

# 埋深对钻孔孔周位移及裂隙分布特征的影响

Influence of Burial Depth on Displacement and Fractures Distribution Characteristics Around Borehole

刘小毅, 曹国选, 王冬冬, 李彦云(陕西煤业化工集团 孙家岔龙华矿业有限公司, 陕西 榆林 719314)

**摘要:**本文通过构建钻孔数值模型,采用埋深表征钻孔整体受力水平,探究不同埋深条件下钻孔孔周应力分布特征,阐明钻孔孔周位移时变特征及分布情况,揭示埋深对钻孔孔周裂隙发育的影响。结果表明:在钻孔周围煤体的应力场调整后,出现应力集中现象。随着埋深增加,钻孔孔周应力逐渐增大,应力集中区范围不断增大。孔周煤体变形存在一定的方向性,煤体的变形会沿着直线方向发生较大的变形,与此直线的垂直方向会出现较小的变形。随埋深增加,孔周煤体变形增大。裂隙的发育与煤体周围变形存在着一定对应关系。随埋深增加,裂隙发育逐渐明显,并呈中间集中、四周分散的分布特点。

**关键词:**埋深; 钻孔; 数值模拟; 位移分布; 裂隙分布

**中图分类号:** TD823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)06-0056-05

**Abstract:** In this study, the numerical model of the drill hole is constructed, and the depth of burial is used to characterize the overall stress level of the borehole, to investigate the stress distribution characteristics around the borehole under different burial depths, to elucidate the time-varying characteristics and distribution of the displacement around the borehole, and to reveal the influence of the depth of burial on the development of the cracks around the borehole. The results show that the stress concentration phenomenon occurs after the stress field of the coal around the drill hole is adjusted. With the increase of burial depth, the stress around the drill hole gradually increases, and the range of stress concentration area is increasing. The deformation of the coal body around the hole has a certain direction, and the deformation of the coal body will be larger along the straight line direction, and the perpendicular direction to this straight line will have a smaller deformation. With the increase of burial depth, the deformation of coal around the borehole increases. There is a certain correspondence between the development of fissures and the deformation around the coal. With the increase of burial depth, the development of fractures is gradually obvious, and the distribution is characterized by concentration in the middle and dispersion around.

**Key words:** burial depth; borehole; numerical simulation; displacement distribution; fracture distribution

## 1 前言

作为煤炭大国,煤炭在我国能源结构中占有重要地位<sup>[1-2]</sup>。为满足国家煤炭能源需求,煤炭开采深度逐渐增加,开采地质条件也更加复杂<sup>[3-4]</sup>。深部煤层具有瓦斯含量高、瓦斯压力大、地应力大、透气性差等特点,不仅增加了煤炭开采难度,更提高了矿井事故,对煤炭安全高效开采产生极大威胁<sup>[5-6]</sup>。钻孔施工完毕提钻后,钻孔周围煤岩应力重分布,位移产生,从而原生裂隙扩大、新裂隙产生。这些都是导致塌孔的重要因素。因此,为了保证抽采钻孔的有效性,对钻孔孔周煤岩应力-位移-裂隙“三场”演化规律进行研究十分有必要。

针对抽采钻孔相关的研究,已有学者开展了大量的理论分析、数值模拟、室内实验<sup>[7-9]</sup>。刘虎<sup>[10]</sup>分析了不同钻孔间距下双孔及三孔抽采效果,发现双孔布置下抽采效果随钻孔间距增加呈现出两个阶段。焦稳锋等<sup>[11]</sup>采用数字散斑系统观测孔周煤岩体裂纹在扩展过程中的损伤破坏及蠕变过程,发现在恒载应力下,随着蠕变时间推移,煤岩体的变形能力、变形空间都逐渐减弱。郝志勇等<sup>[12]</sup>构建了煤体应力和钻杆转速的力学模型,应用钻杆转速测试系统分析了不同煤体应力下钻杆转速的变化规律。综上所述,目前对钻孔进行了大量研究,在应力方面取得了一系列研究成果。然而,钻孔孔周位移及裂隙的相关研究较少,且关于埋深或者地应力的影响,较为少见。因此,有必要对不同埋深条件下的钻孔孔周应力-位移-裂隙“三场”演化进行研究。

