复合材料学报 第26卷 第4期 8月 2009年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 26 No. 4 August 2009

文章编号：1000-3851(2009)04-0181-05

三维正交机织复合材料的单胞模型及应用

余育苗，王肖钧*，李永池，王志海
（中国科学技术大学 近代力学系，合肥 230027）

摘　要： 根据三维正交机织复合材料的结构特点，在假设纤维束横截面为矩形的基础上建立一种单胞模型，该模型由3组互相正交的纤维与基体组成。首先利用这一模型，推导出纤维体积分数与纤维粗度、机织密度等织物参数的关系式，通过测量单胞单元的单层厚度得到纤维体积分数，计算值和实验值较为吻合。然后在假定纤维和基体均为线弹性材料的基础上，利用材料力学方法推导出了3个正交方向的杨氏模量表达式，该表达式简单明了，给出了三维正交机织复合材料杨氏模量与纤维和基体的杨氏模量以及纤维体积分数间的关系，算例的计算结果与实验值有良好的一致性，这说明所建立的单胞模型具有合理性。

关键词： 三维正交机织复合材料；单胞模型；织物参数；纤维体积分数；杨氏模量
中图分类号： TB332　　**文献标志码：** A

Cell model of 3D orthogonal woven composite and its application

YU Yumiao, WANG Xiaojun*, LI Yongchi, WANG Zhihai
(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Considering the structure characteristics of 3D orthogonal woven composite (3D-OWC), a cell model composed of three orthogonal bundles of fibers and matrix was proposed based on the assumption that the fiber bundle has the rectangular cross section. According to the cell model, an equation relating the fiber volume fraction and the woven parameters (such as the fiber roughness, weaving density and so on) was obtained. The relatively simple formulas of Young's modulus of 3D-OWC were developed by the assumption that both the fiber and matrix are elastic. With the new formulas, three dimensional orthogonal composite's Young's modulus can be got by the fiber modulus, matrix modulus and fiber volume fraction. The fiber volume fraction and elastic modulus calculated by the equations are in good agreement with the experiments. It is concluded that the proposed cell model is effective and valuable, and it will be useful in the study of 3D-OWC mechanical properties.

Keywords: 3D orthogonal woven composite; cell model; woven parameters; fiber fraction volume; Young's modulus

纤维增强复合材料由于其比强度高的优点而被应用于航空、工程防护等领域。与层合复合材料相比，三维复合材料沿厚度方向的纤维束可以有效地克服诸如分层的缺陷，并且提高该方向的强度和抗冲击损伤能力。三维正交机织作为最有前景的三维纺织技术之一，具有角联和正交2种结构，贯穿和分层2种接结方式，见图1。三维正交机织复合材料（3D orthogonal woven composite，简称3D-OWC）在空间上有3组相互正交的纤维束，分别称为面内经纱（Warp yarn），面内纬纱（Weft yarn）和厚度方向 z 纱（z yarn），见图1(d)，其中 z 纱将经纱层和纬纱层所形成的面内纤维叠层在 z 方向上贯穿起来，形成一个三维整体[1]。

三维正交机织复合材料已经被广泛地关注和研究，已有的研究工作主要集中于准静态力学实验研究和材料模型的建立[2]。如Tan[3-4]对碳纤维/环氧树脂3D-OWC开展了大量的实验研究，通过电镜扫描观察断裂面，详细讨论了材料的破坏行为，并建立3D-OWC的单胞模型，应用有限元方法计算弹性常数。Cox[5]通过对石墨/环氧树脂3D-OWC

收稿日期： 2008-05-05；**收修改稿日期：** 2009-02-20
基金项目： 国家自然科学基金(10572134)；国防科技重点实验室基金(51453030205ZK0101)
通讯作者： 王肖钧，博士生导师，教授，从事冲击动力学研究工作　E-mail：xjwang@.ustc.edu.cn

