

引用格式:郑茂慧,王东林,和志永,等. 颗粒迁移下岩体单裂隙冲蚀损伤主控因素分析[J]. 有色设备,2024,38(6):36-42.  
ZHENG Maohui, WANG Donglin, HE Zhiyong, et al. Analysis of main controlling factors of single fracture erosion damage of rock mass under particle migration[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2024,38(6):36-42.

# 颗粒迁移下岩体单裂隙冲蚀损伤主控因素分析

郑茂慧,王东林,和志永,王辉,曹浩浩,张正萌,李思宏,聂鹏飞  
(内蒙古黄陶勒盖煤炭有限责任公司,内蒙古鄂尔多斯017300)

**[摘要]** 微裂隙渗流损伤是断层突水优势路径形成过程中的重要影响因素。本文通过构建三维单裂隙渗流模型,探究了不同颗粒粒径、入射速度对单裂隙壁面冲蚀损伤影响规律。结果表明:颗粒入射速度和颗粒粒径与平均冲蚀速率之间均呈现幂函数关系,高速颗粒、大粒径颗粒作用下单裂隙的冲蚀速率增大,且影响大小关系为:颗粒入射速度 > 颗粒粒径;水力作用和颗粒磨蚀作用下,裂隙损伤较严重时期主要集中在裂隙刚发育阶段。

**[关键词]** CT 三维重建;颗粒迁移;数值模拟;冲蚀损伤;主控因素

**[中图分类号]** TD12 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)06-0036-07

**DOI:**10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.06.005

## 0 引言

断层活化具有隐蔽性和突发性,极易诱发突水事故<sup>[1]</sup>。断层填充物往往以断层泥为基质和断层破碎岩体为骨架构成,采动过程中高承压水的冲蚀作用加剧岩体的破坏,高应力、强采动下岩体的破坏进一步造成断层填充物分解及流失,断层破碎带内的孔隙连通性随之增加,断层岩体渗透性逐渐增强,导水通道加速演化,最终诱发突水灾害<sup>[2-3]</sup>。从微观角度分析影响裂隙损伤的主控因素,有利于解释裂隙扩展机理,对优势导水路径预测与防治具有重要意义。

在断层活化特征、裂隙带渗流导水方面,许多学者开展了大量的研究。孙文斌等<sup>[4]</sup>采用岩石应力-渗流耦合真三轴试验系统,结合声发射和数字散斑技术,研究了双轴加载过程中含不同岩性和产状断层充填物的试样失稳破坏特征。李彦志等<sup>[5]</sup>采用数值模拟方法再现了微裂隙渗流过程,分析了水压作用下水力扩缝演化过程。董蕙等<sup>[6]</sup>系统综述了完整岩体和裂隙岩体的渗流特性研究,系统地介绍

了水力耦合裂隙岩体破裂机理。杨森等<sup>[7]</sup>采用室内单轴压缩试验与 PFC 颗粒流模拟相结合的方法,得到岩石裂隙扩展规律及破坏形式。姚邦华等<sup>[8]</sup>建立了多场耦合的陷落柱突水变形-渗流-冲蚀耦合模型,表明陷落柱内充填物颗粒液化并迁移流失,部分裂隙不断扩展并贯通发展成为优势导水通道。李杨杨等<sup>[9]</sup>分析不同预制裂纹倾角对岩石整体裂纹扩展倾向及力学特性的影响。以上学者的研究主要围绕裂隙扩展以及渗流特性开展,较少考虑冲蚀效应下裂隙发育损伤特征规律。

本文通过现场取样以及 CT 图像三维重构技术,构建三维单裂隙渗流模型,探究不同颗粒粒径、入射速度对单裂隙壁面冲蚀损伤影响规律,从微观角度进行冲蚀效应下单裂隙渗流损伤主控因素分析,获得影响流场变化的结构因素。

## 1 单裂隙微观结构分析

CT 图像三维重构技术可实现岩样内部成分和结构的可视化,以此建立三维孔裂隙模型,直观了解岩样内部整体的孔裂隙分布情况,能够准确、真实地建立孔裂隙微观结构的数值几何模型。通过对岩石材料裂隙及表面结构进行定量化特征描述,建立岩石与渗流及冲蚀特征联系,具体分析影响岩体单裂隙渗流冲蚀的主控因素。

