

中文引用格式:王鹤远,冯福平,张健伟,等. 深层含夹矸组合煤岩水平井井壁失稳模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11): 122-130.

英文引用格式:WANG Heyuan, FENG Fuping, ZHANG Jianwei, et al. Simulation study on wellbore instability of horizontal wellbore in deep interbedded gangue combined coal rock[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 122-130.

深层含夹矸组合煤岩水平井井壁失稳模拟研究^{*}

王鹤远^{1,2}, 冯福平^{**1,2,3}教授, 张健伟^{1,2,3}副教授,

韩旭^{1,2,3}, 张宇昊^{1,2}, 杨冬临^{1,2}

(1 东北石油大学 提高油气采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;

2 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;

3 中国石油集团公司 油气藏改造重点实验室, 黑龙江 大庆 163318)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.1468

基金项目:国家科技重大专项(2025ZD1404205)。

【摘要】 为解决夹矸与煤岩物理力学性质差异导致的组合煤岩井壁失稳问题, 基于三轴压缩试验测定的煤岩及夹矸力学参数, 结合组合煤岩破坏准则与流固耦合理论方程, 建立深层含夹矸组合煤岩水平井井壁失稳数值模型。通过该模型模拟煤岩-夹矸组合形式对水平井井周坍塌压力的影响机制, 并分析接触面位置参数及倾角变化对井周坍塌压力分布的影响规律。研究结果表明: 煤岩与夹矸的矿物成分比例显著差异导致其接触面胶结强度薄弱, 煤岩试样因强度较低更易破碎; 物理力学性质差异及接触面弱胶结特性使得水平井钻遇不同组合煤岩时, 井周坍塌压力在接触面处呈现明显突变; 接触面位置变化影响煤岩与夹矸坍塌压力差值, 而倾角改变不仅调控井壁坍塌压力峰值, 还导致其极值位置发生迁移。

【关键词】 含夹矸组合煤岩; 接触面; 水平井; 井壁稳定性; 坍塌压力

Simulation study on wellbore instability of horizontal wellbore in deep interbedded gangue combined coal rock

WANG Heyuan^{1,2}, FENG Fuping^{1,2,3}, ZHANG Jianwei^{1,2,3}, HAN Xu^{1,2,3},

ZHANG Yuhao^{1,2}, YANG Donglin^{1,2}

(1 Key Laboratory of Ministry of Education of China on Enhanced Oil and Gas Recovery, Northeast

Petroleum University, Daqing Heilongjiang 163318, China; 2 State Key Laboratory of Continental

Shale Oil, Daqing Heilongjiang 163318, China; 3 Key Laboratory of Reservoir Stimulation,

China National Petroleum Corporation, Daqing Heilongjiang 163318, China)

Abstract: To address wellbore instability caused by differences in the physical-mechanical properties of coal-rock and gangue seams, this study established a numerical model for borehole collapse in deep horizontal wells with composite coal-rock layers. The model leveraged triaxial compression test data on coal-rock and gangue mechanics, integrating composite material failure criteria with poroelastic coupling

* 文章编号:1003-3033(2025)11-0122-09; 收稿日期:2025-03-13; 修稿日期:2025-06-12

** 通信作者:冯福平(1982—),男,河北唐山人,博士,教授,主要从事井筒完整性失效机制与评价方面的研究。E-mail: fengfuping2005@163.com。

equations. This model was used to simulate how coal-gangue configurations affect peripheral collapse pressure in horizontal wells and analyze the influence of interface positioning and dip angles on collapse pressure distribution. The results show that significant differences in mineral composition ratios between coal and gangue create compromised cementation strength at interfaces, where coal samples fracture more readily due to lower strength. Disparities in physical-mechanical properties and weak interfacial bonding cause pronounced pressure discontinuity at contacts when drilling traverses varied composites. While interface position dictates coal-gangue collapse pressure differentials, dip angle variations not only modulate peak collapse pressure magnitudes but also trigger migration of extreme-value locations along the borehole wall.

Keywords: interbedded gangue combined coal rock; contact surface; horizontal well; wellbore stability; collapse pressure

0 引言

深层煤岩气作为当今全球非常规能源开发的重点领域,尽管具有巨大的能源潜力,但井壁失稳问题突出,始终制约着其安全高效开发^[1-2]。在深层煤岩气井钻井过程中,复杂的地层岩性使得井壁稳定性受到多因素耦合影响^[3-4]。为实现长水平井段的安全钻进,必须确保煤岩、夹矸及其接触界面在整个钻完井周期内保持长期稳定^[5]。因此,深入揭示深层含夹矸组合煤岩水平井井壁失稳机制,对保障煤岩气资源安全高效开发具有重要理论价值。

针对夹矸-煤岩组合体力学性能,目前已积累了较为丰富的研究成果^[6-7]。研究表明:组合煤岩的力学特性与其结构构型密切相关,岩石层厚度的增加会降低煤岩组分比例,进而减少内部缺陷分布密度,使得组合煤岩强度介于纯煤与岩石之间^[8-9]。同时,接触面力学特性对组合煤岩力学行为具有显著影响^[10-11]。樊玉峰等^[12]基于端面效应理论构建了组合煤岩本构模型,系统阐述了煤岩组分力学特性与组合构型间的关联机制。解北京等^[13]通过不同静水压与应变率条件下的对比试验,揭示了原煤、原生及人工组合煤岩的破坏演化特征,发现原生界面在相同扰动条件下更易诱发裂纹扩展并形成宏观破裂面。部分研究指出,组合煤岩的破坏模式受控于结构面空间方位参数,当结构面倾角接近 45°时,试样易沿接触面发生剪切滑移破坏^[14-15]。郑建伟等^[16]通过层位调控试验发现,随着结构面位置下移,岩石单元破坏程度呈递增趋势,而煤体损伤则逐步缓解。

