

超深井油页岩地层水泥环材料参数优选及井筒完整性评价

张博文¹, 王鑫尧¹, 赵宇杰¹, 王 英¹, 李 源²

¹辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

²山西冶金岩土工程勘察有限公司, 山西 太原

收稿日期: 2026年5月30日; 录用日期: 2026年6月30日; 发布日期: 2026年7月30日

摘 要

针对超深井油页岩地层高地应力与高内压工况下水泥环韧性评价不足、材料参数优选缺乏依据的问题, 基于ABAQUS建立水泥环数值模型, 采用混凝土损伤塑性本构描述水泥环非线性力学行为, 系统研究弹性模量5~30 GPa、泊松比0.16~0.28范围内6组参数组合下的应力分布与环向应力-应变全曲线, 以峰值应力、韧性指数、残余强度及软化行为指标优选材料参数。研究结果表明, 低弹性模量与高泊松比的协同作用可显著改善水泥环力学韧性, A2组(弹性模量5 Gpa, 泊松比0.26)综合性能最优, 韧性指数最高, 达3.58 MJ/m³, 较A3组(弹性模量15 Gpa, 泊松比0.16)提高27.4%, 且软化段平缓。与A3组相比, A2组水泥环内壁环向应力的周向波动明显减小, 危险点应力集中得到有效缓解。优选参数与现有弹韧性水泥浆配方可实现范围一致, 具备工程转化可行性。建议超深井油页岩地层固井水泥环采用低弹性模量、高泊松比的韧性材料参数, 以降低高地应力与高内压作用下的内壁应力集中, 延缓裂纹的萌生和扩展, 从而保障水泥环的长期密封完整性。

关键词

油页岩, 韧性水泥环, 参数优选, 环向应力, 井筒完整性

Optimization of Cement Sheath Material Parameters and Wellbore Integrity Evaluation for Oil Shale Formation in Ultra-Deep Wells

Bowen Zhang¹, Xinyao Wang¹, Yujie Zhao¹, Ying Wang¹, Yuan Li²

¹School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²Shanxi Metallurgical Geotechnical Engineering Investigation Co., Ltd., Taiyuan Shanxi

文章引用: 张博文, 王鑫尧, 赵宇杰, 王英, 李源. 超深井油页岩地层水泥环材料参数优选及井筒完整性评价[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 1078-1087. DOI: 10.12677/me.2026.144107

Received: May 30, 2026; accepted: June 30, 2026; published: July 30, 2026

Abstract

To address the insufficient toughness evaluation of cement sheath and the lack of basis for material parameter optimization under high *in-situ* stress and high internal pressure in ultra-deep oil shale formations, a numerical model of the cement sheath was established based on ABAQUS. The concrete damaged plasticity (CDP) constitutive model was adopted to describe the nonlinear mechanical behavior of the cement sheath. Six parameter combinations with elastic moduli ranging from 5 to 30 GPa and Poisson's ratios ranging from 0.16 to 0.28 were systematically studied, focusing on stress distribution and hoop stress-strain full curves. Material parameters were optimized using peak stress, toughness index, residual strength, and softening behavior as evaluation indicators. The results show that the synergistic effect of low elastic modulus and high Poisson's ratio can significantly improve the mechanical toughness of the cement sheath. Group A2 (elastic modulus of 5 GPa and Poisson's ratio of 0.26) exhibits the best comprehensive performance, with the highest toughness index reaching 3.58 MJ/m³, which is 27.4% higher than that of Group A3 (elastic modulus of 15 GPa and Poisson's ratio of 0.16), and a gentle softening stage. Compared with the conventional Group A3, the circumferential fluctuation of hoop stress on the inner wall is reduced, and the stress concentration at the critical point is effectively alleviated. The optimized parameters are consistent with the achievable range of existing elastic-tough cement slurry formulations, demonstrating engineering conversion feasibility. It is recommended that the cement sheath in ultra-deep oil shale formations adopt tough material parameters with low elastic modulus and high Poisson's ratio, which can reduce stress concentration on the inner wall and delay crack initiation and propagation under high *in-situ* stress and high internal pressure, thereby ensuring the long-term sealing integrity of the cement sheath.

