

平面机织复合材料低温力学性能数值分析与试验验证

周光明 王宁

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室,南京,210016)

摘要:建立了单向玻璃纤维增强复合材料及酚醛树脂基平面机织复合材料层合板周期性单胞三维(3-D)有限元模型,在两个模型的有限元分析中引入周期性边界条件,保证了周期性单胞边界面的应力和应变的连续性。通过有限元模拟获得单向纤维增强材料的各项力学参数。模拟了常温及低温情况下基体模量改变这两种情况下层合板拉伸、压缩和剪切的渐进损伤过程。引入合适的损伤起始和损伤扩展准则,预测了层合板在两载荷下的破坏过程。在常温和 -50°C 两种情况下,对平面机织复合材料进行了拉伸、压缩、剪切试验。将有限元模拟结果与层合板在常温和低温下的试验结果进行了对比,进一步讨论了影响酚醛树脂基复合材料层合板低温力学性能的因素,得出了材料在低温情况下力学性能优于常温情况,同时也用试验验证了分析方法的正确性。

关键词:复合材料;渐进损伤分析;力学性能;低温

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)06-0838-07

Numerical Analysis and Test Evaluation on Cryogenic Mechanical Properties of Two-Dimensional Woven Composite

Zhou Guangming, Wang Ning

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Three-dimensional periodic finite element models of unidirectional composites and phenolic resin matrix two-dimensional woven composite laminates are established. The periodical boundary conditions are applied to the finite element method (FEM) analysis of the two models to ensure stress continuous and strain continuous on boundary surfaces. The mechanical parameters of unidirectional composites are obtained by FEM analysis. The tensile, compression and shear progressive damage analysis of the laminates are simulated at normal temperature and when the modulus of phenolic resin is changed at the low temperature of -50°C . Appropriate criterions are chosen to predict the failure process of the laminates. The tensile, compression and shear tests are conducted at normal temperature and the low temperature of -50°C of the two-dimensional woven composite. The FEM results are compared with the experimental results to acquire the factors affecting the mechanical properties of phenolic resin matrix composite laminates at low temperature. The results prove that the mechanical properties of the composite at low temperature are better than those at normal temperature, verifying the correctness of the analysis method by the test.

Key words: composite materials; progressive damage analysis; mechanical property; low temperature

收稿日期:2014-01-06;修订日期:2014-06-18

作者简介:周光明,男,1966年生,博士,教授,博士生导师,主要从事先进复合材料结构设计及工程问题的计算机建模与仿真。

通信作者:周光明,E-mail:zhougm@nuaa.edu.cn。

复合材料在低温领域使用范围的增大使得其低温力学性能的研究越来越重要。中科院北京低温中心、北京科技大学等单位也对复合材料的低温力学性能进行了研究^[1]。目前对材料低温力学性能的研究主要为材料低温力学性能测试、理论的解释等,而将有限元模拟和试验数据结合评估复合材料低温力学性能改变原因的却很少。

从国外近几年的研究成果来看,低温下纤维增强复合材料的强度和模量会有不同程度的改变。已经进行的研究取得了一定的成果,国内外的专家对于材料在低温环境下力学性能改变的原因提出以下两种观点^[2-3]:(1)树脂基体的模量在低温下成倍数地增加,从而在材料承力过程中能够延缓破坏微缺口产生的应力集中现象;(2)随着温度的降低,在纤维和基体横向上产生不同程度的收缩,纤维和基体之间的作用力增大,从而增加了两种材料接触界面的滑动摩擦力和剪切强度。本文以平面编织复合材料为研究对象,针对上述两种观点,探究因温度改变在纤维和基体之间产生的温度应力及基体模量改变对复合材料力学性能的影响,并探究两者中哪一个是改变复合材料低温力学性能的主要因素。

