

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220330001

文章编号: 1672-9331(2023)05-0105-10

引用格式: 高英力, 曹韩硕, 卜涛, 等. 尾矿砂对混杂纤维水泥砂浆性能的影响研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 105-114.

Citation: GAO Yingli, CAO Hanshuo, BO Tao, et al. Study on the effect of tailing sand on the mechanical properties of hybrid fiber reinforced cement mortar [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(5): 105-114.

尾矿砂对混杂纤维水泥砂浆性能的影响研究

高英力¹, 曹韩硕¹, 卜涛¹, 蒋震², 向佳瑜²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中建西部建设湖南有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要:【目的】利用国产聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维、改性聚丙烯(polypropylene, PP)纤维、碳酸钙晶须, 以及用部分尾矿砂替代石英砂, 制备尾矿砂-混杂纤维复合水泥砂浆, 研究该砂浆的力学性能, 探讨尾矿砂的最佳掺量。【方法】通过改变尾矿砂替代石英砂的掺量及级配, 测试复合砂浆的流动度和力学性能, 观察其微观形貌, 进而确定尾矿砂的最佳掺配参数。【结果】尾矿砂掺量(尾矿砂占细集料总质量的百分比)为50%且级配为Ts-150时, 复合砂浆的性能最优, 此时其流动度与对照组相比下降了5.46%, 7、28 d抗压强度分别提高了22.07%和16.86%; 7、28 d抗折强度分别提高了31.36%和24.42%; 7、28 d劈裂抗拉强度分别提高了17.63%和46.84%。电镜扫描结果显示, 尾矿砂-混杂纤维复合水泥砂浆中水化产物与尾矿砂颗粒黏结状态良好。【结论】以尾矿砂替代石英砂作细集料制备混杂纤维水泥基材料具备可行性, 具有十分可观的经济效益与环保效益。

关键词: 砂浆; 尾矿砂; 混杂纤维; 力学性能; 微观形貌

中图分类号: TQ177.6+8

文献标志码: A

0 引言

近年来, 随着矿业资源开采技术的逐渐成熟, 我国采矿业得到了突飞猛进的发展, 但是开采过程中产生的尾矿废料对环境造成了严重的不良影响^[1-2]。尾矿是分选矿石后遗留的固体废弃物, 根据母矿种类的不同, 其中可能含有少量铅、锌及其他重金属元素^[3-4]。尾矿的大量堆存不仅会造成生态环境的污染, 甚至还会通过食物链或渗入地下水等方式影响到生物体的健康^[4-5]。此外, 随着我国采砂相关政策的出台, 天然砂的开采和使用受到了限制, 因此合理使用尾矿砂替代天然砂用作水泥基材料中的细集料受到了国内外学者和工程技术人员关注^[6-8]。

尾矿砂的主要成分为 SiO_2 , 其性质与天然砂的十分相近。不同类型的尾矿砂可以作为不同的

组分替代粗、细集料以及水泥微粉等, 从而制备不同性能的水泥基材料。王辉等^[9]使用铅锌尾矿砂部分替代天然砂制备了不同强度等级的水泥混凝土, 研究结果表明, 掺铅锌尾矿砂混凝土的强度均高于天然砂混凝土的强度, 完全可以将尾矿砂作为建筑用细集料加以使用。范定强等^[10]使用铅锌尾矿砂部分替代水泥制备了一种超高性能混凝土, 研究发现该混凝土不仅可以有效固化尾矿砂中的重金属离子, 而且还可以降低混凝土的制备能耗。唐可等^[11]探究了不同含量的铁尾矿砂对混凝土和易性及力学性能的影响, 研究结果表明, 当铁尾矿砂含量为25%~50%时, 混凝土的和易性与力学性能均有所提升。由此, 以尾矿砂作天然砂替代品或水泥微粉制备水泥基材料已被许多研究人员报道。此外, 考虑到尾矿砂粒径多处于细砂至超细砂粒径范围, 因此将尾矿砂用于替代石英砂制备水泥基材料亦具有可行性。

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-05-26; 接受日期: 2022-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1833127、51978080); 湖南省重点研发计划项目(2021SK2044); 湖南省研究生科研创新项目(CX20200828)

通信作者: 高英力(1977—)(ORCID: 0000-0002-3032-9953), 男, 教授, 主要从事固体工业废弃物综合利用、先进土木工程材料方面的研究。E-mail: yingligao509@126.com

水泥混凝土在其服役过程中易出现开裂等问题,在各类型高性能混凝土中混杂纤维混凝土具有其独特的性能优势^[12-14]。YILDIRM^[15]选用不同数量的粗骨料和不同类型的纤维,制备了一种无收缩开裂的水泥基材料,研究结果表明:混杂纤维的掺入显著降低了材料的干燥收缩应力且有效抑制了收缩裂纹的发展。WANG等^[16]研究了聚乙烯醇(polyvinyl alcohol,PVA)纤维和钢纤维复合增强水泥基材料的应力-应变特性,发现纤维的改性效果随着基体强度的增加愈发明显。夏超凡等^[17]利用碳酸钙晶须制备了钢纤维/PVA混杂纤维水泥基材料,验证了碳酸钙晶须可以有效抑制裂缝的发展并提高材料韧性。

总结上述研究可以发现,混杂纤维混凝土的研究主要集中于纤维的种类和掺量两大参数,鲜有关注其骨料类型对其性能的影响;而尾矿砂粒径与混杂纤维混凝土中常用细骨料——石英砂的粒径相当,因而研究尾矿砂替代石英砂对混杂纤维水泥基材料基本性能的影响是有意义的。因此,本研究选取国产PVA纤维、改性聚丙烯(polypropylene,PP)纤维和碳酸钙晶须制备了一种混杂纤维水泥基材料,利用不同尺度不同功能的纤维从多尺度协同作用于水泥基材料,以有效提高水泥基材料的力学性能,并使用尾矿砂部分替代石英砂,制备出尾矿砂-混杂纤维水泥基材料(tailings sand-blended fiber cementitious material,T-BFCMs),研究不同掺量、级配及粒径范围的尾矿砂对混杂纤维水泥-石英砂砂浆的流动性能、力

