复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第30卷 第3期 6月 2013年
Vol. 30 No. 3 June 2013

文章编号：1000-3851(2013)03-0160-08

三维全五向编织复合材料弹性性能及热物理性能的有限元分析

卢子兴*，王成禹，夏 彪
（北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191）

摘 要： 在三维全五向(Q5D)编织复合材料细观结构模型的基础上，建立了其单胞参数化有限元模型。通过施加合理的边界条件，计算得到了Q5D编织复合材料的弹性常数、热传导系数和热膨胀系数，所得结果与现有的实验数据吻合较好。在此基础上，深入研究了纤维体积分数、编织角等工艺参数对材料弹性性能和热物理性能的影响规律，并将计算结果与三维四向(4D)和三维五向(5D)编织复合材料的相应结果进行了对比。结果表明，Q5D编织复合材料具有较好的力学性能和纵向导热性能，其零膨胀结构的可设计性更强，为进一步研究此种结构材料的强度问题和热力耦合问题奠定了基础。

关键词： 三维全五向编织复合材料；弹性性能；热传导；热膨胀；有限元
中图分类号： TB330.1 **文献标志码：** A

Finite element analysis of elastic property and thermo-physical properties of three-dimensional and full five-directional braided composites

LU Zixing*, WANG Chengyu, XIA Biao
(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the meso-structure of three-dimensional and full five-directional(Q5D) braided composites, the parameric finite element model of three-dimensional and full five-directional braided composites was established. By using the reasonable boundary condition, the elastic constants, thermal conductivity coefficient and thermal expansion coefficient were calculated, which were in a good agreement with experimental results. Furthermore, the changing characteristics of elastic property and thermo-physical properties of the braided composites with the braided angle and volume fraction of fibers were described, and the calculation results were compared with the corresponding results of three-dimensional four-directional(4D) and five-directional(5D) braided composites. The results show that the mechanical properties, longitudinal thermal conductivity and the design of zero inflated structure of three-dimensional and full five-directional braided composites are better, providing a basis for the analysis of strength problem and the coupling problem of thermo-mechanics.

Keywords: three-dimensional and full five-directional braided composites; elastic property; thermal conductivity; thermal expansion; FEM

三维编织复合材料是近二十多年发展起来的一种新型复合材料，在航空、航天等特殊领域具有重要的应用前景。与传统复合材料相比，其具有耐冲击、耐烧蚀和性能可设计等优异特性，因此，越来越受到工程界和学术界的关注。众所周知，三维五向(5D)编织复合材料是在三维四向(4D)编织复合材料的基础上加入了不参与编织的轴纱，从而使其沿轴向(编织方向)的力学性能得到了提高。然而，通过对5D材料细观结构模型的观察发现，其内部存在一些编织形成的贯穿空隙，这在一定程度上影响了材料中纤维体积分数的提高和轴向性能的改进。根据这种情况，刘振国等[1-2]提出了三维全五向(Q5D)编织复合材料的概念，即在5D材料的内部编织空隙中再次加入一倍的轴纱，可最大限度地

收到初稿日期： 2012-04-24；**收到修改稿日期：** 2012-08-01；**网络出版时间：** 2013-01-11 10:38:00
网络出版地址： http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130111.1038.015.html
基金项目： 国家自然科学基金(11072015；10932001)
通讯作者： 卢子兴，教授，博士生导师，研究方向为泡沫材料力学及复合材料结构强度 E-mail：luzixing@buaa.edu.cn

提高编织复合材料的纤维体积分数和轴向力学性能。最近，皮秀标等[3]受文献[1]的启发，也对Q5D材料的细观结构进行了分析，推导了编织角等工艺参数与胞体结构参数间的数学关系。但到目前为止，还未见到对Q5D材料力学性能和热物理性能的研究报道，以往的工作主要集中在对4D材料和5D材料力学性能和热物理性能的研究方面[4-9]。例如，Yang等[10]采用修正的经典层合板理论对4D材料的刚度性能进行了研究。卢子兴和刘子仙[11]利用刚度等效的思想，研究了5D材料的弹性性能。程伟等[12]利用“米”字型枝状胞体有限元模型，计算了4D材料的导热性能，但所得模拟结果并不理想，其主要原因是所用模型与实际情况相差甚远。刘振国等[13]基于更加真实的胞体结构模型，研究了4D材料的热传导性能，给出的理论预测与实验值吻合得较好。Soheil[14]采用有限元计算方法，计算了三维编织复合材料的热膨胀系数。最近，夏彪和卢子兴[15]采用周期性非绝热温度边界条件和周期性位移边界条件，计算了4D材料和5D材料的整体等效热传导系数和热膨胀系数，所得结果同已有文献相比与实验值符合得更好些。

本文作者利用ANSYS有限元软件建立了计算Q5D材料弹性性能和热物理性能的有限元模型，计算得到了弹性常数、热传导系数和热膨胀系数随编织角和纤维体积分数的变化规律，并将计算结果同4D材料和5D材料的相应结果进行了对比，得到了有价值的结论。