本文研究的酚醛树脂基平面编织复合材料层合板是由纤维机织平纹布与酚醛树脂复合再铺层而形成。层合板一共 15 层,板厚度平均为 2.53 mm,单层材料的厚度为 0.169 mm。平纹机织布由一层经纱一层纬纱相互交织制成,因此在其面内具有严格的周期性,在厚度方向并没有表现出周期性特点。但是,在实际应用中平面机织结构大多数是由很多层叠加起来制作为层合板使用的。假设各层在厚度方向上规则铺设,忽略表面的影响,则内部各层在 3 个方向上均具有周期性。平面机织复合材料层合板纤维含量为 53%,由单层板厚度、经纬纱线宽度及经纬纱线之间缝隙的大小可以计算出纤维束的纤维含量约 75%。

建立了单向纤维增强复合材料细观模型,引入周期性边界条件,在常温、加入 -50°C 温度应力场和将基体树脂模量增加为常温时的 2 倍 3 种情况下,针对单胞模型的轴向拉压、横向拉压及剪切等过程进行数值模拟,得到了单胞模型即纤维束的轴向强度及模量,轴向压缩强度及模量,横向拉伸强度及模量,横向压缩强度及模量,以及剪切强度 S 及模量。建立酚醛树脂基平面机织复合材料单胞结构的 3D 有限元模型,模拟了常温、将基体模量增加常温时的 2 倍两种情况下的经向拉伸、经向压

缩及纵横剪切的损伤分析过程^[4],探究材料在低温环境下力学性能改变的原因。

1 单向纤维增强复合材料低温力学性能

在确定纤维束几何模型的时候认为纤维束是纤维均匀分布的单向增强复合材料,纤维的体积分数就是纤维的堆积密度^[5]。纤维束周期性单胞几何模型有多种选取方法,但是常用的就是两种:(1)假设纤维在纤维束中是规则的矩形排列,(2)假设纤维是六角形均匀排列。本文选用第一种假设建立六面体周期性单胞模型,并且对单胞施加周期性边界条件^[6],模型见图 1。

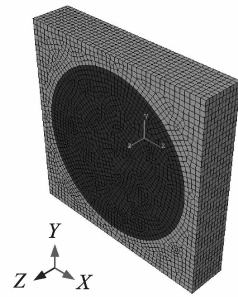


图 1 单向纤维复合材料六面体单胞模型

Fig. 1 Hexahedron model of unidirectional composite

玻璃纤维及基体都是各向同性材料,本文考虑基体单元刚度折减的方向性,因此两者的破坏准则均选用最大主应力准则。基体和纤维单元的损伤和刚度折减可以通过用户自行编写的材料准则来定义。

纤维和基体的材料参数以及纤维束单胞各项力学性能数值模拟结果分别见表 1 和表 2。

从表 2 可以看出,温度应力对单向纤维增强材料细观单胞的轴向拉伸压缩、横向拉伸压缩以及剪

表 1 酚醛树脂和玻璃纤维各项力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of phenol formaldehyde resin and glass fiber

材料性能	酚醛树脂	E 玻纤
拉伸模量/GPa	3.2	73
剪切模量/GPa	1.296	30
泊松比	0.3	0.22
拉伸强度/MPa	50	2 760
压缩强度/MPa	100	2 000
剪切强度/MPa	42.5	
热膨胀系数/(ppm · °C ⁻¹)	1 × 10 ⁻⁵	5 × 10 ⁻⁶

表2 纤维束单胞数值模拟结果

Tab. 2 Parameters of unidirectional composite

工况	E_1/GPa	E_2/GPa	G_{23}/GPa	X_T/MPa
常温	55.25	11.75	4.65	2 142
含-50℃温度场	55.93	11.90	4.67	2 106
基体模量加倍	56.10	23.05	8.92	2 186
工况	Y_T/MPa	X_C/MPa	Y_C/MPa	S/MPa
常温	35.25	1 561	56.00	58.25
含-50℃温度场	35.30	1 493	55.87	59.50
基体模量加倍	80.23	1 585	76.48	144.67

