

固废基泡沫混凝土的研究现状与发展前景

罗江红 李雯婷 刘博宇 蒋东贝 李 威

宿迁学院建筑工程学院 江苏宿迁 223800

摘 要: 随着全球工业化和城市化进程的加速, 固体废弃物的产生量逐年攀升, 对资源、环境和经济造成巨大压力。据统计, 美国与欧盟国家年工业固废量分别达12亿吨和6亿吨, 而我国仅工业固废年产量已超30亿吨, 且持续增长。固废的堆积不仅占用土地资源, 还可能引发环境污染等问题。在此背景下, 固废基泡沫混凝土的研发兼具资源循环利用与建筑节能的双重价值, 对推动可持续发展具有重要意义。本文从胶凝材料优化、发泡技术创新及稳泡剂改性三方面系统综述研究进展, 以期对相关领域提供理论参考。

关键词: 固体废弃物; 泡沫混凝土; 碱硫酸盐复合激发; 发泡剂; 稳泡剂

引言

工业化和城市化的快速发展导致固体废弃物激增, 其资源化利用已成为全球性挑战。与此同时, 建筑业对轻质、节能建材的需求日益迫切。泡沫混凝土因其优异的绝热、隔音及轻质特性, 被视为理想的新型建材。利用固废制备泡沫混凝土, 既能实现废弃物的高值化利用, 又可降低生产成本并减少对自然资源的依赖, 符合循环经济理念。近年来, 国内外学者围绕固废基泡沫混凝土的制备技术及性能优化开展了大量研究。本文旨在梳理相关研究进展, 分析现存问题, 并展望未来发展方向。

一、碱硫酸盐激发胶凝材料的研究现状

碱激发胶凝材料的研究始于20世纪初, Purdon于1940年首次提出了“碱激发”概念, 揭示了氢氧化钠溶液对矿物玻璃相的活化作用^[1]。然而, 高碱性条件易导致浆体凝结时间失控及溶液泛碱风险。我国学者如史才军、郑文忠等通过系统研究, 推动了碱激发材料的工程应用^[2]。Hu及其团队的研究研究表明, 碱激发矿渣/粉煤灰砂浆的孔隙率显著低于传统硅酸盐水泥, 展现出更优的耐久性^[3]。

Singh N发现, 硫酸盐可通过与矿渣中硬石膏反应生成复盐, 促进水化产物AFt相的形成, 从而提升胶凝材料强度^[4]。黄政宇等(2013)采用硫铝酸盐-硅酸盐复合水泥制备泡沫混凝土, 发现其凝结硬化快、孔径均匀且抗压强度高^[5]。为固废基胶凝材料的开发提供了新思路。

二、泡沫混凝土制备技术的研究进展

泡沫混凝土的制备技术可追溯至古埃及时期, 但现代发泡技术始于19世纪末Hofman的化学发泡法。目前主流的发泡方式分为物理法与化学法: 物理法通过机械搅拌引入预制泡沫, 化学法则依赖发泡剂反应生成气体^[6]。到了1923年, 瑞典的J.A.Eriksson对泡沫混凝土展开了细致的探究, 并为此技术申请了专利。而将气泡加入混凝土体的通行方式主要分为物理和化学两大类。在物理发泡这一途径中, 操作者在搅拌过程中向混合料添加表面活性剂以产生气泡, 或者是将预制的泡沫和混凝土糊状物混和^[7]。

我国泡沫混凝土研究始于苏联技术引进阶段。杨红军等采用物理发泡法制备全固废基泡沫混凝土, 发现黄菁树胶作为稳泡剂可显著改善孔结构均匀性^[8]。王全研究表明, 降低泡沫密度与矿物掺量可减小孔径, 但过度延长发泡时间会导致孔结构劣化^[9]。

