{23} & \cos \alpha_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

α_{11} 、 α_{12} 、 α_{13} —— σ_1 与X-Y-Z轴的夹角，单位为度(°)；

α_{21} 、 α_{22} 、 α_{23} —— σ_2 与X-Y-Z轴的夹角，单位为度(°)；

α_{31} 、 α_{32} 、 α_{33} —— σ_3 与X-Y-Z轴的夹角，单位为度(°)；

n'_x 、 n'_y 、 n'_z ——裂缝面单位法向量在大地坐标系中X、Y、Z坐标轴的分量，无量纲；

c) 裂缝的倾向应采用公式（17）计算：

$$\eta = \arctan \left(\frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{n_z} \right) \dots\dots\dots (17)$$

式中:

η ——裂缝倾角, 单位为度($^{\circ}$);

n_x, n_y, n_z ——裂缝面的单位法向量在大地坐标系中X、Y、Z坐标轴的分量, 无量纲。

裂缝倾向应分象限, 按下列公式计算:

1) 当 $n_x \geq 0$ 且 $n_y > 0$ 时, 裂缝的倾向为北东向, 此时裂缝的倾向按公式(18)计算:

$$\gamma = \arctan \left(\frac{n_x}{n_y} \right) \dots\dots\dots (18)$$

2) 当 $n_x \leq 0$ 且 $n_y > 0$ 时, 裂缝的倾向为南东向, 此时裂缝的倾向按公式(19)计算:

$$\gamma = \arctan \left(\frac{n_x}{n_y} \right) + \pi \dots\dots\dots (19)$$

3) 当 $n_x < 0$ 且 $n_y \leq 0$ 时, 裂缝的倾向为南西向, 此时裂缝的倾向按公式(20)计算:

$$\gamma = \arctan \left(\frac{n_x}{n_y} \right) + \pi \dots\dots\dots (20)$$

4) 当 $n_x \geq 0$ 且 $n_y < 0$ 时, 裂缝的倾向为北西向, 此时裂缝的倾向按公式(21)计算:

$$\gamma = \arctan \left(\frac{n_x}{n_y} \right) + 2\pi \dots\dots\dots (21)$$

式中:

γ ——裂缝倾向, 单位为度($^{\circ}$);

n_x, n_y ——裂缝面的单位法向量在大地坐标系中X、Y坐标轴的分量。

8.1.2 裂缝密度的计算模型

裂缝密度计算模型应符合下列规定:

a) 裂缝密度计算应分析古构造应力场模拟的主应力结果, 按照下列公式计算:

$$D_{vf} = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - \sigma_p^2 + 2\mu(\sigma_2 + \sigma_3)\sigma_p] / (2EJ) \dots\dots\dots (22)$$

$$D_{lf} = \frac{2D_{vf}L_1L_2 \sin \theta \cos \theta - L_1 \sin \theta - L_3 \cos \theta}{L_1^2 \sin^2 \theta + L_3^2 \cos^2 \theta} \dots\dots\dots (23)$$

式中:

D_{vf} ——裂缝体密度, 单位为平方米/立方米(m^2/m^3);

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——最大主应力、中间主应力、最小主应力, 单位为兆帕(MPa);

σ_p ——岩石破裂强度, 单位为兆帕(MPa);

μ ——泊松比, 无量纲

E ——杨氏模量, 单位为吉帕(GPa);

D_{lf} ——裂缝线密度, 单位为条/米(m^{-1});

J ——裂缝表面能, 单位为焦耳/平方米(J/m^2);

L_1 ——最大主应力方向的单元体长度, 单位为米(m);

L_3 ——最小主应力方向的单元体长度, 单位为米(m)。

b) 若存在多期裂缝发育, 应进行裂缝密度的叠加。

8.1.3 裂缝开度的计算模型

裂缝开度计算应分析古构造应力场模拟的主应力和主应变结果, 同时应分析现今应力对裂缝开度的改造作用, 应包括现今应力场的正应力和孔隙压力, 应按下列公式计算。

$$|\varepsilon_0| = \frac{\sigma_p}{E} \quad (24)$$

$$b_0 = \frac{|\varepsilon_3| - |\varepsilon_0|}{D_{lf}} \quad (25)$$

$$b_m = \frac{b_0}{1 + 9(\sigma_n - P)/\sigma_{nref}} \quad (26)$$

式中:

b_0 ——裂缝开度, 单位为米(m);

σ_p ——岩石破裂强度, 单位为兆帕(MPa);

E ——杨氏模量, 单位为吉帕(GPa);

ε_3 ——最小主应变, 无量纲;

D_{lf} ——裂缝线密度, 单位为条/米(m^{-1});

b_m ——裂缝现今开度, 单位为米(m);

σ_n ——裂缝面所受正应力, 单位为兆帕(MPa);

P ——孔隙压力, 单位为兆帕(MPa);

σ_{nref} ——使裂缝开度降低90%的正应力, 与岩性有关的常数, 单位为兆帕(MPa)。

8.1.4 裂缝孔隙度和渗透率的计算模型

裂缝孔隙度和渗透率计算模型应符合下列规定:

a) 裂缝孔隙度和渗透率应为经现今地应力改造之后的结果, 应分析裂缝线密度和裂缝现今开度数据, 裂缝孔隙度应按公式(27)计算:

$$\phi_f = b_m D_{Vf} \quad (27)$$

式中:

ϕ_f ——现今应力改造后的裂缝孔隙度, 用百分数表示;

b_m ——现今地应力改造后的裂缝开度, 单位为米(m);

