

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.11.031

动态应力追踪方法识别采动裂隙带发育研究

张 燕¹, 叶剑红², 纪洪广³, 王金安³

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;
3. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 煤层开采过程中, 开采工作面围岩一定范围内的岩体会产生卸荷裂缝或新裂隙, 其中有一部分裂缝和裂隙存在张开的经历。由于张开的裂隙和缝内没有力的传递介质, 在这些裂缝、裂隙附近区域的应力会从因重力引起的应力大值降低到一个很小的值, 但不一定会达到应力为 0 值。裂缝、裂隙附近区域的应力由于之后的应力重分布可以发生调整而振荡, 裂缝、裂隙相应地可以闭合, 甚至可以承受很大的剪应力。基于一部分采动张开裂隙附近区域的应力大值曾经历过大幅度卸载到一个很小值这一动态过程, 提出了一种识别采动裂隙带发育的动态应力追踪方法。以宁夏石嘴山矿区三号煤层为工程背景, 利用离散元 UDEC 软件包计算确定煤层开采过程中覆岩内部不同开采阶段的应力分布。借助于后处理软件 TechPlot, 利用提出的动态应力追踪方法, 识别该矿采动裂隙带的范围和高度; 研究结果表明, 所提出的动态应力追踪方法具有可行性和很好的适用性。

关键词: 水下煤层开采; 动态应力追踪方法; 采动裂隙带; 离散元方法; 宁夏石嘴山矿

中图分类号: TD 833.25

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 11 - 3291 - 09

Identifying the development of mining-induced fractures zone using dynamic stress tracing method

ZHANG Yan¹, YE Jian-hong², JI Hong-guang³, WANG Jin-an³

(1. School of Natural Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;
3. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Disturbance cracks or fractures are generated in the surrounding rock mass of mining face in the process of coal mining. Among these cracks or fractures, some experience the opening process. Due to the fact that there is no substance in these opened cracks or fractures to transmit force, the stresses in the zone near to these cracks or fractures will decrease to a small value from their initial gravity-induced large stress values but not necessarily reach 0. After these cracks or fractures are generated, the stresses in the zone near to them would adjust and cause vibration due to stress redistribution. Accordingly, these cracks or fractures would be closed again, they could even bear great shear stresses. Based on the described phenomenon that the stress in the zone near to disturbance cracks or fractures have experienced the process of stress unloading from large to small values, a method referred to as "dynamic stress tracing method" is developed to identify the range and height of disturbance fractures/cracks zone. The No.3 coal seam mining of Shizuishan in Ningxia province is given as a case. The discrete element software package UDEC is applied to determine the stress distribution during the process of coal mining. Based on the proposed dynamic stress tracing method, the range and height of the disturbance fractures/cracks zones are estimated using the post-processing package TecPlot. It is indicated that the proposed dynamic stress tracing method for identifying the height of coal mining disturbance fractured/cracks zone is feasible, and owns good suitability.

Keywords: underwater seam mining; dynamic stress tracing method; mining disturbance fractures/cracks zone; discrete element method; Ningxia Shizuishan coal mine

1 引 言

我国煤炭生产主要采用地下深部开采的方法,

开采安全严重受到开采工作面涌水、突水等因素威胁, 尤其是在含水层下方开采, 危险性更大。据不完全统计, 我国探明有 37 亿吨以上的煤炭资源位于

收稿日期: 2015-05-28

基金项目: 中国博士后科学基金一等资助 (No. 2013M540051)

This work was supported by the China Postdoctoral Science Foundation-First Level (2013M540051).

第一作者简介: 张燕, 女, 1984 年生, 博士, 主要从事采矿工程领域的数值计算方法等方向的研究工作。E-mail: yanzhang2009@gmail.com

江、河、湖、海及第三、四系松散含水层等各种类型的水体之下^[1]。工程中普遍采用经验公式和现场测试来确定采动裂隙发育的高度。虽然导水裂隙发育高度利用经验公式^[2]可以简单予以估计,但由于各矿区的地质条件和采煤方法差异较大,所得到的结果只能作为粗略参考。目前现场实测确定导水裂隙带的主要方法有声波CT成像法^[3-4]、高密度电阻率法^[5-6]、注水试验法^[7-8]、微震探测^[9-10]、钻孔电视法^[11-12]等。现场实测方法虽然比较可靠,但工作量大,成本高,在实际工程应用中不可能大范围开展,具有一定的局限性。20世纪60~80年代,随着水体下采煤技术的发展,开展了大量针对采动裂隙带高度的相似模拟试验研究,总结出了导水裂隙带高度与煤层采厚、岩体类型的关系。20世纪80年代以来,随着岩土工程数值计算方法的快速发展,通过数值计算确定围岩内部应力场^[13-14]和位移场,进而评估扰动裂隙带高度的方法已逐步开始得到应用^[15-16],使得对覆岩的扰动破坏的研究逐渐深入到对覆岩破坏机制的研究。

然而,在数值计算方法研究覆岩破坏这一问题时,国内外大量学者往往采用基于连续介质理论计算软件,如ABAQUS^[17]、ANSYS^[18-19]、FLAC2D/3D^[20-22],得到的结果通常只包括应力场、位移场的分布。裂隙带形成过程难以模拟,只能根据应力场和位移场的分布大致估计裂隙带发育高度和规模。本文采用基于非连续介质力学的离散元模拟软件UDEC为分析工具,计算和确定开采工作面围岩因煤层开采所产生的扰动应力场和相应的位移场。在此基础上,提出以应力变化时程曲线为基础的识别采动裂隙是否已经生成的方法,用以判断围岩采动裂隙带发育的高度和范围。应该指出的是,本文所提出的识别裂隙是否已经生成的动态应力追踪方法并不能像断裂力学理论中的J积分、最大周向应力判据那样用于裂隙产生和扩展的判据,而是根据部分张开型裂隙及裂隙周围附近应力场的时程变化特征来描述裂隙是否已经生成。

