复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第23卷 第5期 10月 2006年
Vol. 23 No. 5 October 2006

文章编号: 1000-3851(2006)05-0161-07

由材料组分直接计算功能梯度复合材料开孔板宏观响应的跨尺度分析

程红梅, 曹志远*
(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘 要: 建议一种新颖的功能梯度构件分析的细观元法, 给出了方法模型、基本算式及特点与功能。细观元法对构件的常规有限单元内部设置密集细观单元以反映材料组分梯度变化, 又通过协调条件将各细观元结点自由度转换为同一常规有限元自由度, 再上机计算。此法可实现材料细观结构到构件宏观响应的直接过渡分析, 而计算单元与自由度又等同于常规有限元, 为解决功能梯度构件宏观、细观跨尺度分析提供了一种有效工具。本文中直接从制备时给定材料组分分布出发计算构件宏观响应, 给出了不同开孔形状与数量功能梯度板的力学量三维分布形态。

关键词: 功能梯度材料; 三维分析; 细观元; 材料组分; 开孔板
中图分类号: O316; TB330.1 **文献标识码**: A

Scale-span analysis for macro-response of functionally graded material plates with holes by material component

CHENG Hongmei, CAO Zhiyuan*
(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new microelement method for the analysis of functionally graded structures was suggested, and the method model, basic computational equations, features and functions were given in this paper. In order to reflect the graded change of the material component, the dense microelements were set up in the normal finite element of the structure, and the degrees of freedom of all microelement's nodes were translated into the ones of the same normal finite element by the compatibility conditions, which were calculated by the computer. This microelement method can fully realize the transition from material micro-constitution to macroresponse of the structure, and its computational elements and degrees of freedom are the same as those of the normal finite element method. Therefore, this method is an effective means for the scale-span analysis of the functionally graded structures. In this paper, the macro-response can be immediately calculated by the material component distribution determined in the process of the material production. The three-dimensional distributions of mechanical quantities of the functionally graded plates with different holes are given in this paper.

Keywords: functionally graded material; three-dimensional analysis; microelement; material component; plate with hole

功能梯度材料是一种近期发展的新型复合材料, 其由多种不同材料介质沿空间按不同组分进行复合, 形成材料功能的梯度分布, 从而满足构件不同部位对材料使用性能的不同要求。同时, 由于该种材料及结构中各组分相呈连续变化, 不存在明显的界面及性能的突变, 具有优于一般层叠型和组合型复合材料的特性。这种将性能各异的材料按照设计意愿在结构内部非均匀连续地合成的复合材料, 使新材料的研制迈入了材料设计的更高层次[1]。

功能梯度材料的设计理念是日本科学家于上世纪80年代首先提出来的, 主要用于国防高新技术领域对材料性能提出的特殊要求方面。尽管功能梯

收稿日期: 2005-11-14; **收修改稿日期**: 2006-03-06
基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(10432030)
通讯作者: 曹志远, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为材料工程力学 E-mail: caozytj@sina.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度材料的研制始于缓和热应力，但鉴于功能梯度材料的特点，这一概念逐渐被应用于其他功能材料的构思和研究中，在航天、能源、电子、化学工程、光学材料和生物医学工程等重要领域得到广泛的应用与发展。近年来，功能梯度材料与结构已引起国际学术界广泛关注[2]，日本、美国、俄罗斯、德国、英国、瑞士、芬兰及乌克兰等国家相继在不同应用领域开展了功能梯度材料的研制工作。

功能梯度材料是作为航空航天工业中特殊功能材料而开始进行力学性能研究的，加上其发展时间较短，因此功能梯度材料与结构的力学研究大多集中于热应力及裂纹、优化设计方面[3-8]，其各力学分支还存在大量空白和薄弱环节，即使对于一般常见构件的静、动力分析[9]。另外，功能梯度材料参数与空间坐标相关联，其控制方程是变系数的，数学上很难取得直接解析解，还存在大量富有挑战性的研究课题。目前，对于应用功能梯度材料常见的板壳结构力学分析，主要采用层合模型法[10]、渐进解法[11]、三维分析法[12]及简化模型法[13]等。

