

# 复合结构微胶囊的掺量与粒径对自修复性能的影响研究

李晓妍<sup>1</sup> 杨光<sup>1,2</sup> 张科<sup>1</sup> 曹叶儿<sup>1</sup> 王祎帆<sup>1</sup> 王嘉豪<sup>1</sup>

1. 西安欧亚学院人居环境学院 陕西 西安 710065

2. 城市智慧建造陕西省高校工程研究中心 陕西 西安 710065

**摘要:** 为提高水泥基材料对微裂缝的自修复能力, 本文研制了一种以矿物粉末为囊芯、快硬水泥和聚乙烯醇为复合囊壁的微胶囊。通过喷雾干燥结合圆盘造粒与包衣技术制备微胶囊, 重点分析了微胶囊掺量与粒径对水泥砂浆力学性能及自修复效果的影响。结果表明: 当微胶囊掺量为10% (粒径2.36-3.2mm) 时28d抗压强度影响较小, 且自修复效果最优。经28 d修复养护后, 试件的微裂缝修复率超过85%, 抗压强度恢复率达90%以上, 相对透水系数显著降至0.15。微观分析表明, 修复产物主要为碳酸钙和C-S-H凝胶。

**关键词:** 微胶囊; 自修复; 水泥基材料; 力学性能; 修复机理

混凝土作为基础设施建设中最重要的建筑材料, 其在服役期间的裂缝问题备受关注<sup>[1]</sup>。其通过预埋修复剂胶囊, 实现裂缝自主愈合, 已成为改善混凝土性能的研究热点<sup>[2]</sup>。目前, 微胶囊研究多集中于环氧树脂体系, 但存在与水泥基体相容性差、成本高等问题<sup>[3]</sup>。

传统的裂缝修复方法如灌浆填充、压力注浆等, 难以快速监测并修复结构内部细微损伤<sup>[4]</sup>。水泥基材料自身虽存在一定自愈能力, 但修复过程缓慢, 修复效果有限<sup>[5]</sup>。在此背景下, 微胶囊自修复技术因修复速度快、效果好、成本相对低廉等优势, 展现出广阔的应用前景<sup>[6]</sup>。

基于此, 本文旨在开发一种以氧化镁基膨胀剂等无机材料为囊芯的复合结构微胶囊。重点解决其制备工艺、在水泥基体中的分布行为, 并定量评价其对材料力学性能与自修复效能的影响, 进而通过微观测试揭示其修复机理。

## 1 试验原材料及方法

### 1.1 试验原材料

1.1.1 囊芯材料: 选用氧化镁膨胀剂、P.O 42.5普通硅酸盐水泥、硅灰作为囊芯主要成分, 其化学成分如表1所示。优选出囊芯配方DM3, 具体配比为氧化镁膨胀剂60%、硅酸盐水泥20%、硅灰20%。

1.1.2 囊壁材料: 内囊壁选用快硬性水泥, 外囊壁选用国产二号聚乙烯醇, 配制质量分数5%的PVA溶液。

**作者:** 李晓妍 (2004-), 女, 西安欧亚学院智能建造专业, 研究方向: 智能建造技术及应用, E-mail: 1348719060@qq.com。

**基金项目:** 陕西省大学生创新创业训练计划项目 (S202412712033); 西安欧亚学院科研创新团队 (2021XJD01)。

表1 囊芯原材料的主要化学成分 (wt%)

材料	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
水泥	21.16	7.81	2.92	54.42	3.19	2.93
硅灰	95.70	0.82	0.09	0.30	0.72	0.71
膨胀剂	3.71	0.80	1.17	3.39	90.13	0.07

1.1.3 基体材料: P.O 42.5水泥、标准砂、自来水。

### 1.2 微胶囊制备方法

采用三步法制备复合结构微胶囊:

1.2.1 囊芯造粒: 将DM3配方粉末放入圆盘造粒机, 喷涂水雾成球, 筛分粒径1.4-4.75mm颗粒, 烘干备用。

1.2.2 包裹内囊壁: 将干燥后的囊芯颗粒重新放入圆盘造粒机, 均匀喷洒快硬性水泥粉末及水雾, 使颗粒表面形成厚度约0.5mm的内囊壁, 然后放入恒温恒湿箱中硬化1h。

