

DOI: 10.7672/sgjs2025230053

建筑施工废弃物低碳处理与再利用技术研究进展*

林佐江¹,周予启¹,赵忠忠²

(1. 中建一局集团建设发展有限公司,北京 100102; 2. 清华大学土木工程系,北京 100084)

[摘要] 建筑施工过程中产生大量的建筑废弃物,占用土地资源、危害环境,使绿色建筑发展面临严峻考验,对建筑废弃物的综合处置刻不容缓。综述并分析了建筑废弃物的来源、性质及综合处置现状,发现目前主要集中于研究单独的建筑废弃物,缺乏对建筑废弃物系统的研究与处置流程。基于此,分析了不同建筑废弃物的低碳处理技术并评述了其再利用途径。

[关键词] 绿色建筑;废弃物;低碳;再利用

[中图分类号] TU18

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)23-0053-08

Research Progress on Low-carbon Treatment and Recycling Technology of Construction Waste

LIN Zuojiang¹, ZHOU Yuqi¹, ZHAO Zhongzhong²

(1. China Construction First Group Construction & Development Co., Ltd., Beijing 100102, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A large amount of construction waste was generated during the construction process, which occupies land resources and endangers the environment, making the development of green buildings face a severe test. Therefore, the comprehensive disposal of construction waste is extremely urgent. This paper reviews and analyzes the sources, properties and comprehensive disposal status of construction waste. It is found that the current research mainly focuses on the study of individual construction waste, and lacks the research and disposal process of construction waste system. This paper analyzes the low carbon treatment technology of different construction waste and reviews its recycling ways.

Keywords: green building; waste; low carbon; recycling

0 引言

2021年6月,我国《关于推动绿色建筑发展的指导意见》开始实施,其中表明了绿色建筑核心理念在于可持续发展^[1],不仅需要关注建筑物本身的性能,还强调在设计、建造、运营乃至拆除过程中的环境友好性。

施工阶段作为建筑结构生命周期中的一个重要环节,在建设、拆除、维修过程中会产生大量的建筑废弃物,如图1,2所示。据统计,2023年我国建筑废弃物约占城市废弃物总生成量的40%以上,是生活垃圾产量的8倍左右,在建筑废弃物中施工垃圾和建筑拆除垃圾占40%左右^[2]。在建筑物的拆

除阶段^[3-4],会产生 $1\text{t}/\text{m}^2$ 左右的建筑废弃物,而在建造阶段,产生大约 $0.06\text{t}/\text{m}^2$ 的建筑废弃物,大量的建筑施工废弃物不仅占用宝贵的土地资源,而且会对生态环境造成污染。

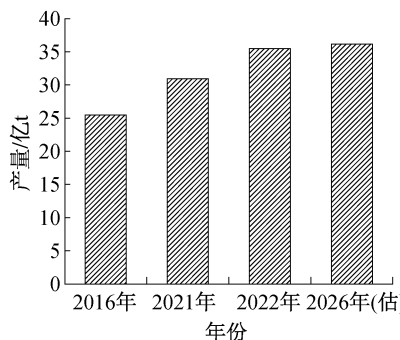


图1 建筑废弃物产量

Fig. 1 Production of construction waste

* 国家自然科学基金(52408276)

[作者简介] 林佐江,正高级工程师,E-mail: linzuojiang@chinaonebuild.com

[通信作者] 赵忠忠,博士后,E-mail: zhaozz@xauat.edu.cn

[收稿日期] 2025-07-28

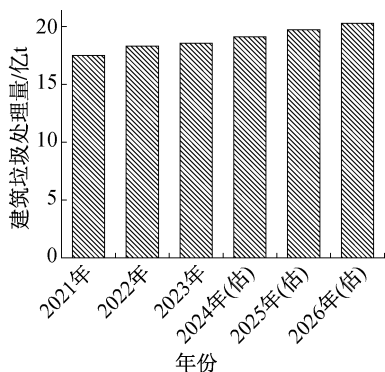


图2 建筑废弃物处理量

Fig. 2 Disposal capacity of construction waste

《建筑垃圾资源化利用指导意见》中提出,加强建筑废弃物的分类、收集、运输、处理等各环节的管理,到2030年新建建筑施工现场所产生的建筑垃圾排放量不高于300t/万 m^2 ,同时资源化利用率至少达到55%。

发达国家已经形成了一系列较为成熟的技术体系和管理经验^[5-6],如图3所示,发达国家建筑施工废弃物的综合利用率均超过70%^[7],我国建筑施工废弃物的综合利用率仅为30%。在建筑施工废弃物资源化利用方面的科学研究和工程实践仍存在较大差距与技术挑战^[8]。

