

引用本文: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 Jian-zhuang, SHEN Jian-yu, 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.

DOI:10.19815/j.jace.2019.11038

工程弃土现状与资源化创新技术

肖建庄¹, 沈剑羽¹, 高琦^{1,2}, 马志鸣¹, 李福安²

(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 461001)

摘要:分析了中国工程弃土的产生来源、组成成分、年排放量、来源分布、空间分布、利用率及法律法规等基本现状;基于国内外对于工程弃土治理的经验和法律,以弃土的分类治理为依托,将弃土分为良质土和劣质土进行分类讨论,详细介绍了中国对这 2 种工程弃土现有的处理方式,其中良质弃土处理方法包括填埋、堆山造景、道路防护林带等,劣质弃土处理方法包括固化改良、弃土烧结砖、弃土免烧砖等,并指出目前处理方法中现存的一些难题;介绍了工程弃土资源化的创新技术,如弃土固化新技术、弃土烧结砖砌块新技术等,其中着重介绍了弃土烧结砖砌块技术,包括其新型焙烧工艺、弃土烧结砖表面处理工艺、新型砌块形式、烧结砌块装配式结构、烧结砌块配筋技术等,其中烧结砌块装配式结构可在保证烧结砖自身多种优势的情况下大大提高施工效率和后期回收利用率;最后,针对中国工程弃土数量巨大、管理缺失、处理低效的现状提出建议,从工程管理、技术创新和法律法规 3 个方面入手,注重源头控制是第一步,发展创新技术、提高终端处理效率是基本,科学有效的管理制度、完善的法律法规是根本保证。

关键词:工程弃土;资源化;创新技术;烧结砖砌块;装配式结构

中图分类号: TU746

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)04-0001-13

Current Situation and Innovative Technology for Recycling of Engineering Waste Soil

XIAO Jian-zhuang¹, SHEN Jian-yu¹, GAO Qi^{1,2}, MA Zhi-ming¹, LI Fu-an²

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

2. Xuchang Jinke Resource Recycling Co., Ltd, Xuchang 461001, Henan, China)

Abstract: The source, composition, annual discharge, source distribution, spatial distribution, utilization rate, laws and regulations of engineering waste soil in China were analyzed. Based on the experience and laws of engineering waste soil treatment at home and abroad, and the classified treatment of waste soil, the waste soil was divided into superior soil and inferior soil, and the existing treatment methods of these two kinds of engineering waste soil in China were introduced in detail, the treatment methods of superior waste soil including landfill, mountain heaping, road protection forest belt, etc., and the treatment methods of inferior waste soil including solidification improvement, sintered waste soil brick, unburned waste soil brick, etc. Some existing problems in the current treatment methods were pointed out, and the innovative

收稿日期:2019-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51438007)

作者简介:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn.

technologies of engineering waste soil recycling were introduced, such as new technology of solidification of waste soil, new techniques of sintered waste soil brick block, etc., the new technologies of sintered waste soil brick block were introduced, including new sintering process, surface treatment of sintered waste soil brick, new forms of sintered brick, assembly sintered block structure, sintered block reinforcement technology, in which the assembly sintered block structure could improve the construction efficiency and reuse rate. Finally, in view of the current situation of huge quantities, chaotic management and inefficient treatment of engineering waste soil in China, the solutions should start from three aspects: engineering management, technological innovation, laws and regulations. Source control is the first step, developing innovative technologies and improving efficiency of terminal treatment are the basic, scientific and effective management system, excellent laws and regulations are the fundamental guarantee.

Key words: engineering waste soil; recycling; innovative technology; sintering brick block; fabricated structure

0 引言

随着中国城市化的推进和现代化的建设,越来越多的大型建筑物拔地而起。城市发展方向也从原本的地上朝着地下发展,如建筑地下室、地铁线路、市镇管网等地下结构在如今的城市发展中已然成了不可或缺的一部分。但是,随着城市的不断建设,产生的建筑垃圾也在逐渐增多,并成为困扰中国发展的一大难题。目前建筑垃圾大部分为工程弃土,存在数量庞大、成分复杂、处理困难等特点,已成为当今城市可持续发展中亟待解决的问题。

工程弃土也称为建筑弃土,即各类建筑物、构筑物、管网等进行建设、铺设或拆除、修缮过程中所产生的渣土和淤泥等。工程弃土以城市的新建、改建等工程开挖的弃土、淤泥为主要来源。据统计,中国建筑垃圾数量已占城市垃圾总量的 30%~40%^[1],其中约一半以上为建筑弃土。据 2105 年的调查数据显示,目前中国包括建筑物垃圾和工程弃土在内的建筑垃圾年产生量约为 35×10^8 t,其中每年仅拆除就产生 15×10^8 t 建筑垃圾^[2]。大量的工程弃土直接贡献了大部分城市垃圾,造成所谓“垃圾围城”现象,形势十分严峻。工程弃土常常不易处理,若随意堆置则会占用大量土地面积,同时造成环境污染,产生扬尘和水土流失,破坏土壤结构,造成土地沉降,危害巨大。工程弃土的排放量目前还呈现出逐年增长的趋势,而中国的大部分弃土临时堆积场都已经不堪重负,一味地堆填弃置无法解决当下弃土围城的现状,对于工程弃土,必须秉承可持续发展的理念,将其充分合理地资源化再利用。

1 工程弃土现状

1.1 中国工程弃土的主要来源及排放量

工程弃土的主要来源有:新建建筑物的地基开挖、场地平整产生的土方量;地铁管线、地铁站点及其他地下公共设施建设所产生的挖土量;旧建筑拆除产生的建筑垃圾中包含的弃土;道路翻修、河道疏浚等所产生的渣土和淤泥等。其中,新建建筑的弃土排放占据了工程弃土的大部分来源。

中国新增建筑面积逐年增长,占据全世界总量的一半,位居世界第一。仅 2015 年,中国竣工建筑面积就已经达到了 27.9×10^8 m²,如图 1 所示。若按每年平均 20×10^8 m² 新增建筑面积,平均每栋建筑 9 层算,每层高 3 m,每栋配备 1 层地下室,那么每年将产生 6×10^8 m³ 的土方量,即 18×10^8 t 土。地铁管线和地铁站开挖产生的土方量同样惊人,据统计,在“十三五”期间,中国每年新增约 880 km 的地铁线和 500 座地铁站点,如表 1 所示。若按每条地铁管道直径 6.3 m,每座地铁站占地 1×10^4 m²,高 2 或 3 层约 10 m 进行估算,可得中国每年在地铁建设中开挖的弃土量约 1×10^8 m³,即 3×10^8 t 土。

据测算,中国每年约 4.6×10^8 m² 的旧建筑被拆除,而每拆除 1×10^5 m² 旧建筑时,产生的建筑垃圾为 6 000~10 000 t^[3],其中的弃土量约占建筑拆除垃圾总量的一半,即中国每年因拆除产出的工程弃土约 4×10^8 t。新建筑的建设和旧建筑拆除所产生的弃土,加上地下综合管廊、道路翻修、河道疏浚等产出的弃土和淤泥,工程弃土的每年排放量可达约 30×10^8 t,按此计算,可以得到各类来源的工程弃土的数量占比,如图 2 所示。