钻孔所处地质环境复杂,钻进过程中存在复杂的空间关系,钻孔穿过不同的地层,存在不同的受力

[作者简介] 刘小毅(1976—),男,陕西神木人,研究生,工程师,现主要从事化工企业管理工作。

[引用格式] 刘小毅,曹国选,王冬冬,等.埋深对钻孔孔周位移及裂隙分布特征的影响[J].中国矿山工程,2024,53(6):56-60+67.

状态,钻进方向不同,引起孔周应力场的不同,进而产生了位移场及裂隙场的差异。因此,本研究建立了钻孔数值模型,通过埋深表征钻孔整体受力水平,揭示孔周应力时变规律,监测钻进中孔周位移时变规律与位移分布形态,分析孔周微裂隙分布形态并对孔周微裂隙进行量化表征。本研究为钻孔的稳定性提供了重要理论参考。

## 2 数值模型构建及模拟方法

### 2.1 数值模型构建

数值模型构建以实际矿井为例。本研究工程背景为陕西煤业化工集团孙家岔龙华矿业有限公司,地处陕北侏罗纪煤田神府矿区,井田位于陕西省神木市北部。孙家岔龙华煤矿 $2^{-2}$ 煤层位于延安组第四段上部,下距 $3^{-1}$ 煤层 $24.39 \sim 38.2$  m。 $2^{-2}$ 煤层厚度 $6.25 \sim 7.39$  m,平均 $6.50$  m。 $2^{-2}$ 煤层在盘区东部大面积自燃。煤层结构简单,属稳定煤层。煤层含 $0 \sim 2$ 层夹矸,夹矸厚 $0.04 \sim 1.05$  m,一般 $0.40$  m,岩性为粉砂岩、泥岩。

建立笛卡尔坐标系,具体如图1所示,对孔周煤岩的应力场进行分析:采用线性孔隙弹性模型,通过坐标变换方程,将自然空间坐标系下的钻孔应力状态分布转换到以钻孔为中心的 $xyz$ 方向受力模型,对钻孔周围应力分布进行求解。粒子流模型由多个计算循环完成,即通过力-位移特征更新粒子接触部分的接触力,通过牛顿第二定律更新粒子和壁面的位置,以及重新调整粒子之间的接触关系,这两个过程交替进行,遍历整个模型集合,直到达到平衡或发生破坏。

为了保证数值模拟结果可靠,有以下假定条件:(1)球体或者圆形单元均为刚度一定的单元体,球体与圆形单元运动涉及平移变换和转动变换,可以绕一定的形心进行转动,球体与圆形单元的形状和大小随时间发生变化。(2)球体之间的接触视为点-点接触,与边界面接触为点-边接触。(3)组成模型的球体或圆形单元之间的接触力大小与球体或圆形单元刚度相关,各个单元体之间的相对位移与初始设置的阻尼系数有关。

### 2.2 数值模型参数设定

针对PFC模拟,选择合适的细观力学参数是至关重要的。结合孙家岔龙华煤矿 $2^{-2}$ 煤层的物理力学参数,设定了数值模型参数。根据室内位移加载试验所得的试样力学参数,以相同加载方式对构建数值

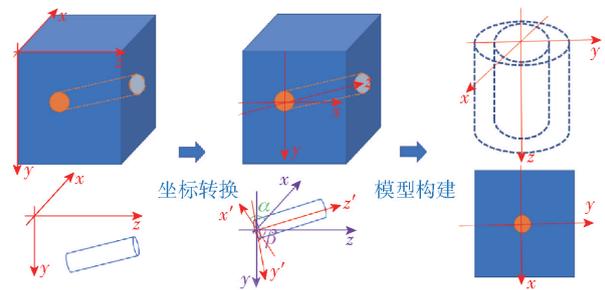


图1 数值计算模型

模拟模型的力学参数进行测定。其室内位移加载试验的样品模型参数为:单轴压缩试验模型为高 $100$  mm,直径 $50$  mm;巴西圆盘测试模型高度 $100$  mm,直径 $50$  mm。室内位移加载试验和数值模拟的力学参数见表1。调节细观参数使模型的力学特性与室内试验结果所得一致。标定后的细观参数见表2。

