

烧结法制备固废基透水石材试验研究

金海¹, 司美艳¹, 张云涛¹, 李青松^{1,2}

(1. 贵州省煤矿设计研究院有限公司, 贵阳 550025; 2. 贵州省矿山安全科学研究院有限公司, 贵阳 550025)

摘要: 为实现煤基固废和冶金废渣高附加值利用, 研究以煤基固废、冶金废渣为主要原料, 添加膨润土和碳粉作为辅助原材料来探索制备透水石材的可行性, 试样在 1 215~1 245 °C 的烧结区间进行制备, 保温时间为 1 h, 在经过高温处理后可以形成良好的多孔结构。通过 SEM 和 XRD 对试样的显微结构和物相进行分析观察。结果表明: 试样的主要晶相为钙长石和少量的辉石相, 煤基固废和冶金废渣作为主要原材料具有制备透水石材的可行性。当冶金废渣掺量 53%, 煤基固废掺量 47%。冶金废渣的粒径范围在 0.5~2.0 mm 时, 透水石材的孔隙率和抗压强度达到最优。试样最佳烧结温度为 1 235 °C, 透水石材的透水系数为 $0.42 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, 抗压强度为 16.5 MPa, 孔隙所占百分比为 19.5%。为大宗工业固废的资源化处置提供技术参考, 实现煤基固废和冶金废渣的协同利用。

关键词: 煤基固废; 冶金废渣; 透水石材; 透水性

中图分类号: X752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0008-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.002

Experimental Study on Sintered Permeable Stone Fabricated from Solid Waste

JIN Hai¹, SI Meiyang¹, ZHANG Yuntao¹, LI Qingsong^{1,2}

(1. Guizhou Research Institute of Coal Mine Design Co., Ltd., Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Mining Safety Scientific Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to achieve high value-added utilization of coal based solid waste and metallurgical waste residue, this paper studies the feasibility of using coal based solid waste and metallurgical waste residue as the main raw materials, and adding bentonite and carbon powder as auxiliary raw materials to explore the preparation of permeable stone. The samples are prepared in the sintering range of 1 215~1 245 °C, with a holding time of 1 hour. After high-temperature treatment, a good porous structure can be formed. Analyze and observe the microstructure and phase of the sample through SEM and XRD. The results indicate that the main crystal phases of the sample are calcium feldspar and a small amount of pyroxene phase. Coal based solid waste and metallurgical waste as the main raw materials have the feasibility of preparing permeable stone. When the content of metallurgical waste slag is 53%, and the content of coal based solid waste is 47%. When the particle size range of metallurgical waste is between 0.5~2.0 mm, the porosity and compressive strength of permeable stone reach the optimal level. The optimal

项目来源: 贵州省高层次创新人才计划项目 (黔科合平台人才-GCC [2023] 102); 贵州省科技计划项目 (黔科合服企 [2022] 010); 贵州省科技计划项目 (黔科合基础- [2024] 青年 378)。

作者简介: 金海 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 固废资源化利用。

通信作者: 李青松 (1985—), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向: 矿山瓦斯治理及固废资源化利用。

收稿日期: 2025-04-27

sintering temperature of the sample is 1 235 °C, the permeability coefficient of the permeable stone is 0.42×10^{-2} cm/s, the compressive strength is 16.5 MPa, and the percentage of pores is 19.5%. Provide technical reference for the resource utilization and disposal of bulk industrial solid waste, and achieve the synergistic utilization of coal based solid waste and metallurgical waste residue.

Key words: coal-based solid waste; metallurgical slag; permeable stone; permeability

0 引言

目前,煤基固废的再处理应用仍采用较为粗放的方式,如填埋、堆积,不仅占用了土地资源,还可能造成地表沉降和土壤污染等灾害^[1-2]。煤基固废含碳量较低,黏土矿物含量较高,在高温环境下脱羟基后主要成分为二氧化硅和氧化铝,在制备建筑石材方面具有良好的优势。

