

《水泥混凝土脲酶自修复剂》

征求意见稿

编制说明

《水泥混凝土脲酶自修复剂》编制组
2026年4月

目 录

1 工作简况.....	1
1.1 任务来源.....	1
1.2 主要工作过程.....	1
2 标准制定原则和主要内容.....	2
2.1 编制原则.....	2
2.2 主要内容.....	2
2.2.1 标准题目.....	2
2.2.2 标准制定的目的及使用范围.....	3
2.3 分章节具体解读.....	3
2.3.1 引用文件.....	3
2.3.2 术语和定义.....	4
2.3.3 测定方法.....	4
2.3.4 标志、包装、运输和贮存.....	5
2.3.5 技术要求.....	5
3 主要试验（或验证）情况分析.....	6
3.1 水泥混凝土脲酶自修复剂的脲酶活性验证分析.....	6
3.2 水泥混凝土脲酶自修复剂对水泥基材料的性能影响验证分析.....	11
4 知识产权情况说明.....	18
5 产业化情况、推广应用论证和预期达到的效果.....	18
5.1 社会效益.....	18
5.2 经济效益.....	19
6 采用国际标准和国外先进标准情况.....	19
7 与现行法律、法规、规章及相关标准的协调性.....	19
8 重大分歧意见的处理经过和依据.....	19
9 标准性质的建议说明.....	19
10 贯彻标准的要求和措施建议.....	19
11 废止现行相关标准的建议.....	20
12 其它应予说明的事项.....	20

1 工作简况

1.1 任务来源

根据中国水泥协会《关于下达 2025 年第二批中国水泥协会团体标准制定计划的通知》（中水协发〔2025〕74 号），团体标准《水泥混凝土脲酶自修复剂》已列入编制计划，项目承担单位为山东高速建设管理集团有限公司，具体由济南大学，山东高速烟蓬公路有限公司共同开展。

1.2 主要工作过程

（1）成立标准编制组

接到中国水泥协会下达的标准指定任务后，济南大学联合山东高速建设管理集团有限公司，山东高速烟蓬公路有限公司共同成立了标准编制组，并就标准编制工作任务进行了分解部署。

（2）资料收集以及现行标准的分析

2025 年1 月，编制组对国内外现行及相关资料进行收集以及调研。

（3）编制开题论证报告和标准草案初稿

2025 年2-5 月，编制组在前期工作的基础上，研究提出了标准的制定思路和制定原则，确定了标准草案的框架结构和主要技术内容等，并编制完成标准开题论证报告和标准草案初稿。

（4）组织召开标准内部研讨会和专家咨询会，编制完成标准草案

2025 年6 月，编制组组织召开标准内部研讨会和专家咨询会，就标准内容进行研讨，会后编制组根据专家意见对标准开题论证报告和标准草案初稿进行修改，形成了标准草案。

（5）组织召开标准立项论证会

2025 年9 月，中国水泥协会召开《水泥混凝土脲酶自修复剂》等团体标准专家论证会，牵头单位济南大学对《水泥混凝土脲酶自修复剂》团体标准立项必要性与重要性进行了介绍，5 位同行专家代表对《水泥混凝土脲酶自修复剂》进行了评审并对团体标准内容提出意见，随后投票同意该标准立项。

（6）起草完成标准征求意见稿以及征求意见稿编制说明，公开向业

内专家征求意见

2025 年 10-12月，标准编制组根据立项论证会的专家意见，对国内外标准情况做了补充调研，在此基础上起草完成标准征求意见稿及征求意见稿编制说明初稿。召开内部研讨会，对标准征求意见稿形成了完善标准征求意见稿初稿及征求意见稿编制说明初稿。

2026 年 4月，标准编制组在前期研讨的基础上，对标准征求意见稿初稿和征求意见稿编制说明初稿进行修改完善，完成标准征求意见稿和编制说明，并向业内专家征求意见。

2 标准编制原则和主要内容

2.1 编制原则

本标准依据GB/T 1.1-2020 的规定，并结合国家、行业、地方及团体标准，以及相关法律法规、合同范本等资料，选取了具有代表性的抽样、实验方法和评估内容，主要采纳现行有效的国家标准和行业标准，确保技术指标的准确性、科学性和可比性。在编制过程中，我们严格遵守以下原则：全面落实国家和行业的政策法规，确保与现有的国家和行业标准相协调；条文的制定注重先进性和实用性，力求规范合理；标准的设定强调产品的特点和可操作性，旨在推动行业的健康发展和产品的广泛应用。各项指标值的确定是在满足供需双方需求的基础上，依据标准和合同的具体内容来决定的。本标准的编制原则概括为先进性、可行性和公正性。

2.2 主要内容

2.2.1 标准题目

本标准题目为：水泥混凝土脲酶自修复剂

2.2.2 标准制定的目的及使用范围

为规范混凝土用脲酶修复外加剂的技术要求，提高混凝土质量，制定本标准。混凝土是当今甚至将来很长时间内不可替代的重要建筑材料。混凝土使用一段时间经常出现不同程度的开裂，影响其力学性能及耐久性，甚至导致结构的破坏和建筑物的倒塌。如果不能及时修补裂缝，将可能引发严重的经济损失与安全隐患。混凝土属于高能耗材料，混凝土裂缝自修复材料的掺入可以有效解决混凝土早期开裂问题，提高交通工程基础设施建筑质量的同时延长其服务

