

文章编号:1007-9629(2022)11-1195-08

# 园林垃圾对工程弃土烧结砖性能的影响

高琦<sup>1,2</sup>, 肖建庄<sup>1,\*</sup>, 沈剑羽<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 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:**采用破碎、碳化和腐熟 3 种方法预处理园林垃圾,并按质量分数 0%、3%、6%、9% 和 12% 掺入工程弃土中,制备得到工程弃土烧结砖,并对其进行基本性能研究.结果表明:掺入园林垃圾后混合物料的塑限和液限提高,烧结后的主要产物为钾长石、斜长石、赤铁矿和莫来石;烧结砖的孔隙率增加、微观结构变得松散、吸水率增大、表观密度降低、体积收缩先增大后减小、质量损失增大;碳化园林垃圾因其颗粒小、有机质含量少、对烧结砖微观结构影响小且烧结产物中含有莫来石等,对烧结砖的力学性能影响最小;以质量分数 6% 的碳化园林垃圾掺入工程弃土中所制备的烧结砖抗压强度有所提升.

**关键词:**烧结砖;工程弃土;园林垃圾;碳化;腐熟

中图分类号:TU522.1; TU522.06

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.11.013

## Effects of Garden Waste on the Properties of Sintered Bricks Prepared with Construction Spoil

GAO Qi<sup>1,2</sup>, XIAO Jianzhuang<sup>1,\*</sup>, SHEN Jianyu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Xuchang Jinke Resources Recycling Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Three methods of pulverizing, carbonizing and decomposing were used to pretreat the garden waste, and sintered bricks were prepared by mixing the construction spoil and treated garden waste. The sintered brick was prepared with the mass mixing ratios of 0%, 3%, 6%, 9% and 12% of the treated garden waste and the basic properties of sintered construction spoil bricks were studied. The results show that the plastic limit and liquid limit of the construction spoil are increased after the addition of garden waste. The main products after sintering are potassium feldspar, plagioclase, hematite and mullite. With the increase of the mixing ratios, the micropores increase, the microstructure becomes looser, the water absorption increases, the density decreases, the volume shrinkage first increases and then decreases, and the mass loss increases. It is found that carbonized garden waste has the least influence on the mechanical properties of sintered brick because of its small particle size, less organic matter, little influence on the microstructure of sintered brick and mullite in sintered product, the compressive strength of sintered brick can be improved by adding 6% mass fraction of waste clay.

**Key words:** sintered brick; construction spoil; garden waste; carbonizing; decomposing

目前中国每年产生的工程弃土超过 30 亿 t<sup>[1]</sup>,且大量工程弃土未经过资源化处理,多采取填埋或临时堆放的形式,从而带来大气、水体污染或滑坡等风

险<sup>[2-3]</sup>,因此,工程弃土的高品质资源化问题亟待解决.目前,工程弃土的资源化路径主要有地基填埋,制备烧结砖<sup>[4-7]</sup>、免烧结砖<sup>[8-9]</sup>,堆山造景<sup>[10]</sup>和制备陶

收稿日期:2022-05-14; 修订日期:2022-07-20

基金项目:中韩国际合作重点项目(2022TFE0198300)

第一作者:高琦(1983—),女,河南许昌人,同济大学博士生,许昌金科资源再生股份有限公司高级工程师.E-mail:22371434@qq.com

通讯作者:肖建庄(1968—),男,山东沂南人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail:jzx@tongji.edu.cn

粒<sup>[11]</sup>等.其中,烧结工艺可以消除弃土中混杂的有机质并形成孔隙,进而提高烧结砖的保温性能<sup>[12-14]</sup>;另外烧结工艺还可以固定弃土中的重金属污染物,大幅降低重金属浸出率<sup>[15-18]</sup>.因此烧结砖制备工艺常被用于协同处理来自农林业的固体废弃物<sup>[7, 19]</sup>,如麦秸、葵花籽饼<sup>[12]</sup>、藤条木屑<sup>[13]</sup>、甘蔗渣与植物纤维<sup>[14]</sup>,或燃烧后的植物灰分<sup>[20]</sup>,如稻壳灰<sup>[21]</sup>和甘蔗渣灰<sup>[22]</sup>等.上述制备工艺已被广泛证明是有效可行的.虽然将农业固体废物直接掺入弃土中烧结处理的工艺较为简单,但所制备的烧结砖力学性能降幅较大,因此适当对此类固体废物进行预处理是较好的办法.

园林垃圾的主要成分是木质素和纤维素<sup>[23]</sup>.全中国每年约产生 $4 \times 10^7$  t 园林垃圾<sup>[24]</sup>,其主要处理方式为填埋或堆肥,占用了大量土地<sup>[24]</sup>.将园林垃圾与工程弃土混合制备成烧结砖不仅可以同时处理2种固体废物,而且园林垃圾作为烧结砖的内燃料和造孔剂,能够提升砖的保温性能、减少制砖能耗.但简单采用粉碎处理可能对烧结砖的基本力学性能产生较大负面影响<sup>[12-13]</sup>.为剖析园林垃圾对烧结砖品质的影响规律,本文同时对比了破碎、碳化和腐熟3种预处理方法对工程弃土烧结砖性能的影响,以探索经济可行的园林垃圾与工程弃土协同处置方法.