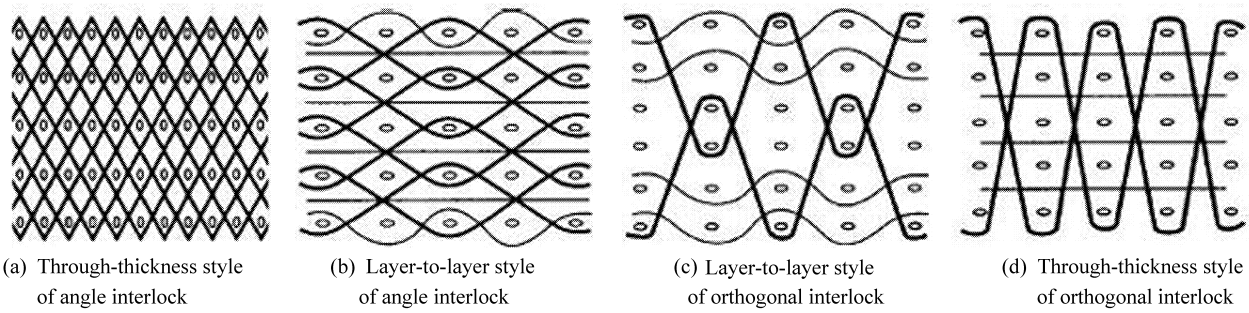

图 1　常见的三维机织结构

Fig. 1　3D woven structures

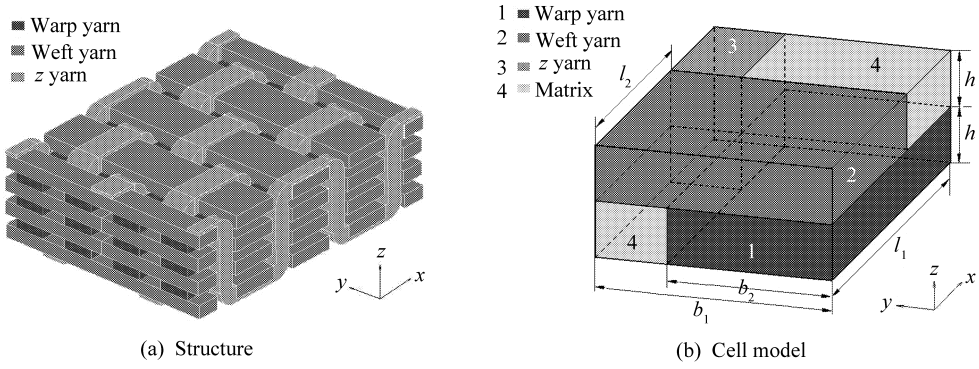

图 2　3D-OWC 结构与单胞模型

Fig. 2　Structure and cell model of 3D-OWC

破坏机制的研究，发现其拉伸破坏主要源于纤维束的脆断和拔出，压缩破坏主要由皱损区产生分层所引起，而弯曲破坏则呈现上述 2 种破坏形态的综合。戎琦[6]分别对 E 玻璃纤维 3D-OWC 和层合板进行拉伸和压缩实验，发现前者的拉伸、压缩强度大于后者，并且两者均有脆性破坏特点。吴华利[7]测试了无碱 E 玻璃纤维 3D-OWC 的抗拉伸、抗弯曲力学性能，指出其能有效抑制分层破坏；Luo[8]等对混杂纤维 3D-OWC 开展了准静态压缩实验和 SHPB 实验，分析并比较了准静态下和冲击下材料的破坏形态和吸能机制；杨彩云[9]阐述了适用于三维机织复合材料纤维体积含量测定的 3 种新方法，并指出图像分析法是今后的发展方向；郭兴峰[10-11]考虑了 z 纱真实状态，利用纤维束和单胞尺寸参数推导了纤维体积分数计算公式，并讨论了织物参数对纤维体积分数的影响；蔡敢为[12]以 3 个方向的纤维体积分数为参数，在单位体积内建立了 3D-OWC 的单胞模型，并且推导了拉伸弹性模量和主泊松比计算公式。由于 3D-OWC 力学性能受到诸如纤维、基体类型和力学性能等许多因数影响，目前的研究结果差异较大。而对于计算纤维体积分数和弹性常数的方法，或计算公式复杂，不便于工程应用；或只适合某种特定材料，应用范围有限，因此，3D-OWC 仍然有许多问题值得研究。

