

文章编号: 1000-4750(2017)12-0229-10

# 浅埋煤层开采突水溃砂两相流的耦合数值研究

钟江城<sup>1</sup>, 周宏伟<sup>1,2</sup>, 赵宇峰<sup>3</sup>, 刘亚群<sup>4</sup>, 易海洋<sup>1</sup>, 薛东杰<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;  
3. 弗莱贝格工业大学岩土工程研究所, 德国, 弗莱贝格 D-09596; 4. 机械科学研究院工程机械军用改装车试验场, 北京 102100)

**摘 要:** 为探究浅埋煤层开采上覆含水松散层水砂两相流动规律, 采用基于离散元软件 PFC<sup>3D</sup> 和有限元软件 GID 的耦合数值方法, 模拟了上覆岩层中预制理想单裂隙在不同开度和倾角条件下突水溃砂全过程, 分析了裂隙通道所受接触力、水流速度、水砂间拖曳力随时步的变化规律。结果表明: 裂隙开度和倾角会改变突水溃砂过程中水砂突涌类型, 对覆岩所受接触力、水流速度及其稳定所需时间产生较大影响, 水砂间拖曳力主要受裂隙倾角的影响。裂隙通道入口处即上覆岩层的顶层在突水溃砂初期所受接触力最大, 处于最危险状态; 水流速度稳定值和流动稳定所需时间分别与裂隙倾角和开度成线性相关; 对比裂隙通道底面侧, 倾向侧水砂间拖曳力较大, 水砂突涌更加剧烈。

**关键词:** 浅埋煤层; 突水溃砂; 离散元; 有限元; 裂隙; 突涌类型

中图分类号: TD822 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.08.0592

## THE TWO-PHASE FLOW OF WATER-SAND INRUSH UNDER SHALLOW COAL SEAM MINING: A COUPLED NUMERICAL STUDY

ZHONG Jiang-cheng<sup>1</sup>, ZHOU Hong-wei<sup>1,2</sup>, ZHAO Yu-feng<sup>3</sup>, LIU Ya-qun<sup>4</sup>, YI Hai-yang<sup>1</sup>, XUE Dong-jie<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg D-09596, Germany;

4. Proving Ground for Construction Machinery & Refit Military Vehicles of CAM, Beijing 102100, China)

**Abstract:** In order to study the flow performance of mixed water-sand two-phase flow of the overlying water bearing loose bed under the shallow coal seam mining, a coupled numerical method based on discrete element software PFC<sup>3D</sup> and finite element software GID is used to simulate the whole processes of water-sand inrush in precast ideal fracture with different opening widths and dip angles in overlying rock strata. The analysis of the contact force of the fracture channel, flow velocity of water and the drag force between water and sand variation law along with time steps show that, the opening widths and dip angles of fracture change the flow patterns of water-sand flow inrush, and have great impact on the contact force of the fracture channel, flow velocity of water and the time of mixed water-sand flow. However, the drag force is mainly influenced by the dip angles of fissure channel. The fracture channel entrance is the most dangerous position, where has the largest contact force in the process of water-sand coupled flow. The final flow velocity of water and the time steps to stabilize the water

收稿日期: 2016-08-05; 修改日期: 2016-11-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600704); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(博导类)(20130023110017);

国家自然科学基金项目(51134018)

通讯作者: 周宏伟(1965—), 男, 重庆合川人, 教授, 博士, 博导, 主要从事工程力学与岩石力学方面的教学与研究(E-mail: zhw@cumtb.edu.cn).

作者简介: 钟江城(1988—), 男, 湖北随州人, 博士生, 主要从事渗流力学及其工程应用方面的研究(E-mail: zhongjc1988@126.com);

赵宇峰(1989—), 男, 内蒙赤峰人, 博士生, 主要从事岩土工程数值模拟方面的研究(E-mail: yufeng.zhao1@student.tu-freiberg.de);

刘亚群(1990—), 男, 河北秦皇岛人, 硕士, 主要从事渗流力学方面的研究(E-mail: yqtt1909@yeah.net);

易海洋(1988—), 男, 四川达州人, 博士, 主要从事孔隙介质渗流-应力耦合过程的数值模拟研究(E-mail: yihaiyangchina@gmail.com);

薛东杰(1986—), 男, 山东微山人, 讲师, 博士, 主要从事采矿工程及岩石力学方面的研究(E-mail: xuedongjie@163.com).

velocity in the fissure are in linear correlation with the fracture angles and the fracture opening widths, respectively. The drag force is greater and water-sand inrush is more intense in dip side than underside of the fissure channel.

**Key words:** shallow coal seam; water-sand inrush; discrete element; finite element; fracture; type of inrush

神华集团大柳塔活鸡兔井开采区域大部分集中于埋深在 150 m 以内的浅部, 是典型的浅埋深厚松散层的地质条件。在浅埋深煤层开采过程中经常会遇到上覆松散层含砂含水率较高的情况, 煤层开采往往会导致覆岩破断而产生煤层与上覆松散层的贯通裂隙, 此时水砂混合流体极容易通过贯通裂隙突涌到采煤工作面, 此类突水溃砂事故轻则破坏开采设备, 恶化开采环境, 影响煤矿的正常生产, 重则会威胁到井下作业人员的生命安全<sup>[1]</sup>。突水溃砂事故的危害主要有: ① 产生的瞬间冲击力会破坏突水溃砂口附近的巷道支护; ② 导致原始裂隙通道的扩张以及新裂隙的产生; ③ 加剧开采上方顶板的冒落, 严重破坏区域水系<sup>[2]</sup>。

国内外一些学者就浅埋深煤层开采过程中的突水溃砂问题已做过相关研究。梁燕<sup>[3]</sup>和汤爱萍<sup>[4]</sup>等通过突水涌砂室内试验, 总结出突水涌砂的影响因素, 分析了突水机理, 并给出了相关的防治方法; 张敏江等<sup>[2,5]</sup>利用室内模拟试验, 探讨了弱胶结砂层在井下形成突水涌砂的机理; 隋旺华等<sup>[6]</sup>以不同颗粒组成的 7 种土样以及带不同尺寸裂缝的混凝土块为模拟材料, 在不同的初始压力下, 模拟了煤体采动过程中突水溃砂的全过程, 提出上覆含水层的初始水头与突砂口的张开程度是控制矿井工作面突砂量的关键因素。此外, 隋旺华、张蓓等<sup>[7-9]</sup>分别对浅埋深煤层开采和钻孔导致的突水溃砂机理及其防治对策做出了相关研究。国外学者对于突水溃砂问题研究相对较少, 主要有美国密西西比水流的携砂能力问题研究<sup>[10]</sup>, 砂体在油井中的移动受砂体的颗粒大小、形状及砂拱等因素限制的研究<sup>[11]</sup>, 水砂混合流的输送问题及水砂运动过程中的力学行为<sup>[12-13]</sup>, 深部砂土在特定水头、特定应力以及特定突涌条件下的砂土运移状态的问题研究<sup>[14-17]</sup>等。

