

生物质灰用作混凝土掺合料的研究综述

马必聪,梁健*,翁贻令

(广西路桥工程集团有限公司,广西 南宁 530200)

摘要:为总结生物质灰用作混凝土掺合料的研究进展,该文从生物质灰的理化特性、作用机理、生产工艺的影响因素及掺入混凝土后对混凝土工作性能、力学性能和耐久性能的影响进行研究。结果表明:与传统矿物掺合料相比,生物质灰密度小且比表面积大,大部分生物质灰中的SAF($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)活性成分总量均超过F类火山灰的标准要求(即 $\geq 70\%$)。将生物质灰掺入混凝土后,能有效提高混凝土的力学和耐久性能,但可能会对混凝土的流动性和抗碳化性能产生负面影响。另外,生物质灰的性能受燃烧和研磨等生产工艺的影响较大,为实现生物质灰在大规模工程中的广泛应用,未来还需要对生物质灰的生产工艺进行优化。

关键词:生物质灰;混凝土;掺合料;理化性质

中图分类号:U414

文献标志码:A

Research Review of Biomass Ash as Concrete Admixture

MA Bicong, LIANG Jian*, WENG Yiling

(Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530200, China)

Abstract: In order to provide a comprehensive overview of research progress in the use of biomass ash as concrete admixture, the physical and chemical properties, mechanism of action, factors affecting the production process of biomass ash, and the effects of biomass ash incorporation on the working properties, mechanical properties, and durability of concrete were studied. The results show that biomass ash has a smaller density and a larger specific surface area than traditional mineral admixture, and the total amount of active components, namely $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (SAF) in most biomass ashes exceeds the requirements of class F volcanic ash ($\geq 70\%$). Incorporating biomass ash can effectively improve the mechanical properties and durability of concrete, but it may have a negative impact on the flowability and anti-carbonization performance of concrete. Moreover, the performance of biomass ash is greatly influenced by production processes such as combustion and grinding. To make biomass ash widely used in large-scale engineering in the future, it is necessary to optimize the production process of biomass ash.

Keywords: biomass ash ; concrete ; admixture ; physical and chemical properties

0 前言

随着“碳达峰,碳中和”战略目标的提出,国家倡导提高资源利用效率,大力发展新型建材。科学使用掺合料不仅可以减少水泥等高耗能材料用量,从

而降低成本和减少碳排放,还可以消纳工业固废资源,实现资源的合理应用^[1]。据统计,在2020年,全球水泥行业的碳排放约27亿t,占全球碳排放量的8.3%^[2],每生产1t的水泥熟料会产生约860kg的 CO_2 气体^[3],这意味着1t水泥中每被取代1%将会减

收稿日期:2023-08-22(修改稿)

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(编号:20221229);广西重点研发计划项目(编号:桂科AB23026126);交通运输行业重点科技项目(编号:2121MSI026)

作者简介:马必聪,男,高级工程师.E-mail:mabicon@gxlq.com.cn

*通信作者:梁健,男,助理工程师.E-mail:598214816@qq.com

少 8.60 kg 的 CO₂ 排放量。使用掺合料替代部分水泥,可以提高胶凝材料的水化程度和颗粒堆积密实度,从而提高混凝土的力学性能和耐久性能^[4-5]。而粉煤灰、高炉矿渣粉及硅灰等传统的矿物掺合料主要来源于工业废弃物,由于近些年基础设施建设的飞速发展,混凝土用矿物掺合料供需矛盾凸显,因此亟须发展新型的掺合料以解决矿物掺合料供不应求的问题。

生物质灰是农林废弃物经燃烧和研磨后所形成的颗粒粉末,其化学成分与传统掺合料相似,具有较高火山灰活性。与传统掺合料相比,生物质灰具有低能耗、来源广泛、成本低廉和再利用价值大等优势。因此,作为掺合料的潜力正在被迅速发掘与应用。常见的生物质灰有稻壳灰(RHA)^[6-8]、甘蔗渣灰(SCBA)^[9-12]、各类农作物的秸秆灰^[13-18]以及树皮灰^[19-20]等。根据《第二次全国污染源普查公报》公布的数据及广西日报媒体报道,2017 年中国秸秆产生量为 8.05 亿 t,秸秆可收集资源量为 6.74 亿 t。2020 年广西壮族自治区秸秆年总产生量 3 100 万 t 左右,可收集量约 2 300 万 t,桉树皮和蔗渣等农林废弃物每年总量高达 1.20 亿 t。自 1998 年丹麦建成第一座秸秆发电厂后,利用生物质资源燃烧发电成为生物质资源化利用的主要途径^[21],然而这些生物质废弃物经燃烧后产生的锅炉飞灰和炉底灰渣并未得到合理利用和处理。若能有效利用这些农林废弃物、锅炉飞灰以及炉底灰渣为原料制备生物质灰,并将其作为混凝土的掺合料,不仅可以减少生产成本和碳排放,还可以发挥出广西壮族自治区农作废弃物富余的优势,提高农民经济收入。

目前,生物质灰在建筑材料中的应用研究主要集中在水泥混凝土、黏土砖添加剂、陶瓷以及路基填充材料等方向^[22]。虽然目前已有研究将生物质灰替代部分水泥来作为混凝土掺合料,但仍停留在研究和试验阶段,并未广泛应用于实际工程项目。本文总结生物质灰作为混凝土掺合料的相关研究,通过理化特性、作用机理以及性能测试等方面研究,分析生物质灰作为混凝土掺合料的可行性及应用潜力。

1 生物质灰的物理化学性质

1.1 物理性质

生物质灰混凝土的性能主要受到掺合料的比表

面积和粒径分布的影响。粉体颗粒的比表面积会影响混凝土的用水量,掺入比表面积大的粉体会导致用水量增加,从而降低流动性^[23-24]。而粉体颗粒的粒径分布主要影响混凝土的密实度,例如在粗骨料之间填充细骨料,细骨料之间填充胶凝材料,以及在大粒径胶凝材料之间填充小粒径胶凝材料,从而实现混凝土的紧密堆积^[25-31]。而生物质灰的比表面积和粒径分布受燃烧和研磨影响较大^[17,32-33]。表 1 展示了水泥、常见矿物掺合料以及部分生物质灰的相关物理参数。通过比较各粉体的物理参数可以发现,相较于水泥和部分传统矿物掺合料,生物质灰的密度更小,若作为混凝土掺合料,能够有效降低混凝土的自重。

