

文章编号: 1673-3363-(2013)06-0892-05

# 陷落柱的变质量渗流特性及其 突水危险性数值模拟

张凯<sup>1</sup>, 姚邦华<sup>2</sup>, 吴松刚<sup>2</sup>, 张宏图<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要** 基于多孔介质渗流理论, 推导了流固耦合作用下陷落柱充填物颗粒的质量守恒方程、动量守恒方程以及陷落柱孔隙率演化方程, 建立了陷落柱的变质量渗流力学模型和相应的数值计算模型。假定陷落柱内岩体孔隙率服从 Weibull 分布, 利用多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 对所建的数值计算模型进行了求解, 得到了不同时刻陷落柱内孔隙率和渗流速度的分布图, 以及渗流量随时间变化曲线。研究结果表明: 1) 初始阶段陷落柱内部渗流通道随机分布, 在水流对不同孔隙度的岩体侵蚀作用下, 最后演变成数条主要的渗流通道; 2) 陷落柱的整体渗流速度在初始时刻增加较慢, 随着孔隙度的增大和贯通, 渗流速度会加速增大。

**关键词** 陷落柱; 突水机理; 变质量渗流; 数值模拟

**中图分类号** TD 743

**文献标志码** A

## Study on the characteristics of variable mass seepage and water inrush mechanism of collapse column

ZHANG Kai<sup>1</sup>, YAO Bang-hua<sup>2</sup>, WU Song-gang<sup>2</sup>, ZHANG Hong-tu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering,  
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

**Abstract** Based on the seepage theory of porous media, the mass conservation equation, momentum conservation equation and the porosity evolution of particles in collapse column with fluid-structure interaction is deduced and a mechanical model for collapse column water inrush is proposed, which takes the mass variation during the seepage into consideration. Then, numerical simulation is carried on using COMSOL Multiphysics, which is a Finite Element Code. By assuming that the porosity in collapse columns obeys the Weibull distribution, the distribution of the porosity and seepage velocity in the collapse column at different times is obtained, and the seepage discharge is calculated. The results show that: 1) the seepage channels initially distribute randomly, however, with the different erosion effect of water on rock with different porosity, they finally form several main channels; 2) the seepage capacity of the collapse column initially grows slowly, while seepage velocity increases significantly with the growth and connectivity of porosity.

收稿日期: 2012-12-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB227900, 2012CB723100); 国家自然科学基金项目(51304072, U1261201)

作者简介: 张凯(1984-), 男, 河南省周口市人, 博士, 讲师, 从事岩石力学和渗流力学等方面的研究。

通信作者: 姚邦华

E-mail: yaobanghua@126.com

Tel: 13523214069

**Key words** collapse column; water-inrush mechanism; variable mass seepage; numerical simulation

岩溶陷落柱广泛分布于我国山西、河北等地区 20 多个煤田中<sup>[1]</sup>。岩溶陷落柱这种特殊地质构造的存在, 给煤矿开采带来了严重的安全隐患。我国山西、河北等地的矿区都发生过陷落柱突水淹井事故, 造成了重大的经济损失和社会影响, 其中开滦范各庄矿突水淹井事故是世界采矿史上最大的一次淹井事故, 陷落柱突水涌水量达到了 2 053 m<sup>3</sup>/min, 创造了国内外矿井突水量的记录, 此次突水殃及了 4 个大矿, 直接经济损失达 5 亿元。2010 年 3 月 1 日, 神华集团乌海能源有限公司骆驼山矿煤层底板发生突水事故, 死亡 32 人, 事故直接原因是: 该矿 16 号煤层回风大巷掘进工作面遇煤层下方隐伏陷落柱, 在承压水和采动应力作用下, 诱发掘进工作面底板底鼓, 承压水突破有限隔水带形成集中过水通道, 导致奥陶系灰岩水从煤层底板涌出。由于陷落突水造成了巨大的经济损失和严重的人员伤亡, 成为影响我国许多矿区安全开采的巨大隐患。因此, 关于陷落柱突水机理的研究也一直是学术界研究的热点。尹尚先、武强等<sup>[2-3]</sup>建立了陷落柱突水的“厚壁筒”力学模型, 给出了不同突水模式下的理论判据; 朱万成、杨天鸿等<sup>[4-5]</sup>用数值模拟软件对陷落柱突水过程进行了模拟研究, 并探讨其发生突水的机理, 李连崇等<sup>[6]</sup>运用 RFPA 模拟了煤层底板下隐伏陷落柱的滞后突水机理。以上研究成果为揭示陷落柱突水机理起到了积极作用。因为陷落柱突水本质是一个流固耦合问题, 为了使分析结果更符合实际, 需要深入研究水与岩体的相互作用。因此, 本文在上述及相关研究成果<sup>[7-11]</sup>的基础上, 基于渗流力学理论, 尝试从破碎岩体变质量流固耦合的角度揭示陷落柱突水力学机理。