目前国际上功能梯度材料及构件各种分析的前提是给定“材料功能梯度分布函数”，实际上功能梯度材料制备过程只是控制“不同材料组分空间分布”，因此还需由组分去测定、识别功能梯度函数，这将带来许多困难和分析误差，也需要大量人力、物力及财力。本文中将直接从制备时给定材料组分分布出发计算构件宏观响应，为解决功能梯度构件宏观、细观跨尺度分析提供一种有力工具——细观元法。其优点是这种细观元法既能充分反映功能梯度材料内部细观构造与组分分布以及三维力学形态分析要求；而上机计算的单元与自由度数又和匀质材料构件有限元一样，是一种针对功能梯度材料与结构细观分析的有效数值方法。另外，在目前研究的功能梯度板壳结构中，大都集中在形状规则的矩形板和圆柱壳上面，对开孔功能梯度板的三维分析尚未见到有关报道[14]。本文中用细观元方法，对具有不同形状与数量孔洞的板件进行研究，得到了由组分确定的开孔功能梯度板件的三维宏观力学响应。

1　细观元法的基本算式

1.1　宏观元的位移模式

对于由功能梯度材料制成的构件，可按常规有限元法剖分成若干单元，称为“宏观元”(图 1)，其具有三维力学特性，即位移分量为

$$u_i = \sum_j^J N_j(x,y,z)\,\delta_{ij} \qquad (i = 1,2,3) \qquad (1)$$

其中：u_i 为三维位移分量 u、v、w；N_j $(j = 1 \sim J)$ 为形函数；J 为宏观元结点数；δ_{ij} 形成宏观元结点自由度列阵 $\{\delta\}$。

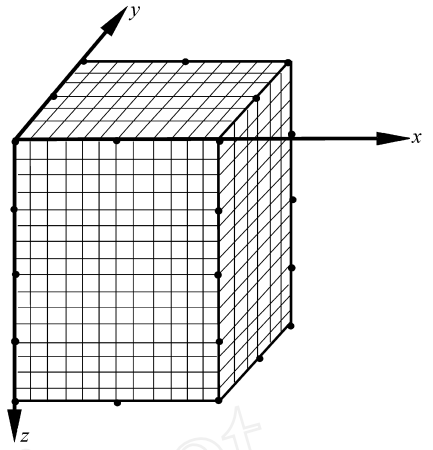


图 1　宏观元与细观元

Fig. 1　Macroelement and microelement

1.2　细观元的力学分析

根据宏观元内材料性能梯度或组分分布情况，进一步可将宏观元细分为密集的“细观元”(图 1)，而每个细观元内持有某种单一材料。不同细观元内材料配置形成不同梯度与不同组分。对每个细观元再进行细观力学三维分析及宏观、细观间的协调、平衡分析。为此，首先写出细观元的位移列阵为

$$\{u^e\} = [u^e, v^e, w^e]^{\mathrm{T}} = [N^e]\{\delta^e\} \qquad (2a)$$

式中：$\{u^e\}$ 为细观元内三维位移分量；$[N^e]$ 为细观元形函数，一般如可采用常规的 20 结点六面体单元形函数；$\{\delta^e\}$ 为细观元结点自由度，有

$$\{\delta^e\} = [\cdots u^e_{il} \cdots]$$
$$(i = 1,2,3;\ l = 1 \sim 20) \qquad (2b)$$

其中，u^e_{il} 为细观元第 l 个结点的 i 向位移。

对细观元进行三维有限元分析，可以列出相应的应变、应力列阵及其刚度阵、质量阵、荷载阵算式，分别为[15]

$$\{\varepsilon\} = [B^e]\{\delta^e\}, \qquad \{\sigma^e\} = [D^e]\{\varepsilon\} \qquad (3)$$

及

$$[K]^e = \iiint_{\Omega_e} [B^e]^{\mathrm{T}}[D^e][B^e]\,\mathrm{d}\Omega$$
$$[M]^e = \iiint_{\Omega_e} [N^e]^{\mathrm{T}}[\rho^e][N^e]\,\mathrm{d}\Omega$$
$$\{F\}^e = \iiint_{\Omega_e} [N^e]^{\mathrm{T}}\{q\}\,\mathrm{d}\Omega \qquad (4)$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.3 细观元运算矩阵的转换