煤矸石是煤炭企业在开采、掘进、洗选等生产过程中产生的工业副产物^[3]。诸多研究学者对煤基固废来制备透水石材做了大量的研究,通过利用不同固废理化性质与部分添加剂融合,在高温煅烧后制备透水石材,从而优化不同固废在建筑材料领域的应用潜力。为循环经济发展提供技术支持。由于煤矸石与黏土成分十分相似^[4],以煤矸石替代部分黏土制备透水砖,可以降低生产成本。李珠等^[5]利用煤矸石和黏土为主要材料,以膨胀珍珠岩为造孔剂制备烧结透水砖,其劈裂抗拉强度为 3.75 MPa,透水系数为 0.355×10^{-2} cm/s; 南宁等^[6]以废弃碎砖、废弃陶瓷砖和废弃混凝土块破碎的混合料为主要骨料,以污泥、石英砂和废玻璃混合料为黏结剂,研制出环保型高性能透水砖,透水系数和抗压强度均达到相关指标要求; 李大伟等^[7]以陶瓷废料为骨料制备高性能烧结透水砖,透水砖透水系数为 3.5×10^{-2} cm/s,抗压强度为 57.7 MPa,满足 JC/T 945—2005《透水砖》标准要求; 王绍熙等^[8]利用钒钛铁尾矿、金尾矿、页岩和水库底泥为原料制备高强烧结透水砖,发现了以 SiO_2 、CaO、MgO 作为主要化学组成的原材料,有利于形成辉石体系,促进结构致密性,应用于烧结材料较为理想; 代红涛等^[9]利用垃圾焚烧渣与废玻璃混合制备烧结透水砖,其透水系数、抗折强度与抗压强度分别为 0.58 mm/s、6.23、18.58 MPa,高温形成的莫来石与玻璃相相互胶结,连通气孔均匀分布,赋予透水砖较好的强度和透水性能; 丁海萍等^[10]利用粉煤灰、煤矸石和炉

渣为主要材料制备烧结透水砖,其中炉渣作为骨料,获得的透水砖其抗压强度为 31.2 MPa、透水系数为 1.12×10^{-2} cm/s; 贺晓梅等^[11]以煤矸石为主要材料成功制得烧结透水砖的体积密度为 1.96 g/cm³、吸水率为 12.01%、抗折强度为 3.72 MPa,透水系数为 1.64×10^{-2} cm/s; 霍红英^[12]通过将高炉渣作为骨料,添加钾长石、高岭土和助溶剂制备烧结透水砖,高炉渣粒径控制在 0.18~0.25 mm,所得透水系数为 0.064 cm/s,抗折强度为 12 MPa,实现大掺量高炉渣制备透水砖; 李峰等^[13]利用粉煤灰、水泥、隧道弃渣制备免烧透水砖,抗压强度为 12.3 MPa,透水系数为 3.25×10^{-2} cm/s,其免烧工艺能耗较低,但在多种固废类联动制备透水砖方面存在一定的局限性; 吴瑞等^[14]以废瓷为骨料,添加芒硝、废玻璃、钾长石成功制备透水砖,其透水系数为 2.5×10^{-2} cm/s,抗压强度为 56.52 MPa,分析了高温阶段液相迁移及气体产生对孔隙结构的影响; 徐珊等^[15]以金尾矿、污泥、砂子、木屑按照特定比例进行混合制备透水砖,对烧结温度、配比、颗粒度等因素进行分析,发现骨料粒径 40 目 (1.6 mm)、烧结温度 1 095 °C、成型压力 16 MPa 时,获得透水砖性能最佳,其抗压强度为 26.97 MPa,透水系数为 2.97×10^{-2} cm/s。

综上所述,以固废为原材料采用烧结法制备透水砖具有良好前景和可行性。以较高掺量冶金废渣和煤基固废为主要材料制备烧结透水砖的研究相对较少。将冶金废渣、煤基固废进行高附加值处理制备建筑材料,不仅可以降低对天然石材的开采,缓解固废长期堆积造成的土资源压力,具有良好的环境效益,还可以促进大宗工业固废循环经济产业的发展,为大宗工业固废的建材化处理方向提供参考依据。

1 试验原料和方法

1.1 试验原料

试验所用冶金废渣是通过磁选之后获得的尾渣。煤基固废是煤矿开采过程中的伴生副产物混合物。

材料科学

添加膨润土作为辅助原料、碳粉作为造孔剂。采用 XRF 对冶金废渣、煤基固废、膨润土分析检测, 主要化学成分见表 1。

表 1 主要试验原料化学成分

名称	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
煤基固废	2.58	0.95	43.03	32.87	2.94	2.94
冶金废渣	33.98	7.92	15.57	30.59	0.45	0.45
膨润土	2.93	2.05	17.18	68.69	2.87	2.45

