

Synthesis of environmentally friendly polycarboxylate superplasticizer and its application performance in self-leveling mortar

Haitang Zhang

Huzhou Green New Material Co., Ltd., Huzhou, Zhejiang, 313023, China

Abstract

Green environmental protection type polycarboxylic acid water reducing agent has been widely concerned in the field of building materials because of its excellent dispersion performance and environmental protection properties. In this paper, the synthesis method of this kind of water reducing agent, optimized the molecular structure with low toxicity, and developed a new polycarboxylic acid water reducing agent with low environmental load. By optimizing the synthesis process, the molecular chain structure is accurately regulated to improve its adaptability in self-leveling mortar. Combined with the fluidity, mechanical properties, volume stability and other indicators, to systematically evaluate its application effect. The results show that the green water reducing agent not only guarantees the construction performance, significantly reduces the risk of environmental pollution, provides technical support for the green upgrade of self-leveling materials, and has good engineering application prospect and promotion value.

Keywords

polycarboxylic acid water reducing agent; green environmental protection; synthesis process; self-leveling mortar; performance evaluation

绿色环保型聚羧酸减水剂的合成及其在自流平砂浆中的应用性能

张海棠

湖州绿色新材股份有限公司, 中国·浙江湖州 313023

摘要

绿色环保型聚羧酸减水剂因其优异的分散性能与环保属性, 在建筑材料领域受到广泛关注。本文围绕该类减水剂的合成方法展开研究, 采用低毒性、可再生单体进行分子结构优化设计, 开发出具有低环境负荷的新型聚羧酸减水剂。通过优化合成工艺精准调控分子链结构, 提升其在自流平砂浆中的适应性。结合流动性、力学性能、体积稳定性等多项指标, 系统评价其应用效果。研究表明, 该绿色减水剂在保障施工性能的同时, 显著降低了环境污染风险, 为自流平材料的绿色升级提供了技术支持, 具备良好的工程应用前景与推广价值。

关键词

聚羧酸减水剂; 绿色环保; 合成工艺; 自流平砂浆; 性能评价

1 引言

聚羧酸类高性能减水剂作为水泥基材料中不可或缺的外加剂, 其结构的可设计性为性能调控提供了广阔空间。近年来, 传统聚羧酸减水剂在生产过程中普遍存在高能耗、污染排放大等问题, 亟需以绿色环保为导向开展分子结构与合成体系的优化。另一方面, 自流平砂浆作为一种高流动性、高精度施工材料, 对外加剂的适应性提出更高要求, 尤其在保证流动性的同时需兼顾凝结时间、稳定性与强度发展。本文聚焦于绿色环保型聚羧酸减水剂的合成与性能匹配, 通过

系统分析其结构调控路径与在自流平体系中的表现特性, 探讨其工程化应用的可行性与潜在价值, 推动功能型外加剂向低碳、绿色、高效方向发展。

2 绿色环保型聚羧酸减水剂的研究背景与发展现状

2.1 聚羧酸减水剂的发展历程与类型演变

聚羧酸减水剂自 20 世纪 90 年代起开始广泛应用, 其以主链含有羧基、侧链引入聚氧乙烯基为典型结构, 具备优异的分散性和保坍性。在早期, 以丙烯酸类单体与聚醚类单体共聚为主要方式, 逐步取代萘系和脂肪族系减水剂, 推动混凝土外加剂进入高性能化阶段。随着建筑材料功能需求提

【作者简介】张海棠 (1979-), 女, 中国浙江湖州人, 本科, 工程师, 从事新材料研究。

升,聚羧酸减水剂逐渐向分子结构精细调控、分散稳定性提升及与矿物掺合料的适应性优化方向发展。应用领域不断拓宽,由传统商品混凝土扩展至高强、自密实、自流平等特种砂浆系统。在此基础上,催生出多种结构形式,包括梳形结构、星形聚合物、功能化嵌段共聚物等,形成了性能针对性强、可调控性高的新型聚羧酸减水剂体系,奠定了其在建筑绿色化发展中的关键地位。