## 1 陷落柱的变质量渗流力学模型

地层中陷落柱示意图如图 1 所示, 其周边为不透水围岩, 底部为承压含水层, 内部岩体较为松散, 可以看做是由破碎的固体介质(骨架和充填物)、孔隙裂隙中液体(流体)介质和液体介质中的细小充填物颗粒 3 种介质构成。当采动揭露了导水陷落柱, 渗流冲刷侵蚀破碎岩体骨架内的细小充填物颗粒, 使其运移流失, 导致陷落柱渗透特性发生改变, 从而有可能引发突水灾害。

### 1.1 基本假设

在上述陷落柱水文地质模型分析的基础上, 为

建立陷落柱的变质量渗流力学模型, 作以下假设:

- 1) 陷落柱是导水的, 即具有渗流通道;
- 2) 决定陷落柱渗流特性的是内部充填物;
- 3) 陷落柱内物质的运动满足 Darcy 定律;
- 4) 含颗粒流体的渗流特性保持不变。

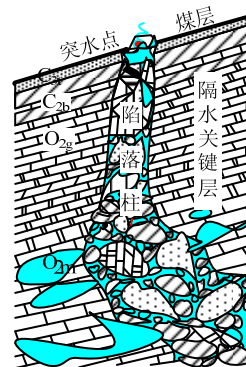


图 1 陷落柱示意图

Fig.1 Karst collapse column in rock strata

### 1.2 力学模型的建立

基于以上假设, 取陷落柱特征单元(如图 2), 其体积为  $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ , 可以看做是由 3 部分组成:

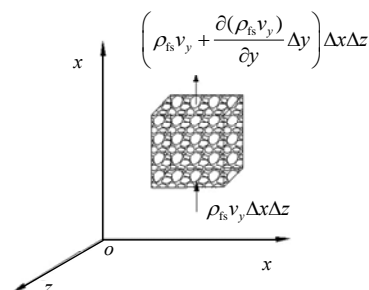


图 2 陷落柱特征单元

Fig.2 The representative element for collapse column

- 1) 固体颗粒, 其体积为  $V_s$ ;
- 2) 流体, 其体积为  $V_f$ ;
- 3) 流体中悬浮的颗粒, 其体积为  $V_{fs}$ , 质量为  $M_{fs}$ , 密度为  $\rho_s$ 。

则单元中孔隙体积为:  $V_p = V_f + V_{fs}$ ; 充填物的孔隙度为:  $\phi = \frac{V_p}{V} = \frac{V_f + V_{fs}}{V}$ ; 孔隙中颗粒的体积分数为:  $c = \frac{V_{fs}}{V_p} = \frac{V_{fs}}{V_f + V_{fs}}$ , 质量分数为:  $\rho_{fs} = \frac{M_{fs}}{V} = c\phi\rho_s$ 。

假设特征单元的坐标为  $P(x, y, z)$ , 其体积  $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ , 单元体下表面面积为  $\Delta x \Delta z$ , 颗粒在孔隙中的运动速度为  $v_y$ , 则单位时间内通过此平面流入特征单元体的颗粒质量为:  $\rho_{fs} v_y \Delta x \Delta z$ ,

利用泰勒级数展开, 则右边平面流出的颗粒质量为:  $\left(\rho_{fs}v_y + \frac{\partial(\rho_{fs}v_y)}{\partial y}\Delta y\right)\Delta x\Delta z$ , 则  $y$  方向单位时间流入流出的颗粒质量差为:  $\frac{\partial(\rho_{fs}v_y)}{\partial y}\Delta x\Delta y\Delta z$ , 同理, 可以求出  $x, z$  方向的颗粒质量差:  $\frac{\partial\rho_{fs}v_x}{\partial x}\Delta x\Delta y\Delta z, \frac{\partial\rho_{fs}v_z}{\partial z}\Delta x\Delta y\Delta z$ , 则单元体内单位时间内流出的颗粒质量为:  $\left(\frac{\partial(\rho_{fs}v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{fs}v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_{fs}v_z)}{\partial z}\right)\Delta x\Delta y\Delta z$ 。

