复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第31卷 第1期 2月 2014年
Vol. 31 No. 1 February 2014

文章编号：1000-3851(2014)01-0213-07

复合材料螺栓联接螺纹载荷分布规律研究

廖 强[1]，卢子兴*[1]，杨振宇[1]，俸 翔[2]，张中伟[2]，冯志海[2]
（1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191；2. 航天材料及工艺研究所，北京 100076）

摘 要： 基于 Abaqus 有限元分析软件建立了复合材料螺栓联接的三维有限元模型，以预测复合材料螺栓联接的螺纹载荷分布，为使模型符合真实情况，将螺母支承在弹性地基上并通过 Abaqus USDFLD 子程序考虑了 C 基或 SiC 基复合材料拉压不对称特性。此外，本文对预测金属螺纹的载荷分布的 Yamamoto 方法进行了经验性的推广，使其可以反映 C 基或 SiC 基复合材料的各向异性和拉压不对称性。通过对比多组材料及几何参数下推广的 Yamamoto 方法(EYM)和有限元法(FEM)预测的螺纹载荷分布验证了推广的 Yamamoto 方法的有效性。研究结果表明：复合材料螺栓联接的载荷分布通常比金属联接的载荷分布更均匀；随着螺距与直径之比的增加，螺纹载荷分布不均程度有所增加；复合材料螺栓绕其轴线相对于螺母的转动对载荷分布几乎没有影响。

关键词： 复合材料螺栓联接；载荷分布；Abaqus；三维有限元模型；Yamamoto 方法
中图分类号： TB330.1 **文献标志码：** A

Study of load distribution in the threads of composite fasteners

LIAO Qiang[1], LU Zixing*[1], YANG Zhenyu[1], FENG Xiang[2], ZHANG Zhongwei[2], FENG Zhihai[2]
(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Institute of Space Material Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Three dimensional finite element model of composite fastener was established based on Abaqus to predict the thread load distribution of composite fasteners. In order to simulate the real situation, the nut was placed on an elastic foundation and the tension-compression modulus asymmetry of C or SiC matrix composites was considered by Abaqus users' subroutine USDFLD. Furthermore, Yamamoto's method for the metal threaded connections was empirically extended to the connections by C or SiC matrix composites with special consideration of the anisotropy and tension-compression modulus asymmetry. The effectiveness of the extended Yamamoto's method (EYM) was validated by finite element method (FEM) for different materials and different geometry parameters. The results show that the load distribution of composite fasteners is usually more uniform than that of the metal fasteners. In addition, the nonuniformity of load distribution increases with the pitch-to-diameter ratio, but the relative rotation of bolt and nut almost have no effect on the load distribution.

Keywords: composite fasteners; load distribution; Abaqus; 3D finite element model; Yamamoto's method

航天飞行器再入大气层时与空气剧烈摩擦，其头锥和襟翼表面温度可达 1 650 ℃左右[1]，这要求用于连接其热防护系统和机体结构的螺栓螺母具有优异的热物理和力学性能。金属紧固件存在低高温力学性能，大热膨胀系数、大密度等缺点，不能满足工程上日益提高的使用要求。C 基和 SiC 基复合材料具有耐高温、低热膨胀系数、高比强度和高比刚度、抗疲劳、耐磨损等优异性能，因此近年来 C 基和 SiC 基复合材料紧固件逐渐受到人们的关注[1-6]。文献[1]～文献[6]中制备了 C/SiC 或 C/C 复合材料紧固件并对它们的抗拉或抗剪力学性能进行了测试，发现复合材料紧固件承受拉伸载荷时容易发生螺纹拉脱失效，这种失效模式导致螺栓的强度不能得到充分地发挥，因此有必要对复合材料紧固件受拉时螺纹的受载规律进行研究。

目前关于螺纹载荷分布规律的研究基本上都是

收到初稿日期： 2013-03-01；**收到修改稿日期：** 2013-06-03；**网络出版时间：** 2013-06-07 17:37
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130607.1737.005.html
基金项目： 国家自然科学基金(11072015；11272030；10932001；11002011)
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与复合材料结构力学。 E-mail：luzixing@buaa.edu.cn