2 动态应力追踪识别采动裂隙方法

在煤层开采之前,围岩体之间相互紧密接触,应力由其上覆岩体重力所引起,应力值应该为一较大值。当煤层开采扰动之后,开采工作面围岩内一定范围内的岩体要么与其周围块体分离形成裂缝,要么岩体自身内部产生新的裂隙。无论属于哪一种情况,其中有一部分裂缝和裂隙存在张开的经历。由于张开的裂隙和缝内没有力的传递介质,在裂

缝和新裂隙附近区域的应力就会从因重力引起的应力大值降低到一个很小的值,但不一定会达到应力0值。图1所展示的就是某开挖中3个典型的能够识别采动裂隙生成的应力动态时程曲线,图中表明,在开挖之前该3点处由重力引起的平均应力值分别为2.5、3.0和7.0 MPa;开挖后,该3点处的平均应力迅速下降到一个很小的值,接近为0。这一开挖围岩大幅度卸载的力学过程表明,计算过程中该3点处已经生成了张开型裂隙;如果没有张开型的裂隙生成,该3点处的应力应该不会大幅度卸载或者应该承担更多的荷载。这些生成的有张开经历的裂隙在之后随着开采工作面围岩内应力的继续调整,或者附近其他煤层开采的影响,或多或少地会发生闭合或者再张开,直接导致它们附近区域的应力发生不规则振荡(见图1典型结果)。根据开采工

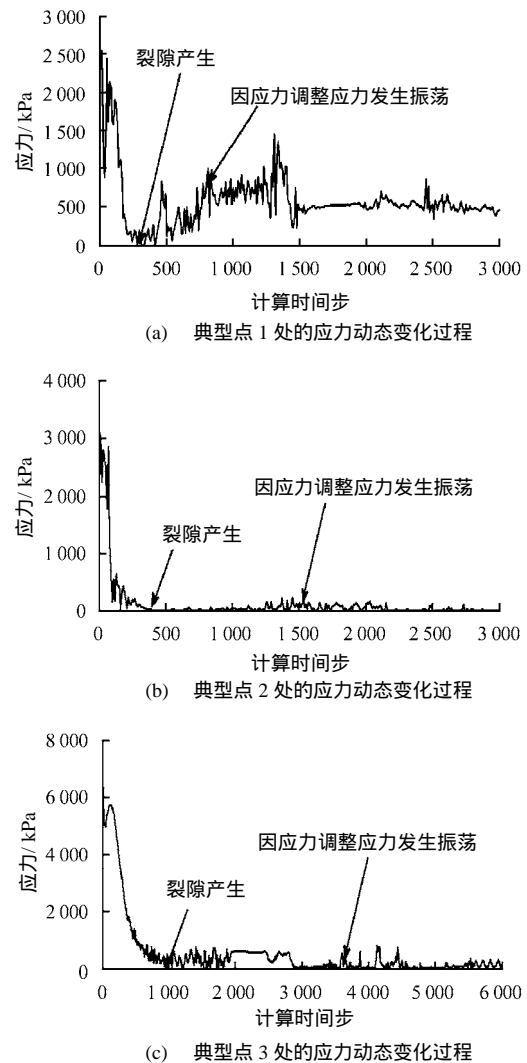


图1 UDEC离散元程序模拟石嘴山3#煤矿开采中监测得到的采空区覆岩3个典型点上的应力动态变化过程
Fig.1 Stress dynamic process on three typical points in surrounding rock mass of Shizuishan coal seam #3 simulated by UDEC package

作面围岩内张开型采动裂隙附近曾经历过应力大幅度卸载至一应力小值的这一动态过程特点，可以识别采动裂隙在开采工作面围岩内的发育特征。因本文所提的识别方法是基于应力这样一个变化过程，在该过程中，应力是要发生动态变化的，所以称之为动态应力追踪方法。

3 工程背景及计算模型

宁夏石嘴山矿区西翼采区位于宁夏石嘴山矿区向斜西北翼，井田走向长为 4.5 km，倾向平均宽为 0.7 km，面积为 3.15 km²。该区水文地质条件特殊，地层不整合，第三系地层缺失，巨厚的富水第四系松散层直接覆盖在煤系地层之上，基岩剥蚀面斜坡上直接堆积了巨厚的冲洪积物，岩性主要为砂、砂砾及黏性土层，揭露最大厚度为 420.90 m，具有自东南向西北逐渐增厚之势（见图 2），详细的工程地质情况描述请见文献[23]。拟挖煤层最小埋深约 350 m，最大埋深约 700 m，属深部缓倾斜煤层的地下开采。

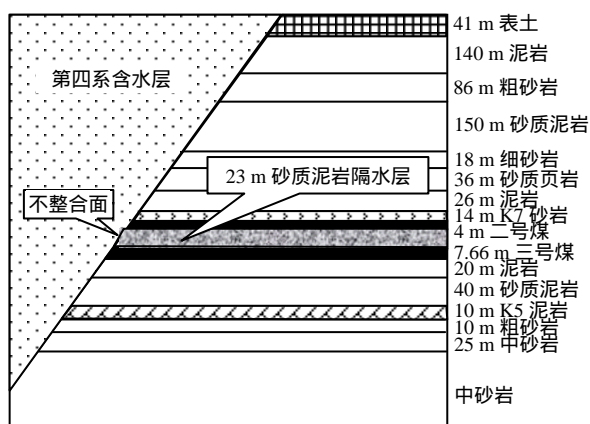


图 2 开挖煤层所在区域内的地层剖面
Fig.2 Stratigraphic section in near region of coal seam

石嘴山矿 3[#]煤层为目前主煤层，煤层厚为 7.66 m，倾角平均为 8°，属近水平煤层。煤层岩性如图 2 所示。矿区水文地质条件、岩性参数测试结果显示，粗粒砂岩、粉砂岩类坚硬岩层为含水层；在 3[#]煤层以上共 5 层，累计厚度为 68.78 m；粉砂质泥岩类中硬岩层为弱含水层。由统计可知，该矿 3[#]煤层上覆岩层及第四系以下以硬岩及中硬岩类的含水层以及弱含水岩层为主，3[#]煤层上方 23 m 砂质泥岩可视为煤层上方关键隔水层，4 m 厚的 2[#]煤层及 14 m 厚的 K7 砂岩层是含水层。煤层未开采扰动前，第四系松散体含水层对 2[#]煤层及 K7 砂岩层进