学性能及微观结构的影响,并确定尾矿砂的最佳掺配参数,为尾矿砂替代石英砂制备T-BFCMs提供试验参考。

1 材料与试验

1.1 原材料

本试验采用P·O 42.5级普通硅酸盐水泥,I级粉煤灰,比表面积为20~28 m²/g的微硅灰,选用石英砂和尾矿砂(尾矿砂取自湖南郴州某铅锌矿场尾矿库)为细集料,石英砂颗粒较为浑圆,且颗粒相对较大;尾矿砂多为层状或片状颗粒,棱角更加分明。水泥、粉煤灰、硅灰以及尾矿砂的主要化学组成及其质量分数见表1。本试验所选用铅锌尾矿砂含沙量不大于1.0%,主要有害重金属离子为Pb²⁺与Zn²⁺,重金属总质量占比小于0.5%,对水泥砂浆性能影响较小。石英砂主要化学成分为SiO₂,其质量分数为99.3%,含泥量不大于1.0%,孔隙率为43.0%。本试验选用纤维为国产PVA纤维、改性PP纤维及碳酸钙晶须,其基本参数见表2。本试验选用石英砂与尾矿砂的粒径范围为[0,0.400) mm,其中粒径范围为[0,0.150) mm的颗粒筛分数据见表3,尾矿砂与石英砂的扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)图像如图1所示。为了保持纤维的分散性,选用羟乙基纤维素(hydroxyethyl cellulose,HEC)作为分散剂,减水剂选用聚羧酸高性能减水剂。

表1 各原材料主要化学成分及其质量分数

Table 1 The main chemical composition of each raw material and mass ratio %

原材料	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{K}_2\text{O})$
水泥	5.39	23.33	61.35	2.40	2.66	2.82	0.07	0.71
粉煤灰	33.78	52.89	4.28	2.67	2.68	2.92	0.07	0.71
硅灰	1.26	94.98	0.42	0.65	0.79	0.08	1.21	0.61
尾矿砂	16.20	60.70	2.68	0.41	0.93	1.55	2.74	5.62

表2 各种纤维基本参数

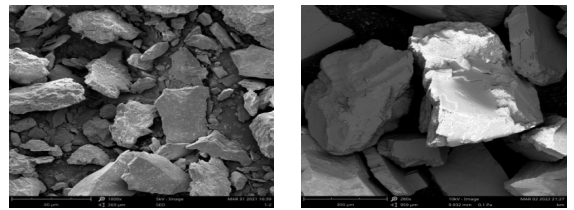
Table 2 Basic parameters of fibers used in this study

纤维种类	长度/mm	直径/ μm	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	拉伸强度/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	断裂伸长率/%
PVA纤维	12	39	1.30	36	1 260	6
PP纤维	20	0.25	0.95	10	760	11~16
碳酸钙晶须	30~40	0.5~1.2	2.80	410~710	3 000~6 000	

表 3 尾矿砂及石英砂筛分试验数据

Table 3 Screening test data of tailing sand and quartz sand

细集料	通过不同筛孔的颗粒质量百分比/%			
	0.150 mm	0.125 mm	0.100 mm	0.075 mm
尾矿砂	100.00	93.66	72.34	36.41
石英砂	100.00	78.63	58.56	32.74



(a) 尾矿砂 SEM 图 (b) 石英砂 SEM 图

图 1 原材料扫描电镜图像

Fig. 1 SEM images of raw materials

1.2 试件制备

根据预试验以及课题组前期发表的研究成果,确定了尾矿砂-混杂纤维水泥砂浆的初步配比,即水胶比为 0.31,胶砂比为 0.36,胶凝材料由水泥、粉煤灰和硅灰三种材料组成,且水泥、粉煤灰、硅灰的质量比为 5:4:1,HEC 质量分数(按胶凝材料计)为 0.5%,减水剂质量分数(按胶凝材料计)为

0.9%,PVA 纤维、PP 纤维、碳酸钙晶须体积分数(按砂浆计)分别为 0.8%、0.8%、0.4%。具体制备流程如图 2 示。

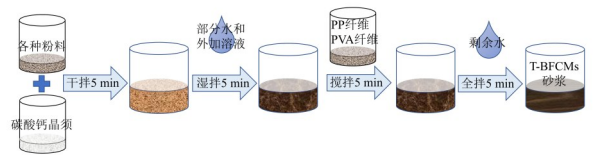


图 2 T-BFCMs 砂浆制备流程

Fig. 2 Preparation process of T-BFCMs mortar

探究尾矿砂级配对 T-BFCMs 的影响时,所选尾矿砂最大筛分粒径分别为 0.400、0.250 和 0.150 mm,分别表示为 Ts-400、Ts-250 和 Ts-150,并以等量尾矿砂替代石英砂;探究尾矿砂粒径对 T-BFCMs 的影响时,所选尾矿砂粒径范围为[0, 0.150) mm(与所选取石英砂的相同),并将颗粒分为小于 0.075 mm、[0.075, 0.100) mm、[0.100, 0.125) mm、[0.125, 0.150) mm 4 种粒径范围,并分别在相同粒径范围内用尾矿砂等量替代石英砂。砂浆的具体配合比见表 4~6,表 4~6 及文中提到的尾矿砂掺量均为其占细集料总质量的百分比。

