

机械-热活化建筑垃圾制备再生微粉及机理研究

王 全¹, 陈永亮^{1,2}, 朱肖情¹, 杨金健¹, 李傲君³

- (1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 武汉 430081;
2. 国家环境保护矿冶资源利用与污染控制重点实验室, 武汉 430081;
3. 宝武环科武汉金属资源有限责任公司, 武汉 430081)

摘 要: 为了促进建筑垃圾资源化利用, 采用机械-热处理联合活化建筑垃圾制备再生微粉, 研究了不同球磨时间和煅烧温度对建筑垃圾活性激发效果的影响, 并利用 X 射线衍射 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 揭示其微观结构和作用机理。结果表明: 再生微粉经过 30 min 球磨后, 其活性指数可达到 79.0%。继续进行煅烧处理可进一步提高其活性, 当煅烧温度为 800 ℃ 时, 再生微粉的活性指数达到 96.0%, 主要性能满足 JG/T573—2020《混凝土和砂浆用再生微粉》的要求。微观分析表明, 机械球磨可以增大微粉的比表面积, 改善粒度分布, 促进水化反应的进行, 经过 800 ℃ 活化的再生微粉可水化生成大量片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与絮状 C-S-H 凝胶紧密粘接, 针状钙矾石交织穿插形成网状结构, 提高了试块强度。为建筑垃圾再生微粉的应用提供技术指导和理论依据。

关键词: 建筑垃圾; 再生微粉; 机械活化; 热活化; 活性指数; 水化产物

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0050-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.008

Preparation of Recycled Fine Powder by Mechanically-Thermal Activation of Construction Waste and Mechanism

WANG Quan¹, CHEN Yongliang^{1,2}, ZHU Xiaoqing¹, YANG Jinjian¹, LI Aojun³

- (1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of
Science and Technology, Wuhan 430081, China;
2. National Key Laboratory of Mining and Metallurgical Resources Utilization and Pollution
Control for Environmental Protection, Wuhan 430081, China;
3. Baowu Huanke Wuhan Metal Resources Co., Ltd., Wuhan 430081, China)

Abstract: In order to promote the resource utilization of construction waste, construction waste recycled fine powder was prepared by combined activation of mechanical and thermal treatment. The effects of different ball milling times and calcination temperatures on the activity excitation were studied, and the microstructure and action mechanism were analyzed by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). The results show that after 30 minutes of ball milling, the activity index of recycled fine powder reaches 79.0%. Further firing treatment at 800 ℃ can improve the activity, the activity index

作者简介: 王 全 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 固废资源化研究。

通信作者: 陈永亮 (1977—), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 新型建筑材料、环境功能材料及固废资源化研究。

收稿日期: 2025-02-14

reaches 96.0% and main properties meet the requirements of " Regenerated Micropowder for Concrete and Mortar" JG/T573-2020. Microscopic analysis shows that mechanical ball milling can increase the specific surface area of the fine powder and improve the particle size distribution to promote the hydration reaction. After the fine powder is activated at 800 ℃ , a large number of plate-like $\text{Ca}(\text{OH})_2$ are closely bonded with the flocculent C-S-H gel, and acicular ettringite are interwoven to form a network structure in hydration product, which improves the strength of the test block.

Key words: construction waste; recycled fine powder; mechanical activation; thermal activation; activity index; hydration product

0 引言

随着城市化进程加快，建筑行业迅速发展，建筑垃圾大量产生，主要包括建设、铺设或拆除过程中产生的渣土、混凝土块、砖瓦碎块等废弃物^[1]。目前，大部分建筑垃圾未经处理或仅简单处理后露天堆放或填埋，不仅占用大量土地资源，还造成环境污染，并带来安全隐患^[2]，如何高效利用成为当前亟待解决的问题。许多科研工作者针对建筑垃圾再利用进行了大量研究，主要集中在回用于建筑材料领域，如制备再生骨料和再生微粉等方面^[3]。