表 1 水泥、常见掺合料与部分生物质灰的物理性质

Table 1 Physical properties of cement, common admixture, and partial biomass ash

种类	密度/(g·cm ⁻³)	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	D ₅₀ /μm
水泥 ^[6,26]	3.10~3.15	360.00~450.00	13.70
粉煤灰 ^[27-29]	2.24	300.09~666.90	10.16~19.82
硅灰 ^[29-31]	2.22	16 333.00~25 000.00	0.10~0.23
矿粉 ^[29]	2.80	416.00	
稻壳灰 ^[6,8,31]	2.08~2.12	36 470.00~62 100.00	4.13~7.30
甘蔗渣灰 ^[10-12]	2.24~2.53	196.00~25 400.00	7.40~16.90
水稻秸秆灰 ^[20]	2.22	2 054.500	
小麦秸秆灰 ^[14-15]	1.97~2.01	430.00~440.00	10.00

生物质灰粒径分布 D₅₀(即粒径小于该值的颗粒占总颗粒数的 50%)为 4~17 μm,比粉煤灰和水泥的粒径要小一些,但相较于硅灰的 D₅₀ 范围,生物质灰要大 41~169 倍。已有研究表明:将稻壳灰的 D₅₀ 磨至 4.13 μm 时,水泥胶砂的抗压强度和抗折强度随着稻壳灰取代硅灰比例的增加而增大,并且当取代比例达到 100% 时,28 d 的抗压强度和抗折强度分别较纯硅灰组的提高了 15.4% 和 16.0%^[31]。

从表 1 可以看出:比表面积相差较大,这是由于测定比表面积的方法有所差异(数值较小的为勃氏法的测定结果,数值较大的为 BET 氮气吸附法的测定结果)。生物质灰一般具有多孔结构,若用 BET 法测定,其比表面积为 1 250~62 100 m²/kg。其中,稻壳灰的比表面积最大,尽管其粒度没硅灰细,但由于其多孔结构,它具有比硅灰更大的比表面积。这意味着当稻壳灰掺入混凝土后,在成型过程中会比

硅灰吸收更多的自由水,从而使得混凝土流动性下降。但有研究表明:随着时间的推移,多孔结构所吸收的水分能够逐渐释放,从而进一步促进水化反应,并发挥内养护的作用^[31]。

根据美国材料与试验协会的标准 ASTM C168-19 规定,火山灰材料的颗粒保留在 45 μm 筛上的比例不应超过 34%,强度活性指数应不少于 75%。因此,需要对初始生物质灰进行研磨处理,改善其粒径分布和提高比表面积,扩大生物质灰与反应物的接触面,使二次水化反应得更充分,间接提高生物质灰在混凝土中的化学作用^[23]。

1.2 化学性质

生物质灰的主要化学成分包括 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 CaO 等活性成分, K₂O、Na₂O 碱性成分以及有机物。

活性成分参与水化反应是生物质灰能作为掺合料使用的基础。其中, CaO 与水反应生成 Ca(OH)₂, 而 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 会与水泥水化过程中生成的 Ca(OH)₂ 发生二次水化反应生成 C—S—H 等产物^[34-35]。美国材料与试验协会标准(ASTM C168-19)

对火山灰的活性氧化物成分做出了规定,对于 C 类火山灰,其活性氧化物百分比总和 $w(\text{SAF})$ (SAF 为 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) $\geq 50\%$; 对于 F 类火山灰,其 $w(\text{SAF}) \geq 70\%$ 。表 2 展示了水泥、常见掺合料及部分生物质灰的化学成分。图 1 展示了各掺合料和生物质灰(包括稻壳灰 RHA、甘蔗渣灰 SCBA、水稻秸秆灰 RSA、小麦秸秆灰 WSA、高粱秸秆灰 SHSA、青稞秸秆灰 HBSA 以及竹叶灰 BLA)的烧失量、碱含量、氧化钙以及 SAF 的含量统计数据。从表 2 和图 1 可以看出:稻壳灰(RHA)在化学成分上与硅灰(SF)相近,按照《矿物掺合料应用技术规范》(GB/T 51003—2014)规定, SF 的 $w(\text{SiO}_2) \geq 85\%$, RHA 完全满足硅灰的活性要求。同时,甘蔗渣灰(SCBA)的 $w(\text{SAF}) > 70\%$, 与《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2017)中规定的 C 类粉煤灰中的 $w(\text{SAF}) \geq 50\%$ 和 F 类粉煤灰的 $w(\text{SAF}) \geq 70\%$ 相比,甘蔗渣灰的活性满足 F 类粉煤灰的活性要求。此外,除了 RHA 和 SCBA 之外,其他生物质灰的 SAF 总量均能达到 C 类火山灰的活性要求,甚至大部分的生物质灰也能满足 F 类火山灰的活性要求。

表 2 水泥、常见掺合料以及部分生物质灰的主要化学成分

Table 2 Main chemical components of cement, common admixture, and partial biomass ash										%
类别	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)$	烧失量
水泥 ^[30,36-37]	19.20~21.50	4.18~5.00	3.32~4.23	62.28~64.93	1.61~2.05	0.50~0.78	0.09~0.10	2.46~3.35	0.09	1.47~2.49
粉煤灰 ^[24,27,37-38]	31.33~63.79	15.80~26.78	1.53~7.90	2.46~27.38	1.82~3.05	1.07~4.30	0.41~2.75	1.46~7.90	0.06	0.69~9.41
硅灰 ^[24,29,36]	92.00~96.21	0.25~0.78	0.15~0.79	0.36~1.72	0.47~2.71	0.03~0.84	0.13~0.16	0.69~1.16	0.03~0.17	2.29~4.67
矿渣粉 ^[29,39]	28.15~31.86	16.00~16.53	0.43~1.10	34.54~39.81	1.40~6.00	0.45~0.54	0.33~0.46	0.04~0.32		2.88
稻壳灰 ^[6-8]	82.60~91.00	0.15~1.23	0.10~0.73	0.55~1.60	0.20~0.81	1.80~3.68	0.66~1.12	0.10~1.21		3.81~11.90
甘蔗渣灰 ^[9,11-12]	56.37~78.34	4.80~14.61	0.90~5.04	2.15~3.90	1.43~1.65	2.00~3.46	0.12~1.57	0.90	0.85~1.07	0.42~10.53
水稻秸秆灰 ^[18]	52.44	0.47	0.17	8.01	2.70	12.05	0.89	2.26	2.58	14.60
小麦秸秆灰 ^[13,15-16]	51.20~65.10	1.20~9.10	0.32~2.67	5.90~10.30	1.11~6.45	8.40~23.82	0.32~4.60	1.13~4.93	2.40~3.80	4.03~10.30
高粱秸秆灰 ^[16]	71.42	2.52	0.74	4.20	2.35	11.3	2.16	0.78	1.94	6.47
青稞秸秆灰 ^[17]	61.75	5.92	3.83	10.63	2.04	5.31	2.60	1.75	5.72	4.55
竹叶灰 ^[19]	78.71	1.01	0.54	7.82	1.83	3.78	0.05	1.00	0.99	3.83