本文以在济宁矿区采集的小断层填充物骨架岩

**[收稿日期]** 2024-09-06

**[第一作者]** 郑茂慧(1988—),男,山东济宁人,工程师,主要从事采掘技术管理工作,现任内蒙古黄陶勒盖煤炭有限责任公司巴彦高勒煤矿生产技术部部长。

样为例,岩样大小为  $7\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ ,CT 扫描重建的模型大小为  $600 \times 600 \times 1\ 400$  体素,不透光性体素单位为  $0.023\ 8\text{ mm}$ 。采用 Avizo 三维重建软件,进行几何校正、中值滤波、确定阈值、图像二值化、重建区域选择、曲面简化、重构集合边界和构建参数化曲面等步骤,构建三维单裂隙模型(图 1)。CT 扫描的模型取样时,裁剪选取了含有代表性的裂隙孔喉特征的一部分,样本包含了完整大裂隙和独

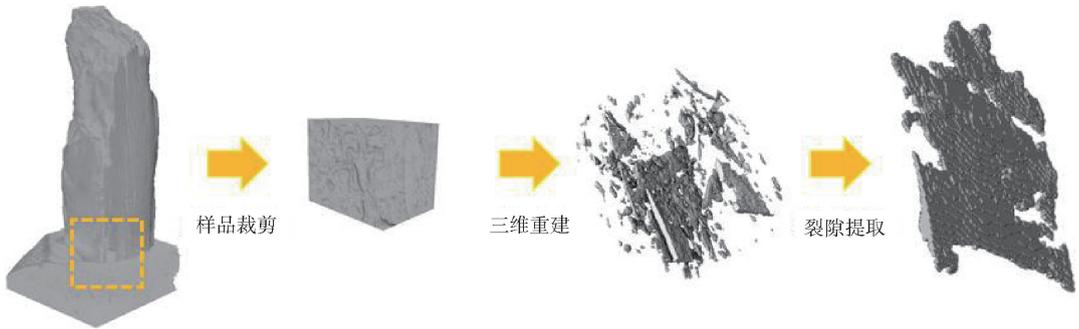


图 1 单裂隙三维重建示意

Fig.1 Schematic diagram of single crack 3D reconstruction

在孔裂隙流模拟分析中,裂隙表面特征和裂隙迂曲度是影响流体通过能力的主要因素。由于在单裂隙低雷诺数流动中,近壁面的边界层是影响流动的主要特征,而由于尺寸微小,其主流区流速虽然受裂隙表面粗糙度影响较大,但稍大尺寸的曲折将表现为裂隙的迂曲度和主流区的流线曲折,导致了主流区流线切入壁面而造成冲蚀。这种冲蚀是由于流体在穿过曲折区域时受到壁面的阻碍和摩擦力的作用所引起的。

将路径的扭曲与流场变化联系起来,在对裂隙模型进行数值模拟时,将流场的流速变化与路径的扭曲弯折联系起来,补充了影响流场变化的结构因素。由单裂隙模型的流速分布(图 2)可以看出,单裂隙中主要表现为层流,曲折的路径导致狭窄颈缩区域会发生边界层脱离产生紊流,湍流一般受平均流中旋转或涡流的影响。曲折的路径也对水流产生阻碍作用,偏折了主流区流动方向,与边界层和壁面产生摩擦,发生动能与压力势能的相互转化,损失了总能量。在曲折狭窄的渗流区域中表现为更大的压力,水流的惯性动能被转换为压力势能,更容易对周围岩石裂隙结构产生冲蚀效应。

冲蚀效应导致单裂隙损伤的机制是水力冲击和细观颗粒的磨蚀。动水的存在大幅弱化了动力变质

立的孔裂隙,重构的数字影像显示裂隙分布为层状分布,从模型中裁剪去含有单裂隙的样本,提取完整的单裂隙模型,单裂隙体积  $1.164\ 26\text{ mm}^3$ 。在渗流模拟中,模型最重要的基本性质时裂隙的大小及其连通信息,分离出的单裂隙模型为片状孔喉,由于选取的单裂隙独立性强,出入口连通状况良好,能够完全贯通。