原方等<sup>[18]</sup>对固体颗粒在带流槽侧壁筒仓内的单相流动规律展开了三维颗粒流数值模拟, 胡亚元等<sup>[19]</sup>通过数值模拟研究了流体在堤坝中的渗流(管涌)特性, 但是突水溃砂两相流动的数值研究却较少。本文利用三维颗粒流离散元软件 PFC<sup>3D</sup> 和有限元软件 GID, 选取大柳塔活鸡兔井 22614 综采工作

面为浅埋深薄基岩煤层开采突水溃砂机理研究的工程背景, 建立了不同裂隙开度和倾角条件下浅埋煤层开采突水溃砂的耦合数值模拟模型。深入研究了不同形态的裂隙通道下, 突水溃砂过程中裂隙通道所受作用力、水的流动速度、水砂之间相互作用力的变化规律, 并由此划分出了水砂混合物在裂隙通道内的两种突涌类型。

## 1 两相流的 PFC<sup>3D</sup>-GID 耦合模拟理论

### 1.1 两相流的耦合数值方法及原理

目前模拟流体-固体两相流的相间耦合数值模型主要有颗粒群轨道模型和双流体模型两种。颗粒群轨道模型把流体(液体或气体)当作连续介质, 而将颗粒视为离散体系; 双流体模型则把颗粒作为拟流体, 认为颗粒与流体是共同存在且相互渗透的连续介质<sup>[20]</sup>。本文采用颗粒群轨道模型。

CCFD (The Coupled Computational Fluid Dynamics) 是包含于 PFC<sup>3D</sup> 内的计算流体动力学代码, GID 是含有计算引擎的建模及后处理软件。PFC<sup>3D</sup>-GID 耦合数值方法模拟水砂两相流动的原理如下: 首先, 在 GID 中建立突水溃砂的几何模型, 并设置流体的边界条件、初始条件以及时间信息。其次, 调用 PFC<sup>3D</sup> 生成颗粒的数据文件, 并用 GID 通过计算对话框启动耦合计算, 即 GID 启动 CCFD、PFC<sup>3D</sup> 以及连接 CCFD 与 PFC<sup>3D</sup> 的代理服务器。其中, 每一时间步的计算, 实质上是耦合信息交换的过程, 即 PFC<sup>3D</sup> 先将每个流体单元中当前颗粒的孔隙率以及拖曳力等数据发送到 CCFD, 同时 CCFD 将每个流体单元中当前的流体速度和水压力梯度等信息反馈到 PFC<sup>3D</sup> 中。最后, 计算结束后, 在 GID 中进行后处理, 查看模拟计算结果。

### 1.2 颗粒系统控制方程

PFC<sup>3D</sup> 颗粒运动假定: 当时间步距足够小时, 单个时间步内, 颗粒的运动只受直接相邻的颗粒或墙体的影响, 而不受其他不相邻颗粒影响。离散元计算中所用颗粒系统中单个颗粒  $i$  的控制方程为:

$$m_i \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} \mathbf{f}_{ij}^c + \mathbf{f}_i^f + m_i \mathbf{g},$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} M_{ij} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{u}_i$  和  $\omega_i$  分别为颗粒  $i$  的线速度和角速度； $\mathbf{f}_{ij}^c$  和  $M_{ij}$  分别为颗粒  $j$  或墙体施加到颗粒  $i$  的接触力和力矩； $\mathbf{f}_i^f$  为流体施加于颗粒  $i$  的力； $n_i$  为与颗粒  $i$  相邻的颗粒总个数； $m_i$  和  $I_i$  分别为颗粒  $i$  的质量和惯性矩； $\mathbf{g}$  为重力加速度。

### 1.3 流体控制方程

在 CCFD 方法中连续流体域被划分成若干流体单元，对于不可压缩流体而言，计算中所用连续体的质量守恒方程和流体动量守恒方程分别为：

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho_f \varepsilon dV + \int_S \rho_f \varepsilon \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho_f \varepsilon \mathbf{v} dV + \int_S \rho_f \varepsilon \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \varepsilon \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \mathbf{f}_b dV \quad (3)$$

其中：柯西应力张量  $\mathbf{T} = \mu \nabla \mathbf{v} - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \mathbf{I} - p \mathbf{I}$ ， $\mu$  为流体黏度， $p$  为流体压力， $\mathbf{I}$  为单位张量；该等式右边第二项是由孔隙度变化引起流体运动产生的粘性损失，此项在 CCFD 求解中可忽略不计； $V$  为控制体； $S$  为边界曲面； $\mathbf{n}$  为面元  $dS$  外法线方向； $\rho_f$  为流体密度， $\mathbf{v}$  为单个流体单元速度； $\varepsilon$  为孔隙率； $\mathbf{f}_b$  为流体单元单位体积的体力(包含流体单元内颗粒对流体的作用力)。

联合式(2)和式(3)可以得到不可压缩流体的局部平均的纳维斯托克斯方程：

$$\rho_f \frac{\partial \varepsilon \mathbf{v}}{\partial t} + \rho_f \mathbf{v} \cdot \nabla (\varepsilon \mathbf{v}) = -\varepsilon \nabla p + \mu \nabla^2 (\varepsilon \mathbf{v}) + \mathbf{f}_b \quad (4)$$

### 1.4 流体与颗粒间耦合作用力

模拟浅埋煤层开采突水溃砂过程中水砂两相流动时，流体与颗粒间相互作用力主要包括拖曳力和浮力。在 PFC<sup>3D</sup> 中，假定同一流体单元内拖曳力、浮力平均地施加到每一个颗粒的中心，则拖曳力的表达式如下：

$$\mathbf{f}_{\text{drag}} = \left( \frac{1}{8} C_d \rho_f \pi d^2 |\mathbf{u} - \mathbf{v}| (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \right) \varepsilon^{-\chi} \quad (5)$$

其中： $\chi$  为经验系数， $\chi = 3.7 - 0.65 \cdot \exp\left(-\frac{(1.5 - \lg(Re_p))^2}{2}\right)$ ； $C_d$  为拖曳力系数， $C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_p}}\right)^2$ ； $Re_p$  为雷诺数， $Re_p =$

$\frac{\rho_f d |\mathbf{u} - \mathbf{v}|}{\mu}$ ； $d$  为颗粒直径。

因此，流体施加于颗粒的力，即拖曳力与浮力的合力，可以表示为：

$$\mathbf{f}^f = \mathbf{f}_{\text{drag}} + \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_f \mathbf{g} \quad (6)$$

## 2 突水溃砂数值模型

### 2.1 突水溃砂几何模型

煤层开采过程中上覆岩层的破断以剪切破坏导致的全厚度切落为主，上覆岩层裂隙基本形态如图 1 所示。可以看到当煤层开采到一定程度时，上覆岩层中会逐渐形成左右两条贯穿煤层与上覆松散砂砾层的贯通裂隙。一般情况下，由于降雨或者地表河流的存在，使得上覆局部松散层含水率较高，这样水砂混合物就会在自重及上部水压力的作用下沿着贯通裂隙涌入煤层中。