D_{Vf} ——裂缝体密度, 单位为平方米/立方米(m^2/m^3)。

b) 裂缝渗透率由于三向应力的差异会出现不同, 主值方向 θ_{max} 按照公式(28)计算:

$$\theta_{max} = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^m b_i^3 D_{lfi} n_{xi}}{\sum_{i=1}^m b_i^3 D_{lfi} n_{yi}} \right) \quad (28)$$

c) 渗透率主值大小 K_{max} 按照公式(29)计算:

$$K_{max} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{b_i^3 D_{lfi}}{12} \cdot \frac{(n_{xi} \sin \theta_{max} + n_{yi} \cos \theta_{max})^2 + n_{zi}^2 (n_{xi} \cos \theta_{max} - n_{yi} \sin \theta_{max})^2}{\sqrt{n_{xi}^2 + n_{yi}^2}} \right) \quad (29)$$

式中:

k ——单元体内裂缝的组数, 无量纲;

b_i ——第*i*组裂缝的开度, 单位为米(m);

D_{lfi} ——第*i*组裂缝的线密度, 单位为条/米(m^{-1});

n_{xi} , n_{yi} , n_{zi} ——第*i*组裂缝面的单位法向向量在大地坐标系中X、Y、Z坐标轴的分量, 无量纲。

8.2 储层裂缝三维分布规律

8.2.1 裂缝产状分布规律

裂缝走向宜与不同时期的水平最大主应力方向有关,裂缝倾角宜与断层分布、应力状态和埋深有关。

8.2.2 裂缝密度分布规律

裂缝密度宜与断层分布和构造部位有关,随埋深增大,裂缝密度应呈增大趋势,距断层距离增加,裂缝密度应呈减小趋势。

8.2.3 裂缝开度、孔隙度和渗透率分布规律

裂缝开度宜与断层分布和构造部位有关,随着埋深增大,裂缝开度应呈减小趋势,距断层距离增加,裂缝开度应呈减小趋势,裂缝孔隙度和裂缝渗透率宜具有相似的分布规律。

8.3 储层裂缝预测结果对比验证

8.3.1 岩心裂缝与裂缝预测结果对比验证

岩心裂缝宜与裂缝预测结果进行裂缝密度对比验证,裂缝开度对比验证时,围压变化导致观测的开度为视开度,应进行岩心真实开度校正,结果应进行记录,具体见附件E。

8.3.2 成像测井裂缝与裂缝预测结果对比验证

成像测井裂缝宜与裂预测结果进行裂缝开度和裂缝孔隙度对比验证,裂缝密度对比验证时,斜井应进行裂缝密度校正,结果应进行记录,具体见附件E。

8.3.3 分形法与裂缝预测结果对比验证

分形法宜与裂缝预测结果进行裂缝密度的对比验证,分形维数大应代表裂缝形态复杂,裂缝密度大,裂缝密度发育区的分形维数值宜大于1.25,将结果进行记录,具体见附件E。

8.3.4 曲率法与裂缝预测结果对比验证

曲率法宜与裂缝预测结果进行裂缝孔隙度的对比验证,曲率大应代表褶皱弯曲程度高,裂缝孔隙度更大,裂缝孔隙度发育区的曲率值宜大于 0.11km^{-1} ,将结果进行记录,具体见附件E。