根据质量守恒, 单元体内流出的颗粒质量应为单位时间单元体质量的减少值:

$$-\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{fs}\Delta x\Delta y\Delta z) - \dot{m}\Delta x\Delta y\Delta z$$

整理得到:

$$-\left[\frac{\partial(\rho_{fs}v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{fs}v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_{fs}v_z)}{\partial z}\right] = \frac{\partial\rho_{fs}}{\partial t} + \dot{m} \quad (1)$$

或者表示为:

$$\frac{\partial\rho_{fs}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{fs}\vec{v}) = \dot{m} \quad (2)$$

由于:  $\rho_{fs} = \frac{dM_{fs}}{dv} = c\phi\rho_s$ , 则

$$\frac{\partial(c\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (c\phi\vec{v}) = \frac{\dot{m}}{\rho_s} \quad (3)$$

而

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{\dot{m}}{\rho_s} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(c\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (c\phi\vec{v}) = \frac{\partial\phi}{\partial t} \quad (5)$$

孔隙率的变化引入如下表达式<sup>[12]</sup>:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \lambda(1-\phi)cu \quad (6)$$

上式表明侵蚀引起的孔隙率变化与颗粒浓度呈正比, 与渗流速度呈正比, 其中,  $\lambda$  为常数。

Darcy 渗流速率与颗粒的实际流速式如:

$$\vec{u} = \frac{k}{\mu} \nabla p \quad (7)$$

$$\vec{v} = \frac{\vec{u}}{\phi} \quad (8)$$

式中:  $\mu$  为动力黏度系数;  $k$  为渗透率。

陷落柱渗透率和孔隙率可用如下关系表示:

$$k = k_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^3 \left(\frac{1-\phi_0}{1-\phi}\right)^2 \quad (9)$$

式中:  $\phi_0$  与  $k_0$  分别为初始孔隙度与渗透率。式(5)~(9)即为陷落柱变质量渗流力学模型的基本方程。

## 2 陷落柱突水危险性的数值模拟

### 2.1 数值模型的建立

将上节所建立的力学模型导入多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 进行求解, 研究陷落柱的变质量渗流特性, 并分析其突水危险性。

建立的数值模型如图 3, 模型宽 10 m, 高为 20 m, 底部含水层水压为  $p_0=2$  MPa, 顶部边界水压力为 0, 两侧边为不透水边界。模型参数如表 1。

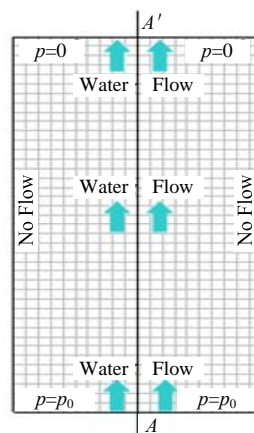


图 3 陷落柱突水数值计算模型

Fig.3 The numerical model for collapse column water-inrush

表 1 数值模拟参数

Table 1 Main parameters of the model

参数	取值
初始渗透率 $k_0/m^2$	$1 \times 10^8$
水的动力黏度 $\mu/(Pa \cdot s)$	$1 \times 10^{-3}$
水的密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1000
Weibull 均匀性指数 $m$	2
平均孔隙率 $\phi'$	0.12
常数 $\lambda$	$7.5 \times 10^{-9}$

研究表明, 岩石的非均质性的分布特征可由 Weibull 分布来描述<sup>[13-14]</sup>。其分布的概率密度为:

$$f(\phi) = \frac{m}{\phi'} \left(\frac{\phi}{\phi'}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\phi}{\phi'}\right)^m\right] \quad (10)$$

式中:  $\phi$  为孔隙率;  $\phi'$  为平均孔隙率;  $m$  为均匀性指数, 值越大表明越均匀, 取  $m=2$ 。

### 2.2 数值模拟结果

将理论推导的结果利用多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 求解, 得到的数值模拟结果如图 4~8 所示。