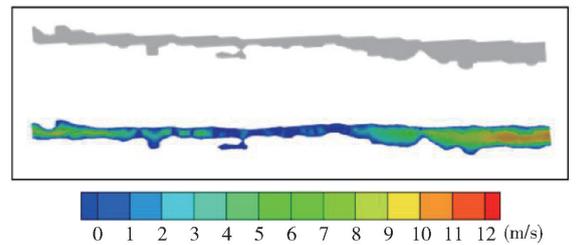


图 2 单裂隙模型的流速分布

Fig.2 Flow velocity distribution of single crack

岩细观结构的稳定性,仅动水水力作用下,对单裂隙的损伤较弱且受力较为均匀。当水力和颗粒磨损共同作用(图 3),在动水的驱动力下,颗粒随动水运动轨迹运动,当存在较多颗粒时,反作用于动水产生局部紊流,致颗粒运动无序,再加上所取的岩样内部规则性较差,颗粒对壁面的冲击和磨损频率增加,对单裂隙壁面的损伤程度增加,而在此过程中颗粒也会对裂隙局部区域填堵,随着动水的持续注入,裂隙内水流的运动趋于稳定,颗粒的运动也趋于稳定状态。

## 2 单裂隙渗流模拟构建

对通过 CT 扫描重建的单裂隙模型进行数学化分析,此种方法可以根据不同需求选择不同的求解模型,通过建立三维单裂隙渗流模型(图 4),根据不

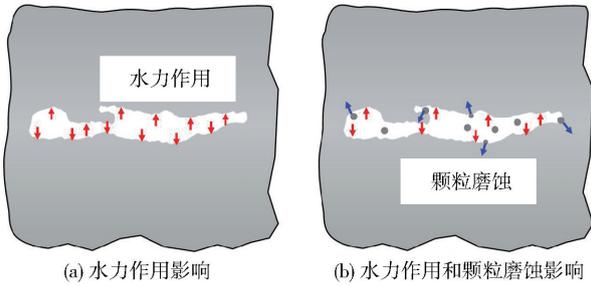


图3 冲蚀效应下单裂隙损伤机制

Fig. 3 Single crack damage mechanism under erosion effect

同的工程实际背景选择不同的边界约束条件,从而得到不同的流动特征。

本文通过 Fluent 软件设置单裂隙模型内流体中的运动行为,流体材料为水,承压水作为压力驱动,裂隙两侧为压力入口和压力出口边界,出口压力取标准大气压,入口处则改变入口压力得到不同的压力梯度。依据《煤矿防治水规定》以及《矿区水文地质工程地质勘探规范》(GB/T 12719—2021)<sup>[10-11]</sup>中的规定:在底板受构造破坏块段的突水系数一般不大于 0.06 MPa/m,在临界突水系数评价中多采用 0.06 MPa/m 作为评价标准。将入口动水压力分别设置为 0.2 MPa、0.6 MPa、1 MPa 3 个阶段,应用 Fluent 软件中的 DPM 模型注入粒子,通过数值分析求解控制流体流动的微分方程,从而得到裂隙内部的流体的流动情况。

由于裂隙的宽度较小,主要流动区域为近壁面流动,同时考虑涡流或旋转影响,因此湍流模型选择 RNG  $k-\varepsilon$  模型,能更好处理近壁区域,RNG  $k-\varepsilon$  模型<sup>[12]</sup>如下:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\kappa \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) +$$

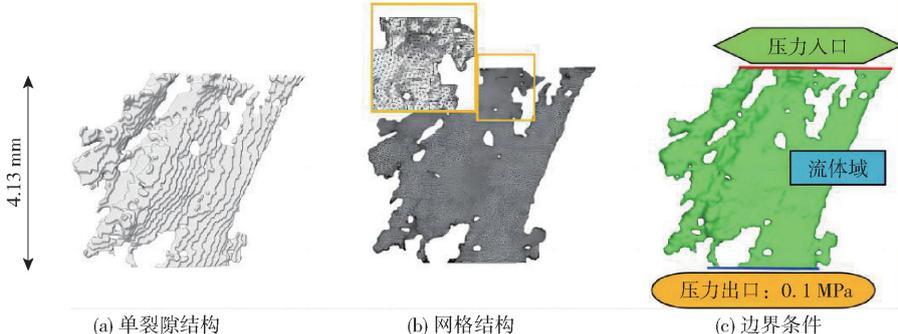


图4 渗流模型设置

Fig. 4 Settings of seepage model

$$G_\kappa + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_\kappa \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) +$$

$$C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中:  $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 + \eta/\eta_o)}{1 + \beta\eta^3}$ ,  $\eta_o = 4.377$ ,  $\beta =$

