



秸秆灰混凝土的性能研究进展

方文迪, 章文姣, 蒋玉恒

(辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要:为了更好地了解秸秆灰混凝土在实际应用中的性能并减少水泥使用对环境的影响, 本文通过综述秸秆灰混凝土领域的相关研究, 重点探讨了秸秆灰作为一种农业废弃物和高火山灰活性材料作为水泥替代品的可能性。结果表明: 秸秆灰掺量对混凝土的工作性能、力学性能以及耐久性能具有显著影响, 适当掺入可以优化混凝土的整体性能。本文结果可为秸秆灰混凝土的研究与应用提供理论依据和技术借鉴。

关键词: 秸秆灰; 混凝土; 工作性能; 力学性能; 耐久性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)08-0001-05

doi: 10.13402/j.gcejs.2025.08.094

Research progress on performance of straw ash concrete

FANG Wendi, ZHANG Wenjiao, JIANG Yuheng

(College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract: In order to better understand the performance of straw ash concrete in practical applications and reduce the environmental impact of cement use, the relevant research in the field of straw ash concrete are reviewed, and the possibilities of straw ash as an agricultural waste and high volcanic ash active materials as cement substitutes are discussed. The results show that the amount of straw ash has a significant impact on the working performance, mechanical properties and durability of concrete, and the appropriate dosage could optimize the overall performance of concrete. The results can provide a theoretical basis and technical reference for the research and application of straw ash concrete in the future.

Key words: straw ash; concrete; working performance; mechanical properties; durability

混凝土因其建造成本相对较低、机械性能较高以及耐久性能较好, 被广泛应用于现代建筑结构中^[1-3]。据估计, 全球混凝土的年产量约为 250 ~ 300 亿吨, 其生产过程中所产生的温室气体排放量约占全球总排放量的 8% ~ 9%^[4]。普通波特兰水泥 (ordinary portland cement, OPC) 是混凝土中的主要胶凝材料, 随着混凝土需求量的不断增加, OPC 的需求量也在不断增加, 而其生产过程所排

放的二氧化碳约占全球碳排放总量的 5% ~ 8%^[5]。为了减少 OPC 的大量使用, 促进建筑行业的绿色化与可持续发展, 寻找一种绿色环保的替代材料部分取代 OPC 尤为重要。

中国作为农业大国, 每年稻谷、小麦、玉米、土豆等农作物产量巨大, 在收割后会产生大量的秸秆废弃物^[6]。目前, 这些废弃秸秆常通过直接填埋或露天焚烧的方式处理, 这不仅占用土地资

收稿日期: 2024-11-29

基金项目: 辽宁省教育厅高等学校基本科研资助项目 (LJ212410154032); 辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金资助项目 (LJZZ222410154008); 辽宁工业大学大学生创新创业训练计划省级资助项目 (162)

作者简介: 方文迪 (2002—), 男, 从事高性能混凝土方面的研究。

通信作者: 章文姣 (1985—), 女, 副教授, 博士, 从事高性能混凝土方面的研究与应用。

源,还会释放大量有毒气体,对环境造成严重污染,并危害人类健康^[7-9]。为减少此类问题,可以将秸秆进行集中回收并统一焚烧,利用焚烧过程中产生的热能发电,同时对排放的废气进行二次净化处理以降低环境污染^[10]。此外,秸秆在特定条件下充分焚烧后形成的秸秆灰具有较大的比表面积和丰富的无定形二氧化硅成分,从而展现出良好的火山灰活性,可作为 OPC 的部分替代材料^[11-12]。这种方式既能有效缓解因秸秆不合理处理带来的环境压力,也有助于推动 OPC 用量的减少和建筑业的可持续发展。

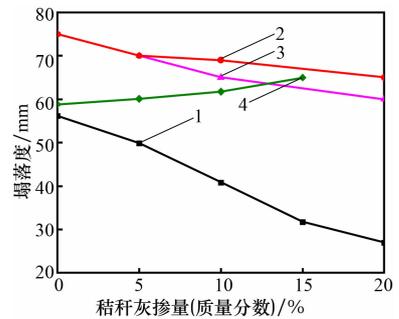
本文对近年来关于秸秆灰在混凝土中部分替代 OPC 的研究进展进行综述,重点探讨秸秆灰掺量对秸秆灰混凝土(straw ash concrete, SAC)的工作性能、力学性能和耐久性能 3 个方面的影响。通过总结现有研究成果,旨在为未来 SAC 的深入研究与推广应用提供理论支持,并对其发展方向进行展望。

