

工程弃土复配及再生砖性能试验

沈剑羽¹, 肖建庄¹, 高琦^{1,2}, 王浩通²

(1.同济大学土木工程学院建筑工程系,上海 200092;2.许昌金科资源再生股份有限公司,河南 许昌 461000)

摘要:为处理日益增多的工程弃土,研究了不同来源工程弃土及其复配土作为再生烧结砖原料的可行性,测试了工程弃土的颗粒级配、化学组成、矿物组成、液限、塑限和塑性指数,再生砖的挤出成型、干燥和烧结结果,再生砖的密度、24h吸水率、抗压和抗折强度,使用SEM观察了再生砖的微观形貌.发现仅少数几种工程弃土可直接制备再生砖,但通过合理的复配可以将工程弃土的再利用率提升至100%.复配可调整弃土的颗粒组成和矿物组成,黏土矿物含量提高,复配土的可塑性提高,越容易挤出成型,但也易在干燥中开裂.黏土矿物含量大的工程弃土在烧结时产生较多的低共熔物,导致再生砖的孔隙率减小,密度和抗压、抗折强度增大,合理的复配可提高再生砖的抗压强度,增幅可达26.7%.最后提出利用工程弃土制备再生砖的快速识别并复配的方法,通过测试工程弃土的液限和塑性指数,或者颗粒级配和黏土矿物组成,快速识别未知工程弃土制备再生砖的可行性,并计算可行的复配配方.

关键词:工程弃土;复配土;再生砖;挤出成型;干燥;烧结;黏土矿物;快速识别

工程弃土(Construction Spoil,CS)是指在各种建设工程中产生的弃土^[1].随着我国基础设施建设的推进,每年弃土排放量可超过 $30\times 10^8\text{t}$,其中约60%为新建建筑弃土^[2].工程弃土若不妥善处理,则会造成环境污染、生态破坏,甚至引发工程事故^[3].弃土常见的处理方式除填埋、路基工程、堆山造景^[4]外,还可以用于制砖.普通黏土烧结砖曾广泛应用于城乡建设中,过去制砖的材料主要为黏土.将工程弃土用于再生烧结砖(以下简称再生砖)制备,既可以处理工程弃土问题,也可以为制砖提供原材料^[1],彻底改变破坏耕地的状况.

新建建筑工程弃土主要为地表土壤,我国各区域土壤成分大同小异^[5],而建筑废料的矿物成分主要为石英和硅酸盐物质^[6],与土壤相似.淤泥与黏土的成分相差不大^[7],可以制砖^[8],污泥不仅可以制砖^[9-11],还可以固定有害成分^[12-13].此外在制砖时添加农业固废,可以提供内燃料,并制造孔洞,改善砖的热性能.如锯末^[14]、麦秸^[15]、木屑^[16]或植物灰分^[17-18].但是工程弃土的来源具有不确定性,造成其成分具有复杂性,而复配土是改善土壤性质的一种基本且有效的方法^[19],因此在利用工程弃土制砖时,首先面临筛选的问题和复配的问题.但是,如何选择工程弃土的复配方案与方法,目前暂无相关报道.

收稿日期:2021-10-25;修订日期:2022-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52078358);科技部“十四五”重点研发项目(2022YFC38034)

作者简介:沈剑羽(1995—),男,博士研究生.E-mail:jianyu_shen@tongji.edu.cn

通信作者:肖建庄(1968—),男,教授.E-mail:jzx@tongji.edu.cn

1 试验设计

1.1 工程弃土基本性能试验

试验选择 4 种来自不同的新建建筑工程的工程弃土,分别命名为 CS-A、CS-B、CS-C、CS-D.将取得的工程弃土烘干并破碎,得到干燥的弃土粉末,如图 1 所示.

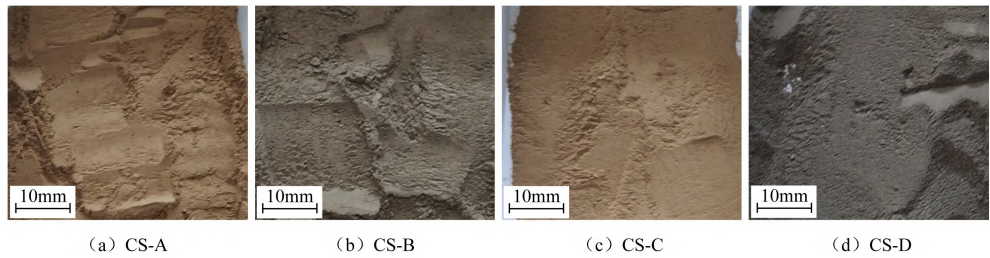


图 1 工程弃土干燥粉末
Fig.1 Dry powder of construction spoil

为简化分析,复配设计一律使用两种不同的工程弃土,因此将这 4 种工程弃土按照一定的组合方式以及一定的质量比例相互混合,得到了 10 种复配工程弃土(Compound Construction Spoil,CCS),所有试样的配方展示在表 1 的左侧.依据规范^[20]使用液塑限联合测试法测试了所有土样的塑限、液限和塑性指数,结果见表 1 的右侧.

$$d^* = \int_0^{100} d(X) \times d_X$$

(1)

表 1 试验组配方设计与界限含水率结果

Table 1 Formulation design and boundary moisture content result

试样编号	质量占比/%				塑限	液限	塑性指数	加水量
	CS-A	CS-B	CS-C	CS-D	$w_p/\%$	$w_L/\%$	I_p	$w/\%$
CS-A	100	0	0	0	17.6	30.4	12.8	19.6
CS-B	0	100	0	0	18.6	37.2	18.7	20.6
CS-C	0	0	100	0	14.8	30.5	15.7	16.8
CS-D	0	0	0	100	24.7	58.7	34.0	26.7
CCS-A5B5	50	50	0	0	17.6	38.6	21.0	19.6
CCS-A5C5	50	0	50	0	16.8	25.0	8.2	18.8
CCS-A5D5	50	0	0	50	17.9	34.6	16.7	19.9
CCS-B5C5	0	50	50	0	18.8	35.4	16.6	20.8
CCS-B5D5	0	50	0	50	16.8	51.1	34.3	18.8
CCS-C5D5	0	0	50	50	17.6	35.9	18.3	19.6
CCS-A9D1	90	0	0	10	15.3	28.5	13.2	17.3
CCS-A7D3	70	0	0	30	17.1	33.9	16.8	19.1
CCS-A3D7	30	0	0	70	21.2	45.4	24.2	23.2
CCS-A1D9	10	0	0	90	22.4	54.6	32.2	24.4

工程弃土的颗粒较细,以粉土与黏土为主,因此联合使用了筛分法与密度计法测试了 4 种初始的工程弃土的颗粒级配,通过级配曲线可以得到这 4 种工程弃土的砂粒($d >$

0.075mm)、粉粒($0.005\text{mm}<d\leqslant 0.075\text{mm}$)和黏粒($d\leqslant 0.005\text{mm}$)的占比,图 2(a)和(b)所示分别为工程弃土的颗粒级配曲线(a)和颗粒组成(b)情况.

