

## 吸水树脂在矿山充填体中应用的可行性研究

苏红力<sup>1</sup>, 蒋江晨<sup>2</sup>

(1. 西藏江南矿业股份有限公司, 西藏 山南 856100; 2. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

**摘要:** 为了缓解矿山排水系统的压力, 解决充填料浆输送至采空区过程中因泌水现象带来的施工影响及排水成本增加问题, 本文通过将吸水树脂添加到充填体中, 系统测试并分析了其对充填体性能的影响。结果表明: 吸水树脂能够有效降低充填体内部水分含量, 适量添加可提升充填体强度, 而过量则会导致强度下降; 微观结构分析进一步揭示了吸水树脂对水泥水化反应及孔隙结构的影响机制。本文成果可为吸水树脂在矿山充填工程中的合理应用提供理论依据和技术借鉴。

**关键词:** 吸水树脂; 充填体; 强度; 微观结构

**中图分类号:** TQ324.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-8993(2025)07-0008-06

**doi:** 10.13402/j.gcjs.2025.07.082

## Feasibility study on application of absorbent resin in mine obturator

SU Hongli<sup>1</sup>, JIANG Jiangchen<sup>2</sup>

(1. Xizang Jiangnan Mining Co., Ltd., Shannan 856100, Xizang, China;

2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410100, Hunan, China)

**Abstract:** In order to alleviate the pressure of the mine drainage system and solve the problem of the construction impact and the increase of drainage cost caused by the water leakage phenomenon in the process of conveying the filling slurry to the goaf, the effect of absorbent resin on the performance of the obturator is systematically tested and analyzed by adding it to the obturator. The results show that the absorbent resin can effectively reduce the moisture content in the obturator, and the appropriate amount can improve the strength of the obturator, while the excess will lead to the decrease of strength. The microstructure analysis further reveals the influence mechanism of water-absorbing resin on the hydration reaction and pore structure of cement. The results can provide a theoretical basis and technical reference for the rational application of absorbent resin in mine filling engineering.

**Key words:** absorbent resin; obturator; strength; microstructure

矿山充填体主要由骨料和胶凝物组成, 部分矿山为了改善充填体的性能, 还会添加外加剂。其中, 骨料一般采用尾砂等矿山固废材料, 而胶凝材料通常为水泥或自制的新型胶凝材料。将充填体填充至采空区不仅可以有效防止采空区塌陷, 还能解决固体废弃物对环境造成的污染以及土地资源的占用问题<sup>[1-2]</sup>。然而, 在实际应用过程中,

充填料浆输送至采空区后常伴随大量泌水现象, 给矿山生产带来诸多不便, 例如影响施工效率、存在安全隐患、增加排水设施负担等。为了解决这一问题, 有必要对充填体的泌水性能进行深入研究。吸水树脂具有较强的吸水能力<sup>[3]</sup>, 因此可将其应用于充填体中以缓解泌水问题。但吸水树脂的加入也可能对充填体的物理力学性能产生一

**收稿日期:** 2025-03-23

**基金项目:** 国家应急管理部重点研发计划(2024YFB2908800)

**作者简介:** 苏红力(1973—), 男, 高级工程师, 从事矿山开采管理及技术研究。

定影响。因此, 系统地研究吸水树脂对充填体性能的影响, 对于评估其在矿山工程中的应用可行性具有重要意义。

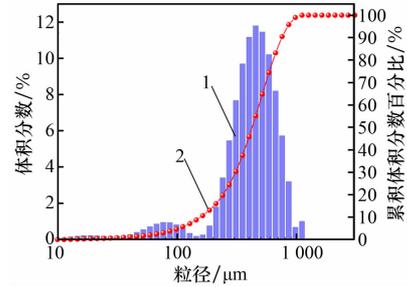
充填体性能的研究主要包括力学性能和微观结构特征两个方面<sup>[4-6]</sup>。充填体在矿山工程中主要起支撑作用, 因此力学性能研究多集中在单轴抗压强度上。而在微观结构方面, 则重点关注孔隙结构及水化产物的形成情况。以往的研究中, 常用手段包括单轴压缩试验、核磁共振、压汞法以及扫描电镜等技术<sup>[6-9]</sup>。其中, 单轴抗压强度是衡量充填体力学性能的重要指标, 也是判断其是否适用于矿山工程的基本依据之一。扫描电镜技术则不仅可用于观察微观结构, 还可用于分析孔隙分布及形态特征。不同放大倍数的扫描电镜图像用途各异: 高倍率的图像有助于观察水化产物的形貌和孔隙结构细节; 低倍率图像则更适合分析孔隙分布及骨料的排列状态。如, 李文臣等<sup>[7]</sup>通过单轴抗压强度测试, 研究了不同类型胶结剂及不同浓度硫酸盐条件下充填体早期强度的变化规律; LIU 等<sup>[10]</sup>则利用扫描电镜对充填体中的水化产物和孔隙结构进行了详细分析。此外, 借助数字图像处理技术, 研究人员还可从扫描电镜图像中提取孔隙特征参数, 如宋迪迪等<sup>[11]</sup>通过图像分析软件获取了孔隙直径和圆形度等关键参数。然而, 直接利用软件处理扫描电镜图像所得结果精度有限, 通常还需对图像进行预处理以提高分析准确性。

