文章编号:1674-2869(2026)02-0167-10

蔗渣灰对水泥混凝土性能影响的研究进展

黄 萍[1],陈智浩[1],吴能森[2],谢信永[1],徐 青*[2]
1. 福州工商学院新能源汽车与工程学院,福建 福州 350715;
2. 福建农林大学交通与土木工程学院,福建 福州 350108

摘 要:蔗渣焚烧发电后产生的蔗渣灰(SCBA)是蔗糖产业链的最终废弃物,常被用作甘蔗种植园的肥料。然而,SCBA作为肥料不仅难以提供矿物质营养,还存在污染土壤和水源的隐患。为降低SCBA对环境的负面影响,建筑材料领域的学者将其应用于水泥基复合材料中,相关试验研究已显示出积极的成果。系统综述了SCBA应用于水泥混凝土的国内外文献资料,详细归纳了SCBA分别作为胶凝材料和填充材料时,对水泥混凝土的物理性质(如流动性、凝固时间等)、力学性能(如抗压强度、抗拉强度等)以及耐久性能(如抗渗性、抗氯性等)产生的影响。同时,深入讨论了SCBA提升水泥混凝土宏观性能的关联机制,其根本原因在于SCBA中无定形SiO_2所诱发的二次水化反应。最后,总结SCBA在水泥混凝土领域的研究成果,并展望未来的研究方向,以期为SCBA在混凝土中的进一步研究和规模化应用提供理论依据,以促进农业废弃物的高值利用,推动绿色混凝土技术的发展。

关键词:蔗渣灰;水泥混凝土;火山灰活性;力学性能;耐久性
中图分类号:TU52 **文献标志码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202404009

Review on the influence of sugarcane bagasse ash on the properties of cement concrete

HUANG Ping[1], *CHEN Zhihao*[1], *WU Nengsen*[2], *XIE Xinyong*[1], *XU Qing*[*2]
1. College of New Energy Vehicle and Engineering, Fuzhou Technology and Business University, Fuzhou 350715, China;
2. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China

Abstract: Sugarcane bagasse ash (SCBA), a residual waste from bagasse incineration for power generation in the sugar industry, is commonly used as a fertilizer in sugarcane plantations. However, SCBA not only provides limited mineral nutrients as a fertilizer but also carries potential risks of contaminating soil and water sources. To mitigate its adverse environmental impacts, researchers in construction materials have incorporated SCBA into cement-based composites, with related experimental studies showing promising results. In this paper, we systematically reviewed domestic and international literature on the application of SCBA in cement concrete, summarizing in detail its effects, when used as a cementitious material or filler, on the physical properties (e.g., workability, and setting time), mechanical properties (e.g., compressive strength, and tensile strength), and durability (e.g., impermeability, and chloride ion resistance) of cement concrete. Furthermore, the underlying mechanisms by which SCBA enhances the macro-properties of cement concrete were thoroughly discussed, which are fundamentally attributed to the secondary hydration reaction induced by the amorphous SiO_2 present in SCBA. Finally, the research findings on SCBA in cement concrete

收稿日期:2024-04-06
基金项目:福建省教育科学规划2024年度常规课题(FJJKBK24-136);福建省本科高校教育教学研究重大项目(FBJY20240005);福建省中青年教师教育科研项目(科技类)(JZ250071)
作者简介:黄 萍,硕士,讲师。Email:huangping@fafu.edu.cn
***通信作者**:徐 青,博士,副教授。Email:xuqing@fafu.edu.cn
引文格式:黄萍,陈智浩,吴能森,等. 蔗渣灰对水泥混凝土性能影响的研究进展[J]. 武汉工程大学学报,2026,48(2):167-176.

were summarized, and future research directions were proposed, aiming to provide a theoretical basis for further investigation and large-scale application of SCBA in concrete, promote the high-value utilization of agricultural waste, and advance the development of green concrete technology.

Keywords: sugarcane bagasse ash; cement concrete; pozzolanic activity; mechanical property; durability

甘蔗是人类主要的糖类作物，其产业规模随人口增长与经济扩张持续扩大。在糖类生产链中，榨汁残余物（蔗渣）经锅炉焚烧发电后产生的蔗渣灰（sugarcane bagasse ash，SCBA）是糖类生产链的最终废弃物。在中国，SCBA通常被用作甘蔗种植园的肥料。但研究发现，SCBA作为肥料使用不仅无法提供足够的矿物质营养，并且浸出的物质存在污染土壤和水源的隐患[1]。鉴于此，学术界近年来致力于探索SCBA资源化利用的新路径[2-3]。

SCBA的化学组分主要是二氧化硅（SiO_2）和三氧化二铝（Al_2O_3），该组分特征使其表现出优异的硬度特性、热稳定性及化学惰性。基于上述材料特性，SCBA在建筑材料领域展现出多重应用潜力，包括但不限于：混凝土矿物掺合料、生态烧结砖添加剂及地基改良材料。其中，SCBA作为混凝土制备的原材料是其在建筑领域的研究热点[2]。目前，国外已经展开了一系列关于SCBA应用于混凝土中的研究，作为全球第三大蔗糖生产国的中国在此领域的研究仍处于起步阶段[4]。

本文系统阐述了SCBA在水泥混凝土中分别作为辅助胶凝材料和填充材料的研究进展，深入分析了SCBA对水泥混凝土物理性能、力学性能及耐久性能的影响，并对其作用机理进行了探讨。旨在为推动SCBA在水泥基材料中的规模化应用提供理论支撑，对实现农业固废高值化利用、促进建筑业低碳转型具有双重战略意义。

