

玻璃加工废料循环利用技术研究

马心磊¹, 陈 波¹, 杨 昊²

(1. 山东温声玻璃科技股份有限公司, 山东 济南 250000;

2. 济南市产品质量检验院, 山东 济南 250000)

摘 要 针对玻璃加工废料加工难度大、利用率不高造成资源浪费、环境污染等问题, 本研究对玻璃加工废料的来源、分类、理化特征进行系统梳理, 提出包含物理法直接使用、热熔回用法、化学活化法等多层次循环使用技术路线, 从技术经济性和环境影响角度比较不同路线的优劣和生命周期的尝试性。研究结果表明, 化学活化法制备高附加值建材具有显著潜力, 但是各种技术都面临着成本、工艺、市场接纳度的产业化瓶颈, 需要进一步从政策引导和技术优化等方面促进规模化应用。

关键词 玻璃加工废料; 循环利用技术; 资源浪费

中图分类号: TQ171

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.021

0 引言

玻璃加工业在快速发展的过程中也会产生大量的废料, 传统的处理方法主要是填埋, 既占用土地又造成资源浪费和潜在的环境风险。促进玻璃加工废料循环利用, 已经成为产业可持续发展中亟待解决的问题。本研究对玻璃加工废料来源、分类、性质进行系统解析, 总结物理法、热熔法、化学法回收技术的主要路线, 对技术经济性和环境影响进行全面评估, 以期对相关工艺的筛选、优化及产业化推进等提供理论参考, 从而推动玻璃行业绿色转型和循环经济的发展。

1 玻璃加工废料的特征与预处理

1.1 废料来源与分类

玻璃加工废料生产贯穿玻璃制品自原片至成品深加工链条中, 来源复杂多变、属性不一。根据发生过程, 大致可以分为如下几种类型: 第一, 切割和磨边废料: 最大量发生于建筑玻璃加工、家具玻璃与汽车玻璃在裁切与边部精磨时产生大量大小不等的玻璃碎屑与粉状磨料的混合物; 第二, 钻孔及雕刻废料, 如玻璃面板开孔和艺术玻璃雕刻时, 都有特定玻璃颗粒和粉尘; 第三, 钢化、夹层、镀膜等深加工生产出来的次品或者不合格废料, 这些废料通常形貌完好却有内部应力不均匀、气泡、膜层有缺陷; 第四, 对清洗、抛光等工序所产生的含有玻璃微粉污泥进行处理。根据其物理形态和污染程度, 又可将这些废料粗略划分为洁净碎玻璃(大规格边角料等)、污染碎玻璃(表面黏附

油污、胶黏剂、金属涂层等)以及玻璃粉(通常情况下, 粒径小于 1 毫米的是细粉或者粉尘)^[1]。

1.2 理化特性分析

玻璃加工废弃物的物理和化学属性构成其资源再利用的核心。从物理特性上看, 它主要体现在硬度大、脆性强、形貌不规则等。尤其是机械加工后生成的玻璃粉体粒径分布广、外形多为尖锐棱角、堆积密度小, 不仅增加贮存、运输难度, 而且影响它们在一定利用途径上的工艺性能^[2]。它是否能得到有效利用, 其化学特性至关重要。玻璃本质上是一种过冷液体, 具有非晶态(长程无序)结构, 化学组成以二氧化硅(SiO_2)为主网络形成体, 并含有氧化钠(Na_2O)、氧化钙(CaO)、氧化铝(Al_2O_3)等多种网络修饰体氧化物。这种成分使其展现出较高的化学稳定性和惰性, 能够在常温下抵抗酸碱侵蚀, 但也意味着在常温常压条件下, 它很难进行化学反应并被转化为其他物质。对镀膜、印刷、夹胶后的污染废料表面会吸附一些有机聚合物、金属氧化物、硫化物之类的杂质, 热处理时可能会生成有害气体或者对反应进程造成化学处理干扰^[3]。

2 玻璃加工废料循环利用技术路径

2.1 物理法直接利用

物理法直接利用就是对玻璃废料进行破碎、筛分、清洗、表面改性, 而无需改变其化学组成及晶相结构, 将其作为骨料或填充料直接应用于其他产品中。多采用当前技术最成熟、费用比较低廉的利用方式。它的

作者简介: 马心磊(1984-), 男, 专科, 研究方向: 玻璃深加工。

主要用途有：第一，用作混凝土或者沥青混合料中骨料或者掺合料^[4]。通过使用特定粒径的清洁玻璃碎片替代部分天然砂石来制作混凝土，可以增强混凝土的防渗和耐用性。但是，需要警惕玻璃骨料与水泥浆体界面可能出现的碱—硅酸反应（ASR），这可能导致混凝土的膨胀和开裂。通常来说，可通过采用低碱性水泥、添加矿渣、粉煤灰等火山灰质物质，或者对玻璃表面进行预先的涂层处理来实现抑制效果。就沥青混合料而言，玻璃骨料可以改善路面抗滑性能及耐磨性。第二，将其用作人造石材或者玻璃陶瓷骨料。把彩色玻璃碎粒和树脂复合在一起可制得美观大方、装饰性人造石材。在粘土和其他材料中掺入特定粒度玻璃粉进行烧结可制得特殊质感玻璃陶瓷砖^[5]。第三，作为建筑的保温隔热材料。通过对玻璃废料进行粉碎和发泡等处理，生产出多孔轻质泡沫玻璃，这种玻璃拥有出色的保温、隔热、吸声、防火特性，因此，在建筑墙体和屋顶的节能隔音项目中得到广泛的应用。另外，玻璃微粉还可以用作填料混入保温砂浆或者涂料，以增强材料的隔热性和耐久性。物理法直接利用工艺成熟、成本低，是实现玻璃废料资源化处理的一种重要手段，在建材领域有着广阔的应用前景。

