

文章编号: 1000-8055(2008)08-1455-06

三维五向编织复合材料导热性能的有限元分析

李典森¹, 卢子兴¹, 刘振国¹, 李仲平²

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 航天材料工艺研究所, 北京 100076)

摘 要: 根据三维五向编织复合材料的细观结构模型, 分别假设编织纱线和轴纱具有六边形和正方形横截面, 建立了计算三维五向编织复合材料导热性能的有限元模型. 采用有限元方法, 设定合理的边界条件, 计算了三维五向编织复合材料的横向和纵向热传导系数, 并与三维四向编织复合材料的热传导系数进行了比较, 分析了编织角和纤维体积含量对热传导系数的影响规律. 此外, 还确定了材料内部的温度、热梯度及热流量的分布, 为材料热力耦合问题的分析奠定了基础.

关 键 词: 三维五向编织; 编织复合材料; 导热性能; 有限元; 单胞

中图分类号: TB332

文献标识码: A

Finite element analysis of thermal conductivity of three dimensional and five directional braided composites

LI Dian-sen¹, LU Zi-xing¹, LIU Zhen-guo¹, LI Zhong-ping²

(1. School of Aeronautics Science and Technology,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Institute of Space Material Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The finite element model for thermal conductivity was established based on the micro-structure of 3-D & 5-D braided composites and the assumption of the braiding yarn with the hexagon section and the axial yarn with the square section. The transverse and longitudinal thermal conductivity coefficients of 3-D & 5-D braided composites were calculated by the finite element method and compared with the corresponding results of 3-D & 4-D braided composites. The influences of the braiding angle and fiber volume fraction on the thermal conductivity coefficient were also analyzed. In addition, the distributions of the temperature, the thermal gradient and thermal flux of composites were determined, providing a basis for the analysis of the coupling problem of thermo-mechanics.

Key words: 3-D and 5-D braiding; composite; thermal conductivity; FEM; unit cell

三维编织复合材料是近年来发展的高新复合材料, 在航空、航天等领域得到广泛应用. 导热性能是三维编织复合材料重要的物理性能之一, 然而, 有关五向(5D)编织复合材料导热性能研究还

未见相关文献报道, 以往的工作多集中在单向复合材料^[1-3]和机织复合材料方面^[4-5]. 对编织复合材料, 程伟等^[6]在“米”字型枝状胞体模型的基础上, 数值计算得到了四向(4D)编织复合材料的导

收稿日期: 2007-07-24; 修订日期: 2007-12-26

基金项目: 航空科学基金(04B51045); 北京市教育委员会共建项目建设计划(XK100060522); 北航博士创新基金.

作者简介: 李典森(1978-), 男, 福建建阳人, 博士生, 主要从事复合材料工艺及力学性能方面的研究.

热性能,但预报结果与实验值相比不够准确.刘振国等^[7]最近基于更真实的胞体结构模型,对 4D 编织复合材料的导热性能进行了研究,给出的理论预测与实验值吻合得较好.本文采用 ANSYS 软件,建立了计算 5D 编织复合材料导热性能的有限元计算模型,该模型与预制件表面平行,有利于力学性能的分析.基于该模型计算得到了 5D 编织复合材料的横向和纵向热传导系数随编织角及纤维体积含量的变化规律.同时,采用文献[8]建立的 4D 编织复合材料的有限元模型,计算得到 4D 编织复合材料的热传导系数,将 5D 材料与 4D 材料热传导系数的计算结果进行了比较,并将本文计算结果与文献[6-7]中热传导系数的实验值和计算值进行了对比,说明了本文计算结果的有效性.

1 有限元模型

由文献[9]可知,5D 编织复合材料的细观结构由内部单胞、表面单胞和棱角单胞组成,当主体纱阵列数 m 和 n 较大时,表面和棱角区域所占比例较小.因此,5D 编织复合材料的有限元模型,可以仅考虑由内部单胞组成,内部纱线的走向如图 1 所示.

