

<http://pmse.scu.edu.cn>

基于扩展有限元的力学性能对比对微胶囊可裂性的影响

王若彤¹, 郭润兰¹, 黄华^{1,2}, 李辉¹

(1. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 温州泵阀工程研究院, 浙江 温州 325105)

摘要:针对微胶囊能否及时开裂, 释放愈合剂从而修复基体中产生的微裂纹以确保良好自愈性能的问题, 文中采用扩展有限元方法结合内聚力模型, 建立了含预制裂纹和微胶囊的三维数值模型, 从微观角度分析了基体开裂与微胶囊开裂的过程及其内在机理。然后以微胶囊与环氧树脂基体之间弹性性能比、断裂性能比及核壳比和界面强度为变量, 揭示其对微胶囊可裂性的影响。结果表明: (1) 微胶囊的开裂取决于微胶囊与基体的弹性性能比和断裂性能比的结合, 其中断裂性能比起主要作用; (2) 在微胶囊与基体弹性性能比相同的情况下, 核壳比越大微胶囊越容易裂开; (3) 微胶囊与基体之间的界面强度较高有助于微胶囊的开裂。研究结果为微胶囊可裂性设计提供了参考依据, 为自修复复合材料的应用提供理论指导。

关键词: 树脂矿物复合材料; 自修复; 扩展有限元; 内聚力模型

中图分类号: TB115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2025)01-0114-11

树脂矿物复合材料因具备优异的动力学性能和易于成型等特性, 在精密机械结构件^[1]、路桥面铺装^[2]等多个重要领域得到广泛应用。然而, 树脂矿物复合材料在实际应用时容易在自身结构内部产生微裂纹, 造成工程结构件的使用寿命缩短和力学性能的降低^[3]。为了解决这个问题, 越来越多的学者开始深入研究材料的自修复性能^[4], 其中微胶囊自愈优势明显, 成为实现材料自修复的有效手段^[5]。但是微胶囊和基体的力学性能参数的不匹配会导致裂纹绕过微胶囊扩展, 不能使微胶囊开裂起到修复效果^[6]。因此, 深入研究微胶囊与基体之间的不同参数配合比, 确保微胶囊在需要时能够及时开裂修复材料结构内部出现的微裂纹, 对于提升设备寿命, 保障设备正常运转尤为重要。

目前研究人员通过力学性能实验的方法对树脂矿物复合材料进行了属性分析^[7], 也有些学者运用数值模拟探讨了微胶囊和基体的材料参数如何影响微胶囊可裂性。在基于二维的微胶囊模型的研究方

面, Ghaemi等^[8]采用有限元分析结合纳米压痕实验, 表征了压缩状态下单填充微胶囊的变形及破裂。Mauludin等^[9]建立了封装自愈混凝土模型, 运用扩展有限元方法(Extended finite element method, XFEM)研究了胶囊的体积比对胶囊承载能力和断裂可能性的影响。Son等^[10]也采用扩展有限元法和相互作用积分法相结合的方法研究了自愈材料中微胶囊与裂纹之间的相互作用, 得到通过提高微胶囊与基体的弹性模量比、优化微胶囊分布、改善界面缺陷等措施可以提高复合材料的抗裂性能的结果。但上述研究不能充分描述和预测微胶囊与基体系统中微观层面的断裂行为, 特别是无法反映基体材料和微胶囊材料之间力学性能匹配状况对裂纹扩展方向和微胶囊开裂的影响。因此, 在上述研究的基础上, Li等^[11]同样运用扩展有限元方法研究了裂纹几何参数和断裂特性对基体中裂纹扩展及微胶囊脱胶的影响。Mauludin等^[12]研究了微胶囊和砂浆基体之间断裂特性不匹配对微胶囊断裂可能性的影响。朱月风

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0013

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52365057); 温州市科技计划项目(G2023045); 甘肃省科技重大专项(23ZDGE002)

通讯联系人: 黄华, 主要从事复合材料在机械装备中的应用研究, E-mail: hh318872@126.com

等^[13]研究了微胶囊材料参数和相对位置对裂纹扩展路径的影响。李辉等^[14]研究了不同偏置裂纹下微胶囊和基体的力学性能及黏结界面缺陷对裂纹扩展路径的影响。同时研究人员发现,微胶囊与基体之间界面强度对裂纹扩展路径和微胶囊开裂情况同样有重要影响。Mauludin 等^[15]的研究发现,拉伸作用下自愈材料的承载能力随着微胶囊壳界面强度的增加而增加。但上述研究都是基于二维模型展开的,对于表达裂纹真实的开裂状态存在一定局限性^[16]。因此,为了表达裂纹真实的开裂状态,部分学者在三维层面分析了微胶囊与基体的力学性能对微胶囊可裂性的影响,Chen 等^[17]建立了三维模型分析微胶囊的弹性模量对复合材料的影响。赵钊^[18]同样建立了三维单元体模型分析囊壁材料力学性能对自修复复合材料中微胶囊破裂行为的影响。范雅琼等^[19]研究了动态载荷下微胶囊和环氧树脂基体之间断裂强度配比关系对微胶囊可裂性的影响。以上基于三维模型的研究主要集中在微胶囊和基体在特定的弹性性能比和断裂强度比下裂纹路径的扩展情况和微胶囊的开裂状态方面,未涉及力学性能的敏感性分析,且没有充分考虑微胶囊囊壁的厚度对微胶囊开裂行为的影响,忽视了断裂能的大小对材料抗破裂能力的影响^[20],结论不具有普遍适用性。

综上,为克服二维模型存在的局限性,结合微胶囊厚度和界面强度,讨论不同力学性能参数配比下微胶囊的开裂状态,揭示微胶囊的开裂机理并总结微胶囊可裂性的一般规律,本文以含微胶囊的树脂矿物复合材料为研究对象,基于 XFEM 方法并结合内聚力模型,建立含预制裂纹及微胶囊的三维模型,分析在不同弹性性能比下微胶囊与基体之间断裂性能比及微胶囊的核壳比和界面强度对裂纹扩展路径和微胶囊可裂性的影响。首先观察并分类了微胶囊与基体弹性性能参数和断裂性能参数在各种组合作用下的裂纹扩展路径和微胶囊开裂状态,其次分析了不同微胶囊的核壳比对微胶囊开裂的影响,得到微胶囊可裂性的一般规律。最后,通过给定不同的界面性能,进一步研究了微胶囊与基体之间不同界面强度对裂纹扩展路径和微胶囊可裂性的影响。研究结果为检验和设计含有微胶囊的复合材料提供了理论参考依据,有助于实现材料性能的“定向”设计。

