

## 煤矸石地质聚合物骨料浆液力学与输送特性分析

朱世彬, 王晓东, 武博强, 许晨, 胡晓宇, 许刚刚, 韩乐, 张跃宏

### Mechanical and transportation characteristics of gangue geopolymer aggregate slurry

ZHU Shibin, WANG Xiaodong, WU Boqiang, XU Chen, HU Xiaoyu, XU Ganggang, HAN Le, and ZHANG Yuehong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502037>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 稻壳灰-地聚物固化土力学特性及机理分析

Mechanical properties and mechanism analyses of rice husk ash geopolymer solidified soil

易富, 管茂成, 李军, 杜常博 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 94-101

#### 含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究

A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil-soft rock mixture

邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 111-115

#### 基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析

Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism

何亮, 魏玉峰, 潘远阳, 雷壮 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 120-126

#### 不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性

Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths

赵丹旗, 付昱凯, 侯晓坤, 李同录, 李萍, 李燕, 张林 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 74-80

#### 各向异性对软土力学特性影响的离散元模拟

Discrete element simulation of the influence of anisotropy on the mechanical properties of soft soil

赵洲, 宋晶, 刘锐鸿, 杨守颖, 李志杰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 70-77

#### 碎屑集合体撞击与停积过程的运动学特征研究

Study on kinetic characteristics of the collision and emplacement of grains aggregation

刘世涛, 程谦恭, 林棋文, 姚志勇, 孙先锋, 邓凯丰, 刘道胜, 王进华 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 140-150



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502037

朱世彬, 王晓东, 武博强, 等. 煤矸石地质聚合物骨料浆液力学与输送特性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 62-74.  
ZHU Shibin, WANG Xiaodong, WU Boqiang, et al. Mechanical and transportation characteristics of gangue geopolymer aggregate slurry[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 62-74.

## 煤矸石地质聚合物骨料浆液力学与输送特性分析

朱世彬, 王晓东, 武博强, 许 晨, 胡晓宇, 许刚刚, 韩 乐, 张跃宏  
(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 煤矸石地质聚合物骨料浆液是一种稳定性良好的新型绿色材料, 可作为充填料浆充注到煤矿采空区, 既解决采煤沉陷区治理问题, 又解决煤基固废规模化处置问题。为了掌握浆液输送性质与固化后力学性能, 以碱激发煅烧煤矸石为胶凝材料、破碎后的煤矸石为骨料制备煤矸石地质聚合物骨料浆液, 以骨料粒径与胶骨比为因素, 采用单轴抗压强度、低场核磁和扫描电镜方法, 分析浆液固化体的力学性能、孔隙分布和微观结构, 利用流变试验和扩展度试验, 分析煤矸石地质聚合物骨料浆液输送特性。研究结果表明: (1) 胶骨比相同时, 浆液中骨料粒径越大, 固化体抗压强度越大, 粒径 20, 10, 5 mm 时, 骨料起支撑作用且水化反应充分, 强度明显优于粒径 0.15, 0.075 mm, 骨料粒径相同时, 受内部孔隙结构与胶凝材料和骨料之间的咬合关系影响, 骨料占比增加, 固化体强度先降低后增加; (2) 浆液的扩展度与流变参数呈负相关关系, 骨料占比增加导致扩展度降低、屈服应力和塑性黏度增加、触变性增大, 致使浆液输送能耗增加、输送效率降低、堵管风险增加, 不利于管道输送。研究可为煤矸石地质聚合物骨料浆液在实际工程的应用提供理论支撑。

**关键词:** 煤矸石; 地质聚合物; 骨料浆液; 力学特性; 输送特性

中图分类号: TD32

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0062-13

## Mechanical and transportation characteristics of gangue geopolymer aggregate slurry

ZHU Shibin, WANG Xiaodong, WU Boqiang, XU Chen, HU Xiaoyu, XU Ganggang,  
HAN Le, ZHANG Yuehong  
(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp,  
Xi'an, Shaanxi 710077, China)

**Abstract:** Coal gangue-based geopolymer aggregate slurry is an emerging green material with excellent stability and suitability for use as backfill in coal mine goafs. This approach not only addresses the remediation of coal mining subsidence areas but also resolves large-scale coal-based solid waste disposal. To investigate the transport properties of the slurry and the mechanical performance of its cured form, this study prepared coal gangue-based geopolymer aggregate slurry using alkali-activated calcined coal gangue as the cementitious material and crushed coal gangue as the aggregate. By controlling aggregate particle size and content, uniaxial compressive strength

收稿日期: 2025-02-15; 修订日期: 2025-05-12

投稿网址: [www.swdgcgdz.com](http://www.swdgcgdz.com)

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBMS-230; 2022JQ-308); 中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金项目(2024XAYJS03; 2023XAYJS11); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2023-TD-ZD004-003)

第一作者: 朱世彬(1987—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事矿山地质灾害防治和采空区治理方面的研究工作。

E-mail: [zhushibin@cctegxian.com](mailto:zhushibin@cctegxian.com)

通讯作者: 王晓东(1981—), 男, 博士, 研究员, 主要从事矿山地质灾害防治等方面的研究工作。E-mail: [wangxiaodong@cctegxian.com](mailto:wangxiaodong@cctegxian.com)

tests, low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR), and scanning electron microscopy (SEM) were employed to analyze the mechanical properties, pore distribution, and microstructure of the cured slurry. Additionally, rheological tests and slump flow tests were conducted to evaluate the transport characteristics of the slurry. The experimental results demonstrate that at a constant binder-to-aggregate ratio, the compressive strength of the cured material increases with larger aggregate particle sizes. Aggregates sized 20 mm, 10 mm, and 5 mm formed robust load-bearing skeletons while maintaining sufficient hydration reactions, leading to significantly higher strength compared to finer aggregates (0.15 mm and 0.075 mm). For materials with identical aggregate sizes, the strength development initially decreases before increasing with higher aggregate content, due to the combined effects of internal pore structure evolution and improved mechanical interlocking between the cementitious matrix and aggregates. The slurry's flowability exhibits an inverse correlation with rheological parameters. Increasing the aggregate content reduces the slump flow while elevating the yield stress, plastic viscosity, and thixotropy, consequently raising pumping energy consumption, decreasing transport efficiency, and increasing pipeline clogging risks, thereby adversely affecting pipeline conveyance performance. The findings of this study provide theoretical support for engineering applications of gangue-based geopolymer aggregate slurry.

**Keywords:** coal gangue; geopolymer; aggregate slurry; mechanical properties; transportation characteristics

我国煤矿资源丰富,在相当长时间内煤炭依然会是我国最重要的能源资源<sup>[1-2]</sup>。根据《中国统计年鉴》数据,2002—2022 年我国原煤产量累计约  $488.03 \times 10^8$  t,其中,2022 年原煤产量  $31.408 \times 10^8$  t,同比增长 10.25%<sup>[3]</sup>。煤矿开采伴随巨大的煤基固废产出,其中,煤矸石占我国煤炭生产总量的 15%~20%<sup>[4-5]</sup>。我国累计堆存煤矸石约  $76.8 \times 10^8$  t,2022 年排放量达  $8.02 \times 10^8$  t。煤矸石堆存占用大量的土地资源,矸石山自燃和重金属释放等均会造成严重的环境破坏。煤矸石无害化规模处置是国家和社会发展的必然要求。

较发电、铺路、制备化工原料、制备建筑材料、制备生态土等煤矸石综合利用方法,矸石井下充填是将井下或地面煤矸石充填至采空区或离层区,实现煤矸石规模化高效快速处置以及控制岩层移动和地表沉降的目的<sup>[6-9]</sup>。按照充填方式划分,煤矸石井下充填分为固体充填、膏体充填和浆体充填,固体充填和膏体充填主要应用于“三下压煤”和井下呆滞资源的安全高效回收,而浆体充填主要以处理煤矸石为目的<sup>[10]</sup>。关于纯煤矸石浆液的成浆机理<sup>[11]</sup>、流变特性<sup>[12]</sup>、管道输送流场稳定性<sup>[13-15]</sup>、充填技术<sup>[16]</sup>等已有一定的研究。但不同地区煤矸石中含有不同的微量元素,当煤矸石中含有超量的铜(Cu)、锰(Mn)、铅(Pb)、镍(Ni)、钴(Co)等重金属元素时,煤矸石地下充填处置将存在重金属元素浸出污染环境的风险<sup>[17-18]</sup>。