图 2 展示了各掺合料及生物质灰的 SAF 的相对含量。从图 2 可以得知:矿物掺合料和大部分生物质灰的活性相同之处在于主要活性成分都是以 SiO₂ 为主。但不同的是,生物质灰的 Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 CaO 的含量低于常规的矿物掺合料。这意味着生物质灰的火山灰活性大多是由活性 SiO₂ 来发挥,且在二次水化时主要生成 C—S—H 凝胶,而除硅灰外的传统矿

物掺合料在二次水化过程中生成 C—S—H 和含较多的铝、铁元素的二次水化产物^[23,40]。

除了活性成分外,从图 1 中也可以看出生物质灰的化学成分不稳定,碱含量和烧失量较高。生物质灰的碱含量为 2.76%~11.30%,烧失量为 3.81%~14.60%。现行标准对水泥和常见矿物掺合料的碱含量与烧失量作出了规定。在《通用硅酸盐水泥》(GB175—

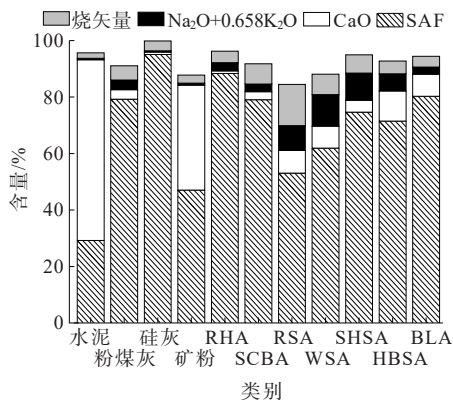


图1 水泥、传统掺合料及部分生物质灰的关键参数含量统计图

Figure 1 Statistics of key parameters of cement, traditional admixture, and partial biomass ash

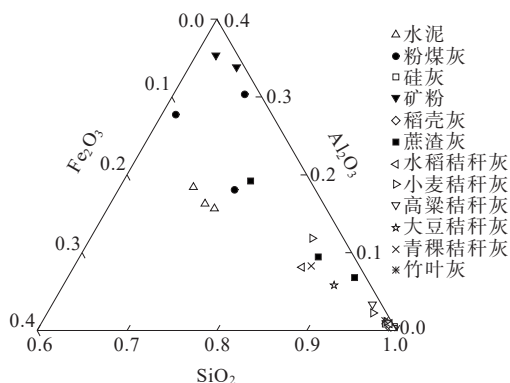


图2 水泥、传统掺合料及部分生物质灰的SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃的相对含量

Figure 2 Relative contents of SiO₂, Al₂O₃, and Fe₂O₃ in cement, traditional admixture, and partial biomass ash

2007)中水泥的碱含量 $\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$ 应不大于0.6%,烧失量不应大于5%以及在《矿物掺合料应用技术规范》(GB/T 51003—2014)中对矿物掺合料的最大碱含量规定为 $\leq 1\%$,烧失量 $\leq 8\%$ 。显然,所有生物质灰的碱含量远超标准要求,大部分生物质灰的烧失量也超标准要求。生物质灰的碱含量过高,会加快水化速度,提前凝结硬化,混凝土中碱-骨料反应加重,导致混凝土膨胀并开裂^[41]。而烧失量则可以间接反映材料的碳含量,高烧失量可能是生物质灰燃烧不完全、煅烧温度低或煅烧时间长的结果。未燃烧的碳会吸附混凝土中的外加剂,导致混凝土坍落度损失快,同时也会阻碍火山灰反应的进行^[16,42]。

针对生物质灰碱含量及烧失量较高的缺点,有研究表明通过先低温后高温的两段燃烧法来降低钾和碳元素的含量^[17,43-44],也有通过浸泡低浓度盐酸来

减少碱金属元素含量^[44-45]。综上所述,通过分析生物质灰的化学成分,发现其具有较高的火山灰活性,但碱含量和烧失量较高,需要通过预处理和生产工艺的优化来降低其碱含量和烧失量,以提高其在混凝土中的应用性能。

2 生物质灰的作用机理及影响因素

2.1 微集料填充效应

生物质灰与大多数掺合料一样,具有微集料填充效应。经研磨加工后的生物质灰,粒径更小,比表面积更大。更小的粒径意味着其能改善粉体颗粒级配,在粉体之间形成更好的微级配,如图3所示,从而弥补混凝土凝固成型后孔结构缺陷给强度带来的负面影响^[46-47]。

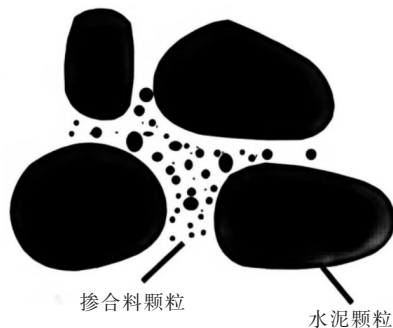


图3 微集料填充效应图示

Figure 3 Illustration of microaggregate filling effect

微集料填充效应不仅可以改善粉体颗粒级配,还能填充孔隙。这是因为生物质灰具有较大的表面积,可以为水泥水化物的沉淀提供更多的成核位点,生成更多的水化产物(如 CH 、 C-S-H 和 C-A-H 等)^[48-49],从而提高基体的密实度,减少孔隙率。这种改善在宏观层面上体现为混凝土力学性能和耐久性的提高。

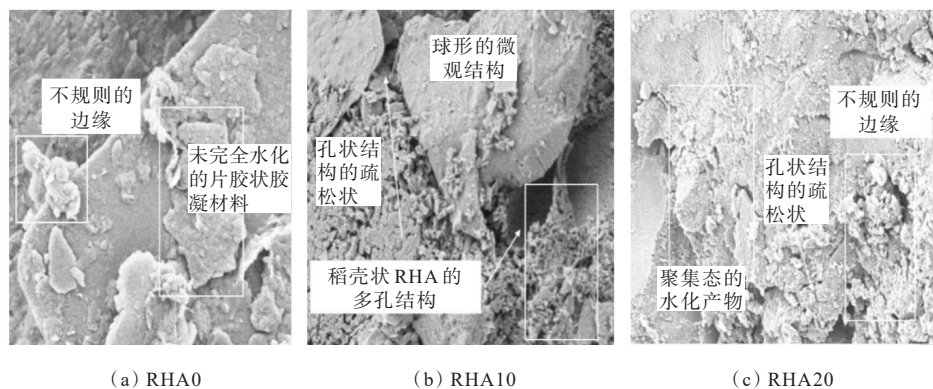
2.2 火山灰效应

火山灰效应是生物质灰作为混凝土掺合料的活性保障,由表2可知:生物质灰有着丰富的SiO₂和Al₂O₃等活性组分,其与水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次反应,生成 C-S-H 和 C-A-H 等凝胶,或者将钙硅比较高的 C-S-H 转化为钙硅比低的 C-S-H ^[50]。这些凝胶会填补部分孔隙,提高密实度,增强各组分的黏结程度,从而改善ITZ界面,提高混凝土的强度和耐久性能。