1 细观几何模型及基本假设

由文献[3]可知，Q5D材料的细观单胞模型由内部单胞、表面单胞和角单胞构成。根据实际编织结构，当主体纱阵的行数和列数均较大时，表面和棱角区域所占的比例就会很小。此时，可以仅考虑Q5D材料内部单胞的贡献。5D材料和Q5D材料内部纱线的走向如图1所示。与5D材料相比，Q5D材料的内部单胞多了四根轴纱，其外观尺寸为$w\times w\times h$，如图1(b)所示。

由文献[16-18]不难推断，在Q5D材料的编织结构中，轴纱截面多呈方型，主要是因为在Q5D材料结构中轴纱密度的增加，使其受到的挤压力更为均匀，如图2所示，故在建立有限元模型的过程中，提出如下假设：(1)编织工艺在一定长度内是稳定的；(2)经过挤压成型的编织复合材料内部的编织纱，其横截面形状为六边形，如图3(a)所示；(3)轴纱由于受到编织纱的对称挤压，其横截面形状为正方形，对应的截面参数如图3(b)所示；(4)彼此相邻的纱线保持紧密的接触，纱线与基体之间保持理想粘结；(5)忽略纱线和基体之间的接触热阻效应。

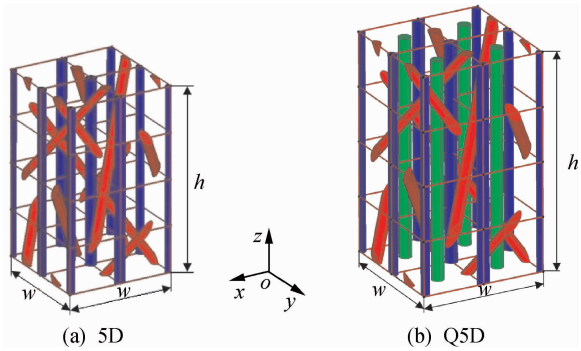

图1 三维编织复合材料细观几何模型

Fig. 1 Micro-geometry model of three-dimensional braided composites

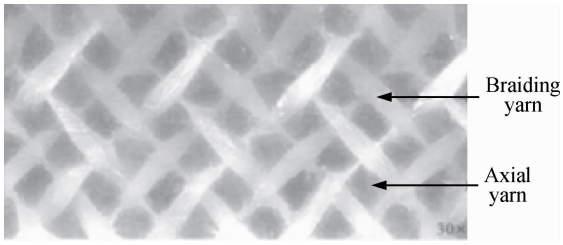

图2 Q5D材料中纱线截面形状[3]

Fig. 2 Cross sections of yarns in three-dimensional and full five-directional braided composites[3]

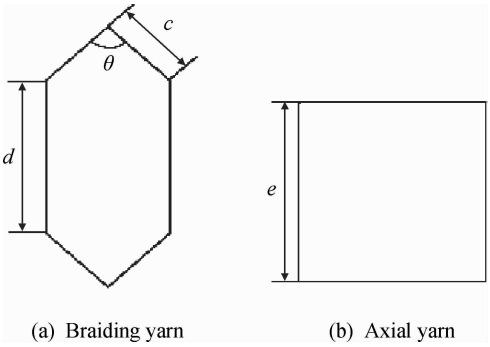

图3 编织纱和轴纱的截面图

Fig. 3 Section of braiding yarn and axial yarn

2 有限元模型

根据图1所示的细观几何模型，由编织纱和轴纱的空间位置关系和编织工艺参数[3]，可得如下

公式：

$$e=\frac{2\sqrt{3R\cos\gamma+2\cos^2\gamma-\sqrt{2}\cos\gamma}}{8R+4\cos\gamma} \tag{1}$$

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

$$c=\frac{\frac{\sqrt{2}}{2}w-e}{2\sin\frac{\theta}{2}} \tag{3}$$

$$d=\frac{\sqrt{2}R+\sqrt{3R\cos\gamma+2\cos^2\gamma}}{4R+2\cos\gamma} \tag{4}$$

$$h=\frac{w}{\tan\alpha} \tag{5}$$

$$\theta=90^\circ \tag{6}$$

$$V_f=\frac{(6R+5\cos\gamma-2\sqrt{(6R+4\cos\gamma)\cos\gamma})\kappa_f}{2(2R+\cos\gamma)^2/(R+2\cos\gamma)} \tag{7}$$

其中：α 为编织角；γ 为内部编织角；R 为编织纱的横截面面积与轴纱的横截面面积之比；κ_f 为纱线填充因子；V_f 为纤维的体积分数。

利用以上的关系，通过给定不同的 α 和 V_f，可以确定相应的单胞外形尺寸，以及轴纱和编织纱的截面尺寸。根据确定的尺寸，采用 ANSYS 的 APDL 程序设计语言，进行编程运算，可建立 Q5D 材料的单胞有限元模型，如图 4 所示(其中，$\alpha=30^\circ$，$V_f=50\%$)。

