

# 煤矸石粒径级配对非胶结膏体充填效果的影响研究

许金钢<sup>1</sup>, 成云海<sup>2</sup>

<sup>1</sup>安徽理工大学矿业工程学院, 安徽 淮南

<sup>2</sup>山东科技大学采矿工程研究院, 山东 泰安

收稿日期: 2025年8月20日; 录用日期: 2025年9月20日; 发布日期: 2025年9月29日

## 摘要

煤矸石充填技术是实现煤矿绿色开采的重要手段, 但其充填效果受颗粒粒径级配的显著影响。本文通过物理模型试验, 系统研究了不同粒径煤矸石( $\leq 2.5$  mm和 $\leq 5.0$  mm)对非胶结膏体充填过程中浆液流动特性、扩散规律及堆积效应的影响。试验结果表明, 细颗粒料浆(A组)扩散范围更广, 流动均匀, 能有效填充空隙; 而粗颗粒料浆(B组)易在管口形成“拱桥效应”, 导致扩散受限、压力升高及局部喷浆现象。此外, 研究发现水平与垂直方向上均存在颗粒分选现象, 粗颗粒多集中于近管口区域, 细颗粒则随浆液远距离迁移。基于试验结果, 揭示了粒径差异对充填效果的调控机制, 提出了优化煤矸石级配的建议, 为提升充填效率与安全性提供了理论依据。本研究对煤矿充填技术的改进及工程实践具有重要指导意义。

## 关键词

煤矸石充填, 粒径级配, 非胶结膏体, 拱桥效应, 扩散机理, 颗粒分选

## Study on the Influence of Coal Gangue Particle Size Distribution on the Filling Effect of Non-Cemented Paste

Jingang Xu<sup>1</sup>, Yunhai Cheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

<sup>2</sup>Mining Engineering Research Institute, Shandong University of Science and Technology, Tai'an Shandong

Received: Aug. 20<sup>th</sup>, 2025; accepted: Sep. 20<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 29<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Coal gangue filling technology is an important method for achieving green mining in coal mines, but

its filling effectiveness is significantly affected by particle size distribution. This study systematically investigates the effects of different coal gangue particle sizes ( $\leq 2.5$  mm and  $\leq 5.0$  mm) on the flow characteristics, diffusion patterns, and accumulation behavior of non-cemented paste during the filling process through physical model experiments. The experimental results show that fine-particle slurry (Group A) exhibits a wider diffusion range and more uniform flow, effectively filling voids, while coarse-particle slurry (Group B) tends to form a “bridge effect” near the pipe outlet, leading to restricted diffusion, increased pressure, and localized slurry spouting. Additionally, the study reveals particle segregation phenomena in both horizontal and vertical directions, with coarse particles concentrated near the pipe outlet and fine particles migrating over longer distances with the slurry. Based on the experimental results, the regulatory mechanisms of particle size differences on filling effectiveness are elucidated, and recommendations for optimizing coal gangue gradation are proposed, providing a theoretical foundation for improving filling efficiency and safety. This research offers significant guidance for the advancement of coal mine filling technology and engineering practices.

## Keywords

Scoal Gangue Filling, Particle Size Distribution, Non-Cemented Paste, Bridge Effect, Diffusion Mechanism, Particle Segregation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着煤炭资源的不断开采和环境保护要求的日益严格, 煤矿开采技术正在向绿色、安全、可持续发展转型。在这一过程中, 煤矸石充填技术作为一种有效的资源回收和环境保护手段, 得到了广泛应用[1]。煤矸石充填不仅能够减少矿山废弃物的排放, 缓解矿区生态环境的压力, 还能够提高采矿效率, 保障采矿作业的安全性[2]。因此, 充填技术已成为现代煤矿开采中不可或缺的技术之一。然而, 尽管充填技术在煤矿开采中的应用已经取得了一定的进展, 但仍面临着一些技术瓶颈。尤其是在充填材料的选择和充填效果的优化方面, 仍存在许多挑战。例如, 充填过程中料浆的扩散能力、流动性以及充填效果受多种因素的影响, 其中颗粒的粒径级配是一个关键因素[3]。粒径的不同, 不仅影响料浆的流动性, 还可能导致拱桥效应的形成, 从而影响充填效果。拱桥效应是指在充填过程中, 较大颗粒煤矸石在裂隙口处堆积, 形成类似拱桥的结构, 进而导致料浆无法顺利流动, 充填效果不理想。目前, 关于不同粒径煤矸石颗粒对充填效果的影响已有一定的研究, 但大多数研究仅局限于单一粒径或单一材料的分析, 缺乏对不同粒径级配对充填效果的系统研究。现有研究已关注到粒径对充填效果的作用: 朱磊等(2023)指出煤矸石浆体的流动阻力随粒径增大而提升[4][5], 但未系统分析不同级配的扩散差异; 张吉雄等(2023)提出矸石注浆充填的工艺优化方法[6], 却未深入探讨颗粒-孔隙匹配性对堵塞的影响。此外, 多数研究聚焦单一粒径或胶结体系, 对非胶结膏体中“拱桥效应”的形成机制、颗粒分选的动力学过程缺乏理论关联。粒径的调控对充填效果的优化具有重要意义。粒径较小的煤矸石颗粒通常具有更好的流动性和扩散性, 但在充填过程中可能无法充分填充较大空隙。而粒径较大的颗粒, 则可能会导致拱桥效应的出现, 造成料浆在裂隙口处堵塞, 影响充填的均匀性和有效性。因此, 研究不同粒径级配对充填效果的影响规律, 优化粒径级配方案, 对于提高充填效果、减少成本、提高充填质量具有重要的实践意义。