切性能都有一定的影响,但是影响很小。将基体材料的模量增加为常温时的2倍对单胞结构的轴向拉压性能的影响很小,但是对单胞结构的横向拉伸、压缩以及剪切性能的影响很大。将基体的模量加倍后,单胞结构的横向拉压强度、剪切强度、横向拉压模量均有大幅的增加,这是因为在横向拉压以及剪切有限元模拟中,基体破坏时单胞结构失去承载能力,而纤维最终保持完好的状态,单胞结构的横向拉压以及剪切性能主要是由基体的性能决定。

综上所述基体模量的改变是影响单胞结构力学性能的主要原因,而温度改变在单胞结构内部引起的温度应力场对纤维束单胞结构的各项力学性能影响很小,基本可以忽略。因此,接下来只研究基体模量的变化对平面编织复合材料各项力学性能的影响。

2 酚醛树脂基平面编织复合材料单胞模型的选取

建立在二维卷曲模型的基础上扩展出来的三维卷曲模型,此模型在三维空间内严格遵守纤维的编织规律,形象地体现了在层合板中每根纤维的走向以及界面形状,可以准确地模拟出平面机织复合材料的真实构型。

图2为平纹机织三维卷曲模型(其中Z向为经

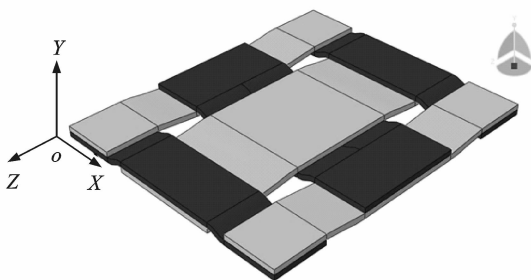


图2 平纹机织复合材料三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of two-dimensional woven composite

向,X向为纬向),纤维采用矩形截面假设^[7]。图3为平面机织复合材料层合板周期性单胞。模型需要的几何参数主要有:(1)经纱宽度;相邻经纱间空隙;纬纱宽度;相邻纬纱之间的空隙。(2)层合板单层厚度;织物厚度。以上数据可根据二维织物的经纬纱线的密度、纱线的规格、试件的层数与厚度以及纱线填充系数确定。

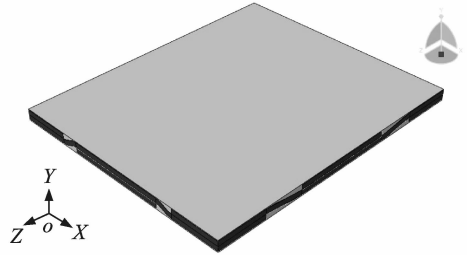


图3 复合材料层合板周期性模型

Fig. 3 Model of composite laminates

3 周期性单胞常温和低温有限元分析及结果

经纬纱线在浸润树脂后形成的具有一定纤维体积分量的纤维束可以视为横观各向同性材料,纤维束破坏后刚度性能的退化具有明显的方向性,如纤维束横向拉伸破坏并未影响其纵向的性能。基体是各向同性材料,本文需考虑基体破坏后单元刚度折减的方向性,因此基体的破坏选用最大主应力准则。

为了确保计算的准确性,在有限元分析中引入周期性边界条件,使模型边界在加载过程中满足应力和应变的连续性。在常温以及将基体模量改变为常温时的2倍两种情况下对平面编织复合材料单胞进行经向拉伸、经向压缩及纵横剪切的数值模拟,纤维束及基体的各项力学参数见表2。

3.1 两种情况下平面编织复合材料单胞经向拉伸分析

图4和图5分别为对模型施加拉伸载荷后纤维和基体的经向应力分布云图。从图4中可见,由于纤维束的纵向模量远高于横向模量,因此在经向拉伸情况下,经向纤维束具有较高的应力水平,其承担了大部分的拉伸载荷。经向纤维束的最大应力出现在相邻两纬向纤维束之间。纬向纤维束平均应力水平很低,但是在经纬向纤维束交接部分的边缘处存在明显的应力集中。由图5可以看出,基体的应力水平也相对较低,但是纬向纤维束边缘区域的基体中具有较高的应力水平。