三、发泡剂与稳泡剂的优化策略

1. 发泡剂的选择与协同效应

为了制造出性能稳定的泡沫混凝土, 必须精选能够稳定泡沫的化合物, 以便在凝固的混凝土中锁定数目有限的气泡, 并创造出更多的密闭细小气孔。通过实践得知, 单一的液体无法生成持久稳定的泡沫体。泡沫的形成要求液体至少包含两种成分, 也就是说, 还需要向液体中加入发泡剂。最常见的发泡剂为表面活性剂, 这类物质在气体与液体的边界面上吸附, 显著减小了表面张力实现泡沫的稳固。除了广泛使用的表面活性剂以外, 蛋白质和其他一些可溶于水的高分子物质也能有效维持泡沫的稳定性。

基金项目: 江苏省高校大学生创新创业训练计划项目 (202414160100Y)

2. 国际新型发泡剂研发趋势

在国际研究领域, 针对新型泡沫剂的开发及其效能增强的研究已广泛展开。这些泡沫剂最初以表面活性剂等化工原料为核心, 但目前研究趋势已逐步转向以蛋白质为主要成分。例如, 美国、日本和意大利等国家已相继研发并推出了基于高效能蛋白质的泡沫剂。这些泡沫剂通常通过烷磺酸的碱金属盐与水解处理后的蛋白质相结合的方式, 制备成液态泡沫剂^[10]。在国际应用领域, 以蛋白质泡沫剂为主导, 这类泡沫剂因其高倍数的发泡性能、卓越的稳定性以及生成的试块具有较高强度等特性而受到高度评价。

3. 我国发泡剂研发进展

我国在发泡剂领域的应用研究相较于国际先进水平起步较晚。自20世纪50年代起, 我国开始自主生产和应用发泡剂, 主要涵盖了松香胶发泡剂、废动物毛发泡剂、树脂皂类发泡剂、水解血凝胶发泡剂、石油磺酸铝发泡剂等多种类型。随后几年, 国内研究者相继开发了AB复合发泡剂、CCW95型固体发泡剂等新产品; 憎水型发泡剂除了具备发泡功能外, 还表现出一定的防水特性。余发红等人研制的动物蛋白质发泡剂, 展现了良好的起泡和稳泡性能, 尤其适用于制备低密度泡沫混凝土, 但其较高的生产成本限制了其应用范围。祁亚龙团队基于牛角粉, 结合适量的氢氧化钙和亚硫酸氢钠, 成功研发出一种新型动物性蛋白发泡剂^[11]。陈红卫及其同事采用自主研发的无机高分子发泡剂, 研究结果表明, 该发泡剂能显著提升泡沫混凝土的气泡分布均匀性和精细度, 同时增强泡沫的稳定性^[12]。

4. 稳泡机制与材料改性

当前科学研究揭示, 在应用表面活性剂过程中, 复合型组合相较于单一发泡剂展现出更显著的效能。因此, 在实际应用中, 人们更倾向于将两种或多种发泡剂进行复合使用, 而非仅限于单一品种。此现象归因于不同表面活性剂间可产生协同作用, 它们能够增强彼此的功效, 弥补各自的不足, 进而展现出更优越的性能。特别是阴离子型与两性离子型表面活性剂的混合, 此类组合能显著提升胶束形成能力, 降低表面张力; 同时, 由于两性离子型表面活性剂分子携带正电荷, 其与溶液中的阴离子型表面活性剂之间会产生强烈的相互作用。

淀粉属于一类高分子化合物, 其来源广泛、无毒且易于生物降解, 这些特性使其在微小矿粒的聚凝作用中得到广泛应用。淀粉之所以能够发挥其作用, 主要归因于其适度的粘合性能, 该性能能够有效填补泡沫间的

Plateau边界, 增强粘合力, 从而显著降低泡沫内液态薄膜的流失速度, 并提升泡沫膜的稳定性。在低浓度条件下, 淀粉以螺旋状长链形态附着于微粒表面。Zeta电位是评估分散体系稳定性的一个重要指标。随着淀粉的持续添加, 附着的螺旋链逐渐展开, 其一端与气泡表层的液膜内侧形成连接, 此过程主要依赖于氢键的结合力。因此, 气泡周围的壁面内侧被一层平滑且坚硬的淀粉胶体薄膜所覆盖, 这也促进了颗粒沿着淀粉的长链吸附于气泡表面周围。

