

物理触发微胶囊自修复水泥基材料研究进展

宋 侨^{1,2}, 王险峰^{1,2*}, 陈 琪^{1,2}, 杨振鸿^{1,2}, 姜 婷³, 李大望^{1,2}, 邢 锋^{1,2}

¹深圳大学土木与交通工程学院 广东深圳

²广东省滨海土木工程耐久性重点实验室 广东深圳

³中交四航局港湾工程设计院有限公司 广东广州

【摘要】自 2008 年以来,广东省滨海土木工程耐久性重点实验室研究了多种可实现自修复功能的有机和无机的微胶囊。为了能够有效的评价微胶囊在水泥基材料中的修复效率,本文对含物理触发型微胶囊的水泥基材料的强度、抗渗性、碳化深度以及微观孔结构进行了详细描述,发现微胶囊的粒径、掺量、修复龄期以及损伤程度对修复效果有一定影响,微胶囊的掺量是影响修复率的主要因素。另外对微胶囊的基本力学性能也进行了详细描述包括微胶囊的破裂判断标准和微胶囊的弹塑性性能。研究发现通过纳米压痕实验以及数值模拟可以得到微胶囊的弹塑性包括杨氏模量、硬度等物理参数。通过判断微胶囊在水泥基材料中的破裂和脱粘的临界值可以得到微胶囊在水泥基体中是否会发生破裂,实现修复功能。

【关键词】物理触发型微胶囊; 力学性能; 渗透性; 微观孔结构; 数值模拟; 弹塑性分析

【基金项目】国家自然科学基金(51978409),国家重点研发计划(2022YFE0109300),广东省滨海土木工程耐久性重点实验室(2020B1212060074),深圳市低碳建筑材料与技术重点实验室(ZDSYS 20220606100406016)

【收稿日期】2023 年 4 月 20 日

【出刊日期】2023 年 5 月 14 日

Research progress on physical triggered microcapsule based self-healing cementitious materials

Qiao Song^{1,2}, Xianfeng Wang^{1,2*}, Qi Chen^{1,2}, Zhenhong Yang^{1,2}, Ting Jiang³, Dawang Li^{1,2}, Feng Xing^{1,2}

¹College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong

²Guangdong Provincial Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering, Shenzhen, Guangdong

³CCCC FHEC Harbor Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong

【Abstract】 Since 2008, the Guangdong Provincial Key Laboratory of Durability in Coastal Civil Engineering has studied a variety of organic and inorganic microcapsules that can achieve self-healing functions. In order to effectively evaluate the repair efficiency of microcapsules in cement-based materials, this paper described the strength, impermeability, carbonization depth and micro-pore structure of cement-based materials containing physically triggered microcapsules in detail. It was found that the particle size, dosage, repair age and damage degree of microcapsules had certain effects on the repair effect. The dosage of microcapsules is the main factor affecting the repair rate. In addition, the basic mechanical properties of microcapsules are described in detail, including the rupture criterion and the elastic-plastic properties of microcapsules. It is found that physical parameters such as Young's modulus and hardness of microcapsules can be obtained through nanoindentation experiment and numerical simulation. By judging the critical value of microcapsule rupture and debonding in cement-based materials, whether microcapsule will break in cement matrix can be obtained, and the repair function can be realized.

【Keywords】 Physically triggered microcapsule; Mechanical test; Permeability test; Micro-pore structure; Numerical simulation; Elastoplastic analysis

*通讯作者: 王险峰(1967-)男,深圳大学教授、博士,研究方向:自修复混凝土材料。

废旧建筑物的大规模拆除和新建筑物不断建造, 不仅耗费大量的财力, 同时要耗费大量的人力, 对社会的可持续发展产生了不利影响^[1-4]。随着科技的日益发展, 自修复混凝土的出现为社会的可持续性发展做出了巨大的贡献。自 White 等人研究了力学触发的自修复微胶囊之后, 作为实现材料或结构自我恢复的新策略, 引起了越来越多的研究者的关注^[5-6]。