在深层煤层井壁失稳机制研究方面^[17-18],屈平等^[19]采用三维离散元方法揭示了煤层水平井稳定性控制特征:当面割理走向与井眼延伸方向平行、割

理密度较大、井径扩展且井底压力不足时,井壁稳定性显著降低,其研究进一步论证了孔隙压力变化对割理应力场的调控作用,明确了孔压波动是诱发失稳的主控因素,而割理系统则是失稳时效性的内在诱因^[20]。ERFAN 等^[21]研发的双渗透耦合模型表明:钻井方位角在 45~60°时可获得最佳稳定效果。张立松等^[22]基于 Hoek-Brown 准则构建的坍塌压力弹塑性模型显示,地质强度指标、单轴抗压强度、塑性区半径及地应力非均匀系数共同制约着坍塌压力演化。严俊涛等^[23]针对泥煤互层段的系统研究表明,虽煤层稳定性是控制要素,但泥岩力学特性最终主导着复合地层的整体稳定性。

尽管现有研究采用多尺度方法揭示了含夹矸组合煤岩的力学响应特征,但当前成果多聚焦于组合煤岩本身的力学特性,且局限于浅层采矿尺度(宽度>5 m,深度 500 m 左右),而深层煤岩气开发涉及的井筒尺寸(井径<0.5 m,深度>2 000 m)效应与应力场重构机制存在显著差异,导致现有理论对深层应力环境下组合煤岩失稳行为的解释力不足。同时,现有研究主要关注煤岩本体割理系统的影响,尚未形成对深层组合煤岩体失稳机制的系统性认识,特别是含夹矸组合结构的井壁失稳机制仍有待深入探究。

鉴于此,笔者拟通过 X 射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)矿物分析和三轴压缩试验,系统表征深层煤岩及夹矸的组分特征与力学行为,进而揭示含夹矸组合煤岩的失稳诱因;基于数值模拟方法,定量解析组合构型、接触面空间参数对坍塌压力的影响,以期对深层含夹矸煤岩井壁稳定性控制提供理论依据和技术支撑。

1 深层组合煤岩水平井井筒位置分析

受沉积年代与成煤地质环境的影响,煤层常发

育单层或多层夹矸层系,导致原始均质煤体演化为组合煤层结构(如煤-矸互层、煤-矸-煤等)。当水平井眼穿越此类复合结构时(图1)^[24],其复合特征更易引发井壁失稳现象。

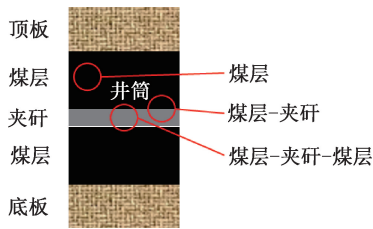


图1 组合煤层结构水平井井筒

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal wellbore of combined coal seam structure

钻井扰动诱发井周应力场重构,导致围岩产生非对称应力分布特征。在穿层钻进复合煤岩体时,煤岩-夹矸力学参数的差异性显著影响井壁稳定性。含夹矸复合结构中井筒稳定性的关键控制因素包括:井轨迹与夹矸接触面的交切关系、接触面在井周方位的空间位置以及接触面与最大周向应力的几何关系。当周向主应力方向与结构接触面呈现非正交关系时,接触面剪切滑移将成为深部复合煤岩失稳的主导模式,此机制显著区别于常规均质岩层的井壁失稳特征。

2 煤岩及夹矸物理力学性能分析

2.1 煤岩及夹矸矿物成分分析

文中样品来自鄂尔多斯东部深层煤层。将现场岩样干燥后使用研钵研磨成细粉,采用压片法,取过325目筛的细粉末(约100mg)制作样品。试验采用TZL-30FX衍射仪,扫描角度为5~70°,速率为2min,步径为0.02°/步。每种样品进行10组,多次试验避免偶然性。通过XRD试验测试煤岩和夹矸的全岩及黏土矿物成分,以评估现场煤岩和夹矸的矿物成分差异。

全岩矿物分析表明:该地区煤岩和夹矸的基本矿物成分相同,主要包括方解石、石英和黏土矿物。煤岩中,方解石、石英和黏土矿物的平均比例分别为43.12%、21.67%和8.26%;夹矸中,这3种矿物的平均比例分别为30.17%、18.94%和40.9%。黏土矿物测定结果表明:该地区煤岩和夹矸均不含水化膨胀性较强的蒙脱石,煤岩主要黏土矿物为高岭石,占比62.3%;其次为伊利石、绿泥石和伊/蒙混层,分别占比11.3%、12.7%和13.7%。夹矸的主要黏

土矿物为高岭石,占比44.4%;其次为伊利石,占比30.6%;绿泥石和伊/蒙混层分别占比14.2%和10.8%。

由此可见:煤岩和夹矸的矿物成分比例明显不同。煤岩中方解石和石英的比例较高,而夹矸中黏土矿物的比例较高,尤其是伊利石的比例显著高于煤岩。这些成分比例的差异导致煤岩和夹矸在物理和化学性质上存在显著区别,使得煤岩和夹矸的接触面无法良好胶结,从而在接触面位置更容易出现井壁失稳现象^[25-26]。

