文章编号:1007-9629(2024)05-0418-07

基于颗粒特性调控的蔗渣灰砂浆抗压强度多因素模型

韦京利^{1,2}、李舒阳^{1,3}、陈 正^{1,2,*}、 粟俊驰^{1,2}、 赵 杰^{1,2}

(1.广西大学省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室,广西南宁530004;
2.广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室,广西南宁530004;
3.广西交科集团有限公司 广西道路结构与材料重点实验室,广西南宁530007)

摘要:研究了乙二醇、三乙醇胺及聚羧酸减水剂等助磨剂对蔗渣灰(SCBA)颗粒特性的影响,揭示了 蔗渣灰颗粒特性对砂浆微观结构的作用机理,分析了蔗渣灰颗粒特性与砂浆强度的相关性,同时基 于水胶比、蔗渣灰掺量及颗粒特性与砂浆抗压强度的相关关系,建立了基于颗粒特性调控的蔗渣灰 砂浆抗压强度多因素模型.结果表明:掺入0.08%三乙醇胺能最大程度地优化蔗渣灰颗粒特性;当蔗 渣灰粒径 $D \leqslant 3 \mu m$ 的颗粒含量过多时,其比表面积过大,蔗渣灰对砂浆强度造成了负面影响,可增多 $3 \mu m < D \leqslant 32 \mu m$ 的颗粒含量以及降低 $D \leqslant 3 \mu m$ 和 $D > 32 \mu m$ 的颗粒含量来提升蔗渣灰砂浆的 强度.

关键词:蔗渣灰;颗粒特性;强度;微观机理;多因素模型 中图分类号:TU528.01 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.05.005

Multi-factor Model for Compressive Strength of Sugarcane Bagasse Ash Mortar Based on Particle Characteristics Regulation

WEI Jingli^{1,2}, LI Shuyang^{1,3}, CHEN Zheng^{1,2,*}, SU Junchi^{1,2}, ZHAO Jie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Featured Metal Materials and Life-Cycle Safety for Composite Structures, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of China Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Key Lab of Road Structure and Materials, Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: The effects of ethylene glycol, triethanolamine and polycarboxylic acid as grinding aid on the particle characteristics of sugarcane bagasse ash(SCBA) were investigated, the mechanism of the particle characteristics of SCBA on the microstructure of mortar was clarified, and the correlation between SCBA particle characteristic and mortar strength were analyzed. Based on the relationships between water-cement ratio, SCBA content, particle characteristic, and compressive strength of mortar, a multi-factor model for compressive strength of SCBA mortar regulated by particle characteristics was established. The results show that incorporating 0.08% triethanolamine optimizes the particle characteristics of SCBA to the maximum extent. Excessive content and large specific surface area of particles with a diameter $D \leq 3 \mu m$ negatively impact SCBA mortar strength. To enhance SCBA mortar strength, increasing the content of particles with 3 $\mu m < D \leq 32 \mu m$ and decreasing the content of particles with $D \leq 3 \mu m$ are recommended.

Key words: sugarcane bagasse ash; particle characteristic; mortar; microscopic mechanism; multi-factor model

收稿日期:2023-06-15;修订日期:2023-08-31

基金项目:广西省杰出青年科学基金项目(2022GXNSFFA035035);广西省科技重大专项项目(AA23023034);广西省研究生教育创新计划 资助项目(YCBZ2023018)

第一作者:韦京利(1995—),女,广西河池人,广西大学博士生.E-mail:weijingli_st@163.com 通讯作者:陈 正(1982—),男,湖南祁东人,广西大学教授,博士生导师,博士.E-mail:chenzheng@gxu.edu.cn