自修复材料的种类可以分为两个方面: (1) 材料层面, 包括微生物^[7-8]、聚合物^[9-10]、膨胀剂和矿物外加剂等^[11]; (2) 结构层面, 包括中空玻璃纤维、形状记忆合金等^[12-14]。前者处于被动修复, 通常是这些材料用球状囊壁包裹, 形成微球, 放置于混凝土材料中, 当混凝土材料出现裂缝或者 pH 值发生变化时, 囊壁破坏, 释放修复材料达到修复裂缝的作用。后者自修复机理为主动修复, 通过记录混凝土内部结构应力变化, 进行实时监测。

自修复微胶囊的制作成本低, 操作方便, 囊壁以及囊芯选材丰富且易与获取, 使得自修复微胶囊在众多领域得到广泛的运用。自修复微胶囊对混凝土裂缝进行有效的修复, 并且能够形成一套自修复系统对于自修复领域具有非常重要的意义^[15]。为了有效的评价微胶囊对混凝土的修复效率, 本文针对含微胶囊的水泥基材料的强度、渗透性以及微观孔结构的研究进行了综述, 并且对微胶囊的破裂标准和弹塑性基本力学性能进行了详细描述。

1 微胶囊的弹塑性分析

对于脲醛树脂微胶囊的弹塑性力学性能, 利用纳米压痕测试以及有限元模拟, 结合优化算法王险峰等人^[16-17]分析。

1.1 微胶囊弹性性能分析

材料的弹性性能主要包括泊松比以及杨氏模量, 其中微胶囊的泊松比是不变的。采用纳米压痕实验 (Berkovich 压头和平板压头), 运用弹性接触理论以及板壳理论对脲醛树脂微胶囊弹性性能进行评定。并且针对测试过程中出现的诸如材料的压入-堆积现象, 以及球壳的实心、空心现象进行了讨论分析。

基于纳米压痕测试结合传统 Hertz 弹性接触理

论进行分析 (使用 Berkovich 压头), 如图 1 所示为 Hertz 弹性接触理论模型。发现脲醛树脂微胶囊的弹性模量 E 和硬度 H 的平均值分别为 0.81 ± 0.04 GPa, 0.27 ± 0.02 GPa。采用另外一种方法利用纳米压痕平板测试, 如图 2 所示为平板压头的接触模型示意图, 结合 Reissner, Lukasiwicz 和 Pogorelov 推导所得的弹性球壳在法向集中力作用下的弹性解, 并且考虑了微胶囊的实心, 空心情形下的压缩力学响应, 最后利用最小二乘法求得实验拟合曲线与弹性解误差最小时的杨氏模量即为所求。Reissner 解析解计算所得杨氏模量的平均值为 0.86 ± 0.04 GPa, 由 Pogorelov 和 Lukasiwicz 的解析解计算所得的杨氏模量的平均值分别为 0.66 ± 0.02 GPa 和 0.73 ± 0.02 GPa。并讨论了微胶囊的整体变形和局部变形, 给出了玻氏压头的适用范围。模拟了微胶囊在不同厚度下的变形行为, 并得出接触理论和壳理论的适用范围。通过两种方法所测得的结果都在一个很小的区间范围内, 说明这两种方法都是稳定而且可行的。