年限，节约建造或维修时大量材料和能源的消耗，同时避免再次施工产生的环境污染，经济效益、环境效益和社会效益显著。

本标准规定了水泥混凝土脲酶自修复剂的术语和定义、分类和标记、技术要求、试验方法、检验规则，以及产品的包装、标志、运输与贮存。

本标准适用于水泥混凝土工程，以外加剂的方式施加到混凝土中，用于修复混凝土早期裂缝、提高混凝土耐久性的脲酶自修复剂的生产、检验和使用。

2.3 分章节具体解读

2.3.1 引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 175 通用硅酸盐水泥

GB 8076 混凝土外加剂

GB/T 8077 混凝土外加剂匀质性试验方法

GB/T 14684 建筑用砂

GB/T 14685 建筑用卵石、碎石

GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法标准

GB/T 50081 普通混凝土物理力学性能试验方法标准

GB/T 50082 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准

JG 3036 混凝土试验用搅拌机

JGJ 55 普通混凝土配合比设计技术规程

JGJ 63 混凝土用水标准

JGJ/T 70 建筑砂浆基本性能试验方法

2.3.2 术语和定义

本次标准制定对水泥混凝土脲酶自修复剂进行了定义，具体如下：

脲酶自修复剂：一种含有脲酶及相关成分，能够在水泥混凝土裂缝中引发化学反应，促使碳酸钙等矿物质沉淀，从而修复混凝土内部微细裂缝、提高混凝土耐久性的固体粉状材料，分为A(脲酶源组分)与B（尿素）。

脲酶活性：脲酶自修复剂中脲酶表现的活性。

2.3.3 测定方法

2.3.3.1 脲酶活性检测方法

（1）脲酶提取

称取1.5 g修复剂A组分分散在100 mL去离子水中(15 g/L)；使用磁力搅拌机搅拌30 min后静置2-3 h；静置后将上清液经纱布过滤倒入离心管中，在进行离心时，确保离心管成对称放置，以避免损坏离心机。3000 r/min的速度离心15 min后保留上清液，其中含有脲酶。将提取的脲酶溶液储存于4℃条件下，以备后用。

（2）脲酶活性测定

使用移液枪吸取3 mL配制好的质量浓度为15 g/L的脲酶溶液，然后与27 mL浓度为1.1 mol/L的尿素溶液充分混合，每3 min测量一次混合后溶液的电导率，测量5次取变化量均值。根据 Whiffin 1mS/（cm·min）的电导率变化对应11.1 mmol/min的尿素水解量，将平均每分钟电导率变化值换算成单位时间的尿素水解量，并乘以稀释倍数10，可得每分钟尿素水解量（mM urea hydrolyse·min⁻¹），并用该值来表示脲酶活性。其公式可表示为：

$$\text{尿素水解量} = \text{电导率变化量 (ms/cm)} \times 11.1 \quad (\text{注: } R_2 \geq 0.99) \quad (\text{公式1})$$

2.3.3.2 脲酶自修复剂在水泥混凝土中的性能检测方法

（1）试验条件

试验室温度为20℃±2℃,相对湿度不低于50%;试验用材料、仪器和用具的温度应与试验室一致。养护箱的温度为20℃±1℃,相对湿度不低于90%。

（2）试验材料

基准水泥：符合GB 8076 要求。砂：符合GB/T 17671中 ISO 标准砂要求。水：符合JGJ 63要求。脲酶自修复剂：需要检测的自修复剂。

（3）pH 值、含水率、氯离子含量测定

按 GB/T 8077 进行。

（4）外观检测

取适量样品置于白纸上，在自然光下观察，要求粉状，均匀、无结块。

（5）细度

按GB/T 8077进行。

（6）硬化混凝土性能试验方法

抗压强度比测定：按 GB 8076 进行。

修复性能试验：按 JGJ/T70-2009 进行抗渗和抗冻性能试验。

修复性能指标：

抗压强度自修复效率(%) = (掺加自修复剂后试件抗压强度 / 未加自修复剂原始抗压强度) × 100% (公式2)

抗渗性能自修复效率(%) = (掺加自修复剂后试件抗渗性能 / 未加自修复剂原始抗渗性能) × 100% (公式3)

2.3.4 标志、包装、运输和贮存

第6、7节主要介绍了水泥混凝土脲酶自修复剂的检验规则以及产品标志、包装、运输和贮存等内容。

附录主要介绍了脲酶活性的测定方法。

2.3.5 技术要求

产品标准中的技术要求是产品标准的核心技术要素，是企业、市场、顾客等各方能够进行沟通交流，体现产品核心技术的重要部分。通过明确的水泥混凝土脲酶自修复剂的技术要求，可以有利于技术人员初步把握所使用材料的基本信息。本标准对技术要求如下。

2.3.5.1 性能指标

脲酶自修复剂应符合表 2-1 规定的性能指标。

表 2-1 基本性能要求

项目	指标
外观	粉状，均匀、无结块
气味	无刺激性气味
pH 值	6.0 - 8.0
含水率 (%)	≤ 2
细度 (mm)	≥ 1000
氯离子含量 (%)	≤ 0.1