针对金属紧固件的，几乎没有关于复合材料紧固件的螺纹载荷分布的研究工作发表。金属紧固件螺纹载荷分布的研究方法可分为解析法、有限元法以及光弹试验法。解析法中，Sopwith 方法[7]、Yamamoto 方法[8]得到了较为广泛的认可。二者都将螺纹视为平面应变梁，根据螺栓螺母体和内外螺纹的轴向变形协调条件得到螺纹的载荷分布，主要区别在于考虑的螺纹轴向变形的种类及方式有所不同。有限元法可以直接模拟螺纹间的接触状态，易于考虑螺牙细节和材料的弹塑性性质，因而被广泛用于螺纹载荷分布的研究。文献[9－11]使用轴对称有限元模型研究了金属螺纹载荷分布，文献[12－13]则使用了三维实体模型。值得特别注意的是，文献[9－10]将螺母支承在弹性地基上而文献[11－13]则直接约束螺母底面的轴向位移，后三者得到的载荷分布集中度显著高于前两者。螺纹载荷分布的试验研究主要采用冻结应力光弹法，以 Hetenyi[14]和 Kenny 与 Patterson[15]的工作为代表，但是复合材料与树脂材质的光弹模型不具备相似性，不能使用光弹法测量复合材料螺纹的载荷分布。

相比于金属材料，C 基和 SiC 基复合材料具有显著的各向异性和拉压不对称性，基于轴对称假定的平面二维有限元模型和解析法以及只适合于各向同性材料的光弹试验法都不能用来研究复合材料螺纹的载荷分布。考虑到复合材料的各向异性，本文中采用三维有限元模拟复合材料螺栓联接的载荷分布，并通过 Abaqus USDFLD 子程序考虑 C 基和 SiC 基复合材料刚度的拉压不对称性。进一步，本文作者对 Yamamoto 方法做了经验性的推广，使之能够在一定程度上考虑复合材料的各向异性和拉压不对称性，推广后的 Yamamoto 方法与有限元模拟结果吻合得较好，并且保持了原始 Yamamoto 方法的简洁形式。

1　螺纹载荷分布的有限元模拟

1.1　三维有限元建模

螺纹联接的几何模型和有限元模型如图 1 所示。图中坐标系 $Ob_1b_2b_3$ 和 $On_1n_2n_3$ 分别为螺栓和螺母的局部坐标系，1 方向沿着螺栓或螺母的轴向（是材料的一个主轴），2、3 方向沿着螺栓或螺母横截面内的两个材料主轴。γ 为 $Ob_1b_2b_3$ 与 $On_1n_2n_3$ 的夹角。真实使用环境下螺母的底面是支承在被连接结构上的，因此如同文献[9]和文献[10]中所做的那样，本文将螺母置于弹性地基上。除特别说明外，弹性地基的厚度与螺栓公称直径相等，地基半径等于螺母的直径，地基中央开孔的直径比螺栓直径大 0.2 mm，螺母高度为螺距的 8 倍，螺母外径取 I 型六角螺母的对角线长度，螺牙为米制粗牙螺纹。螺栓、螺母、地基材料可取为钢、SiC/SiC[16]、C/SiC[16]、C/C[17]，其中 SiC/SiC 和 C/SiC 为平纹编织复合材料，C/C 为三维四向编织复合材料，各材料的弹性参数如表 1 所示。在未经说明的情况下，螺栓、螺母、地基取同种材料，地基厚度方向与复合材料的 3 方向重合。螺栓螺母采用 C3D4 单元，地基采用 C3D8R 单元。在内外螺纹表面之间及螺母下底面和地基上表面之间分别定义面面接触，摩擦系数均取 0.15。约束地基下底面轴向和环向的位移，在螺杆下底面施加 100 MPa 的均布拉伸载荷。

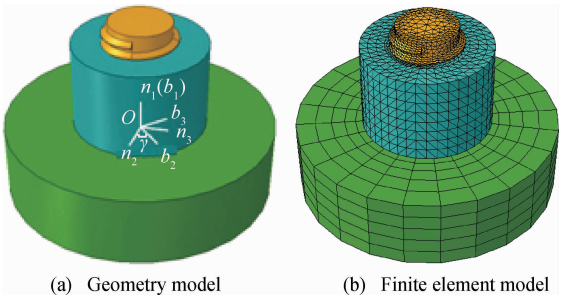


图 1　螺纹联接的几何模型和有限元模型

Fig. 1　Geometry model and finite element model of threaded connections

表 1　4 种材料的弹性常数[16-17]

Table 1　Elastic properties of four types of materials[16-17]

Material		E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	E_{33}/GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa
Steel	—	210			0.33					
C/SiC[16]	Tension	113	113	56*	0.04	0.16	0.16	40	28*	28*
	Compression	140	140	—	0.08	0.23	0.23	—	—	—
SiC/SiC[16]	Tension	147	147	124*	0.14	0.22	0.22	60	56*	56*
	Compression	170	170	—	0.20	0.26	0.26	—	—	—
C/C[17]	—	81.3*	17.2*	17.0*	0.60*	0.22*	0.21*	16.9*	10.7*	7.4*

Note: — denotes nondistinguish of tension and compression, and * denotes predicted values.