2.2 热熔回用法

热熔回用法，又称重熔法，是借鉴废旧玻璃（碎玻璃）回收的传统工艺，将玻璃加工废料经分选、清洗、除杂后，作为原料投入玻璃熔窑中，在高温（通常 $1\ 400\sim 1\ 600^{\circ}\text{C}$ ）下重新熔制成新的玻璃制品。该方法在理论上能使玻璃闭环循环运行，是一种最理想的资源效率途径。热熔回用按照回用目标及废料品质的不同可以划分为“同级回用的”与“降级返回使用”两种。同级回用是指将成分匹配的高质量加工废料（浮法玻璃原片的边角料）回用于生产同类型玻璃产品，这对废料的纯净度、颜色与化学组成的一致性有极其严格的要求，需要进行严格的光学分选和磁选预处理。降级再利用的要求相对较为宽松，如可以将多种颜色混合的废料用于制造玻璃纤维、玻璃马赛克、泡沫玻璃、有色瓶罐玻璃等对颜色和透明度要求不高的产品。热熔回用核心优点是能够充分利用废料原有硅酸盐网络结构，显著减少新玻璃制造过程中所需原料消耗以及熔化能耗。研究发现，当碎玻璃的掺入量增加10%时，熔制过程中的能量消耗大约可以减少2%~3%。

2.3 化学活化法

化学活化法作为近几年备受瞩目的高价值利用技术途径，其核心理念是利用玻璃废料，尤其是那些难以通过物理或热熔法处理的微细玻璃粉（GLP），以硅

铝质为前驱体在碱刺激或酸刺激下发生化学反应解聚和重新组合生成胶凝性能良好的产品，如地质聚合物（Geopolymer）或者碱刺激胶凝材料。玻璃的非晶态结构使其在强碱（NaOH、KOH）或强碱硅酸盐溶液（水玻璃）的激发下，表面的硅氧键和铝氧键更容易断裂，溶解后的硅酸根和铝酸根离子会进行缩聚反应，形成三维网状结构的硅铝酸盐凝胶。这种凝胶具有将骨料与其他填充材料紧密结合的能力，并在硬化后展现出与水泥石相似的性质。化学活化法向玻璃加工废料特别是堆存较多的玻璃粉尘打开了一条很有前景的资源化出口途径。它的主要用途有：地质聚合物混凝土、砂浆、砌块等；固化/稳定化是对重金属污染的土壤或者危险废物进行胶凝处理的一种材料；防火、耐腐蚀涂层材料；多孔吸附材料、催化载体。相较于传统的波特兰水泥，使用玻璃粉作为原料生产地质聚合物不需要经历“两磨一烧”的高能耗和高碳排放阶段。这种制备方法通常可以在低于 100°C 的环境中完成，并据估计可以使二氧化碳的排放量降低到60%~80%之间。

3 玻璃加工废料循环利用技术经济与环境影响综合评价

3.1 不同技术路径对比

系统比较以上三大技术路径，有利于依据废料特性、区域条件、市场需求作出合理的选择。在技术成熟度和适用性方面，物理法直接利用是目前最成熟的方法，适合处理组分简单、污染较小的块状、粗颗粒废料且工艺门槛较低。热熔回用法技术成熟但要求严格，尤其适用于有稳定回用渠道（自有熔窑）的大型玻璃加工企业处理洁净的同质废料。化学活化法则作为一项新兴的技术手段，尤其适用于处理难以处理的玻璃微粉问题，具有高度的技术灵活性，但其生产工艺还需要进一步的优化和标准化。在经济性方面，物理法的初始投资及运行成本最小，但是产品利润单薄、缺乏经济驱动力。热熔回用法的经济效益高度依赖预处理成本和碎玻璃的市场价格，当原生原料（纯碱、石英砂）价格高时优势明显，但高质量分选设备和能源成本是主要负担。化学活化法的原料成本低（废料近乎零成本），但激发剂成本和粉磨能耗构成主要成本，目前其产品因性能优势可能享有一定溢价，但是市场还有待培育，总体的经济性还需要在规模化生产、技术优化之后才能进一步凸显。由资源环境效益评价可知，热熔回用法对于节约原生资源，减少熔制能耗的效益最为直接显著，趋近于闭环循环。化学活化法则在固碳和减少排放方面具有巨大的潜力，同时也实