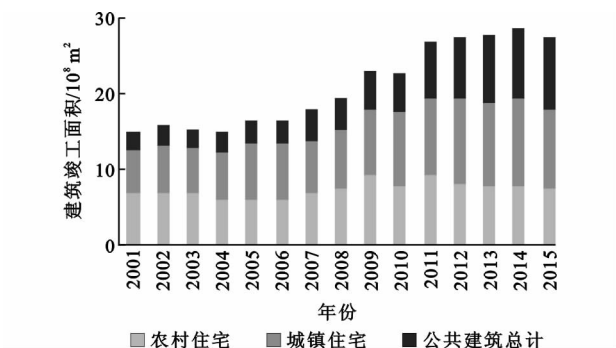


图 1 中国各类民用建筑竣工面积(2001~2015 年)

Fig. 1 Completed Area of All Types of Civil Buildings in China(2001-2015)

表 1 中国“十三五”期间地铁新建站台测算

Tab. 1 Estimation of New Metro Platforms During the 13th Five-year Plan Period in China

项目	2015 年新投入运营	2015 年发改委批复	2015 年现有累计值	2016 年在建城轨	2020 年预测值
城轨里程 K/km	334.68	1 417.80	3 618.00	4 000.00	8 000.00
站台数 N/座	259	912	2 257		4 800
N/K	0.77	0.64	0.62		0.60

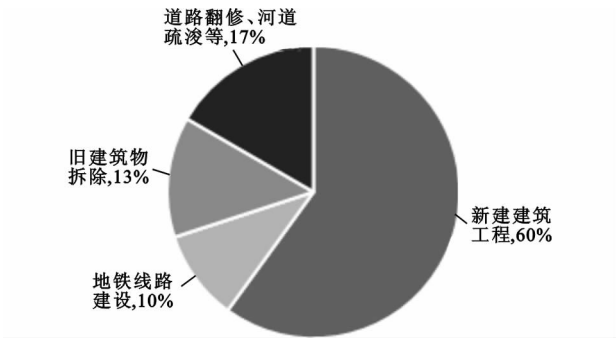


图 2 各类来源的工程弃土占比

Fig. 2 Proportion of Engineering Waste Soil from Various Sources

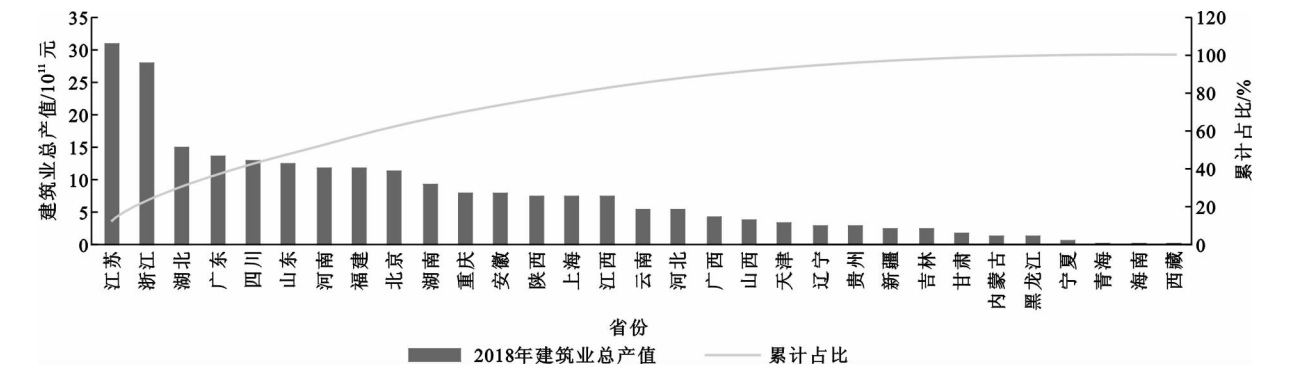


图 3 中国各省 2018 年建筑业总产值

Fig. 3 Total Output Value of Construction Industry of China's Provinces in 2018

从化学组成上来看,地表土壤主要的化学成分为二氧化硅、氧化铝、氧化铁、氧化钙、氧化镁等,其中以二氧化硅和氧化铝为主。干燥的土壤中矿物质成分占到了土壤总质量的 90%~95%,而有机质成

1.2 中国工程弃土的空间分布

中国工程弃土排放源的地理分布主要集中在城市化发展迅速的地区,如华东、华中和西南等地区。据 2018 年的建筑发展统计可知,中国各地建筑业总产值情况如图 3 所示。

建筑业总产值计算公式为 $G=PN(1+R)(1+M)(1+T)$,其中, G 为建筑业总产值, P 为预算单价, N 为实际完成的实物量, R 为间接费率, M 为计划利润率, T 为税率。假定中国各省建筑业的间接费率、计划利润率和税率一致,依据各省的平均房价,便可以根据图 3 计算出各省的房屋竣工面积,从而得到各省各地区的弃土排放量,如图 4 所示。

1.3 中国工程弃土的组成分析

工程弃土的成分主要包括原土所具有的粒度成分、矿物成分和液相成分,建筑拆除后产生的碎混凝土、砂浆、砖粉等,以及其他成分如有机物碎屑和化学物质。工程弃土以地表土壤为主,而地表土成分的差异性因地区而异,呈现出较大的离散型。中国幅员辽阔,经纬度跨度大,地质条件及气候条件丰富,因此土壤资源也十分丰富,包括南方红壤、东部棕壤、褐土、黑土、北方栗钙土、西北漠土等。目前中国对工程弃土常采用分类处理的方式,因此在处理前,需要重点注意弃土的成分差异所带来的影响。

分只占 1%~10%,因而土壤的成分差异主要受其成土母质差异的影响。以浙江省为例^[4],省内的土壤母质多达 29 种,土类达 16 种,相同母质类型土壤含有相似的矿物种类,而且相同母质不同样品中同

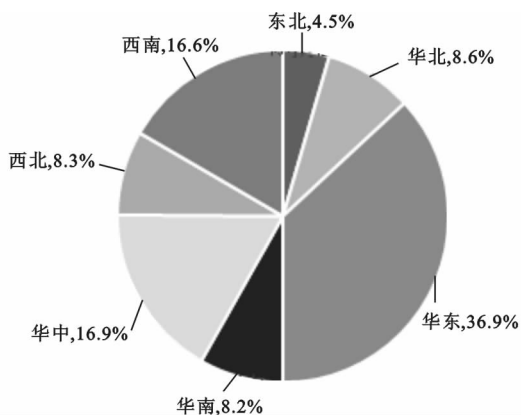


图4 中国各地区弃土排放量比例

Fig. 4 Proportion of Waste Soil Emission in All Regions of China

一矿物含量变化也较小,即同母质土壤矿物组成与含量具有相似性。由此可知,在进行弃土相关研究时,需要注意根据弃土的来源进行分类。

1.4 中国工程弃土利用率和法律现状

随着中国现在城市建设的高速发展,工程弃土的排放量逐年增长,而中国目前对工程弃土的利用率低下,仍有大量的浪费,与发达国家相比,中国在对工程弃土的处理能力上有巨大的进步空间。据资料显示,德国在2008年的建筑垃圾回收利用率就达到了95%,再生利用率也达到70%以上。根据联合国再生联合会的统计,欧洲主要国家的建筑垃圾平均利用率达到80%左右,其他国家如日本、韩国等,建筑垃圾回收利用率达95%以上。中国的建筑垃圾总体资源化再利用率仍不足5%,不仅浪费严重,且未资源化的建筑垃圾还会产生严重的二次污染。建筑垃圾的再生利用主要包括:建筑弃料的资源化,如制作再生骨料、再生砂粉等,以及建筑弃土的资源化,如回填、造景、固结回填、烧制砖等。