$0.012$ ,  $\eta = (\alpha E_{ij} E_{ij})^{1/2} \frac{\kappa}{\varepsilon}$ ,  $E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ;  $\kappa$  为

湍流动能;  $\varepsilon$  为湍流耗散率;  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ,  $C_{3\varepsilon} = 0.099$ ;  $G_\kappa$  为平均速度梯度引起的湍流动能的产生;  $G_b$  为由浮力产生的湍流动能;  $Y_M$  为可压缩湍流中波动膨胀对总耗散率的贡献;  $\alpha_\kappa$  和  $\alpha_\varepsilon$  分别为和有效普朗特数的倒数;  $E_{ij}$  为时均应变率;  $S_\kappa$ 、 $S_\varepsilon$  为自定义源项。

本文从细观角度研究冲蚀作用下的裂隙裂隙损伤的主控因素,在承压水作用下,由冲蚀作用导致充填物介质颗粒迁移引起的损伤。采用冲蚀速率来描述颗粒碰撞材料表面产生的累计损伤程度,其物理意义是单位时间单位面积上颗粒冲击材料表面损失的质量,其值越大说明损伤强度越大。

冲蚀速率  $E_f$  定义为壁面材料在单位时间单位面积上损失的质量(单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。通过计算颗粒对壁面的累积损伤来计算冲蚀速率,其表达式为:

$$E_f = \frac{1}{A_f} \sum_{\pi(f)} \dot{m}_\pi e_r \quad (3)$$

式中:  $A_f$  为网格单元面积;  $\dot{m}_\pi$  为冲击壁面的颗粒质量流量;  $e_r$  为冲蚀率。

对于单裂隙模型内动水诱发颗粒迁移引起的冲蚀损伤,文中 Fluent 软件中提供的 DPM 离散项模型作为计算的冲蚀模型,冲蚀速率表达式为:

$$E_f = \sum_{p=1}^{N_{\text{traject}}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_f} \quad (4)$$

式中： $C(d_p)$ 为颗粒粒径函数； $f(\alpha)$ 为冲击角函数； $b(v)$ 为颗粒相对速度函数； $A_f$ 为壁面面积。

为分析动水诱发颗粒迁移单裂隙冲蚀损伤的主控因素，定量分析不同颗粒属性对裂隙冲蚀速率影响，数值模拟参数设置见表1。

表1 数值模拟参数设置

Table 1 Numerical simulation parameter settings

项目	具体内容	参数指标	数值
边界条件	压力入口	压力值, MPa	0.2, 0.6, 1
	压力出口	压力值, MPa	0.1
	壁面	无滑移壁面	—
材料	水	密度, kg/m <sup>3</sup>	998
		密度, kg/m <sup>3</sup>	2500
	颗粒	初始速度, m/s	0.2, 4, 6, 8
		直径, μm	2, 4, 6, 8, 10

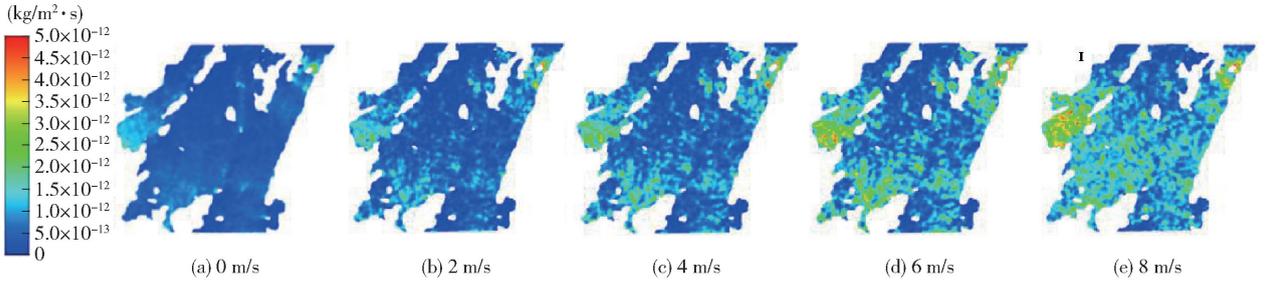


图5 0.6 MPa时不同颗粒入射速度下冲蚀损伤云图

Fig. 5 Cloud map of erosion damage under different particle incidence velocities at 0.6 MPa