3　有限元计算

3.1　组分材料属性和网格划分

对图 4 所示的 Q5D 材料单元胞体的有限元模型，可以将其看作由两种材料组成，一种是树脂基体，另一种是纱线。基体为各向同性材料，根据单向复合材料理论，纱线为横观各向同性材料，对应的等效弹性性能由以下公式计算得到[19]：

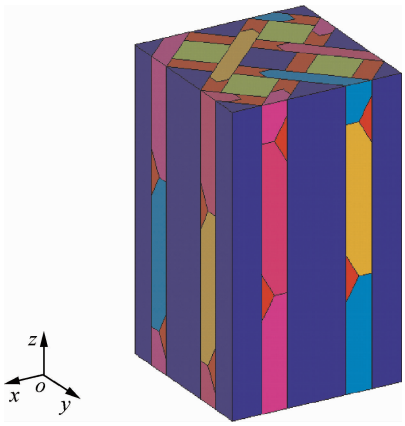

图 4　Q5D 编织复合材料单胞模型

Fig. 4　Unit cell model of three-dimensional and full five-directional braided composites

$$E_{11}=\kappa_f E_{f11}+(1-\kappa_f)E_m \tag{8}$$

$$E_{22}=E_{33}=\frac{E_m}{1-\sqrt{\kappa_f}(1-E_m/E_{f22})} \tag{9}$$

$$G_{12}=G_{13}=\frac{G_m}{1-\sqrt{\kappa_f}(1-G_m/G_{f12})} \tag{10}$$

$$G_{23}=\frac{G_m}{1-\sqrt{\kappa_f}(1-G_m/G_{f23})} \tag{11}$$

$$\mu_{12}=\mu_{13}=\kappa_f\mu_{f12}+(1-\kappa_f)\mu_m \tag{12}$$

$$\mu_{23}=\frac{E_{22}}{2G_{23}}-1 \tag{13}$$

纱线的横向导热性能参数可用 Hashin 的上限估计公式计算[20]，即

$$K_T^+=K_m+\frac{V_f}{V_m/2K_m+1/(K_{f22}-K_m)} \tag{14}$$

而其纵向的导热性能参数用混合定律公式来确定，即

$$K_L=K_{f11}V_f+K_mV_m \tag{15}$$

对于纱线热膨胀系数的求解，可以采用 Schapery(SH)公式计算[21]，即

$$\lambda_{11}=\frac{E_{11}^f\lambda_{11}^fV_f+E^m\lambda^mV_m}{E_{11}^fV_f+E^mV_m} \tag{16}$$

$$\lambda_{22}=(1+\mu^m)\lambda^mV_m+(1+\mu_{12}^f)\lambda_{11}^fV_f-\lambda_{11}\mu_{12} \tag{17}$$

在以上各式中，E 代表弹性模量；G 代表剪切模量；μ 代表泊松比；K 代表热传导系数；λ 代表热膨胀系数；V 代表体积分数；μ_{12} 代表主泊松比；上标、下标 f 和 m 分别代表与纤维和树脂基体有关的量；下标 1 表示纤维的纵向特性，2 和 3 表示纤维的横向特性。

因在材料的编织结构中，编织纱与轴纱相互接触挤压，两者在空间中的取向不同，而轴纱沿着编织方向布置，所以它们具有不同的材料主向，故需要对不同取向的编织纱和轴纱建立对应的局部坐标系，并赋予相应的材料属性。本文中使用的纤维和基体的弹性性能和热物理性能参数如表 1 所示，在计算过程中，假定所有纱线的填充因子均相同。

为保证划分的网格在空间上满足周期性的要求，首先应对六面体单胞的三组相对表面进行面网格划分，即对每一组表面，先划分出一个表面上的网格，之后把网格映射到与其相对的表面上，这样就能保证相对平面上的面网格、节点的一一对应，同理，继续完成其他组表面网格的划分；然后，对

表 1 树脂基体、碳纤维的弹性性能和热物理参数[12]

Table 1 Elastic and thermal physical properties of fiber and matrix[12]

	Modulus				μ_{12}
	E_{11}	E_{22}	G_{12}	G_{23}	
Fiber	230.0	40.0	24.0	14.3	0.26
Matrix	4.5	4.5	—	—	0.34

	Thermal conductivity coefficient/(W·(m·K)$^{-1}$)		Thermal expansion coefficient/(10^{-6} K^{-1})	
	K_{11}	K_{22}	λ_{11}	λ_{22}
Fiber	8.00	1.00	3.10	−0.30
Matrix	0.18	0.18	31.70	31.70