基于上述研究基础, 本文通过选用尾砂和水泥作为主要充填原料, 并引入吸水树脂作为外加剂制备充填体试样, 系统研究吸水树脂对充填体性能的影响, 重点考察其力学性能的变化规律, 并结合扫描电镜技术和数字图像处理方法, 对充填体的微观结构特征进行分析, 以期为解决充填体泌水问题及优化充填材料性能提供实践借鉴与参考依据。

## 1 试验方案

采用某矿山的尾砂作为骨料, 水泥作为胶凝材料, 吸水树脂作为外加剂。利用激光粒度仪对尾砂的粒径进行测试, 其分布情况如图 1 所示;

同时对其物理性质进行分析, 结果如表 1 所示。所用水泥为普通硅酸盐水泥(P·O 42.5), 高吸水树脂为市售产品, 其吸水率为自身重量的 200 倍。



1—体积分数; 2—累积曲线。

图 1 尾砂粒径分布

表 1 尾砂物理性质

堆积密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	最大孔隙度/%	自然休止角/( $^{\circ}$ )
1 570	49.5	37.5

试验中, 充填体灰砂比为 1:10, 料浆质量分数为 78%, 吸水树脂的添加量分别为拌合水量的 0、1/150、1/100、1/50, 并依次标记为  $A_0$  (对照组)、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 。将搅拌均匀制备好的料浆注入模具中成型, 待试样凝固后脱模, 并放入养护箱中进行养护, 养护时间为 7 d。

测试内容分为两部分: 第一部分为强度测试, 其过程是将试样置于承压板中心位置, 设置加载速率后进行加载直至破坏; 第二部分为扫描电镜测试, 具体操作是从强度测试后破碎的试样中选取中心部位的碎片, 经干燥和喷金处理后, 在扫描电镜下选择不同放大倍率进行微观结构观察, 具体流程如图 2 所示。

## 2 结果分析

### 2.1 抗压强度分析

抗压强度是评估充填材料是否适用于矿山工程的重要力学指标。各组试件的强度测试结果如图 3 所示。由图 3 可知: 随着吸水树脂添加量的增加, 充填体的强度先升高后下降, 这表明适量的吸水树脂有助于提升强度, 而过量添加剂则会产生不利影响。根据对试样表面的观察发现, 添加了吸水树脂的充填材料表面明显比未添加的试样更为干燥。充填材料中的水分对强度具有显著影响, 当含水量较高时, 强度会明显降低<sup>[12]</sup>, 这也