近年来,中国在法律制度、经济政策和技术研发等方面开展了建筑垃圾资源化道路的积极探索,但进展相对缓慢,尚未形成趋势。中国在2003年1月颁发了《城市建筑垃圾和工程弃土管理规定》,2009年施行了《中华人民共和国循环经济促进法》,2011年8月施行了《固体废物污染防治法》,2013年3月住建部发布了《十二五绿色建筑和绿色生态城区发展规划》,重点要求加快发展绿色建筑产业。很多新兴企业在逐步开展建筑垃圾的再利用,但暂未形成较稳定的产业链,应用工程有限。

在学界李建明等^[5]深入探讨了“无废城市”这一全新概念,并从政策引导、问责制度、市场机制、推进示范工程建设等方面,针对性地为中国工程弃土的

治理问题提出了建议。

如今,中国“十三五”规划明确提出了“让城市越来越智慧”的顶层设计要求,许多城市完成了包括建筑弃土运输智能化管理系统在内的多个子系统建设,实现了弃土车辆的智能化监管全覆盖,并在此基础上进一步建设城市土石方调配信息化平台,加强对工程弃土的管理。抓紧建立土石方调配信息化平台,强化土石方公共数据资源共享势在必行。可由各地国土资源厅搭建土石方调配信息化平台及公开的土石方调配信息查询系统,将相关的资源信息公布在互联网上,做到信息互通共享,并以可视化的方法呈现在电子地图之上。在建筑弃土运输智能化管理系统的基础上集成调度功能,政府部门则重在监管,当好市场的服务者,各方要在协作过程中强化平台的公共数据资源共享功能,争取做到肯用、会用、善用、爱用。如此,才能科学、高效地处理工程弃土管理困难的问题。

2 工程弃土处置及利用现状

2.1 国外工程弃土处理经验

在发达国家,处理工程弃土主要采取“工程渣土源头消减策略”,通过科学管理和有效控制措施,在工程弃土形成之前,进行减量化,并对工程弃土采取科学手段,使其变成再生资源^[6]。

德国是世界上最早开展循环经济处理法的国家,1972年制定了《废物处理法》,1986年修改为《废物限制及废物处理法》,1994年制定了《循环经济和废物清除法》。采用的理念是减量产生,循环利用,最终处理,将废物的产生和消纳规划为一套完整的循环经济体系^[1];对于产生弃土的工程会采取每吨500欧元的罚款,以此来督促施工方。

美国在20世纪70年代制定了《固体废弃物处置法》,各州根据自身情况制定了相应的再生资源循环利用法规,美国政府还在《超级基金法》中规定“任何生产有工业废弃物的企业,必须自行妥善处理,不得擅自随意倾卸”,对直接填埋处理的企业,收取高额的处置费用,因而美国建筑弃土资源化率超过90%以上。

日本政府在20世纪70年代制定了《再生骨料和再生混凝土使用规范》,90年代又制定了《资源重新利用促进法》,这些法规的指导方针是建筑弃土尽可能不离开施工现场,尽可能重新利用,重新利用有困难的则缴纳必要的处置费,故而日本建筑弃土资源化率达到98%。

2.2 工程弃土分类治理原则

根据欧美、日本等发达国家对建筑垃圾的处理经验,结合中国实际情况,可以将工程弃土分类利用。工程弃土根据弃土来源和自身性质,可分为工程产出土和工程垃圾土^[7]。工程产出土包括良质弃土、疏浚砂石等可以直接利用的土工材料;工程垃圾土包括劣质弃土、工程污泥、疏浚泥等不可以直接使用的垃圾土。

所谓良质弃土和劣质弃土,即根据土木工程建设中产出的弃土的物化性质再次细分得到的分类。良质弃土主要为砂砾土、砂土、粉砂土等压实性能好、易于施工的土方,而劣质弃土主要是指标贯击数在 2 以下,无侧限抗压强度为 50 GPa 以下,含水率达到 80% 以上的软黏土、有机质土等^[7]。

目前,工程弃土的利用现状主要包括以下几个方面:

(1) 直接再利用。此类方法所用的弃土必须是自身性质优良的土壤,其含水率适合,不被污染,施工性能优良。常被用于填埋、标高平衡、山体修复、公路防护带、堆山造景、恢复耕田、土壤改良、修路筑堤、填海造陆等。

(2) 通过干燥、脱水等物理方法处理后,恢复优良物化性质,再利用。

(3) 通过化学处理,使其固结,作为固结回填土。

(4) 通过热处理,即用于生产砖瓦、陶粒等再生建筑材料。

工程弃土的分类及处理方向如图 5 所示。

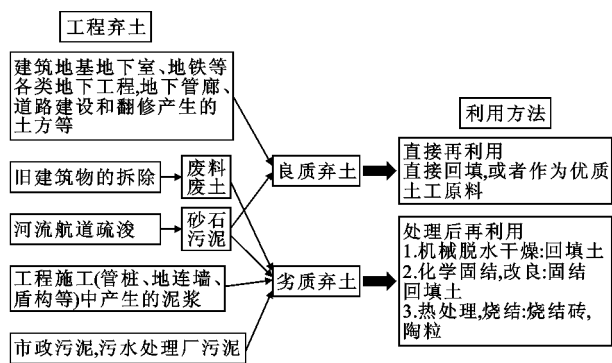


图 5 工程弃土的分类及处理方向

Fig. 5 Classification and Treatment Direction of Engineering Waste Soil

2.3 良质弃土的处理

众所周知,地表的岩石矿物经过千百年的风化、沉淀,以及复杂的物理化学变化后,才会最终形成土壤。土壤对人类来说是一种宝贵的不可再生资源,因此,在对工程中产出的弃土进行再利用时,应根据

其性质进行分类。每年大约产生的 30×10^8 t 弃土中,大部分本质上是来自大地表层的土,是干净的、优质的资源,对此,应尽量采用填埋、平整场地、恢复山体等方式进行再利用,让优质的土壤重回大地。

2.3.1 填埋,恢复山体,填海造陆

中国目前对于工程弃土还是主要以填埋为主,所用的工程弃土为其中的良质弃土。

填埋是最简单传统的弃土利用方式。一般在各类建设工程的前中后期,都会需要填平坑地、平衡场地标高等,往往可以就地消纳部分刚排放的弃土。

山体恢复包括天坑回填和山坡复原,主要适用于处理城市近郊因开山采石、采矿挖掘、挖山取土等行为而出现的山体生态失衡、地表景观碎片化、生物多样性降低等生态问题,以及预防边坡易崩塌、滑坡等地质灾害隐患问题。

填海造陆即使用人工手段把原有的海域、湖区或河岸转变为陆地的行为。对于山多地少的沿海城市,填海造地是一个为城市有限空间的发展起到重要作用的方法。填海造陆工程可以消纳大量的弃土,是一种直接简单的利用方式。

2.3.2 堆山造景

近年来各地兴起的堆山造景是一种对工程弃土高效清洁的利用方式。每完成一座人造景观的建设,就可以消纳大量的工程弃土,如仅造一座底部面积 $500 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 、高 50 m 的小山,就可以消纳 3×10^6 t 的弃土^[8]。