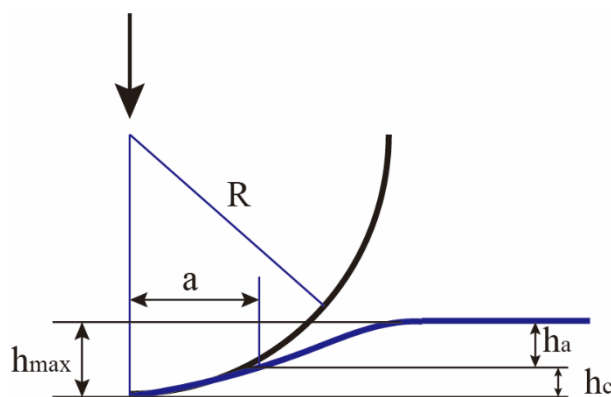


图 1 Hertz 接触模型示意图

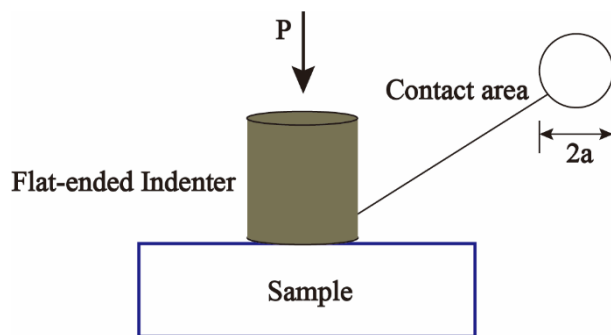


图 2 采用平板压头的接触模型示意图

1.2 微胶囊塑性性能分析

通过利用 Matlab 平台开发程序, 调用 Abaqus

有限元软件,并读取计算结果与试验结果进行对比,结合其内置的优化算法对微胶囊进行力学参数评定。针对脲醛树脂微胶囊的三种弹塑性本构模型利用优化程序进行参数评定包括幂函数硬化的弹塑性本构;理想弹塑性本构;线性硬化的弹塑性本构,其表达式如式(1)(2)(3)所示:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ R\varepsilon^n, & \varepsilon \geq \varepsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma_y, & \varepsilon \geq \varepsilon_y \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma_y, & \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_1 \\ T(\varepsilon - \varepsilon_1) + \sigma_y, & \varepsilon_1 \leq \varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

其中 E 是弹性模量; ε 是应变; σ 是应力。

对于幂函数硬化弹塑性本构模型,得到的最终解分别为:杨氏模量 $E=1954 \pm 1$ MPa,屈服应力 $\sigma_y=168 \pm 1$ MPa,硬化指数 $R=8.1 \pm 0.2$, $n=0.6 \pm 0.1$ 。针对理想弹塑性本构模型,得到的最终解分别为:杨氏模量 $E=1953 \pm 1$ MPa,屈服应力 $\sigma_y=167 \pm 1$ MPa。针对线性硬化的弹塑性本构模型,得到的最终解分别为:杨氏模量 $E=1953 \pm 1$ MPa,屈服应力 $\sigma_y=168 \pm 1$ MPa,线性硬化模量 $T=194 \pm 2$ MPa。并且通过多次改变初始值以及选取多个单元数量(网格尺寸)验证了计算程序的可靠性和收敛性。

2 含微胶囊水泥基材料的强度修复率

通过三点弯曲试验^[10]对含微胶囊砂浆的抗弯强度和抗压强度进行了评价,在砂浆中加入不同粒径不同掺量的微胶囊,研究微胶囊对砂浆的强度的影响。由于在砂浆试块内部存在很多空隙,而小粒径的微胶囊会填充其内部发生微填充效应。因此当微胶囊掺量较少时,对水泥基材料的强度可能有所提升。而随着微胶囊的含量增多,会在砂浆内部形成较多的缺陷,降低水泥基材料的强度。

强度的恢复率来自于附着在裂纹面上的修复剂固化物,微胶囊的用量越多,修复率越高。为了得到微胶囊的修复效果,需要考虑三个影响因素,包括水灰比,微胶囊含量和预加载损伤率。对于含有微胶囊的水泥基材料的强度修复率可以定义为:

$$\text{Recovery rate} = \frac{\text{strength after healing}}{\text{original strength}} \times 100\% \quad (4)$$