2.2 煤岩及夹矸力学性能分析

为获取岩石力学特性参数,采用实际井下煤岩和夹矸岩心加工标准圆柱试样各9个进行三轴压缩试验。整个试验过程均采用轴向应变控制,加载速率均设置为匀速1kN/s,三轴试验围压分别设置为5、10和20MPa。图2展示了试验得到的煤岩和夹矸在不同围压下的抗压强度。

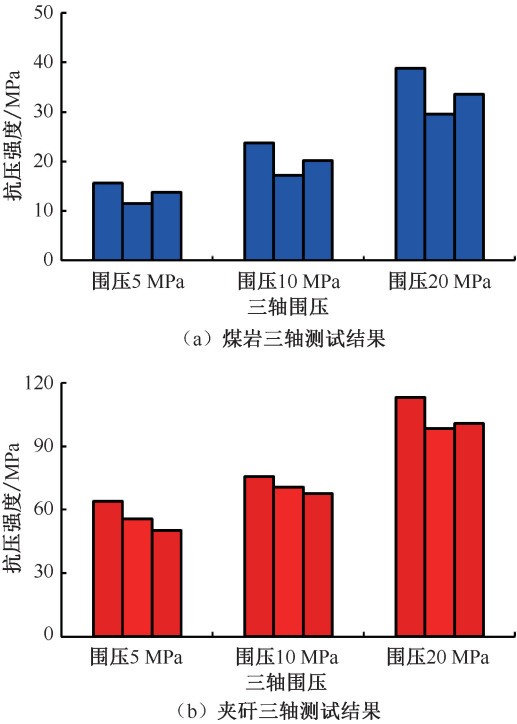
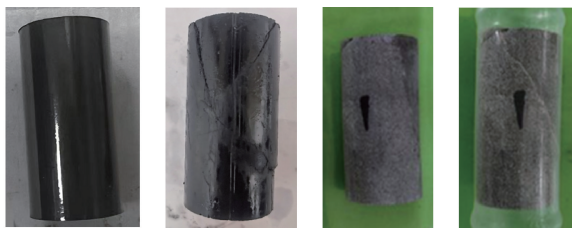


图2 煤岩和夹矸三轴测试结果

Fig. 2 Coal rock and gangue triaxial test results

由图2可知:随着围压升高,煤岩与夹矸的抗压强度均呈现升高趋势。煤岩在围压5和20MPa时的抗压强度分别为11.46~15.67MPa和29.515~38.874MPa,均低于夹矸的50.354~63.942MPa和98.277~113.074MPa。这表明:相同应力条件下,煤岩强度更低更容易出现井壁失稳现象。根据试验结果,煤岩内摩擦角为8.51°,黏聚力为2.92MPa;

夹矸内摩擦角为 30.69° , 黏聚力为 11.633 MPa 。试验结果可为后期数值模拟提供基础参数。图 3 显示了三轴加载破坏后的部分试样, 煤岩试样呈深黑色, 加载后破碎程度高, 形成了多条小裂缝; 而夹矸试样呈青灰色, 在三轴加载后并未形成很多的小碎块, 明显沿主裂缝劈裂破坏。由此可见: 夹矸强度更高、构造更紧密, 相对而言同样地质条件下煤层更容易出现井壁失稳的现象。



(a) 煤岩试验前 (b) 煤岩试验后 (c) 夹矸试验前 (d) 夹矸试验后

图 3 煤岩及夹矸试样破坏形态

Fig. 3 Damage patterns of coal rock and gangue specimens

3 井周组合煤岩水平井井壁失稳数值模拟

3.1 理论模型

1) 本构方程及破坏准则。假设组合煤岩初始阶段为完全弹性体, 根据胡克定律可推导出弹性应力与弹性应变的方程:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}, \gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx}, \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_{ij} 、 γ_{ij} 为应变分量 (i, j 取方向矢量 x, y, z); E 为弹性模量, MPa ; G 为剪切模量, MPa ; μ 为泊松比; σ_{ij} 、 τ_{ij} 为应力分量, MPa 。

方程可写为矩阵形式:

$$\sigma = D\varepsilon \quad (2)$$

式中 D 为弹性本构矩阵。

模型采用 Mohr-Coulomb 准则判断岩石是否破坏, 该准则确定了材料剪切破坏极限与黏聚力和内摩擦角的关系:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + C \quad (3)$$

式中: τ 为剪切面上的剪应力, MPa ; σ 为剪切面上的

正应力, MPa ; C 为岩石基质初始黏聚力, MPa ; φ 为岩石基质初始内摩擦角, $(^\circ)$ 。

应力分量形式可写为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

式中: σ_1 为破坏时的最大主应力, MPa ; σ_3 为破坏时的最小主应力, MPa 。

2) 流固耦合引入基本方程。根据有效应力原理, 岩石总应力由孔隙流体压力及骨架承受有效应力叠加组成, 即:

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + p\delta_{ij} \quad (5)$$

式中: σ_{ij} 为总应力, MPa ; σ'_{ij} 为岩石骨架有效应力, MPa ; p 为地层压力, MPa ; δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

根据 Biot 系数修正有效应力, 可得到储层骨架有效应力, 表示为:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (6)$$