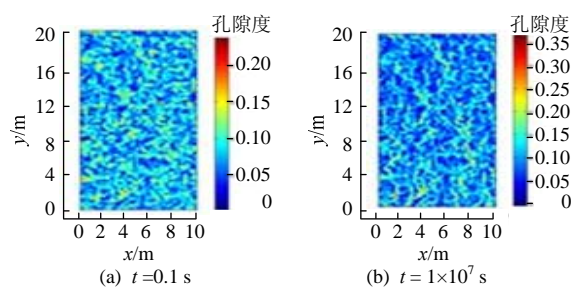


图4 不同时刻陷落柱内孔隙率分布图

Fig.4 Distribution of porosity in the collapse column

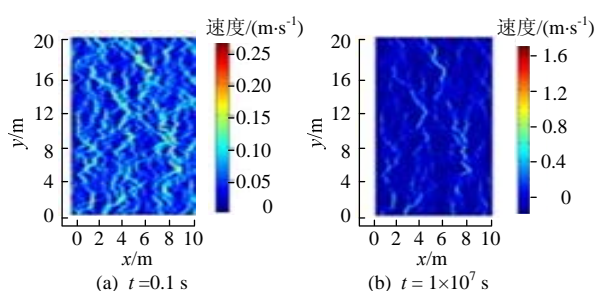


图5 不同时刻陷落柱内渗流速度分布图

Fig.5 Distribution of seepage velocity in the collapse column

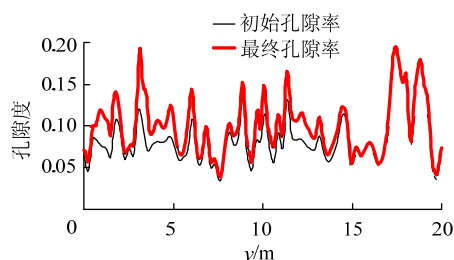


图6 截面 A-A' 上陷落柱内孔隙率分布曲线

Fig.6 Distribution of porosity along the line A-A'

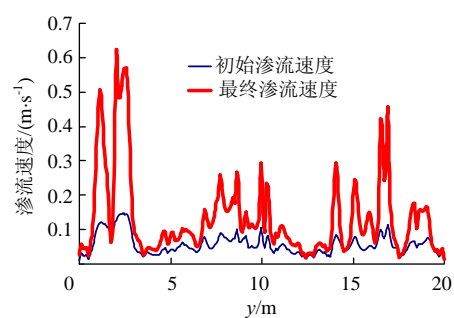


图7 截面 A-A' 上陷落柱内渗流速度分布曲线

Fig.7 Distribution of seepage velocity along line A-A'

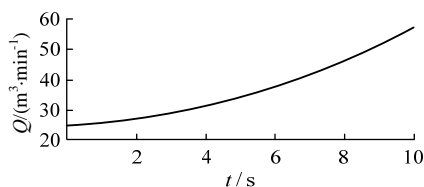
图8 陷落柱涌水量  $Q$  随时间变化规律

Fig.8 Water flow rate from collapse column at different times

### 3 陷落柱突水数值模拟结果分析

图 4a, b 分别为陷落柱内部初始孔隙率分布以及  $t=1 \times 10^7$  s 后的孔隙率云图, 从图中可以看到: 随着渗流时间不断增加, 陷落柱的孔隙率不断增大。在初始阶段, 陷落柱内部孔隙率随机分布, 随着渗流时间的增加, 自下而上逐渐形成了数条孔隙率较大的条带状通道。这是因为孔隙率的变化率与渗流速度有重要关系, 孔隙率大的地方渗流速度大, 而较大的渗流速度又使得孔隙率变化速率增大, 最终导致孔隙的彼此贯通, 形成渗流优势通道。

图 5a, b 分别为陷落柱内部初始渗流速度分布以及  $t=1 \times 10^7$  s 后渗流速度变化云图, 通过图中可以看到, 初始阶段渗流速度随机分布, 渗流通道相互交叉, 形成一个网状结构, 随着时间增加, 渗流速度不断增加, 最大渗流速度从初始阶段的 0.27 m/s 增加到 1.90 m/s, 与此同时, 主要的渗流通道逐渐减少, 从初始的相互连通网状渗流状态变化为基本互不交叉的带状结构, 这与孔隙率的变化规律是相似的。

图 6, 7 分别为截面 A-A' 上陷落柱内孔隙率与渗流速度变化曲线。从中可以看到, 在每一点最终的孔隙率与渗流速度均大于初始的孔隙率和渗流速度, 但是若初始的孔隙率和渗流速度较小, 那么最终的孔隙率和渗流速度变化幅度也会很小, 反之孔隙率和渗透率变化幅度也会很大。这是因为渗透系数由孔隙率决定, 初始孔隙率越大, 速度越大, 侵蚀作用越强烈, 造成了孔隙率的进一步增大, 反过来愈加强了侵蚀作用。

