

DOI: 10.7511/jslx20230618001

面向含外表面异质层的结构构型设计的 拓扑优化方法

李冉, 胡靖宇, 刘书田*

(大连理工大学 工程力学系 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 大连 116024)

摘要: 严苛的服役环境要求异质表面层结构在满足特定功能的同时, 兼具轻量化的特性。这意味着结构的外表面不能仅作为功能层使用, 还需要参与承载, 结构构型设计时需要考虑外表面异质层的影响。针对该需求, 本文研究建立了一种考虑异质层影响的含外表面异质层结构的拓扑优化方法。首先, 采用基于腐蚀算法的结构表面建模技术, 通过光滑过滤和离散映射两个过程构建了异质表面层结构的识别和描述模型。其次, 采用非线性虚温度法识别了结构中的开放/封闭区域, 并基于此区分暴露于工作环境中的结构外表面层及附着于封闭孔洞的结构内表面层。最后, 建立了含外表面异质层结构的拓扑优化模型, 并推导了目标函数关于设计变量的灵敏度信息。几个数值算例验证了本文方法的有效性。

关键词: 含异质表面层的结构; 拓扑优化; 表面层识别与描述; 虚拟温度法

中图分类号: O343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-4708(2024)06-0984-07

1 引言

异质表面层结构是指表面层和基体具有不同材料性质的特殊结构, 其形成来源于两个方面。一是环境影响。如增材制造中的表面缺陷^[1]、海水浸泡引起的腐蚀^[2,3]等, 都会导致结构的表面性质改变。二是功能需求。通过在结构的外表面布置具有不同材料性质的表面层, 以实现特定功能。如工程结构的隔热涂层^[4]、防腐涂层^[5]等。随着科技的发展, 高端装备和先进结构的轻量化要求越来越苛刻。那么, 异质表面层结构在满足特定功能的同时, 必须兼具轻量化的特性, 这要求外表面层参与承载。因此, 在进行结构构型设计时, 充分考虑外表面异质层的影响显得尤为重要。

拓扑优化方法^[6-9]由于其高度自由的设计能力成为了结构轻量化和创新设计的重要工具。基于此, 本文提出了一种面向含外表面异质层的结构构型设计的拓扑优化方法, 借助拓扑优化技术, 实现在既定载荷下结构外表面层与基体的一体化设计。

开展含外表面异质层结构的拓扑优化研究, 要

解决两个关键问题。首先, 要准确建模结构的表面层。先驱研究^[10-12]中提出了一种两步过滤方法, 利用大的空间密度梯度来识别结构的表面层。在此基础上, 文献^[13,14]发展了基于腐蚀算法的表面层建模技术, 将初始结构与被腐蚀结构的差集定义为结构的表面层。除使用基于的密度方法外, 文献^[15,16]在水平集方法中使用符号距离函数定义了结构的表面层。其次, 需要精确识别结构在工作环境中暴露的表面层, 并将附着在结构内孔上的表面层排除在外。换句话说, 需要准确区分结构的封闭和开放区域。为此, 文献^[17,18]提出了虚拟温度方法 (Virtual Temperature Method, VTM), 利用材料的导热性质和孔洞的温度分布差异来实现开放区域的识别。随后文献^[19]将其进一步发展为非线性虚温度法 (Nonlinear Virtual Temperature Method, N-VTM)。相比于传统方法, N-VTM 无需精细设置温度阈值, 更简便地实现了对所有封闭孔洞的识别。

本文首先利用基于腐蚀算法的结构表面层建模技术, 构建了异质表面层结构的识别与描述模型。其次, 采用 N-VTM 精准识别了结构的外表

收稿日期: 2023-06-18; 修改稿收到日期: 2023-07-28.

基金项目: 国家自然科学基金(12272076; 11821202); 国家重点实验室专项经费(S22102)资助项目.

作者简介: 刘书田* (1962-), 男, 博士, 教授 (E-mail: stliu@dlut.edu.cn).

引用本文: 李冉, 胡靖宇, 刘书田. 面向含外表面异质层的结构构型设计的拓扑优化方法[J]. 计算力学学报, 2024, 41(6): 984-990, 1019.

LI Ran, HU Jing-yu, LIU Shu-tian. Topology optimization method for structural configuration design containing heterogeneous outer surface layers[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(6): 984-990, 1019.

面。最后,建立了面向含外表面异质层结构构型设计的拓扑优化模型,并给出求解方法。

2 含外表面异质层结构的描述模型

本节提出了只在外表面附着涂层结构的描述与建模方法。

2.1 基于腐蚀算法的结构表面层建模技术

含异质表面层结构的等效模型采用基于腐蚀算法的表面层建模技术^[13]来建立,其基本思想如图1所示。对图1(a)的初始结构进行腐蚀处理,得到图1(b)规模缩减的结构,然后将二者的差集,即图1(c)腐蚀掉的部分,定义为异质表面层。

