

建筑施工废弃物资源化利用的技术路径

于加群

青岛德泰建设工程有限公司 山东 青岛 266500

摘要：本论文主要研究目的就是全面总结和完善一套完整的建筑施工废弃物资源化利用的技术路线。第一章介绍了建筑施工废弃物的概念、来源以及物理、化学性质并对其进行合理分类；第二章详细论述了包括物理方法、化学方法、生物方法和高级回收等四种主要资源化技术手段及其工作机理、过程、应用领域和技术问题；第三章分析了保障上述技术路线有效实施的相关法律法规、经济利益驱动因素以及考核标准等问题；最后预测了该技术路线的发展前景，期望对中国乃至全世界建筑业向可持续方向发展起到一定的借鉴作用和实用价值。

关键词：建筑施工废弃物；资源化利用；技术路径；再生骨料

引言

21世纪以来，迅猛的城市化进程产生了大量建筑施工废弃物，如果仅仅采取填埋或堆放的方式，很快就会占满土地，而且由于成分复杂、含有有害物质，成为长期的环境污染问题。国际上普遍认为这是“城市矿产”，具有很高的经济价值。合理有效进行资源化再利用不仅可以减少对天然砂石等原始资源的需求，还可以大幅度减少整个建筑行业的碳足迹，是实现建筑业绿色发展、循环经济、低碳发展的必然选择。但是资源化不是简单的技术叠加，而是一个从源头分拣、中间加工、最终利用以及政策支持在内的整体过程。目前我国存在的主要问题是前端分拣粗糙、再生产品质量不稳定、技术和产业脱节、缺乏政策引导等问题，需要找到一条明确、有效的、超前的技术路线，解决从“废物”转变为“再生资源”过程中所遇到的问题。

1 建筑施工废弃物的界定、分类与特性

1.1 内涵与来源界定

一般认为，建筑施工废弃物是在进行新建、改建或扩建及拆除各种类型的建筑物、构筑物或管网过程中产生的弃土、弃料以及其他固体废物，在整个建筑生命周期中都存在，而在施工期间主要为工程渣土、废弃混凝土、砂浆、砖瓦碎块、废钢筋、废木材、废塑料管材、包装材料等；而在拆除期间主要是大量的结构构件被破碎成的碎片，比如废混凝土块、废砖块、废梁柱、废门窗、废管道等，种类繁多；而在装修期间主要是瓷砖、石膏板、壁纸、油漆桶、电线、卫浴洁具等。由于其覆盖范围广、来源多样，因此其所含物质种类繁杂并且难以处理。

1.2 科学分类体系

根据来源以及其组成成分，可以对建筑施工废弃物

进行多层次划分。从来源来看，可以分为工程渣土、工程泥浆、工程垃圾、拆除垃圾和装修垃圾五大部分；从成分上来看，又可以分为惰性无机物、金属类、轻质有机物及有害物质等几大类。其中，惰性无机物包括混凝土、砂浆、砖瓦、石材、渣土等占比较大，是生产再生骨料的主要原材料；金属类包括废旧钢筋、铁丝、铝型材、铜线等有较高再利用价值；轻质有机物例如废木材、废塑料、废纸张、废纺织品、沥青等可以通过热解、焚烧或者生物降解的方式加以利用；而含有石棉制品、废油漆、废溶剂、荧光灯管等有害物质需要专门的安全处置^[1]。合理地分类是资源化的基础，在此基础上对不同的物料进行有效分离，才能有的放矢地选择最合适的方法，最大限度地提高资源利用率并且防止二次污染的发生。

1.3 物理化学特性分析

建筑施工废弃物的物理化学性质决定其能否被资源化以及如何资源化的问题，其中物理性质包括粒径大小、密度、孔隙率、吸水率、硬度等，如废弃混凝土经过破碎而成的再生骨料，其表观密度一般小于天然骨料，但是其吸水率却大得多，这对它作为再生混凝土原材料的影响很大。而化学性质主要是指它的化学组成以及其中所含有的有害物质的数量，惰性无机物主要是由硅酸盐、碳酸盐等组成的，它们是稳定的；而轻质有机物是由复杂的高分子聚合物构成；有害物质可能是重金属或者是持久性有机污染物（POPs）。了解这一点对于保证最终产物的安全性和环保性至关重要，同时也是实现精细化处理和高附加值利用的基础。