行横向水力补给。因此，3[#]煤层的安全开采关键在于 23 m 厚的砂质泥岩关键隔水层的破坏程度。

若 3[#]煤层开采后，采动裂隙带高度大于 23 m，从而越过砂质泥岩隔水层；其中部分采动裂隙有可能形成导水的通道，K7 砂岩主含水层将可能通过部分联通的导水采动裂隙向采空区发生纵向水力联系，易发生开采工作面突水、涌水事故。所以研究石嘴山矿巨厚第四系松散沉积物含水层下方开采 3[#]煤层采动裂隙的发育形态、范围和高度对验证所提出的动态应力追踪方法的可行性和适用性具有意义。

利用 UDEC 离散元软件对开采扰动进行数值模拟，开采方案如图 3 所示，煤层开采共分 3 次完成，采用下行式开采顺序，其中不整合面处预留防水煤柱 150 m，中间煤柱宽为 15 m。在横向坐标 0~1 300 m，竖向坐标 0~540 m 范围内，设置密集的检测点（见图 4）。在矩形 ABCD 范围内，竖直方向每隔 1 m 设置一个监测点，水平方向每隔 1.5 m 设置一个监测点。对开挖过程中每个监测点的横向、竖向应力、剪应力进行全程监测。计算过程中监测点达 45×10⁴ 个。计算中采用摩尔-库仑模型描述岩块间的接触面力学行为，岩块、结构面的物理力学参数，请见文献[24]。

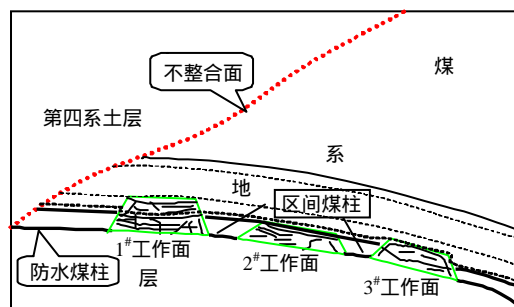


图 3 宁夏石嘴山三矿井开采剖面示意图
Fig.3 Sketch map of mining section of Shizuishan coal seam #3

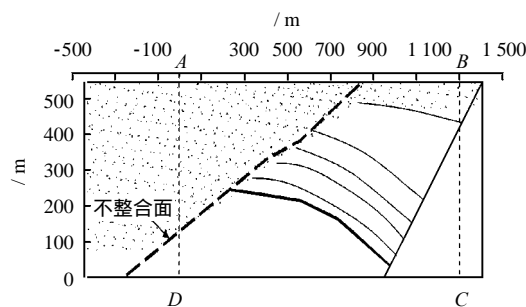


图 4 应力监测点设置范围
Fig.4 Regional scope of points for monitoring stresses

4 煤层开挖过程中的应力分布

图 5 1[#]~3[#]工作面分别是开挖稳定后横向、竖向应力分布云图。从该图中的应力分布变化情况，可以直接了解 2[#], 3[#]工作面开挖后对之前开挖形成的应力场的影响情况。由图可以看出，2[#]工作面的开采对 1[#]工作面围岩内部的应力分布的影响极为显著。2[#]工作面开采稳定后，其上方同样有大面积的应力卸载区。然而 2[#]工作面的煤层开采却使 1[#]工作面上方的应力都有所增大，从裂隙发育的角度看，2[#]工作面的开挖会使 1[#]工作面上方裂隙有所闭合。2[#]工作面的开挖，对原有的应力场的扰动进一步增大，然而不整合面同样对应力分布有着很明显的阻隔效应^[24]。3[#]工作面的开挖对 1[#]和 2[#]工作面上方的应力也有着显著的影响，表现为 1[#]和 2[#]工作面上方

围岩内应力也有所增大，其上方裂隙会有所闭合，尤其在 1[#]工作面上方围岩内最为明显。所以综合分析可以发现：不整合面的作用不可忽视，其对扰动应力场的阻隔作用极为明显，对上覆第四系松散沉积物的稳定性有着积极的作用。

从竖向应力分布看，煤层柱内部有很大的应力集中现象，最大可以达到 30 MPa，属高应力区。后开挖的采煤工作面对之前开挖的工作面有着积极和正面的作用，表现为后开挖的工作面可以使之前开挖的工作面上方覆岩内部应力有所增加，使之前开挖张开的裂隙有所闭合，对阻止地下水进入开采工作面具有积极作用。