图1 CS与3种预处理GW的外观  
Fig. 1 Appearance of construction spoil and three kinds of treated garden waste

### 1.1.3 工程弃土和园林垃圾的基本性能

表1为GW的纤维素、半纤维素和木质素含量(质量分数,文中涉及的含量、组成等均为质量分数).表2为CS与GW的化学组成.图2为CS与GW的颗粒级配.依据SY/T 5163—2018《沉积岩中黏土矿物总量和常见非黏土矿物X射线衍射定量分析方法》得到CS的矿物组成(见图3).

由表1可知:PGW的纤维素、半纤维素和木质素含量均较低,可能是由于机械破碎过程不能破坏纤维素、半纤维素和木质素的胶合状态;CGW的木质素含量最高,明显高于纤维素和半纤维素含量;DGW的纤维素、半纤维素和木质素含量相近.总体

## 1 试验

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 工程弃土

工程弃土(CS)来源于中国中部地区某建筑工地的基坑开挖土.将其自然晾晒、烘干、破碎和筛分,得到粒径小于0.075 mm的弃土原料,用于制备工程弃土烧结砖(SCSB).

#### 1.1.2 园林垃圾

园林垃圾(GW)来自于某园林采集的落叶和枯枝,其中落叶包括女贞树叶、桐树叶、香樟树叶和柳树叶等.采用破碎、碳化和腐熟3种方式对其进行预处理,分别得到破碎园林垃圾(PGW)、碳化园林垃圾(CGW)和腐熟园林垃圾(DGW).其中,破碎垃圾过筛后粒径小于1.0 mm;碳化使用250 mm×250 mm×100 mm的带盖方形坩埚进行,在电炉中先以5 °C/min的速率升温至270 °C且保温2 h,再以相同速率继续升温至570 °C且保温2 h,然后自然冷却;腐熟使用腐熟专菌种,在密封罐中进行,环境温度为(20±2) °C,保持原料潮湿,全程持续3个月,期间每隔7 d取出原料,翻动搅拌并补充水分.

CS和3种预处理GW的外观如图1所示.

来说,PGW的有机质破坏程度最低,有机质含量最高,而CGW的有机质含量最低.

由表2可见:CS和GW的化学组成以硅、铝、钙和铁为主,说明CS中硅酸盐、硅铝酸盐或氧化硅含量较高;而GW中的硅和钙含量最高,其次为铝和铁.

表1 GW的纤维素、半纤维素和木质素含量  
Table 1 Content of cellulose, hemicellulose and lignin in garden waste

Type	w/%		
	Cellulose	Hemicellulose	Lignin
PGW	0.56	2.35	0.83
CGW	2.99	8.85	28.78
DGW	11.75	11.70	14.27

表 2 CS与GW的化学组成  
Table 2 Chemical compositions of construction spoil and garden waste

Material	Si	Al	Ca	Fe	K	Na	Mg	Ti	Other
CS	55.08	11.18	10.21	11.49	6.17	1.65	1.97	1.33	0.92
GW	33.91	7.36	33.30	9.10	5.83	1.09	2.98	0.95	5.48

由图 2 可见:CS 的颗粒明显小于 GW 的颗粒;碳化处理可以大幅降低 GW 的颗粒大小,破碎处理其次,腐熟处理对 GW 颗粒细化的效果最弱.

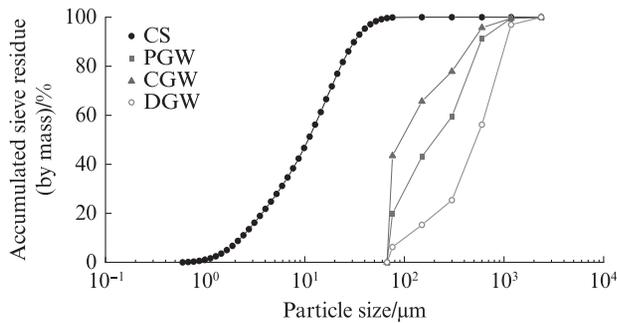


图 2 CS与GS的颗粒级配曲线  
Fig. 2 Particle gradation curves of construction spoil and garden waste