Keywords

Oil Shale, Tough Cement Sheath, Parameter Optimization, Hoop Stress, Wellbore Integrity

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

井筒完整性失效是威胁油气藏安全高效开发的重要问题之一，其中水泥环密封完整性失效是主要的失效形式[1]-[4]。西部工区超深井段固井优质率不足 30%，主要归因于极端井下工况：井底温度超 180℃、压力达 120 MPa，压裂套管内压可达 154 MPa。在此条件下，水泥环承受极端载荷，其力学性能直接决定井筒的长期密封能力[5]。

针对水泥环力学完整性问题，已开展了大量研究。在数值模拟方面，初纬等[2]建立了套管-水泥环-围岩弹塑性模型，分析了微环隙产生机制；赵新波等[6]考虑热流固耦合效应，指出胶结面参数与水泥环相近时有利于完整性；曾秦涛等[7]采用内聚力单元模拟了界面脱粘过程。在材料参数优化方面，安峰辰等[8]揭示了柔性水泥环的“主动拱效应”，即弹性模量越小套管应力越小；杨焕强等[9]构建了水泥环疲劳损伤模型；石鲁杰[10]建立了封隔能力评价模型；Wu 等[11]系统综述了相关理论研究进展。实验研究方面，林元华等[12]发现交变热载荷显著影响水泥环完整性；周浪等[13]揭示了不同井段水泥环密封性能差异；胡志强等[14]推导了环空附加压力方程；刘硕琼等[15]指出卸载导致微环隙形成。上述研究为理

解水泥环力学行为奠定了基础。

以上研究均侧重于组合体在外载作用下的应力变形分析及单一参数优化，对水泥环自身韧性的多指标定量评价研究相对较少。鉴于此，本研究基于 ABAQUS 采用混凝土损伤塑性模型，建立水泥环非线性力学行为的数值模型。针对高地应力、高内压工况，设计不同弹性模量、不同泊松比范围内 6 组参数方案，以峰值应力、韧性指数、残余强度及软化行为为指标优选材料参数，并通过应力云图、周向应力分布验证工程可靠性，为超深井油页岩地层固井水泥浆体系设计提供理论依据。

2. 工程概况

西部工区超深井段(大于 7600 m)逐年增多，尤其在顺北油气田 V 条带井区，已施工的超深井段固井区域优质率不到 30%，合格率不足 60%。该类井井底温度 180℃ 以上、压力达 120 MPa，具有典型的“超深、超高温、超高压”特点[5]。在压裂工况下，套管内压可达 154 MPa。因此，针对该工况开展水泥环材料参数系统优选，量化评价弹性模量与泊松比对水泥环韧性及应力分布的影响规律，对保障超深井井筒完整性具有重要工程意义。

3. 模型建立

基于西部工区超深井段工况，通过 ABAQUS 建立由地层、水泥环、套管三部分组成的井筒组合体几何模型，如图 1 所示。其中套管外径 177.8 mm、内径 152.5 mm、壁厚 12.65 mm；水泥环外径 246.1 mm、内径 177.8 mm、环厚 34.15 mm；地层外径取 3000 mm，以消除边界效应对模拟结果的影响。

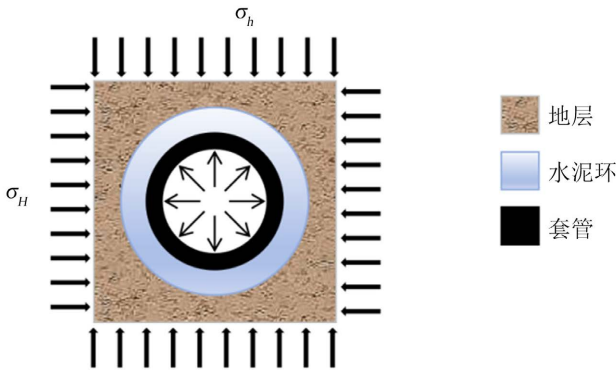


Figure 1. Geometric model of the wellbore assembly
图 1. 井筒组合体几何模型图

3.1. 井筒材料属性

为系统筛选适用于超深井油页岩地层工况的最优水泥环材料，选取弹性模量 5~30 GPa、泊松比 0.16~0.28 作为研究区间，采用交叉分组法设计多组计算方案，通过对比不同参数组合下的环向应力 - 应变全曲线，综合评价材料的峰值应力、软化行为及韧性指数，以确定兼具优异强度与韧性的水泥环材料。其他材料主要参数见表 1。

