

生物质固废分级利用策略：飞灰辅助胶凝与灰渣骨料替代的协同增效

吉梦玉

华北水利水电大学土木与交通学院，河南 郑州

收稿日期：2025年3月8日；录用日期：2025年3月28日；发布日期：2025年4月10日

摘要

本研究系统探究了生物质飞灰与灰渣在水泥基材料中的资源化利用潜力，通过活性指数测试及抗压/抗折强度分析，揭示了其胶凝活性演变规律与改性机制。结果表明：生物质飞灰的火山灰活性显著低于传统掺合料，其28 d强度活性指数随掺量增加呈线性下降，主要归因于有效硅铝相不足及未燃尽碳颗粒的孔隙劣化效应。而生物质灰渣作为细骨料替代河砂时，预湿处理触发的内养护效应显著优化了长期性能，28d抗折强度反超未掺组。抗压强度则呈现掺量阈值效应：小于10%替代时，28 d强度保持基准组的95%以上，但15%掺量因胶凝稀释与孔隙劣化导致强度骤降13%。研究提出分级应用策略：飞灰宜作为辅助胶凝材料(掺量 $\leq 20\%$)，灰渣可安全替代10%河砂用于承重结构，高掺量场景需结合机械活化或化学激发。该成果为生物质固废的低碳建材化提供了理论与技术支撑。

关键词

生物质灰渣，内养护效应，强度活性指数，水泥砂浆，建材化利用

Classification and Utilization Strategy of Biomass Solid Waste: Synergistic Effect of Fly Ash Assisted Gelling and Ash Aggregate Replacement

Mengyu Ji

School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Mar. 8th, 2025; accepted: Mar. 28th, 2025; published: Apr. 10th, 2025

文章引用: 吉梦玉. 生物质固废分级利用策略：飞灰辅助胶凝与灰渣骨料替代的协同增效[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 635-642. DOI: 10.12677/hjce.2025.144068

Abstract

This study systematically investigated the potential for resource utilization of biomass fly ash and bottom ash in cement-based materials. Through tests of pozzolanic activity indices and analysis of compressive and flexural strengths, the study revealed the evolution of pozzolanic reactivity and the modification mechanisms of these ashes. The results indicated that the pozzolanic activity of biomass fly ash is significantly lower than that of conventional admixtures. The 28-day strength activity index of fly ash decreases linearly with increasing dosage, primarily due to insufficient reactive silica and alumina phases and the pore-deteriorating effect of unburned carbon particles. In contrast, when biomass bottom ash is used as a fine aggregate to replace river sand, pre-wetting treatment triggers an internal curing effect that significantly optimizes long-term performance, with the 28-day flexural strength exceeding that of the control group. Compressive strength exhibits a threshold effect: when the substitution level is below 10%, the 28-day strength remains above 95% of the reference group; however, at a 15% substitution level, strength drops by 13% due to pozzolanic dilution and pore deterioration. Based on these findings, a tiered application strategy is proposed: fly ash is suitable as a supplementary cementitious material (dosage $\leq 20\%$), while bottom ash can safely replace up to 10% of river sand in load-bearing structures. For higher substitution levels, mechanical activation or chemical activation is recommended. This study provides theoretical and technical support for the low-carbon utilization of biomass solid waste in building materials.

Keywords

Biomass Ash, Internal Curing Effect, Strength Activity Index, Cement Mortar, Resource Utilization in Building Materials

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球能源危机和环境问题的日益加剧,资源的高效利用和循环经济发展已成为全球关注的焦点。生物质灰渣作为生物质能利用过程中产生的废弃物,具有一定的资源属性和环境价值[1]。通过将其建材化利用,不仅可以实现资源的循环利用,还能减少对天然建筑材料的依赖,符合可持续发展的理念[2]。

生物质灰渣的大量堆积不仅占用土地资源,还可能对土壤、水体和空气造成污染[3]。特别是在“绿水青山就是金山银山”的发展理念下,如何妥善处理生物质灰渣已成为亟待解决的环境问题。将其转化为建筑材料,既能减少环境污染,又能降低建筑行业的碳排放,具有显著的环境效益。