由图 3 可以看出:CS 的矿物组成中石英含量为 48.3%,这是 CS 中硅含量高的主要原因;而黏土矿物含量仅为 19.7%,其中以伊利石为主,占总质量的

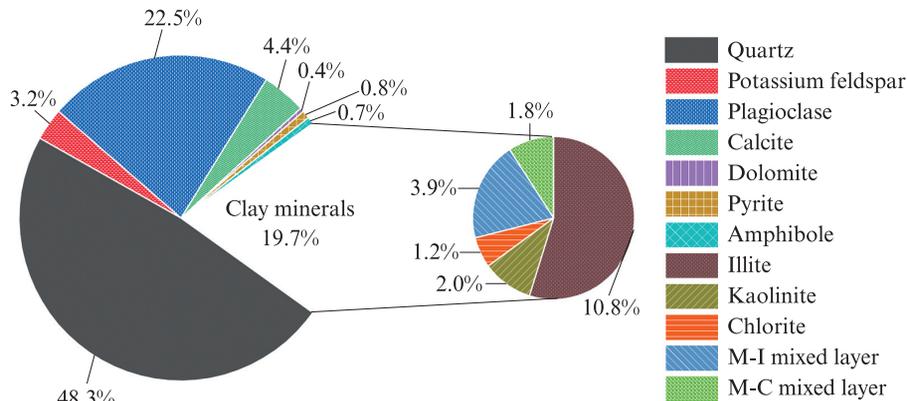


图 3 CS的矿物组成  
Fig. 3 Mineral composition of construction spoil

首先将加水后的混合物料在 30~40 °C 的密封条件下陈化 3 d,使其可塑性进一步提高;然后将其放入普通小型擀面机中挤压成 1 mm 厚的泥土薄片,糅合并再次挤压,反复 5 次完成练泥过程;接着采用真空挤出机将该泥土薄片在 -80~-90 kPa 的真空环境下缓慢挤成泥条;再将泥条切割为等长泥块,放入电子干燥箱中进行干燥,干燥分 2 个阶段——先在 40 °C 下慢速干燥 12 h,再在 100~105 °C 下快速干燥

10.8%,没有蒙脱石,说明该土的吸水能力差、可塑性低、黏性不高.

1.2 试验方法

1.2.1 工程弃土烧结砖的制备

以 CS 质量为基准,将 3 种 GW 按照质量分数 0%、3%、6%、9% 和 12% 分别掺入 CS 中,制备得到园林垃圾-工程弃土烧结砖 (GW-SCSB). GW-SCSB 试件的编号和配方如表 3 所示,制备流程如图 4 所示.相较于压制成型方式,试验采用的真空挤出成型方式对泥胚的可塑性要求更高,当可塑性偏低时,容易造成砖坯在挤出过程中发生开裂现象.另外考虑到 GW 的掺入会影响未烧结 CS 与 GW 混合物(简称混合物料)的界限含水率及制备过程中产生的水分损耗,故基于混合物料的实测塑限 ( $w_p$ ) 值来调配试验加水量 ( $w$ ).经前期测验,所有试验组的加水量 ( $w$ ) 均统一按  $w = w_p + 2\%$  来控制.为保证砖坯挤出时不出现开裂,GW-SCSB 含水量要尽量小,以提高其干燥成功率.

8 h;最后取出干燥泥块放入电子窑炉中进行烧结,以 200 °C/h 的速率升温至 900 °C,并在 900 °C 下保温 8 h,自然冷却得到 GW-SCSB 试件.

1.2.2 混合物料的界限含水率和塑性指数

依据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》,采用 LP-100D 型液塑限联合测定仪测试混合物料的界限含水率(塑限 ( $w_p$ )、液限 ( $w_l$ ))和塑性指数 ( $I_p$ ).

表3 GW-SCSB试件的编号和配方

Table 3 Number and formula of GW-SCSB specimens

Specimen No.	$w(\text{PGW})/\%$	Moisture content(by mass)/%	Specimen No.	$w(\text{CGW})/\%$	Moisture content(by mass)/%	Specimen No.	$w(\text{DGW})/\%$	Moisture content(by mass)/%
GW0-SCSB	0	25.3	GW0-SCSB	0	25.3	GW0-SCSB	0	25.3
PGW3-SCSB	3	21.3	CGW3-SCSB	3	24.0	DGW3-SCSB	3	26.9
PGW6-SCSB	6	24.2	CGW6-SCSB	6	26.7	DGW6-SCSB	6	27.6
PGW9-SCSB	9	25.3	CGW9-SCSB	9	28.8	DGW9-SCSB	9	28.4
PGW12-SCSB	12	26.2	CGW12-SCSB	12	29.5	DGW12-SCSB	12	29.9

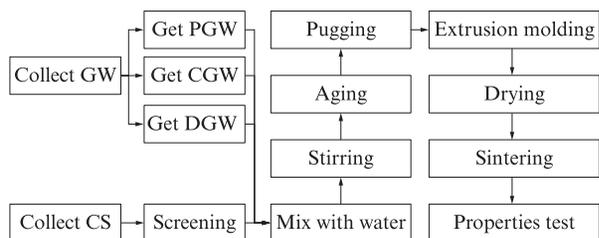
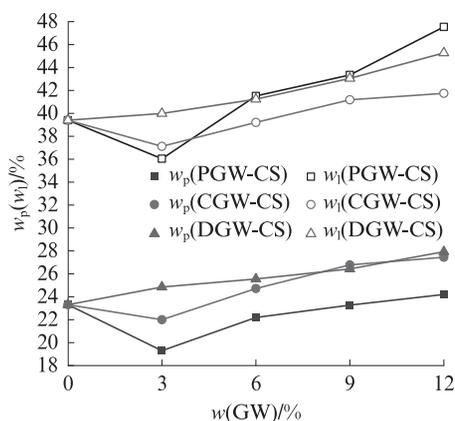


