

# 采矿与岩层控制工程学报

JOURNAL OF MINING AND STRATA CONTROL ENGINEERING



## 矽石粒径与料浆质量分数交互作用对充填材料性能的影响

王树帅 李刚 李永亮 杨庆贺

## Influence of interaction between gangue particle size and mass concentration on properties of backfilling materials

WANG Shushuai, LI Gang, LI Yongliang, YANG Qinghe

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1402>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### “膏体-矽石”复合承载结构的力学特性试验研究

Experimental study on mechanical properties of “paste-gangue” composite bearing structure

采矿与岩层控制工程学报. 2023, 5(5): 053513–053513 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20230710.001>

#### 基于正交试验的合成纤维及橡胶颗粒对湿喷混凝土力学性能的影响

Effects of synthetic fibers and rubber particles on the mechanical properties of wet shotcrete based on orthogonal test

采矿与岩层控制工程学报. 2023, 5(3): 033013–033013 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20230424.002>

#### 不同养护温度下水泥基尾砂胶结充填体的力学特性及能量演化规律

Mechanical properties and energy evolution of cemented tailings backfill at different curing temperatures

采矿与岩层控制工程学报. 2023, 5(2): 023013–023013 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20221012.001>

#### 固体充填开采中的矽石粒径级配优化试验

Experimental on optimization of gangue particle size gradation in solid filling mining

采矿与岩层控制工程学报. 2022, 4(1): 013516–013516 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20210610.006>

#### 矽石固体充填散体材料注浆扩散试验研究

Experimental study on grouting diffusion of gangue solid filling bulk materials

采矿与岩层控制工程学报. 2021, 3(2): 023011–023011 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20201111.001>

#### 基于正交试验的充填体力学及微观特性研究

Mechanical performances and microscopic properties of cemented backfilling based on orthogonal experiment

采矿与岩层控制工程学报. 2022, 4(6): 063520–063520 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20220727.001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王树帅, 李刚, 李永亮, 等. 矽石粒径与料浆质量分数交互作用对充填材料性能的影响[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(4): 048031.

WANG Shushuai, LI Gang, LI Yongliang, et al. Influence of interaction between gangue particle size and mass concentration on properties of backfilling materials[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(4): 048031.

## 矽石粒径与料浆质量分数交互作用对 充填材料性能的影响

王树帅<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>, 李永亮<sup>2</sup>, 杨庆贺<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000; 2. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083)

**摘要:** 矽石粒径与料浆质量分数对胶结充填材料性能具有重要影响, 以细矽质量分数 (0~5 mm 矽石占全部矽石的百分比) 表征矽石粒径级配, 分析了细矽质量分数、料浆质量分数及两者交互作用对充填材料流动性、流变性能、力学特性、超声波波速及微观结构的影响。研究表明: 随着细矽和料浆的质量分数增加, 料浆扩展度与泌水率减小, 流变参数、单轴抗压强度、弹性模量、劈裂抗拉强度以及超声波波速均增加, 总孔隙率减小, 充填体内部更加致密。料浆属于宾汉姆流体, 随着细矽质量分数增加, 料浆剪切应力曲线波动性减小, 均质性变佳。两种因素交互作用对流变参数以及力学特性产生影响, 一因素的增加会促进另一因素的增强效果, 料浆质量分数的影响程度大于细矽质量分数。各性能对两者交互作用的响应曲面可拟合为 Parabola 型函数曲面。劈裂抗拉强度主要分布在 0.11~0.12 倍单轴抗压强度之间, 两种强度具有显著的线性正相关关系。单轴抗压强度与超声波波速、微孔与毛细孔含量成正相关, 与总孔隙率、大孔与多害孔含量成负相关, 拟合度均大于 0.90, 声波波速与微观结构分布可较好的揭示两种因素对充填体强度的影响机理。

**关键词:** 矽石粒径; 料浆质量分数; 交互作用; 流变性能; 力学特性

中图分类号: TD823

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2025)04-8031-14

### Influence of interaction between gangue particle size and mass concentration on properties of backfilling materials

WANG Shushuai<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, LI Yongliang<sup>2</sup>, YANG Qinghe<sup>1</sup>

(1. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Gangue particle size and mass concentration have an important influence on the performance of backfilling materials. The size grading of gangue was characterized by the fine gangue content (the percentage of 0–5 mm gangue in the total gangue), and the influence of the fine gangue content, concentration and their interaction on the flow performance, rheological properties, mechanical properties, ultrasonic wave velocity and microstructure of backfill was analyzed. The results show that with the increase of fine gangue content and

收稿日期: 2024-11-12

修回日期: 2025-06-30

责任编辑: 许书阁

DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1402

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (52204122, 52174095)

作者简介: 王树帅 (1993—), 男, 内蒙古赤峰人, 副教授, 博士, 主要从事煤矿充填工艺与充填材料性能等方面的研究工作。E-mail: wsstree@163.com

concentration, the slurry flow, bleeding rate and the total porosity decreased, while the rheological parameters, uniaxial compressive strength, modulus of elasticity, splitting tensile strength and ultrasonic wave velocity increased, making the backfill more compact. The slurry belonged to Bingham fluid, and the fluctuation of slurry shear stress curve decreased and the homogeneity became better with the increase of fine gangue content. In the interaction of two factors on the rheological parameters and mechanical properties, the increase of one factor promoted the enhancement of the other factor, but the influence of concentration was greater than that of fine gangue content. The response surface of each property to the interaction term could be fitted as parabola function surface. The splitting tensile strength was mainly 0.11-0.12 times of uniaxial compressive strength, and a significant linear positive correlation lied between them. The uniaxial compressive strength was positively correlated with ultrasonic wave velocity and the content of micropores and capillary pores, but negatively correlated with total porosity and the content of large pores and multi-damaged pores, with the fitting degree greater than 0.9. The findings demonstrate that the performance of acoustic wave velocity and microstructure in describing the influential mechanism of these two factors on backfill strength.

**Key words:** gangue particle size; mass concentration; interaction effect; rheological properties; mechanical properties

煤矿大规模的垮落法开采,在高效率采出煤炭资源的同时,也引起了大量压煤损失、煤基固体废物排放量大、水土破坏及环境污染等问题<sup>[1-3]</sup>。充填开采可最大限度降低岩层扰动、高效利用煤基固废、实现资源与环境协调(绿色)开采<sup>[4-6]</sup>。煤矿胶结充填密实度高,对岩层移动的控制效果好,是目前广泛应用的充填开采工艺<sup>[7-9]</sup>。

充填材料性能分析是胶结充填开采研究的重要内容。胶结充填材料的水固比可用料浆质量分数表示,即材料中固体颗粒质量占材料总质量的百分比,是控制充填材料多种性能的重要因素,是充填作业过程严格管控的主要指标之一<sup>[10-11]</sup>。矽石是煤矿胶结充填应用最广泛的骨料,矽石的粒径级配材料性能具有重要影响<sup>[12-13]</sup>。充填材料的性能主要有坍塌度、泌水率、流变特性以及力学特性等<sup>[14-16]</sup>。

徐文彬等<sup>[17]</sup>开展了不同级配骨料下充填料浆流动性的试验,当煤矽石、粉煤灰、水泥质量比为5:3:1,料浆质量分数为80%~81%时,浆体可泵送性好;杨鹏飞<sup>[18]</sup>分析得出矽石破碎加工后,须确保小于5 mm的矽石颗粒比例控制在30%~50%,且最大粒度应小于15 mm;王树帅等<sup>[19]</sup>基于Talbol级配理论制备不同粒径级配的矽石胶结充填体,充填材料坍塌度、单轴抗压强度、弹性模量随Talbol指数 $n$ 先增大后减小,得到了最优的指数 $n=0.5$ ;夏雨等<sup>[20]</sup>

也进行了矽石级配试验研究,得到了相同的试验结果;杨宝贵等<sup>[21]</sup>试验得到水泥、粉煤灰、煤矽石、水在质量配比为1:2:5:2时充填材料具有较佳的流动性与强度;尹升华等<sup>[22]</sup>与付自国等<sup>[23]</sup>利用响应面法揭示了料浆质量分数、骨料配比和胶砂比对充填体强度的影响机制,结果表明强度不仅对单一因素的响应极敏感,对因素交互作用也有显著响应。

上述研究表明矽石粒径级配与料浆质量分数对充填体具有显著的影响,目前,关于矽石粒径级配与料浆质量分数交互作用对胶结充填材料各类性能的研究较少。笔者以矽石细矽质量分数(0~5 mm矽石占全部矽石的百分比)表征矽石粒径级配,分析细矽和料浆的质量分数对矽石胶结充填材料流动性、流变性、力学特性的影响,并结合超声波波速测试与孔隙结构测试,分析两者对充填体强度的影响机理。

## 1 试验内容及过程

### 1.1 试验内容与方案

矽石胶结充填材料以煤矽石为骨料、粉煤灰为辅料、水泥为胶凝材料,与矿井水混合成具有一定料浆质量分数的均匀料浆,输送至充填工作面。矽石经破碎后粒径主要集中在0~10 mm,进一步划分为0~5 mm(细矽)、5~10 mm(粗矽)。充填材料中固体原料水泥、粉煤灰及矽石的质量分数约为13%、