生物质灰替代常规的活性掺合料是具有发展潜

力的,但判断可行性不能仅凭活性成分的相似性,还应结合实际的性能测试进行综合评估^[51-52]。图4展示了不同掺量(掺量指占总胶凝材料的百分比)下(0、10%和20%)RHA混凝土的SEM(扫描电子显微镜)图。从图4中可以看出:随着掺量的增加,颗粒团

聚的状态变强,孔隙和孔洞更少,形成更致密的微观结构。这是因为RHA中高SiO₂含量形成的硅氧桥链将颗粒牢固地连接在一起,减少了C—S—H等凝胶的空隙^[53]。在RHA的微集料填充效应和火山灰效应的共同作用下,形成了致密微观结构。



(a) RHA0

(b) RHA10

(c) RHA20

图4 不同掺量的RHA在10 μm下的SEM图^[53]Figure 4 SEM images of RHA with different doping amounts at 10 μm^[53]

掺入生物质灰后,混凝土的密实度和孔隙结构得到改善,不仅可以通过SEM直接观察得到,还可以使用压汞法、气体吸附法以及核磁共振法等多种技术手段进行表征。Cao等^[17]利用核磁共振波谱(NMR)分析得到掺入15%HBSA的混凝土,其孔隙率较纯水泥组的更低,平均孔直径更小,随后利用氮气吸附法(BET)进一步研究孔结构,氮气吸附量、比表面积大小及孔径分布的结果再次表明,掺入15%HBSA的混凝土具有更少的孔数量和孔结构。掺入生物质灰之所以能改善混凝土孔隙结构和有害孔数量,是由于生成的C—S—H等凝胶变多,细化了孔隙,使得混凝土毛细管孔隙率降低。而C—S—H凝胶之所以能细化孔隙,是因为C—S—H凝胶不是直接在水泥熟料中析出,而是在熟料颗粒和硅相颗粒之间的空间中析出^[20]。

综上所述,由于生物质灰的高火山灰活性,能有效促进水化反应,生成更多水化产物来填充孔隙,使得混凝土有害孔数量减少,内部孔隙结构得到改善,从而提高了混凝土的密实度。

2.3 生产工艺的影响因素

生物质灰理化性质不稳定,受燃烧和研磨的影响较大。已有研究表明:当燃烧温度超过800℃时,SiO₂的晶型会由非晶型转变为方石英;当燃烧温度1000℃以上时,开始转变为磷石英^[54]。在燕麦壳






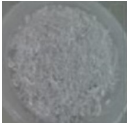



灰^[55]、稻壳灰^[56]以及甘蔗渣灰^[57]的XRD等表征结果中发现,当燃烧温度大于700℃时SiO₂晶型开始发生改变,而SiO₂晶型的转变会导致其火山灰活性下降。研究表明:甘蔗渣灰在600℃下燃烧时间由1h延长至3h时,SiO₂含量增加了10%,且当燃烧温度为600~700℃时,灰分颜色随燃烧温度的升高以及燃烧时间的延长变得更白^[45](表3)。这意味着温度的升高及燃烧时间的延长对灰分中有机物的去除效果是显著的,有助于降低灰分的烧失量^[17,33,55]。除此之外,燃烧时间的延长也有利于提高生物质灰的比表面积,但是效果不明显,一般燃烧时间在3h以内^[56]。此外,还有研究发现,用盐酸溶液预处理甘蔗渣灰后,在燃烧温度800℃下燃烧1h后没有检测到SiO₂晶型的转变,说明经盐酸预处理后的甘蔗渣灰,能提高活性成分SiO₂晶型转变的初始温度^[58]。此外,也有研究表明经酸处理后的生物质灰能有效降低碱金属含量和烧失量^[59]。

早在1998年,就有学者发现研磨不仅能改变粉体的粒度、比表面积以及微观形貌等物理性质,还能使晶体畸变,键耦合解离,导致表面悬空化学键,表面结构无定形化^[60],从而使得粉体的反应接触面积增大以及含硅铝元素的有效成分增多,反应活性升高,但也会导致粉体的热稳定性降低^[61]。有研究发现,当甘蔗渣灰研磨至D₈₀(D₈₀物理意义是粒径小

于该值的颗粒占 80%) 值低于 $60\ \mu\text{m}$ 和 Blaine 细度高于 $300\ \text{m}^2/\text{kg}$ 时, 可以被认为是火山灰材料^[62]。Bahurudeen 等^[57]探究了甘蔗渣灰 $210\sim 45\ \mu\text{m}$ 的粒度与活性的关系, 发现当研磨至 $53\sim 45\ \mu\text{m}$ 时, 均能满足强度活性指数 $\geq 75\%$ 。但是研磨时间不能太久, 否则会导致比表面积过大, 造成混凝土需水量过大且粉体易出现“球团”现象^[63]。

表 3 蔗渣灰在不同燃烧温度和燃烧时间下的颜色对比^[45]

Table 3 Color comparison of sugarcane bagasse ash at different combustion temperatures and combustion time^[45]

燃烧温度/ ℃	不同燃烧时间(h)时的颜色		
	1	2	3
600			
700			
800			

总的来说, 燃烧主要影响生物质灰成分的晶型结构、碱含量和碳含量等化学成分含量。研磨主要是通过改变生物质灰的晶型结构、比表面积和粒径来影响其在混凝土中的填充效应和火山灰效应。使用生物质灰作为掺合料时, 不但需要探究最佳的预处理条件使其满足作为混凝土掺合料要求, 还应满足其掺入混凝土后的实际性能需求。