煤矸石的主要成分为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,是一种优良的硅铝质矿物材料<sup>[19-20]</sup>。通过物理化学方法活化后,可将其制备成煤矸石基地聚物胶凝材料。该材料不

仅具有强度高、耐酸碱等优异特性,还表现出良好的胶凝性能兼具固化重金属的作用<sup>[21-22]</sup>。近年来,煤矸石地质聚合物的研究取得了显著进展,主要集中在活化反应条件优化和复合改性对其力学性能及微观机构的影响。机械活化和热活化等预处理方法能有效改善煤矸石的活性<sup>[23]</sup>,碱激发剂参数(如碱激发剂模数、钠铝比、液固比等)对材料的力学性能和微观结构具有决定性作用<sup>[24-26]</sup>,采用纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和钢纤维<sup>[27]</sup>或多固废协同<sup>[28-30]</sup>等方式可增强地聚物注浆材料力学性能。将煤矸石作为骨料替代碎石,制备煤矸石粗骨料-地聚物混凝土,其抗压强度和抗氯离子渗透性能可高于普通混凝土<sup>[31]</sup>。对于地质聚合物固化重金属的研究多为对污染土壤的固化,如煤矸石基地质聚合物对铀污染土壤的固化<sup>[32]</sup>、煤矸石基地质聚合物对铅锌尾矿固化<sup>[33]</sup>、粉煤灰基地质聚合物对工程渣土固化<sup>[34-35]</sup>。利用煤矸石地质聚合物的胶凝性能和固化重金属能力,将其与破碎后的矸石混合,制备成矸石浆体充填材料,可消除原矸石内部重金属浸出风险。但相应材料的力学与输送性能方面的研究相对较少,尚不能有效指导煤矸石井下安全高效充填,因此,亟待开展相关研究。

本文以碱激发煅烧煤矸石为胶凝材料、破碎后的煤矸石为骨料制备煤矸石地质聚合物骨料浆液,采用单轴抗压强度试验、流变试验和扩展度测试方法,探索骨料粒径与胶骨比对煤矸石地质聚合物骨料浆液力学性能与输送特性的影响,为煤矸石规模化安全充注采空区或离层区提供理论支撑。

## 1 试验材料

### 1.1 煤矸石原料

试验选择保德煤矿矸石,使用X射线衍射仪进行矿物组成测试,确定煤矸石原料的物相组成以石英和高岭石为主(图1)。

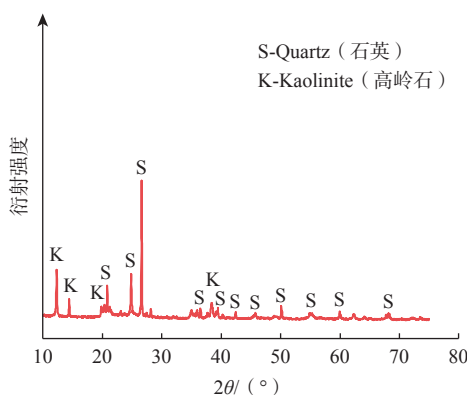
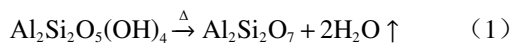


图1 煤矸石原料的XRD图谱  
Fig. 1 XRD pattern of coal gangue raw material

注:  $\theta$  为入射X射线与晶面之间的夹角。

利用热重、微分热重(TG、DTG)监测矸石在程序控温条件下的质量变化及其变化速率,确定矸石的煅烧温度,结果见图2,煤矸石发生失重的最优煅烧温度在750~800℃,高岭石(化学式为 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ )属于1:1型层状硅酸盐,由硅氧四面体层和铝氧八面体层通过羟基连接,高温下羟基(—OH)以水蒸气形式脱除,转变成偏高岭石,见式(1)。为节约能耗,煅烧温度选择750℃。



利用颚式破碎机和球磨机,制备煤矸石骨料及用于煅烧活化的煤矸石粉料。选用小于0.075mm的煤矸石粉末,利用回转窑,将煤矸石在750℃煅烧2h,

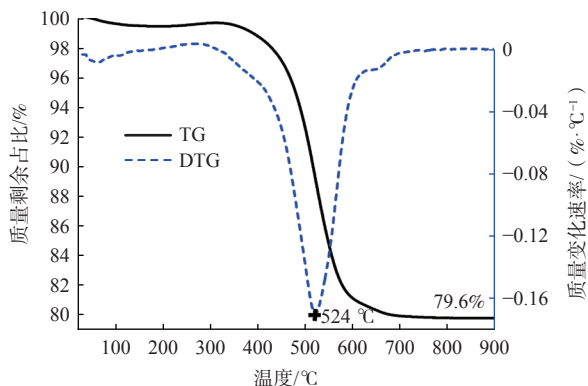


图2 保德煤矸石TG、DTG曲线

Fig. 2 TG, DTG curves of coal gangue from Baode coal mine

升温速率设定为5℃/min。自然降温后取出,制备活化煤矸石,活化煤矸石的粒径分布曲线见图3。

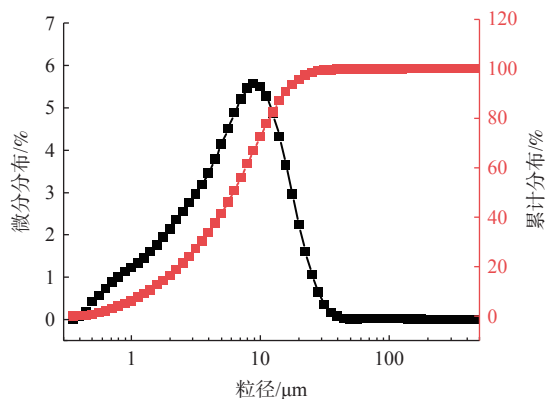


图3 活化煤矸石粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of activated coal gangue

经过煅烧后,煤矸石中高岭石相衍射峰完全消失,同时在2倍入射X射线与晶面之间的夹角( $\theta$ )等于26°附近产生了弥散峰,这应当归因于高岭石经过煅烧生成了无定型偏高岭石(图4)。

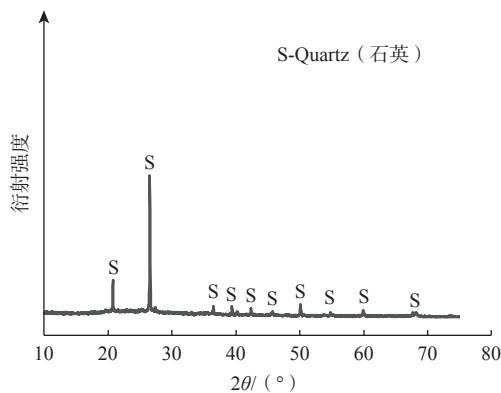


图4 煤矸石750℃煅烧前后的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of coal gangue before and after calcination at 750℃

### 1.2 化学激发剂

激发剂选用北京化工厂的NaOH(分析纯)与北京红广科技有限公司生产的水玻璃,其中水玻璃模数( $\text{SiO}_2$ 与 $\text{Na}_2\text{O}$ 的摩尔比)为2.41, $\text{Na}_2\text{O}$ 占13.85%, $\text{SiO}_2$ 占32.28%,波美度为50.9,比重为1.545,固体含量为46.13%。

## 2 试验方案及方法

### 2.1 试验方案

以保德矿原状煤矸石为原料,经破碎粉磨煅烧(750℃)后作为前驱体,制备碱激发煅烧煤矸石胶凝材料。参考全煤矸石地质聚合物固结体制备方法<sup>[17]</sup>,

结合前期试验结果,以模数为 1.1 的水玻璃为激发剂,设置胶凝材料体系的钠铝比为 0.9。考虑工程现场煤矸石破碎球磨设备出料粒径,将原状煤矸石破碎粉磨至小于 20, 10, 5, 0.15, 0.075 mm 5 种粒径,作为矸石骨料。试验方案中胶骨比为碱激发煅烧煤矸石胶凝材料与矸石骨料的质量比。水胶比为水与碱激发煅烧煤矸石胶凝材料的质量比。通常充填材料的胶骨比为 1/2~1/4<sup>[36-37]</sup>,水胶比为 0.8~1.0<sup>[38]</sup>,考虑最大化低成本处理矸石,结合前期试验结果,当骨料粒径为 20, 10, 5 mm 时,本试验胶骨比为 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 水胶比为 1.0;当骨料粒径为 0.15, 0.075 mm 时,胶骨比为 1/0.5, 1/1, 1/2, 1/3, 1/4, 水胶比为 1.5。具体试验方案见表 1。