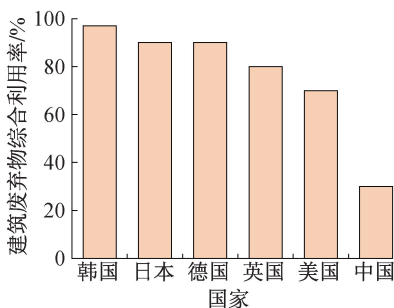


图3 建筑施工废弃物综合利用率

Fig. 3 Comprehensive utilization rate of construction waste

本文分析建筑施工废弃物的特点及分类,探索其低碳处理方法和再利用途径,从而为建筑施工废弃物的综合处置提供思路。

1 建筑施工废弃物现状分析

根据CJJ/T 134—2019《建筑垃圾处理技术标准》,建筑施工废弃物按其来源可分为工程渣土、工程泥浆、工程垃圾、拆除垃圾、装修垃圾等五大类。其中,拆除垃圾占比为45%左右,是最主要的建筑垃圾来源。如表1所示,建筑施工废弃物的主要成分为废旧混凝土、砖渣,以及少量的钢材、木材、塑料有机物,其中非金属材料占90%左右^[9]。

表1 建筑施工废弃物类型与分类

Table 1 Types and classification of construction waste

类型	分类组成
工程渣土	碎砖块(砖、石、混凝土等)、渣土
工程泥浆	泥浆、泥砂
工程垃圾	无机非金属材料(混凝土、水泥制品、砂石、砖瓦、陶瓷、砂浆、轻型墙体材料等)、金属类、有机类(木材、塑料、织物、纸类、沥青类等)、其他类
拆除垃圾	无机类(混凝土、石材、砖瓦砌块、陶瓷、玻璃、轻型墙体材料、石膏、土)、金属类、木材类、有机可燃类(塑料、纸制品等)、其他类
装修垃圾	无机类(水泥制品、凿除、抹灰等产生的旧混凝土、砂浆层等矿物材料)、金属类、有机类(木材、塑料、织物、纸类、沥青类等)、其他类

1) 工程渣土

工程渣土指各类建筑结构的基础在开挖过程中产生的弃土,主要产生于新开工的工地,主要成分为土石方,占比70%~90%,混凝土和砖块占比5%~20%,主要氧化物为 SiO_2 ,占比在70%左右。

2) 工程泥浆

工程泥浆是指钻孔桩基、地下连续墙、泥水盾构等施工过程中产生的泥水混合物^[10]。其中水占比60%~90%、悬浮固体物占比10%~40%、化学添加剂占比1%~5%。

3) 工程垃圾

工程垃圾指建设过程中产生的混凝土、沥青混合料、砂浆、模板等废弃料,不同结构中工程垃圾的成分与组成比例如表2所示。工程垃圾占施工垃圾、拆除垃圾和装修垃圾总生成量的30%~40%^[11]。

表2 不同结构中工程垃圾组成

Table 2 Composition of engineering waste in different structures

垃圾成分	工程垃圾组成比例/%		
	砖混结构	框架结构	框架剪力墙结构
砖和砌块	30~50	15~30	10~20
砂浆	8~15	10~20	10~20
混凝土	8~15	15~35	15~35
桩头	—	8~15	8~20
包装材料	5~15	5~20	10~20
屋面材料	2~5	2~5	2~5
钢材	1~5	2~8	2~8
木材	1~5	1~5	1~5
其他	10~20	10~20	10~20
合计	100	100	100
垃圾产生量/ ($kg \cdot m^{-2}$)	50~200	45~150	40~150

4) 拆除垃圾

拆除垃圾指建筑物拆除过程中产生的混凝土、砖瓦、砂浆、陶瓷、石材、金属、木材等废弃物。如图

4所示,拆除垃圾主要为废弃黏土砖和混凝土,来源于旧城改造以及新建施工现场拆除的临时设施,产量占施工、拆除和装修垃圾总量的50%~60%。

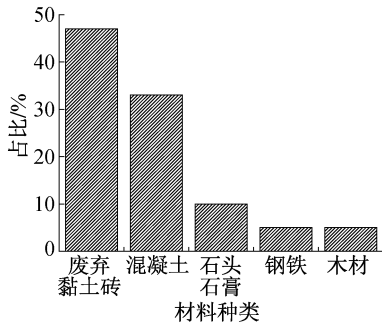


图4 拆除垃圾组成

Fig. 4 Composition of demolition waste

5) 装修垃圾

装修垃圾指装修过程中产生的废弃物。其成分复杂,产生源较分散、产生量较少。主要来源于新建建筑物、构筑物及二次装修建筑物、构筑物的施工过程。装修垃圾占施工、拆除和装修垃圾总量的5%左右。

2 低碳处理技术进展

由于建筑施工废弃物中无机非金属含量较多,因此本文主要研究无机非金属废弃物的处置技术与再利用途径,如图5所示。建筑施工废弃物的处置流程如下:源头减量→分类收集→运输→分拣→资源化利用→无害化填埋。