从实验结果可以得到,随着微胶囊含量的增加,修复率几乎呈线性增加。水灰比、预加载的程度对修复率影响较小,而微胶囊的掺量是影响修复率大小的主要因素。

3 含微胶囊水泥基材料的渗透性以及抗碳化深度性能的修复率

3.1 水压力渗透试验

如图3,当微胶囊掺量为3%时混凝土的抗渗透性增大,当微胶囊掺量为6%时,试件的抗渗水压力值降低至0.81MPa(150.05 μ m),低于未掺微胶囊的试件,混凝土的抗渗性降低。由于微胶囊和水泥基体的弹性模量差异较大,使得二者的结合界面产生了孔隙,微胶囊掺量越大,孔隙就会越多。随着微胶囊掺量由3%增至6%时,微胶囊在孔隙中产生了拥挤现象,阻碍周围流体运动,使砂浆粘性增大导致试件压实不良,导致试件抗渗透性降低。

在掺量相同时,不同的微胶囊粒径,试件的抗渗性也有一定的差异性,这种现象表明微胶囊的粒径也会对含微胶囊的水泥基材料的抗渗透性产生影响,随微胶囊粒径的增大,材料抗渗透性降低,但其影响程度比微胶囊掺量的影响因素要小。这是由于粒径较小时,其在水泥基中的颗粒级配得到优化,最终提高了试件的密实性,宏观上使得抗渗透性能提升。

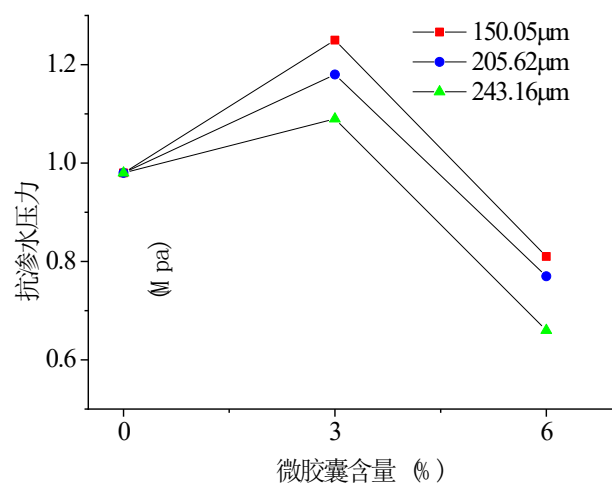


图3 抗渗水压力随微胶囊掺量的变化

3.2 碳化试验

如图 4 所示, 混凝土碳化试验所测得碳化深度通常随碳化龄期递增, 微胶囊的掺入, 对混凝土各龄期的抗碳化性能都有不同程度的影响。微胶囊对混凝土抗碳化性能的影响是随微胶囊掺量变化的, 较小掺量的微胶囊可以明显提高混凝土抗碳化性能, 但当掺量增加到 6% 时, 混凝土抗碳化性能反而会小幅度下降。这个结论也与水压力渗透试验的结果一致, 验证了小掺量微胶囊在水泥基材料中的填充作用, 以及大掺量微胶囊在水泥基材料中所产生的拥挤效应与弹性模量差异的理论。

此外, 未掺微胶囊的试件碳化深度在各个龄期都不同程度的高于掺有微胶囊的试件, 这表明掺入微胶囊掺量为 3% 时, 各尺寸的胶囊均对混凝土的抗碳化性能产生积极的效应。同时微胶囊粒径也是对混凝土抗碳化性能的影响因素, 水泥基材料所掺微胶囊粒径越大, 其抗碳化性能越低, 但其影响程度低于微胶囊掺量。这可能是由于粒径小的微胶囊在水泥基材料中有更好的级配, 使材料更加密实, 提高了其抗碳化性能。