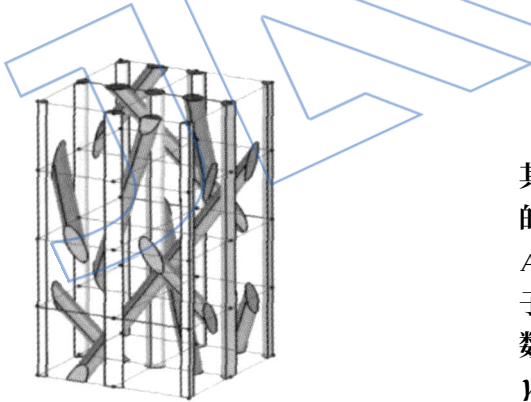


图 1 细观几何模型

Fig. 1 Micro-geometry model

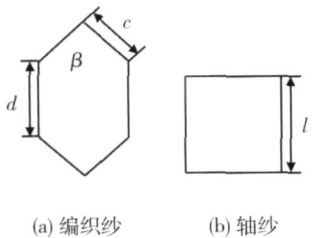


图 2 编织纱和轴纱的截面图

Fig. 2 Section of braiding yarn and axial yarn

为建立单胞的有限元模型,根据文献[10-11]

中纱线的扫描电镜图,提出如下基本假设:①编织纱线经挤压变形后截面为六边形,参数为 c, d, β ,如图 2a 所示;②轴纱经挤压变形后截面为正方形,边长为 l ,如图 2b 所示;③所有相邻纱线保持紧密接触;④胞体的外形尺寸为 $2A \times 2A \times h$;⑤纱线与基体理想粘结,它们之间的接触热阻忽略不计.

根据图 1 中编织纱线之间、编织纱线与轴纱之间的空间接触关系以及胞体的外形尺寸与编织工艺参数之间的关系,可以得到如下关系式:

$$\tan \gamma = \sqrt{2} \tan \alpha \tag{1}$$

$$l = \sqrt{N_1 \pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 / \varepsilon} \tag{2}$$

$$c^2 \sin \beta + 2dc \sin \frac{\beta}{2} = N\pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 / \varepsilon \tag{3}$$

$$\varepsilon = V_f / V \tag{4}$$

$$V = \frac{A_f}{A_c} = 3/4 + l^2 / A^2 - \sqrt{2}l / (2A) \tag{5}$$

$$\beta = 2\arcsin \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \cos^2 \gamma}} \right) \tag{6}$$

$$h = \frac{2\sqrt{2}A}{\tan \gamma} \tag{7}$$

$$e = (\sqrt{2}A - 2l) / \left(4\sin \frac{\beta}{2} \right) \tag{8}$$

$$d = \frac{A}{\sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\tan^2 \gamma + 1}} - \frac{(\sqrt{2}A - 2l)}{2\tan \frac{\beta}{2}} \tag{9}$$

其中 V_f 为纤维体积含量, V 为纱线在复合材料中的体积含量, A_f 为沿编织方向纱线的横截面积, A_c 为编织复合材料的横截面积, ε 为纱线填充因子, N 为编织纤维单丝数, N_1 为轴向纤维单丝数, ϕ 为纤维单丝直径 ($\phi = 7.6 \mu\text{m}$), α 为编织角, γ 为内部编织角, $2A$ 为胞体截面宽度, h 为花节高度. 因此,当给定不同的 α 、不同的 V_f ,可以确定出不同的单胞外形尺寸,编织纱线以及轴纱的截面尺寸. 根据确定的尺寸,以及纱线在空间上的几何接触关系,可进一步求出模型的关键点坐标,采用 ANSYS 的 APDL 程序设计语言,按点-线-面-体的顺序建立 5D 编织复合材料的有限元模型. 建立的有限元模型如图 3 所示 ($\alpha = 30^\circ, V_f = 50\%$),该模型一共具有 140 个关键点,284 条线,150 个面,23 个体,且胞体内纱线与纱线之间为面相切关系.

