

基于 CFD-DEM 耦合的含骨料浆液充填沉积 封堵规律研究

杨旭凡 熊益 谢孟琦 曹正正
(河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000)

[摘要] 在大同煤矿双系特厚煤层开采中,采用含骨料浆液注浆充填技术封堵岩层裂隙,能够减轻采动对裂隙的扰动以及降低破碎岩体的导水性能,是预防老空水、有害气体下泄以及防止采区垮塌的关键措施。利用矿山固废粉煤灰作为绿色充填材料,可以实现固废资源的再利用。本文基于欧拉双向耦合模型,利用 Fluent 和 Edem 软件的耦合功能,构建了 CFD-DEM 耦合模型,分析骨料颗粒在裂隙中随浆液的运移、沉积行为及其对浆液流动速度的影响。研究发现,较小粒径和较低密度的骨料颗粒迁移距离较远,且相较于密度,粒径是影响骨料沉积速率的更重要因素;在迁移过程中,各粒径和密度的骨料固相比均呈现先增加后减少的趋势,沉降率随运移距离的增加而逐渐增大,且在相同位置,密度更大的骨料表现出更高的沉降率。研究结果为矿山固废充填材料的合理利用及注浆封堵技术的改进提供了理论依据。

[关键词] 注浆充填; 骨料迁移; 沉降率; 固相比

[中图分类号] TD853

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2024)06-0013-09

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.06.002

0 前言

作为中国煤炭资源的重要开采基地,大同矿区双系开采的特殊性为煤炭开采领域带来了诸多挑战与机遇。该矿区的地质构造独特,即上方侏罗系煤层与下方石炭系煤层双层分布。上部侏罗系煤层的

采空区复杂性及采动应力引发的裂隙问题,加之覆岩破坏形成的导水裂隙带,使得开采下部煤层时面临着双系煤层连通、老空水突涌及有害气体下泄等严峻威胁^[1-2]。矿山固废,如煤矸石、粉煤灰等,作为煤炭开采过程中的副产品,其大量堆积不仅占用土地资源,还会对环境造成污染^[3-4]。将这些固废作为充填材料,不仅能够有效解决其堆放问题,还能在煤炭开采中发挥重要作用^[5-6]。采用合理的充填技术与工艺,可以将这些固废材料充填到采空区或煤层间的裂隙中,从而增强煤层的稳定性,防止双系煤层的连通,有效控制老空水及有害气体的下泄^[7-8]。

固废浆体充填和膏体充填技术是当前广泛应用的绿色充填方法。该技术是将固废粉体、胶凝材料按一定水胶比混合成膏体或浆液,通过管道输送至采空区进行充填加固的过程^[9]。众多学者针对含骨料浆液与膏体的性质及其运移规律展开了研究。董培鑫等^[10]研究了充填骨料粒径级配对浆液流动性能与流变阻力的影响。陈寅等^[11]建立了基于流变参数计算管道输送阻力的数学模型,研究了不同浓度、灰砂比条件下的粗骨料膏体料浆管道输送阻力,并研究了不同浓度、灰砂比、管径及流量条件下的粗骨料膏体料浆管道输送阻力。颜丙恒等^[12]采

[收稿日期] 2024-10-31

[基金项目] 河南省自然科学基金资助项目(242300421246);河南省双一流学科建设专项项目(AQ20240724);河南理工大学青年骨干教师资助项目(2023XQG-01)。

[作者简介] 杨旭凡(2000—),女,山西汾阳人,硕士研究生,主要从事注浆充填开采研究工作。

[通信作者] 曹正正(1990—),男,安徽砀山人,副教授,博士,主要从事充填采矿理论与技术等研究工作。

[引用格式] 杨旭凡,熊益,谢孟琦,等.基于 CFD-DEM 耦合的含骨料浆液充填沉积封堵规律研究[J].绿色矿冶,2024,40(6):13-21.

YANG Xufan, XIONG Yi, XIE Mengqi, et al. Study on the deposition and plugging law of aggregate in slurry based on CFD-DEM coupling[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024,40(6):13-21.

用数值模拟探讨了充填料浆的屈服应力、塑性黏度对粗骨料颗粒迁移的影响。CFD-DEM 模型在探索运移规律方面广泛应用。李雪童等^[13]运用 CFD-DEM 耦合模型模拟了含砂水合物浆液在弯管节流装置中的颗粒流动特性与堵塞机制,分析了含砂量、砂粒径、节流孔口径及入口流速等多个变量对流动特性的具体影响。卞跃威等^[14]通过 DEM 模拟砂土颗粒骨架,以 CFD 模拟浆液,研究了砂土注浆过程中浆液在土颗粒间隙中的填充、扩散规律。

关于浆液扩散与运移规律,国内外众多专家学者已开展了大量研究。在理论研究层面,王东亮等^[15]基于牛顿流体、宾汉姆流体和幂律流体的本构方程及运动方程系统地推导出了不同流型浆液的扩散方程。刘向阳等^[16]则进一步考虑了裂缝的几何形态及浆液的黏度流变性,成功推导出相应的浆液扩散运动方程。柴敬等^[17]通过引入浆液时变性的考量,推导出了幂律流体球形扩散半径的计算公式。牟林等^[18]通过构建骨料中水泥浆液运移模型,深入分析骨料的比面积与浆液的时变性对注浆过程的影响。这些研究成果共同为深入理解浆液扩散与运移规律奠定了坚实的理论基础。在试验和数值模拟层面,马敬凯等^[19]开展了流变试验和数值模拟研究,较为细致地阐述了水灰比与水泥净浆的流变性能及流变参数之间的内在联系,并探讨了宾汉姆流体在破碎岩体中的注浆扩散特性。张嘉凡等^[20]借助动水注浆试验系统进行了倾斜裂隙注浆试验,运用有限元法对 Navier-Stokes 方程以及浆水相界面控制方程进行求解,着重分析了倾斜裂隙中流速与压力的分布特征,试验与模拟共同揭示了堵水关键区域内浆液的运移规律。Li Jianbo^[21]采用数值方法研究