西安文景山公园^[9]是中国第一个利用建筑废弃物建造的“堆山造景”公园,可以满足市民休闲娱乐、观光旅游等需求。堆山面积达 $15 \times 10^4 \text{ m}^2$,可消纳 $33.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 建筑废物,山体西侧高 40 m,东侧高 35 m,景观效果良好。北京南海子公园^[10]将建筑废物打碎、分拣,并根据不同规格用于堆山工程、公园路基建设、园中道路填充物、绿地以及人行道石子等,再将土壤铺设其上,用于栽种景观植被,利用各种植物对垃圾进行降解,可消纳约 $32 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的建筑废物处理,仍有约 $24 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的建筑废物填埋山体容量。石家庄柏林公园^[11]占地 $5.3 \times 10^4 \text{ m}^2$,峰高 11 m,建筑废物与土按照 3 : 1 的比例混合后,采用分层碾压的方式,使山体堆土达到合理密实度的同时安全地消纳建筑废物和弃土。天津南翠屏公园^[12]堆山工程用地 $33.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,山体占地面积 $12.1 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆山主峰高度 50 m,另有侧峰 6 座,园中采用巧妙的空间分割,将建筑废物堆山工程打造为园林艺术。此外,天津奥林匹克森林公园^[13]

(峰高 48 m)、江苏无锡金匮公园^[14](峰高 54 m)等都是以人工堆山为基础建造的特色景观区,并发挥了良好的社会效益和经济效益。

2.3.3 恢复地貌与耕地

自然地貌与耕地的复原是指利用建筑弃土的合理堆填来复原自然地貌和耕地建设,保护城市自然地貌特色,恢复农林耕地使用,并避免利用掘土后平整场地搞临时开发建设,保护生态区环境。主要适用于因周边大型工程在项目前期有大量土石方需求,就近利用山脊和农地作为掘土场地,造成丘陵岗地破损和农田损毁。复原丘陵坡地时要满足对周边现状地形、村庄、设施等稳定性和安全性的要求。

2.3.4 公路丘陵防护林带

公路丘陵防护林带是基于绿色循环低碳的公路建设理念,在城市环线及放射线高速公路两侧规划建设 50~200 m 宽绿化带^[1],若防护林带以宽 50 m、高 3 m 的三角锥形防护带计算,所用弃土的密度为 $1.8 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$,那么每 1 km 道路就可以消纳 270 t 的工程弃土,数量相当惊人。

利用建筑弃土和绿化种植结合的方式形成立体、美观且安全的自然绿色生态走廊,主要适用于城市外围环线的快速路、绕城公路、高速公路等两侧丘陵防护林带的建设,通过坡地的绿化造景,提高公路防护带降噪、防尘的隔离作用,进而打造立体美观的城市生态屏障。

2.4 劣质弃土的处理

在第 2.3 节提到的多种弃土处理方法的处理对象主要为建设工程中产生的良质弃土,这些土通常含水率适宜,施工性能好,因而无需处理,便可以用于填埋和堆山等工程。由于土资源具有不可再生性,因此对于良质弃土的利用方式尽量以不改造土的理化性质,直接投放使用为主,目前良质弃土的利用技术已然相当成熟。但是,工程弃土中还有相当数量的劣质弃土,这些劣质弃土主要包括各种来源的渣土和淤泥,对于劣质弃土的资源化利用技术是当下研究的难点,有很大的发展空间。

建筑、道路等设施进行拆除、维护时,将产生大量的弃土,这些弃土混杂着混凝土碎块、砂浆、碎砖、碎陶瓷、碎木屑等杂物,成分复杂多变。

这些弃土通过将有害杂质的剔除,就可以用做生产烧结砖、免烧砖等的原料,也可以用于填埋、堆山造景等。

淤泥包括建设工程中产生的泥浆、河道疏浚淤泥、建筑桩基建设产生的泥浆和地铁开挖产生的深

层淤泥等,每种泥浆都具有不同的性能特征。这些淤泥含水率大,化学成分复杂,无法用于常规的填埋、堆弃等,且目前中国也已经禁止将淤泥直接排放。因此,为了处理这些规模庞大的淤泥,需要考虑合理的利用方法。建筑泥浆有机质含量少,成分和性能相对稳定,力学性能好,污染较小,经脱水和改良后可作为建筑材料、填充土或绿化用土等。在国外,泥浆的处理方法包括絮凝剂处理法、固化剂处理法以及机械处理法。中国在泥浆处理方面也有较多方法,如回填处理、再循环使用、机械处理法、固化剂处理法,其中固化剂处理法应用最广泛,效益最好。目前采用较多的有化学固化处理法、化学强化固液分离法、MTC 转化技术等。但是使用固化剂处理工程弃土和废弃泥浆仍存在的问题,首先弃土泥浆的来源复杂,化学分离散性大,固化处理适应性存在不足,其次是固化泥浆需要消耗大量的固化剂,成本较高。

河道疏浚工程中产生的淤泥中有机质含量高,除了少量航道底泥的重金属含量指标略高外,航道底泥基本满足农用标准,可直接利用,其中黏土和粉质黏土的工程特性较好,航道底泥可用于农业生产增肥,淤泥质黏土经减水化处理后也是良好的再生资源^[15]。除了上述的部分淤泥由于其自身性质优良可以在简单处理后直接农用以外,其余的淤泥则需要另外使用方法处理,包括化学处理、热处理等。

2.4.1 固化技术

在处理含水率大的弃土、泥浆以及污泥时,经过综合考察,发现固化技术是目前使用最多,且经济效益最好的方法。固化技术包括自然固化和改良处理技术。

自然固化处理通用做法是在城市郊区寻找一块场地作为污泥的集中堆放场地,待污泥在自重的作用下经过长期的自然固结达到一定强度后再予以利用。此种处理方式简单,成本低,便于操作。其缺点也十分突出:一是污泥含水率大,存在透水性差,难以在短时间内自然脱水固结,一般的固结周期在 5~10 年;二是占地面积大,随着城市土地资源的缩减,难以寻找到合适的堆放场地,且征地成本价格不断提高;三是对于有污染的污泥易造成重金属流失引起二次污染;四是堆放方式不当容易造成大规模塌方等事故。

改良处理技术就是在污泥中添加改良材料,例如水泥,通过水泥与污泥之间的水化反应把污泥改良为高强度、低渗透性的工程材料。目前国内外所

采用的污泥改良材料依据其作用机理主要分为生物酶类和化学类 2 种。这种生物酶改良处理方式相对环保,但是也会带来成本大的问题,而化学改良处理技术在国内外研究较多,是综合效益最好的处理方法。到目前为止,已经有多种改良剂被发现并投入使用,收效甚佳。

2.4.2 弃土烧砖

弃土烧砖技术即利用工程弃土来烧制砖,属于一种建筑垃圾再生利用技术。烧砖在中国已有 3 500 年的历史,传统的秦砖汉瓦所用的原料是黏土,而近年来的过度开发和粗放式生产导致大量的农田毁坏,同时还消耗了大量的不可再生能源,并造成了严重的环境污染。

使用工程中产生的弃土作为原料生产烧砖,不仅回收利用了废弃资源,还能消纳无处堆放的弃土,进而可以保护环境。其实,早在 2017 年的新编国家规范《烧结普通砖》(GB/T 5101—2017)^[16]中,就首次将建筑渣土、淤泥、污泥和固体废弃物加入了烧砖的原料种类中,扩充了烧砖的原料使用范围,不过规范只说明了可以将这些弃土用于制备普通烧砖,至于如何烧砖及相关的技术和工艺均未说明,相关的探索仍在继续。烧砖现在一般使用空心砌块、多孔砌块等,形式多样,相较于实心砖,具有轻质的特点,且保温、隔热、抗震等性能得到了提升,因此如若将弃土用于制作烧结多孔砖、空心砖,则其中的技术将更加复杂,难度也更高。