24% 及 63%, 保持固料的质量分数不变, 改变矽石的细矽质量分数。取细矽质量分数分别为 60%、80% 与 100% 三种级配, 每种级配矽石的胶结料浆划分 6 种料浆质量分数。矽石含有高岭土与伊利石等黏土性矿物, 细矽质量分数增加后, 矽石总表面积增加, 黏土性矿物表面积也增加, 对料浆中的自由水吸附能力增加, 因此不同细矽质量分数的料浆所能达到的最大料浆质量分数不同。制备的料浆中固料约 15 kg, 具体试验方案见表 1。充填材料性能测试包括料浆扩展度、泌水率、流变特性和充填体单轴抗压强度、弹性模量、劈裂抗拉强度、声波测试以及微观结构测试。

### 1.2 试验过程

首先将水泥、粉煤灰及矽石固体材料搅拌均匀, 再将水倒入, 最终搅拌为均匀的料浆。利用坍落度筒与泌水率筒进行料浆扩展度与泌水率测试; 利用 Rheolab QC 型流变仪进行料浆流变特性试验。将剩余料浆浇筑于 70 mm×70 mm×70 mm 模具, 待试块凝结硬化后进行脱模, 放入养护室进行养护, 养护至相应龄期(3、7 及 28 d) 后, 利用长春 YAD-2000 型电液伺服压力机对相应龄期试块进行单轴压缩试验, 压缩过程采用位移控制, 速度为 0.5 mm/min。对养护龄期为 28 d 的充填体试块进行取芯、切割、打磨等, 将其加工为  $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  标准圆柱体试块进行劈裂抗拉强度测试与超声波测试。采用 Zeiss Merlin Compact 扫描电镜和 Autopore 9600-

表 1 试验设计方案

Table 1 Experimental design scheme

组别	质量分数/%		细矽/kg	粗矽/kg	水/kg
	细矽	料浆			
A1	60	77	5.7	3.8	4.48
A2	60	78	5.7	3.8	4.23
A3	60	79	5.7	3.8	4.00
A4	60	80	5.7	3.8	3.75
A5	60	81	5.7	3.8	3.52
A6	60	82	5.7	3.8	3.30
B1	80	76	7.6	1.9	4.74
B2	80	77	7.6	1.9	4.48
B3	80	78	7.6	1.9	4.23
B4	80	79	7.6	1.9	4.00
B5	80	80	7.6	1.9	3.75
B6	80	81	7.6	1.9	3.52
C1	100	74	9.5	—	5.27
C2	100	75	9.5	—	5.00
C3	100	76	9.5	—	4.74
C4	100	77	9.5	—	4.48
C5	100	78	9.5	—	4.23
C6	100	79	9.5	—	4.00

9510 自动压汞仪对 28 d 的充填体试块样品进行微观扫描与孔隙结构测试。试验过程如图 1 所示。

## 2 料浆流动性与流变性能分析

### 2.1 料浆扩展度与泌水率

不同细矽和料浆的质量分数下充填料浆扩展度与泌水率如图 2 所示。

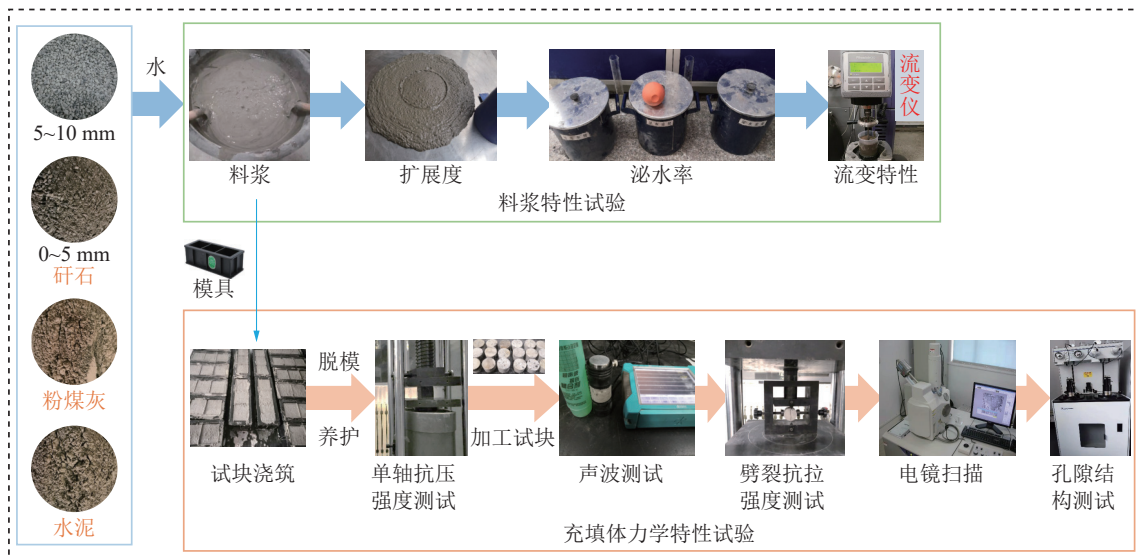


图 1 料浆流变特性试验过程

Fig. 1 Experimental process of rheological properties of slurry

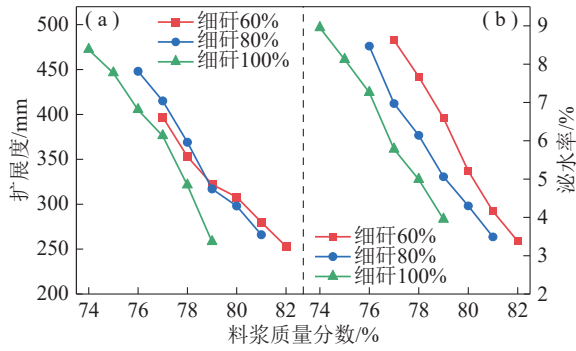


图2 细矸和料浆的质量分数对扩展度与泌水率的影响  
Fig. 2 Influence of mass fraction of fine gangue and slurry on slump flow and bleeding rate

由图2(a)可知,随着料浆质量分数的增加,3种不同细矸质量分数的料浆扩展度均减小。胶结料浆中的水一部分作为结合水与水泥发生水化反应,一部分作为自由水包裹在固体颗粒表面,使料浆具有流动性。在其他条件不变的情况下,随料浆质量分数的增加,自由水含量逐渐减少,由此弱化了自由水的包裹能力,固体颗粒表面的水膜厚度减小,料浆流动时颗粒之间的运动状态由水膜的润滑摩擦逐渐转变为颗粒之间的干摩擦,增加了颗粒间的摩擦因数,因此料浆扩展度减小<sup>[10,24]</sup>。

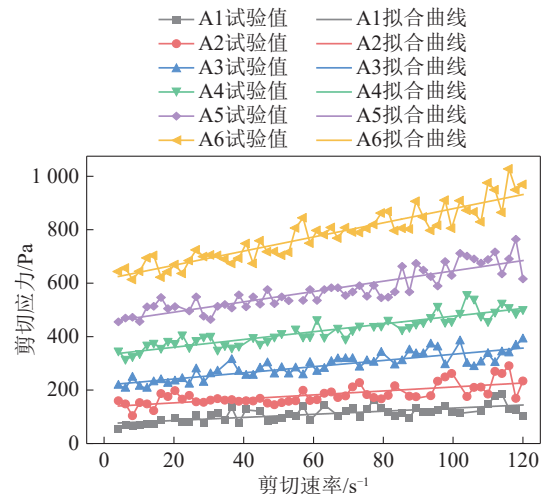
料浆扩展度不仅与料浆质量分数密切相关,同时也受颗粒级配的影响。在料浆质量分数(77%~79%)相同的条件下,随着细矸质量分数的增加,料浆扩展度总体呈先增加后减小的趋势。当细矸质量分数由60%增加到80%时,料浆内粗矸颗粒减少,粗矸颗粒之间的摩擦力减小,料浆扩展度有所增加;当细矸质量分数由80%增加到100%时,虽然粗颗粒之间的摩擦力更小,但由于细矸颗粒小,且细矸颗粒中高岭石、伊利石等黏土性矿物与水接触的表面积增加,因此增加了料浆的黏度系数,减小了料浆扩展度<sup>[19]</sup>。

由图2(b)可知,随着细矸和料浆的质量分数增加,料浆的泌水率均不断减小。泌水率是因混合材料在静止后,固体颗粒在重力的作用下向下运动,自由水一部分形成水膜包裹固体颗粒,一部分相对迁移至材料表面,表现为泌水。任一细矸质量分数的料浆,随着料浆质量分数增加,料浆自由水含量减小,料浆悬浮性与黏度增大,固体颗粒下降速度及下降程度都有所降低,因此泌水率减小。在料浆质量分数不变的情况下,细矸质量分数增加后,在矸石总量不变的情况下,细矸颗粒小,矸石总表面