基体和纱线分别用四面体单元和六面体单元进行体网格划分，最后，需要将六个面上的面网格删除掉，可得到具有周期性分布的实体网格。

3.2 弹性性能的确定

假设周期性复合材料结构为正交各向异性体，则单胞的平均力学性能即为整体结构的性能，对应的弹性本构关系为

$$\{\bar{\sigma}_{ij}\} = [C_{ij}]\{\bar{\varepsilon}_{ij}\} \tag{18}$$

而利用柔度矩阵和刚度矩阵的对应关系可知

$$\{\bar{\varepsilon}_{ij}\} = [S_{ij}]\{\bar{\sigma}_{ij}\} \tag{19}$$

通过施加六组线性无关的位移边界条件，即可得到单胞的柔度矩阵 $[S_{ij}]$，进而得到材料的全部弹性常数。

3.3 热传导系数的确定

在施加完周期性非绝热温度边界条件后，采用各向异性固体材料的导热定律[15]，即

$$q_i = -\sum K_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (i = x, y, z) \tag{20}$$

求得热传导系数 K_i。其中，q_i 为 i 方向上的平均热流密度，$\frac{\partial T}{\partial x_i}$ 为 i 方向上的温度梯度，即

$$\frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\Delta T}{L_i} \quad (i = x, y, z) \tag{21}$$

而胞体在方向上的平均热流密度还可以表示为

$$q_i = \frac{q_{im}S_{im} + q_{if}S_{if}}{S_{im} + S_{if}} \quad (i = x, y, z) \tag{22}$$

上式中，L_i 为胞体在 i 方向上的长度；ΔT 为相对于基准温度 T_0 的温度差；S_{im}、S_{if} 分别表示基体、纤维热流输出面在 i 方向上所占的面积；q_{im}、q_{if} 分别表示基体、纤维热流输出面在 i 方向上的平均热流密度。因此，热传导系数表示为

$$K_i = -\frac{q_i L_i}{\Delta T} \quad (i = x, y, z) \tag{23}$$

3.4 热膨胀系数的确定

由文献[22]可知，材料在受热过程中的应力-应变关系为

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} = \boldsymbol{C}_{ijkl}\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} - \boldsymbol{C}_{ijkl}\boldsymbol{\lambda}_{kl}\Delta T \quad (i, j, k, l = x, y, z) \tag{24}$$

其中；i 和 j 为自由指标；k 和 l 为哑指标；$\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ 为应力张量分量；$\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}$ 和 $\boldsymbol{\lambda}_{kl}$ 分别为应变张量分量和热膨胀系数张量分量；$\boldsymbol{C}_{ijkl}$ 为刚度张量对应的分量；ΔT 为相对于基准温度 T_0 的温度差。采用文献[15]给出的方法，即可求得对应的热膨胀系数。

3.5 周期性边界条件

从胞元的排列方式上可以看出，内胞在三个方向上是周期性排列的。因此，为了保证单胞边界上的位移和温度满足周期性和连续性，本文采用 Xia 等[24]提出的适用于有限元分析的周期性位移边界条件和夏彪等[15]在其基础上改进的周期性非绝热温度边界条件，其适用性的证明可参见已发表文献[15，25]。

4 结果分析与讨论

4.1 弹性常数随编织参数的变化

本文中所建立的 Q5D 材料的有限元模型，是在已有工作[15，23]基础上得到的；而文献[15，23]的计算结果同实验值已吻合较好，这在一定程度上说明了本文模型的有效性。

图 5 给出了 Q5D、5D 和 4D 材料的弹性常数随编织参数的变化曲线。三种材料的弹性常数随编织角 α 和纤维体积分数 V_f 的变化规律相同，关于 5D 材料与 4D 材料弹性性能的比较与讨论，参见文献[23]，这里仅给出 Q5D 材料和 5D 材料弹性性能的比较。

如图 5(a)所示，当 V_f 和 α 一定时，Q5D 材料的纵向弹性模量 E_z 明显大于 5D 材料；且在整个编织角范围内，随着 α 的增加，两者数值相差的更为明显。这主要是因为 Q5D 材料的轴纱密度是 5D 材料的两倍，从而大大提高了其轴向力学性能，同文献[26]得到的结论相同。由图 5(b)可知，当 V_f 一定时，Q5D 材料的横向弹性模量 E_x 和 E_y 随 α 的变化趋势比 5D 材料要缓和一些，数值上也略小些。由图 5(c)可知，V_f 一定时，Q5D 材料的横向剪切模量 G_{xy} 与 5D 材料相比，情况与横向弹性模量相同。而由图 5(d)可知，在 V_f 一定时，Q5D 材料的纵向剪切模量 G_{yz} 和 G_{zx} 随 α 的变化比 5D 材料更平缓些，在整个编织角范围内，其数值也相对较小。由