了垂向裂隙中浆液扩散距离和注浆石体对进水和水压的影响。

目前学者主要对浆液流体的性质进行研究,但有关含骨料浆液在裂隙中运动规律理论的研究较少。骨料颗粒的迁移行为不仅关乎注浆材料能否充分渗透至裂隙深处,还直接影响到裂隙填充的均匀性与密实性,进而影响整体的加固效果。因此,本文基于欧拉双向耦合模型,利用 Fluent 和 Edem 软件的耦合功能,研究骨料颗粒在裂隙中随浆液的运移、沉积行为及其对浆液流动速度的影响规律。

1 工程背景

大同矿区作为典型的双系开采煤田,其地理位置特殊,上方为侏罗系煤层,下方为石炭系煤层,两者相距 150 ~ 200 m。近年来,由于浅部侏罗系煤层的资源逐渐枯竭,下部埋深 400 ~ 520 m、平均厚度达 15.72 m 的石炭系 3[#] ~ 5[#]煤层成为主要待开采区。然而,开采下部石炭系煤层的难度显著高于上部煤层。这主要是由于上部侏罗系煤层采空区情况复杂多变,存在由采动应力引发的裂隙,且覆岩已受破坏形成了导水裂隙带。开采下部石炭系煤层时会对上覆岩层造成二次破坏,加剧采动裂隙的发展,极易导致双系煤层连通。一旦连通发生,上方积聚的老空水及有害气体将会下泄,对煤矿工人的生命安全构成严重威胁。水气下泄示意图如图 1(a)所示,注浆充填破断关键层过程如图 1(b)所示。通过对关键层裂隙实施高压注浆填充,可成功构建“阻隔水气关键层”。这一层结构可有效防控上方侏罗系采空区内积聚的老空水和有害气体下泄。

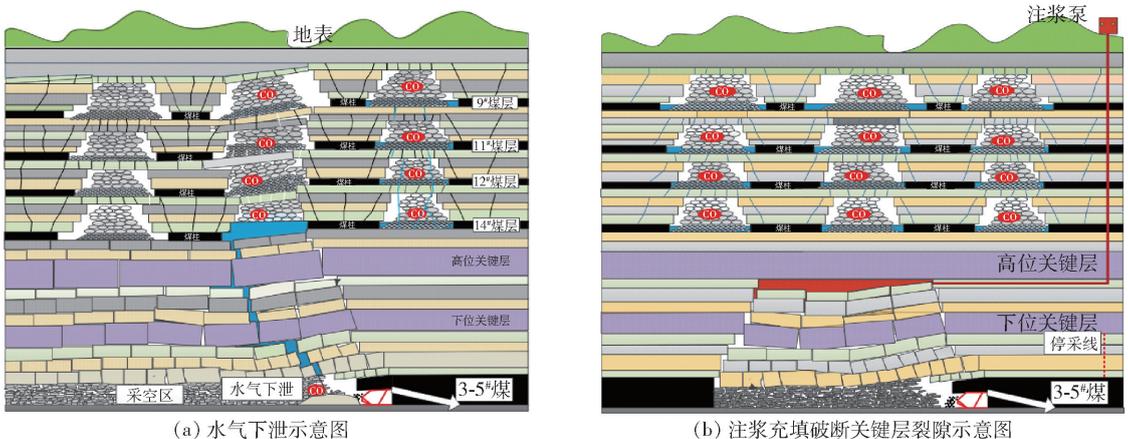


图 1 大同双系煤层注浆充填防治水气下泄示意图

2 固-液两相运动基本理论

2.1 液相运动基本原理

本文选用有黏度的宾汉姆流体。该流体遵循牛顿内摩擦定律,即流层间存在内摩擦力(式(1))^[22],这是各层流流速的主要影响因素。

$$F = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

式中, F 为流体的内摩擦力,N; A 为流体间接触面积, m^2 ; dv/dy 为流速梯度, $Pa \cdot s$; μ 为与流体性质相关的比例系数, $1/s$ 。

根据牛顿内摩擦定律,流体中不同层流之间因存在内摩擦力而相互影响,导致各层流速不同。在裂隙中,流体与墙壁之间的附着力使得紧贴裂隙壁的一层流体速度降为零。由于内摩擦定律的作用,层流流体的流速逐层递减,使得裂隙壁附近的流体域流速发生显著变化。最终形成的速度分布规律表现为:靠近裂隙壁的两部分呈现低流速,而中间区域则为高流速,整体形态类似于子弹头。同时,由于流