1.2 试验方法

将煤基固废通过鄂式破碎机进行粗粉碎, 再放入振动磨中细磨, 获得粒径<1 mm 的煤基固废备用。将冶金废渣在 105 ℃ 进行烘干处理 3 h, 利用筛网进行筛分, 获得粒径为<3 mm 冶金废渣备用。煤基固废掺量为 23%~47%, 冶金废渣掺量为 53%~77%, 膨润土的掺量 8%, 碳粉掺量 5%。将煤基固废、冶金废渣、膨润土、造孔剂、水按照设计好的比例进行配制, 然后放入胶砂机中进行搅拌。将混合好的生料倒入 $\phi 30$ mm 的圆柱形模具中, 通过液压伺服压力机压制成型, 成型压力为 30 MPa, 保压时间为 5 min。将压制成型的试样放入烘干箱内于 105 ℃ 烘干 3 h, 随后取出放入箱式电阻炉中进行烧制, 烧结温度设定为 1 235 ℃, 升温速率为 4 ℃/min, 保温时间为 1 h, 试样随炉冷却至室温后取出试样, 获得透水石材试样。

1.3 性能检测

采用 QUANTA 400 扫描电镜对试样的微观结构进行分析; 采用 Bruker D8 型 X 射线衍射仪进行物相分析; 采用透水系数仪 FC-3 对试样的透水系数进行检测。采用微机控制电液伺服压力试验机 YAW-1000 对试样的抗压强度进行检测。

1.4 配方设计

设计四组不同配比的透水石材基础配方, 其中膨润土和碳粉掺量分别为煤基固废和冶金废渣总量的 8% 和 5%, 结果见表 2。

表 2 透水石材的基础配比

编号	煤基固废	冶金废渣	膨润土	碳粉
PF1	23	77	8	5
PF2	33	67	8	5
PF3	41	59	8	5
PF4	47	53	8	5

2 试验结果及讨论

2.1 基础配方筛选

根据表 2 的配比进行透水石材制备, 烧结结果如图 1 所示。从试验结果发现, PF1、PF2、PF3 试样经高温烧结后都出现了明显形变, 只有 PF4 外观完整、无形变。当煤基固废掺量为 23% 和 33% 时, 试样全部严重形变, 轮廓消失。掺量为 41% 时, 试样轮廓部分可见, 但仍有局部形变。掺量达到 47% 时, 试样外观完整, 无明显形变。说明随着煤基固废掺量的增加, 冶金废渣掺量降低, 形变程度越来越低。这主要是由于煤基固废中含有较高的 Al 元素, 其掺量增加提高了透水石材试样的热稳定性, 起到了“骨架”作用, 同时冶金废渣比例降低使碱金属含量降低, 相应地提高了试样形变温度, 从而避免了明显的形变。所以从外观观察, PF4 是最适宜的基础配方。



图 1 不同配比透水石材试样宏观外貌
Fig. 1 Macroscopic appearance of permeable stone specimens with different ratios

2.2 显微结构及物相分析

选取形变严重的 PF1 和无形变的 PF4 进行显微结构对比和物相分析。由图 2 可知, 由于 PF1 试样出现了熔融态导致了形变, 表面结构致密。将 PF1 放大 1 000 倍可以看到被液相包裹的板柱状晶体。由图 3 可知, PF4 放大 10 倍时, 发现了明显的孔结构, 这主要是由于高比例的煤基固废为试样提供了较好的热稳定性, 避免了明显的形变。随着温度升高, 碳粉燃烧分解产生的气体逃逸后在试样内部留下孔隙; 在高温阶段产生的少量液相将颗粒包裹并黏连在一起, 在提高了试样致密度的同时保留了原有的连通孔结构, 试样的透水能力也得到了保留。将 PF4 放大 1 000 倍时也出现了板柱状晶体。由图 4 可知, 板柱