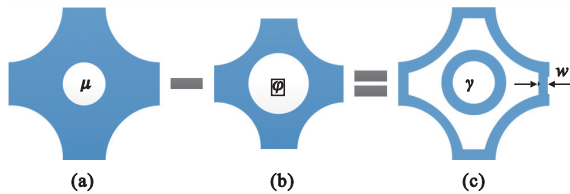


图1 基于腐蚀算法的表面层建模技术的基本思想

Fig. 1 Basic idea of the erosion-based surface layer modeling technology

其中,初始结构场的腐蚀使用光滑过滤和离散映射两个步骤来实现。光滑过滤使初始结构场变得光滑和连续。离散映射使用一个较大的阈值对光滑化的结构场进行截断,以得到腐蚀后的结构。图2展示了一维(1D)情况下腐蚀操作的过程。特别地,与此过程相关的参数都用下标 e 进行标记。

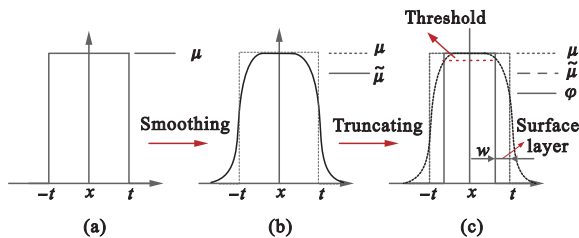


图2 1D情况下的腐蚀操作

Fig. 2 1D process of the erosion operation

首先,采用基于 Helmholtz 偏微分方程的 PDE 过滤技术^[20],对初始结构场 μ 进行光滑化处理

$$-r_e^2 \nabla^2 \tilde{\mu} + \tilde{\mu} = \mu \quad (1)$$

式中 $\tilde{\mu}$ 表示经过光滑化后的结构场, r_e 是长度参数,与标准过滤半径 R_e 之间满足 $r_e = R_e / 2\sqrt{3}$ 。

接着,基于 Heaviside 投影函数^[21]对光滑化后的结构场 $\tilde{\mu}$ 进行截断,得到腐蚀后的结构场 φ

$$\varphi = \frac{\tanh(\beta_e \eta_e) + \tanh(\beta_e (\tilde{\mu} - \eta_e))}{\tanh(\beta_e \eta_e) + \tanh(\beta_e (1 - \eta_e))} \quad (2)$$

式中 β_e 为投影函数的锐度, η_e 为较大的投影阈值,

通过引入 $\Delta\eta_e \in (0, 0.5)$ 来定义, $\eta_e = 0.5 + \Delta\eta_e$ 。

经光滑过滤、离散映射后,厚度均匀可控的结构表面层 γ 可以定义为 $\gamma = \{x | x \in \mu \text{ and } x \notin \varphi\}$ 。本文表面层厚度 w 为预先设定的值,其与过滤半径 R_e 、投影阈值 $\Delta\eta_e$ 之间满足^[13]

$$w = -\frac{R_e}{2\sqrt{3}} \ln(1 - 2\Delta\eta_e) \quad (3)$$

本文将 $\Delta\eta_e$ 取值为 0.45,只通过 R_e 的选取来控制的面层厚度 w ,此时 $R_e \approx 1.5w$ 。

2.2 基于 N-VTM 的开放/封闭区域识别

VTM 假设封闭区域由具有均匀分布热源的高导热材料填充,实体部分则是低导热材料。通过设定合适的温度阈值来判定不同区域的温度差异,进而实现封闭/开放区域的识别。然而,封闭区域大小、壁厚和位置的多样性致使不同区域内的温度分布不均匀,如何确定合适的温度阈值是具有挑战性的。为了解决上述问题,文献^[19]提出了 N-VTM。

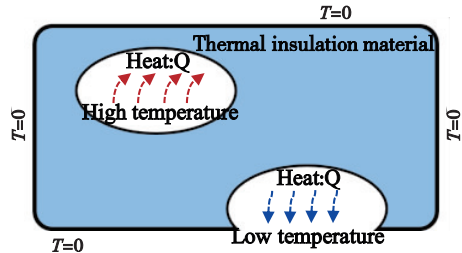


图3 N-VTM 识别封闭孔洞的基本思想

Fig. 3 Basic idea of N-VTM for enclosed void identification

与 VTM 不同的是, N-VTM 在封闭区域中施加了一个与温度相关的非线性热源,旨在使封闭区域内温度分布尽可能均匀,其基本思想如图3所示。需要求解以下非线性问题:

$$\begin{aligned} \nabla(k \nabla T) + Q(T) &= 0 \quad (\text{in } \Omega) \\ T &= 0 \quad (\text{on } \partial\Omega) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 T 表示在 Ω 域中的温度场, Q 是与温度相关的热源,定义为 $Q = q / (1 + e^{\alpha(T - T_{\max})})$ 。其中, α 和 T_{\max} 是给定的两个正值,本文分别取值为 0.2 和 100。参数 k 与 q 满足

$$\begin{aligned} k &= k_0, q = q_0 \quad (\text{在孔洞处}) \\ k &= \epsilon_0 k_0, q = 0 \quad (\text{在实体处}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 k_0 和 q_0 分别表示热传导和热源系数。 ϵ_0 是一个极小的正数,来模拟绝热材料。为了便于描述,将参数 k 与 q 定义为密度插值的形式

$$\begin{aligned} k &= \mu \epsilon_0 k_0 + (1 - \mu) k_0 \\ q &= (1 - \mu) q_0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中 μ 表示初始结构的密度场。为了便于数值实

