涂层织物类膜材简化桁架模型研究

马 奔，郝圣杰，徐俊豪*，赵玉帅

（中国矿业大学江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，徐州 221116）

摘要：在单胞模型的基础上，提出了一种用于预测涂层织物类膜材料力学性能的简化桁架模型。根据组分材料拉伸试验数据，选取以真应变为变量的四次多项式描述纤维束拉伸非线性行为，采用理想弹塑性模型反映涂层的力学响应，并结合扫描电镜试验获取膜材的细观结构尺寸参数。通过 ABAQUS 有限元软件及 UMAT 子程序实现上述模型，对膜材的拉伸性能进行预测。结果表明：整体预测结果较好，最大误差约为 20%。形成误差的主要原因是纤维束间及纤维束与涂层间的接触非线性不能在模型中得到体现。

关键词：涂层织物类膜材；简化桁架模型；力学性能；非线性

中图分类号：TB332 **文献标识码**：A **文章编号**：1003-0999(2018)12-0016-06

1 引 言

涂层织物类膜材为复合材料，由纤维基布、涂层及面层组成。纤维基布由纤维构成的纺纱线编织而成，它决定了膜材的主要力学性能。涂层主要保护基布，同时还具有自洁、抗污染、提高耐久性等作用[1,2]。建筑用膜材一般采用平纹编织或巴拿马编织，涂层织物的基层材料可采用碳纤维、芳纶纤维、聚酯纤维和玻璃纤维等，涂层材料则有聚氯乙烯、聚四氟乙烯、硅酮和聚氨酯等。常用的涂层织物类膜材主要有外涂聚四氟乙烯的玻璃纤维类膜材（一般称为 PTFE 膜材）和外涂聚氯乙稀的聚酯纤维类膜材（一般称 PVC 膜材）两种[4]。

建筑膜材特殊的构成决定了其力学性能与传统的建筑材料完全不同[3]。膜材属于柔性材料，只有在受拉状态下才具有刚度，具有很强的材料非线性、非弹性和粘弹性，受加载大小、比例及加载历史等影响明显[4]。传统对膜材料力学性能的研究多在宏观层次[5]，主要集中在基本力学指标的测量，如抗拉强度、断裂延伸率、撕裂强度、弹性模量、剪切模量等[6-8]。近年来随着计算机技术的发展，数值模拟在编织复合材料力学性能表征方面得到了广泛运用，尤其在复合材料的渐进损伤行为研究上。常用的研究思路为结合微观观测手段，通过 CAD 得到编织复合材料复杂的几何构型，结合细观力学方法获取组分材料的力学本构模型，并利用有限单元法、边界元方法、离散元法等对材料的力学性能进行离散计算[9,10]。但该方法建模过程较为复杂，运算量较大，且组分材料参数不易获取[11]。为了弥补上述缺陷，不少学者提出了基于编织材料三维细观结构的简化模型，包括 Peirce 模型、Testa 模型、空间桁架模型、网格模型、Pargana 模型等[4]。该类模型通常对编织纤维束进行了简化，有效缩短了建模过程，但一些较为复杂的力学响应难以体现，如纤维束间的相互作用、纤维束与涂层间的相互滑动等[12,13]。

涂层织物类膜材料的力学性能由其基布决定，基布由增强纤维编织而成。因此，要准确预测膜材料的力学性能，需建立能真实反映膜材料细观结构及各组分材料力学性能的模型[2]。本文在单胞模型的基础上，将增强纤维束等效成弦杆，提出了一种适用于膜材力学性能预测的简化桁架模型。根据组分材料拉伸试验数据，模型中选取能反映组分材料非线性力学行为特点的本构模型，结合微观扫描电镜试验获取细观结构尺寸，通过 ABAQUS 有限元软件及 UMAT 子程序实现上述模型。该模型有效地简化了建模及计算过程，充分考虑了组分材料的非线性性能，避免了施加周期性边界条件使用，可以较为准确地预测膜材料的拉伸力学性能，为进一步从膜材的细观结构及组分材料上改进其力学性能奠定理论基础。