状晶体为钙长石相，同时还含有少量的辉石相。根据 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 相图，钙长石的熔点为 $1\,533\text{ }^\circ\text{C}$ ，莫氏硬度约为 6，可以为透水石材强度提供支撑。综上所述，PF4 的试样具备一定的透水能力，具有制备透水石材的可行性。

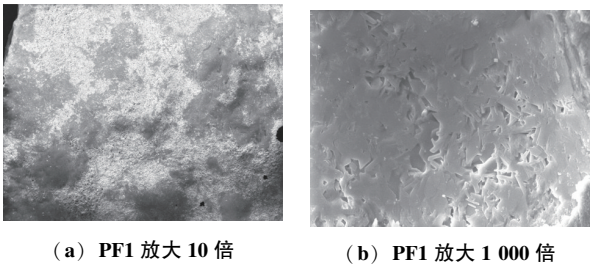


图 2 PF1 的微观结构
Fig. 2 Microstructure of PF1

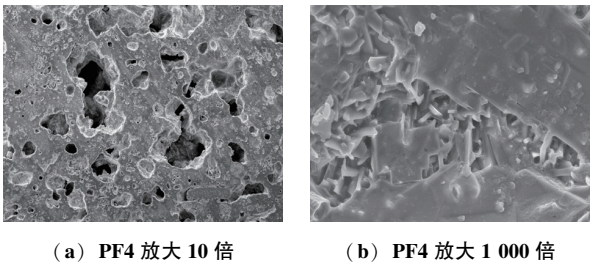
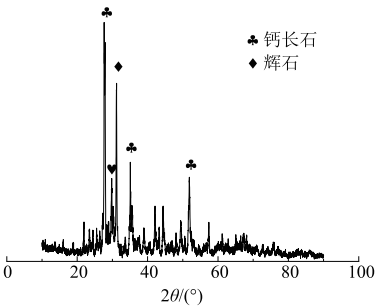
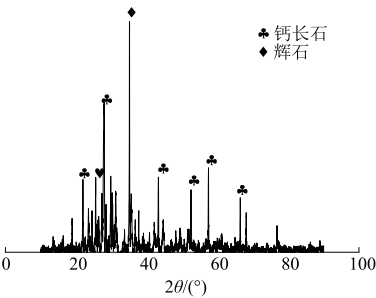


图 3 PF4 的微观结构
Fig. 3 Microstructure of PF4



(a) PF1 的 X 射线衍射图谱



(b) PF4 的 X 射线衍射图谱

图 4 试样 X 射线衍射图谱
Fig. 4 Sample XRD pattern

2.3 温度对透水石材强度及透水性的影响

在 PF4 的基础上，选取不同烧结温度来观察试样温度对其性能的影响。试样配比及烧结温度见表 3。由图 5 可知，可以看到 WD1、WD2、WD3 在宏观上没有明显的变化，WD4 出现熔融形变现象，说明当烧结温度达到 $1\,245\text{ }^\circ\text{C}$ 的时，超过了 PF4 试样形变温度。利用 SEM 观察 WD1~WD4 的显微结构，如图 6 所示。WD1、WD2、WD3 均出现了孔隙结构，WD4 由于熔化形变表面为致密结构。说明烧结温度在 $1\,215\sim 1\,235\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内均可以制备出具有孔隙结构的透水石材试样。

表 3 透水石材试样配比及烧制温度
Table 3 Pervious stone specimen proportioning and firing temperature

编号	煤基固废 /%	冶金废渣 /%	膨润土 /%	碳粉 /%	温度 / $^\circ\text{C}$
WD1	47	53	8	5	1 215
WD2	47	53	8	5	1 225
WD3	47	53	8	5	1 235
WD4	47	53	8	5	1 245