图 6 为 1[#]~3[#]工作面开挖稳定后剪应力的分布图，开挖导致的剪应力分布表明：(1) 开挖后在所有工作面周围都存在着大范围的剪应力集中区。

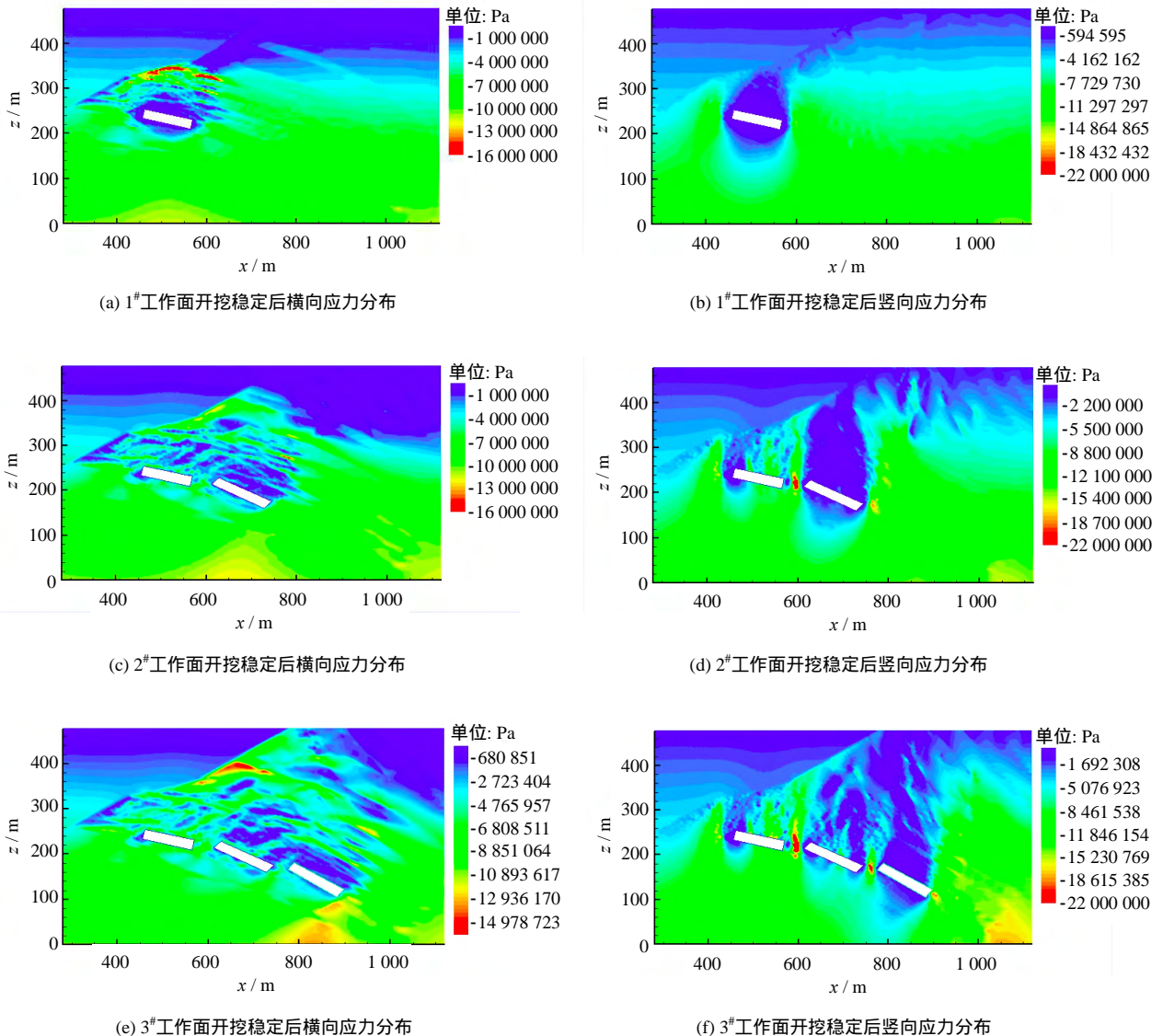


图 5 1[#], 2[#], 3[#]工作面开挖稳定后横向, 竖向应力分布图

Fig.5 Distributions of horizontal and vertical stresses after excavation of #1, #2, #3 working faces

(2) 不整合面对剪切应力的阻隔作用也同样极为明显。(3) 2[#]工作面的开挖可以明显减少 1[#]工作面围岩内的剪应力量级；同样 3[#]工作面的开挖可以明显减少 2[#]和 1[#]工作面围岩内的剪应力的量级。(4) 开挖导致的剪切应力不仅存在于开采工作面四周，还存在于具有不同岩性的地层之间，量级可达到 5 ~ 10 MPa。

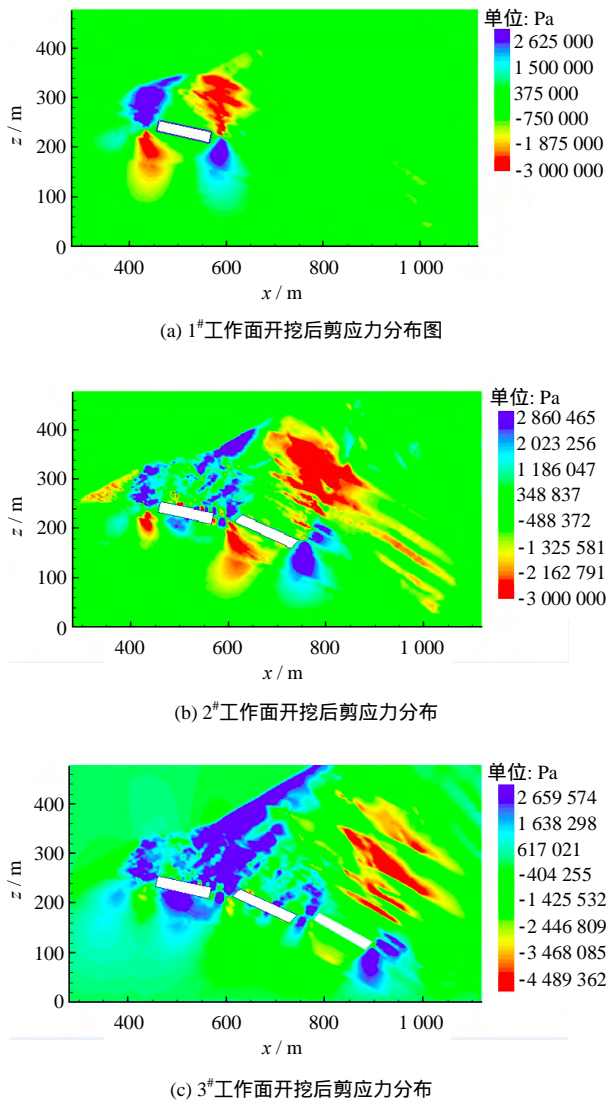


图 6 1[#] ~ 3[#]工作面开挖后剪应力分布图
Fig.6 Distributions of shear stress after the excavation of working faces #1, #2 and #3