收稿日期：2018-09-10

基金项目：国家自然科学基金项目（51678563）

作者简介：马奔（1988-），男，硕士，主要从事复合材料方面的研究。

通讯作者：徐俊豪（1993-），男，博士研究生，主要从事复合材料方面的研究，xujunhao-93@cumt.edu.cn。

2　组分材料拉伸试验

本文以一种常见的 PVC 膜材为例,材料基本参数如表 1 所示。该膜材的基布、涂层及成品均由厂家提供,应厂家的保密要求,材料命名为 P 膜材。从 P 膜材的基布上拆下单根经、纬向纤维束进行单轴拉伸试验。根据《涤纶工业长丝》(GB/T 16604—2008)[14],纤维束试样尺寸如图 1 所示,拉伸速度为 500 mm/min,预拉力为 6 cN。同时对涂层、基布及膜材进行单轴拉伸试验,试验参照《膜结构检测技术规程》[15],试样采用长条形试件,膜材试样尺寸如图 2 所示,拉伸速度为 100 mm/min。试验温度为(23±2)℃,相对湿度为 65%±3%,试验仪器为新三思系列微机控制电子万能试验机,试验过程主要记录力-位移曲线。

表 1　材料参数

Table 1　Material parameters

膜材类型	厚度 /mm	重量 /g·m^{-2}	纤维束强度 /N	纤维丝密度 /Dtex	拉伸强度 /N·(5 cm)$^{-1}$		撕裂强度 /N	
					经向	纬向	经向	纬向
P 膜材	0.4	800	205	1000	4000	3500	550	500

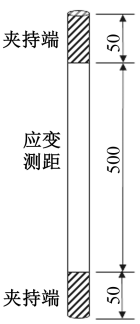


图 1　纤维束拉伸示意图

Fig. 1　Drawing of fiber bundle



图 2　膜材拉伸示意图

Fig. 2　Drawing of film material

2.1　纤维束拉伸试验结果

纤维束作为膜材的主要组成部分,由大量单根纤维丝加捻而成[2]。考虑到在拉伸过程中,在拉力的作用下纤维束截面会不断缩小,因此本文采用真应力-真应变曲线描述单根纤维束的力学性能。由图 3 可知,纤维束力学性能呈现显著的非线性,且经、纬向纤维束拉伸曲线基本一致。由于纤维束加捻工艺的影响,拉伸曲线前部呈现先凸后凹,在后期纤维束完全拉直后曲线趋于直线,此时其力学行为由单根纤维丝的力学性能所决定。

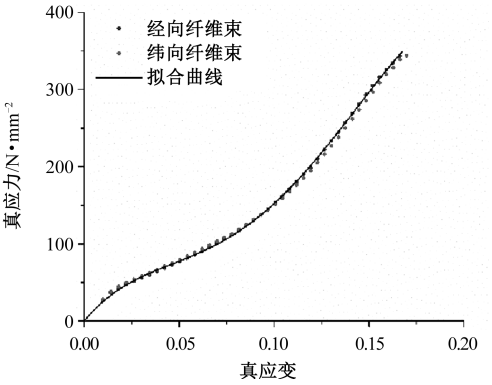


图 3　纤维束真应力-真应变曲线

Fig. 3　True stress-true strain curve of fiber bundles

2.2　涂层拉伸试验结果

图 4 为 P 膜材涂层的拉伸应力-应变曲线。从图中可以看出涂层是一种较为理想的弹塑性材料。采用最小二乘法对其进行分段拟合,得到其屈服应力为 13.28 MPa。值得注意的是,涂层的拉伸极限应变远大于纤维束,因此在膜材拉伸过程中,往往是纤维束首先破坏,既而导致此处的涂层出现相应破坏,最终出现试件整体拉断。