再生骨料因存在孔隙率高、强度低、吸水率高等问题，其推广应用受到限制^[4]。再生微粉是建筑垃圾制备再生骨料过程中产生的或直接加工而成的粒径小于 75 μm 的颗粒，具有微集料效应和潜在胶凝活性，可作为水泥掺合料应用^[5]。在当前矿物掺合料紧缺的形势下，再生微粉的开发利用具有广阔的应用前景^[6]。研究表明，建筑垃圾中含有大量 SiO₂ 和少量 CaO、Al₂O₃，以及未水化的水泥等，具有一定胶凝活性，可通过机械、化学或热活化激发其潜在活性^[7]。其中，机械活化和热活化操作简便、处理量大，是微粉材料活性激发的重要方向。机械活化通常是通过粉磨方式提高微粉颗粒细度和比表面积，从而激发其潜在活性^[8]。李述俊等^[9]发现再生微粉活性随球磨时间延长而增加，细度越大活性越高；杨琳^[10]则认为活性随球磨时间先升后降；楼聪等^[11]也得出了类似结论，认为超过最佳球磨时间后激发效果减弱；张平等^[12]认为最佳球磨时间为 60 min，继续延长无显著变化。热活化是通过煅烧使

体系组分脱水分解，硅铝酸盐矿物结构解体，从稳定态转为亚稳态，从而提高其活性；康晓明等^[13]发现再生微粉经过 800 ℃ 热活化后的活性优于 600 ℃ 热活化；何建恒^[14]得出类似结论，认为最佳活化温度为 600 ℃ 左右；Florea 等^[15]发现 500、800 ℃ 高温处理均能激发活性，800 ℃ 煅烧后可替代 20% 水泥，胶砂试块抗压强度无明显下降。

总之，对于建筑垃圾再生微粉的机械活化和热活化研究尚处初步阶段，研究结论尚不一致，且缺乏深入分析。因此，以混合建筑垃圾为原料制备再生微粉，采用机械-热处理联合方式激发其活性，探索最有效的激发方式及条件，并通过 XRD 和 SEM 分析深入探究机械活化和热活化对建筑垃圾再生微粉活性激发的机理。

1 试验

1.1 试验材料

建筑垃圾取自于建筑废料堆放场，由多种建筑垃圾混合而成，主要组成及占比见表 1，主要包括废弃混凝土、废加气混凝土和渣土，以及少量陶瓷、黏土砖、石膏等，经破碎预处理至粒径 ≤ 5 mm 备用。化学成分分析见表 2，XRD 分析结果如图 1 所示。此外还存在大量无定型矿物的弥散型衍射峰，这些成分均具有潜在活性^[16]。采用 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥；采用 ISO 标准砂；水为自来水。

表 1 混合建筑垃圾成分表							
Table 1 Composition of mixed construction waste							
/%							
混凝土	加气混凝土	黏土砖	石膏	陶瓷	玻璃	渣土	其他
43.2	15.5	6.5	6.9	10.5	1.6	12.9	2.8

表 2 建筑垃圾主要化学组成									
Table 2 Main chemical compositions of construction waste									
/%									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻	烧失量
11.02	60.13	9.02	1.52	2.17	1.27	1.90	1.33		11.03

材料科学

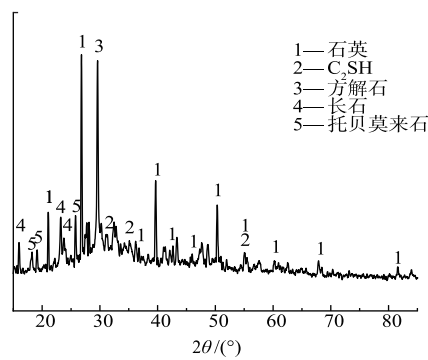


图1 建筑垃圾再生微粉 XRD 图
Fig.1 XRD pattern of recycled fine powder of construction waste

1.2 试验方法

选取 5 mm 钢球作为研磨球，控制球料比为 1 : 3，将破碎预处理后粒径小于 5 mm 的建筑垃圾置于行星球磨机（KQM-Y/B）中，以 600 r/min 转速分别球磨 10、20、30、40 和 50 min，得到再生微粉，测试其粒径分布、比表面积及活性指数，研究机械活化对建筑垃圾活性的影响，确定最佳机械活化时间。在此基础上，将最佳条件机械活化后的再生微粉置于马弗炉内，以 10 ℃/min 的升温速率由室温分别升温至 400、600、800、1 000 ℃，并保温 2 h 后随炉冷却，得到活化再生微粉，研究热活化对其活性的影响，探讨最佳热活化条件。并称取 500 g 再生微粉，固定水胶比 0.3，制备 30 mm×30 mm×50 mm 净浆试块，进行表征分析，探讨建筑垃圾再生微粉的活化机理。