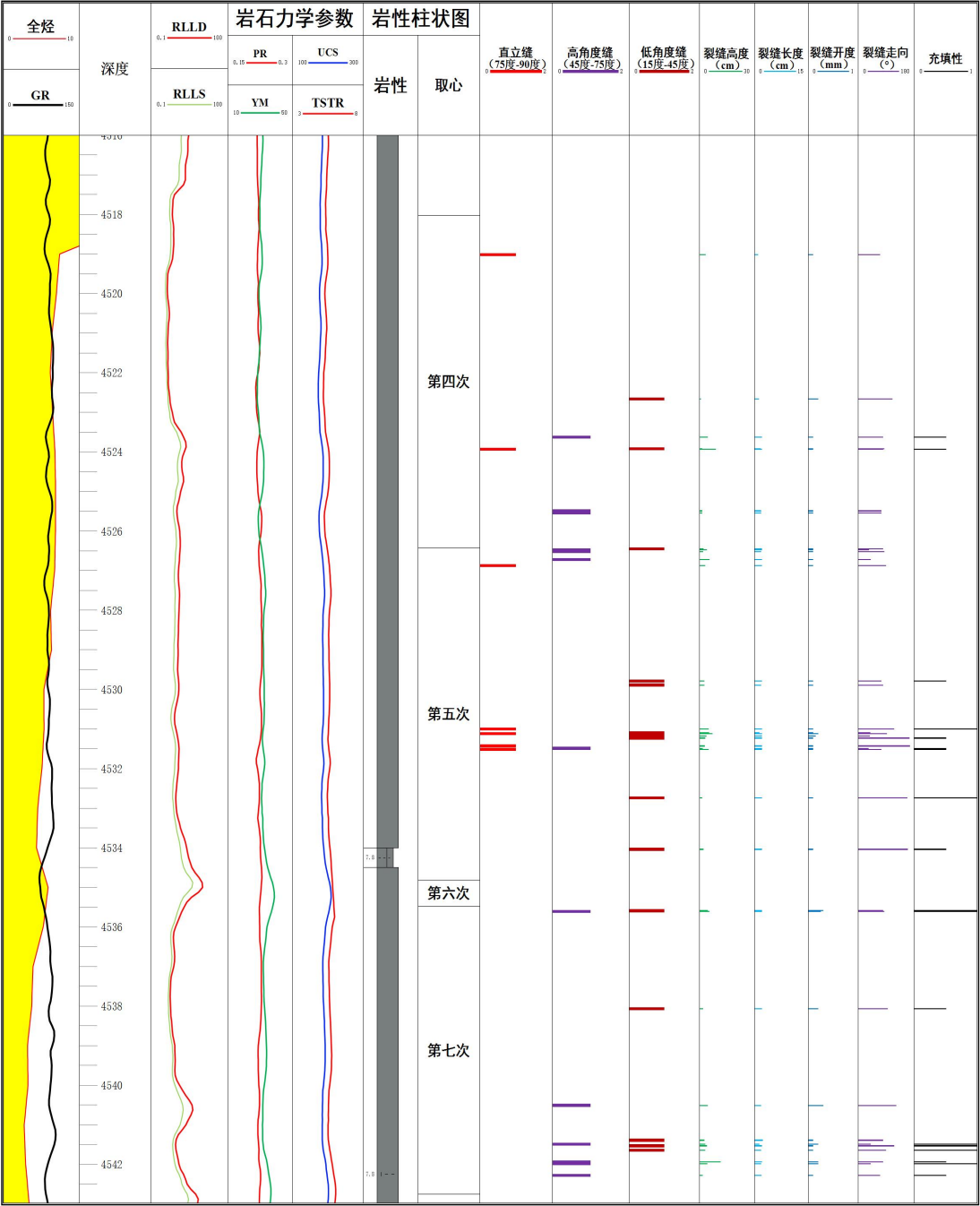
8.4 裂缝三维分布规律图

裂缝三维分布规律图应按裂缝预测结果,总裂缝发育规律绘制,具体见附件F。

附 录 A
(资料性)
岩心裂缝观察统计表

标签 编号	井 号	层 位	筒 次	块 号	深度 (m)	岩 性	产 状	缝长 (cm)	缝高 (cm)	开度 (mm)	力学 性质	充 填 性	擦痕/ 阶步	备 注