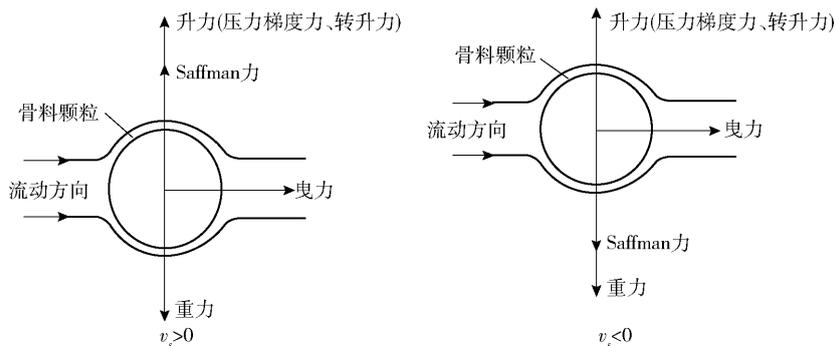


图2 骨料颗粒受力分析示意图

3 骨料随浆液运移的流固耦合数值模拟

3.1 耦合基本参数设定与耦合模型构建

本文浆液的骨料为粉煤灰、普硅水泥和黄土。粉煤灰源自燃煤电厂的灰尘颗粒,大同地区有多个火力发电厂,粉煤灰储量大、成本低,且资源化利用环保;普硅水泥作为注浆领域的常用材料,不仅成本低、环保,而且性能卓越;黄土资源丰富,粒径大于粉煤灰,能增加浆液流动性。这三种骨料的结合,既符

速分布不均匀,高速区的骨料颗粒会比低速区的颗粒移动得更快。这种速度差异会导致在运动过程中,高速区的骨料颗粒浓度相对较低,而在低速区或靠近裂隙壁的区域,由于颗粒堆积或移动速度较慢,骨料颗粒浓度可能会相对较高。

2.2 骨料颗粒运动基本原理

在岩层裂隙注浆过程中,浆液中骨料颗粒运动状态受到多种力的综合影响,主要包括重力、曳力、升力(压力梯度力和转升力)以及 Saffman 升力^[23]。骨料颗粒所受各力主要与颗粒的运动状态相关,其详细受力分析如图2所示。Saffman 升力一般在裂隙边缘附近产生,并且在速度梯度较小的情况下,其影响可以忽略不计。颗粒滑移速度是决定 Saffman 升力方向的关键因素:当滑移速度为正值时,Saffman 升力方向向上;反之向下。骨料颗粒随浆液运动时,主要受“推动力”“沉降力”共同作用。骨料颗粒在曳力等“推动力”的作用下沿水平方向扩散的趋势;同时,在重力等“沉降力”的影响下,颗粒也呈现向下沉积的趋势。

合绿色、环保、可持续发展的理念,又能满足工程注浆的需求。关于浆液参数的设定,本文参考了课题组任宇楼^[24]采用正交试验的方法得出的浆液参数。水泥、粉煤灰、黄土作为细骨料能够提供良好的流动性和可塑性,便于注浆操作。然而在一些特殊情况下,为了增加注浆层的强度和承载能力,可以适当添加一些粗骨料,如碎石或砂等。在 Fluent 中,忽略细骨料的离散性,将水泥、粉煤灰、黄土与水等材料的混合物视为液相。液相的详细参数见表1。

表1 液相参数

参数	模型	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	稠度指数	幂律指数	屈服应力阈值/Pa	临界剪切速率/ s^{-1}
数值	Herschel-Bulkley	1 250	1.53	0.66	6.51	2.87

采用 Edem 软件中生成的粗骨料颗粒作为固相进行模拟。在添加粗骨料时,需要严格控制其颗粒大小以确保注浆效果。在对宽度为 16 mm 的裂隙进行封堵研究时,通过对不同粒径颗粒进行预模拟,为了兼顾计算效率与沉积效果,选取粒径 4 mm 和 5 mm 的颗粒,密度设置 4 个等级 (3 000 kg/m³、3 500 kg/m³、4 000 kg/m³、4 500 kg/m³)。骨料颗粒设定为单粒球形,采用 Hertz-Mindlin 软球模型。其中,剪切模量设定为 4.7e⁸ Pa,泊松比则为 0.3。

Edem-Fluent 耦合是一个瞬态双向数据传递的过程。本文耦合接口采用欧拉-欧拉法。耦合过程为:Fluent 计算一个时间步的流场信息,启动 Edem 进行相同时间迭代,利用耦合接口将颗粒的位置、运动等信息传递至 Fluent 中;Fluent 计算颗粒与流体的相互作用,流体对颗粒的作用将通过接口传递至 Edem,作为颗粒体积力影响颗粒的运动,而颗粒对流体的作用通过动量源相的方式作用于流体中。通过不断地进行流场计算、颗粒-流体信息传递与更新,最终实现对颗粒-流体系统全过程的精确瞬态模拟。

裂隙模型为水平裂隙,尺寸如图 3 所示。模型边界条件为:Fluent 中裂隙入口设置恒定的流速,大小为 0.85 m/s,出口为大气压,浆液整体流动方向为自左向右;Edem 中入口处设置颗粒工厂,颗粒生成速度为每秒 2 000 个。模拟的过程中需要持续观察骨料的流动状态,直至观察到浆液前端的大部分骨

料颗粒沉积,此时即可判定模拟结束。

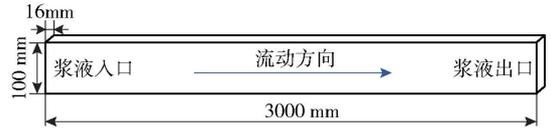
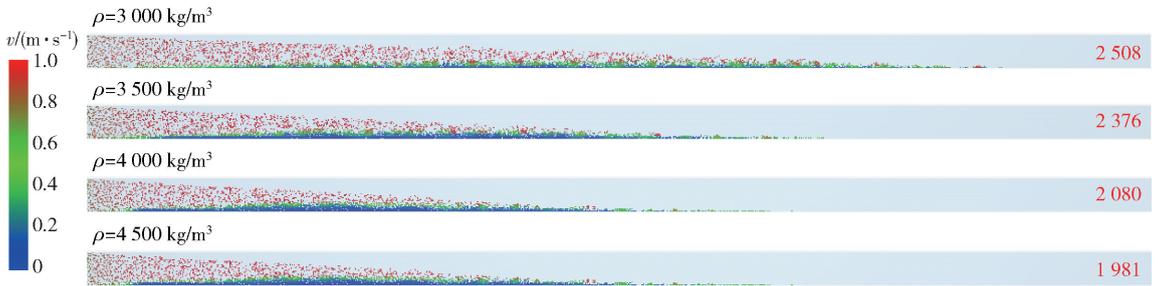