1 含初始裂纹和微胶囊的三维模型建立和求解方法

微胶囊自修复树脂矿物复合材料在微观下可以看作由微胶囊、环氧树脂基体和黏结界面组成。本文结合内聚力模型运用 XFEM 建立含预制裂纹和微胶囊的三维数值模型,并设定了模型的基本参数,给定材料的参数范围,为后续研究不同力学性能对比对裂纹扩展路径和微胶囊可裂性的影响提供模型基础。

1.1 扩展有限元方法

扩展有限元是一种解决断裂力学问题的有限元方法,主要是采用独立于网格剖分的思想解决有限元中的裂纹扩展问题^[21],在保留传统有限元优点的同时,不需要对结构内部存在的裂纹等缺陷进行网格划分。核心思想是在包含不连续位移场的近似中加入富集函数^[22],针对含有裂缝等内部不连续的力学问题,在单元分解的基础上引入不连续函数进行局部逼近。因此裂纹尖端单元内任意点的位移方程如式(1)所示,

$$u = \sum_{i=1}^N N_i(x) \left[u_i + H(x) a_i + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x) b_i^{\alpha} \right] \quad (1)$$

式中: u ——单元内任一点的位移; u_i ——常规节点的位移变量; a_i ——节点位移间断附加自由度产生的向量; b_i^{α} ——节点位移间断奇异附加自由度产生的向量; $H(x)$ ——反映裂纹尖端间断位移的不连续函数,在裂纹上方、下方时分别取1和-1,计算公式如式(2)所示,

$$H(x) = \begin{cases} 1 & (\vec{x} - \vec{x}^*) \cdot \vec{n} \geq 0 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F_{\alpha}(x)$ ——反映裂缝尖端奇异应力场的函数。对于弹性材料若取四阶渐进函数,计算公式如式(3)所示,

$$F_{\alpha}(x) = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2} \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (3)$$

式中: $\theta = 0$ 与尖端裂纹相切。

1.2 内聚力模型

内聚力模型是把内聚力表示为裂纹张开位移的

函数,在裂纹尖端引入内聚力的概念,以此避免线弹性力学中裂纹尖端的奇异性。近些年来,内聚力模型应用范围越来越广,从最开始的脆性材料扩展到复合材料、金属材料、高分子材料、功能梯度材料,广泛应用于动态裂纹扩展、裂纹萌生及复合材料界面脱粘等具体的工程问题。

内聚力实际上是物质原子或分子之间的相互作用力。在内聚力区域内,应力是开裂位移的函数,即张力-开裂位移(Traction-separation)关系,也称为内聚力准则。内聚力区域代表了待扩展的裂尖前沿的区域,其中内聚力区域中裂尖的概念是一种数值定义,而非实际材料中的裂尖范畴。内聚力模型的重要特征是张力-位移曲线的形状和内聚力参数。目前,应用较为广泛的内聚力准则是双线性张力位移法^[23]。因此本文采用双线性内聚力模型,控制方程如式(4)和 $\bar{\tau}$

$$\sigma = \begin{cases} \frac{\sigma_{\max}}{\delta_n^0} \delta & (\delta \leq \delta_n^0) \\ \sigma_{\max} \frac{\delta_n^f - \delta}{\delta_n^f - \delta_n^0} & (\delta > \delta_n^0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau = \begin{cases} \frac{\tau_{\max}}{\delta_t^0} \delta & (\delta \leq \delta_t^0) \\ \tau_{\max} \frac{\delta_t^f - \delta}{\delta_t^f - \delta_t^0} & (\delta > \delta_t^0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ ——法向的应力值; τ ——切向的应力值; σ_{\max} ——法向的最大应力值; τ_{\max} ——切向的最大应力值; δ_n^0 ——法向的裂纹界面张开位移值; δ_t^0 ——切向的裂纹界面张开位移值。双线性内聚力模型张力位移关系如图1所示,图中线斜率为内聚力刚度。

在达到其最大值后应力开始减小至零时裂纹

开裂完成,其对应的值为最终开裂位移值 δ_n^f 。各项的断裂能临界值 Φ_n^c, Φ_n^f 。计算公式如式(6)和式(7)所示,

$$\Phi_n^c = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \delta_n^f \quad (6)$$

$$\Phi_t^c = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \delta_t^f \quad (7)$$

双线性内聚力模型精度高,可以准确模拟材料的断裂行为,预测材料的断裂强度、裂纹扩展路径等参数,且分析效率很高。双线性内聚力模型通常包括2个线性区域,即弹性区域和塑性区域。在弹性区域内,材料受到的应力与应变呈线性关系,材料行为表现为完全弹性。弹性区域通常对应于裂纹扩展的初期阶段,此时裂纹尖端附近的材料尚未发生明显的塑性变形。当应变超过材料的弹性极限时,材料进入塑性区域。在塑性区域内,材料的应力与应变呈现出非线性的关系,材料行为表现为塑性变形。塑性区域通常对应于裂纹扩展的中后期阶段,此时裂纹尖端附近的材料已经发生明显的塑性变形。

1.3 含初始裂纹及微胶囊的三维数值模型建立

在使用ABAQUS有限元软件中的XFEM进行微胶囊可裂性分析时,首先需要确定含有初始裂纹和微胶囊的三维几何模型的基本参数。在微观角度上,假设微胶囊以单个离散的状态分布于基体当中,每个单独的微胶囊之间没有粘黏。在微观层面上,认为基体为各向同性材料,分析裂纹体与微胶囊之间的相互作用时,选取一个直径为180 μm 的球形微胶囊位于单元体模型内部。当微胶囊的质量分数为1.25%的时候,微胶囊的修复率较高^[24],将微胶囊看作实心的,认为微胶囊的体积分数等于质量分数,即以微胶囊体积分数为1.25%,推算出含微胶囊的单元

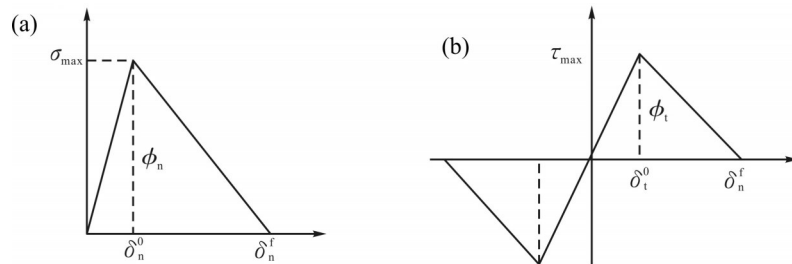


Fig. 1 Tension displacement relationship of the bilinear cohesive force model: (a) Normal tension-displacement relationship; (b) tangential tension-displacement relationship