考虑到细观元间及宏观元、细观元间协调与共同作用, 可将细观元第 l 结点在宏观元内空间坐标值代入到宏观元位移模式(1), 写出每个 u^{e}_{il}, 然后按式(2b)形成列阵$\{\delta^{e}\}$, 即可给出用宏观元结点自由度 δ_{ij} 来表达的细观元结点自由度列阵, 即

$$\{\delta^{e}\} = [\cdots u^{e}_{il} \cdots]^{\mathrm{T}} = [\cdots \sum_{j=1}^{J} N_j(x_l, y_l, z_l)\delta_j \cdots]^{\mathrm{T}} = [A]\{\delta\} \tag{5}$$

显然式中$[A]$为宏观元、细观元结点自由度间转换矩阵。

将式(5)代回到式(2a)、式(3), 则细观元的位移阵与应变阵也可分别转换为相对于宏观元自由度, 即

$$\{u^{e}\} = [N^{e}]\{\delta^{e}\} = [N^{e}][A]\{\delta\} = [\overline{N}]\{\delta\} \tag{6a}$$

$$\{\varepsilon\} = [B^{e}]\{\delta^{e}\} = [B^{e}][A]\{\delta\} = [\overline{B}]\{\delta\} \tag{6b}$$

则细观元相应于宏观元自由度$\{\delta\}$的刚度阵可推得为

$$[K]^{e} = \iiint_{\Omega^{e}} [\overline{B}]^{\mathrm{T}}[D^{e}][\overline{B}]\mathrm{d}\Omega = \iiint_{\Omega^{e}} [A]^{\mathrm{T}}[B^{e}]^{\mathrm{T}}[D^{e}][B^{e}][A]\mathrm{d}\Omega = [A]^{\mathrm{T}}[K]^{*}[A] \tag{7a}$$

同理可推得质量阵及载荷阵分别为

$$[M]^{e} = [A]^{\mathrm{T}}[M]^{*}[A] \tag{7b}$$

$$\{F\}^{e} = [A]^{\mathrm{T}}\{F\}^{*} \tag{7c}$$

式(7a)～式(7c)是细观元相对于细观元自由度$\{\delta^{e}\}$的运算矩阵$[K]^{*}$、$[M]^{*}$、$\{F\}^{*}$转换为相对宏观元自由度$\{\delta\}$的运算矩阵$[K]^{e}$、$[M]^{e}$、$[F]^{e}$ 的转换公式。

应该指出, 其中所有运算只是简单的矩阵相乘, 不涉及求解代数方程组, 即实现从细观元自由度到宏观元自由度的转换。

1.4 宏观元的运算矩阵及构件算式

一个宏观元内含有大量细观元, 每个细观元均可按式(7)确定自身的运算矩阵$[K]^{e}$、$[M]^{e}$、$\{F\}^{e}$, 而所有这些细观元的运算矩阵均是相对于同一宏观元自由度$\{\delta\}$的, 因此, 整个宏观单元运算矩阵为其所含全部细观元的(经式(7)转换后)运算矩阵简单叠加, 即

$$[K] = \sum [K]^{e},\ [M] = \sum [M]^{e},\ \{F\} = \sum \{F\}^{e} \tag{8}$$

而将这些运算矩阵按宏观元在构件中位置进行集合(完全类同一般有限元), 即可建立下列构件算式上机计算:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F\} \tag{9}$$

由式(9)解出$\{\delta\}$后, 则可通过式(5)求取细观元自由度, 再按式(3)给出每个细观元内力学量, 即细观力学分析结果。

将式(9)、式(8)、式(7)、式(5)、式(4)综合起来, 即可看出构件算式(9)直接反映了每个细观元的几何、材料参数(式(4))及相对位置(式(5)), 因此式(9)的解, 即构件宏观响应, 可与材料细观构造(也包括材料组分分布)直接关联。

另外应该指出, 不管宏观元内细分多少个细观元, 都不增加上机计算基本算式(9)的计算自由度与工作量。因此细观元是既能充分反映材料性能梯度变化和材料内部细观构造与组分分布, 又无需增加上机计算单元和自由度的功能梯度材料构件三维分析的有效、实用数值方法。