每一种弃土的颗粒级配曲线与纵轴和直线 $X=100\%$ 围成的面积即该种工程弃土的平均颗粒粒径,可通过式(1)计算得到,式中, d^* 为平均粒径, X 为小于某粒径的质量占比, $d(X)$ 为质量占比为 X 时对应的颗粒粒径,结果如表 2 所示,通过平均粒径可以直观地表征某种工程弃土颗粒的粗细程度.

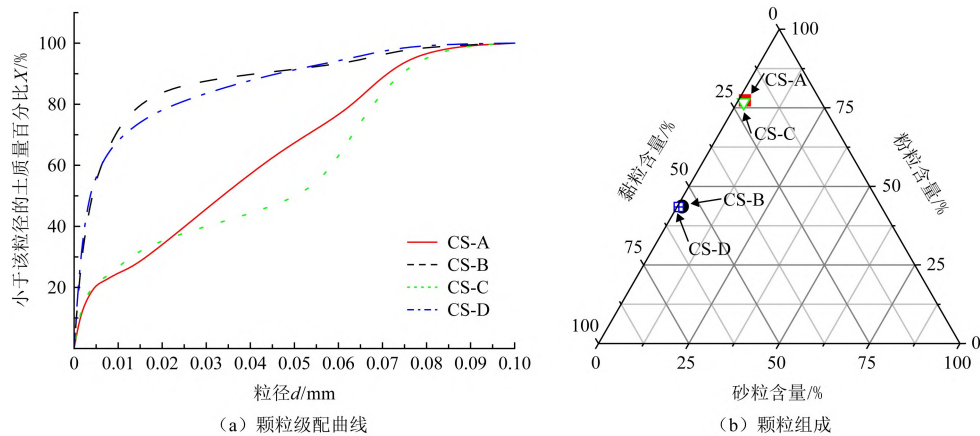


图 2 工程弃土颗粒级配曲线和颗粒组成

Fig.2 Particle grading curve and particle composition of construction spoil

表 2 工程弃土颗粒组成及平均粒径

Table 2 Particle composition and average particle size of construction spoil

土样	砂粒含量/ $d>0.075\text{mm}$	粉粒含量/ $0.005\text{mm}<d\leqslant 0.075\text{mm}$	黏粒含量/ $d\leqslant 0.005\text{mm}$	平均粒径 d^*/mm
CS-A	1.8	77.4	20.8	0.0350
CS-B	1.3	43.6	55.1	0.0121
CS-C	1.8	76.7	21.5	0.0402
CS-D	0.5	43.5	56.0	0.0131

使用 X-射线荧光光谱分析(XRF)测试了这 4 种工程弃土的化学成分,结果如表 3 所示.使用 X-射线衍射(XRD)测试了工程弃土的图谱,并基于 Rietveld 方法对图谱进行定量分析,表 4 列出了这 4 种工程弃土的矿物组成.

表 3 工程弃土的化学成分(氧化物)

Table 3 Chemical composition (oxide) of construction spoil

wt/ $\%$	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	MgO	Na_2O	SO_3	TiO_2	P_2O_5	Other
CS-A	64.96	17.09	6.65	3.92	2.66	1.58	1.28	0.05	1.23	0.18	0.40
CS-B	49.94	20.39	9.99	3.95	10.92	2.34	0.68	0.15	1.20	0.13	0.31
CS-C	60.60	17.00	7.34	3.83	6.60	1.84	1.04	0.06	1.18	0.16	0.35
CS-D	55.62	21.33	10.60	3.83	3.62	2.61	0.65	0.05	1.19	0.17	0.33

表 4 工程弃土的矿物组成
Table 4 Mineral composition of construction spoil

wt/%	方解石	石英	白云母	绿泥石	伊利石	钠长石	微斜长石	堇青石	正长石	蒙脱石
CS-A	/	41.03	5.75	3.63	/	23.19	4.25	0.91	5.00	16.23
CS-B	10.25	21.88	11.55	6.55	6.33	13.54	2.60	0.37	/	26.93
CS-C	3.39	37.89	6.15	3.09	4.99	19.34	5.12	1.83	1.36	16.84
CS-D	1.88	29.38	10.58	6.79	9.03	18.11	2.93	/	/	21.30

1.2 工程弃土再生砖制备试验

以 4 种工程弃土与 10 种复配工程弃土为原料,进行工程弃土再生成砖试验,图 3 展示了完整的试验过程,其中挤出成型、土坯干燥和砖坯烧结过程中产生的试验现象是判断工程弃土对于再生砖的再利用途径的可行性的指标。

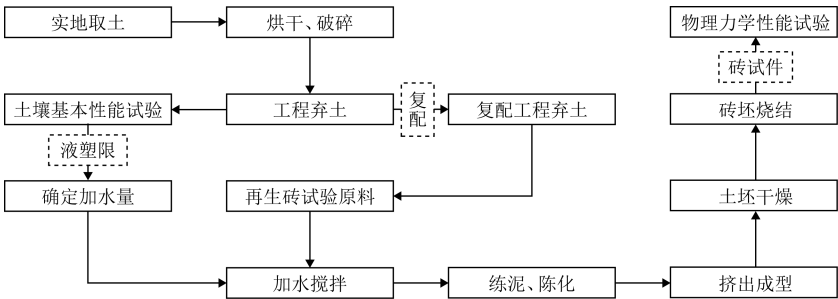


图 3 试验过程

Fig.3 Experimental process

所有试验组的加水量均是基于实测的塑限值进行确定的,当含水率达到塑限时,土坯具有可塑性,而考虑到搅拌、练泥和陈化过程中产生的水分流失(约 2%左右),因此选择在塑限的基础上增加 2%的水作为试验的成型含水率,计算方法如式(2)

$$w = w_p + 2\%$$
 (2)

式中: w 为试验采用的加水量; w_p 为塑限,加水量计算结果见表 1。

弃土加水后的搅拌时间为 10~15min,随后进行练泥,使泥料更加密实,水分分布均匀,改善泥料成型性能.随后将泥料在 30℃左右环境下陈化 3d,使土颗粒在浸润状态下进一步疏解,促使水分分布均匀,从而进一步改善泥料的成型和干燥性能^[21].在挤出成型试验时,使用仪器为实验室真空挤出机,挤出截面为 27mm×17mm 的矩形实心泥条用于后续制备再生砖,机腔内气压为-85~-90kPa.图 4 所示为所有试验组均统一采用的干燥和烧结阶段的温度控制曲线。

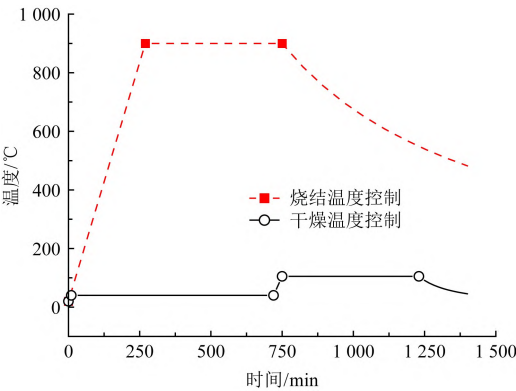


图 4 干燥和烧结温度控制曲线

Fig.4 Drying and sintering schedule

1.3 再生砖物理力学性能试验

对烧结的各组再生砖试件进行物理力学性能试验,包括体积密度、24h 吸水率、抗压强度和抗折强度,所有的试验和数据处理方法均参照规范^[22],其中抗压强度参照规范中的非成型制样方案,将条状试样中间折断并叠合加载,试样的叠合面长度为 50mm,测试抗折强度时,使用三点自由支承式抗折试验机测试抗折强度,跨距 L 为 80mm.