1 工作性能

1.1 流动性

坍落度是衡量混凝土流动性优劣的重要指标。图 1 为秸秆灰掺量与 SAC 坍落度之间的关系。由图 1 可知:在部分研究^[13-15]中,随着秸秆灰掺量(质量掺量,下同)的增加,SAC 的坍落度呈下降趋势;而在其他研究中,则观察到坍落度随秸秆灰掺量的增加而上升。BHEEL 等^[13]的研究发现,随着小麦秸秆灰掺量的增加,SAC 的坍落度持续下降。当掺量为 20% 时,其坍落度较未掺小麦秸秆灰的基准混凝土的坍落度降低了 51.8%。AGWA 等^[14]的研究则发现,当水稻秸秆灰掺量为 20% 时,SAC 的坍落度降到最低值,比未掺水稻秸秆灰的混凝土的坍落度降低了 20%。此外,棉花秸秆灰混凝土的坍落度也随掺量的增加而下降,在棉花秸秆灰掺量为 20% 时,坍落度降低了 13.3%。然而,SALEM 等^[15]的研究结果则呈现相反趋势:当玉米秸秆灰掺量增加至 15% 时,SAC 的坍落度达到最高值 65 mm。

SAC 坍落度随秸秆灰掺量增加而降低的主要原因:1) 秸秆灰的比表面积高于水泥,且其表面存在较多孔洞,因此能够吸附更多水分,导致混



1—小麦秸秆灰; 2—棉花秸秆灰;
3—水稻秸秆灰; 4—玉米秸秆灰。

图 1 秸秆灰掺量和 SAC 坍落度的关系

凝土中自由水含量减少,从而降低坍落度;2) 秸秆灰颗粒形状不规则,增大了其与混凝土组分之间的内摩擦,进一步降低了坍落度^[16]。而对于玉米秸秆灰,研究中观察到坍落度随掺量增加而上升的现象,主要是因为其粒径小于水泥,具备一定的填充作用,能够有效填补混凝土中的空隙,降低微粒之间的摩擦力,从而提高坍落度^[17]。

1.2 凝结时间

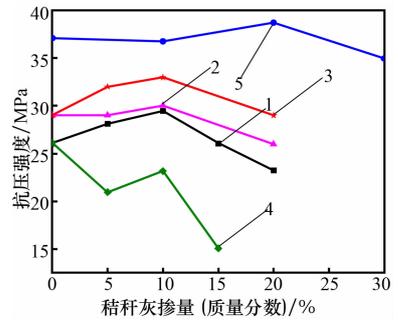
目前关于秸秆灰掺量对 SAC 凝结时间影响的研究中,大多数研究人员认为,添加秸秆灰会导致 SAC 的凝结时间延长。CAO 等^[18]的试验表明,随着青稞秸秆灰掺量的增加,SAC 的凝结时间逐渐延长。当青稞秸秆灰掺量为 30% 时,其凝结时间比未添加青稞秸秆灰的混凝土的凝结时间延长了 36.36%。PANDEY 等^[19]的研究也发现,SAC 的凝结时间随着水稻秸秆灰掺量增加而不断延长。当水稻秸秆灰掺量为 5%~30% 时,凝结时间延长幅度为 10%~80%。造成这种现象的原因可能包括:秸秆灰具有较高的比表面积和较强的吸水能力,会吸附较多水分,从而减少参与水化反应的自由水量,降低水化反应速率;此外,随着秸秆灰掺量的增加,水泥的相对质量分数减少,也进一步减缓了水化反应速度,从而延缓了混凝土的硬化过程。AHMAD 等^[20]的试验结果显示,当小麦秸秆灰掺量为 21% 时,SAC 的凝结时间比未添加小麦秸秆灰的混凝土延长了 47.6%,进一步验证了这一结论。

