

井壁破裂与内部应变状态机理分析*

胡 锐¹, 贾晓芬^{1,2}, 赵佰亭³, 兰世豪³, 李德权¹

- (1. 安徽理工大学 人工智能学院, 安徽 淮南 232001;
2. 安徽理工大学 省部共建深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001;
3. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为研究立井井壁破裂与内部应变之间的相互规律, 搭建井壁实物模型以模拟井壁受力破裂过程和状态, 利用分布式光纤技术对井壁内部应变进行监测, 并分别从应力和应变多角度进行深入分析, 结果表明: 对于应变状态, 当施加应力增大, 井壁应变程度也随之增大, 应变极大值所对应的井壁位置, 其应变程度在范围内达到最大, 破裂风险也就最高; 对于应力作用, 不同应力下井壁应变最大值与最小值之间的偏差度越大, 井壁稳定性越差, 越容易发生破裂; 分析了应力、应变二者相互关联性, 拟合各方向角所对应的井壁位置应变变化的线性方程, 变化率数值越大, 井壁应变增长速度就越快, 当应变值超过所能承受极限时, 井壁会更容易发生破裂; 通过对井壁应变数据监测, 分析了应变差值、偏差度和应变变化率, 结合 Lamé 公式, 建立了井壁应变破裂关系模型, 为井壁破裂预警提供了新方案。

关键词: 立井井壁; 应力-应变; 井壁应力; 线性拟合

中图分类号: TD262 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.440171

Mechanism Analysis of Wellbore Fracture and Internal Strain State

HU Rui¹, JIA Xiaofen^{1,2}, ZHAO Baiting³, LAN Shihao³, LI Dequan¹

- (1. *School of Artificial Intelligence, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R.China;*
2. *State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R.China;*
3. *School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R.China*)

Abstract: To study the mutual law between the vertical shaft wall fracture and the internal strain, a physical model for the shaft wall was built to simulate the process and state of the shaft wall stress fracture. The distributed optical fiber technology was used to monitor the internal strain of the shaft wall, and the in-depth analysis was conducted from multiple perspectives of stress and strain. The results show that, for the strain state, the wellbore strain degree will increase with the applied stress. In the wellbore position corresponding to the maxi-

* 收稿日期: 2023-06-05; 修订日期: 2023-10-23

基金项目: 安徽省自然科学基金(面上项目)(2108085ME158); 国家自然科学基金(面上项目)(52174141); 安徽高校协同创新项目(GXXT-2020-54)

作者简介: 胡锐(1995—), 男, 助理实验师, 硕士(通讯作者. E-mail: hurui810@163.com).

引用格式: 胡锐, 贾晓芬, 赵佰亭, 兰世豪, 李德权. 井壁破裂与内部应变状态机理分析[J]. 应用数学和力学, 2023, 44(12): 1463-1472.

imum strain value, the strain degree will reach the maximum value within the range, and the risk of fracture will be the highest. For the stress effect, the larger the deviation between the maximum and minimum strain values of the wellbore under different stresses is, the poorer the wellbore stability will be, and the more likely it will rupture. The analysis of the correlation between stress and strain, and the fitting of the linear equation of strain change at the wellbore position corresponding to each direction angle indicate that, the larger the change rate value is, the bigger the growth rate of wellbore strain will be. For the strain value exceeding the allowable limit, the wellbore is more prone to fracture. Through monitoring of the wellbore strain data and analysis of the strain difference, deviation and strain change rate, and combined with the Lamé formula, a wellbore strain rupture relationship model was established. The study provides a new scheme for wellbore rupture warning.

Key words: vertical shaft wall; stress-strain; wellbore stress; linear fitting

0 引言

煤矿开采转入深部,对于立井井壁安全监测要求将会提升新高度,开采深度越深,地质条件越复杂,地应力就越大,井壁所承受作用力也随之增大.实际生产中,在地应力、地温、围岩应力和其他不确定因素影响^[1],井筒井壁会受到横、纵不同方向应力叠加,可能会导致井壁破裂,严重时将会威胁人员生命,特别深部地层压力分布往往为非均匀,极大程度上限制对井壁周围应力的分析.为此,有一部分学者通过分布式光纤技术采集井壁内部混凝土应变数据^[2],进行立井井壁安全监测研究.

当前国内外更多关注于井筒周围不同地应力、温度以及材料等对井壁破裂的影响,分析研究其中规律,寻找破裂原因并降低井壁破裂风险^[3-5].Amadei^[6]建立和改进了各向异性井壁周围力场的计算,优化了参数水平,提升了井壁承压能力.Gupta等^[7]研究了材料各向异性、岩层面倾斜度和原地应力之间的相互机理,降低了对井筒稳定性影响.刘志强等^[8]针对地下水位下降所导致的地层上覆盖土体下沉,提出了相关治理方案,降低了对井壁破裂影响.张卫东等^[9]研究了各向异性地层井孔周围的应力计算,提升了层理面井壁稳定性.宋朝阳等^[10]在分析井筒围岩应力与变形特征的基础上,提出了井筒围岩双壳复合支护理念,并分析了其加固机理.张明明等^[11]通过进一步分析各向同性地层应力,揭示了对水平井井壁坍塌压力的影响规律.管华栋等^[12]建立了矿山立井井壁早期温度应力计算模型,证明了温度应力对于井壁破裂存在影响.Ma等^[13]综合弹性和强度各向异性影响,建立了水平井的井壁破裂压力预测模型.杨仁树等^[14]针对非均匀荷载下斜井井壁应力的分析,综合考虑了井径与侧墙高度比,合理优化了井壁断面,减小了井壁所受荷载.这些对于井壁应力的研究仅限于地下表层,近年来,煤矿开采转向深部,地下深部环境的复杂也使得研究难度加大,对于各自相互作用机理和对井筒应力的综合影响研究并不充分,研究手段单一,立井井壁破裂机理和规律也并未完全明确^[15-16].