1 SCBA作为辅助胶凝材料在水泥混凝土中的应用

经检测，SCBA中SiO_2、Al_2O_3和氧化铁（Fe_2O_3）的总质量分数≥70%，其化学组成满足火山灰活性材料的关键指标要求，表明该材料具备作为混凝土掺合料的潜在应用价值[5]。

1998年，学者首次将SCBA作为火山灰材料应用于混凝土中，并发现掺入适量SCBA可以提高混凝土的抗压强度[6]。后来，SCBA被认定为潜在火山灰质辅助胶凝材料，进而引发持续性学术关注与研究。研究表明，SCBA作为辅助胶凝材料加入混凝土中，当质量替代率控制在合适范围内（≤20%）时，可以提高混凝土的力学性能[7]、降低水化热[8]、改善孔结构[9]、降低渗透性[10]，20%~25%的质量替代率对混凝土耐久性能无负面影响[11]。基于表1对SCBA影响水泥混凝土性能

表1 SCBA作为辅助胶凝材料对水泥混凝土性能的影响

Table 1 Effect of SCBA as an auxiliary cementitious material on the properties of cement concrete

性能		SCBA质量替代率对混凝土的影响	参考文献
物理性能	水化热	降低总热量	[8,10,12]
	干缩性	烧失量为3%~6%时，影响不大	[10,13-14]
	凝固时间	延长	[15-17]
	用水量	增加	[18-19]
	流动性	没有定论	[7,20-22]
	干缩性	在允许范围内	[10,13-14]
力学性能	抗压性	先增加后减少	[7,21]
	抗拉性质	先增加后减少	[13,21]
	抗折强度	先增加后减少	[23-24]
	弹性模量	降低	[13,25-26]
耐久性	界面过渡区	减少	[27-28]
	孔分布	改善	[9,16,29]
	抗氯性	提高	[9,10,28]
	电阻率	增加	[10,30]
	耐酸性、耐高温性	提高	[7,31-32]
	碱-硅膨胀	降低	[16,33-34]
	碳化深度	增加	[35-36]

（物理、力学及耐久性）规律的系统梳理，后续将对其内在影响机理进行深入解析。

1.1　物理性能

SCBA作为辅助胶凝材料用于混凝土制备，可降低混凝土水化热，并延长混凝土的初凝和终凝时间[5,8]。Montakarntiwong等[12]的研究表明，SCBA可降低混凝土水化热峰值温度4~11 ℃，并且达到峰值的时间延迟1~3 h。Bahurudeen等[10]发现用SCBA替代质量分数10%和20%的水泥，混凝土的总热量较对照组均下降约60 kJ/kg。据报道，水泥化学组分中铝酸三钙（C_3A）、硅酸三钙（C_3S）和石膏的含量决定了水泥的放热特性[37]。由于SCBA的替代稀释了水泥的成分，基体中C_3A和C_3S含量减少，因此降低了混凝土水化热并延长了凝结时间[8]。此外，SCBA具有的孔隙结构会吸附水分，导致基体凝结时间变长[17]。

SCBA对混凝土流动性的影响，由于受混凝土配合比和SCBA性质差异的影响，目前没有准确定论。将SCBA研磨至水泥相近细度且质量替代率低于30%时，坍落度随SCBA替代率的增加呈线性增加[7]。这归因于SCBA具有类似玻璃面的结构和较低的烧失量（loss-on-ignition，LOI）[20-21]。另外一些研究表明，由于SCBA中碳含量高，并且其不规则的多孔结构会吸收部分拌合用水，导致混凝土的流动性下降[38]。SCBA替代率的提升将显著增加混凝土需水量。为确保混凝土的正常稠度，需通过引入减水剂或增加拌合水用量进行补偿调控[18-19]。

SCBA对混凝土干缩性的影响与SCBA质量替代率和LOI有关。当SCBA的LOI值低于6%时，其质量替代率对混凝土的干缩性能几乎没有影响[10]；而当LOI值超过6%时，随着质量替代率的增加干燥收缩随之增加[13]，但均低于允许极限值（600×10^{-6}~800×10^{-6}）[14]。基于以上实验结果分析表明，不同LOI值的SCBA对混凝土的干燥收缩存在差异，但都在允许范围内。

1.2　力学性能

鉴于配合比设计参数与SCBA物化特性存在显著差异，现阶段对SCBA混凝土抗压强度的最优替代率尚未形成一致意见[7,21,23-24,38-42]。不同SCBA质量替代率对混凝土抗压强度的影响，整合至图1中。由图1可知，SCBA的最佳质量替代率一般为5%~10%，当替代率超出该范围时，混凝土抗压强度反而下降。研究表明，通过物理预处理工艺将SCBA粒径调整至接近水泥粒度，可显著提高其在混凝土中的最佳掺量。Bahurudeen等[10]采用球磨工艺将SCBA球磨至水泥粒度，当掺量达到20%时混凝土抗压强度较对照组提升12%；此外，Le等[38]通过煅烧、冷却、研磨工艺制备的SCBA，在30%掺量下仍能使混凝土保持与对照组相当的力学性能。

通过X射线衍射、热重分析及扫描电子显微镜等微观测试方法研究SCBA在水泥基复合材料中的作用机制，SCBA作为辅助胶凝材料主要通过以下3种机制协同提升混凝土的力学性能：（1）SCBA中无定形SiO_2的火山灰活性促进了二次水化反应[10]；（2）SCBA中超细颗粒有效填充水泥-骨料间的空隙，优化了微观结构[8]；（3）SCBA中孔隙结构抑制了体系内部相对湿度的降低，起到了增强内部养护的作用[8]。上述机制协同促进了水化反应的进程与微观结构的致密化，进而共同提升了混凝土的宏观力学性能。