表 1 试验方案  
Table 1 Experiment plan

| 编号 | 骨料粒径/mm | 胶骨比                       | 水胶比 |
|----|---------|---------------------------|-----|
| 1  | 20      | 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6   | 1.0 |
| 2  | 10      |                           |     |
| 3  | 5       |                           |     |
| 4  | 0.15    | 1/0.5, 1/1, 1/2, 1/3, 1/4 | 1.5 |
| 5  | 0.075   |                           |     |

注: 骨料粒径均为该骨料的<sup>最大</sup>粒径。

2.2 试验方法

2.2.1 抗压强度试验

将配好的碱激发剂与煅烧煤矸石混合并高速搅拌 2 min,然后将获得的浆体浇注到 40 mm×40 mm×40 mm 的模具中,24 h 后脱模得到试块,标准养护至规定龄期后,采用 CS200 万能强度测试仪,测试样品的抗压强度<sup>[39]</sup>,进行数据处理与误差分析。

2.2.2 低场核磁测试

采用 MicroMR23-025V 核磁共振仪器,进行低场核磁测试<sup>[40-41]</sup>,分析试样的孔隙分布特征。

2.2.3 扫描电镜测试

利用场发射环境扫描电镜(ESEM, FEI Quanta 250 FEG)配合背散射电子成像图像灰度分析方法,观测试样微观结构特征。

2.2.4 流变试验

采用美国博勒飞(Brookfield)公司的 RST-CC 桨式流变仪进行流变试验,通过一个带光编码器的高精密动态驱动系统确定转子绝对位置,控制剪切率或者剪切应力,测量施加在测量元件上的扭矩、预先设定剪切应力、测量元件的角偏转或剪切变形等。本试验采用稳态剪切,设计剪切速率由 0 s<sup>-1</sup> 线性增加至 40 s<sup>-1</sup>

再线形减小至 0 s<sup>-1</sup>,测试时间为 120 s,实时监测并输出剪切应力随剪切速率变化关系。利用 Bingham 模型对试验数据进行拟合:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \tag{2}$$

式中:  $\tau$ ——剪切应力/Pa;  
 $\tau_0$ ——屈服应力/Pa;  
 $\mu_p$ ——塑性黏度/(Pa·s);  
 $\gamma$ ——剪切速率/s<sup>-1</sup>。

2.2.5 扩展度测试

使用微型圆锥坍落度筒进行扩展度试验,微型坍落度筒为上口直径 5 cm、下口直径 10 cm、高 15 cm 的圆锥体。测试时,桌面放置一个带有十字刻度的光滑平板,用水平尺保证水平,将坍落度筒的中心置于十字刻度中心交叉点;将搅拌好的料浆立即从上口连续倒入坍落度筒,刮去上口多余料浆;以恒定速度垂直上提坍落度筒,料浆在平板扩展稳定后读取扩展面的直径,以正交的 2 次读数平均值为 1 次扩展度测量结果,每个样品连续进行 3 次测试,以 3 次的平均值作为最终结果。

3 结果及分析

3.1 骨料粒径与胶骨比对地质聚合物煤矸石基浆液固化体力学性能的影响

图 5 为不同骨料粒径与胶骨比浆液固化体的力学性能。从图中可以看出,随着骨料粒径的减小,浆液固化体的抗压强度呈下降趋势。其中 20 mm 与 10 mm 骨料浆液固化体力学性能基本相当,减小到 5 mm 时抗压强度略微下降,再到 0.075 mm 时强度下降明显。这可能是由于较小粒径的骨料表面积增大,浆液内部自由水减少,地质聚合物煤矸石基浆液中参与水化反应的水量减少,水化程度降低,造成水化不完全,影响了浆液固化体的强度。骨料粒径在 5 mm 以上时,骨料自身起到骨架支撑作用;骨料粒径在 0.15, 0.075 mm 时,与胶凝材料粒径相近,无法起到骨架支撑作用,受比表面积增加影响显著,吸水量增加,参与水化反应的水量减少,生成的 N-A-S-H 凝胶减少<sup>[42-43]</sup>,强度下降明显。另外,骨料粒径与胶凝材料粒径相近时,由于本文可控制的是水胶比,水胶比一定时,粒径为 0.075, 0.15 mm 时胶骨比 1/0.5 和 1/1 对应的浆液内部含水量较高,浆液较难凝结。此外,还可以看出,随着胶骨比的减小,浆液固化体的抗压强度先降低又增加,这可能与浆液固化体基体内孔隙结构相关。

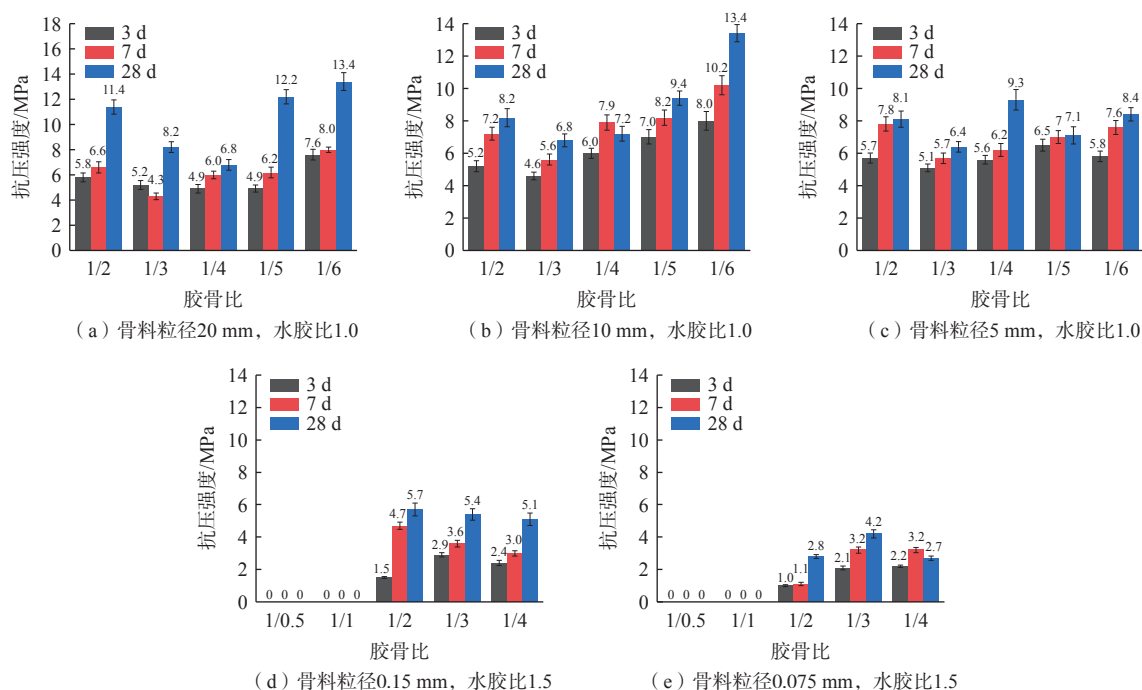


图 5 不同骨料粒径与胶骨比浆液固化体的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of solidified slurry with different aggregate particle sizes and cement-to-aggregate ratios

### 3.2 骨料粒径与胶骨比对地质聚合物煤矸石基浆液固化体微观结构的影响

#### 3.2.1 孔隙结构

28 d 龄期不同骨料粒径与胶骨比浆液固化体的孔结构见图 6。从图中可以看出,对于 5 ~ 20 mm 的粗骨料部分,随着骨料粒径的减小,浆液固化体的孔径分布主峰逐渐向左偏移,即主孔径逐渐减小,0.01  $\mu\text{m}$  以下的凝胶孔增多;同时,0.002  $\mu\text{m}$  左右的凝胶内孔逐渐减少,取而代之的是大于 0.03  $\mu\text{m}$  的凝胶间孔,这表明碱激发反应程度加深,生成凝胶数量增多且老化程度加深。究其原因,可能是由于骨料粒径的减小,胶凝材料连接的更加紧密,促进了碱激发反应的进行。此外,还可以看出,随着骨料粒径的减小,浆液固化体中 0.1  $\mu\text{m}$  以上的毛细孔增多,这对于浆液固化体力学性能的发展不利,这可能是图 5 中抗压强度随着骨料粒径的降低而下降的原因。