蔗糖生产过程中使用甘蔗渣作为燃料,其焚烧 产生了农业废料蔗渣灰(SCBA),逐年堆积填埋的蔗 渣灰会污染土壤和水体,导致环境问题日益严峻^[1]. 已有研究表明蔗渣灰具有火山灰活性,可作为辅助 胶凝材料代替部分水泥,提升水泥基材料的性能[2], 但直接获取的蔗渣灰通常存在粒径粗大且不均质的 缺点,需要进行研磨处理以激发其火山灰活性[3].通 过加入助磨剂优化矿物掺合料的颗粒特性可实现蔗 渣灰活性的进一步提升^[4],三乙醇胺(TEA)、乙二醇 (EG)及聚羧酸减水剂(PC)等助磨剂的掺入可明显 降低矿物掺合料的中位粒径,并显著提升其比表面 积.其原因为助磨剂在粉磨过程中可吸附在熟料表 面,阻止颗粒团聚和断面愈合,大幅提升研磨效率[5-6]. 但目前不同种类及掺量助磨剂对蔗渣灰颗粒特性的 影响研究较少,蔗渣灰颗粒特性与水泥基材料性能 的相关性及作用机理有待进一步探讨.

本文研究了TEA、EG及PC等助磨剂对蔗渣灰 颗粒特性的影响,揭示了蔗渣灰颗粒特性对砂浆微 观结构的作用机理,分析了蔗渣灰颗粒特性与砂浆 强度的相关性,建立了基于颗粒特性调控的蔗渣灰 砂浆抗压强度多因素模型,以期为蔗渣灰在建筑材 料领域的有效应用提供指导.

1 试验

1.1 原材料

蔗渣灰取自广西南宁糖业股份有限公司明阳糖 厂,其化学组成(质量分数,文中涉及的掺量、含量、 比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比)见表1. 由表1可见,蔗渣灰的SiO₂含量高达45.90%,烧失量 为21.70%,这是由于直接获取的蔗渣灰中仍存在未 燃尽的植物纤维和碳纤维^[7].蔗渣灰的XRD图谱见 图1,其20°~40°处的漫反射峰是由于无定形SiO₂的 存在^[8].水泥取自广西华润水泥有限公司提供的P·O 42.5硅酸盐水泥;采用广西嘉泰搅拌站提供的细度 模数为2.95的天然河砂,属于 [[区中砂;选用3种不 同种类的助磨剂——醇类的EG、醇胺类的TEA及 高分子类的PC进行研磨处理.

表 1 蔗渣灰的化学组成 Table 1 Chemical composition(by mass) of SCBA

							Unit: ½
SiO_2	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K_2O	IL
45.90	5.45	3.99	12.10	0.09	1.84	2.63	21.70

1.2 配合比设计

为有效去除蔗渣灰中未燃尽的植物纤维和碳纤维,在前期研究^[9]的基础上对蔗渣灰进行预处理,将



蔗渣灰置于 600 ℃的烧炉中煅烧 90 min. 设置助磨剂 掺量 w为 0%、0.04%、0.08% 及 0.12%,向 3 kg 蔗渣 灰中加入助磨剂,并在 SM-500型研磨机中以 300 r/ min 转速球磨 3 h,即获得蔗渣灰样品. 掺量为 0.04%、助磨剂为 EG 的蔗渣灰样品记为 EG4,其他 类推.为进行对比,未掺助磨剂进行研磨处理的蔗渣 灰记为 UGAs.

为保证助磨剂不受减水剂作用的影响,通过增大 水胶比以保证蔗渣灰砂浆的流动性,由前期研究¹⁹得 到蔗渣灰的最佳掺量为15%.设置砂浆水胶比*m*_w/*m*_B 为0.52,胶砂比为1:3,养护龄期为28d.为进行对比, 制备了普通砂浆(CS);掺助磨剂EG、TEA、PC 蔗渣 灰的砂浆分别命名为EG 蔗渣灰砂浆、TEA 蔗渣灰砂 浆以及 PC 蔗渣灰砂浆.EG4制备的蔗渣灰砂浆记为 EG4M,其他类推.蔗渣灰砂浆的配合比见表2.