$2 \times 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，随着入射速度的增加平均冲蚀速率的增幅更加明显。这主要是由于随着颗粒入射速度的增加，颗粒拥有更大的动能，增加了颗粒在单裂隙壁面的碰撞反弹次数。本文对颗粒属性参数进行拟合分析，反映影响平均冲蚀速率的参数变化， $v_p$ 和 $E_f$ 之间的相关性进行拟合，同样获得幂函数关系：

$$E_f = kv_p^n \quad (5)$$

式中： $k$ 和 $n$ 为拟合系数。

图7为不同颗粒入射速度在不同动水入口压力下最大冲蚀率的拟合曲线。结果表明，幂函数很好地拟合了模拟数据，相关度系数 $R^2$ 的范围为0.9968~0.9992，拟合系数 $k$ 在 $3.01 \times 10^{-12} \sim 9.77 \times 10^{-12}$ 小范围内变化，另一个拟合系数 $n$ 也在1.403~

### 3 单裂隙渗流模拟与分析

对裂隙壁面的冲蚀损伤程度取决于颗粒直径和颗粒入口速度，不同粒径的颗粒在惯性力和曳力等方面存在的差异，导致他们在冲蚀阶段的颗粒速度、颗粒分布、冲蚀频率等方面存在较大差异。

图5为0.6 MPa入口压力、2 μm颗粒粒径条件下，单裂隙在不同颗粒入射速度下的冲蚀损伤云图。如图所示，随着颗粒入射速度的增加，单裂隙的平均冲蚀速率与冲蚀区域逐渐增大，这是由于随着入射速度的增加，颗粒具有更大的动能增加了颗粒在单裂隙表面的碰撞反弹次数，使得冲蚀损伤程度逐渐增加。

图6为不同颗粒入射速度在不同动水入口压力下的平均冲蚀速率。当入口压力为0.6 MPa，颗粒入射速度分别为0~2 m/s、2~4 m/s、4~6 m/s、6~8 m/s时，平均冲蚀速率增幅分别为 $9 \times 10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.4 \times 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.4 \times 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、

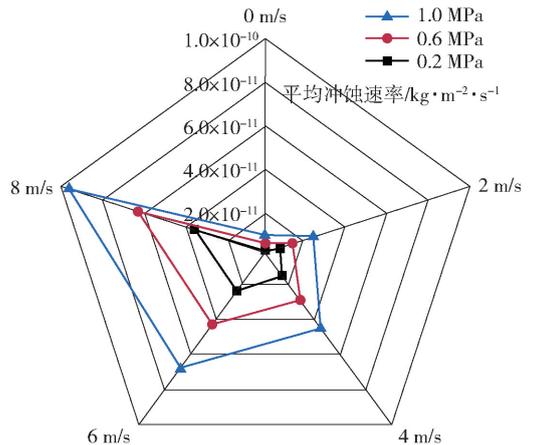


图6 不同颗粒入射速度下平均冲蚀速率

Fig. 6 Average erosion rate under different particle incidence velocities

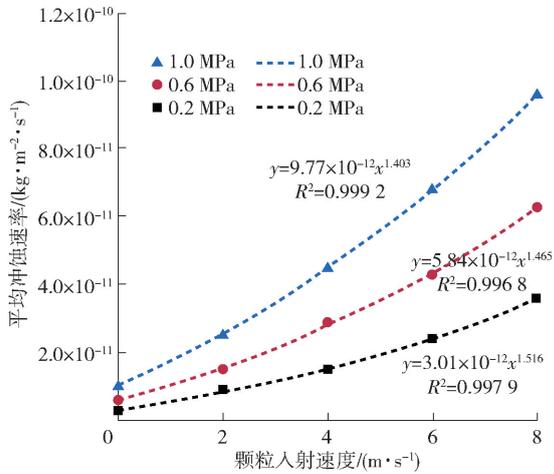


图7 不同颗粒入射速度下平均冲蚀速率拟合曲线  
Fig.7 Fitting curve of average erosion rate under different particle incidence velocities