Table 1. Reference table of materials for the wellbore model
表 1. 井筒模型材料参考表

介质	弹性模量/Gpa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
套管	205	0.3	7800
地层	40	0.28	2160

3.2. 本构模型

1) 应力 - 应变关系

CDP 模型在有效应力空间中描述材料的弹塑性响应, 并通过标量损伤因子表征材料刚度退化。单轴压缩和拉伸下的宏观应力 - 应变关系分别为:

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (1)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (2)$$

式中: σ_c 、 σ_t 分别为压缩和拉伸应力; E_0 为水泥石初始弹性模量; d_c 、 d_t 分别为压缩和拉伸损伤因子, 取值范围为 0 (材料无损) 至 1 (材料完全破坏); ε_c 、 ε_t 分别为压缩和拉伸总应变; $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ 、 $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ 分别为压缩和拉伸等效塑性应变。

2) 屈服准则

该屈服函数通过引入不同的演化规律, 可同时描述材料在拉伸和压缩作用下的差异响应。其在有效应力空间中的表达式为:

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} \left(\bar{q} - 3\alpha \bar{p} + \beta (\tilde{\varepsilon}^{pl}) \left\langle \hat{\sigma}_{\max} \right\rangle - \gamma \left\langle -\hat{\sigma}_{\max} \right\rangle \right) - \bar{\sigma}_c (\tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \leq 0 \quad (3)$$

$$\text{其中: } \alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}, 0 \leq \alpha \leq 0.5, \quad \beta = \frac{\bar{\sigma}_c (\tilde{\varepsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t (\tilde{\varepsilon}_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha), \quad \gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1}。$$

式中: $\bar{q}$ 为 Mises 等效应力; $\bar{p}$ 为有效静水压力; $\hat{\sigma}_{\max}$ 为最大有效主应力; $\bar{\sigma}_c$ 、 $\bar{\sigma}_t$ 分别为有效压缩和拉伸内聚力; σ_{b0}/σ_{c0} 为初始等双轴压缩屈服应力与单轴压缩屈服应力之比; K_c 为拉伸子午线与压缩子午线上第二应力不变量之比; α 反映双轴压缩对屈服的强化效应; β 控制拉伸屈服面随塑性应变的演化, γ 控制屈服面在偏平面上的形状。〈〉为 Macaulay 括号, 当变量为正值时取自身, 为负值时取零。

3) 流动法则

CDP 模型采用非关联流动法则, 塑性势函数取 Drucker-Prager 双曲函数形式:

$$G = \sqrt{(\varepsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi \quad (4)$$

式中: ψ 为剪胀角, 表征材料在剪切作用下的体积变化特性, 对水泥石取 $15^\circ \sim 20^\circ$; σ_{t0} 为单轴拉伸峰值应力, MPa; ε 为偏心率, 表征塑性势函数逼近其渐近线的速率, 本文取默认值 0.1, 采用非关联流动法则的意义在于避免关联流动法则在摩擦型材料中过高估计体积膨胀, 使塑性变形更符合水泥石的实际力学响应。

3.3. 井筒边界条件

在超深井工况下, 固井水泥环承受高地应力与套管内压的共同作用。为突出材料参数对水泥环完整性的影响规律, 本研究聚焦于压力场分析, 暂不考虑其他附加载荷的耦合效应。基于 ABAQUS 软件建立数值模型, 通过设定初始地应力场模拟三向地应力(128 MPa), 并在套管内壁施加压裂峰值内压(154 MPa)。在超深井固井数值模拟中, 三向地应力与套管内压分别取 128 MPa 和 154 MPa。该取值以井底压力 120 MPa 为核心工程依据, 同时结合地应力分布规律、压裂施工极限及安全设计保守原则综合确定。模型各组件间采用绑定接触(Tie)定义界面关系, 整体选用 C3D 单元划分网格, 共计 28,470 个单元。由数值模拟建成的井筒组合体几何模型由图 2 所示。