本文旨在通过实验研究不同粒径煤矸石颗粒在充填过程中的流动特性、扩散特性和堆积效应, 探索不同粒径级配对充填效果的影响, 并提出优化的煤矸石粒径级配方案。研究结果将为煤矸石充填技术的改进提供理论依据, 为矿山安全、环保和经济效益的提升提供技术支持。

## 2. 试验方案

### 2.1. 构建实验模型

为了研究非胶结膏体充填采空区流动特征, 进行采空区充填物理模型试验。试验模型为棱台状, 走向长度 6 m, 倾向长度 6 m, 阶梯高度 1.8 m, 预埋管路平铺模型底部中间位置, 距地面高度 0.2 m, 布置深度 2.5 m; 试验管路采用无缝钢管, 内径 52 mm, 壁厚 6 mm, 每节长度为 2~3 m, 管道输送总长度 20 m, 连接方式为卡扣连接。所用试验泵型号为 SPB7-G (试验泵专门进行改进, 搅拌泵送一体), 泵送流量  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ , 泵送最大压力为 6 MPa。模型搭建如图 1 所示:

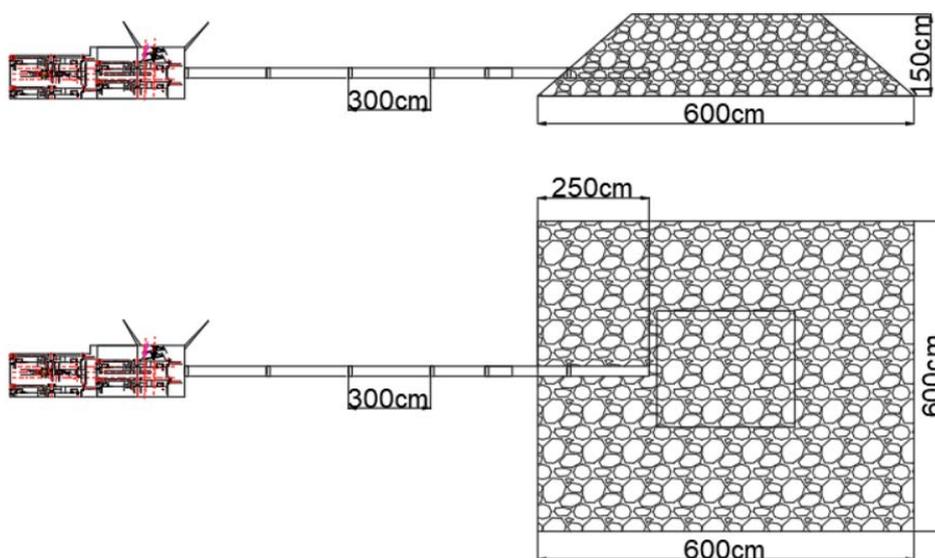


Figure 1. Simulation filling test process flow chart  
图 1. 模拟充填试验工艺示意图

### 2.2. 试验设计

#### 2.2.1. 试验材料配比设计

本次试验充填料浆由煤矸石、粉煤灰及水拌制而成, 其煤矸石为充填材料的主要骨料, 经筛分之后分为 2.5 mm 和 5.0 mm 两种粒径的矸石颗粒, 配比方案如表 1 所示。

Table 1. Proportioning scheme design  
表 1. 配比方案设计

序号	最大粒径/mm	煤矸石/kg	水/kg	粉煤灰/kg	配比	料浆浓度
A	≤2.5	1400	700	400	14:7:4	72%
B	≤5.0	1400	600	400	14:6:4	75%

#### 2.2.2. 实验步骤

试验工艺流程图如图 2 所示:

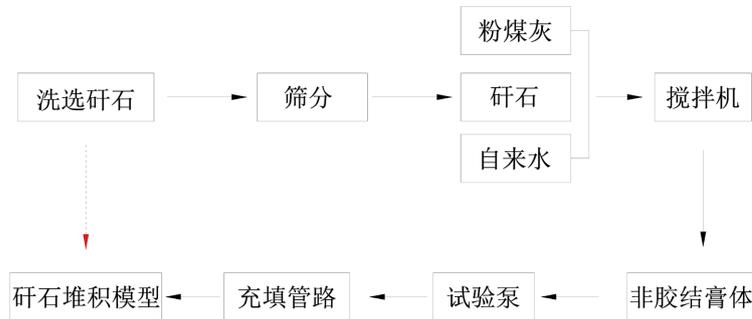


Figure 2. Schematic diagram of test process flow  
图 2. 工艺流程示意图

(1) 依据地面矸石堆积模型构建规范, 在水平地面搭建采空区矸石堆积模型。模型构建过程中, 需提前完成充填管路的预埋、管道连接、管道与充填泵的对接、用电线路连接等工作, 并同步完成充填原材料的制备。