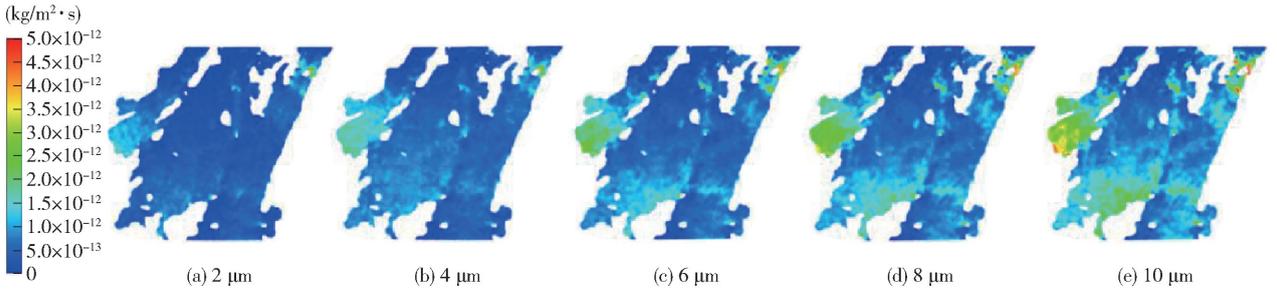


图8 0.6 MPa 时不同颗粒粒径下冲蚀损伤云图

Fig.8 Cloud map of erosion damage under different particle sizes at 0.6 MPa

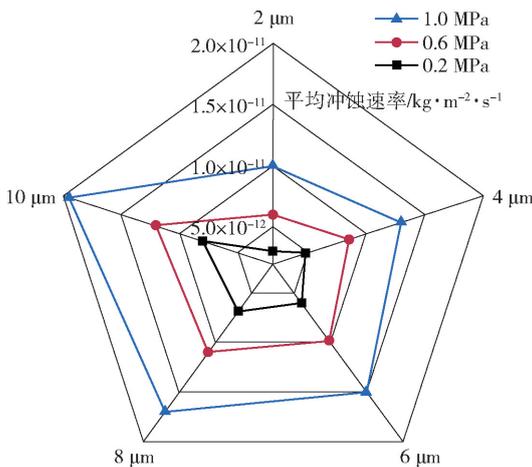


图9 不同颗粒粒径下平均冲蚀速率

Fig.9 Average erosion rate under different particle sizes

1.515 6 小范围内变化。

图8为0.6 MPa入口压力、0 m/s颗粒入射速度条件下,单裂隙结构在不同颗粒粒径下的冲蚀损伤云图。随着颗粒粒径的减小,对于壁面冲蚀磨损面积增大,这是由于小粒径颗粒比大粒径颗粒对于流体的跟随性更好。随着颗粒粒径的增加,平均冲蚀速率增加,这是由于惯性力作用,大粒径颗粒的冲击速度大于小粒径颗粒,大直径颗粒产生的冲蚀破坏相较于小直径颗粒更加集中且冲蚀损伤程度更为严重。小粒径颗粒与大粒径颗粒在对流体变化的反应上存在差异。这主要是由于小粒径颗粒具有较小的体积和质量,对于流体的变化能够较快做出响应。

图9为不同颗粒粒径在不同动水入口压力下的平均冲蚀速率。当入口压力为0.6 MPa时,随着颗粒直径的增加,当颗粒直径分别为2~4 μm、4~6 μm、

2.5 × 10<sup>-12</sup> kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、1.3 × 10<sup>-11</sup> kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、1.2 × 10<sup>-11</sup> kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、1 × 10<sup>-11</sup> kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,随着颗粒粒径的增加平均冲蚀速率的增幅降低。当流体发生变化时,小粒径颗粒能够更快地跟随流体的流动。大粒径颗粒由于跟随性较差,在流体流动时容易出现相对滞后的现象,导致其平均冲蚀速率的增幅相对较低。

同时,对颗粒粒径进行拟合分析,以此反映影响平均冲蚀速率的参数变化, $d_p$ 和 $E_f$ 之间的相关性进行拟合,同样获得幂函数关系:

$$E_f = kd_p^n \quad (6)$$

图10为不同颗粒粒径下在不同动水入口压力下最大冲蚀率的拟合曲线。结果表明,幂函数很好地拟合了模拟数据,相关系数 $R^2$ 的范围为0.992 3~0.995 0,拟合系数 $k$ 在 $4 \times 10^{-6} \sim 0.001 7$ 较宽范围内变化,另一个拟合系数 $n$ 在0.402 8~0.596 7小范围内变化。