螺纹连接承受拉伸载荷时，螺杆主要受拉，螺母主要受压，螺牙则会受到弯曲、剪切、挤压载荷的共同作用。C 基和 SiC 基复合材料具有拉压不对称特性，本文中通过 Abaqus USDFLD 子程序考虑了这一特点。USDFLD 子程序根据单元主方向应变的符号确定应该使用拉伸模量还是压缩模量。泊松比对载荷分布影响很小[11]，本文中直接将拉压泊松做平均处理。

1.2　有限元模型的验证

为验证有限元模型的可靠性，本文与文献[9]及文献[12]关于金属螺纹载荷分布的模拟结果进行了比较(模型几何和材料参数完全按照对应文献选取)，结果如图 2 所示。三维模型中的螺牙是一条连续的曲线，本文中将高度等于螺距的一段螺纹定义为“一圈螺纹”，并从螺母承载面开始计数。文献[12]中直接约束了螺母承载面的位移，为与其比较取地基的弹性模量为螺栓螺母的10倍并称此种情况为“present work (rigid foundation)”，与文献[9]比较时地基模量与螺栓螺母取相同值。本文中所得螺纹载荷分布与文献结果吻合良好。

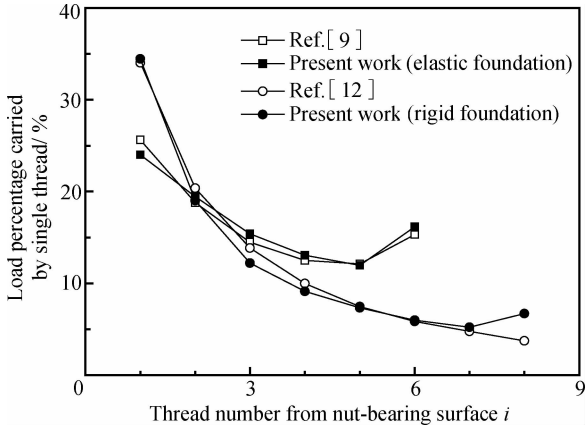


图 2　本文和文献预测的钢质紧固件的载荷分布

Fig. 2　Load distribution of steel fastener predict by this paper and references

2　推广的 Yamamoto 载荷分布分析方法(EYM)

Yamamoto[8]忽略螺纹升角，把螺牙视为平面应变梁，然后将螺牙的轴向变形分为螺牙弯曲引起的变形 δ_1 、螺牙剪切引起的变形 δ_2 、牙根倾斜引起的变形 δ_3 、牙根剪切引起的变形 δ_4 和螺栓螺母体径向收缩引起的变形 δ_5 (如图 3 所示)，最后根据螺牙和螺栓螺母体的变形协调条件导出了载荷沿着螺牙的分布情况。图 3 中：ω 为单位长度螺牙上作用的压力；α 为牙侧角。Yamamoto 方法比较准确地把握了螺牙的主要变形机制，因而得到学术界和工程界的广泛认可。

本文中仍旧将复合材料螺牙的轴向变形分为图 3 所示的 5 类。复合材料螺牙具有显著的各向异性，沿着周线方向(忽略螺牙升角)螺牙的轴向变形不是一个常数。为了沿用 Yamamoto 方法的理论框架本文将复合材料螺牙的各类轴向变形按某种平均的方式等效为一个常数。Nelson 等[18]在计算螺栓对复合材料层合板的挤压刚度时将复合材料等效为模量等于其两个面内模量均方值的各向同性材料，所得结果与实验吻合得很好。类似 Nelson 等的工作，对于图 3 所示的每一种变形，本文中首先确定影响此种变形的主要弹性常数，然后将这些弹性常数进行几何平均得到一个“等效模量”，最后将复合材料联接视为具有“等效模量”的各向同性联接并根据Yamamoto方法得到一个等效的变形。经