1.3 性能测试与表征

利用全谱直读等离子体发射光谱仪（ICP-AES）测定建筑垃圾化学成分，采用 Mastersizer-2000 激光粒度分析仪对不同球磨时间的再生微粉进行粒度测试，参照 GB/T 8074—2008《水泥比表面积测定方法（勃氏法）》测定再生微粉比表面积，根据 JG/T 573—2020《混凝土和砂浆用再生微粉》测定再生微粉 3、7、28 d 活性指数及其他性能指标。通过 X 射线衍射仪（SmartLab SE）分析原料及净浆试块的矿物组成，利用扫描电镜（Apreo S HiVac）分析再生微粉及净浆试块的微观形貌结构。

2 结果与讨论

2.1 球磨时间对再生微粉粒径与比表面积的影响

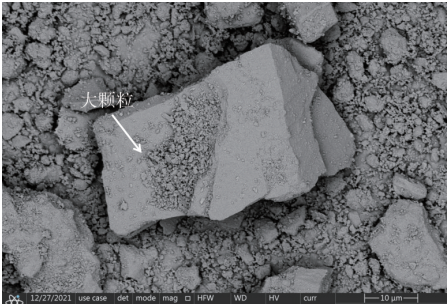
由表 3 可知，随着球磨时间的延长，再生微粉粒度（D90）先减小后增大，比表面积则先增大后趋于稳定。当球磨时间从 10 min 增至 30 min 时，比表面

积从 199 m²/kg 增至 401 m²/kg，说明机械球磨中的冲击、剪切和磨削作用使颗粒细化，进而使比表面积显著增大。同时，粒径小于 20 μm 的颗粒占比从 52.39% 增至 80.27%，小于 10 μm 的颗粒占比从 34.32% 增至 57.26%，大于 40 μm 的颗粒占比则从 28.60% 降至 3.28%。继续球磨后，比表面积变化不大，大于 40 μm 的颗粒占比显著增加，是因为再生微粉达到粉磨极限，继续球磨导致颗粒团聚所致。因此，最佳球磨时间为 30 min，此时再生微粉粒度 D90 为 32.01 μm，比表面积为 401 m²/kg。

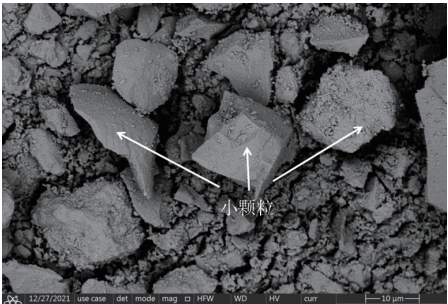
表 3 不同球磨时间建筑垃圾再生微粉粒径占比及比表面积
Table 3 Particle size ratio and specific surface area of recycled fine powder of construction waste with different ball milling times

时间 /min	<10 μm	10~20 μm	20~40 μm	>40 μm	D90/μm	比表面积 /(m ² /kg)
10	34.32	18.07	19.01	28.60	62.12	199
20	53.59	22.67	17.47	6.27	38.67	350
30	57.26	23.01	16.45	3.28	32.01	401
40	53.75	20.09	18.28	7.05	34.36	397
50	49.81	21.83	19.12	9.24	38.67	396

由图 2 可知，相比于球磨 10 min 的微粉，球磨 30 min 后微粉粒径显著减小，细颗粒占比增加，颗粒级配明显改善，与粒径分析结果一致。这是因为



(a) 10 min



(b) 30 min

图 2 不同球磨时间建筑垃圾再生微粉 SEM 图
Fig.2 SEM images of recycled fine powder of construction waste at different ball milling times

更多小颗粒和更优级配可填补砂浆空隙，提高密实度，增强胶砂试块抗压强度，从而提升再生微粉活性。此外，球磨 30 min 后微粉颗粒棱角更明显，表面更粗糙不规则，增强了微粉与水泥浆的吸附力，促进水化反应的进行。

2.2 球磨时间、煅烧温度对再生微粉活性的影响

由图 3 可知，随着球磨时间延长，胶砂试块 3、7、28 d 的抗压强度先增加后略微下降，球磨 30 min 时强度最高。此时，3、7、28 d 抗压强度分别为 15.2、24.0、31.7 MPa，相应再生微粉活性指数 SAI 达到 79.0%，满足 JG/T573—2020《混凝土和砂浆用再生微粉》要求。这是由于混合建筑垃圾中的黏土砖、瓷砖、玻璃与加气混凝土增加了硅酸盐含量，机械力作用下更易转化为无定形态，暴露出更多活性点位，提升再生微粉活性。继续延长球磨时间，胶砂试块抗压强度下降，因再生微粉颗粒的“团聚效应”增大，填充效果变差，微集料效应降低，导致强度下降。