2 设置材料属性与网格划分

三维编织复合材料的纱线可看成由许多纤维

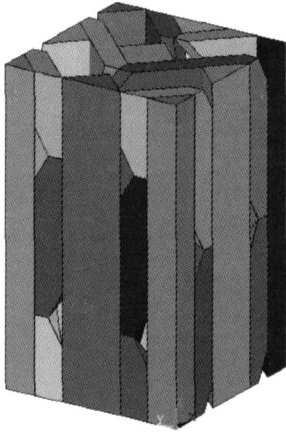


图 3 有限元单胞模型

Fig. 3 Unit cell model of FEA

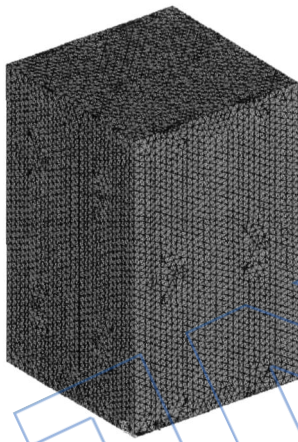


图 4 单胞的网格划分

Fig. 4 Meshing of unit cell

与树脂合成的单向纤维复合材料柱,纱线的纵向导热性能用混合律公式确定,即

$$K_L = K_{f11} V_f + K_m V_m \quad (10)$$

而对纱线横向导热性能的计算,没有统一的公式可供选用.经研究发现,Hashin 的上限估计公式,能较好地用于纱线横向热传导系数的计算^[7].这里,同样采用此公式,即

$$K_T^+ = K_m + \frac{V_f}{1 / (K_{f22} - K_m) + V_m / 2 K_m} \quad (11)$$

上述公式中 K_{f11} 、 K_{f22} 分别为纤维的纵向和横向导热系数; K_m 为基体的导热系数; V_f 和 V_m 是纱线中纤维和基体的体积比;上标 + 表示上限值.

K_{f11} 、 K_{f22} 和 K_m 的取值分别为^[6] $K_{f11} = 8.0$, $K_{f22} = 1.0$, $K_m = 0.18$, 单位 $W/m \cdot K$. 由于沿空间不同取向的纱线,具有不同的材料主向,因此,需沿每一种取向的纱线建立独立的局部坐标系,并分别设置材料属性.

网格划分时,对编织纱线和轴纱采用热实体

单元 SOLID70,对基体采用 SHELL63 单元进行.为保证划分出的网格在空间上满足周期性要求,先是划分单胞外形尺寸棱边上的线网格,控制线网格的大小均匀一致,并保证相对棱边上所划分的线网格相对应.再划分胞体的面网格,调节控制面网格的大小,并保证相对平面上的面网格、节点一一对应.然后,采用 Smart 方式,利用四面体单元对单胞所有的体进行体网格划分.最后,再将六个面网格删掉,得到最终的具有周期性分布的实体网格.

图 4 给出了 5D 编织复合材料有限元模型的网格划分结果.图中胞体的编织角为 30° ,纤维体积含量为 50%,共划分出 14 649 个节点,78 653 个单元.

3 边界条件及导热系数的确定

热传导问题的边界条件通常有 3 种,具体详见文献^[12].对于稳态热分析而言,通常都不考虑时间的影响,倘若再不考虑各物理量随空间的变化,则物体表面的温度 T_w 为常值;另外,如果物体边界上的热流密度 q_w 保持均匀一致,且不随时间和空间位置而改变,则热流密度 q_w 也为常值;基于以上 2 种最简单的边界条件,可进行稳态热分析.具体而言,如对胞体在 x 方向上进行稳态热分析,则在该方向施加温度边界条件,即在 x 方向上对胞体 $x = 0$ 与 $x = 2A$ 的两个面施加不同的温度,得到胞体的温度场分布,再根据周期性对称边界条件,在 y, z 方向上胞体的所有面 $y = 0$ 与 $y = 2A$, $z = 0$ 与 $z = h$ 施加绝热边界条件,即

$$K_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z = 0 \quad (12)$$

式中 K_i 为物体的导热系数, $\frac{\partial T}{\partial x_i}$ 为物体的温度梯度, l_i 为施加绝热边界条件面的方向余弦 ($i = x, y, z$).

同理,对胞体在 y, z 方向上的稳态热分析,边界条件可作类似处理.

根据确定的边界条件,利用各向异性固体的导热定律,即

$$q_i = - \sum K_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad i = x, y, z \quad (13)$$

可求得导热系数 K_i . 式中 q_i 表示 i 方向的平均热流密度. 计算材料的横向 (y 向) 热传导系数时,在 y 方向施加温度边界条件,产生温差 ΔT ,可计算出面 $y = 2A$ 相对于面 $y = 0$ 的温度梯度 t ,即

$$t = \frac{\Delta T}{2A} \tag{14}$$

同时,可计算得到单胞在 $y = 2A$ 面上所有节点在 y 方向的平均热流密度 q_y ,即

$$q_y = \frac{S_{yj} \times \sum_{j=f,m} q_{yj}}{\sum_{j=f,m} S_{yj}} \tag{15}$$

上式中, $j = f, m, f$ 代表纤维, m 代表基体, S_{yj} 为纤维或基体热流输出面在 y 方向所占的面积,则横向热传导系数为

$$K_y = \frac{\sum q_y}{t} \tag{16}$$

同理,可以计算得到纵向(z 向)热传导系数.