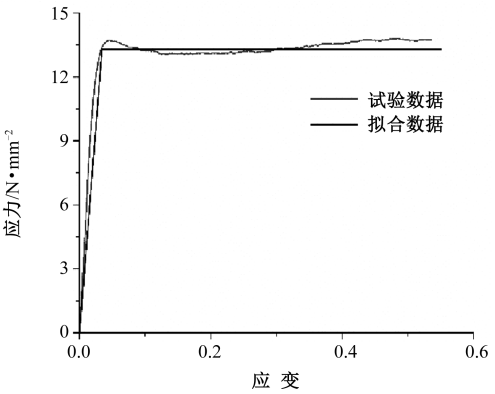


图 4　涂层拉伸应力-应变曲线

Fig. 4　Coating tensile stress-strain curve

2.3　基布与膜材拉伸试验结果

图 5 为 P 膜材及其基布的拉伸应力-应变曲线。从图中可以看出,基布的拉伸力学行为呈现显著的非线性。其拉伸曲线有两个转折点,可分为三个阶段:第一阶段是经、纬向纤维束由卷曲到绷直阶段,该阶段纤维束的力学性能没有得到体现,此时拉伸模量比较小;第二阶段是基布弹性响应阶段,此时基布的拉伸模量较大,其力学性能由纤维束数量及其本身力学性能所决定;第三阶段为基布塑性响应阶段,此阶段初期由于荷载的不断增加,纤维束进入塑

性阶段,拉伸模量减小。当荷载增加至纤维丝的极限荷载时,纤维丝开始出现断裂,拉伸曲线呈现波动,基布的极限承载力逐渐下降,直至基布完全失效。

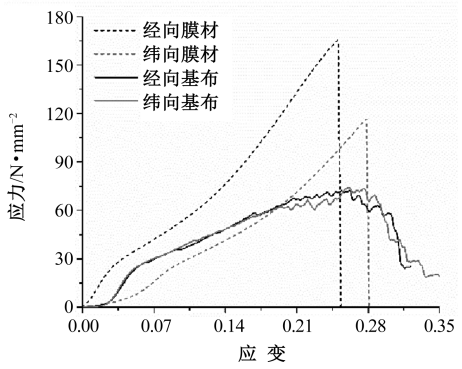


图 5 基布及膜材拉伸应力-应变曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain curves of base fabric and membrane material

从图 5 中可以看出,P 膜材的力学行为同样呈现显著的非线性。但是值得注意的是,膜材的经、纬向力学行为差异明显,而基布的经、纬向力学行为基本一致。这主要是由膜材的加工工艺造成的,在基布加工至膜材的过程中,经向纤维束被拉直,并在此基础上进行涂层的贴合。因此,膜材的经向拉伸应力应变曲线不存在初始的纤维束由卷曲至绷直阶段,从图 5 中膜材经向拉伸曲线的初始阶段与基布的弹性阶段曲线几乎平行可以印证。在涂层贴合工艺的作用下,膜材的抗拉强度由基布显著提升,经、纬向膜材抗拉强度的差异主要是由两向纤维编织密度的差异引起的。上述表明,涂层织物类膜材由于其组分材料自身性能的材料非线性、拉伸过程中编织结构卷曲转换的几何非线性及保证各组分材料间协同受力的摩擦接触非线性,使其力学行为呈现大变形、非线性等特点。

3 涂层织物类膜材简化桁架模型

3.1 简化桁架模型

为获取膜材的细观结构,对 P 膜材的经、纬向横断面进行电镜扫描试验,扫描结果如图 6 所示。从图中可以看出,纤维束横截面为梭形,且呈周期性分布,为便于模型的建立,本文假定经、纬向纤维束横断面尺寸一致。根据该特点,将膜材内部的经、纬向纤维束等效成弦杆,纤维束连接处的相互作用以及涂层对纤维束的固定作用统一简化成撑杆,如图 7 所示。另外,涂层简化为矩形块体,且纤维束嵌入涂层内。