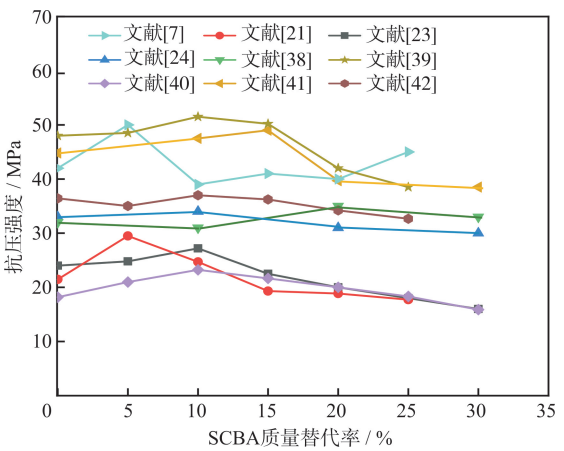

图1　SCBA替代辅助胶凝材料对水泥混凝土抗压强度的影响（数据来源：[7,21,23,24,38-42]）

Fig. 1　Impact of SCBA as a supplementary cementitious material on compressive strength of cement concrete (source: [7,21,23,24,38-42])

图2揭示了SCBA质量替代率对混凝土28 d抗拉强度的影响规律。随着SCBA质量替代率的增加，混凝土的抗拉强度先增加后降低，呈单峰变化趋势，最佳阈值在5%~15%之间[21,23-24,40,43-46]。

SCBA混凝土的抗拉强度（f_t）与抗压强度（f_{cu}）之间存在一定的关系[42,47-48]。根据之前学者研究的试验结果，将不同质量替代率下SCBA混凝土抗压强度与抗拉强度的关系归纳至图3中。通过非线性拟合得到两者的指数关系为$f_t=0.595\ 0f_{cu}^{0.5}$，其中$R^2=0.653\ 7$。Li等[49]拟合SCBA混凝土抗压与抗拉强度数据得到类似的结论：$f_t=0.505\ 2f_{cu}^{0.5}+0.601\ 8$，其中$R^2=0.82$。以上拟合结果均高于

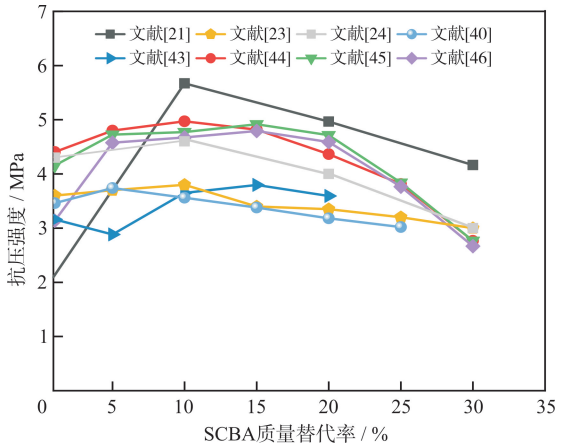

图2 SCBA替代辅助胶凝材料对水泥混凝土抗拉强度的影响(数据来源:[21,23,24,40,43-46])

Fig. 2 Impact of SCBA as a supplementary cementitious material on tensile strength of cement concrete (source:[21,23,24,40,43-46])

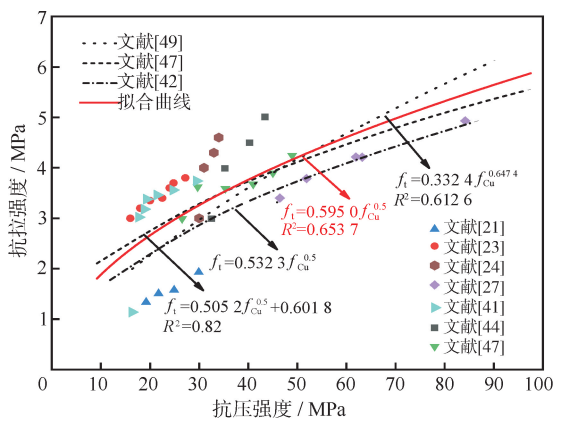

图3 SCBA替代辅助胶凝材料的混凝土抗压与抗拉强度关联方程(数据来源:[21,23,24,27,41,42,44,47,49])

Fig. 3 Correlation between compressive and tensile strength of concrete with SCBA as a supplementary cementitious material (source:[21,23,24,27,41,42,44,47,49])

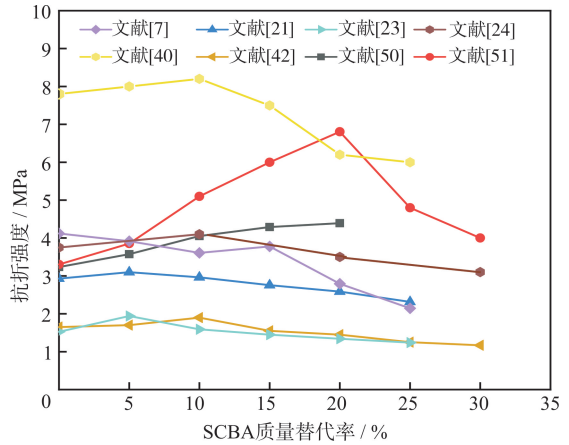

图4 SCBA替代辅助胶凝材料对水泥混凝土抗折强度的影响(数据来源[7,21,23,24,40,42,50,51])