对于 0.15 mm 与 0.075 mm 骨料浆液,呈现出与 5 ~ 20 mm 大颗粒骨料不同的孔隙分布特征,浆液固化体随着胶骨比的增加,孔径分布逐渐向右偏移。这可能是由于胶凝材料增多,水胶比又较高,导致体系中水含量较高,充满于孔隙中,最终导致浆液固化体的主孔径增大,0.1  $\mu\text{m}$  以上的有害孔增多,这导致其在 7 d 龄期时强度很低,常规测试方法测不出其强度。当胶骨比减小到 1/2 时,浆液固化体才有可测强度。相比

于 0.075 mm 骨料浆液,0.15 mm 浆液在胶骨比小于等于 1/2 时有更低的孔隙率,因此力学性能较好。

#### 3.2.2 界面过渡区

煤矸石地质聚合物骨料浆液作为一种多相复合材料,其力学性能取决于各相自身性能及其之间的界面结合能力,而胶凝材料基体与骨料的界面过渡区由于壁面效应<sup>[44]</sup>,通常疏松多孔,被认为是其中最薄弱的部分。图 7 为粒径 10 mm 骨料浆液在 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6 胶骨比条件下的扫描电子显微镜图片。可以看出,随着胶骨比降低,胶凝材料与骨料之间黏结更加紧密。当胶骨比为 1/2 和 1/3 时,胶凝材料与骨料之间存在细小裂隙,这可能归因于胶凝材料和骨料之间自身力学性能存在差异,当胶骨比降低至 1/4, 1/5, 1/6 时界面过渡区出现裂隙现象减少,仅在极小薄弱骨料附近出现一些微裂隙。这表明合理的胶骨比对结石体界面过渡区有着重要影响,即通过调整料浆的级配可以减少界面过渡区的裂隙(图 6),改善结石体的微观结构,并提升结石体宏观性能(图 5),这也解释了地质聚合物煤矸石基浆液固化体强度变化的原因。

### 3.3 骨料粒径与胶骨比对地质聚合物煤矸石基浆液流变特性的影响

#### 3.3.1 胶骨比对浆液流变参数的影响

图 8—9 分别为骨料浆液剪切应力和黏度随胶骨比变化关系曲线。随着胶骨比的减小,不同粒径(0.075,

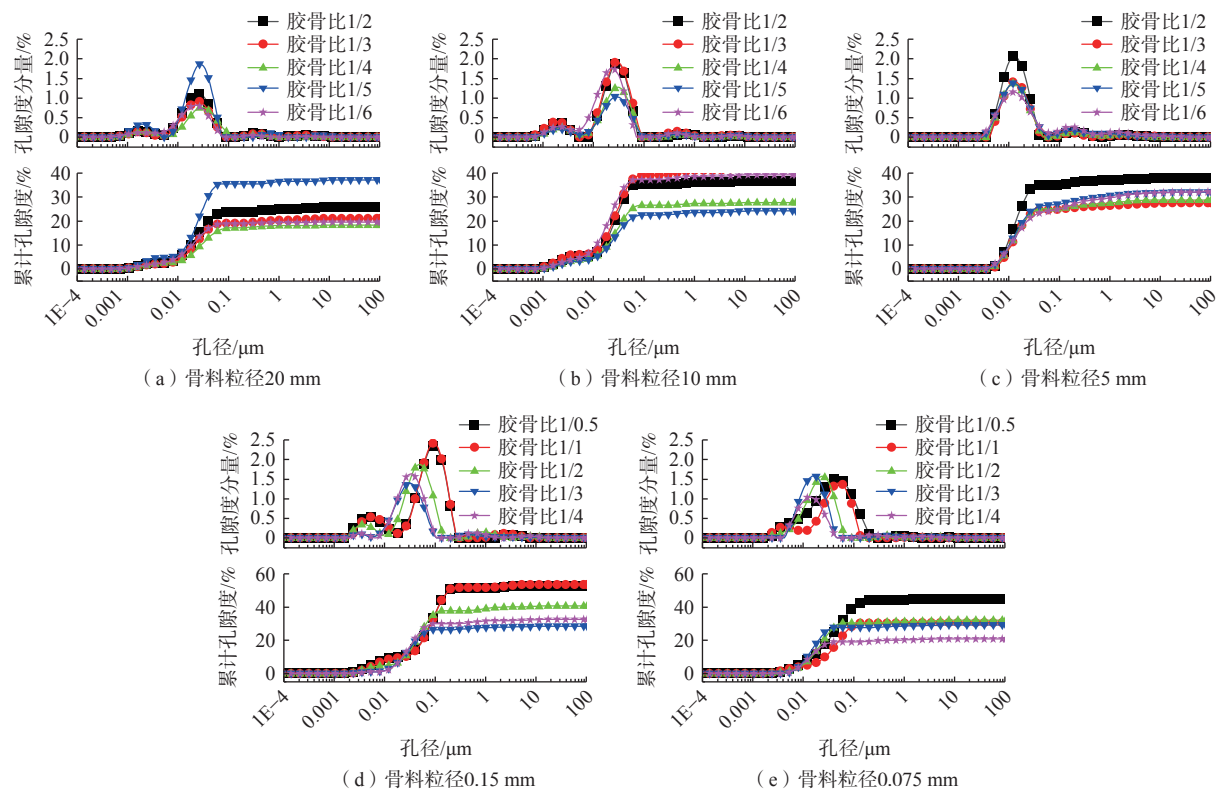


图 6 28 d 龄期不同骨料粒径与胶骨比浆液固化体的孔结构图

Fig. 6 Porosity distribution of slurry solidified bodies with different aggregate particle sizes and binder-to-aggregate ratios at 28-day curing age

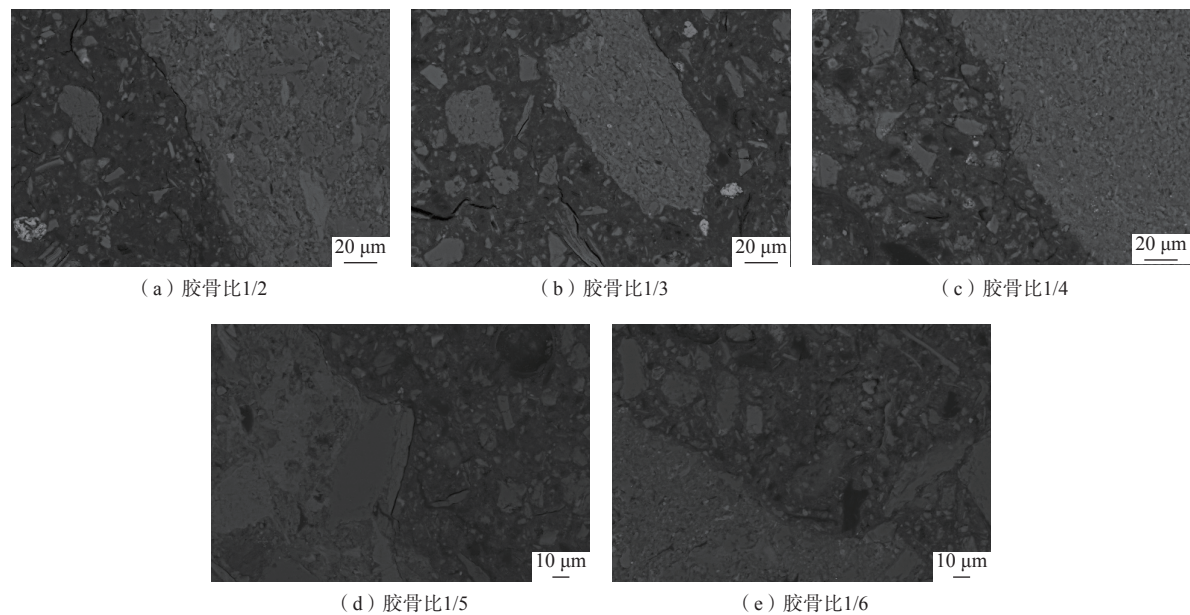


图 7 28 d 龄期骨料粒径 10 mm 不同胶骨比浆液固化体界面过渡区图片

Fig. 7 Micrographs of interfacial transition zone (ITZ) in solidified slurry composites with 10 mm aggregate size and varying binder-to-aggregate ratios at 28-day curing age

0.15, 5, 10 mm)浆液达到同一剪切速率所需的剪切应力和黏度均显著增大。其中,骨料粒径 0.15 mm 胶骨比为 1/2 和 1/3 时,浆液黏度随着剪切速率的降低而增加,可能是因为当前胶骨比下,浆液中骨料处于悬浮状态,当剪切速率较低时,悬浮颗粒更容易相互碰撞,导致黏度增加。当胶骨比小于临界值(如 0.075 mm 骨