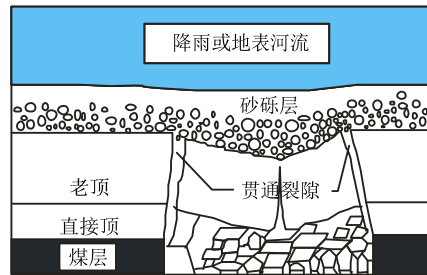


图 1 煤层开采过程中上覆岩层中裂隙形态特征

Fig.1 Fracture morphology of the upper strata in coal seam mining process

为了模拟浅埋煤层上方覆岩中水砂两相流动的规律，结合计算机的计算能力，建立了一个 3D 理想化数值模型，其侧视图如图 2 所示。模型从上至下依次为：长 1.0 m，高 0.6 m 的含水层，含水层上方初始水压力为  $q$ ；其中含水层底部为长 1.0 m，高 0.35 m 的含水砂层；垂直高度(即开采面上方覆岩的厚度)为 1.2 m，开度为  $\delta$ ，倾角为  $\alpha$  的裂隙，裂隙顶端位于含水砂层底端正中央。含水层及含水砂层中的水砂混合物从裂隙上端依靠自重及上方水压力沿着倾斜的横截面为矩形的裂隙流入煤层开采面。图 2 实际为裂隙中水砂两相流动数值模型的侧视图，上方含水层宽度为 1.0 m，裂隙宽度为 0.4 m。

薛东杰等<sup>[21]</sup>通过室内浅埋煤层开采相似模拟试验得出上覆岩层破断形成的裂隙带破裂角一般稳定在 60°左右，且角度大致在 30°~90°，当破裂角达到 90°时会出现台阶式垮落。为了研究裂隙的开

度以及裂隙相对于上覆松散层底部的倾角对水砂两相流动的影响, 本文建立了三种不同的裂隙倾角  $\alpha$  ( $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ )和三种不同的裂隙开度  $\delta$  (0.2 m、0.3 m、0.4 m)共 9 种不同情况下的数值模型(以下分别简称为: 30-0.2、30-0.3、30-0.4、60-0.2、60-0.3、60-0.4、90-0.2、90-0.3、90-0.4, 例如 30-0.2 表示裂隙倾角为  $30^\circ$ , 开度为 0.2 m 的情况)。

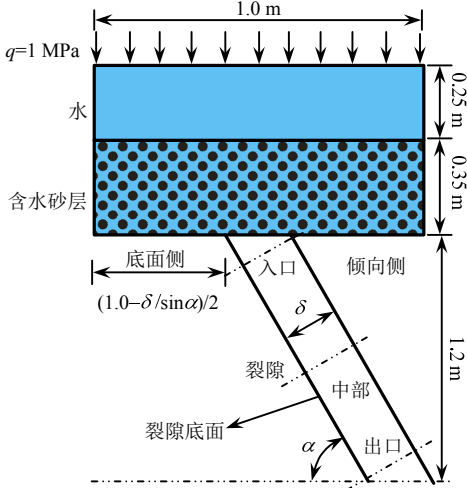


图 2 数值模型侧视图

Fig.2 Side view of the numerical model

2.2 数值模型建立及参数选取

利用软件 GID、PFC<sup>3D</sup> 建立突水溃砂两相流数值模拟的三维模型: 在 GID 中设定流体域的边界条件、初始条件及流体域网格单元划分。然后, 以 GID 中生成的墙体为边界, 在 PFC<sup>3D</sup> 中生成颗粒, 部分颗粒的模拟参数确定方法参见文献[1], 设定孔隙率为 0.4, 设定颗粒半径为 0.005 m~0.02 m, 按照随机分配的原则生成颗粒, 最终颗粒的总数为 15105, 颗粒级配曲线如图 3 所示。突水溃砂模拟过程中流体占据除颗粒以外的整个模拟区域。

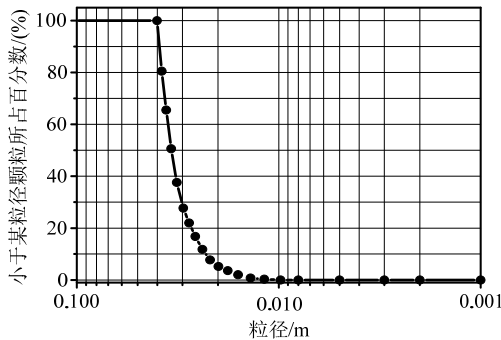


图 3 颗粒的级配曲线

Fig.3 Curves of sand samples

PFC<sup>3D</sup>-GiD 进行水砂两相流动模拟计算时, 根据颗粒状态及数据是否溢出确定合适的运算时间

步距和时间步距增量。本文选取 90-0.3 模型进行试运算, 以此来确定 PFC<sup>3D</sup> 内的相关耦合参数。当耦合时间步距选取过大时, 计算初期未形成明显的通路状态下, 会在上部空间形成湍流, 使部分颗粒漂浮起来, 即出现数据溢出现象。因此, 通过反复调节耦合参数, 当流体的速度与无颗粒状态下流体速度曲线趋势一致时, 认为该耦合参数选用准确。最终, 数值模拟所采用的颗粒参数、耦合参数等重要模型参数见表 1。

表 1 突水溃砂数值模拟几何及模型参数

Table 1 Geometric and model parameters used in the water-sand inrush simulation

类别	参数名称	数值
流体单元参数	流体密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1.0×10 <sup>3</sup>
	流体动力粘性系数/(Pa·s)	1.004×10 <sup>-3</sup>
颗粒粒子参数	颗粒数目	15105
	颗粒最大/最小半径/m	0.02/0.005
	颗粒比重/(kg/m <sup>3</sup> )	2650
	法向/切向粘结强度/N	0/0
	颗粒法向/切向刚度/(N/m)	1×10 <sup>10</sup> /1×10 <sup>8</sup>
墙体参数	颗粒摩擦系数	0.1
	初始孔隙率	0.4
	墙体摩擦系数	0.2
裂隙几何参数	墙体法向刚度/(N/m)	1×10 <sup>10</sup>
	倾角/(°)	30, 60, 90
模拟控制参数	开度/m	0.2, 0.3, 0.4
	时间步距/s	2.78×10 <sup>-7</sup>
	耦合数据交换时间步距增量/s	5×10 <sup>-4</sup>
	模拟真实时间/s	2.224 (800 万步)