鉴于此,本文在建立井壁实物模型基础上,模拟了井壁破裂过程,同时利用分布式光纤采集井壁内部应变数据,并分别从应变、应力以及二者相互关联等多角度进行了分析,探讨了井壁应变与破裂之间的规律,揭示了破裂机理,完成了应变与井壁破裂及其位置之间的关联研究,为井壁安全监测提供了新思路和新方案.

1 井壁应变数据模型建立

1.1 仿真模拟描述

立井井壁深埋地下,受到多种作用力的相互叠加影响,对于井壁结构和强度设计尤为重要.由于施加在井壁外部的应力是持续且不断变化的,井壁内部也会发生相应的应变变化,当应变程度超过自身所能承受极限范围时,井壁就可能发生破裂损毁,影响安全生产.

有限元软件 COMSOL Multiphysics 常用来建立电场、温度场、固体力学场等多物理场耦合模型,进行数学仿真分析^[17-18].图 1 为用该软件建立的井壁应变 3D 仿真模型,以此分析井壁受力时内部所产生的应力状态.为真实模拟井壁应变特性,模型材料设置为素 C80 混凝土,其力学特性参数弹性模量为 $3.8 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, Poisson 比为 0.20,密度为 $2\,400 \text{ kg/m}^3$,并添加一组外荷载应力.在最终仿真结果中,模型颜色代表井壁产生

的应力大小,红色区域代表应力值偏高,蓝色区域代表应力值偏低。

由图 1 可见,模型中红色呈现不均匀分布,并集中在某一区域内,说明当井壁受到力的作用时,其内部产生的应力呈现不均匀分布。从力学角度分析:若井壁内部应力数值不同,则产生的应变程度也不相同,这会导致井壁内部结构不稳定,增加井壁破裂风险。上述模型表明,当井壁受到应力作用时,其内部应力出现不均匀分布,随着应力的增加,井壁结构稳定性急剧下降,极有可能发生破裂。

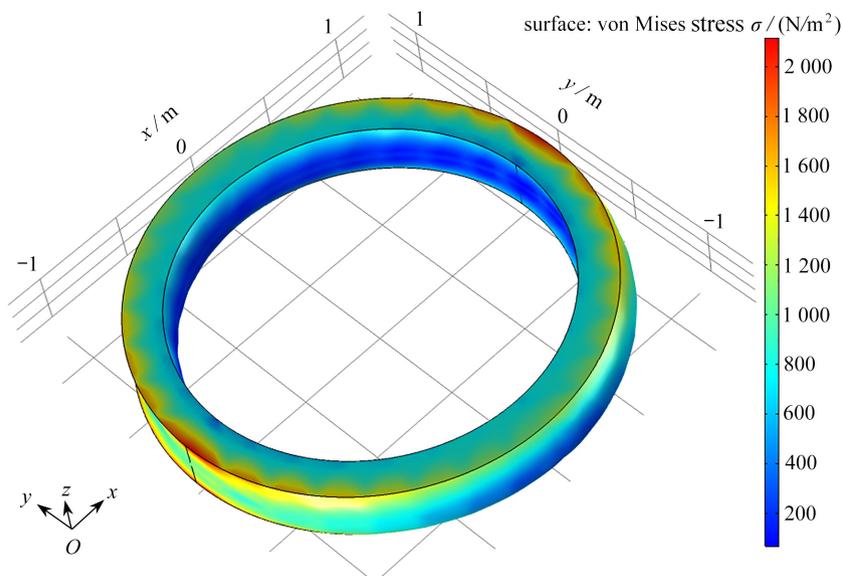


图 1 井壁应变 3D 仿真模型

Fig. 1 The 3D simulation model for wellbore strain

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同。

实践过程中,受多种因素影响,地下各种应力监测难度大,且井壁混凝土的破裂极值也不尽相同,对井壁具体破裂位置及时间预测难以通过模型仿真确定。因此,本文通过建立实物井壁模型,模拟实践中井壁破裂过程,进一步分析内部应变与破裂机理的内在联系,为井壁破裂预测及破裂位置的确定提供了新思路。

1.2 井壁实物模型测试概况

基于国家级实验平台,利用安徽理工大学矿山深井建设技术国家工程研究中心“井壁结构模型实验台”进行实测。按照实际井壁大小等比例建立井壁模型,其中高为 0.25 m,厚度为 0.20 m,井壁半径为 1.60 m,井壁材料选用素 C80 混凝土。结合实验平台,在井壁实验中模拟水平均匀地压情况下的井壁结构受力状态,水平地压对井壁作用的模拟示意图如图 2 所示。

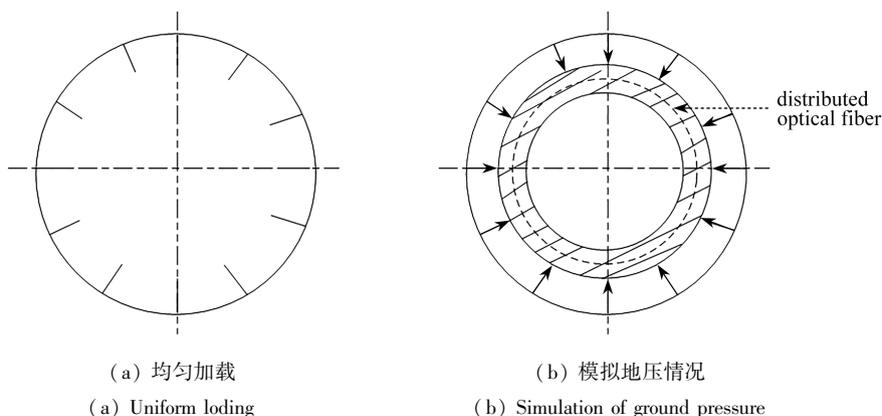


图 2 水平地压对井壁作用模拟示意图

Fig. 2 Schematic diagram for simulation of horizontal ground pressure effect on the wellbore