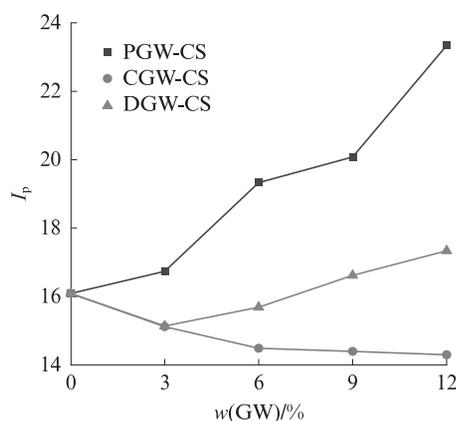
图4 GW-SCSB的制备流程  
Fig. 4 Preparation process of GW-SCSB

### 1.2.3 工程弃土烧结砖的物理力学性能

依据 GB/T 2542—2012《砌墙砖试验方法》进行 GW-SCSB 的物理力学性能试验,包括烧结砖的 24 h 吸水率( $W_{24}$ )、煮沸 3 h 吸水率( $W_3$ )、饱和系数( $K$ )、表观密度( $\rho$ )、体积收缩( $S$ )、质量损失( $\Delta W$ )、抗压强度和抗折强度等。



(a) Limit moisture content



(b) Plasticity index

图5 混合物料的界限含水率、塑性指数

Fig. 5 Limit moisture content and plasticity index of mixed materials

### 2.2 工程弃土烧结砖的物理性能

图6为GW-SCSB的物理性能试验结果.由图6(a)可见:(1)随着GW掺量的增加,GW-SCSB的体积收缩( $S$ )先增后降.这主要是因为GW-SCSB在制备过程中添加的水分随着GW掺量的增加而增加,更多的水分导致砖坯在干燥时产生更大的收缩,整体收缩率主要由干燥时的体积收缩所决定,

### 1.2.4 工程弃土烧结砖的微观形貌

采用 ZEISS Gemini300 型扫描电子显微镜 (SEM) 进行 GW-SCSB 的微观形貌分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 混合物料的界限含水率、塑性指数

图5为混合物料的界限含水率、塑性指数.由图5可见:(1)整体上,无论掺入何种GW,混合物料的塑限和液限均随其掺量增大而增大,说明掺入GW后,混合物料需要更多的水分来保持可塑性或者流动性.(2)3种GW对混合物料塑性指数的影响有所不同——CGW降低了混合物料的塑性指数;PGW大幅提高了混合物料的塑性指数,主要是因为PGW中的有机质含量较高;DGW对混合物料塑性指数的影响不明显.

烧结过程的体积变化不明显;当GW掺量达到12%时,GW-SCSB的 $S$ 下降最为显著,这可能是由于过量GW纤维组成了一种能够抵抗收缩的骨架结构,其中DGW-SCSB(采用DGW制备的SCSB)的体积收缩大于CGW-SCSB(采用CGW制备的SCSB)和PGW-SCSB(采用PGW制备的SCSB).(2)整体上,随着GW掺量的增加,GW-SCSB在干

燥时的损失( $\Delta W_d$ )逐渐增加;DGW-SCSB的 $\Delta W_d$ 较CGW-SCSB和PGW-SCSB更大,这可能是DGW的亲水性更强,能够吸附的水分更多所致。(3)GW-SCSB烧结过程中的质量损失( $\Delta W$ )(包含干燥时的水分损失( $\Delta W_d$ )、烧结时的结构水脱水、有机质分解和方解石分解等)随着GW掺量的增加而增大;3种GW-SCSB的 $\Delta W$ 值相差较小,且与 $\Delta W_d$ 的变化趋势相差不大。(4)随着GW掺量的增加,GW-SCSB的24 h吸水率( $W_{24}$ )和煮沸3 h吸水

率( $W_3$ )均逐渐增大,而饱和系数( $K$ )整体呈下降趋势,但降幅不大.由此说明GW导致SCSB产生孔隙,且其掺量越大,SCSB的孔隙数量和大小也越大。(5)随着GW掺量的增加,GW-SCSB烧结前(干燥后)的表观密度( $\rho_d$ )和烧结后的表观密度( $\rho_s$ )均有所下降.这是因为GW自身密度低于CS,在混合过程中,GW使得CS不易压实,残留了孔隙,以及在烧结过程中GW中的有机质分解产生孔隙所致。