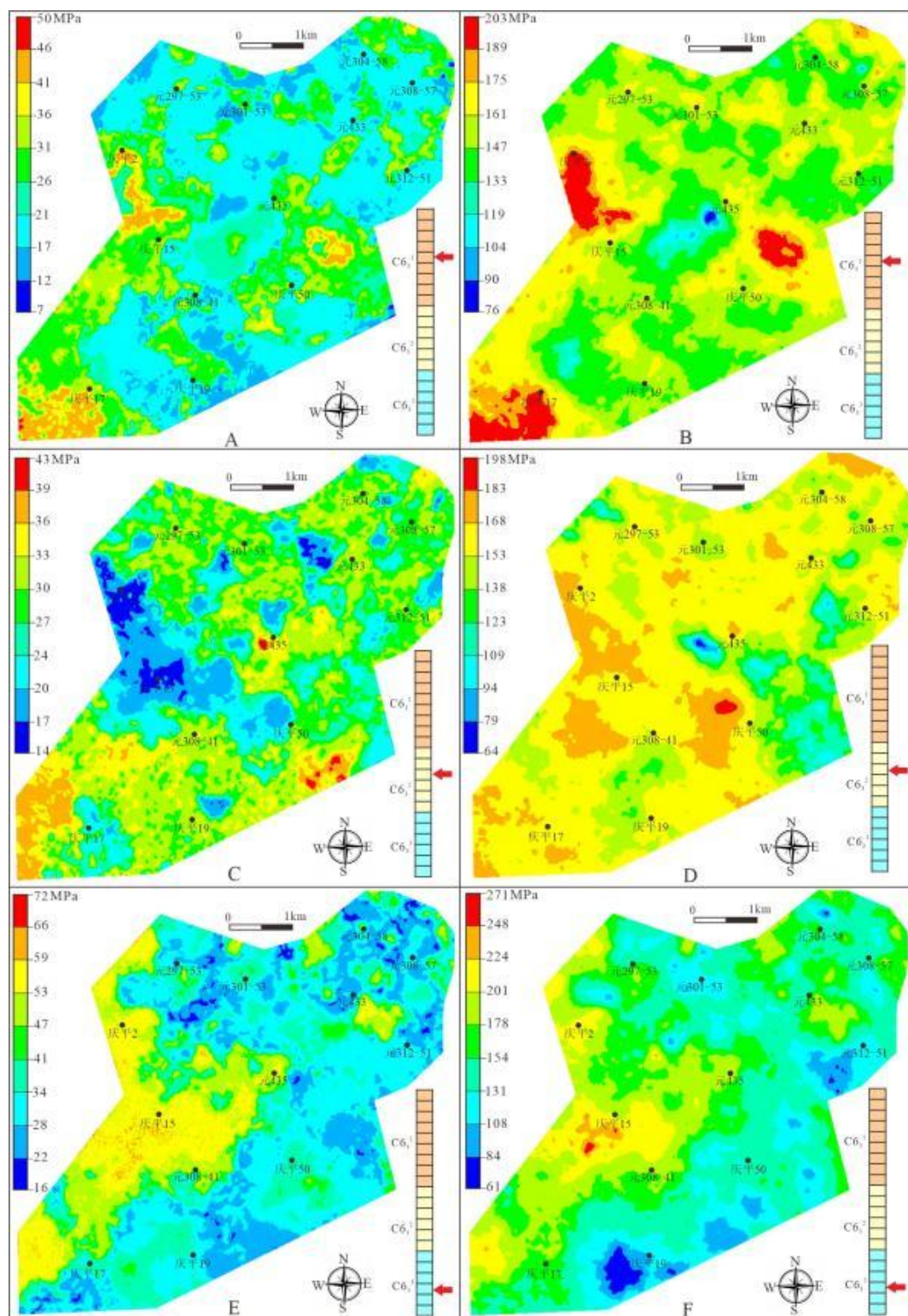
附 录 B
(资料性)
单井裂缝发育综合柱状图



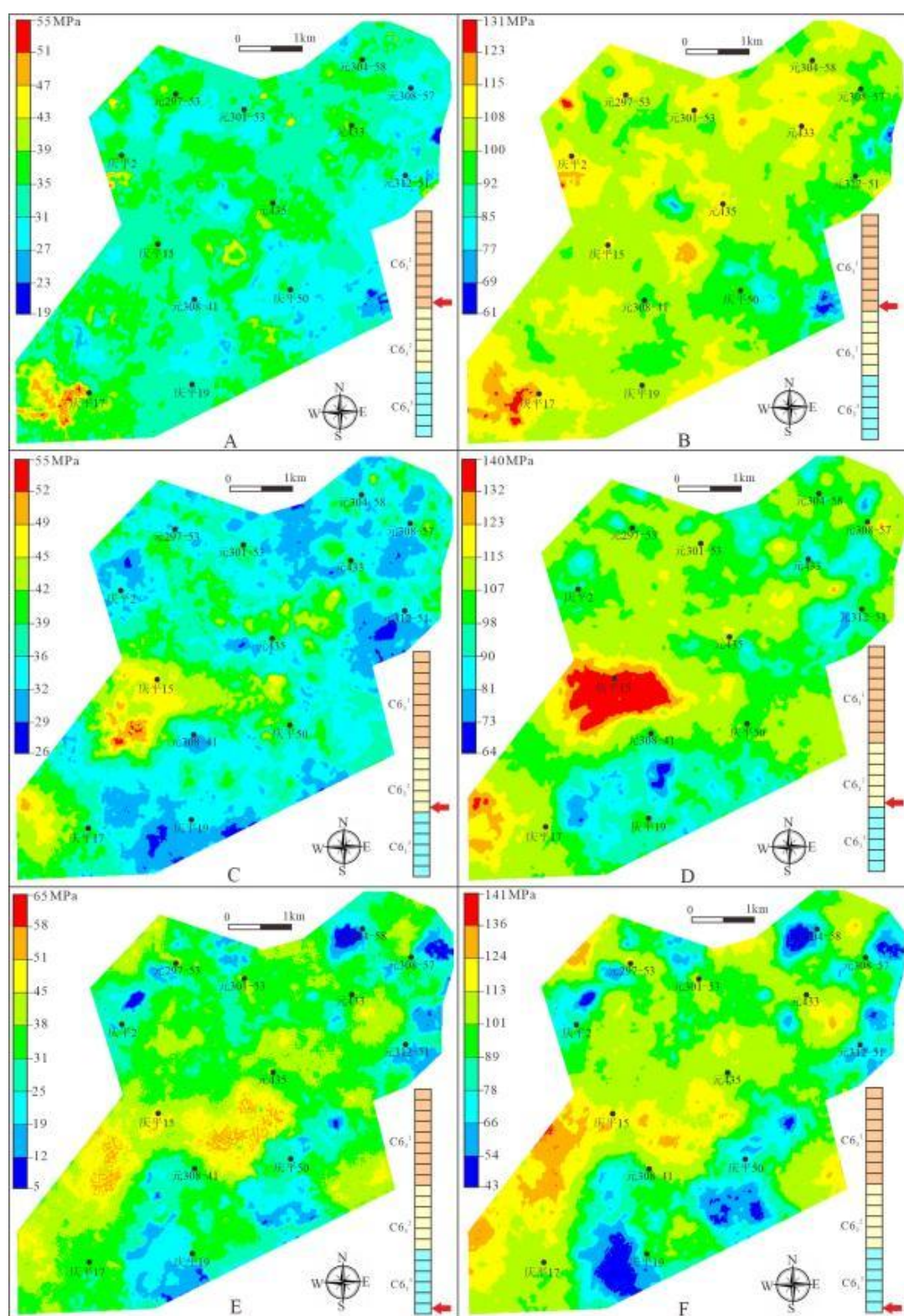
附 录 C
(资料性)
岩石力学实验设计表

实验类型	井号	编号	深度(m)	围压(MPa)	加载速率 (mm/min)
抗压实验					
实验类型	井号	编号	深度(m)	围压(MPa)	加载速率 (mm/min)
抗剪实验					
实验类型	井号	编号	深度(m)	直径(mm)	高度(mm)
巴西劈裂实验					
实验类型	井号	编号	围压(MPa)	深度(m)	加载速率 (mm/min)
声发射实验					