在井壁外部各方位均匀施压,并平稳升降压,同时在井壁内部 360° 方向角布置分布式光纤应变传感器,

利用分布式光纤光栅技术对应变数据进行实时采集^[19-20],并将数据导出进行分析。

实验仅考虑井壁内部应变状态和过程,为避免外界环境因素影响,实验在恒温环境下开展,自然环境(约 20 ℃),且井壁模型的周围温度相等。在实验过程中,利用分布在模型周围的单缸进行施压,模拟水平均匀地压作用力,并且通过分布式光纤对井壁各方向角应变数据进行记录。施压时,从 1 MPa 开始均匀加载压力,避免产生应力突变,影响实验结果,最终压力到达 13 MPa 时,井壁模型局部出现粉碎性破损,考虑实验安全性,至此实验记录停止。井壁结构受力模拟实验如图 3 所示。



图 3 井壁结构受力模拟实验

Fig. 3 The stress simulation experiment of the shaft wall structure

2 井壁破裂与内部应变机理

2.1 应力作用下井壁应变分布

实验过程中,井壁应变过程记录如图 4 所示,所施加应力作用于井壁,并从 1~13 MPa 均匀加载,横坐标为井壁环形的 360°角位置,纵坐标为井壁应变数值,实验共采集 217 个方向角度数值,采样间隔为 1.659°,包含井壁 360°范围内的全部区域。图 4 中,在实验初始时所施加的压力为 1~3 MPa 时,由于数值较小导致出现了零漂移现象,使得所测应变数据为正值。随着施加压力的增大,内部应变出现规律性变化,在井壁 209.45°和 290.74°方向角上分别达到极值,最终曲线呈现出马鞍形状的波动。当压力增大到 13 MPa 时,井壁模型在 210°方向角上率先出现损毁,实验停止。为进一步进行分析,我们分别从应变、应力以及二者相互关联等三个方面对数据进行分析,并结合 Lamé 公式进行理论验证,探究引起井壁破裂的内在因素。

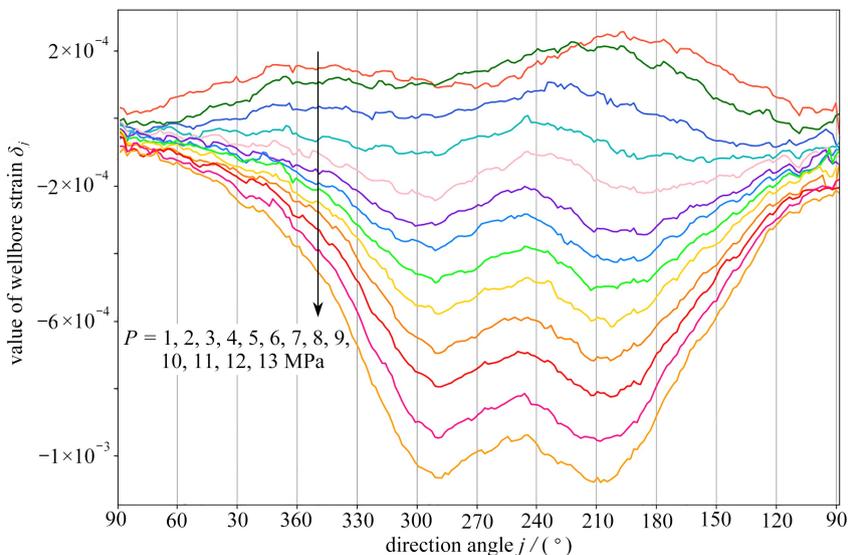


图 4 井壁应变数据

Fig. 4 The shaftwall strain data chart

2.2 应变差值与井壁破裂关系分析

分析井壁各角度位置内部应变变化与破裂状态之间的关系,此时不考虑所施加应力影响,应变过程中,井壁各位置应变数值会发生相应变化,当内部应变超过所能承受极限范围时,井壁将会产生破裂,应力得到突然释放,具体结果表现为出现局部损毁.应变差值为当前井壁位置点从应变最小值到最大值之间的变化差值,反应井壁产生形变大小和状态.对于井壁来说,差值越大,井壁所发生的形变就越严重,出现破裂风险程度就越高;反之,若差值越小,对应井壁所发生的形变就越轻微,破裂风险也就越低.

鉴于上述分析,构建衡量应变差值的数学模型:

$$\varepsilon_j = |\delta_{j(\min)} - \delta_{j(\max)}|, \quad (1)$$

式中, j 表示井壁角度范围($0^\circ \leq j \leq 360^\circ$), $\delta_{j(\max)}$ 表示当前角度方向最大应变数值, $\delta_{j(\min)}$ 表示当前角度方向最小应变数值.

利用实验中采集的应变数据,分析井壁内部应变数值与破裂之间的对应关系.按照式(1)计算井壁各角度值下应变差值 ε_j ,并将结果绘制为应变差值图,如图5所示.