表1 基本参数标定

力学参数	弹性模量/GPa	泊松比
实验室实验参数	1.48	0.23
数值试验结果	1.55	0.21
误差( $\pm\%$ )	4.7	8.6

表2 模型参数

参数类型	参数名称	泊松比
粒子基本参数	粒子密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1450
	颗粒接触模量 $\bar{E}/\text{GPa}$	0.8
	颗粒最小半径 $r_{\min}$	$2 \times 10^{-4}$
	球径比 $r_{\max}/r_{\min}$	1.8
	刚度比 $k_n/k_s$	1
	摩擦系数 $\mu$	0.4
平行键参数	阻尼常数 $\alpha$	0.7
	平均正态强度 $\sigma_n/\text{MPa}$	4
	标准强度标准差 $\sigma_s/\text{MPa}$	0.1
	平均剪切强度 $\tau/\text{MPa}$	4
	剪切强度的标准差 $\tau_s/\text{MPa}$	0.1
	弹性系数 $E_c/\text{GPa}$	0.8
	刚度比 $k_n^*/k_s^*$	1

### 2.3 数值模拟方案

使用有效的数值模拟方法对卸载过程进行模拟,是保证模拟最终效果真实可靠的关键。在钻孔前需设置相应的初始应力条件,钻进后钻孔卸压使初始应力发生较大的改变,发生相应的应力场、位移场和裂隙场变化。本研究采用地应力自动释放法。其能够演示钻孔孔周煤岩应力的真实变化过程,反映煤体中力的分布再平衡过程,揭示开挖后的煤体

卸压规律。

基于地应力自动释放方法,钻孔后边界上各点初始应力平衡状态被打破,边界上各个节点受力不平衡,从而发生颗粒的运动。对过程中颗粒的运动进行计算,最终达到一个新的平衡,可以对平衡条件进行设置以满足相关精度要求。在平衡过程中,物体会发生相应的变形,表现为粒子的运动,从而得到应力重新分布的结果,最终得到钻进后煤体的应力场、变形场与裂隙场。通过对相应位置的球体删除来进行实现钻孔过程的模拟,钻孔过程分解为多步进行。根据钻孔钻进过程特点设置步骤,分别对相应条件下的颗粒进行删除,每一步开挖可分别对相应条件下的钻孔周围应力、应变和裂隙变化情况进行对比分析。

以不同埋深条件下钻孔施工过程为研究对象,使用 PFC 离散元数值模拟软件对煤体钻孔的施工过程进行模拟分析。改变埋深进行数值模拟,不同埋深设置为 200 m、400 m、600 m、800 m,此时侧压系数  $\lambda = 1.0$ 。

### 3 不同埋深下孔周位移与裂隙分布

#### 3.1 孔周应力场演化

图 2 所示为埋深  $h$  为 200 m、400 m、600 m、800 m,侧压系数  $\lambda = 1.0$  的条件下,钻孔周围应力变化情况。钻进时,孔周煤体会产生卸压,压力突降,随着埋深的增加,卸压幅度逐渐增大。随着岩体变形,岩体周围的压力逐渐恢复初始地应力水平,水平、竖直两方向应力的变化趋势近乎相同。