4 计算结果与分析

4.1 热传导系数随编织工艺参数的变化

5D 编织复合材料的热传导系数随编织角和纤维体积分含量的变化曲线如图 5 和图 6 所示,同时给出了与 4D 编织复合材料相应结果的比较.计算中,4D 材料的编织纱、5D 材料的编织纱及轴纱均采用 9k 碳纤维.

由图 5 可见,在纤维体积分含量 V_f 一定时,5D 材料和 4D 材料的横向热传导系数 K_y 都随编织角 α 的增加而不断增大,4D 材料的 K_y 基本呈线性增加,5D 材料的 K_y 随 α 的变化趋势较 4D 材料更缓慢一些,且在 α 较大时更加明显.另外,两种材料的 K_y 在数值上都较小,而 5D 材料的 K_y 要比 4D 材料来得更小.这主要是因为 α 增大时,将导致胞体横向上的纤维比例增大,而纤维的热传导系数大于基体,所以使得整个复合材料的横向热传导系数得以提高.而 5D 材料由于加入了轴纱,大大提高了纵向上纤维的含量,造成横向上的纤维比例比 4D 材料要小,从而导致热传导系数比 4D 材料要小.当 α 较小时,5D 和 4D 材料的纤维大都集中在纵向上,在横向上的纤维比例都较小,从而使得两种材料的热传导系数比较接近.而随 α 的增大,相对 5D 材料,4D 材料在横向上的纤维比例要逐渐增大,使得两种材料横向热传导系数的差距也逐渐增大.在 α 一定时,5D 材料和 4D 材料的 K_y 都随 V_f 的增加而增大,并且在 α 较大情况下随 V_f 的变化更加敏感一些.这是因为 V_f 增加,使两种材料在横向上的纤维比例都增大,而在 α 较大时,纤维比例也将进一步增大.

由图 6 可见,5D 材料和 4D 材料的纵向热传导系数 K_z 在数值上要比横向热传导系数显著增

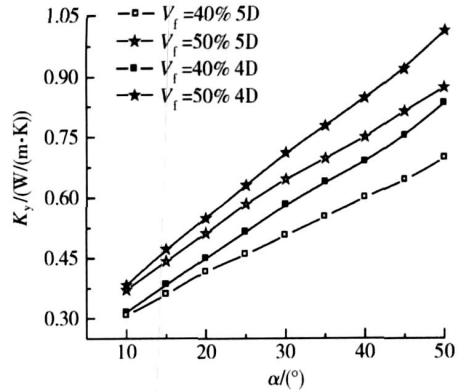


图 5 横向热传导系数随编织参数的变化趋势
Fig. 5 Transverse thermal conductivity variation with the braiding parameters

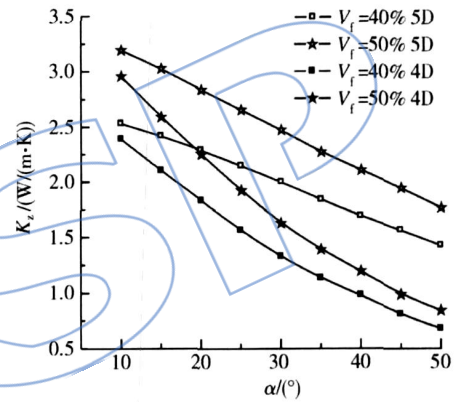


图 6 纵向热传导系数随编织参数的变化趋势
Fig. 6 Longitudinal thermal conductivity variation with the braiding parameters