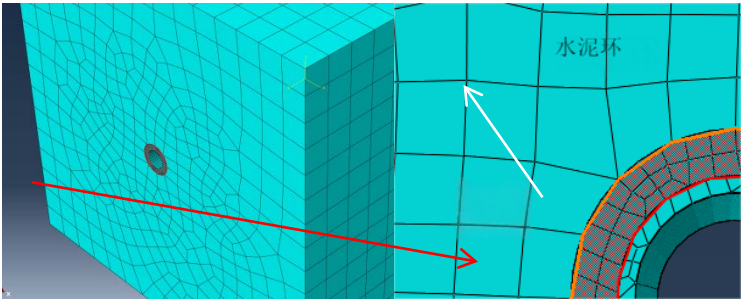


Figure 2. Numerical simulation model of the wellbore assembly
图 2. 井筒组合体数值模拟模型图

4. 水泥环材料参数优选分析

为系统研究弹性参数对水泥环力学韧性的影响规律，需筛选适用于超深井油页岩地层的最佳水泥环材料。本章采用交叉分组方法设计计算方案，基于 ABAQUS 数值模拟提取各方案下的环向应力 - 应变全曲线，通过对比峰值应力、软化行为及曲线下面积等指标，确定最优的弹性模量与泊松比组合。

4.1. 参数范围

参考既有研究成果及油井水泥的工程应用范围，确定弹性模量 E 的取值范围为 5~30 GPa，泊松比 ν 的取值范围为 0.16~0.28。该范围覆盖了从柔性水泥(低弹模)到刚性水泥(高弹模)以及不同泊松比水平的典型取值，能够全面反映材料参数对水泥环力学响应的影响。

4.2. 交叉分组方案

为揭示弹性模量和泊松比的独立影响及耦合效应，采用控制变量法设计 6 组计算方案，如表 2 所示。方案设计遵循以下原则：

- 1) 固定一个参数，变化另一个参数，以分析单一参数的影响；
- 2) 覆盖参数区间的两端，以确定韧性变化的上、下限；
- 3) 在关键点设置对比组，以便进行系统性分析。

Table 2. Parameter combinations for calculation schemes
表 2. 计算方案参数组合表

方案编号	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
A1	5	0.16
A2	5	0.26
A3	15	0.16
A4	15	0.24
A5	30	0.26
A6	30	0.28

4.3. 应力 - 应变曲线分析

在 Visualization 模块中，选取水泥环内壁环向应力最大的节点，提取其在整个加载过程中的环向应力(S22)与环向应变(LE22)历史数据，并绘制应力 - 应变全曲线。曲线反映了材料从弹性变形、屈服、强化、峰值到软化的全过程力学行为，如图 3~5 所示(图中应力表示压力)。

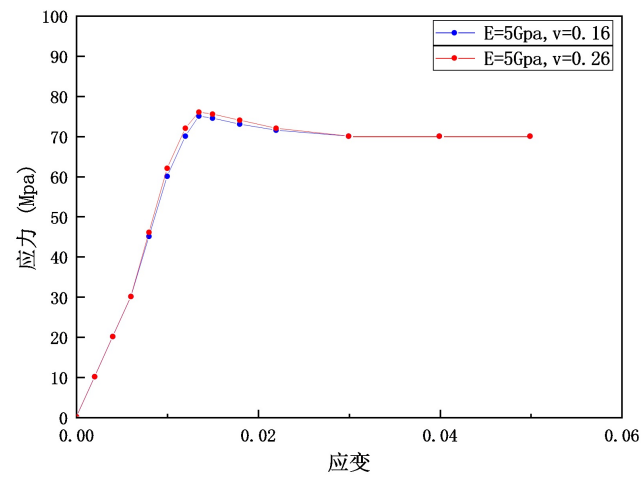


Figure 3. Stress-strain curves for different Poisson's ratios at $E = 5$ GPa
图 3. $E = 5$ GPa 不同泊松比应力 - 应变曲线