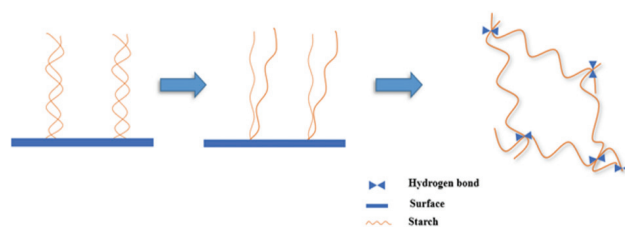


图1 淀粉螺旋双链解聚成环示意

蛋白质作为典型的两亲性化合物, 其疏水基团通常被蛋白质的紧密螺旋结构所包裹。在高碱性环境下, 蛋白质易发生改性, 导致氢键断裂和空间螺旋结构的解体, 进而引起二硫键的断裂(由于其结合力较弱)。这一过程使得疏水性氨基酸暴露于碱性溶液中, 并逐步水解, 导致肽键的断裂, 最终使得氨基和羧基以氨基酸残基的形式在水溶液中游离, 同时各种类型的R基团也发生水解。

由于大分子具有极高的表面亲和力以及在疏水亲水界面的强烈吸附倾向, 亲水基团通过氢键吸附于液膜的外层, 而疏水基团则吸附于液膜的内层, 与内部气体接触, 形成蛋白质双分子膜。强碱性环境导致吸附于泡沫外表面的蛋白质膜发生改性与水解, 由于大量氨基酸残基的存在, 泡沫表面会带有负电荷, 这促使带电的矿物颗粒靠近气泡以平衡电位差。随着P掺量的增加, 改性水解后产生的负电荷数量增多, 从而诱导带正电的水化颗粒迅速接近。

此外, 由于泡沫周围带有同种电荷, 泡沫之间以及颗粒之间会相互排斥, 这有助于泡沫与颗粒的分散, 形成独立的孔结构。随着P的改性水解和矿物水化的进行, 泡沫的稳定性得到增强, 孔隙率相对稳定。同时, 矿渣颗粒或FA固体颗粒表面的结合水与水解的氨基酸残基通过氢键相互缔合, 导致固体颗粒表面带有相同电荷, 从而增加分散性能。当体系中P的掺量达到2%时, Zeta电位开始增大, 体系整体稳定性提高。鉴于分散质为固体矿物颗粒, 良好的固体颗粒分散性可以降低奥斯瓦尔德熟化效应, 有利于气泡的均匀分散。

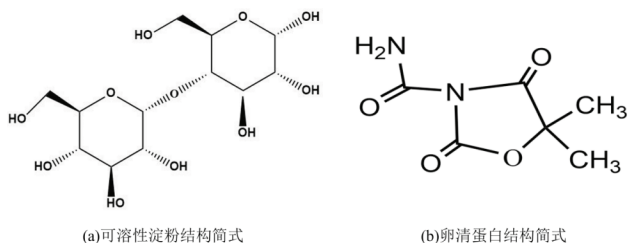


图2 稳泡剂的化学结构简式

为制备性能稳定的泡沫混凝土，必须精心挑选能够稳定泡沫的化合物，以便在固化混凝土中固定有限数量的气泡，并形成更多密闭的微小气孔。经实践验证，单一液体无法生成持久稳定的泡沫体系。泡沫的形成需要液体至少包含两种成分，即必须向液体中添加发泡剂。最常用的发泡剂为表面活性剂，这类物质在气液界面吸附，显著降低表面张力以实现泡沫的稳定。除广泛使用的表面活性剂外，蛋白质及其他一些水溶性高分子物质亦能有效维持泡沫的稳定性。