脲酶活性	≥ 5.00
受检混凝土自修复效率（抗压强度性能恢复率，%）	≥ 80
受检混凝土自修复效率（抗渗性能恢复率，%）	≥ 80

2.3.5.2 环保要求

脲酶自修复剂在生产、使用和废弃过程中，不应产生对人体健康和环境有害的物质。其有害物质限量应符合国家相关环保标准的规定。

3 主要试验（或验证）的情况分析

本文件的验证主要分为两部分：一为水泥混凝土脲酶自修复剂的脲酶活性验证分析；二为水泥混凝土脲酶自修复剂水泥基材料的性能影响验证分析。

3.1 水泥混凝土脲酶自修复剂的脲酶活性验证分析

脲酶活性是水泥混凝土脲酶自修复剂实现裂缝自修复功能的核心指标，其活性高低直接决定尿素水解效率、碳酸钙沉淀生成速率及裂缝修复效果。本验证以天然大豆为脲酶源制备脲酶自修复剂（核心组分为脲酶源-尿素复合物），采用电导率法测定脲酶活性，该方法基于尿素水解产生的氨会改变溶液电导率，通过监测电导率变化间接反映脲酶催化效率，确保验证结果科学、精准、可重复。

3.1.1 验证原理与方法

脲酶可特异性催化尿素水解生成碳酸根离子和铵根离子，反应方程式为： $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{2-}$ ，反应生成的离子会显著增加溶液电导率，且尿素水解量与溶液电导率变化量呈线性正相关，其关系可通过以下公式量化：

$$\text{尿素水解量}(\text{mmol/L}) = \text{电导率变化量}(\text{mS/cm}) \times 11.11 \quad (\text{注: } R^2 \geq 0.99) \quad (\text{公式 1})$$

验证方法具体如下：使用移液枪吸取 3 mL 待测脲酶自修复剂溶液，加入 27 mL 浓度为 1.11mol/L 尿素溶液内充分混合，每 3 min 测量一次混合后溶液的电导率，连续测量 5 次并取电导率变化量均值。1 mS/（cm·min）的电导率变化对应 11.11 mmol/min 的尿素水解量，计算得到脲酶每分钟水解尿素的量

(mmol/min)，再乘以稀释倍数 10，即为脲酶自修复剂的最终脲酶活性。

同时，设置不同质量浓度的脲酶自修复剂梯度（5g/L、10g/L、15g/L、20g/L、25g/L），探究浓度对脲酶活性的影响规律，确定最优活性浓度范围；引入包覆剂 P 优化修复体系，对比脲酶-尿素体系、P-脲酶体系、P-尿素体系的脲酶活性差异，验证包覆剂对脲酶活性的保护作用。

3.1.2 验证结果与分析

不同质量浓度脲酶自修复剂溶液的电导率变化量及脲酶活性测试结果如表 3-1 所示，脲酶活性与脲酶自修复剂质量浓度的关系如图 3-1 所示。

表 3-1 不同质量浓度脲酶自修复剂溶液的电导率变化量及脲酶活性

脲酶自修复剂质量浓度 (g/L)	电导率变化量 (ms/(cm·min))	脲酶活性 (mmol/min)
5	0.021	2.35
10	0.029	3.23
15	0.033	3.61
20	0.035	3.92
25	0.037	4.06

由表 3-1 可知，脲酶活性随着脲酶自修复剂质量浓度的升高呈现显著的正相关增长趋势。这是因为当脲酶自修复剂质量浓度提升时，体系内可参与反应的脲酶分子数量相应增多，与尿素底物的接触概率大幅提高，进而加速了尿素的水解进程，表现为电导率变化量持续增大，脲酶活性同步提升。当质量浓度从 5g/L 提升至 25g/L 时，脲酶活性从 2.35 mmol/min 提升至 4.06 mmol/min，增长率达 72.8%，但浓度超过 20g/L 后，脲酶活性增长速率放缓，表明此时脲酶分子已接近饱和状态，继续提高浓度对活性提升贡献有限。

为进一步明确脲酶自修复剂的适用环境范围，开展温度、pH 对脲酶活性的影响验证。pH 梯度设置为 5、6、7、8、9、10、11 和 12，其他测试条件与前述电导率法一致，验证结果如图 3-1 所示。