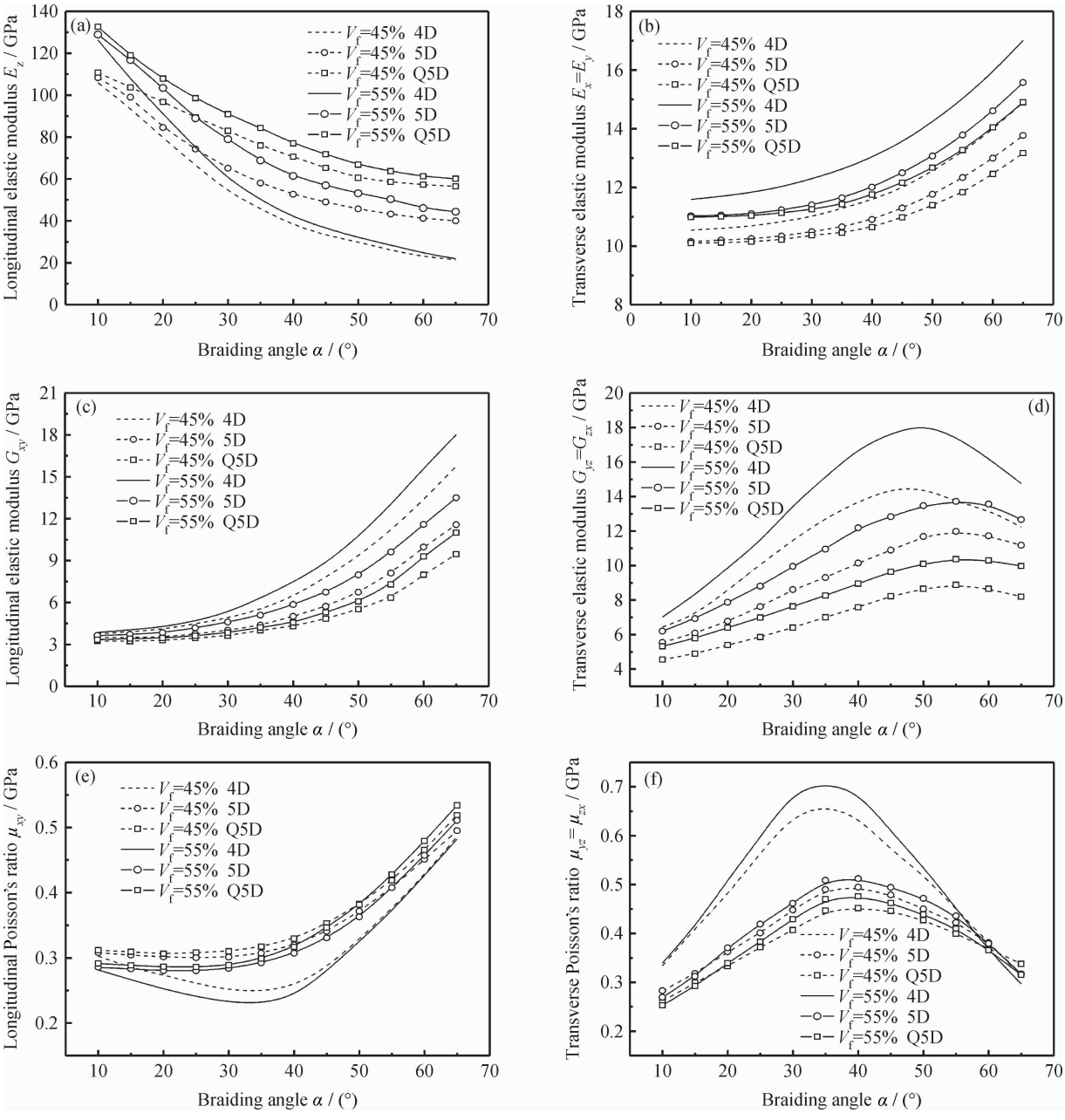

图 5　Q5D、5D 和 4D 材料的弹性常数随编织参数的变化

Fig. 5　Elastic constants variation of Q5D, 5D and 4D material with braiding parameters

图 5(e)、5(f)可知，无论横向泊松比 μ_f，还是纵向泊松比 μ_{yz} 和 μ_{zx}，当 V_f 一定时，在绝大部分编织角范围内，Q5D 材料与 5D 材料相比差异不大，但 μ_{xy} 在数值上略大一些，而 μ_{yz} 和 μ_{zx} 在数值上略小一些。

为了进一步验证模型的有效性，将有限元计算结果同黄雨霓提供的实验结果[26]进行了对比，如表 2 所示，可见，E_z 的预测结果与实验值吻合很好，结合图 5 的讨论，可以看出，本文中对 Q5D 材料弹性性能的预测是有效、合理的。

4.2　热传导系数随编织参数的变化

Q5D 材料的热传导系数随编织参数的变化曲线如图 6 所示，为了与 4D 和 5D 材料的相应结果进行对比，图中也给出了对应的变化曲线。有关 4D 材料和 5D 材料的热传导系数随编织参数变化规律的讨论详见文献[15]，这里仅给出 Q5D 材料同 5D 材料的对比讨论。

表 2　Q5D 材料纵向拉伸弹性性能的有限元计算结果与实验值[26]对比

Table 2　Comparison of FEM with experimental data[26] for longitudinal elastic modulus of Q5D material

