大 学 化 学
Univ. Chem. **2025,** *40* (8), 315

•化学实验• doi: 10.12461/PKU.DXHX202410036 www.dxhx.pku.edu.cn

“一触即发”：聚羧酸减水剂和水泥的魔力碰撞

陈胜利*，赵鑫鑫，邢明雪，李鑫泰，张效洁，胡秀丽，张计敏
河北工业大学化工学院，河北省功能高分子重点实验室，天津 300401

摘要：聚羧酸减水剂是推动混凝土施工技术快速发展的关键材料。本文通过演示加入减水剂后，水泥浆体流动性显著提升，激发公众求知热情；结合科普互动和动画展示，从“吸附-分散”机理出发，介绍其绿色合成工艺、独特梳形结构和应用领域，传播“结构决定性能，性能决定应用”的科学思想，宣传生活化学理念，具有梯度科普实践效果。

关键词：减水剂；水泥；混凝土；流动性；梯度科普
中图分类号：G64；O6

“Hair-Trigger”: The Magical Collision of Polycarboxylate Superplasticizers and Cement

Shengli Chen *, Xinxin Zhao, Mingxue Xing, Xintai Li, Xiaojie Zhang, Xiuli Hu, Jimin Zhang
Hebei Key Laboratory of Functional Polymers, School of Chemical Engineering and Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China.

Abstract: Polycarboxylate superplasticizer is a key material driving the rapid development of concrete construction technology. This study demonstrates how the addition of superplasticizers significantly enhances the fluidity of cement slurry, sparking public interest and curiosity. By combining the “adsorption-dispersion” mechanism with interactive science outreach and animated visualization, we introduce the green synthesis process, the unique comb-like structure, and its application areas. This paper conveys the scientific concept that “structure determines performance, and performance determines application”, while promoting the idea of chemistry in everyday life and achieving effective multilevel popularization of science.

Key Words: Superplasticizer; Cement; Concrete; Fluidity; Multilevel popularization of science

1 引言

混凝土作为推动城市化进程的重要建筑材料，其质量和性能直接影响建筑工程的安全与耐久性。然而，除了常见的水、水泥、砂子和碎石这四种基础原材料，混凝土施工中还离不开第五种关键原料——减水剂[1–3]。减水剂不仅能够显著提高水泥浆体的流动性，还能优化混凝土的工作性和力学性能[4,5]。因此，高楼、港口、桥梁和大坝等重要基础建筑的高标准建设中，都需要加入减水剂才能发挥混凝土的最佳性能[6–12]。例如，在城区内施工时，长距离运输过程中需要减水剂保持混凝土的流动性；在超高层建筑用混凝土长时间泵送时，需要减水剂防止其过快凝固；而在装配式建筑的预制构件生产中，需要使用对混凝土硬化历程影响小的减水剂；另外，在艺术场馆用清水混凝土生产

收稿：2024-10-09；录用：2024-12-04；网络发表：2025-05-22
*通讯作者，Email: shenglichen@hebut.edu.cn
基金资助：河北省自然科学基金(B2022202045, B2022202029)；中央引导地方发展专项资金(236Z1209G)；南开沧州渤海新区绿色化工研究有限公司(NCC2022FH02)

中，也需要使用适当的减水剂，以呈现出成型后自然质感所具有的独特美感等。这些为适应不同应用场景广泛使用的功能型减水剂，好像“调味品”一样调节混凝土的性能，满足了我们对不同建筑形式的需求[9–12]。