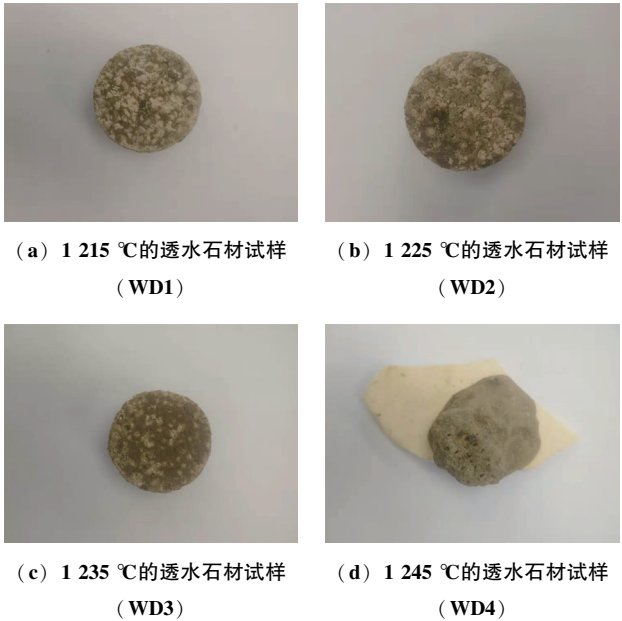
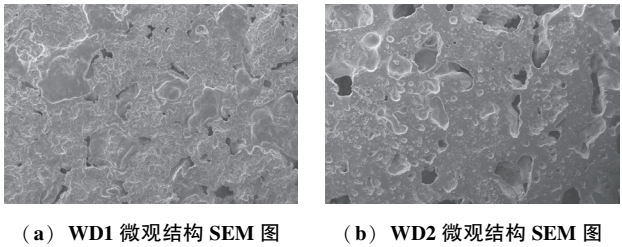


图 5 不同烧制温度的透水石材试样
Fig. 5 Permeable stone specimens sintered at different temperatures



(a) WD1 微观结构 SEM 图 (b) WD2 微观结构 SEM 图

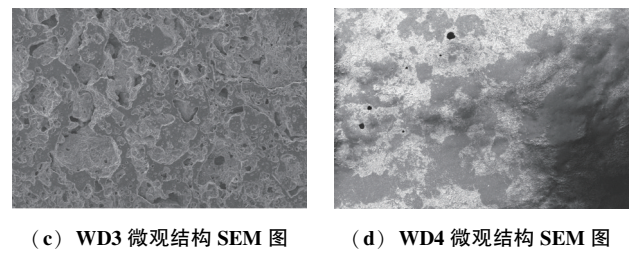


图 6 不同烧制温度透水石材试样 SEM 图
Fig. 6 SEM images of permeable stone specimens sintered at different temperatures

由图 7 可知，WD1、WD2、WD3 的抗压强度分别为 12.2、13.6、16.5 MPa，透水系数分别为 0.16×10^{-2} 、 0.33×10^{-2} 、 0.42×10^{-2} cm/s。随着温度的升高，试样的抗压强度不断增大，透水系数也不断提高。当温度达到 1 245 ℃ 时，试样产生的液相量过多，造成熔化形变，无法检测抗压强度和透水性能。所以透水石材试样的最适宜的烧制温度为 1 235 ℃。

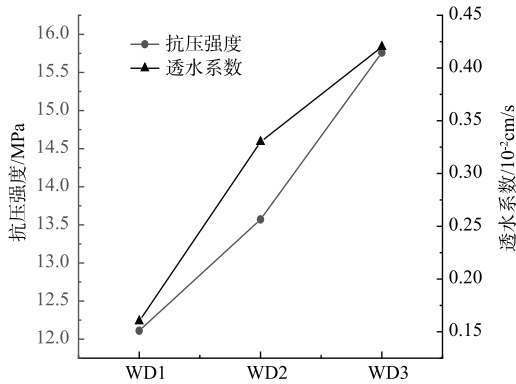


图 7 不同烧制温度透水石材试样抗压强度和透水系数
Fig. 7 Compressive strength and water permeability coefficient of permeable stone specimens sintered at different temperatures

利用 ImagJ 软件对 WD1、WD2、WD3 试样的孔隙占比进行计算，验证试样孔隙占比与透水性的变化规律是否一致。由图 8 可知，图中黑色部分为孔隙所占面积。通过计算得到的 WD1、WD2、WD3 孔隙占比分别为 7.9%、13.2%、19.5%。