图 3 裂隙模型尺寸

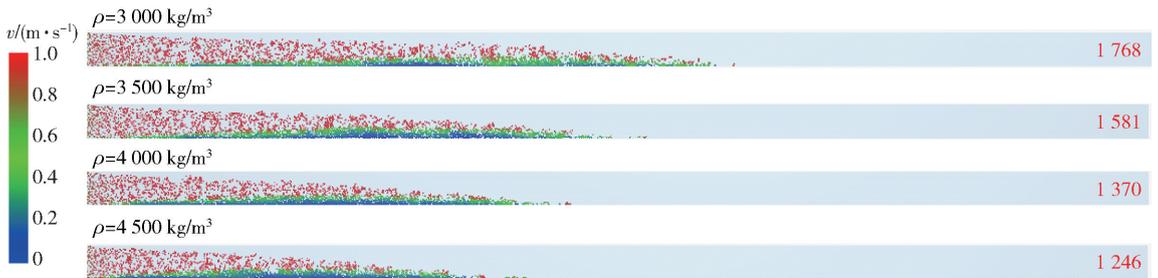
3.2 骨料颗粒随浆液运移的数值模拟

图 4 的 Edem 速度云图展示了不同粒径和密度骨料颗粒在浆液中的运移速度分布特点。由图 4 可知,随着骨料颗粒密度的增加,其运移距离呈现缩短的趋势。具体而言,粒径为 4 mm 且密度为 3 000 kg/m³ 的骨料颗粒运移距离达到了最远的 2 508 mm,而粒径为 5 mm、密度为 4 500 kg/m³ 的骨料颗粒运移距离则最短,仅为 1 246 mm。

在同一粒径下,当骨料颗粒的密度从 3 000 kg/m³ 增加到 4 500 kg/m³ 时,相邻两个密度之间最远运移距离的减少幅度呈现先增大后减少的趋势。在 4 mm 粒径下,相邻密度之间最远运移距离的减少量分别为 132 mm、296 mm、99 mm,在 5 mm 粒径下分别为 187 mm、211 mm、124 mm。在密度增加的初期阶段,颗粒沉降速度的增加是主导因素,颗粒间相互作用尚弱,对最远运移距离影响有限,故此时相邻密度间最远运移距离减少量相对较大;随着密度的进一步增加,颗粒间相互作用(碰撞、摩擦等)变得频繁且剧烈,显著限制了颗粒的运动范围,颗粒间相互作用的增强成为主导因素,导致骨料迁移距离的缩



(a) 4 mm 粒径



(b) 5 mm 粒径

图 4 4 mm 和 5 mm 粒径骨料颗粒速度云图

减幅度趋于减缓。

Fluent 骨料体积分数云图如图 5 所示。根据图 5 可知,裂隙底部的骨料体积分数明显高于其他

位置。其中,高密度颗粒的沉积区域更靠近裂隙入口,呈现“前移”的现象,这表明其沉降速度更快。

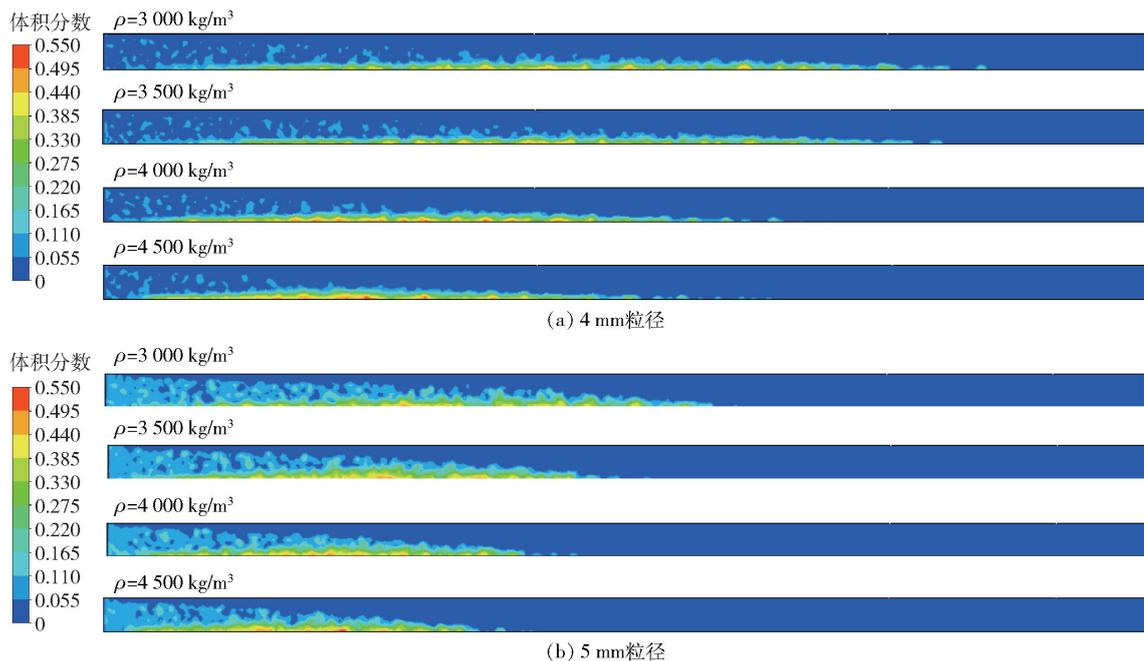


图 5 4 mm 和 5 mm 粒径固相颗粒体积分数云图

图 6 的速度云图呈现了携带 4 mm 和 5 mm 粒径的骨料浆液在单裂隙中流动时的速度特性。由图 6 可知,浆液的最大流速均接近 1.1 m/s,相较于裂隙入口处初始流速 0.85 m/s,存在明显差异。随