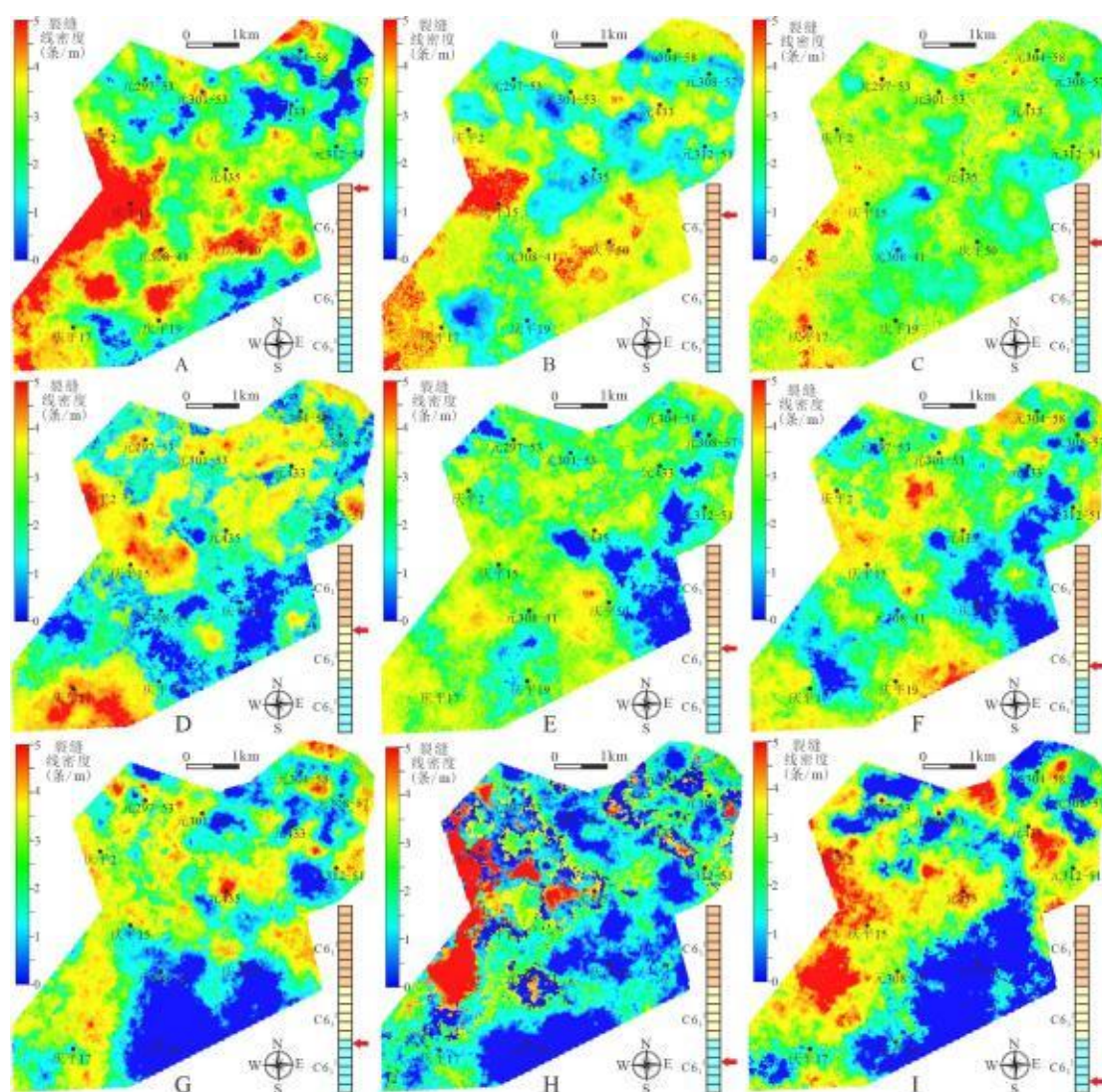
附录 F
(资料性)
储层裂缝三维分布规律图