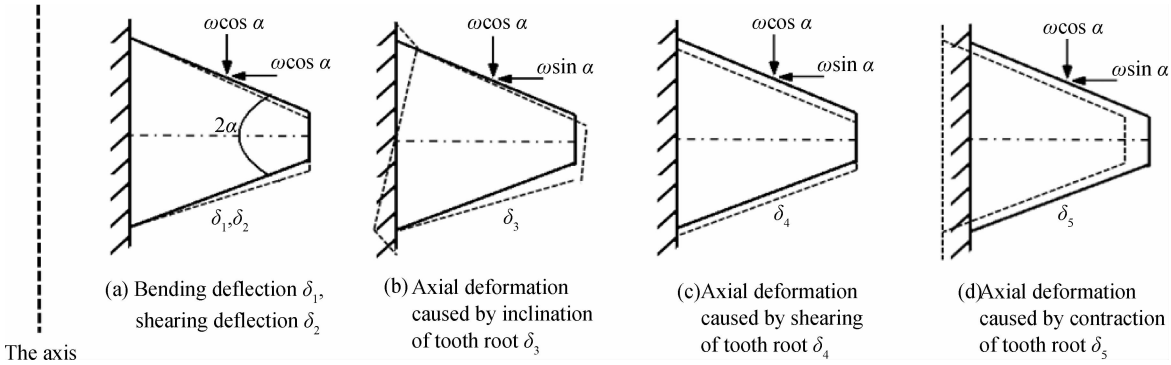


图 3　螺牙的各类轴向变形[8]

Fig. 3　Various kinds of axial deformation of threads[8]

此种处理后的 Yamamoto 方法可以在一定程度上考虑复合材料的各向异性和拉压不对称性，并且保持了原始 Yamamoto 方法简单易用的特性。

泊松比对载荷分布影响很小[11]，因此本文直接将金属联接内外螺牙的变形分量 $\delta_1 \sim \delta_5$ 表达式中的 ν_b 和 ν_n 分别替换为 ν_{beq} 和 ν_{neq}。ν_{beq} 和 ν_{neq} 如式(1)所示(鉴于篇幅所限，本文中不再给出金属螺牙各变形分量的具体表达式，读者可参阅文献[8]中第 4 章式(4.26)～式(4.29))。

$$\begin{cases}\nu_{beq} = (\nu_{bt12}\nu_{bt13}\nu_{bt23}\nu_{bc12}\nu_{bc13}\nu_{bc23})^{1/6} \\ \nu_{neq} = (\nu_{nt12}\nu_{nt13}\nu_{nt23}\nu_{nc12}\nu_{nc13}\nu_{nc23})^{1/6}\end{cases} \tag{1}$$

式中：b 表示螺栓；n 表示螺母；t 表示拉伸；c 表示压缩；1～3 表示螺栓或螺母局部坐标方向(如图 1 所示)。需要注意的是，局部坐标的 1 方向对应于与螺栓轴向平行的材料主方向(不一定是编号为 1 的材料主方向)，2、3 方向对应于螺栓螺母横截面内的两个材料主方向(不一定是编号为 2、3 的材料主方向)。

螺牙弯曲引起的变形 δ_1、牙根倾斜引起的变形 δ_3，及螺栓螺母体径向收缩引起的变形 δ_5，主要与螺栓螺母横截面内的两个模量有关，因此将金属外螺牙的变形分量 δ_{1b}、δ_{3b}、δ_{5b} 中的 E_b 替换为 E_{beq}，将金属内螺牙的变形分量 δ_{1n}、δ_{3n}、δ_{5n} 中的 E_n 替换为 E_{neq}。E_{beq} 和 E_{neq} 如式(2)所示。

$$\begin{cases}E_{beq} = (E_{bt22}E_{bt33}E_{bc22}E_{bc33})^{1/4} \\ E_{neq} = (E_{nt22}E_{nt33}E_{nc22}E_{nc33})^{1/4}\end{cases} \tag{2}$$

与螺牙剪切引起的变形 δ_2 和牙根剪切引起的变形 δ_4 相关的是复合材料的剪切模量，因此将金属外螺牙变形分量 δ_{2b}、δ_{4b} 中的 E_b 和金属内螺牙的变形分量 δ_{2n}、δ_{4n} 中的 E_n 分别替换为 $2(1+\nu_{beq})G_{beq}$ 和 $2(1+\nu_{neq})G_{neq}$。G_{beq} 和 G_{neq} 如式(3)所示。

$$\begin{cases}G_{beq} = (G_{b12}G_{b13}G_{b23})^{1/3} \\ G_{neq} = (G_{n12}G_{n13}G_{n23})^{1/3}\end{cases} \tag{3}$$

经以上调整后，得到的复合材料螺牙的总轴向变形 δ_b 和 δ_n 如式(4)所示。

$$\begin{cases}\delta_b = \delta_{1b} + \delta_{2b} + \delta_{3b} + \delta_{4b} + \delta_{5b} = \dfrac{k_{beq}}{E_{bt11}}\omega\cos\alpha \\ \delta_n = \delta_{1n} + \delta_{2n} + \delta_{3n} + \delta_{4n} + \delta_{5n} = \dfrac{k_{neq}}{E_{nc11}}\omega\cos\alpha\end{cases} \tag{4}$$