Sample	Braiding structure	Yarn	Braiding angle/(°)	Fiber volume fraction /%	Longitudinal elastic modulus/GPa		
					Exp. results[26]	This work	Error/%
1	Q5D	T700－12 K	20.64	59.56	113.97	115.72	1.51
2	Q5D	T700－12 K	20.89	50.89	98.20	100.13	1.97
3	Q5D	T700－12 K	29.10	46.73	88.04	89.98	2.20
4	Q5D	T700－12 K	39.60	47.66	77.62	75.99	－2.10
5	Q5D	T700－12 K	50.10	46.60	61.95	60.05	－3.07

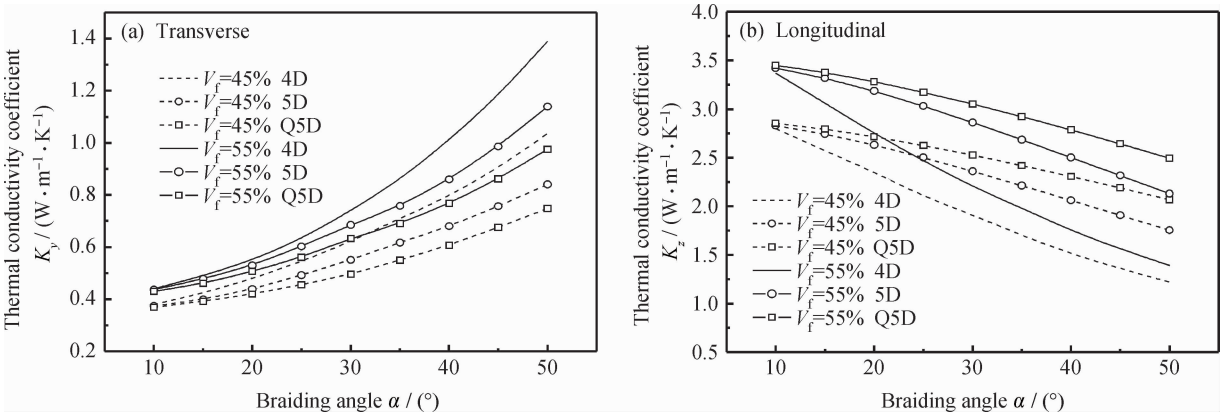

图 6　Q5D、5D 和 4D 材料的横向和纵向热传导系数随编织参数的变化

Fig. 6　Transverse and longitudinal thermal conductivity coefficient variation of Q5D, 5D and 4D material with braiding parameters

图 6(a)为 Q5D 材料的横向热传导系数 K_y 随 α 和 V_f 的变化规律。可以看出，Q5D 材料和 5D 材料的 K_y 随 α 和 V_f 的变化规律基本相同；当 α 很小时，Q5D 材料的 K_y 与 5D 材料几乎相等，随着 α 的增加，两者 K_y 的变化幅度出现明显的差异。在 V_f 和 α 一定时，Q5D 材料的 K_y 比 5D 材料更小一些，且在 V_f 一定时，减小的程度随 α 增加而增大。这主要是因为 Q5D 材料在编织方向上的轴纱密度是 5D 材料的两倍，从而使胞体在横向上的纤维比例更小，故使得其 K_y 比 5D 材料要小。

图 6(b)给出了 Q5D 材料的纵向热传导系数 K_z 随编织角 α 和纤维体积分数 V_f 的变化规律。可见，在 V_f 一定时，纵向热传导系数 K_z 随 α 的增加而减小。这主要是因为随 α 的增加，胞体内纵向上的纤维比例减小，横向上的纤维比例增加，使得整个材料的纵向热传导系数 K_z 逐渐减小；对于 Q5D 材料和 5D 材料，因轴纱的加入，使得其纵向热传导系数 K_z 均较大；然而，由于 Q5D 材料轴纱的密度是 5D 材料的两倍，因此，Q5D 材料的 K_z 比 5D 材料大一些；Q5D 材料的 K_z 随着 α 的增加，其变化趋势较 5D 材料缓和一些。当 α 一定时，K_z 均随 V_f 的增加而增大；并且，V_f 对 Q5D 材料和 5D 材料的 K_z 的影响比 4D 材料更大一些。

根据横/纵向热传导系数随着编织工艺参数的变化趋势可知，相对 5D 材料而言，Q5D 材料内部轴纱密度的进一步增加，对其纵向导热性能具有更显著的增强作用。

4.3　热膨胀系数随编织参数的变化

Q5D、5D 和 4D 材料的热膨胀系数随编织参数的变化曲线如图 7 所示。有关 4D 材料和 5D 材料的热膨胀系数随编织参数变化规律的讨论详见文献[15]。

由图 7(a)可见，相比热传导性能，Q5D 材料的热膨胀性能呈现出更为明显的非线性特征。V_f 一定时，三者的横向热膨胀系数 λ_y 均随 α 的增加而减小；当 α 小于 30°时，Q5D 材料和 5D 材料的横向热膨胀系数 λ_y 的变化趋势几乎完全一致，数值上也相等。这主要是因为在 α 较小时，两者在横向上的纤