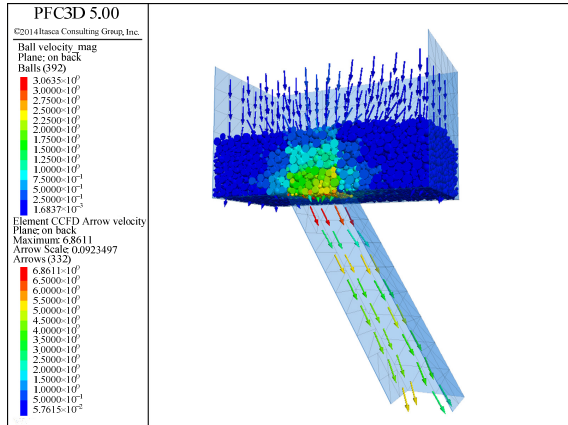
3 数值模拟结果

图 4 为模拟 60-0.2 模型突水溃砂过程中六个不同时间(0、50 万、100 万、200 万、300 万、500 万时步)流体和颗粒的速度云图, 其中颗粒和箭头颜色代表速度大小, 箭头代表流体速度方向。

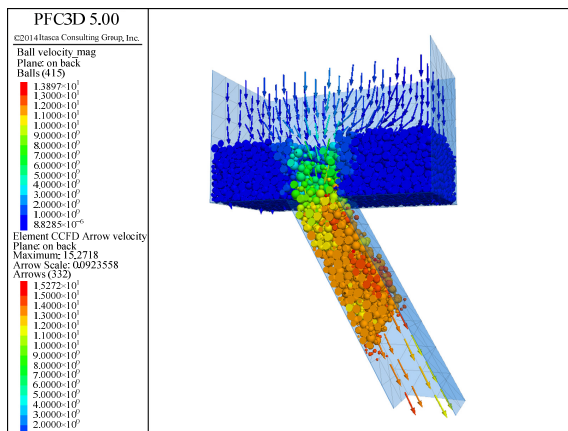
图 4 表明不同时间不同位置的砂粒速度不同, 突水溃砂的初期(图 4(a)、图 4(b)), 最前端的砂粒速度最大; 突水溃砂的高峰期(图 4(c)), 砂粒几乎充满整个裂隙通道, 通道出口顶部的颗粒速度最大; 而突水溃砂的后期(图 4(d)~图 4(f)), 砂粒疏松且大部分集中于裂隙通道底部, 底部砂粒速度最大。前期最前端砂粒在自重及水压力的作用下先涌入裂隙通道, 因而速度最大; 突水溃砂高峰期, 大量砂粒和水涌入通道, 此时涌入量大于涌出量, 裂隙通道出口处形成砂粒局部暂时堆积的现象, 阻碍了砂粒的快速运动; 突水溃砂的后期, 堆积现象解除,



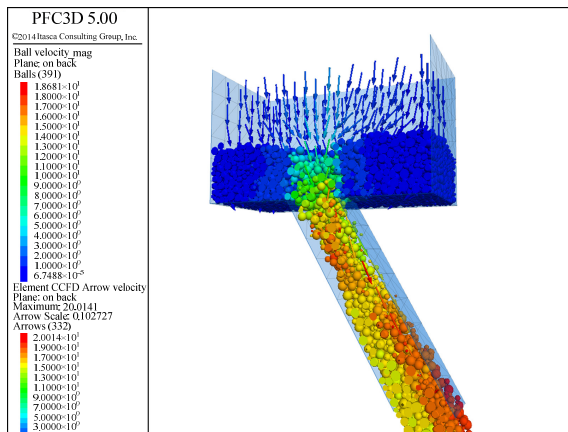
由于底部砂粒拥有更大压力差和势能差而获得更大的速度。从图 4 可以看出流体的速度也不停变化，裂隙通道内同一高度处的流体速度也不同，这是因为水和砂流动会产生速度差，导致水和砂之间产生作用力即拖曳力，从而影响彼此的速度。当局部水流速度大于颗粒速度时，水将会对砂施加推力，使砂体速度提高；相反，当局部水流速度小于颗粒速度时，砂体将会对水施加推动力，此时水流速度将增加。由此可知，水砂混合物的流动过程，水砂会



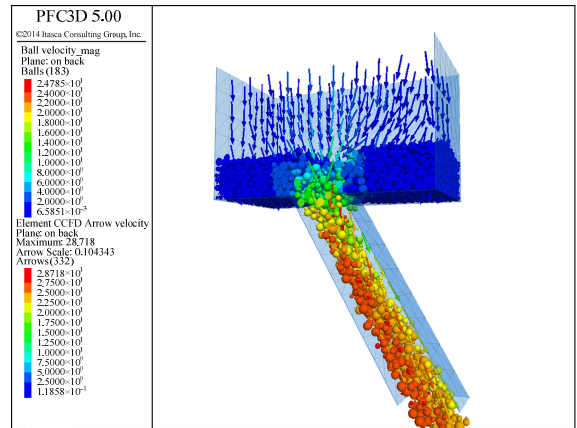
(a) 0 时步



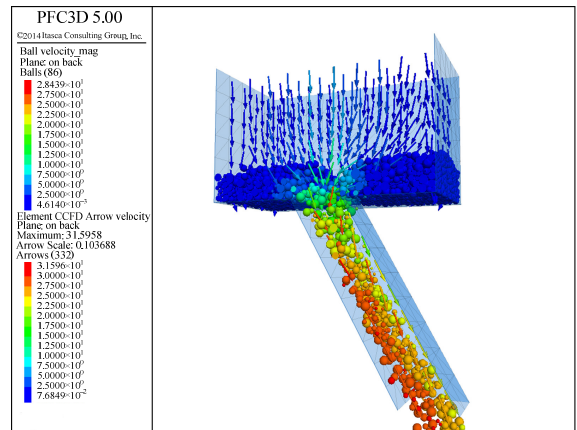
(b) 50 万时步



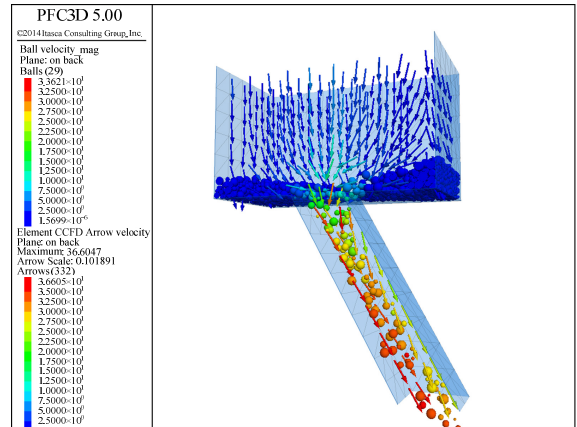
(c) 100 万时步



(d) 200 万时步



(e) 300 万时步



(f) 500 万时步

图 4 突水溃砂颗粒流模拟结果

Fig.4 The particle flow simulation result of water-sand inrush 影响彼此的流动速度，水和砂的相互作用(拖曳力)是影响水砂彼此速度的桥梁，是突水溃砂过程中的重要因素。