本文中以 3D-OWC 为研究对象，在假设纤维束横截面为矩形截面的基础上，建立了一种单胞模型，推导出纤维体积分数与织物参数之间的关系；并且在此单胞基础上，利用材料力学方法推导出杨氏模量计算公式。

1　3D-OWC 单胞模型

根据三维正交机织复合材料的结构特点，如图 2(a)所示，在假设纤维束横截面为矩形截面的基础上，从中取一个最小的具有代表性的重复单元为研究对象，即图 2(b)所示的单胞单元。其中 1、2、3 分别表示经纱束、纬纱束、z 纱束，4 表示基体；x、y、z 分别表示经向、纬向、z 向；l_1、b_1分别表示单胞单元 x、y 方向的长度；l_2、b_2分别表示单元内经纱束和纬纱束的宽度。

2 纤维体积分数计算

纤维体积分数是表征三维机织复合材料性能的一个重要指标，其测量方法一般采用称量法、理论模型法、数字图像分析法[9]，目前理论模型法是主要研究方法，其通过建立 3D-OWC 单胞模型，可以获得纤维体积分数与织物参数之间的关系，这对指导 3D-OWC 的生产和设计具有重要意义。

如图 2(b)所示，设经纱、纬纱、z 纱粗度分别为 $T(x)$、$T(y)$、$T(z)$，纱线粗度指 1000 m 长的纱束所具有的质量克数(单位 Tex，1 Tex＝1 g/1000 m)；经纱和纬纱的机织密度分别为 $d(x)$、$d(y)$，某一方向的机织密度 d 指该方向 10 cm 长度内具有的纱束根数(根/10 cm)，通常按照国家标准 GB/T 8946—1998 进行测量；假设每一纱层厚度为 h，单元中纤维体积分数 V_f 可以表示为

$$V_f = \frac{V_x + V_y + V_z}{V} = \frac{S_x}{A_x} + \frac{S_y}{A_y} + \frac{2S_z}{A_z} \tag{1}$$

其中：$V_i(i=x,y,z)$ 表示单胞中 i 向纤维束的体积；V 为单胞单元体积；S_i、$A_i(i=x, y, z)$ 分别表示 i 向纤维束横截面积和单元横截面积。S_i 可以表示为

$$S_i = \frac{T(i)}{c_i \rho_i} \tag{2}$$

其中：$T(i)$ 表示 i 向纤维的粗度；c_i 表示 i 向纤维束中纤维所占的体积分数。一般而言，纤维束并不是完全由纤维组成，c 的值通常在 0.55～0.75 之间，ρ_i 表示 i 向纤维的密度。

设 b_1、l_1 分别表示单胞单元 x、y 方向的长度，则 3 个正交方向单胞单元的横截面面积为

$$A_x = b_1 \cdot 2h,\ A_y = l_1 \cdot 2h,\ A_z = b_1 l_1. \tag{3}$$

b_1、l_1 可以通过机织密度求出：

$$b_1 = 1/d(x),\ l_1 = 1/d(y). \tag{4}$$

于是将式(2)～(4)代入式(1)中，得到

$$V_f = \frac{T(x)d(x)}{c_x \rho_x \cdot 2h} + \frac{T(y)d(y)}{c_y \rho_y \cdot 2h} + \frac{2T(z)d(x)d(y)}{c_z \rho_z} \tag{5}$$

等式右边 3 项分别为经向、纬向、z 向的纤维体积分数，式中参数 T、d、c 以及 ρ 均为已知，h 可以通过测量单胞单元的 z 向厚度而得到。该公式可以用于计算 3D-OWC 的纤维体积分数，而对 3 个方向上的纤维类别没有要求。公式(5)与文献[12]中利用纤维束和单胞单元几何尺寸推导出的纤维体积分数计算公式相比，形式上更为简洁，而且由于需要测量的单胞参数只有 h，减少了更多的人为测量所带来的误差。