式中 α 为流体压力作用在岩石骨架的有效系数。

钻井过程中流体满足单向流介质渗流的达西公式:

$$u = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p \quad (7)$$

式中: k 为多孔介质的渗透率, μm^2 ; μ 为流体的动力黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; ∇p 为压力差, MPa ; u 为流速, m/s 。

假设岩体为连续介质, 近似认为微元体各个面的应力分布是均匀的, 则可得到平衡方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + F_y = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + F_z = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其张量形式表达式为:

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0 \quad (9)$$

式中 F_i 为作用在微元体上的体力分量, MPa 。

结合式(5), 即流固耦合平衡方程的张量形式写为:

$$\sigma_{ij,j} - (\alpha \delta_{ij} p)_j + F_i = 0 \quad (10)$$

3.2 井壁失稳数值模拟模型建立

使用有限元软件求解含夹矸组合煤岩水平井井壁失稳数值模拟模型。模型中正方形地层的宽度为 0.5 m , 中心井眼的半径为 0.1 m 。设定纵向为最大水平主应力 σ_H 方向, 横向为最小水平主应力 σ_h 方向, 井筒右侧为井周角 0° , 沿逆时针方向井周角逐渐增大。井周周向应力为沿井筒切线方向, 径向应

力为井眼中心指向井壁方向。分别对煤岩和夹矸设定材料参数,分析不同组合形式及接触面产状对井周围岩坍塌压力的影响,具体参数见表 1。

表 1 模型参数

参数	数值
最大水平地应力/MPa	64.83
最小水平地应力/MPa	54.75
上覆岩层压力/MPa	69.24
地层压力/MPa	41.16
煤岩密度/(g·cm ³)	1.54
煤岩渗透率/μm ²	0.047×10 ⁻³
煤岩孔隙度/%	6.09
煤岩黏聚力/MPa	2.92
煤岩内摩擦角/(°)	8.51
煤岩杨氏模量/GPa	2.8
煤岩泊松比	0.31
夹矸密度/(g·cm ³)	2.53
夹矸渗透率/μm ²	0.012×10 ⁻³
夹矸孔隙度/%	4.8
夹矸黏聚力/MPa	11.633
夹矸内摩擦角/(°)	30.69
夹矸杨氏模量/GPa	7.3
夹矸泊松比	0.16
接触面黏聚力/MPa	0
钻井液黏度/(mPa·s)	20

3.3 模拟结果及分析

3.3.1 煤岩及夹矸组合形式的影响

煤岩及夹矸组合形式的不同影响了水平井井周围岩坍塌压力。根据水平井段钻遇的煤层结构选择不同的组合形式研究其对水平井井周围岩失稳的影响。具体组合形式如图 4 所示。

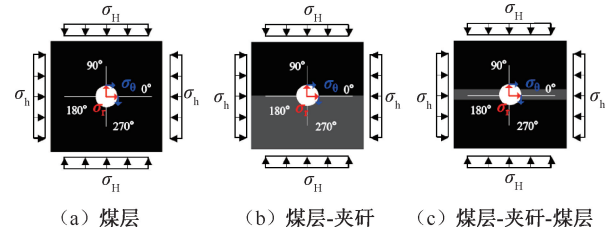


图 4 煤层及夹矸组合形式

根据室内试验结果,设定煤层和夹矸密度、渗透率、孔隙度、黏聚力、内摩擦角、杨氏模量及泊松比等材料参数。2 种材料之间的接触面为直接拼接形式,黏聚力设定为 0^[27]。根据表 1 的参数设定地应力及孔隙压力等边界条件,图 5 展示了不同类型煤岩及夹矸组合形式对井周坍塌压力的影响。

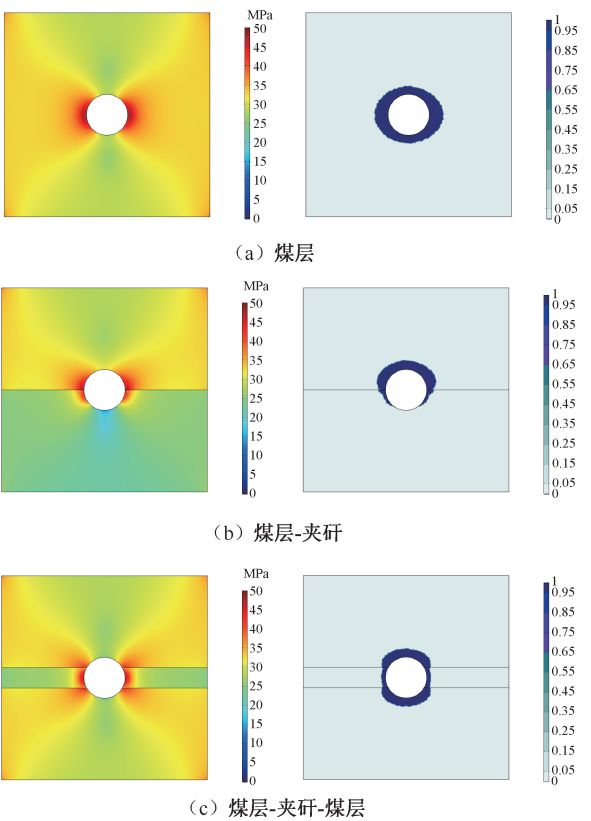


图 5 不同类型煤岩及夹矸组合形式对井周坍塌压力的影响

Fig.5 Influence of different types of coal rock and gangue combination forms on collapse pressure around wells