6~8 μm、8~10 μm时,平均冲蚀速率增幅分别为

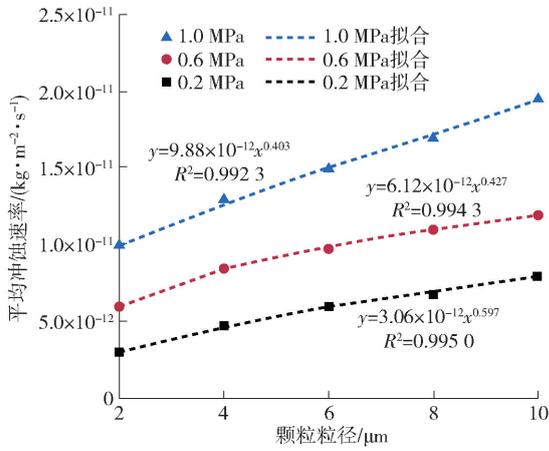


图 10 不同颗粒粒径下平均冲蚀速率拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of average erosion rate under different particle sizes

### 4 讨论

上文介绍了 2 种不同颗粒属性参数随不同水力参数变化对单裂隙壁面冲蚀损伤变化的分析,颗粒入射速度与平均冲蚀速率、颗粒粒径与平均冲蚀速率之间均呈现幂函数关系,即颗粒动力学参数的增加将引起裂隙壁面磨损率的增加。

通过对比 2 种颗粒属性参数与冲蚀损伤之间幂函数的指数  $n$  大小(表 2)以及颗粒属性对平均冲蚀速率的响应变化(图 11),获得单一颗粒动力学参数对最大冲蚀率的影响规律。结果表明,这 2 种颗粒动力学参数对冲蚀损伤的影响大小关系为:颗粒入射速度 > 颗粒粒径,即在控制其他参数不变的情况下,颗粒入射速度比颗粒粒径引起的冲蚀损伤更为严重。

表 2 颗粒属性参数与冲蚀速率拟合函数的部分相关参数

Table 2 Partial correlation parameters between particle attribute parameters and erosion rate fitting function

颗粒动力学参数(x)	入口动水压力 p/MPa	k	n
颗粒入射速度	0.2	$3.01 \times 10^{-12}$	1.5156
	0.6	$5.84 \times 10^{-12}$	1.4652
	1	$9.77 \times 10^{-12}$	1.4030
颗粒粒径	0.2	$3.06 \times 10^{-12}$	0.5967
	0.6	$6.09 \times 10^{-12}$	0.4265
	1	$9.88 \times 10^{-12}$	0.4028

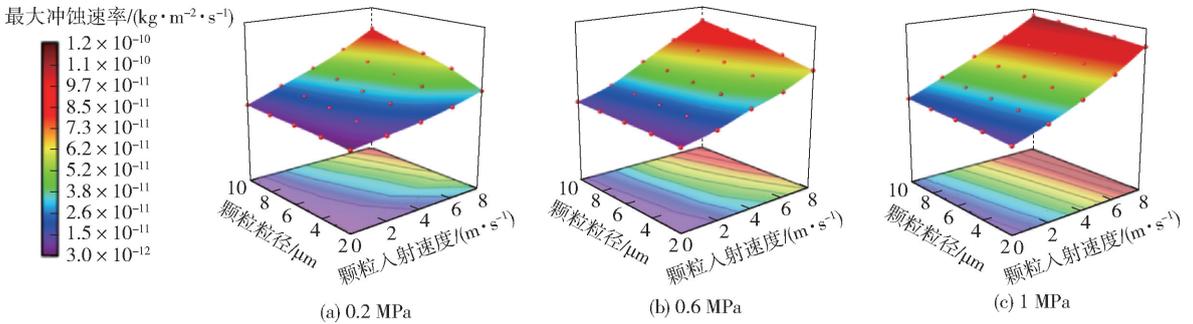


图 11 颗粒入射速度和颗粒粒径对平均冲蚀速率的响应变化

Fig. 11 Response changes of particle incidence velocity and particle size to average erosion rate

本文研究的颗粒颗粒对冲蚀损伤的影响关系为:颗粒入射速度 > 颗粒粒径,颗粒入射速度主要取决于水压的驱动力,颗粒粒径则反映为颗粒的物性,即水压相较颗粒物性更具影响且在裂隙刚发育阶段尤为明显。