着浆液在裂隙中的流动,骨料颗粒因重力沉积于裂隙底部,导致了浆液在裂隙中的过流断面减小。在流量保持恒定的条件下,由于过流断面的减小,根据流量与流速、过流断面面积之间的基本关系,流速会

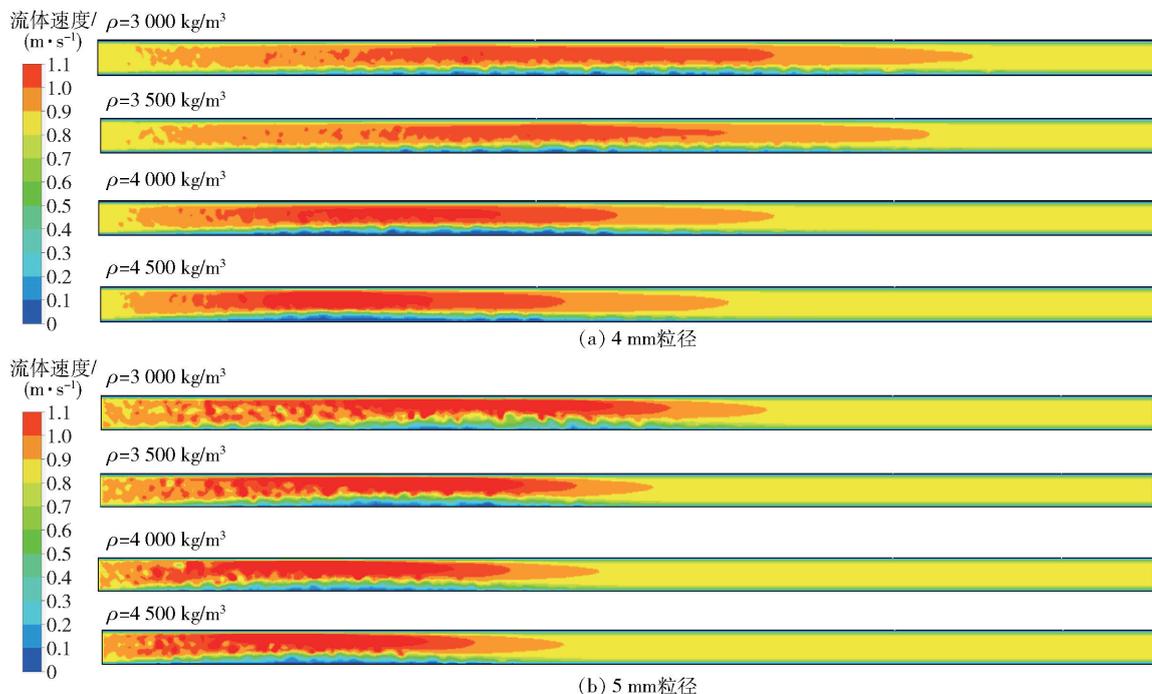


图 6 携带 4 mm 和 5 mm 粒径骨料的流体速度云图

增加以维持流量的稳定。结合颗粒体积分数云图,流体速度云图中速度最大值均出现于颗粒堆积量较大位置之上;而在颗粒堆积量较小的位置,由于过流断面相对较大,浆液流速则能够恢复到接近初始入口流速 0.85 m/s 。

3.3 骨料颗粒运移模拟数据分析

通过分析图 4 的颗粒速度云图发现:颗粒沉降达到一定高度后,会进入一个速度显著降低的区域。在这一区域内,颗粒的水平速度会显著地下降,与裂隙中心区域快速流动的颗粒形成鲜明对比。以图 7 中粒径 4 mm ,密度 $3\ 000 \text{ kg/m}^3$ 、 $4\ 500 \text{ kg/m}^3$ 颗粒的速度云图为例,裂隙中心区域的颗粒速度较快,而位于红色标线下方的颗粒速度则明显减小,远低于其他区域的颗粒速度,故推断红色标线下方的颗粒已经或即将发生沉积。

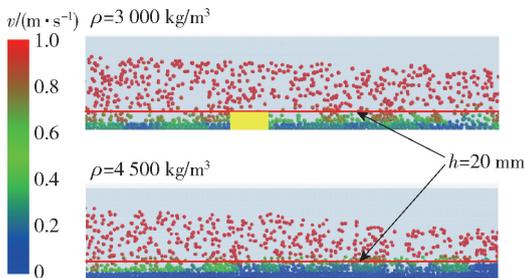


图 7 单裂隙局部速度云图

本节将通过统计骨料颗粒随浆液流动过程中固相比和沉降率的变化情况来研究沉积规律。测点设置在距离入口 0.05 m 、 0.2 m 、 0.5 m 、 0.8 m 、 1.1 m 、 1.4 m 、 1.7 m 、 2.0 m 、 2.3 m 和 2.6 m 位置处。第一个测点设置在 0.05 m 处是为了避免注浆孔附近流体流动的不稳定性对数据造成失真。借助 Edem 后处理中 section 区域统计功能,对每个测点取