1.2.3 成膜外囊壁: 将包裹内囊壁的颗粒放入包衣机, 均匀喷涂5%的PVA溶液, 同时鼓吹 60℃热风去除颗粒表面水分, 使PVA溶液快速成膜。

### 1.3 试验配合比

制备40 mm×40 mm×160 mm砂浆试件, 微胶囊掺量分别设为5%、10%、15%、20%, 胶囊粒径范围分为1.6-2.36mm、2.36-3.2mm、3.2-4.0mm、4.0-4.75mm, 以探究掺量和粒径对基体性能的影响。A系列固定掺量10%粒径, B系列固定粒径为2.36-3.2 mm, 基准组为未掺微胶囊的普通水泥砂浆, 具体砂浆试件试验配合比如表2所示。

表2 水泥砂浆试件试验配合比 (kg/m<sup>3</sup>)

组别	水泥	砂	微胶囊	水	减水剂	胶囊粒径	胶囊掺量
基准组	400	800	0	200	3.2	-	0
A1	400	720	80	200	3.2	1.6-2.36	10
A2	400	720	80	200	3.2	2.36-3.2	10

续表:

组别	水泥	砂	微胶囊	水	减水剂	胶囊粒径	胶囊掺量
A3	400	720	80	200	3.2	3.2-4.0	10
A4	400	720	80	200	3.2	4.0-4.75	10
B1	400	760	40	200	3.2	2.36-3.2	5
B2	400	680	120	200	3.2	2.36-3.2	15
B3	400	640	160	200	3.2	2.36-3.2	20

1.4 性能测试方法

力学性能: 参照GB/T 17671-2021, 制备砂浆试件, 测试3d、7d、28d抗压/抗折强度。

自修复效果:

裂缝宽度: 对试件施加压力产生微裂缝, 浸泡水中养护3d、7d、14d、28d, 用光学显微镜测量裂缝宽度, 计算修复程度。

透水性: 采用恒定水头法测试裂缝渗透系数, 计算相对透水系数。

强度恢复率: 对比修复前后抗压强度, 计算恢复率。

微观形貌: 采用扫描电子显微镜搭配能谱仪及X射线衍射分析裂缝处的修复产物形貌与物相组成。

2 结果与分析

2.1 微胶囊基本性能

测试结果表明, 微胶囊的硬度随粒径增大而增加。如图1所示, 当粒径处于2.36-3.2 mm范围内时, 硬度值达到1.8 kg。

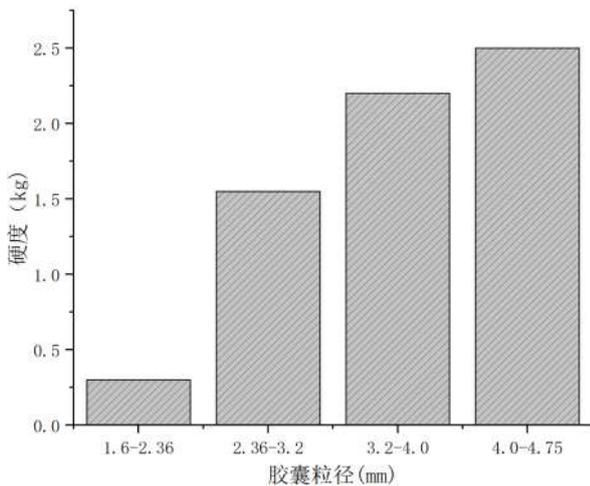


图1 复合结构微胶囊硬度与粒径的关系

2.2 对基体力学性能的影响

微胶囊的掺入会引入薄弱界面, 因此砂浆的力学性能随掺量增加呈现下降趋势, 这与预期相符。由图2和图3可知, 当微胶囊掺量为10%时, 28 d抗压强度较基准组下降约12%, 降幅在可接受范围内, 说明此掺量下微胶囊对基体结构的负面影响可控。然而, 当掺量增至20%时,