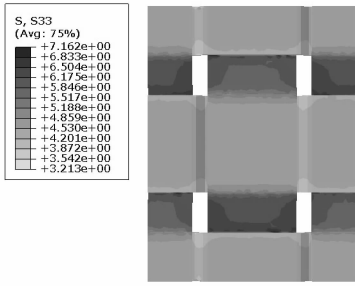


图 4 纤维束经向应力分布云图(拉伸)

Fig. 4 Meridional stress nephogram of fiber bundles (stretch)

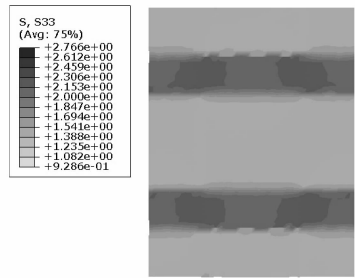


图 5 基体经向应力分布云图(拉伸)

Fig. 5 Meridional stress nephogram of matrix (stretch)

在经向拉伸过程中,随着载荷的不断增大,损伤最先出现在经纬纱相交处的基体上,然后扩大至基体表面,直至单胞的表面,基体失效。基体的最终破坏模式见图 6。



图 6 基体破坏模式

Fig. 6 Failure mode of matrix

纱线的损伤开始于经纬向纱线交接处,由于经向纤维束为拉伸的主要承载体,因此当最后经向纤维束达到其拉伸强度,发生断裂的时候周期性单胞失效。整个过程中,纬纱并没有完全损伤断裂失效,其保持了较为完好的状态。纬纱最终破坏形式见图 7。

图 8 为两种情况下有限元数值模拟应力-应变图。

从图 8 可以看出,两种情况下的模拟曲线在破



图 7 纬纱最终破坏模式

Fig. 7 Failure mode of zonal fiber bundles

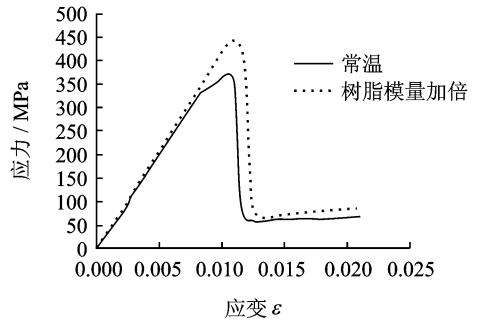


图 8 单胞结构在两种情况下拉伸应力-应变图

Fig. 8 Tensile stress-strain figure in two conditions of composite laminates model

坏未发生前呈良好的线性分布,选取此部分曲线的点计算单胞的经向弹性模量,选取模拟曲线的最高点为单胞的拉伸强度。当经向纤维束出现损伤的时候,单胞的应力水平急剧减小。从图 8 可以看出,基体模量加倍可以有效地增加酚醛树脂基平面机织复合材料经向拉伸强度,而两种情况下单胞的拉伸模量基本相同。

3.2 层合板周期性单胞 Z 向压缩分析

图 9 和图 10 分别为单胞模型承受经向压缩载荷时纤维和基体未破坏时的应力云图。

从图 9 可以看出,与单胞结构承受经向拉伸载

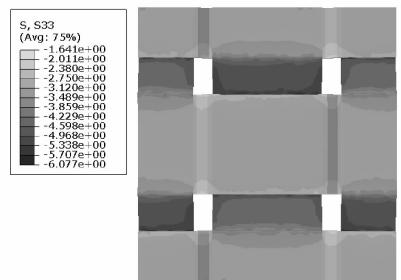


图 9 纤维束经向应力分布云图(压缩)

Fig. 9 Meridional stress nephogram of fiber bundles (compress)