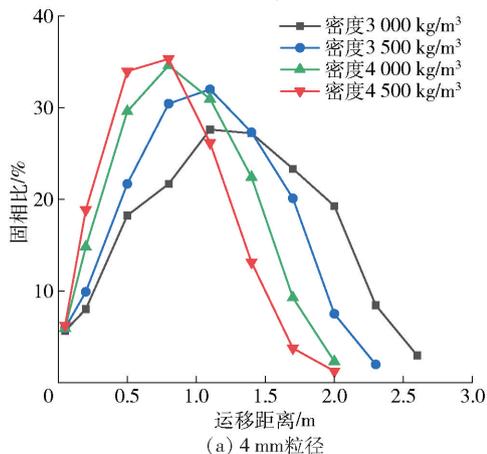


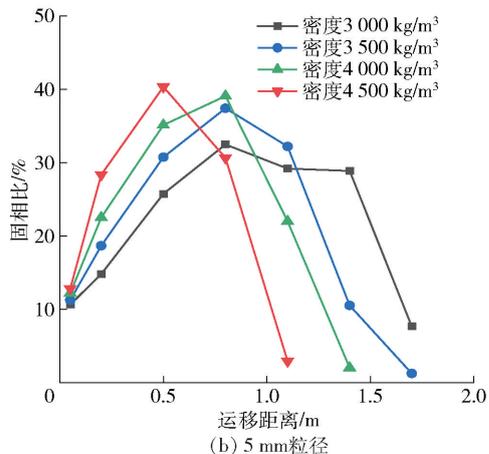
图 8 4 mm 与 5 mm 粒径下骨料的固相比随其流动距离的变化曲线

$50 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的计算单元(图 7 黄色示例)进行统计。固相比是指计算单元内骨料体积与计算单元体积的比值;沉降率指计算单元内骨料体积与对应长宽所有高度内骨料体积的比值。为了降低小部分骨料在流动过程中可能出现的无规律沉积对统计结果的影响,文中采用了多点取样并求平均值的方法,以减少偶然误差。除第一个测点以外,其余测点设置了 3 个取样点进行数据统计。以测点为中心,取计算单元为第一个取样点,间隔 30 mm 左右取第 2 和第 3 个取样点。

3.3.1 4 mm、5 mm 粒径下不同密度骨料颗粒随浆液流动过程中固相比的变化规律

4 mm 与 5 mm 粒径下各密度的骨料随浆液流动时固相比的变化趋势如图 8 所示。由图 8 可知,4 mm 与 5 mm 粒径下各密度的骨料随浆液流动时固相比的变化趋势相似,均呈现出先增大后减小的特点。在流动初期,由于骨料受到重力作用,会沉积在裂隙底部,从而导致固相比增大。但随着浆液的继续流动,沉积的骨料使得浆液中骨料含量相对降低,固相比减少。在裂隙的前半部分,骨料的沉积量大于其含量的减少量,固相比增加,骨料沉积是主要影响因素;在后半部分,骨料含量的减少量大于其沉积量,固相比减少,骨料含量降低为主要影响因素。

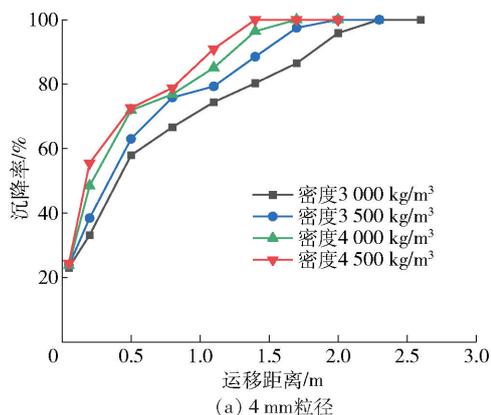
在 4 mm 和 5 mm 粒径下,密度 $4\ 500 \text{ kg/m}^3$ 的骨料均首先达到固相比的最大值。4 mm 粒径的骨料在 0.8 m 测点处固相比最大,达到 35.31% ; 5 mm 粒径的骨料在 0.5 m 测点处固相比最大,达到 40.31% 。对于相同粒径的骨料,密度增加会加大其重力,使垂直沉降力明显增强,沉积速度加快。这进



一步证实了流速最大值区域并非固定不变,而是会随着骨料粒径和密度的变化而发生相应的变化。

3.3.2 4 mm、5 mm 粒径下不同密度骨料颗粒随浆液流动过程中沉降率的变化规律

4 mm 与 5 mm 粒径下各密度的骨料随浆液流动时沉降率的变化如图 9 所示。由图 9 可知,沉降率



均随运移距离的增加而增大;在同一距离下,密度越大,骨料沉降率越高。在 4 mm 粒径组中,密度为 4 500 kg/m³ 的骨料在 1.4 m 处率先达 100% 沉降率;而 5 mm 粒径组中,同密度骨料在 1.1 m 处即达 100% 沉降率;两组半径下密度为 4 000 kg/m³ 的骨料分别在 1.7 m、1.4 m 测点达到 100% 沉降率。