抗压强度急剧下降至28.3 MPa, 表明过高的微胶囊含量严重破坏了水泥基体的整体性。抗折强度变化趋势类似但降幅较小, 暗示微胶囊与水泥基体界面粘结尚可。

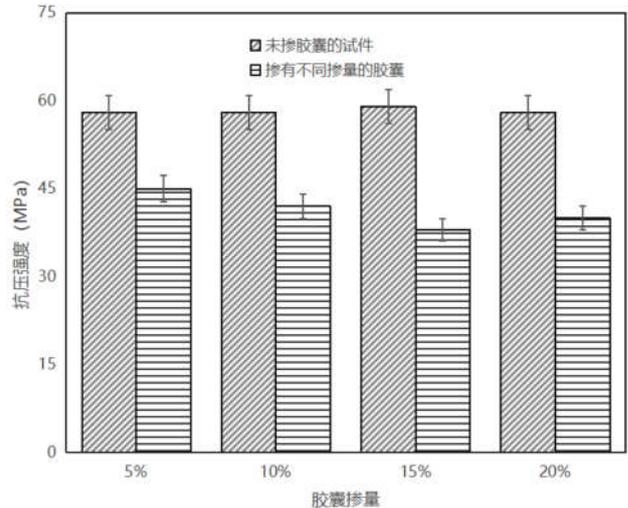


图2 不同微胶囊掺量对水泥砂浆抗压强度的影响

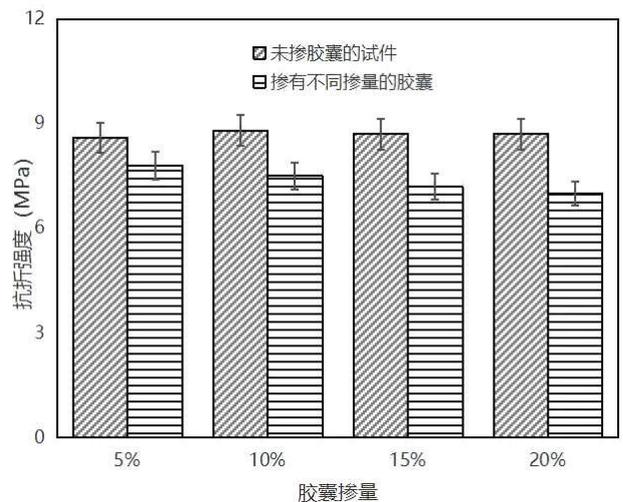


图3 不同微胶囊掺量对水泥砂浆抗折强度的影响

2.3 自修复效果分析

本节通过裂缝宽度观测、抗渗性能测试和强度恢复率分析, 系统探究了微胶囊对水泥基材料自修复能力的提升作用。

2.3.1 裂缝表面修复行为与修复率

通过光学显微镜持续观测预开裂试件在水养护条件下的裂缝变化, 发现微胶囊的修复效果具有明显的时间依赖性。对于初始宽度约为0.2 mm的微裂缝, 掺加10%微胶囊(粒径2.36-3.2 mm)的试件在修复3 d后, 裂缝边缘即开始有白色修复产物析出; 修复7 d时, 裂缝宽度显著减小; 至28 d养护龄期, 裂缝基本闭合。相比之下, 基准组修复效果有限。

值得注意的是,修复效果与初始裂缝宽度密切相关。当裂缝宽度增加至0.3 mm时,同期修复率下降至约50%,说明该体系修复能力存在上限,更适用于早期微裂缝的自主修复。不同胶囊掺量下试件的抗压强度恢复率结果进一步验证了修复效果(图4)。如图所示,掺量10%的试件在28 d修复后强度恢复率超过90%,而掺量5%和15%的试件恢复率分别为84%和88%,表明10%为最优掺量。