聚羧酸减水剂是新发展的第三代高性能减水剂，具有低掺量、高减水(即减少混凝土拌合用水)和高保坍(即长时间维持混凝土流动性)等突出优点[12]。本科普实验利用水、水泥和减水剂三种材料的拌合，简化模拟混凝土的生产过程。通过对比实验，展示减水剂加入后，水泥浆体流动性的显著提高，激发公众思考背后的科学问题。然后，通过介绍聚羧酸减水剂的绿色合成工艺，引出其独特的梳形高分子结构，阐明现象蕴含的“吸附-分散”机理。进一步结合应用实例说明，向公众传播“结构决定性能，性能决定应用”的科学思想。最后，通过在大中小学校园邀请公众参与实验、回答减水剂基础知识、畅想未来城市建设中减水剂的应用场景、发放水泥制品纪念礼等环节，提高科普实验的互动性和参与感。本实验从生活中的混凝土入手，通过实验演示、原理探索和互动参与等多环节，全方位展示聚羧酸减水剂合成、结构、性能和应用间的联系及蕴含的化学原理，使参与者切身感受减水剂和水泥的魔力碰撞，体验化学与生活的密切联系[13–15]，激发大众的科学兴趣，传播科学思想，提高公众的科学素养[16]。

2 实验部分

2.1 实验原理

2.1.1 聚羧酸减水剂的合成及梳形结构

聚羧酸减水剂是由不饱和羧酸(如丙烯酸(AA))和聚醚大分子单体(如甲基烯丙基聚氧乙烯醚(HPEG))两种主要原料，在氧化还原引发体系[如双氧水(H_2O_2)-维生素C(Vc)]的引发下，于水溶液中室温反应4 h得到，合成路线如图1所示。反应采用水作为溶剂，产品加碱中和后直接使用，零碳排放，无“三废”产生，合成工艺绿色环保。本文合成的聚羧酸减水剂为聚(丙烯酸-*co*-甲基烯丙基聚氧乙烯醚) (PAA-*co*-PHPEG)的无规共聚物，由于高分子链中含有多个聚氧乙烯醚长侧链，形似生活中广泛使用的梳子，所以称为梳形减水剂。

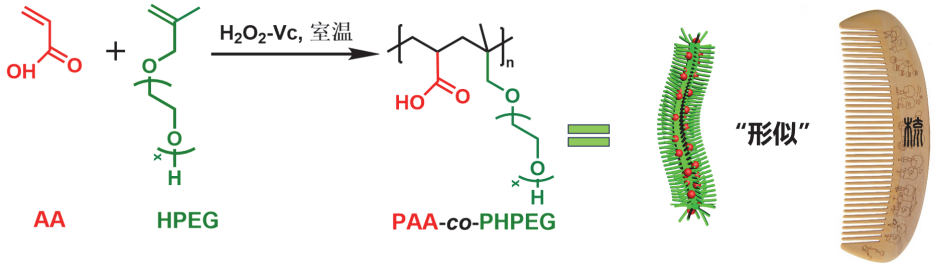

图1 聚羧酸减水剂的合成路线及梳形结构

2.1.2 聚羧酸减水剂“吸附-分散”机理

聚羧酸减水剂的高减水特性，直接表现为提高水泥浆体流动性，起源于其独特的梳形结构，可由“吸附-分散”机理解释，如图2所示。在不加减水剂的水泥浆体中，水分子被大量水泥颗粒包裹，若想分散水泥颗粒提高流动性，只能不断加入大量的水，但会导致水泥浆体粘聚性差，凝固时间延长，后期强度低。聚羧酸减水剂通过分子链上的羧基直接吸附或者和水泥中的钙离子络合吸附到水泥颗粒表面，形成聚合物分子层，提高水泥颗粒间的静电斥力，并利用较长的侧链，使水泥颗粒分散开，从而大幅提高浆体流动性。残留在浆体中的减水剂可缓慢重复“吸附-分散”过程，在较长时间内维持浆体流动性(保坍)，直观表现出低掺量(水泥用量的1‰–2‰)、高减水(减水率≥25%)和高保坍的特性。