工程渣土及工程泥浆的处置方式主要以建筑施工现场内部平衡为主,其中的页岩、石料等可部

分运输至建筑垃圾综合利用厂。

工程垃圾与拆除垃圾进行源头分拣,装修垃圾直接进入分选场。分拣后,金属、木材等进入回收再利用渠道,混凝土块、砖块、碎石等进入建筑垃圾综合利用厂,生产可再生骨料、混凝土、活性粉等,少量不可利用部分进入填埋场。

文献[12-14]的研究结果表明,在建筑施工废弃物的处置过程中,资源化利用是首要的处置方式(见表3),因此低碳处理技术与废弃物再利用途径尤为重要。

表3 建筑废弃物处理及利用顺序

Table 3 The order of construction waste treatment and utilization

类别	处理及利用顺序
工程渣土	资源化利用>堆填>作为填埋场覆盖用土>填埋处置
工程泥浆	资源化利用>堆填>作为填埋场覆盖用土>填埋处置
工程垃圾	资源化利用>堆填>填埋处置
拆除垃圾	资源化利用>堆填>填埋处置
装修垃圾	资源化利用>填埋处置

2.1 物理处置技术

建筑施工废弃物的成分复杂,含有金属、有机物、无机物等,直接利用效率较低且难度较大,不利于低碳发展,因此必须利用物理处置技术将废弃物进行破碎、分拣、筛分。

1) 分选技术

分选技术^[15]主要有磁性分选、人工分拣、重力分选、粒径筛选、光电识别分拣等,将建筑施工废弃物中可回收利用或不可利用的物质分离出来,实现

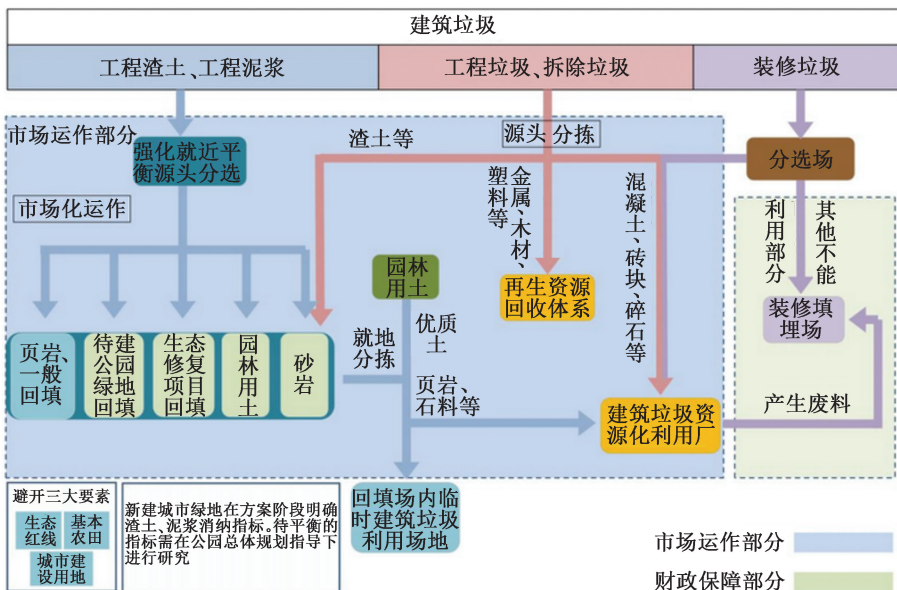


图5 建筑施工废弃物处理流程

Fig. 5 Treatment flow of construction waste

钢筋、木料、塑料、合金、混凝土块等分类。此外,目前可实现工艺组合分选技术,例如采用风、水、气、磁、光电及数字图像处理技术,对废弃物进行综合分选。

但是目前的分拣技术以快速处置建筑垃圾存量为出发点,未能精细化分离建筑垃圾中的重物质,例如混凝土块、废玻璃、陶瓷、砖块等,未来分选技术的发展方向主要以智能精细化分拣为主。

2) 破碎技术

采用分级破碎技术^[16]破碎大体积建筑施工废弃物。如表 4 所示,在破碎时,一级破碎给料粒径 600~1 200mm,可选择不同型号的颚式、反击式、锤式、双齿辊破碎机进行破碎,第 2 次破碎选用反击式破碎机破碎,随后根据工程应用采用圆锥、锤破机及辊式破碎机将块体再次破碎为粒径 0~10mm 的颗粒。破碎后的物料可作为细集料和粗集料^[17]。

表 4 破碎阶段的物料粒径

Table 4 Particle size of material in crushing stage

粒径种类	破碎阶段		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次
给料粒径	600~1 200	100~250	2~60
出料粒径	100~250	2~60	0~10