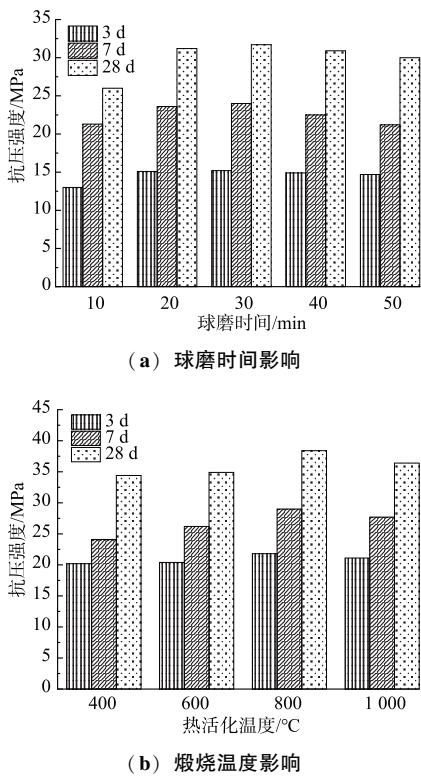


图 3 不同球磨时间和煅烧温度对建筑垃圾再生微粉胶砂试块抗压强度的影响
Fig. 3 Effects of different ball milling times and calcination temperatures on the compressive strength of construction waste recycled fine powder mortar samples

煅烧处理后，胶砂试块抗压强度均有所提升，且随温度升高呈现先升后降趋势。800 °C 时强度最高，3、7 和 28 d 抗压强度分别达 21.8、29.0 和 38.4 MPa，较未煅烧前分别提高 43.4%、20.8% 和 21.1%，活性指数 SAI 达到 96.0%。然而，进一步提高温度会导致强度下降。这是由于煅烧温度升高使再生微粉中的水化产物脱水形成新活性位点，方解石、长石、石英等分解生成新活性成分，促进水化反应，从而提高了试块强度。但过高温度会使活性成分转化为低反应性结晶，导致强度降低。

2.3 综合性能分析

选取球磨 30 min 后再在 800 °C 下煅烧 2 h 所制得的再生微粉样品进行综合性能测试，结果见表 4。建筑垃圾活化再生微粉样品的主要综合性能指标符合 JG/T 573—2020《混凝土和砂浆用再生微粉》的要求。

表 4 最佳条件下活性激发再生微粉综合性能
Table 4 Comprehensive properties of activity-stimulated recycled fine powder under optimal conditions

项目名称	JG/T573—2020 I 级标准	检测结果
细度 (45 μm 方孔筛筛余) /%	≤30.0	26.80
需水量比/%	≤105.0	102.30
活性指数/%	≥70.0	96.00
流动度 2 h 经时变化量/mm	≤40.0	29.40
含水量/%	≤1.0	0.88

2.4 微观分析

2.4.1 XRD 分析

由图 4 可知，未活化、球磨 30 min 以及 800 °C 热活化的再生微粉净浆试块中矿物组成相近，主要包括石英、方解石、C₂SH、Ca (OH)₂、钙矾石、长石和托贝莫来石，其中石英、方解石、C₂SH、长石和托贝莫来石在原建筑垃圾中也存在，Ca (OH)₂、钙矾石主要是再生微粉水化形成的，且球磨 30 min 的试块中 Ca (OH)₂ 和钙矾石的衍射峰强度均有所增强，这是因为延长研磨时间提高了再生微粉的比表面积，有利于促进水化反应的进行。800 °C 活化后的微粉净浆试块中方解石的衍射峰明显减弱，这是由于方解石在高温下分解生成了 CaO 和 CO₂，而新形成的活性 CaO 更容易参与材料中的水化反应，从而产生更多的 C-S-H，从而增强了试块强度。此外，在 2θ 为 30°~35°处出现了“弥散凸包”，说明水化产物中产生了大量非晶态的水化硅酸钙凝胶 C-S-H。