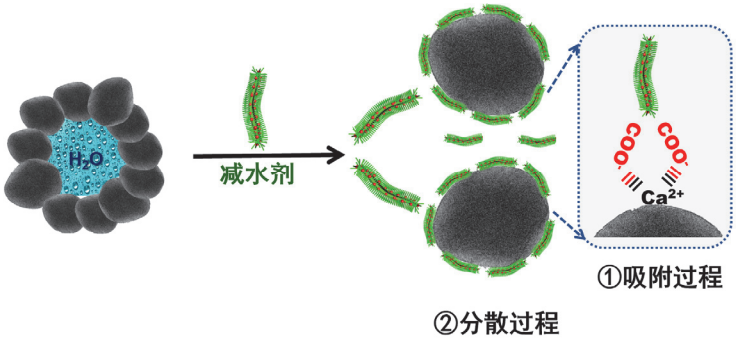

图2　聚羧酸减水剂的“吸附-分散”机理示意图

2.2　试剂或材料

2.2.1　实验试剂

实验所用自来水、水泥为普通材料，甲基烯丙基聚氧乙烯醚(> 95%)，丙烯酸(> 95%)，双氧水，维生素C，氢氧化钠等均为化学纯试剂。本实验所用聚羧酸减水剂可参照图1所示方法或文献合成[6]，也可从江苏苏博特新材料股份有限公司(中国)、广东红墙新材料股份有限公司(中国)或科之杰新材料集团福建有限公司(中国)等公司采购，所有减水剂配制成10%的溶液备用。如无特别说明，本文所用聚羧酸减水剂溶液的质量浓度均为10%。

2.2.2　实验材料

三口烧瓶，烧杯，锥形瓶，量筒，试管，玻璃棒，胶头滴管，pH试纸，硅胶模具等。

2.3　仪器和表征方法

2.3.1　实验仪器

布鲁克600 MHz核磁波谱仪(Bruker公司，美国，马萨诸塞州)，布鲁克Vertex 70型光谱仪(Bruker公司，美国，马萨诸塞州)，天津华通NJ-160全自动水泥净浆搅拌机，武汉本恒全自动滴加仪，大龙顶置式机械搅拌器(中国，北京)，分析天平。

2.3.2　表征方法

核磁氢谱的采集，是将样品溶解于氘代水中，使用600 M核磁波谱仪扫描16次获得。红外光谱表征在漫反射模式下采集，每个谱图在400–4000 cm^{-1}波数范围以4 cm^{-1}的分辨率扫描64次后平均得到，最终的谱图通过Bruker OPUS 6.5软件进行基线校正和背景扣除。水泥浆体流动性由净浆流动度表征，流动度越大，浆体流动性越好。净浆流动度测定按照国家标准(GB/T 8077–2012)，由水泥净浆搅拌机全自动操作，浆体直径即为水泥浆体流动度，采用每间隔60 min测试水泥浆体流动度，可以评价减水剂的保坍性能。

2.4　实验步骤/方法/现象

本科普实验的总体实验方案如图3所示。

2.4.1　聚羧酸减水剂分子结构表征

聚羧酸减水剂是本实验的核心原料，使用前应通过核磁波谱和红外光谱确定其分子结构，如图4所示。图4A的核磁氢谱中3.51处化学位移的强质子单峰信号是梳形侧链PHPEG中的亚甲基，而1.25–1.85的宽峰则归属于减水剂的主链。遗憾的是，由于较强的氢键作用，聚丙烯酸的质子氢信号无法从核磁测试中观测，但可由红外光谱测定。从图4B的红外谱图中，可以清晰地看到PAA的羧基吸收峰在3190–3689 cm^{-1}和1732 cm^{-1}波数；PHPEG中的－C－O－C－醚键伸缩振动在1235–1350 cm^{-1}波数范围内出现多个特征峰，其变形振动出现在958 cm^{-1}；主链上亚甲基－CH_2－CH_2－的伸缩振动信号为出现在2888 cm^{-1}处的宽峰，甲基－CH_3的对称变形振动峰位于1472 cm^{-1}，而亚甲基－CH_2－的变形振动峰则在839 cm^{-1}。基于两种仪器的结构表征结果，可以明确聚羧酸减水剂成功合成。