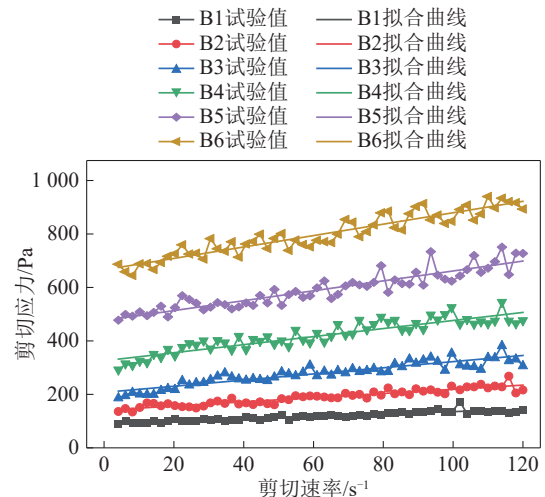
积增加,矸石中高岭石、伊利石等保水性矿物与水接触面积增加,因此用于包裹颗粒表面的自由水含量增加,相对的可迁移运动的自由水含量减小,表现为泌水率减小<sup>[10]</sup>。

## 2.2 胶结充填料浆流变性

不同细矸和料浆的质量分数下矸石胶结充填料浆流变剪切应力曲线如图3所示。由图3可知,随着料浆质量分数的增加,任一细矸质量分数的胶结料浆剪切应力均增加;随着细矸质量分数的增加,料浆剪切应力也增加,且应力曲线波动范围减小。当细矸质量分数为60%时,此时胶结料浆中粗矸颗粒较多,粗矸粒径尺寸较大而且分布不均匀,高速转动的转子与矸石碰撞导致剪切应力值波动较大<sup>[21]</sup>;随着细矸质量分数的增加,料浆中粗矸颗粒较少,转子与粗矸碰撞次数减少,料浆剪切应力值波动范围减小;当细矸质量分数为100%时,此时料浆中骨料全部为细矸,转子与细矸接触时引起的应力波动



(a) 细矸质量分数60%



(b) 细矸质量分数80%

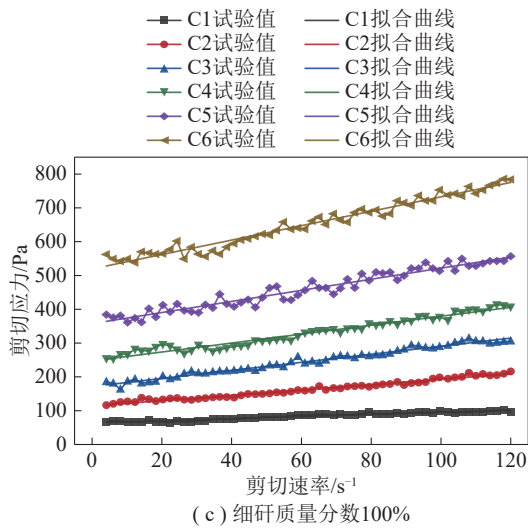


图3 细研和料浆的质量分数对胶结料浆剪切应力的影响

Fig. 3 Influence of mass fraction of fine gangue and slurry on shear stress of cemented slurry

较小, 料浆剪切应力曲线趋于光滑, 此时料浆的均质性更好。

不同细研和料浆的质量分数下料浆的颗粒分布状态如图4所示。料浆质量分数较低时, 料浆黏滞阻力不高, 矽石颗粒发生下沉, 堆积在料浆底部, 料浆整体性不好, 管道输送过程中容易离析、分层, 造成管路堵塞, 在井下充填时, 会因含水量较大, 骨料易流失。料浆质量分数居中时, 料浆的黏滞阻力适中, 矽石颗粒整体上呈均匀分布, 均质性与流动性都较好; 料浆质量分数较高时, 料浆粘稠、流动性

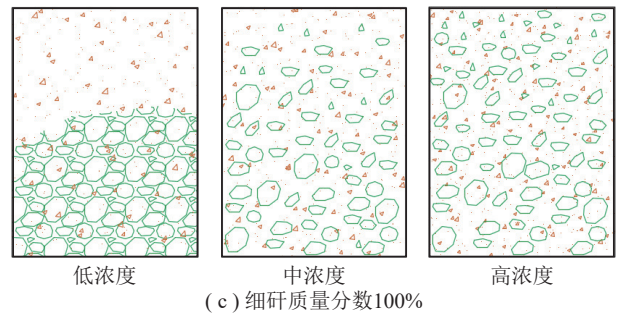
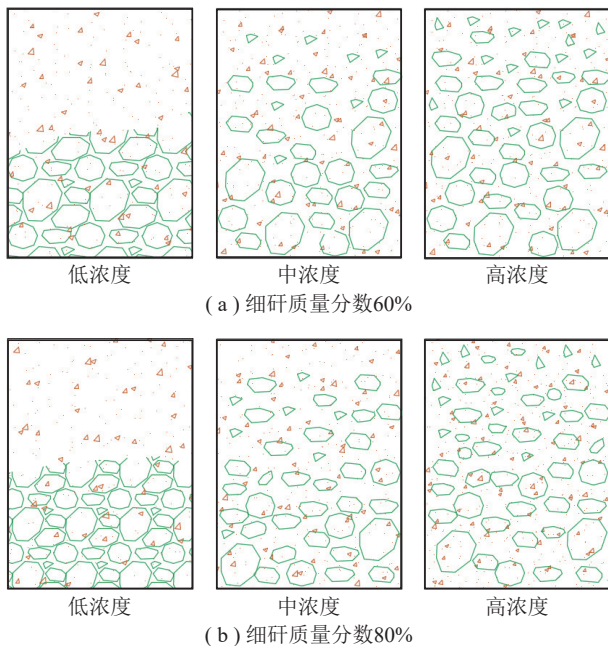


图4 不同细研和料浆的质量分数下料浆的颗粒分布状态

Fig. 4 Particle distribution in slurry with different mass fraction of fine gangue and slurry

较差, 矽石颗粒均匀散布, 不发生下沉, 但在管道输送中阻力大。

料浆质量分数较低时, 由于矽石颗粒下沉, 在流变试验中, 转子与矽石颗粒的碰触次数少, 剪切应力曲线波动较小, 且随着细研质量分数的增加, 料浆质量分数较低的料浆剪切应力更加光滑; 料浆质量分数居中或较高时, 由于矽石颗粒悬浮于料浆中, 在流变试验过程中, 转子与矽石颗粒碰触的次数增加, 剪切应力曲线波动性增加, 且随着细研质量分数的减小, 剪切应力曲线波动性更大。

图3中各料浆的剪切应力与剪切速率关系曲线为1条近似的直线, 且与原点不相交, 属于非牛顿料浆宾汉姆流体<sup>[21, 25]</sup>。采用宾汉姆本构方程对料浆剪切应力曲线进行拟合, 宾汉姆模型表达式见式(1), 不同细研和料浆的质量分数下料浆剪切应力模型表达式及流变参数见表2。

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

式中,  $\tau$  为剪切应力, Pa;  $\tau_0$  为屈服应力, Pa;  $\eta$  为黏度系数, Pa·s;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $s^{-1}$ 。

随着细研质量分数的增加, 剪切应力值波动性减小, 曲线的拟合度逐渐增加, 料浆流变参数(屈服应力、黏度系数)逐渐增加, 且随着料浆质量分数的增加也逐渐增加, 各料浆的流变参数随细研和料浆的质量分数变化的规律如图5所示。

随着细研质量分数的增加, 料浆中矽石颗粒总表面积增加, 矽石中黏性矿物质与水接触的面积增加, 同时水泥与粉煤灰等细颗粒吸附水中的各向异性离子, 形成双电层, 使料浆中自由水含量减少。双电层的粒子在表面电场的作用下相互吸引, 然后逐渐重叠形成絮凝体; 随着料浆质量分数的增加,

表 2 不同细矸和料浆的质量分数下料浆流变参数

Table 2 Rheological parameters of cement slurry under different mass fraction of fine gangue and slurry

组别	拟合方程	$\tau_0/\text{Pa}$	$\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	拟合度 $R^2$
A1	$\tau=74.47+0.58\gamma$	74.47	0.58	0.496
A2	$\tau=137.32+0.74\gamma$	137.32	0.74	0.478
A3	$\tau=218.14+1.16\gamma$	218.14	1.16	0.732
A4	$\tau=331.13+1.45\gamma$	331.13	1.45	0.816
A5	$\tau=452.78+1.93\gamma$	452.78	1.93	0.779
A6	$\tau=614.06+2.65\gamma$	614.06	2.65	0.842
B1	$\tau=91.42+0.44\gamma$	91.42	0.44	0.833
B2	$\tau=140.76+0.78\gamma$	140.76	0.78	0.859
B3	$\tau=207.48+1.15\gamma$	207.48	1.15	0.830
B4	$\tau=325.73+1.51\gamma$	325.73	1.51	0.822
B5	$\tau=476.48+1.85\gamma$	476.48	1.85	0.841
B6	$\tau=666.08+2.14\gamma$	666.08	2.14	0.875
C1	$\tau=63.97+0.32\gamma$	63.97	0.32	0.931
C2	$\tau=113.99+0.79\gamma$	113.99	0.79	0.973
C3	$\tau=171.50+1.19\gamma$	171.50	1.19	0.974
C4	$\tau=247.16+1.32\gamma$	247.16	1.32	0.959
C5	$\tau=357.53+1.64\gamma$	357.53	1.64	0.936
C6	$\tau=519.36+2.13\gamma$	519.36	2.13	0.961