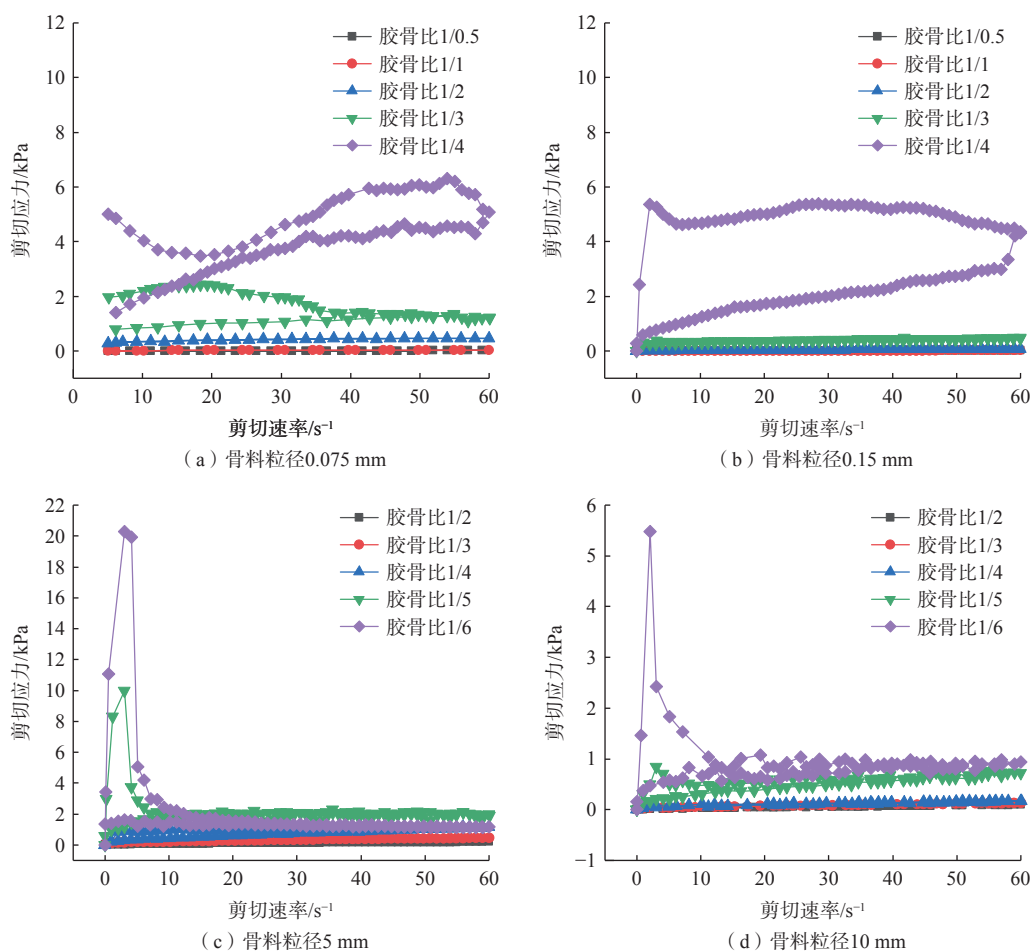


图 8 骨料浆液剪切应力随胶骨比变化关系

Fig. 8 Relationship between shear stress and cement-to-aggregate ratio

料的 1/3 和 0.15, 5, 10 mm 的 1/4) 时, 浆液表现出明显的触变性, 表现为剪切应力及表观黏度随剪切速率的降低而恢复, 但存在滞后性, 且触变行为随胶骨比减小而增强。这一现象与煤矸石骨料的含碳特性相关, 骨料占比越大, 含碳量越高, 吸水性越强, 内部结构强度随之提升。

### 3.3.2 骨料粒径对浆液流变参数的影响

骨料粒径是影响浆液流变性能的主要因素。由图 10 可见, 0.075 mm 骨料浆液在不同胶骨比下均表现出最大的剪切应力, 这与其较大的比表面积和需水量导致体系自由水减少有关。相比之下, 5 mm 骨料因与胶凝材料结合较好, 其剪切应力高于 10, 20 mm 骨料浆液。随着胶骨比从 1/2 降至 1/4, 各粒径浆液的流变参数均增大, 其中 0.15 mm 骨料浆液的剪切应力增幅显著, 在胶骨比 1/3 后超过 5 mm 骨料浆液。值得注意的是, 10, 20 mm 骨料浆液因离析问题, 流变曲线相近; 特别是 20 mm 骨料在胶骨比 1/4 时, 由于骨料沉积导致转子碰撞, 流变曲线出现明显突变。

### 3.3.3 胶骨比与骨料粒径对浆液屈服应力及塑性黏度的影响

屈服应力是浆液从弹性状态转变为塑性流动所需的临界剪切应力, 塑性黏度反映了浆液体系内的变形速率, 是浆液内部阻碍流动的一种性能。屈服应力和塑性黏度是表征宾汉流体流变特性的 2 个核心参数。胶骨比及骨料粒径对地质聚合物矸石基浆液屈服应力和塑性黏度的影响, 见图 11。由图可知, 随着胶骨比的减小, 所有浆液体系的塑性黏度和屈服应力均呈现增大趋势, 这一现象与固体浓度增加导致的自由水减少直接相关。在胶骨比 1/0.5 和 1/1 时, 骨料粒径对浆液屈服应力和塑性黏度的影响均不明显, 此时胶凝材料与骨料混合均匀。随着胶骨比增加, 骨料粒径的影响逐渐显现, 粒径越小, 浆液的屈服应力和塑性黏度越大。这主要是因为细骨料具有更大的比表面积和需水量, 同时细骨料占比增加会促进成核反应, 形成絮凝结构, 从而显著提高浆液的屈服应力和塑性黏度。