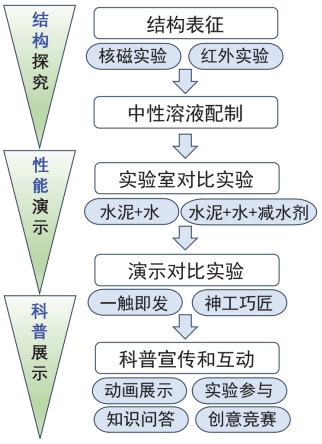

图3　聚羧酸减水剂科普的总体实验方案

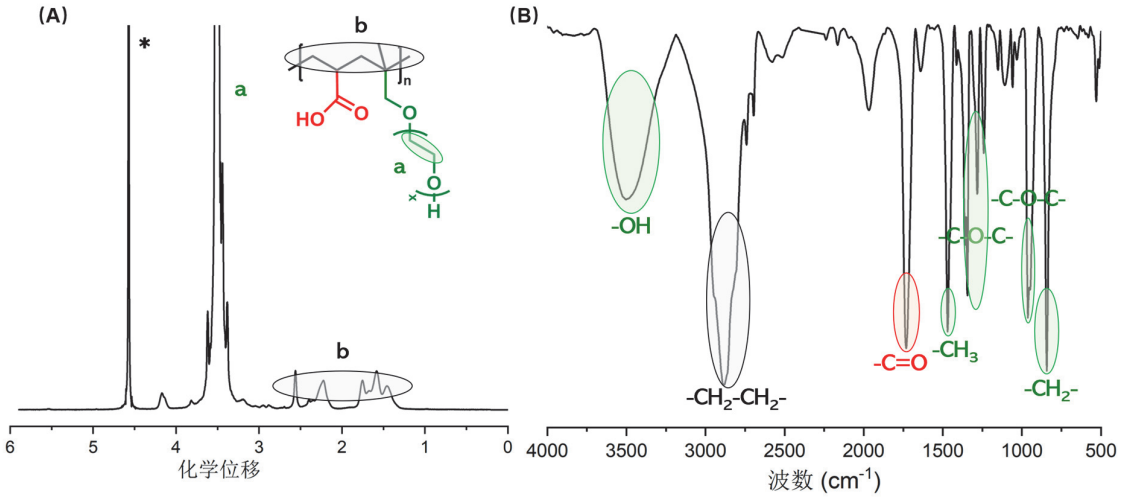

图4　聚羧酸减水剂的核磁波谱(A)和红外光谱(B)

2.4.2　聚羧酸减水剂中性溶液的配制

首先称取1.0 g的粉体聚羧酸减水剂，置于100 mL的锥形瓶中，加入9.0 g自来水，搅拌溶解均匀。用玻璃棒蘸取少量溶液，滴加到pH试纸上，试纸若呈酸性，则滴加少量氢氧化钠溶液到锥形瓶中，重复pH测试直至试纸呈中性，溶液留存备用。聚羧酸减水剂溶液的质量浓度均调配为10%。

2.4.3　实验室对比实验

聚羧酸减水剂的流动度测试根据《混凝土外加剂匀质性试验方法》(GB/T 8077–2012)，依次按照下述三个步骤进行：

(1) 将玻璃板放置在水平位置，用湿布抹擦玻璃板、截锥圆模、搅拌桨和搅拌锅，使其表面湿润而不带水渍。将截锥圆模放在玻璃板中央，并用湿布覆盖待用；

(2) 称取水泥300 g，倒入搅拌锅内，加入87 g水，或加入87 g水和1.5 g聚羧酸减水剂溶液，立即慢速搅拌120 s，停15 s，快速搅拌120 s；

(3) 将拌好的水泥浆体迅速注入截锥圆模内，用刮刀刮平，将截锥圆模垂直方向提起，同时开启秒表计时，水泥净浆流动30 s后，用直尺取流淌部分相互垂直的两个方向的最大直径，取平均值作为水泥净浆流动度。

图5是未掺加减水剂和掺加减水剂的水泥浆体拌合效果对比图，从中可以明显看出：未掺加减水剂的水泥聚集严重，难以分散，无法使用；掺加减水剂的水泥拌合均匀，分散性好，流动性优良，可直接使用。