图 5 显示,由于煤层强度较低,水平井段在钻遇煤层时坍塌压力相对较高,坍塌区域相对更大;煤层与夹矸在力学性质的差异以及接触面的弱胶结性,导致钻遇不同类型组合煤岩时井周坍塌压力具有明显差异。

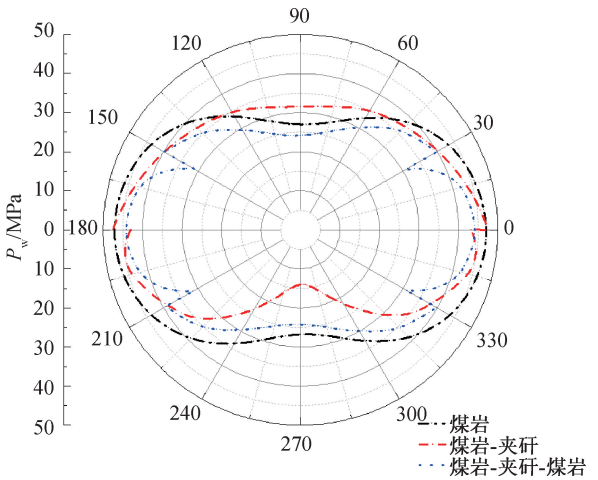


图 6 不同类型组合煤岩井壁坍塌压力
Fig.6 Collapsing pressure of well wall in different types of combined coal rock

提取井壁上坍塌压力计算结果进行井壁稳定性分析,由图 6 可知:在纯煤岩地层中,井壁坍塌压力分布特征与均质地层具有相似规律;在井周最小水平主应力方向(0° 和 180°)达到峰值 47.14 MPa,而在最大水平主应力方向(90° 和 270°)呈现最小值 26.8 MPa。

当钻遇煤岩-夹矸复合地层时,由于材料力学特性的显著差异,井周形成明显的坍塌压力分异现象。以煤岩-夹矸组合地层为例, 0° 方位角处煤岩坍塌压力为 47.57 MPa,相邻夹矸段则降至 43.2 MPa,接触面处形成 4.37 MPa 的应力梯度。值得注意的是,在不同结构组合中接触面应力差值呈现显著差异:煤岩-夹矸-煤岩型复合地层接触面处,煤岩与夹矸坍塌压力分别为 39.77 和 31.33 MPa,差值扩大至 8.44 MPa。表明接触面空间位置可能成为控制井壁失稳的关键因素。

进一步研究发现,组合结构的失稳机制与周向应力-接触面空间关系密切相关。在煤岩-夹矸组合地层中,当 0° 方位角处周向应力与煤岩-夹矸接触面正交时,接触面未发生相对位移现象,此时煤岩段坍塌压力与纯煤岩地层值(47.14 MPa)一致,夹矸段则保持其固有强度特征。然而,当周向应力与接触面呈一定夹角时,接触面处可能诱发剪切滑移破坏,显著改变局部应力分布模式^[15]。

3.3.2 煤岩与夹矸接触面位置的影响

煤岩与夹矸接触面位置的不同影响井周周向应力和接触面的夹角,进而影响水平井井周围岩的坍塌压力。具体的接触面位置参如图 7 所示,图 8 展示了不同煤岩与夹矸接触面位置对井周坍塌压力的影响。

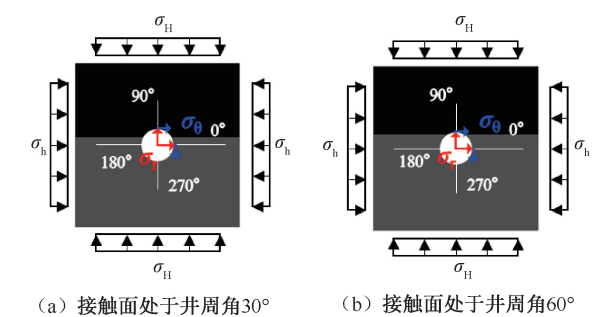


图 7 不同煤岩与夹矸接触面位置

Fig. 7 Location of contact surface between different coal rocks and gangue

由图 5b 可知:当接触面处于井周角 0° 时,周向应力与接触面相互垂直,不存在接触面相对滑移,因此,煤岩与夹矸的坍塌压力差异较小。而图 8 表明:

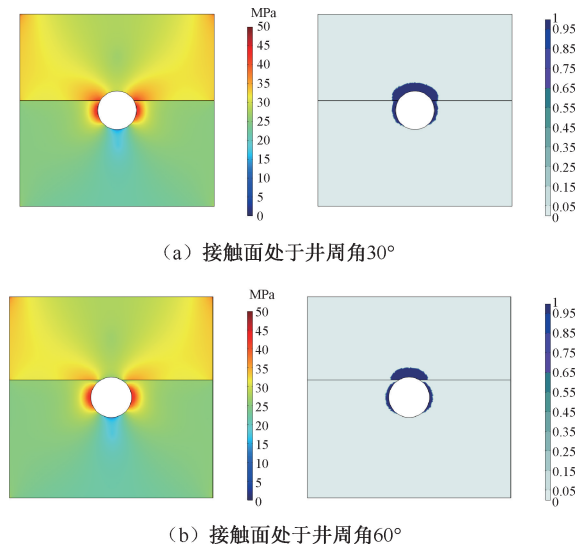


图 8 不同煤岩与夹矸接触面位置对井周坍塌压力的影响

Fig. 8 Influence of different locations of contact surface between coal rock and gangue on collapse pressure around wells