近年来,中国政府高度重视固体废物资源化利用和绿色低碳发展。《“十四五”循环经济发展规划》明确提出要推动工业固体废物、农业废弃物等的资源化利用。生物质灰渣的建材化利用正是这一政策导向的具体实践,具有重要的政策支持和现实意义。

生物质能作为一种可再生能源,在我国能源结构中的占比逐年提高。据统计,截至2024年底,我国生物质发电装机容量已超过4000万千瓦[4]。然而,生物质发电过程中会产生大量灰渣,其处理和利用已成为生物质能发展的瓶颈问题。生物质燃料经燃烧后,部分无机成分和矿物质以固体颗粒的形式留存下来,形成灰渣;生物质灰渣按照收集方式可分为飞灰和灰渣。

随着环保法规的日益严格，传统的填埋或堆存方式已无法满足现代环境治理的要求。生物质灰渣的建材化利用不仅可以减少环境污染，还能推动绿色建筑的发展，符合国家“双碳”目标的要求。

随着建筑行业的快速发展，传统建筑材料砂石等的需求量持续增长，而资源短缺和成本上升已成为行业发展的重要制约因素[5]。生物质灰渣作为一种可再生资源，其建材化利用不仅可以缓解资源短缺问题，还能降低建筑成本。

2. 试验材料与预处理方法

2.1. 试验材料

本研究中所用的胶凝材料主要包括水泥，该材料是由河南天瑞水泥厂生产的 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥；细骨料主要使用了天然河砂和生物质灰渣，生物质灰渣来自河南省延津长青生物质能源有限公司；粗骨料按照规范采用了 5~10 mm 粒径区间的小石子与 10~16 mm 粒径区间的大石子。天然河砂的基本物理性能如表 1 所示。

Table 1. Physical properties of natural river sand

表 1. 天然河砂的物理性能

	粒径区间(mm)	堆积密度(kg/m ³)	表观密度(kg/m ³)	天然含水率(%)	吸水率(%)
河砂	0~4.75 mm	1512	2583	0.04	1.12

2.2. 预处理

由于生物质灰渣原材料露天存放，试验前需将生物质灰渣颗粒进行烘干处理，为了避免高温破坏生物质灰渣的物理化学性能，故而选择置于 60℃ 的鼓风干燥箱中烘干。生物质灰渣颗粒烘干后使用鄂式破碎机破碎，将生物质灰渣颗粒粒径破碎筛分至 4.75 mm 以下。破碎后生物质灰渣的颗粒级配如表 2 所示，颗粒的累计筛余曲线如图 1 所示，基本物理性能如表 3 所示。

其中含水率与吸水率的试验方式参照国家现行标准《建设用砂》(GB/T 14684-2022) [6]对天然河砂与生物质灰渣两种骨料在室温下的含水率以及饱和面干状态下 1 h 的吸水率进行测试。

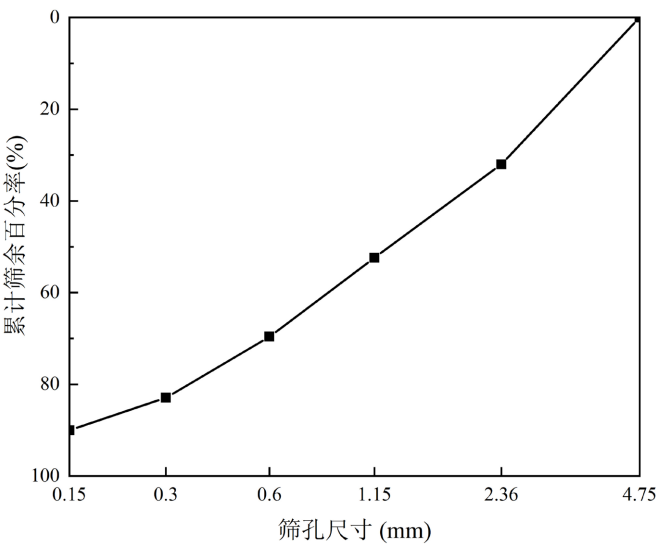


Figure 1. Particle size distribution curve of biomass ash residue

图 1. 生物质灰渣颗粒级配曲线

Table 2. Grading of crushed biomass ash residue
表 2. 破碎后生物质灰渣的级配

筛孔尺寸(mm)	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
分级筛余率(%)	0.4	21.2	14.4	18.0	14.0	9.4