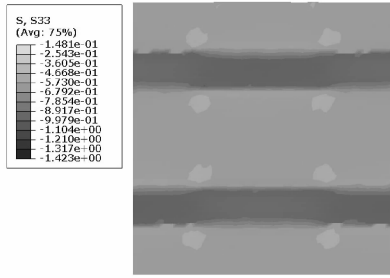


图 10 基体经向应力分布云图(压缩)

Fig. 10 Meridional stress nephogram of matrix (compress)

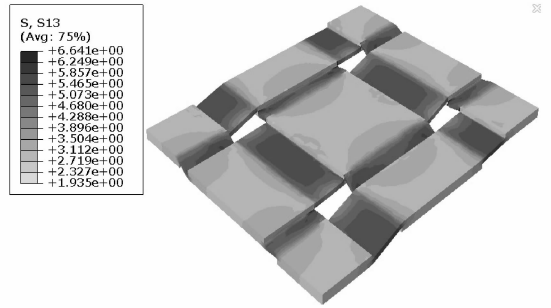


图 12 纵横剪切纤维应力分布云图

Fig. 12 Shear stress nephogram of fiber bundles

荷时相似,经向纤维束具有较高的应力,承担了大部分压缩载荷,基体中的应力水平相对较低,但是靠近纬向纤维束边缘处的基体单元应力集中现象比较严重。

在加载过程中纱线破坏的起始点在经纬纱线的交接处,基体和纱线的破坏过程和单胞结构承受经向拉伸载荷的情况基本一致,最后纱线和基体损伤破坏图也和经向拉伸情况类似,在此就不加以赘述。

图 11 为有限元模拟两种情况下经向压缩过程中单胞的应力应变曲线。

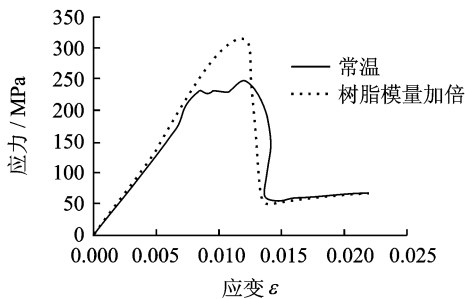


图 11 单胞结构在两种情况下压缩应力-应变图

Fig. 11 Compressive stress-strain figure in two conditions of composite laminates model

取单胞破坏前曲线中线性段部分计算得到材料的压缩模量,并取曲线最高点的应力值为材料压缩强度。

从有限元数值模拟的过程可以看出:单胞结构无论是承受拉伸载荷还是压缩载荷,其性能主要是由平行于加载方向的纱线性能决定的,纱线完全破坏则单胞结构由于失去承载能力而失效。

3.3 层合板周期性单胞纵横剪切性能分析

图 12 和图 13 分别为周期性单胞承受剪切力未破坏时纤维和基体的应力分布图,从应力图可以看出,经纬向纱线承担的剪应力水平基本一致,纤维束的边缘处存在较为严重的应力集中现象。

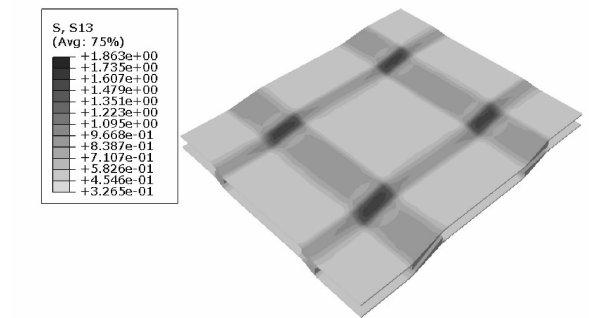


图 13 纵横剪切基体应力分布云图

Fig. 13 Shear stress nephogram of matrix

在模拟的过程中还可以看出单胞在承受剪切力的过程中,无论是纤维束还是基体,其相对边界面上对应点的应力水平完全相同,应力分布严格满足周期性单胞结构的应力连续条件。

由于经纬向纤维束相交的各角点区域具有较高的应力水平,该区域的纤维束在加载过程中会最先达到纵向剪切强度而破坏。从图 12 可以看出在施加剪切载荷的过程中经纬纱的应力水平基本一致,因此损伤沿着经纬纱线双向扩展至最终破坏。损伤在纱线和基体上的扩展见图 14 和图 15。