当接触面位于井周角 30° 时,周向应力与接触面形成 30° 的夹角,容易沿接触面出现剪切破坏情况,导致煤岩与夹矸的坍塌压力差异较大。

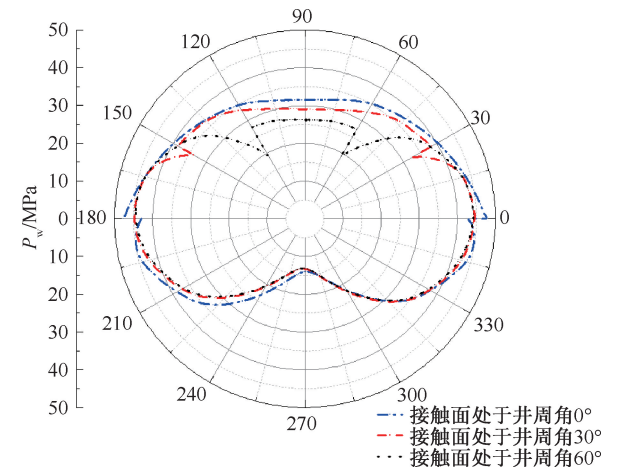


图 9 不同煤岩与夹矸接触面位置组合煤岩井壁坍塌压力

Fig. 9 Collapsing pressure of well wall of coal rock with different locations of contact surface between coal rock and gangue

图 9 显示了煤岩与夹矸接触面处于不同位置时井眼周围坍塌压力分布情况。接触面位于井周角 0° 时,周向应力与接触面相垂直,接触面处煤岩与夹矸的坍塌压力分别为 47.57 和 43.2 MPa,相差 4.37 MPa;接触面位于井周角 30° 时,周向应力与接触面夹角为 30° ,接触面处煤岩与夹矸的坍塌压力分别

为 38.41 和 32.87 MPa,相差 5.54 MPa;接触面位于井周角 60°时,周向应力与接触面夹角为 60°,接触面处煤岩与夹矸的坍塌压力分别为 27.29 和 19.05 MPa,相差 8.24 MPa。随着接触面相对于井眼轴线位置升高,周向应力与接触面形成的夹角越大,接触面处煤岩与夹矸的坍塌压力差值也增大,表明井周围岩更容易沿接触面出现相对滑移。不论接触面位置如何,井壁坍塌压力的最大值始终出现在井周最小水平主应力方向,表明接触面位置对井壁坍塌压力最大值方位无明显影响。

3.3.3 煤岩与夹矸接触面倾角的影响

煤岩与夹矸接触面倾角的不同影响了水平井井周围岩的坍塌压力。具体接触面倾角如图 10 所示,图 11 展示了不同煤岩与夹矸接触面倾角对井周坍塌压力的影响,随着煤岩与夹矸接触面倾角的改变,井壁坍塌压力的最大值并不总是出现在井周最小水平主应力方向,而是随着接触面倾角的变化而变化,这与常规井壁失稳情况有所不同。

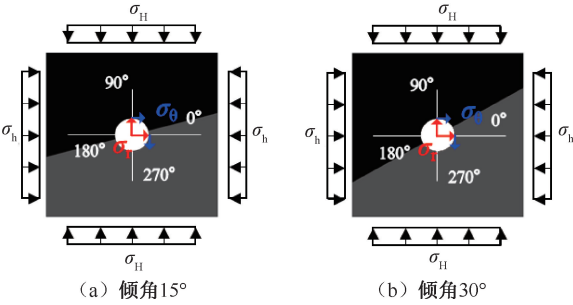


图 10 不同煤岩与夹矸接触面倾角
Fig. 10 Inclination angle of different coal rock and gangue contact surface

由图 12 可知:当接触面倾角为 0°时,井壁坍塌压力的最大值位于最小水平主应力方向即接触面处,为 47.57 MPa,煤岩与夹矸的坍塌压力差值为 4.37 MPa;倾角为 15°时,最大坍塌压力位于井周角 195°处,为 42.64 MPa,接触面处煤岩与夹矸的坍塌压力差值为 4.1 MPa;倾角为 30°时,坍塌压力最大值出现在井周角 180°处,最大坍塌压力值为 45.8 MPa,接触面处的坍塌压力差值为 4.46 MPa。

由于接触面倾角的改变并不影响周向应力与接触面的夹角,因此,随着接触面倾角的增大,接触面处煤岩与夹矸的坍塌压力差值变化不大。但随着接触面倾角的改变,井壁坍塌压力的最大值及其所处位置发生变化。由于接触面处岩石的力学性质的差异,出现接触面倾角为 15°时,井周角 195°处坍塌压力大于井周角 180°处的情况。因此,对于深层含夹

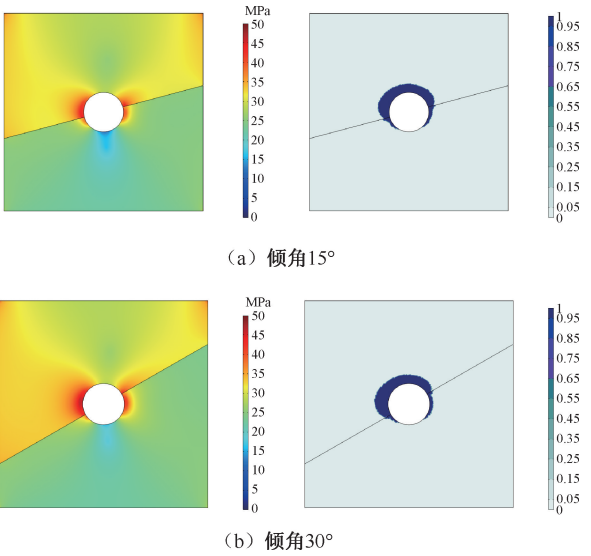


图 11 不同煤岩与夹矸接触面倾角对井周坍塌压力的影响
Fig. 11 Influence of different inclination angles of contact surface on collapse pressure around wells