(2) 采用筛分设备对煤矸石进行分级处理, 分别筛分出粒度  $\leq 2.5\text{ mm}$  和  $\leq 5.0\text{ mm}$  的矸石粉末。筛分后的矸石分袋密封储存备用, 每种粒径的矸石预先筛分 1000 kg。

(3) 试验操作流程如下: 泵送作业启动前, 先以清水对管道进行润洗; 按照预设试验配比配制非胶结膏体, 上料前通过电子秤精确称重, 上料后搅拌约 5 min 再启动泵送; 依次开展两组试验以模拟采空区充填过程。

(4) 泵送停止条件及后续操作: 当观察到堆积矸石周边出现浆液溢出时, 关闭充填泵终止泵送; 待充填浆液充分扩散后进行复注作业, 同步记录充填量及充填压力的动态变化; 泵送作业完成后, 抽出管路并进行彻底清洗。

(5) 试验数据采集: 停止泵送后静置 24 h, 确保充填浆液充分流动扩散; 采用人工挖掘方式, 按预设不同断面依次剖开矸石堆, 剖开断面如图 3 所示。

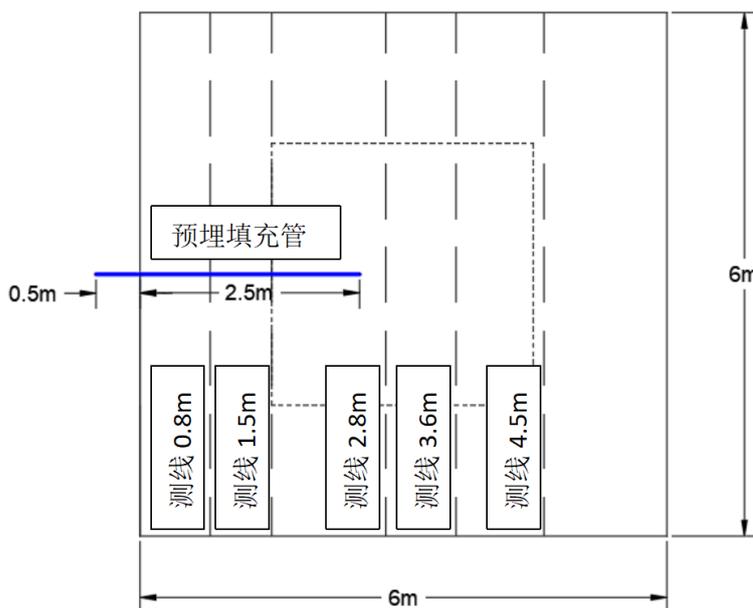


Figure 3. Position diagram of survey line  
图 3. 测线位置示意图

### 3. 实验结果与分析

试验过程中, 时刻观察记录充填泵压力变化以及堆积矸石内浆液流动扩散特征, 其充填泵在充填过程中压力基本稳定在 4~6 MPa。堆积矸石模拟充填结束后, 用人工挖掘的方式沿管路布置方向依次剖开矸石堆, 测量沿充填走向各个断面矸石料浆堆积高度、扩散范围并分析矸石浆液流动堆积特征, 经处理后得到矸石料浆扩散分布图, 矸石料浆分布特征如图 4 所示:

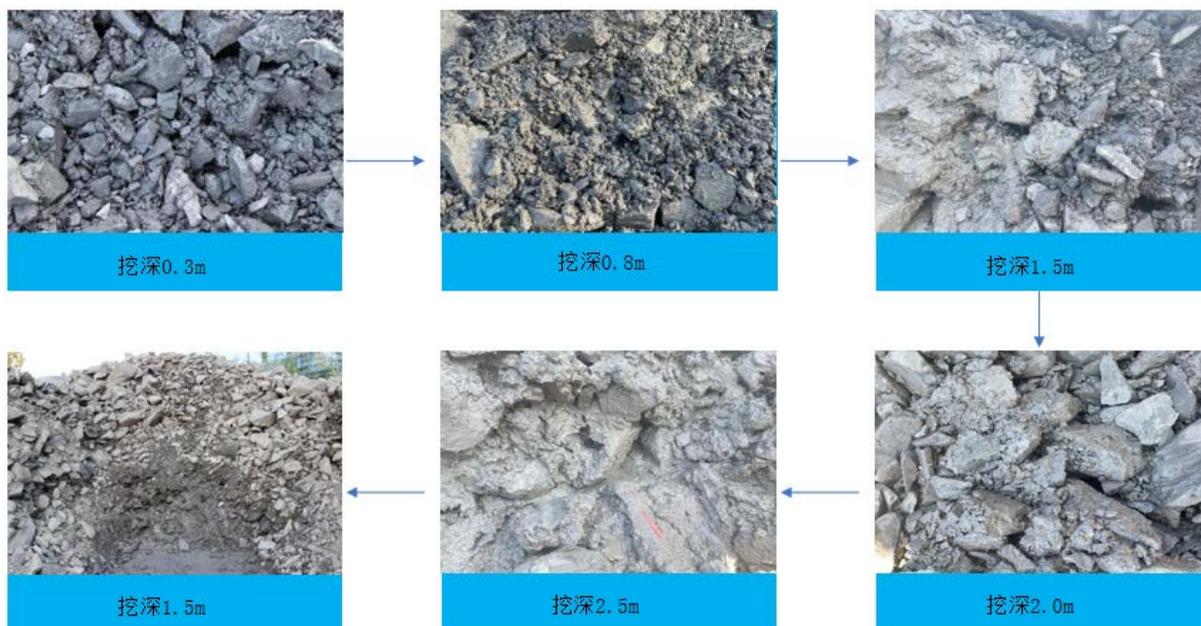


Figure 4. Diffusion distribution after cutting open gangue pile  
图 4. 剖开矸石堆浆液扩散分布

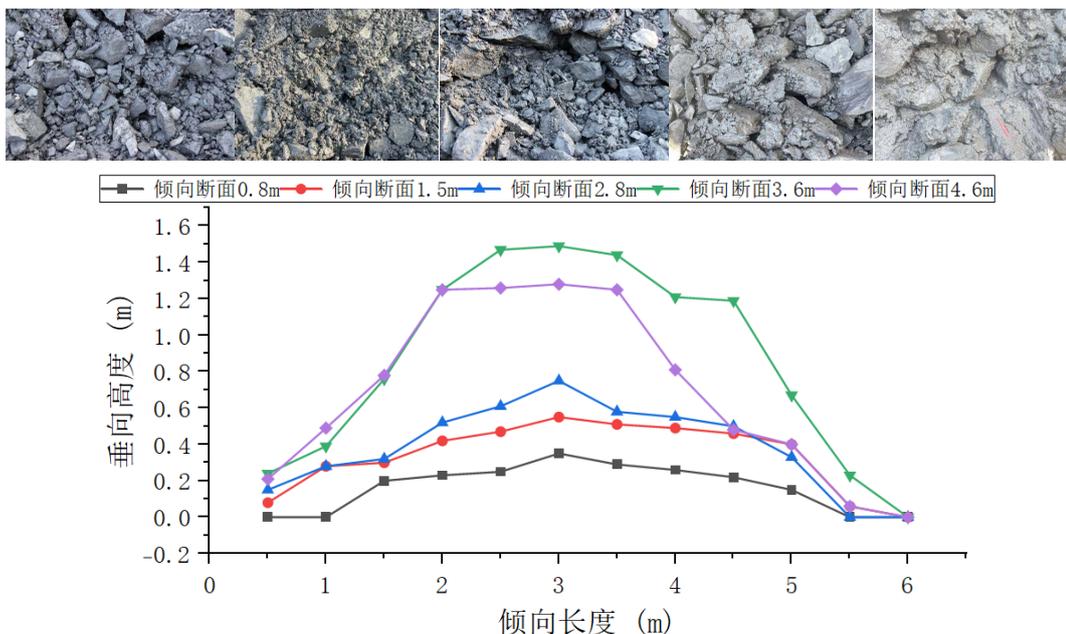


Figure 5. Model A slurry diffusion vertical height  
图 5. A 模型浆液扩散垂高

模型 A 组试验, 其原材料煤矸石粒径为 2.5 mm, 浆料质量浓度为 72%, 利用人工挖掘和大型机械设备配合的方式, 沿着测线依次剖开倾向断面, 数据处理之后得到非胶结膏体在堆积矸石内扩散分布图, 如图 5 和图 6 所示。

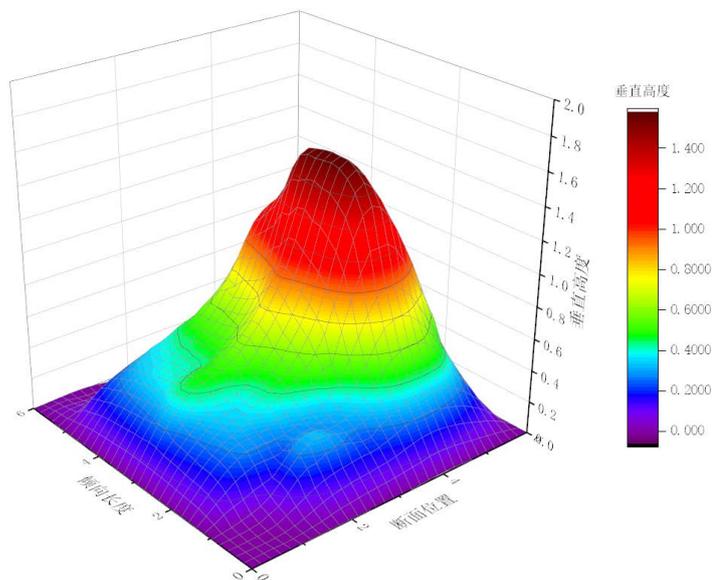


Figure 6. 3D diffusion cloud map of Model A  
图 6. A 模型三维扩散云图

模型 B 组试验, 其原材料煤矸石粒径为 5.0 mm, 浆料质量浓度为 75%, 利用人工和大型机械设备沿着测线依次剖开倾向断面, 经过处理得到非胶结膏体扩散分布图, 如图 7 和图 8 所示:

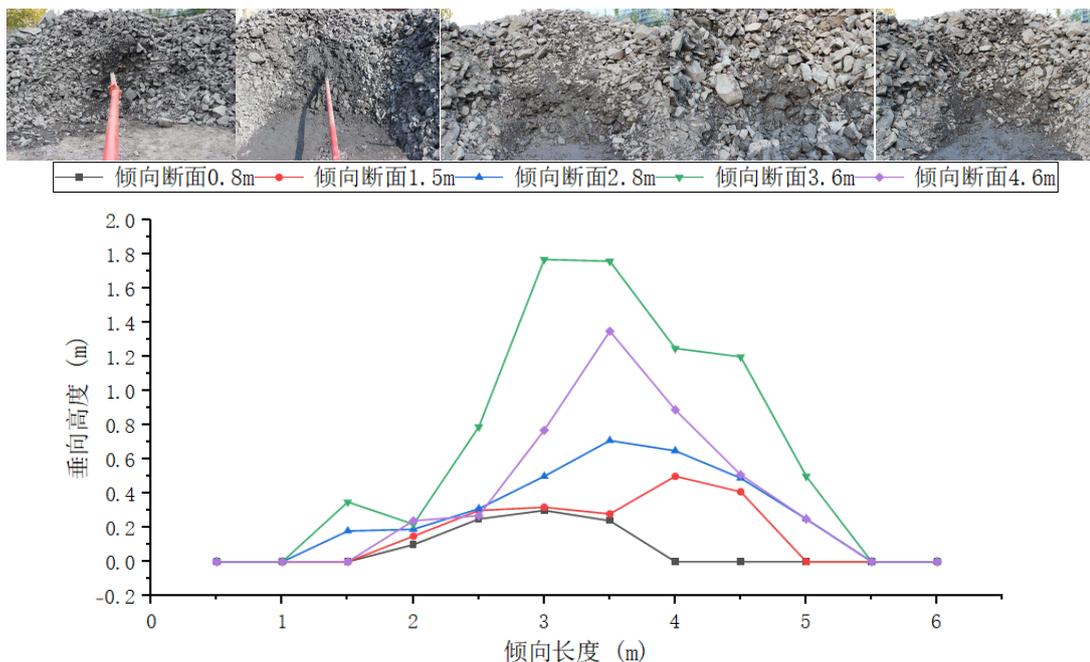


Figure 7. 3D diffusion cloud map of Model B  
图 7. B 模型三维扩散云图

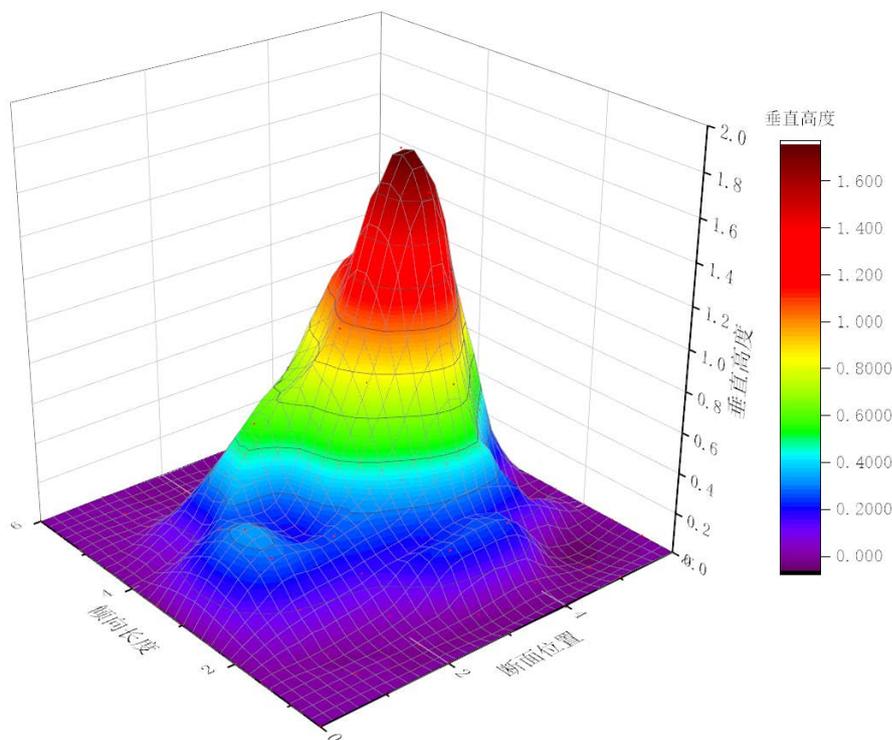


Figure 8. 3D diffusion cloud map of Model B  
图 8. B 模型三维扩散云图

本次试验以煤矸石、粉煤灰和水为原料配制非胶结膏体, 通过设置两组不同煤矸石粒径的对比方案 (A 组最大粒径  $\leq 2.5$  mm, B 组最大粒径  $\leq 5.0$  mm), 系统探究了浆液在模拟采空区破碎堆积岩块中的流动与扩散规律, 试验结果呈现出显著的特征差异与内在规律。从泵送参数与输出特征来看, A 组试验输出矸石料浆  $1.2 \text{ m}^3$ , 泵送压力稳定维持在  $4 \text{ MPa}$ , 全程未出现堵管或喷浆等异常现象; B 组试验输出料浆  $0.8 \text{ m}^3$ , 泵送压力升至  $5 \text{ MPa}$ , 且当泵送量达到  $0.8 \text{ m}^3$  时, 在堆积矸石顶部沿管路布置方向前方  $0.5 \text{ m}$  处观测到高度为  $20\sim 30 \text{ cm}$  的喷浆现象, 随后停止泵送。这一差异初步反映出不同粒径煤矸石对浆液输送过程的影响, 较大粒径的煤矸石可能增加了浆液流动阻力, 导致压力升高及局部喷浆。

在浆液扩散的共性规律方面, 两组试验中, 充填浆液均通过位于堆积矸石底部的充填管路进入, 在管口处迅速堆积并形成半圆形覆盖区, 进而向周边扩散。随着充填量的增加, 矸石料浆的扩散范围持续扩大, 覆盖区域逐步延展, 但浆液的扩散速率逐渐减缓, 直至矸石堆底部出现漏浆, 这一过程体现了浆液在有限空间内扩散受边界条件与自身流动性共同作用的特点。