1.4 再生砖断面 SEM 微观形貌测试

使用扫描电镜 ZEISS Gemini 300 对部分再生砖试样断面的微观形貌进行观察,放大倍数为 5 000 倍,事先对试件表面进行了喷金处理,以增强导电性,确保观察到清晰的图像.

2 试验结果及分析

2.1 工程弃土再生砖制备试验结果

各组试样的成型、干燥和烧结试验现象如表 5 所示.其中,挤出过程中的大量开裂现象如图 5(a)所示,而挤出成功现象如图 5(b)所示,CCS-A7D3 的挤出毛刺如图 5(c)所示;干燥时大量开裂现象如图 5(d)所示,干燥后不开裂则如图 5(e)所示;烧结后的大量开裂现象如图 5(f)所示,烧结后不开裂如图 5(g)所示,CCS-A3D7 的烧结后短小裂纹如图 5(h)所示.

表 5 各试验组的挤出成型、干燥、烧结现象总结及分类结果
Table 5 Extrusion molding, drying, sintering phenomena and classification results of each test group

试样	成型	干燥	烧结	分类
CS-A	不能成型,大量开裂	/	/	A
CS-B	成功成型,表面光滑	出现少量细裂纹	部分试件开裂	B
CS-C	不能成型,大量开裂	/	/	A
CS-D	成功成型,表面光滑	基本无开裂现象	出现大量开裂	B
CCS-A5B5	成功成型,表面光滑	无开裂现象	无开裂现象	C
CCS-A5C5	不能成型,大量开裂	/	/	A
CCS-A5D5	成功成型,表面光滑	无开裂现象	无开裂现象	C
CCS-B5C5	成功成型,表面光滑	无开裂现象	无开裂现象	C
CCS-B5D5	成功成型,表面光滑	出现大量开裂	出现大量开裂	B
CCS-C5D5	成功成型,表面光滑	无开裂现象	无开裂现象	C
CCS-A9D1	不能成型,大量开裂	/	/	A
CCS-A7D3	可以成型,边角毛刺多	无开裂现象	无开裂现象	A
CCS-A3D7	成功成型,表面光滑	无开裂现象	出现小裂纹	B
CCS-A1D9	成功成型,表面光滑	出现大量开裂	出现大量开裂	B

从表 5 可以看到,不同的工程弃土或复配工程弃土的再生砖制备试验结果不完全相同,但依然存在一定的规律性,按照其现象可以将这些弃土试样分为 3 类,具体分类方法如图 6 所示,分类的结果展示在表 5 的右侧.其中,仅工程弃土中的 C 类土适宜制备再生砖,而通过将 A 类土与 B 类土按一定比例混合可得到 C 类土.

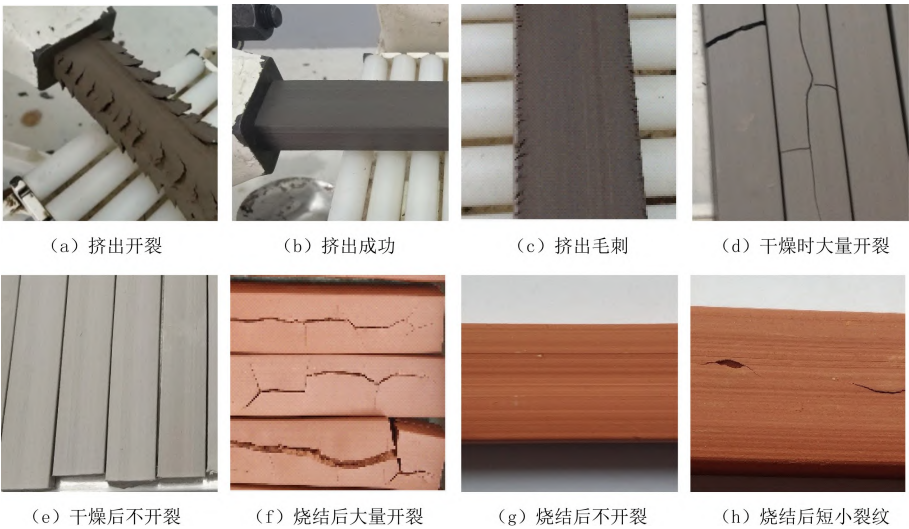


图 5 挤出、干燥、烧结试验现象
Fig.5 Extrusion, drying and sintering phenomenon

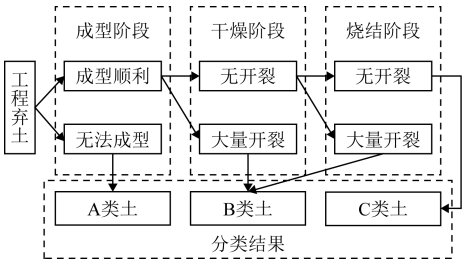


图 6 工程弃土按制砖结果的分类方法
Fig.6 Method for the classification of construction spoil according to the results of brick making

2.2 再生砖物理力学性能试验结果

由于工程弃土的主要成分与土壤类似,因此再生砖烧结过程中发生的物理化学变化与黏土烧结相似,如图 7 所示^[21].其中,结晶水和结构水的脱离会导致内部结构变疏松;石英的体积变化容易导致裂纹的产生;低共熔物生成后会流动并填充固体颗粒间的空隙,或依靠表面张力使物体颗粒聚拢,冷却后再次凝固,使再生砖的强度提高;而有机质和

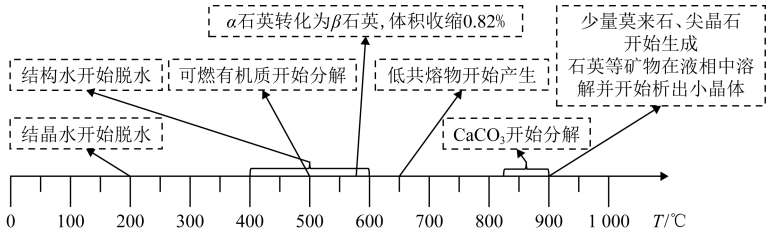


图 7 工程弃土烧结过程中的物理化学变化
Fig.7 Physical and chemical changes of construction spoil during sintering

CaCO₃ 的分解会产生孔隙,可以发现再生砖在烧结过程中的物理化学变化主要与其矿物组成相关,其中最主要的影响因素为黏土矿物的种类及含量,其影响贯穿了整个成型、干燥和烧结阶段.

图 8 展示了再生砖试件的体积密度,24h 吸水率,抗压强度和抗折强度.可以发现复配对再生砖体积密度变化的影响不明显,而对于再生砖 24h 吸水率、抗压和抗折强度的影响则较明显.表 6 展示了复配对再生砖这 3 种性能的影响情况,在多数情况下,复配可提高抗压强度,最大提高幅度达 26.7%,但是复配也会使抗折强度降低,但在以承压为主的砌体结构中,这种变化可以认为是有益的.

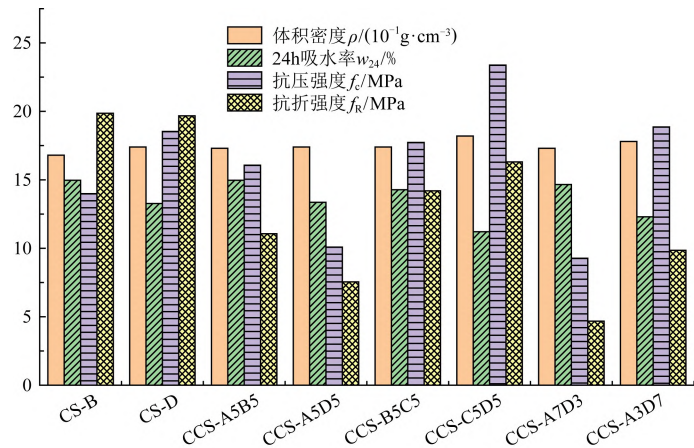


图 8 试件物理力学性能
Fig.8 Physical and mechanical properties of specimens

表 6 复配对吸水率、抗压强度、抗折强度的影响

试样	参考对象	掺入土	掺入比例/%	物理力学性能变化/%		
				w_{24}	f_R	f_c
CCS-A5B5	CS-B	CS-A	50	0.0	-44.3	+14.9
CCS-B5C5	CS-B	CS-C	50	-4.6	-28.5	+26.7
CCS-A5D5	CS-D	CS-A	50	+0.7	-61.6	-45.5
CCS-C5D5	CS-D	CS-C	50	-15.5	-17.1	+26.2
CCS-A7D3	CS-D	CS-A	70	+10.5	-76.2	-50.0
CCS-A3D7	CS-D	CS-A	30	-7.3	-49.9	+1.8

再生砖的吸水率与抗压强度的关系较为密切,由图 9(a) 可以看到,随着吸水率的提升,抗压强度表现出逐渐降低的趋势,可以发现 CCS-A7D3 与 CCS-A5D5 的抗压强度过低,这是因为 CCS-A7D3 的边角毛刺作为初始缺陷,导致再生砖的抗压与抗折强度大幅降低.而 CCS-A5D5 虽然外观无明显缺陷,但其石英含量在这些试样中是除了 CCS-A7D3 以外最高的,石英除了导致成型困难外,还会降低烧结砖的强度^[21].对比几组试样的吸水率、抗压强度和抗折强度(图 9(b)),可以发现随着复配土中 CS-D 的掺量的提升,黏土矿物含量提升,石英含量降低,最终再生砖的吸水率逐渐下降,抗压强度和抗折强度均得到提升.

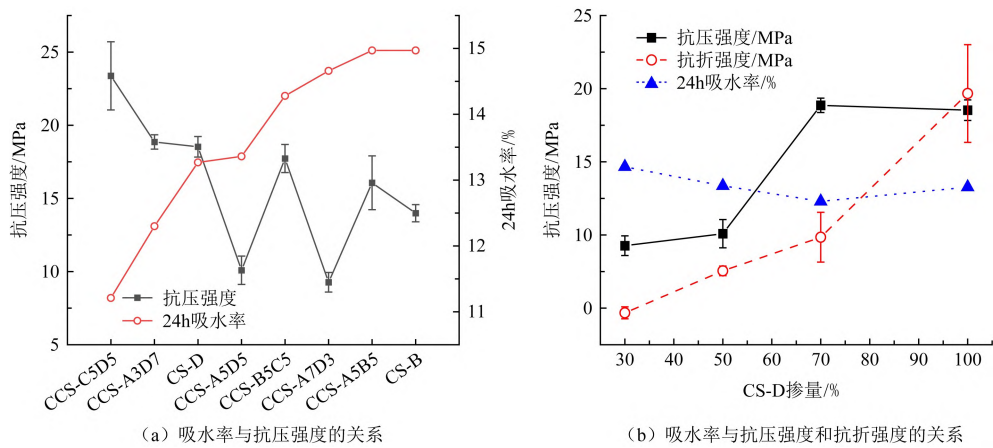


图9 再生砖试件抗压、抗折强度及吸水率的变化
Fig.9 Changes of compressive and flexural strength and water absorption of recycled brick

3 工程弃土再生砖机理分析

3.1 黏土矿物组成对弃土的影响机理

当制备工艺保持不变时,造成工程弃土再生砖物理力学性质差异的根本原因在于土体的化学成分、矿物组成和颗粒组成的差异,而同时这也是导致土体液塑限与塑性指数差异的根本原因.这其中,黏土矿物组成是最重要的影响因素,因为黏土的可塑性、压缩性、强度等工程性质主要受到黏土矿物中原子、分子间的键力,以及与颗粒周围介质之间的相互作用力所影响^[23].其中,蒙脱石对工程弃土的物理性能影响巨大,蒙脱石是膨润土的主要成分,具有较强的湿胀性和阳离子交换空间,常用于土壤改性^[24-25],也是工程弃土湿胀干缩效应的主要原因.

黏土矿物颗粒由于其晶体结构的特殊性,外形为鳞片状,且粒径极小,比表面积大,且电荷在黏土颗粒表面分布不均匀,在黏土颗粒薄片的面上分布负电荷,边角处则带正电

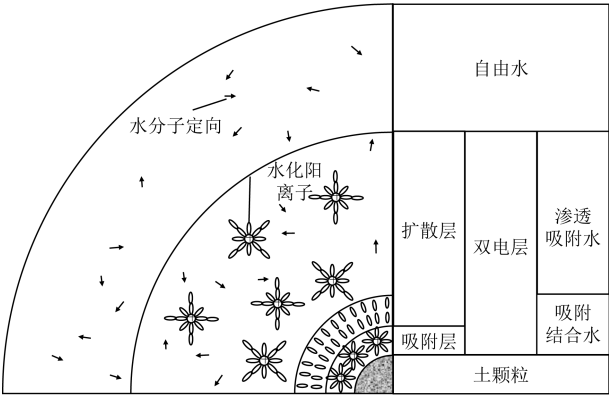


图10 黏土双电层的结构
Fig.10 Structure of electric double layer of clay

荷,因此在接触水分时,可吸附水中的金属阳离子,又进一步形成双电层结构^[23],如图 10 所示,其中扩散层水膜的厚度则取决于黏土颗粒自身所带的电荷数量(即热力电位)和外界条件,如阳离子的价位、浓度、直径和交换能力^[23].试验中的土坯由干燥土粉加纯水搅拌而成,因此可认为外界条件的影响较小,即所有试样的黏土颗粒可吸附的水膜的厚度基本相同.

一般情况下,工程弃土中黏土矿物占比越高,黏粒数量越多,平均粒径越小,需要更多的水分去包裹土颗粒表面使其可以相互滑动,因此其塑限、液限和塑性指数越大,而团聚了水分子的黏土颗粒与其他的土颗粒或者其他物质的黏聚力也更大,这也是潮湿的黏土更加粘手的微观原因.因此,黏土矿物含量更高的土体可塑性越强,更易挤出成型,但是干燥时也会失去更多的水分,收缩更大,也更易发生开裂.

影响土坯挤出时是否出现边角开裂或者整体撕裂的因素是土体的可塑性,在宏观上,可塑性体现为受力时可变形的能力和不受力时保持外形不变的能力^[26].挤出成型时,泥料在挤出口位置的受力情况如图 11 所示,挤出机提供的总推力 P_0 在缩口处受到挤出机金属内壁的反力和摩擦力作用而减小,到挤出口时,推力为 F ,且此时泥料的流变已经完成,在挤出口内部不再发生变形,此时泥料受到的推力 F 和摩擦力 f 在水平方向平衡,泥料可以匀速挤出,但是摩擦力集中在泥料表面,导致泥料的外表面受到较大的切应力,切应力会在泥料的棱边上达到最大.在未挤出时,受到挤出口金属内壁提供的环向约束力 p 的作用,泥料不会开裂,但当泥料刚刚被挤出时(在 A-A 截面),泥料失去了这种环向束缚,则此时可塑性不强的泥料就会立即产生开裂,从受切应力最大的 4 个棱边开始,真实的开裂情况如图 5(a) 所示,与理论分析相符.可塑性强的泥料,受力时变形能力强,因此在挤出口时的内力更小,此外可塑性强的泥料的颗粒间黏结力更强,挤出后也更不易开裂.定量分析挤出泥料的受力情况则需要综合考虑泥料自身力学性质(包括 Bingham 粘度、屈服应力)、泥料含水率、挤出口的构造、内壁粗糙度等相关参数^[27~28].

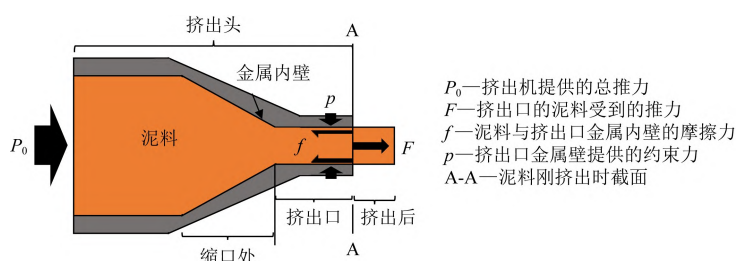


图 11 泥料挤出时受力分析示意

Fig.11 Stress analysis during extrusion

在干燥时,土颗粒间的水分流失,首先是自由水,其次是吸附水,水分的流失会导致土颗粒相互聚拢,进而产生收缩.黏土矿物颗粒占比大的土体含水率高,干燥时的收缩更大,但收缩往往是不均匀的,而不均匀收缩通常被认为是细裂缝最初产生的原因^[29].干燥收缩产生的开裂,一方面是由于不均匀收缩导致的初始细裂纹的产生、发展与扩大,另一方面则是因为土坯内外的收缩速度不同,由于土坯外表面直接接触空气,水分流失速度较土坯内部更快,收缩速度也比内部快,因此已经干燥、收缩和硬化的外部土体会对内部的土

体产生挤压,相对的内部土坯对外部的土坯产生的抗力将使外部土坯产生切向的拉应力,导致表面产生裂纹,如图 12 所示.裂缝产生的位置主要集中在土坯的大面上,因为土坯面积最大的一面干燥速度最快,产生的拉应力也最大,裂缝发展速度也最快.这与实际的干燥开裂结果相符,如图 5(d)所示.

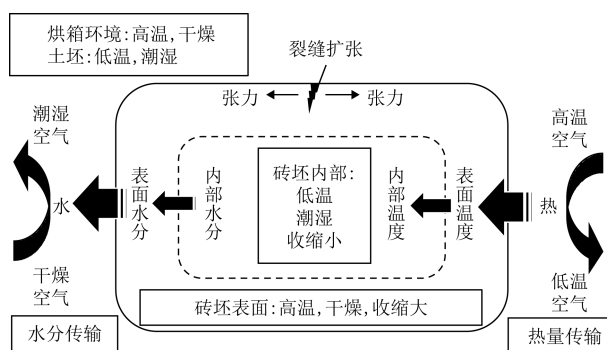


图 12 砖坯干燥时的开裂机理

Fig.12 Cracking principle of brick adobe during drying

3.2 黏土矿物组成对再生砖的影响机理

再生砖的强度取决于其内部的结构,包括颗粒连接、孔隙和裂缝.土颗粒首先在外力挤压和水的作用下紧密聚合,后在高温下发生固相反应,使颗粒间相互连接,固相反应的程度取决于颗粒间的距离和接触面积,距离越近,或者颗粒粒径越小,比表面积越大,固相反应则越充分.其次,黏土矿物在高温下产生低共熔物并填充在颗粒间的孔隙中,低共熔物具有表面张力,使土颗粒聚拢,产生体积收缩,低共熔物冷却后凝固,使土颗粒相互连接,因此黏土矿物含量越高,低共熔物产生数量越多,烧结收缩越大,烧结砖的抗压强度、抗折强度越高,孔隙率越低,如图 9(b)所示.通过比较试样 CCS-A7D3 和 CS-D 的 SEM 图像,可以发现,CS-D 的微观结构更加紧密,连通孔隙数量更少,如图 13 所示,根据表 2 计算可知 CCS-A7D3 和 CS-D 的黏土矿物含量分别为 31.4%和 56.0%,后者较前者高 78.6%,在图 13 中也发现了更多固相反应和低共熔物的痕迹.

另外,再生砖的孔隙主要来源于干燥时脱水和烧结时结构水脱水阶段,碳酸钙的高温分解和有机质的氧化,当孔隙数量增多且孔隙相互连接时,孔隙率增大,吸水率也越大,抗压强度越低,如图 9(a)所示.先天缺陷对再生砖强度一般产生不利的影响,如裂缝会导致抗压强度降低,边角的开裂会导致抗折强度和抗压强度的降低,如图 9(a)所示的 CCS-A7D3.

复配可以调整工程弃土的黏土矿物含量,当黏土矿物含量降低时,抗折强度快速降低,而抗压强度还受到粗颗粒的骨架作用的影响,再生砖试件受压破坏与受弯折破坏的机理不同,受折破坏时主要是粘结材料或者粘结材料与骨料的界面发生了破坏,而低共熔物充当了粘结材料的作用,因此黏土矿物含量对抗折强度的影响起到了决定性作用.而复配使抗压强度产生了一定的增强,表明合理的土体颗粒级配会一定程度上影响再生砖的抗压强度.

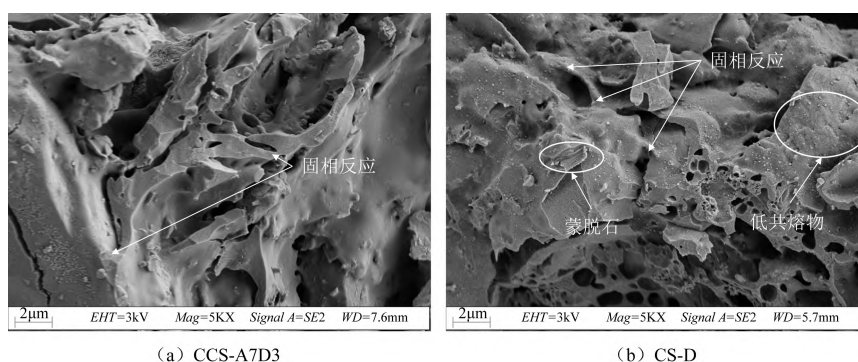


图 13 再生砖断面的 SEM 微观形貌

Fig.13 SEM microscopic appearance of recycled brick section

4 工程弃土复配方法

4.1 工程弃土快速识别方法

之前的试验已证明工程弃土具备再生成砖的可行性,且利用复配技术可以将不适宜再生成砖的工程弃土转化为可以制备再生砖的优质原料,但是在实际应用中仍然面对如下问题:(1)如何快速获知某种未知来源的新工程弃土是否可以再生成砖?(2)如何为不适宜再生成砖的工程弃土制定合理的复配方案?

虽然通过实际的制砖试验可以获得工程弃土是否适宜制砖的明确结果,但当面对数量庞大的、来源广泛且性能未知的工程弃土时,这种方法的效率较低,实用价值不大,因此应该直接对工程弃土本身的性质进行分析,以此确定某种工程弃土再生砖的可行性,以实现工程弃土的快速识别.由于之前的试验已根据工程弃土实际的再生砖制备试验结果将工程弃土分为 3 类,因此只需要事先知道某未知工程弃土的所属类别,就可以快速倒推出其再生成砖的可行性.

图 14(a)展示了在以土体的液限 w_L 和塑性指数 I_p 构建的坐标系中,参与试验 14 种工程弃土试样在坐标空间中的分布情况,其中在直线 $I_p = 0.73(w_L - 20)$ 上方的是黏土,下方的是粉土,在直线 $w_L = 50\%$ 左侧的是低液限土,右侧的是高液限土^[20].从中可以发现 3 类土集中分布在 3 个地方,表面该图具备了通过划分区域来辅助分类的可能性.

图 14(b)所示为以平均粒径 d^* 和黏土矿物含量 $wt\%(cm)$ 为坐标轴建立的坐标空间,其中 CS-A~CS-D 的平均粒径和黏土矿物含量分别来自于表 2 和表 4,其中这些工程弃土的黏土矿物包括伊利石、绿泥石和蒙脱石.其他复配土的平均粒径和黏土矿物含量遵从线性计算规则直接计算得到.从图 14(b)中可以发现 3 类工程弃土同样集中分布在 3 个区域.

因此,可以通过一些简单的设计将这些区域划定,并以此作为快速判断工程弃土所属分类区域的依据.对于图 14(a)所示的情况,可以使用双曲线函数式(3)划分 3 个区域,对于图 14(b)所示的情况,则可使用线性函数式(4)划分

$$I_p = v/w_L \quad (3)$$

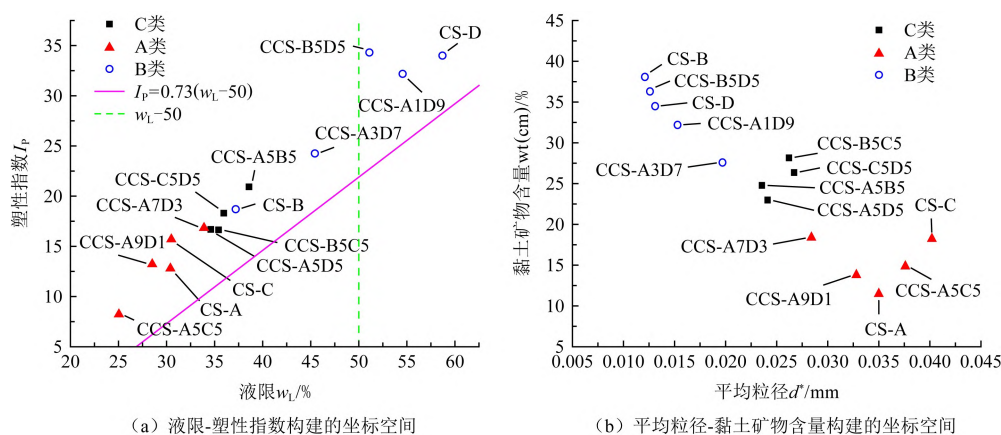


图 14 工程弃土的分类方法

Fig.14 Classification method of construction spoil

$$\text{wt\% (cm)} = F \cdot d^* \quad (4)$$

其中: I_p 为塑性指数; w_L 为液限; $\text{wt\% (cm)}$ 为黏土矿物的质量分数; d^* 为平均粒径; 而 v 、 F 为参数。

图 15(a) 和(b) 分别展示了两种划分方法的结果, 可以看到分类的效果非常清晰. 而划分区域的参数 v 和 F 的数值可从图 15 中大致确定, 可以发现, 此时界限参数 v 和 F 处于较宽的范围中, 若有工程弃土处于界限范围内时, 会存在分类不明确的问题, 这是由于本文试验样本数量不足, 因此需要更多相似的试验数据丰富数据库, 随着数据的增加, 参数的取值范围会减小, 工程弃土快速识别方法的精准性也会提高。

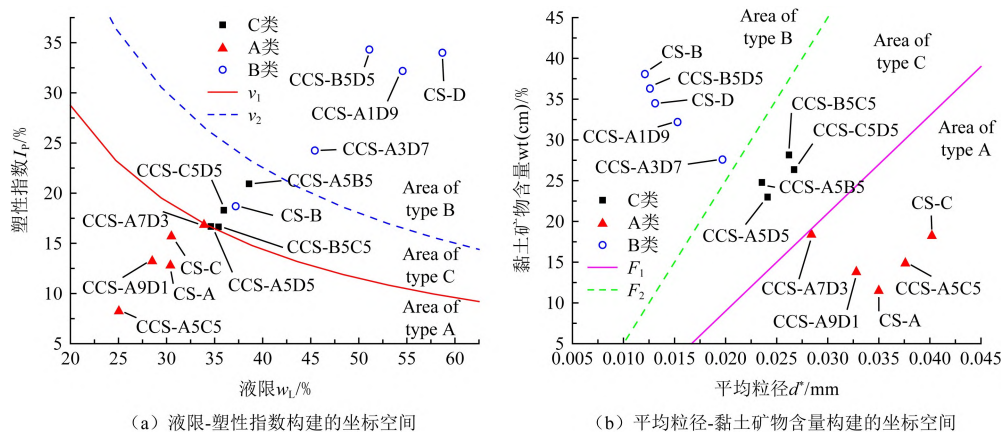


图 15 工程弃土的改进分类方法

Fig.15 Improved classification method of construction spoil

4.2 工程弃土复配方法设计

利用 4.1 节的方法确定未知工程弃土的分类结果后, 可选择性地将 A 类土与 B 类土混合成 C 类土, 以提高工程弃土的利用率. 仅讨论利用 2 种工程弃土复配的情况, 图 16 所

示为工程弃土复配方法的过程,首先测得弃土的液塑限、塑性指数或者颗粒级配曲线和XRD 分析结果后,可得到分类结果,选择结果为 A 类土和 B 类土的两种工程弃土 CS1 与 CS2 进行复配得到复配土 CCS,若 CS1 的质量占比为 k ,则 CS2 的质量占比为 $(1-k)$,由于平均粒径和黏土矿物含量存在明确的线性计算规律,因此可直接计算得到复配土的平均粒径和黏土矿物含量,进而计算得到合理的复配比例.由于土体的液塑限和塑性指数不存在精确的线性变化规律,但仍保留一定的相关性,可按线性计算方法估算复配土的液限和塑性指数,进而估算复配比例,随后需试验测试复配土真实的液限和塑性指数进行验算.

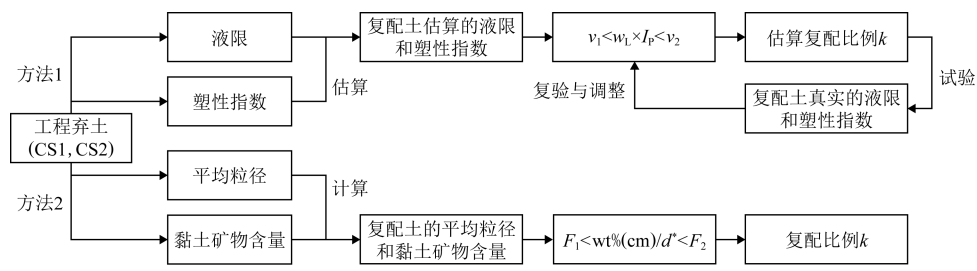


图 16 工程弃土的复配方法

Fig.16 Compound method of construction spoil

两种方法各有优势(表 7),采用方法 1 时,工程弃土只需进行液塑限联合测试试验,时间短,成本低,但是需要对复配土进行试验验算.采用方法 2 时,则不用后续的试验验算,但是成本较高,耗时较方法 1 更长.

表 7 工程弃土分类方法及参数设计

Table 7 Classification method and parameter design of Construction spoil

类别	方法 1		方法 2	
	分类规则	参数	分类规则	参数
A	$I_p * w_L < v_1$	$v_1 = 571 \sim 577$ $v_2 = 808 \sim 1\ 102$	$wt\%(cm)/d^* < F_1$	$F_1 = 800 \sim 900$ $F_2 = 1\ 400 \sim 1\ 621$
B	$I_p * w_L > v_2$		$wt\%(cm)/d^* > F_2$	
C	$v_1 < I_p * w_L < v_2$		$F_1 < wt\%(cm)/d^* < F_2$	

4.3 试验验证

试验验证了识别及复配方法的可行性,试验选择使用来自其他新建建筑工程产生的工程弃土,按照图 16 所示的方法 1 进行快速识别,并利用再生砖制备试验进行验证,结果如表 8 所示,可以发现识别方法得到的预测结果与实际情况吻合程度较高.

表 8 筛选与复配方法的试验验证结果

Table 8 Experimental verification results of screening and compounding methods

试样	$w_L/\%$	I_p	v	分类预测	成型情况	干燥情况	烧结情况	实际分类
CS-E	27.3	11.9	323	A	无法成型	/	/	A
CS-F	44.2	25.0	1 103	B	顺利成型	出现开裂	出现开裂	B
CS-G	29.3	12.3	360	A	无法成型	/	/	A
CS-H	38.3	19.8	758	C	顺利成型	无开裂	无开裂	C
CCS-E5F5	37.8	19.6	741	C	顺利成行	无开裂	无开裂	C

通过简单可行的复配,即 CS-E 与 CS-F 的质量占比各为 50%,得到复配土 CCS-E5F5,预测为 C 类土,实测的液塑限结果与实际的制砖试验显示预测与结果相吻合.证明该方法具有一定的可行性.

5 结论

(1)工程弃土直接制备再生砖的成功率较低,但通过复配可 100%利用工程弃土.复配可以调整黏土矿物的组成和含量,来影响制砖结果.弃土的黏土矿物含量越高,则平均粒径越小,液塑限与塑性指数越大,土体可塑性越强,越容易挤出成型,但干燥收缩更大,更易开裂;

(2)复配可以改变工程弃土再生砖的物理力学性能,黏土矿物含量越高,烧结前土颗粒越紧密,再生砖的抗压、抗折强度更大,孔隙越小,吸水率越小,通过合理的复配可提升再生砖的抗压强度达 26.7%;

(3)提出了快速识别工程弃土和指导复配设计的方法,当测试工程弃土的液限与塑性指数的数量积介于 v_1 和 v_2 之间,或者黏土矿物含量和平均粒径的比值介于 F_1 和 F_2 之间时,复配土适宜制成再生砖,其中 $v_1 = 571 \sim 577$, $v_2 = 808 \sim 1\ 102$, $F_1 = 800 \sim 900$, $F_2 = 1\ 400 \sim 1\ 600$.

参考文献

- [1] Xiao Jianzhuang, Shen Jianyu, Bai Meiyang, et al. Reuse of construction spoil in China: Current status and future opportunities[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 290(1): 125742
- [2] 肖建庄, 沈剑羽, 高琦, 等. 工程弃土现状与资源化创新技术[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(4): 1-13
Xiao Jianzhuang, Shen Jianyu, Gao Qi, et al. Current situation and innovative technology for recycling of engineering waste soil[J]. Journal of Architecture and Engineering, 2020, 37(4): 1-13
- [3] 刘传正. 深圳红坵弃土场滑坡灾难成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 1-5
Liu Chuanzheng. Genetic mechanism of landslide tragedy happened in Hong'ao dumping place in Shenzhen, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 1-5
- [4] 肖建庄, 张青天, 段珍华, 等. 建筑废物堆山造景工程探索[J]. 结构工程师, 2019, 35(4): 60-69
Xiao Jianzhuang, Zhang Qingtian, Duan Zhenhua, et al. The exploration of using construction waste in piling up hill for making scenery[J]. Structural Engineers, 2019, 35(4): 60-69
- [5] 顾铁新, 卜维, 王春书, 等. 我国主要覆盖区土壤地球化学标准物质的研制[J]. 地质与勘探, 2002, 38(增1): 240-244
Gu Tiexin, Pu Wei, Wang Chunshu, et al. Development of soil geochemical reference materials in main overburden areas of China[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(S1): 240-244
- [6] Mueller A. Recycling of masonry rubble—Status and new utilisation methods[C]. Abstracts of Papers of World Congress on Recovery, 2005
- [7] 刘世杰, 陆琳, 冯青. 新型建筑烧结砖烧成性能的研究[J]. 中国陶瓷, 2015, 51(2): 57-60
Liu Shijie, Lu Lin, Feng Qing. The research of sintering properties of the new building sintered clinker[J]. China Ceramics, 2015, 51(2): 57-60
- [8] 耿飞, 潘龙, 沈勇林, 等. 太湖淤泥烧结砖的制备及其性能[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10): 182-185
Geng Fei, Pan Long, Shen Yonglin, et al. Production and performance of sintered bricks made by Taihu Lake silt[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(10): 182-185
- [9] Kaling Taki, Rohit Gahlot, Manish Kumar. Utilization of fly ash amended sewage sludge as brick for sustainable building material with special emphasis on dimensional effect[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 123942
- [10] 李淑展, 施周, 谢敏. 污水厂污泥制地砖及其性能[J]. 硅酸盐学报, 2007, (2): 251-254

- Li Shuzhan, Shi Zhou, Xie Min. Production and performance of tiles made from wastewater treatment sludge[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, (2): 251-254
- [11] Pokhara P, Ekamparam A S S, Gupta A B, et al. Activated alumina sludge as partial substitute for fine aggregates in brick making[J]. Construction and Building Materials, 2019, 221: 244-252
- [12] Kadir A A, Hassan M I H, Salim N S A, et al. Stabilization of heavy metals in fired clay brick incorporated with wastewater treatment plant sludge; Leaching analysis[J]. Journal of Physics Conference Series, 2018, 995: 012071
- [13] Zhang Minte, Chen Chen, Mao Linqiang, et al. Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks; Characterization and environmental risk evaluation[J]. Construction and Building Materials, 2018, 159
- [14] Anjum F, Naz M Y, Ghaffar A, et al. Study of thermal and mechanical traits of organic waste incorporated fired clay porous material[J]. Physica B Condensed Matter, 2020, 599: 412479
- [15] Bodes C, La Aouba L, Vedrenne E, et al. Fired clay bricks using agricultural biomasswastes; Study and characterization [J]. Construction and Building Materials, 2015, 91: 158-163
- [16] Munoz P, Mendivil M A, Letelier V, et al. Thermal and mechanical properties of fired clay bricks made by using grapevine shoots as pore forming agent. Influence of particle size and percentage of replacement[J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 639-658
- [17] De Silva G H M J, Perera B V A. Effect of waste rice husk ash (RHA) on structural, thermal and acoustic properties of fired clay bricks[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 18: 252-259
- [18] Phonphuak N, Chindaprasirt P. Utilization of sugarcane bagasse ash to improve properties of fired clay brick[J]. Chiang Mai Journal of Science, 2018, 45(4): 1855-1862
- [19] 李裕瑞, 范朋灿, 曹智, 等. 基于扫描电镜解析毛乌素沙地砒砂岩与沙复配成土的微观结构特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(4): 707-719
- Li Yurui, Fan Pengcan, Cao Zhi, et al. Analysis of micro-structure of composited soil with feldspathic sandstone and sand through the scanning electronic microscope in Mu Us Sandy Land Region [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(4): 707-719
- [20] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007
- Ministry of Communications of the People's Republic of China. Highway geotechnical test code: JTG E40—2007[S]. Beijing: China Communications Press, 2007
- [21] 赵镇魁. 烧结砖瓦工艺及实用技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2012. 35-162
- Zhao Zhenkui. Craft and practical technology of sintered brick and tile[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2012: 35-162
- [22] 国家市场监督管理总局. 砌墙砖试验方法: GB/T 2542-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
- State Administration for Market Regulation. Test method of wall bricks: GB/T 2542-2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2012
- [23] 钱建固. 土质学与土力学. 第5版[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 27-38
- Qian Jiangu. Soil properties and soil mechanics[M]. Beijing: China Communications Press, 2015: 27-38
- [24] 刘阳生, 白庆中. 膨润土改性天然粘土防渗材料的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2): 143-149
- Liu Yangsheng, Bai Qingzhong. Study on bentonite enhanced soil as landfill materials[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 10(2): 143-149
- [25] 李婧男, 孙向阳, 张贺, 等. 暗管排盐条件下园林废弃物与膨润土对滨海盐土的改良效果研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(3): 562-574
- Li Jingnan, Sun Xiangyang, Zhang He, et al. Study on the amelioration effect of garden waste and bentonite on coastal saline soil under subsurface drainage[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(3): 562-574
- [26] 许拥胜. 烧结砖原料工艺性能与生产控制[J]. 砖瓦, 2006, (1): 25-27
- Xu Yongsheng. Process performance and production control of sintering brick raw material[J]. Brick-Tile, 2006, (1): 25-27
- [27] 邹基, 李密芳, 陈振涛. 坯体挤出成型中的流变学问题(一)[J]. 砖瓦, 2001, (5): 20-23
- Zou Ji, Li Mifang, Chen Zhenhao. Rheology problems in extrusion molding of adobe (1) [J]. Brick-Tile, 2001, (5): 20-23
- [28] 邹基, 李密芳, 陈振涛. 坯体挤出成型中的流变学问题(二)[J]. 砖瓦, 2001, (6): 37-39

- Zou Ji, Li Mifang, Chen Zhentao. Rheology problems in extrusion molding of adobe (2) [J]. Brick-Tile, 2001, (6): 37-39
- [29] 闫澍旺, 郭炳川, 楚剑, 等. 软泥土开裂机理分析及模型试验研究[J]. 应用数学和力学, 2015, 36(增1): 117-128
- Yan Shuwang, Guo Bingchuan, Chu Jian, et al. Mechanism of Soft clay cracking and model test simulation[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2015, 36(S1): 117-128

Compound Mixing and Properties of Recycled Brick with Construction Spoil

SHEN Jianyu¹, XIAO Jianzhuang¹, GAO Qi^{1,2}, WANG Haotong²

(1. College of Civil Engineering, Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Xuchang Jinke Resources Recycling Co. Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract

To solve the increasing construction spoil (CS), the feasibility of making recycled brick from CS and compound construction spoil (CCS) from different sources was studied, the grain composition, chemical composition, mineral composition, liquid limit, plastic limit and plastic index of CS were tested, the process of extrusion molding, drying and sintering were observed, and the density, 24h water absorption, compressive and flexural strength of recycled bricks were tested, and the micro appearance of recycled brick was observed by SEM. It was found that only few kinds of CS can make recycled bricks directly, however the recycling rate of CS could increase to 100% through compound methods. The particle composition and mineral composition of the CS could be adjusted by compounding, while the clay minerals content of CCS increases, the plasticity also increases, and it is easier to be extruded into shape, but also easier to crack while drying. CS with larger clay mineral content produces more low-eutectic during sintering, which leading the lower porosity, higher density, and higher compressive and flexural strength of recycled brick. The compressive strength of recycled bricks could be improved up to 26.7% through reasonable compounding. Finally, a rapid identification and compounding method of making recycled bricks from CS was established, by testing the liquid limit, plastic index or the particle distribution curve and clay mineral composition of CS, the feasibility of making recycled bricks from CS can be quickly identified, and a reasonable compound design can be calculated.

Keywords: construction spoil; compound soil; recycled brick; extrusion molding; drying; sintering; clay minerals; rapid identification