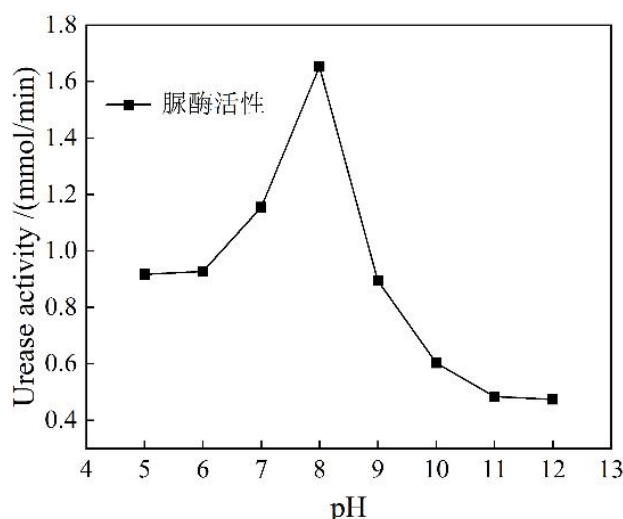


图 3-1 大豆脲酶活性随 pH 变化关系

脲酶活性是调控尿素水解反应的核心因子，其活性强弱直接决定尿素分解的动力学特征与物质转化效率，不仅影响尿素分解速率，更决定反应达到平衡时产生二氧化碳的总量，进而构成微生物诱导碳酸钙沉淀反应的核心限速环节。从酶促反应机理来看，脲酶的活性中心由特定氨基酸残基构成，可通过配位作用特异性结合尿素分子，大幅降低反应活化能，推动尿素快速分解为碳酸根离子、铵根离子与二氧化碳。当脲酶活性较高时，单位时间内活性中心结合并催化分解的尿素分子数量显著增多，尿素水解速率呈指数级提升，且反应平衡时的尿素转化率更高，二氧化碳生成总量更充足，为碳酸根离子的富集提供了物质基础，进而促进碳酸钙沉淀高效生成且结晶度良好；若脲酶活性不足，尿素水解反应速率迟缓，即便延长反应时间，尿素转化率也难以提升，二氧化碳生成总量受限，导致碳酸根离子供给不足，不仅碳酸钙产量偏低，沉淀颗粒也易因离子浓度不足而呈现细小、松散状态，影响沉淀稳定性。此外，二氧化碳总量还会通过溶解-逸出平衡间接调控体系 pH 值，与碳酸根离子的解离过程相互作用，形成复杂的酸碱调控循环，进一步凸显脲酶活性在整个矿化反应体系中的核心调控地位。

为系统探究碱性环境对脲酶催化效能的长效影响，明确其在水泥基材料天然碱性环境中的适配性，本研究专门设计独立实验，聚焦碱性条件下脲酶的存活稳定性，通过系统测定不同时间节点、不同 pH 梯度下的脲酶活性，量化其活性保留规律与衰减特征。该实验采用前文筛选的 15 g/L 最优豆粉浓度为基准，兼顾实验一致性与数据可比性，设置 pH 7~13 七个梯度，覆盖中性至强碱

性范围，同时设定 0~12 h 连续时间节点，每隔 2 h 取样检测，确保捕捉脲酶活性的动态变化过程。实验中采用电导率法测定脲酶活性，通过监测尿素水解过程中溶液电导率的变化量量化酶活性，每组设置 3 组平行样，同时引入空白对照组（不含豆粉的尿素溶液）排除非酶促反应干扰，采用缓冲体系维持各 pH 组浓度稳定，避免反应过程中 pH 波动对实验结果产生影响。实验结果表明，脲酶在碱性环境中的稳定性呈现显著的 pH 依赖性：pH 8~10 的弱至中碱性区间，脲酶活性可长期维持在较高水平，12 h 内活性衰减率不足 15%，氢键、二硫键等维系酶空间构象的作用力稳定，活性中心结构完整，催化效能不受明显影响；当 $\text{pH} \geq 11$ 时，脲酶活性随时间延长快速衰减， $\text{pH}=13$ 强碱性条件下，脲酶分子内部作用力被大量 OH^- 破坏，空间构象发生不可逆变性，4 h 后活性便降至初始值的 50% 以下，12 h 后基本丧失催化能力。这一独立实验结果不仅揭示了脲酶在碱性环境中的稳定性规律，更为后续 MICP 技术在水泥基材料中的应用提供了关键参数，为优化反应周期、调控体系 pH 值以维持脲酶活性提供了理论支撑。

为系统探究温度对大豆脲酶活性的影响规律，明确脲酶催化尿素水解的适宜温度范围，实验设定 0 °C、10 °C、20 °C、30 °C、40 °C、50 °C、60 °C、70 °C 和 80 °C 共 9 个温度梯度，覆盖低温至高温区间，可全面捕捉脲酶活性随温度变化的动态特征。

在 0-30°C 内，大豆脲酶活性变化较为缓慢。而当温度升高到 30°C 后，大豆脲酶活性随环境温度的升高增加变快。由此可知该大豆提取的脲酶蛋白质结构比较稳定，能够在较高的温度环境下维持活性，适用于水泥水化所造成的较高温度。温度对大豆脲酶活性的调控作用，根源在于其蛋白质本质及反应动力学特性，整体呈现“分段变化、逐步攀升”的典型规律，与实验观测结论高度契合。在 0~30°C 的低温至中温区间，大豆脲酶活性随温度升高呈平缓上升趋势，无显著跃升现象。这是因为该温度范围内，脲酶分子动能虽随温度提升逐步增加，但增速缓慢，导致其与尿素底物的碰撞概率仅小幅上升；同时，脲酶活性中心构象维持稳定初始状态，催化效率提升幅度有限，温度尚未成为驱动反应加速的主导因子，这也间接印证了该大豆提取脲酶的蛋白质结构具备优良的基础稳定性。