2 具有不同孔洞的功能梯度板件的三维分析

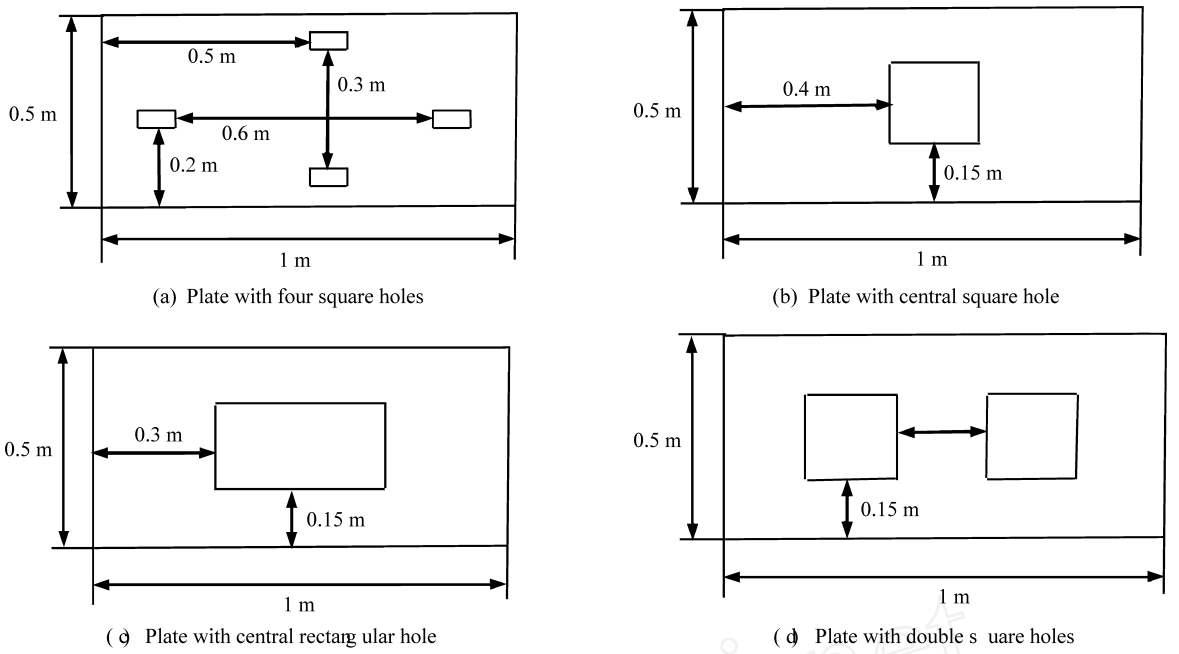
2.1 用细观元法实现板件材料组分空间分布及孔洞的存在

功能梯度材料制备过程只是控制"不同材料组分空间分布", 因此还需由组分去测定、识别功能梯度函数, 带来许多困难与误差。本文中采用上述细观元法可实现从制备时给定材料组分出发直接计算构件宏观响应, 每个细观元计算时取用由组分确定的某种材料, 具有不同材料的细观元集合实现要求的组分分布。因此, 对于具有不同组分分布的功能梯度材料构件均可用细观元法来实现其三维分析。对于含有不同形状及数量孔洞的功能梯度板件, 可在划分宏观元时不计孔洞的部分, 由不包括孔洞的宏观元集合实现孔洞的存在。因此, 细观元法可实现含孔洞的功能梯度板的三维分析。

2.2 算例与分析

四边简支开孔的功能梯度板件包括: (1) 四方孔(长 0.1 m, 宽 0.05 m)板(图 2(a)); (2) 中心方孔(长 0.2 m, 宽 0.2 m)板(图 2(b)); (3) 中心矩形孔(长 0.4 m, 宽 0.2 m)板(图 2(c)); (4) 双方孔(长 0.2 m, 宽 0.2 m)板(图 2(d))。其材料参数如下:

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) Plate with four square holes　(b) Plate with central square hole

(c) Plate with central rectangular hole　(d) Plate with double square holes

图 2　不同类型开孔功能梯度板

Fig. 2　FGM plates with different holes

a = 1 m, b = 0.5 m, h = 0.1 m。不同材料组分(该种材料所占百分比)分布为: $\eta_B(z) = 0.2(z/h)$, $\eta_A(z) = 1 - \eta_B$, 在 $z = 0$ 均布 q = 1000 N/m^2。而金属材料(A)的弹性模量 E_A = 150 GPa, 泊松比 μ_A = 0.3; 陶瓷材料(B)的弹性模量 E_B = 350 GPa, 泊松比 μ_B = 0.33。