Fig. 4 Impact of SCBA as supplementary cementitious material on flexural strength of cement concrete (source:[7,21,23,24,40,42,50,51])

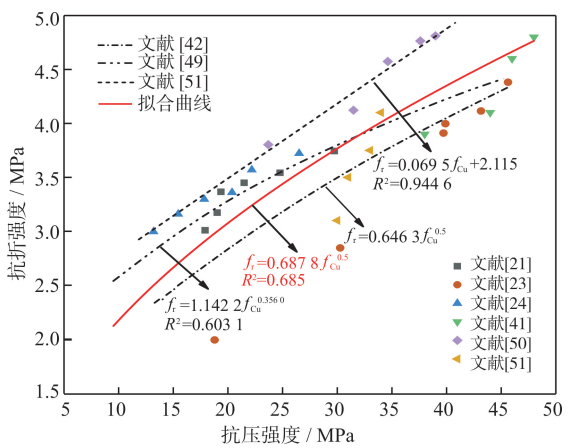

图5 SCBA替代辅助胶凝材料的混凝土抗压与抗折强度关联方程(数据来源:[21,23,24,41,42,49,50,51])

Fig. 5 Correlation between compressive and flexural strength of concrete with SCBA as a supplementary cementitious material(source:[21,23,24,41,42,49,50,51])

ACI 318-11推荐强度[48],这表明SCBA混凝土的抗拉强度高于普通混凝土。

SCBA混凝土抗折强度的发展趋势呈现出与抗压强度类似的趋势,先增加后降低,如图4所示。SCBA对抗折强度的优化效果更为显著,抗折强度的最优替代率(10%~20%)高于抗压强度阈值(5%~10%)[7,21,23,24,40,42,50,51]。同时,SCBA细度提升可将其在混凝土中抗折强度的最佳阈值提高至20%。

在Gupta等[51]的实验中发现SCBA混凝土抗折强度(f_r)与抗压强度(f_{cu})之间满足f_r=0.069 5f_{cu}+2.115,其中R^2=0.944 6。图5总结了SCBA混凝土抗压强度和抗折强度的关系,通过非线性拟合得到两者的指数关系为f_r=0.687 8$f_{cu}^{0.5}$,拟合结果高于ACI 318-11的推荐强度[48],这表明SCBA的掺入有利于提高混凝土的抗折强度。

SCBA替代率对混凝土弹性模量的影响存在分异。SCBA替代水泥质量的10%制备的混凝土,其弹性模量较对照组混凝土降低13.1%,该结论与Srinivasan等[21]和Chindaprasirt等[26]的研究结论一致(降幅范围8%~15%)。但Rerkpiboon等[25]发现使用质量分数高达50%的SCBA代替水泥,对混凝土的弹性模量无显著影响。研究表明,弹性模量的差异源于其并非唯一取决于抗压强度,还取决于骨料性能[53]。

1.3 耐久性

SCBA作为辅助胶凝材料可提高混凝土界面

过渡区的密实度、改善孔结构，这对混凝土耐久性产生积极影响[27]。Rossignolo等[28]通过纳米压痕实验发现，随着SCBA质量替代率的增加，骨料与水泥基界面过渡区（interfacial transition zone，ITZ）的厚度显著减少，掺入20%质量分数的SCBA所制备的混凝土ITZ厚度减少了70%。

SCBA的性质（如烧失量、无定形SiO_2含量）因地域来源及生产批次存在差异，导致其对混凝土总孔隙率的影响存在分歧。部分研究者发现，高质量替代率的SCBA可降低混凝土孔隙率[35]，另外一部分研究者发现掺入SCBA后混凝土的孔隙率有所增加[25,32]。根据之前学者研究的试验结果，将SCBA对混凝土孔径分布的影响归纳至图6中。由图6可知，SCBA的掺入将中孔（50~200 nm）的占比降低24%~27%，小孔（20~50 nm）的占比降低28%~33%，优化了混凝土的孔径分布。综上，SCBA虽对混凝土总孔隙率的影响因材料差异性存在分歧，但却能优化混凝土的孔隙结构分布，提升混凝土耐久性。

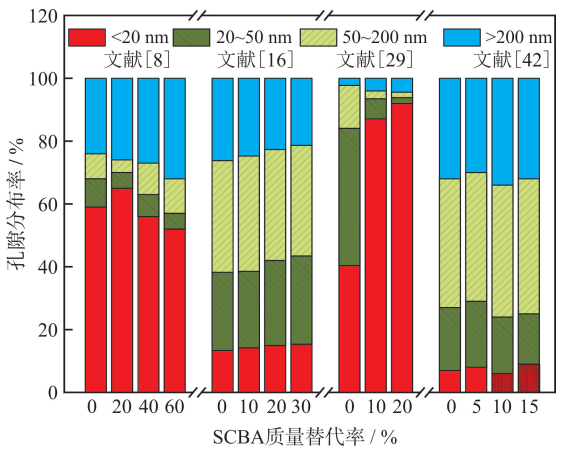

图6　SCBA替代辅助胶凝材料混凝土的孔径分布图（数据来源：[8,16,29,42]）

Fig. 6　Pore size distribution of concrete with SCBA as a supplementary cementitious material (source: [8,16,29,42])