利用式(5)对 Kevlar/乙烯基树脂 3D-OWC 的纤维分数进行计算。在该复合材料中，经纱层为 7 层，纬纱层为 6 层，Kevlar29 密度 1.44 g/cm^3，纤维束中纤维的体积分数 c 为 0.75，经纱、纬纱、z 纱的粗度分别为 628、628 和 314 Tex。经纱和纬纱的机织密度均为 40 根/10 cm。表 1 为纤维束和单胞单元的几何尺寸平均值。将数据转化为国际单位制后代入式(5)可得纤维体积分数。计算值和实测值的对比见表 2。

表 1 纤维束和单胞单元的几何尺寸

Table 1 Geometrical size of fiber bound and cell model

	b_1	b_2	l_1	l_2	h
Size/mm	2.52	1.32	2.52	1.32	0.48

表 2 纤维体积分数的计算值和实测值对比

Table 2 Comparison of fiber volume fraction between calculation and experiment %

Volume fraction	V_{fx}	V_{fy}	V_{fz}	V_f
Calculation	24.2	24.2	9.3	57.3
Experiment	25.3	24.7	10.2	60.2

从表 2 可以看出，纬向纤维的体积分数计算值和实测值比较接近，而经向和 z 向的计算值比实测值低。认为原因如下：(1) 实际的 3D-OWC 中经纱层比纬纱层多 1 层，但在计算中 $d(x)$ 和 $d(y)$ 相等，因此体现不了它们的差异；(2) z 纱在材料表面是弯曲的，但是计算时没有考虑这一点，另外，少计算 1 层经纱层相应地也少计算了 1 层 z 纱，这些都是导致计算值比实测值小的因素。总体上，两者吻合依然是理想的。

3 杨氏模量的计算

3.1 公式推导

将图 2(b)所示的单胞单元按照纤维束方向划分为 8 个组分，其中经纱束、纬纱束和 z 纱束均被分为二组分，如图 3 所示，3 个正交方向的纤维体积分数亦可以利用纤维束和单胞单元的几何尺寸表示为

$$V_{fx} = b_2/(2b_1),$$
$$V_{fy} = l_2/(2l_1),$$
$$V_{fz} = (1 - 2V_{fx})(1 - 2V_{fy}). \tag{6}$$

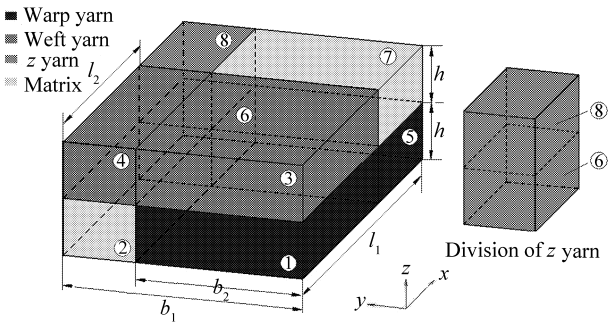

图 3　3D-OWC 单胞模型组分划分

Fig. 3　Parts division of cell model of 3D-OWC

假设纤维束和基体均为线弹性材料，因此 3D-OWC 单元体也是线弹性的。由此可以根据力平衡条件和变形协调条件，由纤维体积分数以及纤维、基体的杨氏模量求出单元的杨氏模量。

设 x 向横截面上作用有应力 σ_x，若以 σ_{ix} $(i=1,\cdots,8)$ 分别表示图 3 所示单元第 i 组分沿 x 向的应力分量，则对图 3 所示的单胞有

$$\sigma_x(b_1\cdot 2h)=\sigma_{1x}(b_2h)+\sigma_{2x}(b_1-b_2)h+\sigma_{3x}(b_2h)+\sigma_{4x}(b_1-b_2)h \tag{7}$$

在交界面上，x 向力平衡条件：

$$\sigma_{1x}=\sigma_{5x},\ \sigma_{2x}=\sigma_{6x},\ \sigma_{3x}=\sigma_{7x},\ \sigma_{4x}=\sigma_{8x}. \tag{8}$$