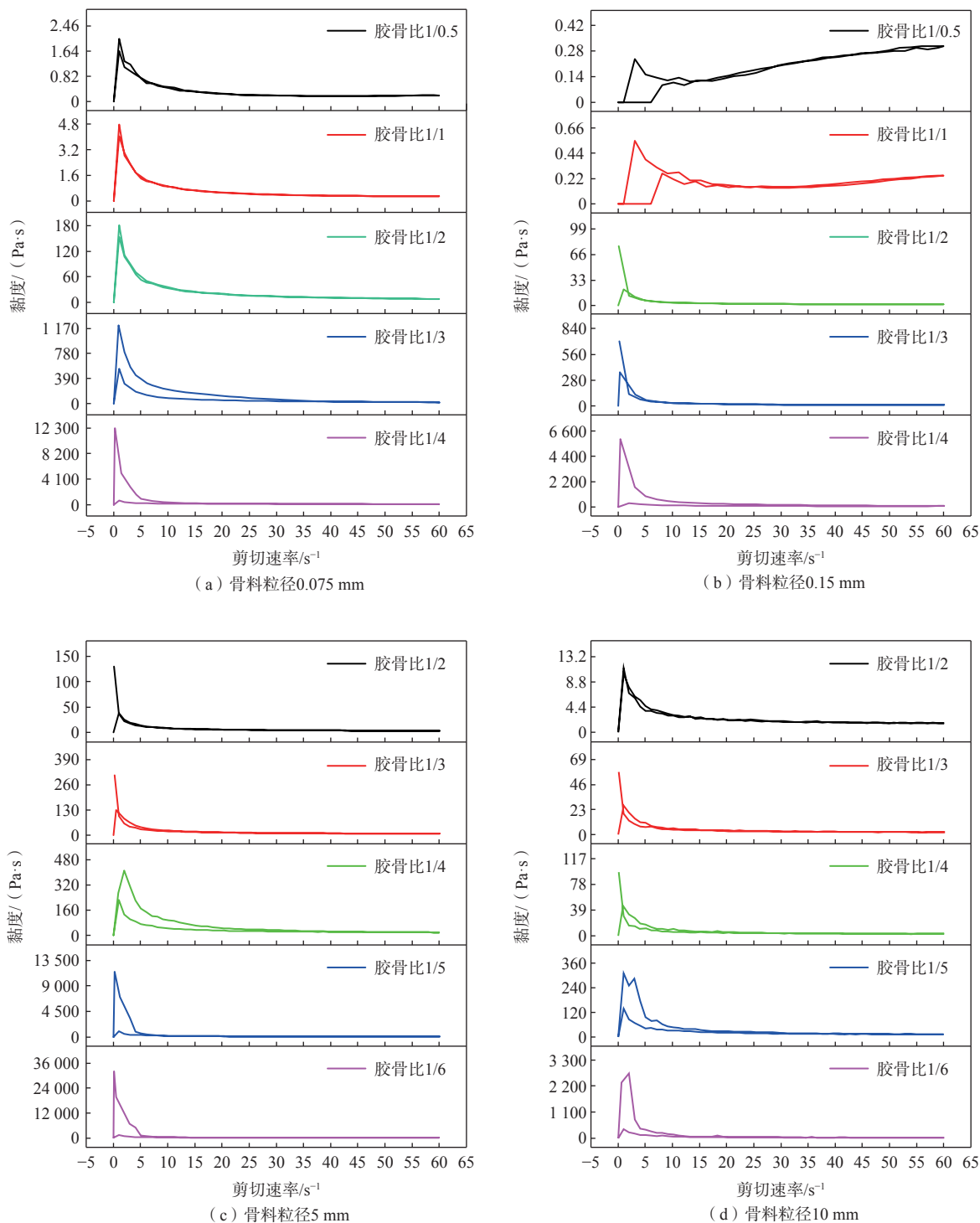


图 9 骨料浆液黏度随胶骨比变化关系

Fig. 9 Relationship between viscosity and cement-to-aggregate ratio

3.3.4 浆液扩展度与流变参数之间关系

浆液的扩展度与浆液流变参数均反映浆液的流动扩散规律,综合分析不同粒径下不同胶骨比浆液扩展度与屈服应力和塑性黏度之间的关系(图 12),发现浆液的扩展度与浆液的流变参数存在负相关规律。相同粒径条件下,浆液的扩展度随着骨料占比的增加

呈现降低趋势,浆液的屈服应力和塑性黏度呈现增加趋势。

4 讨论

浆液的输送性能受浆液的流变性能影响,流变性能中浆液的剪切应力与浆液的黏度将直接反映浆液

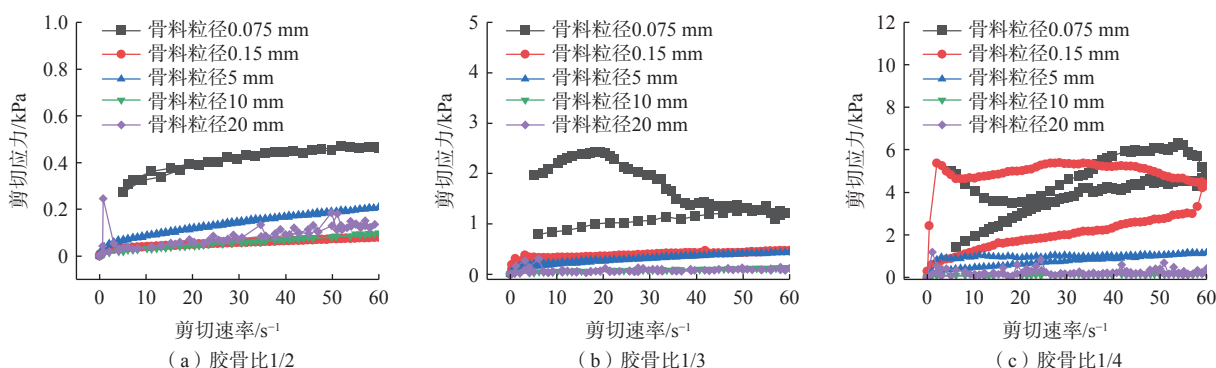


图 10 浆液剪切应力随骨料粒径变化关系

Fig. 10 Relationship between shear stress of slurry and aggregate particle size

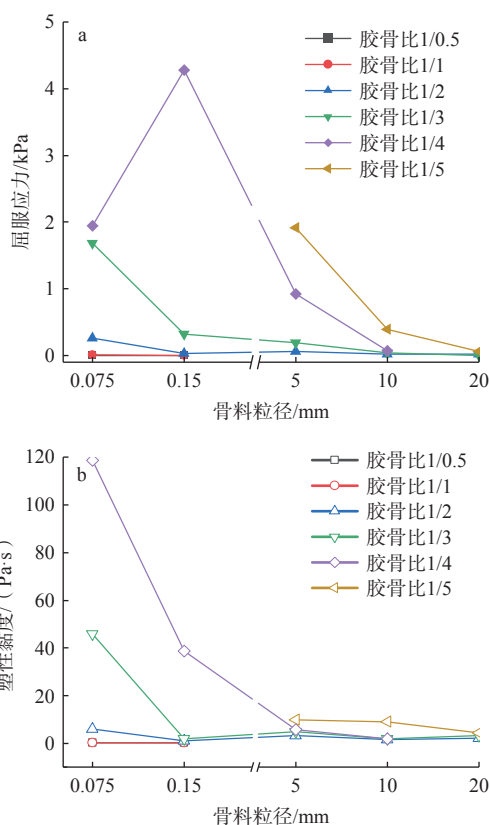


图 11 不同骨料粒径和不同胶骨比下浆液屈服应力 (a) 与塑性黏度 (b) 曲线

Fig. 11 Yield stress (a) and plastic viscosity (b) curves of slurry with different aggregate particle sizes and cement-to-aggregate ratios

的可输送能力。当剪切应力和黏度均较小时,浆液具有较好的流动性;剪切应力和黏度均适中时,浆液具有较好的可塑性;剪切应力和黏度均较大时,浆液具有较好的稳定性<sup>[45]</sup>。由试验结果可见,粒径相同,胶骨比越大,浆液的流动性越好。

屈服应力是浆液在受到外力作用下开始发生塑性变形的应力值,它是浆液输送过程中衡量浆液抵抗变形能力的一个重要指标。屈服应力越大,浆液在受

到外力作用时越难开始流动,在浆液输送过程中,这可能导致启动流动所需的能量增加,从而影响输送效率。在浆液流动过程中,当屈服应力过大,可能会导致流动不稳定,甚至出现堵塞等问题。因此,适当的屈服应力对于保证浆液输送的稳定性至关重要。塑性黏度是指浆液在受到剪切力作用下的变形能力,它反映了浆液内部的内摩擦力。塑性黏度越大,浆液在输送过程中受到的流动阻力越大。这可能导致输送能耗增加,输送效率降低。塑性黏度越大,浆液的流动性越差,这可能会影响浆液的输送性能。在管道输送中,高塑性黏度的浆液可能更容易导致管道堵塞。地质聚合物煤矸石基浆液的骨料粒径相同时,浆液的扩展度随着骨料占比的增加呈现降低趋势,浆液的屈服应力和塑性黏度呈现增加趋势,浆液的输送耗能将增加,输送效率或将降低,堵管风险也将增加。

浆液触变性是影响浆液输送时泵送的主要因素之一。浆液触变性大,则浆液在泵送突然中止到再次启动过程需要消耗更大的泵送压力来克服浆液静止过程中已形成的胶凝絮状结构;反之,浆液在泵送突然中止到再次启动过程所需的泵送压力将大大减小。触变性浆液在输送过程中可能会因剪切力的变化而经历流动性的波动,进而影响输送的稳定性。如果输送系统不能很好地适应这种流动性的变化,可能会导致浆液输送系统中断或故障。触变性浆液或将增加输送能耗,特别是在输送管道较长或浆液浓度较高的情况下,这种能耗的增加可能更为显著。由试验结果可知,粒径相同,胶骨比越小,浆液的触变性越大,越不利于输送;胶骨比相同,粒径越小,浆液触变性越大,越不利于输送。