加,这是由于在纵向上的纤维比例要明显大于横向的缘故,这也说明三维编织复合材料的导热呈现各向异性,且在 α 较小时,各向异性现象更加明显.在 V_f 一定时,与横向热传导系数正好相反,两种材料的纵向热传导系数 K_z 都随 α 的增大而明显地减小,其中 4D 材料的 K_z 减小的趋势比 5D 材料更加迅速,在 α 小于 30° 左右, K_z 急剧下降,而 α 大于 30° 左右时,下降的速度又有所回升.5D 材料的 K_z 基本保持线性减小趋势,在数值上要明显大于 4D 材料,且在 α 较大时,二者差异更加显著.当 α 较小时,由于轴纱的加入,使得 5D 材料在纵向上的纤维比例较 4D 材料增大,故而 5D 材料的 K_z 大于 4D 材料的 K_z ,随着 α 的增大,4D 材料在纵向上的纤维比例较 5D 材料将大大减少,导致热传导系数的急剧下降,而 5D 材料由于轴纱仍占据较大比例,使得热传导系数仍然较高.在 α 一定时,5D 材料和 4D 材料的 K_z 都随 V_f 的增加而增大,并且在 α 较小时随 V_f 的变化更加敏

感;另外,在 α 大于 20 时, V_f 对 5D 材料的影响明显大于 4D 材料. 综上可见,轴纱对纵向导热性能具有明显的增强作用,提高了 5D 材料的纵向热传导系数.

4.2 计算结果与实验值的比较

本文将 4D 编织复合材料有限元模型的计算结果与文献[6-7]的结果进行了对比,如表 1 所示. 可见,热传导系数的预测值与实验值吻合较好,且比文献[6-7]的预测结果更加接近实验值. 由于目前缺乏 5D 编织复合材料热传导系数的实验数据,故对其预测精度还有待进一步验证,但从上面图 5、图 6 的讨论及表 1 中的数据可以看出,本文对 5D 编织复合材料热传导系数的预测还是合理的.

4.3 温度、热梯度及热流量分布

了解材料内温度、热梯度及热流量的分布情况是分析热力耦合问题的前提. 图 7 至图 9 分别

给出了 5D 材料纵向导热时胞体内温度、热梯度及热流量的分布情况. 由图 7 可见,由于复合材料的各向异性,温度分布也表现出明显的不均匀性,从胞体的不同截面观察,同样表明,单元的温度分布也存在不均匀性. 对 5D 材料和 4D 材料进行对比观察表明,5D 材料温度分布的不均匀性要明显小于 4D 材料(图略). 由图 8 可见,5D 材料的热梯度分布也表现出不均匀性,通过对比发现,5D 材料热梯度分布的不均匀性也比 4D 材料来得小. 由图 9 可见,热流量分布的不均匀性也很明显,通过纱线的热流量较大,而通过基体的热流量较小,可见,基体是热的不良导体. 对胞体的不同截面进一步观察表明,不同纱线之间的热流量也存在较大差异,其中,通过轴纱的热流量最大. 三维编织复合材料横向导热时胞体内部各物理量的分布情况与纵向导热时有类似的结果,只是分布的方向发生了改变.

表 1 计算结果与文献[6-7]的结果对比
Table 1 Comparison of numerical results with the results of references[6-7]

编号	种类	编织纱	内部编织角	纤维体积含量	实验值 ^[6]	计算值 $K_y/(W/(m \cdot K))$		
			$\theta/(^\circ)$	$V_f/\%$	$K_y/(W/(m \cdot K))$	本文	文献[7]	文献[6]
1	4D	6k	41	0.54	0.694	0.791	0.810	0.916 25
2	4D	6k	41	0.56	0.730	0.821	0.839	0.963 18
3	4D	9k	42	0.58	0.780	0.859	0.875	0.969 72
4	4D	9k	42	0.57	0.700	0.846	0.852	0.969 69
5	4D	9k	48	0.45	0.770	0.740	0.779	0.907 70
6	4D	12k	42	0.54	0.750	0.797	0.807	0.941 67
7	4D	12k	42	0.53	0.750	0.787	0.794	0.875 34

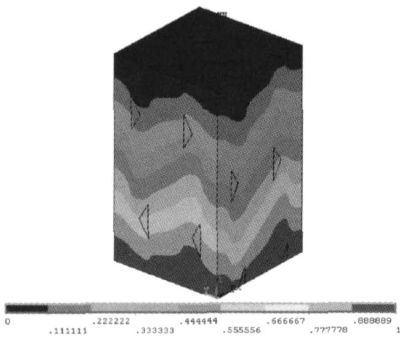


图 7 5D 编织复合材料的 z 向温度分布
Fig. 7 Temperature distribution in z direction for 5D braided composites

