

城市固体废弃物在道路工程中的资源化利用： 现状、挑战与前景

田辛岳 谢直伟 叶 芃
长安大学 陕西 西安 710000

摘要：随着城市化进程的加快，城市固体废弃物（Urban Solid Waste, USW）的数量逐年攀升，如何有效处理和利用这些废弃物已成为亟待解决的环保课题。在道路工程领域，固体废弃物的资源化利用逐渐成为一种可行的解决方案。本文系统回顾了城市固废，尤其是建筑废弃物、炉渣以及废旧沥青混合料的应用现状，并探讨了其在道路工程中的潜在价值。为推动循环经济和绿色转型奠定基础。

关键词：道路工程；城市固体废弃物；资源化利用

伴随着城市化进程显著加快，随之产生的城市固体废弃物也呈现出持续增长的趋势。诸如建筑垃圾、炉渣和废旧沥青混合料，占据了大量城市空间，更对生态环境构成了严重威胁。同时，随着城市基础设施建设对建筑材料的需求不断增加。传统建筑材料的生产成本高昂，且伴随着高能耗，与当前绿色发展的理念背道而驰。在这一背景下，将城市固体废弃物应用于道路工程成为了解决资源浪费和环境压力的有效途径。通过资源化利用，可以减少废弃物对环境的负面影响，还能提升资源使用效率，降低道路工程的建设成本。这种做法响应了节能减排的全球需求，也为推动道路建设及建筑行业的绿色转型提供了重要机遇。基于此，本文将深入探讨USW在道路工程中的应用现状与潜力，重点分析建筑废弃物、炉渣和废旧沥青混合料的特性及相关处理技术，同时研究资源化过程中面临的挑战与机遇，为未来循环经济的发展提供可行性建议。

1 城市固体废弃物现状分析

1.1 废弃物的来源与分类

1.1.1 工业固体废弃物

工业固体废弃物种类繁多，涵盖了各个行业。如煤炭制造业会产生煤矸石，热供系统中则会有炉渣和粉煤灰，冶金行业常伴有钢渣和赤泥，而化工行业则产生废催化剂、滤渣以及不合格的产品等^[1]。这些废弃物数量庞

大，且成分复杂，其中有不少具有毒性或其他危害性。若处理不当，能会对生态环境造成不可忽视的破坏，甚至对人体健康构成直接威胁。

1.1.2 危险固体废弃物

这类废物被归类在《国家危险废物名录》里，或者是通过一系列复杂的标准和检测方法被认定为危险物质。它们的来源广泛，几乎覆盖了工业、医疗和农业等多个领域，且具备各种让人头疼的特性：有的带有放射性，有的易燃易爆，更多的是有毒、腐蚀性极强的物质^[2]。典型的例子可以包括废酸、废碱、废油，甚至是含有重金属的污泥、医疗废物和废弃农药等。通常来说，处理这些废弃物需要运用专门的技术和设施，确保在最大限度内降低其危险性，做到无害化处理。处理此类废物的过程，像是与这些隐形的危险物质进行一场无声的博弈，稍有不慎，后果不堪设想。

1.2 环境影响与资源化潜力

城市固体废弃物的构成极其复杂，从废纸、食品残渣到金属、塑料和玻璃，各类废物混杂其中。尽管它们表面上看似杂乱无章，但实际上大约80%的废弃物可以通过合理分类和处理，转化为具有经济价值的二次资源。这也就意味着，废弃物的巨大潜力正等待我们去发掘。相反，若任其堆积，既浪费宝贵的土地，还可能对环境与健康带来严重后果。渗滤液可能污染地下水，直接威胁饮用水源的安全。因此，科学回收和合理利用即是资源的有效节省方式，更是一种减少污染、实现环境与经济双赢的途径。如今，全球都在探索将废物转化为资源的创新方式。随着技术进步和环保意识的提升，废物资源化正在成为发展最快、潜力最大的领域之一，也为未来城市的发展创造了前所未有的机遇和挑战。

作者简介：田辛岳（2005年9月-），女，汉族，河北人，本科；主要研究方向：道路桥梁与渡河工程。

谢直伟（2005年10月-），男，汉族，四川成都人，本科，主要研究方向：道路桥梁与渡河工程。

叶芃（2004年12月-），男，汉族，福建人，本科，主要研究方向：道路桥梁与渡河工程。

2 建筑固体废弃物在道路工程中的应用

2.1 建筑固体废弃物的分类与特性

建筑固体废弃物主要来自建筑施工、管道铺设,以及老旧建筑的拆除和修缮过程,种类繁多。在不同施工阶段,废弃物的类型也有所不同:基础和主体建设阶段常产生渣土、木料和钢筋,后期装修和验收阶段则以石材、木板和废旧工具为主。这些建筑废弃物具有较高的硬度、强度和耐磨性,同时还具备良好的韧性、抗冻性和水稳定性,在遇水时几乎不收缩,使其成为道路工程中极为理想的填筑材料^[13]。根据《国家危险废物名录》,建筑废弃物大致分为两类:一类是有潜在风险的废料,另一类则是可以回收再利用的材料。从物理性质上,它们可以进一步划分为三类:第一类如混凝土块和砖块,可直接再利用,具有较高的强度和稳定性;第二类如玻璃,虽然难以降解,但具备一定的水硬性和火山灰活性;第三类如污染土壤和污泥,通常含有有机物或有毒物质,性质较为复杂。在这些废料中,渣土、装修垃圾和拆迁垃圾经过处理后,可广泛用于道路工程建设中。