3 生物质灰混凝土的性能

3.1 力学性能

生物质灰在混凝土中具有微集料填充效应和火山灰效应, 使混凝土的密实度增加, 水化程度更彻底。从宏观层面上看, 提升了混凝土的力学性能。

从掺量上看, 当稻壳灰掺量为 10% 时, 混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度最大, 同时抗折强度也随掺量的增加而提高; 当其掺量为 20% 时, 混凝土的抗折强度达到最大^[53]。当蔗渣灰掺量为 10% 时, 对混凝土抗压强度的发展没有显著影响。然而, 当掺量为 20% 时, 尽管降低了早期的抗压强度, 但是在 $90\ \text{d}$

后抗压强度实现反超^[64]。当烟草秸秆灰掺量 15% 时, 抗压强度达到最大, 较对照组 $7\ \text{d}$ 的抗压强度提高了 12.33% , $28\ \text{d}$ 提升了 20.56% ^[51]。当青稞秸秆灰掺量为 15% 时, 抗压强度和劈裂抗拉强度较对照组提高 11.94% 和 18.52% ^[17]。在超高性能混凝土方面也有相应的研究指出, 掺 20% 水稻秸秆灰和掺 20% 竹叶灰的混凝土抗压强度分别达到了 $188.5\ \text{MPa}$ 和 $185.0\ \text{MPa}$, 比对照组高出了 13.2% 和 11.1% ^[20]。

从理化特性上看, 甘蔗渣灰的化学成分与粉煤灰相似, 而且甘蔗渣灰和粉煤灰作为掺合料掺入混凝土时均会降低前期强度, 提高后期强度^[64-65]。而稻壳灰与硅灰的化学组成也相似, 且比表面积均较大, 掺入混凝土中均会提高混凝土的力学性能^[31]。这间接说明了粉体材料的化学组成影响水化过程, 即影响混凝土强度发展的过程。

从燃烧和研磨的影响上看, 当甘蔗渣灰燃烧温度 $700\ ^\circ\text{C}$, 研磨至与水泥细度一致时, 甘蔗渣灰 $7\ \text{d}$ 和 $28\ \text{d}$ 强度活性指数达到 108% 和 106% ^[57]。稻壳灰在 $600\ ^\circ\text{C}$ 下燃烧, $28\ \text{d}$ 抗压强度和抗折强度随掺量呈先增大后减小的趋势, 但掺量在 20% 以内都高于对照组, 而在 $700\ ^\circ\text{C}$ 下燃烧时, $28\ \text{d}$ 抗压强度只在 5% 掺量内有所提高, 而抗折强度表现为先减少后增大的趋势^[56]。张华等^[66]采用不同比例的薪材、稻壳和秸秆来烧制高硅型和低硅型生物质灰。其中, 经研磨至通过 $45\ \mu\text{m}$ 负压筛的高硅型和低硅型生物质灰分别能等效替代微硅粉 SF85 和 II 级粉煤灰在胶砂强度上的应用效果。

由以上的研究结果可知: 经一定程度的燃烧和研磨后的生物质灰, 在掺量不超过 20% 的情况下, 均能有效保证并提高混凝土的力学性能。其中, 生物质灰的掺量、理化特性以及燃烧与研磨的生产工艺均会对生物质灰混凝土的力学性能产生影响。

3.2 工作性能

在对生物质灰混凝土工作性能的研究上, 主要集中在混凝土流动性方面。Hasan 等^[53]发现, 随着稻壳灰掺量的增加, 混凝土的坍落度与密度逐渐减少, 但是在掺量不超过 10% 时, 坍落度的下降幅度较小。同样, 对水稻秸秆灰与棕榈竹叶灰的研究也表明, 随着掺量的增加, 坍落度会有所下降^[20]。但也有文献表明, 青稞秸秆灰经 $600\ ^\circ\text{C}$ 燃烧并研磨 $2\ \text{h}$ 后, 当掺量不超过 30% 时, 其坍落度随掺量的增加而增大^[17]。

在针对甘蔗渣灰的研究中,有学者发现,甘蔗渣灰的微观结构中存在少量类似粉煤灰颗粒的球形结构,且发现能改善混凝土工作性能的甘蔗渣灰通常具有低烧失量的特点^[67]。

可以发现,生物质灰在混凝土中的工作性能表现不太一致,但是大部分生物质灰的流动性随着掺量的增加而减小,这主要是因为生物质灰的初始颗粒较大且粒径分布不均匀,经过研磨后,生物质灰的比表面积偏大,再加上其颗粒多孔,含碳量高,易吸附水分和外加剂,从而使得混凝土流动性变差^[57]。但比表面积大,颗粒形态不规则,使得颗粒间的摩擦力变大,黏聚性和保水性提高^[58]。

综上所述,生物质灰的掺入很可能会降低混凝土的流动性,增加其需水量,但同时也会改善其黏聚性和保水性。若能有效解决生物质灰烧失量高的问题,并结合合理使用减水剂,则在流动性上的不足可以得到有效改善。

3.3 耐久性能

在耐久性能方面,有研究表明:掺量在50%以内的水稻秸秆灰和竹叶灰均能提高混凝土的抗氯离子和抗渗水性能,并且这种效果随着掺量的增加而更加显著^[20]。Aliu等^[68]综述了在混凝土中掺入玉米秸秆灰能有效提高混凝土的抗化学侵蚀能力、抗冻性和抗渗性。有学者于2008年发现,当掺量在6%以内时,玉米芯灰、小麦秸秆灰以及梧叶灰的掺入,均能有效提高混凝土的耐磨性、抗硫酸盐侵蚀能力以及抗渗性^[69]。还有研究表明:掺入10%青稞秸秆灰的氯氧镁水泥砂浆,有害孔比例降低了25.11%,吸水率降低了2.11%,耐水性提高了6.80%^[17]。

除各类秸秆灰及树叶灰外,蔗渣灰和稻壳灰的研究也相对较多。Zaheer等^[70]综述表明,掺入20%的甘蔗渣灰后,混凝土的电导率显著降低,氯离子扩散系数减小50%,抗硫酸盐侵蚀能力和抗水渗透增强。在抗碳化性能上,由于C—S—H等凝胶的生成量变大,Ca(OH)₂的量变少,导致pH值下降,从而引起碳酸化加剧。还有学者发现,掺入甘蔗渣灰还能提高混凝土耐酸性^[71],降低渗水性,改善抗单向吸水性能^[72]。2007年,有学者发现掺入稻壳灰能有效减少界面过渡区的孔隙率^[73]。Zhang等^[8]发现在自密实混凝土中掺入15%~20%的稻壳灰能降低混凝土的吸水率,提高耐酸性、抗氯离子渗透能力和电阻