表 4 不同掺量尾矿砂砂浆配合比

Table 4 Mix proportions of mortars with different dosage of tailing sand

试验组	胶砂比	水胶比	每立方米砂浆中各材料的质量/kg						尾矿砂掺量/%
			胶凝材料	PVA	碳酸钙晶须	PP	石英砂	尾矿砂替代石英砂质量	
0(对照组)	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	358.90	0.00	0.0
A-1	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	269.20	89.70	25.0
A-2	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	179.45	179.45	50.0
A-3	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	89.70	269.20	75.0
A-4	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	0.00	358.90	100.0

表 5 不同级配尾矿砂砂浆配合比

Table 5 Mix proportions of mortars containing tailing sand with different gradation

试验组	尾矿砂级配类型	胶砂比	水胶比	每立方米砂浆中各材料的质量/kg						尾矿砂掺量/%
				胶凝材料/	PVA	碳酸钙晶须	PP	尾矿砂替代石英砂质量	石英砂	
B-1	Ts-150	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	89.7	269.2	25.0
B-2	Ts-250	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	89.7	269.2	25.0
B-3	Ts-400	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	89.7	269.2	25.0
C-1	Ts-150	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	179.5	179.5	50.0
C-2	Ts-250	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	179.5	179.5	50.0
C-3	Ts-400	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	179.5	179.5	50.0
D-1	Ts-150	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	269.2	89.7	75.0
D-2	Ts-250	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	269.2	89.7	75.0
D-3	Ts-400	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	269.2	89.7	75.0

表6 不同粒径范围尾矿砂砂浆配合比

Table 6 Mix proportions of mortars containing tailing sand with different particle size range

试验组	胶砂比	水胶比	每立方米砂浆中各材料的质量/kg				不同粒径范围的石英砂或尾矿砂每立方米的质量/kg			
			胶凝材料	PVA	碳酸钙晶须	PP	[0.125, 0.150) mm	[0.100, 0.125) mm	[0.075, 0.100) mm	小于 0.075 mm
E-1	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	22.76*	76.53	128.96	130.67
E-2	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	22.76	76.53*	128.96	130.67
E-3	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	22.76	76.53	128.96*	130.67
E-4	0.36	0.31	997	10.40	22.88	3.60	22.76	76.53	128.96	130.67*

注:表6中*号表示尾矿砂等量替代石英砂。

1.3 试验方法

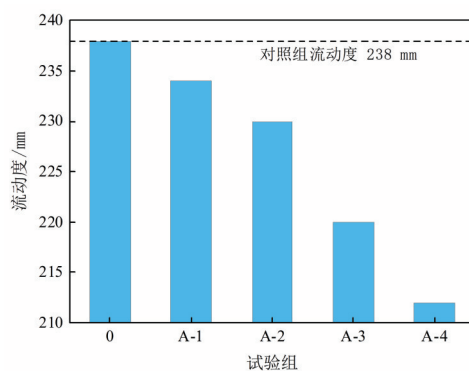
流动度试验参照《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005);抗压强度与抗折强度参照《水泥胶砂强度检测方法(ISO方法)》(GB/T 17671—2020);劈裂抗拉强度参照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020);SEM试验参照《微米级长度的扫描电镜测量方法通则》(GB/T 16594—2008)。

2 试验结果分析

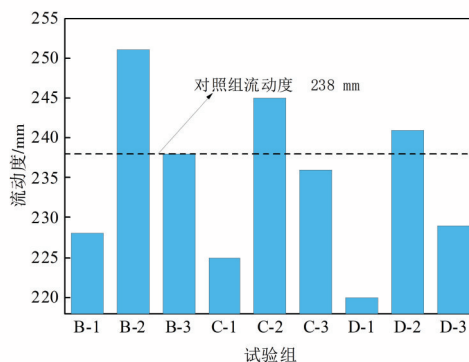
2.1 流动度

对采用不同掺量、级配及粒径范围的尾矿砂制备的T-BFCMs砂浆开展流动度试验,试验结果如图3所示。由图3(a)可知,随着尾矿砂掺量的增加,T-BFCMs流动度呈下降趋势。当尾矿砂掺量为50.0%时,其流动度与对照组的相比只减少了8 mm;掺量增加至75.0%时,流动度降低至220 mm,相比对照组,流动度减少了18 mm。由图3可知,当尾矿砂掺量低于50.0%时,对拌和物流动度的影响在可控范围之内;当尾矿砂掺量大于50.0%时,流动度会大幅度下降。分析其原因为,石英砂多为规则形状的颗粒,而尾矿砂颗粒与石英砂颗粒相比,颗粒棱角更加分明,多为层状或片状结构,当使用少量尾矿砂取代石英砂时,尾矿砂虽有棱角,但整体存在比例低且细度较低,对砂浆流动度整体影响不大;而随着尾矿砂掺量的增加,颗粒棱角分明的尾矿砂会在浆体流动过程中起阻碍作用,增大了颗粒间的摩擦咬合力,影响颗粒间的相对移动,导致砂浆流动度下降,这与文献[18]中的结论相类似。

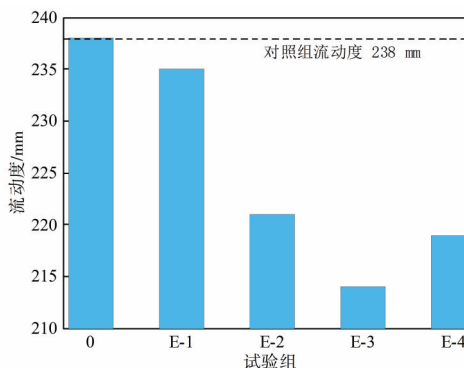
由图3(b)可知,当尾矿砂掺量保持不变时,拌和物的流动度随着尾矿砂粒径的增大呈先增大后