表 2 蔗渣灰砂浆的配合比 Table 2 Mix proportions of SCBA mortars

0	. / 0/	Mi	Mix proportion/(kg \cdot m ⁻³)				
Specimen	W/ 70	SCBA	Cement	Water	Sand		
CS	0	0	500	260	1 500		
UGAsM	0	75	425	260	1 500		
EG4M	0.04	75	425	260	1 500		
EG8M	0.08	75	425	260	1 500		
EG12M	0.12	75	425	260	1 500		
TEA4M	0.04	75	425	260	1 500		
TEA8M	0.08	75	425	260	1 500		
TEA12M	0.12	75	425	260	1 500		
PC4M	0.04	75	425	260	1 500		
PC8M	0.08	75	425	260	1 500		
PC12M	0.12	75	425	260	1 500		

1.3 试验方法

根据 GB/T 1345—2005《水泥细度检验方法》, 采用 FSY—150A 型水泥细度负压筛析仪测定蔗渣 灰的 45、80 μm 筛余量 R₄₅、R₈₀.采用 LA—960A 型激 光粒径分布分析仪和 NOVA400E 型全自动比表面 积分析测试仪分别测定蔗渣灰的粒径D分布和比表 面积A.根据GB/T17671—1999《水泥胶砂强度检 测方法》,对尺寸为40mm×40mm×160mm的砂浆 试件开展强度试验,测试抗压强度f_c和抗折强度f_m. 取蔗渣灰砂浆的破碎样品,使用无水乙醇浸泡72h 以终止水化后,置于40℃干燥箱中烘干48h^[10],采用 AUTOPORE IV 9500型全自动压汞仪对蔗渣灰砂 浆进行孔结构分析,并采用S—3400N型扫描电镜观 (SEM)测试蔗渣灰砂浆的微观形貌.

2 结果与讨论

2.1 助磨剂对蔗渣灰颗粒特性的影响

助磨剂对蔗渣灰颗粒特性的影响见表3(表中 D₅₀为中位粒径).由表3可见:掺入助磨剂后蔗渣灰 45、80 µm 筛余量相较于UGAs均有所降低,3种助磨 剂对蔗渣灰细度的影响程度为TEA>PC>EG,其中 w=0.08%的TEA对蔗渣灰颗粒粒径的细化作用最 好;对于粒径分布而言,掺入助磨剂后 $D \leq 3 \mu m$ 、 $3 \mu m < D \leq 32 \mu m 及 32 \mu m < D \leq 65 \mu m 的颗粒含量$ $均提高, D>65 \mu m 的粗颗粒含量降低, 蔗渣灰颗粒的$ 粒径分布趋于细化集中, 其中 w=0.08%的TEA使 $D <math>\leq 3 \mu m \pi 3 \mu m < D \leq 32 \mu m$ 的细颗粒含量提升最 大;对于比表面积而言, 掺入助磨剂有效提高了蔗渣 灰的比表面积, 且影响程度为PC>TEA>EG, 其中 w=0.04%的PC使蔗渣灰比表面积达到最大值 4.47 m²/g. 由此可见, 与醇类助磨剂EG、高分子类助 磨剂PC相比, 醇胺类助磨剂TEA 对蔗渣灰颗粒特 性的优化效果最好, 掺入 w=0.08%的TEA 研磨后 蔗渣灰细度最小, 粒径分布最集中, 而 w=0.04%的 聚羧酸类助磨剂PC 对蔗渣灰比表面积的提升最大.

表 3 助磨剂对蔗渣灰颗粒特性的影响 Table 3 Effect of grinding aids on particle characteristic of SCBA

	D (0)	$R_{_{80}}/\%$ –	Proportion(by mass)/%					$A/(m^2 \cdot kg^{-1})$ 2.05 2.34 2.52
Sample R_{45}	$R_{45}/\%_0$		<i>D</i> ≪3 μm	3 μm< <i>D</i> ≤32 μm	32 μm≪D≪65 μm	D>65 µm	$D_{50}/\mu{ m m}$	$A/(m^{-}kg^{-})$
UGAs	37.4	17.2	1.3	33.9	28.4	36.4	57.4	2.05
EG4	33.4	14.2	3.7	34.8	29.9	31.6	54.1	2.34
EG8	31.2	12.9	6.2	36.9	31.4	25.5	53.4	2.52
EG12	28.9	10.3	7.9	38.3	31.8	22.0	46.7	2.82
TEA4	29.2	13.4	5.0	39.8	32.4	22.8	43.5	3.33
TEA8	21.2	5.3	5.8	45.9	35.1	13.2	31.8	3.67
TEA12	24.1	10.5	5.3	41.6	33.8	19.3	35.6	3.56
PC4	27.2	11.2	6.4	36.2	30.5	26.9	39.6	4.47
PC8	27.8	13.7	4.8	35.1	32.3	27.8	40.3	4.30
PC12	28.4	15.0	4.5	34.1	33.1	28.3	42.4	4.25

2.2 助磨剂对蔗渣灰砂浆强度的影响

助磨剂对蔗渣灰砂浆强度的影响见图 2. 由图 2 可见:与未掺助磨剂的UGAsM砂浆相比,掺入助磨 剂后蔗渣灰砂浆的强度均得到一定程度的提升;3种 助磨剂对蔗渣灰砂浆强度的影响存在差异,EG 砂浆 的强度随着 EG 掺量的增加呈提升的趋势,TEA 砂 浆的强度随着 TEA 掺量的增加呈先提升后降低的 趋势,PC 砂浆的强度随着 PC 掺量的增大而降低但 变化趋势并不明显;相较于醇类助磨剂 EG 和高分子 类助磨剂 PC,醇胺类助磨剂 TEA 对蔗渣灰砂浆的强 度表现出更为优异的提升效果;TEA 的最优掺量为 0.08%,当TEA 掺量为 0.12% 时,蔗渣灰砂浆的强度 有所降低,这是由于 TEA 在低用量下可以促进水泥 水化及早期强度发展,而高掺量下则会延缓水泥的 水化进程^[6,11].

2.3 微观机理分析

以CS砂浆和UGAsM砂浆作为对照组,选取3种助磨剂中性能提升最佳的EG12M、TEA8M及PC4M砂浆进行孔结构和微观形貌分析,并基于吴中伟等^[12]提出的孔径分布计算了蔗渣灰砂浆的孔径分布占比.

蔗渣灰砂浆的孔结构分析见图 3. 由图 3 可见: UGAsM 砂浆的孔径分布曲线相较于 CS 砂浆右移, 表明无害微孔(d≪50 nm)数量增多且有害大孔(d> 50 nm)数量降低;掺入助磨剂后蔗渣灰砂浆有害大 孔数量相较于与未掺助磨剂的 UGAsM 砂浆进一步 降低;累计孔径分布曲线持续降低表明掺入助磨剂 后 EG12M、TEA8M 及 PC4M 砂浆的累计总孔隙相 较于 CS 砂浆和 UGAsM 砂浆均有所降低;掺入助磨 剂后有效降低了蔗渣灰砂浆的孔隙率和平均孔径;







Fig. 3 Analysis of pore structure of SCBA mortars

EG12M、TEA8M及PC4M砂浆的有害孔(50 nm < d ≤ 200 nm)和多害孔(d > 200 nm)占比均降低,表明 掺入助磨剂研磨处理后蔗渣灰颗粒特性得到了有效 优化,细化了蔗渣灰粒径并使其分布更为集中,使蔗 渣灰更好地发挥填充效应和成核效应^[4],总孔隙率降 低且有害孔数量减少.

蔗渣灰砂浆的微观形貌见图 4. 由图 4 可见: CS 砂浆的界面过渡区(ITZ)存在连接缺陷且黏结性较 差^[13],附近水泥基体与骨料存在微裂缝和较大孔隙; UGAsM 砂浆的微观形貌与 CS 砂浆差异不大, ITZ 也存在一定微裂纹和孔隙缺陷,结合孔结构分析可 知UGAs发挥了一定程度的填充效应,使其微观结 构的密实度得到优化^[8];与CS砂浆相比,EG12M砂 浆ITZ的密实性得到改善,胶凝基体与骨料界面紧 密结合,并且基体中孔隙结构更细化,并且被针状钙 矾石(AFt)填充,表明蔗渣灰细度降低和比表面积增 大使其火山灰活性得到增强^[14],促进了二次水化反 应进程,生成的水化硅酸钙(C-S-H)及AFt等胶凝产 物进一步填充了孔隙结构并增强了基体硬度^[7-8]; TEA8M和PC4M砂浆也较密实,进一步证实了掺入



Fig. 4 Micromorphologies of SCBA mortars

助磨剂后能提升蔗渣灰砂浆基体的密实性,从而使 蔗渣灰砂浆的强度得到有效提升.

2.4 模型的建立及其验证分析

蔗渣灰颗粒特性与砂浆强度的相关关系见图 5. 由图 5 可见,蔗渣灰砂浆强度与 45 μm 筛余量呈指数 函数关系,而与 80 μm 筛余量呈负线性相关关系,与 比表面积呈二次函数关系.已有研究表明:当蔗渣灰 细度F≤75μm时才能激发出其火山灰活性,反之相 当于惰性掺合料掺入基体中影响水化进程^[15];当F≤ 45μm时能有效发挥蔗渣灰的填充效应,并在一定程 度上提高了蔗渣灰非晶态SiO₂的反应接触面,促进 火山灰反应驱动力,但45μm筛余量不断增大会导致



Fig. 5 Correlation between particle characteristics of SCBA and strength of mortars

砂浆二次水化进程的提升作用减低并趋于平缓^[14,16]. 蔗渣灰的吸水量随着比表面积的增大而不断增加^[14],当比表面积增大至一定程度后,浆体中自由水 量减少至难以保证水化反应的进行,导致Ca(OH)₂ 生成量减少,阻碍后续水化进程,此时比表面积增大 产生的负面影响降低了填充和成核效应^[17-18]的正面 影响,从而对砂浆强度造成负面影响.

综合考虑 *D*≤3 μm、3 μm<*D*≤32 μm 及 *D*> 32 μm颗粒含量对蔗渣灰砂浆强度的影响,拟合得到蔗 渣灰粒径分布与砂浆抗压、抗折强度的相关关系为:

$$f_{\rm c} = -0.07c_1 + 0.26c_2 - 0.17c_3 + 41.92, \ R^2 = 0.98 \tag{1}$$

$$f_{\rm tm} = -0.11c_1 + 0.02c_2 - 0.11c_3 + 14.51, \ R^2 = 0.98 \tag{2}$$

式中: c_1 、 c_2 、 c_3 分别为蔗渣灰 $D \le 3 \mu m$ 、 $3 \mu m < D \le 32 \mu m$ 和 $D > 32 \mu m$ 颗粒含量.

由式(1)、(2)可见, c_2 的系数均大于0,而 c_1 、 c_3 的系数均小于0,表明3 μ m $< D \leq 32 \mu$ m 颗粒含量 增多有助于蔗渣灰砂浆的强度提升,其对强度增长 起主导作用并决定着水泥基材料性能发展.D >32 μ m 颗粒含量的增多对砂浆强度具有负面影响 已得到证实^[16],但 $D \leq 3 \mu$ m 颗粒含量过多也会对 强度产生不利影响,原因在于过细颗粒会增强颗粒 之间的范德华力和静电力等作用力^[19],产生的团聚 现象使水化初期蔗渣灰团聚体外表面形成了水化 产物层,阻止了 Ca^+ 、OH⁻和 H_2O 向内层迁移和扩 散,阻碍内部蔗渣灰颗粒的水化进程^[20-21].因此,为 提升蔗渣灰砂浆的强度应增多蔗渣灰中 3 μ m $< D \leq$ 32 μ m 颗粒含量,并降低 $D \leq 3 \mu$ m 和 $D > 32 \mu$ m 颗 粒含量.

已有研究表明蔗渣灰砂浆的抗压强度与水胶 比、蔗渣灰掺量存在明显的相关性^[21],并基于混凝土 强度与水胶比 m_w/m_c的 Bolomey 关系式进行推 导^[22],提出了蔗渣灰砂浆抗压强度多因素模型.基于 前文蔗渣灰颗粒特性与砂浆强度的单因素分析,根 据变量分离原理和最小二乘法非线性回归分析^[22], 综合考虑蔗渣灰细度、粒径分布及比表面积对蔗渣 灰砂浆抗压强度的多因素耦合作用,得到基于颗粒 特性调控的蔗渣灰砂浆抗压强度多因素模型,同时 结合试验结果,当蔗渣灰砂浆的 m_w/m_B=0.52,蔗渣 灰掺量为15%时,拟合得到基于颗粒特性调控的蔗 渣灰砂浆抗压强度多因素模型为:

$$f_{c} = \alpha_{a} f_{i} (\varphi_{1} w^{2} + \varphi_{2} w + 1) \times (m_{w}/m_{B} - \alpha_{b}) \times (-$$

$$0.619 \ 09 + 0.998 \ 83^{R_{to}}) \times (0.030 \ 83c_{2} +$$

$$3.517 \ 23) \times (-0.006 \ 19A^{2} + 0.036 \ 76A +$$

$$0.575 \ 4) \qquad (3)$$

式中: α_{a} 、 α_{b} 、 φ_{1} 、 φ_{2} 为回归系数; f_{i} 为胶凝材料的抗压强度.