现废物的高价值转化。物理法在环境效益上虽不及前二者,却能避免填埋对环境产生的负外部性问题,而且工艺能耗最小。

3.2 生命周期评价(LCA)初步分析

生命周期评价(LCA)是一种综合性的方法,用于全面评估产品、工艺、活动在从原材料获取到最终处理的整个生命周期中对资源消耗、能源消耗、环境排放的影响。玻璃加工废料循环利用技术的 LCA 尝试性分析可量化对比不同途径下全链条环境绩效。将生产一吨建筑材料作为一个功能单位,对其加以分析。对于物理法(作为混凝土骨料),其系统边界包括废料收集、运输、破碎筛分等过程,主要环境影响来自于电耗和运输产生的间接排放,但是由于它代替天然砂石进行开采加工,整体上可以显著降低生态破坏、粉尘排放、能耗。对热熔回用法而言,系统边界需要覆盖废料分选、清理、输送、重熔等工序。LCA 研究结果一般表明,虽然分选和清洗工艺耗费水电,但是用碎玻璃代替原生原料可以显著减轻石英砂开采和纯碱生产这类能耗大、排放多的环节所带来的负担,总体而言,这有助于减少全球变暖潜力(GWP)、酸化潜力(AP)以及初级能源消费(PED)。影响结果的关键参数是碎玻璃的掺入比例和熔窑的能源结构(天然气 versus 电)。对化学活化法而言,系统边界主要由玻璃粉粉磨、激发剂制作、混合搅拌和维护等工序组成。其 LCA 研究的焦点往往在于激发剂(尤其是 NaOH)生产的高能耗高排放,以及粉磨玻璃粉的耗电量。然而,由于其完全避免水泥熟料烧成(温度约 1450℃)这一碳密集型过程,绝大多数研究结论表明,即使考虑激发剂的影响,地质聚合物产品碳足迹亦远远小于普通硅酸盐水泥混凝土碳足迹。另外,地质聚合物所具有的耐腐蚀性可能会延长结构的使用寿命并产生附加环境效益。初步 LCA 分析表明,三种循环利用路径在“摇篮到坟墓”整个过程视角下都较传统填埋处置有明显环境优势,其中,热熔回用、化学活化等技术对气候变化响应的促进作用尤其明显。

3.3 产业化瓶颈分析

尽管玻璃加工废料循环利用的技术路径日益清晰,环境效益得到认可,但其大规模产业化仍面临一系列系统性瓶颈。从技术工艺层面看:第一,高效智能化分选技术仍然是产业难点。现有的光学、密度、电磁等分选设备在除去玻璃中痕量陶瓷、金属、不同色彩玻璃时,分离效果以及成本效率都需要提高。第二,对于化学活化法,反应过程的稳定性控制、激发剂的

优化与替代(探索利用工业副产物作激发剂),以及产物性能的长期可靠性验证仍需大量研究与工程实践。在经济成本层面,回收体系设置及运营成本较高。玻璃加工企业星罗棋布,废料收集、分类、运输等物流成本比重较大。高品质预处理(深度清洗、精细分选等)进一步推高回收料成本,使其在与廉价原生原料竞争时处于劣势。同时,再生产品市场尚未完全打开,消费者和建筑设计师对含再生玻璃的产品(特别是结构材料)存在性能疑虑,导致市场接纳度低、价格上不去。在政策标准和市场机制方面:目前存在的最大限制。一方面,由于没有强制性玻璃废料分类收集法规以及清晰的“生产者责任延伸”,造成废料来源混杂、质量不高。另一方面,再生产品(玻璃骨料混凝土、地质聚合物制品等)的行业标准严重缺失或滞后,无法进入主流建筑设计规范和采购目录。第三,实质性经济激励政策不足,如对于利用再生材料生产的产品税收减免、补贴、绿色采购优先权以及对于填埋处置收取高额处理费,都未能有效地调控市场。

4 结束语

循环利用玻璃加工废料是减轻资源压力、环境负荷的一个重要手段。本文对不同技术路径进行了系统分析,结果表明各种方法具有适用性、经济性、环境效益等特征。化学活化法显示高值化利用的良好前景,但技术标准欠缺、处理成本过高、市场机制不够健全等问题仍然是目前制约产业化发展的瓶颈问题。未来要强化跨领域技术融合并健全政策激励和标准体系,促进形成涵盖分类收集、高效处理及产品应用等环节的产业链,从而使玻璃加工废料得到大规模、高值化回收。

参考文献:

- [1] 黄民才,刘中安,杨泉.一种用于钢化玻璃加工废料回收设备:CN202320890979.9[P].2023-04-20.
- [2] 唐道会.一种具有废料收集机构的玻璃加工平台:CN202220811882.X[P].2022-04-11.
- [3] 王泽斌.高放射性核废料玻璃固化及成分设计[J].玻璃搪瓷与眼镜,2022,50(10):37-43.
- [4] 杨贵龙,耿东凯.一种玻璃加工用废料收集装置:CN20220910494.7[P].2022-12-13.
- [5] 张宇轩,马瑞,崔秀涛,等.硼硅酸盐核废料玻璃在深地质处置过程中腐蚀机理研究进展[J].硅酸盐学报,2024,52(05):1749-1760.