从具体扩散效果来看, A 组试验料浆扩散范围较广, 从管口向四周呈均匀流动扩散状态, 且料浆在空隙内呈现选择性扩散特征, 能够均匀分布于堆积矸石的空腔中; B 组试验料浆则集中在管口区域, 延伸发育效果较差, 扩散方向单一, 尽管高压作用可促使裂隙尖端发生劈裂扩展, 并与孤立裂隙连通实现局部填充, 但整体扩散效果欠佳。结合两组模型的浆液扩散模拟云图可见, A 模型云图呈“矮胖”形态, 高度范围为  $0\sim 1.585 \text{ m}$ , 顶部平缓, 体现出浆液垂直高度增长均匀、水平扩散趋势广的特点; B 模型云图呈“瘦高”形态, 高度范围为  $0\sim 1.755 \text{ m}$ , 顶部尖锐, 反映出浆液垂直高度增长突出、水平扩散范围窄的特征, 进一步印证了两组试验在扩散形态上的差异。综合分析可知, 试验结果明确表明: 充填材料中煤矸石的粒径大小对浆液流动扩散具有显著影响, 粒径越大, 流动扩散范围越小, 且粗矸石颗粒易在管口附近形成堵塞, 导致充填压力升高。

## 4. 矽石料浆采空区扩散机理

### 4.1. 料浆采空区内扩散特征

(1) 通过分析两次非胶结膏体在堆积矽石空隙内的流动规律, 将料浆的流动特征大致分为 4 个阶段。第一阶段: 充填初期, 料浆的充填管路管口流出, 形成半球形覆盖区, 迅速将管口四周空腔饱和。第二阶段: 采空区充填料浆受到充填管路内浆液推力的作用, 沿着堆积矽石形成的横向扩散通道渗透, 并且此阶段由于受到垂向重力的作用和堆积矽石的阻力, 其横向扩散具有一定的坡度, 随着充填量的增加, 浆液的覆盖区域逐渐增大。第三阶段: 充填量进一步增加, 充填浆液横向覆盖区范围逐渐稳定, 浆液主要向堆积矽石底部竖向扩散, 竖向扩散直至接触底部边界。第四阶段: 充填浆液接触底部之后, 开始沿堆积矽石底部横向扩散, 当堆积矽石边界漏浆时, 结束充填。

(2) 充填过程中浆液扩散形成的液面坡度呈现明显的阶段性特征。在充填初始阶段, 由于充填料浆在管口处聚集且覆盖范围有限, 矽石料浆尚未充分扩散, 导致管口周边区域形成最大液面坡度。该坡度特征反映了显著的压力梯度, 从而促使料浆以较快速度扩散。进入第二阶段后, 充填浆液主要表现为横向扩散行为, 随着浆液覆盖区域的持续扩展, 液面坡度逐渐减小并最终趋于稳定值。值得注意的是, 堆积矽石的非均匀分布特性导致其空隙结构在形态和尺寸上存在显著差异, 这种结构性对浆料扩散产生明显的阻碍作用, 致使充填料浆呈现树枝状分叉式的选择性流动特征, 如图 9 所示。