随着P的持续水解，溶液中负电荷显著超过正电荷，导致电荷间吸引力平衡的丧失，进而促进固体颗粒进一步溶解并释放出带正电的离子（如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）。由于扩散层中负电荷的大量存在，靠近滑移层的负电荷在扩散层中更多负电荷的挤压作用下进入滑移层，导致滑移层厚度的压缩，表现为Zeta电位的增加。随着颗粒的持续溶解，正电荷逐渐累积，Zeta电位在P添加至一定量时，正电位上升。随着P的改性水解和矿物水化的进行，泡沫稳定性得到增强，孔隙率保持相对稳定。同时，矿渣颗粒或FA固体颗粒表面的结合水与水解的氨基酸残基基团通过氢键相互作用，导致固体颗粒表面带有相同电荷，从而增强了分散性能。当体系中P的掺量达到2%后，由于Zeta电位的增加，体系整体稳定性提高。考虑到分散质为固体矿物颗粒，良好的固体颗粒分散性可以降低奥斯瓦尔德熟化效应，有利于气泡的均匀分散。

总结

固废基泡沫混凝土的研发为固废资源化与建筑节能提供了新路径。碱硫酸盐复合激发技术可优化胶凝材料性能，而发泡剂与稳泡剂的协同改性则是提升泡沫混凝土综合性能的关键。通过加入适当量的气体并混入恰当比例的稳定剂来复合体系，可成功制作出质轻保温效果优越的泡沫混凝土，有望取代现有的水泥基泡沫混凝土，为固废的循环再利用提供了新途径。

参考文献

- [1]Purdon A.The action of alkalis on blast-furnace slag[J].Journal of the Society of Chemical Industry, 1940, 59(9): 191-202.
- [2]郑文忠, 邹梦娜, 王英.碱激发胶凝材料研究进展[J].建筑结构学报, 2018, 40(1): 28-39.
- [3]Hu X,Shi C,Shi Z,et al.Compressive strength,pore structure and chloride transport properties of alkali-activated slag/fly ash mortars[J].Cement and Concrete Composites, 2019, 104:103392
- [4]Singh N.The activation effect of $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ on the hydration of gypsum anhydrite, CaSO_4 (II)[J].Journal of the american ceramic society, 2005,88(1):196-201.
- [5]黄政宇, 孙庆丰, 周志敏.硅酸盐-疏铝酸盐水泥超轻泡沫混凝土孔结构及性能研究[J].硅酸盐通报, 2013, 32(9): 1894-1899.
- [6]Liu Z,Shao N ning,Wang D min,et al.Fabrication and properties of foam geopolymer using circulating fluidized bed combustion fly ash[J].International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2014,21(1):89-94.
- [7]Ducman V,Korat L.Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H_2O_2 as foaming agents[J].Materials Characterization, 2016, 113:207-213.
- [8]杨红军, 宫清峰, 齐子函, 王同宾, 李明阳, 高翔鹏, 张浩.新型稳泡剂黄耆树胶对全固废基泡沫混凝土性能影响[J].现代矿业, 2024, 40(12): 209-213.
- [9]王全, 李晓, 陈勇, 张信龙, 赵君友, 侯恩哲, 刘庆东, 王学历.固废基相变轻骨料混凝土的制备和性能研究[J].混凝土, 2024, (11): 172-175.
- [10]Guo W, Zhang Z,Bai Y,et al.Development and characterization of a new multi-strength level binder system using soda residue-carbide slag as composite activator[J].Construction and Building Materials. 2021, 291:123367.
- [11]祁亚龙.固体废物在蓄水池混凝土中的抗渗性能研究[J].中国新技术新产品, 2025, (05): 86-88.
- [12]陈红卫, 严平, 刘景禹, 江辉, 庄宁, 王亚洲.基于疏浚土的泡沫混凝土配合比研究[J].水道港口, 2025, 46(01): 120-126.