(a) 不同尾矿砂掺量



(b) 不同尾矿砂级配



(c) 不同尾矿砂粒径范围

图3 不同影响因素下的砂浆流动度

Fig. 3 Mortar flow with different influencing factors

减小的变化趋势。尾矿砂掺量为50.0%,级配为Ts-250的C-2试验组的流动度为245 mm,与对照组相比,流动度增加了7 mm;级配为Ts-150的C-1试验组流动度为225 mm,比对照组的下降了13 mm;级配为Ts-400的C-3试验组流动度为236 mm,比对照组的下降了2 mm。分析其原因为,尾矿砂的比表面积与颗粒粗细程度有着密切的关系,颗粒越细,比表面积越大,吸附自由水数量越多,导致拌和物的流动度下降^[5]。而当颗粒尺寸增大时,颗粒与纤维之间会发生团聚现象,形成的絮凝结构流动度较差,从而使得砂浆整体流动度降低。此外,B-2、C-2、D-2试验组的流动度与对照组的相比均有明显的优化提升,此时砂浆内尾矿砂级配良好,细颗粒与较大颗粒尾矿砂相互交错,在浆体内部提供润滑作用,增加浆体流动度。

由图3(c)可知,使用等量尾矿砂替代相同粒径范围的石英砂时,以0.075 mm为集料粒径替代的临界点。当替代粒径小于0.075 mm时,砂浆流动度随着尾矿砂粒径的减小而增大;当替代粒径大于0.075 mm时,砂浆流动度随着尾矿砂粒径的减小而减小。分析其原因为,颗粒粒径越大,颗粒棱角之间的阻碍作用越明显,对材料工作性能影响就越大,但是,由于E-1试验组中尾矿砂掺量极低,仅为6.3%,因而影响较小。随着尾矿砂掺量的增加及颗粒粒径的减小,细小颗粒之间分子引力、静电引力增大,更加容易相互吸附成团,黏附性增大,导致拌和物的流动度降低^[19]。当颗粒粒径小于0.075 mm时,棱角阻碍作用不明显,E-4试验组的流动度又有所上升。

2.2 抗压强度与抗折强度

本研究对采用不同掺量、级配以及粒径范围的尾矿砂制备的T-BFCMs砂浆进行抗压强度与抗折强度测试,并通过折压比来评价砂浆韧性。采用不同掺量、级配与粒径范围的尾矿砂制备的T-BFCMs砂浆在不同养护龄期时的强度及折压比如图4~6所示。

由图4可知,随着尾矿砂掺量的增加,砂浆的抗压强度、抗折强度与折压比均呈先增大后减小的变化趋势,且其抗压强度、抗折强度与折压比均比对照组的更优。由此可知,虽然适量尾矿砂的掺入可以增强砂浆的各项力学指标,但当其掺量过大时,砂浆整体强度增长幅度不明显,甚至会出现强度随掺量增加而降低的现象。当尾矿砂掺量

为50%时,试件的基本力学强度达到最大值,该掺量为最佳掺量。分析其原因为,与石英砂相比,尾矿砂的细度更小,其在拌和物成型过程中起到“微集料填充”效应,使拌和物结构更加致密;此外,其粗糙的表面纹理与颗粒棱角增强了水泥-骨料界面黏结强度,进而提高了砂浆的整体力学性能^[11]。但随着其掺量的增加,作为细集料的尾矿砂增多,此时尾矿砂取代石英砂带来的正效应小于石英砂减少产生的负效应,导致试件强度下降。

由图5可以看出,当尾矿砂掺量不变时,在不同尾矿砂级配条件下,随着所选取尾矿砂粒径的增大,砂浆的抗压强度与抗折强度均降低。当尾矿砂掺量为50.0%,级配为Ts-150时,即C-1试验组的7、28 d抗压强度分别为34.40和53.16 MPa;7、28 d抗折强度分别为13.78和17.12 MPa。相比对照组,C-1试验组的7、28 d抗压强度分别提高了22.07%和16.86%;7、28 d抗折强度分别提高了31.36%和24.42%。分析其原因为,尾矿砂化学性质较稳定,在浆体结构中主要作为惰性材料填充,且由于T-BFCMs中含有三种不同尺寸的纤维,且纤维的掺量较大,在Ts-150级配条件下,细小颗粒占据主体部分,此时,纤维间距大于颗粒粒径,纤维分散性较好,使得细颗粒充分填充浆体内部空隙,增加了砂浆的密实度,因此其强度得以提升;而在Ts-400级配条件下,粗颗粒含量占比较大,此时颗粒粒径大于纤维间隙,影响了纤维的分散性,部分纤维间发生团聚现象,同时大颗粒含量较多时,缺乏填充内部空隙的小颗粒,导致砂浆强度降低^[20]。因此,相比于Ts-250与Ts-400级配组,Ts-150级配组的砂浆力学强度更为优异。

由图6可以看出,在Ts-150级配条件下,尾矿砂等量替代部分石英砂,在初始阶段,随着替代粒径的减小,砂浆的力学性能整体变化不大,提高幅度也不明显,但当选择粒径范围为小于0.075 mm的尾矿砂等量替代石英砂时,砂浆的抗压强度与抗折强度与对照组相比提升较显著,如E-4组28 d抗压强度、抗折强度分别为49.66和14.89 MPa,与对照组相比,分别提升了9.17%和8.22%。分析其原因:选取大比例的细小颗粒的尾矿砂替代石英砂时,大量未水化的活性粉末在浆体早期强度发展中起到“微集料填充”效应,活性粉末的二次水化与细颗粒相互交错填充浆体内部空隙,使得浆体结构更加密实,强度有所提升。