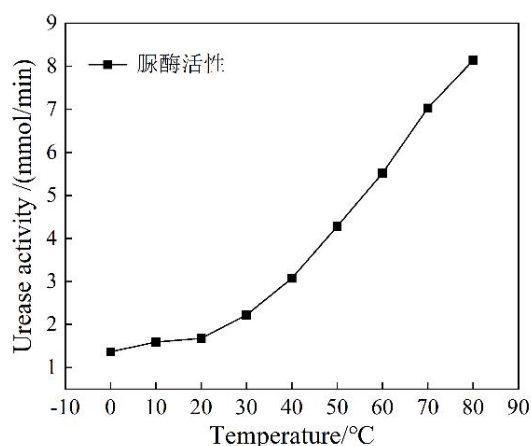


图3-2 大豆脲酶活性随温度变化关系

当温度升至 30°C 后，大豆脲酶活性进入急剧上升阶段，且该增长趋势持续至 80°C，形成 30~80°C 区间活性急剧攀升的核心特征。此温度区间内，温度提升使脲酶分子动能快速突破临界阈值，酶与底物的碰撞频率呈指数级增长，同时适宜的温度梯度持续优化脲酶活性中心构象，不断提升底物结合效率与催化转化能力，促使脲酶活性呈陡坡式上升。这一特征凸显了该大豆脲酶显著的温度适应性优势——可在 30~80°C 宽温度范围内稳定维持活性中心的结构完整性与催化功能，无明显构象变性，且能借助温度提升强化催化效能，这一特性对其适配水泥基材料应用场景具有关键意义。

30~80°C 区间脲酶活性的急剧上升，进一步印证了该大豆脲酶蛋白质结构的特殊稳定性与适配性。该大豆脲酶在 30~80°C 范围内，分子内部氢键、疏水作用等维系空间构象稳定的关键作用力未被破坏，活性中心构象持续处于最优适配状态，氨基酸残基排列规整，可高效特异性结合尿素底物，催化功能随温度提升持续增强。此外，高温虽会轻微加速尿素的非酶促分解，但该干扰可通过空白对照组排除，因此温度对酶活性的正向驱动作用是此区间催化效能提升的主导因素。

结合水泥基材料的实际应用场景，水泥水化过程伴随放热反应，会使体系温度升至 40~60°C，恰好处于大豆脲酶 30~80°C 的活性急剧上升区间。其在该温度范围内不仅不会失活，反而能借助水化放热实现催化活性的持续提升，完美适配水泥水化引发的温度变化，有效保障 MICP（微生物诱导碳酸钙沉积）矿化反应的高效推进。本次实验结果不仅明确了大豆脲酶 30~80°C 活性急剧上升的核心规律、温度耐受范围及最优催化区间，更验证了其在水泥基材料中应用的高度适配性，为后续结合水泥水化放热特性精准调控体系温度、最大化矿

化效果提供了关键理论支撑与数据依据。

3.2 水泥混凝土脲酶自修复剂对水泥基材料的性能影响验证分析

本部分验证重点探究脲酶自修复剂掺入水泥基材料后，对其工作性能、力学性能、自修复性能、抗渗性能及抗盐性能的影响，明确脲酶自修复剂的适配性及改性效果，为团体标准中脲酶自修复剂掺量、应用场景等指标的设定提供实验依据。验证采用山水水泥厂 P.O 42.5 水泥制备水泥试块，水灰比 0.37，标准养护条件（温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $\geq 95\%$ ），设置空白组（不掺加脲酶自修复剂）与实验组（掺加脲酶源-尿素复合物）进行对比试验，同时探究不同养护龄期、不同脲酶自修复剂掺量对水泥基材料性能的影响规律。

3.2.1 对水泥基材料工作性能的影响验证

水泥基材料的工作性能（流动度、凝结时间）直接影响施工便利性，本验证重点测试脲酶自修复剂单独掺入及与减水剂、缓凝剂和早强剂复配时，对水泥浆体流动度、初凝及终凝时间的影响，验证结果如表 3-2、3-3、3-4 所示。

表 3-2 脲酶源-尿素复合物与减水剂 SJ-1 复配的水泥砂浆流动度测试

复合物/掺量	减水剂/掺量	0 min/mm	30 min/mm	60 min/mm
-	SJ-1/0.6%	208	198	190
-	SJ-1/0.8%	212	206	197
-	SJ-1/1.0%	217	209	200
-	SJ-1/1.2%	218	211	203
1%	SJ-1/0.6%	217	197	189
1%	SJ-1/0.8%	219	203	196
1%	SJ-1/1.0%	218	207	200
1%	SJ-1/1.2%	219	211	205

减水剂的核心功能是通过改善水泥浆体流动性优化混凝土施工性能，其效果直接影响浇筑质量与结构密实度，因此率先通过浆体流动度测试，探究脲酶源-尿素复合物对减水剂 SJ-1 性能的影响，实验数据如表 3-2 所示。从表中数据可清晰看出，水泥体系中未掺入减水剂时，水泥颗粒间因范德华力作用易发生团聚，浆体内部摩擦力较大，流动度处于较低水平；而向体系中加入减水剂 SJ-1 后，浆体流动度较空白组呈现显著增大趋势，这与减水剂的作用机制高度契

合——SJ-1 通过吸附于水泥颗粒表面形成静电斥力，打破颗粒团聚状态，降低浆体内部阻力，从而大幅提升流动性。进一步观察减水剂掺量梯度变化对流动度的影响可见，随着 SJ-1 掺量逐步增加，浆体流动度随之持续增大，但当掺量达到一定阈值后，流动度增长速率明显放缓并趋于平衡，这是由于水泥颗粒表面的吸附位点已基本被减水剂分子占据，多余的减水剂无法进一步提升分散效果，体系进入吸附饱和状态。