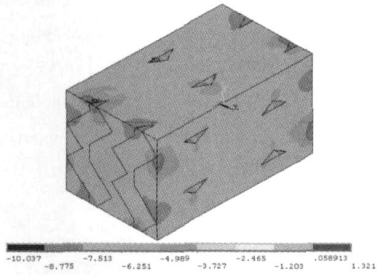


图 8 5D 编织复合材料的热梯度分布
Fig. 8 Thermal gradient distribution for 5D braided composites

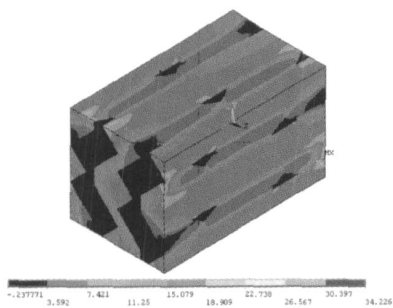


图9 5D 编织复合材料的热流量分布

Fig.9 Heat flux distribution for 5D braided composites

5 结 论

本文建立了 5D 编织复合材料的有限元模型,结合 4D 编织复合材料的有限元模型计算得到了 5D 和 4D 编织复合材料横向和纵向热传导系数.结果表明,两种材料的横向热传导系数随编织角的增大而增大,纵向热传导系数随编织角的增大而减小;在数值上,5D 材料的横向热传导系数比 4D 材料要小,而其纵向热传导系数比 4D 材料又显著增加.另外,与 4D 材料相同,5D 材料的横向和纵向热传导系数均随纤维体积分量的增加而增大.计算结果还表明,三维编织复合材料的导热性能呈现各向异性,材料内温度、热梯度及热流量的分布表现出明显的不均匀性.

参考文献:

- [1] Springer G S, Tsai S W. Thermal conductivities of unidirectional materials[J]. J Compos Mater, 1967,1:166-73.
- [2] Islam M D R, Pramila A. Thermal conductivity of fiber reinforced composites by the FEM[J]. J Compos Mater, 1999,33(18):1699-715.
- [3] Zou Mingqing, Yu Boming, Zhang Duanming, et al. Study on optimization of transverse thermal conductivities of unidirectional composites [J]. Journal of Heat Transfer, 2003,125:980-987.
- [4] Goo N S, Woo K. Measurement and prediction of effective thermal conductivities of woven fabric composites[J]. Int J Mod Phys B, 2003,17(8/9):1808-1813.
- [5] Kyeongsik Woo, Nam Seo Goo. Thermal conductivity of carbon-phenolic 8-harness satin weave composites [J]. Composite Structures, 2004, 66:521-526.
- [6] 程伟,赵寿根,刘振国,等. 三维四向编织复合材料等效热特性数值分析和试验研究[J]. 航空学报, 2002, 23(2): 102-105.
CHENG Wei, ZHAO Shougen, LIU Zhenguo, et al. Thermal property of 3-D braided fiber composites experimental and numerical results[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica 2002, 23(2): 102-105. (in Chinese)
- [7] LIU Zhenguo, ZHANG Haiguo, LU Zixing. Investigation on the thermal conductivity of 3-dimensional and 4-directional braided composites[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(4): 327-331.
- [8] 李典森,卢子兴,蔺晓明,等. 三维四向编织复合材料弹性性能的有限元预报[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(7): 828-832.
LI Diansen, LU Zixing, LIN Xiaoming, et al. Finite element prediction of elastic properties of three dimensional and four directional braided composites[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(17): 828-832. (in Chinese)
- [9] 李典森,陈利,李嘉禄. 三维五向编织复合材料的细观结构分析[J]. 天津工业大学学报, 2003, 22(6): 7-11.
LI Diansen, CHEN Li, LI Jialu. Microstructure analysis of 3-dimensional 5-directional braided composites [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2003, 22(6): 7-11. (in Chinese)
- [10] Chen L, Tao X M, Choy C L. On the microstructure of three-dimensional braided perform[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(3): 391-404.
- [11] 李嘉禄,刘谦. 三维编织复合材料中纤维束横截面形状的研究[J]. 复合材料学报, 2001, 18(2): 9-13.
LI Jialu, LIU Qian. Study on fiber tows' cross-section in 3D braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(2): 9-13. (in Chinese)
- [12] 曹玉璋主编. 传热学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2001.