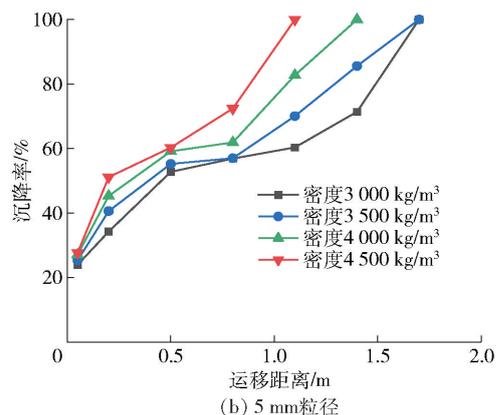


图 9 4 mm 与 5 mm 粒径下骨料的沉降率随其流动距离的变化规律

3.3.3 不同密度下两种粒径的骨料随浆液流动过程中的固相比变化规律

4 mm、5 mm 粒径下 4 种密度骨料在浆液流动过程中固相比的变化对比如图 10 所示。由图 10 可

知,5 mm 粒径下固相比的增加和减少速度均大于粒径 4 mm 组。对于相同密度的骨料,5 mm 粒径的骨料颗粒的固相比最大值总是高于 4 mm 粒径的骨料。具体而言,这些最大值的差值分别达到了

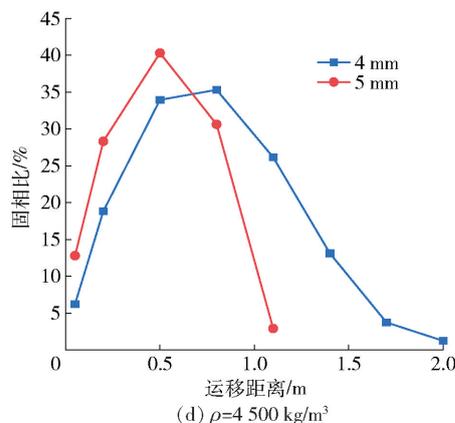
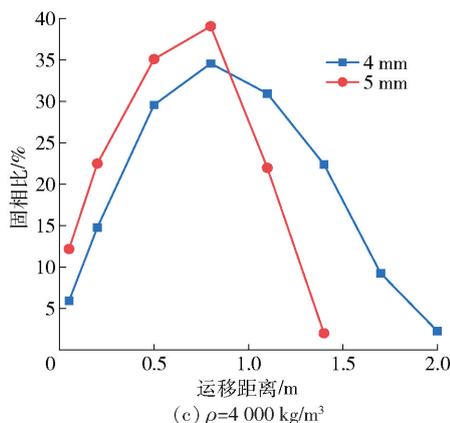
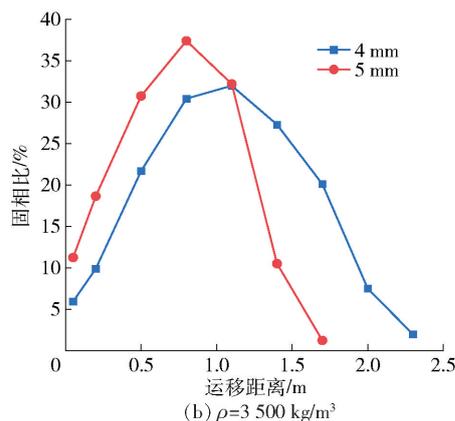
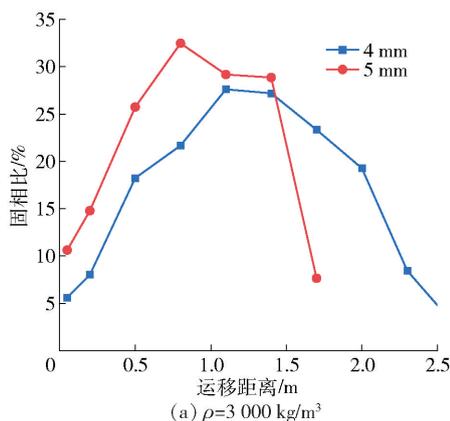


图 10 4 mm 与 5 mm 粒径下不同密度的骨料随浆液流动过程中的固相比变化

7.40%、5.42%、4.48%、5.00%。

在浆液运移前中期,5 mm 粒径的骨料固相相比更快达到峰值;而中后期,其固相比则迅速下降,甚至低于 4 mm 粒径的骨料。当骨料密度相同时,单个骨料颗粒在竖直方向上所受的沉降力主要取决于其粒径。骨料颗粒的粒径越大,其所受的沉降力也就越大。在同一空间位置,尽管骨料颗粒所受到的水平力相差不大,但由于粒径对沉降力的显著影响,粒径较大的骨料颗粒会呈现更快的沉积速率。所以在运移的前中期,5 mm 粒径骨料沉降速度更快,所测得的固相比也就越大。在运移中后期,由于前中期的大幅沉降,5 mm 粒径骨料在浆液中的浓度显著减少,导致其沉积量也随之减少,固相比值迅速下降,甚至低于 4 mm 粒径的骨料。

4 结论

1) 骨料特性对运移的关键作用:在岩层裂隙的注浆施工中,骨料颗粒的粒径与密度是影响其运移行为的主导因素。粒径细小、密度较低的骨料能够随浆液流动更远距离,这归因于它们受到的沉降力相对较小,有利于在裂隙中保持更久的悬浮状态。

2) 运移过程中的固相比与沉降率变化:4 mm 与 5 mm 粒径下不同密度的骨料随浆液流动时,固相比的变化趋势为先增大后减小。在运移初期,骨料的沉积量大于其浓度的减少量,呈现固相比增加;而到了后期,骨料浓度的减少量大于其沉积量,呈现固相比减少。沉降率随运移距离的增加而逐渐增大,且在同一位置,密度更大的骨料呈现更高的沉降率。

3) 注浆策略的优化建议:基于骨料特性对运移效果的显著影响,制定注浆方案时需充分考虑骨料粒径与密度的选择。通过精确计算,合理布局注浆孔的位置与间距,可以确保骨料在目标区域内实现均匀分布,既避免局部过度堆积,又减少未填充区域,从而提升注浆充填工程的整体质量和效率。

[参考文献]

[1] 于斌,杨敬轩,高瑞.大同矿区双系煤层开采远近场协同控顶机理与技术[J].中国矿业大学学报,2018,47(3):486-493.