为系统评估SCBA对混凝土抗渗性的影响，图7汇总了不同研究中所报道的SCBA混凝土氯离子扩散系数。从图7中可以看出，SCBA显著降低混凝土的氯离子渗透扩散系数，并且随着龄期增长，效果更显著。有学者发现，使用质量分数50%的SCBA替代水泥可以提高抗氯离子渗透性能，并指出氯化物渗透深度的降低与SCBA替代率呈线性关系[25]。SCBA显著降低混凝土的氯离子渗透扩散系数可能归功于：(1)SCBA颗粒填充了混凝土内过大的孔隙；(2)SCBA与水化产物进行二次水化反应产生的水化铝酸钙和水化硅酸钙，进一步填充混凝土内部的孔隙使混凝土的孔隙结构得到细化，降低基体内孔隙连通性，最终使得混凝土氯化物渗透值降低[9-10]。

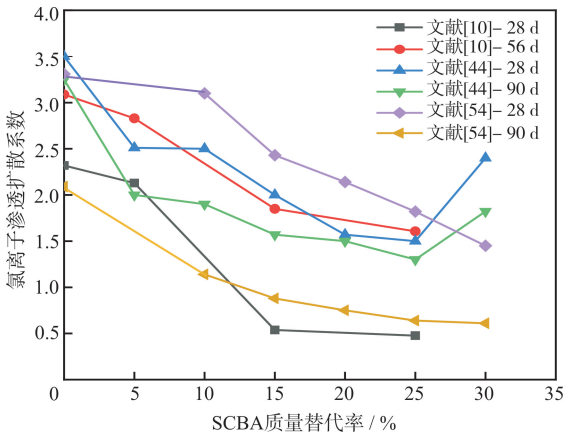

图7　SCBA替代辅助胶凝材料对混凝土氯离子渗透系数影响（数据来源：[10,44,54]）

Fig. 7　Effect of SCBA as a supplementary cementitious material on the chloride ion permeability coefficient of concrete (source: [10,44,54])

电阻率与混凝土中钢筋的腐蚀速率密切相关，电阻率值越高表明混凝土孔隙连通性越低，抵抗有害物质的渗透性越强[55]。研究表明，混凝土的电阻率随SCBA替代率的增加而增大[38,40]。这主要归因于两点：(1)火山灰反应消耗了钙离子(Ca^{2+})和氢氧根离子(OH^-)，降低了孔隙液的导电性；(2)反应生成的额外水化硅酸钙(C-S-H)凝胶填充孔隙、细化孔径，降低了孔隙连通性，从而提升了电阻率[5]。

混凝土暴露在恶劣环境中（如酸性或高温环境），会发生强度下降和质量劣化的现象，而SCBA在水化后期发生的火山灰反应能够有效弥补混凝土的强度与质量损失[31]，从而提升混凝土在酸性环境[34]与高温环境[56]下的耐久性。

混凝土碱-硅反应（alkali-silica reaction，ASR）可诱发有害膨胀，使混凝土产生严重的缺陷。SCBA作为水泥替代材料显著提升混凝土抗ASR性能[33]：当质量替代率为10%、20%和40%时，混凝土膨胀率分别降低23%、36%和46%[16]。此外，随着龄期增长和SCBA细度的增加，其对ASR的抑制效果更为显著[57]。该抑制机制主要源于两个方面：(1)火山灰反应消耗了孔隙液中的碱，降低了ASR的风险；(2)反应产物细化孔结构，降低了有害离子的扩散速率，从而减少ASR的危害。

SCBA对混凝土耐久性能的影响并非完全积

极。与其他大多数火山灰材料类似，SCBA会加速混凝土碳化速率[36]。Silva等[35]通过快速碳化试验分析发现，SCBA替换质量分别为5%、10%和15%的水泥，混凝土碳化系数分别增加16%、19%和69%。此现象源于火山灰反应消耗$Ca(OH)_2$，削弱了碳化缓冲能力以及孔隙连通性，增加加速CO_2扩散。

2 SCBA作为填充材料在水泥混凝土的应用

SCBA在电厂锅炉中不均匀燃烧，部分SCBA内无定型SiO_2含量低，导致其没有良好的火山灰活性。此类低火山灰活性的SCBA不适合作为胶凝材料应用在水泥混凝土中。但可利用其SiO_2含量高及适宜粒径分布特点，作为良好的填充材料加入混凝土中[1-2]。如表2所示，当低活性的SCBA作为填充材料掺入混凝土时，通过颗粒密实填充效应改善混凝土物理特性、提高力学性能、改善耐久性能。

2.1 物理性能

SCBA作为填充材料使用时，因其多孔结构会吸附额外的拌合水，导致基体流动性降低[59]和早期的水化促进[58]。SCBA的孔结构具有吸水和释水的性能，混凝土基体的吸水系数随SCBA质量替代率的增加而增加，在不额外增加水分的情况下基体的流动性降低[60]。吸附水在初期释放，使水化热峰值提高5%~14%，同时缩短凝结时间1.0~1.5 h[58]；内部水在硬化后期释放可促进二次水化反应，特别在高性能水泥体系中，发挥内部养护的作用[20]。

表2 SCBA作为填充材料对水泥混凝土的影响

Table 2 Effect of SCBA as filler material on cement cocrete

性能		SCBA质量替代率对混凝土的影响	参考文献
物理特性	水化热	提升	[58]
	需水量	增加	[59-60]
	流动性	降低	[59-60]
力学特性	抗压强度	先增加后减少	[61-63]
	抗拉强度	先增加后减少	[1,59]
	抗折强度	先增加后减少	[1,58,64]
	弹性模量	增加	[10,63]
耐久性	孔隙率	降低	[58,62]
	氯离子扩散	显著降低	[62,65]
	碳化深度	增加	[63]