为研究水压力渗透试验、碳化试验中微胶囊对水泥基材料修复作用的效率, 定义各实验参数修复率、恢复率如下:

$$\eta_{RCM} = -\frac{D_{healed} - D_{damaged}}{D_{damaged}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\varphi_{RCM} = \frac{D_{initial}}{D_{healed}} \times 100\% \quad (6)$$

$$\eta_{水压力} = \frac{P_{healed} - P_{damaged}}{P_{damaged}} \times 100\% \quad (7)$$

$$\varphi_{水压力} = \frac{P_{healed}}{P_{initial}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\eta_{碳化} = -\frac{d_{healed} - d_{damaged}}{d_{damaged}} \times 100\% \quad (9)$$

$$\varphi_{碳化} = \frac{d_{initial}}{d_{healed}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: η_{RCM} 、 φ_{RCM} 是基于 RCM 试验所测得的抗渗性修复率、恢复率 (%) ; $D_{initial}$ 、 $D_{damaged}$ 、 D_{healed}

分别表示初始、损伤后、损伤并修复后的试件的氯离子扩散系数 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}^2$) ; η 水压力、 φ 水压力分别是基于水压力试验所测得的抗渗性修复率、恢复率 (%) ; $P_{initial}$ 、 $P_{damaged}$ 、 P_{healed} 分别表示初始、损伤后、损伤并修复后的试件的抗渗压力值 (MPa) 。 η 碳化、 φ 碳化是基于碳化试验所测得的抗渗性修复率、恢复率 (%) ; $d_{initial}$ 、 $d_{damaged}$ 、 d_{healed} 分别表示初始、损伤及修复后的试件平均碳化深度 (mm) 。

从研究结果^[18]可以看出, 微胶囊的掺入对所有参数的修复率和恢复率都有积极且明显的作用。这表明未掺微胶囊的试件依靠自身的水化作用也有一定的修复作用, 但是由于水化自身的局限性和一些难于修复的较大裂缝的存在, 导致其修复效果较低, 不能完全恢复到初始状态。对于掺了微胶囊的试件, 可以发现, 所有参数的修复率和恢复率都有随着微胶囊掺量和粒径的增加而增加的规律。

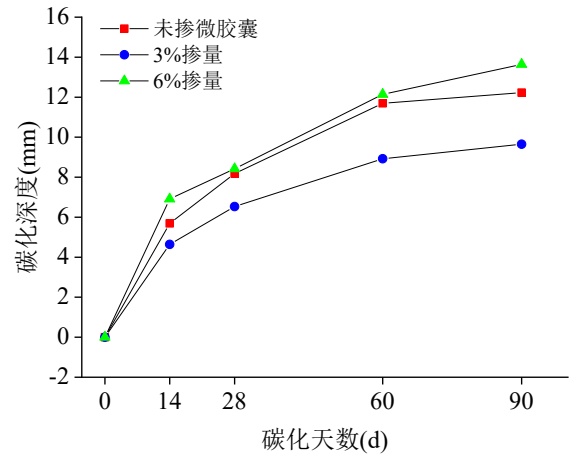


图 4 碳化深度随时间的变化

4 含微胶囊自修复水泥基材料的微观孔结构的修复率

文献^[19]提出了微胶囊自修复混凝土的微观孔结构对修复率的影响, 水泥基材料硬化后, 内部自由水的大量蒸发会产生孔隙。不同尺寸的孔隙是影响水泥浆体性能的重要因素。大量的研究发现混凝土性质不仅和孔隙率相关, 而且和孔的形态、孔径分布范围等都有密切的联系。

常用的测孔技术有压汞法、氮吸附法、光学法以及核磁共振等方法。其中, 压汞法主要是根据压入混凝土材料等多孔体系中的水银数量与所加压力之间的函数关系, 计算孔尺寸和相应的孔体积, 根