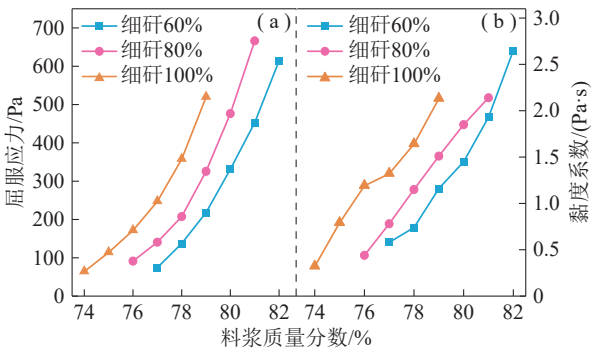


图 5 料浆流变参数随细矸和料浆的质量分数变化的规律

Fig. 5 Variation of slurry rheological parameters with fine gangue content and concentration

固相颗粒增加, 颗粒间距离减小, 絮凝体数量逐渐增加, 然后絮凝体相互连接形成“絮凝网状结构”, 抵抗外界剪切的能力<sup>[26]</sup>, 因此屈服应力与黏度系数增加。

### 3 充填体力学特性分析

对不同细矸和料浆的质量分数下的充填体进行力学特性测试, 分析两因素对充填体单轴抗压强度、应力-应变曲线、弹性模量及劈裂抗拉强度的影响。

#### 3.1 单轴抗压强度

不同细矸和料浆的质量分数下充填体单轴抗

压强度如图 6 所示。

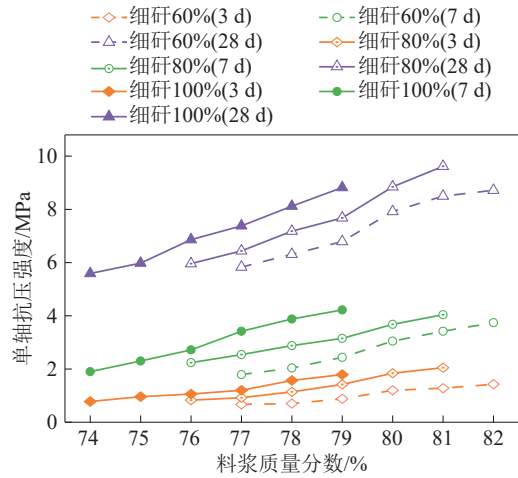


图 6 细矸和料浆的质量分数对充填体单轴抗压强度的影响

Fig. 6 Influence of mass fraction of fine gangue and slurry on uniaxial compressive strength of backfill

由图 6 可知: 随着细矸和料浆的质量分数及养护时间的增加, 充填体单轴抗压强度均呈增加趋势。细矸质量分数较小时 (60%), 粗矸含量大且粗矸颗粒之间的空隙较大, 在粉煤灰、水泥等含量一定的情况下, 细颗粒不能较好的填充粗矸之间的空隙; 且由于粗矸表面积大, 部分粗矸不能被水化产物完全包裹, 在水化产物与固体颗粒相互搭接形成“絮凝体”的过程中, 部分搭接体胶结程度弱, 使得“絮凝体”结构不稳固, 因此强度较小。当细矸质量分数增加后, 粗矸含量减少, 粗矸之间的空隙可以被细颗粒较好地填充; 细矸颗粒小, 可以被水化产物较好地胶结包裹, 形成的絮团结构胶结程度高, “絮凝体”结构更加稳固, 因此强度提高<sup>[20, 27]</sup>。

当料浆质量分数较小时, 料浆中固体含量相对减少, 水化产物和颗粒间隙增大, 气孔较多; 当料浆质量分数增加时, 水化产物和颗粒可以很好地结合成团簇, 孔隙明显减少, 充填体内部结构更加致密, 因此强度增加; 在料浆质量分数增长初期, 充填体强度增长较快, 当料浆质量分数较大时, 充填体强度增长变得缓慢。在养护初期, 水化产物较少, 水化产物与固体颗粒相对分散, 水化产物与颗粒未完全连接成絮体, 充填体内部孔隙较多; 随着养护时间的增加, 水化产物增多, 颗粒被水化产物包裹, 水化产物和颗粒相互包裹搭接成絮凝体, 充填体内部孔隙明显减少, 因此强度提高<sup>[14, 28]</sup>。

### 3.2 应力-应变曲线与弹性模量

以养护龄期为 28 d 的充填体为研究对象, 分析细矸和料浆的质量分数对充填体应力-应变与弹性模量的影响。充填体应力-应变全曲线如图 7 所示。不同细矸和料浆的质量分数的充填体应力-应变曲线形状大致相同, 大致可分为应力缓慢增长阶段、线弹性增长阶段、屈服阶段及残余强度阶段。

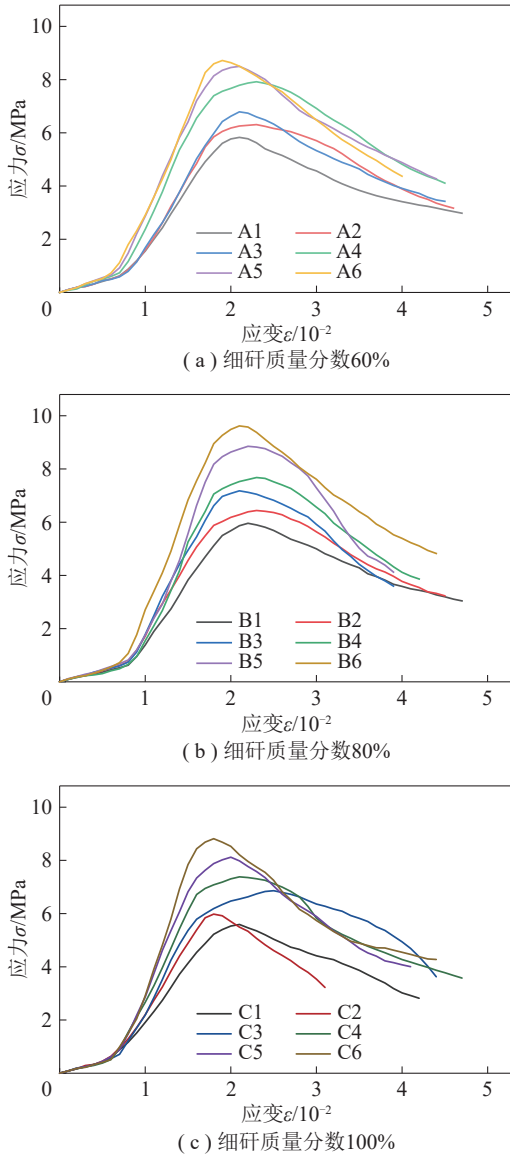


图 7 充填体试块单轴压缩下应力-应变曲线  
Fig. 7 Stress-strain curve of backfill block under uniaxial compression

不同细矸和料浆的质量分数下充填体弹性模量如图 8 所示。随着细矸和料浆的质量分数的增加, 充填体弹性模量均近似成线性增长。细矸和料浆的质量分数对充填体弹性模量均有显著影响, 且细矸和料浆的质量分数对弹性模量的影响程度会

因另一因素增加而增强。

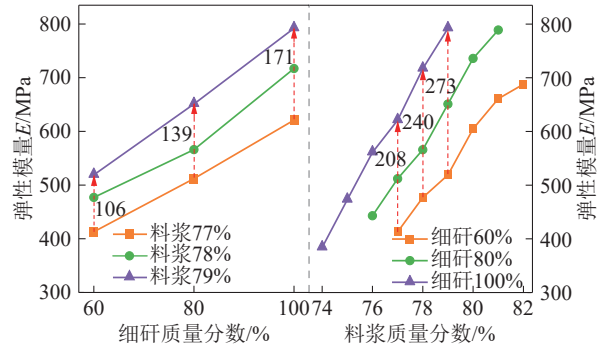
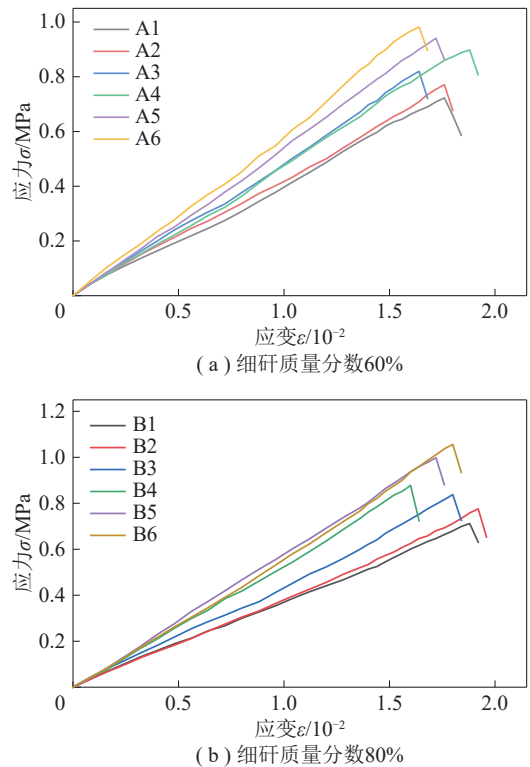