现,将非线性热问题的离散形式控制方程表示为

$$\mathbf{R}=\mathbf{H}\mathbf{T}-\mathbf{Q}(\mathbf{T})=0 \quad (7)$$

式中 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别为残差向量和温度向量, \mathbf{H} 是全局热传导矩阵, $\mathbf{Q}(\mathbf{T})$ 表示非线性热载荷向量。

借助 Newton-Raphson 方法求解上述非线性热问题后,可以将封闭区域的温度控制在与问题无关的给定值 T_{\max} 附近。因此, N-VTM 无需仔细设定温度阈值。本文温度阈值取为固定值 $T_{\max}/2$, 也就是说, 可以通过 $T>T_{\max}/2$ 来识别封闭/开放区域。

2.3 多重过滤/投影过程及材料插值函数

如图 4 所示, 通过一个多重过滤/投影的数值过程, 对只在外表面附着涂层结构的建模进行描述。

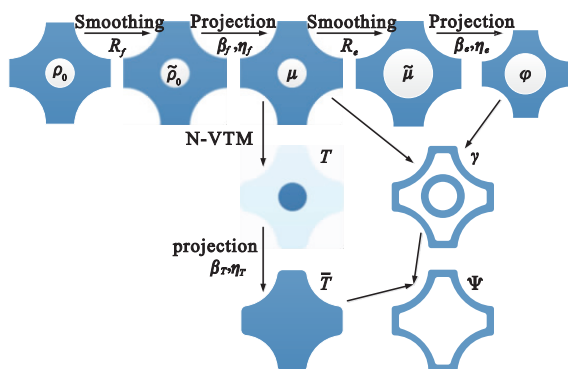


图 4 外表面涂层结构建模的多重过滤/投影过程
Fig. 4 Multiple filtering/projection process for modeling of exposed surface coated structures

为了消除棋盘格效应并获得黑白设计, 在腐蚀过程前添加了过滤过程, 所有参数用下标 f 标记。接着, 将 N-VTM 用在结构场 μ 上, 得到结构温度场 T 。最后通过 Heaviside 投影来识别开放区域

$$\begin{aligned} \bar{T} &= H\left(\frac{T}{T_{\max}}, \beta_T, \eta_T\right) \\ &= \frac{\tanh(\beta_T \eta_T) + \tanh(\beta_T (\bar{\mu} - \eta_T))}{\tanh(\beta_T \eta_T) + \tanh(\beta_T (1 - \eta_T))} \end{aligned} \quad (8)$$

本文选择温度阈值 $T_{\max}/2$ 来识别封闭孔洞, 因此取投影阈值 $\eta_T = 0.5$ 。结构开放区域处于 $\bar{T} = 0$ 的位置, 而在封闭区域 $\bar{T} = 1$ 。最终, 使用结构场 ψ 来描述位于开放区域的结构表面层。则初始结构场 μ 与被腐蚀结构场 ϕ 的差集 ($\mu = 1$ 且 $\phi = 0$) 定义为结构表面层, $\phi = 1$ 对应的结构场定义为结构基体, 而 $\mu = 0$ 的区域表示为孔洞区域。因此, 最终的密度和刚度插值函数可以表示为

$$\rho(\mu, \phi, \bar{T}) = \mu[\varphi \rho_b + \bar{T}(1 - \varphi)\rho_b + (1 - \bar{T})(1 - \varphi)\rho_s] \quad (9)$$

$$E(\mu, \phi, \bar{T}) = \mu^p[\varphi^p E_b + \bar{T}^p(1 - \varphi^p)E_b + (1 - \bar{T}^p)(1 - \varphi^p)E_s] \quad (10)$$

式中 ρ_b, E_b, ρ_s 和 E_s 分别为基体和表面层的材料密度和刚度(弹性常数), p 为惩罚参数。

3 面向含外表面异质层的结构构型设计的拓扑优化方法

3.1 优化列式

本文考虑静力学拓扑优化中的最小柔顺性设计问题。为避免出现由于杆件太细而整体识别为表面层的情况, 在优化问题中使用稳健性公式^[22]来实现结构最小尺寸的控制。于是, 该拓扑优化问题可表述为

$$\begin{aligned} \text{Find: } & \rho = \{\rho_e\} \quad (e = 1, 2, \dots, N_e) \\ \text{min: } & \max(c(E^e(\rho)), c(E^i(\rho)), c(E^d(\rho))) \\ \text{s. t. } & \mathbf{K}(E^e(\rho))\mathbf{U}(E^e(\rho)) = \mathbf{F} \\ & \mathbf{K}(E^i(\rho))\mathbf{U}(E^i(\rho)) = \mathbf{F} \\ & \mathbf{K}(E^d(\rho))\mathbf{U}(E^d(\rho)) = \mathbf{F} \\ & \sum_{e=1}^{N_e} \rho_e^d(\rho) \leq \text{frac}^{d*} \times N_e \\ & \rho_e \in [0, 1] \end{aligned} \quad (11)$$

式中 c 为结构柔顺度, $E^{e/i/d}(\rho)$ 分别表示侵蚀、中间和扩张结构的弹性常数, $\rho^d(\rho)$ 表示扩张结构的密度, 都是设计变量 ρ 的函数。 \mathbf{K} 为全局刚度矩阵, \mathbf{U} 和 \mathbf{F} 分别为位移向量和载荷向量。 N_e 为有限元网格总数。整体刚度矩阵 \mathbf{K} 可表示为

$$\mathbf{K} = \sum_{e=1}^{N_e} E_e(\mu, \varphi) k_e^0 \quad (12)$$

式中 k_e^0 为单位杨氏模量下的单元刚度矩阵。需要说明的是, 稳健性公式以侵蚀结构、中间结构和扩张结构中的最差性能为目标, 在第一步离散映射中分别使用不同的映射阈值 $0.5 - \Delta\eta_f, 0.5$ 以及 $0.5 + \Delta\eta_f$ 对光滑结构场进行截断, 其中 $\Delta\eta_f$ 为稳健公式的控制参数。同时, 使用稳健性公式时优化问题的质量约束要施加在扩张结构上来保证结构最小尺寸可控。因此, 为了使中间设计(目标设计)的质量约束等于规定值 frac^* , 每 10 步迭代对扩张设计的质量约束 frac^{d*} 进行更新:

$$\text{frac}^{d*} = \frac{\text{frac}^*}{\text{frac}^i} \text{frac}^d \quad (13)$$

式中 frac^i 和 frac^d 分别为当前迭代步中间设计和扩张设计的质量约束。

3.2 敏感度分析

基于伴随法, 目标函数关于设计变量的敏感度信息可以表示为

$$\frac{\partial c}{\partial \rho_e} = -\mathbf{U}^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_e} \mathbf{U} = -\sum_i \frac{\partial E_i}{\partial \rho_e} (\mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_e^0 \mathbf{u}_i) \quad (14)$$

式中 $\partial E_i / \partial \rho_e$ 可以进一步展开为

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_i}{\partial \rho_e} = & p[\varphi_i^p E_b + \bar{T}_i^p (1 - \varphi_i^p) E_b + \\ & (1 - \bar{T}_i^p)(1 - \varphi_i^p) E_s] \mu_i^{p-1} \frac{\partial \mu_i}{\partial \rho_e} + \\ & p \mu_i^p (1 - \bar{T}_i^p) (E_b - E_s) \varphi_i^{p-1} \frac{\partial \varphi_i}{\partial \rho_e} + \\ & p \mu_i^p (1 - \varphi_i^p) (E_b - E_s) \bar{T}_i^{p-1} \frac{\partial \bar{T}_i}{\partial \rho_e} \end{aligned} \quad (15)$$

式中 $\partial \mu_i / \partial \rho_e$ 和 $\partial \varphi_i / \partial \rho_e$ 可以通过链式法则来求解

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial \rho_e} = \frac{\partial \mu_i}{\partial \tilde{\rho}_i} \frac{\partial \tilde{\rho}_i}{\partial \rho_e} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \rho_e} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial \tilde{\mu}_i} \frac{\partial \tilde{\mu}_i}{\partial \mu_j} \frac{\partial \mu_j}{\partial \tilde{\rho}_j} \frac{\partial \tilde{\rho}_j}{\partial \rho_e} \quad (17)$$

图5给出了一个简单的设计题来验证式(15)

温度敏感项 $\partial \bar{T}_i / \partial \rho_e$ 对结构构型的影响。图5(b)为忽略温度敏感并且每10步更新温度场时的优化结果($c=43.71$),图5(c)为考虑温度敏感时的最优构型($c=43.69$)。可以看出,构型和性能表现上两者几乎没有差别。因此,本文在优化过程中忽略了热场的灵敏度^[13],并采用每10步更新一次温度场的策略。该拓扑优化问题的求解基于移动渐近线法^[23]实现,并借助MATLAB实现可视化。

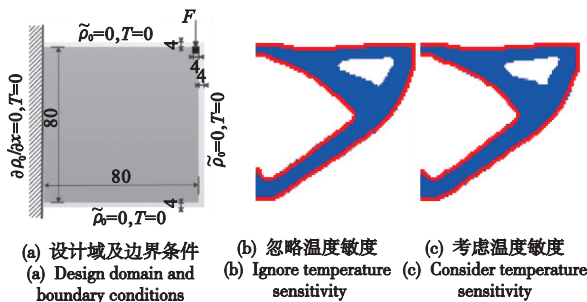


图5 温度敏感项对结构构型的影响

Fig. 5 The influence of temperature sensitivity on configuration

4 数值算例

本节给出三个数值算例来说明本文 ps 方法的有效性。所有算例的设计域采用单元大小为 1×1 的均匀网格,并在所有支撑和载荷点处设置了实体不可设计域。PDE 过滤和非线性热分析都使用齐次零 Dirichlet 边界条件,同时通过域扩展方法^[24]保证在结构边界处获得相同的腐蚀厚度。

用于所有算例的常数参数有,结构表面层的材料性质 $\rho_s=1, E_s=1$,惩罚参数 $p=3$ 应用在 μ 和 φ 两个结构场上。对于非线性虚拟热问题,用来模拟孔洞和固体部分的热传导系数参数设置为 $k_0=1$

和 $\epsilon_0=10^{-9}$ 。过滤过程的投影锐度 β_f 在迭代收敛时(或每100步迭代后)从1到128逐渐增加到先前值的1.5倍。腐蚀过程和 N-VTM 过程中的投影锐度 β_e 和 β_T 按照与 β_f 同样的规则进行更新。不同点在于,对于不同的算例, β_e 和 β_T 所取的初值有所不同。

4.1 MBB 梁

算例1 集中载荷作用下的 MBB 梁设计问题,设计域的尺寸为 600×150 ,边界条件等细节如图6所示。投影锐度 β_e 和 β_T 的初值均为16。结构基体部分的材料性质为 $\rho_b=0.7$ 和 $E_b=0.4$ 。过滤过程的滤波半径 $R_f=8$,异质表面层厚度 $w=4$,即腐蚀过程的过滤半径 $R_c=6$ 。稳健性公式的控制参数 $\Delta \eta_f=0.1$,即对侵蚀结构、中间结构和扩展结构进行首次离散映射的阈值分别为0.4,0.5和0.6。优化问题的质量约束为30%。

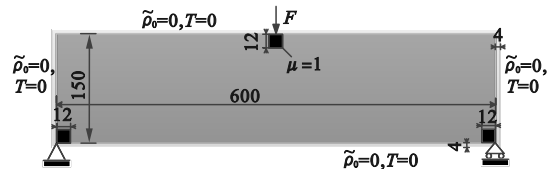


图6 MBB 梁算例的设计域及边界条件

Fig. 6 Design domain and boundary conditions of MBB example

图7展示了 MBB 梁算例的拓扑优化结果和目标函数的迭代收敛曲线,曲线上的突变点源于投影锐度 β 或质量约束的更新。可见,本文方法成功地实现了面向含外表面异质层结构构型的拓扑优化设计,并表现出良好的收敛性能。

优化过程中,不同迭代步时结构场的温度分布和中间拓扑构型如图8所示,优化在第262个迭代步结束。可以看出,在优化的早期阶段(100步以前),拓扑结构主要受目标约束和质量约束的驱动,此时结构内部仍存在较多的灰度单元,温度场对优化结果影响较小。随着结构内灰度单元减少,结构构型逐渐稳定(超过120步),温度场开始有效识别结构中的封闭孔洞,这进一步验证了温度场对最优拓扑构型的影响甚微。

过滤过程中的过滤半径 R_f 取不同值时的拓扑优化结果如图9所示。当 $R_f=7$ 时,拓扑结果出现了尺寸较小的细杆;随着 R_f 的增大,结构的最小尺寸也随之增大,并消除了细杆的存在。这表明通过选择不同的过滤半径值可以有效控制结构中杆件的最小尺寸。

4.2 悬臂梁

算例2 集中载荷作用下的悬臂梁设计问题,

设计域的尺寸为 300×150 , 载荷作用位置和边界条件如图 10 所示。算例 2 中, 投影锐度 β_e 和 β_T 的初值均为 16。结构基体部分的材料性质为 $\rho_b = 0.7$ 和 $E_b = 0.4$ 。过滤过程的滤波半径 $R_f = 8$, 稳健性控制参数 $\Delta\eta_f = 0.1$, 优化问题的质量约束为 40%。

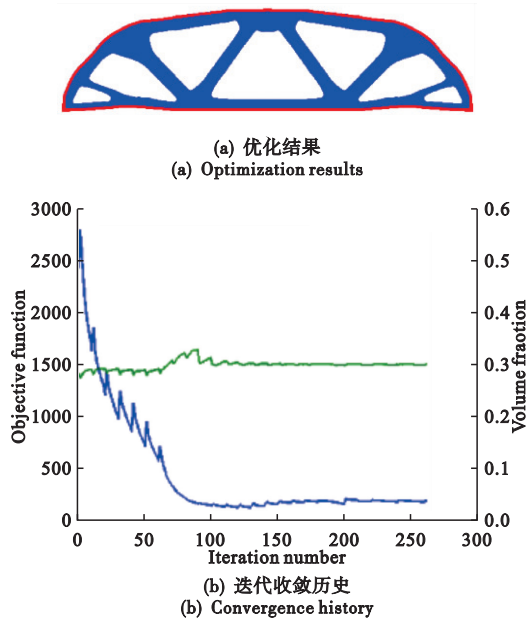


图 7 MBB 梁算例
Fig. 7 MBB

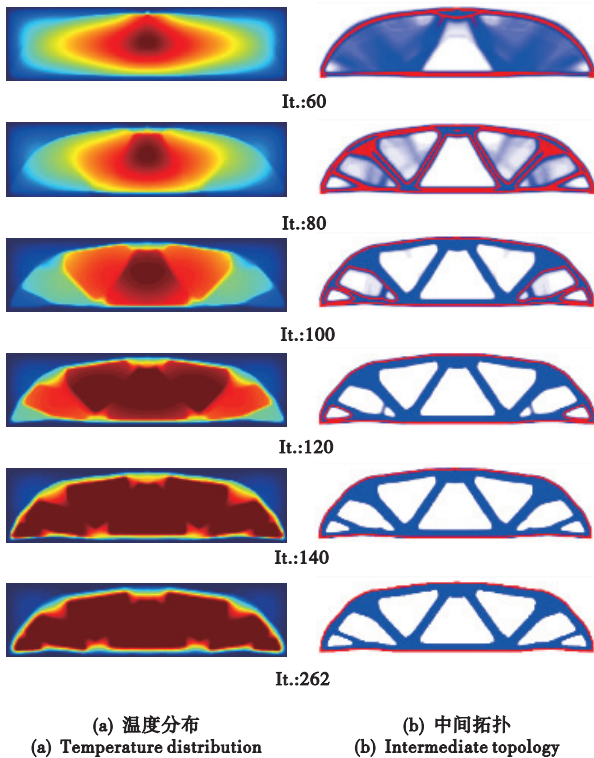


图 8 迭代过程中的温度分布和中间拓扑
Fig. 8 Temperature distribution and intermediate topology of iterative process

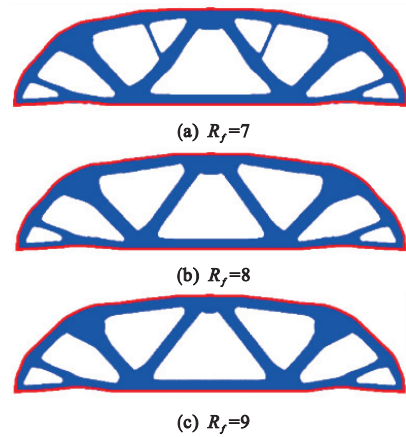


图 9 过滤半径 R_f 取不同值时的优化结果
Fig. 9 Optimization results when R_f takes different values

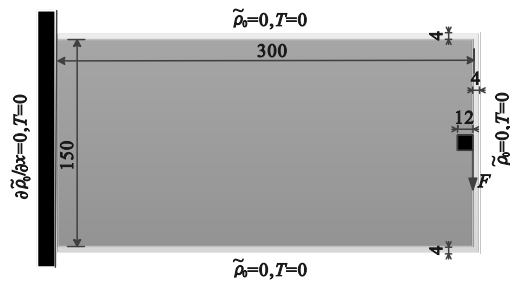


图 10 悬臂梁算例的设计域及边界条件
Fig. 10 Design domain and boundary conditions of cantilever beam

图 11 所示为设定结构表面层厚度 w 分别取值为 4, 6, 8 时的拓扑优化结果。此时, 腐蚀过程的过滤半径 R_c 分别为 6, 9 和 12。观察到这三个优化结果都成功地在结构外表面生成了高度均匀的表面层。随着表面层厚度的增加, 表面层材料的用量也增加, 导致结构基体中的杆件尺寸变细。同时, 由于表面层相对于基体是一种硬材料, 整体结构的刚度逐渐增大。

本文研究了稳健性参数 $\Delta\eta_f$ 对优化结果的影响, 不考虑稳健性, $\Delta\eta_f$ 分别取值为 0.1, 0.2 和 0.3 时的拓扑优化结果如图 12 所示。研究结果显示, 当没有使用稳健性公式时, 优化结果出现了小的孔洞和细小杆件, 并且无法获得厚度均匀的结构

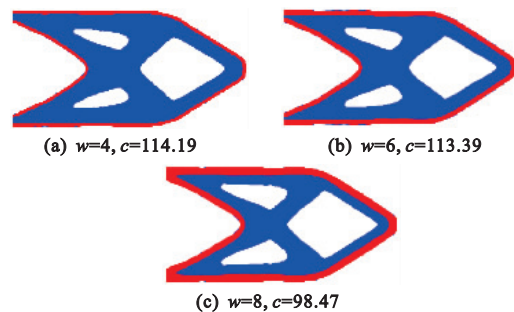


图 11 表面层厚度 w 取不同值时的优化结果
Fig. 11 Optimization result when w takes different values

表面层。这样的优化结果并不符合期望值。当使用稳健性公式但 $\Delta\eta_f$ 取不同值时,结构的最优拓扑和最小尺寸也会发生一定的变化。

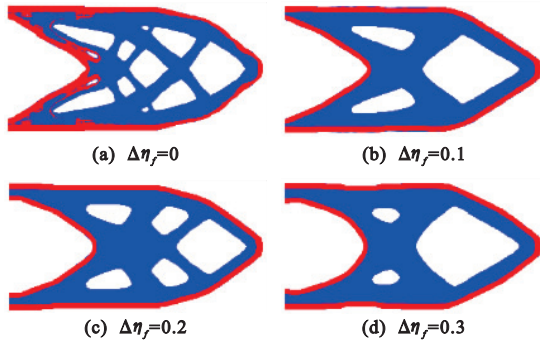


图 12 稳健性参数 $\Delta\eta_f$ 取不同值时的优化结果
Fig. 12 Optimization result when $\Delta\eta_f$ takes different values

4.3 双轴拉伸板

算例 3 方形板在双轴拉伸下的拓扑优化设计,选取方形板的四分之一(200 × 200)作为设计域,载荷和边界条件的施加细节如图 13 所示。投影锐度 β_e 的初值为 1, β_T 的初值为 16, 基体材料性质 $E_b = 0.4$ 。过滤过程的滤波半径 $R_f = 2$, 异质表面层厚度 ω 取值为 1, 即腐蚀过程的过滤半径 $R_c = 1.5$ 。稳健性控制参数 $\Delta\eta_f = 0.1$, 最大允许质量约束为 40%。

通过双轴拉伸板算例研究结构基体的不同材料性质对优化结果的影响,如图 14 所示。研究结果显示,不同基体材料的性质对结构的最优拓扑具有显著影响。这可以通过总的质量约束来解释,在总质量不变的情况下,基体材料的密度越小,其在结构占的空间就越大。

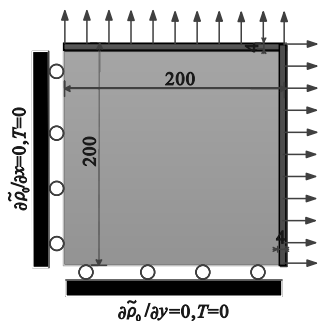


图 13 双轴拉伸板的设计域及边界条件
Fig. 13 Design domain and boundary conditions for bi-axial tension plate

算例 3 还研究了表面层相对于基体是一种软材料时的优化问题,即外软内硬,此时材料性质分别为 $\rho_s = 0.7, E_s = 0.4$ 和 $\rho_b = 1, E_b = 1$ 。优化结果如图 14 所示。与图 14(b)外硬内软的优化结果相比,图 15(a)的结构构型出现了较为明显的差异。

同时,15(a, b)中的不同拓扑,进一步说明了过滤半径 R_f 对杆件尺寸的控制和对结构构型的影响。

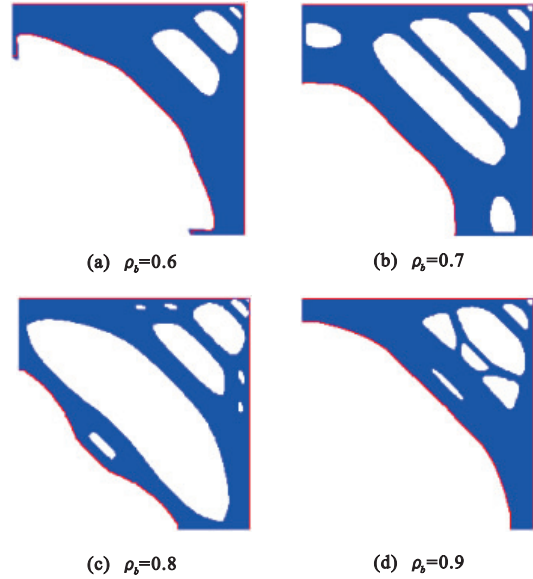


图 14 基体材料性质 ρ_b 取不同值时的优化结果
Fig. 14 Optimization result when ρ_b takes different values

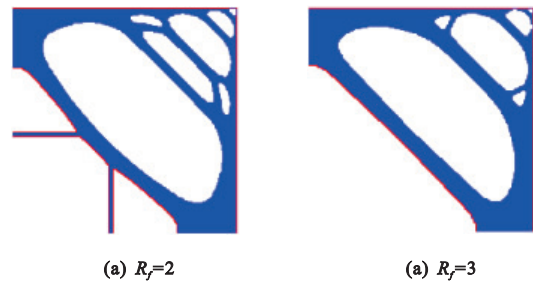


图 15 表面层为软材料时 R_f 取不同值时的优化结果
Fig. 15 Result when the surface takes soft material for different R_f

5 结 论

随着严苛的服役环境对异质表面层结构的设计提出了更高的要求,结构的外表面不能仅充当功能层,还需要具备承载能力。为此,本文提出了一种面向含外表面异质层结构构型设计的拓扑优化方法。

首先,通过基于腐蚀算法的结构表面层建模技术,构建了含外表面异质层结构的等效模型;接着,采用 N-VTM 成功区分了暴露与工作环境中的外表面层和附着于封闭孔洞的内表面层;最后,建立了含外表面异质层结构构型设计的拓扑优化模型。数值算例讨论了结构参数、材料参数的不同取值对拓扑优化结构构型的影响。结果表明,该方法可以成功实现外表面异质层与结构基体的一体化拓扑优化设计。

参考文献(References):

- [1] 顾冬冬,沈以赴. 基于选区激光融化的金属材料零件快速成形现状与技术展望[J]. 航空制造技术, 2012(8): 32-37. (GU Dong-dong, SHEN Yi-fu. Research status and technical prospect of rapid manufacturing of metallic part by selective laser melting[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012(8): 32-37. (in Chinese))
- [2] Huang Y, Yang L J, Xu Y Z, et al. A novel system for corrosion protection of reinforced steels in the underwater zone[J]. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2016, **51**(8): 566-572.
- [3] Zhao J B, Wu W, Cai J X, et al. Evaluating the effect of aluminum on the corrosion resistance of the structural steels used for marine engineering[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, **18**: 4181-4193.
- [4] Penmetsa R C, Grandhi R V, Haney M. Topology optimization for an evolutionary design of a thermal protection system[J]. *AIAA Journal*, 2006, **44**(11): 2663-2671.
- [5] Gopi D, Ramya S, Rajeswari D, et al. Corrosion protection performance of porous strontium hydroxyapatite coating on polypyrrole coated 316L stainless steel[J]. *Colloids Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, **107**: 130-136.
- [6] Bendsoe M P, Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1988, **71**(2): 197-224.
- [7] Bendsoe M P. Optimal shape design as a material distribution problem[J]. *Structural Optimization*, 1989, **1**(4): 193-202.
- [8] Wang M Y, Wang X M, Guo D M. A level set method for structural topology optimization[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, **192**(1-2): 227-246.
- [9] Zhang W S, Yuan J, Zhang J, et al. A new topology optimization approach based on Moving Morphable Components (MMC) and the ersatz material model[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, **53**(6): 1243-1260.
- [10] Clausen A, Aage N, Sigmund O. Topology optimization of coated structures and material interface problems[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015, **290**: 524-541.
- [11] Clausen A, Aage N, Sigmund O. Exploiting additive manufacturing infill in topology optimization for improved buckling load[J]. *Engineering*, 2016, **2**(2): 250-257.
- [12] Groen J P, Wu J, Sigmund O. Homogenization-based stiffness optimization and projection of 2D coated structures with orthotropic infill[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, **355**: 94-112.
- [13] Luo Y F, Li Q H, Liu S T. Topology optimization of shell-infill structures using an erosion-based interface identification method[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, **355**: 94-112.
- [14] Hu J Y, Liu Y, Luo Y F, et al. Topology optimization of multi-material structures considering a piecewise interface stress constraint[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, **398**: 115274.
- [15] Wang Y G, Kang Z. A level set method for shape and topology optimization of coated structures[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, **329**: 553-574.
- [16] Fu J J, Li H, Gao L, et al. Design of shell-infill structures by a multiscale level set topology optimization method[J]. *Computers & Structures*, 2019, **212**: 162-172.
- [17] Liu S T, Li Q H, Chen W J, et al. An identification method for enclosed voids restriction in manufacturability design for additive manufacturing structures[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2015, **10**(2): 126-137.
- [18] Li Q H, Chen W J, Liu S T, et al. Structural topology optimization considering connectivity constraint[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, **54**(4): 971-984.
- [19] Luo Y F, Sigmund O, Li Q H, et al. Additive manufacturing oriented topology optimization of structures with self-supported enclosed voids[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, **372**: 113385.
- [20] Lazarov B S, Sigmund O. Filters in topology optimization based on Helmholtz-type differential equations[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2011, **86**(6): 765-781.
- [21] Wang F W, Lazarov B S, Sigmund O. On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2011, **43**(6): 767-784.
- [22] Schevenels M, Lazarov B S, Sigmund O. Robust topology optimization accounting for spatially varying manufacturing errors[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2011, **200**(49-52): 3613-3627.
- [23] 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.
- [24] Clausen A, Andreassen E. On filter boundary conditions in topology optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, **56**(5): 1147-1155.

Hybrid shape functions and Gurtin variational principle based on temporal finite element method for dynamic analysis

CHEN Feng-ling, HE Yi-qian, YU Yang, YANG Hai-tian*

(State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment,
Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A kind of hybrid shape functions are presented using polynomial and trigonometric base functions, and three temporal finite element models are developed utilizing Gurtin variational principle and weighted residual technique, such that variables can be characterized more flexibly to cope with more complex time varying loads. An error transfer formula is derived for the first-order temporal FE model, by which stability analysis can numerically be conducted when the shape functions, time step size, and the numbers of temporal nodes are determined. Various numerical examples with constant/variable stiffness and mass, and polynomial and harmonic excitations are provided to illustrate the efficiency of the proposed approaches, and impacts of different temporal FE models/shape functions, different numbers of interpolation points, and different step sizes, etc. are taken into account. Satisfactory results are achieved in comparison with analytical solutions, results from Newmark method, and Central difference method, etc.

Key words: dynamic analysis; hybrid shape functions; temporal finite element; gurtin variational principle; weighted residual method

(上接第 990 页)

Topology optimization method for structural configuration design containing heterogeneous outer surface layers

LI Ran, HU Jing-yu, LIU Shu-tian*

(State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for
Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The harsh service environment requires the heterogeneous surface layer structure to meet the specific function while exhibiting lightweight characteristics. In other words, the outer surface of the structure can not be used as only a functional layer. It must also be involved in load transfer. Its influence should be considered when designing the structure. This paper proposes a topology optimization method for structural configuration design containing heterogeneous outer surface layers. Firstly, a structural surface layer modeling technique based on an erosion algorithm is used to construct an equivalent model of the heterogeneous surface layer structure through smooth filtering and discrete projecting. Second, the open/closed holes in the structure are identified by the nonlinear virtual temperature method, and based on this, the outer surface layer of the structure exposed to the working environment and the inner surface layer of the structure attached to the enclosed holes are distinguished. Finally, a topology optimization model for structures with heterogeneous outer surface layers is developed, and the sensitivity information of the objective function concerning the design variables is derived. Several numerical examples verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: structures with heterogeneous surface layer; topology optimization; surface layer identification and description; virtual temperature method