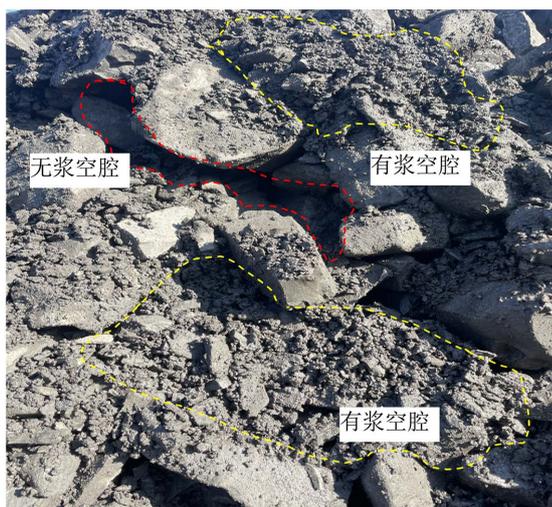


Figure 9. The gangue slurry flows selectively in the form of branches and branches

图 9. 矽石浆液呈树枝分叉状选择性流动

(3) 矽石颗粒在裂隙入口处易形成“拱桥结构”。矽石膏体在采空区冒落矽石形成的裂隙网络中流动渗透时, 较大粒径的矽石颗粒容易在空隙入口处发生堆积, 导致有效流通通道缩小, 进而阻碍原本可通过的细颗粒矽石的流动。这种颗粒堆积现象会显著降低浆液的扩散能力, 本研究将此类因矽石颗粒粒径过大而导致的流动阻碍现象定义为“拱桥效应”。如图 10 所示, 基于两次试验的矽石颗粒分布特征分析, 研究发现: 当充填材料中的最大粒径不超过裂隙入口尺寸的  $1/3$  时, 料浆可顺利通过堆积矽石间的裂隙; 反之, 若颗粒粒径过大, 则会在裂隙入口处形成稳定的“拱桥结构”, 导致浆液无法充分充填采空区空腔。这一结论为优化充填材料粒径配比、提高充填效果提供了理论依据。

颗粒介质力学认为, 颗粒群在受限空间(如采空区裂隙)中流动时, 颗粒最大粒径与孔隙入口尺寸的比值是决定是否形成“拱桥结构”的关键条件。当颗粒最大粒径超过孔隙入口尺寸的  $1/3$  时, 颗粒间易通过

摩擦作用和咬合作用形成自支撑的稳定堆积结构, 即“拱桥效应”——此时颗粒重力与孔隙壁面的约束力达到平衡, 孔隙的有效流通截面被大幅压缩, 甚至完全堵塞。本研究的试验结果直接印证了这一理论: B组煤矸石粒径( $\leq 5.0$  mm)与模拟采空区裂隙入口尺寸的比值超过  $1/3$ , 导致粗颗粒在管口处堆积形成“拱桥结构”, 表现为浆液扩散受限(仅输出  $0.8$   $\text{m}^3$ )、泵送压力升高(达  $5$  MPa)及局部喷浆现象; 而 A组煤矸石粒径( $\leq 2.5$  mm)未超过裂隙入口尺寸的  $1/3$ , 未形成明显“拱桥”, 因此浆液扩散更充分(输出  $1.2$   $\text{m}^3$ ), 压力稳定在  $4$  MPa 且无异常现象。这一差异清晰揭示了颗粒介质力学中“颗粒-孔隙尺寸临界比值”对“拱桥效应”形成的调控机制。

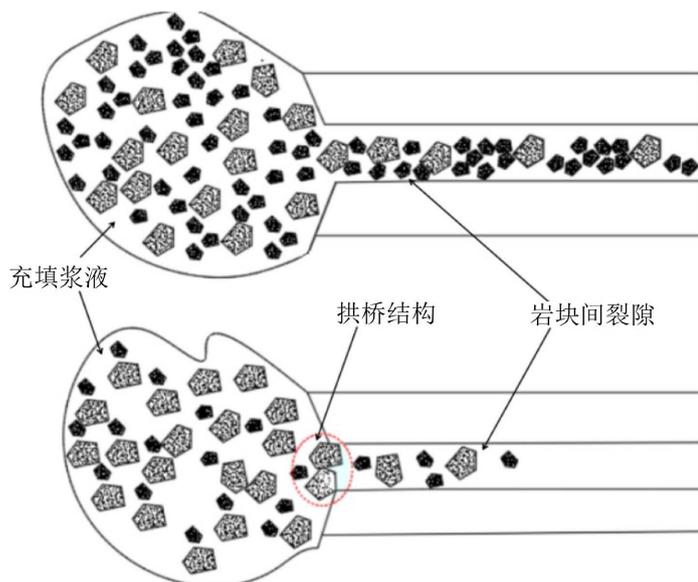


Figure 10. Crack mouth “arch bridge structure”  
图 10. 裂隙口“拱桥结构”