率。电阻率的增大也间接说明了孔隙率的减少以及基体密实度的提高。在抗碳化性能方面,有研究发现虽然稻壳灰的掺入,会加剧混凝土的碳化程度,但是随着混凝土固化时间的增加,碳化深度也随之降低^[74]。这与蔗渣灰在抗碳化性能方面的研究结论一致,即生物质灰的掺入,使得更多的Ca(OH)₂转化为C—S—H等凝胶,导致前期碳化程度加剧,但随着混凝土固化时间的推移,生物质灰混凝土的水化程度更大,混凝土密实度得到进一步提升,对碳化的负面影响也随之降低^[70,74]。

总而言之,掺入生物质灰后,改善了混凝土的内部孔隙结构和孔隙密度,减少了有害孔,增加了基体密实度及水化程度,从而增强了抵抗外力破坏与侵蚀的能力,提高了混凝土大部分的耐久性能。虽然生物质灰的掺入会加剧混凝土碳化,但对抗碳化的负面影响会随着混凝土的固化龄期的增加而减弱。

4 结论

本文从生物质灰的理化特性、作用机理、影响因素以及掺入混凝土后的实际性能表现出发,综合评估了生物质灰作为混凝土掺合料的可行性,得出结论:

(1) 生物质灰具有密度较低、比表面大以及火山灰活性高等优势,但是生物质灰作为混凝土掺合料时,还需解决高碱含量、高烧失量以及理化特性不稳定的问题。后续研究应聚焦于燃烧和研磨等生产工艺上的优化,以制备出理化特性稳定的生物质灰。

(2) 在工作性能方面,由于生物质灰的形状不规则和比表面积大,掺入后会增大混凝土的需水量,导致颗粒间摩擦增大,流动度下降,但混凝土的黏聚性和保水性会有所提高。为解决生物质灰混凝土流动性差的问题,后续可以通过改善燃烧及研磨的工艺、使用高性能减水剂以及复掺粉煤灰或石灰石粉等掺合料几个方面进行优化。

(3) 在力学性能方面,生物质灰的掺量、燃烧温度和研磨细度对其影响较大,建议使用燃烧温度为600~700℃且细度达到水泥细度以下的生物质灰,并将掺量控制在20%以内,以保证甚至提高混凝土的力学性能。在今后的研究中,可探索不同生物质灰的理化特性与力学性能之间的关系,这对未来的推广应用与标准化具有重要意义。

(4) 在耐久性能方面,生物质灰的掺入能够提高混凝土的抗氯离子渗透、耐酸性、抗硫酸盐侵蚀、抗冻性以及抗渗性等性能,但会加剧混凝土的前期碳化。因此,在评估生物质灰混凝土的耐久性能时,需要重点关注生物质灰混凝土的碳化程度是否满足使用需求。目前,关于生物质灰混凝土耐久性能的研究比较碎片化,未来需要对生物质灰混凝土的耐久性能进行更全面且深入的研究。

参考文献:

References:

- [1] 贺晋瑜,何捷,王郁涛,等.中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J].环境科学研究,2022,35(2):347-355.
HE Jinyu, HE Jie, WANG Yutao, et al. Pathway of carbon emissions peak for cement industry in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 347-355.
- [2] 白玫.中国水泥工业碳达峰、碳中和实现路径研究[J].价格理论与实践,2021(4):4-11,53.
BAI Mei. Research on the path of achieving carbon peak and carbon neutrality in China's cement industry[J]. Price: Theory & Practice, 2021(4): 4-11, 53.
- [3] 李鹏鹏,任强强,吕清刚,等.面向双碳的低碳水泥原料/燃料替代技术综述[J].洁净煤技术,2022,28(8):35-42.
LI Pengpeng, REN Qiangqiang, LYU Qinggang, et al. Review on raw meal and fuel substitution technology for low carbon cement under carbon neutrality[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(8): 35-42.
- [4] TAYEH BASSAM A, AKEED MAHMOUD H, SHAKER Q, et al. Influence of sand grain size distribution and supplementary cementitious materials on the compressive strength of ultrahigh-performance concrete[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01495.
- [5] 姜天华,管建成,张秀成.超高性能混凝土掺合料应用综述[J].科学技术与工程,2022,22(14):5528-5538.
JIANG Tianhua, GUAN Jiancheng, ZHANG Xiucheng. Summary of application of admixtures in ultra-high performance concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(14): 5528-5538.
- [6] 吴浪,吴小萍,黄斯蕙铭,等.稻壳灰-水泥胶凝体系的水化动力学模型[J].功能材料,2022,53(5):5178-5185.
WU Lang, WU Xiaoping, HUANG Sihui, et al. Hydration kinetics model of rice husk ash-blended system[J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(5): 5178-5185.
- [7] 余跃心,李锦柱,曹茂柏,等.稻壳灰及掺稻壳灰混凝土应用研究进展述评[J].混凝土,2016(6):57-62.
SHE Yuexin, LI Jinzhu, CAO Maobai, et al. Research of rice husk ash and application of rice husk ash in concrete[J]. Concrete, 2016(6): 57-62.
- [8] ZHANG P, WEI S Y, CUI G, et al. Properties of fresh and hardened self-compacting concrete incorporating rice husk ash: A review[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2022, 61: 563-575.
- [9] MALDONADO-GARCÍA M A, HERNÁNDEZ-TOLEDO U I, MONTES-GARCÍA P, et al. Long-term corrosion risk of thin cement composites containing untreated sugarcane bagasse ash[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(4): 4019020.
- [10] CORDEIRO G C, BARROSO T R, TOLEDO FILHO R D. Enhancement the properties of sugar cane bagasse ash with high carbon content by a controlled re-calcination process[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(4): 1250-1257.
- [11] 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.
HUANG Ping, XU Qing, WU Nengsen, et al. Review of characteristics of sugar cane bagasse ash and its application in construction materials[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2022, 44(6): 599-607.
- [12] RUKZON S, CHINDAPRASIRT P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete[J]. Materials & Design, 2012, 34: 45-50.
- [13] KHAN K, ISHFAQ M, AMIN M N, et al. Evaluation of mechanical and microstructural properties and global warming potential of green concrete with wheat straw ash and silica fume[J]. Materials, 2022, 15(9): 3177.
- [14] AL-AKHRAS N M. Durability of wheat straw ash concrete to alkali-silica reaction[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 2013, 166(2): 65-70.
- [15] AL-AKHRAS N M. Durability of wheat straw ash concrete exposed to freeze-thaw damage[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 2011, 164(2): 79-86.
- [16] 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):108-112,116.
XU Peng, XU Changdong, WANG Zhengjun, et al. Activity analysis of biomass straw ash and its effect on mechanical properties of concrete[J]. Concrete, 2020(3): 108-112, 116.
- [17] CAO F, QIAO H X, LI Y K, et al. Effect of highland barley straw ash admixture on properties and microstructure of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 315: 125802.