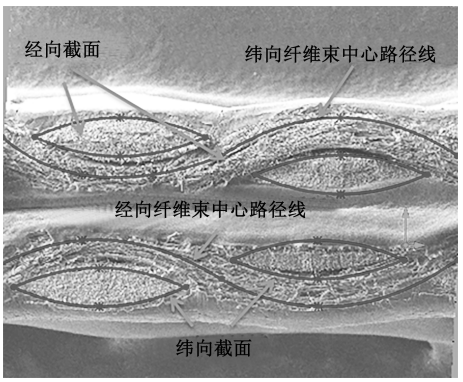


图 6 P 膜材横断面电镜扫描图片

Fig. 6 Cross section electron microscopy of P film

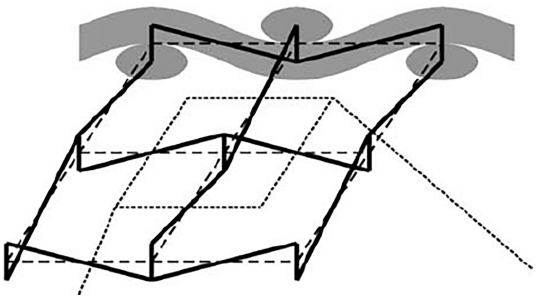


图 7 纤维束简化模型

Fig. 7 Simplified model of fiber bundle

根据 P 膜材横断面的电镜扫描结果确定膜材中弦杆的尺寸。其中,撑杆的长度取经、纬向纤维束截面中心点连线的长度,值为 0.4 mm,撑杆之间的间距为 0.94 mm。将相邻撑杆依次连接,即可得到内部纤维束的简化桁架模型。为减少尺寸效应对模型预测结果的影响,建立 4×4 个单胞模型组成的简化桁架模型,模型的几何尺寸及建模流程如图 8 所示。

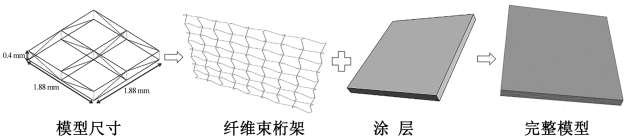


图 8 简化桁架模型建模流程

Fig. 8 Simplifies the modeling process of the truss model

3.2 组分材料本构模型

为了准确地描述纤维束的非线性行为,采用四次多项式对纤维束拉伸曲线进行拟合,拟合结果如图 3 及式(1)所示。对式(1)进行求导获取其切线模量随真应变的变化关系,结果如式(2)所示。选取横观各向同性本构模型来描述纤维束的力学行

为,其中,通过切线模量的变化描述纤维束拉伸非线性行为。另选取最大主应力准则作为纤维束失效准则,当纤维束的最大主应力达到极限拉应力时,令纤维束的拉伸模量折减为 0,以表示纤维束的失效,纤维束的极限拉应力由拉伸试验获取,其值详见表 1。为保证有限元计算过程中不出现零刚度矩阵,令纤维束压缩模量为 100 MPa。涂层采用理想弹塑性本构模型,失效准则为 Mises 应力准则。上述模型通过 ABAQUS 软件自定义材料子程序 UMAT 实现。

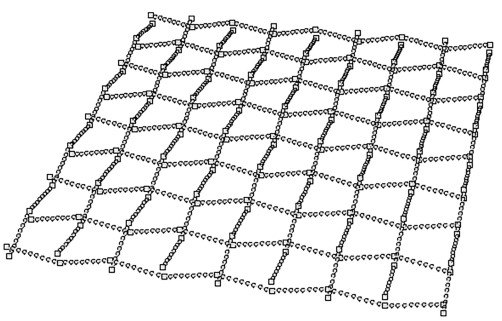
$$\sigma_1 = 2753.9 \times \varepsilon_{11} - 41295.3 \times \varepsilon_{11}^2 + 356167.8 \times \varepsilon_{11}^3 - 900337.4 \times \varepsilon_{11}^4 \quad (1)$$

$$E_{11} = 2753.9 - 82590.6 \times \varepsilon_{11} + 1068503.4 \times \varepsilon_{11}^2 - 3601349.6 \times \varepsilon_{11}^3 \quad (2)$$