2.2.1　四方孔功能梯度矩形板力学响应沿厚度分布规律

用细观元法计算开四方孔功能梯度矩形板(图 2(a))的宏观力学响应, 并分别给出不同点 u、w、σ_x、σ_{xy}、σ_{xz}、σ_z 无量纲值沿厚度方向分布曲线列于图 3。

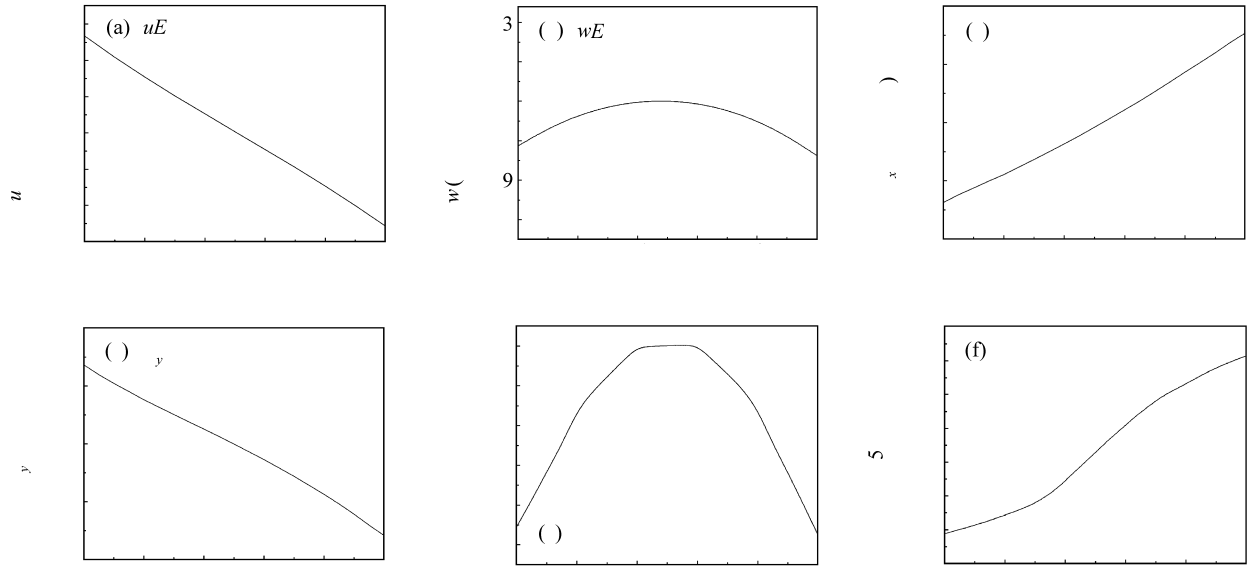


图 3　无量纲力学量沿板厚方向分布曲线

Fig. 3　Distribution curves of dimensionless mechanical quantities along the thickness direction

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图 3 可以看出，用细观元法计算开孔功能梯度矩形板给出的宏观力学响应自动体现了平板理论规律(因本法沿板厚方向未作任何约束或假定)：w 基本均布；u、σ_x、σ_{xy} 以中面反对称；σ_{xz} 在两表面为零，在板中面最大；σ_z 在加载面为外载，另侧面为零。这些结果从一个侧面说明用细观元法来分析开孔功能梯度板的问题是正确、可行的。

2.2.2 不同开孔功能梯度板力学响应值

不同开孔板件如图 2(a)～图 2(d)所示。用细观元法计算此 4 种不同孔洞形状与数量的功能梯度板件，所给出 u、w、σ_x、σ_{xy}、σ_{xz}、σ_z 无量纲值列于表 1 中。

由表 1 可知，含不同孔洞的功能梯度板件其宏观力学响应差别很明显。但其宏观力学响应与薄板理论相比，由于材料组分沿厚度梯度分布，不同开孔的功能梯度板的宏观响应对薄板理论规律均有所偏离，反映了功能梯度板的三维特性[16]。另外可以看出，开孔对板件孔边点上的挠度分布影响很大，如表 1所示。因取的点在中心方孔和中心矩形孔的开孔处位置，故其挠度 w 从板上表面至其下表面逐渐减小而不是原来所呈的抛物线状(图 3(b))。