5 采动裂隙发育高度识别

这里所采用的识别标准就是本文提出的采动裂隙生成动态应力追逐方法：开挖导致开采工作面围岩应力如果存在从由重力引起的应力大值大幅度释放卸载至一个应力小值的过程，岩体松弛，采动裂隙即已经生成并张开或轻微接触。对张开型裂隙，其附近区域的应力应降至接近 0 的值，对轻微接触

裂隙，其周围应力也应该为一很小的值。所以在开挖过程中应力曾出现过从重力引起的大应力值降到接近为一小值的动态过程，可以用来识别采动裂隙是否形成的一个指标。在使用 TechPlot 后处理软件进行数据处理时，将经历过大幅度应力释放过程的区域标识为蓝色，以表示采动裂隙发育带。以此即可以获知采动裂隙发育的范围及高度。

如前文所提到，在 DEM 计算中监测了计算域内 45×10^4 个点的应力变化时程曲线。下面以 1[#]工作面中线上方一点 ($x=512\text{ m}$, $z=257\text{ m}$) 为代表性点来分析煤层开采过程中开采工作面围岩内部应力变化过程，以及与之相对应的裂隙生成、张开和闭合的过程。

图 7、8 是该代表性点上开挖过程中横向应力和剪应力的全过程时程曲线。图 7 清楚地显示，在 1[#]工作面开挖之前，该代表性点上由重力引起的横向应力超过了 4 MPa，1[#]工作面开挖后，该点处发生卸载，应力迅速降低到接近于 0，表明 1[#]工作面的开挖使该点处产生了裂隙。裂隙产生后，由于围岩还处于应力重分配调整阶段，该裂隙处的应力也发生相应的震荡，但不会出现量级很大的应力值。图 7 还显示 2[#]、3[#]工作面的开挖对该代表点处的应力有相当显著的影响。2[#]、3[#]工作面的开挖使该代表点处的应力发生大幅度快速上升，表明 2[#]、3[#]工作

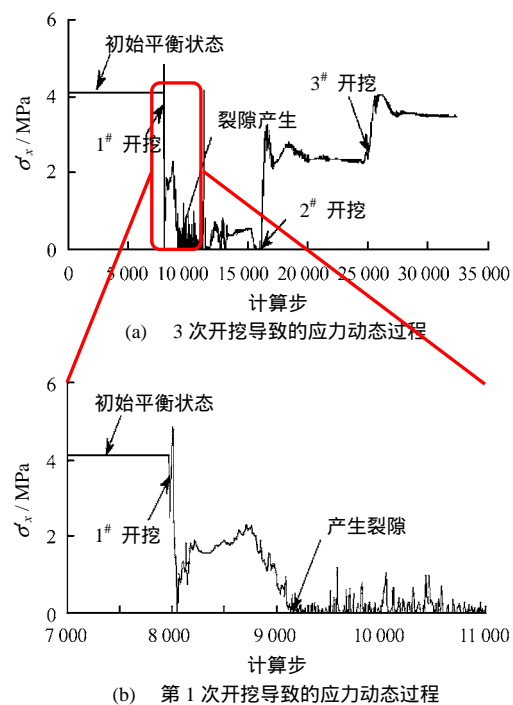


图 7 1[#]工作面中线上方点 $x=512\text{ m}$, $z=257\text{ m}$ 上在开挖过程中横向应力变化全时程曲线
Fig.7 Time history curves of horizontal stress variation on point $x=512\text{ m}$, $z=257\text{ m}$ in process of excavation

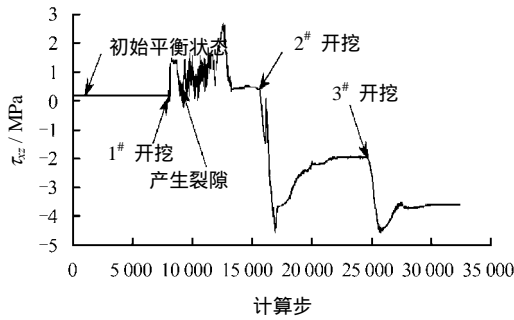


图 8 1#工作面中线上方点 $x=512\text{ m}$, $z=257\text{ m}$ 上在开挖过程中剪应力变化全时程曲线

Fig.8 Time history curve of shear stress variation on point $x=512\text{ m}$, $z=257\text{ m}$ in the process of excavation

面的开挖使 1#工作面围岩内裂隙发生了闭合。这种裂隙的闭合实际上是有利于 1#工作面的防水。

图 8 表明，在 1#工作面开挖之前，代表性点处

有重力引起的剪应力很小，约为 40 kPa。但 1#工作面开挖之后，该点处的剪应力总体上是有大幅度上升的，一般最大可以超过 2 MPa。同样由于围岩应力重分布调整，该点的剪应力在 1#工作面开挖之后也发生振荡。2#、3#工作面的开挖对代表性点处的剪应力的影响也极为显著。该点处的剪应力在 2#、3#工作面的开挖后量级可达 4 MPa，但剪切方向与之前的相反。能够承受如此之大的剪应力也表明了之前产生的裂隙一定发生了闭合。需要注意的是，尽管剪应力的量级很大，并不代表一定能够发生剪切破坏，因为，此时的围压也很大。

图 9 显示的是采用本文提出的动态应力追踪方法判定的石嘴山矿 3#煤层开挖过程中的裂隙发育图。从图可以看出，1#工作面开挖后 1 000 个计算步，由于开挖工作面周围岩体松弛有大量裂隙生成，