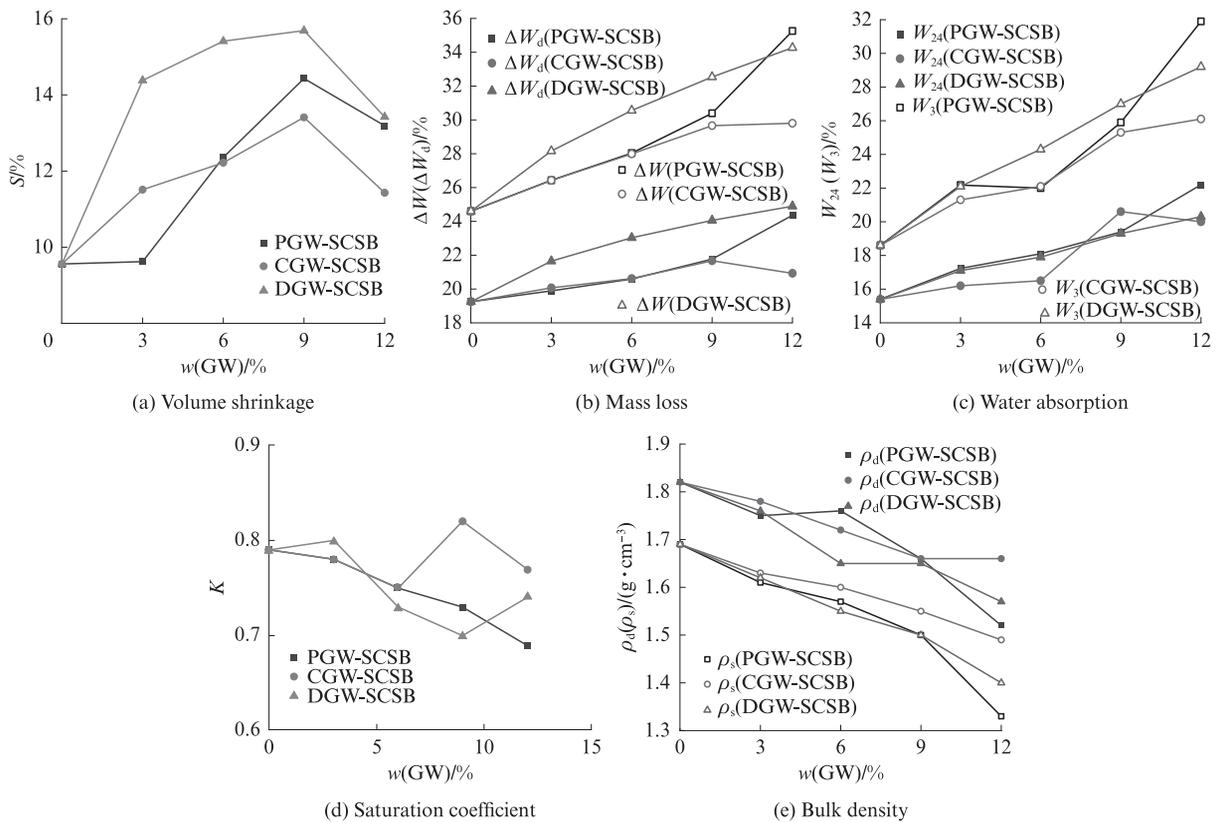


图6 GW-SCSB的物理性能试验结果

Fig. 6 Physical performance test results of GW-SCSB

### 2.3 工程弃土烧结砖的力学性能

GW-SCSB是一种可用于砌体结构的建筑材料,因此抗压强度是最重要的评价指标之一.图7为GW-SCSB的抗压强度和抗折强度曲线.由图7(a)可见:(1)当掺入PGW时,GW-SCSB的抗压强度随着其掺量的增加而下降.(2)当掺入DGW或CGW且掺量低于6%时,GW-SCSB的抗压强度随其掺量的增加而增大,而当DGW或CGW掺量高于6%时,GW-SCSB的抗压强度随其掺量的增加而下降,最终低于未掺GW时的抗压强度.GW-SCSB抗压强度下降的主要原因是掺入GW带来了大量孔隙,导致SCSB内部结构疏松,从而更容易产生开裂和破坏.而当GW掺量较低时,少量的孔隙所带来的强度降

低效应并不明显.另外因CGW和DGW的掺入而产生的莫来石矿物相可能是GW在低掺量时SCSB强度提升的一个重要原因.(3)当GW掺量为12%时,PGW-SCSB、CGW-SCSB和DGW-SCSB的抗压强度较未掺GW的SCSB分别降低48.5%、6.5%和30.2%;当GW掺量为6%时,上述3种GW-SCSB的抗压强度分别提高20.8%、15.4%和20.0%。

不同于抗压强度,GW-SCSB抗折强度的变化趋势较为简单.由图7(b)可见:(1)随着GW掺量的增加,3种GW-SCSB的抗折强度均呈降低趋势,其中当GW掺量小于12%时,普遍存在CGW-SCSB的抗折强度最高,DGW-SCSB的抗折强度次之,PGW-SCSB的抗折强度最低的关系.这可能是由于