2.2.3 孔洞附近应力响应沿厚度分布规律

用细观元法计算四方孔功能梯度矩形板(图 2(a))的宏观力学响应，孔洞附近应力 σ_x、σ_{xy}、σ_{xz}、σ_z 无量纲值沿厚度方向分布曲线分别列于图 4。

以上各图与图 3(c)至图 3(f)相比较可以看出，孔洞附近的应力分布规律均有所变化，表明了孔洞存在对应力三维分布的影响。

表 1 力学量无量纲值沿厚度方向分布

Table 1 Distribution values of dimensionless mechanical quantities along the thickness direction

Dimensionless mechanical quantity	FGM plate with different holes	$z/h=0$	$z/h=0.5$	$z/h=1$
$u\left(0,\frac{b}{2}\right)E_A/qa$	Plate with four square holes (Fig. 2(a))	1.3339	0.0174	-1.2837
	Plate with central square hole (Fig. 2(b))	1.2735	0.0253	-1.2078
	Plate with central rectangular hole (Fig. 2(c))	1.4279	0.0260	-1.3588
	Plate with double square holes (Fig. 2(d))	1.3825	0.0351	-1.2937
$w\left(\frac{a}{2},\frac{3b}{10}\right)E_A/qa$	Plate with four square holes (Fig. 2(a))	5.9174	6.0133	5.8920
	Plate with central square hole (Fig. 2(b))	7.2147	7.1811	7.1674
	Plate with central rectangular hole (Fig. 2(c))	8.7657	8.7491	8.7176
	Plate with double square holes (Fig. 2(d))	6.4834	6.5731	6.4578
$\sigma_x\left(\frac{a}{2},\frac{3b}{10}\right)/q$	Plate with four square holes (Fig. 2(a))	-6.8938	-0.4224	7.7496
	Plate with central square hole (Fig. 2(b))	-3.0574	-0.1723	3.1809
	Plate with central rectangular hole (Fig. 2(c))	-3.6741	-0.2114	4.0979
	Plate with double square holes (Fig. 2(d))	-3.2804	-0.2303	3.6139
$\sigma_{xy}(0,0)/q$	Plate with four square holes (Fig. 2(a))	6.8205	-0.0228	-7.9263
	Plate with central square hole (Fig. 2(b))	6.7437	-0.0294	-7.8636
	Plate with central rectangular hole (Fig. 2(c))	7.4508	-0.0151	-8.7115
	Plate with double square holes (Fig. 2(d))	7.2043	-0.0283	-8.4280
$\sigma_{xz}\left(0,\frac{b}{2}\right)/q$	Plate with four square holes (Fig. 2(a))	0.2254	2.5054	0.1227
	Plate with central square hole (Fig. 2(b))	0.2490	2.7262	0.2216
	Plate with central rectangular hole (Fig. 2(c))	0.2178	2.7160	0.1862
	Plate with double square holes (Fig. 2(d))	0.1416	2.4325	0.1522
$\sigma_z\left(\frac{a}{2},\frac{3b}{10}\right)/q$	Plate with four square holes (Fig. 2(a))	-1.2364	-0.5342	0.1482
	Plate with central square hole (Fig. 2(b))	-1.2273	-0.5259	0.2231
	Plate with central rectangular hole (Fig. 2(c))	-1.2386	-0.6070	0.1187
	Plate with double square holes (Fig. 2(d))	-0.9693	-0.5051	0.0139