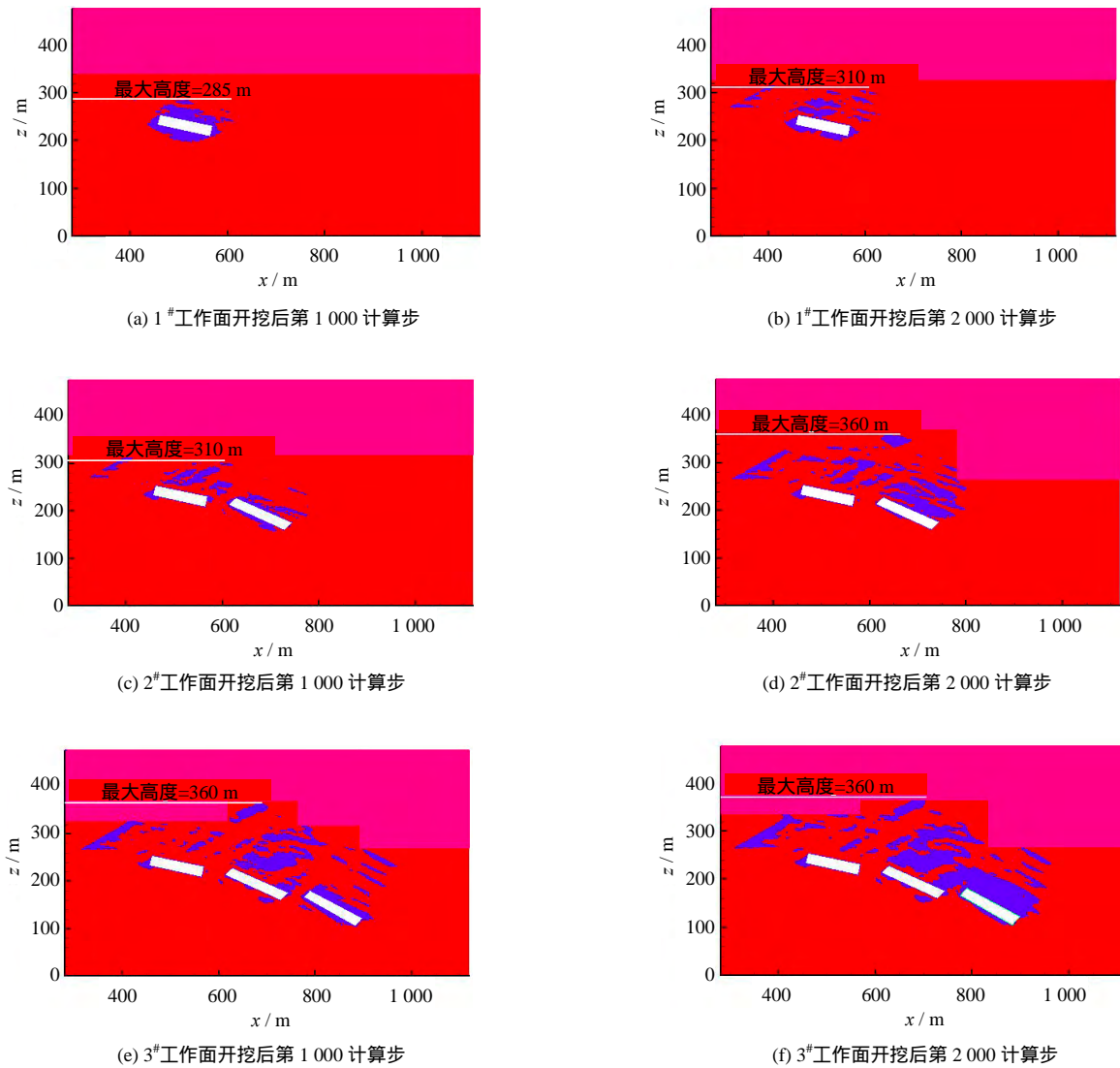


图 9 1# ~ 3#工作面开挖后导致的新生裂隙发育带

Fig.9 Fractures developments of newly generated fractures in surrounding rock masses after excavation of working faces #1, #2 and #3

最大裂隙高度达到 $z=285$ m 处，裂隙带的高度约 18 m。之后 1[#]开挖工作面上覆围岩进一步松弛，围岩内应力也进一步调整，扰动裂隙带高度进一步向上发展，到第 2 000 个计算步时扰动裂隙带高度发展到 $z=310$ m 处，裂隙带高度约 25 m。而且还可以看到，不整合面的存在可以阻挡扰动裂隙向第四系松散地层内发展，但在不整合面下方附近，有扰动裂隙产生。如果不整合面导水性良好，并且和含水地层相通，就极易导致 1[#]工作面内的涌水事件。

2[#]工作面开挖后第 1 000 个计算步，其周围也产生了采动裂隙，该裂隙网络与 1[#]工作面开挖后形成的裂隙网络合并。但该联合的采动裂隙网络的最大高度还是由 1[#]工作面开挖导致的裂隙带决定，最大裂隙高度达到 $z=310$ m 处，裂隙带的高度为 25 m。随着时间的推移，2[#]工作面上方覆岩内的采动裂隙大幅度增加，同时也影响到原有的 1[#]工作面开挖后形成的采动裂隙网络，联合的裂隙网络范围扩大，高度增加，达到 $z=360$ m 处，裂隙带高度约 40 m。然而 1[#]工作面上方小区域范围内，扰动裂隙的密度有所降低，表明有部分原有张开裂隙在 2[#]工作面开挖后发生了闭合。

3[#]工作面开挖后第 1 000 个计算步，其周围当然也产生了采动裂隙，并且裂隙带基本与 3[#]工作面平行，在工作面附近，裂隙发育密度相对比较大。新形成的裂隙带网络与之前的裂隙网络相联合，在覆岩内部形成一个更大的采动裂隙网络。而且还可以很清楚地看到，3[#]工作面的开挖使 1[#]、2[#]开挖工作面上方裂隙的采动裂隙进一步减少，表明有很多原有的裂隙因 3[#]工作面的开挖发生了闭合。这一现象在 1[#]工作面上方尤为明显。第 1 000 个计算步之后，3[#]工作面上方覆岩进一步调整，应力也要进一步释放，采动裂隙进一步增多，从图片分析结果看，3[#]工作面上方附近，第 2 000 个计算步时裂隙发育密度相对之前的第 1 000 个计算步时有大幅度增加，上覆围岩发生垮塌，该分析结果提示 3[#]工作面开挖过程中需要对围岩垮塌予以关注。1[#]~3[#]工作面上方覆岩内的采动裂隙带不会延伸到第四系地层。不整合面的存在也在一定程度上限制了扰动裂隙带发育的最大高度。最终，扰动裂隙带发育的最大高度达到竖向坐标 $z=360$ m 处，裂隙带的高度约为 65 m。