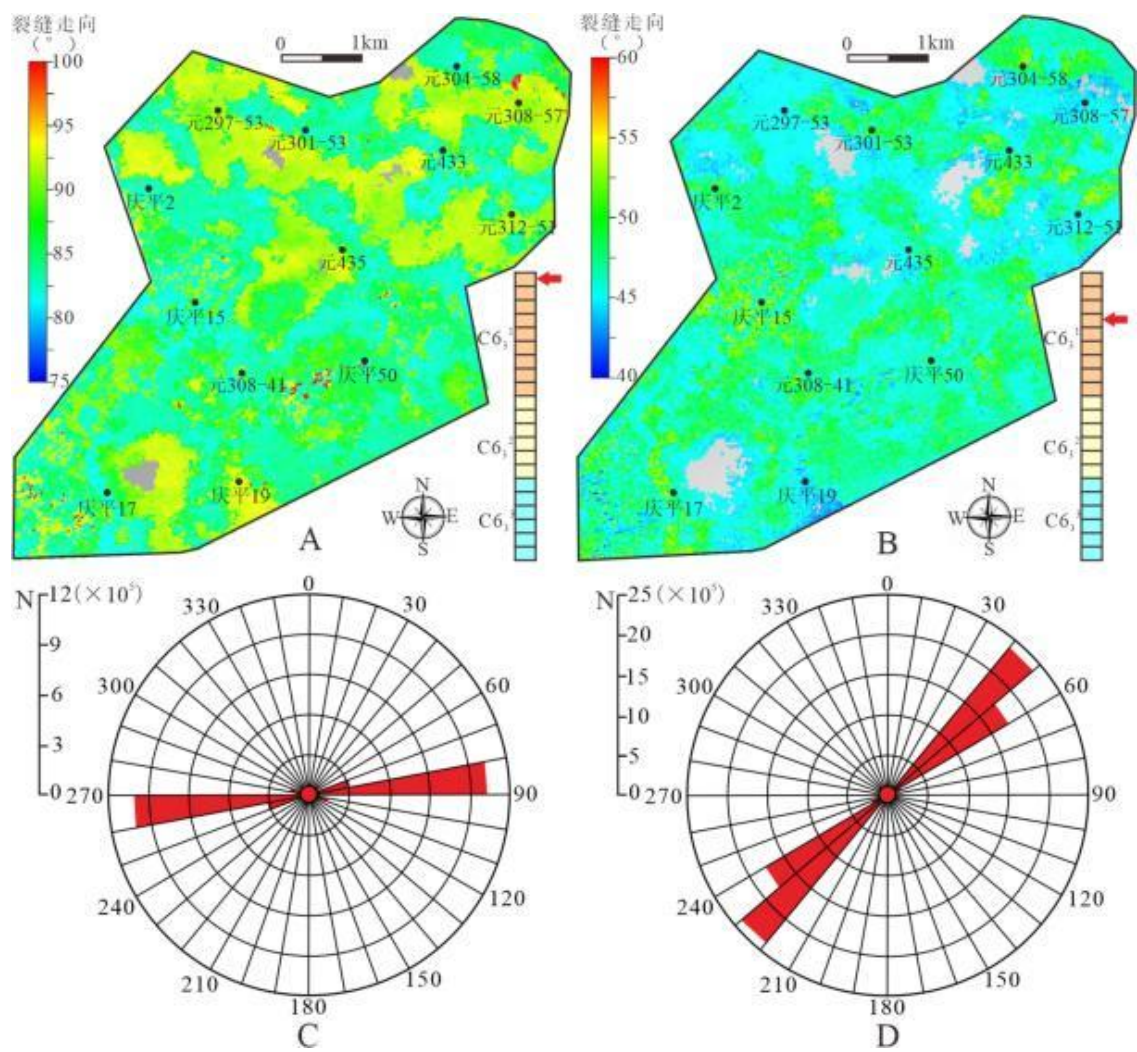
燕山期应力模拟结果



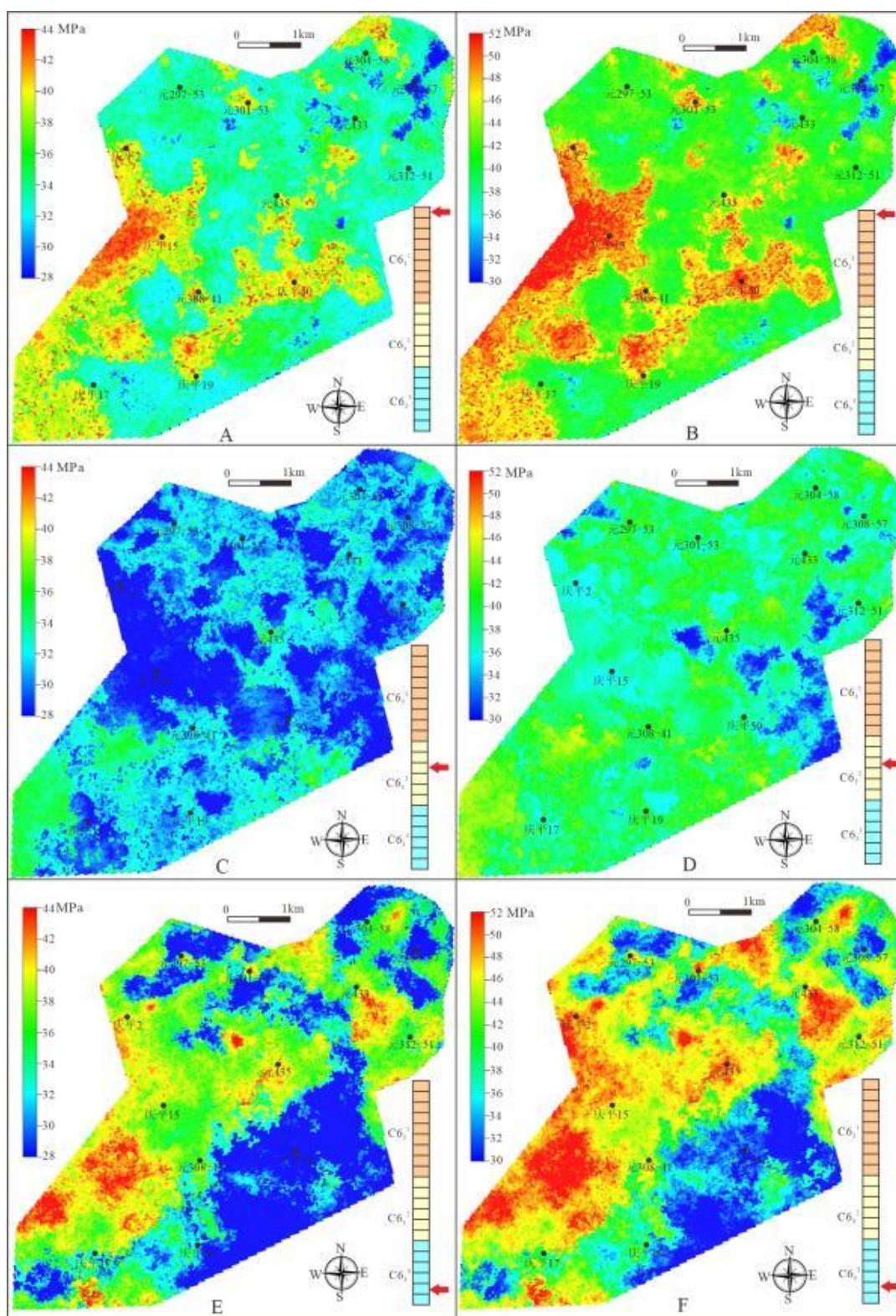
喜山期应力模拟结果