2 建筑施工废弃物资源化利用的技术路径

2.1 物理处理技术路径：基础与核心

2.1.1 破碎筛分技术

这是处理惰性无机废物（特别是混凝土与砖渣）的关键步骤。一般情况下采用多段破碎的方式，初破用颚式破碎机把大块物料破碎到一定程度后，再由反击式或者圆锥式破碎机制成二破甚至三破，以便更细地破碎物料同时改善颗粒形态。目前市场上常见的破碎机都有配置除尘、消音以及防过载等功能来达到环保及安全的目的。破碎后的混合物料需要经过振动筛进行准确分级，按不同的应用目的可以得到不同粒径等级的再生骨料例如0-5mm（再生细骨料），5-10mm，10-20mm，20-31.5mm（再生粗骨料）等。精细的筛分工序对于保障再生骨料的质量以及符合国家有关标准至关重要，近年来出现的“3D筛分”等新技术使筛分效率更高、更精确，有利于提供优质的再生资源。

2.1.2 分选提纯技术

为了得到较高纯度单一成分，需要对筛分后混合物进一步精选。磁选法是根据废金属（主要是铁磁性物质）和非金属物料之间磁性不同，在磁选机上把它们分开，回收率可以达到98%以上。风选或者气流分选是根据不同物料密度以及悬浮速度，在气流作用下把较轻杂质（比如木屑、塑料薄膜、纸张）从较重颗粒料中分离出来，这对提高再生骨料清洁程度非常重要。而对于密度差别较小物料，还可以用水做介质进行水力浮选分离，但是需要有良好污水处理设施^[2]。目前智能化分选是物理处理领域最新发展方向，在近红外（NIR）、X射线透射（XRT）、激光诱导击穿光谱（LIBS）等传感技术配合下，利用高速气动喷嘴以及人工智能算法，智能分选机器人可以精确识别并去除再生骨料中杂质（例如陶瓷、玻璃），也可以对各种不同类型的轻质废物进行有效分类，从而大大提高分选效率和准确性，正在逐步替代人工分拣工作，使物理处理过程更为便捷、准确及智能化。

2.2 化学处理技术路径：深度转化与功能提升

2.2.1 热解与碳化技术

此方法主要用于处理建筑施工废弃物中的轻质有机物（如废旧木材、废旧塑料、废旧沥青等）。热解是在缺氧或者几乎无氧情况下对有机废弃物进行加热到一定温度（一般为300-800℃），使其发生热裂解产生三种产物即可燃气体、生物油、生物炭。这个过程不会产生二噁英之类的有害物质，而且具有减量化、无害化以及资源化的优点，所产生的可燃气体可以用来给系统供能，生物油经过提纯可以作为燃料使用，生物炭可以用作土壤改良剂或者吸附剂。而碳化技术则是专门针对废弃混凝土的一种新型化学方法，其中一种是香港理工大学研发的“半湿法碳化”。这种方法就是用废弃混凝土

中存在的少量氢氧化钙（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）、硅酸钙水化产物（C-S-H）凝胶与工业回收的二氧化碳（ CO_2 ）在较低温度下进行反应形成稳定的碳酸钙（ CaCO_3 ）。这样不仅可以长期固定大量的 CO_2 ，还可以填补再生骨料内部的小孔洞减少再生骨料吸水率提高再生骨料强度及耐久性进而解决再生骨料用于高等级混凝土的技术问题也使得废弃混凝土得到很好的利用。

2.2.2 水热处理技术

水热处理是在密闭反应器中，用水作为溶剂和反应物，在亚临界或超临界状态下（温度150-375℃，压力自生）对有机废弃物进行处理的方法，其中水热液化（Hydrothermal Liquefaction, HTL）可以将湿态有机废弃物（例如污泥或者一些特定有机废弃物）转化为类似于石油的产品即生物原油，是很好的能源回收方式；而水热炭化（Hydrothermal Carbonization, HTC）可以将生物质或者有机废弃物转化为富含碳元素的水热炭，该物质含有大量的含氧官能团并且非常稳定，可用于改善土壤质量、吸附或者做固体燃料等^[3]。尽管目前水热处理技术在建筑废弃物的应用较少见，但是由于其对湿态以及复杂的有机废物具有独特的优势以及巨大的前景。

2.3 生物处理技术路径：有机组分的生态循环

2.3.1 好氧堆肥技术

这是一种传统的生物方法来处置有机废物。主要是在有氧气的情况下，用好氧微生物（细菌、真菌、放线菌等）把有机物质转化为二氧化碳、水以及腐殖质，在适宜温度、湿度、pH以及通气条件下加入一定量有益微生物（如枯草芽孢杆菌、木霉等），就可以加快堆肥过程，使堆肥完全腐熟并且杀死其中致病微生物及杂草籽粒。充分腐熟之后的堆肥可用于生产优质有机肥或者土壤改良剂还田，实现有机质自然循环。对于建筑工地所产生的少量园林修剪物、木屑等，就地或附近进行堆肥是既便宜又环保同时遵循自然规律的方法。