尤为关键的是，在掺有减水剂 SJ-1 的水泥体系中加入脲酶源-尿素复合物后，水泥砂浆的流动度与未加复合物的组别相比无明显变化，流动度数值波动幅度控制在合理误差范围内，未出现显著下降或异常波动。这一实验结果充分表明，脲酶源-尿素复合物的掺入对减水剂 SJ-1 的减水效果影响极小，二者具备良好的兼容性。

为系统研究脲酶源-尿素复合物与缓凝剂的兼容性及协同作用对水泥基材料凝结性能的影响，实验通过测试水泥净浆的初凝时间与终凝时间，量化脲酶源-尿素复合物与三种缓凝剂共掺后对凝结性能的影响，相关数据如表 3-3 中所示。从表中数据可清晰看出，与未掺加任何外加剂的空白水泥净浆相比，同时加入脲酶源-尿素复合物和缓凝剂后，水泥净浆的初凝时间与终凝时间均呈现显著延长趋势，且不同缓凝剂体系下的延长幅度存在一定差异，但整体均处于工程可接受范围内。这一现象并非单一因素作用导致，而是缓凝剂的固有功能与脲酶源-尿素复合物的间接调控共同作用的结果，二者形成协同效应，共同延缓了水泥水化进程，进而延长了凝结时间。

这一实验结果对自修复混凝土的工程应用具有重要指导意义：一方面，凝结时间的适度延长可改善混凝土的施工工作性，尤其适用于高温环境施工或大体积混凝土浇筑，避免因凝结过快导致的施工困难及温度应力裂缝，且蔗糖体系的强缓凝效果可适配超长浇筑周期需求，葡萄糖酸钠适配常规延长周期场景，柠檬酸钠则适用于对凝结时间延长需求较低的工况；另一方面，需根据实际施工需求精准控制不同缓凝剂的掺量，尤其针对蔗糖体系，需避免其与脲酶源-尿素复合物协同作用导致凝结时间过长，进而影响混凝土早期强度发展。同时，该结果也印证了脲酶源-尿素复合物与三种常用缓凝剂均具备良好的兼容性，仅通过协同作用强化缓凝效果且效果排序明确，为自修复混凝土配合比设计中缓凝剂的合理选用、掺量优化及场景适配提供了精准实验依据，保障自修

复功能与混凝土施工性能的协同优化。

表 3-3 脲酶源-尿素复合物与缓凝剂复配后对凝结时间的影响

复合物掺量	缓凝剂	缓凝剂掺量	初凝时间/h	终凝时间/h
-	-	-	5.0	7.2
1%	葡萄糖酸钠	2%	10	14
1%	柠檬酸钠	2%	6	9.5
1%	蔗糖	2%	14	21

为进一步探究复合物与早强剂的复配效应，明确二者共掺对混凝土性能的影响，本实验选取工程中广泛应用的两种有机胺类早强剂——三乙醇胺

（TEA）和三异丙醇胺（TIPA），开展复配性能测试，重点分析新拌混凝土的流动扩展度、含气量等关键工作性能指标，实验数据如表 3-4 所示。

表 3-4 脲酶源-尿素复合物与与早强剂复配的混凝土性能

实验名称	复合物掺量	早强剂/掺量	初始坍落度/扩展度（mm）	含气
实验1	1.0%	-	220/560	2.0%
实验2	1.0%	三乙醇胺/0.05%	210/560	2.0%
实验3	1.0%	三异丙醇胺/0.1%	220/550	2.0%

从表 3-4 数据可清晰观察到，与仅掺加早强剂的对照组相比，当脲酶源-尿素复合物与早强剂三乙醇胺或三异丙醇胺复配使用时，混凝土流动扩展度呈现一定程度的降低，但下降幅度均控制在工程可接受范围内，未出现流动度骤降导致的施工困难问题。值得关注的是，无论是否掺入脲酶源-尿素复合物，混凝土的含气量均基本保持稳定，数值波动极小，处于常规混凝土含气量控制范围之内。综合来看，脲酶源-尿素复合物与两种有机胺类早强剂复配后，仅对混凝土流动扩展度产生小幅可控影响，含气量及其他工作性能基本稳定，且早强剂自身不干扰混凝土工作性，二者具备良好的复配兼容性。这一结果为自修复混

凝土在早期强度需求场景的应用提供了实验支撑：可通过复配早强剂解决自修复体系可能存在的早期强度不足问题，同时无需过度担忧工作性能恶化，只需根据流动扩展度变化微调减水剂掺量即可实现性能平衡。该研究进一步完善了脲酶源-尿素复合物与各类外加剂的协同适配理论，为自修复混凝土配合比的全面优化及多场景应用奠定了坚实基础。

3.2.2 对水泥基材料力学性能的影响验证

力学性能是水泥基材料服役安全性的核心保障，本验证通过测试 3 天、7 天、28 天龄期水泥试块的抗折强度、抗压强度，探究自修复剂对水泥基材料力学性能的改性效果，同时开展冻融循环试验，验证自修复剂对水泥基材料抗冻性能的提升作用，测试结果如表 3-5、表 3-6 所示。