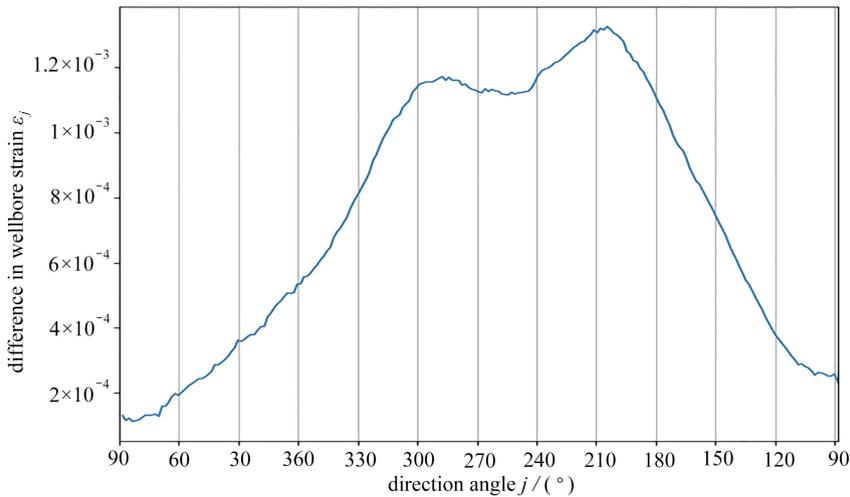


图5 井壁应变差值

Fig. 5 Shaft wall strain difference values

由图5可知,应变差值 ε_j 在 289.08° 和 206.13° 方向角上存在极值,分别为 1.17075×10^{-3} 和 1.32457×10^{-3} ,可以推测在此处两个位置较容易产生井壁破裂.最终实验结果也验证,当施加应力达到13 MPa时,井壁 210° 方向角率先损毁,该位置应变极值为 1.17075×10^{-3} ,忽略试件材质均匀度、外界环境因素以及测量角度偏差影响,该结果符合上述推测.在相同环境条件下,通过监测井壁应变数值,计算应变极值,分析大小和所在位置,判断此处发生破裂风险程度.对于实验井壁模型,当应变极值超过 1×10^{-3} 时,出现破裂风险程度就会极大增加,需要提前防范.

2.3 应变偏差度与井壁破裂关系分析

分析对井壁施加应力的大小与破裂之间关系,此时不考虑各角度应变的变化数值影响,在受力过程中,井壁结构的稳定与内部受力分布状态有关.从力学角度,若应变分布越不均匀,内部应变偏差就越大,井壁结构越不稳定,破裂风险也会越高.反之,若应变分布均匀,内部应变偏差就越小,井壁结构越稳定,破裂风险也会越低.应变偏差度反应当前应力状态下,井壁各角度范围应变的最大值与最小值之间的差值,忽略井壁自身材料及测量误差原因,当处于最小偏差度时,立井井壁结构为稳定状态,该位置出现破裂风险程度较低.而当处于最大偏差度时,此时井壁内部受力分布严重不均衡,结构极其不稳定,若承受值超过自身极限,就容易出现破裂风险.

为衡量应变偏差度所反应的井壁破裂情况,构建偏差度计算公式:

$$\varepsilon_x = |\delta_{x(\min)} - \delta_{x(\max)}|, \quad (2)$$

式中, $\delta_{x(\max)}$ 为当前应力作用下井壁 360° 方向角所监测应变的最大数值, $\delta_{x(\min)}$ 为其中应变的最小数值, x 表

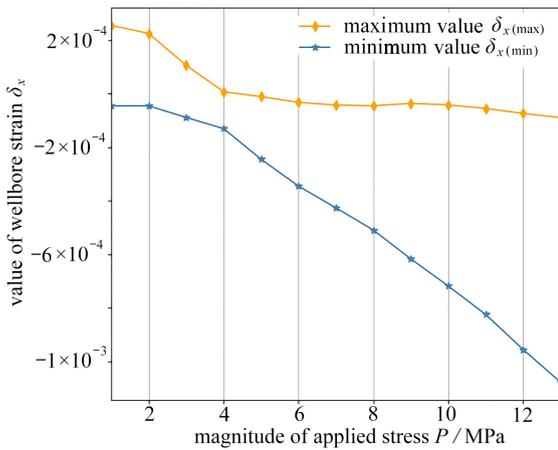
示当前所施加应力数值($1 \text{ MPa} \leq x \leq 13 \text{ MPa}$)。

结合 2.1 小节的实验数据,利用式(2)计算分析不同应力下井壁应变偏差度,具体数值如表 1 所示。其中包含了从 1~13 MPa 时,不同应力下井壁应变的最大值、最小值和对应偏差度。其中,当应力为 13 MPa 时,偏差度最大,达到了 9.892×10^{-4} ;当应力为 4 MPa 时,偏差度最小,为 1.379×10^{-4} 。

表 1 不同应力下井壁应变偏差度

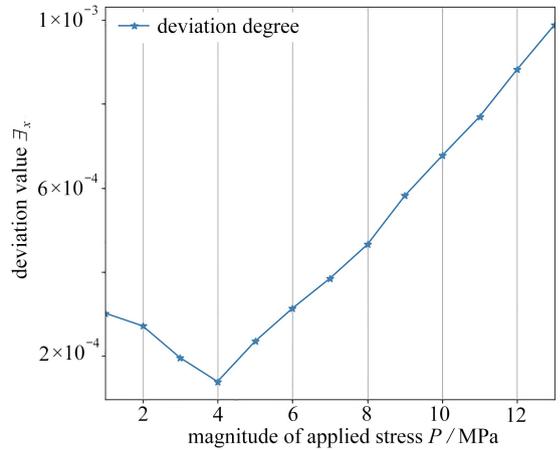
Table 1 Deviations of borehole wall strains under different stresses