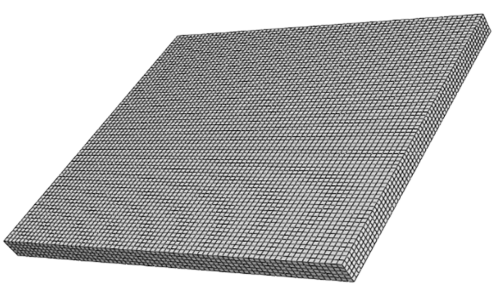
式中:σ_1 为沿纤维方向应力;ε_{11} 为沿纤维方向应变;E_{11} 为切线模量。

4　拉伸性能预测结果分析

通过 ABAQUS 通用有限元软件建立上述模型。其中,涂层采用实体单元 C3D8R 进行离散,弦杆采用桁架单元,单元划分如图 9 所示。沿纬向方向,对模型的一面进行固定,另一面施加位移荷载模拟试件经向的拉伸过程,对膜材拉伸应力应变曲线进行预测。



(a)弦杆网格

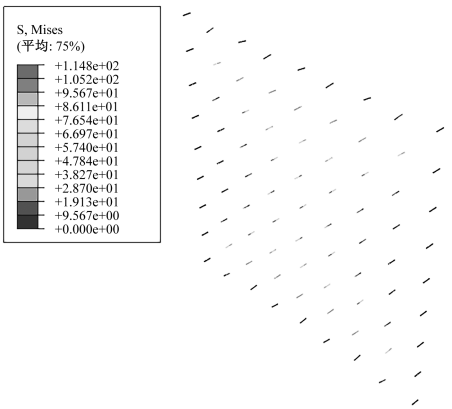


(b)涂层网格

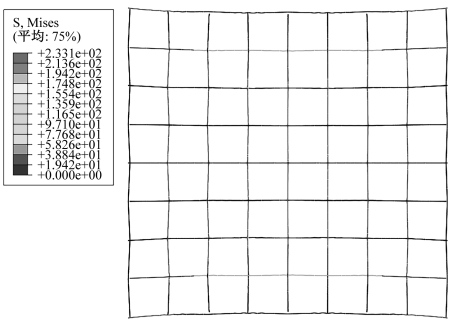
图 9　模型网格划分

Fig. 9　Model grid partitioning

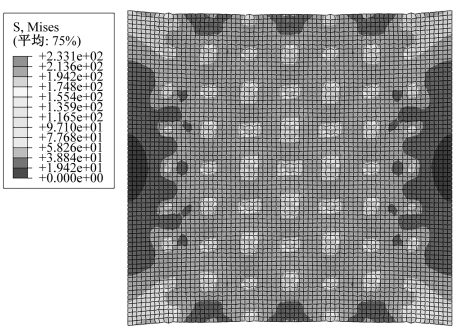
分别提取涂层、弦杆、撑杆模型的应力云图,如图 10 所示。



(a)撑　杆



(b)弦　杆



(c)涂　层

图 10　模型 Mises 应力云图(单位:MPa)

Fig. 10　Mises stress cloud diagram of model (unit: MPa)

对于两向纤维束间的撑杆而言,其最外圈的受力较小,几乎为零,这也与实际情况相符。对于实际受力的纤维来说,最外圈的杆件由于没有其他纤维与之相互作用,悬在外面的杆件是不能受力的。外面第二圈的受力最大,里面受力会减少一点。这主要是由于最外圈不能受力,荷载主要是通过外面第二圈依次向里面传递的,所以外面第二圈的受力是

