

考虑胶结面孔隙影响的套管-水泥环胶结面应力场分析

秦翊玮^{1,2}, 赵新波^{1,2,3,*}, 吕健^{1,2}

(1. 青岛理工大学 理学院, 青岛 266525; 2. 青岛市岩土力学与近海地下工程重点实验室, 青岛 266525;

3. 青岛市地下非常规能源开发工程研究中心, 青岛 266525)

摘要: 考虑到套管-水泥环胶结面的力学性质和胶结面孔隙结构形状的影响, 基于弹性力学理论, 建立了套管-胶结面-水泥环-地层组合体力学模型, 同时借助有限元分析方法, 建立了套管-水泥环胶结面孔隙数量与孔隙结构形状对应力场的影响系数, 得到考虑胶结面孔隙影响的套管-水泥环胶结面应力场的表达式。研究表明, 当孔隙存在时 Mises 等效应力增大 12.50%, 径向应力增大 9.30%, 环向应力增大 8.65%。套管-水泥环胶结面孔隙数量与孔隙结构形状会加剧应力场的非均匀性。孔隙数量对应力场影响更大, 影响系数最大为 1.1524。研究结果对于井筒系统安全性评价具有一定的工程价值。

关键词: 套管-水泥环胶结面; 力学模型; 孔隙率; 影响系数; 应力场

中图分类号: O343.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)02-0011-09

Analysis of the stress field of casing-cement sheath cementation surface considering the influence of cementation surface pore

QIN Yiwei^{1,2}, ZHAO Xinbo^{1,2,3,*}, LÜ Jian^{1,2}

(1. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Offshore Underground Engineering, Qingdao 266525, China;

3. Qingdao Underground Unconventional Energy Development Engineering Research Center, Qingdao 266525, China)

Abstract: Considering the mechanical properties of casing-cement sheath cementation surface and the influence of pore structure shape of cement surface, the mechanical model of casing-cement surface-cement sheath-formation combination is established based on the theory of elasticity, and with the help of finite element analysis method, the influence coefficients of pore number and pore structure shape of casing-cement sheath cement surface on the stress field are established. The expression of the stress field of casing-cement sheath cementation surface considering the effect of cementing surface clearance is obtained. The results show that when the pores exist, the Mises equivalent stress increases by 12.50%, the radial stress increases by 9.30% and the circumferential stress increases by 8.65%. The pore number and pore structure shape of the casing-cement sheath cementation interface will aggravate the non-uniformity of the stress field, and the pore number has a greater influence on the stress field, with the maximum influence coefficient being 1.1524. The research results have cer-

收稿日期: 2022-09-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52104004)

作者简介: 秦翊玮(1996-), 男, 山东日照人。硕士, 研究方向为岩石力学与地下工程。E-mail: qywqut@163.com。

* 通信作者: 赵新波(1986-), 男, 山东济宁人。副教授, 主要从事油气井筒系统完整性方面的研究。

E-mail: xinbo.zhao@qut.edu.cn。

tain engineering value to the safety evaluation of wellbore system.

Key words: casing-cement sheath cementation surface; mechanical model; porosity; influence coefficient; stress field

研究套管-水泥环胶结面是提高固井质量的一个基础工作,套管-水泥环胶结强度和質量对于保障井筒完整性及油气安全生产十分重要^[1]。国内外学者开展了一些套管-水泥环胶结面胶结质量的研究。殷有泉等^[2]、赵新波等^[3-4]探究了套管-水泥环-地层组合体三层至多层的力学模型并研究套管完整性。MARCELO等^[5]结合组合体模型探究了套管-水泥环完整性。DENG等^[6]通过实验研究发现,随着压力的升高,水泥环界面力学性能的下降速率增加,对于高压井下而言十分危险。针对水泥环孔隙的影响,部分学者也对此进行了研究。LI等^[7]通过实验发现水泥环界面渗透率与循环卸荷载次数呈负指数相关性。RIJFKOGEL等^[8]研究指出使用简单的几何形状,如圆柱形和狭缝形,以孔径尺寸分布推导出理论模型来估计渗透率,并提出两种孔隙的具体关系。ARANDIGOYEN等^[9]对石灰水泥砂浆的孔结构和力学性能进行了评估,讨论了孔隙率、孔径分布、表面分形维数与混合砂浆的微观结构关系。郭辛阳等^[10]利用自己设计的仪器进行了胶结面强度试验,研究了在复杂的温度环境下胶结面的强度表现。

但是在上述研究成果中,均未将胶结面处的孔隙率考虑到套管-水泥环-地层的力学模型中。由于套管-水泥环胶结面(以下简称胶结面)上存在壁效应,水泥浆体固化过程中水泥大颗粒在胶结面处不能有效堆积,无法形成最优结构,在胶结处形成一层薄弱带。同时由于水泥硬化引起收缩,水泥水化放热引起的套管膨胀^[11]等,致使胶结面处孔隙等缺陷较多,孔隙率较大,水泥环和套管的实际接触面积减少,胶结面强度降低。本文以套管-水泥环-地层组合体模型为基础,考虑到胶结面的力学性质与其内部孔隙结构的影响,建立套管-胶结面-水泥环-地层组合体模型,并确立了胶结面孔隙数量与孔隙结构形状对应力场的影响系数,最终得到考虑胶结面孔隙结构影响的胶结面应力场表达式。