[2] 谢经鹏,杨柳华,郑攻关,等.充填料浆泌水特性及其微观结构演变[J].绿色矿冶,2024,40(4):1-7.

[3] 刘具,秦坤.我国煤炭绿色开采技术进展[J].矿业安全与环保,2023,50(6):7-15.

[4] 郭文兵,吴东涛,白二虎,等.我国煤矿智能绿色开采

技术现状与展望[J].河南理工大学学报(自然科学版),2023,42(5):1-17.

[5] 朱瑞军,李立涛,夏长念,等.充填料浆制备浓度前馈调控工艺及技术途径[J].中国矿山工程,2024,53(1):36-40.

[6] 康国华,白龙剑,王洪江,等.地下矿山新型浮箱式膏体充填接顶技术研究及应用[J].矿产保护与利用,2024,44(2):46-51.

[7] 卢宏建,牟超,武捷.充填体-边界介质组合体剪切力学特性与参数分析[J].金属矿山,2024,(2):80-87.

[8] 梁新民,王怀勇,陈小伟,等.铲运机自动化出矿系统在上向分层充填采场的应用研究[J].有色设备,2021,35(3):68-75.

[9] 奚弦,桑树勋,刘世奇.煤矿区固废矿化固定封存CO₂与减污降碳协同处置利用的研究进展[J].煤炭学报,2024,49(8):3619-3634.

[10] 董培鑫,杨志强,高谦,等.混合充填集料粒径与级配对料浆流动性影响[J].矿业研究与开发,2018,38(3):53-59.

[11] 陈寅,郭利杰,邵亚平,等.粗骨料膏体充填料浆流变特性与管道输送阻力计算[J].中国矿业,2018,27(12):178-182.

[12] 颜丙恒,李翠平,吴爱祥,等.膏体料浆管道输送中粗颗粒迁移的影响因素分析[J].中国有色金属学报,2018,28(10):2143-2153.

[13] 李雪童,史博会,段旭,等.含砂水合物浆液过节流装置数值模拟研究[J].工程热物理学报,2022,43(4):989-996.

[14] 卞跃威,张小龙,袁甲,等.基于CFD-DEM方法的砂土注浆微观机理研究[J].现代隧道技术,2020,57(S1):528-534.

[15] 王东亮,郝兵元,梁晓敏.不同流型浆液在裂隙内扩散规律的理论及数值分析[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(10):3760-3770.

[16] 刘向阳,程桦,黎明镜,等.基于浆液流变性的深埋岩层纵向劈裂注浆理论研究[J].岩土力学,2021,42(5):1373-1380,1394.

[17] 柴敬,周余,欧阳一博,等.基于光纤监测的注浆浆液扩散范围试验研究[J].中国矿业大学学报,2022,51(6):1045-1055.

[18] 牟林,董书宁.截流巷道骨料堆积体中浆液运移规律与阻水机制[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1891-1900.

[19] 马敬凯,冯国瑞,李竹.不同水灰比水泥净浆流变参数测定及注浆扩散特征[J].中国安全生产科学技术,2023,19(8):100-107.

[20] 张嘉凡,孙晓东,刘洋,等.倾斜裂隙动水注浆扩散规

- 律及堵水关键域研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(S2): 575-588.
- [21] LI Jianbo. Numerical study on diffusion distance and plugging effect of grouting in a vertical fracture under high water pressure [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(11): 5497-5506.
- [22] 王贞涛. 流体力学与流体机械[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [23] 宁智, 白振霄, 孙春华, 等. 湍流通道内微粒受力沉降特性模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 1-8, 31.
- [24] 任宇楼. 岩层采动裂隙注浆浆液扩散机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.

Study on the Deposition and Plugging Law of Aggregate in Slurry based on CFD-DEM Coupling

YANG Xufan, XIONG Yi, XIE Mengqi, CAO Zhengzheng

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In the mining of double-system extra-thick coal seams in Datong Coal Mine, the use of aggregate-containing slurry grouting filling technology to seal rock fractures can reduce the disturbance of mining to fractures and reduce the water conductivity of broken rock masses. It is a key measure to prevent goaf water and harmful gas leakage and prevent collapse of mining areas. Using mine solid waste fly ash as green filling material can realize the reuse of solid waste resources. Based on the Euler two-way coupling model, the CFD-DEM coupling model was constructed by using the coupling function of Fluent and EDEM software. The migration and deposition behavior of aggregate particles in cracks with slurry and its influence on slurry flow velocity were analyzed. It is found that the aggregate particles with smaller particle size and lower density have a longer migration distance, and the particle size is a more important factor affecting the aggregate deposition rate compared with the density. During the migration process, the aggregate-solid ratio of each particle size and density shows a trend of increasing firstly and then decreasing. The sedimentation rate gradually increases with the increase of the migration distance, and at the same position, the aggregate with higher density shows a higher sedimentation rate. The research results provide a theoretical basis for the rational utilization of mine solid waste filling materials and the improvement of grouting plugging technology.

Key words: grouting filling; aggregate migration; settlement rate; solid ratio