设单元体的截面在变形过程中保持为平面，则有变形协调条件：

$$\begin{aligned}\varepsilon_x l_1&=\varepsilon_{1x}l_1+\varepsilon_{5x}(l_1-l_2)\\&=\varepsilon_{2x}l_1+\varepsilon_{6x}(l_1-l_2)\\&=\varepsilon_{3x}l_1+\varepsilon_{7x}(l_1-l_2)\\&=\varepsilon_{4x}l_1+\varepsilon_{8x}(l_1-l_2)\end{aligned} \tag{9}$$

式中，ε_{ix} $(i=1,\cdots 8)$ 表示第 i 组分沿 x 方向的应变分量。由于单元是线弹性的，因此

$$\sigma_x=E_x\varepsilon_x \tag{10}$$

纤维束和基体也是线弹性的，故有

$$\begin{aligned}&\sigma_{1x}=E_{\mathrm{fL}}\varepsilon_{1x},\ \sigma_{5x}=E_{\mathrm{fT}}\varepsilon_{5x},\\&\sigma_{3x}=E_{\mathrm{fT}}\varepsilon_{3x},\ \sigma_{4x}=E_{\mathrm{fT}}\varepsilon_{4x},\\&\sigma_{6x}=E_{\mathrm{fT}}\varepsilon_{6x},\ \sigma_{8x}=E_{\mathrm{fT}}\varepsilon_{8x},\\&\sigma_{2x}=E_{\mathrm{m}}\varepsilon_{2x},\ \sigma_{7x}=E_{\mathrm{m}}\varepsilon_{7x}.\end{aligned} \tag{11}$$

式中：E_{m} 表示基体杨氏模量；E_{fL} 和 E_{fT} 分别表示纤维束纵向和横向的杨氏模量。

联立解式(7)～(11)，并利用式(6)，可以得到

$$E_x=E_{\mathrm{fL}}V_{\mathrm{f}x}+\frac{E_{\mathrm{m}}E_{\mathrm{fT}}(1-2V_{\mathrm{f}x})}{4E_{\mathrm{fT}}V_{\mathrm{f}y}+2E_{\mathrm{m}}(1-2V_{\mathrm{f}y})}+\frac{E_{\mathrm{m}}E_{\mathrm{fT}}(1-V_{\mathrm{f}z})+E_{\mathrm{fT}}^2V_{\mathrm{f}z}}{4E_{\mathrm{m}}V_{\mathrm{f}y}+2E_{\mathrm{fT}}(1-2V_{\mathrm{f}y})} \tag{12}$$

同理可得

$$E_y=E_{\mathrm{fL}}V_{\mathrm{f}y}+\frac{E_{\mathrm{m}}E_{\mathrm{fT}}(1-2V_{\mathrm{f}y})}{4E_{\mathrm{fT}}V_{\mathrm{f}x}+2E_{\mathrm{m}}(1-2V_{\mathrm{f}x})}+\frac{E_{\mathrm{m}}E_{\mathrm{fT}}(1-V_{\mathrm{f}z})+E_{\mathrm{fT}}^2V_{\mathrm{f}z}}{4E_{\mathrm{m}}V_{\mathrm{f}x}+2E_{\mathrm{fT}}(1-2V_{\mathrm{f}x})} \tag{13}$$

$$E_z=E_{\mathrm{fL}}V_{\mathrm{f}z}+4E_{\mathrm{fT}}V_{\mathrm{f}x}V_{\mathrm{f}y}+\frac{4E_{\mathrm{m}}E_{\mathrm{fT}}}{E_{\mathrm{m}}+E_{\mathrm{fT}}}(1-V_{\mathrm{f}x}-V_{\mathrm{f}y}-V_{\mathrm{f}z}) \tag{14}$$