P/MPa	1	2	3	4	5	6	7
$\delta_{x(\max)}$	2.553×10^{-4}	2.253×10^{-4}	1.061×10^{-4}	7.42×10^{-6}	-1.089×10^{-5}	-3.253×10^{-5}	-4.239×10^{-5}
$\delta_{x(\min)}$	-4.583×10^{-5}	-4.544×10^{-5}	-8.865×10^{-5}	-1.305×10^{-4}	-2.446×10^{-4}	-3.452×10^{-4}	-4.264×10^{-4}
$\bar{\epsilon}_x$	3.011×10^{-4}	2.707×10^{-4}	1.948×10^{-4}	1.379×10^{-4}	2.337×10^{-4}	3.127×10^{-4}	3.840×10^{-4}
P/MPa	8	9	10	11	12	13	
$\delta_{x(\max)}$	-4.507×10^{-5}	-3.610×10^{-5}	-4.158×10^{-5}	-5.517×10^{-5}	-7.366×10^{-5}	-8.918×10^{-5}	
$\delta_{x(\min)}$	-5.098×10^{-4}	-6.172×10^{-4}	-7.186×10^{-4}	-8.252×10^{-4}	-9.562×10^{-4}	-1.078×10^{-3}	
$\bar{\epsilon}_x$	4.647×10^{-4}	5.811×10^{-4}	6.770×10^{-4}	7.700×10^{-4}	8.825×10^{-4}	9.892×10^{-4}	



(a) 不同应力下应变最大、最小值

(a) The maximum and minimum strains under different stresses



(b) 不同应力下应变偏差度

(b) The degrees of strain deviation under different stresses

图 6 井壁应变数值分析

Fig. 6 Numerical analysis of shaft wall strains

为了更直观地对比分析应变状态,将表 1 中数据绘制如图 6 所示的井壁应变数值分析图。由图 6(a)可知,随应力增加,应变的程度也随之增大。由图 6(b)应变偏差度可知:在 1~3 MPa 应力较小时,会出现零漂现象,所测数据产生偏差,偏差度出现下降;在 4 MPa 之后呈现增长变化;当处于 13 MPa 时,偏差度达到最大,此时破裂风险最高,这也与实验过程中施压在 13 MPa 时井壁发生破裂的情况相符合。

由此可得,当井壁位置偏差度超过自身极限时,井壁此时出现破裂的风险极大,需要提前进行安全处理,做好相应防护。对于实验中所建立的井壁模型,当偏差度超过 9×10^{-4} 时,井壁出现破裂风险的程度将会增大,实践中的井壁极限偏差度数值与自身材质和结构设计有关,需要进行综合考虑。

2.4 应变变化率与井壁破裂关系分析

在具体应用中,井壁应变与应力的变化有关,若随着施加应力的增大,井壁各位置应变变化率趋于稳定状态,则可以根据变化率对破裂风险进行预测。若速率越大,井壁应变增长就越快,发生破裂风险程度也就越高。反之,若速率越小,井壁应变增长越慢,发生破裂的风险程度也就越低。

结合应力、应变二者关系,通过拟合线性回归方程^[21-22],寻找各方向角应变数据速率变化的最优解,分析变化率与井壁破裂之间的规律。设计当前方向角位置的应变变化模型,建立起井壁应变拟合函数:

$$h_j(x) = \theta_0 + \theta_1 x, \quad (3)$$

式中, x 为应力值, j 为井壁方向角度, θ_0 为偏差, θ_1 为速率。

评价所构建的线性方程,使用代价函数来实现,计算每一个应变值在当前拟合函数下偏差平方和,并求解平均数,若最终结果越接近 0,函数预计就越准确.其公式为

$$J(\theta_0, \theta_1) = \frac{1}{2m} \sum_{z=1}^m (h_j(x^{(z)}) - y^{(z)})^2, \quad (4)$$

式中, $m = 13$ 为所记录应变数值的数量.

为获取代价函数最小值,使用梯度下降法求解最优解.其公式为

$$\theta_n := \theta_n - \alpha \frac{\partial}{\partial \theta_j} J(\theta_0, \theta_1), \quad (5)$$

式中,“:=”表示赋值, $J(\theta_0, \theta_1)$ 为求解其最小值, $n = 0, 1$ 为函数参数值, $\alpha = 0.2$ 为学习速率.

那么对于 θ_0, θ_1 的函数最优解有

$$\theta_0 := \theta_0 - \alpha \frac{1}{m} \sum_{z=1}^m (h_\theta(x^{(z)}) - y^{(z)}), \quad (6)$$

$$\theta_1 := \theta_1 - \alpha \frac{1}{m} \sum_{z=1}^m (h_\theta(x^{(z)}) - y^{(z)}) \cdot x^{(z)}. \quad (7)$$

对所有方向记录数据值进行线性拟合并统计应变变化率,即速率的绝对值 $|\theta_1|$, 并绘制直方图如图 7 所示.在图 7 中,在方向角 290.74° 和 209.45° 处分别达到极大值,说明在该位置应变增长速度较大,而在方向角 90° 处为极小值点,则该位置应变的增长速度较小.