材料科学

因此热活化后再生微粉的水化更充分，生成的产物更多，导致其活性更高，与热活化后其活性指数进一步提高的结果相一致。

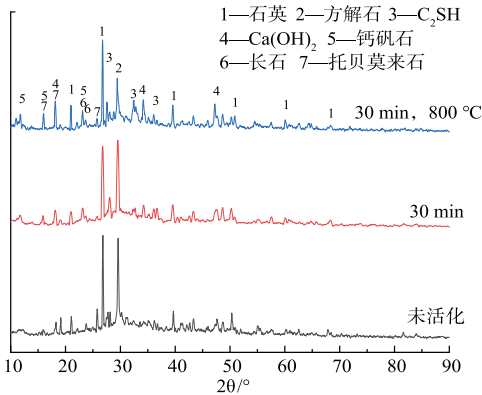
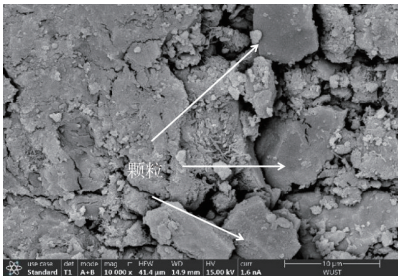


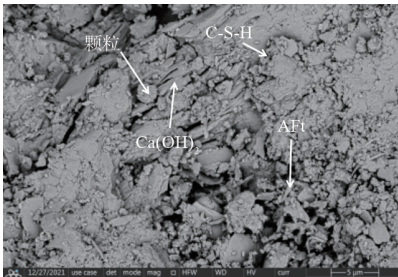
图 4 不同条件活化后建筑垃圾再生微粉净浆试块的 XRD 图谱
Fig. 4 XRD patterns of recycled fine powder paste test blocks of construction waste after activation under different conditions

2.4.2 SEM 分析

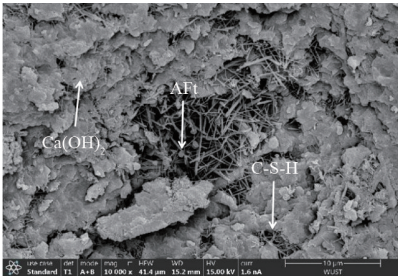
由图 5 可知，未活化建筑垃圾微粉试块中大颗粒较多，结构较松散；球磨 30 min 后，微粉试块结构更加致密，生成了很多絮状 C-S-H 凝胶，黏结在细小颗粒周围，还可见少量板片状 Ca (OH)₂ 和针状钙矾石；800 °C 热活化后，微粉试块中水化产物更加明显，大量片状 Ca (OH)₂ 与絮状 C-S-H 凝胶紧密黏接在一起，针状钙矾石穿插其中形成网状结构，使得材料结构更稳定，强度更高，与 XRD 分析结论一致。



(a) 未活化



(b) 球磨 30 min



(c) 球磨 30 min-热活化 800 °C

图 5 不同条件活化后建筑垃圾再生微粉净浆试块的 SEM 图
Fig. 5 SEM images of construction waste recycled fine powder paste test blocks after activation under different conditions

3 结论

通过试验探究了球磨时间对再生微粉粒径与比表面积的影响，分析了不同球磨时间、煅烧温度下再生微粉活性和微观结构的变化。得出结论如下：

(1) 机械球磨可有效降低再生微粉粒径，改善颗粒级配，提高比表面积，再生微粉活性随球磨时间延长先增加后略微下降，最佳球磨时间为 30 min，再生微粉活性指数达到 79.0%。热处理可进一步提升其活性，且随温度升高，再生微粉活性先升高后降低，最佳活化温度为 800 °C，此时再生微粉活性指数达到 96.0%，主要综合性能指标满足 JG/T573—2020《混凝土和砂浆用再生微粉》的要求。

(2) 微观分析表明，机械活化可有效改善再生微粉的颗粒形貌，并促进水化反应的进行，生成了片状 Ca (OH)₂、针状钙矾石和 C-S-H 凝胶，从而提高再生微粉活性。热活化后再生微粉水化更加充分，水化产物中存在大量片状 Ca (OH)₂ 与絮状 C-S-H 凝胶紧密黏接，针状钙矾石交织穿插形成网状结构，增强材料强度。

参 考 文 献

[1] 建筑垃圾处理技术标准 CJJ/T 134-2019 [S].
[2] 周义辉. 建筑垃圾再生微粉相关研究 [J]. 价值工程, 2020 (24): 238-239.
[3] 付士峰, 刘东基, 崔彦发, 等. 建筑垃圾综合利用体系及现状 [J]. 建筑技术, 2021, 52 (7): 793-796.
[4] 刘斌. 建筑垃圾再生细骨料及微粉制备再生砂浆试验研究 [D]. 河南: 郑州大学, 2019.
[5] 田青, 屈孟娇, 张苗, 等. 废弃混凝土再生微粉激活方式研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (8): 2476-2485.