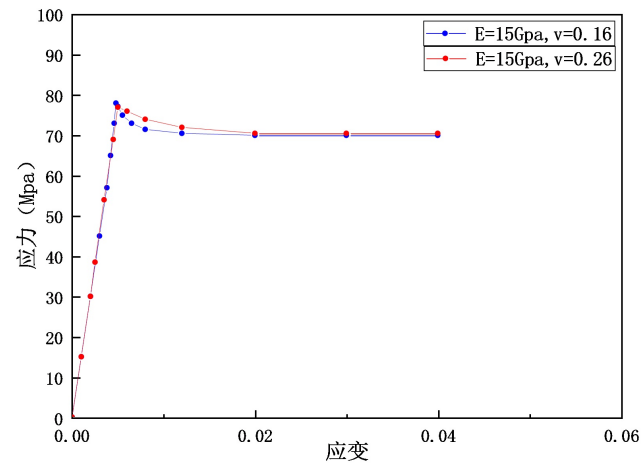


Figure 4. Stress-strain curves for different Poisson's ratios at $E = 15$ GPa
图 4. $E = 15$ GPa 不同泊松比应力 - 应变曲线

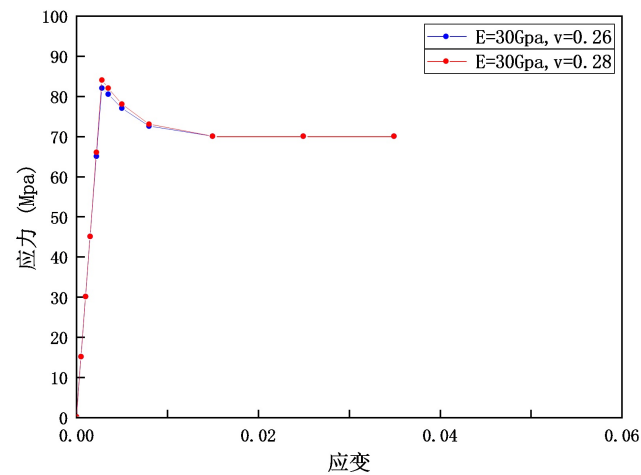


Figure 5. Stress-strain curves for different Poisson's ratios at $E = 30$ GPa
图 5. $E = 30$ GPa 不同泊松比应力 - 应变曲线

5. 参数结果分析

5.1. 不同应力 - 应变曲线计算分析

基于六组计算方案的数值模拟结果以及应力 - 应变曲线，为量化评价各方案的力学性能，引入以下指标：

1) 弹性模量：曲线初始线性段的斜率，计算公式为：

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (5)$$

其中， $\Delta\sigma$ 是应力变化量， $\Delta\varepsilon$ 是应变变化量，可以反映材料的刚性。

2) 峰值应力： $\sigma_{\max}$ ，曲线的最大值，表征材料的极限承载能力。

3) 韧性指数： W ，曲线下面积，计算公式为：

$$W = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad (6)$$

其中， ε_f 取应力降至残余强度时的应变值，反映材料破坏前吸收能量的能力。

4) 软化行为：峰值后应力下降的速率，下降越平缓表示延性越好，切线模量为：

$$E_{\tan} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (7)$$

5) 残余强度： σ_{res} ，曲线尾部稳定段的应力值，反映材料破坏后的残余承载能力。通过各项指标计算出来的各项数据如表 3 所示。

Table 3. Mechanical performance indicators of cement sheath under different parameter combinations
表 3. 不同参数组合下水泥环力学性能指标表

方案	E/GPa	ν	$\sigma_{\max}/\text{Mpa}$	$\varepsilon_{\max}$	$\sigma_{\text{res}}/\text{Mpa}$	$W/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$	软化行为
A1	5	0.16	75	0.0135	70	3.51	平缓软化
A2	5	0.26	76	0.0135	70	3.58	平缓软化
A3	15	0.16	78	0.0048	70	2.98	一般软化
A4	15	0.24	77	0.005	70.5	2.85	一般软化
A5	30	0.26	82	0.0028	70	2.12	明显软化
A6	30	0.28	84	0.0028	70	2.08	明显软化