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

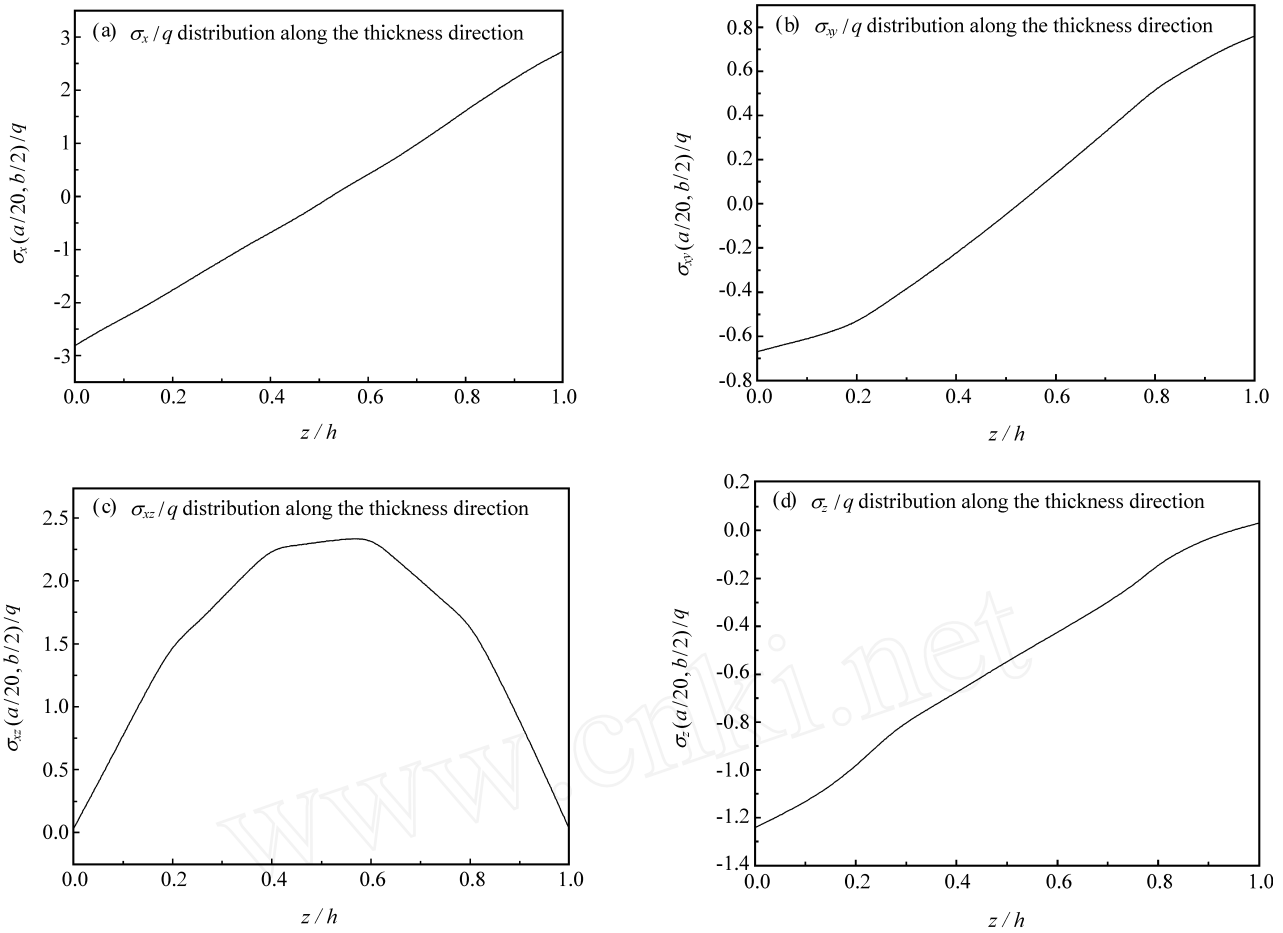


图 4　无量纲应力沿板厚方向分布曲线

Fig. 4　Distribution curves of dimensionless stresses along the thickness direction

3　结　论

本文中针对功能梯度材料构件力学分析的特点发展了一种细观元模型与方法。该方法具有下列优点与特点：(1) 给出力学量是三维的，但其计算单元与自由度仍是原来一维、二维的，具有较高精度和较低计算工作量的优点。(2) 其宏观响应充分反映材料特性的细观分布与结构，便于建立材料的宏观、细观跨尺度分析。(3) 可实现按制备时材料组分信息直接计算宏观响应。(4) 细观元法适应于任意开孔的功能梯度板件三维分析。(5) 其宏观响应自动体现了平板理论规律，但与薄板理论规律又有所偏离，说明了细观元法的可靠性及三维分析的可行性。(6) 为进一步研究材料细观构造(特别是中等组分的网状细观结构)对宏观响应的影响提供一种可行手段与工具。(7) 细观元法保留了一般有限元法对求解问题(形状、边界、载荷、静动态、线性与非线性等)普遍适应性与程序统一性的特点。

参考文献：

[1] Koizumi M. The concept of FGM [J]. Ceramic Trans, Functionally Gradient Materials, 1993, 34(1): 3 - 10.

[2] Hirai T, Chen L. Recent and prospective development of functionally graded materials in Japan [J]. Mater Sci Forum, 1999, 308/311: 509 - 514.