式中：

$$k_{beq} = 0.034(1-\nu_{beq}^2)c_{1b} + 0.229(1-\nu_{beq}^2)c_{1b} + 1.08c_{2b} + 1.18(1-\nu_{beq})c_{2b} + (1-\nu_{beq})\frac{\tan^2\alpha}{2}\cdot\frac{d_p}{p}c_{1b} \tag{5}$$

$$k_{neq} = 0.073(1-\nu_{neq}^2)c_{1n} + 0.294(1-\nu_{neq}^2)c_{1n} + \left(\frac{D_0^2+d_p^2}{D_0^2-d_p^2}+\nu_{neq}\right)\frac{\tan^2\alpha}{2}\cdot\frac{d_p}{p}c_{1n} + 1.15c_{2n} + 1.14(1-\nu_{neq})c_{2n} \tag{6}$$

$$c_{1b} = \frac{E_{bt11}}{E_{beq}}, c_{2b} = \frac{E_{bt11}}{2G_{beq}}, c_{1n} = \frac{E_{nc11}}{E_{neq}}, c_{2n} = \frac{E_{nc11}}{2G_{neq}} \tag{7}$$

式(4)～式(7)中：d_p 为螺栓中径；p 为螺距；D_0 为螺母外径。

复合材料螺栓和螺母体的轴向变形 ε_b 和 ε_n 分别和螺栓的轴向拉伸模量 E_{bt11} 及螺母的轴向压缩模量 E_{nc11} 有关，因此将金属螺栓 ε_b 中的 E_b 和金属螺母 ε_n 中的 E_n 分别替换为 E_{bt11} 和 E_{nc11}。经上述替换后，ε_b 和 ε_n 如下式所示：

$$\begin{cases}\varepsilon_b = \displaystyle\int_0^x \frac{F}{A_b E_{bt11}}\mathrm{d}x \\ \varepsilon_n = \displaystyle\int_0^x \frac{F}{A_n E_{nc11}}\mathrm{d}x\end{cases} \tag{8}$$

式中：x 为截面到螺母自由端的距离；F 为螺母 x 截面受到的轴向力；$A_b = \pi d_p^2/4$ 为螺栓等效截面积；$A_n = \pi(D_0^2 - d_p^2)/4$ 为螺母等效截面积。

在式(4)和式(8)的基础上，经与文献[8]相同的推导过程可得复合材料螺牙的载荷分布为

$$\frac{F}{F_b} = \frac{\sinh(\lambda_{eq}x)}{\sinh(\lambda_{eq}L)} \tag{9}$$

$$\lambda_{eq} = \sqrt{\frac{\dfrac{1}{A_b} + \dfrac{E_{bt11}}{E_{nc11}}\cdot\dfrac{1}{A_n}}{\left(k_{beq} + \dfrac{E_{bt11}}{E_{nc11}}k_{neq}\right)\tan\beta}} \tag{10}$$

式中：F_b 为螺栓光杆段受到的轴向力；β、L 为螺纹升角和螺母高度。

由式(9)可得到螺母轴力 F 的分布，再由两个距离等于螺距的截面的轴力做差，就可以得到一圈螺纹承担的载荷。通常 λ_{eq} 越大螺纹载荷分布越不均匀。各向异性对载荷分布的影响主要体现在式(7)中，对于式(7)中各项的取值，复合材料通常比金属大，因此复合材料螺栓 λ_{eq} 一般较相同几何参数的金属螺栓低，载荷分布也就更均匀。

3　结果与讨论

3.1　螺栓螺母相对转动对载荷分布的影响

在拧紧螺母的过程中，螺母绕螺栓旋转的角度不同会导致内外螺纹在局部的相对刚度发生变化(复合材料具有各向异性)。本节通过有限元法考察这种局部相对刚度变化对螺纹载荷分布的影响。螺

栓、螺母、地基的材料取 C/SiC，螺栓轴向沿着材料的 1 方向，螺母轴向和地基厚度方向沿着材料的 3 方向。螺栓公称直径 $d=10$ mm，螺距 $p=1.5$ mm。螺栓螺母的相对转角 γ 如图 1 所示，$\gamma=0°$ 时螺栓的局部坐标系与螺母的局部坐标系重合。γ 对载荷分布的影响如图 4 所示。