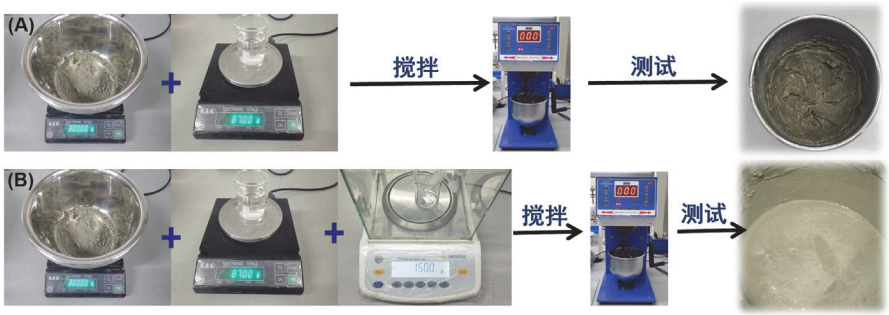

图5　未掺加(A)和掺加(B)聚羧酸减水剂的拌合效果对比图

2.4.4　保坍性能对比实验

聚羧酸减水剂的保坍性能(流动度维持性能)可通过测量水泥浆体流动度的经时损失来评价。在水泥中掺加不同含量的减水剂，拌合均匀后，每隔1 h测量一次流动度变化，结果如图6A所示。数据显示，减水剂含量的略微提升(每多加0.05 g的10%聚羧酸减水剂溶液)，就可大幅提升流动度20–30 mm，并且最长可在4 h内保持流动度损失在15%以内(270→230 mm，图6B)，而掺量不足的水泥浆在3 h就已凝结成团(图6C)，丧失了流动性，验证了聚羧酸减水剂低掺量、高减水和高保坍的特性。

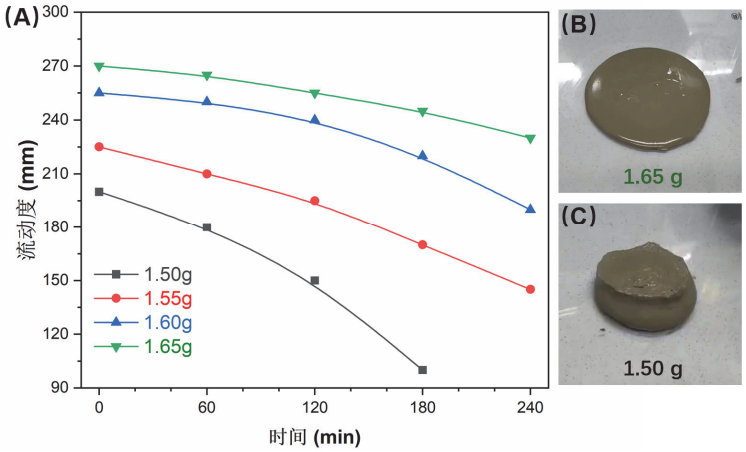

图6　(A) 不同掺量减水剂的水泥浆体流动度经时变化；(B) 掺加1.65 g聚羧酸减水剂溶液的浆体拌合4 h后的照片；(C) 掺加1.50 g聚羧酸减水剂溶液的浆体拌合3 h后的照片

3　科普展示和互动方案

3.1　科普展示

3.1.1　“吸附-分散”机理展示

为向公众更形象地解释减水剂的“吸附-分散”机理，我们制作了“减水剂卫士的救援之战”原创动画短片。在动画中，聚羧酸减水剂具象化为保卫水分子的减水剂卫士(图7)，演绎了一出“减水剂卫士分散水泥，解救被围困水分子”的英雄故事，便于大众理解接受。当减水剂卫士收到被水泥围困水分子的求救信号后，凭借自身定位器(即羧基位点，形象化为图7-②中减水剂卫士身上的“⊖”标