最大的,往里会相对减少。对比经、纬向弦杆,发现经向的弦杆受力较大,纬向的弦杆受力较小。对于经向的弦杆,最外面两侧的弦杆受力较小,往内部依次增大。对于纬向的弦杆受力普遍较小,且受力比较均匀。这主要是由于荷载是沿着经向弦杆的方向施加的,所以经向承担主要荷载,纬向主要起传递荷载的作用。涂层材料整体受力比较均匀,荷载相差不大,模型边缘处受力较小,杆件和模型连接的部位受力较大。

提取模型的拉伸应力应变曲线,结果如图 11 所示。对比试验结果可以看出,整体预测结果较好,在前一阶段模拟结果大于试验结果,后一阶段试验结果大于模拟结果,最大误差约为 20%。形成误差的主要原因是纤维束间及纤维束与涂层间的接触非线性不能在模型中得到体现,另外,涂层涂覆过程中加工工艺对膜材力学性能的影响无法确切予以考虑。在加载后期,本文模型未能体现膜材各组分材料的损伤演化,故误差加大。但考虑到膜材在工程运用中大多处于拉伸曲线的前半段,因此从工程运用的角度,本文模型预测结果具有一定的参考价值[16]。

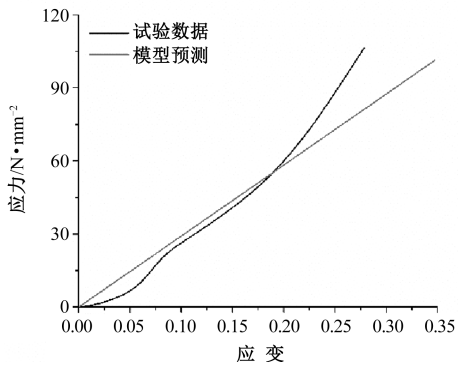


图 11 简化桁架模型建模流程

Fig. 11 Simplified truss model modeling process

5 结 论

在单胞模型的基础上,建立了一种用于预测涂层织物类膜材料力学性能的简化桁架模型,并对膜材拉伸性能进行预测。对比试验数据表明:整体预测结果较好,最大误差约为 20%。形成误差的主要原因是纤维束间及纤维束与涂层间的接触非线性不能在模型中得到体现。该模型较常规的单胞模型而言,简化了建模过程,显著缩短了计算时间。在膜材工程运用层次,本文模型对膜材拉伸力学行为的预测结果具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 张营营, 张其林. 涂层织物类建筑膜材料的力学性能[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2013.

[2] Forster B, Mollaert M. European design guide for tensile surface structures[M]. Brussel: Tensinet, 2004.

[3] 李阳, 张其林. 建筑膜材性能及试验研究现状[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(2): 53-56.

[4] Zhang Yingying, Xu Junhao, Zhang Qilin. Advances in mechanical properties of coated fabrics in civil engineering[J]. Journal of Industrial Textiles, 2018, 48(1): 255-271.

[5] 张营营, 许珊珊, 徐俊豪, 等. 聚四氟乙烯膜材黏弹性本构关系[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(6): 245-252.

[6] 高成军, 陈务军, 邱振宇, 等. 建筑织物膜材双轴剪切试验与分析[J]. 实验力学, 2016, 31(1): 25-30.

[7] 倪静, 罗仁安, 陈有亮, 等. 建筑膜材料在双轴拉伸作用下的特性[J]. 工程力学, 2009, 26(6): 100-104.

[8] 赵飞龙, 陈务军, 何艳丽, 等. PVDF 涂层织物膜材和节点高温力学性能试验研究[J]. 空间结构, 2014, 20(3): 42-47.

[9] Fang G D, Liang J, Yu W, et al. The effect of yarn distortion on the mechanical properties of 3D four-directional braided composites[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2009, 40(4): 343-350.

[10] 庞宝君, 杜善义, 韩杰才, 等. 三维多向编织复合材料非线性本构行为的细观数值模拟[J]. 复合材料学报, 2000,17(1): 98-102.