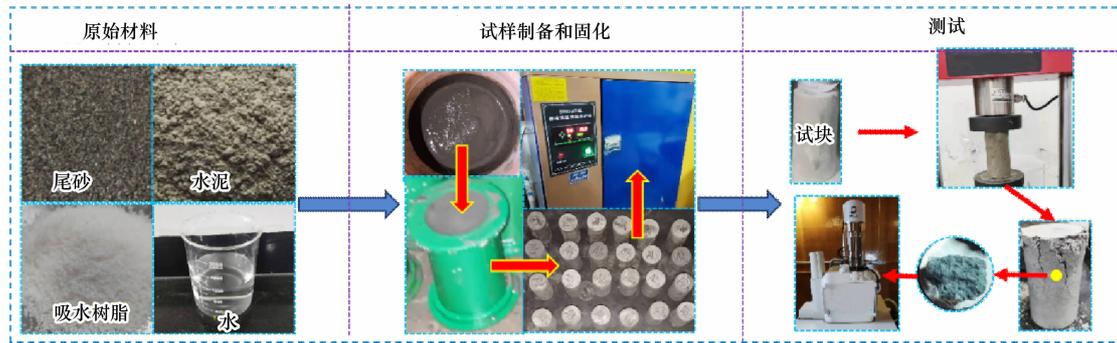


图 2 试验流程

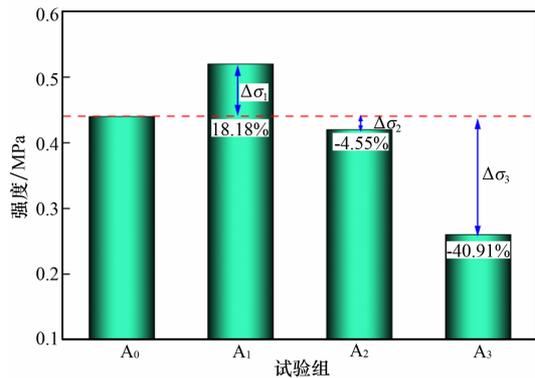


图 3 不同添加量吸水树脂的充填体强度特性

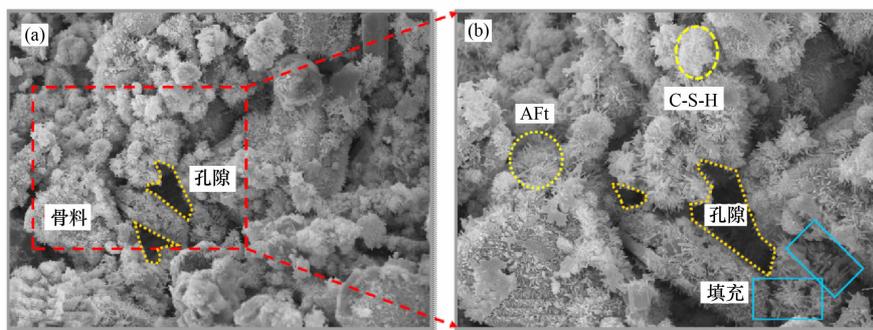
是 A<sub>1</sub> 组强度高于 A<sub>0</sub> 组的原因之一。A<sub>2</sub> 组和 A<sub>3</sub> 组强度低于 A<sub>1</sub> 组的原因在于：这两组中吸水树脂的掺量更高，在吸水后发生体积膨胀，导致充填体内大孔隙数量增加；同时，过量的水分吸收也可能阻碍水泥的正常水化反应，从而进一步削弱材料强度。式 (1) 为充填体强度增长率计算公式。通过计算发现，在适量添加吸水树脂的情况下，其强度可提高 18.18%；然而当添加量过多时，强度反而会降低 40.91%。因此，在实际应用中应严格控制吸水树脂的掺量，以避免对其力学性能产生负面影响。

$$\Delta\sigma_i = \frac{\sigma_i - \sigma_0}{\sigma_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $\Delta\sigma_i$  为强度增长率； $\sigma_i$  为测试组强度，MPa； $\sigma_0$  为对照组强度，MPa。

## 2.2 微观结构分析

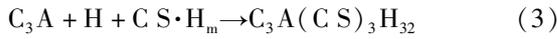
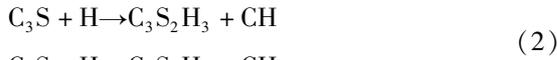
扫描电镜图像可用于定性分析充填材料的微观结构，并通过产物的形貌特征识别其类型。通常情况下，针状或棒状晶体为钙矾石 (AFt)，絮凝状不定形态物质为 C-S-H 凝胶，而六方片状结构则为氢氧化钙 (CH)<sup>[13]</sup>。根据上述判别标准，从图 4 可以看出，充填体内主要生成的水化产物为钙矾石和 C-S-H 凝胶，部分附着于骨料表面，部分填充在孔隙之中。根据水泥水化反应方程式 [式 (2)、(3)]<sup>[14-15]</sup> 可知，水泥水化过程需要水分参与。若吸水树脂掺量过大，大部分水分将被其吸收，导致用于水泥水化的有效水量减少，从而抑制或延缓水化反应的进行。此外，如果料浆中水分含量过高，在泌水过程中，水泥颗粒可能随水分被带出充填体，进而降低其中水泥的实际含量，对强度发展产生不利影响。适量添加吸水树脂有助于缓解这一问题，从而维持充填材料



(a) 1 000 倍；(b) 2 000 倍

图 4 不同倍率下的电镜图

的力学性能稳定。



式中:  $C_3S$  为硅酸三钙的缩写;  $C_2S$  为硅酸二钙的缩写;  $C_3S_2H_3$  为水化硅酸钙 ( $C-S-H$ ) 的缩写;  $CH$  为氢氧化钙的缩写;  $C_3A$  为铝酸三钙的缩写;  $C\bar{S} \cdot H_m$  为石膏的缩写;  $C_3A(C\bar{S})_3H_{32}$  为钙矾石 (AFt) 的缩写。

### 2.3 充填体孔隙特征

#### 2.3.1 孔隙参数

数字图像处理技术的应用流程: 首先将扫描电镜图像转化为二值化图像, 随后利用图像分析软件对二值化图像进行参数提取, 最终获得扫描电镜图像的孔隙结构参数。具体流程如图 5 所示。本文采用数字图像处理技术对各组扫描电镜图像进行处理, 提取其孔隙特征数据<sup>[11,16]</sup>, 结果如图 6、表 2 所示。由于各组图像的孔隙结构特征相似, 本次分析以 A0 组为例进行说明。由图 6 可知: 大多数孔隙的直径较小, 孔径小于平均值的孔隙所占比例超过 70%。此外, 由表 2 可知: 随着吸水树脂添加量的增加, 充填体的孔隙平均直径、周长等参数呈现先减小后增大的趋势, 表明适量添加吸水树脂有助于降低孔隙尺寸, 从而改善材料的微观结构。

#### 2.3.2 分形特征

充填体的强度与孔隙的分布特征密切相关, 而孔隙结构的复杂性则可通过分形维数进行表征。由于各组样品的分形特征相似, 以 A<sub>0</sub> 组为例进行分析, 计算结果如图 7 所示。由图 7 可知: 孔隙的

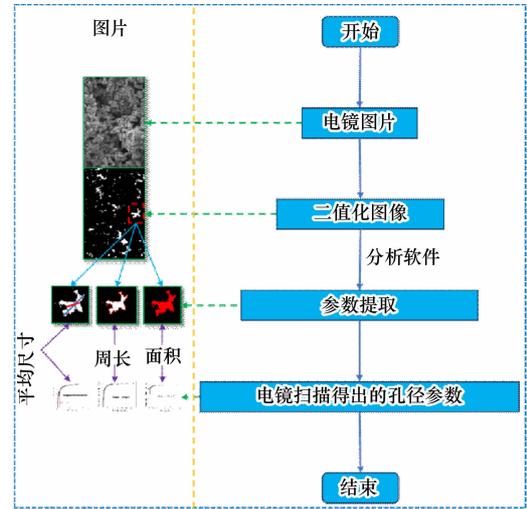


图 5 数字图像处理技术的处理过程

表 2 充填体孔隙参数值

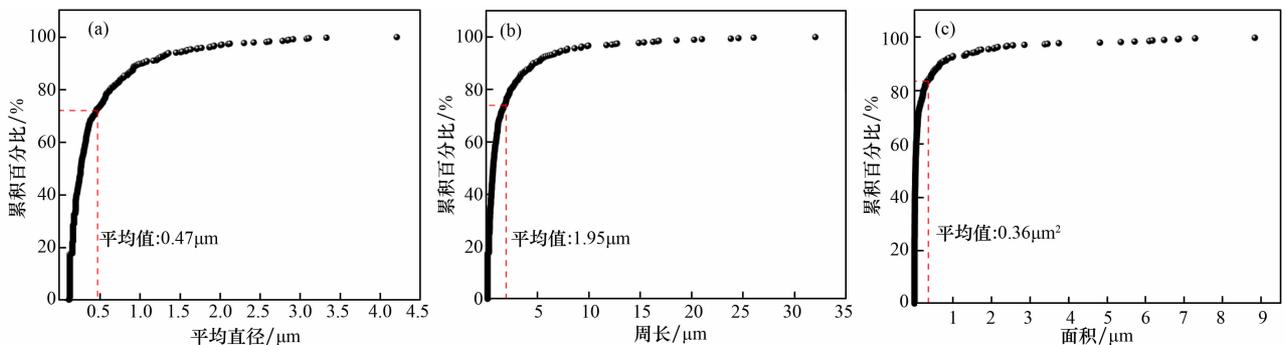
组别	平均直径/ $\mu\text{m}$	周长/ $\mu\text{m}$	面积/ $\mu\text{m}^2$
A <sub>0</sub>	0.47	1.95	0.36
A <sub>1</sub>	0.39	1.51	0.22
A <sub>2</sub>	0.46	2.03	0.40
A <sub>3</sub>	0.53	2.33	0.54

周长与面积之间具有明显的正相关关系。对其进行线性拟合分析后, 拟合决定系数  $R^2$  为 0.98, 表明拟合效果良好; 拟合曲线斜率为 1, 说明利用孔隙面积和周长进行分形维数计算能有效反映充填体孔隙结构的复杂程度。分形维数的具体计算方法如式 (4) 所示。

$$\ln(P) = \frac{D}{2} \ln(A) + D \ln C \quad (4)$$

式中:  $D$  为分形维数;  $P$  为周长,  $\mu\text{m}$ ;  $A$  为面积,  $\mu\text{m}^2$ ;  $C$  为常数。

经计算, A<sub>0</sub> 组 ~ A<sub>4</sub> 组的分形维数分别为



(a) 孔隙直径累积变化曲线; (b) 孔隙周长累积变化曲线; (c) 孔隙面积累积变化曲线

图 6 SEM 图像孔隙参数特征

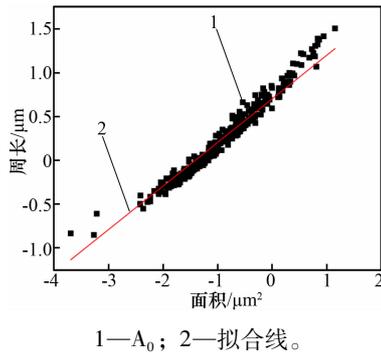
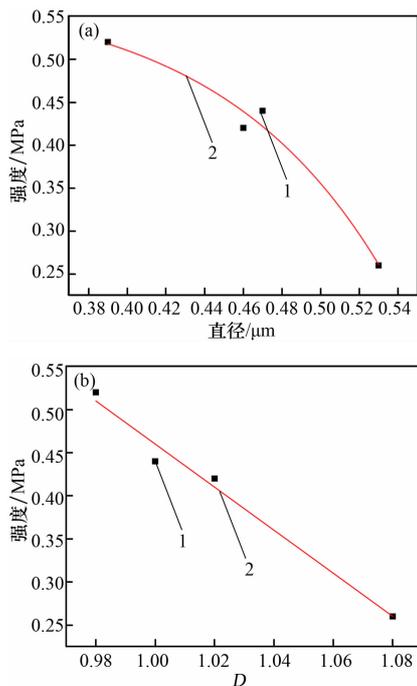


图 7 充填体内孔隙分形特征

1.00、0.98、1.02、1.08，呈现出先减小后增大的变化趋势，表明在吸收树脂的作用下，除了孔隙尺寸发生变化外，其结构复杂性也经历了先趋于简化、随后又逐渐增强的过程。

#### 2.4 强度与孔隙参数间的关系

利用上述试验数据，建立充填强度与孔隙参数之间的关系模型，结果如图 8 所示。由图 8 可知：二者拟合效果良好 ( $R^2 = 0.98$ )，其关系可由式(5)、(6)描述。



(a) 强度与孔隙直径关系曲线；  
(b) 强度与分形维数关系曲线  
1—强度；2—拟合曲线。

图 8 充填体强度与孔隙参数之间的关系

$$y = -0.0007e^{11.68x} + 0.58 \quad (5)$$

$$y = -2.5D + 2.96 \quad (6)$$

式中： $x$  为平均直径， $\mu\text{m}$ ； $x$  为分形维数； $y$  为单

轴抗压强度，MPa。

由式(5)可知：充填体的孔隙尺寸与强度之间存在指数递减关系，即平均孔径越大，强度越低，且呈指数下降趋势。因此，降低孔隙的平均直径是提升充填体强度的有效手段。由式(6)可知：强度与分形维数之间呈线性负相关关系，表明孔隙结构越复杂、数量越多、形态越不规则，强度下降越显著。

结合前述分析结果可以明显看出，适量添加吸水树脂能够有效减小充填体的孔隙尺寸及其不规则程度，从而提高其强度性能。

### 3 结 论

(1) 吸水树脂的添加可有效降低充填体中的水分含量，适量掺入还能提升其强度；但若掺量过高，则会对强度产生不利影响。

(2) 通过微观结构观察发现，充填体中水泥的水化产物主要包括钙矾石和 C-S-H 胶凝。当吸水树脂掺量过多时，其会吸收水泥水化反应所需的水分，导致水化反应减缓；同时，吸水树脂在吸水后发生膨胀，使得充填体内孔隙增大，从而造成强度下降。