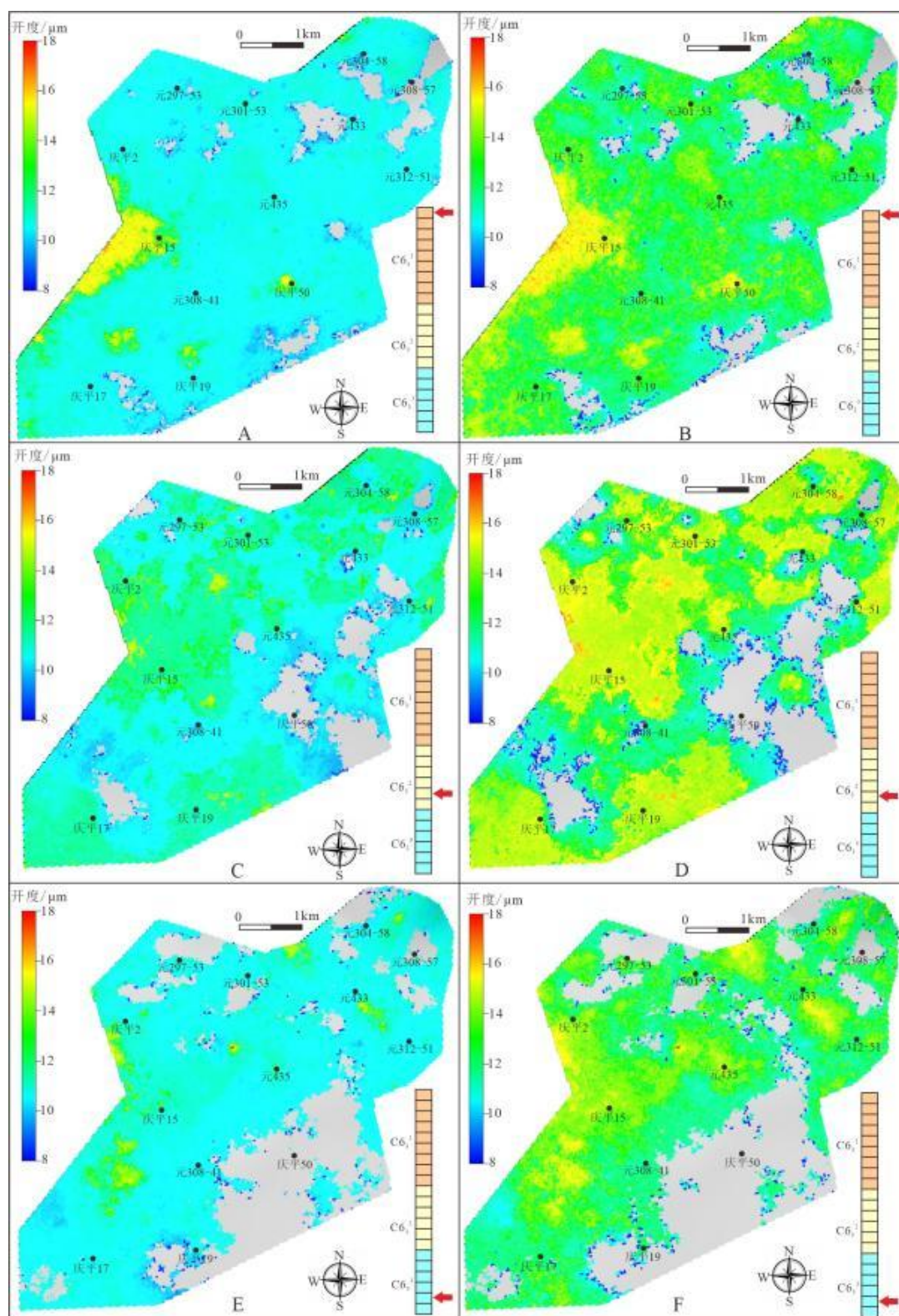
裂缝密度



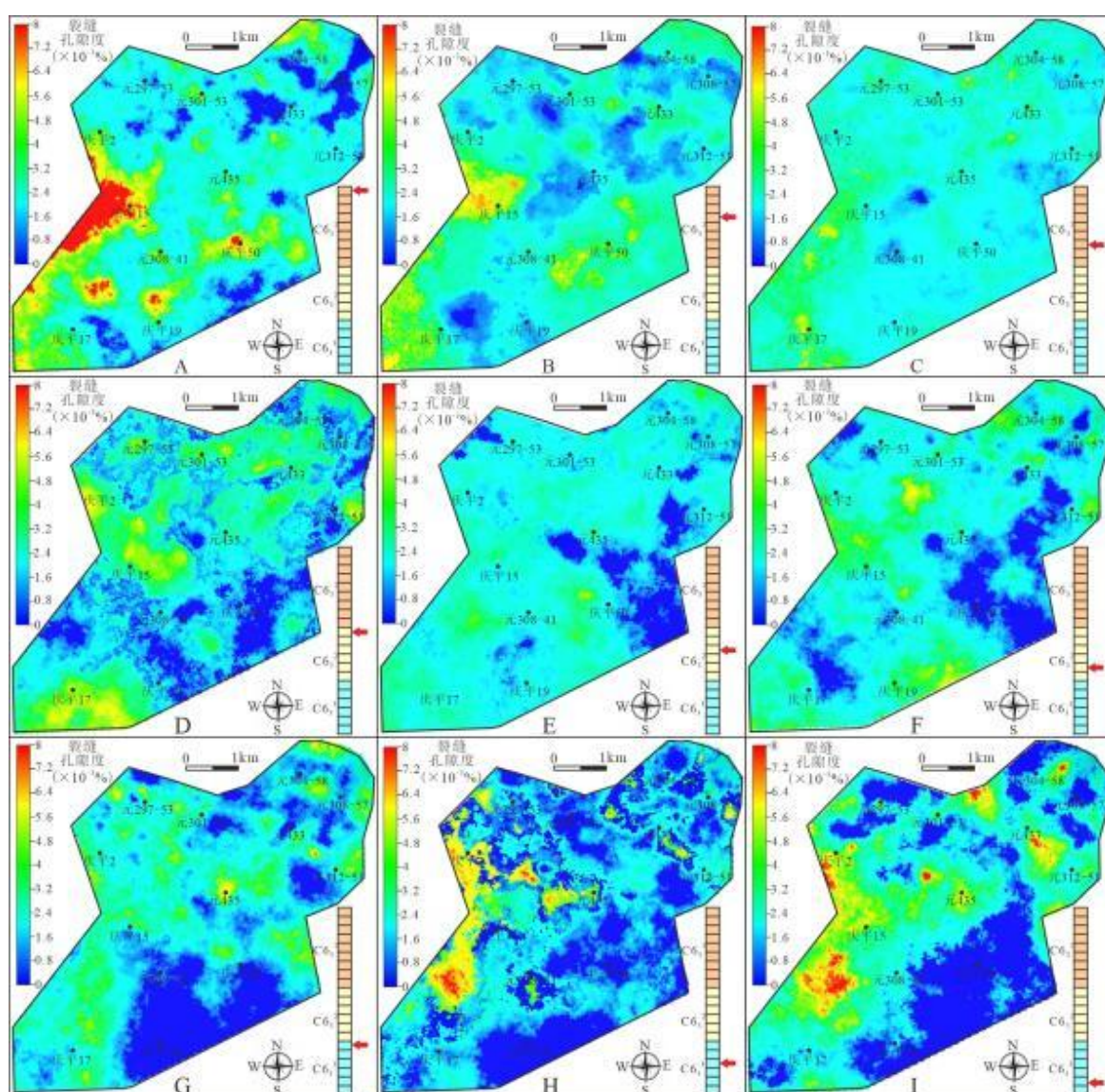