2.2 力学强度

图8归纳了SCBA作为填充材料对混凝土抗压强度的影响规律。研究表明，SCBA在10%~30%的质量替代率范围内可以提高混凝土的抗压强度，其中Dayo等[61]证实10%替代率时强度提高4.20%，但超过该阈值后出现强度折减。Sales等[1]发现高效减水剂会覆盖SCBA颗粒抑制其火山灰活性，提出SCBA作为填充材料的最佳替代率应大于20%。Sande等[62]在试块中掺入质量分数30%的SCBA替代砂，其抗压强度高于对照组10.9%，证实高替代率的可行性。

随着SCBA质量替代率的增加，混凝土的抗拉强度和抗折强度总体呈现出与抗压强度相似的先增后降的趋势[63]。Dayo等[64]发现，当SCBA对河砂的质量替代率为10%时，混凝土抗折强度显著提升14.41%。Moretti等[63]则进一步证明，即使增大SCBA混凝土的水灰比，其抗压强度仍能保持不变。这表明，SCBA在混凝土中作为填充材

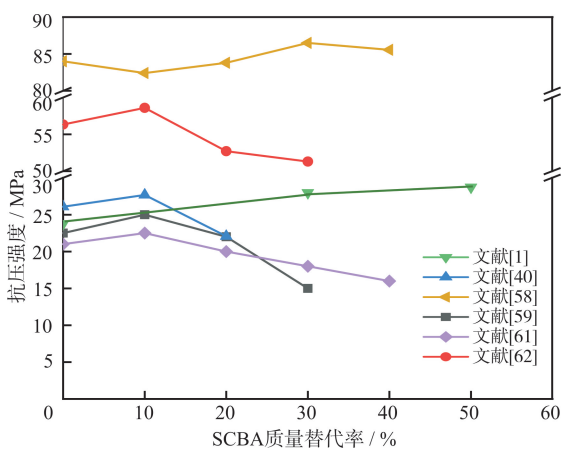

图8 SCBA替代填料对水泥混凝土抗压强度的影响
（数据来源：[1,40,58,59,61,62]）

Fig. 8 Effect of SCBA as replacement filler on compressive strength of cement concrete(source:[1,40,58,59,61,62])

料，除填充作用外，还能通过以下两个途径促进水化反应并提高强度[66]：(1)相较于常温下完全惰性的填充材料，如砂[1]和石英粉[58]等，SCBA具有微火山灰活性，对混凝土后期二次水化反应有促进作用；(2)SCBA的吸水释水性能在水泥硬化过程中形成内部养护，促进水化反应并优化微观结构，从而提升混凝土的力学性能[58]。

2.3　耐久性

SCBA作为填充材料对混凝土耐久性起到积极的影响。Sande等[62]通过开孔率、电阻率、毛细管吸收及氯离子迁移等多种试验验证了SCBA提升抗渗性、电阻率等关键耐久性指标的效果，并揭示了该改善作用的机理主要源于以下3个方面：(1)SCBA具有一定的火山灰活性，能生成额外水化硅酸钙填充孔隙，显著降低孔隙结构的连通性与渗透性，进而提升耐久性能[62]。(2)SCBA颗粒可填充微孔(粒径小于150 μm)，改善了混凝土的孔结构分布，从而降低试块的渗透性[66]。(3)SCBA自身的孔隙结构可提供内部养护作用，促进后期水化。

3　总结与展望

SCBA掺入混凝土可提高混凝土力学性能、改善微观结构、增强耐久性，是SCBA高值利用的一种方式。该应用方式有助于促进我国农业经济的可持续发展，同时为开发绿色混凝土提供新思路。本文基于已有研究，对SCBA在水泥混凝土中的应用研究进行归纳与总结，得出以下结论：

(1)SCBA在混凝土的应用研究分两类，火山灰活性较好的SCBA作为辅助胶凝材料制备混凝土，是其主流的研究方向，水化机理和力学增强效应已形成较为完善的理论体系；而火山灰活性较差的SCBA更宜作为填充材料制备混凝土，但该研究方向的成果较少，关于其对混凝土物理性能和微观结构方面影响的研究，有待进一步深入探索。

(2)SCBA作为辅助胶凝材料制备混凝土，可降低混凝土水化热、延长凝结时间，提高强度(抗压、抗拉以及抗折强度)、改善孔径分布、降低氯离子渗透性能、提高电阻率、弥补恶劣环境下强度和质量的损失、抑制ASR反应。最佳质量替代率在5%~10%之间，通过对SCBA颗粒进一步处理，降低LOI值、提高粒径细度，可提高SCBA的最佳质量替代率。因此，开展研究SCBA的最佳处理方式，是提高其应用价值的关键。

(3)SCBA作为填充材料制备混凝土，相较于作为胶凝材料不仅工艺更为简便，并且最佳质量替代率有所提升。同时，相较于其他常温下惰性的填充材料，SCBA作为填充材料具有吸水释水性和火山灰活性。这两个特点可分别在水化后期提供内部养护和二次水化反应，有效提高混凝土总水化热、增强混凝土的力学性能(抗压、抗拉以及抗折强度)、优化孔隙结构并改善耐久性。

(4)SCBA在混凝土中作为辅助胶凝材料或填充材料时，主要通过促进水化反应、优化孔结构分布等核心机制提高混凝土致密性，因此产生的影响大部分是积极的。但目前研究中关于碱集料反应、冻融循环、干湿循环等相关研究有待进一步探索。

(5)由于混凝土不同的实验的配合比以及SCBA性质存在差异，SCBA对混凝土的影响有所不同。在开展研究前，需先研究试验批次的SCBA特性，建立“成分-工艺-性能”关联模型确定最佳处理和应用方式。因此，未来SCBA研究需聚焦3大研究方向：SCBA活性增强技术、SCBA混凝土粒径级配优化策略以及复合掺合料协同效应研究。

参考文献

[1] SALES A, LIMA S A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement [J]. Waste Management, 2010, 30(6): 1114-1122.