对于细观角度下裂隙岩体损伤的研究较少,本文采用冲蚀速率的变化反映裂隙的损伤程度,该参数的变化缺乏对裂隙损伤的适量影响,后续将会考虑影响损伤绝对量的参数进行研究。

### 5 结论

1) 采用三维 CT 重构技术构建了三维单裂隙结构,分析了裂隙材料结构特征,流体在穿过曲折区域时受到壁面的阻碍和摩擦力的作用,引起主流区流线切入壁面而造成冲蚀效应,补充了影响流场变化的结构因素。

2) 颗粒入射速度和颗粒粒径与单裂隙壁面平均冲蚀速率均呈现幂函数关系。颗粒属性参数对冲

蚀损伤的影响大小关系为:颗粒入射速度 > 颗粒粒径。表现为在控制其他参数不变的情况下,颗粒入射速度比颗粒粒径引起的冲蚀损伤更为严重,即水压相较颗粒物性更具影响且在裂隙刚发育阶段更为明显。

3)以裂隙结构和颗粒粒径、入射速度入手,分析了上述参数对单裂隙损伤的影响,一定程度上还原了断层破碎带应力-渗流耦合作用下颗粒迁移过程,揭示了断层破碎带渐进演化过程,为研究断层水害提供新的思路,对优势导水路径预测具有重要意义。

#### [参考文献]

[1] 李利平,李术才,石少帅,等.基于应力-渗流-损伤耦合效应的断层活化突水机制研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):3295-3304.

[2] 宋亚新.采动应力-承压水耦合下煤层底板突水机理研究[J].中国煤炭,2022,48(S1):92-97.

[3] 王士伟,马钱钱,范晓刚,等.断层影响下底板突水机理数值模拟研究[J].煤炭技术,2020,39(5):112-115.

[4] 孙文斌,杨辉,赵金海,等.断层突水灾变演化过程划分基础

试验研究[J].煤炭科学技术,2023,51(7):118-128.

[5] 李彦志,张帅,吴岳,等.煤矿深井砂岩微裂隙水力耦合渗流机理研究[J].煤矿安全,2021,52(9):48-53,63.

[6] 董惠,张保良,于海锋.水力耦合裂隙岩体破裂机理研究综述[J].新疆有色金属,2021,44(4):51-52.

[7] 杨森,刘启蒙,刘瑜.单轴压缩下不同倾角交叉裂隙扩展演化研究[J].山东煤炭科技,2021,39(10):166-169,173.

[8] 姚邦华,王连成,魏建平,等.煤矿陷落柱突水的变形-渗流-冲蚀耦合模型及应用[J].煤炭学报,2018,43(7):2007-2013.

[9] 李杨杨,颜浩东,张士川,等.复合缺陷类岩石裂纹扩展规律及力学特性试验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(2):42-50.

[10] 刘其声.关于突水系数的讨论[J].煤田地质与勘探,2009,37(4):34-37,42.

[11] 张圣才,于德亮,李士强,等.兖州矿区兴隆庄煤矿下组煤底板岩溶水参数计算及突水危险性评价[J].中国煤炭地质,2015,27(3):35-39.

[12] 任志安,郝点,谢红杰.几种湍流模型及其在 FLUENT 中的应用[J].化工装备技术,2009,30(2):38-40,44.

## Analysis of main controlling factors of single fracture erosion damage of rock mass under particle migration

ZHENG Maohui, WANG Donglin, HE Zhiyong, WANG Hui, CAO Haohao,  
ZHANG Zhengmeng, LI Sihong, NIE Pengfei  
(Inner Mongolia Huangtaolugai Coal Co., Ltd., Ordos 017300, China)

**Abstract:** Micro-fracture seepage damage is an important influencing factor in the formation of the dominant path of fault water inrush. In this paper, by constructing a three-dimensional single fracture seepage model, the influence of different particle size and incident velocity on the erosion damage of single fracture wall is explored. The results show that there is a power function relationship between particle incident velocity, particle size and average erosion rate. The erosion rate of single fracture increases under the action of high-speed particles and large-size particles, and the influence size is: particle incident velocity > particle size. Under the action of hydraulic action and particle abrasion, the more serious period of fracture damage is mainly concentrated in the stage of fracture development.

**Keywords:** CT three-dimensional reconstruction; particle migration; numerical simulation; erosion damage; main controlling factors