## 5 结论

(1)考虑破磨能耗和材料制备成本,骨料粒径优选 20, 10, 5 mm。骨料粒径越大,固化体抗压强度越

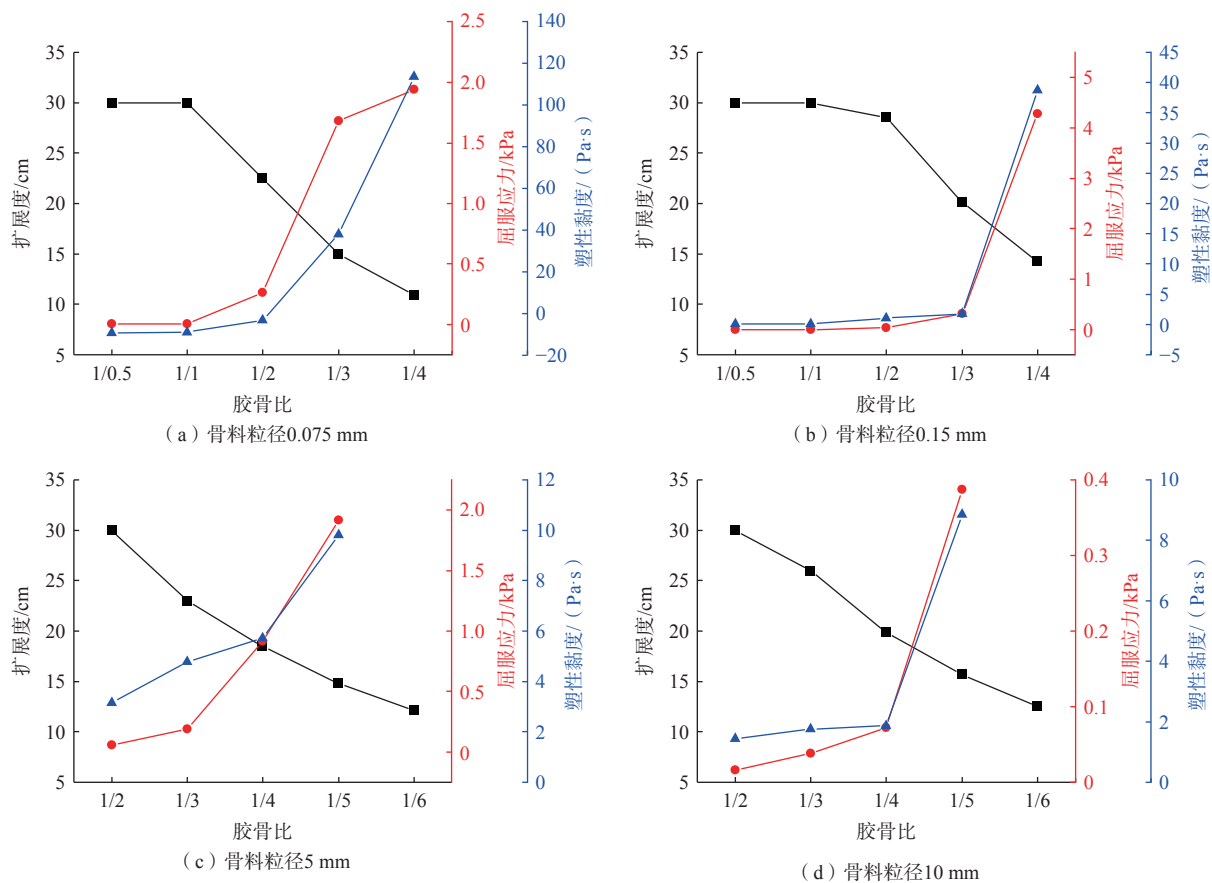


图 12 不同胶骨比浆液扩展度与屈服应力和塑性黏度之间关系曲线

Fig. 12 Relationships among slump flow, yield stress, and plastic viscosity of slurry at different cement-to-aggregate ratios

大,此时骨料起支撑作用且水化反应充分,强度明显优于粒径 0.15, 0.075 mm。骨料粒径相同时,受内部孔隙结构与胶凝材料和骨料之间的咬合关系影响,骨料占比增加,固化体强度先降低后增加。

(2)浆液的扩展度与流变参数呈负相关关系,骨料占比增加导致扩展度降低、屈服应力和塑性黏度增加、触变性增大,致使浆液输送能耗增加、输送效率降低、堵管风险增加,不利于管道输送。

(3)骨料粒径为 5, 10, 20 mm 时,固化体 3 d 抗压强度大于 4.6 MPa, 28 d 抗压强度大于 6.4 MPa, 满足采空区充填要求,且骨料粒径越大,耗能越低,材料制备越经济。粒径 10, 20 mm 浆液存在离析问题,不利于管道输送。综合浆液力学与输送性能,优选骨料粒径 5 mm, 结合项目对矸石处置要求、采空区充填体强度要求及设备能力适配要求,进一步优选胶骨比。本研究成果可为煤矸石地质聚合物骨料浆液在实际工程的应用提供理论支撑。

参考文献 (References) :

[ 1 ] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与

绿色低碳技术路径 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1 – 15. [ LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1 – 15. (in Chinese with English abstract) ]

[ 2 ] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187 – 1197. [ XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187 – 1197. (in Chinese with English abstract) ]

[ 3 ] 国家统计局. 中国统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023. [ National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2023[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023. (in Chinese) ]

[ 4 ] 史全林, 龙力华, 杨前, 等. 煤矸石在绿色矿山建设中的规模化利用技术研究进展 [J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 113 – 125. [ SHI Quanlin, LONG Lihua, YANG Qian, et al. Advances in research on technologies

- for large-scale coal gangue utilization for green mine construction[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(3): 113 – 125. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼. 矸石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2009, 26(4): 395 – 401. [ ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, GUO Guangli. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2009, 26(4): 395 – 401. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 刘建功, 李新旺, 何团. 我国煤矿充填开采应用现状与发展 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 141 – 150. [ LIU Jiangong, LI Xinwang, HE Tuan. Application status and prospect of backfill mining in Chinese coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 141 – 150. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展 [J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(9): 1 – 15. [ XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 1 – 15. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 杨胜利, 白亚光, 李佳. 煤矿充填开采的现状综合分析 & 展望 [J]. *煤炭工程*, 2013, 45(10): 4 – 6. [ YANG Shengli, BAI Yaguang, LI Jia. Comprehensive analysis on present status of mine backfill mining and prospects[J]. *Coal Engineering*, 2013, 45(10): 4 – 6. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 王玉涛. 煤矸石固废无害化处置与资源化综合利用现状 & 展望 [J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(10): 54 – 66. [ WANG Yutao. Status and prospect of harmless disposal and resource comprehensive utilization of solid waste of coal gangue[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(10): 54 – 66. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 朱磊, 古文哲, 袁超峰, 等. 煤矸石浆体充填技术应用 & 展望 [J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(4): 93 – 104. [ ZHU Lei, GU Wenzhe, YUAN Chaofeng, et al. Application and prospect of coal gangue slurry filling technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 93 – 104. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 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 & 展望 [J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 143 – 154. [ ZHU Lei, GU Wenzhe, SONG Tianqi, et al. Research progress and prospect of coal gangue slurry backfilling technology in goaf[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 143 – 154. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 杨晓炳. 低品质多固废协同制备充填料浆及其管输阻力研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2020: 21 – 22. [ YANG Xiaobing. Study on the collaborative preparation of backfilling materials with low quality and multi-solid wastes and their pressure drop in pipeline transportation[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020: 21 – 22. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 郝宇鑫, 黄玉诚, 李育松, 等. 矸石似膏体充填料浆临界流速影响因素研究 [J]. *煤炭工程*, 2022, 54(4): 128 – 133. [ HAO Yuxin, HUANG Yucheng, LI Yusong, et al. Influencing factors of critical flow rate of gangue paste-like filler slurry[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(4): 128 – 133. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 甘德清, 闫泽鹏, 薛振林, 等. 考虑壁面滑移效应的充填料浆管道输送阻力研究 [J]. *金属矿山*, 2020(9): 26 – 32. [ GAN Deqing, YAN Zepeng, XUE Zhenlin, et al. Study on the resistance of cemented paste backfill slurry pipeline transport considering wall slip effect[J]. *Metal Mine*, 2020(9): 26 – 32. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 杨天雨. 膏体管道输送边界层效应及阻力特性 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021: 137 – 164. [ YANG Tianyu. Boundary layer effect and resistance characteristics of paste pipeline transportation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021: 137 – 164. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 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(增刊 1): 39 – 48. [ ZHU Lei, SONG Tianqi, GU Wenzhe, et al. Experimental research on transport-resistance characteristics of gangue slurry and its flow trend in goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(Sup1): 39 – 48. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 张卫清, 梅璟昕, 柴军, 等. 全煤矸石基地质聚合物固结体制备及力学性能 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 42(3): 673 – 683. [ ZHANG Weiqing, MEI Jingxin, CHAI Jun, et al. Preparation and mechanical properties of coal gangue-based geopolymer consolidation[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 42(3): 673 – 683. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 殷文文, 张理群, 丁丹, 等. 淮南潘一矿煤基固废精细化学结构及重金属生态风险评价 [J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(12): 176 – 184. [ YIN Wenwen, ZHANG Liqun, DING Dan, et al. Coal-based solid waste from the