图 8 不同细矸和料浆的质量分数下充填体的弹性模量  
Fig. 8 Elastic modulus of backfill with different fine gangue content and concentration

### 3.3 劈裂抗拉强度

以 28 d 的充填体为研究对象, 不同细矸和料浆的质量分数下充填体试块劈裂抗拉应力-应变曲线如图 9 所示, 充填体在劈裂拉伸达到峰值荷载后, 也即试块破坏后, 载荷瞬间减小, 没有峰后变形阶段。随着料浆质量分数的增加, 充填体劈裂抗拉强度逐渐增加, 且应力-应变曲线斜率逐渐增加。

对充填体劈裂抗拉强度与单轴抗压强度进行拟合分析, 两者关系如图 10 所示。由图 10 可知, 充填体试块劈裂抗拉强度与单轴抗压强度具有很好的拟合性, 即随着细矸和料浆的质量分数增加,



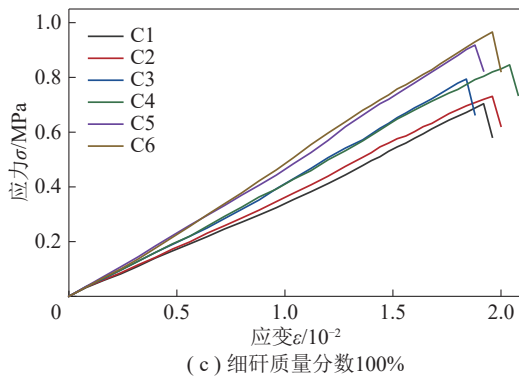


图9 充填体试块劈裂拉伸下应力-应变曲线  
Fig. 9 Stress-strain curve of backfill block under splitting tension

充填体试块的劈裂抗拉强度具有与单轴抗压强度相似的变化规律。充填体劈裂抗拉强度分布在0.11~0.13倍单轴抗压强度范围内,且主要分布在0.11~0.12倍单轴抗压强度区间。

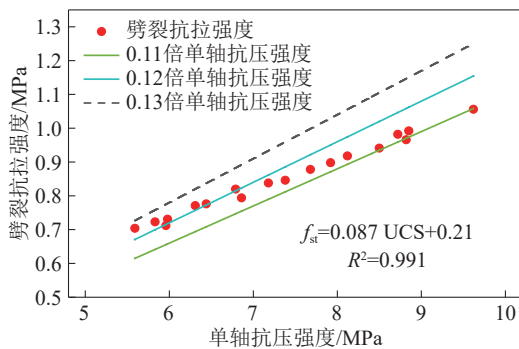


图10 劈裂抗拉强度与单轴抗压强度的关系  
Fig. 10 Relationship between splitting tensile strength and uniaxial compressive strength

### 3.4 性能评价

由上述料浆流动性、流变性以及充填体力学特性分析结果可知: 细研质量分数为60%时,料浆扩展度较大(流动性较好),但是料浆的泌水率大,剪切应力曲线波动性大,料浆和易性较差,且在相同料浆质量分数下,充填体强度不及细研质量分数80%与100%时的强度。当细研质量分数为100%时,料浆剪切应力曲线波动性小,泌水率较小,但是在相同料浆质量分数下,料浆扩展度小,且料浆屈服应力和黏度系数大;在相同料浆质量分数下,细研质量分数100%时充填体强度大,但是在所能达到最大料浆质量分数的范围内,充填体所能达到的最大强度(8.82 MPa)不及细研质量分数为80%时所达到的最大强度(9.62 MPa)。当细研质量分数为

80%时,在料浆质量分数为77%~79%时,料浆扩展度最大,且在整个料浆质量分数范围内,料浆扩展度均较大,与细研质量分数为60%时相差较小,但明显大于细研质量分数为100%时的料浆扩展度;在相同料浆质量分数下,细研质量分数80%时,料浆剪切应力曲线波动性较细研质量分数60%时减小,且屈服应力与黏度系数也比细研质量分数100%时减小,料浆流动性与和易性较好;且细研质量分数为80%时,充填体所能达到的最大强度为9.62 MPa,高于其他两种细研质量分数的充填体最大强度。

由料浆以及充填体性能分析得,细研质量分数最优值为80%,料浆质量分数最优值为78%~80%。

## 4 交互作用的影响规律分析

### 4.1 料浆泌水率与流变参数

当细研质量分数分别为60%、80%与100%,料浆质量分数从77%增加到79%时,胶结料浆泌水率分别减小了2.03%、1.91%及1.83%;当料浆质量分数分别为77%、78%与79%,细研质量分数从60%增加到100%时,胶结料浆泌水率分别减小了2.84%、2.68%及2.64%。细研和料浆的质量分数对泌水率的影响效果随另一因素的增加而减弱。细研和料浆的质量分数对泌水率的交互影响结果如图11所示。由图11可知,料浆泌水率随细研和料浆的质量分数增加均减小,响应曲面符合Parabola型函数( $Y=Y_0+aX_1+bX_2+cX_1^2+dX_2^2$ )曲面。泌水率曲面函数如图11所示,图中 $B_r$ 为泌水率;

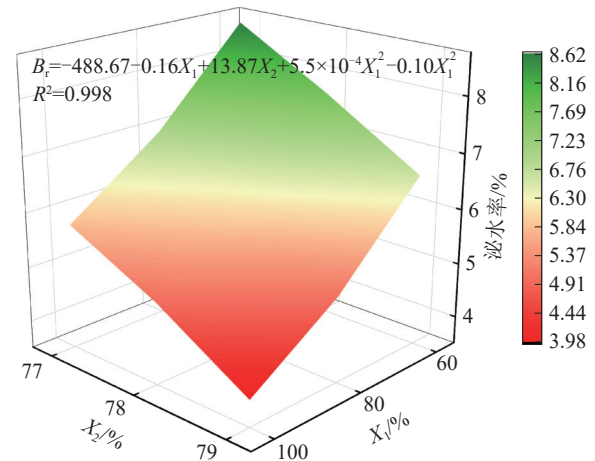


图11 细研和料浆的质量分数交互作用对泌水率的影响  
Fig. 11 Influence of interaction between mass fraction of fine gangue and slurry on bleeding rate

$X_1$  为细研质量分数;  $X_2$  为料浆质量分数;  $R^2$  为拟合度。

当细研质量分数分别为 60%、80% 与 100%, 料浆质量分数从 77% 增加到 79% 时, 胶结料浆屈服应力分别增加了 143.67、184.97 及 272.20 Pa, 黏度系数分别增加了 0.58、0.73 及 0.81 Pa·s; 当料浆质量分数分别为 77%、78% 与 79%, 细研质量分数从 60% 增加到 80% 时, 胶结料浆屈服应力分别增加了 172.69、220.21 及 301.22 Pa, 黏度系数分别增加了 0.74、0.90 及 0.97 Pa·s。细研和料浆的质量分数会相互促进两者对料浆屈服应力与黏度系数的增强作用。细研和料浆的质量分数对料浆流变参数都有明显的影响, 将细研和料浆的质量分数的交互作用对流变参数的影响进行分析, 结果如图 12

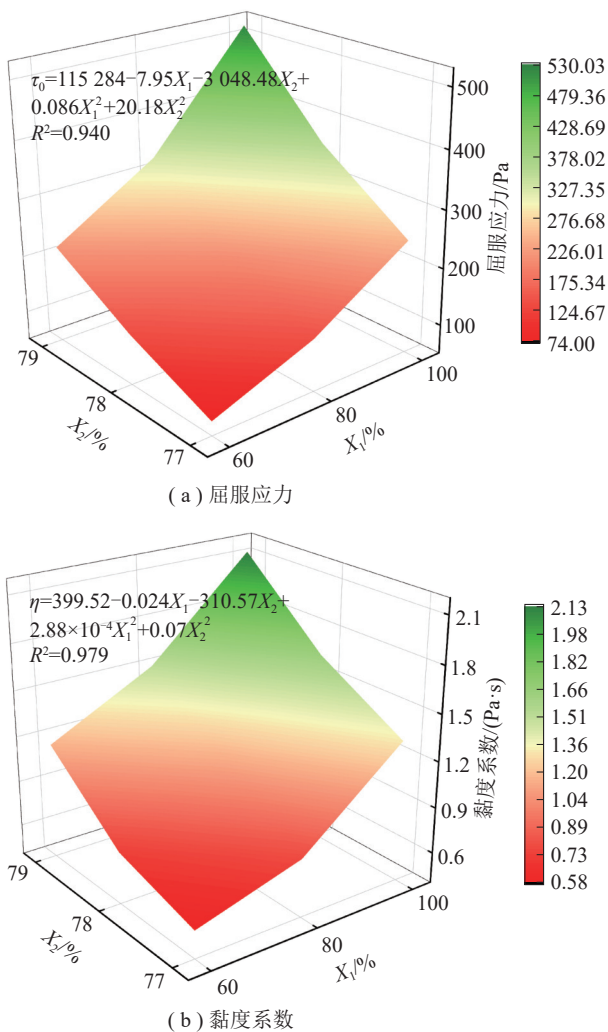


图 12 细研和料浆的质量分数交互作用对流变参数的影响

Fig. 12 Influence of interaction between fine gangue content and concentration on rheological parameters