(3) 适量添加吸水树脂能够有效减小充填体孔隙的尺寸及其不规则程度，从而显著改善其力学性能。

(4) 当吸水树脂掺量为水质量的 1/150 时，充填体的强度得到了较好提升。后续可进一步研究不同粒径尾砂及不同类型胶凝材料的影响，以获得更为全面的吸水树脂应用规律，为其在矿山工程中的实际应用提供理论支持。

### 参考文献：

- [1] 刘浪,方治余,张波,等. 矿山充填技术的演进历程与基本类别[J]. 金属矿山,2021(3):1-10.
- [2] 梁志强. 新型矿山充填胶凝材料的研究与应用综述[J]. 金属矿山,2015(6):164-170.
- [3] 远明珠. 采空区高分子吸水树脂(SAP)充填材料物理力学性能研究[D]. 西安:长安大学,2021.
- [4] MIN C D,XIONG S,SHI Y, et al. Early-age compressive strength prediction of cemented phosphogypsum backfill using lab experiments and ensemble learning models

- [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e02107.
- [5] QIU H F, ZHANG F S, LIU L, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of cemented rock-tailings backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 315: 125278.
- [6] 张友志, 甘德清, 薛振林, 等. 基于 NMR 技术的孔隙结构与充填体强度关联机制[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(4): 121 – 128.
- [7] 李文臣, 王忠红, 郭利杰, 等. 尾砂胶结充填体试样早期强度与孔结构关联规律研究[J]. *中国矿业*, 2018, 27(10): 143 – 147.
- [8] 赵康, 何志伟, 严雅静, 于等. 纤维增强超细尾砂充填体微观破坏机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(增刊 1): 3010 – 3020.
- [9] 赵文华, 崔锋, 刘鹏亮, 等. 粉煤灰 – 脱硫石膏充填材料性能及微观结构研究[J]. *中国矿业*, 2022, 31(9): 132 – 138.
- [10] LIU L, FANG Z Y, QI C C, et al. Experimental investigation on the relationship between pore characteristics and unconfined compressive strength of cemented paste backfill [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 254 – 264.
- [11] 宋迪迪, 张根广, 张宇卓, 等. Image-pro plus 软件在泥沙絮凝体结构特征分析中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(4): 156 – 161.
- [12] 钱觉时, 余金城, 孙化强, 等. 钙矾石的形成与作用[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(11): 1569 – 1581.
- [13] XU L, WANG J J, LI K F, et al. Investigations on the rehydration of recycled blended SCMs cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2023, 163: 107036.
- [14] YANG P, SUO Y L, LIU L, et al. Study on the curing mechanism of cemented backfill materials prepared from sodium sulfate modified coal gasification slag[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 62: 105318.
- [15] 刘光宗, 方水平, 陈小燕. 基于各相矿物组成含量的水泥水化动力学模型[J]. *四川建筑科学研究*, 2012, 38(1): 164 – 167.
- [16] 陈恋, 袁梅, 许石青, 等. 数字图像技术结合小島法在煤分形特征中的应用[J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(3): 77 – 83.

(上接第 7 页)

- [35] ZHANG X M, QIN Y, CHEN Z H, et al. Experimental behavior of innovative T-shaped composite shear walls under in-plane cyclic loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 120: 143 – 159.
- [36] JI X D, CHENG X W, JIA X F, et al. Cyclic in-plane shear behavior of double-skin composite walls in high-rise buildings [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(6): 04017025.
- [37] 李健, 韩广强, 李峰, 等. L 形截面双钢板组合剪力墙受力性能有限元分析[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(5): 70 – 80.
- [38] 董美静. Z 形双钢板 – 混凝土组合剪力墙抗震性能研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
- [39] 张冯霖. L 形双波纹钢板 – 混凝土组合剪力墙抗震性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [40] 王梦争. T 形截面波形钢板组合墙设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2021.
- [41] 许新颖, 陈宗平, 张冯霖, 等. T 形双波纹钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(3): 176 – 189.
- [42] 陈宗平, 莫琳琳, 许新颖, 等. 低周反复荷载下 T 型双波纹钢板混凝土组合剪力墙受力性能试验研究[J]. *工程力学*, 2024, 41(6): 87 – 104.
- [43] 仇紫璇. T 形双波纹钢板 – 混凝土组合剪力墙抗震性能有限元分析[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- [44] 李清华. 工字形双波纹钢板 – 混凝土组合剪力墙力学性能有限元分析[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2021.