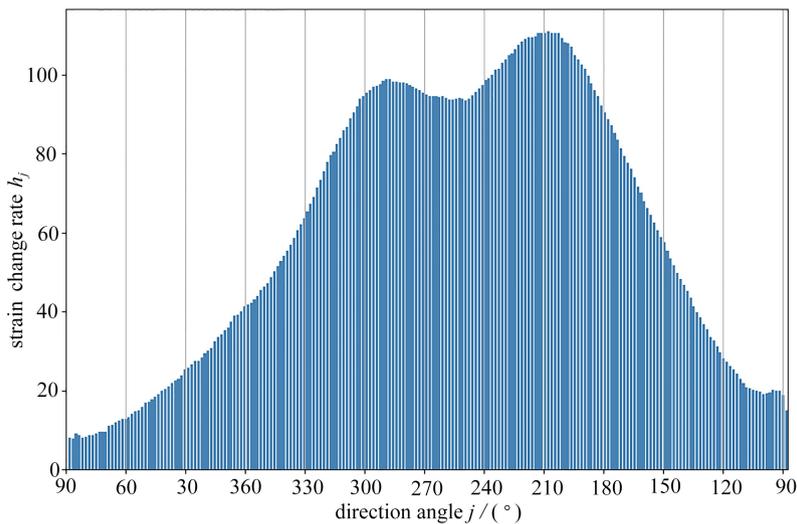


图 7 线性拟合应变变化率直方图

Fig. 7 Linear fitting of the strain change rate histogram

为进一步对比分析,选取井壁位置极大值点 209.45° 方向角和极小值点 90° 方向角度进行探究.图 8 为 90° 和 209.45° 两个方向角所拟合的 $J(\theta_0, \theta_1)$ 空间图像.在该空间内, 90° 方向角线性方程为 $y = 19.39 - 8x$, 209.45° 方向角的线性方程为 $y = 382.4 - 111x$, 其中 209.45° 方向角倾斜角度远大于 90° 方向角,且数值更小,说明在 209.45° 方向角的应变增加趋势及速度远大于 90° 方向角.

在图 8 基础上,通过绘制出井壁 90° 和 209.45° 方向角应变数据,得到相关的曲线如图 9 所示.随着施加应力的增大,井壁两个位置的应变均出现变化,且速率趋于稳定状态,其中 209.45° 方向角变化倾斜角度远大于 90° 方向角,可以根据井壁变化率进行破裂风险的提前预测.当应变变化率越大,应变变化速度就越快,相较于其他位置也越容易出现破裂,结合破裂位置分析, 209.45° 方向角位置率先发生破裂,符合判断.实践过程中,通过分析井壁应变数据变化趋势及速度,拟合线性方程,判断发生破裂位置.

2.5 弹性力学中 Lamé 公式理论分析

弹性力学中 Lamé 公式常用于力学分析,其公式如式(8)所示.利用该公式进行模拟井壁受力分析,这里只分析径向应力:

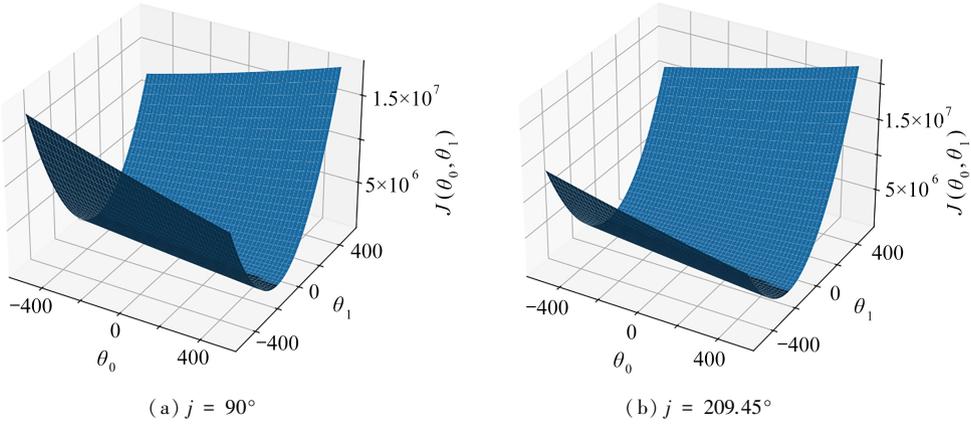


图8 井壁90°, 209.45°方向角线性空间图

Fig. 8 Linear space diagram of the well wall 90°, 209.45° directional angle fitting

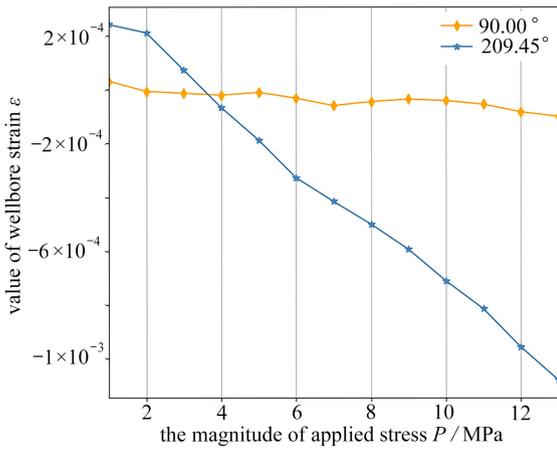


图9 井壁90°, 209.45°应变数据

Fig. 9 Strain data of the shaft wall at 90° and 209.45°

对于式(9), r 为数据采集位置半径, 数值大小为 1.5 m. 对于井壁混凝土所受应力计算有

$$\sigma_r = \varepsilon_p E, \quad (11)$$

式中, ε_p 为当前破裂应变数值, E 为当前材料的弹性模量.