- [18] SAMANTHA H, LOURDES S, JOSÉ M, et al. Evaluation of rice straw ash as a pozzolanic addition in cementitious mixtures[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(2):773.
- [19] FRÍAS M, SAVASTANO H, VILLAR E, et al. Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(9):1019-1023.
- [20] MOHAMED A, TAYEH BASSAM A, KANDIL MOHAMED A, et al. Effect of rice straw ash and palm leaf ash on the properties of ultrahigh-performance concrete[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17:e01266.
- [21] 李晓明, 崔明, 顾红波. 广西生物质资源状况及利用初探[J]. *河南农业科学*, 2011, 40(4):27-29.
- LI Xiaoming, CUI Ming, GU Hongbo. Biomass resources situation and utilization in Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, 40(4):27-29.
- [22] 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.
- ZHAO Baofeng, XIE Hongzhang, REN Changzai, et al. Application of biomass power plant ash as building materials[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(17):6802-6811.
- [23] ZHANG P, LIAO W Y, KUMAR A, et al. Characterization of sugarcane bagasse ash as a potential supplementary cementitious material: Comparison with coal combustion fly ash[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020:123834.
- [24] 卫煜, 陈平, 明阳, 等. 超细高活性矿物掺合料对UHPC水化和收缩性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(2):461-468.
- WEI Yu, CHEN Ping, MING Yang, et al. Effects of ultrafine and highly active mineral admixtures on hydration and shrinkage properties of UHPC[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(2):461-468.
- [25] 黄柏宗. 紧密堆积理论的微观机理及模型设计[J]. *石油钻探技术*, 2007, 35(1):5-12.
- HUANG Bozong. Microscopic mechanisms and model design of close packing theory[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2007, 35(1):5-12.
- [26] 牛建刚, 边钰, 刘威亨, 等. 高强轻骨料混凝土配合比设计方法及试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(11):3480-3487.
- NIU Jiangang, BIAN Yu, LIU Weiheng, et al. Mix proportion design method and experimental research of high-strength lightweight aggregate concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(11):3480-3487.
- [27] 刘润清, 孙斯慧, 杨元全. 粉煤灰粒径分布对硅酸盐水泥水化性能的影响[J]. *中国粉体技术*, 2017, 23(5):83-86.
- LIU Runqing, SUN Sihui, YANG Yuanquan. Effect of particle size distribution of fly ash on hydration property of silicate cement[J]. *China Powder Science and Technology*, 2017, 23(5):83-86.
- [28] MA J T, WANG D G, ZHAO S B, et al. Influence of particle morphology of ground fly ash on the fluidity and strength of cement paste[J]. *Materials*, 2021, 14(2):283.
- [29] QIAN R S, ZHANG Y S, LIU C, et al. Effects of supplementary cementitious materials on pore-solution chemistry of blended cements[J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2022, 11(6):389-407.
- [30] 李瑶, 刘润清, 齐雯涵, 等. 硅灰粒径分布对混凝土微观结构及其低温抗压强度的影响[J]. *中国粉体技术*, 2019, 25(6):75-80.
- LI Yao, LIU Runqing, QI Wenhan, et al. Effects of particle size distribution of silica fume on pore structure and compressive strength of concrete at low temperature[J]. *China Powder Science and Technology*, 2019, 25(6):75-80.
- [31] 龚建清, 包文进. 复掺稻壳灰/硅灰以及橡胶粉对水泥砂浆性能的影响[J]. *混凝土*, 2020(6):137-142.
- GONG Jianqing, BAO Wenjin. Properties of cement mortar containing rice husk ash/silica fume and rubber powder[J]. *Concrete*, 2020(6):137-142.
- [32] GOVINDARAJAN D, JAYALAKSHMI G. XRD, FTIR and SEM studies on calcined sugarcane bagasse ash blended cement[J]. *Archives of Physics Research*, 2011, 2(4):38-44.
- [33] 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.
- [34] SHAO Q Y, ZHENG K R, ZHOU X J, et al. Enhancement of nano-alumina on long-term strength of Portland cement and the relation to its influences on compositional and microstructural aspects[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 98:39-48.
- [35] DUNA L L, AUDREY N N G, TCHAMBA A B, et al. Engineering and mineralogical properties of Portland cement used for building and road construction in Cameroon[J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2022, 15(4):821-834.
- [36] WANG X P, YU R, SONG Q L, et al. Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 126:105921.
- [37] PAPADAKIS V G, TSIMAS S. Supplementary cementing