由于大型移动式破碎筛分设备可就地处置破碎和筛分建筑垃圾,具有生产速度快且处置成本低等优点,因此移动式破碎筛分技术也得到了大力发展^[18]。

3) 粉磨技术

在破碎筛分过程中会产生混凝土粉和废弃黏土砖粉,具有一定的水化活性。但是由于其反应活性较低,需采用一定的技术手段来提升其活性。

粉体粒径的大小和均匀性直接影响终端产品的性能与质量。超细粉体因其显著增大的比表面积,展现出优异的反应活性和分散性能,使其在高性能材料制备中具有不可替代的应用价值。在实际生产中,采用粉磨活化是最直接与便捷的一种方法,微粉经过超细粉磨后,其活性可以显著升高,因此粉磨技术起着决定性作用。

目前常见的粉磨技术有球磨、偏心磨、辊式磨等。然而,传统粉磨技术普遍存在能耗高、效率低的固有缺陷,严重制约了相关产业的可持续发展。超细粉磨与分选系统的引入,旨在通过构建闭路循环,实现对粉磨物料的动态控制,从而避免过粉磨和欠粉磨现象,最终提升粉磨效率和产品质量。在此系统中,分选单元能够精确控制产品的粒度分

布,以满足不同应用场景的特定需求,并能通过及时分离合格产品,有效降低不必要的能量损耗。

张传仁等^[19]设计了超细粉磨与分选系统,如图 6 所示,在粉磨过程中分选出超细灰,不合格的粗粉返回磨机继续粉磨,产品的比表面积可达到 1 500m²/kg。此外,高性能助磨剂的加入能够降低物料的表面能,从而减少粉磨过程中的团聚现象,使物料更易于破碎。此外,助磨剂还能够改变物料的破碎机理,提高粉磨效率,降低能量消耗,甚至具备改善产品性能的潜力。冯春花等^[20]在粉磨过程中加入高性能助磨剂,粉磨后产品粒径在 3~32μm 的比例升高,活性增大。不同的材料需要选择与之相匹配的研磨体和粉磨设备,以获得最优的粉磨效果。粉磨时间、转速和进料量等工艺参数对粉磨效率和产品质量具有显著影响,因此需要通过试验设计进行优化。此外,对现有粉磨设备进行技术改进,例如优化衬板结构和提高传动效率,也能够有效提高粉磨效率^[21-22]。

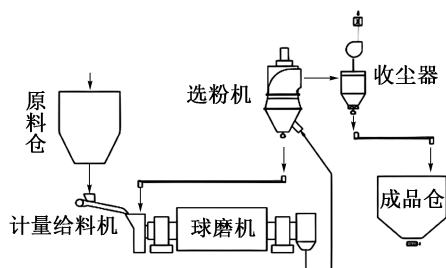


图 6 超细粉磨技术

Fig. 6 Superfine grinding technology

2.2 材料再生技术

2.2.1 再生骨料改性技术

相对于天然骨料,使用再生骨料虽然可以降低碳排放与节约天然资源,但由于再生骨料中残留的水泥浆体、界面过渡区的存在、内部微裂缝以及颗粒棱角较多,这些不利因素会对新拌再生混凝土的流动性、力学性能及耐久性等产生负面影响。

郭远新等^[23]通过采用颗粒整形技术,成功改善了再生骨料的各项指标,使其形状更加接近于天然骨料,从而提升了再生骨料的整体性能,使其产品性能符合 GB/T 25177—2010《混凝土用再生粗骨料》的要求。

针对再生骨料内部微裂纹和界面过渡区的问题,碳化技术和微生物改性技术被有效地应用于修复这些缺陷,如图 7 所示。碳化技术可以使再生骨料表面的水泥浆体发生碳化反应,填充微裂纹,并增强界面结合。微生物改性技术则利用微生物代

谢产生的生物矿物,修复骨料内部微裂纹,从而进一步强化再生骨料的性能。



图7 骨料增强技术

Fig. 7 Aggregate reinforcement technology

2.2.2 再生微粉活化技术

再生微粉的主要化学组成为 SiO_2 , Al_2O_3 以及 CaO ^[24]。为了充分发挥其潜在价值,提升其在工程应用中的性能,多种活化技术被开发并应用于再生微粉的处理过程中。

1) 机械活化技术,作为物理活化的一种,其主要作用机理在于通过机械力作用改善再生微粉的颗粒形貌,增大其比表面积,进而提高其反应活性。这一过程可以优化颗粒级配,降低孔隙率,使得微粉在后续应用中能够更好地与其他材料结合,形成致密结构。

2) 高温活化技术,利用了再生微粉在高温条件下发生的物理化学变化。在高温作用下,微粉中的某些组分会发生脱水反应,同时部分矿物相会发生分解,这些变化会导致微粉内部产生更多的活性位点,从而提高其反应活性。

3) 碳化活化技术,其作用原理基于再生微粉中的活性组分,如硅酸盐矿物等,与 CO_2 发生化学反应。该反应能够生成硅胶和碳酸钙等产物,这些产物通常具有较高的活性,能够促进再生微粉在后续应用中的性能提升。