#### 4 结果分析

为了研究不同裂隙开度与倾角条件下水砂两相流动的耦合作用力、裂隙通道所受作用力、流体的流动速度等的变化规律，我们在数值模型的内部

(例如图 2 所示的裂隙通道入口、中部、出口等位置) 选取并记录一定数量单元在模拟计算过程中的力、速度等数据。

由于模拟时步很小，裂隙通道单元所受作用力具有偶然性，少数结果呈现上下波动趋势，为了便于观察和对比分析，将数据结果等间距的每 15 时步取一次平均值，从而一定程度上减小了曲线的波动性。为了说明波动性的影响，同时计算取平均值时的标准方差值。以模型 30-0.2 裂隙通道入口处所受接触力为例，图 5 给出了其原始数据与均值化数据对比结果，可以看到均值化数据能够较好的反映原始数据的变化规律。因此本文有关力的数据均采用均值化数据。

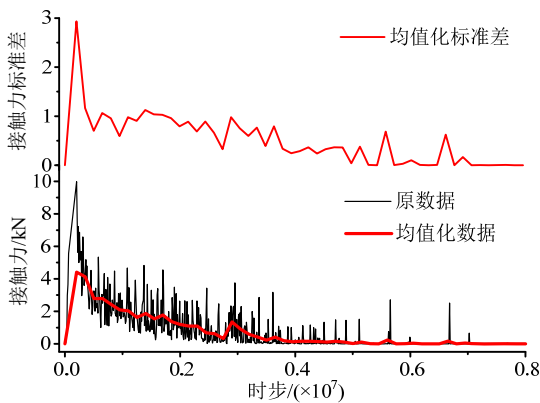


图 5 均值化数据与原数据对比图

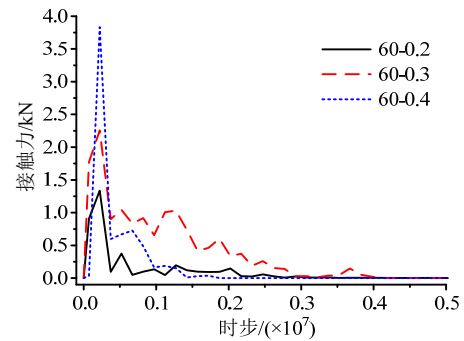
Fig.5 Comparison of the mean data and the original data

#### 4.1 突水溃砂过程中覆岩所受作用力的变化规律

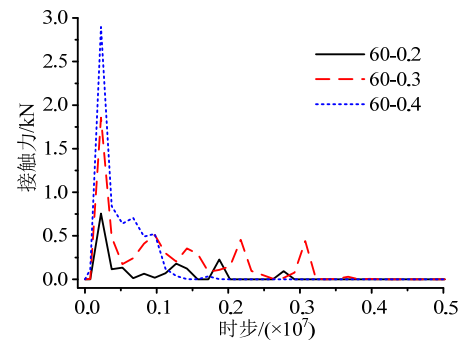
突水溃砂灾害发生过程中，水砂混合流将不可避免的对裂隙通道产生很大的瞬间作用力，这将直接影响上覆岩层的稳定性。因此，本文首先对比分析了不同裂隙开度、不同裂隙倾角模型中裂隙通道底面入口处、中部、出口处三个位置受到水砂混合物作用力(接触力)随时步(时间)的变化规律。

以 60°倾角为例，图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)给出了 60-0.2、60-0.3、60-0.4 三种模型下裂隙通道底面入口处、中部、出口处三个位置受到的接触力随时步的变化规律。可以看出，突水溃砂初期接触力达到最大值，然后逐渐降低且在一定的范围内波动，最后趋向于 0。当裂隙倾角一定时，裂隙开度越大，接触力初期达到的最大值越大，突水溃砂持续时间越短；裂隙开度为 0.3 m 时，入口处接触力的波动性大于开度为 0.2 m、0.4 m 的情况(图 6(d))，突涌形态转变不明显。对比裂隙通道不同位置所受接触力情况可以看出，从裂隙入口→中部→出口，即随

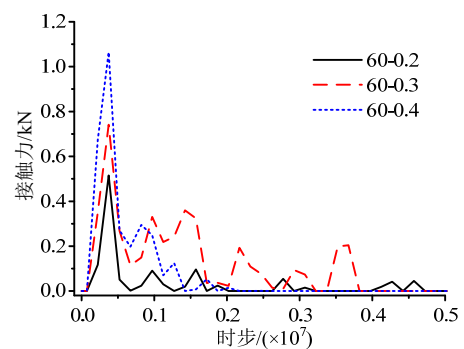
着离突水溃砂入口距离的增加，裂隙受到的接触力逐渐减小，同时作用力持续时间逐渐增加。



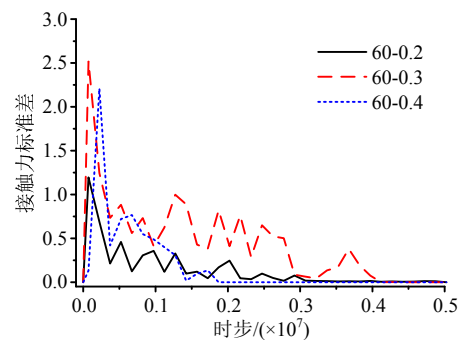
(a) 裂隙底面入口处



(b) 裂隙底面中部



(c) 裂隙底面出口处

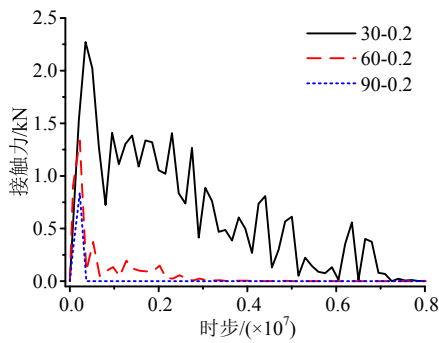


(d) 裂隙底面入口处波动性

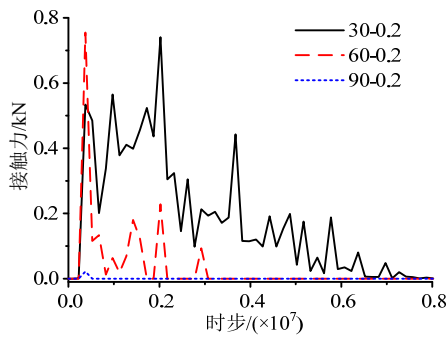
图 6 不同裂隙开度下裂隙通道不同位置所受作用力随时步变化规律

Fig.6 The applied force of the fissure entry variation law along with time steps

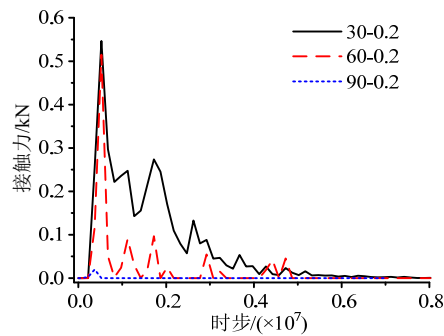
以 0.2 m 开度为例, 图 7(a)、图 7(b)、图 7(c) 给出了 30-0.2、60-0.2、90-0.2 三种模型下裂隙通道底面入口处、中部、出口处三个位置受到的接触力随时步的变化规律。可以看出, 倾角为 30°时, 突水溃砂初期和高峰期裂隙所受接触力维持在一个相对较高的水平, 并上下频繁波动, 最大值出现在高峰期, 而当倾角为 60°和 90°时, 突水溃砂初期接触力即达到最大值, 然后小幅度波动并迅速降低为 0。当裂隙开度一定时, 随着裂隙倾角的增大, 接触力明显降低, 其波动性也明显减弱(图 7(d)), 水砂突涌形式由波动突出型转向快速突出型, 突水溃砂持续的时间明显缩短。对比裂隙通道不同位置所受接触力情况可以看出, 入口处所受作用力明显大于中部和出口处。