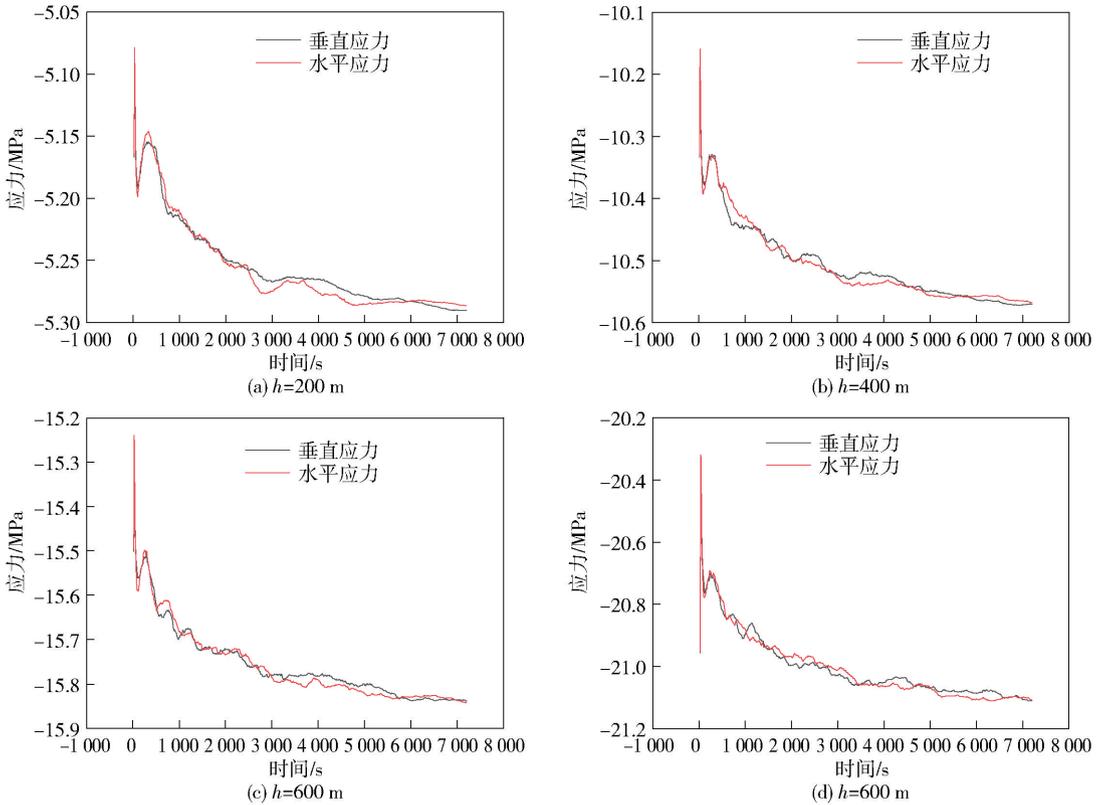


图 2 不同埋深下孔周应力变化情况

#### 3.2 孔周位移场演化

钻进中,孔周会出现卸压变形、变形波动和变形恢复三个阶段,在卸压变形阶段应力显著降低。卸压变形的产生与钻孔形成后对钻孔周围的煤岩体产生卸压作用有关,在孔周煤体应力卸载后,钻孔四周未卸压煤体的高应力与卸压煤体的低应力产生应力差,进而导致孔周围岩卸压变形。

3 所示。当埋深为 200 m 时,钻孔周围煤体应变水平最低,此时超过塑性变形临界值的空间范围相对较小。对比不同埋深的实验结果可以看到,随埋深增加,钻孔周围的煤体变形增大,变形速率增大,直到埋深最大时,孔周煤体竖直方向位移变化最大。

图 4 所示为埋深为 200 m、400 m、600 m、800 m 条件下,钻进初期与稳定后钻孔周围应变变化情况。在埋深 200 m(图 4a),侧压系数  $\lambda = 1.0$  的条件下,