图 8 为陷落柱上边界流量随时间的变化曲线, 从中图中可以看出, 随着时间的推移, 流量加速增大, 在本文数值模拟的参数条件下, 最终可能存在突水风险。

### 4 结论

1) 陷落柱内充填物在渗流作用下颗粒不断被侵蚀, 导致孔隙率和渗透率的不断增大, 渗流速度不断增加, 最终导致了采场底板陷落柱突水。为了防止陷落柱突水, 需要采取一些措施来防止陷落柱充填物被侵蚀冲刷, 如底板陷落柱注浆等。

2) 数值模拟结果表明, 陷落柱的整体渗透性在初始时刻增加较慢, 随着孔隙率的增大和贯通, 渗流速度会加速增大, 因此, 对于导水陷落柱, 一旦揭露, 尽快采取措施可以有效防止陷落柱突水。

## 参考文献:

- [1] 李振华, 徐高明, 李见波. 我国陷落柱突水问题的研究现状与展望[J]. 中国矿业, 2009, 18(4): 107-109.  
LI Zhen-hua, XU Gao-ming, LI Jian-bo. Research status and outlook of water-inrush from collapse column in China[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(4): 107-109.
- [2] 尹尚先, 王尚旭, 武强. 陷落柱突水模式及理论判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 964-968.  
YIN Shang-xian, WANG Shang-xu, WU Qiang. Water inrush patterns and theoretic criteria of karstic collapse columns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 964 - 968.
- [3] 尹尚先, 武强. 华北煤矿区岩溶陷落柱特征及成因探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 120-123.  
YIN Shang-xian, WU Qiang. Studies on characters and forming mechanism of karstic collapse columns at mine area of north China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 120-123.
- [4] 朱万成, 魏晨慧, 张福壮, 等. 流固耦合模型用于陷落柱突水的数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 928-933.  
ZHU Wan-cheng, WEI Chen-Hui, ZHANG Fu-zhuang, et al. Investigation of water inrush from Karst subsidence column by using a coupled hydromechanical model[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 928-933.
- [5] 杨天鸿, 陈仕阔, 朱万成, 等. 矿井岩体破坏突水机制及非线性渗流模型初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1411-1416.  
YANG Tian-hong, CHEN Shi-kuo, ZHU Wan-cheng, et al. Water inrush mechanism in mines and nonlinear flow model for fractured rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1411-1416.
- [6] 李连崇, 唐春安, 左宇军, 等. 煤层底板下隐伏陷落柱的滞后突水机理[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 62-66.  
LI Lian-chong, TANG Chun-an, ZUO Yu-jun, et al. Mechanism of hysteretic groundwater inrush from coal seam floor with karstic collapse columns[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 62-66.
- [7] 宋彦琦, 王兴雨, 程鹏, 等. 椭圆形陷落柱厚壁筒突水模式力学判据及数值模拟[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 452-455.  
SONG Yan-qi, WANG Xing-yu, CHENG Peng, et al. The mechanical criterion and numerical simulation of thick-walled elliptical cylinder collapse column model under water inrush[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 452-455.
- [8] 王家臣, 李见波. 预测陷落柱突水灾害的物理模型及理论判据[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(10): 1273-1247.  
WANG Jia-chen, LI Jian-bo. Physical model and theoretic criterion of the forecast of water inrush caused by collapse columns[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(10): 1273-1247.
- [9] 刘志军, 熊崇山. 陷落柱突水机制的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4013-4018.  
LIU Zhi-jun, XIONG Chong-shan. Numerical simulation study on water inrush mechanism from collapse column[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp 2): 4013-4018.
- [10] 王家臣, 杨胜利. 采动影响对陷落柱活化导水机理数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 140-144.  
WANG Jia-chen, YANG Sheng-li. Numerical simulation of mining effect on collapse column activated water conducting mechanism[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(2): 140-144.
- [11] 许进鹏, 梁开武, 徐新启. 陷落柱形成的力学机理及数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(1): 82-86.  
XU Jin-peng, LIANG Kai-wu, XU Xin-qi. Mechanics mechanism of forming Karst collapse columns and numerical simulation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1): 82-86.
- [12] SAKTHIVADIVEL R, IRMAY S. A review of filtration theories[M]. Berkeley: University of California, 1966.
- [13] TANG C A, THAM L G, LEE P K K, et al. Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(4): 477-489.
- [14] ZHU W C, TANG C A. Micromechanical model for simulating the fracture process of rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 37(1): 25-56.