1 考虑孔隙影响的套管-水泥环胶结面力学模型

在图1(a)所示的模型中,假设胶结面材料性质近似于水泥,将套管、胶结面及水泥环均假设为理想圆环且厚度均匀的弹性体。其外部载荷主要受到来自地层的非均匀地应力 σ_H 、 σ_h 。套管内外半径分别为 r_0 、 r_1 ,胶结面内外半径分别为 r_1 、 r_2 ,以此类推。由于胶结面上存在壁效应,水泥浆体和套管的胶结并不能做到完全胶结,在胶结面处会存有大量孔隙、裂隙、气泡等如图1(b)所示,会降低胶结强度^[12],因此进行胶结面的应力研究时,不能忽略孔隙的影响。

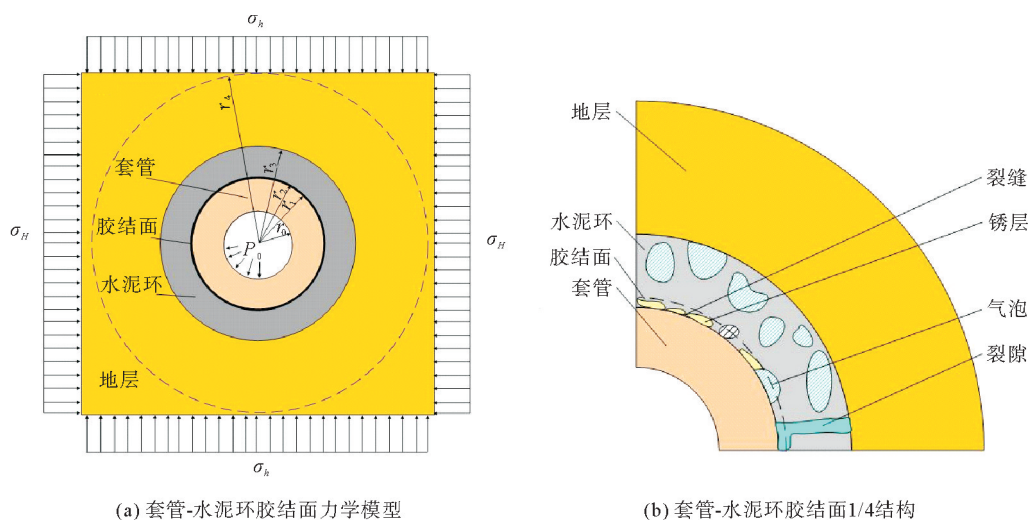


图1 考虑孔隙影响的套管-水泥环胶结面力学模型

2 考虑孔隙影响的套管-水泥环胶结面应力分析

2.1 套管-水泥环胶结面应力分析

2.1.1 坐标变换及控制方程

假设套管、胶结面、水泥环和地层的纵向形变受限,即不考虑纵向主应变的变换,将此时整个系统看作平面应变问题。同时假设系统中的各材料均为各向同性材料且孔隙分布均匀。当地层边界为水泥环外边界 20 倍以上时,边界条件对于温度变化的影响可以忽略^[13],因此在极坐标系中选取的模型外边界无限远处,利用极坐标表示的应力边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

在此模型中所描述的应力状态可由均匀场和非均匀场两部分组成。

2.1.2 均匀应力场下套管-水泥环胶结面应力分析

假设套管均匀内压为 P_0 , 均匀压应力为 $P_4 = (\sigma_H + \sigma_h)/2$, 均匀应力场下的胶结面应力分析可结合拉梅解答。由于模型中所受的力是轴对称的, 因此环向应变为 0, 结合几何方程和物理方程, 组合体第 i 层应力和位移表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^{Mi} &= -P_{i-1} \\ \sigma_\theta^{Mi} &= \frac{r_{i-1}^2 + r_i^2}{r_i^2 - r_{i-1}^2} P_{i-1} - \frac{2r_i^2}{r_i^2 - r_{i-1}^2} P_i \\ u_r^{Mi} &= r_{i-1} \cdot \varepsilon_{\theta_i} = r_{i-1} \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} \left(\sigma_{\theta_i} - \frac{\mu_i}{1 - \mu_i} \sigma_{r_i} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $i = 1, 2, 3, 4$, 其中 1 为套管, 2 为胶结面, 3 为水泥环, 4 为地层; σ_r^{Mi} 、 σ_θ^{Mi} 分别为均匀应力场下径向应力和环向应力; E_i 为弹性模量; μ_i 为泊松比; u_r^{Mi} 为径向位移。

根据模型, 以连续性条件, 即可列出每一层的方程, 并将所有方程组联立并求解。

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ 0 & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_{10} P_0 \\ 0 \\ -M_{34} P_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{M_{10}}{M_{12} M_{33} \Delta_1} (M_{33} M_{22} - M_{23} M_{32}) P_0 + \frac{M_{23} M_{34}}{M_{33} \Delta_2} P_4 \\ P_2 &= \frac{M_{21} M_{10}}{M_{11} \Delta_2} P_0 + \frac{M_{23} M_{34}}{M_{33} \Delta_2} P_4 \\ P_3 &= \left(\frac{M_{21} M_{10} (M_{23} M_{32} - M_{33} M_{22})}{M_{23} M_{12} M_{33} \Delta_1} - \frac{M_{22} M_{21} M_{10}}{M_{23} M_{11} \Delta_2} \right) P_0 - \left(\frac{M_{21} M_{34}}{M_{33} \Delta_1} + \frac{M_{23} M_{34}}{M_{33} \Delta_2} \right) P_4 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\Delta_1 = M_{21} - \frac{M_{22} M_{11}}{M_{12}} + \frac{M_{23} M_{32} M_{11}}{M_{33} M_{12}}$; $\Delta_2 = M_{22} - \frac{M_{21} M_{12}}{M_{11}} - \frac{M_{23}}{M_{32} M_{33}}$; $M_{n(n-1)} = \frac{1 - \mu_{n-1}^2}{E_{n-1}} \frac{2}{r_n^2 - r_{n-1}^2}$;

$M_{n(n+1)} = \frac{1 - \mu_n^2}{E_n} \frac{2r_{n+1}^2}{r_{n+1}^2 - r_n^2}$; $M_{nn} = \frac{1 - \mu_{n-1}^2}{E_{n-1}} \left(\frac{\mu_{n-1}}{1 - \mu_{n-1}} - \frac{r_n^2 + r_{n-1}^2}{r_n^2 - r_{n-1}^2} \right) - \frac{1 - \mu_n^2}{E_n} \left(\frac{\mu_n}{1 - \mu_n} + \frac{r_{n+1}^2 + r_n^2}{r_{n+1}^2 - r_n^2} \right)$; $n = 1, 2, 3$ 。

2.3。

2.1.3 非均匀应力场下套管-水泥环胶结面应力分析

在非均匀应力场下, 假设套管内压为 0 MPa, 非均匀压应力为 $(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta/2$, 非均匀切应力为 $(\sigma_H - \sigma_h) \sin 2\theta/2$ 。假设应力函数 $\xi = f(r) \cos 2\theta$, 求解得到第 i 层的应力表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^{Di} &= -\cos 2\theta \left(2B_i + \frac{4C_i}{r_i^2} + \frac{6D_i}{r_i^4} \right) \\ \sigma_\theta^{Di} &= \cos 2\theta \left(12A_i r_i^2 + 2B_i + \frac{6D_i}{r_i^4} \right) \\ \tau_{r\theta}^{Di} &= \sin 2\theta \left(6A_i r_i^2 + 2B_i - \frac{2C_i}{r_i^2} - \frac{6D_i}{r_i^4} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: σ_r^{Di} 、 σ_θ^{Di} 和 $\tau_{r\theta}^{Di}$ 分别为第 i 层非均匀应力场下径向应力、环向应力和切应力; A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 分别为与力学参数有关的常数。

根据极坐标系下的几何和物理方程, 可得每层的径向和环向位移为

$$U_r^{Di} = \frac{2\cos 2\theta}{5E_i} \left[(12 - 6\mu_i)A_i r_i^3 - (1 + \mu_i)B_i r_i + \frac{(6 + 4\mu_i)C_i}{r_i} + \frac{9(1 + \mu_i)D_i}{r_i^3} \right] \quad (6)$$

$$U_\theta^{Di} = \frac{6\sin 2\theta}{5E_i} \left[(3 + \mu_i)A_i r_i^3 + (1 + \mu_i)B_i r_i - \frac{(1 - \mu_i)C_i}{r_i} + \frac{(1 + \mu_i)D_i}{r_i^3} \right] \quad (7)$$

再利用无穷远处的应力边界条件 σ_r 、 $\tau_{r\theta}$ 与井壁处的应力边界条件 $\sigma_r^0 = -P_0$ 、 $\tau_{r\theta}^0 = 0$ 及连续性条件, 可建立 16 个方程, 解得对应的 16 个未知量。

$$\begin{bmatrix} 3r_0^2 & 1 & -r_0^{-2} & -3r_0^{-4} & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2r_0^{-2} & 3r_0^{-4} & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 3r_i^2 & 1 & -r_i^{-2} & 3r_i^{-4} & -3r_i^2 & -1 & r_i^{-2} & 3r_i^{-4} & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 2r_i^{-2} & 3r_i^{-4} & 0 & -1 & -2r_i^{-2} & -3r_i^{-4} & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & L_i^1 & L_i^2 & L_i^3 & L_i^4 & L_i^5 & L_i^6 & L_i^7 & L_i^8 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & L_i^9 & L_i^{10} & L_i^{11} & L_i^{12} & L_i^{13} & L_i^{14} & L_i^{15} & L_i^{16} & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & -2r_4^{-2} & -3r_4^{-4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -3r_4^2 & -1 & r_4^{-2} & 3r_4^{-4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ \vdots \\ A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \\ \vdots \\ C_4 \\ D_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ q_4 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $L_i^1 = \frac{E_{i+1}}{E_i}(12 - 6\mu_i)r_i^2$; $L_i^2 = \frac{E_{i+1}}{E_i}(1 + \mu_i)$; $L_i^3 = \frac{E_{i+1}}{E_i}(6 + 4\mu_i)r_i^{-2}$; $L_i^4 = \frac{E_{i+1}}{E_i}(9 + 9\mu_i)r_i^{-4}$; $L_i^5 = -(12 - 6\mu_{i+1})r_i^2$; $L_i^6 = -(1 + \mu_{i+1})$; $L_i^7 = -(6 + 4\mu_{i+1})r_i^{-2}$; $L_i^8 = (9 + 9\mu_{i+1})r_i^{-4}$; $L_i^9 = \frac{E_{i+1}}{E_i}(3 + \mu_i)r_i^2$; $L_i^{10} = \frac{E_{i+1}}{E_i}(1 + \mu_i)$; $L_i^{11} = \frac{E_{i+1}}{E_i}(1 - \mu_i)r_i^{-2}$; $L_i^{12} = \frac{E_{i+1}}{E_i}(1 + \mu_i)r_i^{-4}$; $L_i^{13} = -(3 + \mu_{i+1})r_i^2$; $L_i^{14} = -(1 + \mu_{i+1})$; $L_i^{15} = (1 - \mu_{i+1})r_i^{-2}$; $L_i^{16} = -(1 + \mu_3)r_i^{-4}$; $i = 1, 2, 3$ 。

2.2 考虑孔隙影响的套管-水泥环胶结面应力分析

胶结面的黏结力由水泥的性能和胶结面实际总面积决定, 黏结强度 σ_n 与总面积 A_n 和黏结力 F_n 为成正比关系。由于胶结面处的有效面积减少, 单位面积上所受应力增大, 因此在考虑孔隙率情况下, 真实胶结面处胶结强度将小于理论强度。于同一结点取值, 其有限元模拟情况如图 2 所示。

从表 1 中可知, 孔隙的存在对胶结面的应力和位移均有一定的影响。其中, Mises 等效应力增大 1.50%, 径向应力增大 74.01%, 环向应力增大 91.83%。

2.2.1 考虑孔隙椭圆度影响的应力影响系数

考虑不同椭圆度情况下的真实应力情况, 在本文中, 椭圆度的定义为椭圆的短轴与长轴比, 当其比值为 1 时认为此时椭圆为理论圆。有限元模型如图 3 所示。

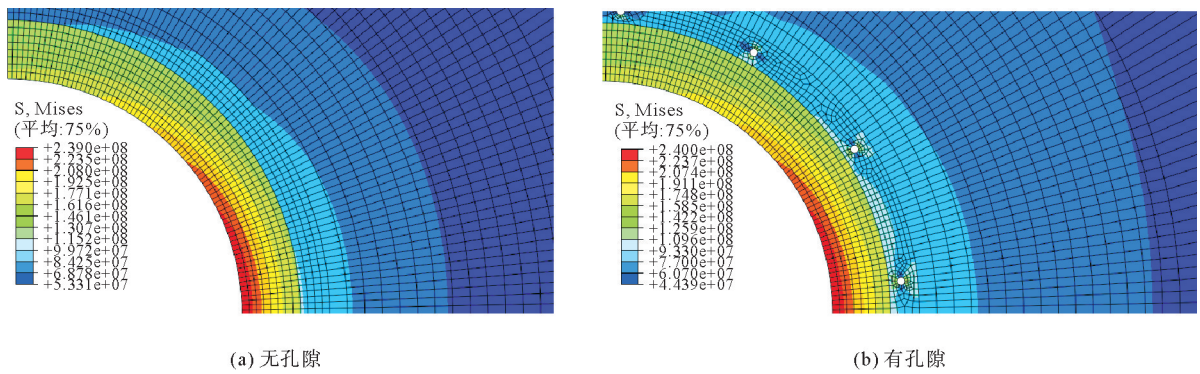


图 2 有无孔隙时 Mises 等效应力云图

表 1 有无孔隙对比情况

项目	Mises/MPa	σ_r /MPa	σ_θ /MPa	U_r /m
无孔隙	87.560 9	24.486 9	101.703	0.010 864
有孔隙	88.874 2	42.610 0	195.100	0.011 310

注: σ_r 为径向应力; σ_θ 为环向应力; U_r 为径向位移。

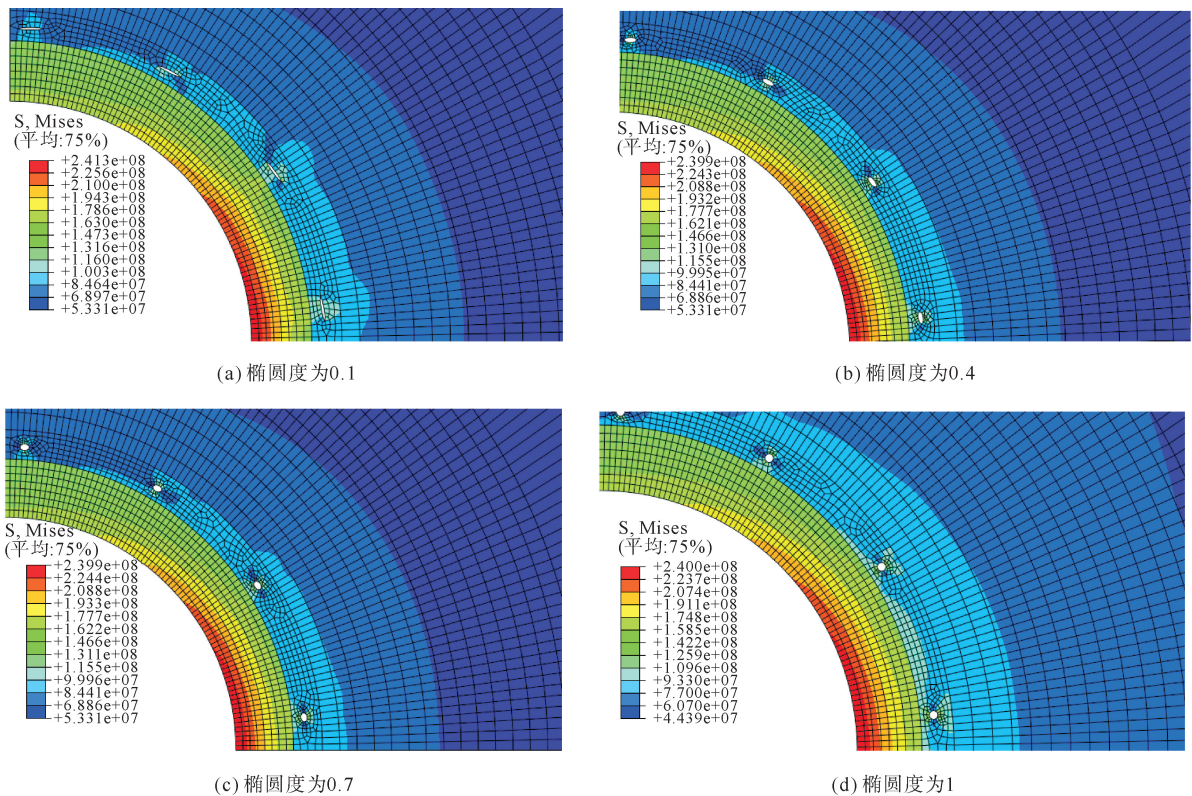


图 3 不同椭圆度椭圆孔 Mises 等效应力云图

使用相同方法,绘制其不同椭圆度 Mises 等效应力散点,并对散点进行拟合得到变化曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,随着椭圆度增大,Mises 等效应力随之减小,最大变化为 1.75%。因此当椭圆度不同时,胶结面处破坏发生所需应力条件亦不同。通过拟合可得到椭圆度 ω 与 Mises 等效应力 σ_ω 之间的曲线函数为式(9)。

$$\sigma_\omega = 1.47465e^{\omega/-0.48495} + 88.68232 \quad (9)$$

无孔隙时计算得到的 Mises 等效应力为 $\sigma_0 = 87.5615 \text{ MPa}$, 进一步得到孔隙椭圆度影响下的无量纲应力系数 K_1 , K_1 最大值为 1.0265。

$$K_1 = \frac{\sigma_\omega}{\sigma_0} = 0.01684e^{\omega/-0.48495} + 1.0128 \quad (10)$$

2.2.2 考虑孔隙率影响的应力影响系数

考虑相同椭圆度下不同数量椭圆孔对应力场的影响。取 $\omega = 1$, 孔数分别为 4, 6, ..., 16 个等情况下, 有限元模型如图 5 所示。绘制其不同椭圆度 Mises 等效应力散点, 并对其进行拟合, 得到曲线如图 6 所示。