不同埋深下孔周煤体轴向变形情况,具体如图

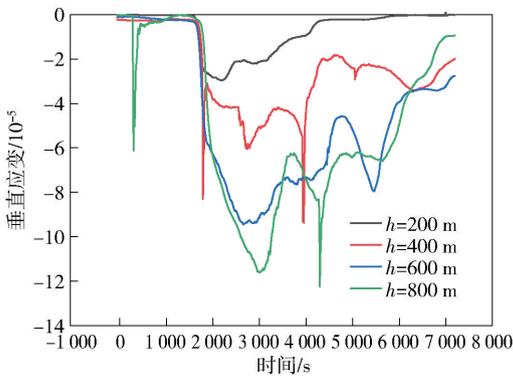


图3 不同埋深下轴向变形情况

应变主要集中在钻孔形成过程。后续钻进结束时,钻孔周围应变范围进一步扩大,通过模拟发现,在形变过程存在一定的方向性,煤体会沿着直线方向发生较大的变形,与此直线的垂直方向会出现较小的变形。这是由 200 m 埋深下最大变形方向和最小变形方向分布存在差异造成的,同时可以看出大变形区和小变形区域存在  $\pi/2$  的偏角。

400 m 埋深下(图 4b),钻孔形成初期应变分布不均匀,钻孔周围煤体变形较小。煤体变形稳定后,变形较大,这与埋深 200 m 不同。在高应力作用下,成钻后钻孔变形更为迅速且更为剧烈,位移场从最开始分布不均逐渐转变成均匀的趋势。煤体应变在开始阶段呈现出随机方向性,后续随着煤体变形稳定,变形各向趋向于均匀,说明随着地应力水平增加,地应力水平作为钻孔变形的主导因素,决定钻孔稳定后的煤体应力分布。

埋深 600 m 下(图 4c),钻孔形成时周围煤体应变分布均匀。随时间变化,应变发育为扁平的椭圆状。钻孔发生孔径缩小的情况,钻孔上部发生了轻微塌孔。在钻进初期,孔周煤体主要变形区域内呈现出随着距离钻孔中心距离越近,变形情况越明显的特点。变形区域呈层状分布,在钻孔稳定后则发育成为长条形状。在模型尺度范围内,钻孔周围呈现“X”型变形,在两侧位置变形较小。

埋深 800 m 下(图 4d),位移分布与 600 m 条件下相似。但是在钻孔形成初期,由高地应力作用影响所致,钻孔周围煤体变形剧烈,整体呈现出圆形,破坏形式与 600 m 条件下基本相同。煤体应力稳定后,位移分布与 600 m 条件下存在同样长条形的变形区域。但在 800 m 埋深下,模型范围内四个边角位置出现更为明显的大变形。