2.4 不同粒径冶金废渣对透水石材的影响

根据试验结果可知，PF4 的物料比例最优，透水石材最适宜的烧制温度为 1 235 ℃。在此基础上，研究冶金废渣粒径范围对透水石材的影响，具体配比见表 4。

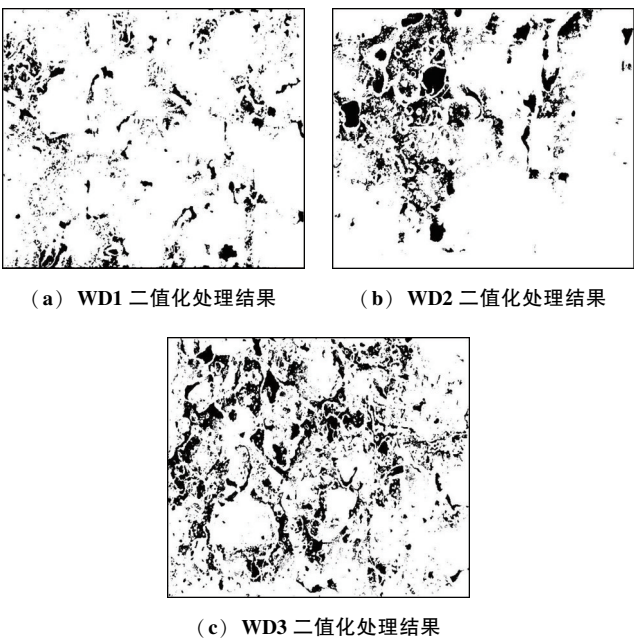
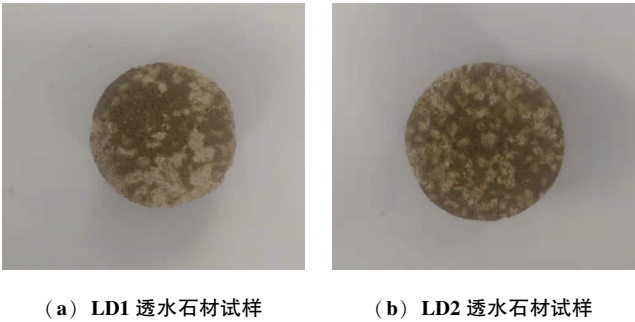


图 8 WD1-WD3 试样 SEM 图二值化处理结果
Fig. 8 Binarization results of SEM images for specimens WD1-WD3

表 4 不同粒径冶金废渣试样配比
Table 4 Particle size-based ratio design of metallurgical slag specimens

编号	煤基固废 /%	冶金废渣 /%	膨润土 /%	碳粉 /%	粒径 /mm
LD1	47	53	8	5	3.0~5.0
LD2	47	53	8	5	2.0~3.0
LD3	47	53	8	5	0.5~2.0
LD4	47	53	8	5	<0.5

按照表 4 的配比，将冶金废渣通过筛网进行分级筛分，分别选取 3.0 ~ 5.0、2.0 ~ 3.0、0.5 ~ 2.0、<0.5 mm 四种粒径范围用于试验，煤基固废的粒径 ≤ 75 μm。按设计的配比将物料混合、搅拌、压制成型，烧制温度为 1 235 ℃，升温速率为 6 ℃/min，保温 1 h，试样随炉冷却至室温，获得透水石材试样如图 9 所示，可以看到试样 LD1 ~ LD4 在宏观上均无明显形变，成型效果良好。





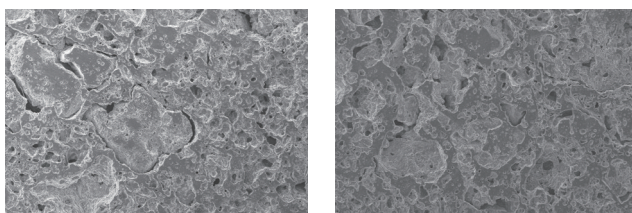
(c) LD3 透水石材试样

(d) LD4 透水石材试样

图 9 不同粒径冶金废渣的透水石材试样

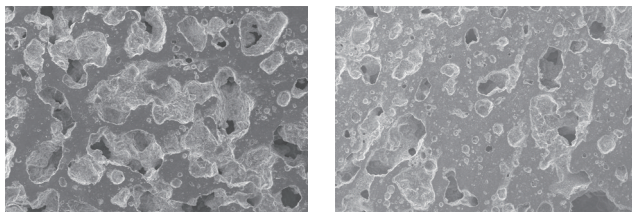
Fig. 9 Permeable stone specimens incorporating metallurgical slag with graded particle sizes