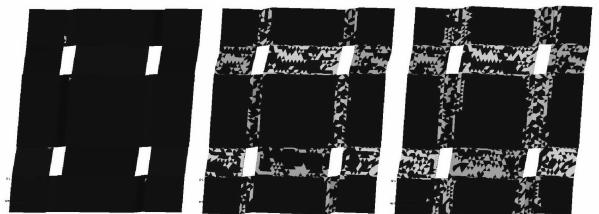


图 14 单胞结构承受剪切力情况下纤维的损伤过程

Fig. 14 Failure process of fiber bundles

图 16 为两种状态下对单胞结构施加纵向剪切载荷过程中其应力-应变图。

由图 16 所示结合有限元模拟损伤过程,当纤维束的边缘处存在较为严重的应力集中现象。

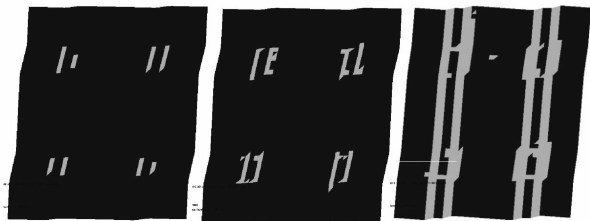


图 15 单胞结构承受剪切力情况下基体的损伤过程

Fig. 15 Failure process of matrix

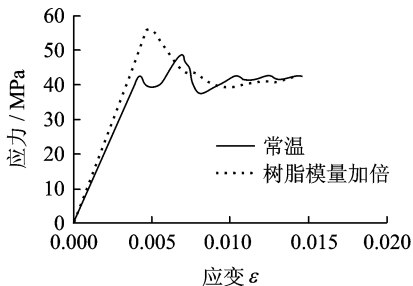


图 16 单胞结构在两种状态下剪切应力-应变图

Fig. 16 Shear stress-strain figure in two conditions of the composite laminates model

维束出现破坏后,单胞承载有轻微的下降,总载荷继续增加,这表明纤维初始的破坏对单胞的剪切刚度影响很小。随着加载位移的增加,基体单元出现破坏,曲线又有一定程度地下降,这是因为基体单元出现破坏后,因为其周围的部分纤维纱线已经破坏并且失去了承载能力导致整体单胞平均应力水平降低。取应力-应变曲线中初始破坏出现前线性部分斜率为单胞的剪切模量,并取第一个峰值为单胞的强度。从图 13 可以看出,将基体模量加倍可以有效地提高单胞模型的剪切强度,同时剪切模量也会有微小的增加。

4 层合板拉伸、压缩、剪切试验结果

为了更加准确地探究影响酚醛树脂基纤维增强复合材料层合板低温力学性能的因素,对层合板进行了常温和-50℃低温下的拉伸、压缩和剪切试验。有限元数值模拟结果及试验结果见表 3。

表 3 有限元及试验结果

Tab. 3 Results of numerical analysis and test

状态	拉伸		压缩		剪切	
	模量/ GPa	强度/ MPa	模量/ GPa	强度/ MPa	模量/ GPa	强度/ MPa
常温试验	25.89	379.14	28.29	265.75	1.52	43.01
常温模拟	20.06	371.46	26.85	246.37	1.19	30.37
低温试验	24.01	523.79	33.55	304.60	2.10	51.88
低温模拟	20.19	444.71	27.46	314.48	1.28	40.41

表 3 的有限元数值模拟及试验数据具有一致性:-50℃低温情况下材料的拉伸、压缩和剪切强度都有大幅度的提高,因此影响复合材料低温力学性能的主要原因是基体模量在低温下的成倍数增加,而不是基体和纤维之间的温度应力。