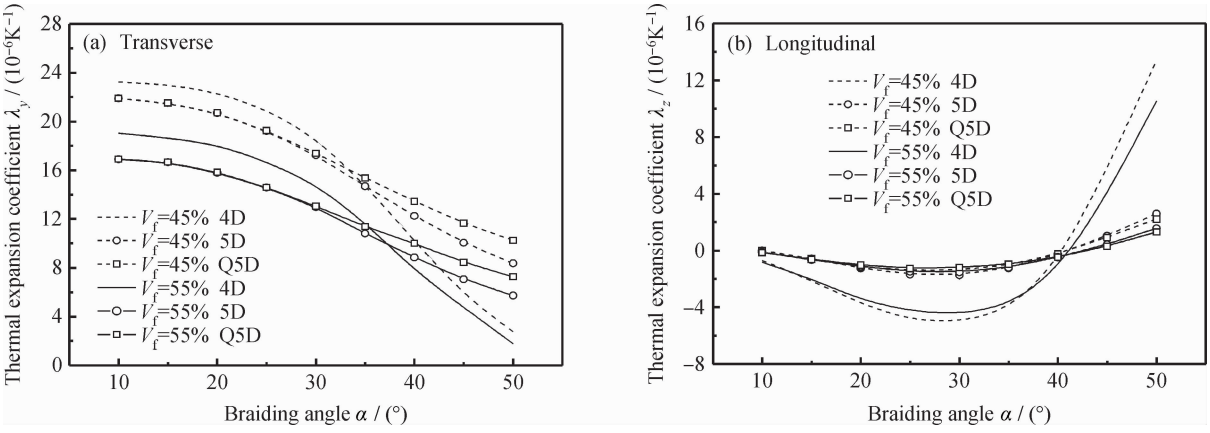

图 7　Q5D、5D 和 4D 材料的横向和纵向热膨胀系数随编织参数的变化

Fig. 7　Transverse and longitudinal thermal expansion coefficient variation of Q5D, 5D and 4D material with braiding parameters

维均较少；当 α 大于 30°时，Q5D 材料和 5D 材料 λ_y 的变化幅度出现明显的差异，Q5D 材料 λ_y 的变化趋势较缓和。由图 7(b)可以看出，对于不同的 V_f，三者的纵向热膨胀系数 λ_z 随 α 的变化规律差异不大；当 V_f 不变时，Q5D 材料的 λ_z 随 α 的增加，先减小后增大；α 小于 40°时，λ_z 均为负值；当 α 大于 40°时，λ_z 均为正值，Q5D 材料的 λ_z 在 40°左右出现零值，即具有零膨胀特性。由此表明，编织复合材料的热膨胀特性不仅受到纤维、基体本身性质的影响，还与纤维体积分数和编织角等编织参数有关。由变化曲线可知，与 5D 材料相比，Q5D 材料的 λ_z 随 α 的变化趋势相对更平缓，且在绝大部分编织角范围内，更接近零值，故 Q5D 材料对零膨胀结构的可设计性更强些。

5　结　论

（1）基于 ANSYS 的 APDL 语言编程建立了 Q5D 编织复合材料的参数化有限元模型，并对其弹性性能和热物理性能进行了有限元分析，得到了弹性常数、热传导系数和热膨胀系数随编织角和纤维体积分数的变化规律。

（2）与 5D 编织复合材料相比，Q5D 编织复合材料的纵向弹性性能有了进一步的提高，具有较大的纵向承载能力。

（3）当编织结构一定时，Q5D 编织复合材料的横向热传导系数比 5D 编织复合材料更小一些，而其纵向热传导系数则更大一些。

（4）在绝大部分编织角范围内，Q5D 编织复合材料的热膨胀系数与 5D 编织复合材料接近，但其纵向热膨胀系数比 5D 编织复合材料更接近于零，故其对零膨胀结构的可设计性更强。

（5）与 5D 编织复合材料一样，Q5D 编织复合材料的热物理性能也具有较为明显的各向异性和非线性特征。

参考文献：

[1]　刘振国. 三维全五向编织预型件的概念[J]. 材料工程，2008(S1)：305-312.
Liu Zhenguo. Concept of three-dimentional all five-directional braided preforms [J]. Materials Science and Engineering, 2008(S1)：305-312.

[2]　Zhang F, Liu Z G, Wu Z H, et al. A new scheme and microstructural model for 3D full 5 - directional braided composites [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(1)：61-67.

[3]　皮秀标，钱　坤，曹海建，等. 三维全五向编织复合材料的细观结构分析[J]. 宇航材料工艺，2011，41(6)：39-43.
Pi Xiubiao, Qian Kun, Cao Haijian, et al. Microstructure analysis of 3D full 5 directional braided composites [J]. Aerospace Materials and Technology, 2011, 41(6)：39-43.

[4]　李典森，刘子仙，卢子兴. 三维五向碳/酚醛编织复合材料的压缩性能及破坏机理[J]. 复合材料学报，2008，25(1)：133-139.
Li Diansen, Liu Zixian, Lu Zixing. Compressive properties and failure mechanism of three - dimensional and five - directional carbon/phenolic braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1)：133-139.