2 力学性能

2.1 抗压强度

图 2 为秸秆灰掺量与 SAC 抗压强度的关系。

由图 2 可知: 总体上秸秆灰的掺量控制在 30% 以下, 而 SAC 的抗压强度随着掺量的增加呈现出不同的发展趋势。BHEEL 等^[13]的研究表明, 随着小麦秸秆灰掺量的增加, SAC 的抗压强度先升高后降低。当小麦秸秆灰掺量为 10% 时, 抗压强度比未掺小麦秸秆灰的混凝土的抗压强度提高了 12%。AGWA 等^[14]也观察到了类似趋势: 当棉花秸秆灰掺量为 10% 时, SAC 的抗压强度达到最高值 33 MPa; 继续增加掺量后, 抗压强度则逐渐下降。这主要是因为秸秆灰中含有大量 SiO_2 , 其可与水泥水化产物如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应, 生成额外的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶。这些 C-S-H 凝胶能够有效降低混凝土的孔隙率, 改善界面过渡区的孔隙结构, 从而提高 SAC 的抗压强度。此外, 未参与反应的秸秆灰还具有一定的集料效应, 也有助于降低孔隙率, 进一步提高力学性能。然而, 当秸秆灰掺量过高时, 水泥的实际用量显著减少, 导致水化产物(如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 凝胶)生成量下降, 进而削弱了 SAC 抗压强度。尽管 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 仍能与 SiO_2 反应生成 C-S-H 凝胶, 但其反应能力是有限的, 过量的秸秆灰反而会抑制整体强度的发展^[21]。韩江伟等^[22]的研究也发现, 随着棉花秸秆灰掺量的增加, SAC 的抗压强度呈现“先降、再升、后降”的变化趋势。仅在掺量为 20% 时, 抗压强度比未掺棉花秸秆灰的混凝土的抗压强度提高了 4.3%。AGWA 等^[14]还在水稻秸秆灰研究中发现, 当掺量为 10% 时, SAC 的抗压强度达到 30 MPa, 高于未掺水稻秸秆灰的混凝土的抗压强度。SALEM 等^[15]的研究结果则显示, 无论玉米秸秆灰的掺量如何变化, SAC 的抗压强度始终低于未掺玉米秸秆灰的混凝土的抗压强度。这是因为在低掺量下, 秸秆灰作为火山灰材料的活性作用不明显, 水泥水化效率较低, 导致强度有所下降。只有当掺量进入有效范围时, 秸秆灰的火山灰效应才能显现。然而, 若继续增加掺量, 不仅水泥含量减少, 影响水化产物的生成, 而且部分秸秆灰未能完全反应, 其活性发挥需要更长时间^[23], 因此最终强度仍低于未掺玉米秸秆灰的混凝土的抗压强度。



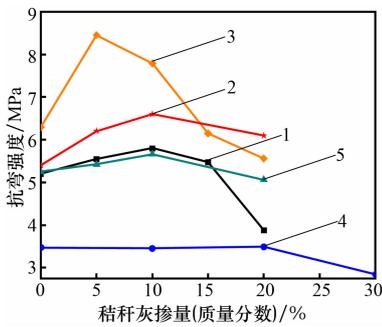
1—小麦秸秆灰; 2—水稻秸秆灰; 3—棉花秸秆灰;
4—玉米秸秆灰; 5—棉花秸秆灰。

图 2 秸秆灰掺量和 SAC 抗压强度的关系

2.2 抗弯强度

图 3 为秸秆灰掺量与 SAC 抗弯强度的关系曲线。由图 3 可知: 总体上 SAC 的抗弯强度随着秸秆灰掺量的增加呈现先升高后降低的趋势。BHEEL 等^[13]的研究表明, SAC 的抗弯强度随着小麦秸秆灰掺量的增加先上升后下降。当小麦秸秆灰掺量为 10% 时, 抗弯强度达到 5.8 MPa; 但继续增加掺量后, 抗弯强度显著下降, 最终比未掺小麦秸秆灰的混凝土的抗弯强度低了 25%。AGWA 等^[14]则发现, 添加棉花秸秆灰的 SAC 的抗弯强度始终高于未掺棉花秸秆灰的混凝土的抗弯强度。当棉花秸秆灰掺量为 10% 时, 抗弯强度达到最大值 6.6 MPa。CAO 等^[18]的研究显示, 添加青稞秸秆灰后, SAC 的抗弯强度也呈现出先升后降的趋势。当青稞秸秆灰掺量为 5% 时, 抗弯强度最高可达 8.5 MPa; 而当掺量增加至 20% 时, 抗弯强度降至最低值 4.1 MPa。DUPPATI 等^[24]和韩江伟等^[22]的研究也得出了类似结论, 进一步验证了这一变化规律。

上述研究表明, 抗弯强度的提升主要归因于秸秆灰中活性 SiO_2 参与火山灰反应, 生成额外的 C-S-H 凝胶, 从而改善了混凝土的微观结构, 提高了致密性, 进而增强了混凝土的力学性能。而抗弯强度的下降可能由两个因素引起: 1) 过量加入秸秆灰会稀释水泥质量分数, 导致界面过渡区应力降低。同时, 水泥质量分数减少会降低水化产物的生成量, 而水化产物的减少是混凝土强度下降的关键原因。2) SAC 流动性的降低会导致在成型过程中形成更多孔隙, 孔隙率的增加将削弱混凝土基体的致密程度, 从而降低其承受外部弯曲应力的能力, 最终导致抗弯强度下降^[21]。