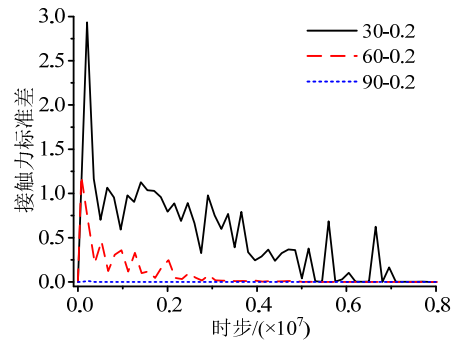
(a) 裂隙底面入口处



(b) 裂隙底面中部



(c) 裂隙底面出口处



(d) 裂隙底面入口处波动性

图 7 不同裂隙倾角下裂隙通道不同位置所受作用力随时步变化规律

Fig.7 The applied force of the fissure entry variation law along with time steps

从以上接触力变化规律可以推断, 突水溃砂初期大量的水砂混合物在水压力作用下垂直涌入裂隙通道, 导致接触力出现最大值。当裂隙开度和倾角均较小时, 由于水砂速度与裂隙倾向并不一致, 水砂会不断撞击裂隙呈跳跃式突涌状态, 即接触力大小会频繁波动, 加之重力的作用导致裂隙底部砂体局部堆积, 从而延长了突涌时间; 相反, 当裂隙开度和倾角较大时, 砂体初始碰壁反弹后二次碰壁可能性大大降低, 即接触力波动性减弱, 水砂流动速度方向很快与裂隙倾向一致, 水砂沿裂隙通道快速突涌而出, 大大缩短了突涌时间。

综上所述, 裂隙通道入口处处在突水溃砂初期受到的接触力最大, 处于最危险状态。裂隙倾角和开度越小时, 覆岩所受作用力越大, 砂体呈跳跃式突涌状态, 对覆岩的稳定性越不利, 突水溃砂持续的时间也越长。

#### 4.2 突水溃砂过程中水流速度的变化规律

浅埋煤层开采突水溃砂过程中水砂混合物的流动不再是缓慢稳定流, 水的流动状态直接影响灾害的发生情况。突水溃砂灾害是水砂耦合作用结果, 水贯穿于整个过程, 上覆松散含水层水压力是其动力源。

由 4.1 节可知, 裂隙通道入口处处于最危险状态, 因此图 8 给出了不同裂隙倾角和开度模型下, 裂隙通道入口处流体速度随时步的变化曲线, 可以看出其曲线变化趋势一致(对数形式), 即表现出伴随在一个极小范围内波动并逐渐增加到一定值后保持稳定。

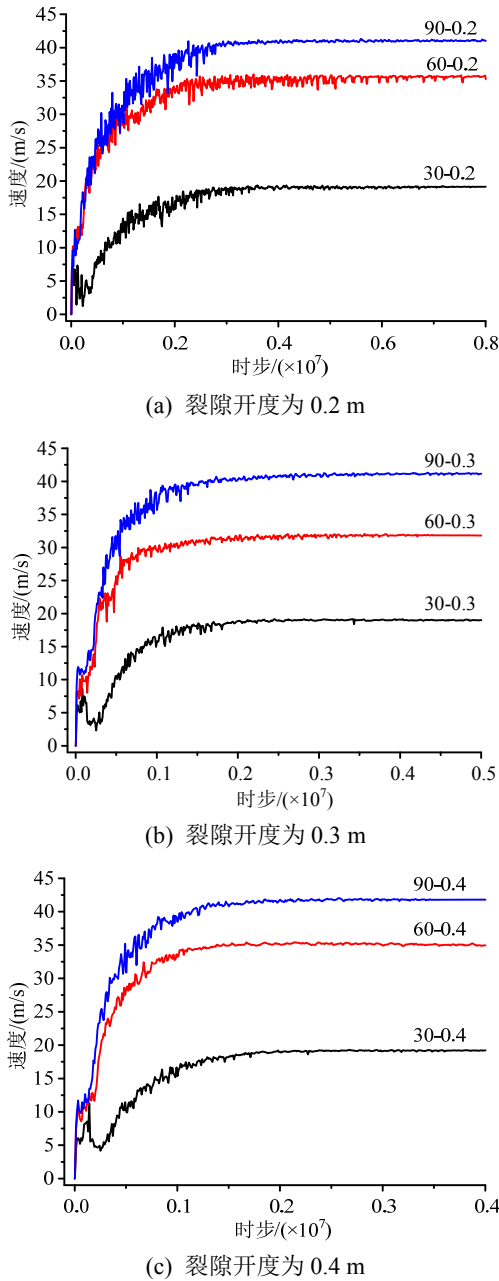


图8 不同模型下裂隙通道入口处水流速度随时步变化规律  
 Fig.8 The water velocity of the fissure variation law along with time steps under different models

由图8的数据可以得到各个模型下水流速度达到稳定时的速度大小以及达到稳定所需时步(时间)。图9表明相同裂隙开度下水流速度稳定值随裂隙倾角的增大逐渐增大,且呈现强线性相关;而同一倾角不同开度下流动速度稳定值几乎相同。图10表明相同裂隙开度不同裂隙倾角下流动稳定所需时步(时间)几乎相同,而同一倾角下裂隙开度越大,流动稳定所需时间越短,且二者间呈现出较好的线性相关性。