表 3-5 不同外加剂、不同养护龄期水泥试块的强度

外加剂	3 天抗折强度 (MPa)	3 天抗压强度 (MPa)	7 天抗折强度 (MPa)	7 天抗压强度 (MPa)
空白	3.6	22.3	4.2	27.9
脲酶	4.1	24.3	5.15	30.83
脲酶自修复 剂（复合 物）	4.3	25.54	5.4	32.28

表 3-6 冻融循环对不同掺量自修复剂水泥试块 28 天强度的影响

大豆粉掺量 (%)	28 天抗折强 度 (MPa)	28 天抗压强 度 (MPa)	冻融循环后 抗折强度 (MPa)	冻融循环后 抗压强度 (MPa)
--------------	--------------------	--------------------	------------------------	------------------------

0（空白）	6.86	26.48	6.4	26.2
0.2（自修复剂）	7.4	33.1	5.6	30.9

由表 3-5 可知，掺入脲酶自修复剂后，*+水泥试块的抗折强度与抗压强度均较空白组有明显提升，且随着养护时间的延长，强度增长趋势显著，改性效果优于单一脲酶。3 天龄期时，自修复剂组抗折强度 4.3MPa，较空白组增长 19.4%，抗压强度 25.54MPa，较空白组增长 14.5%；7 天龄期时，抗折强度 5.4MPa，增长率达 28.6%，抗压强度 32.28MPa，增长率达 15.6%，展现出优异的力学性能优化能力。

力学性能提升的核心机理是：脲酶自修复剂中脲酶催化尿素水解生成的碳酸根离子，与水泥水化产生的钙离子反应生成碳酸钙沉淀，填充水泥基体内部的微裂缝及毛细孔隙，减少内部缺陷，缓解应力集中；同时，脲酶自修复剂中大豆粉的有机成分可吸附于水泥颗粒表面，优化水化产物沉积形态，增强水化产物间的黏结力，提升基体整体性。

冻融循环试验结果表明（表 3-6），掺加自修复剂的水泥试块 28 天抗折、抗压强度均高于空白组；冻融循环后，强度虽有降低，但仍显著高于空白组，说明脲酶自修复剂生成的碳酸钙沉淀可填充孔隙，形成物理屏障，减少水分侵入和冰胀压力，有效提升水泥基材料的抗冻性能，适配寒冷地区工程应用需求。

3.2.3 对水泥基材料自修复性能的影响验证

自修复性能是脲酶自修复剂的核心功能，本验证通过制备带表面裂缝的水泥试件，观察脲酶自修复剂在不同时间内的裂缝修复效果，同时结合扫描电子显微镜（SEM）观察微观结构，验证脲酶自修复剂的裂缝填充能力。

宏观观察结果显示，随着养护时间延长，掺加脲酶自修复剂的水泥试件表面裂缝被逐步封堵，12h 时裂缝开始出现填充迹象，60h 时裂缝基本被完全修复，而空白组试件裂缝无明显修复现象，反而有轻微扩展。微观分析结果表明，空白样品内部存在大量不规则且相互连通的孔隙，而掺加脲酶自修复剂的样品内部孔隙数量大幅减少，整体结构更为致密。脲酶自修复剂中的脲酶催化

尿素水解生成的碳酸钙晶体，以针状、板状等多种形态均匀分布，填充于水泥孔隙和裂缝之中，与水泥水化产物紧密结合，形成致密的晶体网络结构，实现裂缝的有效修复。

3.2.4 对水泥基材料抗渗性能的影响验证

抗渗性能直接影响水泥基材料的耐久性，本验证采用抗渗试验测试掺加脲酶自修复剂的水泥砂浆试件抗渗压力，探究脲酶自修复剂对水泥基材料抗渗性能的提升作用，测试结果如表 3-7 所示。

表 3-7 脲酶自修复剂对水泥砂浆试件抗渗性能的影响

试件类型	抗渗压力（MPa）
空白试件	1.6
掺加脲酶自修复剂试件	2.0

由表 3-7 可知，掺加脲酶自修复剂后，水泥砂浆试件的抗渗压力从 1.6MPa 提升至 2.0MPa，抗渗性能显著提升。其作用机制主要分为两方面：一是脲酶自修复剂中的颗粒成分对水泥内部孔隙起到物理填充作用，缩小孔隙尺寸并阻断连通路径，减少水分渗透通道；二是脲酶催化尿素水解产生的碳酸根离子，与水泥水化释放的钙离子反应生成大量碳酸钙晶体，这些晶体在孔隙中生长堆积，进一步填充剩余孔隙，形成致密的抗渗屏障，有效阻挡水分及有害介质的侵入。

3.2.5 对水泥基材料抗盐性能的影响验证

采用硫酸盐干湿循环试验，探究脲酶自修复剂对水泥基材料抗盐侵蚀性能的影响，以强度耐蚀系数作为核心评价指标，强度耐蚀系数计算公式如下：

$$K_f = \frac{f_0 - f_n}{f_0} \times 100\%$$

其中， K_f 为强度耐蚀系数（%）， f_n 为 N 次循环后受硫酸盐腐蚀的水泥试件抗压强度平均值（MPa）， f_0 为与受腐蚀试件同龄期的标准养护对比试件抗压强度平均值（MPa）。试验采用 5%Na₂SO₄溶液，测试结果如表 3-8 所示。