[2] 黄萍，徐青，吴能森，等. 蔗渣灰特性及其在建筑材料的应用研究综述 [J]. 武汉工程大学学报，2022，44(6)：599-607.

[3] 沈华艳，谢东，刘海露，等. 甘蔗渣生物质资源在复合材料领域的研究进展 [J]. 现代化工，2019，39(7)：52-55.

[4] XU Q, JI T, GAO S J, et al. Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials [J]. Materials, 2019, 12(1): 39.

[5] THOMAS B S, YANG J, BAHURUDEEN A, et al. Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete: a review [J]. Materials Today Sustainability, 2021, 15: 100086.

[6] MARTIRENA-HERNÁNDEZ J F, MIDDENDORF B, GEHRKE M, et al. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(11): 1525-1536.

[7] ZAREEI S A, AMERI F, BAHRAMI N. Micro-structure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash [J].

Construction and Building Materials, 2018, 184: 258-268.

[8] WU N S, JI T, HUANG P, et al. Use of sugar cane bagasse ash in ultra-high performance concrete (UHPC) as cement replacement [J]. Construction and Building Materials, 2022, 317: 125881.

[9] RUKZON S, CHINDAPRASIRT P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete [J]. Materials and Design, 2012, 34: 45-50.

[10] BAHURUDEEN A, KANRAJ D, GOKUL DEV V, et al. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 59: 77-88.

[11] KATARE V D, MADURWAR M V. Experimental characterization of sugarcane biomass ash: a review [J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 1-15.

[12] MONTAKARNTIWONG K, CHUSILP N, TANGCHIRAPAT W, et al. Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry [J]. Materials and Design, 2013, 49: 414-420.

[13] KLATHAE T, TANAWUTTIPHONG N, TANGCHIRAPAT W, et al. Heat evolution, strengths, and drying shrinkage of concrete containing high volume ground bagasse ash with different LOIs [J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119443.

[14] BAHURUDEEN A, SANTHANAM M. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 56: 32-45.

[15] PRAVEENKUMAR S, SANKARASUBRAMANIAN G, SINDHU S. Strength, permeability and microstructure characterization of pulverized bagasse ash in cement mortars [J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117691.

[16] KAZMI S M S, MUNIR M J, PATNAIKUNI I, et al. Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 231-240.

[17] CORDEIRO G C, ANDREÃO P V, TAVARES L M. Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning [J]. Heliyon, 2019, 5(10): e02566.

[18] SINGH N B, SINGH V D, RAI S. Hydration of bagasse ash-blended portland cement [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(9): 1485-1488.

[19] TANTAWY M A, EL-ROUDI A M, SALEM A A. Immobilization of Cr(VI) in bagasse ash blended cement pastes [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30: 218-223.

[20] LURA P, WYRZYKOWSKI M, TANG C, et al. Internal curing with lightweight aggregate produced from biomass-derived waste [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 59: 24-33.

[21] SRINIVASAN R, SATHIYA K. Experimental study on bagasse ash in concrete [J]. International Journal for Service Learning in Engineering, Humanitarian Engineering and Social Entrepreneurship, 2010, 5(2): 60-66.

[22] 熊伟, 王四青, 李文, 等. 甘蔗渣灰对混凝土和易性及强度的影响 [J]. 江西建材, 2023(4): 24-25, 28.

[23] BATOOL F, MASOOD A, ALI M. Characterization of sugarcane bagasse ash as pozzolan and influence on concrete properties [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(5): 3891-3900.

[24] AMIN M N, ASHRAF M, KUMAR R, et al. Role of sugarcane bagasse ash in developing sustainable engineered cementitious composites [J]. Frontiers in Materials, 2020, 7: 65.

[25] RERKPIBOON A, TANGCHIRAPAT W, JATURAPITAKKUL C. Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101(Part 1): 983-989.

[26] CHINDAPRASIRT P, SUJUMNONGTOKUL P, POSI P. Durability and mechanical properties of pavement concrete containing bagasse ash [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 17: 1612-1626.

[27] HUSSEIN A A E, SHAFIQ N, NURUDDIN M F, et al. Compressive strength and microstructure of sugar cane bagasse ash concrete [J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2014, 7(12): 2569-2577.

[28] ROSSIGNOLO J A, RODRIGUES M S, FRIAS M, et al. Improved interfacial transition zone between aggregate-cementitious matrix by addition sugarcane industrial ash [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 80: 157-167.

[29] ARENAS-PIEDRAHITA J, MONTES-GARCÍA P, MENDOZA-RANGEL J, et al. Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash [J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 69-81.

[30] JAGADESH P, RAMACHANDRAMURTHY A, MURUGESAN R. Overview on properties of sugarcane bagasse ash (SCBA) as pozzolan [J].

Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2018, 47(10): 1934-1945.

[31] JOSHAGHANI A, RAMEZANIANPOUR A A, ROSTAMI H. Effect of incorporating sugarcane bagasse ash (SCBA) in mortar to examine durability of sulfate attack[C]//Second International Conference on Concrete Sustainability. Madrid, Spain: F, 2016.

[32] 李明韬. 偏高岭土-蔗渣灰-硅酸盐水泥三元体系设计及抗碳酸水研究[D]. 南宁：广西大学，2023.

[33] AFSHINNIA K, RANGARAJU P R. Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars [J]. Construction and Building Materials, 2015, 81: 257-267.