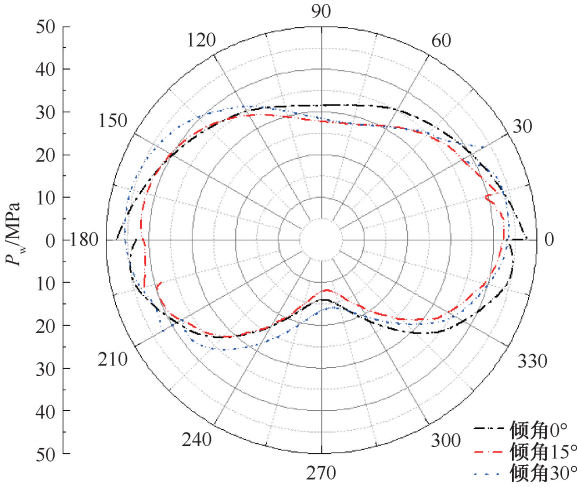


图 12 不同煤岩与夹矸接触面倾角组合煤岩井壁坍塌压力
Fig. 12 Wellbore collapse pressure of combined coal-rock under different contact interface inclination angles between coal-Rock and gangue

矸组合煤岩,不能仅以常规最小水平主应力方向的坍塌压力作为计算依据,应根据实际地质资料计算井周围岩的坍塌压力,并提取最大坍塌压力点,从而指导现场组合煤岩水平井段的安全钻进。

4 结 论

1) 煤岩和夹矸的矿物成分比例明显不同,夹矸中黏土矿物,特别是伊利石含量显著高于煤岩。此

外,煤岩试样强度较低,加载后破碎程度更高。这些矿物成分和力学性质差异导致煤岩和夹矸的接触面胶结不良,使得在接触面位置更容易出现井壁失稳现象。

2) 煤岩与夹矸力学性质的差异以及接触面的弱胶结性导致钻遇不同类型组合煤岩时,井周坍塌压力在接触面处产生明显分界面。接触面的位置会影响周向应力与接触面之间的夹角,使得井周围岩更容易

沿接触面出现相对滑移,导致煤岩和夹矸的坍塌压力差值增大。同时,接触面倾角的改变会使得井壁坍塌压力的最大值及其所处位置发生变化。

3) 由于煤岩与夹矸的组合形式、接触面的位置及倾角会改变井周围岩的坍塌压力最大值及其所处位置,因此,建议根据实际的组合煤岩情况进行井周坍塌压力计算,并以此提取最大坍塌压力点,确保现场水平井钻遇组合煤岩时的安全钻进。

参 考 文 献

[1] XU Fengyin, HOU Wei, XIONG Xianyue, et al. The status and development strategy of coalbed methane industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 765-783.

[2] ZHANG Yongping, YANG Yanhui, SHAO Guoliang, et al. Problems in the development of high-rank CBM horizontal wells in the Fanzhuang-Zhengzhuang block in the Qinshui basin and countermeasures[J]. Natural Gas Industry B, 2017, 4(6): 423-431.

[3] WANG Heyuan, FENG Fuping, ZHANG Jianwei, et al. Impact of rock strength degradation by fluid intrusion on borehole stability in shale [J]. Natural Gas Industry B, 2024, 11(6): 553-568.

[4] LI Hangyu, LAU Honchuan, HUANG Shan. China's coalbed methane development: a review of the challenges and opportunities in subsurface and surface engineering[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 166: 621-635.

[5] GAO Deli, BI Yansen, XIAN Baoan. Technical advances in well type and drilling & completion for high-efficient development of coalbed methane in China[J]. Natural Gas Industry B, 2022, 9(6): 561-577.

[6] FENG Fuping, WANG Heyuan, HAN Xu, et al. Dynamic coupling mechanism of shale drilling fluid invasion depth, fracture width, and rock strength[J]. Physics of Fluids, 2025, 37: DOI: 10.1063/5.0271691.

[7] 王在明,陈金霞,沈园园,等. JN1H 井煤岩气长水平段钻井井壁稳定技术[J]. 钻井液与完井液, 2023, 40(3): 356-362.

[7] WANG Zaiming, CHEN Jinxia, SHEN Yuanyuan, et al. Borehole wall stabilization technology for drilling the long horizontal section coal rock gas well JN1H[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2023, 40(3): 356-362.

[8] 肖晓春,樊玉峰,吴迪,等. 组合煤岩力学性质与声-电荷信号关系研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(2): 126-132.

[8] XIAO Xiaochun, FAN Yufeng, WU Di, et al. Study on relationship between mechanical properties and acoustic emission-charge signals of combined coal-rock[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(2): 126-132.

[9] 陆菜平. 组合煤岩的强度弱化减冲原理及其应用[D]. 徐州:中国矿业大学, 2008.

[9] LU Caiping. Intensity weakening theory for rock burst of compound coal-rock and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.