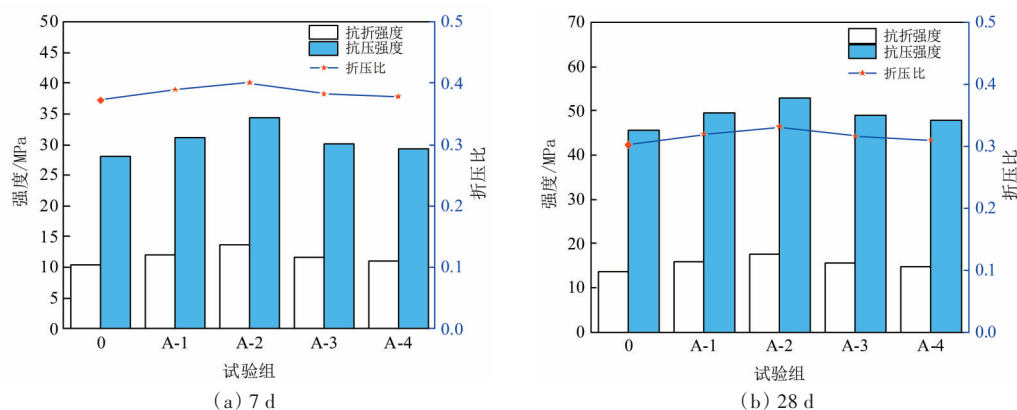


图4 不同尾矿砂掺量下T-BFCMs砂浆的抗折强度、抗压强度与折压比

Fig. 4 Flexural strength, compressive strength, and flexural-compressive strength ratio of T-BFCMs mortar with different tailing sand content

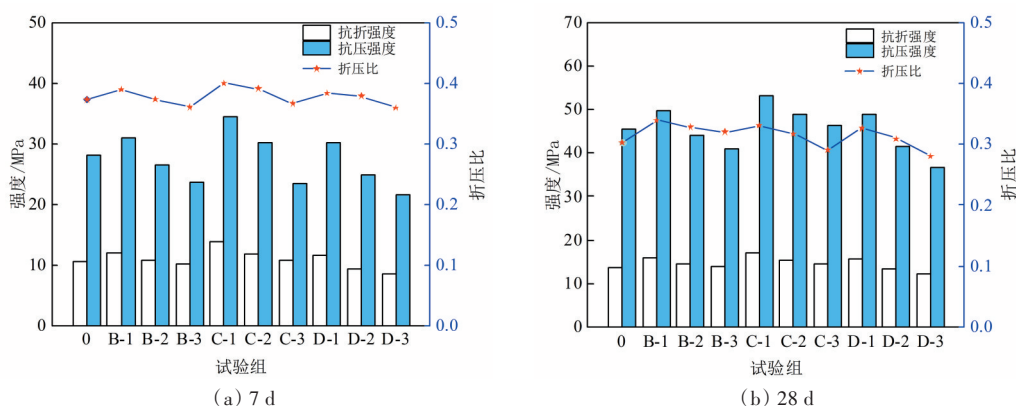


图5 不同尾矿砂级配下T-BFCMs砂浆的抗折强度、抗压强度与折压比

Fig. 5 Flexural strength, compressive strength, and flexural-compressive strength ratio of T-BFCMs mortar with different tailing sand gradations

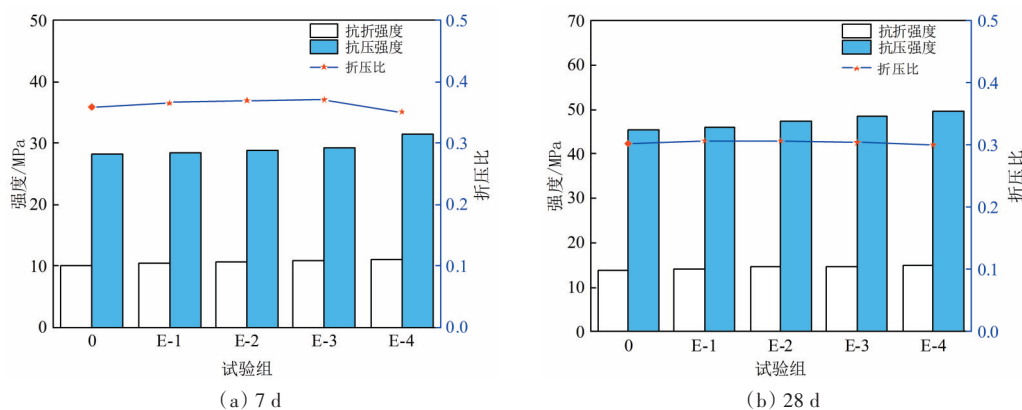


图6 不同尾矿砂粒径范围内T-BFCMs砂浆的抗折强度、抗压强度与折压比

Fig. 6 Flexural strength, compressive strength, and flexural-compressive strength ratio of T-BFCMs mortar with different particle size ranges of tailing sand

2.3 劈裂抗拉强度

对采用不同掺量、级配和粒径范围的尾矿砂制备的砂浆立方体试件养护7、28 d,并进行劈裂抗拉强度测试,结果如图7所示。由图7(a)可知,尾矿砂的掺入可有效提高砂浆的劈裂抗拉强度。

随着其掺量的增加,砂浆的劈裂抗拉强度呈先增加后降低的变化趋势,尾矿砂掺量为50.0%的A-2试验组的7、28 d劈裂抗拉强度分别为3.97和5.86 MPa,与对照组的3.46和4.12 MPa相比,分别提升了14.74%和42.23%。不难发现,当尾矿砂掺量为

50%时,砂浆的劈裂抗拉强度最高,这与抗压强度和抗折强度的变化趋势一致。分析其原因为,纤维在整体结构中起到了连接作用,随机分布的纤维可以在砂浆内部形成三维网状结构,当选用合适掺量的尾矿砂替代石英砂时,细颗粒含量增加,能够更充分地填充纤维间空隙,抑制水泥中裂隙的发展,进而提高了砂浆的劈裂抗拉强度。