识符)识别发现水泥村民，并用长长的手臂(即梳形侧链)分散他们，解救被围困的水分子，保卫着混凝土王国的和平与安宁。通过短片，公众可以更直观地理解聚羧酸减水剂通过‘吸附-分散’作用改善混凝土性能的原理。

①水分子被水泥包围　②减水剂卫士收到呼救　③卫士们识别发现水泥　④卫士分散水泥，救援成功

图7　动画展示：减水剂卫士的救援之战

3.1.2　演示实验一——“一触即发”

为方便公众感受减水剂的魔力，我们进一步简化混凝土拌合过程，通过对比减水剂加入前后水泥浆体流动性的变化，展示减水剂的独特性能(图8)。首先，我们将水泥和水分别加入两个离心管，接着，将水倒入水泥中共混。此时，水泥成团难以分散开。然而，当我们向其中滴加减水剂溶液时，原本紧密的水泥颗粒，瞬间像感受到减水剂的召唤，魔法般地快速散开，浆体的流动性大大增强，并且可保持流动2 h以上，神奇地见证了减水剂和水泥的魔力碰撞。单纯加水达到与加入减水剂后近似的流动度时，所需水量约为加入减水剂时用水量的两倍。与单纯加水达到相同流动度的情况相比，减水剂的加入可使用水量减少40%以上。这正是减水剂凭借低掺量、高减水性能展现出的神奇之处，通过少量的添加就能显著改善水泥浆体的流动性并减少用水量。

①实验材料准备　②水和水泥共混效果　③滴入减水剂后的效果

图8　减水剂性能展示：“一触即发”

3.1.3　演示实验二——“神工巧匠”

我们还利用“儿童泥瓦匠”的玩具模型，使用加入减水剂的水泥浆替代普通水泥浆，手工模拟工程施工，搭建梦幻庭院(图9)。制作过程中，随着减水剂的加入，浆体保持流动性更久，方便长时间“涂抹施工”。与普通模型搭建后易松散不同，使用加有减水剂的水泥浆建成的庭院，放置一个月后，依然稳固如初，且不塌陷，可长期保存留念。这充分说明减水剂加入后，不仅混凝土的流动性得到显著提高，其强度也有所增强。

①水泥浆拌合　②长时间涂抹施工　③庭院效果展示

图9　减水剂性能展示：“神工巧匠”

3.2 互动方案

本科普实验原料便宜易得、条件温和、简单易操作、互动性强，适用于各种公众场合展示，可面向大、中、小学生和普通群众开展化学知识科学普及活动。科普活动时，我们从日常生活中常见的高楼大厦建造切入主题，通过提问“混凝土超高层输送时性能如何保持？”启发大家的思考，再通过回答“混凝土可以实现超高层输送而不凝固，主要是聚羧酸减水剂的作用”，引出“聚羧酸减水剂”这一概念；然后通过讲解其绿色合成工艺、独特的梳形结构，同时结合展板和科普动画演示，阐明现象蕴含的化学原理，激发公众求知热情，传播“结构决定性能，性能决定应用”的科学思想。基于上述铺垫，本实验设定下面三个互动方案，利用实验的强趣味性，提高公众参与度，增强科普效果。

(1) 实验参与

通过邀请公众参与演示实验一和演示实验二，让公众切实体会到减水剂和水泥的魔力碰撞。图10A和10B分别是科普人员在大学校园和小学课堂中向同学们科普讲解本实验，同学们参与度高，积极反馈，科普效果突出。

图10　科普活动现场

(A) 大学校园；(B) 小学课堂；(C) 水泥制品纪念礼物

(2) 知识问答

基于科普员讲解、展板提示和动画演示，科普人员针对现场观众，提问聚羧酸减水剂的一些基础知识，充分增强观众的体验感和参与感。例如，① 减水剂的结构，② 减水剂的作用，③ 举一个减水剂的应用实例等。对于回答正确的观众，发放实验水泥制成的小猫、猪仔、麋鹿等玩偶纪念品(图10C)，让参与者在此过程中做有所思、思有所获。