[3] Obata Y, Noda N, Tsuji T. Steady thermal stresses in a FGM plate [J]. Trans of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, 1992, 58(553): 1689 - 1695.

[4] Obata Y, Noda N. Steady thermal stresses in a hollow circular cylinder and a hollow sphere of a FGM [J]. J of Thermal Stresses, 1994, 17(3): 471 - 487.

[5] Cheng Z Q, Batra R C. 3-D thermoelastic deformations of a FGM elliptic plate [J]. Composites Part B, 2000, 31(2): 97 - 106.

[6] Praveen G N, Reddy J N. Nonlinear transient thermoelastic analysis of FGM ceramic-metal plates [J]. Inter J of Solids and Structures, 1998, 35(33): 4457 - 4476.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[7] Tanigawa Y, Matsumoto M, Akat T. Optimization problem of material composition for nonhomogeneous plate to minimize thermal stress [J]. Trans of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, 1996, 62(593): 115 - 122.

[8] Erdogan F. Fracture mechanics [J]. Inter J of Solids and Structures, 2000, 37(1/2): 171 - 183.

[9] Tanigawa Y. Some basic thermoelastic problems for nonhomogeneous structural materials [J]. ASME, App Mech Rev, 1995, 48(6): 287 - 300.

[10] Chen W Q, Ding H T. Bending of functionally graded piezoelectric rectangular plates [J]. Acta Mech Solida Sinica, 2000, 13(4): 312 - 319.

[11] Cheng Z Q, Lim C W, Kitipornchai S. 3-D asymptotic approach to inhomogeneous and laminated piezoelectric plates [J]. Inter J of Solids and Structures, 2000, 37(23): 3153 - 3175.

[12] Lim C W, He L H. Exact solution of a compositionally graded piezoelectric layer under uniform stretch, bending and twisting [J]. Inter J of Mechanical Sciences, 2001, 43(11): 2479 - 2492.

[13] Yang J, Shen H S. Dynamic response of initially stressed functionally graded rectangular thin plates [J]. Composite Structure, 2001, 54(4): 497 - 508.

[14] 沈惠申. 功能梯度复合材料板壳结构的弯曲、屈曲和振动 [J]. 力学进展, 2004, 34(1): 53 - 60.
Shen Huishen. Bending, buckling and vibration of functionally graded composite material plates and shells [J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(1): 53 - 60.

[15] 王勖成. 有限单元法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 40 - 140.
Wang X C. Finite Elements Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 40 - 140.

[16] Zhong Z, Sheng E T. 3-D exact analysis of a simply supported functionally gradient piezoelectric plate [J]. Inter J of Solids and Structures, 2003, 40(20): 5335 - 5352.

2004 年度材料科学类期刊影响因子排序表

序号	刊名	影响因子	序号	刊名	影响因子
1	新型炭材料	1.265	20	稀土	0.331
2	中国稀土学报	1.070	21	材料导报	0.327
3	稀有金属材料与工程	0.833	22	中国腐蚀与防护学报	0.319
4	**复合材料学报**	**0.818**	23	航空材料学报	0.308
5	无机材料学报	0.618	24	玻璃钢/复合材料	0.303
6	JOURNAL OF RARE EARTHS	0.576	25	宇航材料工艺	0.299
7	稀有金属	0.536	25	材料保护	0.299
8	材料科学与工程学报	0.522	27	腐蚀科学与防护技术	0.294
9	材料研究学报	0.521	28	机械工程材料	0.286
10	功能材料	0.504	29	合成材料老化与应用	0.283
11	贵金属	0.500	30	功能材料与器件学报	0.264
12	材料热处理学报	0.480	31	建筑材料学报	0.258
13	高分子材料科学与工程	0.473	32	兵器材料科学与工程	0.257
14	钛工业进展	0.468	33	磁性材料及器件	0.213
15	材料科学与工艺	0.454	34	JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY	0.209
16	材料工程	0.453	35	耐火材料	0.204
17	绝缘材料	0.383	37	腐蚀与防护	0.174
18	JOURNAL OF WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY MATERIALS SCIENCE EDITION	0.363	37	材料开发与应用	0.169
19	金属功能材料	0.345	38	信息记录材料	0.103

摘自《2005 年版中国科技期刊引证报告》——中国科学技术信息研究所

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net