Table 3. Physical properties of biomass ash particles
表 3. 生物质灰渣颗粒的物理性能

	粒径区间(mm)	堆积密度(kg/m ³)	表观密度(kg/m ³)	天然含水率(%)	吸水率(%)
生物质灰渣	0~4.75 mm	1098	1806	0.53	11.01

3. 试验方法

3.1. 生物质飞灰活性测试

试验所用设备为行星式水泥胶砂搅拌机, 水泥胶砂试体成型振实台, 棱柱体试模(40 mm × 40 mm × 160 mm)。胶砂用搅拌机按以下程序进行搅拌, 采用手动控制, 首先把水加入锅里, 再加入胶凝材料, 把锅固定在固定架上, 上升至工作位置; 立即开动机器, 先低速搅拌 30 s 后, 在第二个 30 s 开始的同时均匀地将河砂加入, 把搅拌机调至高速再搅拌 30 s; 停拌 90 s。在停拌开始的 15 s 内, 将搅拌锅放下, 用刮刀将叶片、锅壁和锅底上的胶砂刮入锅中; 再在高速下继续搅拌 60 s。胶砂制备后立即进行成型, 将空试模和模套固定在振实台上, 用料勺将锅壁上的胶砂清理到锅内并翻转搅拌胶砂使其更加均匀, 成型时将胶砂分两层装入试模, 每次装模完成后振实 60 次, 共振实 120 次, 振实完成后移走模套, 用金属尺抹平, 总抹平次数不超过 3 次。活性测试配合比如表 4 所示。

Table 4. Biomass fly ash activity test mix ratio
表 4. 生物质飞灰活性测试配合比

组别	水泥(g)	标准砂(g)	生物质飞灰(g)	水(ml)	内掺(%)
1	450	1350	0	225	0
2	405	1350	45	225	10
3	360	1350	90	225	20
4	315	1350	135	225	30

将上述试块在标准养护环境下(GB/T 17671) [7]养护至 28 d, 按规定(GB/T 17671)分别测定对比胶砂和试验胶砂的抗压强度, 强度活性指数按照公式(1)计算, 结果保留至 1%。

$$H_{28} = \frac{R}{R_0} \times 100 \quad (1)$$

式中:

- H_{28} ——强度活性指数, %;
- R ——试验胶砂 28 d 抗压强度, 单位为兆帕(MPa);
- R_0 ——对比胶砂 8 d 抗压强度, 单位为兆帕(MPa)。

3.2. 生物质灰渣制备水泥砂浆

为了探究生物质灰渣的掺量与内养护效果对水泥基材料的影响程度, 本节设计了三种掺量的水泥砂

浆。将生物质灰渣颗粒按照 11.01% 的吸水率加入内养护水, 在开始制备水泥砂浆的 1 h 前提前预湿生物质灰渣, 目的是让生物质灰渣充分饱和的吸收水分。水泥砂浆制备方式和流程与 3.1 节试验方法一致, 不同的是在第二个 30 s 开始的同时均匀地将河砂与生物质灰渣加入。水泥砂浆的配合比如表 5 所示。

Table 5. Cement mortar mix ratio

表 5. 水泥砂浆配合比

组别	水泥(g)	河砂(g)	生物质灰渣(g)	水(ml)	内养护水(ml)	内掺(%)
1	450	1350	0	261	0	0
2	450	1282.5	67.5	261	3.23	5
3	450	1215	135	261	6.45	10
4	450	1147.5	202.5	261	9.68	15

4. 数据分析

4.1. 生物质飞灰的活性

将养护至 28 d 龄期的生物质飞灰活性指数测试试块按照规范进行抗压强度测试, 抗压强度测试结果如图 2 所示, 活性指数按照公式(1)进行计算, 计算结果如表 6 所示。