所示。料浆流变参数随着细研和料浆的质量分数的增加而增大, 屈服应力和黏度系数响应曲面均可近似拟合为 Parabola 抛物线型曲面函数, 拟合方程分别如图 12 所示。

#### 4.2 充填体强度

细研质量分数分别为 60%、80% 与 100% 时, 以及料浆质量分数分别为 77%、78% 与 79% 时, 不同细研和料浆的质量分数对充填体强度的增强效果见表 3。

表 3 细研和料浆的质量分数对充填体强度的增强效果  
Table 3 Enhancement effect of fine gangue content and concentration on backfill strength

细研质量分数/%	料浆质量分数/%	充填体强度增长值/MPa		
		3 d	7 d	28 d
60	77~79	0.21	0.65	0.96
80	77~79	0.50	0.60	1.24
100	77~79	0.59	0.74	1.44
60~100	77	0.53	1.63	1.55
60~100	78	0.87	1.84	1.81
60~100	79	0.91	1.78	2.03

当料浆质量分数从 77% 增加到 79% 的过程中, 充填体强度的增长值随着细研质量分数的增加而增加; 同样的, 当细研质量分数从 60% 增加到 100% 的过程中, 充填体强度的增长值随着料浆质量分数的增加也逐渐增加。表 3 数据表明, 细研和料浆的质量分数对充填体强度的增加效果会随着另一因素的增加而显著, 也即细研和料浆的质量分数会相互促进彼此对充填体强度的增强效应。

将细研和料浆的质量分数对充填体不同龄期强度的交互影响进行分析, 结果如图 13 所示。由图 13 可知, 充填体强度随着细研和料浆的质量分数的增加而增大, 各龄期强度的响应曲面均可近似拟合为 Parabola 抛物线型曲面函数, 3、7 和 28 d 充填体强度的响应曲面拟合度分别为 0.922、0.994 和 0.982, 拟合效果良好。

### 5 声波与微观结构测试

#### 5.1 声波测试

以不同细研和料浆的质量分数下 28 d 养护龄期的充填体为研究对象, 对充填体进行超声波波速测试, 波速测试结果如图 14 所示。充填体波速随着细研和料浆的质量分数的增加而增大, 表明细研

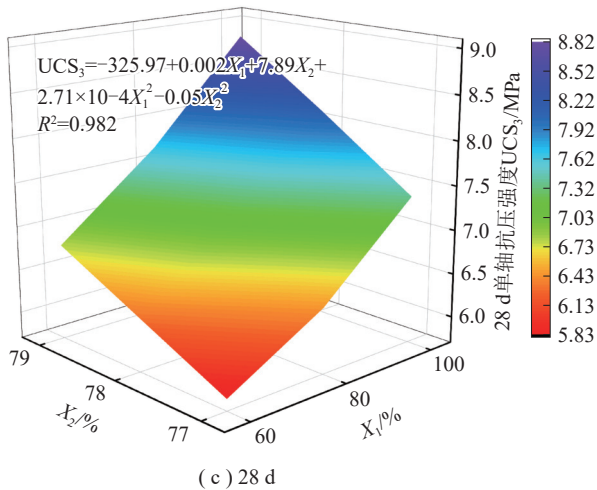
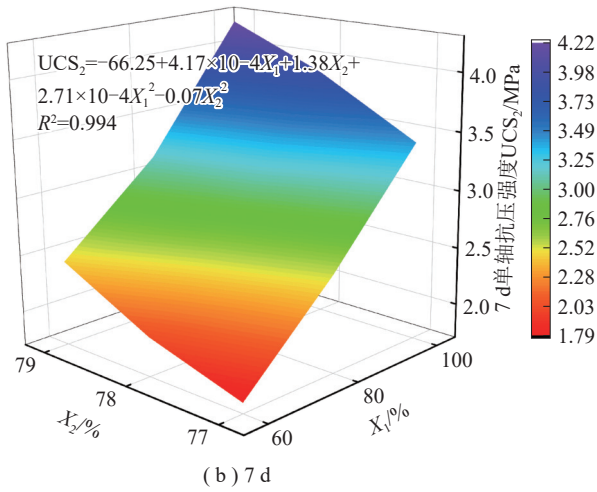
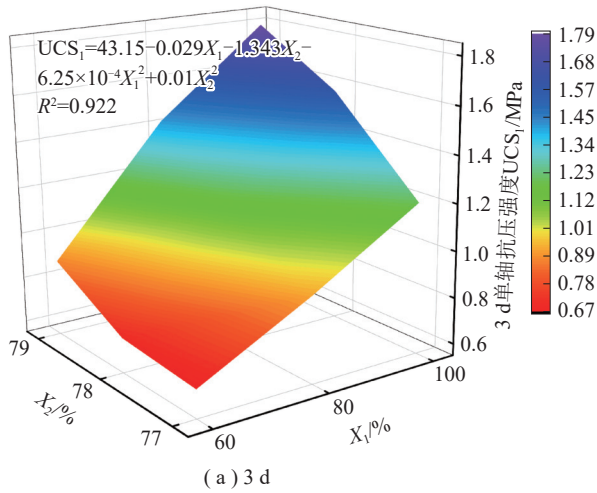


图 13 细矸和料浆的质量分数交互作用对充填体强度的影响

Fig. 13 Influence of interaction between fine gangue content and concentration on backfill strength

和料浆的质量分数增加后, 充填体内部结构更加致密, 孔隙减少。

充填体波速变化规律与单轴抗压强度相似, 采用一次函数、二次函数及指数函数分别对单轴抗压

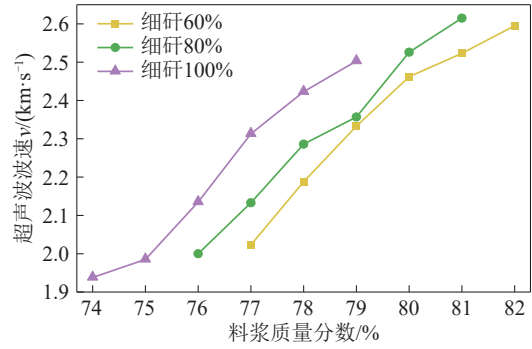


图 14 细矸和料浆的质量分数对充填体波速的影响  
Fig. 14 Effect of mass fraction of fine gangue and slurry on wave velocity of backfill

强度与超声波波速进行拟合, 拟合结果如图 15 所示。由图 15 可知, 一次函数、二次函数及指数函数拟合度分别达到了 0.926、0.940 及 0.941, 表明 3 种函数均可较好地表述单轴抗压强度与波速的关系, 两者具有较强的拟合性。其中二次函数与指数函数拟合曲线几近重合, 可将单轴抗压强度与波速简化为二次函数关系。单轴抗压强度与超声波波速拟合结果说明声波测试是评估充填体力学特性的一种有效无损检测手段。

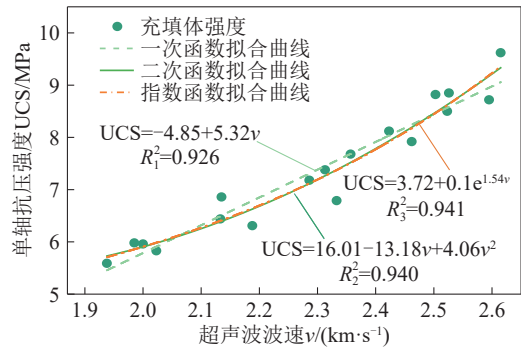


图 15 单轴抗压强度与超声波波速的关系

Fig. 15 Relationship between uniaxial compressive strength and ultrasonic wave velocity

## 5.2 微观结构扫描

对不同配比充填体块体进行了微观扫描, 结果如图 16 所示。

由图 16 可知, 充填体的水化产物主要包括絮凝状水化硅酸钙 (C—S—H), 片状氢氧化钙凝胶 (Ca(OH)<sub>2</sub>, C—H), 以及针状钙矾石 (AFt), 其中 C—S—H 为主要水化产物, AFt 的体积较小。

当细矸质量分数为 60% 时, 充填体块体中粗矸较多, 粗矸颗粒大, 部分粗矸未能被水化产物完全包裹, 如图 16(a) 所示; 当细矸质量分数为 100% 时,