综上所述,裂隙通道内某点处流体速度随时步

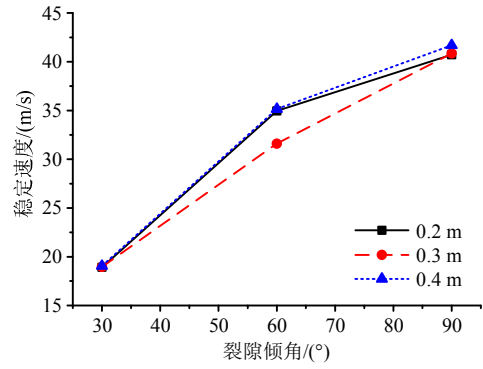


图9 裂隙通道内水流速度随倾角变化规律

Fig.9 The water velocity of the fissure variation law along with fissure angle

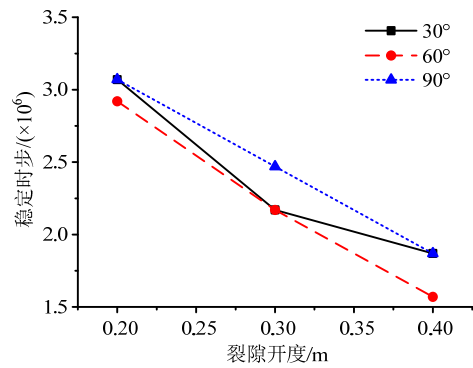


图10 裂隙通道水流速度稳定所需时步随开度的变化规律  
 Fig.10 Time steps to stabilize the water velocity of the fissure variation law along with fracture opening widths

成对数曲线形式变化。流体速度稳定值与裂隙倾角表现出正线性相关性;而流动稳定所需的时间则与裂隙开度呈负线性相关。

### 4.3 突水溃砂过程中水砂耦合作用的变化规律

突水溃砂灾害是地下渗流场和应力场相互作用结果,实质是水砂两相体在裂隙通道内耦合作用的过程。由颗粒的运动方程式(1)可知颗粒除受重力和相邻颗粒的接触力外,还受流体的作用力,由式(6)知其主要包括两项:1) 由水砂流动速度差产生的作用力(拖曳力),2) 水的浮力。水的浮力很容易计算得到,因此,分析水砂间拖曳力的变化规律对于深入研究浅埋深煤层开采过程中突水溃砂的机理具有重要意义。

以60°倾角为例,图11给出了60-0.2、60-0.3、60-0.4三种模型下裂隙通道倾向侧和底面侧拖曳力随时步的变化规律。可以看出,水砂突涌过程中各个模型倾向侧和底面侧拖曳力随时步变化趋势基本一致,即初期即达到最大值,随即小幅度快速下降,然后在突水溃砂高峰期再次达到峰值,第二次峰值过后(中后期)大幅度快速下降并逐渐趋于零。



关于拖曳力出现两次峰值的情况，第一次峰值是突水溃砂刚开始时流体在水压力作用下速度迅速增大而与砂子之间产生较大的速度差；第二次峰值恰好发生在突水溃砂巅峰期，此时砂子会因堆积现象流动受阻，其速度突然减小而造成其与流体速度差突然增大。拖曳力的波动性(图 12(b))在突水溃砂初期达到最大值，然后逐渐减小直至为零。当裂隙倾角一定时，裂隙开度越大，拖曳力越小(巅峰期以后，巅峰期之前基本相同)，持续时间越长。

以 60-0.3 模型为例，图 12(a)表明裂隙通道倾斜侧的拖曳力大于底面侧；图 12(b)表明裂隙通道倾斜侧水砂间拖曳力的波动性高于底面侧。由此可知，相比裂隙通道底面侧，倾向侧水砂突涌更加剧烈。

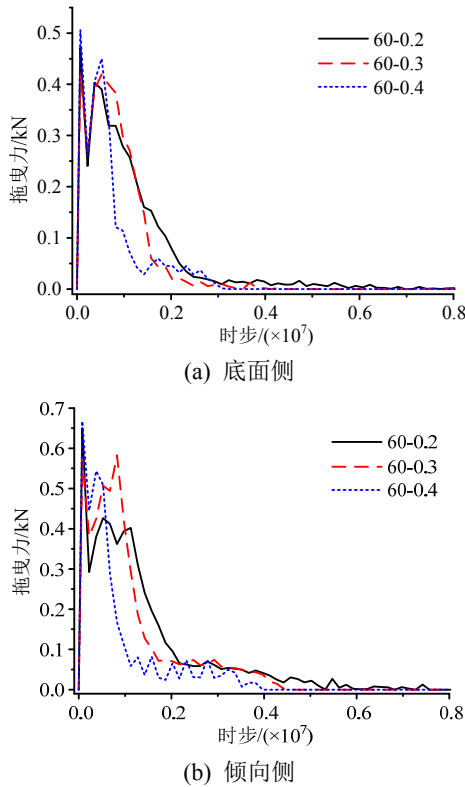


图 11 不同裂隙开度下拖曳力随时步的变化规律  
Fig.11 The drag force variation law along with time steps with different fissure opening widths

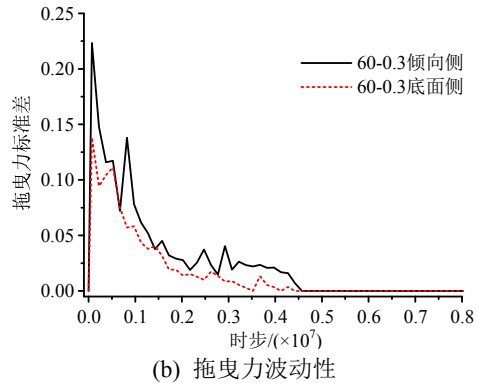
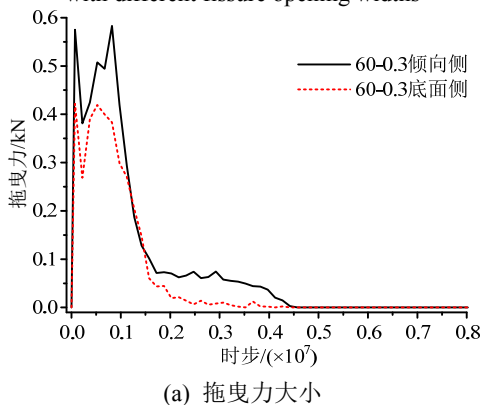


图 12 裂隙通道倾向侧和底面侧拖曳力随时步变化规律  
Fig.12 The drag force of the fissure underside and dip side variation law along with time steps

根据数值模拟结果及 4.1 节~4.3 节，可以划分出两种水砂混合物在裂隙通道内的突涌类型：快速突出型和波动突出型。其中，快速突出型表现为接触力、水流速度以及拖曳力的波动性均较低，水砂突涌速度快、持续时间短，此类突涌类型主要在裂隙倾角和开度均较大的情况下出现；波动突出型表现为接触力、水流速度、拖曳力的波动性及最大值均较高，水砂突涌持续时间长，此类突涌类型主要在裂隙倾角和开度均较小的情况下出现。

## 5 结论

文中利用 PFC<sup>3D</sup>-GID 模拟浅埋煤层突水溃砂的整个过程，研究了预制理想单裂隙不同开度和倾角条件下，水砂两相流动过程中裂隙通道所受接触力、水的流动速度以及水砂间拖曳力随时步的变化规律，并得到如下结论：

(1) 突水溃砂初期裂隙入口处受到的接触力最大，处于最危险状态。一定范围内，裂隙倾角和开度越小，突水溃砂过程中覆岩所受作用力及波动性越大，砂体越接近跳跃式波动突涌状态，对覆岩稳定性越不利，突水溃砂持续的时间越长。