1—小麦秸秆灰；2—棉花秸秆灰；3—青稞秸秆灰；
4—棉花秸秆灰；5—水稻秸秆灰。

图 3 秸秆灰掺量和 SAC 抗弯强度的关系

3 耐久性能

孔隙度是影响 SAC 耐久性的关键因素之一。适量添加秸秆灰可以有效改善 SAC 的微观结构,从而提高其耐久性能,包括抗氯离子渗透性、耐硫酸盐侵蚀性、抗碳化性、抗冻融性等。AHMAD 等^[20]的研究发现,在经过氯离子侵蚀后,添加 40% 小麦秸秆灰的 SAC 的抗压强度达到 30.75 MPa,比未添加小麦秸秆灰的混凝土的抗压强度高 36%。这是因为小麦秸秆灰颗粒较细,能够更好地填充混凝土内部孔隙,优化微观孔隙结构,从而显著提升 SAC 的抗氯离子渗透能力。PANDEY 等^[25]研究发现,添加 10% 水稻秸秆灰的 SAC 在经历硫酸侵蚀后,其抗压强度为 50.6 MPa,高于未添加水稻秸秆灰的混凝土的抗压强度 48.4 MPa。此外,该掺量下 SAC 的碳化深度也比未掺水稻秸秆灰的混凝土的碳化深度降低了 13%。这主要是由于水稻秸秆灰参与的火山灰反应,二次生成的 C-S-H 凝胶有助于改善混凝土界面过渡区的微观结构,填充内部孔隙和裂缝,使基体更加致密,从而提升了 SAC 的耐硫酸盐侵蚀性能和抗碳化能力。CHEN 等^[26]的研究显示,当玉米秸秆灰掺量为 21% 时,SAC 在经历 36 次冻融循环后的抗压强度损失率比未添加玉米秸秆灰的混凝土低 12.65%。这主要是由于玉米秸秆灰的加入促进了 SAC 内部的火山灰反应,其富含的 SiO_2 和 Al_2O_3 与水化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,生成额外的 C-S-H 凝胶,从而降低孔隙率,提高材料的致密性,进而增强了 SAC 的抗冻融性能。然而,由于秸秆灰的水化反应需要一定时间,其在完全反应之前,可能会

在 SAC 内部产生一定的空隙。为缓解这一问题,研究者发现可通过添加纳米材料来进一步优化孔隙结构,从而提升 SAC 的整体性能^[27-29]。

4 结 论

(1) 秸秆灰种类和掺量对 SAC 的流动性具有显著影响。目前不同研究人员所得结论不尽相同。但总体来看,添加秸秆灰后,SAC 的凝结时间普遍延长。

(2) 适量加入秸秆灰有助于提高 SAC 的抗压强度。然而,若加入量过多,则可能导致水泥含量大幅降低,从而减少水化产物的生成,反而引起 SAC 抗压强度的降低。在适宜的掺量范围内,掺加秸秆灰的 SAC 的抗弯强度可高于未掺秸秆灰的普通混凝土。

(3) 适量掺加秸秆灰可以有效提升 SAC 的耐久性能,如增强其抗氯离子渗透性、耐硫酸盐侵蚀性和抗碳化能力等。为进一步改善 SAC 的孔隙结构,可在材料设计中引入纳米材料。

(4) 目前多数研究主要集中在秸秆灰掺量对 SAC 力学性能和耐久性的影响方面,而对于秸秆灰燃烧温度等因素的研究仍较为有限。未来可在这些方向上开展更深入的研究。

(5) 秸秆灰中常含有一些不参与反应的元素及杂质,这将削弱其在水化过程中的活性,进而影响 SAC 的力学性能和耐久性。为缓解这一问题,可在秸秆焚烧前进行适当的预处理,如水洗或酸洗,以去除部分杂质,从而提升 SAC 的整体性能。

参考文献:

- [1] MATHER B. Concrete durability[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(1): 3-4.
- [2] 胡时胜,王道荣,刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的实验研究[J]. 工程力学, 2001, 18(5): 115-118; 126.
- [3] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术, 2010, 41(12): 1074-1077.
- [4] MONTEIRO P J, MILLER S A, HORVATH A. Towards sustainable concrete[J]. Nature materials, 2017, 16(7): 698-699.
- [5] KHAN M, ABBAS Y, FARES G. Review of high and ultrahigh performance cementitious composites incorporating

- various combinations of fibers and ultrafines[J]. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2017, 29(4): 339–347.
- [6] 张晓庆,王梓凡,参木友,等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(9): 30–41.
- [7] ZHANG H, WANG S, HAO J, et al. Air pollution and control action in Beijing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1519–1527.
- [8] 刘树林,马丽文. 农村秸秆焚烧带来的危害及如何综合利用[J]. *农村实用技术*, 2023(3): 116–117.
- [9] 隋华,陈静. 秸秆焚烧的危害及综合利用探究[J]. *南方农业*, 2020, 14(8): 165–166.
- [10] 罗朝阳,罗吉,李林,等. 垃圾秸秆焚烧炉应用现状及发展建议[J]. *现代农业科技*, 2024(8): 88–91.
- [11] 许鹏,许昌东,王正君,等. 生物质秸秆灰活性分析及对混凝土力学特性的影响[J]. *混凝土*, 2020(3): 108–112.
- [12] 张强,李耀庄,刘保华. 秸秆资源在混凝土中应用的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(4): 1000–1003.
- [13] BHEEL N, IBRAHIM M H W, ADESINA A, et al. Mechanical performance of concrete incorporating wheat straw ash as partial replacement of cement[J]. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2021, 6(1): 1–7.
- [14] AGWA I S, OMAR O M, TAYEH B A, et al. Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235: 117541.
- [15] SALEM S, HAMDY Y, ABDELRAOUF E S, et al. Towards sustainable concrete: Cement replacement using Egyptian cornstalk ash[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01193.
- [16] TORRES DE SANDE V, SADIQUE M, BRAS A, et al. Activated sugarcane bagasse ash as efficient admixture in cement-based mortars: Mechanical and durability improvements[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 59: 105082.
- [17] HAMADA H M, AL-ATTAR A A, YAHAYA F M, et al. Effect of high-volume ultrafine palm oil fuel ash on the engineering and transport properties of concrete[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2020, 12: e00318.
- [18] CAO F, QIAO H X, ZHANG Y S, et al. Early-age performance and mechanism of magnesium oxychloride cement mortar mixed with highland barley straw ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 401: 132979.
- [19] PANDEY A, KUMAR B. A comprehensive investigation on application of microsilica and rice straw ash in rigid pavement[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 252: 119053.
- [20] AHMAD M R, SHARIF M B, ALI H A, et al. Experimental investigation of pozzolanic concrete containing wheat straw ash[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2019, 46(10): 941–951.
- [21] HAKEEM I Y, AMIN M, ZEYAD A M, et al. Effects of nano sized sesame stalk and rice straw ashes on high-strength concrete properties[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 370: 133542.
- [22] 韩江伟,张恩泽,郭雅,等. 不同棉花秸秆灰掺量对复合胶结体系力学性能试验研究[J]. *中国建材科技*, 2023, 32(6): 92–94.
- [23] HAFEZ R D A, TAYEH B A, ABDELSAMIE K. Manufacturing nano novel composites using sugarcane and eggshell as an alternative for producing nano green mortar[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(23): 34984–35000.
- [24] DUPPATI S, GOPI R. Strength and durability studies on paver blocks with rice straw ash as partial replacement of cement[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 52: 710–715.
- [25] PANDEY A, KUMAR B. Investigation on the effects of acidic environment and accelerated carbonation on concrete admixed with rice straw ash and microsilica[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 29: 101125.
- [26] CHEN S K, WANG Y J, LIU Y, et al. Mechanical properties, pore structure and freeze-thaw resistance of recycled aggregate concrete based on ash of mushroom and corn straw[J]. *Structures*, 2024, 68: 107167.
- [27] REN J G, LUO X X, BAI R Q, et al. Pore characteristics of different phase in nano-modified concrete and their influences on the compressive strength[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 46: 103784.
- [28] 李福海,丁溢骏,李洲,等. 基于多尺度纤维与纳米材料改进的3D打印混凝土材料力学性能研究[J]. *中国公路学报*, 2025, 38(4): 311–144.
- [29] 刘先南,王珂,李学军. 双掺纳米二氧化钛和秸秆灰对混凝土力学及微观特性试验研究[J]. *混凝土*, 2023(6): 125–129; 133.