有限元模拟结果和试验数据在常温和低温下具有一致性也有一定的差异,原因分析如下:(1)酚醛树脂的力学参数会随着复合材料制作流程的变化而产生极大的差异,本文选取的树脂参数是经验参数,与试验所使用的酚醛树脂不一定相符;(2)树脂在低温下基体模量会成倍的增加,具体增加数值却是未知的,本文选取的树脂低温参数为常温参数的 2 倍,因此有限元数值模拟的结果会和试验结果产生一定的误差。

通过有限元模拟和试验验证可以发现,影响平面编织复合材料低温力学性能的主要原因是低温下基体模量的增加,而因温度降低在基体和纤维之间产生的温度应力不是影响平面编织复合材料低温力学性能的主要原因。

5 结 论

本文建立了单向纤维增强复合材料单胞,在常温、加入-50℃温度应力场和将树脂基体模量加倍 3 种情况下针对单胞模型的轴向拉压、横向拉压及剪切等过程进行数值模拟,得到了单胞模型即纤维束的轴向强度及模量,轴向压缩强度及模量,横向拉伸强度及模量,横向压缩强度及模量,以及剪切强度 S 和模量。建立酚醛树脂基层合板周期性单胞,对单胞施加周期性边界条件,并进行了常温和将基体模量加倍两种状态下的经向拉伸、经向压缩和纵横剪切的有限元损伤模拟,获得了 3 种载荷下材料的强度和模量数据。并且通过酚醛树脂基层合板常温和-50℃低温的拉伸、压缩和剪切试验,获得了材料常温和低温的试验数据,对比有限元模拟和试验数据得出以下结论:

(1)对层合板单胞施加周期性边界条件可以有效地提高有限元模拟的准确性。

(2)酚醛树脂基平面编织复合材料在低温下的力学性能,尤其是拉伸、压缩和剪切强度有大幅度的提高,可以说材料在低温下的力学性能优于常温。

(3)复合材料在低温下各项力学性能的提高主要是基本在低温环境下模量的成倍增加引起的。由于基体和纤维的热膨胀系数不同,低温环境下纤维和基体横向收缩不同而产生的温度应力对层合

板材料在低温下的力学性能的影响很小。

参考文献:

- [1] 曾庆敦, 邹波. 单向复合材料在低温下的应力集中及强度[J]. 航空材料学报, 2005, 25(1): 58-62.
Zeng Qingdun, Zou Bo. Stress concentrations and strengths of unidirectional composites at cryogenic temperature[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(1): 58-62.
- [2] Reed R P, Golda M. Cryogenic properties of unidirectional composites[J]. Cryogenics, 1994, 34(11): 909-928.
- [3] Reed R P, Golda M. Cryogenic composite supports: A review of strap and strut properties[J]. Cryogenics, 1997, 37(5): 233-250.
- [4] 王新峰. 机织复合材料多尺度渐进损伤研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
Wang Xinfeng. Multi-scale analysis of damage evolution in woven composites materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [5] Hearle J W S, Grosberg P, Backer S. Structural mechanics of fibers, yarns, and fabrics [M]. New York: Wiley-Interscience Publisher, 1969.
- [6] 王新峰, 周光明, 周储伟, 等. 基于周期性边界条件的机织复合材料多尺度分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(6): 730-735.
Wang Xinfeng, Zhou Guangming, Zhou Chuwei, et al. Multi-scale analyses of woven composite based on periodical boundary condition[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(6): 730-735.
- [7] 余育苗, 王肖钧, 李永池, 等. 三维正交机织复合材料的单胞模型及应用[J]. 复合材料学报, 2009, 26(4): 181-185.
Yu Yumiao, Wang Xiaojun, Li Yongchi, et al. Cell model of 3D orthogonal woven composite and its application[J]. Acta Mater Compos Sin, 2009, 26(4): 181-185.