裂缝走向



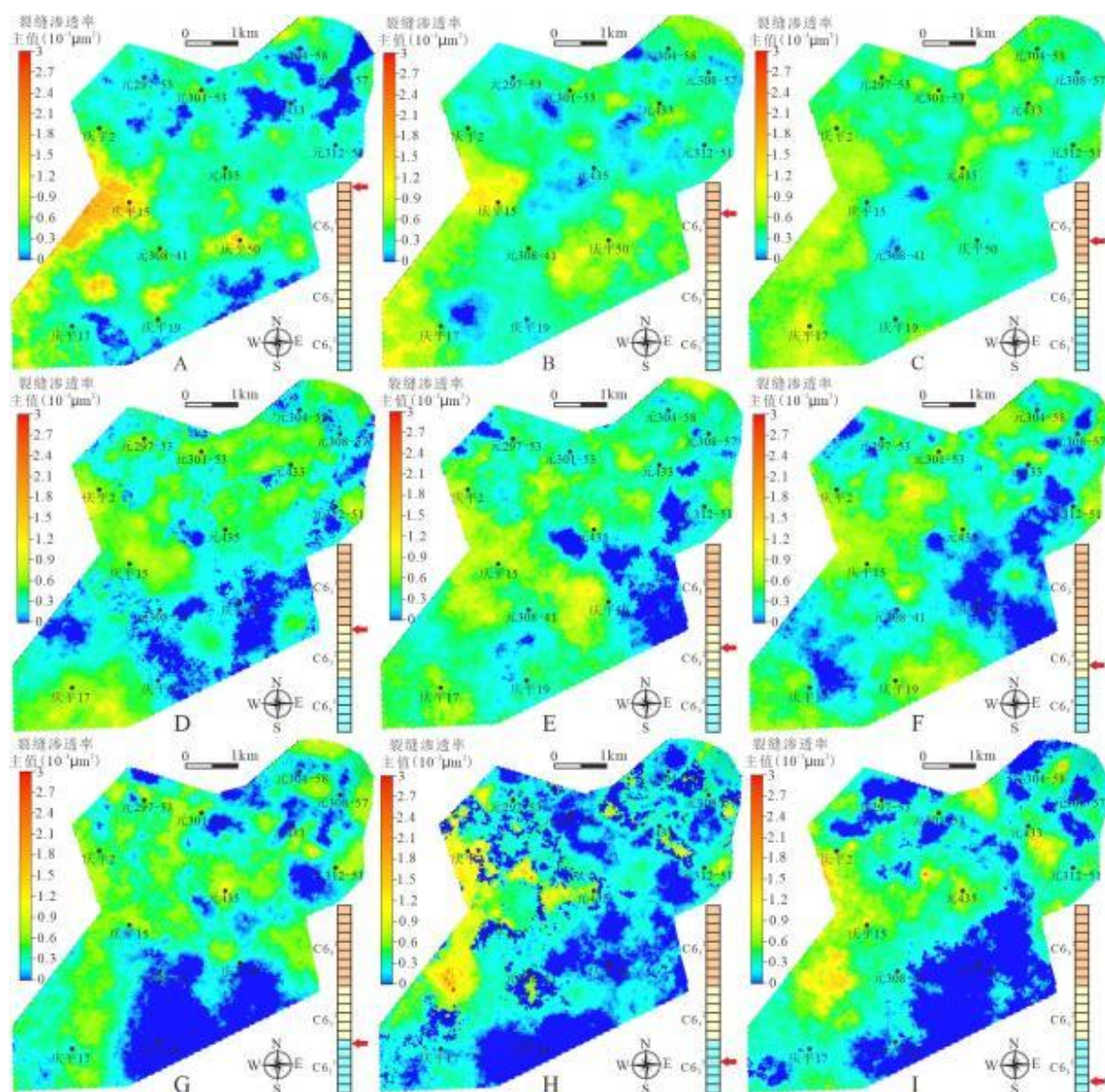
现今应力模拟结果



裂缝开度



裂缝孔隙度



裂缝渗透率