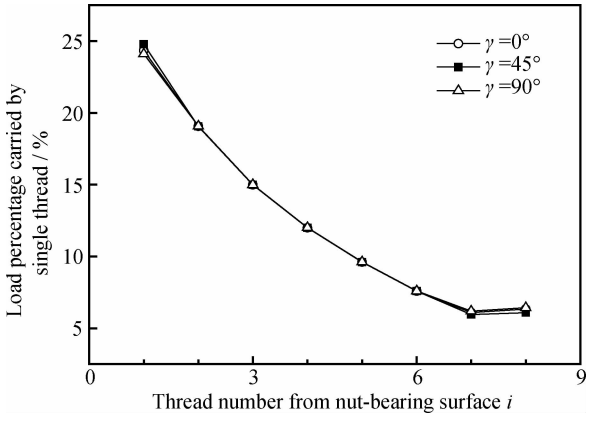


图 4　螺栓螺母相对转角 γ 对 C/SiC 复合材料紧固件载荷分布的影响

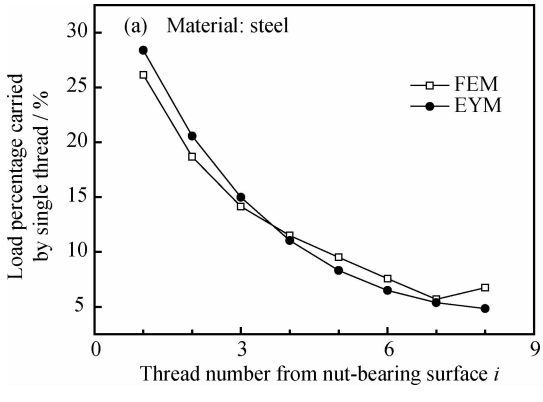
Fig. 4　Influence of the relative rotation angle γ on the load distribution of C/SiC composite fasteners

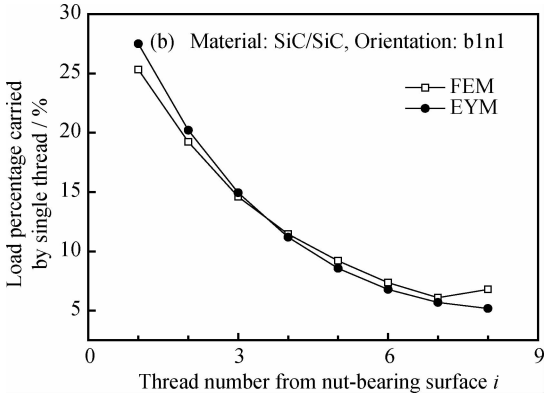
由图 4 可见相对转角 γ 对载荷分布几乎没有影响，因此螺纹的载荷分布主要依赖于一周螺牙的平均刚度而与螺栓螺母在局部的配合情况无关，这在一定程度上支持了本文中将复合材料模量等效为各方向模量的几何平均值的做法。

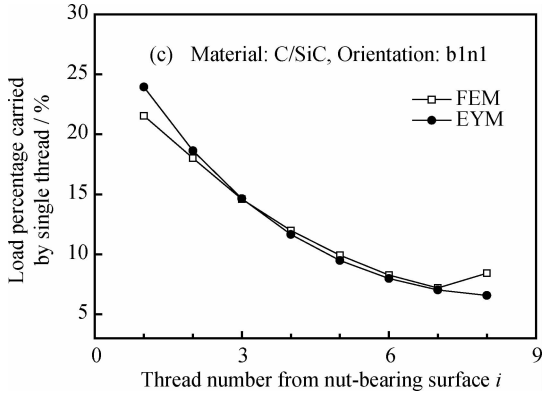
3.2　材质和取向对载荷分布的影响

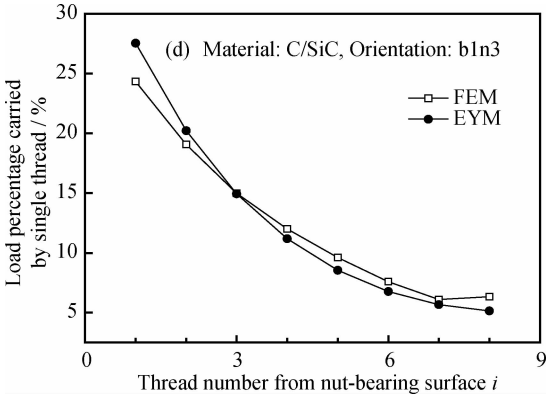
联接取不同材料或不同材料取向时用有限元法和推广的 Yamamoto 方法预测的螺纹载荷分布如图 5 所示。所有情况下，螺栓公称直径 $d=10$ mm，螺距 $p=1.5$ mm，其余几何参数按照 1.1 节确定。