- materials in concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002,32(10):1525-1532.
- [38] 谭盐宾,李化建,谢永江,等.烧失量和细度对粉煤灰浆体流变特性的影响[J]. *铁道建筑*,2010,50(2):127-129.
- TAN Yanbin, LI Huajian, XIE Yongjiang, et al. Effect of ignition loss and fineness on rheological properties of fly ash mortar[J]. *Railway Engineering*,2010,50(2):127-129.
- [39] FAN X, LI Z L, ZHANG W Z, et al. Effects of different supplementary cementitious materials on the performance and environment of eco-friendly mortar prepared from waste incineration bottom ash[J]. *Construction and Building Materials*,2022,356:129277.
- [40] LI G L, ZHOU C K, AHMAD W, et al. Fly ash application as supplementary cementitious material: A review[J]. *Materials*,2022,15(7):2664.
- [41] 杨华全,李鹏翔,陈霞.水工混凝土碱-骨料反应研究综述[J]. *长江科学院院报*,2014,31(10):58-62.
- YANG Huaquan, LI Pengxiang, CHEN Xia. The state-of-art of alkali aggregate reaction of hydraulic concrete[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014,31(10):58-62.
- [42] CORDEIRO G, FILHO R T, FAIRBAIRN E. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2009,23(10):3301-3303.
- [43] 李洪涛,李炳熙,徐有宁,等.灼烧方式对稻壳灰形貌特征和成分的影响[J]. *农业机械学报*,2013,44(4):131-136.
- LI Hongtao, LI Bingxi, XU Youning, et al. Effect of calcination method on morphological characteristics and composition of rice husk ash[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4): 131-136.
- [44] 李松阳,刘建坤,陈越,等.秸秆中钾元素对生物质成灰特性的影响研究[J]. *太阳能学报*,2019,40(5):1324-1329.
- LI Songyang, LIU Jiankun, CHEN Yue, et al. Study on effect of kalium element in straw on ash characteristics of biomass[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*,2019,40(5):1324-1329.
- [45] EMBONG R, SHAFIQ N, KUSBIANTORO A, et al. Effectiveness of low-concentration acid and solar drying as pre-treatment features for producing pozzolanic sugarcane bagasse ash[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,112:953-962.
- [46] LI C Y, GENG H B, ZHOU S Y, et al. Experimental study on preparation and performance of concrete with large content of fly ash[J]. *Frontiers in Materials*,2022,8:764820.
- [47] 薛翠真,申爱琴,郭寅川.基于孔结构参数的掺CWCPM混凝土抗压强度预测模型的建立[J]. *材料导报*,2019,33(8):1348-1353.
- XUE Cuizhen, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan. Prediction model for the compressive strength of concrete mixed with CWCPM based on pore structure parameters[J]. *Materials Reports*,2019,33(8):1348-1353.
- [48] 张延年,张祥坤,顾晓薇,等.铁尾矿基多元矿物掺和料耦合水化机理分析[J]. *非金属矿*,2022,45(3):103-106.
- ZHANG Yannian, ZHANG Xiangkun, GU Xiaowei, et al. Coupling hydration mechanism analysis of multicomponent mineral admixtures based on iron tailings[J]. *Non-Metallic Mines*,2022,45(3):103-106.
- [49] AMER A A, EL-HOSEN S. Properties and performance of metakaolin pozzolanic cement pastes[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*,2017,129(1):33-44.
- [50] 李响.复合水泥基材料水化性能与浆体微观结构稳定性[D].北京:清华大学,2010.
- LI Xiang. Hydration performance and microstructural stability of complex cementitious materials[D]. Beijing: Tsinghua University,2010.
- [51] ADNAN K, MUHAMMAD A S, MUHAMMAD T B, et al. Assessment for utilization of tobacco stem ash as a potential supplementary cementitious material in cement-based composites[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022,53:104531.
- [52] 王淑娟,金玉杰.秸秆灰理化特性及作为混凝土掺和料可行性[J]. *非金属矿*,2020,43(2):30-33.
- WANG Shujuan, JIN Yujie. Physical and chemical properties of straw ash and its feasibility as a concrete admixture[J]. *Non-Metallic Mines*,2020,43(2):30-33.
- [53] HASAN N M S, SOBUZ M H R, KHAN M M H, et al. Integration of rice husk ash as supplementary cementitious material in the production of sustainable high-strength concrete[J]. *Materials*,2022,15(22):8171.
- [54] SUN L Y, GONG K. Silicon-based materials from rice husks and their applications[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*,2001,40:5861-5877.
- [55] SPAT R A, SANTOS LIMA GEANNINA TEREZINHA D, LAURA S, et al. Characterization and investigation of the use of oat husk ash as supplementary cementitious material as partial replacement of Portland cement: Analysis of fresh and hardened properties and environmental assessment[J]. *Construction and Building Materials*,2023,363:129762.
- [56] BIE R S, SONG X F, LIU Q Q, et al. Studies on effects of

- burning conditions and rice husk ash (RHA) blending amount on the mechanical behavior of cement[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 55: 162-168.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] RITHUPARNA R, JITTIN V, BAHURUDEEN A. Influence of different processing methods on the recycling potential of agro-waste ashes for sustainable cement production: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316: 128242.
- [60] JUHÁSZ A Z. Aspects of mechanochemical activation in terms of comminution theory[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1998, 141(3): 449-462.
- [61] 魏博, 张一敏, 包申旭. 机械活化提高石煤提钒尾渣活性[J]. *金属矿山*, 2017(2): 188-192.
- WEI Bo, ZHANG Yimin, BAO Shenxu. Vanadium tailing activity increase by mechanical activation[J]. *Metal Mine*, 2017(2): 188-192.
- [62] CORDEIRO G C, TOLEDO FILHO R D, TAVARES L M, et al. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(2): 110-115.
- [63] 姚金环, 黎铨海, 潘柳萍, 等. 机械活化强化矿物浸出过程的研究进展[J]. *现代化工*, 2011, 31(7): 12-15.
- YAO Jinhuan, LI Xuanhai, PAN Liuping, et al. Research progress in mineral leaching enhanced by mechanical activation[J]. *Modern Chemical Industry*, 2011, 31(7): 12-15.
- [64] RÍOS-PARADA V, JIMÉNEZ-QUERO V G, VALDEZ-TAMEZ P L, et al. Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 157: 83-95.
- [65] 赵晖, 孙伟, 高波, 等. 粉煤灰品质对混凝土性能影响研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(3): 484-491.
- ZHAO Hui, SUN Wei, GAO Bo, et al. The effect of fly ash qualify on the properties of concrete[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(3): 484-491.
- [66] 张华, 薛永杰, 石占斌. 研磨对生物质灰粒度和胶凝活性的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2014, 36(9): 22-27.
- ZHANG Hua, XUE Yongjie, SHI Zhanbin. Effect of milling on fineness and cementitious activity of biomass ash[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2014, 36(9): 22-27.
- [67] AHMAD W, AHMAD A, OSTROWSKI K A, et al. Sustainable approach of using sugarcane bagasse ash in cement-based composites: A systematic review[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15: e00698.
- [68] ALIU ADEKUNLE O, OLALUSI OLADIMEJI B, AWOYERA PAUL O, et al. Evaluation of pozzolanic reactivity of maize straw ash as a binder supplement in concrete[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e01790.
- [69] BINICI H, YUCEGOK F, AKSOGAN O, et al. Effect of corncob, wheat straw, and plane leaf ashes as mineral admixtures on concrete durability[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, 20(7): 478-483.
- [70] ZAHEER M M, TABISH M. The durability of concrete made up of sugar cane bagasse ash (SCBA) as a partial replacement of cement: A review[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, 48(4): 4195-4225.
- [71] RAM BABU P V, RAMA RAO G V. Study on sugarcane bagasse ash as a partial replacement of cement in M60 grade concrete exposed to acidic environment[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2017, 4(9): 1-9.
- [72] JITTIN V, BAHURUDEEN A. Evaluation of rheological and durability characteristics of sugarcane bagasse ash and rice husk ash based binary and ternary cementitious system[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 317: 125965.
- [73] GIACCIO G, DE SENSEALE G R, ZERBINO R. Failure mechanism of normal and high-strength concrete with rice-husk ash[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(7): 566-574.
- [74] NAHIDA N, AHMAD B J. Experimental investigation of rice husk ash on compressive strength, carbonation and corrosion resistance of reinforced concrete[J]. *Australian Journal of Civil Engineering*, 2021, 19(2): 155-163.