由图7(b)可以看出,对于不同级配的尾矿砂,当尾矿砂掺量保持不变时,随着尾矿砂粒径的增大,砂浆的劈裂抗拉强度逐渐降低。当尾矿

砂掺量为50.0%时,级配为Ts-150试验组的7、28 d劈裂抗拉强度分别为4.07和6.05 MPa,与对照组相比,其分别提高了17.63%和46.84%,提升最为明显。分析其原因为,随着尾矿砂粒径的增大,砂浆内部缺乏细颗粒填充,导致其强度降低。另外,砂浆劈裂抗拉强度在前期发展较慢,但到后期集料与纤维间的填充使得砂浆的劈裂抗拉强度提升更快。这表明尾矿砂替代石英砂可以有效提高混杂纤维砂浆的劈裂抗拉强度。

由图7(c)可以看出,使用不同粒径范围的尾矿砂等量替代石英砂时,砂浆劈裂抗拉强度并没有发生明显的变化,这与抗压强度和抗折强度的变化趋势整体相似。这也进一步证明了选用相同粒径范围的尾矿砂替代石英砂不会对砂浆强度产生明显影响。

2.4 微观结构分析

使用尾矿砂作为细集料填充于T-BFCMs砂浆中时,尾矿砂中含有的具有活性的细粉(如 SiO_2 等)会进行二次水化反应,在界面处生成C-S-H凝胶,而大量未反应的尾矿砂可在水泥砂浆的早期强度发展时起到“微集料填充”效应,使得骨料-水泥浆界面过渡区黏结更加紧密,减少了蓬松状结构的产生,因此在一定程度上提高了砂浆的力学强度。图8显示了A-2、C-1与C-2试验组试件在不同分辨率下的内部孔隙、纤维与界面的黏结情况。通过图8(a)、8(b)可以看出,试件中生成的各种水化产物与未反应的尾矿砂紧密黏结在一起,尾矿砂的棱角表面及高吸水率特性会使材料内部的孔隙吸收更多的水分并减缓水分的释放,使其结构更加致密^[5];此外,各水化产物很好地将尾矿砂覆盖,优化了级配,使得集料与水化产物/纤维之间能更好地包裹在一起,使得砂浆具备了良好的力学性能。此外,尾矿砂及纤维四周存在大量针棒状的钙矾石晶体AFt以及C-S-H凝胶,碳酸钙晶须、AFt以及C-S-H凝胶交织在一起形成网状结构,形成更多的成核点,使T-BFCMs砂浆结构更加密实。

从图8(c)、(d)可以看出,C-2试验组材料内部出现了纤维材料拔出脱黏现象,推测其原因可能为,当浆体中的尾矿砂较多时,尾矿砂与水化产物相比其尺寸较大;当所选替代的尾矿砂粒径较大

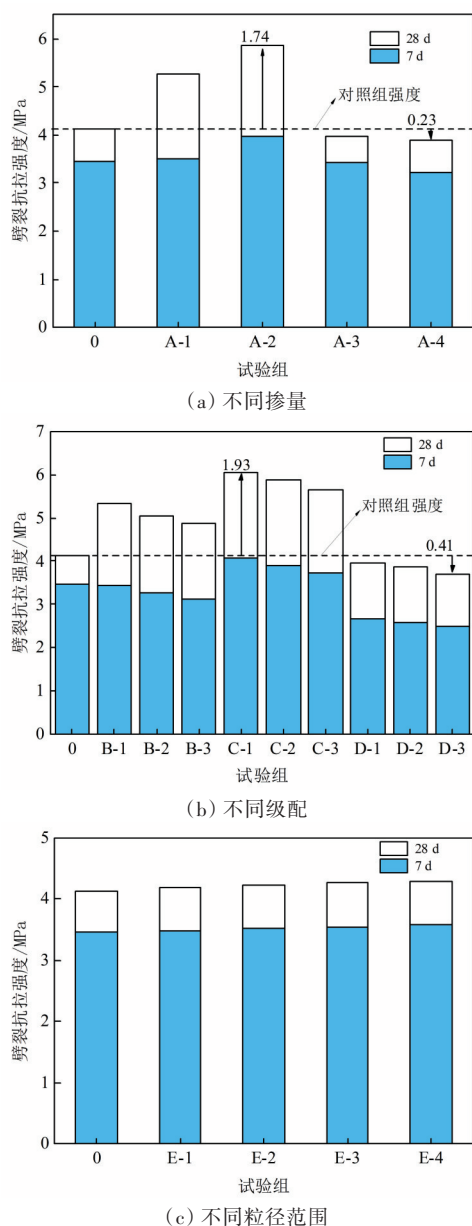


图7 不同尾矿砂掺量、级配与粒径范围下T-BFCMs砂浆的劈裂抗拉强度

Fig. 7 The splitting tensile strength of T-BFCMs mortar with different tailing sand content, gradations and particle size ranges

时,尾矿砂对纤维的桥接能力产生一定的影响,这与力学性能分析时提到的当尾矿砂颗粒粒径增大时,会影响纤维的分散性,致使材料强度降低的现象是一致的。因此,选用合适的尾矿砂掺量与级配至关重要。

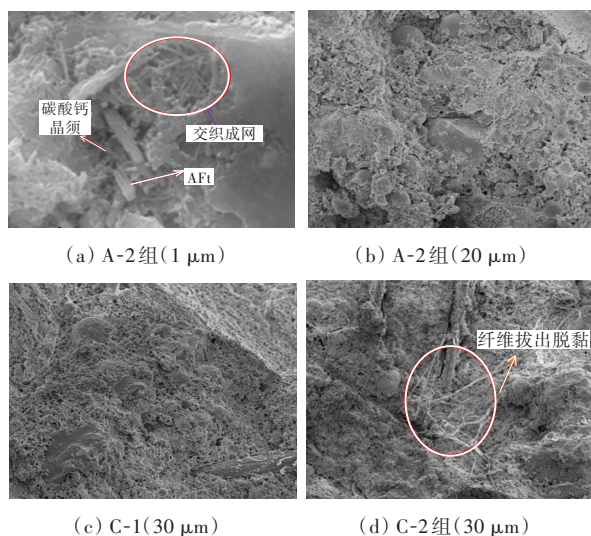


图8 T-BFCMs扫描电镜图

Fig. 8 SEM images of T-BFCMs mortar

3 结论

本研究选用国产PVA纤维、改性PP纤维和碳酸钙晶须制备T-BFCMs砂浆,并以尾矿砂等量替代部分石英砂作细集料,探究了尾矿砂的最佳掺配参数。具体结论如下:

1) 使用尾矿砂替代石英砂制备T-BFCMs砂浆时,T-BFCMs砂浆流动度随尾矿砂掺量的增加而下降,随尾矿砂粒径的增大呈先上升后下降的趋势。当以尾矿砂等量替代相同粒径范围内的石英砂时,砂浆的流动度随尾矿砂粒径的减小先降低后增加。

2) 尾矿砂能明显改善混杂纤维复合砂浆的力学性能。随着尾矿砂掺量的增加砂浆的抗压强度、抗折强度与劈裂抗拉强度均呈先增加后降低的变化趋势。其中,尾矿砂粒径对砂浆强度的影响最为明显,所选尾矿砂粒径越小,砂浆抗压强度与抗折强度越高,这是因为细小的尾矿砂颗粒可带来显著的“微集料填充”效应。

3) 综合流动度、力学性能及劈裂抗拉强度等指标的测试结果,T-BFCMs砂浆中尾矿砂的最佳

掺量为50%,最优粒径范围为 $[0, 0.150)$ mm,此时砂浆的流动度与对照组的相差不大,且各项强度指标均有明显提升。

[参考文献]

- [1] 高文谦, 高新文. 某区域铜冶炼渣再选尾矿污染现状及治理[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(11): 70-74. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2014.11.018.
GAO Wenqian, GAO Xinwen. Study of pollution status and treatment of re-election tailings from copper smelting slag [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2014(11): 70-74. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2014.11.018.
- [2] 梁雅雅, 易筱筠, 党志, 等. 铅锌尾矿库对周围环境重金属污染风险评价指标的建立及方法[J]. 生态学报, 2018, 37(6): 1772-1780. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201806.040.
LIANG Yaya, YI Xiaoyun, DANG Zhi, et al. Methods and indices for risk assessment of heavy metal pollution surrounding Pb-Zn tailing ponds[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1772-1780. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201806.040.
- [3] 朱建平, 乐红志, 朱俊阁, 等. 黄金尾矿材料及环境属性研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(10): 3457-3463. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2021.10.026.
ZHU Jianping, YUE Hongzhi, ZHU Junge, et al. Research on material and environmental properties of gold tailings [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(10): 3457-3463. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2021.10.026.
- [4] 韩先瑞, 张宝虎, 余天航, 等. 铁尾矿沥青混合料水稳定性试验研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 6-10. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.02.002.
HAN Xianrui, ZHANG Baohu, YU Tianhang, et al. Experimental study on the moisture stability of the asphalt mixture with iron tailings [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 6-10. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.02.002.
- [5] 申艳军, 白志鹏, 郝建帅, 等. 尾矿制备混凝土研究进展与利用现状分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 845-857, 876. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20210119.003.
SHEN Yanjun, BAI Zhipeng, HAO Jianshuai, et al. Research progress and utilization status analysis of concrete prepared by tailings [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(3): 845-857, 876. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20210119.003.