基于颗粒特性调控的蔗渣灰砂浆抗压强度拟合 值与试验值见表4.由表4可见,试验值和拟合值吻 合,由此证明所建立的基于颗粒特性调控的蔗渣灰 砂浆的抗压强度多因素模型能较好的预测蔗渣灰砂 浆的抗压强度.

表 4	基于颗粒特性调控的蔗渣灰砂浆抗压强度拟合值与试验值
Table 4	Fitting and experimental values of compressive strength
	of SCBA mortars based on particle characteristics

regulation

C	/ 0 /	$f_{\rm c}/{ m MPa}$			
Specimen	C ₂ / %0	Experimental value	Fitting value		
UGAsM	33.9	39.48	39.57		
EG4M	34.8	40.70	40.51		
EG8M	36.9	41.37	41.46		
EG12M	38.3	42.22	42.24		
TEA4M	39.8	42.61	42.56		
TEA8M	45.9	45.28	45.25		
TEA12M	41.6	43.63	43.69		
PC4M	36.2	41.03	40.97		
PC8M	35.1	40.71	40.79		
PC12M	34.1	40.49	40.48		

3 结论

(1)与醇类助磨剂 EG、高分子类助磨剂 PC 相比,醇胺类助磨剂 TEA 对蔗渣灰颗粒特性的优化效果最好,掺入 0.08%的 TEA 研磨后蔗渣灰细度最小,粒径分布最集中;而掺入 0.04%的聚羧酸类助磨剂 PC 对蔗渣灰比表面积的提升最大.

(2)TEA 掺量为 0.08% 时, 蔗渣灰砂浆的抗压 和抗折强度提升最大.优化蔗渣灰颗粒特性可改善 砂浆的孔结构分布, 使有害孔及多害孔占比减少, 孔 隙率降低最大, 并改善砂浆界面过渡区的密实性.

(3) 蔗渣灰粒径 D ≤ 3 μm 颗粒含量过多且比表 面积过大会对砂浆强度造成负面影响,可通过增多 3 μm < D ≤ 32 μm 颗粒含量和降低 D ≤ 3 μm 、 D > 32 μm 颗粒含量实现砂浆强度提升.

(4)综合考虑蔗渣灰的颗粒细度、粒径分布及比 表面积与蔗渣灰砂浆抗压强度的相关关系,建立了 基于颗粒特性调控的蔗渣灰砂浆抗压强度多因素模 型,可为蔗渣灰颗粒特性的优化调控及配合比设计 提供参考.

参考文献:

- [1] KOLAWOLE J T, BABAFEMI A J, FANIJO E, et al. State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 118:103975.
- [2] KATARE V D, MADURWAR M V. Experimental characterization of sugarcane biomass ash—A review [J]. Construction and Building Materials, 2017, 152:1-15.
- [3] CORDEIRO G C, TAVARES L M, TOLEDO R D, et al. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification [J]. Cement and Concrete Research, 2016, 89:269-275.
- [4] 杨海静,孙振平,PLANK Johann,等.聚羧酸系减水剂作为助 磨剂使用的构效关系研究[J].建筑材料学报,2022,25(1):54-60. YANG Haijing, SUN Zhenping, PLANK Johann, et al. Study on structure-activity relationship of polycarboxylic acid water reducing agent as grinding aid [J]. Journal of Building Materials, 2022,25(1):54-60. (in Chinese)
- [5] ZHAO J H, WANG D M, LIAO S C, et al. Effect of mechanical grinding on physical and chemical characteristics of circulating fluidized bed fly ash from coal gangue power plant [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101:851-860.
- [6] 董耀武,孙振平,周晓阳,等.三乙醇胺和三聚磷酸钠助磨剂 对水泥颗粒表面性质的影响[J].建筑材料学报,2022,25(7): 722-729.