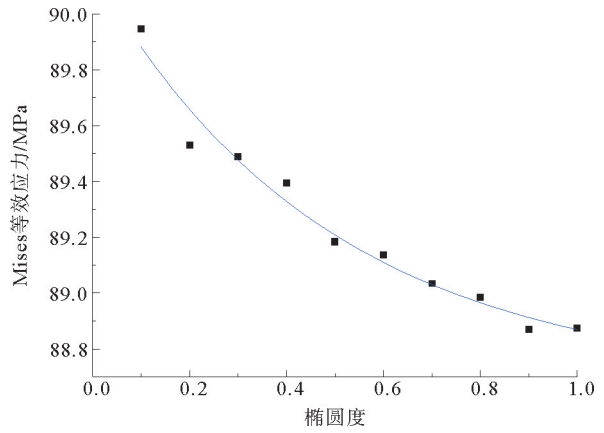


图 4 不同椭圆度下的 Mises 等效应力曲线

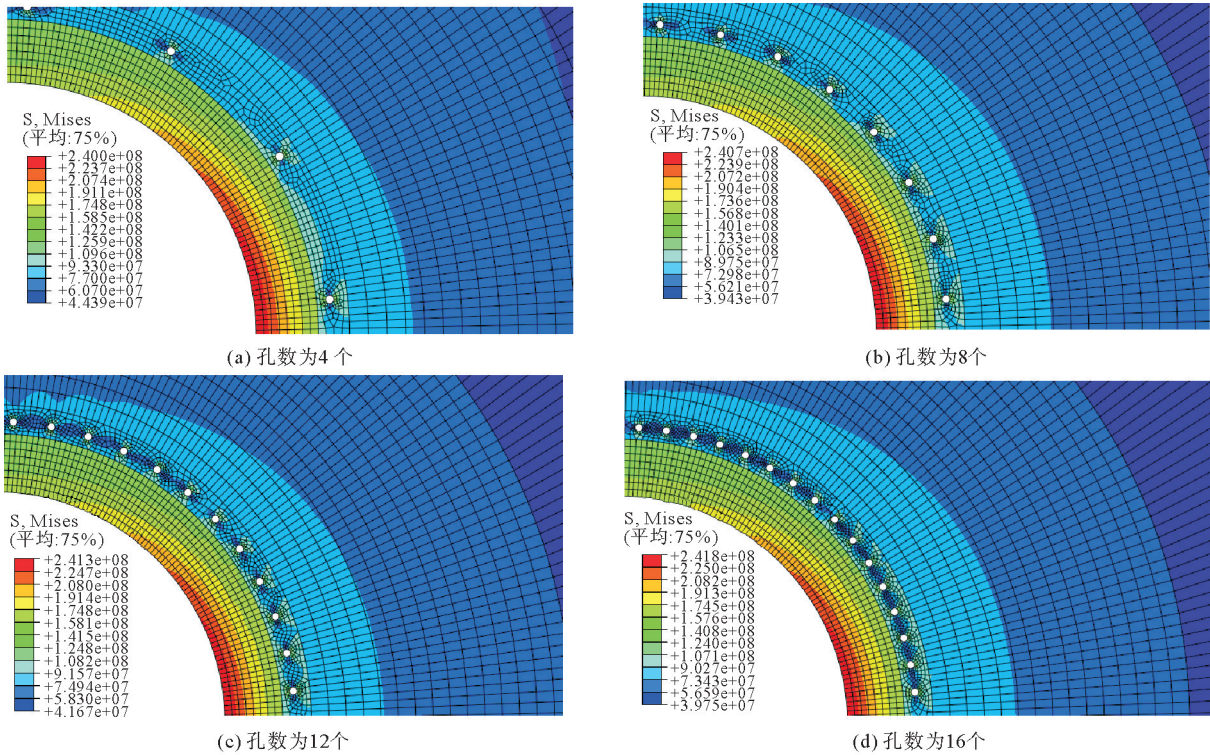


图 5 不同孔数圆孔的 Mises 等效应力云图

随着孔数增加, Mises 等效应力随着增大。设圆孔数量为 N , 通过拟合得到圆孔数量与 Mises 等效应力之间的曲线函数为

$$\sigma_N = 239.0357 + 0.2405N - 0.0042N^2 \quad (11)$$

考虑到试验中往往给出孔隙率参数, 而具体孔隙率与孔隙个数之间的关系并不明确, 因此建立孔隙率与孔隙个数之间的关系至关重要。假设孔隙尺度及分布特征与材料所处的温压环境有关, 即不受其他情况影响, 在相同的温压条件下, 孔隙的分布特征相同。用圆孔覆盖孔隙的方式,

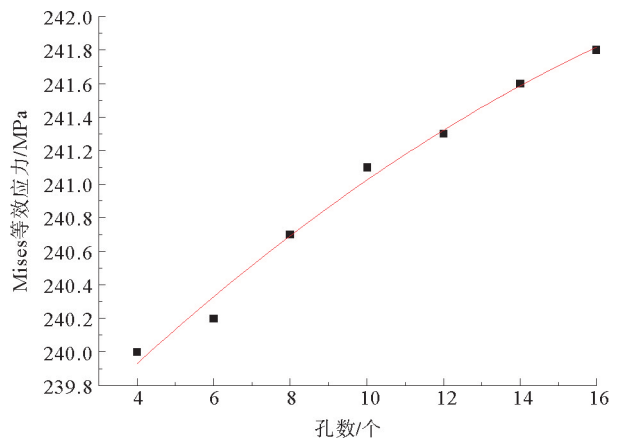


图 6 不同孔数下的 Mises 等效应力曲线

确定圆孔直径与圆孔数量的关系,覆盖图如图 7 所示,统计后得到图 8 曲线,由于图 7 中的孔洞、裂缝与水泥材料所处的温度环境和载荷条件均有关系,因此需要进行特定温压条件下的水泥试样扫描试验,方能确定该曲线。

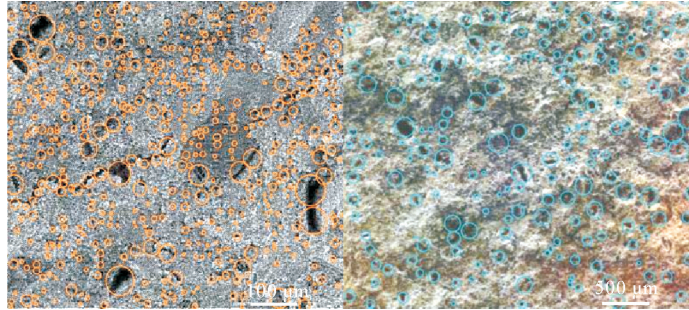


图 7 微观孔隙

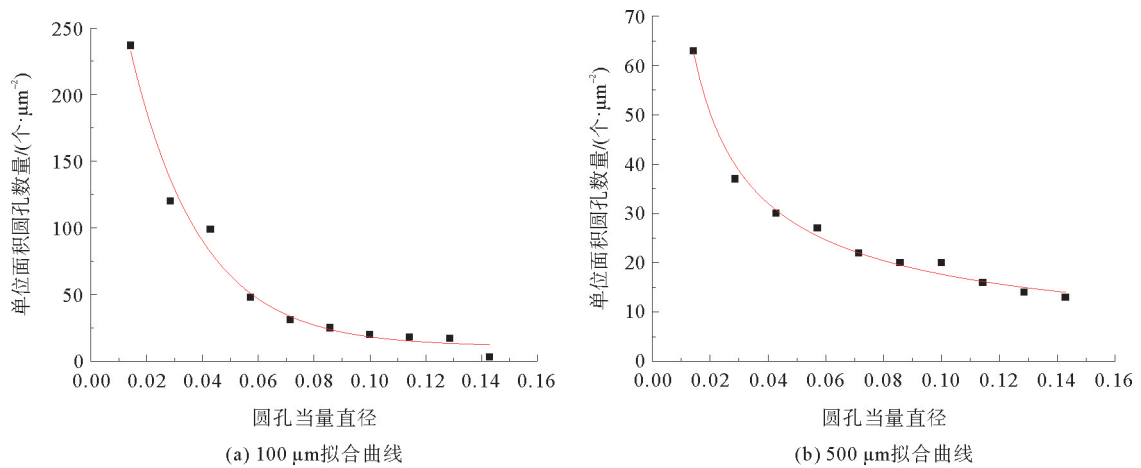


图 8 圆孔直径与数量拟合

由图 8 可知,两种不同情况下的圆孔直径和数量关系皆符合指数的形式,圆孔数量与圆孔当量直径的分布遵循幂或指数定律,这与 POMONIS 等^[14]的研究结果一致。因此,得到其拟合公式为

$$N_i = a_d d_i^{b_d} \quad (12)$$

式中: d_i 为圆孔当量直径, $i = 1, 2, \dots, 10$,对应图 8 中的水平轴上的 10 个离散点,它们的计算方法为圆孔直径与电镜扫描图片尺寸比值; a_d 、 b_d 为与试验温度、载荷等参数有关的待定常数,需要通过试验获得。