据施加压力的大小, 测孔范围为几纳米到几百微米, 测孔范围广。氮吸附技术主要根据滞后环的形状确定孔的形状, 按不同的孔模型计算孔分布, 通常测孔范围在几纳米到几十纳米。光学和电子显微镜结合图像分析常用来测较大的孔 (10 μm 以上), 通过图像结合软件分析, 根据孔和固相灰度的差别进行辨认, 计算孔体积。采用上述 3 种测孔方法研究微胶囊掺量 6% 的砂浆的微观结构, 发现掺有微胶囊的水泥砂浆对基体内部微裂缝有一定改善, 修复剂与固化剂的反应修复砂浆的微裂缝, 对于内部孔隙而言, 降低了大孔的比例, 增加小孔的比例, 表明微胶囊对砂浆微裂缝有一定的修复效果。随着微胶囊数量的增加, 样品的孔隙修复率的变化随着微胶囊的量而增加, 如图 5 所示:

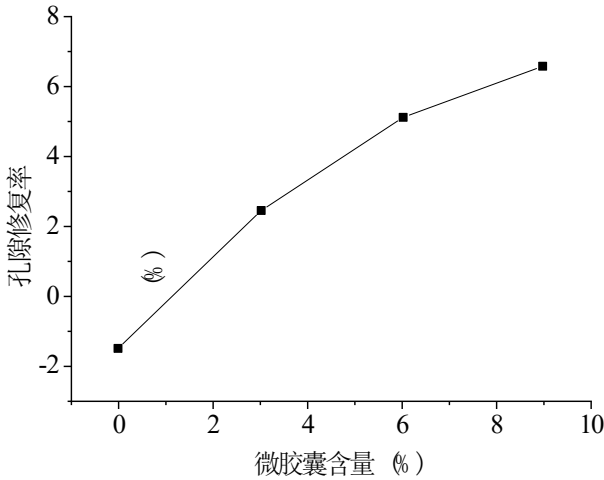
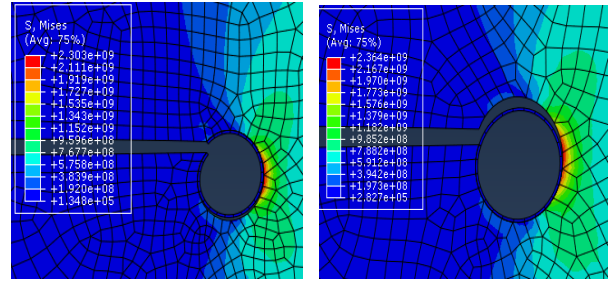


图 5 微胶囊的含量与孔隙修复率的关系

5 微胶囊的破裂/剥离分析

文献^[20]提出了基于水泥基材料中微胶囊的破裂依据。使用有限元软件设计了一个数值模型来研究微胶囊与裂纹的相互作用。设计了二维平面正方形区域, 其中边长为 10mm, 该区域的中心位置有一个半径为 0.1mm 的微胶囊, 通过对上部和下部的外部边界施加一个小的相对拉伸位移来施加载荷。一般的, 微胶囊厚度在 0.003mm 到 0.008mm。假定微胶囊的可能断裂点位于裂纹尖端附近。砂浆基质和微胶囊的其余部分被认为是弹性的。

如图 6 (a、b) 所示为模拟微胶囊的破裂和剥离的结果。通过模拟结果知道, 有两种方式能够判定微胶囊的行为: 破裂和剥离。



(a) 微胶囊破裂 (b) 微胶囊剥离

图 6 数值模拟结果

当只考虑破裂时 $\sigma_c = K_c$, 只考虑剥离时 $\sigma_D = K_D$, 如果两者都考虑时, 则比较 $\sigma_c = K_c$ 和 $\sigma_D = K_D$ 的值, 如果 $(\sigma_c / K_c) > (\sigma_D / K_c)$, 则胶囊破裂, 反之剥离。因此可以定义方程:

$$Q = \frac{\sigma_c}{\sigma_D} - \frac{K_c}{K_D} \quad (11)$$

其中: K_c —微胶囊壁刚度, K_D —界面刚度, σ_c —微胶囊的应力, σ_D —界面的应力。在这里, 限定的状态被定义为, 当一个参数变化很小时得到的点, 失效模式从微胶囊破裂变为脱粘或从脱粘到破裂。很明显, 对于特定的加载应该是弹性状态下的几何参数的函数。胶囊破裂或脱粘的标准可以用三个归一化参数 t/R , h/R 来表示:

$$Q = F\left(\frac{t}{R}, \frac{h}{R}\right) - \frac{K_c}{K_D} \quad (12)$$

其中, R 和 t 分别代表微胶囊的外半径和厚度; h 表示裂纹的高度坐标。通过使用上述模型, 将 t/R 从 0.01 变化到 0.08, 将 h/R 从 0.2 变化到 0.8, 获得了四十个限制状态点, 这四十个要点需要回归到一个表面。

通过使用 Matlab 进行多次测试后, 发现运用四次多项式的方程得到了相对令人满意的结果, 多项式可以表示为图 7 中所示的曲面, 其中表面下的点表示 $Q > 0$, 对应于微胶囊破裂, 否则, 微胶囊被脱粘。

有了这个标准, 我们可以使用这个参数来判断一个微胶囊破裂/剥离行为, 而不需要每次都进行有限元计算。

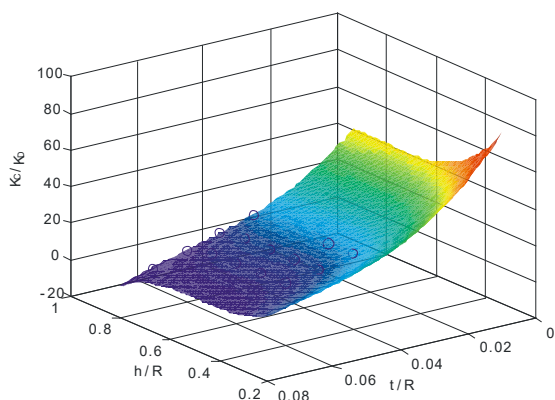


图7 判定微胶囊破裂/剥离的基准面

6 结语

有机微胶囊对力学性能的修复原理是微胶囊破裂流出的修复剂增加了修复剂和混凝土之间的界面粘结强度和有效承载面积, 其影响因素包括微胶囊粒径、掺量、修复龄期、基体损伤程度等。

对脲醛树脂微胶囊的几何形貌表征之后, 通过单粒试样的纳米压痕仪测试其力学参数, 得微胶囊弹性力学参数如杨氏模量、屈服应力等基本力学参数。通过 Matlab 结合有限元软件进行优化计算, 得到了微胶囊的塑性力学性能参数。

通过三点弯曲实验发现, 由于粒径与掺量的增加使修复体系可以提供更多的修复剂, 强度修复率随着微胶囊粒径与掺量的增加而增大, 试样中有很多小孔, 因为小粒径微胶囊产生的微填充效应, 少量的微胶囊的量对水泥基材料的强度是有提升的, 但是过多的微胶囊的含量, 可能会形成很多缺陷, 就会降低水泥基材料的力学性能。同理, 对于抗渗性、抗碳化性和水泥基材料的微观孔结构研究都有相同的结论。

通过数值模拟的方法可以对微胶囊的破裂行为进行系统的研究, 通过判断微胶囊的破裂以及脱粘两个状态的临界值, 得到微胶囊的破裂值判断公式, 通过 Matlab 优化计算, 发现运用四次多项式的方程得到了相对令人满意的结果, 当 $Q > 0$ 时微胶囊破裂, 反之微胶囊被脱粘。

7 展望

本文总结了微胶囊在二维平面中的拉裂破坏以

及在常温下对微胶囊的弹塑性进行了实验和数值分析。而混凝土结构长时间存在于复杂环境中, 如高温、低温等。对于后续微胶囊力学性能的研究提出几点建议:

(1) 对三维混凝土试块中微胶囊的受力进行深入研究, 分析其在复杂应力状态下的破裂值。

(2) 对在不同环境下, 微胶囊的力学性能进行多次实验和数值模拟分析, 完善力学性能参数。

参考文献

- [1] HAN Ningxu, XING Feng. Service life, sustainability and resilience—A holistic strategy dealing with marine concrete structures[C]. In Proceedings of the Seventh International Conference on Concrete under Severe Conditions—Environment and Loading, Nanjing, China, 2013, 1460–1475.
- [2] Zhang Haohui, Wang Qing, Li Yao, et al. Preparation and characterization of damage indication and self-healing microcapsules for surface micro-cracks in mortar coating[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(21), e52198.
- [3] 程智清, 李双祥, 刘宇, 等. 自修复混凝土的研究进展[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(11):84-87.
- [4] 张鸣. 水泥基材料用微胶囊自修复技术与原理的研究[D]. 中南大学, 2013.
- [5] HAN Ningxu, XING Feng. Intelligent resilience of cementitious materials for marine infrastructures[J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2015, 16:14-21.
- [6] HAN Ningxu, XING Feng. A comprehensive review of the study and development of microcapsule based self-resilience systems for concrete structures at Shenzhen university[J]. Materials, 2017, 10:21-25.
- [7] 张鹏, 郭得阳, 鲍致文, 等. 基于微生物矿化作用的混凝土自愈合性能研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(02): 544-554.
- [8] 徐建妙, 泮佳佳, 程峰, 等. 混凝土微生物自修复材料的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(02):429-440.
- [9] JEONG Boyoung, JHO Eun Hea, KIM Sang Hyun, et al.

- Effect of Calcium Organic Additives on the Self-Healing of Concrete Microcracks in the Presence of a New Isolate *Bacillus* sp. BY1[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(10), 04019227.
- [10] WANG Xianfeng, XING Feng, ZHANG Ming, et al. Experimental study on cementitious composites embedded with organic microcapsules[J]. *Materials*, 2013, 6(9):4064-4081.
- [11] YUAN Zhengcheng, JIANG Zhengwu, CHEN Qing. Permeability modeling of self-healing due to calcium carbonate precipitation in cement-based materials with mineral additives[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(3), 567-576
- [12] 马衍轩, 于霞, 徐亚茜, 等. 智能纤维混凝土的力场损伤响应、监测与修复研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(19): 19081-19090.
- [13] DRY Carolyn M. Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability[J]. *Cement and Concrete Research*. 2000, 30: 1969-1977.
- [14] 韩珊, 张小龙, 郭岩东, 等. 中空纤维自修复材料研究进展[J]. *化工新型材料*, 2018, 46(10):36-39.
- [15] Uddin Md Nasir, Tafsirojjaman, T., Shanmugasundaram N, et al. Smart self-healing bacterial concrete for sustainable goal[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2023,8(1), 46.
- [16] WANG Xianfeng, HAN Rui, TAO Jun, et al. Identification of mechanical parameters of urea-formaldehyde microcapsules using finite-element method[J]. *Composites Part B*, 2019, 158: 249-258.
- [17] WANG Xianfeng, HAN Rui, HAN Tielin, et al. Determination of elastic properties of urea-formaldehyde microcapsules through nanoindentation based on the contact model and the shell deformation theory[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, 215: 346-354.
- [18] WANG Xianfeng, ZHANG Jiaheng, ZHAO Wei, et al. Permeability and pore structure of microcapsule-based self-healing cementitious composite[J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 165:149-162.
- [19] WANG Xianfeng, SUN Peipei, HAN Ningxu, et al. Experimental Study on Mechanical Properties and Porosity of Organic Microcapsules Based Self-Healing Cementitious Composite[J]. *Materials*, 2017, 10(1):20.
- [20] WANG Xianfeng, XING Feng, XIE Qiang, et al. Mechanical behavior of a capsule embedded in cementitious matrix-macro model and numerical simulation[J]. *Journal of Ceramic Processing Research*, 2015, 16:74-82.

版权声明: ©2023 作者与开放科学出版研究中心 (OSPRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS