文章编号:1005-0523(2023)03-0097-07

基于MMC的自修复材料结构与微胶囊的协同优化

李 鹏[1,2],张昌有[1],杜艺博[1],程文涛[1],占金青[1],唐 赣[1]

(1.华东交通大学机电与车辆工程学院,江西 南昌 330013;2.华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室,江西 南昌,330013)

摘要:自修复材料作为一种力学构件不仅需要结构宏观构型的拓扑优化,而且需要兼顾自修复剂载体微胶囊的尺寸和分布对自修复材料力学性能和修复效果的影响,因此对结构宏观构型与内置微胶囊进行协同优化具有重要的意义。研究基于可移动变形组件法,以结构柔度为目标函数,材料面积为约束条件,建立了内置微胶囊组件的二维数学模型,基于移动渐近线法(MMA),给出了协同优化自修复材料的设计方法,并与经典自修复材料进行了对比研究,验证了协同优化的优越性。研究表明:两类自修复材料的构型具有相似性;两类自修复材料的结构柔度均随微胶囊体积分数的增加而提高,力学性能发生不同程度的劣化;与经典自修复材料相比,随着体积分数的增加,协同优化自修复材料呈现出更为优异的力学性能,当体积分数接近14%时,其柔度值仅为经典自修复材料的66.1%。

关键词:自修复;拓扑优化;微胶囊;可移动变形组件法

中图分类号:TB381;O342 **文献标志码**:A

本文引用格式:李鹏,张昌有,杜艺博,等. 基于MMC的自修复材料结构与微胶囊的协同优化[J]. 华东交通大学学报,2023,40(3):97-103.

Collaborative Optimization of Self-healing Material Structure and Microcapsule Based on MMC

Li Peng[1,2], Zhang Changyou[1], Du Yibo[1], Cheng Wentao[1], Zhan Jinqing[1], Tang Gan[1]

(1. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. Key Laboratory of Conveyance Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Self-healing material is usually used as a mechanical component, not only needs to consider the topological optimization of the macro-configuration of the structure, but also the influence of the size and distribution of self-healing agent carrier microcapsules on the mechanical properties and healing effect of self-healing material. Therefore, the collaborative optimization of structural macroscopic configuration and internal microcapsules is of great significance. Based on movable morphable component, using structural compliance as the objective function, the material area as constraint condition, a two-dimensional mathematical model with built-in microcapsules component was established, Based on the method of moving asymptote (MMA), collaborative optimization design method of self-healing materials was given, and compared with the classic self-healing materials, the superiority of collaborative optimization was verified. The results show that: The configuration of two self-healing materials is similar; The structural compliance of the two kinds of self-healing materials increases with the increase of microcapsule volume fraction, and the mechanical properties deteriorated to different degrees; Com-

收稿日期:2022-09-15
基金项目:江西省教育厅科技项目(GJJ210631)

pared with the classical self-healing materials, the collaborative optimized self-healing materials showed more excellent mechanical properties with the increase of volume fraction. When the volume fraction is close to 14%, the compliance of the collaborative optimized self-healing materials is only 66.1% of that of the classical self-healing materials.

Key words: self-heal; topological optimization; microcapsule; movable morphable component

Citation format: LI P, ZHANG C Y, DU Y B, et al. Collaborative optimization of self-healing material structure and microcapsule based on MMC[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(3): 97-103.

复合材料因其优异的力学性能,被广泛应用于航空航天、汽车和电子等领域。然而,作为一种由多种异质/异形组元材料复合而成的新材料,其力学分散性较大,致使材料在生产和服役中易产生各类损伤,尤其是微裂纹的产生和扩展将引起材料力学性能的劣化,导致构件过早失效。损伤自修复概念的提出为解决这一问题提供了有效途径。

White 等[1]于 2001 年首次提出微胶囊型自修复材料,并分析了微胶囊的分散性、几何形状与囊壁对修复性能的影响。Yu 等[2]研究了新鲜、短期老化和长期老化沥青混凝土中微胶囊的形态结构、机械强度、热稳定性以及愈合水平。Khan 等[3]研究表明,加入小直径微胶囊的材料弹性模量有轻微减小,但断裂韧性明显增强, 而随着微胶囊直径的增加,材料弹性模量和断裂韧性均开始减小。Choi 等[4]将 3D 打印的微胶囊嵌入混凝土复合材料中,研究了微胶囊壁厚和打印方向对混凝土复合材料的影响。Wang 等[5]采用分子动力学模拟了沿 z 轴进行单轴拉伸的微胶囊自愈合混凝土的力学和界面性能。Han 等[6]提出了一种三维演化的微力学模型来定量解释了微胶囊对裂纹损伤的自愈合作用。Nassho 等[7]将微胶囊嵌入到层板中,在短梁剪切试件上进行实验并表明,随着微胶囊浓度和粒径的减小,层合板的刚度和表观层间剪切强度增大但愈合效率也会随着降低。Chowdhury 等[8]通过偶联剂改性方法改善颗粒在复合材料中的分布。在化学方法中偶联剂改性,会增加微胶囊与树脂界面的黏合力,有利于材料力学性能的提高[9-10]。

在国内,王瑞等[11]通过偶联剂对微胶囊表面进行改性,研究了微胶囊在材料中的分布以及改性后自修复材料的拉伸性能。郭瑞泉等[12]通过万能试验机研究了微胶囊直径和用量对环氧树脂力学性能的影响。肖春平等[13]研究了 4 种不同粒径(180,230,280,370 μm)的微胶囊及其体积分数对材料力学性能和自修复性能的影响。贺子腾[14]制备并研究了苯乙酸乙酯微胶囊直径和体积分数对自修复涂层性能的影响。李鹏等[15]对自修复载体的无壁化设计和分布开展了一些相关研究,并通过实验研究取得一定程度的成果。

近年来, 国内外学者针对微胶囊的体积分数、几何形状及分布等内容进行了大量优化研究,然而优化设计的对象仅限于微胶囊载体,对结构宏观构型与内置微胶囊进行协同优化的研究尚未见报道。研究基于可移动变形组件法,通过自修复材料的结构与微胶囊协同优化,在保证材料与微胶囊力学兼容性的基础上,实现材料的损伤自修复设计。

1 内置微胶囊的二维组件

为实现结构宏观构型和内置微胶囊载体的协同优化,研究基于可移动变形组件法,建立内置微胶囊组件的数学模型。以显式的超椭圆方程描述组件[16]。其表达方式如下

$$\chi_i(x,y)=-\max(\chi_0(x,y),\chi_{-N}(x,y),\cdots,\chi_j(x,y),\cdots,\chi_N(x,y)) \tag{1}$$

式中:

$$\chi_0(x,y)=\left(\frac{x'}{L}\right)^p+\left(\frac{y'}{f(x')}\right)^p-1 \tag{2}$$

$$\begin{Bmatrix}x'\\y'\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\-\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x-x_0\\y-y_0\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$f(x')=\frac{h_1+h_2-2h_3}{2L^2}(x')^2+\frac{h_2-h_1}{2L}x'+h_3 \tag{4}$$

$$\chi_j(x,y)=1-\left(\frac{x''}{r}\right)^p-\left(\frac{y''}{r}\right)^p \tag{5}$$

$$r=a\min(h_1,h_2,h_3) \tag{6}$$

$$\begin{Bmatrix}x''\\y''\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\-\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}x-x_j\\y-y_j\end{Bmatrix} \tag{7}$$

$$\begin{cases} x_j=x_0+\dfrac{2j-1}{2}\cdot I_{\text{dis}}\cdot c_t \\ y_j=y_0+\dfrac{2j-1}{2}\cdot I_{\text{dis}}\cdot s_t \end{cases},j=-N+1:1:N \tag{8}$$

$$N=\text{floor}\left(\frac{L}{G}\right) \tag{9}$$

$$I_{\text{dis}}=G+D \tag{10}$$

图 1 是对组件中微胶囊中心点坐标的说明。

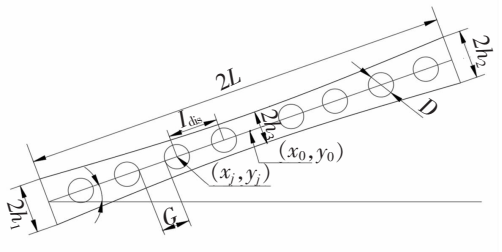


图 1　微胶囊中心点坐标说明

Fig.1　The center point coordinates of the microcapsule

在式(1)~式(10)中,$\chi_i(x,y)$表示内置微胶囊的二维组件;$\chi_0(x,y)$表示无胶囊的原始组件,$\chi_j(x,y)$表示微胶囊;max 表示设计域中有限元节点取值为原始组件与微胶囊在该节点的最大拓扑描述函数值;L 为原始组件在 x'方向上的半长;$f(x')$表示原始组件在 y'方向上的半宽;$f(x')$可以根据实际优化的需要改变其参数(h_1,h_2,h_3),表示为均匀宽度、线性变化宽度或二次变化宽度等不同的形式;p 为偶整数,一般取 $p=6$;θ 表示原始组件在二维平面内逆时针方向的角度,内置微胶囊与所在的组件取相同的角度,其中,$s_t=\sin\theta$,$c_t=\cos\theta$;(x_0,y_0)表示原始组件中心点的坐标;r 表示微胶囊的半径,由组件缩放而来;a 和 G 表示为微胶囊的初始参数,其中 G 表示两个微胶囊之间的间距,a 表示半径系数,这两个参数决定了微胶囊的大小与分布;(x'',y'')因每个微胶囊的中心点坐标不同,而拥有不同的形式,(x_j,y_j)表示第 j 个微胶囊的中心坐标;floor 表示向下取整;I_{dis} 表示两个相邻微胶囊的中心点长度的距离。图 2 为内置微胶囊二维组件图。

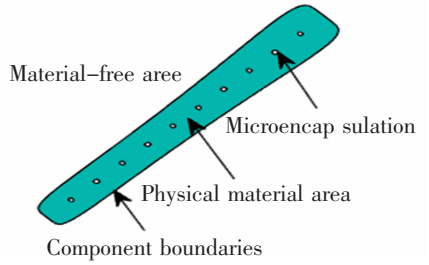


图 2　内置微胶囊组件

Fig.2　The built-in microcapsules components

2　内置微胶囊拓扑优化问题列式

研究以结构柔度作为衡量材料与微胶囊力学兼容性的指标,考虑给定体积约束下以结构柔度最小为目标函数的拓扑优化,即求出在规定约束和荷载条件下使结构变形最小的最佳拓扑构型。优化列式如下

$$\text{Find } \boldsymbol{X}=((\boldsymbol{X}^1)^{\mathrm{T}},\cdots,(\boldsymbol{X}^i)^{\mathrm{T}},\cdots(\boldsymbol{X}^n)^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}},\boldsymbol{u}(x)$$

$$\text{Min } C=\int_D H(\chi(\boldsymbol{X}))f\,\boldsymbol{u}\mathrm{d}V+\int_{\Gamma_t} t\,\boldsymbol{u}\mathrm{d}S \tag{11}$$

s.t.

$$\int_D (H(\chi(\boldsymbol{X})))^q\mathbf{E}:\varepsilon(u):\varepsilon(v)\mathrm{d}V=$$

$$\int_D H(\chi(\boldsymbol{X}))f\,\boldsymbol{u}\mathrm{d}V+\int_{\Gamma_t} t\,\boldsymbol{v}\mathrm{d}S,\ \forall v\in U_{ad}$$

$$\int_D H(\chi(\boldsymbol{X}))\mathrm{d}V\leqslant\overline{V}$$

$$\boldsymbol{X}\in U_X$$

$$\boldsymbol{u}=\overline{\boldsymbol{u}}\ \text{on}\ \Gamma_u$$

在式 (11) 中,C 表示结构柔度;$\boldsymbol{X}^i=(x_0^i,y_0^i,L^i,h_1^i,h_2^i,h_3^i,\sin\theta^i)$,$i=1,\cdots,n$,表示第 i 个内置微胶囊组件的设计变量;H 表示 Heasivide 函数;χ 表示整体结构的拓扑描述函数;f 表示内置微胶囊的二维组件所受的体积力;$\boldsymbol{u}$ 为结构位移场;t 表示 Neumann 边界 Γ_t 上的面力;q 表示惩罚因子,这里取 $q=2$;E 表示为四阶弹性张量,且其表达式为 $\mathrm{E}=E/(1+v)[\mathrm{I}+v/(1-2v)\delta\otimes\delta]$,其中 E 和 v 分别表示实体材料的弹性模量和泊松比,I 和 δ 分别表示四阶单位张量和二阶单位张量;ε 表示二阶线性应变张量;$\overline{V}$ 是实体材料的体积上界;v 表示定义在实体材料所占区域上满足 $U_{ad}=\{v|v\in H^1(\Omega),v=0\ \text{on}\ \Gamma_u\}$ 的试探函数;U_X 表示设计变量所属的可行域;$\overline{u}$ 表示 Dirichlet 边界 Γ_u 上的给定位移,为了简化分析,文中取 $\overline{u}=0$。

3　数值分析

3.1　二维有限元分析

研究基于 MMC 框架的拓扑优化方法,采用“代理材料模型”进行有限元分析,由式(1)计算出每个节点的拓扑描述函数值,则单元格的弹性模量按以下公式插值

$$E^e=\frac{E(\sum_{i=1}^{4}(H(\chi_i^e)^q)}{4} \tag{12}$$

式中：E 为各项同性材料的弹性模量；χ_i^e，i=1，…，4 表示单元格 e 每个点的拓扑描述值。为了确保数值实现的目的，在进行有限元分析时，Heaviside 函数采用其正则化形式 $H_\zeta(x)$ 计算

$$H_\zeta(x)=\begin{cases}1, & if\ x>\zeta\\ \dfrac{3(1-\alpha)}{4}\left(\dfrac{x}{\varepsilon}-\dfrac{x^3}{3\varepsilon^3}\right)+\dfrac{1+\alpha}{2}, & if\ -\zeta\leqslant x\leqslant\zeta\\ \alpha, & \text{otherwise}\end{cases} \tag{13}$$

式中：为了保证全局刚度矩阵的非奇异性，α 是一个很小的正数；ζ 表示一个正则化参数，其作用是用来控制正则化的宽度。

3.2 灵敏度分析

研究因为基于可移动变形框架的优化方法，因此采用伴随法可直接推导目标函数 C 对内置微胶囊组件各个设计变量的灵敏度，如下

$$\frac{\partial C}{\partial x}=-\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\left(\left(\frac{E}{4}\sum_{e=1}^{NE}\sum_{i=1}^{4}q\left(H(\chi_i^e)\right)^{q-1}\frac{\partial H_\zeta(\chi_i^e)}{\partial x}\right)k^e\right)\boldsymbol{u} \tag{14}$$

以及约束条件 V 内置微胶囊组件各个设计变量的灵敏度，如下

$$\frac{\partial V}{\partial x}=\frac{1}{4}\sum_{e=1}^{NE}\sum_{i=1}^{4}\frac{\partial H_\zeta(\chi_i^e)}{\partial x} \tag{15}$$

在式(14)~式(15)中，x 表示 $\boldsymbol{X}=((\boldsymbol{X}^1)^{\mathrm{T}},\cdots,(\boldsymbol{X}^i)^{\mathrm{T}},\cdots,(\boldsymbol{X}^n)^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}$ 中的任意变量；K 表示结构的整体刚度，NE 表示单元格的数量；k^e 表示单元刚度矩阵。

3.3 优化算法

研究采用移动渐进算法(序列凸规划法)作为优化求解器用于对拓扑优化问题的求解。移动渐近线算法最初由瑞典数学家 Svanberg[17]最早提出，它是将目标函数和约束条件转化为在当前设计点的一阶移动近似子问题，通过梯度法求解子问题的解作为目标函数的近似解。

4 算法流程

自修复材料结构与微胶囊的协同优化流程如下：

1）设定材料的原始参数、设计域大小、微胶囊参数、载荷等；

2）根据设计域大小，设计合理的网格大小、组件初始化参数、MMA 优化参数；

3）根据微胶囊的相关参数计算组件中每个微胶囊的中心点坐标，在求解整体结构的拓扑描述函数值时，微胶囊与组件相交显示微胶囊；

4）利用有限元求解结构目标函数和约束条件；

5）利用有限差分原理计算目标函数与约束条件的灵敏度；

6）将 MMA 作为优化器更新设计变量；

7）判断是否满足迭代终止条件：每 100 次迭代的目标函数最优值连续 10 次未被更新，则终止迭代。

5 数值算例

为验证自修复材料结构与微胶囊协同优化的有效性，研究采用二维 MBB 梁算例，算例所涉及的弹性模量、材料密度、载荷以及几何参数等信息均为无量纲，实体材料的弹性模量值设置为 E=1，泊松比设置为 v=0.3。

如图 3 所示，以 MBB 梁的一侧为设计域，长宽比为 3:1，设计域离散为 450×150 的网格，右下角受滚动铰链约束，左下角固定支撑，左上角受到竖直向下的载荷 f=1。由于 MBB 梁结构在此工况下具有对称性，故优化时只取设计域的一侧，对应的水平网格划分和结构受力都减半，以结构柔度最小为目标，给定的面积约束上限为 $\bar{V}\leqslant 0.3D$，D 为设计域面积。

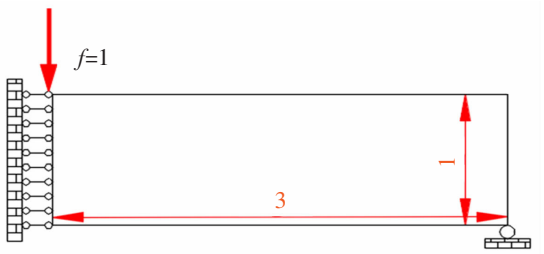


图 3 MBB 梁一侧设计域

Fig.3 One side of the design domain of MBB beam

图 4 为 MBB 梁算例的初始设计，算例中共设计 24 个组件。表 1 给出了组件与微胶囊的初始设计参数。其中，第一和第二个组件的中心点坐标均为(0.25，0.25)，倾角的正弦值分别为 0.7 和−0.7。其他组件依次沿着 x(或 y)方向平移 0.5 获得，各组件中有 6 个微胶囊，微胶囊的半径系数 a 为 0.1，微胶囊之间的间距 G 为 0.1。

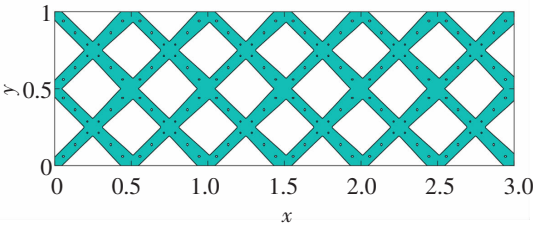


图 4 MBB 梁算例初始设计(a=0.1，G=0.1)

Fig.4 The initial design of MBB beam example

表 1　MBB 梁内置微胶囊的组件初始设计

Tab.1　Initial design of components with microcapsules in MBB beam

Item	Parameter	Value
Components	x_0	0.25
	y_0	0.25
	L	0.38
	h_1,h_3	0.04
	h_2	0.06
	$\sin\theta$	0.7
Microcapsule	a	0.1
	G	0.1
	$2N$	6

图 5 为基于 MMC 方法的自修复材料结构与微胶囊协同优化的结果,即“协同优化自修复材料”。

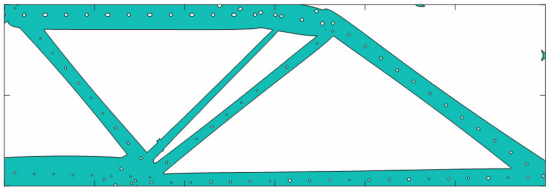


图 5　协同优化自修复材料拓扑优化构型(a=0.1,G=0.1)

Fig.5　Optimize topology and configuration of collaborative self-healing materials(a=0.1,G=0.1)

为论证协同优化的效果,研究沿用经典自修复材料的设计方法。首先,基于 MMC 方法获取相同初始条件(如工况、边界条件等)下无胶囊载体的拓扑优化构型(如图 6 所示,其柔度值为 294.6);其次,根据不同的微胶囊参数,在组件内嵌入微胶囊,设计“经典自修复材料”,并计算相应柔度和微胶囊体积分数(如表 2 和图 7 所示),微胶囊体积分数是指拓扑优化构型中全部微胶囊所占的面积比,体积分数的取值范围为[0,1)。研究结果表明。

1) 对比无胶囊载体的 MBB 梁优化构型(图 7),协同优化自修复材料(a=0.1,G=0.1)的柔度提高了 0.53%,为 296.15(表 2),且构型具有相似性(图 5)。

2) 由表 2 可知,微胶囊参数决定了自修复材料载体的体积分数,当微胶囊半径系数 a 由 0.1 增至 0.4 时,两类自修复材料的微胶囊体积分数均出现了增加趋势;

3) 由表 2 可知,随着微胶囊体积分数的提高,两类自修复材料的柔度均出现了增加,然而增加的幅度存在明显差异,图 7 为两类自修复材料微胶囊体积分数与柔度关系曲线,显然协同优化自修复材料的柔度均小于经典自修复材料,而且随着体积分数的增加(尤其体积分数大于 8%时),两者的差别明显变大。这说明对于经典自修复材料而言,当微胶囊体积分数大于 8%时,微胶囊载体将造成结构力学性能的急剧劣化,而协同优化自修复材料则可减小这一不利影响。

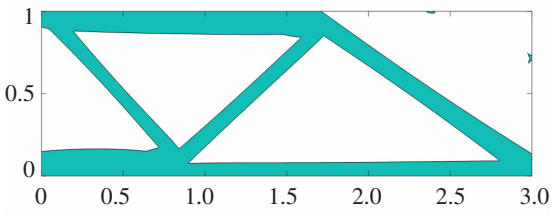


图 6　无胶囊载体拓扑优化构型

Fig.6　Carrier topology optimization configuration (without capsule)

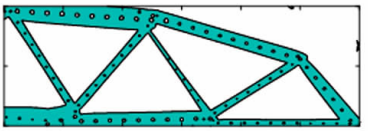
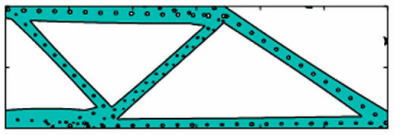
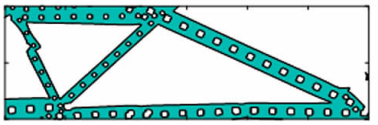
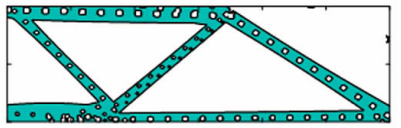
表 2　不同微胶囊半径系数 a 下两类自修复材料的优化结果

Tab.2　Optimization results of two kinds of self-healing materials with different radius coefficients a of microcapsules

a	Compliance		Microcapsule volume fraction/%	
	Collaborative self-healing material	Classic self-healing material	Collaborative self-healing material	Classic self-healing material
0.1	296.15	299.46	1.08	1.03
0.16	309.83	319.05	2.46	2.68
0.22	316.26	332.16	4.01	4.75
0.3	369.83	405.66	7.54	8.34
0.35	377.31	542.96	10.41	10.94
0.4	404.79	612.2	13.91	13.5

表3 两类自修复材料拓扑优化构型

Tab.3 Topological optimization configuration of two self-healing materials

a	Collaborative self-healing material	Classic self-healing material
0.16		
0.35		

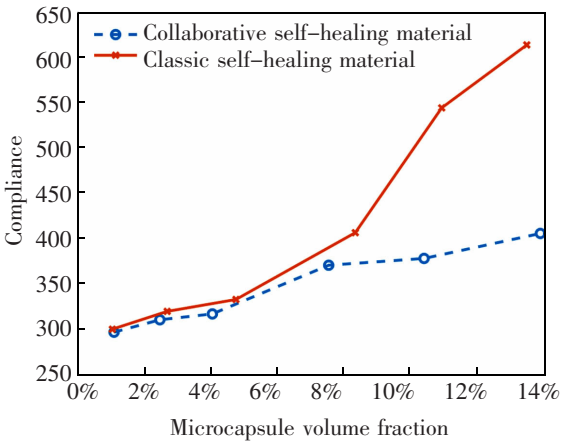


图7 两类自修复材料微胶囊体积分数与柔度关系

Fig.7 Relationship between microcapsule volume fraction and compliance of two kinds of self-healing materials

(4) 通过研究不同微胶囊参数下两类自修复材料的构型,进一步分析协同优化的效果。表3给出了微胶囊半径系数 a 分别为0.16和0.35的两类自修复材料构型,显然相对于经典自修复材料而言,协同优化自修复材料通过宏观构型的优化有效的减弱了载体对自修复材料力学性能的影响。

6 结论

1) 将无胶囊的MBB梁拓扑优化构型与内置微胶囊的MBB梁拓扑优化构型进行了对比,论证了内置微胶囊的MBB梁在微胶囊体积分数较低的情况时,可以获得与无胶囊的MBB梁相似的拓扑优化构型,证明了引入协同优化方法的有效性。

2) 随着微胶囊体积分数的增加,将会造成两类自修复材料的柔度增大,力学性能的劣化。

3) 当微胶囊体积分数超过8%时,对于经典自修复材料,微胶囊会造成其结构力学性能的急剧劣化,当微胶囊体积分数接近14%时,协同优化自修复材料的柔度值仅为经典自修复材料的66.1%。可见研究提出的协同优化自修复材料,通过引入宏观构型与微胶囊的并行优化机制,可有效的减小微胶囊体积分数增加对其结构力学性能的不利影响。

参考文献:

[1] WHITE S,SOTTOS N,GEUBELLE P,et al. Autonomic healing of polymer composites[J]. Nature,2002,409(6822):794-797.

[2] YU X,LIU QT,WAN P,et al. Effect of ageing on self-healing properties of asphalt concrete containing calcium alginate/attapulgite composite capsules[J]. Materials,2022,15(4):1414.

[3] KHAN M Z,ZAIB A,KHAN A,et al. Effect of microcapsules doping on DC flashover and trap level of self-healing epoxy resin composites[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics,2021,32(3):2765-2773.

[4] CHOI S J,KIM J H,JEONG H J,et al. Simulated and experimental investigation of the mechanical properties and solubility of 3D-Printed capsules for self-healing cement composites[J]. Materials,2021,14(16):4578-4578.

[5] WANG X F,XIE W,LI L,et al. Molecular simulation study on mechanical properties of microcapsule-based self-healing cementitious materials[J]. Polymers,2022,14(3):611-611.

[6] HAN K,JU J W W,ZHU Y,et al. Mechanical responses of microencapsulated self-healing cementitious composites under compressive loading based on a micromechanical damage-healing model[J]. International Journal of Damage Mechanics,2021,30(10):1475-1496.

[7] NASSHO Y,SANADA K. Microstructure optimizations for

improving interlaminar shear strength and self-healing efficiency of spread carbon fiber/epoxy laminates containing microcapsules [J]. Journal of Composite Materials,2021,55(1):27-38.

[8] CHOWDHURY F H,HOSUR M V,JEELANI S. Processing,impact response and damage characterisation of plain-weave carbon/epoxy-nanoclay nanocomposites[J]. Polymers and Polymer Composites,2007,15(6):425-435.

[9] LI H Y,WANG R G,HU H L,et al. Surface modification of self-healing poly (urea-formaldehyde) microcapsules using silane-coupling agent[J]. Applied Surface Science,2008,255(5):1894-1900.

[10] YANG Z,WEI Z,LIAO L P,et al. Self-healing coatings containing microcapsule[J]. Applied Surface Science,2012,258(6):1915-1918.

[11] 王瑞,刘星,李婷婷,等. 自修复微胶囊分散对复合材料拉伸性能的影响[J]. 复合材料学报,2012,29(3):90-97.
WANG R,LIU X,LI T T,et al. Effect of the dispersion of self-healing microcapsules on tensile properties of microcapsules filled composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2012,29(3):90-97.

[12] 郭瑞泉,刘景勃,覃兰媚,等. 微胶囊对环氧树脂力学性能的影响[J]. 合成树脂及塑料,2017,34(2):16-19.
GUO R Q,LIU J B,QIN L M,et al. Effect of microcapsules on mechanical properties of epoxy materials[J]. China Synthetic Resin and Plastics,2017,34(2):16-19.

[13] 肖春平,万里鹰,吴嘉栋,等. 单组分微胶囊填充型环氧树脂基复合材料自修复性能研究[J]. 上海航天,2018,35(1):124-131.
XIAO C P,WAN L Y,WU J D,et al. Self-healing properties of filled epoxy besin composite material with one-component microcapsule[J]. Aerospace Shanghai,2018,35(1):124-131.

[14] 贺子腾. 微胶囊自修复涂层力学性能研究[J]. 广州化工,2017,45(24):55-57.
HE Z T. Study on mechanical properties of microcapsule self-healing coating[J]. Guangzhou Chemical Industry,2017,45(24):55-57.

[15] 李鹏,杜艺博,黄培炜,等. 基于无壁型微脉管的光能损伤自修复复合材料[J]. 材料导报,2022,36(2):204-208.
LI P,DU Y B,HUANG P W,et al. Light-energy self-healing composites based on wall-less microvasculature[J]. Materials Reports,2022,36(2):204-208.

[16] GUO X,ZHANG W S,ZHONG W L. Doing topology optimization explicitly and geometrically-a new moving morphable components based framework[J]. Journal of Applied Mechanics,2014,81(8):081009.

[17] SVANBERG K. The method of moving asymptotes-a new method for structural optimization[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,1987,24(2):359-373.



通信作者:李鹏(1976—),男,教授,博士,研究方向为智能结构损伤自修复与健康监测。E-mail:ecitulipeng@126.com。

(责任编辑:吴海燕)