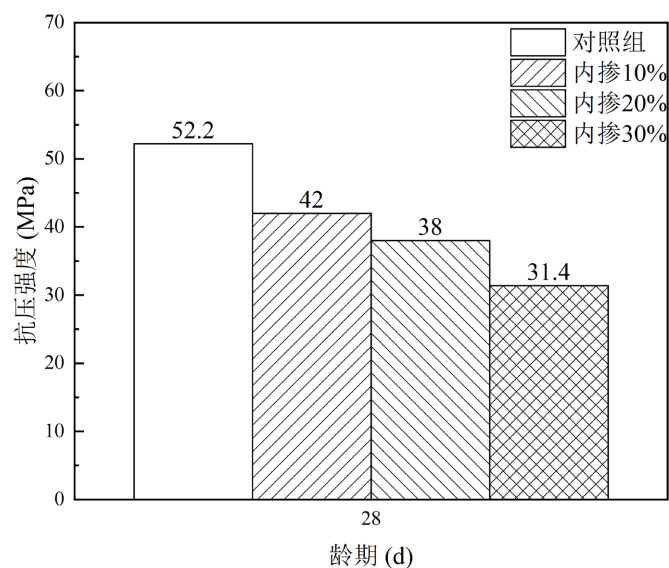


Figure 2. Compressive strength of biomass fly ash

图 2. 生物质飞灰的抗压强度

Table 6. Biomass fly ash activity index

表 6. 生物质飞灰活性指数

	内掺 10%	内掺 20%	内掺 30%
28 d	80%	73%	60%

根据表 6 所示结果, 内掺 10% 生物质飞灰的强度活性指数为 80%, 内掺 20% 生物质飞灰的强度活性指数为 73%, 内掺 30% 生物质飞灰的强度活性指数为 60%。可以观察到当生物质飞灰掺量从 10% 增至 30% 时, 强度活性指数由 80% 降至 60%, 呈现显著剂量依赖关系。掺量每增加 10%, 强度损失约 6.7~13.3

个百分点，说明生物质飞灰存在明显的强度抑制作用。在掺量 $\leq 20\%$ 时，强度活性保持基准材料强度的 73% 以上，而 30% 掺量时强度骤降至 60%，表明 20%~30% 区间可能存在活性组分稀释的临界阈值。

究其原因，当生物质飞灰掺量增加，水泥基材占比相应减少，导致 C_3S 、 C_2S 等活性矿物相总含量线性下降；生物质飞灰中有效 SiO_2 、 Al_2O_3 含量低于一级粉煤灰的 7 标准，当掺量超过 20% 时，有效活性物质总量无法满足火山灰反应需求，导致二次水化反应停滞；微结构方面，生物质飞灰可能含有未燃尽的碳或多孔结构，增加掺量会引入更多缺陷，影响密实度，导致孔隙率增加，从而强度下降。

而在 10% 掺量时仍保持 80% 强度活性，可直接用于地砖、路缘石等承重要求低的建材，也作为辅助胶凝材料与矿渣、粉煤灰复配，通过多元协同效应提升性能；或者通过机械活化来提高强度活性指数，比如通过球磨处理改善颗粒级配，提高比表面积等。

4.2. 生物质灰渣水泥砂浆的强度

分别测试不同掺量的生物质灰渣水泥砂浆试块 3 d、7 d、28 d 的抗折抗压数据，抗折数据如表 7 所示，抗折曲线图如图 3 所示；抗压数据如表 8 所示，抗压曲线图如图 4 所示。

Table 7. Anti bending data of cement mortar test blocks
表 7. 水泥砂浆试块抗折数据

组别	3 d	7 d	28 d
未掺入灰渣(MPa)	4.7	5.3	6
内掺 5% (MPa)	4.5	5.7	6.1
内掺 10% (MPa)	4.4	5.7	6.3
内掺 15% (MPa)	4.2	5.5	6.3