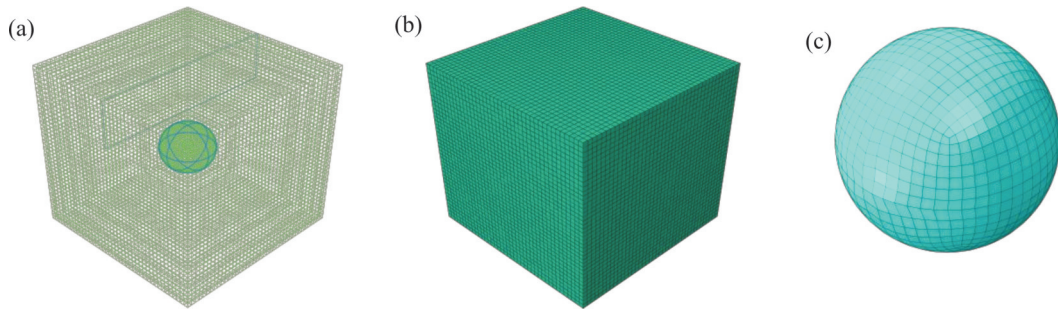


Fig. 2 Three-dimensional numerical model with prefabricated bias crack and microcapsule: (a) a diagram of the positional relationship of the components of the geometry; (b) mesh delineation of matrix; (c) mesh delineation of capsule walls

体模型的尺寸为 $0.65\text{ mm}\times 0.65\text{ mm}\times 0.65\text{ mm}$,并假设微胶囊置于正方体几何中心位置。为模拟裂纹扩展,在微胶囊中心对应位置设置尺寸为 $0.1\text{ mm}\times 0.65\text{ mm}$ 的二维平面作为初始裂纹,单元体各组成部分位置关系如图2(a)所示,单元体模型中基体网格划分如图2(b)所示,单元体模型中微胶囊网格划分如图2(c)所示。运用XFEM模拟载荷状态下裂纹在基体内部的扩展。与此同时,基于内聚力模型,为考虑微胶囊与基体之间的界面黏结关系而设置一对黏结界面,用以表达开裂过程中裂纹与界面的作用关系。

1.4 含初始裂纹及微胶囊的三维模型的材料参数确定

本文主要分析微胶囊和基体之间的力学性能对比对裂纹扩展和微胶囊可裂性的影响。为此,对微胶囊和基体的弹性模量比、断裂强度比、断裂韧性比进行了研究,可简称为弹性比(E_c/E_m)、强度比(t_c/t_m)和韧性比(G_c/G_m)。微胶囊和基体的弹性模量(E_c, E_m)、断裂强度(t_c, t_m)、断裂韧性(G_c, G_m)的参数比模拟值和本文考虑的范围汇总在Tab.1中。所有模拟均保持微胶囊与基体的泊松比 ν_c 和 ν_m 不变,并假设施加较大的断裂强度和断裂能到界面区,使微胶囊与基体之间保持良好的黏结,防止微胶囊脱粘。在此基础上设定基体材料为环氧树脂。

Tab. 1 Ratio of material properties used in this simulation

Parameter	Elastic modulus ratio(E_c/E_m)	Fracture strength ratio(t_c/t_m)	Fracture toughness ratio(G_c/G_m)
	2		
Value	1	0.1~10	0.01~50
	1/3		

2 结果与讨论

2.1 载荷作用下基体与微胶囊开裂的过程分析

基于XFEM结合双线型内聚力模型,研究在不同 E_c/E_m 的情况下,微胶囊和基体的 t_c/t_m 和 G_c/G_m 对裂纹扩展路径和微胶囊破裂的影响,并通过大量的参数分析,得到不同力学性能配比下裂纹路径图及断裂图,观察微胶囊是否开裂。

以沿裂纹面剖开的截面表达含有微胶囊的三维单元体模型的开裂状态,垂直于裂纹面所在截面来展示裂纹扩展路径。Fig.3中①所示红色区域代表初始裂纹位置,Fig.3中②所示蓝绿色区域为载荷作用下的扩展裂纹,而Fig.3中③所示深蓝色区域表示未开裂部分。材料中存在微小的缺陷或应力集中的区域,在载荷作用下,随着初始裂纹的扩展,裂纹尖端周围的应力场会发生变化,当裂纹尖端处的应力接近基体材料的起裂应力时,基体开裂,如图3(a)所示。当裂纹开始扩展到微胶囊囊壁时,在裂纹尖端应力场作用下,微胶囊的承受能力达到极限,发生破裂,如图3(b)所示。随着载荷的持续作用,裂纹继续扩展,基体和囊壁同步被破坏,直至裂纹穿透微胶囊,微胶囊完成从起裂到完全破裂的过程,如图3(c)。最后裂纹继续扩展直至基体断裂,如图3(d)所示。

2.2 弹性性能和断裂性能对比对微胶囊的可裂性的影响分析

基于XFEM进行不同弹性性能和断裂性能对比对微胶囊的开裂情况的模拟,得到不同参数配比下的裂纹扩展路径情况,最后模拟的结果以断裂图的形式呈现。

2.2.1 裂纹形态:本次模拟采用核壳比为5:1的微胶

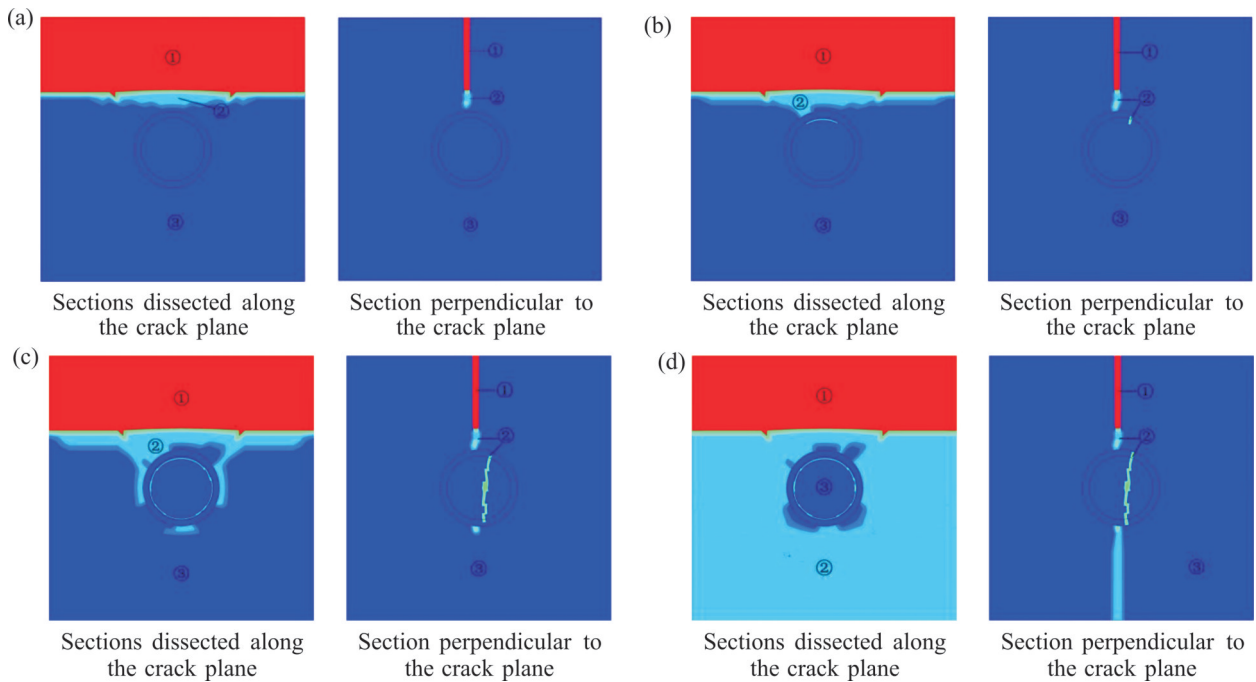


Fig. 3 Propagation process of cracks in a unit under load: (a) breakage of the matrix; (b) breakage of the capsule wall; (c) cracks through microcapsules; (d) complete fracture of the matrix

囊,研究基体与微胶囊弹性比变化时强度比和韧性比对微胶囊开裂的影响。微胶囊的初始状态为未受损,且与周围的基体具有良好的黏结性。Fig.4中所示的裂纹均是从上至下扩展,由于微胶囊和基体之间弹性性能和断裂性能的配比不同,因此当裂纹尖端接近微胶囊后,裂纹路径表现出不同的情况。

在微胶囊较硬,即微胶囊与基体的 $E/E_m=2$ 时,裂纹在单元体中的扩展情况如Fig.4(a~c)所示。当 t/t_m 较低为 $1/2$, $G/G_m=1.5$ 时,裂纹贯穿微胶囊,微胶囊开裂,如Fig.4(a)所示。 G/G_m 不变,将 t/t_m 从 $1/2$ 提高到 1 ,裂纹的扩展路径发生改变,裂纹绕过微胶囊向前扩展直至穿透基体,微胶囊未开裂,如Fig.4(b)所示。若 t/t_m 仍为 1 , G/G_m 降低至 $1/10$,裂纹可以贯穿微胶囊致使微胶囊开裂,如Fig.4(c)所示。结果表明微胶囊和基体的强度比和韧性比影响裂纹扩展路径和微胶囊开裂情况,强度比和韧性比越低,微胶囊越容易开裂。

在微胶囊与基体的 $E/E_m=1$ 时,裂纹在单元体中的扩展情况如Fig.4(d~f)所示。当 $t/t_m=1$, G/G_m 为 1.5 时,裂纹贯穿微胶囊,微胶囊开裂,如Fig.4(d)所示。当 $t/t_m=1.5$, $G/G_m=1/10$,裂纹发生偏转未能穿透微胶

囊,微胶囊未开裂,如Fig.4(e)所示。当 t/t_m 和 G/G_m 均提高到 2 ,裂纹仍旧不能穿透微胶囊,如Fig.4(f)所示。该结果同样表明微胶囊与基体的强度比和韧性比对微胶囊的开裂有严重影响,微胶囊与基体的强度比和韧性比越高,微胶囊越难开裂。

在微胶囊较软,即微胶囊与基体的 $E/E_m=1/3$ 时,裂纹的扩展情况如Fig.4(g~i)所示。当 $t/t_m=1$, G/G_m 较高为 2 时,裂纹可以穿透微胶囊使微胶囊裂开,如Fig.4(g)所示。当 $t/t_m=1.5$, G/G_m 降低到 $1/10$,裂纹仍能贯穿微胶囊,如Fig.4(h)所示。若 t/t_m 提高为 2 , G/G_m 降低到 $1/50$,裂纹的扩展路径偏离绕过微胶囊向前扩展,微胶囊未开裂,如Fig.4(i)所示。该结果表明相对于韧性比,微胶囊与基体之间强度比是影响微胶囊开裂的主要因素。

此外,若微胶囊和基体的强度比、韧性比一定时,弹性比不同对裂纹扩展和微胶囊开裂也有影响。当 $E/E_m=2$, $t/t_m=1$ 和 $G/G_m=1.5$ 时,裂纹未能穿透微胶囊,微胶囊未开裂,如Fig.4(b)所示;保持 t/t_m 和 G/G_m 不变, E/E_m 从 2 减小到 1 时,裂纹路径发生改变能够穿透微胶囊使其开裂,如Fig.4(d)所示。当 $E/E_m=1$, $t/t_m=1.5$ 和 $G/G_m=1/10$ 时,微胶囊未开裂,如

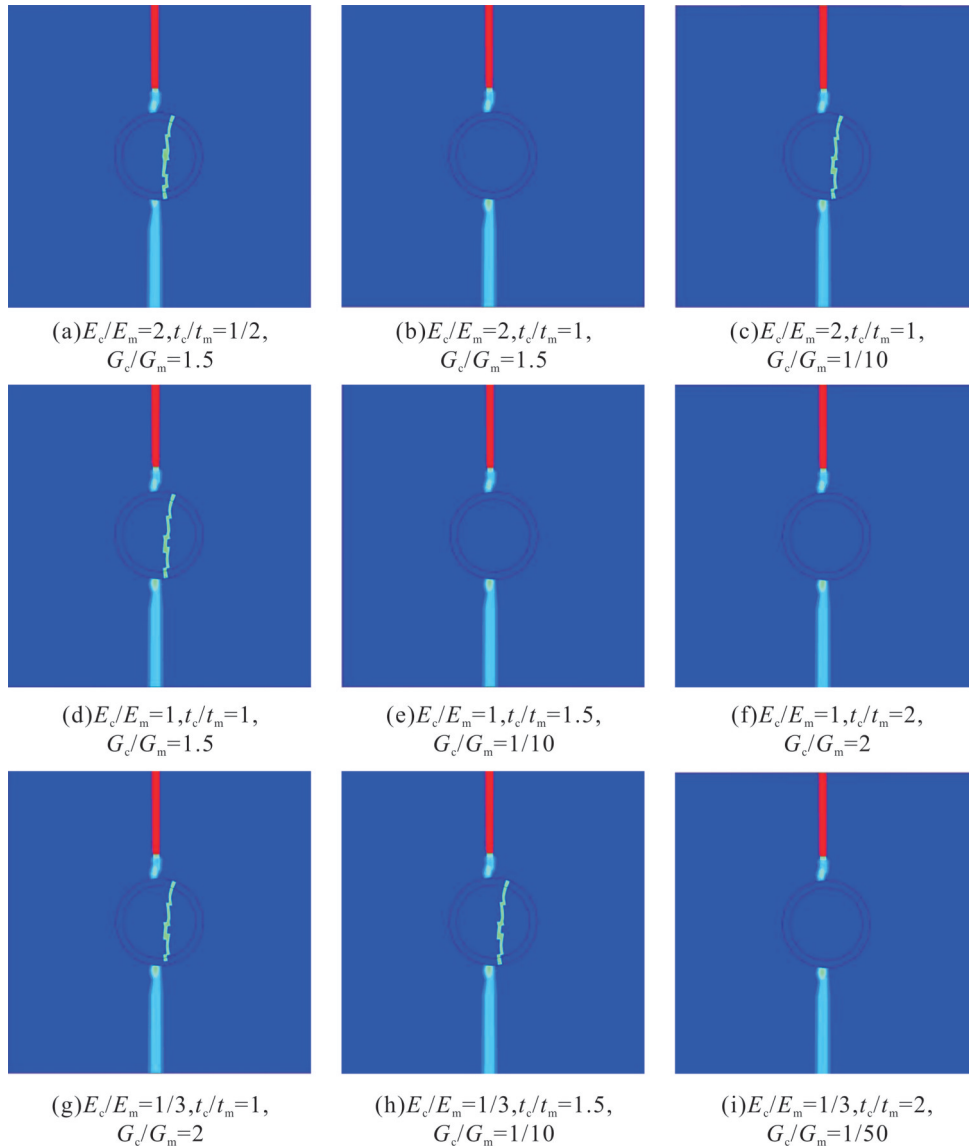


Fig. 4 Crack propagation at elastic ratios of 1/3, 1 and 2

Fig.4(e)所示;保持 t_c/t_m 和 G_c/G_m 不变, E_c/E_m 减小到1/3时,微胶囊开裂,如图4(h)所示。结果说明在微胶囊和基体的强度比和韧性比相同的情况下,弹性比越低,裂纹越容易穿透微胶囊。

2.2.2 断裂图:通过考虑 $E_c/E_m=2, 1$ 和 $1/3$ 不同的弹性比,研究了 t_c/t_m 和 G_c/G_m 对微胶囊开裂的影响。这些模拟结果以断裂图的形式呈现,如图5所示。图中2条曲线代Tab.2种不同的弹性比,当 $E_c/E_m=2$ 时,微胶囊开裂范围为Fig.5中②,③,④所在区域,微胶囊未开裂范围为Fig.5中①所在区域;当 $E_c/E_m=1$ 时,微胶囊开裂范围为Fig.5中③,④所在区域,微胶囊未开裂范围为Fig.5中①,②所在区域;当 $E_c/E_m=1/3$ 时,微胶囊开裂范围为Fig.5中④所在区域,微胶

囊未开裂范围为Fig.5中①,②,③所在区域。

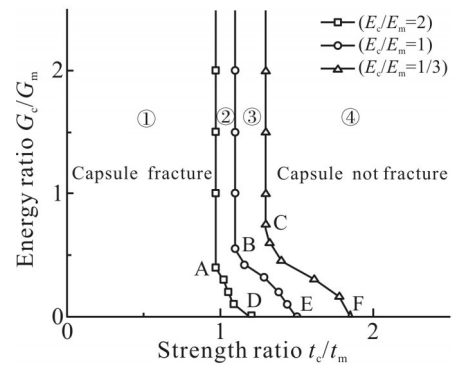


Fig. 5 Fracture diagram at different elastic properties

从Fig.5中可以看出,当弹性比逐渐降低,微胶囊越容易开裂,此结论与文献^[12,25]中的结论一致,即裂纹容易被较软微胶囊所吸引,较硬的微胶囊会

使裂纹远离。而当保持弹性比不变,强度比较高时微胶囊不容易开裂,若同时降低韧性比,则微胶囊更容易开裂。且相较于高弹性比较硬的微胶囊,低弹性比较软的微胶囊对应的曲线下方微胶囊开裂区域更大,因此说明微胶囊与基体弹性比越低,微胶囊的可裂性受到微胶囊与基体断裂性能的配比影响越大。对于弹性比较高为2的情况,若微胶囊与基体强度比超过1.2,则无论微胶囊与基体的韧性比如何降低,微胶囊都不能开裂,如Fig.5中D点所示;当弹性比为1时,如果微胶囊与基体的强度比超过1.5,微胶囊同样都不能开裂,如Fig.5中E点所示;当弹性比较低为1/3时,只要微胶囊与基体的强度比低于1.85,且微胶囊与基体的韧性比足够低,微胶囊均可以开裂,如Fig.5中F点所示。因此在实际工程应用的时

候,应该把微胶囊和基体的断裂性能比合理控制在其弹性性能比所对应的微胶囊开裂范围之内以确保微胶囊能够及时开裂。

2.3 微胶囊的核壳比对微胶囊可裂性的影响分析

基于XFEM结合内聚力模型,本节讨论了在不同囊芯半径 R_c 与囊壁厚度 R_s 比的情况下,微胶囊和基体断裂性能对微胶囊的开裂的影响,囊芯半径(R_c)与囊壁厚度(R_s)之比可简称为核壳比(R_c/R_s)。通过大量模拟,得到不同核壳比 R_c/R_s 下的裂纹路径图以及断裂图。本次模拟考虑了4种不同的核壳比情况,核壳比参数的选择均基于参考文献^[26],Fig.6(a)为 $R_c/R_s=1:1$ 的微胶囊, Fig.6(b)为 $R_c/R_s=5:1$ 的微胶囊, Fig.6(c)为 $R_c/R_s=10:1$ 的微胶囊, Fig.6(d)为 $R_c/R_s=15:1$ 的微胶囊。

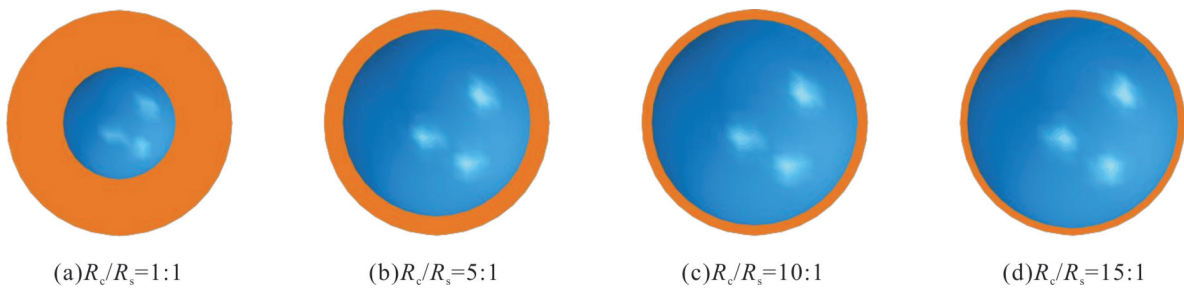


Fig. 6 Microcapsule models with different core-shell ratios

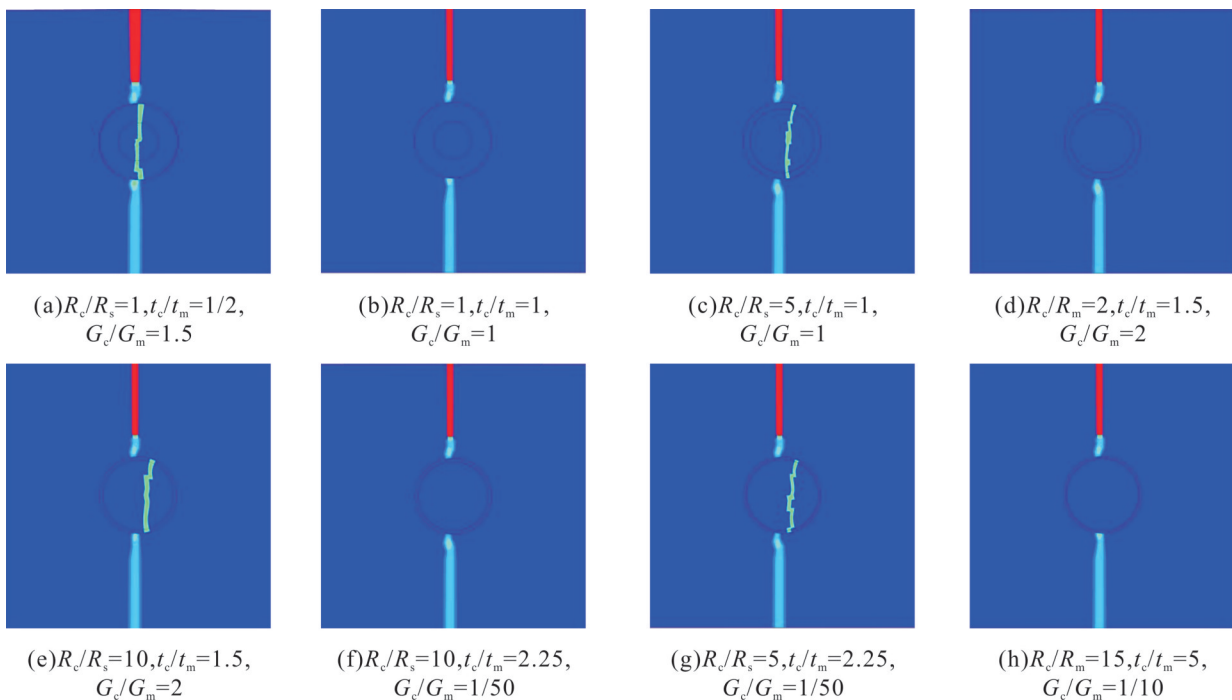


Fig. 7 Propagation path of cracks at different core-shell ratios

2.3.1 裂纹形态:微胶囊核壳比不同,微胶囊与基体之间断裂性能会不同,微胶囊开裂状态也会相应发生变化。Fig.7为不同核壳比情况下裂纹的扩展路径,本次模拟中微胶囊与基体的 E/E_m 均为1/3。

当微胶囊的囊壁较厚,即 $R_c/R_s=1:1$,在 $t_c/t_m=1/2$, $G_c/G_m=1.5$ 时,裂纹能够穿透微胶囊使微胶囊开裂,如图7.7(a)所示。而当 t_c/t_m 和 G_c/G_m 均提高到1时,微胶囊未开裂,如图7.7(b)所示。保持 t_c/t_m 和 G_c/G_m 为1不变,减小微胶囊囊壁的厚度,增大 R_c/R_s 为5,则微胶囊开裂,如图7.7(c)所示。 $R_c/R_s=5$,在 t_c/t_m 提高为1.5, G_c/G_m 升高为2时,裂纹未能贯穿微胶囊,如图7.7(d)所示。而 $R_c/R_s=10$ 时,在 $t_c/t_m=1.5$, $G_c/G_m=2$ 情况下微胶囊能够开裂,如图7.7(e)所示。 $R_c/R_s=10$ 时,在 $t_c/t_m=2.25$, $G_c/G_m=1/50$ 情况下微胶囊不能够开裂,如图7.7(f)所示。而在同样的条件下提高 $R_c/R_s=15$ 时,裂纹能够贯穿微胶囊,微胶囊破裂,如图7.7(g)所示。该结果表明核壳比对微胶囊的可裂性有严重影响。微胶囊与基体的断裂性能比较高时,当微胶囊核壳比较低,进入单元体的裂纹路径会发生偏转,不能穿透微胶囊的囊壁。而提高核壳比,裂纹更容易穿透微胶囊,微胶囊能容易裂开。从Fig.7中还可以看出在核壳比相同的情况下,当微胶囊断裂强度大于基体断裂强度时,裂纹扩展方向偏离微胶囊,而当微胶囊断裂强度小于基体断裂强度时,微胶囊囊壁发生断裂。因此该结果同样表明微胶囊与基体的断裂性能比对微胶囊的可裂性有影响,断裂性能比越高,微胶囊越难开裂。

2.3.2 断裂图:通过考虑1:1,5:1,10:1和15:1不同的核壳比来研究微胶囊囊壁厚度对微胶囊可裂性的影响。模拟结果以断裂图的形式进行总结,如图8所示。当 $R_c/R_s=1:1$ 时,微胶囊开裂范围为Fig.8中②,③,④,⑤所在区域,微胶囊未开裂范围为Fig.8中①所在区域;当 $R_c/R_s=5:1$ 时,微胶囊开裂范围为Fig.8中③,④,⑤所在区域,微胶囊未开裂范围为Fig.8中①,②所在区域;当 $R_c/R_s=10:1$ 时,微胶囊开裂范围为Fig.8中④,⑤所在区域,微胶囊未开裂范围为Fig.8中①,②,③所在区域;当 $R_c/R_s=15:1$ 时,微胶囊开裂范围为Fig.8中⑤所在区域,微胶囊未开裂范围为Fig.8中①,②,③,④所在区域。为了确定曲线,不仅需要识别特定的强度比和韧性比,还考

虑每种核壳比下2种情况之间的过渡现象,因此需进行大量的模拟。

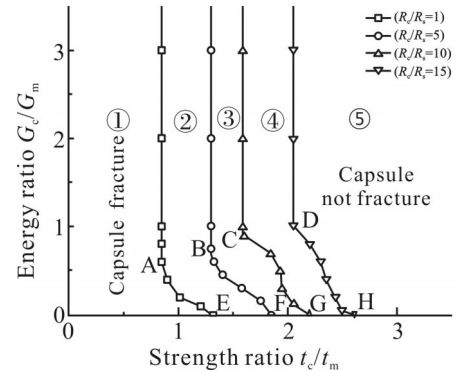


Fig. 8 Fracture diagram at different core-shell ratios

Fig.8总的趋势为随着核壳比的升高,即微胶囊的囊壁越薄,微胶囊越容易破裂。通过Fig.8中曲线AE,BF,CG和DH同样可以看出,微胶囊与基体的断裂性能比对微胶囊的可裂性有着严重影响,微胶囊的断裂强度和断裂韧性越高,微胶囊越难开裂。但更值得注意的是对于囊壁较厚核壳比为1:1的微胶囊,若微胶囊与基体强度比超过1.3,则无论微胶囊与基体的韧性比如何降低,微胶囊都不能开裂,如图8中E点所示;当核壳比提高为5:1时,如果微胶囊与基体的强度比超过1.85,微胶囊同样都不能开裂,如图8中F点所示;当核壳比为10:1时,只要微胶囊与基体的韧性比足够低,且微胶囊与基体的强度比低于2.2,微胶囊均可以开裂,如图8中G点所示;当核壳比较高为15:1时,若微胶囊与基体的强度比低于2.6,同时微胶囊与基体的韧性比足够低,微胶囊均可以开裂,如图8中H点所示。因此,从断裂图可以得出结论,微胶囊的核壳比对微胶囊的可裂性有显著影响。为了确保微胶囊能够及时开裂,应在考虑强度满足要求的基础上,适当提高微胶囊的核壳比。

2.4 界面强度对微胶囊可裂性的影响分析

界面强度是影响微胶囊承载能力和裂纹扩展特性的重要因素,拉伸作用下自愈材料的承载能力随着微胶囊壳界面强度的增加而增加^[15]。在研究界面强度对微胶囊可裂性的影响和对裂纹扩展路径的影响时,用界面强度 t_c 与基体强度 t_m 比分析。本次模拟保持其他参数不变,只改变界面强度与基体 t_c/t_m 的大小。Fig.9显示了核壳比为5:1时,界面强度与基体 t_c/t_m

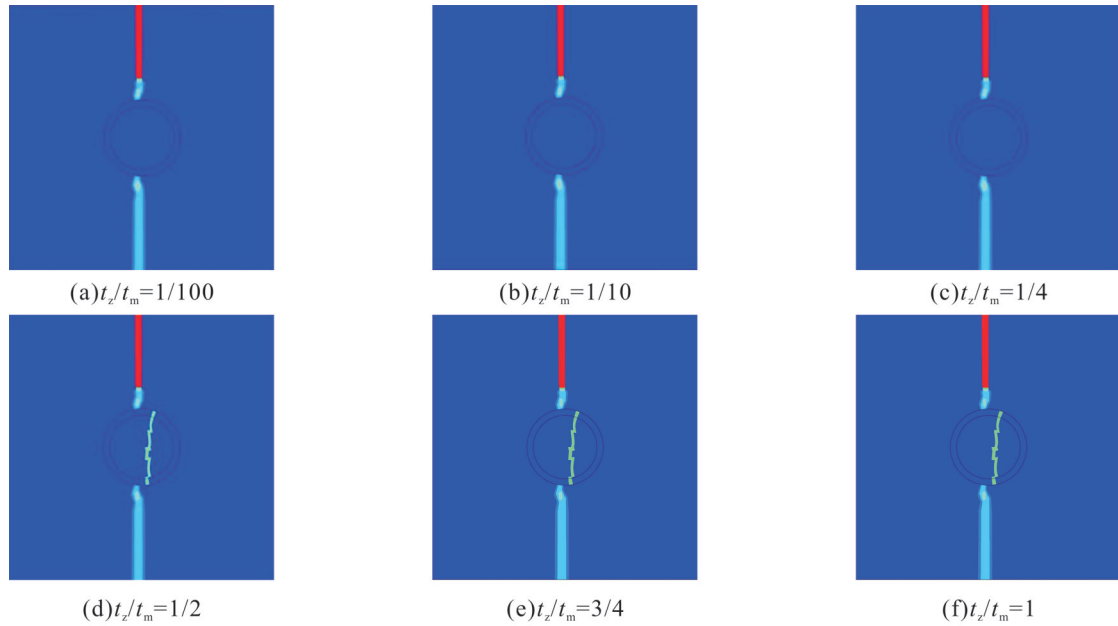


Fig. 9 Propagation of cracks at different interface strength levels

t_m 分别为 1/10, 1/4, 1/2, 3/4, 1 和 2 时的 6 种界面强度水平对微胶囊可裂性和裂纹扩展路径的影响。

当界面强度较低, 即界面强度与基体 t_z/t_m 为 1/100 时, 裂纹扩展远离微胶囊, 微胶囊与基体之间发生脱粘, 微胶囊未能破裂, 如图 9(a) 所示。界面强度与基体 t_z/t_m 为 1/10 时, 裂纹仍旧绕过微胶囊向前扩展, 微胶囊未破裂, 如图 9(b) 所示。而界面强度与基体 t_z/t_m 为 1/4 时, 胶囊依旧未破裂, 如图 9(c) 所示。界面强度与基体 t_z/t_m 为 1/2 时, 裂纹扩展路径发生改变, 裂纹被微胶囊吸引, 裂纹扩展穿透微胶囊, 微胶囊破裂, 如图 9(d) 所示。界面强度与基体 t_z/t_m 为 3/4 时, 裂纹扩展依旧能够穿透微胶囊使微胶囊破裂, 如图 9(e) 所示。提高界面强度与基体 t_z/t_m 到 1 时, 即在界面强度与基体强度相同的情况下, 微胶囊在裂纹扩展的作用下破裂, 如图 9(f) 所示。由此可以得出, 较高的界面强度与基体强度比对微胶囊的可裂性有利, 较低的界面强度与基体强度比会使裂纹扩展时绕过微胶囊, 不能达到自修复的目的, 会降低树脂矿物复合材料的整体强度。所以为了保证微胶囊能够开裂使修复剂流出以实现复合材料的自修复功能, 在实际应用时应该适当提高界面强度。

3 结论

本文建立了含微胶囊的自修复树脂矿物复合材

料的三维单元体模型, 运用 XFEM 研究了不同弹性性能比下微胶囊与环氧树脂基体的断裂性能比对微胶囊可裂性的影响, 进而分析了在不同核壳比和界面强度下微胶囊开裂的情况。得出以下主要结论。

(1) 微胶囊开裂过程划分为基体初步开裂、微胶囊起裂、基体与囊壁同步开裂和微胶囊完全开裂。

(2) 微胶囊的开裂情况受到弹性性能比和断裂性能比共同作用的影响, 断裂性能比起主要作用。弹性比越低, 微胶囊越容易开裂。强度比较高达到临界值后, 降低韧性比微胶囊也均不开裂。