4) 碱激发活化技术,通过引入碱性激发剂,改变再生微粉中活性组分的聚合状态。在碱性环境下,再生微粉中的硅氧四面体和铝氧四面体等活性组分的聚合度会降低,从而产生更多的活性键。这些活性键能够与其他工业废渣等材料发生耦合反应,形成具有一定强度的水化产物。

2.2.3 其余再生技术

不同工业废渣的化学与矿物组成不同,且难以单独作为辅助胶凝材料使用,然而研究表明,不同固废组分间存在潜在的协同反应机制,为开发复合型 SCMs 提供了理论支撑。通过合理利用多种固废间的协同效应,可制备出性能优异的活性微粉,弥补单一固废的性能短板,并通过组分间的互补增强作用,提升最终产物的综合性能^[25]。此外,随着对工业废弃物胶凝机理的深入研究,除传统的碱激发

技术外,硫酸盐激发及氯盐激发技术亦逐渐成熟并广泛应用。这些新兴激发技术通过引入硫酸根离子(SO_4^{2-})或氯离子(Cl^-),诱导固废中特定组分发生化学反应,生成具有胶凝活性的产物,从而提升废渣的利用价值。

此外,工业固废经综合处置后,可衍生出再生骨料及再生活性微粉等多种再生材料。这些材料可进一步应用于制备各类环保型建筑材料,包括再生混凝土、再生免烧砖/砌块、再生砂浆以及再生路面/路基填料等。此类再生建材产品不仅可部分替代传统建材,降低对天然资源的开采依赖,同时亦能有效消纳大量工业固废,减轻环境负荷,实现资源的循环利用^[26]。

2.3 建筑施工废弃物资源化处理中心

建立建筑施工废弃物资源化处理中心是实现建筑垃圾高效管理和可持续发展的关键策略,如图8所示^[27]。这类中心的核心功能在于集成化、系统化地处理建筑施工废弃物,显著提高废弃物的综合处置利用率,并有效降低处理过程的经济成本 and 环境影响。通过对废弃物进行集中处理和资源化利用,可以优化废弃物的处置流程,发掘其最佳的再利用途径,从而实现废弃物的低碳化管理和可持续发展。



图8 建筑施工废弃物资源化中心

Fig. 8 The center of construction waste recycling

建筑施工废弃物资源化处理中心能够整合分选、破碎、筛分、活化等多种工艺,形成完整的处理链条。这种集成化处理方式能够最大程度地回收废弃物中的有效组分,例如将废混凝土块破碎成再生骨料,将废砖瓦等加工成再生活性微粉,从而提高资源的利用效率。同时,通过集中处理,可以实现规模化效益,降低单位废弃物的处理成本。

此外,这类中心能够对废弃物进行精细化管

理,根据废弃物的性质和组成,制定最优的处置路线,例如将可回收的金属、塑料等进行分类回收,将有机物进行堆肥处理,将无法利用的惰性材料进行安全填埋,从而最大限度地减少废弃物的最终处置量,降低其对环境的影响。

更重要的是,建筑施工废弃物资源化处理中心能够通过技术创新和工艺优化,探索废弃物的最佳再利用途径。例如,将再生骨料和再生活性微粉用于生产再生混凝土、再生砂浆等新型建材,实现废弃物的高值化利用。这种以资源化利用为核心的处置方式,不仅能够减少对天然资源的依赖,还能降低建材生产过程中的碳排放,推动建筑行业的绿色转型。

2.4 装配式建筑技术

装配式建筑因其契合现代建筑业高效、环保、可持续发展的诉求而备受瞩目,具有可以显著提升建造效率、提升工程质量稳定性、优化资源配置、降低环境负荷、减少建筑施工废弃物等优势,得到广泛发展。其核心在于将建筑构件的生产环节前置于工厂环境中,待构件预制完成后再运送至施工现场进行高效组装。这种技术模式因其显著的施工速度优势、节能环保特性以及高度的灵活性,近年来得到了迅猛发展。相较于传统的现场浇筑技术,装配式建筑技术在减少废弃物产生量方面表现突出。同时,该技术还有助于降低二氧化碳排放量,并减少对土地资源的过度消耗^[28]。

在“十四五”期间,我国每年新增装配式建筑面积约 $1.2 \times 10^9 \text{m}^2$,若其中 20% 的楼地面保温工程、40% 的轻质墙体采用建筑垃圾资源化产品,则每年可消纳约 $8.0 \times 10^8 \text{m}^3$ 的再生建材。装配式建筑技术体系分类如图 9 所示。