由图 10 可知, LD1 试样中可以明显看到独立的冶金废渣颗粒, 相比其他试样内部结构较为致密。随着冶金废渣粒径减小, LD2 试样内部结构相较于 LD1 无明显变化。LD3 和 LD4 试样内部均出现了明显连通孔结构, LD3 的孔隙结构分布要多于 LD4。说明在一定粒径范围内, 随着冶金废渣粒径逐渐减小, 透水石材内部的连通孔隙率呈现先增加后降低的趋势。



(a) LD1 微观结构 SEM 图

(b) LD2 微观结构 SEM 图



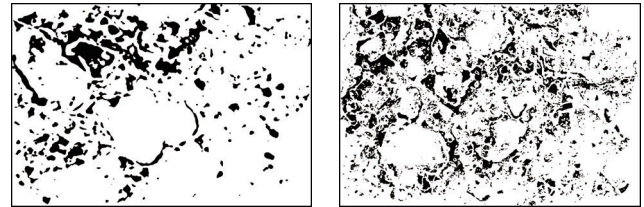
(c) LD3 微观结构 SEM 图

(d) LD4 微观结构 SEM 图

图 10 不同粒径冶金废渣透水石材试样 SEM 图

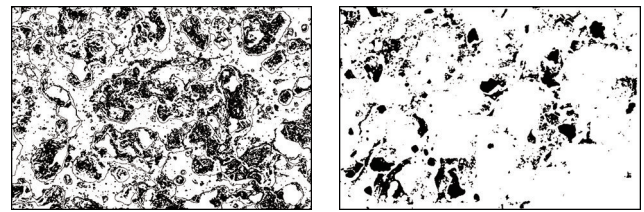
Fig. 10 SEM images of permeable stone specimens incorporating metallurgical slag with graded particle sizes

利用 ImagJ 软件对 LD1~LD4 试样的电镜照片进行二值化处理, 结果如图 11 所示, 通过计算得到孔隙所占的百分比, 不同冶金废渣粒径对孔隙率的影响, 随着冶金废渣粒径的逐渐减小, 孔隙率呈先增加后降低的趋势。



(a) LD1 二值化处理结果

(b) LD2 二值化处理结果



(c) LD3 二值化处理结果

(d) LD4 二值化处理结果

图 11 LD1~LD4 试样 SEM 图二值化处理结果

Fig. 11 Binarization results of SEM images for specimens LD1~LD4

由图 12 可知, 随着冶金废渣粒径不断减小, 抗压强度逐渐提高。这主要是因为, 在相同搅拌工艺下, 冶金废渣的粒径越小, 试样的物料均一化程度越高, 压制成型阶段内部致密化程度越高。随着温度逐渐升高, 冶金废渣出现的液相将试样内部的颗粒黏连在一起, 进一步提高了试样强度。所以试样的抗压强度随着冶金废渣粒径减小而逐渐增强。试样的孔隙率随着冶金废渣粒径减小呈现先增大后降低的趋势, 这主要是因为煤基固废中的碳分解后产生一定的孔隙结构, 大颗粒的冶金废渣逐渐出现液相变化时, 试样内部大量冶金废渣无法完全反应。随着冶金废渣粒径逐渐降低, 物料之间反应得越来越充分。当冶金废渣粒径范围在 0.5~2.0 mm 时, 试

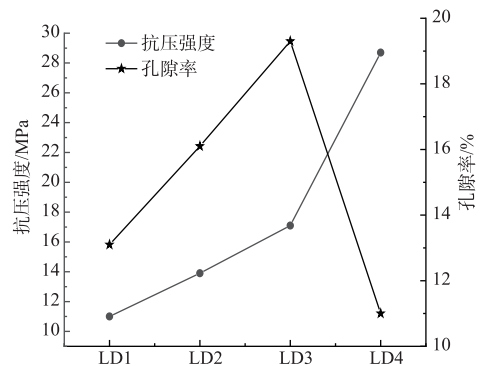


图 12 不同粒径冶金废渣对透水石材抗压强度和孔隙率的影响
Fig. 12 Effects of metallurgical slag particle size distribution on the strength and porosity of permeable stone composites