(3) 创意竞赛

通过介绍聚羧酸减水剂在高性能混凝土、清水混凝土、自流平混凝土和防辐射混凝土中的应用案例，展现其在科技、艺术场馆建设中的技术之美。同时，引导公众展望未来绿色智慧城市建设中减水剂的潜在应用场景，激发对建筑材料科学的兴趣。鼓励公众以手绘设计、3D建模或实体模型等形式，多维度呈现创意构想，从而突破传统科普模式，将绿色建筑材料的发展与社会进步紧密融合。此外，科普人员依据公众提交的创意作品，组织投票与点评活动，评选出“最佳创意奖”，并向获奖者颁发具有纪念意义的定制水泥制品。

4　结语

本实验从日常生活中混凝土建筑切入，引出聚羧酸减水剂在混凝土中的关键作用，利用结构表征、溶液配制、流动度对比实验和保坍性能对比实验，展示减水剂在水泥颗粒分散中的突出效果。通过介绍减水剂独特的梳形结构，揭示现象蕴含的“吸附-分散”机理，表现聚羧酸减水剂低掺量、高减水、高保坍的特性。为便于公众理解和提高宣传效果，我们还通过播放原创动画、设置互动环节，将化学科普与生活相融合，启发大家思考减水剂的应用场景，增强科普实验的趣味性，在大、

中、小学校园多层次地开展梯度科普。本科普实验操作简单，创意新颖，科学性强，易于推广普及，有助于进一步推动公众了解化学、认识化学和掌握化学，提升大众的科学素养。

参 考 文 献

[1] Júnior, L. U. D. T.; dos Santos Lima, G. T.; Silvestro, L.; Ruviaro, A. S.; Gleize, P. J. P.; de Azevedo, A. R. G. *J. Build. Eng.* **2023,** *68*, 106120.

[2] Karakuzu, K.; Kobya, V.; Mardani-Aghabaglou, A.; Felekoğlu, B.; Ramyar, K. *Constr. Build. Mater.* **2021,** *312*, 125366.

[3] Al-Moselly, Z.; Fall, M.; Haruna, S. *J. Build. Eng.* **2022,** *47*, 103859.

[4] Zhang, J.; Ma, Y.; Wang, J.; Gao, N.; Hu, Z.; Liu, J.; Wang, K. *Constr. Build. Mater.* **2022,** *321*, 126342.

[5] 陈绍伟, 刘明涛, 卢采梦. 新型建筑材料, **2024,** *51* (3), 66.

[6] Chen, S.; Zhang, J.; Sun, S.; Zhong, K.; Shao, Q.; Xu, H.; Wei, J. *Constr. Build. Mater.* **2021,** *290*, 123149.

[7] 水亮亮, 杨海静, 孙振平, 何燕, 曾文波. 建筑材料学报, **2020,** *23* (1), 64.

[8] 乔敏, 冉千平. 新型建筑材料, **2018,** *45* (3), 84.

[9] 宋家乐, 周智密, 李禅禅, 赵辉, 彭斐, 李炜光. 材料导报, **2014,** *28* (S2), 280.

[10] 孙振平. 建筑材料学报, **2020,** *23* (1), 128.

[11] 张翠珍, 唐新德, 陈晓东, 郭海超, 李学凡. 材料导报, **2022,** *36* (S2), 503.

[12] 刘晓, 赖光洪, 夏春蕾, 宋建荣, 王子明, 崔素萍, 管佳男, 迟碧川. 高分子材料科学与工程, **2023,** *39* (3), 172.

[13] 孙若曦, 徐祎倩, 荣绍儒, 韩春苗, 许辉. 大学化学, **2024,** *39* (5), 90.

[14] 李覃, 杨可昕, 杨清林, 朱湘锦, 韩晓乐, 黄涛. 大学化学, **2024,** *39* (9), 359.

[15] 李晓东, 刘碧玉, 金玲, 梁海红. 科技视界, **2023,** *403* (1), 43.

[16] 秦敏锐, 邵东贝, 蔡黄菊. 科技视界, **2022,** *377* (11), 59.