式(12)～(14)表明，i 方向杨氏模量除了与该方向上纤维束的杨氏模量有关外，同时还与基体的杨氏模量及其他 2 个方向纤维的横向杨氏模量和体积分数有关。

蔡敢为[12]在研究 3D-OWC 时提出过单位体积单胞模型，即在单位体积内将 x、y、z 三向纤维体积分数的数值作为 3 组纤维束的横截面面积大小，与本文类似的思想导出了 1 组表达式较为复杂的模量估算公式。其给出的 x 向杨氏模量计算公式为(其余 2 个方向类似)

$$\begin{aligned}E_x=&V_{\mathrm{f}x}E_{\mathrm{fL}}+\frac{\sqrt{V_{\mathrm{f}z}}(1-\sqrt{V_{\mathrm{f}y}})E_{\mathrm{fT}}E_{\mathrm{m}}}{(1-\sqrt{V_{\mathrm{f}z}})E_{\mathrm{fT}}+\sqrt{V_{\mathrm{f}z}}E_{\mathrm{m}}}\\&+\frac{\sqrt{V_{\mathrm{f}y}}(1-\sqrt{V_{\mathrm{f}z}})E_{\mathrm{fT}}E_{\mathrm{m}}}{(1-\sqrt{V_{\mathrm{f}y}})E_{\mathrm{fT}}+\sqrt{V_{\mathrm{f}y}}E_{\mathrm{m}}}\\&+\frac{\sqrt{V_{\mathrm{f}y}}\sqrt{V_{\mathrm{f}z}}E_{\mathrm{fT}}E_{\mathrm{m}}}{(\sqrt{V_{\mathrm{f}y}}+\sqrt{V_{\mathrm{f}z}})E_{\mathrm{m}}+(1-\sqrt{V_{\mathrm{f}y}}-\sqrt{V_{\mathrm{f}z}})E_{\mathrm{fT}}}\\&+\left[(1-\sqrt{V_{\mathrm{f}y}})(1-\sqrt{V_{\mathrm{f}z}})-V_{\mathrm{f}x}\right]E_{\mathrm{m}}\end{aligned} \tag{15}$$

3.2　算例分析

3.2.1　算例 1

利用 Kevlar/乙烯基树脂三维正交机织复合材料进行验证，3 个正交方向的纤维体积分数见表 2，纤维和基体的力学性能参数见表 3。拉伸实验在中国科学技术大学材料重点实验室 MTS810 材料实验机上进行，包括面内经向、纬向的拉伸实验。

表 3　纤维和基体性能参数

Table 3　Parameters of fiber and resin

	Direction	Kevlar29	854-vinyl matrix
Tensile strength/MPa	Longitudinal	2800	82
Tensile Young's modulus/GPa	Longitudinal	70.0	3.28
	Transverse	6.2	3.28

3.2.2　算例 2

文献[13]为一篇关于 3D-OWC 的实验报告论文，Hirokawa 对日本 Shikibo 公司研制的 T300 纤

维 3D-OWC 进行了一系列的实验研究，得到许多实验数据。利用这些数据进行验证。文献中，2 种材料的纤维体积分数均为 60%，材料 1 在 x、y、z 方向的纤维体积含量比为 26∶64∶10；材料 2 在 x、y、z 三向的纤维体积含量比为 28∶69∶3。材料性能参数为：E_{fL} = 221 GPa，E_{fT} = 14 GPa，E_m = 3.5 GPa。

2 个算例的结果对比见表 4。由表 4 数据可知，本文公式与文献[12]的估算结果比较接近，和实验测量值较为吻合。计算误差主要和以下因素有关，如基体和纤维之间是否接触良好，成型过程中预压的大小，z 纱在试件表面的弯曲等。从公式表达式上来说，本文公式比文献[12]中公式简洁，更便于工程应用。

表 4　杨氏模量比较(E)

Table 4　Comparison of Young's modulus (E)　GPa

	1st example		Material 1 of 2nd example		Material 2 of 2nd example	
	E_x	E_y	E_x	E_y	E_x	E_y
Reference [12]	20.71	20.62	36.78	87.89	42.30	94.71
This paper	20.83	20.65	40.23	88.39	43.33	94.55
Experiment	18.35	18.15	38.40	79.50	44.30	104.10

Note: Material 1 with fiber volume fraction 60% and ratio in three directions $x:y:z=26:64:10$; Material 2 with fiber volume fraction 60% and ratio in three directions $x:y:z=28:69:3$.