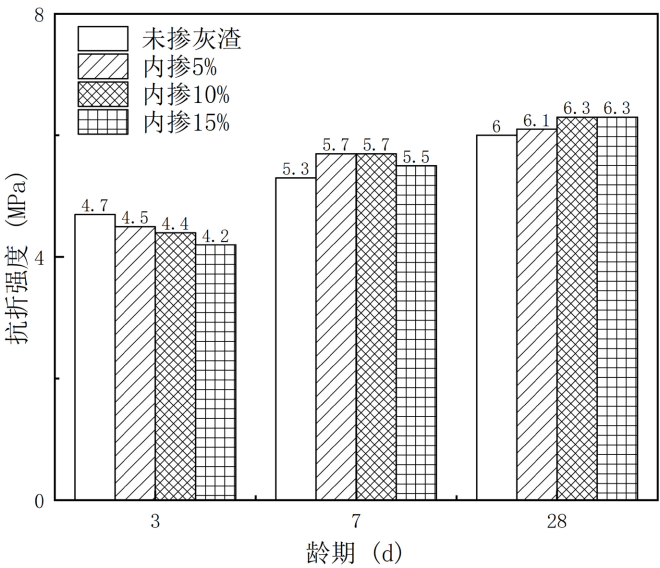


Figure 3. Flexural strength of biomass ash residue
图 3. 生物质灰渣的抗折强度

根据上图可以观察到，生物质灰渣水泥砂浆的抗折强度与掺量呈正相关，虽然在 3 d 龄期时，内掺组均略低于对照组；7 d 龄期时，只有内掺 15% 生物质灰渣的抗折强度低于对照组；但在 28 d 龄期时，内掺 5%、10%、15% 生物质灰渣的抗折强度均高于未掺灰渣的抗折强度(6 MPa)，抗折强度分别为 6.1、6.3、

6.3 MPa。

生物质灰渣经 1 h 预湿后，其内部孔隙吸水率为 11.01%，在水泥水化放热阶段，灰渣内部水分通过毛细作用逐步释放，使浆体内部相对湿度变化程度小，灰渣释放的水分加速了 C₃S 的溶解和 C-S-H 成核，缓解了灰渣掺入导致的早期水化抑制现象，灰渣释放的水分与 Ca(OH)₂ 形成碱性溶液，促进灰渣中活性 SiO₂、Al₂O₃ 的溶解，说明内养护环境更利于二次水化产物的持续生成；预湿过程可去除灰渣表面吸附的粉尘和未燃尽碳颗粒，并且生物质灰渣表面粗糙，生物质灰渣颗粒表面粗糙度显著高于河砂，粗糙表面提供更大的表面积，增强水泥水化产物的锚固作用，其多棱角形态在浆体中形成“锚固效应”，在砂浆中提供更大的机械咬合力，粗糙表面使水化产物 C-S-H 凝胶的渗透深度增加，形成更致密的界面过渡区，使灰渣-水泥界面过渡区粘结强度提升，抑制微裂纹萌生，且生物质灰渣表面的多孔结构使其与水泥水化产物的结合更加紧密，形成应力屏障，迫使裂纹绕行或终止于骨料表面，最终提升生物质灰渣的抗折强度。

Table 8. Cement mortar compression data
表 8. 水泥砂浆抗压数据

组别	3 d	7 d	28 d
未掺入灰渣(MPa)	22.4	32	43.1
内掺 5% (MPa)	22.1	30.8	41.1
内掺 10% (MPa)	21.8	30.9	41.2
内掺 15% (MPa)	21.9	30.1	37.5