实验过程中, 井壁破裂位置在 210° 方向角, 其中的应变数值为 $\varepsilon_p = 1.319\ 212 \times 10^{-3}$. 求解得出 $\sigma_r = 5.03$ MPa, 并将其代入式(10)中, 求得 $p_2 = -9.11$ MPa.

在实验初始时(1~3 MPa), 存在零漂移现象, 压力数据为正值, 当压力为 3.7 MPa 时井壁位置点 209.45° 方向角此时的应变为初始零点, 且由于计算的径向应力与所施加的应力方向相反, 因此最终实验时所施加的力为

$$P = |p_2| + 3.7, \quad (12)$$

式中, “|·|” 为求绝对值运算, 计算可得 $P = 12.81$ MPa.

因此在理论中, 由 Lamé 公式计算可得, 当施压达到 12.81 MPa 时, 井壁出现破裂. 而最终的实验数据表明, 井壁在 13 MPa 时发生破裂, 忽略实际数据采集所存在的误差, 理论数值与实验数值基本一致. 至此, 通过 Lamé 公式进行分析, 可为实验中井壁的破裂提供理论支持, 预测所施加应力极值.

3 总 结

本文通过搭建立井壁实物模型模拟井壁受力, 并利用分布式光纤技术记录井壁内部应变数据, 探讨了井壁破裂与内部应变状态之间的机理关系, 得到了如下结论:

1) 应变差值能反应井壁应变程度大小. 通过计算井壁各位置所产生的应变差值, 判断破裂风险程度. 实

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_1 - b^2 p_2}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 (p_2 - p_1)}{(b^2 - a^2) r^2}, \quad (8)$$

式中, σ_r 为在半径 r 处的径向应力, a 和 b 分别为井壁的内半径和外半径, p_1 和 p_2 分别为井壁内径和外径所承受应力.

实验分析中, 井壁在应力为 13 MPa 时发生破裂, 且只考虑外压 p_2 的作用, 因此 $p_1 = 0$. 将式(8)进行求解可得

$$\sigma_r = -\frac{b^2 p_2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right). \quad (9)$$

进一步有

$$p_2 = -\frac{(b^2 - a^2) r^2}{b^2 (r^2 - a^2)} \sigma_r. \quad (10)$$

验中,在施加相同压力情况下,井壁 209.45°方向角率先损毁,此时该位置应变差值为 $1.170\ 75 \times 10^{-3}$.应变极值越大,井壁所产生形变也就越大,那么相应的,在该位置所发生破裂风险程度也就越高。

2) 偏差度能反应井壁结构稳定性.通过计算施加不同压力下,井壁所发生应变最大值和最小值之间的差值,以此作为偏差度.实验中当所施加压力达到 13 MPa 时,井壁破裂,此时井壁偏差度达到了最大值 $9.892\ 8 \times 10^{-4}$.偏差度越大,井壁内部结构越不稳定,当所能承受的应变数值超过自身极限时,井壁发生破裂风险程度就越高。

3) 井壁应变的变化率能反应井壁应变程度变化情况.通过线性拟合计算出井壁各方向角应变数值变化方程,并以此分析井壁应变变化率.变化率最大值在 209.45°方向角处为 111,最小值在 90°方向角处为 8,数值越大,井壁应变增长速度就越快,当应变值超过所能承受极限时,井壁就会发生破裂.井壁应力增长速率基本保持稳定,井壁变化率数值越高,内部所产生应变数值变化就越大,随着时间的增加,在该位置所产生的破裂风险也就越大。

通过对井壁内部应变数据进行监测,分析应变差值、偏差度和应变变化率,并结合 Lamé 公式,建立起井壁应变破裂关系模型,可为井壁破裂预警提供新方案。

参考文献(References):

- [1] 孙利辉, 杨本生, 杨万斌, 等. 深部巷道连续双壳加固机理及试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 686-691. (SUN Lihui, YANG Bensheng, YANG Wanbin, et al. Reinforcement mechanism and experimental study on continuous double shell of deep roadway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(5): 686-691. (in Chinese))
- [2] 王太元, 王侃. 光纤光栅技术在井壁融化期间变形监测中的应用[J]. 煤矿安全, 2016, 47(11): 162-164. (WANG Taiyuan, WANG Kan. Application of fiber bragg grating technology in deformation monitoring of shaft wall melting stage[J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(11): 162-164. (in Chinese))
- [3] 刘金龙, 陈陆望, 王吉利. 立井井壁温度应力特征分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2386-2390. (LIU Jinlong, CHEN Luwang, WANG Jili. Characteristic analysis of temperature stresses of shaft wall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(8): 2386-2390. (in Chinese))
- [4] 刘启国, 徐有杰, 刘义成, 等. 夹角断层多段压裂水平井试井求解新方法[J]. 应用数学和力学, 2018, 39(5): 558-567. (LIU Qiguo, XU Youjie, LIU Yicheng, et al. A new well test analysis method for multi-stage fractured horizontal wells with angle faults[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, 39(5): 558-567. (in Chinese))
- [5] 王华宁, 郭振宇, 高翔, 等. 含水合物地层井壁力学状态的弹塑性解析分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 1696-1706. (WANG Huaning, GUO Zhenyu, GAO Xiang, et al. Elastoplastic analytical investigation of mechanical response of wellbore in methane hydrate-bearing sediments[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(12): 1696-1706. (in Chinese))
- [6] AMADEI B. *Rock Anisotropy and the Theory of Stress Measurements*[M]. BREBBIA C, ORSZAG S. *Lecture Notes in Engineering, Vol 2*. Berlin: Springer-Verlag, 1983: 87-116.
- [7] 古泼塔 D, 塞门 M. 包括各向异性效应在内的地球介质中井孔的稳定性[J]. 应用数学和力学, 1999, 20(8): 783-802. (GUPTA D, ZAMAN M. Stability of boreholes in a geologic medium including the effects of anisotropy[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1999, 20(8): 783-802. (in Chinese))
- [8] 刘志强, 王飞, 郭强. 深厚表土层井壁破裂机理及防治技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(4): 6-10. (LIU Zhiqiang, WANG Fei, GUO Qiang. Research progress on mine shaft liner breaking mechanism and prevention technologies in deep and thick overburden[J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(4): 6-10. (in Chinese))
- [9] 张卫东, 常龙, 高佳佳. 横观各向同性地层井壁应力分析[J]. 工程力学, 2015, 32(11): 243-250. (ZHANG Weidong, CHANG Long, GAO Jiajia. Stress analysis at the borehole wall in transverse isotropic formations[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(11): 243-250. (in Chinese))
- [10] 宋朝阳, 纪洪广, 孙利辉. 高地应力深立井井筒围岩应力演化与变形规律及支护分析[J]. 煤炭工程, 2016, 48