工程弃土一般成分复杂多变,含水率高,甚至包括有毒有害成分,这种直接挖掘出的弃土一般不能直接投入烧砖生产应用,需要经过复配、干燥、破碎、陈化等处理后,才能得到适合用于制造砖块的原料。烧结用的废弃土因其来源不同,故其化学组成、粒度组成等性质也会各异。经过大量的试验证明,若要成功烧结成优质砖,那么原料土必须拥有特定的化学成分、粒度组成、含水率等。在实际烧结工作中,需要首先鉴定各类来源土的性质,并根据其性质进行土的复合配比,从而得到可以用于制作烧结砖的原料。因此,了解和研究土的组成与微观结构等对烧结砖基本性能的影响机理,从科学上探究原料土和烧制砖之间的联系,是弃土烧砖技术的关键内容。

最终的烧砖成功率除了受到弃土原料的影响,还会受到烧结工艺及技术的影响。目前国内外对废土烧结砖的成套技术均有研究,大致过程为:原料土风化、破碎、粉碎、除杂、粒度分级、配料、干燥脱水、加水均化、陈化、成型、恒温恒湿环境下通风干燥、烧

结成砖、自然冷却,具体流程如图 6 所示。烧结过程中,复配、成型、干燥和烧结是技术的关键点,干燥时

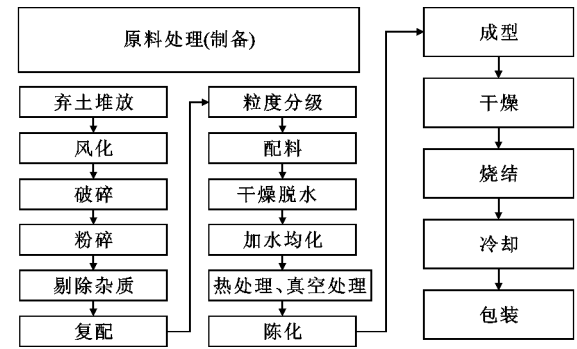


图 6 弃土烧结工艺流程

Fig. 6 Technological Process of Waste Soil Sintering

需要保持一定的温度、湿度和空气流速,否则将导致砖的开裂和变形。在烧结时,同样需要保持烧结窑内的湿度恒定,且对烧结窑的温度控制较为严格,否则仍然会导致烧结后的砖出现开裂、变形等,最终导致成砖的品质下降。

在中国的部分省份,如江苏省、河南省、山东省等,均已经有使用弃土烧制砖的应用案例。然而现在弃土烧砖面临一些问题:

- (1)工程弃土来自地下不同土层带,成分复杂多样,且含水量大,不同土体的组成成分和性质都大不相同,不能直接不加区分地利用,需要进一步研究其复配的方式和原理。
- (2)工程弃土中含有有害杂质等,如何合理再生利用的问题。由于早期可能存在土地污染和地下水污染的影响,工程弃土中可能会存在一些工业废料,包括有毒有害化学成分,其中主要是重金属和以多环芳烃为代表的有机污染物。另外,在工程建设或拆除中混杂进入的混凝土、砂浆等碎屑,会严重影响砖的烧结效果,容易造成烧结砖开裂变形、石灰爆裂、泛霜等。这样的弃土,自然是无法直接用作回填土的,同样也不能简单地直接烧制成砖。如何辨别、筛分以及改善这部分土壤,使之成为可利用的土,是当下研究的一大难题。
- (3)弃土烧制成砖所面临的一系列技术性难题。比如在生产烧结砖的过程中,存在弃土搅拌时失水严重、挤出成型效果不理想、烧结制度不合理、冷却时砖体开裂等问题。烧结完成后,又有成品本身的问题,如成品泛霜、收缩变形、有气泡、表面粗糙等问题。一般弃土烧制成的砖具有质硬、脆性、抗压强度降低等性质变化,因此利用价值有限,存在局限性,若能改善技术,使弃土砖的物理力学性能、耐久性能

等变得更好,就能拓宽其利用空间,提高其利用价值。

(4)用弃土烧制成的砖块不同于传统黏土砖,会出现易破碎的问题,即边角粗糙,裂痕、缺口多,这些缺陷会影响产品的使用性能,使其在砌筑成型后无法保持完整性,并在后期使用中出現破碎问题,极大地制约了弃土烧制砖的应用空间。

2.4.3 弃土免烧砖

免烧砖为利用粉煤灰、煤渣、煤矸石、尾矿渣、化工渣或者天然砂、海涂泥等(以上原料的一种或数种)作为主要原料,不经高温煅烧而制造的砖块。此类产品符合中国“保护农田、节约能源、因地制宜、就地取材”的发展建材总方针,符合国务院曾转发的《严格限制毁田烧砖积极推动墙体改革的意见》,符合国家税务总局《关于印发〈资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录〉的通知》(财税[2015]78号)即征即退政策。

弃土免烧砖是在原免烧砖的基础上,将部分原料替换成弃土或者污泥,制成免烧砖,作为新型环保墙面或者路面材料。此技术近年来已经在中国有所应用,并取得了显著的成效。冯志远等^[17]通过对深圳市弃土免烧砖试点应用项目的研究总结发现,采用非烧结、免蒸压的固化技术,通过压制成型、自然养护的生产工艺,可以将弃土和污泥转化为实心砖、路面砖以及各种砌块产品(免烧砖工艺流程如图7所示),将其应用到建设工程当中,可以取得良好的成效。另外,免烧砖还可以应用于处理特殊类型的弃土,如李建伟等^[18]对使用赤泥制备免烧砖的技术研究中,提出将赤泥进行脱碱除盐处理,即将脱碱赤泥进行热激发并与重晶石粉、矿渣等一起进行机械活化,混料过程中通过加入激发剂激发赤泥本身的潜在活性等方法可以解决赤泥免烧砖泛霜及放射性大等问题,为赤泥免烧砖的应用拓宽了道路。

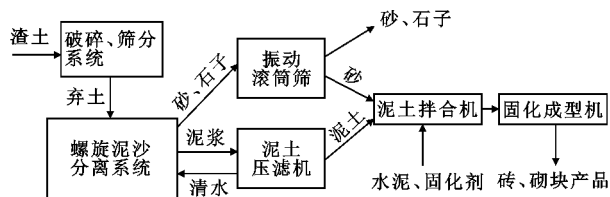


图7 弃土免烧砖工艺流程

Fig. 7 Technological Process of Waste Soil Non-fired Bricks

弃土制砖技术是一个充满朝气和活力的产业,除了具有废物利用、环境保护等优势外,还能不断地优化,朝着更加经济高效的方向发展。随着研究的

深入开展,甚至还可以代替处理一些难以处理的垃圾,如有毒、有害、有放射性的弃土污泥等。

2.5 中国工程弃土利用中存在的问题

目前,中国在工程弃土的利用方面主要面临以下问题:

(1)产大于用,挖大于填。随着中国城市化推进加速,部分大城市对于地下空间的开发量更是逐年增加。目前,工程弃土的排放量要远远大于其消耗量。大城市开挖的土被大量就近堆弃,或者运送到附近城市的临时堆放场进行堆弃,或者大量的优良土被运送到海外丢弃,这是极其浪费的。若不能做到减量化生产和再生利用,那么工程弃土的处理负担始终不可能削减。

(2)分类不明确。目前大量的废弃土都是介于优质弃土和垃圾土之间的土,这些土可以通过技术手段加工成再生材料,但若不进行有效利用就会成为垃圾而被随意处理。因此需要建立更加完善的管理体系,将弃土分类贯彻到底。

(3)优质土壤未得到良好的利用,造成浪费和污染。优质土包括建筑地基或者浅埋地下室、地铁开挖产出的表层土等,具有优良的理化性能,是用于填埋土地、堆山造景、恢复耕地的优质原料。若随意与其他垃圾土混合堆弃,则会造成一定污染,而且容易失水固结,使优质土的质量变低。

3 工程弃土资源化新技术

3.1 弃土固化新技术

在弃土固化技术领域,其研究和更新的方向就是生产出更加高效、更加经济以及更加环保的固化剂。除了传统固化剂,更多高性能的固化材料及技术也在逐渐崭露头角,例如日本的YS工法,主要以DF剂为改良材料,通过DF剂的水合作用产生针状晶体将弃土颗粒包裹捆绑,达到固化效果,此工法已经在上海某钻孔灌注桩基工程中得到成功应用^[19]。

除了将弃土污泥固化后填埋,中国还有多种新型弃土利用方法,如使用固化技术和发泡技术将污泥改良为轻质固化土,其具有抗压强度高、自重轻、水稳性能好、抗干湿循环性能好、抗干缩、温缩性能好、抗冻融性能好、抗流变性能好、抗疲劳性能好、孔隙率高、孔隙结构好等优点,可应用于填筑各类路基,填补坑洞,用于未来的海绵城市的路基,应用前景广阔^[20]。

固化技术最大的优势在于其能原位修复,针对某些土质较差的地方,使用固化技术将废土变成优

质可用土,再在此基础上进行后续建设。对于被转运的废弃土,输送到场站式的弃土资源化工厂则是更好的选择。

3.2 弃土烧结砌块新工艺及整体装配式技术

传统的烧结砖技术需要消耗大量的黏土和能源,使用弃土来烧结砖块的技术解决了烧砖的原料问题。然而,利用传统技术将弃土、淤泥烧制成低品质的实心砖、砌块仍然需要消耗大量的能源,因附加值低,烧结成本高,加上无法适应现代建筑的需求,产品没有市场成为该技术发展中的一大制约因素。因此,弃土烧结砖急需在技术路径、烧结工艺以及产品性能上进行改革创新。

3.2.1 烧结砖燃料及焙烧工艺改进

传统的烧砖技术中,是以煤炭、燃气、煤矸石、粉煤灰等作为烧结砖的燃料,而部分燃料还存在产生有害烟气的问题。现今,中国对工业三废的管理更加严格,因此,清洁能源的选择和使用是烧结砖现代化技术中的重要一环。

内燃烧法相较于外燃烧法能使烧结砖在焙烧中对能源的吸收利用效率更高,内燃烧燃料的掺入还能作为烧结砖的造孔剂,提高烧结砖的孔隙。“内燃为主,外燃为辅”是科学高效利用燃料的方式。然而目前内燃烧法很难控制燃料的均化和烧结温度,故而很难控制烧结砖产品的最终质量,尤其是在烧结多孔砖、薄壁砌块中,内燃烧法的优势无法体现。

在国外,利用生物质废料作为内燃烧法燃料制备烧结砖的研究较为盛行,如 Bories 等^[21]研究了使用麦秸、葵花籽饼制备烧结砖;De Silva 等^[22]使用了稻壳灰制备烧结砖;Phonphuak 等^[23]使用甘蔗渣灰作为烧结砖的燃料及成孔剂;Munoz 等^[24]则是用了葡萄枝木屑制备烧结砖;Bullibabu 等^[25]利用蔗渣和巴尔米拉果纤维的混合物,制备保温烧制黏土砖。一系列的研究表明,农业生物质废物可以用作烧结砖的内燃料,同时也是优质的造孔剂,对于烧结砖的孔隙率和保温隔热性能有明显的提升。然而这些试验目前仅限于实心砖,且造成的砖块力学性能劣化问题仍然存在。因此,使用内燃烧法制作多孔保温砌块的技术目前仅存在理论可能,实际仍然任重道远。

另一方面,中国的城市、农田、工厂等每年都会产生大量的有机废物,如废弃的稻草、秸秆、废木板、枯枝落叶、塑料等。此类废物目前主要被火电厂作为燃料进行焚烧发电处理,但是,在某些农田,为了及时处理有机废物,会将秸秆、稻草等直接焚烧,不

仅大量浪费了这些潜在能源,还会严重污染空气。若将这类有机废物用于烧结砖的燃料,则可实现废物利用。

如今,中国出现了将这些有机废物先进行高温高压碳化,制成生物煤,再用于做烧结砖燃料的新模式。这样的优点在于:①生物煤的化学稳定性要高于各种有机废物,不易腐烂、霉变,利于长期储存;②生物煤的成分较单一,基本以碳为主,便于管理,而原始的有机废料则成分复杂多变,不宜管理;③高温高压碳化后产生的生物煤相较于原始废料是一种更为清洁的能源,其燃烧产物主要为二氧化碳,而原始废料中存在的硫、氮、细微颗粒和有毒有害有机污染物则在工业碳化过程中就被释放和净化,因此在烧结砖时,基本不会产生二氧化硫、氮氧化物、悬浮颗粒等有害废气;④碳化后,原本有机废料自身结构被破坏,体积大大减少,因此生物煤相较于原始有机废料,单位体积产生的热值更大,这不仅能够提升储存空间的利用率,还能降低运输成本,实为一种优质、清洁、高效的燃料。如此,用“垃圾柴”来烧“垃圾土”的新模式产生了,所有原料都是废弃物,但是最终的产物却是优质的建筑材料。有机废物充分燃烧后的灰则可以再次利用,成为弃土烧结砖中的添加剂,从而实现生产过程的全程“零”排放。

3.2.2 砖面烧釉,结构与装饰的结合

随着中国生活水平的提高,人们对居所建筑墙面的要求也随之提高,最早的土墙和水泥混凝土墙因其保温、防水性能差而不再适合现代生活。因此,在建筑主体结构完成后,一般都会进行一次装修,为墙面和地面贴上瓷砖、墙纸等装饰表面。然而瓷砖、陶瓷等与烧结砖一样,同为黏土矿物的烧制品,仅在烧成温度和所用原料有所区别,在制作工艺上具有很大的相似性,因此,传统的陶瓷施釉技术与烧结砖技术的结合在理论上是完全可行的。事实上,在弃土烧结保温制品上施釉并一次烧成,制备自带釉色的砌块,在实际上也已经得到了验证,如图8所示。

将中国传统的陶瓷施釉技术与烧结砖技术相结合,生产自带釉面的烧结保温砌块,从而实现让砖墙自带装饰功能,可以使砖砌墙面一次完成施工,省去后期装修,同样也避免了一般陶瓷墙面的各类维护问题。更重要的是,避免在烧结砖表面涂抹水泥砂浆、贴瓷砖、墙纸等,能够最大程度地将烧结砖的自保温、防水、防火等优异性能发挥出来,既提高了建筑的舒适度,又降低了建筑的成本,还能提高墙面装饰物的耐久度,可谓一举多得。

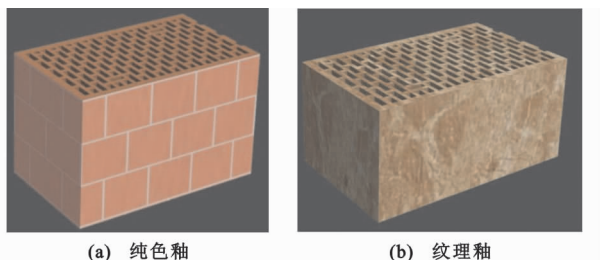


图 8 弃土烧结砖表面烧釉

Fig. 8 Firing Glost on Surface of Waste Soil Sintered Brick

3.2.3 烧结异形砌块满足各种建筑要求

利用烧结砖成型时的高自由度特点,可以制作各种各样的异形砌块,满足建筑中各种异形砌块的制作要求,如图 9 所示。例如蜂窝状砌块可以用作特殊功能的墙体,不仅结构强度高,还能提供孔洞用于储物。在屋顶、屋檐、墙角、窗沿、门框等部位可以针对性地烧制特殊形状的砌块,可以使用带弧度的砌块来砌筑光滑的圆弧形墙面,可以利用烧结砖的耐火性来制作烟囱管道等特殊结构。

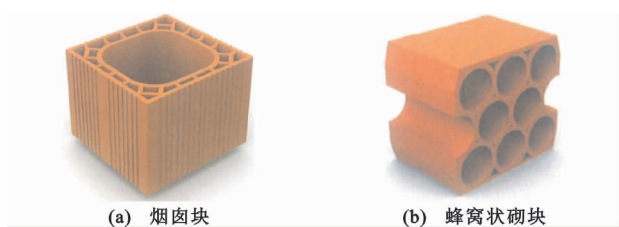


图 9 异形砌块

Fig. 9 Profiled Block

总之,烧结制品对于其外形的设计可以有很高的自由度,且适合大规模批量生产,具有广阔的应用前景。

3.2.4 烧结砖砌块与整体装配式技术结合

弃土烧结砌块适合工厂流水线生产,因此机械化和自动化程度高,然而此条件同样适合建筑业中的装配式建筑。烧结砖砌块与整体装配式技术可以方便地结合,各取所长,成为全新的应用模式——弃土烧结装配式技术。

该技术有其独特的优势,如使用烧结砌块砌筑墙体时,若需要插入钢筋或者灌注混凝土,则需要特定部位使用特殊外形的砌块及采用专业的拼搭方式。这将产生在施工现场操作难度高的问题,而将该技术与装配式技术相结合就可以避免这个问题。此外可以充分利用烧结砖的保温、防火等性能,在工厂加工成一面整体墙体,适合流水线工作,提高效率,降低操作难度。在施工现场可以直接整体吊装,

适合于低层建筑结构或者中高层框架结构的内墙及外墙,而且装配式墙可以搭配传统的钢筋混凝土等使用,灵活度高。

弃土烧结保温砌块装配式构件的施工应用与普通钢筋混凝土装配式建筑的原理和方式相似,能够方便地投入实际工程中。

在建筑拆除工作中,装配式结构可发挥其快速、方便地进行拆除的优势,且由于烧结砖的耐久性好,使用寿命非常久,拆除后的烧结砖片墙可直接整体回收并再利用,这将极大地减少建筑废物的排放量,提高建筑拆除物的回收利用率。

3.2.5 烧结砖砌体结构中的钢筋混凝土结构骨架

钢混结构在现今建筑业中大量应用,在传统砌体结构中也配置钢筋或浇筑混凝土构造柱、圈梁等受力构件,目的是充分利用钢混材料高强度的特性强化建筑结构的可靠性。而在弃土烧结砖砌体结构中,烧结砖砌筑墙体施加配筋与混凝土模式也可以发生一定的转变。

烧结砖结构形式的多样性转变是当下烧结砖走出市场困境的另一个重要方式。烧结砖结构不再仅限于墙体的砌筑,而是将外墙、角柱、过梁全部一体化砌筑,通过改变烧结砖砌块的外型、构造等,实现房屋采用烧结砖全覆盖的目的。烧制特型的开槽砖可用于放置配筋,最后浇筑砂浆、混凝土等填充料,将烧结砖、钢筋、填充料结合在一起,既能利用钢筋增强结构强度,又能充分发挥烧结砖材料自身的性能。

烧结砖的导热系数低,热惰性强,吸水排水效果强,因此烧结砖结构具备保温、隔热、呼吸性,在国内外受到较高的评价,称之为“活着的材料”。

如今,中国对绿色建筑的要求逐步提高,目前住宅和公共建筑普遍执行的是节能 65% 的标准,部分地区如北京、山东、浙江等甚至执行 75% 设计标准^[26]。建筑节能并不是仅指建造过程中的节能,更在于后期使用过程中的节能。研究显示,围护结构的传热量占建筑的 70%~80%,建筑采暖和空调能耗占据建筑总能耗的 50% 左右^[27],这意味着如果未能在建筑建设时做好围护结构的保温隔热工作,那么后期使用时将产生更多的能耗。在建筑墙体施加保温隔热层可以提高建筑的保温隔热性能,但是由此损失的有效建筑面积同样值得关注。

烧结砖墙体因其自身能满足围护、保温、隔热、防火、防水等要求,将多种建筑需求集于一身,且耐久性出色,寿命极长,能大大降低房屋的后期维护、

采暖、空调等成本。烧结砖中配筋的新型结构形式与此前的传统构造梁柱砌体墙结构形式相比,不仅满足了烧结砖材料的全覆盖,完善了结构的防水防火能力,还能削弱传统构造梁柱产生的热桥效应,进一步提高了结构的保温隔热性能,具有很大的潜能。

4 结 语

中国工程弃土数量庞大,成分复杂,缺少有效管理,资源化利用水平低。为了解决上述问题,必须从以下几个方面入手。

(1)工程管理方面。中国弃土排放量巨大,占据世界首位,但是对弃土的资源化利用效率却较低。究其原因,虽然不缺乏对弃土的终端处理措施,但对弃土管理存在低效性和滞后性。从弃土的源头产生、前期处理、中途运输、临时堆放,再到最后的终端处理进行高效的管理不仅可以从源头将弃土减量,更能在终端将弃土高效再生资源化,同时减少弃土所带来的一系列土地占用、水土流失、环境污染、工程事故隐患等问题。这其中,源头控制是大幅降低工程弃土排放的第一步,提高终端处理能力是解决弃土问题的基本。

(2)创新技术方面。技术的革新是解决弃土问题的基础。在传统的填埋、堆山等直接资源化手段无法满足日益增加的弃土排放量时,需要革新原有技术的不足,提高其处理能力及处理效率,降低其产生的能耗、成本和污染。以弃土烧结砖为例,传统烧结砖技术使用的原料主要为黏土,成分及性能稳定;弃土烧结砖所用的原料主要为弃土,如何将来源各异、成分复杂、性能不稳定的弃土变成稳定的、适宜烧结的土,就成为弃土烧结砖所面临的主要难点,目前所用的复配技术仍存在一定的不足,在实际工程中还面临着如何快速将未知来源、成分、性能的弃土复配成适合烧结土的另一难题。另一方面,传统烧结砖技术由于能耗巨大、效率低下、污染较大,已不适合现今中国的发展模式。天然气和生物煤等清洁能源的利用,隧道窑技术的发展等,将烧结砖的这一弊端大大削弱,让生态环保也能成为烧结砖的一大优点。此外,成型、干燥和烧结等则是烧结砖技术面临的工艺难题,烧结砖工艺的改进永远是烧结砖技术所面临的挑战。在烧结砖技术中,材料和工艺是两个密不可分、相辅相成的重要因素,因此,对于烧结砖来说,当材料发生了改变时,工艺必然发生改变,其中所蕴含的机理变化若能被揭示,将极大地促进弃土烧结砖技术的进步。