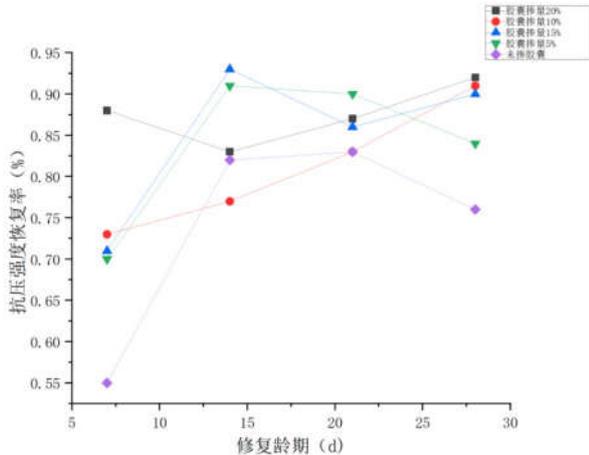


图4 不同胶囊掺量下试件的抗压强度恢复率

### 2.3.2 抗渗性能恢复

抗渗性能是评价裂缝修复效果的重要指标。通过恒定水头法测试修复后试件的相对透水系数,发现裂缝修复程度随养护龄期增长而显著提升(图5)。初始裂缝宽度0.2 mm时,修复28 d后相对透水系数降至0.15,修复率达85%以上;当裂缝宽度增至0.3 mm时,修复率降至50%。胶囊掺量10%的试件抗渗恢复效果最优,这是由于该掺量下修复剂在基体中分布最为均匀,能有效封堵渗水路径。

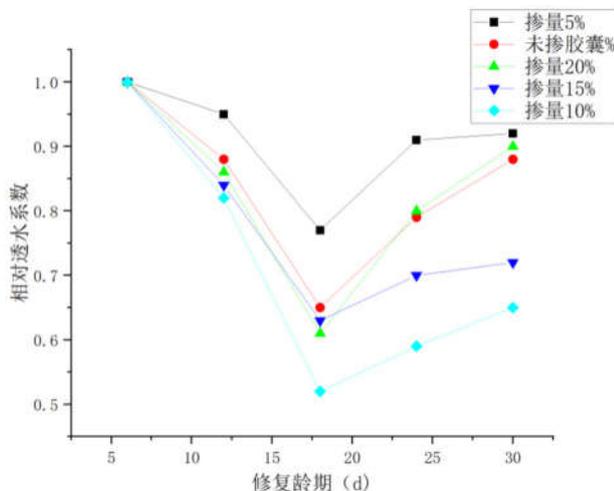


图5 不同微胶囊掺量下水泥基材料的相对透水系数变化

### 2.4 微观机理

为揭示修复机理,对裂缝区域进行SEM-EDS和XRD分析。SEM图像显示,裂缝中生成了大量的针状或块状晶体以及无定形的凝胶状物质。EDS分析表明这些产物富含Ca、Si、O、Mg等元素。XRD图谱进一步证实,修复产物主要包括方解石、C-S-H凝胶以及少量钙矾石。

其修复机理可归结为:破裂释放的囊芯材料在水环境下发生水化反应,生成膨胀性产物和C-S-H凝胶,同时硅灰的火山灰效应进一步促进致密结构的形成。

### 3 结论

复合结构微胶囊能显著提升水泥基材料自修复能力,修复28d后裂缝修复率可达85%以上,抗压强度恢复率超90%。微胶囊掺量不宜超过10%。推荐囊芯配方DM3、内囊壁硬化1h、外囊壁厚度0.15mm为最佳参数,平衡修复效果与基体性能。

本研究为无机微胶囊自修复水泥基材料的开发与应用提供了实验依据和理论支撑。后续研究可关注微胶囊在长期服役环境下的耐久性及其在实际工程中的修复效果。

### 参考文献

- [1] Dry C, Mcmillan W. Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete[J]. Smart Materials and Structures, 1996, 5(3): 297-300.
- [2] 万健, 韩超. 微胶囊自修复混凝土的实验研究及性能评价[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(5): 40-42.
- [3] 曲明月. 复合结构微胶囊的制备技术及自修复性能研究[D]. 山东大学, 2021.
- [4] 刘素瑞, 杨久俊, 王战忠, 等. 混凝土自愈合能力环境影响因素研究进展 [J]. 混凝土, 2015, 34 (10): 2851-2856.
- [5] 金海东, 杨杨, 顾春平, 等. 微胶囊型自修复砂浆的制备及其性能优化 [J]. 混凝土, 2019 (3): 124-129.
- [6] 陈胜利, 张译允, 黄文辉, 等. 混凝土微裂缝自修复技术研究进展及展望 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22 (5): 673-681.