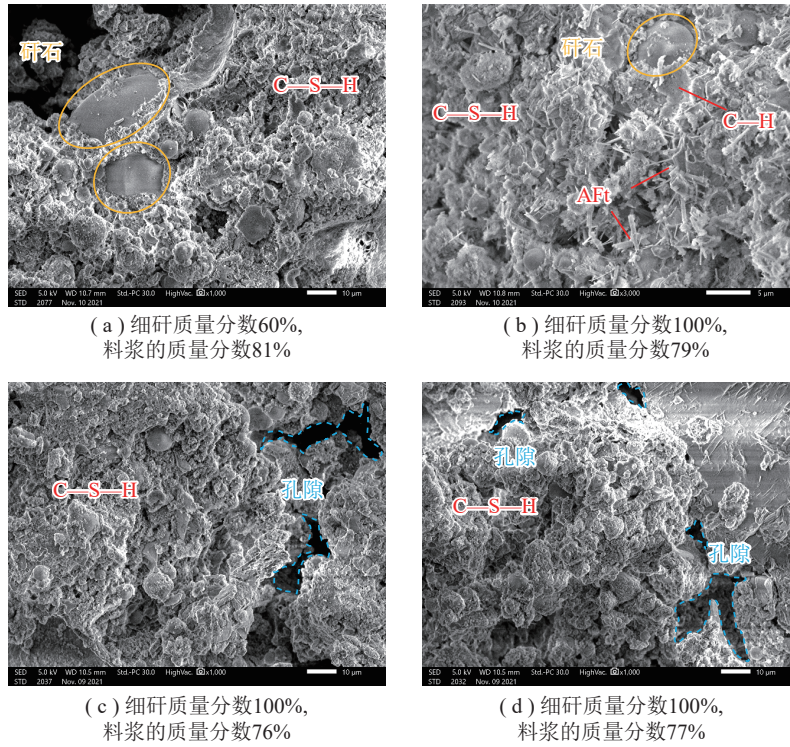


图 16 不同细矽和料浆的质量分数下充填体的微观结构

Fig. 16 Microstructure of backfill with different fine gangue content and concentration

由于细矽颗粒体积小, 水化产物能较充分地包裹细矽颗粒, 如图 16(b) 所示。

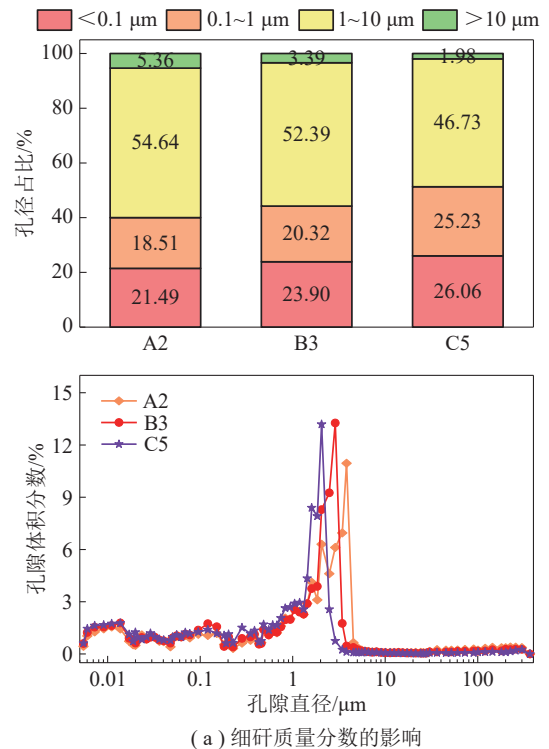
对比图 16(b)~16(d), 当料浆质量分数较大时, 充填体结构致密, 未见明显孔隙; 随着料浆质量分数降低, 充填体的微观结构有明显的孔隙, 充填体强度降低。

### 5.3 孔隙结构测试

以不同细矽和料浆的质量分数下 28 d 养护龄期的充填体为研究对象, 对部分充填体进行孔隙结构测试, 测试内容与样品为: ①料浆质量分数为 78% 时, 分析细矽质量分数对充填体孔隙结构的影响, 选取试块为 A2、B3 与 C5; ②细矽质量分数为 80% 时, 分析料浆质量分数对充填体孔隙结构的影响, 选取试块为 B1、B3 与 B5。测试结果如图 17 所示。

由图 17 测试结果可知, A2、B3、C5、B1、B5 试块的最可几孔径分别为 3.82、2.88、2.05、4.52 及 1.85  $\mu\text{m}$ , 表明随着细矽和料浆的质量分数的增加, 充填体试块的最可几孔径均减小, 孔径分布曲线均向左偏移。根据孔径大小, 将孔径划分为微孔 ( $p_1$ ,  $<0.1 \mu\text{m}$ )、毛细孔 ( $p_2$ ,  $0.1\sim 1 \mu\text{m}$ )、大孔 ( $p_3$ ,  $1\sim 10 \mu\text{m}$ ) 和多害孔 ( $p_4$ ,  $>10 \mu\text{m}$ )<sup>[29]</sup>。由图 17 各类孔

径分布结果得: 随着细矽和料浆的质量分数的增加, 充填体试块的微孔与毛细孔数量增多, 大孔与多害孔的数量减小, 充填体试块内部结构更加致密。对单轴抗压强度与孔隙结构 (总孔隙率  $p$  与不同孔径的孔隙) 分布情况进行拟合, 结果如图 18 所示。由



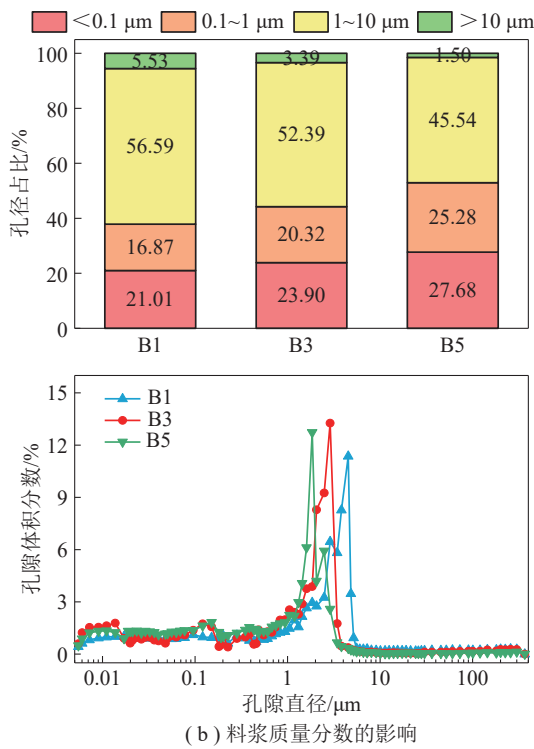


图 17 细研和料浆的质量分数对充填体孔隙结构的影响  
Fig. 17 Effect of mass fraction of fine gangue and on pore structure of backfill

图 18 可知, 单轴抗压强度与总孔隙率和 4 种不同孔径的孔隙含量拟合函数  $R^2$  均大于 0.9, 具有很好的拟合性。孔隙结构分布以及强度与孔隙含量拟合结果表明, 单轴抗压强度与孔隙结构具有很好的拟合效果, 孔隙结构可以很好的揭示细研和料浆的质量分数对充填体的增强机理。

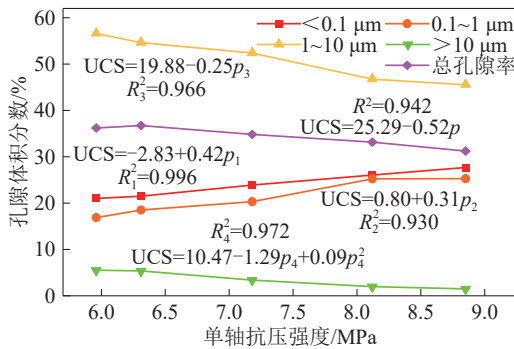


图 18 单轴抗压强度与孔隙结构的关系  
Fig. 18 Relationship between uniaxial compressive strength and pore structure

## 6 结论

(1) 随着细研和料浆的质量分数增加, 胶结料浆扩展度与泌水率减小, 流变参数增加。料浆属于宾

汉姆流体, 随着细研质量分数的增加, 料浆剪切应力曲线波动性减小, 均质性变佳。

(2) 随着细研和料浆的质量分数增加, 充填体单轴抗压强度、弹性模量、劈裂抗拉强度均增加, 劈裂抗拉强度主要分布在 0.11~0.12 倍单轴抗压强度之间, 两种强度具有显著的线性正相关关系。

(3) 两种因素交互作用在对流变参数及力学特性的影响中, 一因素的增加会对另一因素的增强效果起促进作用。

(4) 随着细研和料浆的质量分数增加, 充填体超声波波速增加, 孔径分布曲线向左偏移, 充填体内部更加致密。单轴抗压强度与超声波波速、微孔与毛细孔含量成正相关, 与总孔隙率、大孔与多害孔含量成负相关, 拟合度均大于 0.9。