(3) 弹性比相同, 核壳比和界面强度较高, 微胶囊容易破裂, 界面强度较低会造成微胶囊与基体脱粘。

结论启示了未来在设计自修复复合材料时需要考虑不同材料参数之间的匹配关系, 这对于发展更具可持续性和高性能的工程材料具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] Ma Y, Li F, Wang L, *et al.* Life cycle carbon emission assessments and comparisons of cast iron and resin mineral composite machine tool bed in China[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113: 1143-1152.
- [2] Gao Y, Zhang H, Kang H, *et al.* Road performance of liquid nitrile-butadiene rubber modified unsaturated polyester resin concrete

- [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120479.
- [3] 张仲, 吕晓仁, 于鹤龙, 等. 智能自修复材料研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(7): 241-248.
- Zhang Z, Lü X R, Yu H L, *et al.* Research progress of intelligent self-healing materials[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(7): 241-248.
- [4] Zhang L, Wang H, He F, *et al.* Wear in-situ self-healing polymer composites incorporated with bifunctional microcapsules [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 232: 109566.
- [5] 李武强, 李有堂, 辛军博, 等. 微胶囊型智能自愈复合材料的研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(12): 157-165.
- Li W Q, Li Y T, Xin J B, *et al.* Development of microencapsulated intelligent self-healing composites[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2023, 39(12): 157-165.
- [6] Irico S, Bovio A G, Paul G, *et al.* A solid-state NMR and X-ray powder diffraction investigation of the binding mechanism for self-healing cementitious materials design: the assessment of the reactivity of sodium silicate based systems[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 76: 57-63.
- [7] Ramana M V, Thyla P R, Mahendrakumar N, *et al.* Selection of resin and aggregates for particulate polymer concrete machine tool structures-A review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 8621-8628.
- [8] Ghaemi A, Philipp A, Bauer A, *et al.* Mechanical behaviour of micro-capsules and their rupture under compression[J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 142: 236-243.
- [9] Mauludin L M, Zhuang X, Rabczuk T. Computational modeling of fracture in encapsulation-based self-healing concrete using cohesive elements[J]. *Composite Structures*, 2018, 196: 63-75.
- [10] Song Q, Wang X F, Fang Y, *et al.* Interaction between microcapsules and crack using XFEM and data-driven fracture toughness predictive model[J]. *Structures*, 2024, 64: 106470.
- [11] Li W, Jiang Z, Yang Z. Crack extension and possibility of debonding in encapsulation-based self-healing materials[J]. *Materials*, 2017, 10: 589.
- [12] Mauludin L M, Oucif C, Rabczuk T. The effects of mismatch fracture properties in encapsulation-based self-healing concrete using cohesive-zone model[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2020, 14: 792-801.
- [13] 朱月风, 赵向臻, 司春棣, 等. 自修复型微胶囊在沥青路面中的受力分析及破裂机制[J]. *材料导报*, 2022, 36(10): 44-49.
- Zhu Y F, Zhao X Z, Si C D, *et al.* Mechanical analysis and fracture mechanism of self-healing microcapsules in asphalt pavement materials reports[J]. *Materials Reports*. 2022, 36(10): 44-49.
- [14] 李辉, 郭润兰, 黄华, 等. 基于扩展有限元方法的自愈微胶囊和基体力学性能适配的研究[J]. *材料导报*, 2024, 38(13): 272-279.
- Li H, Guo R L, Huang H, *et al.* Microscopic study of microcapsule crackability in self-healing materials by biased cracking based on extended finite element method[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(13): 272-279.
- [15] Mauludin L M, Oucif C. The effects of interfacial strength on fractured microcapsule[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2018, 13: 1-11.
- [16] Zhang X, Wang P, Sun D, *et al.* Dynamic plastic deformation and failure mechanisms of individual microcapsule and its polymeric composites[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, 139: 103933.
- [17] Chen C, Ji H, Wang H. Damage properties simulations of self-healing composites[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, 13: 6679-6686.
- [18] 赵钊. 自修复复合材料中微胶囊破裂行为研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Zhao Z. Study on fracture behavior of microcapsule in self-healing composite material[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [19] Huang H, Fan Y Q, Huang H Y, *et al.* An micro-level study on the cracking performance of encapsulation-based self-healing resin mineral composites under dynamic load based on XFEM [J]. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2023, 19: 848-875.
- [20] Mrma A, Dmi A, Smsa B, *et al.* Mixture optimization of epoxy base concrete for achieving highest fracture toughness and fracture energy values using Taguchi method[J]. *Composites Communications*, 2022, 32: 101150.
- [21] Belytschko T, Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 45: 601-620.

- [22] Melenk J, Babuska I. The partition of unity finite element method: basic theory and applications[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, 39: 289-314.
- [23] Rule J D, Sottos N R, White S R. Effect of microcapsule size on the performance of self-healing polymers[J]. *Polymer*, 2007, 48: 3520-3529.
- [24] Keller M, Sottos N. Mechanical properties of microcapsules used in a self-healing polymer[J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46: 725-733.
- [25] 张伟, 辛毅, 张纾, 等. 自修复微胶囊制备及微纳力学性能[D]. *化工学报*, 2008, 59(6): 1595-1599.
Zhang W, Xin Y, Zhang S, *et al.* Preparation and nano-mechanical properties of microcapsule for self-repairing of materials[J]. *CIESC Journal*, 2008, 59(6): 1595-1599.
- [26] Mauludin L M, Zhuang X Y, Rabczuk T. Computational modeling of fracture in encapsulation-based self-healing concrete using cohesive elements[J]. *Composite Structures*, 2018, 196: 63-75.

Influence of Mechanical Property Proportioning Based on Extended Finite Element on the Rupturability of Microcapsules

Ruotong Wang¹, Runlan Guo¹, Hua Huang^{1,2}, Hui Li¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Wenzhou Pump and Valve Engineering Research Institute, Lanzhou University of Technology, Wenzhou 325105, China)

ABSTRACT: To address the problem of whether microcapsules can crack in time and release healing agents to repair the microcracks generated in the matrix to ensure excellent self-healing performance, the study combined with a cohesion model to establish a three-dimensional numerical model containing prefabricated cracks and microcapsules through XFEM, and analyzed the process of matrix cracking and microcapsule cracking besides its intrinsic mechanism from a microscopic point of view. The research focused on the ratios of elastic properties, fracture properties, core-shell ratios, and interfacial strength between microcapsules and the epoxy resin matrix, to elucidate their impact on crack propagation paths and the crackability of microcapsules. The results show that: (1) the cracking of microcapsules primarily depends on their ratios of elastic and fracture properties with the matrix, particularly the latter having a more significant effect on the microcapsule cracking; (2) at the same elastic property ratios, a larger core-shell ratio facilitates easier cracking of microcapsules; (3) the high interface strength between microcapsules and matrix facilitates the cracking of microcapsules. These findings offer crucial insights for the design of crackability in microcapsules and provide theoretical guidance for the application of self-repairing composite materials.

Keywords: resin mineral composites; self-healing; extended finite element; cohesion model