- (10): 45-48. (SONG Chaoyang, JI Hongguang, SUN Lihui. Evolution-deformation law and support of surrounding rock in deep vertical shaft under high ground stress[J]. *Coal Engineering*, 2016, **48**(10): 45-48. (in Chinese))
- [11] 张明明, 梁利喜, 刘向君. 页岩储层各向异性对水平井坍塌压力的影响[J]. *应用数学和力学*, 2017, **38**(3): 295-309. (ZHANG Mingming, LIANG Lixi, LIU Xiangjun. Impacts of rock anisotropy on horizontal wellbore stability in shale reservoir[J]. *Applied mathematics and Mechanics*, 2017, **38**(3): 295-309. (in Chinese))
- [12] 管华栋, 周晓敏, 徐衍, 等. 冻结立井井壁早期温度应力计算研究[J]. *金属矿山*, 2018, **503**(5): 44-47. (GUAN Huadong, ZHOU Xiaomin, XU Yan, et al. Calculation of the early thermal stress in freezing vertical shaft lining[J]. *Metal Mine*, 2018, **503**(5): 44-47. (in Chinese))
- [13] MA T S, LIU Y, CHEN P, et al. Fracture initiation pressure analysis of horizontal well in anisotropic formations[J]. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 2019, **22**(4): 447-469.
- [14] 杨仁树, 王千星. 非均匀荷载下斜井井壁应力和位移场弹性分析[J]. *煤炭学报*, 2020, **45**(11): 3726-3734. (YANG Renshu, WANG Qianxing. Elastic analysis of full stress and displacement field for inclined shaftliner subjected to non-uniform stresses[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, **45**(11): 3726-3734. (in Chinese))
- [15] 吕有厂, 何志强, 王英伟, 等. 超千米深部矿井采动应力显现规律[J]. *煤炭学报*, 2019, **44**(5): 1326-1336. (LÜ Youchang, HE Zhiqiang, WANG Yingwei, et al. Mining-induced mechanics behavior in the deep mine with an over-kilometer depth[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, **44**(5): 1326-1336. (in Chinese))
- [16] 乔立瑾. 立井井筒破坏原因及修复方案设计[J]. *煤炭工程*, 2022, **54**(8): 6-11. (QIAO Lijin. Cause for vertical shaft wall failure and the repair scheme design[J]. *Coal Engineering*, 2022, **54**(8): 6-11. (in Chinese))
- [17] 乔宏霞, 乔国斌, 路承功. 硫酸盐环境下基于COMSOL混凝土损伤劣化模型[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, **49**(3): 119-125. (QIAO Hongxia, QIAO Guobin, LU Chengong. Damage and deterioration model of concrete based on COMSOL in sulfate environment[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, **49**(3): 119-125. (in Chinese))
- [18] 侯晓萍, 樊恒辉. 基于COMSOL Multiphysics的非饱和裂隙土降雨入渗特性研究[J]. *岩土力学*, 2022, **43**(2): 563-572. (HOU Xiaoping, FAN Henghui. Study on rainfall infiltration characteristics of unsaturated fractured soil based on COMSOL Multiphysics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, **43**(2): 563-572. (in Chinese))
- [19] 朱磊, 柴敬, 陈娜. 基于光纤光栅技术的井筒变形监测[J]. *煤矿安全*, 2017, **48**(3): 140-143. (ZHU Lei, CHAI Jing, CHEN Na. Shaft deformation monitoring based on fiber bragg grating[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, **48**(3): 140-143. (in Chinese))
- [20] 王正帅, 柴敬, 黄旭超, 等. 采场覆岩变形分布式光纤测量研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, **45**(10): 196-202. (WANG Zhengshuai, CHAI Jing, HUANG Xuchao, et al. Research on overlying strata deformation based on distributed optical fiber sensing measure[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, **45**(10): 196-202. (in Chinese))
- [21] 王德发, 李琪, 叶菁, 等. 气体测量中的线性拟合[J]. *计量科学与技术*, 2022, **66**(10): 3-9. (WANG Defa, LI Qi, YE Jing, et al. Linear fitting in gas measurement[J]. *Metrology Science and Technology*, 2022, **66**(10): 3-9. (in Chinese))
- [22] 汪伟, 罗周全, 秦亚光, 等. 深部开采初始地应力场非线性反演新方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, **48**(3): 804-812. (WANG Wei, LUO Zhouquan, QIN Yaguang, et al. A new nonlinear inversion method of geostress field in deep mining[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, **48**(3): 804-812. (in Chinese))