表 3-8 不同水泥试件耐盐试验数据

样品类型	初始抗压强度 f_0 (MPa)	腐蚀后抗压强度 f_n (MPa)	强度耐蚀系数 K_f (%)
空白试件	29.7	24.95	16.0
掺加脲酶自修复 剂试件	59.0	36.35	38.4

试验结果表明，空白组试件经盐侵蚀循环后，强度耐蚀系数仅为 16.0%，说明基体结构遭受严重破坏，强度大幅衰减；而掺加脲酶自修复剂的实验组试件，强度耐蚀系数提升至 38.4%，较空白组提升 22.4 个百分点，不仅初始强度显著提高，且在盐侵蚀环境下展现出更优异的强度保留能力。

抗盐性能提升的核心原因是：脲酶自修复剂诱导生成的碳酸钙沉淀填充水泥基体微裂缝和孔隙，细化孔隙结构，降低盐离子渗透速率；同时，碳酸钙沉淀形成的致密屏障可减少盐离子与水化产物的接触，抑制有害反应（如钙矾石生成）的发生，避免基体开裂、剥落，从而提升水泥基材料在盐侵蚀环境下的耐久性。

3.2.6 验证小结

综合以上验证结果，水泥混凝土脲酶自修复剂对水泥基材料的性能具有显著优化作用：可提升水泥基材料的流动度、延长凝结时间，适配施工需求；显著提升抗折、抗压强度及抗冻性能，保障服役安全性；能有效修复水泥基材料表面及内部微裂缝，填充孔隙，提升抗渗、抗盐性能，延长材料服役寿命。脲酶自修复剂的作用机制基于脲酶催化尿素水解生成碳酸钙沉淀的生物矿化反应，实现物理填充与化学封堵的双重改性效果，且与水泥基材料相容性良好，无不利影响，为团体标准中脲酶自修复剂的应用参数设定提供了充分的试验支撑。

3.3 水泥混凝土脲酶自修复剂工程应用照片



图 3-9 水泥混凝土酶自修复剂工程应用现场照片

4 知识产权情况说明

通过资料查询、网上征询和征求意见阶段的反馈意见，标准内容直至目前没发生有关专利所属权的请求，故本标准不涉及相关专利与知识产权。

5 产业化情况、推广应用论证和预期达到的效果

混凝土是当今甚至将来很长时间内不可替代的重要建筑材料。混凝土使用一段时间经常出现不同程度的开裂，影响其力学性能及耐久性，甚至导致结构的破坏和建筑物的倒塌。如果不能及时修补裂缝，将可能引发严重的经济损失与安全隐患。混凝土属于高能耗材料，水泥混凝土酶自修复剂的掺入可以有效解决混凝土早期开裂问题，提高交通工程基础设施建筑质量的同时延长其服务年限，节约建造或维修时大量材料和能源的消耗，同时避免再次施工产生的环境污染，经济效益、环境效益和社会效益显著。

5.1 社会效益

本项目核心原料采用大豆粉，可推动农产品资源化高效利用，拓宽大豆等农产品的应用渠道，助力农业产业链增值，带动农户增收。工艺采用常温复配、粉剂/液剂分装生产模式，绿色环保无污染物排放，替代传统高污染修复材料，有效减少工业污染，助力“双碳”目标落地。同时，混凝土抗碳化能力提升62.5%，护栏寿命从50年延长至80年，大幅减少维修施工频次，降低施工对高速公路通行的干扰，保障道路通行安全，提升基础设施运维效率，推动交通、住建等领域绿色高质量发展，兼顾生态保护、农业赋能与民生保障多重效益。

5.2 经济效益：

以高速护栏为例，除直接成本节省外，寿命延长可减少维修期间的交通管制、临时防护、车辆绕行等间接支出，降低运维隐性成本。应用无需新增专用施工设备，规避设备采购、维护、存放等额外投入。技术规模化落地后，可带动脲酶源原料加工、生产、运输等相关产业协同发展，创造大量就业岗位，促进区域经济活力提升。同时，为应用单位节省长期运维资金，释放的资金可投入其他工程建设，提升整体投资效益，进一步推动相关领域基础设施升级，实现产业与工程效益的双向赋能。该技术成果未来的市场需求量巨大。

6 采用国际标准和国外先进标准情况

无

7 与现行法律、法规、规章及相关标准的协调性

本标准与现有标准GB 8076-2008、GB 18445-2012等国内标准形成互补与延伸关系，共同构建混凝土外加剂材料应用的技术框架。本标准专注于脲酶自修复剂的应用，填补现有标准中对此类材料的技术指导空缺，有利于拓展脲酶自修复剂的利用效率和应用市场。

8 重大分歧意见的处理经过和依据

本标准编制过程中尚未出现不能解决的重大分歧意。

9 标准性质的建议

本标准属团体推荐性产品标准。

10 贯彻标准的要求和措施建议

根据标准情况分别列标题阐述待本标准批准发布后，建议由主编单位组织相关生产、检验、施工、设计等有关单位进行宣贯。

11 替代和废止现行相关标准的建议

无

12 其他应予说明的事项

无