[34] BARBHUIYA S A, BASHEER P A M, CLARK M W, et al. An investigation into the behaviour of concrete containing seawater-neutralised bauxite refinery residues in silage effluent [J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(4): 433-439.

[35] de SILVA ANDRADE NETO J, de FRANÇE M J S, de AMORIM JÚNIOR N S, et al. Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 266(Part A): 120959.

[36] PACHECO TORGAL F, MIRALDO S, LABRINCHA J A, et al. An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: evaluation, use of SCMs and/or RAC [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 141-150.

[37] 姜文斌. 水泥矿物及其水化产物对氯离子的固化机理[D]. 武汉：武汉理工大学，2018.

[38] LE D H, SHEEN Y N, LAM M N T. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash-slag blended cement [J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 138-147.

[39] JAGADESH P, RAMACHANDRAMURTHY A, MURUGESAN R. Evaluation of mechanical properties of sugar cane bagasse ash concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 608-617.

[40] JOSHAGHANI A, MOEINI M A. Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar [J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 818-831.

[41] JHA P, SACHAN A K, SINGH R P. Agro-waste sugarcane bagasse ash (SCBA) as partial replacement of binder material in concrete [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 44 (Part 1): 419-427.

[42] 李腾宇，梁晋鹏，陀广泉，等. 蔗渣灰对砂浆性能及孔结构的影响研究 [J]. 混凝土与水泥制品，2022(10): 92-95, 100.

[43] INBASEKAR M, HARIPRASATH P, SENTHILKUMAR D. Study on potential utilization of sugarcane bagasse ash in steel fiber reinforced concrete [J]. International Journal of Engineering Science and Research Technology, 2016, 5(4): 43-50.

[44] AMIN N U. Use of bagasse ash in concrete and its impact on the strength and chloride resistivity [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(5): 717-720.

[45] MINNU S N, BAHURUDEEN A, ATHIRA G. Comparison of sugarcane bagasse ash with fly ash and slag: an approach towards industrial acceptance of sugar industry waste in cleaner production of cement [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 285: 124836.

[46] MAMATHA P, NARAYANA D, KUMAR T N. To evaluate the mechanical and durability properties of nano sugarcane bagasse ash in cement concrete [J]. International Journal of Engineering Science and Research Technology, 2017, 3(8): 425-430.

[47] CHINDAPRASIRT P, KROEHONG W, DAMRONGWIRIYANUPAP N, et al. Mechanical properties, chloride resistance and microstructure of Portland fly ash cement concrete containing high volume bagasse ash [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 31: 101415.

[48] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary [M]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2011.

[49] LI Y, CHAI J Q, WANG R J, et al. Utilization of sugarcane bagasse ash (SCBA) in construction technology: a state-of-the-art review [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 56: 104774.

[50] KIRAN K, SIVA KISHORE I. An experimental study on partial replacement of cement with bagasse ash in concrete mix [J]. International Journal of Civil Engineering and Technology, 2017, 8(1): 452-455.

[51] QUEDOU P G, WIRQUIN E, BOKHOREE C. Sustainable concrete: potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry [J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 14: e00545.

[52] DHENGARE S W, RAUT S P, BANDWAL N V, et al. Investigation into utilization of sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete [J]. International Journal of Emerging Engineering

Research and Technology, 2015, 3(4): 109-119.

[53] SOMNA R, JATURAPITAKKUL C, RATTANACHU P, et al. Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete [J]. Materials and Design, 2012, 36: 597-603.

[54] ARIF E, CLARK M W, LAKE N. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: applications in cement and mortar production [J]. Construction and Building Materials, 2016, 128: 287-297.

[55] 刘志勇,詹镇峰. 混凝土电阻率及其在钢筋混凝土耐久性评价中的应用研究 [J]. 混凝土, 2006(10): 13-16.

[56] GAR P S, SURESH N, BINDIGANAVILE V. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 929-936.

[57] RAMJAN S, TANGCHIRAPAT W, JATURAPITAKKUL C. Influence of bagasse ash with different fineness on alkali-silica reactivity of mortar [J]. Materiales de Construcción, 2018, 68 (332): e169.

[58] HUANG P, HUANG B C, LI J J, et al. Application of sugar cane bagasse ash as filler in ultra-high performance concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 71: 106447.

[59] MODANI P O, VYAWAHARE M R. Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete [J]. Procedia Engineering, 2013, 51: 25-29.

[60] HASNAIN M H, JAVED U, ALI A, et al. Eco-friendly utilization of rice husk ash and bagasse ash blend as partial sand replacement in self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121753.

[61] DAYO A A, KUMAR A, RAJA A, et al. Use of sugarcane bagasse ash as a fine aggregate in cement concrete [J]. Engineering Science and Technology International Research Journal, 2019, 3(3): 8-11.

[62] de SANDE V T, SADIQUE M, PINEDA P, et al. Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 39: 102277.

[63] MORETTI J P, SALES A, ALMEIDA F C R, et al. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 317-323.

[64] DAYO A A, KUMAR A, RAJA A, et al. Effect of sugarcane bagasse ash as fine aggregates on the flexural strength of concrete [C]//International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering. Jamshore, Pakistan: MUET, 2019.

[65] HEMKEMEIER T A, ALMEIDA F C R, SALES A, et al. Carbonation and chloride penetration of repair mortars with water treatment plant sludge and sugarcane bagasse ash sand [J]. MATEC Web of Conferences, 2022, 364: 04011.

[66] ALMEIDA F C R, SALES A, MORETTI J P, et al. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar [J]. Construction and Building Materials, 2015, 82: 31-38.

本文编辑:苗 变