- [6] 马昆林, 孟维琦, 申景涛, 等. 再生微粉性能激活研究及应用进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (10): 96-108.
- [7] 王鑫, 梁栋, 王丹, 等. 机械活化和热活化对煤矸石水化活性的影响 [J]. 砖瓦, 2022, (8): 13-16.
- [8] Muesi G, Nh P, Ulsen C, et al. Mechanical activation of construction and demolition waste in order to improve its pozzolanic reactivity [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9 (9): 3416-3427.
- [9] 李述俊, 赵霄龙, 李秋义, 等. 再生微粉基本性能及活性试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (10): 3314-3319, 3325.
- [10] 杨琳. 再生混凝土微粉制备再生胶凝材料的研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2016.
- [11] 楼聪, 郑朝灿, 李晓珍, 等. 再生微粉活性对水泥胶砂性能的影响 [J]. 工业建筑, 2019, 49 (10): 151-155, 199.
- [12] 张平, 古龙龙, 王琴, 等. 激发再生微粉活性的方法研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2019 (2): 90-93.
- [13] 康晓明, 李滢, 樊耀虎. 不同激发方式对再生微粉性能的影响研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (4): 1135-1139.
- [14] 何建恒. 废弃混凝土中砂浆组分的性能及利用研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [15] Florea M, Ning Z, Brouwers H. Activation of liberated concrete fines and their application in mortars [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50 (50): 1-12.
- [16] Likes L, Markandeya A, Haider M M, et al. Recycled concrete and brick powders as supplements to portland cement for more sustainable concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 364: 132651.

(上接第 49 页)

参 考 文 献

- [1] 袁冻雷. 不同纤维改性透水沥青混合料水稳定性的试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (1): 52-56.
- [2] 贾丽晓, 刘永梅. 不同级配排水沥青混合料路用性能与透水性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 144-150.
- [3] 刘玉东, 蔡燕霞, 奚进, 等. 老化及浸水条件下凝灰岩沥青混合料长期水稳定性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 13-18, 34.
- [4] 严兵, 姚波. 基于离散元法的多孔沥青混合料集料骨架优化研究 [J]. 公路, 2025, 70 (2): 14-21.
- [5] 王勋, 石立万, 王悦婵, 等. 基于图像的沥青混合料骨架结构设计及评价 [J]. 公路, 2023, 68 (2): 40-48.
- [6] 彩雷洲, 李刚, 李翔, 等. 压实次数对沥青混合料骨架特征影响研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30 (2): 341-350.
- [7] 吴文亮, 卢家志, 涂志先. 基于 X-ray CT 和离散元法级配离析对沥青混合料骨架结构力学性能的影响 [J]. 公路工程, 2020, 45 (1): 55-61, 97.
- [8] 吴文亮, 涂志先, 李智. 基于离散元法离析对混合料骨架结构特征影响 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2018, 43 (6): 2303-2310.
- [9] 刘丽, 姚刚, 张娟. 排水沥青混合料堵塞模拟试验与渗水性能研究 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36 (6): 39-43.
- [10] 王若宇. 透水沥青混合料堵塞及清理行为的实验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [11] 贡梁良, 李刚, 李典, 等. 空隙堵塞状态下排水沥青混合料渗水性能衰变研究 [J]. 西部交通科技, 2024 (4): 29-33.
- [12] 秦旻, 杨小丁, 赵毅. 透水沥青混合料抗堵塞性能及功能恢复研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (10): 10-17.
- [13] 张皓东. 不同空隙率透水沥青混合料路用性能及堵塞衰变规律研究 [J]. 公路, 2022, 67 (9): 115-121.
- [14] 朱旭伟, 李波, 魏定邦, 等. 循环堵塞-清洗对多孔沥青混合料渗水性能的影响 [J]. 材料导报, 2020, 34 (20): 20040-20045.
- [15] 蒋娅娜. 透水沥青路面抗堵塞性能优化方法研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2020.