5.2. 最优参数选择

综合对比各项指标，A2 组($E = 5 \text{ GPa}$, $\nu = 0.26$)在六组方案中表现出最优的力学韧性：

- 1) 峰值应力：76 MPa，满足强度要求，与 A1 组(75 MPa)基本相当；
- 2) 韧性指数：3.58 MJ/m³，为六组中最高；
- 3) 残余强度：70 MPa，保持良好承载能力；
- 4) 软化行为：平缓软化，延性特征显著。

A1 组性能与 A2 组较为接近，但 A2 组在韧性指数上更优，且在实际工程应用中，适当提高泊松比有助于增强水泥环的横向变形能力，改善界面胶结质量，降低微环隙产生风险。因此，在超深井高地应力与高内压工况下，推荐水泥环材料参数为弹性模量 5 GPa、泊松比 0.26。高弹模组(A5, A6)虽峰值应力略高，但韧性指数显著降低，且软化明显，不宜作为优选。

“低弹性模量、高泊松比”组合在改善水泥环力学完整性作用明显。弹性模量方面,苏东华等[16]建立的量化设计图版指出,降低弹性模量可避免水泥环塑性变形、提高屈服强度,与 A2 组软化段平缓、无应力骤降的规律一致;郭辛阳等[17]从反面印证,弹性模量越大越易引发界面微间隙和拉伸破坏;安峰辰等[8]的“主动拱效应”理论则从机理上说明,低弹性模量可增强地层承载能力,大幅减小套管与水泥环应力。

泊松比方面,陈思成等[18]的研究表明,高泊松比可提升水泥环水力封隔能力和抗窜槽性能;吴宇萌等[19]通过碳纤维与胶乳液协同增韧,将水泥弹性模量降至 5.8 GPa,与优选值 5 GPa 处于同一量级,证实其工程可行性。综上, A2 组参数与现有研究结果高度契合,且具备实际配方可实现性,可作为超深井油页岩地层固井水泥浆体系设计的可靠推荐值。

6. 结果与分析

6.1. 应力云图对比

图 6 给出了韧性水泥环(A2 组)与常规水泥环(A3 组)的环向应力云图(S22)。对比两图可直观发现, A2 组水泥环的应力分布具有显著优化特征: A3 组云图中,内壁高应力区呈狭窄的带状分布,且沿最小水平地应力方向($\theta = 90^\circ$ 及 270°)存在显著的局部应力集中,而 A2 组云图中,高应力区范围明显收窄,颜色梯度过渡平缓,内壁附近未出现急剧的应力梯度变化,表明低弹性模量(5 GPa)与较高泊松比(0.26)的匹配有效缓解了内壁处的“硬约束”效应,使应力分布更趋均匀。

从环向应力云图的直观对比即可判定: A2 组($E = 5 \text{ GPa}$, $\nu = 0.26$)通过低弹模、高泊松比的参数设计,有效缓解了内壁应力集中,降低了峰值应力幅值,并改善了壁厚方向的应力梯度,其应力场分布特征较常规 A3 组具有显著的优越性,是满足超深井压裂工况需求的优选材料参数组合。