2.2 资源化利用技术与工艺

在将建筑固体废弃物应用于道路工程前,需要经过一系列技术和工艺处理。对于可直接再利用的废料,如混凝土块和砖块,通常通过破碎和筛分,将其加工成符合工程要求的再生集料。废旧沥青混合料则相对简单,通过加热再生或冷再生技术,可以恢复其适用于路面铺设的性能。而像粉煤灰、矿渣等工业副产品,则需通过更复杂的工艺,如活化处理或改性技术,来提升其在道路工程中的应用价值。资源化技术的运用,为建筑废弃物找到了有效的解决方案,还将其转化为具备实际价值的道路建筑材料,真正实现了资源的循环利用,推动了更加环保的建设模式。

2.3 工程应用案例

在我国众多基础设施项目中,城市建筑废弃物再生料已被广泛应用于道路和桥梁的建设中。这一举措减少了对天然资源的依赖,还显著降低了工程的碳排放。以陕西省西安外环高速公路6号标段为例,路基填充骨料主要来自破碎后的废弃混凝土和砖石^[13]。再生材料的使用实现了环保目标,还为当地的可持续发展注入了动力。这样的资源化实践,既保护了自然环境,更为未来的绿色建设提供了有力的示范。

3 炉渣在道路工程中的应用

3.1 炉渣的分类与特性

炉渣是金属或矿石冶炼时产生的副产品,其主要成分是氧化物,通常还含有少量的硫化物和金属。无论产

自何处,炉渣的矿物组成大致相同,主要由碳酸钙和二氧化硅构成^[4]。微观上,炉渣表面粗糙,呈不规则角状,并有大量孔隙,类似海绵。这些特点使其具备较低密度、较高吸水率和良好的坚固性。炉渣在细集料标准中表现优异,尤其是亚甲基蓝值低于25g/kg的要求。为了确保炉渣的环保性,研究人员对其进行了严格的环境评估。依据相关标准,炉渣中的六种主要重金属的浸出含量均低于国家规定限值。研究还发现,炉渣堆放熟化90天后,pH值从最初的13降至稳定的9,进一步证明了其环境友好性。这一系列评估确保了炉渣在资源化利用中的安全性,对生态环境没有不利影响。

3.2 资源化利用技术与工艺

在炉渣的资源化利用中,碳酸化反应起到了关键作用。炉渣中的碱性物质(如氢氧化钙)与空气中的二氧化碳反应,生成碳酸钙沉淀。这有效降低了炉渣浸出液的碱性,还改善了其多孔结构,提升了环保性和稳定性。然而,自然风干的速度较慢,因此常通过将炉渣与污泥结合,利用污泥中的微生物代谢所产生的CO₂加速反应。实验表明,炉渣与污泥按8:2或7:3的干基比混合时,处理成本效益最佳。这种方法的好处显著:微生物代谢产生的CO₂加速了碳酸化过程,消耗了大量氢氧根离子,降低了pH值;pH值下降后,重金属盐类的溶解度降低,促进了重金属的沉淀;铅、铜、锌等重金属也参与碳酸化反应,形成低溶解度的碳酸盐,进一步减少了重金属释放。在外部压力和环境的共同作用下,碳酸钙逐渐转化为更稳定的方解石晶体,形成一种稳定的复合结构。这一系列反应提高了炉渣的环境安全性,还大幅改善了其物理性能,为其在道路工程中的应用打下了坚实基础。

3.3 工程应用案例

作为天然骨料的替代品,炉渣在道路施工中的应用日益广泛。这种资源化利用有效解决了环保问题,也显著降低了建设成本。一个典型的例子是上海浦东新区御桥垃圾焚烧后的炉渣应用于浦东机场北通道试验路段。实验数据显示,使用炉渣作为集料的路基表现优异,无论是基层的完整性还是长期稳定性都非常出色。路面的承载能力和抗压强度完全可与传统材料媲美,甚至在某些方面表现更为优越。经过处理的炉渣在抗压回弹模量和劈裂强度方面的表现,远超常规材料。这些数据展示了炉渣在实际工程中的巨大潜力,也证明其在未来道路建设中可以作为一种环保且高效的替代材料,进一步推动了资源化利用的普及。