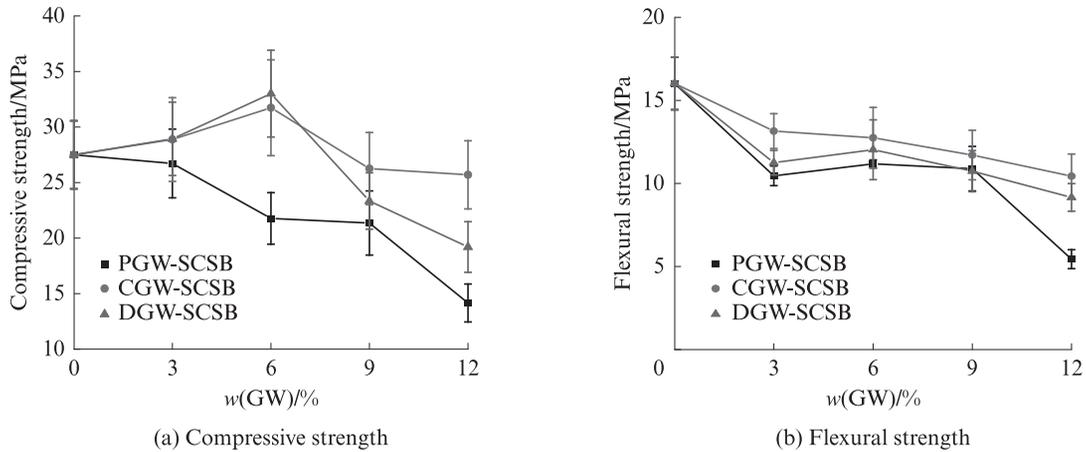


图7 GW-SCSB的抗压强度和抗折强度曲线  
Fig. 7 Compressive strength and flexural strength curves of GW-SCSB

CGW 颗粒更细;PGW 虽然颗粒比 DGW 小,但有有机质含量更高,且反应后没有产生提高强度的莫来石矿物相。(2)当 GW 掺量为 12% 时,PGW-SCSB、CGW-SCSB 和 DGW-SCSB 的抗折强度分别较未掺 GW 的 SCSB 降低 66.0%、34.8% 和 42.8%。

2.4 烧结前后工程弃土烧结砖的矿物含量变化

图 8 为未掺 GW 和掺 12% GW 烧结砖的 XRD 图谱。CS 与 GW-SCSB 的矿物含量见表 4。由表 4 可见:(1)GW0 在烧结后,黏土矿物基本消失,这是因为多种黏土矿物在烧结过程中熔化,产生低共熔物,在烧结结束后,原本的黏土矿物反应生成了新的矿物相;(2)烧结后的新产物主要为钾长石、斜长石、赤铁矿等,掺 CGW 和 DGW 后还额外产生了莫来石;(3)烧结后,黏土中的赤铁矿含量增加,这是由弃土中的铁元素在高温下反应生成的,而原先这些铁元素可能存在于黏土矿物如绿泥石中。赤铁矿显红色,这也是弃土在烧结后颜色变红的主要原因。

对比 PGW、CGW 和 DGW 的掺入对 SCSB 产物的影响,发现主要区别在于莫来石矿物相的产生,掺入 DGW 后,烧结产生了最多的莫来石;同时石英含量最低,钾长石含量最低,与不掺 GW 时的矿物含量最接近,这可能是部分黏土受到了某种催化作用。GW 中

含有大量钙,而 3 种 GW-SCSB 较 SCSB 中的方解石含量均大幅降低,这是由于方解石在高温下分解产生氧化钙和二氧化碳,钙是一种有效的助熔剂,可以降低弃土中矿物的熔点,从而促进部分化学反应的进行。

对比掺入 PGW 和 CGW 后的产物结果,可以看到石英含量和钾长石含量均较不掺时更高,说明破碎和碳化更有助于钾长石的生成。考虑到制砖试验和 XRD 检测中可能存在的误差,不同处理后的 GW 对 SCSB 的影响机理及化学反应过程,需要更多后续研究。

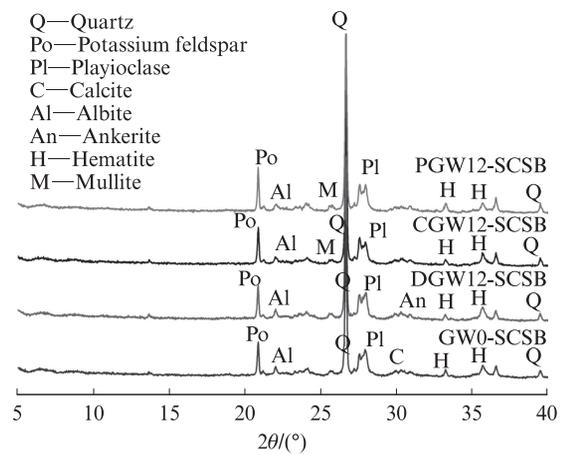


图 8 未掺 GW 和掺 12% GW 烧结砖的 XRD 图谱  
Fig. 8 XRD patterns of SCSB without and with 12% GW

表 4 CS 与 GW-SCSB 的矿物含量  
Table 4 Mineral content of CS and GW-SCSB

Specimen No.	Quartz	Potassium feldspar	Plagioclase	Calcite	Dolomite	Hematite	Ankerite	Clay	Mullite
CS	48.3	3.2	22.5	4.4	0.4	0.8	0	19.7	0
GW0-SCSB	40.9	17.8	28.7	3.7	0	7.4	1.5	0	0
PGW12-SCSB	47.1	21.0	25.8	0	0.8	5.1	0.2	0	0
CGW12-SCSB	44.1	21.5	27.1	0	0	2.5	1.6	1.0	2.2
DGW12-SCSB	41.4	16.9	28.2	0.7	0	3.4	2.7	0.5	6.2

w/%

## 2.5 工程弃土烧结砖的微观结构

图9为未掺GW和掺12%GW烧结砖断面的SEM照片.由图9可以看出:GW0的孔隙数量最少、孔隙尺寸最小、微观结构最为致密;PGW12-SCSB的孔隙尺寸最大、结构最松散,存在较大的裂隙;CGW12-SCSB的孔隙尺寸最小,结构最紧密,

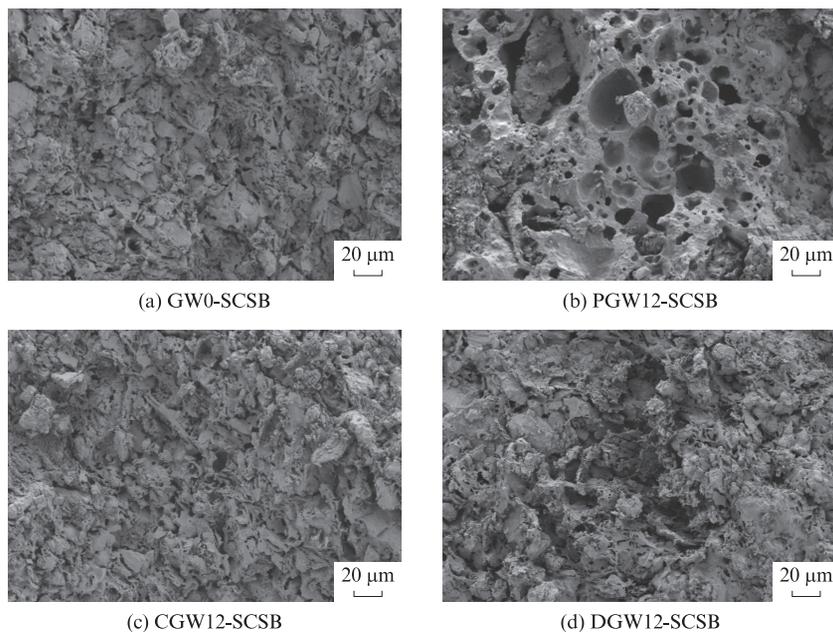


图9 未掺GW和掺12%GW烧结砖断面的SEM照片  
Fig.9 SEM images of cross section of SCSB without and with 12% GW

## 3 结论

(1)3种预处理的GW掺入CS中制备SCSB时,均可提高混合物料的塑限和液限.烧结后主要新产物为钾长石、斜长石、赤铁矿和莫来石等.随着GW掺量的增加,SCSB的微观孔隙数量增加,微观结构更加松散,吸水率增大,混合物料经干燥和烧结后密度降低、质量损失增大、体积收缩增大.当GW掺量为12%时,SCSB的体积收缩因为纤维骨架作用而减小,导致其抗折强度降低.

(2)PGW中的有机质含量高,可以提升CS和GW混合物料的塑性指数,烧结后不产生莫来石,微观结构最松散,微观孔隙最多;随着PGW掺量的增加,GW-SCSB的抗压强度和抗折强度逐渐降低,当PGW掺量为12%时,GW-SCSB的抗压强度降低48.5%,抗折强度降低66.0%.

(3)CGW的颗粒最细,能够降低混合物料的塑性指数,烧结后可以产生少量莫来石,使得SCSB的微观结构较为紧密,孔隙最少.基本上在各掺量条件下,SCSB的吸水率最低、密度最大,且抗折强度始终最大,抗压强度随着CGW掺量的提升而先增大后减小.与

DGW12-SCSB次之.CGW本身颗粒更加细小,且经过碳化处理后,自身的有机质含量是3种情况中最低的,DGW次之,而PGW的有机质含量最高,有机质在烧结时会分解并留下孔洞,所产生的气体还会扩大孔洞.因此烧结后,PGW12-SCSB的孔隙和裂缝最多,CGW12-SCSB的孔隙最少.

GW0-SCSB相比,当CGW掺量为6%时,GW-SCSB的抗压强度提升15.4%;当CGW掺量为12%时,GW-SCSB的抗压强度降低6.5%,抗折强度降低34.8%.