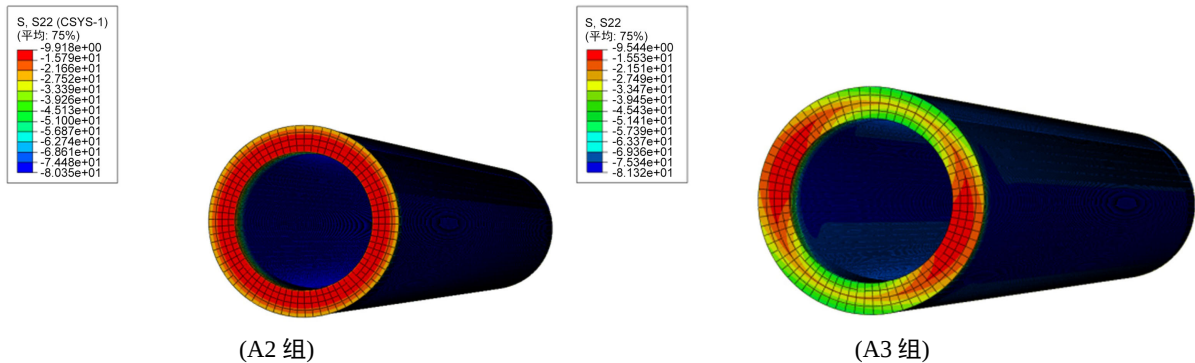


Figure 6. Hoop stress contour

图 6. 环向应力云图

6.2. 危险点定位

水泥环内壁的环向压应力是导致压溃失效的直接诱因。通过提取内壁不同圆周角度 θ 下的环向应力 $\sigma-\theta$,可准确识别最危险截面。图 7 展示了 A2 组与 A3 组在内壁处的 $\sigma-\theta$ 分布曲线。两组材料环向压应力的极值均出现在 $\theta = 90^\circ$ 及其轴对称方向附近: A2 组峰值应力为 -76.3 MPa (位于 $\theta = 90^\circ$), A3 组峰值应力为 -78.0 MPa (位于 $\theta = 90^\circ$)。该高应力区即为水泥环承受最大环向压缩载荷的危险点,也是工程设计中需重点关注的失效起始位置。

尽管两组在危险点的峰值应力数值接近,但 A2 组的 $\sigma-\theta$ 曲线整体形态较 A3 组更为平缓。A3 组应

力随角度变化剧烈,周向应力梯度较大,易引发局部应力集中与不均匀变形。而 A2 组应力波动范围很小,表明其沿周向的应力分布更趋均匀,可有效降低因局部高应力导致的压溃风险。这一改善归因于 A2 组较低的弹性模量(5 GPa)与较高的泊松比(0.26),使水泥环在非均匀地应力与高内压耦合作用下能够产生协调变形,缓解内壁处的刚度突变。

危险点($\theta=90^\circ$)处的环向应力直接决定了水泥环的压缩安全系数。尽管 A2 组与 A3 组峰值应力相当,但 A2 组凭借更优的应力均匀性和材料自身的高韧性(韧性指数 3.58 MJ/m^3),可在同等载荷水平下延缓裂纹萌生与扩展,并在达到峰值后展现出平稳的软化行为,避免突发性脆性破坏。综上,从应力分布特征与材料韧性储备两方面综合考量, A2 组($E=5 \text{ GPa}$, $\nu=0.26$)是超深井水泥环的优选方案。

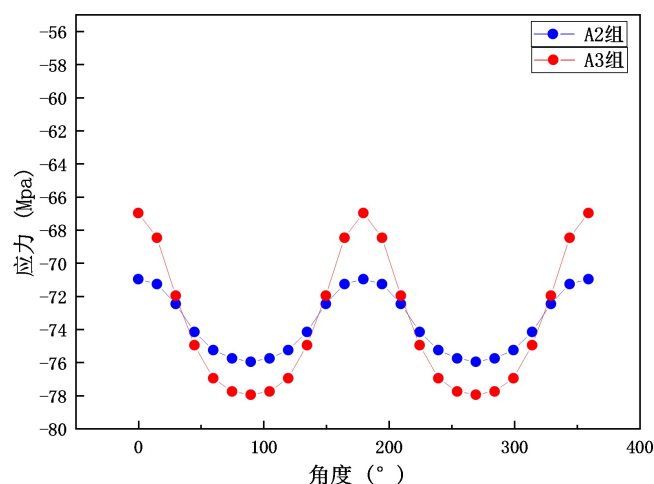


Figure 7. Angle curve of hoop stress on the inner wall
图 7. 内壁环向应力角度曲线

7. 结论

本文针对超深井油页岩地层高地应力与高内压耦合工况,基于 ABAQUS 混凝土损伤塑性模型,系统研究了弹性模量 5~30 GPa、泊松比 0.16~0.28 范围内 6 组参数组合下水泥环的力学响应,以峰值应力、韧性指数、残余强度及软化行为为评价指标优选材料参数,并通过应力云图、周向应力分布曲线验证工程可靠性。主要结论如下:

1) 综合对比 6 组方案, A2 组力学韧性最优。其韧性指数达 3.58 MJ/m^3 ,较 A3 组的 2.98 MJ/m^3 提高约 20.1%;峰值环向应力为 76 MPa,满足强度要求;残余强度保持 70 MPa;软化段平缓,无应力骤降现象,呈现显著的延性破坏特征。