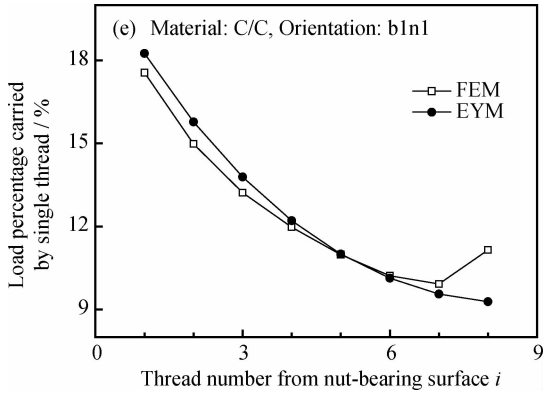
由图 5 可见，对于本文中所考虑的 4 种材料来

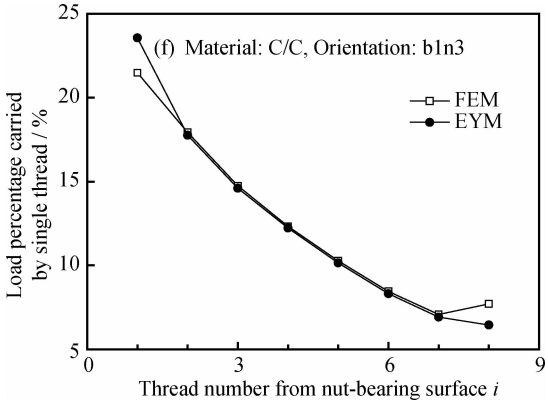












b1n3 means the axes of the bolt and nut are along the warp yarn direction and the thickness direction of the composite respectively. b1n1 can be explained in a similar manner.

图 5　有限元法和推广的 Yamamoto 方法预测的不同材料及不同材料取向紧固件的载荷分布

Fig. 5　Load distribution predicted by FEM and EYM for fasteners with different materials and material orientations

说，推广的 Yamamoto 方法预测值与有限元模拟的结果比较接近。总体上，复合材料螺栓联接的载荷分布比金属联接更均匀，这主要是因为复合材料沿纤维方向的拉伸模量与其剪切模量及横向拉伸模量的比值通常比金属高。纤维方向(螺栓螺母轴向)拉伸模量高意味着螺栓螺母体变形比较困难，二者的不协调变形小；剪切模量和横向拉伸模量低意味着复合材料螺牙和牙根更容易发生剪切和弯曲变形，螺栓螺母体的变形更容易被螺牙的变形所协调，因此复合材料螺栓的载荷分布一般比金属螺栓更均匀。SiC/SiC 复合材料比较接近各向同性，因此其载荷分布与钢质联接很接近。C/C 复合材料 1 方向拉伸模量与其剪切模量及横向拉伸模量的比值显著高于其他 3 种材料，因此 C/C 联接第一圈螺牙承载百分比显著低于其他几种材质的联接。C/SiC 和 C/C 复合材料 3 方向的刚度显著低于 1 方向的刚度，同 1 方向沿螺母轴向(图 5(c)和图 5(e))相比，3 方向沿着螺母轴向时(图 5(d)和图 5(f))螺母体会产生更大的变形且螺牙的弯曲刚度较大，螺牙和螺栓螺母体的变形协调更加困难，因此 3 方向沿螺母轴向时载荷分布更不均匀。所有子图中螺母承载面附近推广的 Yamamoto 方法的预测值均比有限元法的预测值偏高，这是因为 Yamamoto 方法只考虑了牙根的剪切变形和螺母径向的伸缩变形而忽略了螺母承载面的其他变形。

3.3　几何参数对载荷分布的影响

本文中进一步给出了不同公称直径 d 和螺距 p 下，两种方法得到的第一圈螺纹的承载比例，结果如表 2 所示。由表 2 可见，推广的 Yamamoto 方法和有限元法吻合得较好。类似于金属联接，影响螺牙载荷分布的主要几何参数是 p/d，随着 p/d 的增加螺纹载荷分布不均的程度有所增加，因为螺牙的刚度增加使变形协调变得更困难。

表 2　不同螺距与直径比的 C/SiC 复合材料紧固件靠近螺母受压面的第一圈螺纹的承载比例

Table 2　Load proportion carried by the first thread numbered from the nut-bearing surface for C/SiC composite fasteners with different pitch-to-diameter ratios

%

p/d	M10		M16		M20	
	FEM	EYM	FEM	EYM	FEM	EYM
0.125	22.0	25.2	22.5	25.7	22.9	25.9
0.150	24.3	27.5	24.9	28.2	25.5	28.4
0.175	26.6	29.7	27.9	30.4	27.8	30.6
0.200	28.9	31.7	30.1	32.4	29.9	32.6

Note: p/d is pitch-to-diameter ratio, the orientation of bolt and nut is b1n3.