- Panyi Mine in the Huainan mining area: Fine-scale chemical structure and ecological risk assessment of heavy metals[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(12): 176 – 184. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 占俊雄, 卢金山, 刘智勇, 等. 大宗固体废渣制备地质聚合物及其性能和应用研究进展 [J]. 陶瓷学报, 2021, 42(1): 54 – 62. [ ZHAN Junxiong, LU Jinshan, LIU Zhiyong, et al. Progress in the preparation, physical properties and applications of geopolymers from bulk solid wastes[J]. *Journal of Ceramics*, 2021, 42(1): 54 – 62. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 张卫清, 柴军, 冯秀娟, 等. 煤矸石地质聚合物的制备及微观结构 [J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 539 – 547. [ ZHANG Weiqing, CHAI Jun, FENG Xiujuan, et al. Preparation and microstructure of coal gangue-based geopolymer[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 539 – 547. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] AMRAN M, DEBBARMA S, OZBAKKALOGLU T. Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: 121857.
- [22] 刘恒凤, 张吉雄, 周楠, 等. 矸石基胶结充填材料重金属浸出及其固化机制 [J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 523 – 531. [ LIU Hengfeng, ZHANG Jixiong, ZHOU Nan, et al. Study of the leaching and solidification mechanism of heavy metals from gangue-based cemented paste backfilling materials[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 523 – 531. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] ZHANG Weiqing, DONG Chaowei, HUANG Peng, et al. Experimental study on the characteristics of activated coal gangue and coal gangue-based geopolymer[J]. *Energies*, 2020, 13(10): 2504.
- [24] YI Chen, MA Hongqiang, CHEN Hongyu, et al. Preparation and characterization of coal gangue geopolymers[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 318 – 326.
- [25] 董猛, 李江山, 陈新, 等. 煤系固废基绿色充填材料制备及其性能研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 75 – 84. [ DONG Meng, LI Jiangshan, CHEN Xin, et al. Preparation of coal-series solid-waste-based green filling materials and their performance[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 75 – 84. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 王菲, 刘泽, 韩乐, 等. 活化煤矸石地质聚合物的制备与性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 914 – 920. [ WANG Fei, LIU Ze, HAN Le, et al. Preparation and properties of activated coal gangue geopolymer[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(3): 914 – 920. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 杨正辉, 朱涛, 张东生, 等. 纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和钢纤维复合增强煤矸石-矿渣基地聚合物灌浆材料的性能研究 [J/OL]. 材料导报, (2024-11-01) [2025-04-04]. [ YANG Zhenghui, ZHU Tao, ZHANG Dongsheng, et al. Study on the properties of Nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  and steel fiber composite reinforced geopolymer grouting materials[J/OL]. *Materials Reports*, (2024-11-01) [2025-04-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20241101.1142.004.html>. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 郭凌志, 周梅, 王丽娟, 等. 煤基固废地聚物注浆材料的制备及性能 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25(10): 1092 – 1100. [ GUO Lingzhi, ZHOU Mei, WANG Lijuan, et al. Preparation and properties of coal-based solid waste geopolymer grouting materials[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(10): 1092 – 1100. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 刘子豪, 刘俊芳, 崔潮, 等. 基于响应面法的二元固废地聚物配比优化试验研究 [J]. 材料导报, 2024, 38(增刊 2): 265 – 271. [ LIU Zihao, LIU Junfang, CUI Chao, et al. Response surface method-based experimental study on mixing proportion optimization for binary solid-waste geopolymer[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(Sup2): 265 – 271. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 石起振, 周梅, 白金婷, 等. 煤矸石对煤基固废地聚物注浆材料性能的影响 [J/OL]. 建筑材料学报, (2025-01-07) [2025-04-04]. [ SHI Qizhen, ZHOU Mei, BAI Jinting, et al. Influence of coal gangue on the properties of coal-based solid waste geopolymer grouting material [J/OL]. *Journal of Building Materials*, (2025-01-07) [2025-04-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20250106.1521.004.html>. (in Chinese with English abstract) ]
- [31] 葛洁雅, 朱红光, 李宗徽, 等. 煤矸石粗骨料-地聚物混凝土的力学与耐久性能研究 [J]. 材料导报, 2021, 35(增刊 2): 218 – 223. [ GE Jieya, ZHU Hongguang, LI Zonghui, et al. Study on mechanics and durability of coal gangue coarse aggregate-geopolymer concrete[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(Sup2): 218 – 223. (in Chinese with English abstract) ]
- [32] ZHOU Shukui, LI Jiali, RONG Lishan, et al. Immobilization of uranium soils with alkali-activated coal gangue-based geopolymer[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2021, 329(3): 1155 – 1166.

- [33] ZHAO Shujie, XIA Ming, YU Lin, et al. Optimization for the preparation of composite geopolymers using response surface methodology and its application in lead-zinc tailings solidification[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 266: 120969.
- [34] 易富, 姜珊, 慕德慧, 等. 流态地聚物固化土强度特性及其强度预测 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 60 - 68. [YI Fu, JIANG Shan, MU Dehui, et al. Strength characteristics and strength prediction of fluid geopolymer solidified soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(1): 60 - 68. (in Chinese with English abstract) ]
- [35] 陈忠清, 朱泽威, 吕越. 粉煤灰基聚物加固土的强度及抗冻融性能试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 100 - 108. [CHEN Zhongqing, ZHU Zewei, LV Yue. Laboratory investigation on the strength and freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer stabilized soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 100 - 108. (in Chinese with English abstract) ]
- [36] 王树帅, 杨仁树, 李永亮, 等. 风积沙胶结充填体力学特性与破坏特征研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(2): 418 - 429. [WANG Shushuai, YANG Renshu, LI Yongliang, et al. Study on mechanical properties and failure characteristics of cemented aeolian sand backfill[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2025, 42(2): 418 - 429. (in Chinese with English abstract) ]
- [37] 邱华富, 李宇航, 刘浪, 等. 循环荷载尾砂胶结充填体声发射特征 [J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(1): 74 - 85. [QIU Huaifu, LI Yuhang, LIU Lang, et al. Acoustic emission characteristics of cemented tailings backfill under cyclic loading[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2025, 45(1): 74 - 85. (in Chinese with English abstract) ]
- [38] 任才富, 王栋民, 房奎圳, 等. 固废基注浆材料的性能与硬化机理研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(4): 1328 - 1336. [REN Caifu, WANG Dongmin, FANG Kuizhen, et al. Properties and hardening mechanism of solid waste based grouting materials[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(4): 1328 - 1336. (in Chinese with English abstract) ]
- [39] 中国建筑材料联合会. 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. [China Building Materials Federation. Test method of cement mortar strength (ISO method): GB/T 17671—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese) ]
- [40] 石油地质勘探专业标准化委员会. 油气井核磁共振录井规范: SY/T 6747—2014[S]. 北京: 石油工业出版社, 2015. [Petroleum Geology Exploration Professional Standardization Committee. Specification for NMR physical property logging of oil and gas wells: SY/T 6747—2014[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015. (in Chinese) ]
- [41] 石油工业标准化技术委员会和石油测井专业标准化委员会. 岩样核磁共振参数实验室测量规范 SY/T 6490—2014[S]. 北京: 石油工业出版社, 2015. [Petroleum Industry Standardization Technical Committee and Petroleum Logging Professional Standardization Technical Committee. Specification for measurement of rock NMR parameter in laboratory: SY/T 6490—2014[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015. (in Chinese) ]
- [42] GARCIA-LODEIRO I, APARICIO-REBOLLO E, FERNÁNDEZ-JIMENEZ A, et al. Effect of calcium on the alkaline activation of aluminosilicate glass[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(6): 7697 - 7707.
- [43] 欧阳高尚, 王劲松, 董腾, 等. 三聚氰胺减水剂对碱激发超细偏高岭土地质聚合物流动性和力学性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(6): 1828 - 1834. [OUYANG Gaoshang, WANG Jinsong, DONG Teng, et al. Effect of melamine water reducer on fluidity and mechanical properties of alkali-activated ultrafine metakaolin based geopolymer[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(6): 1828 - 1834. (in Chinese with English abstract) ]
- [44] GAO Xuan, LIU Qingfeng, CAI Yuxin, et al. A new model for investigating the formation of interfacial transition zone in cement-based materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2025, 187: 107675.
- [45] 朱世彬, 王晓东, 许刚刚, 等. 煤矿采空区充填高浓度胶结材料流变特性试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 69 - 73. [ZHU Shibin, WANG Xiaodong, XU Ganggang, et al. Experimental study on rheological properties of high concentration cementing materials in coal mine goaf filling[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(11): 69 - 73. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 汪美华