6 结 论

煤层开采过程中，开采工作面围岩一定范围内的岩体会产生卸荷裂缝或新裂隙，其中有一部分裂

缝和裂隙存在张开的经历。由于张开的裂隙和缝隙内没有力的传递介质，在这些裂缝、裂隙附近区域的应力会从因重力引起的应力大值降低到一个很小的值，但不一定会达到应力 0 值。裂缝、裂隙附近区域的应力由于之后的应力重分布可以发生调整而振荡，裂缝、裂隙相应地可以闭合，甚至可以承受很大的剪应力。基于一部分张开的采动裂隙附近区域的应力大值曾经历过大幅度卸载到一个很小值这一动态过程，本文提出了识别采动裂隙带发育的动态应力追踪方法，并将该识别方法应用到石嘴山矿 3[#]煤层开采中，识别围岩采动裂隙带的范围和高度。研究表明 1[#]~3[#]煤层工作面开采后，采动裂隙带发育高度分别达到 25、40、65 m。实际上都已经穿透了石嘴山矿 3[#]煤层上覆的隔水层，预判该矿煤层开采中进水危险性较大。本文的研究案例表明，所提出的动态应力追踪方法在预测和识别采动裂隙发育范围和高度方面具有很好的可行性和适用性，可以为今后开展类似的研究工作提供较好的基础。

参 考 文 献

- [1] 孙亚军, 徐智敏, 董青红. 小浪底水库下采煤导水裂隙发育监测与模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 238 - 245.
SUN Ya-jun, XU Zhi-min, DONG Qing-hong. Monitoring and simulation research on development of water flowing fractures for coal mining under Xiaolangdi reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, (2): 238 - 245.
- [2] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
State Coal Industry Administration. Buildings, water, railways and major roadway Coal Pillar Design and Coal mining regulations[S]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 2000.
- [3] 程学丰, 刘盛东, 刘登宪. 煤层采后围岩破坏规律的声波 CT 探测[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 153 - 155.
CHENG Xue-feng, LIU Sheng-dong, LIU Deng-xian. Sound-wave CT detection for failure patterns of surrounding rock after mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(2): 153 - 155.
- [4] 于师建. 大距离声波穿透法确定导水裂隙带范围[J]. 山东矿业学院学报(自然科学版), 1998, 17(4): 32 - 35.
YU Shi-jian. Fissure zones in the long distances on transmission method[J]. *Journal of Shandong Mining*

- Institute, 1998, 17(4): 32 - 35.
- [5] 王刚, 周启友, 吴世艳. 基于高密度电阻率成像法的基岩裂隙网络原位识别试验研究[J]. 地质评论, 2012, 58(1): 165 - 174.
WANG Gang, ZHOU Qi-you, WU Shi-yan. An in-situ experimental study of fractures network identification within bedrock by high-density electrical resistivity tomography[J]. **Geological Review**, 2012, 58(1): 165 - 174.
- [6] 刘盛东, 吴荣新, 张平松. 高密度电阻率法观测煤层上覆岩层破坏[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(4): 18 - 22.
LIU Sheng-dong, WU Rong-xin, ZHANG ping-song. High density electric resistance method applied to monitor and measure overburden failure above seam[J]. **Coal Science and Technology**, 2001, 29(4): 18 - 22.
- [7] 王玉峰. 厚黄土层下综放面顶板导水裂隙带高度探测研究[J]. 煤炭技术, 2012, 31(1): 74 - 76.
WANG Yu-feng. Research on detecting height of water flowing fractured zone of roof at fully mechanized caving face under thick soil layer[J]. **Coal Science and Technology**, 2012, 31(1): 74 - 76.
- [8] 范志胜, 程敏. 应用井下仰孔分段注水观测导水断裂带高度[J]. 矿业安全与环保, 2012, 37(6): 75 - 77.
FAN Zhi-sheng, CHENG Min. Application of underground hole segmented injection for observing water-conducting fractured zone height[J]. **Mining Safety and Environment Protection**, 2012, 37(6): 75 - 77.
- [9] 孔令海, 姜福兴, 杨淑华. 基于高精度微震监测的特厚煤层综放工作面顶板运动规律[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(5): 552 - 558.
KONG Ling-hai, JIANG Fu-xing, YANG Shu-hua. Movement of roof strata extra-thick coal seam in top coal caving mining based on high precision micro-seismic monitoring system[J]. **Journal of Science and Technology Beijing**, 2010, 32(5): 552 - 558.
- [10] LUO Xun, HLATHERLY P. Application of microseismic monitoring to characterize geomechanic conditions in longwall mining[J]. **Exploration Geophysics**, 1998, 489 - 493.
- [11] 张玉军, 张华兴, 陈佩佩. 覆岩及采动岩体裂隙场分布特征的可视化探测[J]. 煤炭学报, 2008, 33(11): 1216 - 1219.
ZHANG Yu-jun, ZHANG Hua-xing, CHEN Pei-pei. Visual exploration of fissure field of overburden and rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(11): 1216 - 1219.
- [12] 张玉军, 李凤明. 高强度综放开采采动覆岩破坏高度及裂隙发育演化监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2994 - 3001.
ZHANG Yu-jun, LI Feng-ming. Monitoring analysis of fissure development evolution and height of overburden failure of high tension fully-mechanized caving mining[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp. 1): 2994 - 3001.
- [13] 桂和荣, 周庆富, 廖多荪. 综放开采最大导水裂隙带高度的应力法预测[J]. 煤炭学报, 1997, 22(4): 375 - 379.
GUI He-rong, ZHOU Qing-fu, LIAO Duo-sun. Prediction of maximum height of the fractured zone by stress method for sun-level caving mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 1997, 22(4): 375 - 379.
- [14] 黄志安, 童海方, 张英华. 采空区上覆岩层“三带”的界定准则和仿真确定[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(7): 609 - 612.
HUANG Zhi-an, TONG Hai-fang, ZHANG Ying-hua. Dividing guideline and emulating determination of “three zones” of the depressing zones overlying a goaf[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2006, 28(7): 609 - 612.
- [15] 杨贵. 综放开采导水裂隙带高度及预测方法研究[D]. 山东: 山东科技大学, 2004.
YANG Gui. Study on the height of water flowing fractured zone and prediction method in fully mechanized sub-level caving[D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2004.
- [16] 石必明, 俞启香, 周世宁. 保护层开采远距离煤岩破裂变形数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 259 - 263.
SHI Bi-ming, YU Qi-xiang, ZHOU Shi-ning. Numerical simulation of far distance rock strata failure and deformation caused by mining protection stratum[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2004, 33(3): 259 - 263.
- [17] 任强. 采场覆岩变形破坏规律的数值模拟及敏感性分析[D]. 山东: 山东科技大学, 2007: 32 - 40.
REN Qiang. The numerical simulation and sensitive analysis of the mining overlying strata distortion and failure laws[D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2007: 32 - 40.