2.3.2 厌氧消化技术

不同于好氧堆肥的是，厌氧消化是在无氧条件下发生的。这一过程是以厌氧菌群来降解有机物质，最终产生沼气（主要是甲烷和二氧化碳）、沼渣。沼气是一种清洁能源可以用来发电或者供暖从而实现能源回收，另外沼渣经过一定时间腐熟也可以当作有机肥施用^[4]。因此厌氧消化比较适合用于高水分有机废弃物，在大型建筑物或者集中式处理场所如果能够获得足够的有机物的话，它也是一种很好的能源回收方式，可以起到辅助作用，和好氧堆肥一起服务于建筑废弃物中的有机物再利用过程。

2.4 高级回收与创新应用技术路径：迈向高值化

2.4.1 3D打印技术

这是一项近来最具有颠覆力的应用。它就是将处理过的再生骨料（尤其是细骨料）作为主体材料，添加一定量的胶凝剂、外加剂等制备成可用于3D打印的“建筑油墨”，根据已有的设计方案用机器人的手进行分层铺设而成路沿石、花池、甚至是整栋建筑物的外墙乃至整座房子。这不仅使废物得到高附加值的再利用而且由于不用模具、机械化程度高、耗材少等特点符合当前智能建造的要求。3D打印技术让再生骨粒有了新天地不再受限于传统的混凝土中的性能而提高了自身竞争力成为连接废物资源化与未来的建筑工业化的纽带。

2.4.2 复合材料制备技术

将不同类型建筑废物混合可以得到性能良好的新型建筑材料，比如将再生骨料和废旧塑料混合可以得到强度高、抗老化性能好的塑木复合材料，可用于室外 decking、栏杆等；而将再生粉体（如磨细废旧砖粉）作为矿物掺合料部分取代水泥，也可以制得环保节能型胶凝材料。这样“以废代废”，实现了多种废物联合利用，既解决了单一类别废物处置困难问题，又由于不同材料之间相互补充作用，形成了一种新型材料并且赋予其特殊功能以及更高价值，真正体现循环经济理念。

3 支撑体系：政策法规、经济激励与综合评价

完善的支撑系统是促进建筑施工废弃物资源化利用的重要保障。政策法规方面，国家已颁布《固废法》以及建筑垃圾分类处理指导意见，“谁产生、谁负责”，并提出2030年地级以上城市资源化率达50%的目标要求；地方如杭州、青岛等地进一步明确从规划、运输、处置到产品的全链条管理措施，并通过强制规定一定比例的再生建材使用、绿色采购等方式激发市场对再生产品的购买力。经济激励机制采取“奖惩并举”的方式：一方

面给予税收优惠、财政补贴、低息贷款减轻企业负担；另一方面征收处置费或者填埋税增加最终处理环节的成本，促使源头减少排放。此外，还尝试开展再生产品认证以及碳交易工作，形成“补贴+销售+碳汇”的多种收益途径，刺激市场需求。而综合评价体系结合生命周期评价（LCA）、技术经济分析（TEA）和社会效益评价，从环境影响、经济效益和社会效益三个方面对比分析不同方法的技术路线优劣并不断改进，以实现资源化有效、经济合理以及长期可行的发展方向。

4 结语

建筑施工废弃物资源化是一项综合性工作，在此基础上依靠物理、化学、生物以及高级回收四种手段构成一个多层次系统。物理处理是第一步简单分离再利用，而化学、生物处理是对物质进一步分解转变，高级回收则是更高层次的应用。未来发展方向有四个方面：第一，智能化、精细化，利用人工智能、物联网等技术对全过程进行精确控制；第二，高值化、多样化，提高再生产品质量并开发新的用途例如功能建筑材料、纳米材料等；第三，联结化、一体化，与城市建设及各个行业相结合，打造“无废城市”的闭环；第四，绿色化、低碳化，符合“双碳”要求，采用低能耗、低排放技术和研究施工废弃物在二氧化碳捕集和埋存（CCUS）方面的可能性。

参考文献

- [1]李清海,孙金梅,周文娟.再生骨料强化技术研究进展[J].建筑材料学报,2020,23(4):892-899.
- [2]刘志华,王大为,李秋义.建筑垃圾资源化利用关键技术及工程应用[M].北京:科学出版社,2021.
- [3]陈宗平,陈宇良,应敬伟.再生混凝土基本理论与应用[M].武汉:武汉理工大学出版社,2022.