4 废旧沥青混合料在道路工程中的应用

4.1 沥青混合料回收料的特性

沥青混合料回收料(RAP)是通过铣刨或挖除旧路面获取的材料,其特性直接影响再生沥青混合料的性能。RAP的核心属性包括集料级配、沥青含量及其性能,以及集料的物理特征。由于在施工过程中材料受到了破碎和磨损,RAP的集料级配通常比原始混合料更细。随着时间推移,RAP中的沥青逐渐老化,表现为针入度下降、软化点升高和延度减小等变化。研究表明,RAP的针入度可能下降超过50%,而软化点则会上升5至15摄氏度。此外,集料也可能因磨损和风化而改变其棱角性和表面纹理。这些变化意味着在使用RAP时,需要进行相应的调整和改性,确保再生材料符合新的性能要求。

4.2 再生技术的分类与原理

沥青混合料的再生技术可按温度和地点分类。按温度分为热再生、温再生和冷再生;按地点分为厂拌再生和就地再生。热再生通过将RAP加热至150-180℃,使旧沥青软化,并与新沥青混合,同时调整集料级配,制备再生混合料。温再生则在较低温度(100-140℃)下进行,通过添加温拌剂降低沥青粘度,实现较低温度下的有效混合^[5]。冷再生完全在常温下操作,通常使用乳化沥青或泡沫沥青作为再生剂,无需加热,从而大幅减少能耗和碳排放。就地再生技术在原路面上直接处理,省去了材料运输及其他中间环节,因此施工效率更高,且对环境的影响较小^[6]。厂拌再生则在搅拌站内进行,能更精确控制材料配比和混合质量,但需考虑材料运输成本。选择哪种再生技术,通常取决于工程需求、环境条件及经济因素。

4.3 工程应用案例

废旧沥青混合料的再生技术已广泛应用于道路工程中。例如,中国国道G205江苏段的改扩建项目采用了30%RAP的热再生SMA-13混合料。经过优化设计,该再生混合料展现出出色的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性,路面表现优良。在北京的大修项目中,使用温拌技术实现了45%-50%旧料的添加,后续监测显示路面性能保持稳定。港珠澳大桥的建设更是再生技术的典范,采用浇注式沥青(GMA)、改性沥青(SMA)和环氧类沥青混合料,路面硬度、抗车辙性及冲击韧性均表现出色,是桥梁工程史上的一大杰作。在高速公路项目中,如K10+683.88至K15+008.375路段,使用SBS改性沥青混合料,大大提升了路面的高温稳定性和低温抗裂性,显著增强了道路整体性能^[7]。此外,冷再生技术在公路养护中也得到广泛应用。以北京市某主干道为例,乳化沥青冷再生技术有效修复了裂缝和坑洞,提升了抗滑性能,

同时大幅减少了施工期间对交通的影响。

5 资源化利用的挑战和前景

城市固体废弃物的资源化利用在推进过程中面临多重挑战。首先,资金短缺是主要障碍,许多项目因缺乏启动资金而难以实施。其次,法律法规体系尚不完善,缺少针对资源再生的明确法律支持。此外,无害化处理技术的研究与应用进展缓慢,可能导致二次污染,进一步限制了资源化利用的发展。随着“无废城市”理念的推广,资源化利用的前景逐渐清晰。政府正加大对相关项目的资金支持,同时完善法律框架并引进先进处理技术。预计到2025年,固体废弃物行业的投资将大幅增长,占环保总投资的比例有望超过35%。在政府推动、企业参与和公众支持的努力下,城市固体废弃物的资源化利用有望实现可持续发展。这种多方合作模式推动了生态文明的建设,为循环经济的实现奠定了坚实基础。

6 结论

城市固体废弃物的资源化利用在道路工程中的应用潜力巨大。本文探讨了建筑废弃物、炉渣和废旧沥青混合料等废弃物的特性及其在工程中的实际应用,分析了资源化过程中遇到的挑战与未来发展趋势。研究发现,约80%的城市固废具备回收利用的潜力。通过合理分类和处理,这些废弃物可以转化为有价值的二次资源,有效减少环境污染并节约自然资源。尽管在资金、法规和技术方面仍有诸多挑战,随着“无废城市”理念的推广及政策支持的加强,固体废弃物资源化利用的前景广阔,行业投资规模也有望继续增长。

参考文献

- [1]李金惠,张上,孙乾予.我国工业固体废物处理利用产业状况分析与展望[J].环境保护,2021,49(02):14-18.
- [2]张军辉,丁乐,张安顺.建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述[J].中国公路学报,2021,34(10):135-154.
- [3]肖前慧,刘书林,邱继生,等.建筑垃圾在路基填筑中的应用综述[J].科学技术与工程,2023,23(11):4502-4513.
- [4]惠迎新,王欣宇,徐新强,等.钢渣沥青混合料在道路工程中的应用[J].公路交通科技,2024,41(02):22-38.
- [5]王妍,张成梁,苏昭辉,韩爽,荣立明.城市生活垃圾焚烧炉渣的特性分析[J].环境工程,2019,37(07):172-177.
- [6]王冠,石南,范文森,尹利洋,王鑫洋,赵品晖.新型温再生剂的制备及性能研究[J].中外公路,2023,43(06):298-307.
- [7]鲁华英,王民,徐伟.港珠澳大桥浇注式沥青混合料性能优化试验研究[J].科学技术与工程,2020,20(06):2434-2440.