设环胶结面单位面积上的孔数为 N' ,胶结面的孔隙率为 φ' ,孔隙当量面积为 A_i ,可得

$$N' = \sum_{i=1}^{10} N_i \quad (13)$$

$$\varphi' = \sum_{i=1}^{10} N_i A_i \quad (14)$$

如图 9 所示,孔隙率随孔隙距套管的距离 r 具有一定的关系^[15],由养护 1 年的曲线得到变化规律为

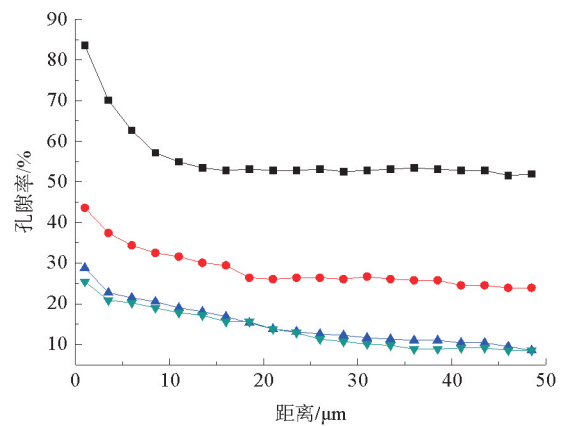


图 9 不同养护时间胶结面平均孔隙率
 —■— 刚混合; —●— 养护 1 d; —▲— 养护 28 d; —▼— 养护 1 a

$$\varphi_r = 26.6581e^{\frac{r_1-r}{10.2862}} + 8.4615 \tag{15}$$

$$N = \frac{N'\varphi_r}{\varphi'} = \frac{4 \sum a_d d_i^{b_d}}{\pi \sum a_d d_i^{2b_d}} (26.6581e^{\frac{r_1-r}{10.2862}} + 8.4615) \tag{16}$$

结合上述过程可求出孔隙距套管距离 r 与有效应力 σ_s 间的关系。无孔时的最大应力 $\sigma'_0 = 239.01$ MPa, 可得到考虑孔隙率影响的无量纲的应力系数 K_2 , K_2 最大值为 1.1524。

$$K_2 = \frac{\sigma_s}{\sigma'_0} = 1.1518 + \frac{\sum a_d d_i^{b_d}}{\pi \sum a_d d_i^{2b_d}} (0.1235e^{\frac{r_1-r}{10.2862}} + 0.0392) - 0.00032 \left(\frac{\sum a_d d_i^{b_d}}{\pi \sum a_d d_i^{2b_d}} \right)^2 (26.6581e^{\frac{r_1-r}{10.2862}} + 8.4615)^2 \tag{17}$$

2.3 总应力场分析

总应力场可由均匀应力场、非均匀应力场叠加得到, 考虑到孔隙结构对胶结面应力场成正相关的影响, 因此考虑孔隙影响的胶结面总应力表达式可表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= K_1 K_2 (\sigma_r^M + \sigma_r^D) \\ \sigma_\theta &= K_1 K_2 (\sigma_\theta^M + \sigma_\theta^D) \\ \tau_{r\theta} &= K_1 K_2 \tau_{r\theta}^D \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

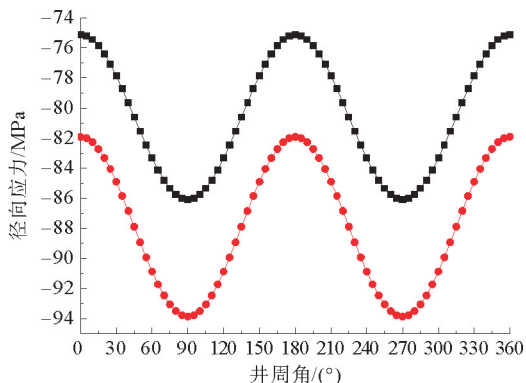
式中: M 为均匀应力场; D 为非均匀应力场。

3 算例分析

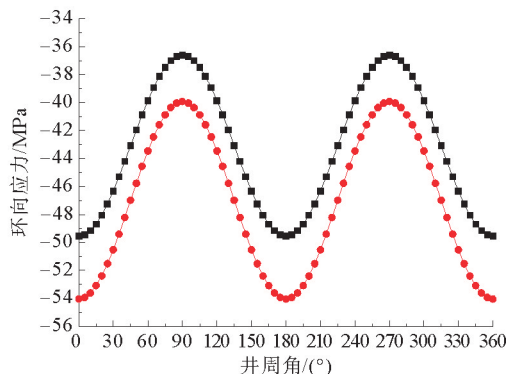
以川渝页岩气井异常高压井为例, 其地层压力系数高, 地况复杂, 在复杂地层下, 微小振动就会导致胶结面发生改变。因此, 假设物理模型位于井深 2800 m 处, 其主要几何与力学参数见表 2。地层最大水平主应力 σ_H 为 54 MPa, 最小水平主应力 σ_h 为 45 MPa, 井筒内压为 20 MPa。