[5]　庞宝君，杜善义，韩杰才，等. 三维四向编织碳/环氧复合材料实验研究[J]. 复合材料学报，1999，16(4)：136-141.
Pang Baojun, Du Shanyi, Han Jiecai, et al . An experimental investigation of three - dimensional and four - directional braided carbon/epoxy composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 16(4)：136-141.

[6]　李王波，矫桂琼，潘文革. 三维编织 C/ SiC 复合材料的拉压实验研究[J]. 复合材料学报，2004，21(3)：110-114.
Li Wangbo, Jiao Guiqiong, Pan Wen'ge. Tensile and compress experimental investigation of three - dimensionally braided C/SiC

composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(3): 110-114.

[7] 李典森，卢子兴，卢文书. 三维四向编织复合材料刚度和强度的理论预测[J]. 应用数学和力学，2008，29(2)：149-156.
Li Diansen, Lu Zixing, Lu Wenshu. Theoretical prediction of the stiffness and strength of three-dimensional and four-directional braided composites [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008, 29(2): 149-156.

[8] 卢子兴，杨振宇，李仲平. 三维编织复合材料力学行为研究进展[J]. 复合材料学报，2004，21(2)：1-7.
Lu Zixing, Yang Zhenyu, Li Zhongping. Development of investigation into mechanical behavior of three-dimensional braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 1-7.

[9] Mouritza A P, Bannisterb M K, Falzonb P J, et al. Review of applications for advanced three-dimensional fiber textile composites [J]. Composites: Part A, 1999, 30(12): 1445-1461.

[10] Yang J M, Ma C L, Chou T W. Fiber inclination model of three-dimensional textile structural composites [J]. Journal of Composite Materials, 1986, 20(5): 472-484.

[11] 卢子兴，刘子仙. 三维五向编织复合材料的弹性性能[J]. 北京航空航天大学学报，2006，32(4)：455-460.
Lu Zixing, Liu Zixian. Elastic properties for 3 dimensional and 5 directional braided composites [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(4): 455-460.

[12] 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.

[13] Liu Z G, Zhang H G, Lu Z X. Investigation on the thermal conductivity of 3-dimensional and 4-directional braided composites [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(4): 327-331.

[14] Soheil M. Predictions for coefficients of thermal expansion of three-dimensional braided composites [J]. AIAA Journal, 1997, 35(1): 141-144.

[15] 夏 彪，卢子兴. 三维编织复合材料热物理性能的有限元分析[J]. 航空学报，2011，32(6)：1040-1049.
Xia Biao, Lu Zixing. Finite element analysis on thermo-physical properties of 3D braided composites [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(6): 1040-1049.

[16] 陈 利，徐正亚. 三维五向编织复合材料中纱线截面形状实验分析[J]. 复合材料学报，2007，24(4)：128-132.
Chen Li, Xu Zhengya. Experimental analysis on the yarns section of three-dimensional and five-directional braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(4): 128-132.

[17] Li D S, Lu Z X, Chen L, et al. Microstructure and mechanical properties of three-dimensional five-directional braided composites [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(18/19): 3422-3432.

[18] 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-sect ion in 3-D braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(2): 9-13.

[19] Chamis C C. Mechanics of composites materials: Past, present and future [J]. Journal of Composites Technology and Research, 1989, 11(1): 3-14.

[20] 李典森，卢子兴，刘振国，等. 三维五向编织复合材料导热性能的有限元分析[J]. 航空动力学报，2008，23(8)：1455-1460.
Li Diansen, Lu Zixing, Liu Zhenguo, et al. Finite element analysis of thermal conductivity of three-dimensional and five directional braided composites [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(8): 1455-1460.

[21] Bowles D E. Tnmpkins S S. Prediction of coefficients of thermal expansion for unidirectional conposites [J]. Journal of Composite Materials, 1989, 23: 371-388.

[22] Rao M V, Mahajan P, Mittal R K. Effect of architecture on mechanical properties of carbon/carbon composites [J]. Composite Structures, 2008, 83(2): 131-142.

[23] 李典森，刘子仙，卢子兴，等. 三维五向编织复合材料弹性性能的数值预报[J]. 北京航空航天大学学报，2008，34(8)：891-895.
Li Diansen, Liu Zixian, Lu Zixing, et al. Numerical prediction for the elastic properties of three dimensional and five directional braided composites [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(8): 891-895.

[24] Xia Z H, Zhang Y F, Fernand E. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications [J]. International Journal of Solid & Structure, 2003, 40(8): 1907-1921.

[25] Xia Z H, Zhou C W, Yong Q L, et al. On selection of repeated unit cell model and application of unified periodic boundary conditions in micro-mechanical analysis of composites [J]. International Journal of Solid & Structure, 2006, 43(2): 266-278.

[26] 黄雨霓. 三维编织复合材料力学性能研究 [D]. 北京：北京航空航天大学，2012.
Huang Yuni. Research on the mechanical properties of three dimensional braided composites [D]. Beijing: Beihang University, 2012.