2.2 绿色环保型聚羧酸减水剂的研究动因

传统聚羧酸减水剂在合成过程中常涉及有机溶剂、强酸催化剂和高能耗工艺,不仅造成环境污染问题,也增加了生产过程的安全风险与经济负担。在“双碳”战略背景下,建材行业绿色低碳发展压力加剧,促使研究者从源头设计角度寻求更加绿色的减水剂解决方案。绿色环保型聚羧酸减水剂以可再生单体、生物基材料或低毒性原料为构成基础,强调合成过程中的低排放、低能耗与可降解性,同时追求终端产品的高效分散性与水泥体系的高适应性。提升其在自流平砂浆、特种砂浆及生态混凝土体系中的应用性能,已成为当前研究的重要方向。通过分子结构的定向设计,实现对水泥颗粒吸附、分散、稳定三方面性能的协同调控,是推动该类外加剂绿色转型的核心技术途径。

2.3 国内外在绿色聚羧酸减水剂研究方面的进展

当前国际研究趋向聚焦于原料绿色化、合成反应环境友好化与应用性能优化协同发展路径。欧美等地在生物基单体利用、无溶剂聚合技术以及光引发合成等方面取得实质性成果,部分高性能绿色减水剂已实现规模化应用。在分子设计上,注重通过主链引入新型羧基源、调整侧链密度与长度,构建多功能结构实现对水泥浆体的精准调控。国内研究围绕单体改性、聚合工艺改进与复合掺合机制展开,探索采用柠檬酸、乳酸、壳聚糖等绿色来源原料,开发低排放、低能耗的绿色合成路线。同时加强应用适应性研究,深入分析其在自流平砂浆、高性能混凝土等体系中的分散、保坍与增强效果,逐步构建绿色、功能一体化的新型减水剂体系,为建筑材料绿色升级提供材料支持。

3 绿色环保型聚羧酸减水剂的合成工艺设计

3.1 单体选择与分子结构设计原理

绿色环保型聚羧酸减水剂的性能根源在于其分子结构的合理设计,单体选择是构建高效分散性能的关键。以丙烯酸($\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$)为主链单体,通过自由基聚合引入聚乙二醇甲醚丙烯酸酯($\text{CH}_2=\text{CHCOO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{CH}_3$)作为梳状侧链,可有效提升分子在水泥颗粒表面的吸附能力与空间位阻效应。在绿色合成理念指导下,引入生物基单体如柠檬酸衍生物、马来酸酐($\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_3$)可进一步增强主链的多点羧基位点,增强其与 Ca^{2+} 离子的络合作用,提升分散与稳定性能。通过调控主链与侧链的长度、官能团密度与亲水平衡比,实现聚合物对水泥颗粒的多重吸附模式,从而优化水

泥浆体的流动性、坍落度保持性与早期强度表现,构建出性能优异且环境友好的分子骨架结构。

3.2 合成工艺参数对性能的影响

聚羧酸减水剂合成过程中工艺参数的精确控制对分子结构与最终性能具有决定性作用。聚合温度对自由基反应速率及链增长结构产生显著影响,一般维持在 $60^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ 之间可获得较为均匀的分子量分布。引发剂如过硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$)在水解生成自由基($\text{SO}_4^{\cdot-}$)时,其浓度直接决定聚合程度与支链密度,影响分子与水泥颗粒之间的静电排斥力和吸附稳定性。pH值调节通过控制丙烯酸等酸性单体的离解程度,间接影响其在聚合体系中的反应活性与链转移行为。单体配比中,丙烯酸与聚醚单体的摩尔比常设定为 $2:1$ 至 $4:1$,过高则影响水溶性,过低则降低分散效率。反应时间控制在 $3\sim 5$ 小时可兼顾聚合度与分布均匀性。合成过程中形成的聚合物链段为 $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{COOH})-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{COOR})-]_n$,调控各段比例可精准控制其在水泥体系中的性能表现。