2) 应力云图与内壁周向应力分布曲线表明,低弹性模量与高泊松比协同作用可显著改善水泥环应力均匀性。危险点均位于 $\theta=90^\circ$ (最小水平地应力方向), A2 组峰值应力较 A3 组降低约 2.2%; A2 组内壁环向应力周向波动仅 5.3 MPa,约为 A3 组(11.0 MPa)的 48%,有效缓解了非均匀地应力引起的弯曲附加应力,使截面环向应力趋于均匀分布,降低局部压溃风险。

3) 优选参数 $E=5 \text{ GPa}$ 、 $\nu=0.26$ 与现有弹韧性水泥浆配方可实现范围一致。有研究表明,碳纤维-胶乳复合体系可将弹性模量降至 5.8 GPa,与本文优选值处于同一量级,具备工程转化可行性。建议超深井油页岩地层固井水泥环采用该韧性材料参数,以在高地应力与高内压耦合作用下获得高抗压强度(76 MPa)、高韧性(3.58 MJ/m^3)及均匀应力分布的综合性能,保障水泥环长期密封完整性,为同类深井固井水泥浆体系设计提供理论依据。

基金项目

辽宁省科技计划联合计划(自然科学基金 - 博士科研启动项目), 编号: 2024-BSLH-113。

参考文献

- [1] 魏国齐, 郑雅丽, 邱小松, 等. 中国地下储气库地质理论与应用[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1519-1530.
- [2] 初纬, 沈吉云, 杨云飞, 等. 连续变化内压下套管-水泥环-围岩组合体微环隙计算[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 379-385.
- [3] 王黎松, 高宝奎, 胡天祥, 等. 考虑材料非线性的环空增压预测模型[J]. 石油学报, 2020, 41(2): 235-243.
- [4] 赵垒, 闫怡飞, 王鹏, 等. 气井生产过程中碳钢管柱 CO₂ 腐蚀规律[J]. 石油学报, 2019, 40(2): 232-239.
- [5] 钱肖峰. 西部工区超深井段固井封隔完整性保障技术研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2023.
- [6] 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.
- [7] 曾秦涛, 何霞, 张林锋, 等. 海上 9-5/8"套管-水泥环界面脱黏行为数值模拟[J]. 应用力学学报, 2026, 43(2): 376-386.
- [8] 安峰辰, 苗智博, 孟思炜, 等. 基于地层成拱效应的水泥环对套管应力影响规律研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 64-71.
- [9] 杨焕强, 王凯, 蔡萌, 等. 基于连续损伤力学的水泥环疲劳损伤规律[J]. 石油学报, 2025, 46(5): 977-993.
- [10] 石鲁杰. 页岩气水平井水泥环封隔能力评价研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [11] Wu, X., Li, Z., Hou, Z., Liu, J., Huang, S., Su, D., *et al.* (2024) Analytical Perspectives on Cement Sheath Integrity: A Comprehensive Review of Theoretical Research. *ACS Omega*, 9, 17741-17759.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00475>
- [12] 林元华, 邓宽海, 易浩, 等. 强交变热载荷下页岩气井水泥环完整性测试[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 81-88.
- [13] 周浪, 曾青松, 汪传磊, 等. 地下储气库注采井不同井段水泥环密封性能实验[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 104-108.
- [14] 胡志强, 杨进, 刘书杰, 等. 基于套管-水泥环-地层热固耦合作用的多层套管环空附加压力预测模型[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(8): 1824-1832.
- [15] 刘硕琼, 李德旗, 袁进平, 等. 页岩气井水泥环完整性研究[J]. 天然气工业, 2017, 37(7): 76-82.
- [16] 苏东华, 黄盛, 李早元, 等. 页岩油水平井压裂水泥环力学性能设计方法[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 798-805.
- [17] 郭辛阳, 宋雨媛, 步玉环, 等. 基于损伤力学变内压条件下水泥环密封完整性模拟[J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1425-1433.
- [18] 陈思成, 马思佳, 等. 注入井射孔段水泥环密封失效数值模拟研究[J]. 化工机械, 2024, 51(2): 252-259.
- [19] 吴宇萌, 许明标, 宋建建, 等. 碳纤维与胶乳液协同作用对固井水泥浆力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 253-258, 264.