#### 4.2. 充填料浆沉积分选规律

在架后拖管充填采空区的场景中, 矸石料浆的运动及颗粒分布受多场力耦合作用显著。管道内浆液推力、竖向重力, 与不规则堆积矸石形成的阻力相互交织, 驱动料浆内矸石颗粒经历流动-沉积过程, 使采空区不同空间位置呈现出明显的颗粒分选特征, 具体规律如下:

(1) 沿水平方向, 随与充填管路管口距离增大, 充填料浆中粗颗粒矸石占比呈递减趋势, 细颗粒占比则逐步递增。这一分选性在煤矸石颗粒粒径  $\leq 5.0$  mm 时表现尤为显著——大粒径粗颗粒因重力沉降与空隙堵塞效应, 易滞留于近管口区域; 细颗粒受流场扰动影响更小, 可随料浆长距离运移。本质上, 粗颗粒在空隙口的堆积行为(“拱桥效应”雏形)及更快的沉积速率, 共同塑造了水平方向“近口粗、远口细”的分布格局。

(2) 竖直方向上, 随充填量增加, 料浆逐步向堆积矸石底部扩散, 粗、细颗粒分布规律与水平方向趋同(底部细颗粒占比更高)。但需关注泌水作用的叠加影响: 充填料浆泌出的水分, 一部分被矸石吸附, 大量的水受重力驱动向底部渗透, 导致底部料浆质量分数低于上部。这一“重力-泌水”耦合效应, 使竖直方向不仅存在颗粒分选, 还伴随浓度梯度变化, 深刻影响充填体的力学与渗透特性。

### 5. 总结

非胶结膏体采空区充填试验及煤矸石粒径影响规律分析, 在非胶结膏体采空区充填研究中, 通过构

建物理模型开展充填试验, 深入探究煤矸石颗粒最大粒径对浆料流动特征的作用机制。

(1) 多因素耦合的浆液扩散机制浆液在破碎矸石空隙的扩散范围与流动形态, 由充填压力、矸石空隙结构、浆液流动性能及注浆充填工艺共同决定。受重力作用, 浆液扩散呈现显著三维效应; 减小矸石粒径、提高浆液浓度, 可有效弱化重力对扩散的影响。注浆压力对扩散范围的促进作用存在边际效应——压力增大初期扩散范围提升明显, 随压力持续升高, 促进效果逐步衰减, 最终浆液扩散趋于稳定状态。

(2) 粒径差异主导的扩散形态分异不同粒径矸石料浆表现出截然不同的扩散特征: 细颗粒体系下, 料浆从管口向四周均匀流动, 可广泛填充堆积矸石空腔, 扩散形态规整、范围大; 粗颗粒体系中, 料浆集中于管口区域, 延伸发育受限, 扩散方向单一。虽高压可驱动裂隙尖端劈裂、连通孤立裂隙实现局部填充, 但整体扩散效果差, 易引发顶部喷浆等异常现象。

(3) “拱桥效应”与颗粒堆积堵塞机理 粗颗粒矸石易在裂隙口形成“拱桥结构”——矸石料浆在采空区冒落矸石裂隙间流动时, 大粒径颗粒先于空隙口堆积, 缩窄流通断面; 原本可通过的细颗粒因通道受阻, 逐渐在裂隙口堆积, 最终形成“拱塞体”。这一“拱桥效应”显著削弱浆液扩散能力, 导致充填压力陡增, 埋下堵管、炸管等安全隐患, 揭示了粗颗粒体系充填风险的内在机制。

(4) 颗粒分选性与空间分布规律采空区管道充填时, 料浆受推力、重力及矸石阻碍等多因素作用, 矸石颗粒经流动-沉积过程产生空间分选: 随与充填管路管口距离增加, 充填料浆中粗颗粒占比递减, 细颗粒占比递增。这一分选性反映了颗粒迁移-沉积的动力学规律, 为采空区充填体分层特征分析提供依据。综上, 煤矸石粒径通过“扩散形态-堵塞机理-颗粒分选”三个维度, 深刻影响非胶结膏体采空区充填效果。细颗粒体系更适配均匀扩散与高效充填, 粗颗粒体系易引发压力异常与安全隐患, 为实际工程中优化矸石级配、调控充填参数提供了理论支撑。

## 参考文献

- [1] 武强, 涂坤, 曾一凡. “双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J]. 科学通报, 2023, 68(15): 1884-1898.
- [2] 罗文, 王庆雄. 神东高强度开采煤矸石规模化利用模式研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(4): 1-7.
- [3] 张吉雄, 周楠, 高峰, 等. 煤矿开采嗣后空间矸石注浆充填方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 150-162.
- [4] 古文哲, 朱磊, 刘治成, 等. 煤矿固体废弃物流态化浆体充填技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 83-91.
- [5] 朱磊, 古文哲, 宋天奇, 等. 采空区煤矸石浆体充填技术研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 143-154.
- [6] 朱磊, 宋天奇, 古文哲, 等. 矸石浆体输送阻力特性及采空区流动规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 39-48.