- 1625.20210119.003.
- [6] 吕兴栋,刘战鳌,朱志刚,等.尾矿作为水泥和混凝土原材料综合利用研究进展[J].材料导报,2018,32(sup 2): 452-456.
LYU Xingdong, LIU Zhan'ao, ZHU Zhigang, et al. Study of the progress of tailings comprehensive utilization of raw materials in cement and concrete [J]. Materials Reports, 2018, 32(sup 2): 452-456.
- [7] 丁浩珉.循环压缩作用下铁尾矿砂混凝土变形破坏研究[J/OL].长江科学院院报,2023: 1-8. (2023-06-26)[2023-09-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20230626.1419.008.html>.
DING Haomin. Study on deformation and failure of iron tailings sand concrete under cyclic compression [J/OL]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023: 1-8. (2023-06-26) [2023-09-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20230626.1419.008.html>.
- [8] 鲍文博,付云鹏.尾矿砂水泥基复合材料的拉压韧性[J].沈阳工业大学学报,2022,44(5): 584-589. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2022.05.18.
BAO Wenbo, FU Yunpeng. Tensile and compressive toughness of tailing sand-cement based composites [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2022, 44 (5) : 584-589. DOI: 10.7688/j. issn. 1000-1646.2022.05.18.
- [9] 王辉,吴爱军,刘文,等.铅锌尾矿砂对不同强度等级混凝土影响分析[J].混凝土与水泥制品,2018(11): 30-33. DOI: 10.19761/j. 1000-4637.2018.11.007.
WANG Hui, WU Aijun, LIU Wen, et al. Analysis on effects of lead-zinc tailings sand on different strength grades of concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2018(11): 30-33. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2018.11.007.
- [10] 范定强,水中和,余睿,等.铅锌尾矿回收制备环保型超高性能混凝土研究[J].硅酸盐通报,2018,37(7): 2231-2236. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.2018.07.027.
FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, YU Rui, et al. Preparation of eco-friendly ultra-high performance concrete by lead-zinc tailings [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(7): 2231-2236. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2018.07.027.
- [11] 唐可,毛雪松,徐旺,等.掺铁尾矿砂细集料的水泥混凝土性能分析[J].工业建筑,2019,49(8): 153-157. DOI: 10.13204/j.gyjz201908025.
TANG Ke, MAO Xuesong, XU Wang, et al. Performance analysis of cement concrete with iron tailings sand as fine aggregate [J]. Industrial Construction, 2019, 49(8): 153-157. DOI: 10.13204/j.gyjz201908025.
- [12] 丛卓红,陈恒达,郑南翔,等.水泥混凝土路面纹理的研究进展[J].材料导报,2020,34(9): 9110-9116. DOI: 10.11896/cldb.19010079.
CONG Zhuohong, CHEN Hengda, ZHENG Nanxiang, et al. Surface texture of cement concrete pavement: a review [J]. Materials Review, 2020, 34 (9) : 9110-9116. DOI: 10.11896/cldb.19010079.
- [13] 梁志成.钢纤维增强砼力学及耐久性能研究[J].公路与汽运,2020(3): 81-85, 96.
LIANG Zhicheng. Study on mechanics and durability of steel fiber reinforced concrete [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(3): 81-85, 96.
- [14] 邹艳胜.掺量及分层布设对钢纤维混凝土力学性能的影响研究[J].湖南交通科技,2021,47(1): 52-55. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2021.01.013.
ZOU Yansheng. Study on the influence of mixing amount and layered arrangement on the mechanical properties of steel fiber reinforced concrete [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2021, 47 (1) : 52-55. DOI: 10.3969/j. issn. 1008-844X. 2021.01.013.
- [15] YILDIRIM G. Dimensional stability of deflection-hardening hybrid fiber reinforced concretes with coarse aggregate: suppressing restrained shrinkage cracking [J]. Structural Concrete, 2019, 20 (2) : 836-850. DOI: 10.1002/suco.201800096.
- [16] WANG Z B, ZUO J P, ZHANG X Y, et al. Stress-strain behaviour of hybrid-fibre engineered cementitious composite in compression [J]. Advances in Cement Research, 2020, 32 (2) : 53-65. DOI: 10.1680/jadcr.18.00072.
- [17] 夏超凡,李志华,张聪.碳酸钙晶须对混杂纤维增强高延性水泥基复合材料力学性能的影响[J].功能材料,2020,51(1): 1120-1125. DOI: 10.3969/j. issn.1001-9731.2020.01.020.
XIA Chaofan, LI Zhihua, ZHANG Cong. Effect of calcium carbonate whisker on mechanical properties of hybrid fiber reinforced high ductility cementitious composites [J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51 (1) : 1120-1125. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-9731.2020.01.020.
- [18] 王营,顾晓薇,张延年,等.铁尾矿砂水泥砂浆抗压强度及微观结构分析[J].金属矿山,2022(1): 60-64. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202201008.
WANG Ying, GU Xiaowei, ZHANG Yannian, et al. Analysis of compressive strength and microstructure of iron tailings sand cement mortar [J]. Metal Mine, 2022 (1) : 60-64. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202201008.
- [19] 张丽辉,郭丽萍,孙伟,等.高延性水泥基复合材料的流变特性和纤维分散性[J].东南大学学报(自然

科学版), 2014, 44(5): 1037-1040. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2014.05.028.

ZHANG Lihui, GUO Liping, SUN Wei, et al. Rheological property and fiber dispersion of high ductility cementitious composites [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44 (5) : 1037-1040. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-0505.2014.05.028.

[20] 刘竞怡, 孙志华, 温久然, 等. 金尾矿砂作为混凝土集料的物化性质及其改性试验[J]. 金属矿山, 2021 (5): 211-220. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202105029.

LIU Jingyi, SUN Zhihua, WEN Jiuran, et al. Physical and chemical properties of gold tailing sand as concrete aggregate and its modification test [J]. Metal Mine, 2021 (5) : 211-220. DOI: 10.19614/j. cnki. jsks.202105029.

Study on the effect of tailing sand on the mechanical properties of hybrid fiber reinforced cement mortar

GAO Yingli¹, CAO Hanshuo¹, BO Tao¹, JIANG Zhen², XIANG Jiayu²

(1.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. China West Construction Hunan Group Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: [Purposes] Hybrid fiber reinforced cement mortar was prepared using domestically produced PVA fibers, modified PP fibers, calcium carbonate whiskers, and tailings sand as a partial substitute to quartz sand, to study the mechanical properties of the mortar and to explore the optimum mixing amount of tailings sand. [Methods] The workability and mechanical properties of the mortar were tested by changing the dosage and gradation of tailings sand, and the micro-morphology was observed to determine the optimal dosage parameters of tailings sand. [Findings] When the optimum dosage of tailings sand is 50% and the gradation range is Ts-150, the mortar shows the optimal performances: When compared with the control sample, the fluidity decreased by 5.46% , and the 7 d and 28 d compressive strength increased by 22.07% and 16.86%, respectively; the 7 d and 28 d flexural strength increased by 31.36% and 24.42%, respectively; and the 7 d and 28 d cleavage tensile strength increased by 17.63% and 46.84%, respectively. 17.63% and 46.84% respectively. Scanning electron microscope test results show that the hydration products and tailing sand particles are well bonded in the cement mortar. [Conclusions] Results of this study indicate that it is feasible to produce hybrid fiber reinforced cement mortars with tailing sand as a replacement of quartz sand, which can lead to considerable economic and environmental benefits.

Key words: mortar; tailing sand; hybrid fiber; mechanical property; microscopic performance

Manuscript received: 2022-03-30; **revised:** 2022-05-26; **accepted:** 2022-06-09

Foundation item: Projects (U1833127, 51978080) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2021SK2044) supported by the Key Research and Development Program of Hunan Province; Project (CX20200828) supported by Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate

Corresponding author: GAO Yingli (1977—) (ORCID: 0000-0002-3032-9953), male, professor, research interest: solid wastes integrated utilization and advanced civil engineering materials. E-mail:yingligao509@126.com

(责任编辑:刘平;校对:赵冰;英文编辑:李岳林)