### 3.3 孔周裂隙场演化

图 5 所示为不同埋深下的孔周裂隙分布。裂隙

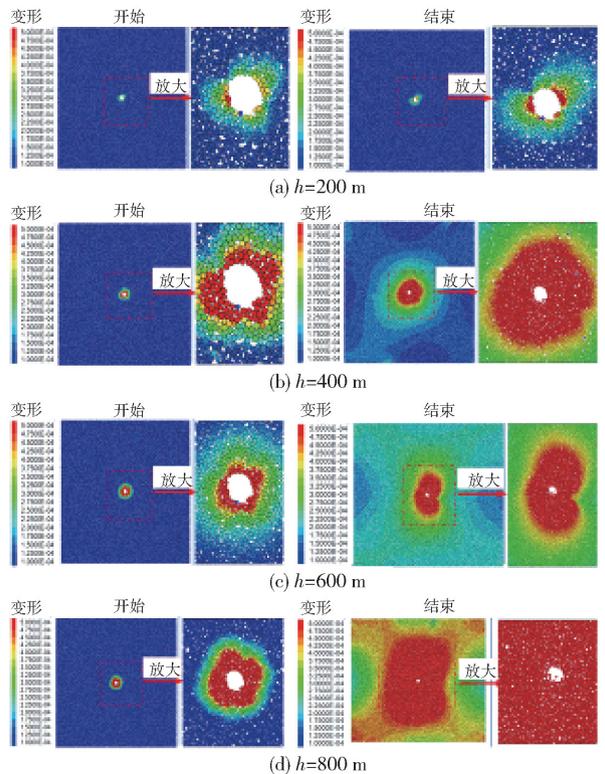


图4 不同埋深下位移变化分布情况

的发育与煤体周围变形存在着一定对应关系,在加载初期发生较大变形的区域产生较多的裂隙,在应力稳定后的高应力区域产生零散分布裂隙。在应力水平较低时,裂隙发育数目少,分布规律不明显,随着地应力增加,裂隙发育逐渐呈现出中间集中分布,四周分散分布。随着地应力的增加,较多区域出现应力集中现象,分布式裂隙数量逐渐增加,进一步促进裂隙发育。

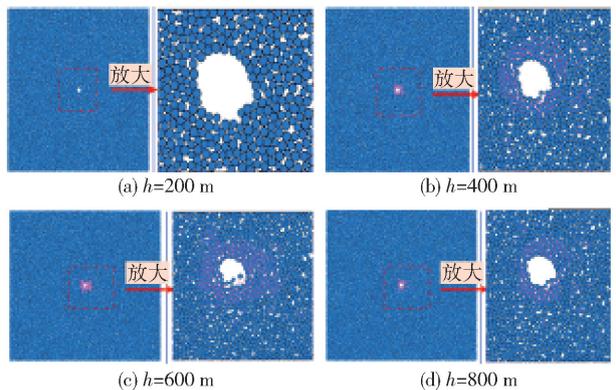


图5 不同埋深下孔周裂隙分布

如图 6 所示,在卸压变形阶段由于钻孔卸压使应力发生显著降低,岩体内部的裂隙发育主要存在于中间的变形波动阶段。尤其是在 200 m 埋深条件下,由于地应力较小,裂隙的数量也较少,仅在前期

产生几条裂隙,在后期基本没有裂隙产生。在800 m埋深范围内,随着埋深的增加,裂隙整体发育水平更高。

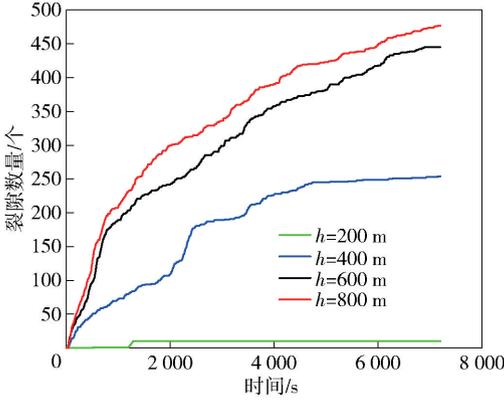


图6 不同埋深下孔周裂隙数量演化

### 4 数值模拟结果有效性验证

结合已有理论对数值模拟结果进行检验<sup>[13-14]</sup>。钻孔形成后,地应力重新进行分布,在开挖后孔周煤体应力变化情况如式(1)所示。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta 1} &= \sigma_{x0} + \sigma_{y0} - 2(\sigma_{x0} - \sigma_{y0}) \cos(2\theta) - 4\tau_{xy0} \sin(2\theta) \\ \sigma_{z1} &= \sigma_{z0} - v[2(\sigma_{x0} - \sigma_{y0}) \cos(2\theta) + 4\tau_{xy0} \sin(2\theta)] \\ \tau_{\theta z1} &= 2(-\tau_{xz0} \sin \theta + \tau_{yz0} \cos \theta) \\ \tau_{r\theta 1} &= \tau_{rz1} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{r1}$  为径向有效应力, MPa;  $\sigma_{\theta 1}$  为环向有效应力, MPa;  $\sigma_{z1}$  为垂向有效应力, MPa;  $\tau_{\theta z1}$ 、 $\tau_{r\theta 1}$ 、 $\tau_{rz1}$  为切向剪应力, MPa;  $v$  为泊松比;  $\theta$  为由钻孔坐标系  $x$  轴顺时针量测的钻孔周向某点的方位角。