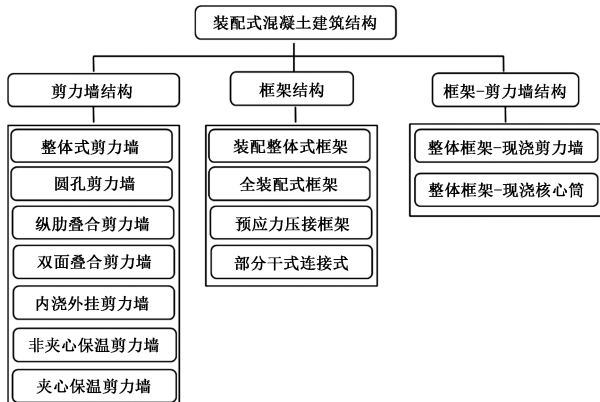


图 9 装配式建筑技术体系

Fig. 9 Prefabricated building technology system

3 建筑施工废弃物再利用途径

3.1 混凝土、砖石和玻璃类废弃物

1) 再生骨料,废弃混凝土和砖块通过上述破碎、筛选等技术处置后,可制备再生骨料,用于混凝土拌制、铺路、地基填充等方面。

2) 再生微粉,将建筑废弃物经过精细化破碎、研磨至微米级粒径后产生超细颗粒状材料,具有较高的比表面积和良好的填充能力,具备一定的反应活性,可作为混凝土、砂浆等的掺和料。

3) 再生砂浆,将上述再生细骨料代替天然砂生成再生砂浆,对节省天然砂资源、发展循环经济具有重要意义。

4) 废弃的玻璃碎片可以熔化后重新制成玻璃容器。将玻璃碎片加工成细小颗粒或粉末,用于制造玻璃纤维绝缘材料或玻璃马赛克等装饰。

3.2 工程渣土

工程渣土的再利用流程如图 10 所示,工程渣土经过一系列处理后,可转化为建设用土、农用土、种植土、制砖原料以及陶粒生产原料等产品。

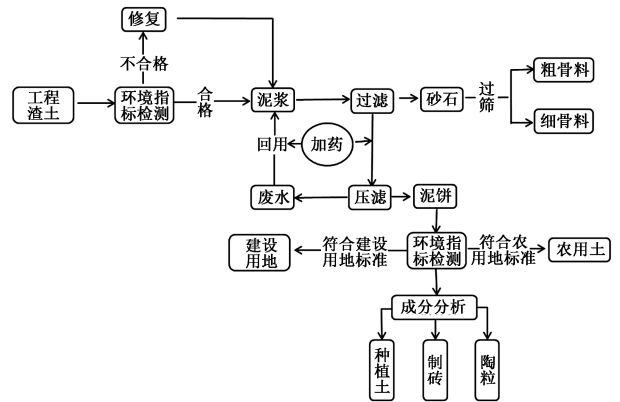


图 10 工程渣土的再利用流程

Fig. 10 The flow of recycling of the excavated soil

此外,工程渣土还可用于制备流态固化土,即通过调控水固比及其他矿物掺和料掺量,从而精确控制其流动性能和强度的特殊材料。

这种对工程渣土的多元化利用,不仅有效减少了废弃物的排放,降低了环境负荷,还实现了资源的循环利用,符合可持续发展的战略要求。

3.3 工程泥浆

工程泥浆的再利用流程如图 11 所示。首先,工程泥浆经过脱水处理后,其中的砂石组分可被分离出来,直接作为建筑原料加以利用,体现了资源的高效循环。其次,脱水后产生的泥饼,即固相部分,可做进一步资源化利用^[29]。例如,可用于道路绿化工程中的种植用土,改善土壤结构,提供植物生长

所需的养分。此外,对脱水泥饼进行固化处理,可制备得到固化土,具有一定的强度和稳定性,可用作制砖原料,生产环保型建筑材料,也可用于道路铺设等工程领域。

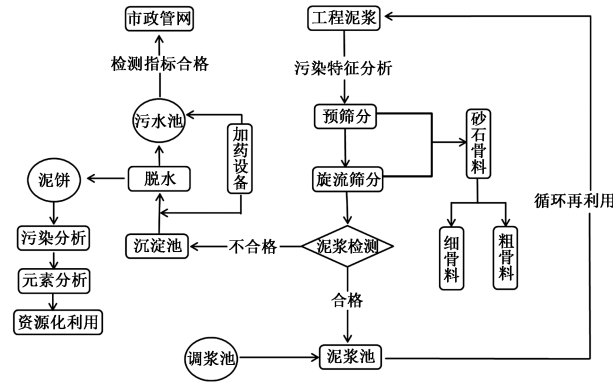


图 11 工程泥浆的再利用流程

Fig. 11 The flow of recycling of the engineering mud

4 结语

本文通过对建筑施工废弃物的来源、特征进行分析,综述了不同类型建筑施工废弃物的低碳处理技术进展,并且分析了再利用途径。建筑施工废弃物通过上述处理与再利用途径可以高效地转化为再生资源,降低碳排放,推动循环经济发展。不仅减少了废弃物对环境的破坏,同时节约了资源,促进绿色建筑的可持续发展。低碳处理技术仍需要朝着精细化、智能化方向发展,进一步加强技术创新与政策支持,提升建筑施工废弃物的利用效率。

