

引用格式: 李清禄, 赵煊贺, 张靖华, 等. 表面效应对热-机多孔悬臂纳米梁力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2024, 44(3): 124-131.

LI Qinglu, ZHAO Xuanhe, ZHANG Jinghua, et al. Influence of surface effect on mechanical properties of thermo-mechanical porous cantilever nanobeams[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(3): 124-131.

表面效应对热-机多孔悬臂纳米梁力学性能的影响

李清禄^{1*}, 赵煊贺¹, 张靖华¹, 潘兆一²

(1. 兰州理工大学 理学院, 兰州 730050; 2. 甘肃新农生态能源环保科技有限公司, 甘肃 定西 730500)

摘要: 表面效应对纳米结构的力学性能有重要影响。飞机上很多微纳尺度的结构可简化为悬臂梁。本工作分析表面效应对随载荷作用下梯度多孔材料纳米悬臂梁在高温环境下非线性力学响应的影响。基于 Gurtin-Murdoch 表面弹性理论和非线性梁理论, 建立梯度多孔材料梁在随载荷以及温度场中的非线性控制微分方程。假定梯度多孔材料的性能在整个厚度范围内连续变化, 且沿厚度呈两种余弦形式的非均匀孔隙率分布模式。采用打靶法求解梯度多孔材料悬臂纳米梁在热-随载荷下的非线性力学响应。获得各种孔隙率系数和不同非均匀升温下悬臂纳米梁非线性力学响应的数值解, 详细讨论材料表面弹性常数和表面应力对纳米悬臂梁力学响应的影响。结果表明: 不同孔隙率系数和不同非均匀升温下梁的力学行为是不同的; 纳米梁表现出十分显著的表面效应。

关键词: 梯度多孔材料; 悬臂梁; 随载荷; 表面残余应力; 表面效应

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2022.000176

中图分类号: V259; TB383; O343.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2024)03-0124-08

Influence of surface effect on mechanical properties of thermo-mechanical porous cantilever nanobeams

LI Qinglu^{1*}, ZHAO Xuanhe¹, ZHANG Jinghua¹, PAN Zhaoyi²

(1. School of Sciences, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Gansu New Agriculture and Energy-Environment Technology Ltd., Dingxi 730500, Gansu, China)

Abstract: The surface effect has an important influence on the mechanical properties of nanostructures. Many micro and nano-scale structures on aircraft can be simplified as cantilever beams. In this paper, the influence of surface effect on the nonlinear mechanical response of gradient porous material nano cantilever under follower load at high temperature was analyzed. Based on Gurtin-Murdoch's surface elastic theory and nonlinear beam theory, the nonlinear governing differential equations of gradient porous material beam under follower load and temperature field were established. It was assumed that the properties of gradient porous materials change continuously in the entire thickness range, and there were two kinds of non-uniform porosity distribution patterns in cosine form along the thickness. The nonlinear mechanical response of the gradient porous material cantilever nanobeam under thermal follower load was solved by shooting method. The numerical solutions of the nonlinear mechanical response of the cantilever under various porosity coefficients and different non-uniform temperature rises were obtained. The effects of the material surface elastic constants and surface stresses on the mechanical response of the cantilever were discussed in detail. The results show that the mechanical behaviors of beams are different under different porosity coefficients and different non-uniform temperature rises. The nanobeams exhibit very significant surface effects.

Key words: graded porous materials; cantilever beam; follower force; surface residual stress; surface effect

飞机机翼一般采用高比强度且轻质的功能型复合材料。当飞机进入平流层和电离层时,气温上热下冷,且随飞机不断的爬升过程中,上下温度差会急剧的变化。另外,飞机机翼上表面有一定的弧度且承受巨大的气流作用,飞机不但承受力的作用,同时也承受着复杂气温变化的影响。因此研究飞机机翼在热/气流(可看作均匀分布的随从载荷)作用下的力学性能十分必要。

随着航空、航天领域在轻量化、多功能、高强度等方面的需要,一种被称为梯度多孔材料的新型材料应运而生^[1]。这种材料的最大特点就是既有功能材料的特点,又可以在材料内部根据需求制造不同类型的孔隙(对称或非对称)来减轻自重,以达到所需的目的。近二十年来,由于梯度多孔材料的广泛应用,科研工作者对梯度多孔材料的力学行为进行了大量的研究^[2-5]。

早期关于多孔材料的研究以材料的制备为主。郑敏等^[6]对多孔金属材料的特点、常用的制备方法以及在工业方面的应用做了详细报道。刘培生等^[7]借助数理分析,全面介绍了多孔金属材料在载荷作用下的失效模式。根据文献调查,对梯度多孔材料和结构的研究数量有限。目前的文献主要集中在利用经典理论研究梯度多孔梁和板的静态弯曲和屈曲。假设材料内部空隙按照对称和非对称分布,Chen等^[8]采用Rit方法研究了梯度多孔Timoshenko梁的弹性屈曲和静力弯曲。

纳米技术作为一种前沿科学技术,已经在航空航天领域广泛应用。相应地,科研人员开始研究纳米结构的力学行为。廖琳等^[9]采用共沉积法研究了氧化镁/碳纳米管界面的稳定性问题。随着纳米线、纳米棒的成功制造,研究一维尺度纳米梁结构的力学响应变得至关重要。比如,Isamil等^[10]研究了磁场和热场作用下功能梯度纳米梁的自由振动和屈曲稳定性。Hamed等^[11]研究了一个具有切开纳米梁的弯曲和屈曲稳定问题。以上文献没有涉及多孔材料。文献[12]运用伽辽金加权残差法,研究了热环境中功能梯度压磁微/纳米梁的热后屈曲力学响应,但没有考虑带孔问题。

实验和原子模拟已经证明,当结构尺寸达到微/纳米尺度时,小尺度的影响变得十分重要。由于纳米结构的表面相和体相相比具有不同的原子排列和较大的比表面积,且表面相的特性与体相不同。因此,表面效应很好地解释了尺寸相关的纳米材料或结构的性能且表面效应是导致纳米结构尺寸依赖性性质的原因之一。基于非局部应变梯度

理论,王平远等^[13]分析了尺度效应对功能梯度纳米矩形板屈曲临界载荷的影响,但没有考虑表面效应的影响。El-Borgi等^[14]基于非局部理论,研究了Timoshenko纳米梁的非线性振动响应,分析了表面效应对振动频率的影响。相比研究均质材料表面效应的影响,研究非均匀梯度多孔材料纳米结构的问题更有意义。但从目前的文献调研来看,表面效应如何影响纳米梁尤其是梯度多孔纳米梁结构在热-机载荷下的非线性力学行为问题鲜有研究成果,特别是研究随从机械载荷下的表面应力问题的文献几乎是空白。在研究弹性材料的表面效应方面,Gurtin^[15]提出的表面G-M模型是具有开创性的,已被广泛应用于解释纳米结构的尺寸依赖性行为^[16]。

鉴于此,本研究基于梁的非线性伸长理论,研究随从载荷(模拟机翼受到的气流)作用下的梯度多孔材料悬臂纳米梁在非均匀温度场中的非线性力学特性,采用G-M表面弹性理论建立问题的控制微分方程。通过孔隙率系数、孔隙率分布方式、非均匀温度场等多种因素的影响,探讨由于尺度效应引起的表面效应对随从载荷作用下悬臂梁(飞机机翼)力学性能的影响。

1 纳米悬臂梁模型

(1)飞机机翼上表面是弓背,且会受到强烈的沿着表面的气流,当机翼变形时,气流也随之改变方向,这里用均匀分布的随从载荷 $\bar{q}$ 模拟机翼上气流的作用;(2)飞机一般会遭受极端的高温天气,且机翼上下表面的气温一般不相等,这里用上面提到的正弦形式的非均匀温度场描述实际情况;(3)飞机上采用功能材料代替普通的材料来减小自重,增加强度。

梯度多孔材料就是这样一种在航空航天中兴起的功能材料。当材料进入微纳尺度时,材料具有表面效应。将整体梯度多孔微纳材料看作具有表面的分层模型,即主体层(bulk)加表面层(surface)。基于以上的航空实际工况,机翼模拟为梯度多孔悬臂纳米梁,其中表面效应用一个非常薄的不考虑厚度的层模拟,如图1所示。

由著名的G-M表面弹性理论^[15],表面层材料的本构关系为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha\beta}^S &= \sigma_0 \delta_{\alpha\beta} + (\lambda^S + \sigma_0) \varepsilon_{\gamma\gamma}^S \delta_{\alpha\beta} + \\ &2(\mu^S - \sigma_0) \varepsilon_{\gamma\gamma}^S + \sigma_0 u_{\alpha\beta}^S \end{aligned} \quad (1)$$

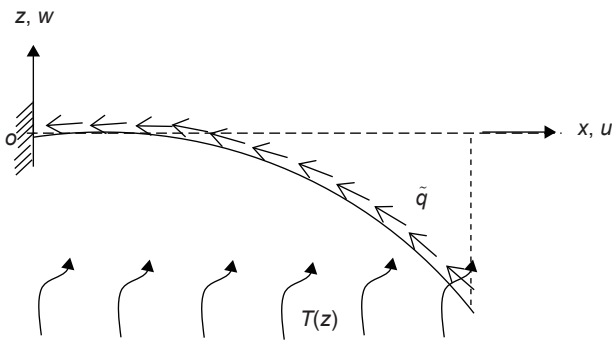


图1 纳米悬臂梁的变形示意图

Fig. 1 Deformation diagram of cantilever nanobeam

式中: σ_0 是表面残余应力; λ^S 和 μ^S 是独立于 σ_0 的表面相的拉梅常数, $\delta_{\alpha\beta}$ 是克罗内克函数。

由式(1), 表面相材料的本构关系可写为:

$$\sigma^S = \sigma_0 + (\lambda_S + 2\mu_S) \left(R - 1 - \frac{d\theta}{dx} z \right) \quad (2)$$

主体相的本构关系仍采用一般弹性体理论:

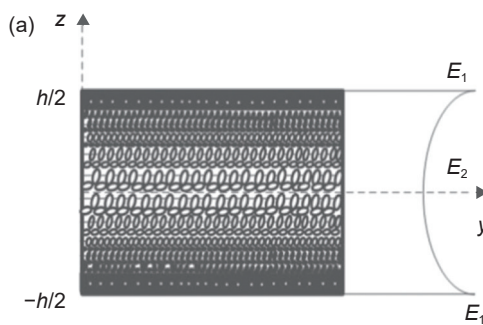
$$\sigma = E(z) \left(R - 1 - \frac{d\theta}{dx} z - \alpha \Delta T \right) \quad (3)$$

式中: θ 为梁变形后挠曲线的切线与 x 轴正向夹角; R 为轴线伸长率。

表面效应梁的薄膜力和弯矩定义为:

$$N_{\alpha\alpha} = b \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\alpha\alpha} dz + b(\sigma_{\alpha\alpha}^+ + \sigma_{\alpha\alpha}^-) \quad (4)$$

$$M_{\alpha\alpha} = b \int_{-h/2}^{h/2} (z - z_0) \sigma_{\alpha\alpha} dz + \frac{bh}{2} (\sigma_{\alpha\alpha}^+ - \sigma_{\alpha\alpha}^-) \quad (5)$$



将式(2)和式(3)代入式(4)和式(5), 得到

$$N = A(\lambda - 1) + 2(\lambda_S + 2\mu_S)(\lambda - 1) + 2b\sigma_0 - n_T = (\lambda - 1)(A + \lambda_1) + 2\sigma_0 - n_T \quad (6)$$

$$M = D \frac{d\theta}{dx} + \frac{h^2}{2} (\lambda_S + 2\mu_S) \frac{d\theta}{dx} = (D + \lambda_2) \frac{d\theta}{dx} - m_T \quad (7)$$

其中:

$$\lambda_1 = 2b(\lambda_S + 2\mu_S), \quad \lambda_2 = bh^2(\lambda_S + 2\mu_S)/2,$$

$$(A, D) = \iint_A E(z)[1, (z - z_0)^2] dA = bhE_1(f_1, h^2 f_3)$$

由于梯度多孔材料是非均质材料, 其几何中面和物理中面不会重合, 这里引入物理中面的概念后, 式(6)和式(7)中已经将拉弯耦合效应消除, 主要是为了后面的计算方便。

$$z_0 = \frac{\int_{-0.5h}^{0.5h} z E(z) dz}{\int_{-0.5h}^{0.5h} E(z) dz} \quad (8)$$

热轴力和热弯矩为:

$$(n_T, m_T) = \iint_A E(z) \alpha(z) \Delta T (1, z - z_0) dA \quad (9)$$

2 梯度多孔材料及温度场

2.1 梯度多孔材料

本研究中涉及的孔隙分布模式有两种, 分别是非均匀对称分布和非均匀非对称分布模式, 这里定义为 Mode I 和 Mode II 模型, 如图2所示。

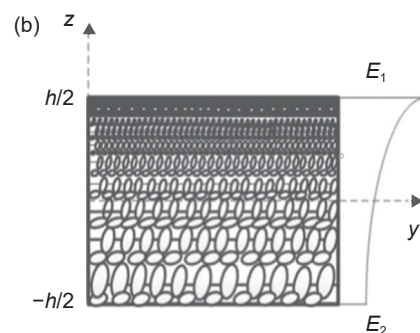


图2 孔隙分布模式 (a)对称(Mode I); (b)非对称(Mode II)

Fig. 2 Patterns of porosity distributions (a) symmetric(Mode I); (b) asymmetric(Mode II)

假设多孔材料的力学性能沿整个厚度方向连续变化, 这里主要指弹性模量 $E(z)$ 如下式所示:

关于几何中面对称的 Mode I 模型:

$$E(z) = E_1 [1 - e_0 \cos(\pi z/h)] \quad (10)$$

关于几何中面不对称模型的 Mode II 模型:

$$E(z) = E_1 [1 - e_0 \cos(\pi z/2h + \pi/4)] \quad (11)$$

式中: e_0 为材料的孔隙率系数, $e_0 = 1 - E_2/E_1$ ($0 < e_0 < 1$); E_2 和 E_1 分别是厚度方向上的最小和最大弹性模量。为简单起见, 这里假设梯度多孔材料的泊松比为常数。热膨胀率系数在厚度方向也没有变化 $\alpha(z) = \alpha_1$ 。

2.2 非均匀温度场

将梁上表面的温度和下表面的温度分别记为

T_t 和 T_b , $T_r = T_t/T_b$ 。

基于大气层复杂多变的温度环境,当温度正弦热场上升时,温度呈非线性变化:

$$T(z) = T_b + (T_t - T_b) \left[1 - \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (12)$$

其中 $T(z) = \Delta T + T_0$, $T_0 = 300$ K为室温。 $T_r = T_t/T_b = 1$ 时为材料上下表面均匀升温, $T_r \neq 1$ 时上下表面为非均匀升温,飞机的机翼上下表面的气温是不同的,所以后面的分析主要采取非均匀升温。

3 控制微分方程

精确考虑梁轴线的伸长,从几何、物理、静力平衡方面出发建立控制微分方程。结合文献[17]可给出无量纲形式的非线性控制微分方程如下:

$$\frac{dS}{d\xi} = R, \quad \frac{dU}{d\xi} = R \cos \theta - 1, \quad \frac{dW}{d\xi} = R \sin \theta \quad (13)$$

$$\frac{dP_H}{d\xi} = -Rq \cos \theta, \quad \frac{dP_V}{d\xi} = Rq \sin \theta, \quad (14)$$

$$\frac{dM}{d\xi} = R(-P_H \sin \theta + P_V \cos \theta) \quad (15)$$

$$\frac{d\theta}{d\xi} = \frac{1}{12(f_3 + 0.5\gamma)} (M + \tau M_T / \delta) \quad (16)$$

$$\text{其中, } R = 1 - \frac{1}{12\delta^2(f_1 + 2\gamma)} [(P_H \cos \theta + P_V \sin \theta + \tau N_T)] - \frac{2\eta}{(f_1 + 2\gamma)}$$

式(13)~(16)不但考虑了温度的影响,也考虑了表面弹出参数 γ 和表面残余应力 η 的影响。式中: S 为梁轴线弧长; U 和 W 分别为物质点在 x, z 方向的位移; P_H 和 P_V 代表横截面内沿 x, z 方向的内力分量; M 为弯矩。

上述方程的纲量归一变换如下:

$$(\xi, S, U, W) = (x, s, u, w)/l, \quad \delta = l/h, \\ \gamma = \frac{E_S}{hE_1}, \quad \eta = \frac{\sigma_0}{hE_1}, \quad (q, P_H, P_V, M) = \frac{12}{bh^3E_1} (\tilde{q}l^3, Hl^2, Vl^2, ml) \quad (17)$$

热轴力和热弯矩为:

$$(N_T, M_T) = \tau(\lambda_1 + (T_r - 1)\lambda_2)(1, t - 0.5) \quad (18)$$

其中: $\tau = 12\delta^2\alpha_1T_b$ 。

对 Mode I 模型:

$$\lambda_1 = \int_0^1 [1 - e_0 \cos \pi(t - 1/2)] \alpha_1 dt \quad (19)$$

$$\lambda_2 = \int_0^1 [1 - e_0 \cos \pi(t - 1/2)] \alpha_1 t dt \quad (20)$$

对 Mode II 模型:

$$\lambda_1 = \int_0^1 (1 - e_0 \cos \pi t / 2) \alpha_1 dt \quad (21)$$

$$\lambda_2 = \int_0^1 (1 - e_0 \cos \pi t / 2) \alpha_1 t dt \quad (22)$$

图1悬臂梁的无量纲归一化边界条件为:

$$S(0) = U(0) = W(0) = \theta(0) = 0, \quad M(0) = m \quad (23)$$

$$W(1) = P_H(1) = M(1) = 0 \quad (24)$$

式中: m 为梁固定端的弯矩。这样,热环境下的梯度多孔悬臂梁在随从载荷下的非线性力学问题就归结为式(13)~(16)在边界条件(23)和(24)下的两点边值问题。

4 数值结果及讨论

由于式(13)~(16)是多变量耦合的强非线性方程组,想要获得在边界条件(23)~(24)下的解析解是十分困难的。这里利用数值计算方法-打靶法求其数值解。打靶法的原理可参考文献[18]的详细描述,这里不再赘述。

4.1 孔隙率系数的影响

首先考虑材料孔隙率系数的影响。为了验证数值方法的正确性,暂时不考虑温度的影响($T = 0$),其采用的参数为 $E_1 = 76$ GPa, $\nu = 0.3$, $\alpha_1 = 1.2 \times 10^{-5}$ K⁻¹, $l = 30$ nm, $h = 1$ nm, $\gamma = 0$, $\eta = 0$,即不考虑表面效应且不处于温度场的纳米悬臂梁。

图3(a)和图3(b)分别为对称和非对称模式下,纳米悬臂梁左端(固定端)的弯矩随随从载荷之间的关系曲线。由图中可以看出:当不考虑温度时,多孔悬臂纳米梁在随从载荷下都发生屈曲行为。当 $e_0 = 0$ 时,两种情况下的多孔梁都退化为均匀材料梁,其屈曲时的临界载荷为 $q_{cr} = 3.47$,这一结果和文献[19]用解析法给出的结果完全一致,也说明了本研究模型的正确性和计算结果的可靠性。随着孔隙率系数的增加,梁发生屈曲的临界载荷随之减小。相比较 Mode I 模型下的梁, Mode II 下的梁发生屈曲的临界载荷较小,比如当 e_0 取图3中的数值时,前者的临界载荷是 $q_{cr} = 3.226, 2.975, 2.596$;后者的临界载荷是 $q_{cr} = 3.059, 2.599, 1.172$ 。另外,当孔隙率系数一定时,超过临界载荷即进入过屈曲之后随着载荷的增加,弯矩非线性递增。同时我们还可以发现: Mode I 情况下,当 $q = 5.05$ 时,各孔隙率系数下的弯矩值相同,当 $q < 5.05$ 时,孔隙率系数越大,固定端弯矩越大,当

$q > 5.05$ 时, 孔隙率系数越大, 固定端弯矩越小。然而, Mode II 下没有这样的特点。

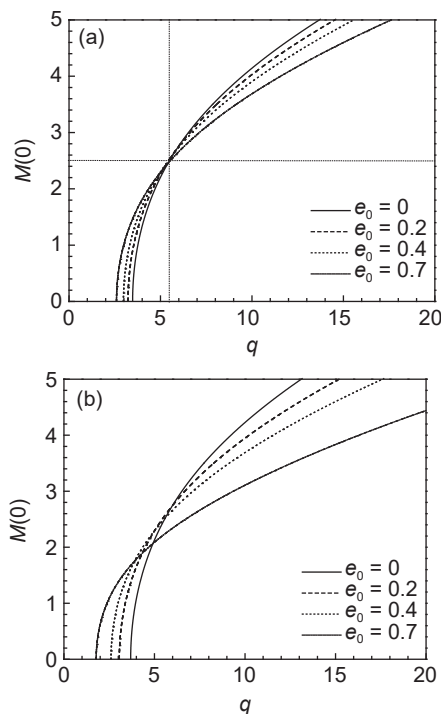


图3 不同孔隙率(e_0)下 $M(0)$ - q 关系曲线
(a)Mode I; (b)Mode II
Fig. 3 $M(0)$ - q curves for different porosities (e_0)
(a)Mode I; (b)Mode II

图4是 Mode I 自由端的挠度(最大挠度)与随从载荷的关系曲线。各孔隙率系数下的挠度都随载荷的增加而非线性增加。孔隙率系数越大临界载荷越小, 挠度越大, 说明孔隙率系数的增加会削弱梁的刚度。图5进一步比较了两种模型下的自由端挠度, 相同的孔隙率系数下, 非对称梁的挠度大于对称梁的挠度, 临界载荷小于对称梁的临界载荷。说明 Mode II 模型下梁的弯曲刚度较小。另外, 孔隙率系数越大, 两种模型下的变形之差越来越大。

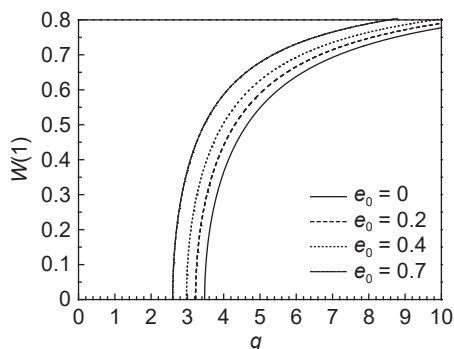


图4 Mode I 不同孔隙率下 $W(1)$ - q 的关系曲线
Fig. 4 $W(1)$ - q curves for different porosities e_0 of Mode I

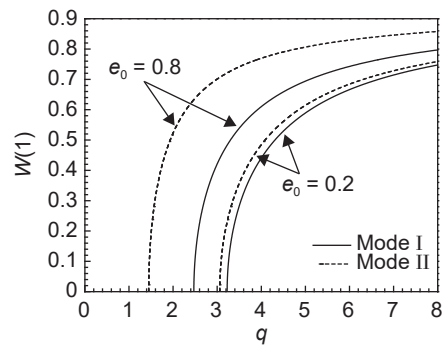


图5 $W(1)$ - q 关系曲线的比较曲线
Fig. 5 Comparison curve of $W(1)$ - q relation curves

4.2 非均匀升温的影响

考虑温度场对梯度多孔悬臂纳米梁力学响应的影响, 其采用的参数和 4.1 中相同。图6(a)和6(b)分别为两种模型下自由端转角与随从载荷之间的关系曲线图。显然, 和 4.1 节中的结果不同, 当梁处于温度场中时, 悬臂多孔纳米梁在随从载荷下并不发生过屈曲, 而是呈现出典型的弯曲行为。当随从载荷(即机翼上气流)达到一个比较高的数值时, 梁的自由端才有挠度, 即梁发生弯曲。各种非均匀升温下, 只要载荷达到这个值, 刚开始尽管随从载荷在减小(即气流在减弱), 但梁的挠度会继续

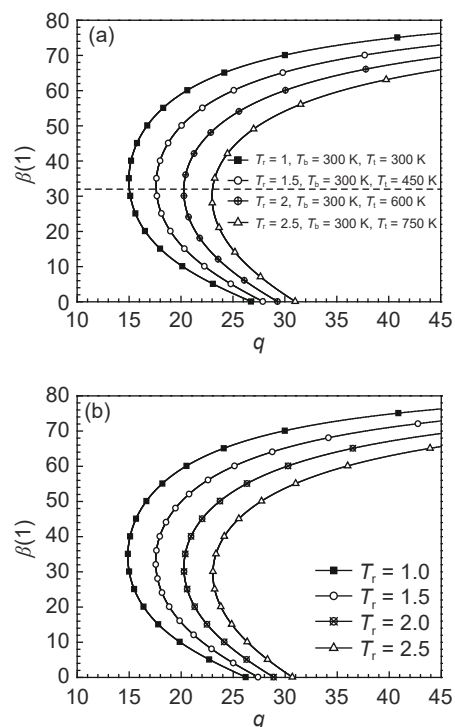


图6 不同非均匀升温下梯度多孔纳米梁的 $\beta(1)$ - q 关系曲线($e_0 = 0.1$) (a)Mode I; (b)Mode II
Fig. 6 $\beta(1)$ - q curves of graded porous nanobeam under different non-uniform temperature rises ($e_0 = 0.1$)
(a) Mode I; (b) Mode II

续增加,当载荷减小到一定时又开始增加(相当于气流先减弱之后又开始增强),这时挠度继续增加。这种情况与一般的工况下载荷小变形小,载荷大变形大是不同的。这揭示了航空中的机翼的受力和变形的复杂性。从图6中还可以看出:随着非均匀升温的变化,多孔纳米梁的变形也不同,说明非均匀升温也是梁产生弯曲的影响因素之一。非均匀升温越高,初始弯曲的载荷越大,之后挠度先快速增加又缓慢增加。 $T_r = 1$ 对应的是均匀升温的情况,其开始弯曲的载荷比非均匀升温下的小,但变形幅度大。飞机起飞过程中,大部分时间段会遇到复杂的非均匀升温的环境,而小部分时间段也会在均匀升温中作业,所以这一研究结果值得引起重视。

图7为不同升温下 Mode I 自由端挠度随载荷的变化关系图。和图4(无温度)相比,在不考虑温度场时和考虑升温时的变形有极大的不同。图4呈现的结果是挠度随载荷非线性单值递增,而图7中呈现的是挠度并不是载荷的单值函数,一个载荷可以对应两种弯曲构形,即载荷先减小后增加,挠度随着载荷一直增加,这一过程中载荷会出现一个极值。因此温度环境下的悬臂纳米梁挠度和载荷的关系是非线性非单调的关系。值得指出的是:非均匀升温越高,初始发生弯曲的随从载荷越大,但发生弯曲时梁的挠度增加得越快,也就是说突然出现一个比较大的弯曲变形。

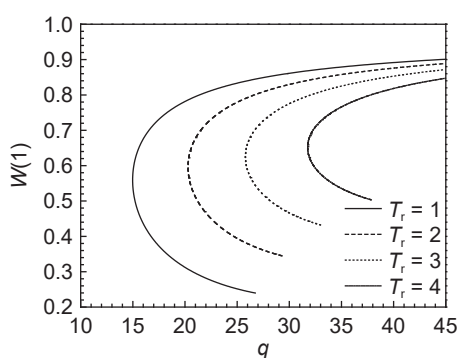


图7 Mode I 不同升温下 $W(1)-q$ 的关系曲线($e_0 = 0.1$)
Fig. 7 Relation curves of $W(1)-q$ of Mode I for different temperature rises($e_0 = 0.1$)

4.3 表面弹性参数 γ 的影响

以下部分分析表面弹性参数 $\gamma = E^S/hE_1$ 对梯度多孔悬臂纳米梁在随从载荷下力学响应的影响。所采取的参数为 $E_1 = 76 \text{ GPa}$, $\alpha_1 = 1.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\nu = 0.3$, $E^S = 1.22 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $\sigma_0 = 0.89 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $\nu^S = 0.3$, $l = 30 \text{ nm}$, $h = 1 \text{ nm}$ 。给定非均匀升温为 $T_b = 300 \text{ K}$,

$T_t = 600 \text{ K}$ 。

先不考虑表面效应的影响(即 $\sigma_0 = 0$),图8为不同表面弹性参数下的 $q-\beta(1)$ 曲线图。图8(a)是无温度环境下的,图8(b)是非均匀温度场下的,从图中容易看出:不管是有温度环境还是无温度作用,表面弹性参数都对悬臂纳米梁的力学特性有影响。当梁没有在温度场中时,表面弹性参数越大,纳米悬臂梁发生屈曲的临界载荷越大,说明表面弹性参数对梁有硬化作用。当梁处于非均匀温度场中时,随着弹出参数的增加,梁初始弯曲时的载荷也随着增加。图9为自由端的挠度也就是梁的最大挠度随随从载荷的变化关系曲线图。不难看出,考虑表面弹性参数和不考虑表面弹性参数时的力学行为是截然不同的,其影响也和图8中反应出的特性是一致的。

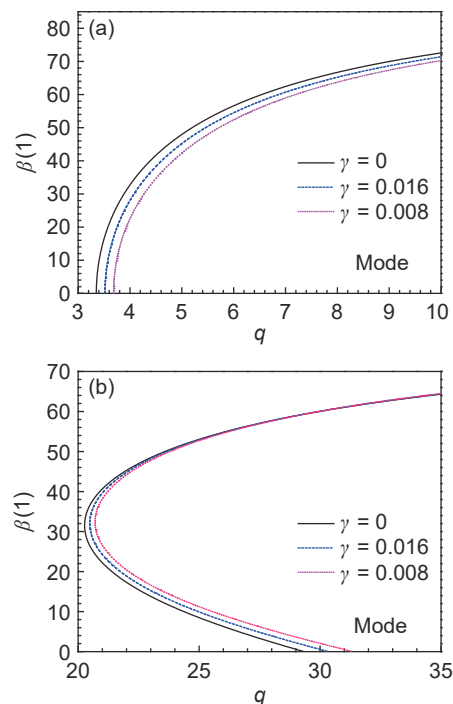


图8 Mode I 表面弹性参数对 $\beta(1)-q$ 的影响($e_0 = 0.1$)
(a)不考虑热;(b)考虑热

Fig. 8 Influences of surface elastic parameters of Mode I on $\beta(1)-q$ ($e_0 = 0.1$) (a) without thermal; (b) with thermal

4.4 表面弹性参数 σ_0 的影响

单独考虑 $\eta = \sigma_0/hE_1$ 对多孔纳米梁在随从载荷下力学行为的影响,用到的参数和4.3节相同。

以 Mode I 梁为例,取孔隙率系数为 $e_0 = 0.1$,图10考察了表面残余应力对固定端内力的影响。其中图10(a)是对弯矩的影响,图10(b)和(c)分别是对固定端水平力和铅垂力与随从载荷之间的关系的影响图。显然,考虑表面残余应力时,固定端

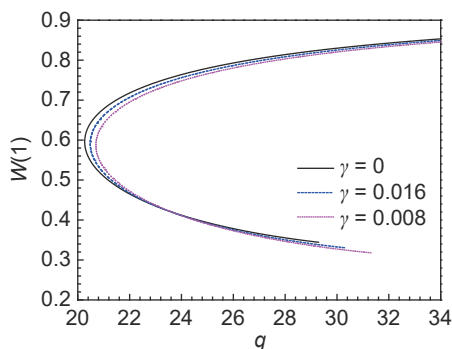


图9 表面弹性参数对 $W(1)$ - q 曲线的影响 ($e_0 = 0.1$)

Fig. 9 Influences of surface elastic parameters on $W(1)$ - q curves ($e_0 = 0.1$)

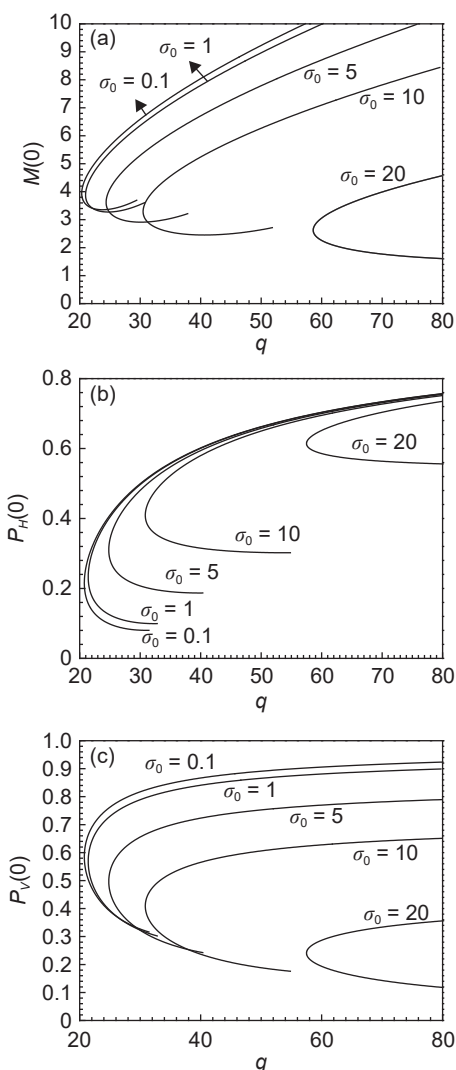


图10 表面残余应力对固定端内力随载荷变化的影响
(a)对 $M(0)$ - q 的影响; (b)对 $P_H(0)$ - q 的影响;
(c)对 $P_V(0)$ - q 的影响

Fig. 10 Influences of surface residual stress on variation of internal force at fixed end with load (a) influence on $M(0)$ - q ;
(b) influence on $P_H(0)$ - q ; (c) influence on $P_V(0)$ - q

的弯矩随载荷的变化是有巨大的差异,也就是说表面残余应力是不能忽视的。另外,当表面残余应力

变化时,引起左端的水平和铅垂力是不同的。特别的,当 σ_0 从 0.1:1 之间变化时,力的变化幅度较小;当 $\sigma_0 > 1$ 之后,随着 σ_0 的增加,左端约束力的增加很快。和图 10 一样,左端的力和弯矩都是随从载荷的非单调非线性函数,表面应力对其影响十分明显,对于纳米梁绝对不能忽视。

值得指出的是,上面虽然考虑的是表面残余应力的影响,事实上,表面残余应力和表面弹性参数是不独立的。当考虑表面残余应力的影响时,必然也同时考虑了表面弹性参数对材料的力学特性有影响。

5 结论

(1)若不考虑温度作用,孔隙率对称和非对称情况下,悬臂梁都产生典型的过屈曲行为,临界载荷均随材料孔隙率系数的增加而减小,相同孔隙率系数下,非对称情况下的临界载荷小于对称梁的临界载荷。自由端挠度和转角都随载荷非线性增加。

(2)若考虑温度作用,Mode I 梁和 Mode II 梁都不会发生过屈曲行为,当随从载荷达到一定值时,梁突然有挠度产生,之后载荷减小(即作用在机翼上的气流减弱),当载荷达到一个极值时又开始增加(气流又加强)。非均匀升温越大,气流稍弱的阶段弯曲变形大,而气流强的阶段变形小。

(3)不管是考虑温度还是不考虑温度场作用,表面弹性参数对梁的屈曲或弯曲行为都有影响。特别地,对于考虑非均匀升温时,表面弹性参数 γ 越大,梁发生弯曲的力越大,当气流由强变弱的过程中, γ 对梁弯曲的影响比较显著,而气流由弱变强的过程中,影响不那么十分明显。

(4)在非均匀升温场中,表面残余应力 σ_0 对梁的变形的影响和表面弹性参数的影响趋势相同,但 σ_0 对梁的变形的影响是非常大的。

参考文献:

- [1] LIU P S, CHEN G F. Porous materials: processing and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [2] SERGEY L, LOPATNIKOV, BAZLE A, et al. Dynamics of metal foam deformation during Taylor cylinder-Hopkinson bar impact experiment[J]. *Composite Structures*, 2003, 61(1/2): 61-71.
- [3] 李元伟, 张猛, 王小健, 等. 纳米多孔金属的制备方法及其力学性能的研究进展 [J]. *航空材料学报*, 2018, 38(5): 10-23.

- LI Y W, ZHANG M, WANG X J, et al. Research progress in preparation and mechanical properties of nanoporous metals[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(5): 10-23.
- [4] WATTANASAKULPONG N, CHAIKITTIRATANA A, PORNPEERAKEAT S. Chebyshev collocation approach for vibration analysis of functionally graded porous beams based on third-order shear deformation theory[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2018, 34(6): 1124-1135.
- [5] 刘培生, 崔光, 程伟. 多孔材料性能模型研究 1: 数理关系[J]. *材料工程*, 2019, 47(6): 42-62.
- LIU P S, CUI G, CHENG W. Study on property model for porous materials 1: mathematical relations[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(6): 42-62.
- [6] 郑敏, 杨瑾, 张华. 多孔金属材料的制备及应用研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(18): 74-89.
- ZHENG M, YANG J, ZHANG H. Review on preparation and applications of porous metal materials[J]. *Materials Review*, 2022, 36(18): 74-89.
- [7] 刘培生, 周茂奇. 多孔金属材料失效模式的数理分析[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(2): 384-400.
- LIU P S, ZHOU M Q. Mathematical analysis of failure mode for porous metallic materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(2): 384-400.
- [8] CHEN D, YANG J, KITIPORNCHAI S. Elastic buckling and static bending of shear deformable functionally graded porous beam[J]. *Composite Structures*, 2015, 133: 54-61.
- [9] 廖琳, 袁邵涛, 周佳俊, 等. 氧化镁/碳纳米管界面稳定性[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(5): 94-102.
- LIAO L, YUAN S T, ZHOU J J, et al. Stability of interface between MgO and carbon nanobutes[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(5): 94-102.
- [10] ISMAIL E, ALAA A A, MOHAMED A, et al. Free vibration and buckling stability of FG nanobeams exposed to magnetic and thermal fields[J]. *Engineering with Computers*, 2022, 38(4): 3463-3482.
- [11] HAMED M A, MOHAMED N A, ELTAHER M A. Stability buckling and bending of nanobeams including cutouts[J]. *Engineering with Computers*, 2022, 38(1): 209-230.
- [12] MALIKAN M, WICZENBACH T, EREMEYEW V A. Thermal buckling of functionally graded piezomagnetic micro- and nanobeams presenting the flexomagnetic effect[J]. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2022, 34(4): 1051-1066.
- [13] 王平远, 李成, 姚林泉. 基于非局部应变梯度理论功能梯度纳米板的弯曲和屈曲研究[J]. *应用数学和力学*, 2021, 42(1): 15-26.
- WANG P Y, LI C, YAO L Q. Bending and buckling of functionally graded nanoplates based on the nonlocal strain gradient theory[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2021, 42(1): 15-26.
- [14] EI-BORGI S, RAIENDRAN P, TRABELSSI M. Nonlocal and surface effects on nonlinear vibration response of a graded Timoshenko nanobeam[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2022, 92: 1-30.
- [15] GURTIN M E, MURDOCH A L. A continuum theory of elastic material surfaces[J]. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 1975, 57(4): 291-323.
- [16] EREMEYEV V A. On effective properties of materials at the nano- and microscales considering surface effects[J]. *Acta Mechanica*, 2016, 227(1): 29-42.
- [17] 李清禄, 王思瑶, 张靖华. 湿-热-机耦合梯度多孔材料梁的非线性力学行为[J]. *航空材料学报*, 2022, 42(3): 38-44.
- LI Q L, WANG S Y, ZHANG J H. Nonlinear mechanical behavior of graded porous material beam subjected to moisture-heat-mechanics loads[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2022, 42(3): 38-44.
- [18] LI S R, CHENG C J, ZHOU Y H. Thermal post-buckling of an elastic beams subjected to a transversely non-uniform temperature rising[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2003, 24(5): 455-460.
- [19] TIMOSHENKO S P. Theory of elastic stability[M]. New York: Dover Publication Inc, 2021.

收稿日期: 2022-10-26; 修订日期: 2023-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(12062010, 12362009); 甘肃省自然科学基金重点项目(23JRRA775)

通讯作者: 李清禄(1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为复合材料结构力学, 联系地址: 甘肃省兰州市兰州理工大学理学院(730050), E-mail: lqu2008@163.com

(责任编辑: 徐永祥)