(4)DGW的颗粒最粗,对混合物料的塑性指数影响不明显,烧结后产生相对最多的莫来石,所制备GW-SCSB的抗压强度随着DGW掺量的增加而先增大后减小.当DGW掺量为6%时,GW-SCSB的抗压强度提升20.0%;当DGW掺量为12%时,GW-SCSB的抗压强度降低30.2%,抗折强度降低42.8%.

(5)当CGW掺量为6%时,所制备的GW-SCSB抗压强度提升,抗折强度降低不明显,效果最好.从微观角度来看,是因为CGW-SCSB的孔隙最少,结构更加致密;从矿物组成角度来看,烧结产物中产生了莫来石,当CGW掺量较少时,烧结产物的强度提升作用占主导因素,当CGW掺量较大时,SCSB微观孔隙增多对强度的降低作用转为主导因素.

## 参考文献:

- [1] 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 Civil Engineering, 2020, 37(4):1-13. (in Chinese)
- [ 2 ] CHEN Z W, JIANG Y L, ZHANG H J, et al. The properties of the soil loss in the spoil area during the construction of expressway in tibetan plateau—Example as the Ping'a express in Qinghai province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(6):4-6.
- [ 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. (in Chinese)
- [ 4 ] XIAO J Z, SHEN J Y, BAI M Y, et al. Reuse of construction spoil in China: Current status and future opportunities[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 290:125742.
- [ 5 ] 吴世流. 建筑淤泥质弃土烧结保温多孔砖生产技术[J]. 砖瓦, 2009(2):22-24.  
WU Shiliu. Production technology of using clay abandoned from construction in perforated insulating fired brick[J]. Brick-Tile, 2009(2):22-24. (in Chinese)
- [ 6 ] CHENG J X, SHAO Z S, XU T, et al. Experimental research on sintering construction spoil bricks based on microwave heating technology[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(48):69367-69380.
- [ 7 ] 陈永亮, 石磊, 杜金洋, 等. 铁尾矿轻质保温墙体材料的制备及性能研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5):721-729.  
CHEN Yongliang, SHI Lei, DU Jinyang, et al. Preparation and properties of the lightweight thermal insulation wall materials with iron tailings[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(5):721-729. (in Chinese)
- [ 8 ] YANG D, XI Z Q, CHEN Q, et al. Mechanical properties of tunnel muck with fly-ash geopolymer[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020:7247134.
- [ 9 ] GUO A F, WEI X F, WANG Y, et al. Study on preparation and properties of unburned brick by building waste[J]. Non-metallic Mines, 2021, 44(3):99-102.
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 张磊, 张鸿飞, 荣辉, 等. 700~900密度等级渣土陶粒的研制及其性能[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5):803-810.  
ZHANG Lei, ZHANG Hongfei, RONG Hui, et al. Fabrication and performance of 700~900 density grade muck ceramicsite[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(5):803-810. (in Chinese)
- [12] BODES C, LA AOUBA L, VEDRENNE E, et al. Fired clay bricks using agricultural biomass wastes: Study and characterization[J]. Construction and Building Materials, 2015, 91158-163.
- [13] 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.
- [14] BULLIBABU K, ABIDALI M, VEERANJANEYULU K. Characterization and production of thermal insulating fired clay bricks with admixture of bagasse and palmyra fruit fiber[J]. Materials Today:Proceedings, 2017, 5(2):6973-6980.
- [15] ARSENOVIC M, RADOJEVIC Z, STANKOVIC S. Removal of toxic metals from industrial sludge by fixing in brick structure [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37:7-14.
- [16] 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 [C]// International Seminar on Mathematics and Physics in Sciences and Technology (ISMAP). Malaysia: [s.n.], 2017:1-10.
- [17] ZHANG M T, CHEN C, MAO L Q, et al. Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: Characterization and environmental risk evaluation [J]. Construction and Building Materials, 2018, 159:27-36.
- [18] 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.
- [19] RAUT S P, RALEGAONKAR R V, MANDAVGANE S A. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10):4037-4042.
- [20] ELICHE-QUESADA D, FELIPE-SESE M A, MARTINEZ-MARTINEZ S, et al. Comparative study of the use of different biomass bottom ash in the manufacture of ceramic bricks[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(12):04017238.
- [21] DE SILVA G, 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, 182:52-259.
- [22] 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.
- [23] 张黎, 张思梦, 伏凯, 等. 城市园林垃圾资源化与处理模式研究[J]. 环境卫生工程, 2021, 29(5):10-16.  
ZHANG Li, ZHANG Simeng, FU Kai, et al. Research on recycling and disposal mode of urban garden waste [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2021, 29(5):10-16. (in Chinese)
- [24] 刘瑜, 赵佳颖, 周晚来, 等. 城市园林废弃物资源化利用研究进展[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(4):32-38.  
LIU Yu, ZHAO Jiaying, ZHOU Wanlai, et al. Progress of resource utilization of urban garden waste [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(4):32-38. (in Chinese)