参考文献:

- [1] 卢昱杰,王娜,朱彤,等.“双碳”背景下我国绿色建造技术发展策略研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(17):77-84,106.
LU Y J, WANG N, ZHU T, et al. Research on development strategy of green construction technologies in China based on carbon peak and carbon neutrality goals [J]. Construction technology, 2024, 53(17): 77-84, 106.
- [2] 张雅鑫. 我国建筑垃圾资源化处理产业发展现状[J]. 再生资源与循环经济, 2023, 16(4): 22-24.
ZHANG Y X. Development situation of construction waste treatment industry [J]. Recyclable resources and circular economy, 2023, 16(4): 22-24.
- [3] 张志红. 建筑废弃物再生利用的调查与研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006.
ZHANG Z H. Investigation and research on the recycling utilization of construction garbage [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2006.
- [4] BOSSINK B A G, BROUWERS H J H. Construction waste: quantification and source evaluation [J]. Journal of construction engineering and management, 1996, 122(1): 55-60.
- [5] AGUILERA-CARACUEL J, ORTIZ-DE-MANDOJANA N. Green

innovation and financial performance: An institutional approach [J]. Organization & environment, 2013, 26(4): 365-385.

- [6] HASHIM R, BOCK A J, COOPER S. The Relationship between absorptive capacity and green innovation [J]. International journal of industrial and manufacturing engineering, 2015, 9(4): 1065-1072.
- [7] 黄桐,寇世聪,周英武,等. 基于建筑信息模型(BIM)的余泥渣土源头减量管理信息系统研究[J]. 科技管理研究, 2024, 44(9): 178-184.
HUANG T, KOU S C, ZHOU Y W, et al. Research on the information system for source reduction management of excavated soil based on BIM [J]. Science and technology management research, 2024, 44(9): 178-184.
- [8] 李欣,郝瀚波,杨柳,等.“双碳”背景下建筑垃圾处理产业发展研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(22): 19-23, 54.
LI X, HAO L B, YANG L, et al. Research on development of construction waste treatment industry under double carbon background [J]. Construction technology, 2024, 53(22): 19-23, 54.
- [9] DUAN H B, WANG J Y, HUANG Q F. Encouraging the environmentally sound management of C&D waste in China: an integrative review and research agenda [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 43: 611-620.
- [10] 吕双汝. 基于工程预算的建筑垃圾数量预测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
LÜ S R. Research on construction and demolition waste quantification based on project budget [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [11] 王一新,李会琴,缙文娟,等. 无废城市背景下的建筑垃圾资源化再生产品使用意愿研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 86-90.
WANG Y X, LI H Q, GOU W J, et al. Research on the use intention of construction waste recycling products based on no waste city [J]. Journal of arid land resources and environment, 2020, 34(12): 86-90.
- [12] 孔庆新,陈思帆,陈思佳,等. 项目群施工现场固体废弃物减量管控[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(24): 138-143.
KONG Q X, CHEN S F, CHEN S J, et al. Reduction and control of solid waste at construction site for project program [J]. Construction technology, 2024, 53(24): 138-143.
- [13] 韩超,江志晟,朱融,等. 无废工地建设废弃物减量及回收技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(23): 98-102, 138.
HAN C, JIANG Z S, ZHU R, et al. Research on waste reduction and recycling technology of waste free construction site [J]. Construction technology, 2023, 52(23): 98-102, 138.
- [14] 蔡琦. 建筑垃圾资源化利用评价研究——以南京市为例[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
CAI Q. Research on the evaluation of construction waste resource utilization [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [15] 陈昱成,耿贵军,申明远,等. 建筑垃圾分拣技术发展现状及趋势[J]. 建筑机械化, 2023, 44(9): 96-98.
CHEN Y C, GENG G J, SHEN M Y, et al. Development status and trend of construction waste sorting technology [J].