4　结　论

(1) 在假设纤维束横截面为矩形的基础上，建立了 3D-OWC 的单胞模型，利用该模型得到了纤维体积分数和织物参数的关系式，该关系式中只有一个人为测量量 h，减少了更多的人为测量误差，并且表达式清晰明了，计算结果和实验测值较为吻合，说明了该关系式的正确性，可以应用于 3D-OWC 的生产和设计。

(2) 在假设纤维和基体均为线弹性材料的基础上，利用材料力学方法，通过对单胞模型建立力平衡方程得到 3D-OWC 的杨氏模量计算公式，该计算公式形式上比参考文献[12]中式子简单。并且通过算例对比计算，本文公式的计算结果和实验值较为吻合，说明了公式的可靠性，同时也指出了单胞模型在 3D-OWC 材料分析中的合理性和适用性。

参考文献：

[1] Antonio Miravete. 3D textile reinforcements in composite materials [M]. London: CRC Press, 1999.

[2] 易洪雷，丁　辛. 三维机织复合材料力学性能研究进展 [J]. 力学进展，2001，31(2)：161-171.
Yi Honglei, Ding Xin. Progressing in the study on mechanical properties of 3D woven composites [J]. Advances in Mechanics, 2001, 31(2): 161-171.

[3] Tan Ping, Tong Liyong, Steven G P, Ishikawa Takashi. Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composite Ⅰ: Experimental investigation [J]. Composite Part A, 2000, 31(3): 259-271.

[4] Tan Ping, Tong Liyong, Steven G P. Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites Ⅱ: FEA and analytical modeling approaches [J]. Composites Part A, 2000, 31(3): 273-281.

[5] Cox B N, Daskhah M S. Failure mechanisms of 3D woven composite in tension, compression and bending [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(12): 3967-3984.

[6] 戎　琦，邱夷平. 二维和三维机织复合材料的力学性能实验研究 [J]. 纤维复合材料，2006，23(6)：13-16.
Rong Qi, Qiu Yiping. Study on mechanical properties of 2D and 3D woven composites [J]. Fiber Composites, 2006, 23(6): 13-16.

[7] 吴华利，王　钧，杨小利，陆晓华，翟保利. 三维正交机织复合材料的力学性能 [J]. 高科技纤维与应用，2007，24(4)：19-22.
Wu Huali, Wang Jun, Yang Xiaoli, Lu Xiaohua, Zhai Baoli. Tensile and flexural properties of 3D orthogonal woven composites [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2007, 24(4): 19-22.

[8] Luo Yunsong, Lü Lihua, Sun Baozhong, Qiu Yiping, Gu Bohong. Transverse impact behavior and energy absorption of three-dimensional orthogonal hybrid woven composites [J]. Composite Structures, 2007, 81(2): 202-209.

[9] 杨彩云，李嘉禄. 三维机织复合材料纤维体积含量计算方法 [J]. 固体火箭技术，2005，28(3)：224-227.
Yang Caiyun, Li Jialu. Calculation methods of 3D woven composites fiber volume fraction [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2005, 28(3): 224-227.

[10] 郭兴峰，王　瑞，黄　故，郝志坚. 三维正交机织物参数对纤维体积含量的影响 [J]. 复合材料学报，2004，21(2)：123-127.
Guo Xingfeng, Wang Rui, Huang Gu, Hao Zhijian. Influence of 3D orthogonal woven fabric parameters on the fiber volume fraction [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 123-127.

[11] 郭兴峰，黄　故，王　瑞. 三维正交机织物结构的几何模型 [J]. 复合材料学报，2005，22(4)：183-187.
Guo Xingfeng, Huang Gu, Wang Rui. Geometric model of three dimensional orthogonal woven fabric structures [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(4): 183-187.

[12] 蔡敢为，陆俊华，廖道训. 三维正交纤维复合材料弹性性能细观力学分析 [J]. 华中理工大学学报，1996，24(4)：67-70.
Cai Ganwei, Lu Junhua, Liao Daoxun. A micromechanics analysis of the elastic properties of 3-D orthogonal woven fabric reinforced composites [J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 1996, 24(4): 67-70.

[13] Hirokawa T, Yasuda J, Wasaki Y. The characteristics of 3D orthogonal woven fabric reinforced composite [C]// Stinson J, ed. 36th International SAMPE Symposium. California: SAMPE, 1991.