DONG Yaowu, SUN Zhenping, ZHOU Xiaoyang, et al. Effect of triethanolamine and sodium tripolyphosphate as grinding aids on the surface properties of cement particle [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):722-729. (in Chinese)

- [7] TORRES S M, DELIMA V E, BASTO P D, et al. Assessing the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash using X-ray diffraction [J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 120684.
- [8] LI J, TAO Y, ZHUANG E D, et al. Optimal amorphous oxide ratios and multifactor models for binary geopolymers from metakaolin blended with substantial sugarcane bagasse ash [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377:134215.
- [9] CHEN Z, WEI J L, YI C F, et al. Strength and chloride resistance of mortars blended with SCBA: The effect of calcination and particle sizing on its pozzolanic activity [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22:1423-1435.
- [10] 刘超,胡天峰,刘化威,等.再生复合微粉对混凝土力学性能及微观结构的影响[J].建筑材料学报,2021,24(4):726-735.
 LIU Chao, HU Tianfeng, LIU Huawei, et al. Effect of recycled composite powder on mechanical properties and microstructure of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4): 726-735. (in Chinese)
- [11] MISHRA R K, GEISSBUHLER D, CARMONA H A, et al. En route to multi-model scheme for clinker comminution with

chemical grinding aids [J]. Advances in Applied Ceramics, 2015, 114(7):393-401.

- [12] 吴中伟,廉惠珍.高性能砂浆 [M].北京:中国铁道出版社,1999.
 WU Zhongwei, LIAN Huizhen. High performance concrete [M]. Beijing:China Railway Press, 1999. (in Chinese)
- [13] LI Z, GAO X L, LIU Y Y, et al. Hydration kinetics, pore structure, 3D network calcium silicate hydrate, and mechanical behavior of graphene oxide reinforced cement composites [J]. Construction and Building Materials, 2018, 190:150-163.
- [14] MALI A K, NANTHAGOPALAN P. Thermo-mechanical treatment of sugarcane bagasse ash with very high LOI: A pozzolanic paradigm [J]. Construction and Building Materials, 2021, 288:122988.
- [15] 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.
- [16] SUN Y, WANG K Q, LEE H S. Prediction of compressive strength development for blended cement mortar considering fly ash fineness and replacement ratio [J]. Construction and Building Materials, 2021, 271:121532.
- [17] BAI S, GUAN X C, LI H, et al. Effect of the specific surface area of nano-silica particle on the properties of cement paste [J]. Powder Technology, 2021, 392:680-689.
- [18] 刘一帆,吴泽娟,张轩翰,等.超高性能混凝土流变特性及调控研究进展[J].硅酸盐学报,2023,51(11):3025-3038.
 LIU Yifan, WU Zemei, ZHANG Xuanhan. Review on rheological properties and their regulation of ultra-high performance concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(11):3025-3038. (in Chinese)
- [19] HU S W, CHI M C, HUANG R. Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar [J]. Construction and Building Materials, 2018, 176:250-258.
- [20] CUI Y P, WANG L C, LIU J, et al. Impact of particle size of fly ash on the early compressive strength of concrete: Experimental investigation and modelling [J]. Construction and Building Materials, 2022, 323:126444.
- [21] 韦京利,李舒阳,钟福文,等.生物质灰混凝土抗压强度的多因素计算模型[J].混凝土,2021(9):63-72.
 WEI Jingli, LI Shuyang, ZHONG Fuwen, et al. Multi-factor computation model of compressive strength of biomass-based concrete [J]. Concrete, 2021(9):63-72. (in Chinese)
- [22] 杨绿峰,周明,陈正,等.基于强度和抗氯盐耐久性指标的混 凝土配合比设计及试验研究[J].土木工程学报,2016,49(12): 65-74.

YANG Lüfeng, ZHOU Ming, CHEN Zheng, et al. Design and experiment of concrete mix proportion based on indices of strength and durability in chloride environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(12):65-74. (in Chinese)