表 2 计算数据

结构	内半径/mm	外半径/mm	E /GPa	μ	a_d	b_d
套管	60.00	75.00	210	0.25	—	—
胶结面	75.00	75.05	12	0.26	0.96	-1.34
水泥环	75.05	95.00	11	0.30	—	—
地层	95.00	20 000.00	2	0.30	—	—



(a) 径向应力



(b) 环向应力

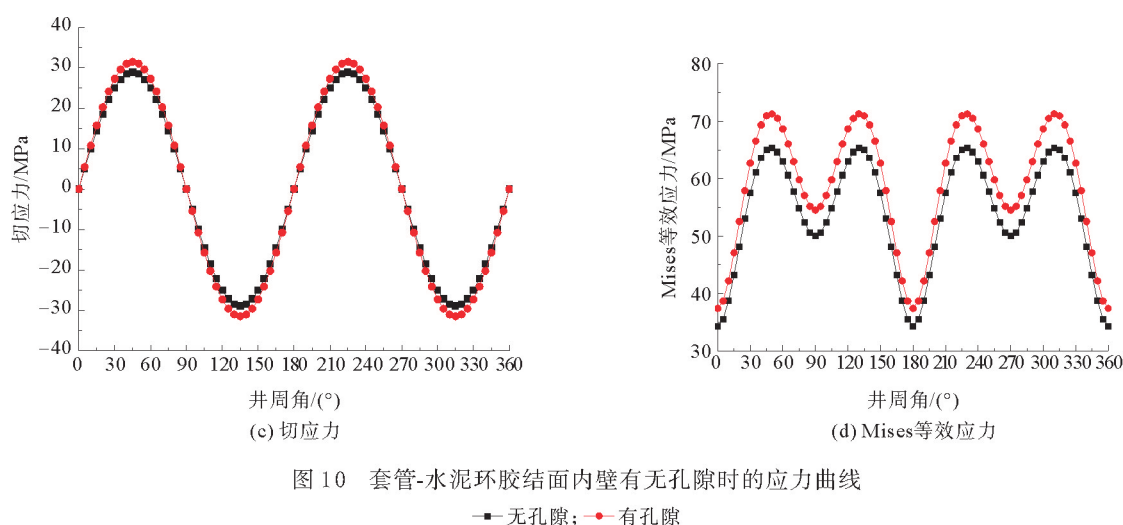


图 10 套管-水泥环胶结面内壁有无孔隙时的应力曲线

—■—无孔隙; —●—有孔隙

从图 10 中可以看出,由于非均匀应力场的影响,胶结面内壁的径向应力、环向应力、切应力及 Mises 等效应力的分布沿环向的分布亦不均匀且呈现正弦或余弦的分布形式。当考虑孔隙时应力增大, Mises 等效应力增大 12.50%, 径向应力增大 9.30%, 环向应力增大 8.65%, 应力曲线变化趋势更加剧烈, 分析原因为接触面积减少, 进而导致应力增大。不均匀的分布形式, 将会导致胶结面内壁胶结强度受到极大的考验。因此, 本文考虑胶结面孔隙率的影响在工程实际上具有一定的工程意义。

4 结论

1) 本文以套管-水泥环-地层组合体模型为基础, 并考虑套管-水泥环胶结面力学性质和内部孔隙结构的影响, 最终得到考虑胶结面孔隙结构影响的胶结面应力场表达式。

2) 借助有限元分析方法, 研究了孔隙数量和孔隙结构对应力场的影响, 引入无量纲应力影响系数 K_1 和 K_2 来反映孔隙数量和孔隙结构对应力场的影响程度, 应力影响系数最大为 $K_2 = 1.1524$ 。

3) 当考虑孔隙时, Mises 等效应力增大 12.50%, 径向应力增大 9.30%, 环向应力增大 8.65%。因此当胶结面孔隙存在时, 会导致应力整体增大, 胶结面极易发生破坏, 影响套管-水泥环的完整性。

参考文献 (References):

- [1] 岳家平, 耿亚楠, 武治强, 等. 水泥封固段长度对固井胶结面密封能力影响的试验研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(2): 53-57.
YUE Jiaping, GENG Yanan, WU Zhiqiang, et al. The experimental study on the influence of the length of cement sheath isolation section on seal capacity of cementing cementation plane[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2020, 17(2): 53-57.
- [2] 殷有泉, 陈朝伟, 李平恩. 套管-水泥环-地层应力分布的理论解[J]. 力学学报, 2006(6): 835-842.
YIN Youquan, CHEN Zhaowei, LI Ping'en. Theoretical solutions of stress distribution in casing-cement and stratum system[J]. Theoretical and Applied Mechanics, 2006(6): 835-842.
- [3] 赵新波, 韩生超, 杨秀娟, 等. 热固耦合作用下的套管-水泥环-地层多层组合系统应力分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(3): 837-843.
ZHAO Xinbo, HAN Shengchao, YANG Xiujuan, et al. Mechanical characteristics analysis of casing-cement sheath-formation multi-layer composite system with thermo-structural coupling effects[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(3): 837-843.
- [4] 赵新波, 杨秀娟, 李向阳, 等. 考虑热固耦合作用的高温高压井井筒完整性分析[J]. 工程科学学报, 2016, 38(1): 11-18.
ZHAO Xinbo, YANG Xiujuan, LI Xiangyang, et al. Integrity analysis of high temperature and high pressure wellbores with thermo-structural coupling effects[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(1): 11-18.
- [5] MARCELO De Simone, FERNANDA L G Pereira, DEANE M Roehl. Analytical methodology for wellbore integrity assessment considering casing-cement-formation interaction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 94: 112-122.

(下转第 57 页)