[10] SHAN Tiancheng, LI Zhonghui, ZHANG Xin, et al. Pressure stimulated current in progressive failure process of combined coal-rock under uniaxial compression: Response and mechanism[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2024, 34(2): 227-243.

[11] 张晨阳. 底煤厚度对巷道底板冲击启动的影响规律研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院, 2018.

[11] ZHANG Chenyang. Research of the influence laws of bottom coal thickness on roadway floor burst start-up[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.

[12] 樊玉峰,肖晓春,丁鑫,等. 岩煤分界面力学性质对组合煤岩力学行为影响机制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1 487-1 501.

[12] FAN Yufeng, XIAO Xiaochun, DING Xin, et al. Influence mechanism of contact surface mechanical properties on mechanical behavior of coal rock combination[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1 487-1 501.

[13] 解北京,栾铮,刘天乐,等. 静水压下原生组合煤岩动力学破坏特征[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2 153-2 167.

[13] XIE Beijing, LUAN Zheng, LIU Tianle, et al. Dynamic failure characteristics of primary coal-rock combination under hydrostatic pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2 153-2 167.

[14] 马智会,马智勇,潘荣锟,等. 三维静载与循环冲击共同作用下组合煤岩体力学特性试验研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(8): 58-67.

[14] MA Zhihui, MA Zhiyong, PAN Rongkun, et al. Experimental study on mechanical properties of coal-rock combined body subjected to combined action of three-dimensional static load and cyclic impact[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(8): 58-67.

- [15] 彭岩岩, 酆亦凡, 余虎, 等. 基于真三轴卸载试验不同倾角组合煤岩力学特性研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(2): DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20231222.001.
PENG Yanyan, LI Yifan, YU Hu, et al. Mechanical properties of coal and rock with different dip angles based on true triaxial unloading test[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(2): DOI: 10.13532/jjmsce.cn10-1638/td.20231222.001.
- [16] 郑建伟, 张修峰, 鞠文君, 等. 层面位置对煤岩组合体动态破坏特性影响规律研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 97-105.
ZHENG Jianwei, ZHANG Xiufeng, JU Wenjun, et al. Influencing analysis of bedding plane location on the dynamic failure characteristics of coal-rock combinations[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 97-105.
- [17] WANG Shugang, DEREK E, LIU Jishan. Permeability evolution during progressive deformation of intact coal and implications for instability in underground coal seams[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 58: 34-45.
- [18] STEVEN A K, KRAMER D L, MICHAEL K. A numerical study on optimization of multilateral horizontal wellbore patterns for coalbed methane production in Southern Shanxi Province, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(4): 306-317.
- [19] 屈平, 申瑞臣, 付利, 等. 三维离散元在煤层水平井井壁稳定中的应用[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 1-5.
QU Ping, SHEN Ruichen, FU Li, et al. Application of three-dimensional discrete elements in the stabilization of coal seam horizontal well walls[J]. Journal of Petroleum, 2011, 32(1): 1-5.
- [20] QU Ping, SHEN Ruichen, LI Fu, et al. Time delay effect due to pore pressure changes and existence of cleats on borehole stability in coal seam[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 85(2): 212-218.
- [21] ERFAN S, QU Qingdong, AMINOSSADATI S M, et al. Horizontal borehole azimuth optimization for enhanced stability and coal seam gas production[J]. Rock Mechanics Bulletin, 2024, 3(1): DOI: 10.1016/j.rockmb.2023.100100.
- [22] ZHANG Lisong, YAN Xiangzhen, YANG Xiujuan, et al. An elastoplastic model of collapse pressure for deep coal seam drilling based on Hoek-Brown criterion related to drilling fluid loss to reservoir[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 134: 205-213.
- [23] 严俊涛, 孟英峰, 李皋, 等. 泥煤互层段井壁稳定分析新方法[J]. 钻采工艺, 2012, 35(4): 19-21.
YAN Juntao, MENG Yingfeng, LI Gao, et al. A new method for well wall stability analysis of peat interbedded sections[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(4): 19-21.
- [24] 王岗, 潘一山, 肖晓春, 等. 组合煤岩体冲击倾向性及破坏特征的电荷规律试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(7): 135-140.
WANG Gang, PAN Yishan, XIAO Xiaochun, et al. Experimental study on charge law of coal-rock bodies rock burst tendency and failure characteristics[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(7): 135-140.
- [25] 杜锋, 王凯, 孙加智, 等. 单轴压缩下不同倾角煤岩组合体力学特性及破坏特征[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6): 136-145.
DU Feng, WANG Kai, SUN Jiazhi, et al. Mechanical properties and failure characteristics of coal rock combinations with different inclination angles under uniaxial compression[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 136-145.
- [26] 伍永平, 闫壮壮, 罗生虎, 等. 煤岩组合体应力传递与强度特征倾角效应[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 105-116.
WU Yongping, YAN Zhuangzhuang, LUO Shenghu, et al. Dip effect of stress transfer and structural instability mechanism of coal-rock combination[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 105-116.
- [27] 张恒. 煤岩组合结构破坏失稳的卸荷机制及前兆规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
ZHANG Heng. Research on unloading mechanism and precursory laws of failure and instability of coal-rock parting compound structure[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2021.



作者简介: 王鹤远 (1996—), 男, 河南驻马店人, 博士研究生, 主要研究方向为岩石力学、井壁稳定性等。E-mail: 17719148589@163.com。