由平面应变假设可以得在此条件下各个方向主应力的变化情况,得出变换出孔周煤体三个应力方向变化方程式,如式(2)(3)所示。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2}(\sigma_{\theta 1} + \sigma_{z1} - 2P_0) + \sqrt{\tau_{\theta z1}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_{\theta 1} - \sigma_{z1})^2} \\ \sigma_3 &= \sigma_{r1} \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2}(\sigma_{\theta 1} + \sigma_{z1} - 2P_0) - \sqrt{\tau_{\theta z1}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_{\theta 1} - \sigma_{z1})^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta 1} &= \sigma_{x0} + \sigma_{y0} - 2(\sigma_{x0} - \sigma_{y0}) \cos(2\theta) - 4\tau_{xy0} \sin(2\theta) \\ \sigma_{z1} &= \sigma_{z0} - v[2(\sigma_{x0} - \sigma_{y0}) \cos(2\theta) + 4\tau_{xy0} \sin(2\theta)] \\ \sigma_{r1} &= P_0 \\ \tau_{\theta z1} &= 2(-\tau_{xz0} \sin(2\theta) + \tau_{yz0} \cos \theta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

结合式(3),可以得  $\sigma_{\theta 1}$ 、 $\sigma_{z1}$ 、 $\sigma_{r1}$ 、 $\tau_{\theta z1}$  中  $\sigma_{r1}$  为常数,  $\tau_{\theta z1}$  的量级小于  $\sigma_{\theta 1}$ 、 $\sigma_{z1}$ , 而  $\sigma_{\theta 1}$ 、 $\sigma_{z1}$  为  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  的主控因素,其中  $\sigma_{\theta 1}$ 、 $\sigma_{z1}$  为  $\theta$  的函数,可以得到最大应力值点和最小应力值点的方位,如式(4)所示。

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2\tau_{xy0}}{\sigma_{x0} - \sigma_{y0}} \right) \\ \theta_2 &= \theta_1 + \pi/2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

结合式(4),可以得到  $\theta$  与埋深的关系,随埋深增加,  $\theta$  值减小,这与数值模拟结果一致,具体如图7所示。说明随埋深增加,孔周煤体失稳模式逐渐由孔壁斜向大变形失稳向孔壁周向大变形失稳转变。

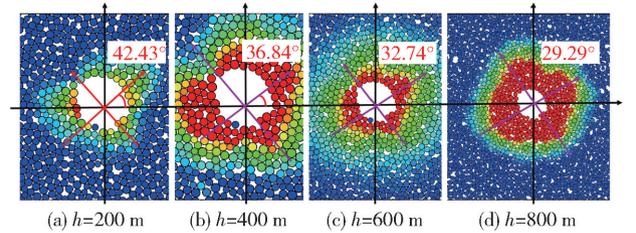


图7 不同埋深条件下位移场最大位移对比

### 5 结论

(1) 在钻孔刚刚形成时,应力水平较低。在钻孔周围煤体的应力场调整后,出现应力集中现象。随着钻孔埋深的增加,钻孔孔周应力逐渐增大,应力集中区范围不断增大,钻孔稳定性随埋深增大而降低。

(2) 孔周煤体变形存在一定的方向性,煤体的变形会沿着直线方向发生较大的变形,与此直线的垂直方向会出现较小的变形。在钻孔形成前,模型在初始应力作用下形成的初始地应力场分布规律与实际情况基本一致。钻孔形成后,钻孔周围应力集中情况产生,钻孔周围变形明显。随埋深增加,钻孔周围的煤体变形增大。

(3) 裂隙的发育与煤体周围变形存在着一定对应关系。在埋深较小时,裂隙发育不明显,裂隙扩展速度较低,裂隙场整体呈圆形分布。随着埋深的增加,裂隙发育逐渐明显,并呈中间集中、四周分散的分布特点。

#### [参考文献]

[1] 翟成, 李贤忠, 李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1996-2001.  
 [2] 冉启灿, 梁运培, 邹全乐, 等. 倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 177-192.