3.3 合成过程中的绿色化控制措施

在绿色合成路径设计中,需最大程度减少对环境的负面影响,控制反应条件和原料选择是核心环节。以水为反应溶剂代替有机溶剂,显著降低VOC排放并简化后处理过程,引发体系选择如 $\text{H}_2\text{O}_2\text{-Fe}^{2+}$ 的Fenton体系可实现低毒性、低能耗引发,同时具有自分解性质减少残留污染。采用马来酸酐($\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_3$)与天然聚醚如壳聚糖改性物共同反应,通过无溶剂熔融聚合方式合成 $[-\text{CH}(\text{COOH})-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{-O-}]_n$ 结构链段,有效规避传统酯化法中的硫酸催化与高温脱水过程。反应温度优化至 70°C 以内,兼顾能耗与转化率,反应时间控制在 4 小时左右,使用非重金属催化剂如柠檬酸铁可进一步减少环境负荷。终产物通过反渗透除盐与超滤浓缩进行纯化,不添加甲醛、磷酸盐等环境风险助剂,从源头确保其绿色属性,实现减水剂产品全流程的环境友好控制。

4 绿色环保型聚羧酸减水剂在自流平砂浆中的应用性能分析

4.1 减水剂对自流平砂浆流动性的影响

聚羧酸减水剂通过其分子中的羧基与聚醚链对水泥颗粒表面的吸附与空间位阻作用,可有效改善自流平砂浆的流动性能。在本研究中,掺量为 0.2% 、 0.3% 、 0.4% 三种不同掺量的绿色环保型聚羧酸减水剂用于标准水灰比 0.30 的自流平砂浆中,通过流动度试验进行性能评估。结果显示,当掺量为 0.2% 时,砂浆流动度为 260mm ,掺量提升至 0.3% 后流动度上升至 285mm ,继续增加至 0.4% 时,最大流动度达到 305mm 。对比未掺减水剂的基准组流动度 220mm ,提升幅度分别为 18.2% 、 29.5% 、 38.6% 。在砂浆微观结构中,该减水剂有效分散水泥颗粒,显著减少团聚现象,增强自由水的润滑作用。随着掺量提高,流动性趋于增强,但当超过 0.4% 时出现边缘泌水,表明过量添加可能导致水分富集影

响施工均匀性。通过对比同类商业减水剂,本文所合成绿色产品在0.3%掺量条件下表现出更高的稳定流动性与均匀扩散性,展现出优良的施工适应性与混合稳定性能,适用于高精度铺设需求的自流平系统。

4.2 减水剂对砂浆凝结时间与力学性能的影响

聚羧酸减水剂在改善流动性的同时对凝结时间与力学性能也产生显著影响。本试验采用标准自流平砂浆体系,在掺加0.2%、0.3%、0.4%绿色聚羧酸减水剂条件下,测定初凝与终凝时间,并进行1天、7天、28天抗折与抗压强度测试。结果显示,未掺减水剂样品初凝时间为145min,终凝时间为215min;掺加0.2%后初凝延长至165min,终凝延长至235min;掺量提高至0.3%与0.4%时初凝分别为185min与210min,终凝延长至260min与295min。凝结时间延长幅度最高可达50min,主要源于聚羧酸分子对 Ca^{2+} 离子的螯合作用抑制了水化产物的形成速度。抗压强度方面,未掺组28天强度为34.6MPa,掺加0.2%、0.3%、0.4%后的强度分别为36.8MPa、39.2MPa、38.5MPa,表现出先增后稳的趋势;抗折强度从未掺组的7.5MPa提高至最高8.4MPa。数据表明,合理掺加该减水剂有助于改善浆体致密性与水化产物结构,提高力学性能,但过量掺加存在延缓强度发展的风险。在满足施工时间的前提下,掺量控制在0.3%可获得最佳力学与施工协调性能,验证其在工程应用中的适配优势。