(2) 裂隙通道内某点处流体速度与时步呈对数相关，且在速度稳定之前会出现微弱的波动性；流体速度稳定值与裂隙倾角呈强正线性相关，与裂隙开度则表现出弱相关性；流速稳定所需时间主要受裂隙开度影响，且二者之间呈负线性相关。

(3) 各个模型突水溃砂过程中，不同位置处水砂间拖曳力随时步变化趋势基本一致，即初期(约 25 万步)达到最大值，然后有一个小幅度快速下降过程，高峰期(约 100 万步)再次达到峰值，第二次峰值过后则大幅度快速下降并逐渐趋于零；拖曳力的波动性在突水溃砂初期达到最大，然后逐渐减小



为零。相比裂隙通道底面侧，倾向侧拖曳力及其波动性更大，水砂突涌更加剧烈。

(4) 突水溃砂过程中，根据不同裂隙开度和倾角模型下上覆岩层接触力、水流速度及水砂间拖曳力表现的特征，划分出两种水砂混合物在裂隙通道内的突涌类型：快速突出型和波动突出型。

#### 参考文献：

- [1] 刘亚群, 周宏伟, 李翼虎, 等. 浅埋煤层开采突水溃砂的颗粒流模拟研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(5): 534—540.  
Liu Yaqun, Zhou Hongwei, Li Yihu, et al. Water-sand inrush simulation under shallow coal mining based on the particle flow code [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(5): 534—540. (in Chinese)
- [2] 张敏江, 张丽萍, 姜秀萍, 等. 弱胶结砂层突涌机理及预测研究[J]. 金属矿山, 2002, 16(10): 48—50.  
Zhang Minjiang, Zhang Liping, Jiang Xiuping, et al. Study on the inrushing mechanism of weak cemented quicksand layer and its forecasting [J]. Metal Mine, 2002, 16(10): 48—50. (in Chinese)
- [3] 梁燕, 谭周地, 李广杰. 弱胶结砂层突水涌砂模拟试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1996, 16(1): 19—22.  
Liang Yan, Tan Zhoudi, Li Guangjie. Simulation test research on water and soil outbursts of weak binding soil [J]. Journal of Xi'an Highway Communication University, 1996, 16(1): 19—22. (in Chinese)
- [4] 汤爱平, 董莹, 谭周地, 等. 振动作用下矿井突水涌砂机理的研究[J]. 地震工程与工程震动, 1999, 19(2): 132—135.  
Tang Aiping, Dong Ying, Tan Zhoudi, et al. Mechanism of sandy-silt seepage-deformation in mine under vibration [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(2): 132—135. (in Chinese)
- [5] 张敏江, 张丽萍. 褐煤矿区弱胶结高压水流砂层井下涌砂机理的研究[J]. 工程勘察, 1997, 25(4): 36—39.  
Zhang Minjiang, Zhang Liping. Study on the inrushing mechanism of weak cemented quicksand layer with high water pressure in Lignite mining area [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1997, 25(4): 36—39. (in Chinese)
- [6] 隋旺华, 蔡光桃, 董青红. 近松散层采煤覆岩采动裂隙水砂突涌临界水力坡度试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2084—2091.  
Sui Wanghua, Cai Guangtao, Dong Qinghong. Experimental research on critical percolation gradient of quicksand across overburden fissures due to coal mining near unconsolidated soil layers [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2084—2091. (in Chinese)
- [7] 隋旺华, 董青红, 蔡光桃, 等. 采掘溃砂机理与预防[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1—17.  
Sui Wanghua, Dong Qinghong, Cai Guangtao, et al. Sand mining collapse mechanism and prevention [M]. Beijing: Geological Press, 2008: 1—17. (in Chinese)
- [8] 隋旺华, 董青红. 近松散层开采孔隙水压力变化及其对水砂突涌的前兆意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1908—1916.  
Sui Wanghua, Dong Qinghong. Variation of pore water pressure and its precursor significance for quicksand disasters due to mining near unconsolidated formations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1908—1916. (in Chinese)
- [9] Zhang Guimin, Zhang Kai, Wang Lijuan, et al. Mechanism of water inrush and quicksand movement induced by a borehole and measures for prevention and remediation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(4): 1395—1405.
- [10] Akalin S. Water temperature effective on sand transport by size fraction in the Lower Mississippi River [D]. Fort Collins: Colorado State University, 2002.
- [11] Meza-Diaz B I. Experimental investigation of sand production into a horizontal well slot [D]. Edmonton: University of Alberta, 2001.
- [12] Singh K B, Singh T N. Ground movement over longwall workings in the Kamptee coalfield, India [J]. Engineering Geology, 1998, 50(1): 125—139.
- [13] Glerum A. Developments in immersed tunneling in Holland [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1995, 10(4): 455—462.
- [14] Gerber T M. *P*-*y* curves for liquefied sand subject to cyclic loading based on testing of full-scale deep foundations [D]. Provo: Brigham Young University, 2003.
- [15] Shan Tong, Zhao Jidong. A coupled CFD-DEM analysis of granular flow impacting on a water reservoir [J]. Acta Mechanica Sinica, 2014, 225(8): 2449—2470.
- [16] Zhao Jidong, Shan Tong. Coupled CFD-DEM simulation of fluid-particle interaction in geomechanics [J]. Powder Technology, 2013, 239(17): 248—258.
- [17] Forterre Y, Pouliquen O. Flows of dense granular media [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2008, 40(1): 1—24.
- [18] 原方, 庞焜, 董承英, 等. 带流槽侧壁卸料动态超压及流态的 PFC<sup>3D</sup> 数值模拟[J]. 工程力学, 2016, 33(增刊 1): 301—305.  
Yuan Fang, Pang Kun, Dong Chengying, et al. The PFC<sup>3D</sup> numerical simulation on dynamic pressures and flow of sidedraw silos [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(Suppl 1): 301—305. (in Chinese)
- [19] 胡亚元, 马攀. 二维堤坝管涌的数值模拟研究[J]. 工程力学, 2015, 32(3): 110—118.  
Hu Yayuan, Ma Pan. The numerical simulation of piping in the two-dimensional embankment [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(3): 110—118. (in Chinese)
- [20] 张政, 谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟[J]. 化工学报, 2001, 52(1): 1—12.  
Zhang Zheng, Xie Zhuoli. Numerical simulation of fluid-solid two-phase flows [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52(1): 1—12. (in Chinese)
- [21] 薛东杰, 周宏伟, 任伟光, 等. 浅埋深薄基岩煤层组开采采动裂隙演化及台阶式切落形成机制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1746—1752.  
Xue Dongjie, Zhou Hongwei, Ren Weiguang, et al. Stepped shearing-induced failure mechanism and cracks propagation of overlying thin bedrocks in shallow deep coal seams mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1746—1752. (in Chinese)