- Construction mechanization, 2023, 44(9):96-98.
- [16] 王春桃. 一种环保建筑垃圾分级破碎筛选分拣回收设备: CN212348861U[P]. 2021-01-15.
WANG C T. An environmentally friendly equipment for graded crushing, screening, sorting, and recycling of construction and demolition waste: CN212348861U[P]. 2021-01-15.
- [17] 宋占. 低碳视角下绿色建筑施工废弃物二次有效利用技术研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(4):160-163.
SONG Z. Secondary effective utilization technology of green building construction waste from a low carbon perspective[J]. Environmental science and management, 2024, 49(4):160-163.
- [18] 张震. 建筑废弃物再生料路基填筑施工技术[J]. 铁道技术标准(中英文), 2023(5):52-56.
ZHANG Z. Subgrade construction technology using recycled filling of construction waste[J]. Railway technical standard (Chinese & English), 2023(5):52-56.
- [19] 张传仁, 徐兴国, 王泽浚, 等. 大型超细粉磨工艺装备技术的应用[J]. 居业, 2022, 14(5):43-46.
ZHANG C R, XU X G, WANG Z J, et al. Application of large-scale ultra-fine grinding process equipment technology[J]. Create living, 2022, 14(5):43-46.
- [20] 冯春花, 李东旭, 苗琛, 等. 助磨剂对钢渣细度和活性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7):1160-1166.
FENG C H, LI D X, MIAO C, et al. Effects of grinding aids on activation and fineness of steel slag[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2010, 38(7):1160-1166.
- [21] 朱飞. 水泥粉磨系统节能降耗改造应用[J]. 中国水泥, 2024(2):92-94.
ZHU F. Application of energy-saving and consumption-reducing transformation in cement grinding system[J]. China cement, 2024(2):92-94.
- [22] 禹敏, 段振洪, 王方伟, 等. 水泥粉磨系统的智能化改造[J]. 水泥技术, 2023(2):13-19.
YU M, DUAN Z H, WANG F W, et al. Intelligent transformation of cement grinding system[J]. Cement technology, 2023(2):13-19.
- [23] 郭远新, 李秋义, 汪卫琴, 等. 再生粗骨料品质提升技术研究[J]. 混凝土, 2015(6):134-138.
GUO Y X, LI Q Y, WANG W Q, et al. Research on recycled coarse aggregate quality of enhancement technology [J]. Concrete, 2015(6):134-138.
- [24] 马郁. 掺建筑垃圾再生微粉混凝土性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(10):88-90.
MA Y. Experimental study on performance of recycled powder concrete adding construction waste [J]. China concrete and cement products, 2016(10):88-90.
- [25] 蒙华良, 黄禧, 陈阳, 等. 工业固废制备低碳胶凝材料的研究进展[J]. 水泥工程, 2023(5):75-78, 94.
MENG H L, HUANG X, CHEN Y, et al. Research progress in the preparation of low-carbon cementitious materials from industrial solid waste[J]. Cement engineering, 2023(5):75-78, 94.
- [26] 李兰欣. 建筑垃圾资源化利用的碳排放及核算方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
LI L X. Study on carbon emission and accounting method of construction waste recycling [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [27] 罗春燕. 基于 BIM 的拟拆除建筑垃圾决策管理系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
LUO C Y. Research of BIM-based decision-making and management system for demolition waste [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [28] 江柯. 装配式与传统现浇建筑的废弃物量化对比分析与仿真研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
JIANG K. Quantitative comparison and management of waste in prefabricated and traditional cast-in-place buildings [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [29] 吕伟, 高奇英, 杨忠贵, 等. 水务泥渣性质特征及资源化途径研究[J]. 给水排水, 2023, 59(11):40-44.
LÜ W, GAO Q Y, YANG Z G, et al. Research on properties of sludge in water facilities and its resource utilization[J]. Water & wastewater engineering, 2023, 59(11):40-44.

(上接第 20 页)

- [5] 刘国省, 史国梁, 焦泽栋. 基于数字孪生的预应力钢结构施工安全智能化分析方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(4):157-165.
LIU Z S, SHI G L, JIAO Z D. Intelligent analysis method for pre-stressed steel structure construction safety based on digital twin[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2022, 39(4):157-165.
- [6] 刘红波, 张帆, 陈志华, 等. 人工智能在土木工程领域的应用研究现状及展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1):14-32.
LIU H B, ZHANG F, CHEN Z H, et al. Research status and prospect of artificial intelligence application in civil engineering [J]. Journal of civil and environmental engineering, 2024, 46(1):14-32.
- [7] 朱昊梁, 王幼松. 基于多源数据的结构安全性能智能化评估[J]. 建筑结构, 2024, 54(23):27-34.
ZHU H L, WANG Y S. Intelligent evaluation of structural safety performance based on multi-source data[J]. Building structure, 2024, 54(23):27-34.
- [8] 刘纲, 陈奇, 雷振博, 等. 基于改进萤火虫算法的有限元模型修正[J]. 工程力学, 2022, 39(7):1-9.
LIU G, CHEN Q, LEI Z B, et al. Finite element model updating method based on improved firefly algorithm [J]. Engineering mechanics, 2022, 39(7):1-9.
- [9] ELVELI B S, IDDBERG M B. On the strength-ductility trade-off in thin blast-loaded steel plates with and without initial defects—an experimental study [J]. Thin-walled structures, 2022, 171:108787.
- [10] LEE J, HYUN H. Multiple modular building construction project scheduling using genetic algorithms[J]. Journal of construction engineering and management, 2019, 145:04018116.