材料科学

样内部孔隙率达到最高。当冶金废渣的粒径小于 0.5 mm 时, 试样致密化程度进一步增高, 在冶金废渣产生液相可以更加均匀的分布在试样内部, 填充了试样内部孔隙, 所以 LD4 孔隙率较低, 而抗压强度显著提高。

3 结论

通过煤基固废、冶金废渣为主要原料, 利用烧结法制备固废基透水石材, 研究不同烧结温度对固废基透水石材的孔径结构、透水性能、抗压强度的影响, 得到以下主要结论:

(1) 冶金废渣粒径对透水石材的孔隙率具有较大影响。在高温阶段粒径越小, 试样的致密化程度越高, 导致试样的强度越高, 但是孔隙率会明显降低, 对透水性能产生较大的负面影响。

(2) 冶金废渣含有较多的非晶态物质和碱金属, 在高温阶段会产生过多的液相, 导致试样整体出现熔融形变。在 1 215~1 235 °C 温度区间内, 透水石材的孔隙度、透水系数和抗压强度随着烧结温度升高逐渐增强。当烧结温度达到 1 245 °C 时, 试样整体出现熔融形变, 所以冶金废渣的掺入量不宜超过 53%。

(3) 冶金废渣受炼铁工艺影响, 成分波动较大, 化学组分对透水石材的最佳烧制工艺具有较大的影响。当试样中碱金属含量较高时, 最佳烧制温度应适当降低, 避免液相过多发生严重的宏观形变。

参 考 文 献

[1] Bi Yinli, Zhang Jian, Song Ziheng, et al. Arbuscular mycorrhizal

fungi alleviate root damage stress induced by simulated coal mining subsidence ground fissures [J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 398-405.

- [2] 马杰, 刘萍, 刘今朝, 等. 重庆市煤矸石周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 [J]. 环境科学, 2022 (12): 5698-5709.
- [3] 宋伟, 刘成勇, 杨军军, 等. 煤矸石规模化处置及高附加值利用现状与展望 [J]. 矿业研究与开发, 2024, 44 (11): 268-282.
- [4] 李振, 雪佳, 朱张磊, 等. 煤矸石综合利用研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2021, 41 (6): 165-178.
- [5] 李珠, 刘家乐, 刘鹏, 等. 煤矸石烧结透水砖的试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2018 (4): 21-23.
- [6] 南宁, 刘明宝, 崔孝炜, 等. 建筑固废掺烧污泥制备透水砖及性能研究 [J]. 非金属矿, 2023 (3): 88-90, 94.
- [7] 李大伟, 范海宏, 李玉祥, 等. 掺烧污泥的烧结透水砖制备及其性能研究 [J]. 非金属矿, 2020 (3): 82-85.
- [8] 王绍熙, 张凯帆, 张苏花, 等. 多元固废制备高强烧结透水砖及其性能研究 [J]. 金属矿山, 2021 (9): 206-215.
- [9] 代红涛, 沈芳芳, 杨文涛. 利用垃圾焚烧渣制备陶瓷透水路面砖的试验研究 [J]. 无机盐工业, 2024 (5): 121-127.
- [10] 丁海萍, 侯泽健, 张怀宇. 以褐煤粉煤灰和煤矸石为原料制备透水砖的工艺研究 [J]. 新型建筑材料, 2019 (6): 72-75.
- [11] 贺晓梅, 段旭晨, 郭伟, 等. 高掺量煤矸石制备烧结透水砖的试验研究 [J]. 陶瓷, 2023 (3): 17-20.
- [12] 霍红英. 高钛型高炉渣透水砖的制备及性能表征 [J]. 矿产综合利用, 2023 (6): 108-113, 140.
- [13] 李峰, 刘明宝, 崔孝炜, 等. 隧道弃渣制备免烧透水砖及性能研究 [J]. 非金属矿, 2025, 48 (1): 112-114.
- [14] 吴瑞, 范海宏, 陈帅辰, 等. 高性能废瓷透水砖的烧结机理及性能耦合机制 [J]. 非金属矿, 2023, 46 (2): 90-93, 97.
- [15] 徐珊, 王若琛, 李峰, 等. 高掺量尾矿透水砖的制备及其性能研究 [J]. 非金属矿, 2022, 45 (4): 88-90, 96.