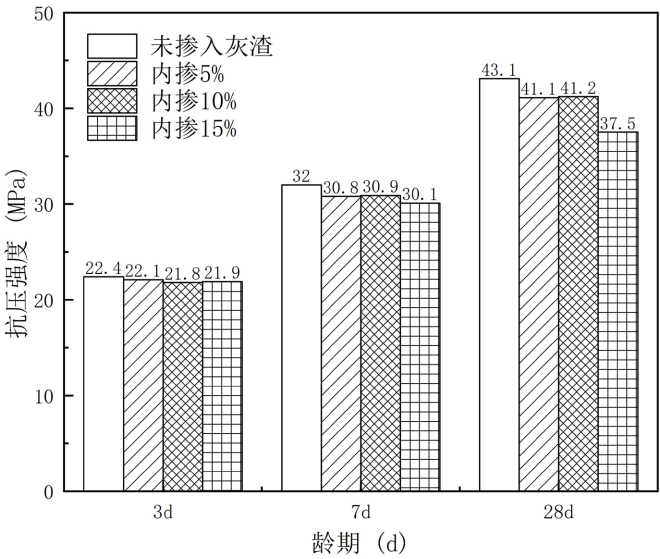


Figure 4. Compressive strength of biomass ash residue
图 4. 生物质灰渣的抗压强度

从图 4 中可以观察到，内掺量 5%~15%时，3 d 抗压强度较未掺组降低 0.3~0.6 MPa，但掺量 15%时强度略高于 10%组，表明灰渣早期可能通过微集料填充弥补部分胶凝损失；掺量 5%~10%的 7 d 强度接近未掺组，但 15%掺量组强度显著降低，说明高掺量下火山灰反应尚未充分启动；掺量 ≤ 10%时，28 d 强度保持未掺组的 95.4%~95.6%，而 15%掺量组强度骤降至 37.5 MPa，揭示高掺量下活性不足的瓶颈。

生物质灰渣替代河砂后，尽管水泥用量未减少，但其活性组分早期未能参与水化反应，导致有效胶凝物质总量未增加，是抗压强度下降的主要原因。生物质灰渣经 1 h 预湿后，其内部孔隙在水泥水化放热

阶段逐步释放水分,维持浆体内部湿度,这种水分补给使灰渣周边形成高湿度微区,促进未水化水泥颗粒的持续反应。小于 10%替代河砂时,胶凝稀释、火山灰反应与内养护效应形成动态平衡,28 d 抗压强度降幅控制在 5%以内,满足工程容许范围。15%掺量时,胶凝体系失衡、孔隙劣化与火山灰反应滞后形成负向循环,导致强度显著下降。当生物质灰渣掺量过高时,由于生物质灰渣本身粗糙多孔,孔隙率远高于河砂,内养护效应无法弥补材料本身的劣性,导致抗压强度与掺量形成负相关趋势。

5. 结论

(1) 生物质飞灰的掺量从 10%增至 30%时,其 28 d 强度活性指数由 80%降至 60%,掺量每提升 10% 平均损失 13.3%强度,表明其火山灰活性显著弱于传统矿物掺合料,但 10%掺量时强度活性达 80%,可满足非承重建材需求。

(2) 预湿灰渣通过持续释放水分,维持浆体湿度,促进 28 d 时火山灰反应充分发展,灰渣粗糙表面与多孔结构形成机械咬合,提升界面过渡区粘结强度,抗折强度反超未掺组。

(3) 生物质灰渣掺量小于 10%时,28 d 抗压强度保持在未掺组的 95%左右,抗压强度损失小于 5%,可满足承重结构的需求。

(4) 飞灰宜作为辅助胶凝材料控制掺量 $\leq 20\%$,灰渣替代河砂的安全阈值为 $\leq 10\%$,二者协同可实现固废资源化与建材低碳化的双赢目标。

参考文献

- [1] 张雁茹,任常在,宋占龙,等. 生物质电厂灰渣替代水泥掺合料的性能研究[J]. 无机盐工业, 2023, 55(10): 128-135.
- [2] 赵保峰,谢洪璋,任常在,等. 生物质电厂灰渣建材化应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 6802-6811.
- [3] 李邦强. 生物质焚烧灰渣制备生态砂浆研究[J]. 砖瓦, 2023(12): 56-60.
- [4] 王紫欣,李奥悉,李柯薇,等. 生物质灰渣露天堆放对地下水环境效应的影响[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(11): 65-70.
- [5] 胡晓曼,董献国. 机制砂和细砂在高性能混凝土中的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(1): 13-16.
- [6] 中国建筑材料联合会. GB/T 14685-2022 建设用卵石、碎石[S].
- [7] 中国建筑材料科学研究院. GB/T 17671-2021 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法) [S].