## 参考文献 (References):

- 王双明, 申艳军, 孙强, 等. 西部生态脆弱区煤炭减损开采地质保障科学问题及技术展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(4): 043531.  
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Scientific issues of coal detraction mining geological assurance and their technology expectations in ecologically fragile mining areas of western China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(4): 043531.
- 黄艳利, 郭亚超, 齐文跃, 等. 西部典型生态脆弱矿区采剥地表植被盖度演化规律与退化机制[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4217-4227.  
HUANG Yanli, GUO Yachao, QI Wenyue, et al. Evolution and degradation mechanism of surface vegetation coverage in typical ecologically fragile mining areas in western China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47 (12): 4217-4227.
- 周楠, 姚依南, 宋卫剑, 等. 煤矿研石处理技术现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 136-146.  
ZHOU Nan, YAO Yinan, SONG Weijian, et al. Present situation and prospect of coal gangue treatment technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 136-146.
- 王树帅, 岳中文, 康一强, 等. 风积沙充填开采应用现状及材料性能研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(2): 217-232.  
WANG Shushuai, YUE Zhongwen, KANG Yiqiang, et al. Research on the application status and material properties of aeolian sand filling mining[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(2): 217-232.
- 吕文玉, 李世杰, 伍永平, 等. “膏体-研石”复合承载结构的力学特性试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(5): 053513.

- LYU Wenyu, LI Shijie, WU Yongping, et al. Experimental study on mechanical properties of "paste-gangue" composite bearing structure[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(5): 053513.
- [6] 李永亮, 路彬, 杨仁树, 等. 煤矿连采连充式胶结充填采煤技术与典型工程案例[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1055–1071.  
LI Yongliang, LU Bin, YANG Renshu, et al. Cemented backfilling mining technology with continuous mining and continuous backfilling method for underground coal mine and typical engineering cases[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1055–1071.
- [7] 杨宝贵, 顾成进, 施展, 等. 深部高浓度胶结充填开采地表沉陷控制因素及影响规律[J]. *绿色矿山*, 2024, 2(3): 234–245.  
YANG Baogui, GU Chengjin, SHI Zhan, et al. Control factors and influencing patterns of surface subsidence in deep high-concentration cemented backfill mining[J]. *Journal of Green Mine*, 2024, 2(3): 234–245.
- [8] 林海, 杨仁树, 李永亮, 等. 短壁连采连充式胶结充填采煤技术应用研究[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(6): 981–992.  
LIN Hai, YANG Renshu, LI Yongliang, et al. Application of short-wall continuous mining and continuous backfilling cemented-fill mining technology[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(6): 981–992.
- [9] 刘浪, 罗屹骁, 朱梦博, 等. 建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(4): 83–92.  
LIU Lang, LUO Yixiao, ZHU Mengbo, et al. Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 83–92.
- [10] 王晓东. 风积沙质胶结充填材料性能对水固比响应分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2016, 44(6): 106–112.  
WANG Xiaodong. Influence of the performance of aeolian arenaceous filling materials on response of water-solid ratio[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2016, 44(6): 106–112.
- [11] 许茜, 王彦明, 张雯超. 基于正交试验的充填体力学及微观特性研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(6): 063520.  
XU Qian, WANG Yanming, ZHANG Wenchao. Mechanical performances and microscopic properties of cemented backfilling based on orthogonal experiment[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(6): 063520.
- [12] 吴疆宇, 冯梅梅, 郁邦永, 等. 连续级配废石胶结充填体强度及变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(1): 101–108.  
WU Jianguyu, FENG Meimei, YU Bangyong, et al. Experimental study of strength and deformation characteristics of cemented waste rock backfills with continuous gradation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(1): 101–108.
- [13] 王旭锋, 曹文豪, 张东升, 等. 矽石粒径及含量影响高砂高泡水泥基固结体强度机理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(2): 376–384.  
WANG Xufeng, CAO Wenhao, ZHANG Dongsheng, et al. Mechanism study on influence of particle size and content of gangue on strength of high-sand and high-foam cement-based filling material[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(2): 376–384.
- [14] 王树帅, 徐斌, 李杨, 等. 基于RSM-BBD法胶结充填材料配比优化及工程应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(3): 73–84.  
WANG Shushuai, XU Bin, LI Yang, et al. Optimization of cemented filling material ratio based on RSM-BBD method and engineering application[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(3): 73–84.
- [15] 安百富, 易巧梅, 赵祥, 等. 煤泥基充填材料流动性与强度特性试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(S1): 13–21.  
AN Baifu, YI Qiaomei, ZHAO Xiang, et al. Experimental research on low and strength characteristics of coal slime based cemented filling material[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(S1): 13–21.
- [16] 郭育霞, 赵永辉, 冯国瑞, 等. 矽石胶结充填体单轴压缩损伤破坏尺寸效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(12): 2434–2444.  
GUO Yuxia, ZHAO Yonghui, FENG Guorui, et al. Study on damage size effect of cemented gangue backfill body under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(12): 2434–2444.
- [17] 徐文彬, 杨宝贵, 杨胜利, 等. 矽石充填料浆流变特性与颗粒级配相关性试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(4): 1282–1289.  
XU Wenbin, YANG Baogui, YANG Shengli, et al. Experimental study on correlativity between rheological parameters and grain grading of coal gauge backfill slurry[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2016, 47(4): 1282–1289.
- [18] 杨鹏飞. 煤矿胶结充填开采覆岩移动及矿压显现规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.  
YANG Pengfei. Research on movement of overlying strata and strata behaviors with cemented backfilling mining in coal mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2016.
- [19] 王树帅, 李永亮, 李清, 等. 基于泰波理论的矽石级配系数对充填材料性能的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(4): 683–692.  
WANG Shushuai, LI Yongliang, LI Qing, et al. Influence

- of gangue gradation coefficient on the performance of filling material based on Talbol theory[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(4): 683–692.
- [20] 夏雨, 卢爱红. 连续级配高强胶结充填体力学特性及破坏特征分析[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(1): 013037.  
XIA Yu, LU Aihong. Analysis of the mechanical properties and damage characteristics of continuously graded high-strength cemented backfill[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(1): 013037.
- [21] 杨宝贵, 杨捷, 于跃, 等. 煤矿新型胶凝充填材料配比试验及水化机理研究[J]. *矿业科学学报*, 2017, 2(5): 475–488.  
YANG Baogui, YANG Jie, YU Yue, et al. Study on proportioning test of a new cementing filling material and hydration mechanism[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 2(5): 475–488.
- [22] 尹升华, 郝硕, 邹龙, 等. 基于 RSM 的胶结充填体强度回归及料浆寻优研究[J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2020, 51(6): 1595–1605.  
YIN Shenghua, HAO Shuo, ZOU Long, et al. Research on strength regression and slurry optimization of cemented backfill based on response surface method[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2020, 51(6): 1595–1605.
- [23] 付自国, 乔登攀, 郭忠林, 等. 基于 RSM-BBD 的废石-风砂胶结体配合比与强度试验研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(3): 694–703.  
FU Ziguang, QIAO Dengpan, GUO Zhonglin, et al. Experimental research on mixture proportioning and strength of cemented hydraulic fill with waste rock and eolian sand based on RSM-BBD[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(3): 694–703.
- [24] 李小占, 张鸿泽, 张苏花, 等. 矿冶固废基胶结充填料的制备及性能研究[J]. *材料导报*, 2023, 37(8): 70–75.  
LI Xiaozhan, ZHANG Hongze, ZHANG Suhua, et al. Preparation and properties of cemented paste backfill material containing mining and metallurgical solid waste[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(8): 70–75.
- [25] WANG Shushuai, LI Yongliang, YANG Renshu, et al. Rheological behavior with time dependence and fresh slurry liquidity of cemented aeolian sand backfill based on response surface method[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 371: 130768.
- [26] XIN Jie, LIU Lang, XU Longhui, et al. A preliminary study of aeolian sand-cement-modified gasification slag-paste backfill: fluidity, microstructure, and leaching risks[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 830: 154766.
- [27] 吴疆宇, 靖洪文, 浦海, 等. 分形矽石胶结充填体的宏微观力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(10): 2083–2100.  
WU Jiangyu, JING Hongwe, PU Hai, et al. Macroscopic and mesoscopic mechanical properties of cemented waste rock backfill using fractal gangue[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(10): 2083–2100.
- [28] XU Wenbin, LI Qianlong, LIU Bin. Coupled effect of curing temperature and age on compressive behavior, microstructure and ultrasonic properties of cemented tailings backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 237: 117738.
- [29] 崔圣爱, 符飞, 曾光, 等. 干热环境喷射用纤维混凝土力学性能及孔隙结构分析[J]. *东南大学学报 (自然科学版)*, 2022, 52(1): 43–49.  
CUI Sheng'ai, FU Fei, ZENG Guang, et al. Analysis on mechanical property and pore structure of fiber concrete for spraying use in hot-dryenvironment[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2022, 52(1): 43–49.