- highway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 512 - 516.
- [2] 杨晶, 楼晓明, 黄江枫, 等. 常见沉降预测方法在软基堆载预压实例中的应用比较[J]. **工程勘察**, 2011, 3: 18 - 23.
YANG Jing, LOU Xiao-ming, HUANG Jiang-feng, et al. Comparison of common settlement predicting methods in application of a project case of surcharge preloading method[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2011, 3: 18 - 23.
- [3] 谢永利, 潘秋元, 曾国熙. 应用离心模型试验研究软基变形性状[J]. **岩土工程学报**, 1995, 17(4): 45 - 50.
XIE Yong-li, PAN Qiu-yuan, ZENG Guo-xi. Centrifugal model tests on settlement characteristics of embankment using blasting compaction technology[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(4): 45 - 50.
- [4] 章为民, 徐光明. 土石坝填筑过程的离心模拟方法[J]. **水利学报**, 1997, (2): 8 - 13.
ZHANG Wei-min, XU Guang-ming. Centrifugal model tests on settlement characteristics of embankment using blasting compaction technology[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1997, (2): 8 - 13.
- [5] 丁金华, 包承纲. 软基和吹填土上加筋堤的离心模型试验及有限元分析[J]. **土木工程学报**, 1999, 32(1): 21 - 25.
DING Jin-hua, BAO Cheng-gang. Centrifugal model tests on settlement characteristics of embankment using blasting compaction technology[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1999, 32(1): 21 - 25.
- [6] ALMEIDA M S, DAVIES M R, PARRY R G. Centrifuge tests of embankments on strengthened and strengthened clay foundations[J]. **Géotechnique**, 35(4): 425 - 441.
- [7] 高长胜, 陈生水, 徐光明, 等. 堤防边坡稳定离心模型试验技术[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(23): 4308 - 4312.
GAO Chang-sheng, CHEN Sheng-shui, XU Guang-ming, et al. Centrifugal model test on slope stability of levee project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4308 - 4312.
- [8] SOMMERS A N, VISWANADHAM B V S. Centrifuge model tests on the behavior of strip footing on geotextile-reinforced slopes[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2009, 27(6): 497 - 505.
- [9] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D, et al. A deformation measurement system for geotechnical testing based on digital imaging, close-range photogrammetry, and PIV image analysis[C]//Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2001, 1: 539 - 542.

上接第 3298 页

- [18] 张云峰, 胡依鲁. 特厚老顶工作面高位钻孔参数优化设计[J]. **煤矿安全**, 2013, 44(3): 136 - 138.
ZHANG Yun-feng, HU Yi-lu. The parameters optimization design of high level borehole for extra thick old top coal mining face[J]. **Safety in Coal Mines**, 2013, 44(3): 136 - 138.
- [19] 廖孟柯, 王波. 采空区上覆岩层裂隙演化数值模拟研究[J]. **科学技术与工程**, 12(25): 6286 - 6289.
LIAO Meng-ke, WANG Bo. Numerical simulation study on crack evolution in overburden strata of top goaf[J]. **Science Technology and Engineering**, 2012, 12(25): 6286 - 6289.
- [20] 刘治国. 中硬覆岩导水裂缝带发育高度与条带开采尺寸的关系研究[D]. 北京: 煤炭科学总院, 2004.
LIU Zhi-guo. The relationship between water conducted zone height in the moderate hardness cover rocks and the dimensions of the strip longwall[D]. Beijing: Chinese Coal Research Institute, 2004.
- [21] 孙国权, 李娟, 胡杏保. 基于 FLAC^{3D} 程序的采空区稳定性分析[J]. **金属矿山**, 2007, (368): 29 - 32.
SUN Guo-quan, LI Juan, HU Xing-bao. FLAC^{3D} based stability analysis of mined-out area[J]. **Metal Mine**, 2007, (368): 29 - 32.
- [22] 武雄, 汪小刚, 段庆伟, 等. 导水断裂带发育高度的数值模拟[J]. **煤炭学报**, 33(6): 609 - 612.
WU Xiong, WU Xiao-gang, DUAN Qin-wei, et al. Numerical modeling about developing high of water flowing fractured zone[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(6): 609 - 612.
- [23] 王金安. 石嘴山三矿建井地质报告[R]. 宁夏: 石嘴山地质测量局, 1991.
Wang Jin-an. Report of geological conditions in No. 3 coal of Shizuishan[R]. Ningxia: Department of Geological Measurement, Shizuishan, 1991.
- [24] 张燕, 纪洪广, 王金安. 不整合地层下煤层开采覆岩裂隙场发育特征研究[J]. **煤炭学报**, 2011, 36(11): 1795 - 1800.
ZHANG Yan, JI Hong-guang, WANG Jin-an. Fracture development due to coal mining under unconformable overlying strata[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(11): 1795 - 1800.