[11] 张超, 许希武, 毛春见. 三维编织复合材料渐进损伤模拟及强度预测[J]. 复合材料学报, 2011, 28(2): 222-230.

[12] 卢子兴, 徐强, 王伯平, 等. 含缺陷平纹机织复合材料拉伸力学行为数值模拟[J]. 复合材料学报, 2011, 28(6): 200-207.

[13] Dinh T D, Rezaei A, Daelemans L, et al. A hybrid micro-meso-scale unit cell model for homogenization of the nonlinear orthotropic material behavior of coated fabrics used in tensioned membrane structures[J]. Composite Structures, 2017, 162: 271-279.

[14] 涤纶工业长丝: GB/T 16604—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[15] 膜结构检测技术规程: DG/T J08-2019-2007[S]. 上海: 2007.

[16] 膜结构设计规程: CECS 158:2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.

(下转第 27 页)

PREPARATION AND STUDY OF TOUGHENED BISMALEIMIDE RESIN MODIFIED BY BENZOXAZINE

ZHOU Ru-jin, WANG Xiang*, WANG Jun, CAI Hao-peng

(School of Materials Science and Engineering & Advanced Materials Manufacturing Equipment and Technology Research Institute, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The unmodified pure bismaleimide resin has the shortcomings of poor solubility, high curing processing temperature and ease of brittleness fracture. 2,2′-Diallylbisphenol A (DABPA) and 3-aminophenylacetylene (m-APA) as chain extender toughening agent, bisphenol A phenylbenzoxazine (BOZ) as toughened agent were adopted to copolymerize with 4,4′-bismaleimidodiphenyl methane (BDM) resin. Then, a kind of resin matrix was prepared, which presented high temperature resistance and high toughness. The curing reaction of BOZ/BAD422 resin system was studied by Fourier transform-infrared spectroscopy and differential scanning calorimetry analyses, respectively. Mechanical measurements, thermal properties analysis, and microanalyses were conducted to assess the toughness and morphology of the cured blends. The research results show that the addition of BOZ resin can effectively increase the BMI resin toughness. In the range of 0 ~ 30wt% BOZ resin, the impact performance of the blended resin system is increased with the increase of the quality fraction of BOZ resin. The maximum impact performance reaches up to 18.3 kJ/m^2, which was 53.8% higher than the BAD422 system. The bending strength is slightly increased and remains at a high level compared with the BAD422 system, reaching at 145.9 MPa. The bending modulus slowly increases with the increase of BOZ content. However, heat resistance and thermal stability are reduced. But glass transition temperature (T_g) can still reach 250.8 ℃ and the initial decomposition temperature ($T_{5\%}$) is 346.5 ℃ after the addition of 30wt% BOZ, indicating that the thermal performance is still good.

Key words: bimaleimide; benzoxazine; toughening; heat-resistance

---

(上接第 20 页)

STUDY ON SIMPLIFIED TRUSS MODEL FOR COATED FABRICS

MA Ben, HAO Sheng-jie, XU Jun-hao*, ZHAO Yu-shuai

(Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Based on the unit cell model, a simplified truss model for predicting the mechanical properties of coated fabric membrane materials was proposed. According to the tensile test data of the component materials, the fourth-order polynomial with true strain as the variable is selected to describe the nonlinear behavior of the fiber bundle, the mechanical response of the coating is reflected by the ideal elastoplastic model, the microstructure and the structure size parameter of the film is obtained by scanning electron microscopy. The above model was realized by ABAQUS finite element software and UMAT subroutine to predict the tensile properties of the film. The results show that the overall prediction results are good, and the maximum error is about 20%. The main reason for the error is that the nonlinearity of the contact between the fiber bundles and between the fiber bundle and the coating cannot be reflected in the model.

Key words: coated fabric film; simplified truss model; mechanical properties; nonlinear