(3)法律法规方面。合理的法律法规的推行,对弃土问题从产生到处理的全过程管理都具有立竿见影的指导和约束作用,是对弃土资源化再利用的重要支持力量。颁布强制性法律条文,有利于解决中国弃土乱堆、偷排等问题,有利于中国对于弃土资源化技术研究的推进,进而有利于从根本上解决中国弃土资源化利用率低的问题。

参考文献:

References:

- [1] 洪月菊,杜 遂. 城市弃土资源化途径探索及管理实践——以武汉市为例[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(3): 85-88.
HONG Yue-ju, DU Sui. Exploration and Management Practice on Resourced Approaches of City Engineering Spoils; A Case Study of Wuhan[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2019, 27(3): 85-88.
- [2] 张增杰,韩玉花. 城市地下空间开发中的弃土管理和处置对策[J]. 城市环境与城市生态, 2008, 21(4): 22-24.
ZHANG Zeng-jie, HAN Yu-hua. Management and Treatment Countermeasures About Discarded Soil in Underground Space Exploitation in City[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2008, 21(4): 22-24.
- [3] 程 都. 试论促进我国建筑垃圾资源化产业发展[J]. 新西部, 2016(27): 71-72, 25.
CHENG Du. On Promoting the Development of Construction Waste Recycling Industry in China[J]. New West, 2016(27): 71-72, 25.
- [4] 郑喜坤,汪庆华,鲁安怀,等. 浙江土壤矿物组成特征[J]. 地质通报, 2005, 24(8): 761-766.
ZHEN Xi-kun, WANG Qing-hua, LU An-huai, et al. Features of the Mineral Composition of Soils Zhejiang, China[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(8): 761-766.
- [5] 李建明,王志刚,王一峰,等. 基于固体废弃物资源化利用的“无废城市”建设初探[J]. 中国水土保持, 2019(7): 25-29.
LI Jian-ming, WANG Zhi-gang, WANG Yi-feng, et al. On the Construction of “Waste Free City” Based on the Utilization of Solid Waste[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(7): 25-29.
- [6] 马志恒,王卫杰,张冠洲. 城市工程渣土资源分类及综合利用研究[J]. 江苏建筑, 2015(6): 100-103.
MA Zhi-heng, WANG Wei-jie, ZHANG Guan-zhou. Study on City Engineering Waste Resources Classification and Comprehensive Utilization [J]. Jiangsu Construction, 2015(6): 100-103.

- [7] 朱 伟,刘汉龙,高玉峰.工程废弃土的再生资源利用技术[J].再生资源与循环经济,2001(6):32-35.
ZHU Wei, LIU Han-long, GAO Yu-feng. Recycling Technology of Engineering Waste Soil[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2001(6):32-35.
- [8] 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 Jian-zhuang, ZHANG Qing-tian, Duan Zhen-hua, et al. The Exploration of Using Construction Waste in Piling up Hill for Making Scenery[J]. Structural Engineers, 2019, 35(4):60-69.
- [9] 董 波.园林景观项目全面质量管理体系研究——西安文化景山公园造山项目实例[D].西安:长安大学,2012.
DONG Bo. Study on the Total Quality Management System of Landscape Project — Example of Xi'an Wen Jing Park Mountain Building Project[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [10] 巨 青.城市垃圾场生态修复的构、建筑物设计[D].北京:清华大学,2011.
JU Qing. Architecture Design and Construction for Ecological Restoration of Urban Landfill[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [11] 付国永.建筑垃圾在城市公园建设中的应用探讨[J].砖瓦,2013(4):42-43.
FU Guo-yong. Application of Construction Waste in the City Park[J]. Brick-tile, 2013(4):42-43.
- [12] 王和祥,韩 庆,宋士宝.建筑垃圾堆山造景技术初探——天津南翠屏公园建设[J].中国勘察设计,2009(12):82-84.
WANG He-xiang, HAN Qing, SONG Shi-bao. Architectural Technology of Heaping Mountain Landscape by Garbage — Tsui Ping South Park Construction in Tianjin[J]. China Engineering & Consulting, 2009(12):82-84.
- [13] 何大为.奥林匹克森林公园堆山工程沉降变形观测及其分析[D].西安:西安建筑科技大学,2007.
HE Da-wei. Observation and Deformation Analysis on the Construction Settlement of Piling Mountain Project in Olympic Forest Park[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.
- [14] 袁瑞祥,张 洋.无锡太湖新城堆山工程变形监测及分析[J].交通科技,2011(增2):24-26.
YUAN Rui-xiang, ZHANG Yang. Deformation Monitoring and Analysis of Taihu New Town Mountain Piling project in Wuxi[J]. Transportation Science & Technology, 2011(S2):24-26.
- [15] 唐 净,郑金余.浙北地区内河航道土方综合利用新思路[J].环境污染与防治,2009,31(12):109-111.
TANG Jing, ZHENG Jin-yu. New Idea of Comprehensive Utilization of Earthwork in Inland Waterway of North Zhejiang Province[J]. Environmental Pollution & Control, 2009, 31(12):109-111.
- [16] GB/T 5101—2017,烧结普通砖[S].
GB/T 5101—2017, Fired Common Brick[S].
- [17] 冯志远,罗 霄,黄启林.余泥渣土资源化综合利用研究探讨[J].广东建材,2018(2):69-71.
FENG Zhi-yuan, LUO Xiao, HUANG Qi-lin. Study on the Comprehensive Utilization of Residual Sludge [J]. Guangdong Building Materials, 2018(2):69-71.
- [18] 李建伟,马 炎,张春光,等.赤泥制备免烧砖的研究现状及技术要点探讨[J].矿产综合利用,2019(3):7-10.
LI Jian-wei, MA Yan, ZHANG Chun-guang, et al. Research Status and Technical Points of Preparation of Unburned Brick by the Red Mud[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(3):7-10.
- [19] 孙卫国,张冠军,任 翔,等.建筑弃土(泥浆)改良技术研究与应用[J].地下工程与隧道,2015(4):34-37.
SUN Wei-guo, ZHANG Guan-jun, REN Xiang, et al. Research and Application of Construction Waste Soil (Slurry) Improvement Technology[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2015(4):34-37.
- [20] 王新岐.泥浆固化轻质土应用技术与展望[J].城市道桥与防洪,2016(9):69-74.
WANG Xin-qi. Study and Expectation of Slurry Curing Light Soil Application Technology [J]. Urban Roads, Bridges & Flood Control, 2016(9):69-74.
- [21] BORIES C, AOUBA L, VEDRENNE E, et al. Fired Clay Bricks Using Agricultural Biomass Wastes: Study and Characterization [J]. Construction and Building Materials, 2015, 91:158-163.
- [22] DE SILVA G H M J S, 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.
- [23] 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.
- [24] 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.

[25] 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, 2018, 5(2): 6973-6980.

[26] 姬广庆. 在节能 75%设计标准下烧结砖产品发展的思考[J]. 砖瓦, 2019(2): 70-73.
JI Guang-qing. Development Prospect of Fired Brick Products Under 75% Energy Saving Design Standard [J]. Brick-tile, 2019(2): 70-73.

[27] 马建勋,崔玉华,雷 波. 新型保温烧结墙体材料之思考[C]//杨伟军,高连玉,梁建国. 砌体结构理论与新型墙材应用. 北京:中国城市出版社, 2007: 270-273.
MA Jian-xun, CUI Yu-hua, LEI Bo. Thinking About New Type of Heat Preservation and Sintering Wall Material[C]//YANG Wei-jun, GAO Lian-yu, LIANG Jian-guo. Masonry Structure Theory and Application of New Wall Materials. Beijing: China City Press, 2007: 270-273.