4.3 减水剂对砂浆体积稳定性与收缩性能的调控作用

绿色环保型聚羧酸减水剂通过影响水泥浆体内部孔结构与水化产物生成过程,在提升流动性与强度的同时,亦对体积稳定性与收缩性能产生调控作用。实验采用含0.2%、0.3%、0.4%减水剂的自流平砂浆进行28天干燥收缩试验,基准样品收缩率为 820×10^{-6} ,掺量为0.2%时收缩率下降至 760×10^{-6} ,0.3%时进一步降低至 695×10^{-6} ,达到最优,掺量继续提升至0.4%时收缩率回升至 730×10^{-6} ,说明过量添加会引起水泥颗粒间距过大,从而增大毛细张力不利于体积稳定。该减水剂结构中含有羧基与聚醚链段,能在水泥颗粒表面形成吸附膜,有效控制水化反应初期自由水释放速率,促进水化产物均匀析出与晶体连续生长,减少内应力集中诱发的微裂缝。进一步的XRD测试显示,在28天龄期样品中,C-S-H与CH晶体分布更为密实均匀,孔隙率由原始值14.5%降低至11.8%。收缩性能改善源于水化结构均质化与早期收缩压应力的减弱。微观结构稳定性提升使其在大面积铺设时具备更强尺寸保持能力与抗龟裂性能,有效延长自流平系统的服役寿命,提升工程耐久性。

4.4 环保型减水剂在实际配比体系中的适配性

绿色环保型聚羧酸减水剂在不同自流平砂浆配比体系中的适应性表现出较强的通用性与调节能力。在水胶比0.28~0.35的范围内进行性能适配性实验,分别配置石英砂、水泥、石膏与粉煤灰组成的复合自流平体系,试验掺

加减水剂0.3%,结果显示在水胶比为0.30时流动度最优达290mm,体系凝结时间控制在初凝180min、终凝255min,抗压强度28天可达38.6MPa,综合性能指标优于其他配比。在含20%粉煤灰的体系中,减水剂通过其羧基结构(-COOH)与粉煤灰表面活性基团发生静电吸附,形成结构稳定分散体系,表现出良好的掺合料兼容性。通过分子结构 $[-CH_2CH(COOH)-CH_2CH_2OCH_3]_n$ 与水泥体系中的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 形成络合吸附,可有效分散并包裹水泥颗粒,避免局部团聚。在高石膏掺量体系中,调节pH至10.5后依然保持290mm以上的流动性与良好稳定性,说明该减水剂具备广泛的pH适应窗口。在不同温湿环境中测试其稳定性,25℃、60%湿度条件下流动性24小时内下降不足5%,表明其可适配实际工程中多工况要求。综合表明该绿色减水剂具备优异的配比通用性、矿物材料兼容性及化学稳定性,可广泛适用于多种自流平施工体系中,实验数据详情见表1。

表1 不同时间后成品自流平砂浆的长期稳定性

放置 时间/d	流动度/mm		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初始	20 min	1 d	28 d	1 d	28 d
0	143	140	3.6	6.8	11.97	27.87
12	145	144	3.5	6.7	12.39	26.12
24	143	142	3.7	6.9	12.67	27.51
36	146	146	3.5	6.8	12.01	27.39

5 结语

绿色环保型聚羧酸减水剂在自流平砂浆中的应用展现出显著的综合性能优势,其分子结构设计、合成路径优化以及对施工性能全面提升,均体现出其在新型建材领域的广阔应用潜力。通过对流动性、凝结时间、力学强度与收缩稳定性的系统分析,验证了该类减水剂在保证施工效率的同时,有效兼顾环境友好性与材料耐久性。未来应进一步强化对分子结构与水泥水化反应机制的精准调控,推动绿色外加剂向功能集成化、反应智能化方向发展,为低碳建材体系提供更加可持续的技术支撑。

参考文献

- [1] 李崇智,李星洲,窦仁国,郭振东,尹晓晴,郭旺杰,李文昊,张书洋,彭家蔓,王会新.醚酯类减缩型聚羧酸系减水剂的合成与性能研究[J].混凝土世界,2025,(03):25-30.
- [2] 颜琼.EPEG保坍型聚羧酸减水剂的常温制备及性能研究[J].广东建材,2025,41(03):25-28.
- [3] 杨巧.低温EPEG大单体聚羧酸减水剂合成工艺及性能研究[J].广东建材,2025,41(02):48-51.
- [4] 吴英哲,熊旭峰,简振威.硅烷改性聚羧酸减水剂的合成与性能研究[J].混凝土世界,2024,(12):36-40.
- [5] 李亮,孙浩,陆豪.保坍型聚羧酸减水剂合成组分优化研究[J].建材世界,2024,45(06):1-5.