4　结　论

(1) 应采用三维有限元模型模拟复合材料螺栓联接的载荷分布；直接约束螺母承载面会导致载荷分布显著偏高，应通过弹性地基支承螺母。

(2) 推广的 Yamamoto 方法可以比较准确地预测不同材料和几何参数下复合材料螺栓联接的载荷分布，并且形式简单易用。

(3) 复合材料的剪切模量与沿增强纤维方向的弹性模量之比通常显著低于金属的剪切模量和弹性模量之比，这使得复合材料联接的载荷分布一般比金属联接更均匀。

(4) 影响螺纹载荷分布的主要几何参数是 p/d (螺距与直径之比)，随着 p/d 的增加，载荷分布不均匀性有所增加。

(5) 螺母绕其轴线相对于螺栓的转动几乎不会对复合材料螺纹联接的载荷分布造成影响。

参考文献：

[1] 万玉慧. C/SiC 复合材料及其构件的制备与力学性能 [D]. 西安：西北工业大学，2005.
Wan Yuhui. Preparation and mechanical properties for C/SiC composites and components [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.

[2] Zhang Y N, Zhang L T, Cheng L F, et al. Fundamental issues of applications of C/SiC composites for re-entry

vehicles [J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2009, 10(3): 248-256.

[3] Mei H, Cheng L F, Ke Q Q, et al. High-temperature tensile properties and oxidation behavior of carbon fiber reinforced silicon carbide bolts in a simulated re-entry environment [J]. Carbon, 2010, 48(11): 3007-3013.

[4] Li G D, Zhang C R, Hu H F, et al. Preparation and properties of C/SiC bolts via precursor infiltration and pyrolysis process [J]. Rare Metals, 2011, 30 (1 Supplement): 572-575.

[5] Li G D, Zhang C R, Hu H F, et al. Preparation and mechanical properties of C/SiC nuts and bolts [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 547: 1-5 .

[6] 王　杰，李克智，郭领军，等，炭布叠层穿刺 C/C 复合材料螺栓连接件微观组织和力学性能 [J]. 固体火箭技术，2012，35(2)：248-252.
Wang Jie, Li Kezhi, Guo Lingjun, et al. Microstructure and mechanical properties of C/C composite bolt [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(2): 248-252.

[7] Sopwith D G. The distribution of load in screw threads[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1948, 159(1): 373-383.

[8] 山本晃. 螺纹联接的理论与计算 [M]. 郭可谦，高素娟，译. 上海：上海科学技术文献出版社，1984：45-52.
Yamamoto A. The theory and computation of threads connection [M]. Guo Keqian, Gao Sujuan, translated. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 1984: 45-52.

[9] Tanaka M, Miyazawa H, Asaba E, et al. Application of the finite element method to bolt-nut joints: Fundamental studies on analysis of bolt-nut joints using the finite element method [J]. Bulletin of JSME, 1981, 24(192): 1064-1071.

[10] Zhao H. A numerical method for load distribution in threaded connections [J]. Journal of Mechanical Design, 1996, 118(2): 274-279.

[11] 陈海平，曾　攀，方　刚，等. 螺纹副承载的分布规律 [J]. 机械工程学报，2010，46(9)：171-178.
Cheng Haiping, Zeng Pan, Fang Gang, et al. Load distribution of bolted joint [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 171-178.

[12] Chen J J, Shih Y S. A study of the helical effect on the thread connection by three dimensional finite element analysis [J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 191(2): 109-116.

[13] Sun Y J, Liao R D. The effect of helix on the nonlinear analysis of threaded connection [J]. Advanced Materials Research, 2011, 148-149: 1741-1744.

[14] Hetenyi M. A photoelastic study of bolt and nut fastenings [J]. Transactions of the ASME, 1943, 10(2): 93-100.

[15] Kenny B, Patterson E A. Load and stress distribution in screw threads [J]. Experimental Mechanics, 1985, 25(3): 208-213.

[16] Jacobsen T K, Brøndsted P. Mechanical properties of two plain-woven chemical vapor infiltrated silicon carbide-matrix composites [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2001, 84(5): 1043-1051.

[17] 袁　辉. 碳/碳复合材料刚度与强度预测模型研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2009.
Yuan Hui. Research on prediction models for stiffness and strength of C/C composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.

[18] Nelson W D, Bunin B L, Hart-Smith L J. Critical joints in large composite aircraft structure, DP-7266 [R]. 1983.