

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.003

# 开口时碳纤维丝束与镀铜综丝眼间 摩擦损伤的有限元模拟

戴鑫<sup>1,2,3</sup>, 李晶<sup>1,2,3</sup>, 刘站<sup>1,2,3</sup>

- (1. 西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710048;  
2. 绍兴市柯桥区西纺纺织产业创新研究院, 浙江 绍兴 312065;  
3. 西安工程大学西安市现代智能纺织装备重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:**为了减小碳纤维丝束在织造时与综丝眼摩擦产生的损伤,课题组提出了在综丝眼内镀有色金属铜的方法。先计算出开口过程中碳纤维丝束与综丝眼摩擦的动程,选取部分动程进行损伤分析,利用体积单元法对碳纤维丝束建立简化模型并在有限元软件 ABAQUS 中对该模型进行拉伸仿真分析;然后进行碳纤维丝束的拉伸实验并将仿真结果与实验数据相比,验证了丝束模型的正确性。课题组利用渐进损伤模型分析了碳纤维丝束与不同金属材料摩擦时的损伤情况,表明镀铜后的综丝眼与碳纤维丝束的摩擦损伤较小。

**关键词:**碳纤维;摩擦损伤;综丝眼;开口过程;体积单元法;渐进损伤模型

中图分类号:TS152.3;TB12 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)05-0013-07

## Finite Element Simulation of Friction Damage between Eyes of Carbon Fiber and Copper Coated Heald Wire during Opening

DAI Xin<sup>1,2,3</sup>, LI Jing<sup>1,2,3</sup>, LIU Zhan<sup>1,2,3</sup>

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;  
2. Shaoxing Keqiao West-Tex Textile Industry Innovative Institute, Shaoxing, Zhejiang 312065, China;  
3. Xi'an Key Laboratory of Modern Intelligent Textile Equipment, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to reduce the damage caused by friction between carbon fiber bundle and heddle eyes during weaving, a method of non-ferrous metals copper plating in heddle eyes was put forward. The stroke of friction between carbon fiber bundle and heddle eyes during the opening process was calculated first and partially selected for damage analysis. The simplified model of carbon fiber bundle was established by unit volume method and the model simulation analysis was carried out by the finite element software ABAQUS. The simulation results were compared with the experimental data to verify the correctness of the model. The progressive damage model was used to analyze the damage of carbon fiber bundles when rubbing against different metal materials, which indicates that the friction damage between the heddle eyes and the carbon fiber bundle was reduced after copper plating.

**Keywords:** carbon fiber; friction damage; heddle eyes; opening process; unit volume method; progressive damage model

碳纤维是一种碳的质量分数在 95% 以上的高强度、高模量的新型无机纤维材料,具有高强度、高硬度、耐高温、耐腐蚀和导电传热的优点。此外,碳纤维还具

有碳材料的固有其本征和纺织纤维的柔软可加工性,广泛应用于航空航天和国防军工等领域,是新一代的增强纤维<sup>[1-3]</sup>。在织造碳纤维织物的过程中,织机的开口

收稿日期:2020-03-03;修回日期:2020-07-23

基金项目:中国纺织工业联合会科技指导性项目(2019006);西安市现代智能纺织装备重点实验室项目(2019220614SYS021CG043)。

第一作者简介:戴鑫(1995),男,江苏如东人,硕士研究生,主要研究方向为机械 CAD/CAE/CAM 应用。通信作者:李晶(1962),女,福建福州人,教授,硕士,主要研究方向为碳纤维性能研究及机械 CAD/CAE/CAM 应用。E-mail:ljing62@126.com

运动是必不可少的部分,它是织机的五大关键运动之一。开口机构主要由提综装置、回综装置和综框(综丝)升降次序控制装置组成。为保证织造完成时碳纤维织物的力学性能良好,织造过程中尽量减小碳纤维丝束与综丝眼之间的摩擦损伤就显得尤为重要。目前减小摩擦的方法是:①将综框的上端向后作少量的倾斜来改变梭口的角度;②降低梭口高度等方法使摩擦功和摩擦次数减小。但这些方法没有考虑到开口过程中综框的振动等因素的影响,因此减小磨损的效果并不理想<sup>[4]</sup>。课题组提出在综丝眼内部镀有有色金属铜来减小碳纤维丝束在织造过程中的损伤;为了了解该方法的可行性,课题组在有限元软件 ABAQUS 中仿真碳纤维丝束与不同的有色金属之间的损伤情况进行分析比较。

### 1 碳纤维丝束在综丝眼内的摩擦移动分析

当织机作开口运动时,碳纤维丝束会伸长,张力会增大,由于梭口前后不对称的原因,一般为梭口前部长度小于后部长度即前部丝束长度小于后部丝束长度<sup>[5-6]</sup>。文中研究的为等张力梭口开口时碳纤维丝束在综眼中移动的情况,等张力梭口丝束伸长情况如图 1 所示。

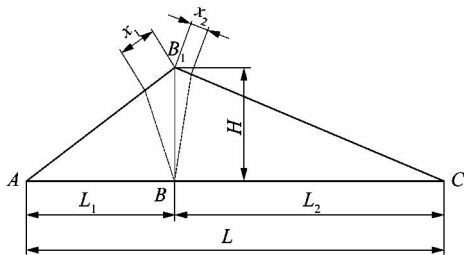


图 1 等张力梭口丝束伸长量  
Figure 1 Elongation of bundle at equal tension shed

AC 为梭口的前后定位线,长度为  $AC = L = L_1 + L_2$ ;提综过程中综眼 B 带着碳纤维丝束上升 H 的高度至点  $B_1$  处,其长度为  $AB_1C = L' = AB_1 + B_1C$ ,则梭口前部经纱的长度为:

$$L'_1 = AB_1 = \sqrt{L_1^2 + H^2} = L_1 [1 + (\frac{H}{L_1})^2]^{\frac{1}{2}} =$$

$$L_1 [1 + \frac{1}{2}(\frac{H}{L_1})^2 - \frac{1}{8}(\frac{H}{L_1})^4 + \dots] \approx L_1 (1 + \frac{H^2}{2L_1^2})$$

梭口前部的经纱伸长为

$$X_1 = L'_1 - L_1 = L_1 (1 + \frac{H^2}{2L_1^2}) - L_1 = \frac{H^2}{2L_1}$$

则相对伸长量为

$$\varepsilon_1 = \frac{X_1}{L_1} = \frac{H^2}{2L_1^2}$$

同理可得梭口后部经纱的长度:

$$B_1C = L'_2 \approx L_2 (1 + \frac{H^2}{2L_2^2})$$

梭口后部的经纱伸长为

$$X_2 = L'_2 - L_2 = L_2 (1 + \frac{H^2}{2L_2^2}) - L_2 = \frac{H^2}{2L_2}$$

则相对伸长量为

$$\varepsilon_2 = \frac{X_2}{L_2} = \frac{H^2}{2L_2^2}$$

因此经纱的全部伸长 X 和相对伸长量  $\varepsilon$  分别为:

$$X = X_1 + X_2 = \frac{H^2}{2L_1} + \frac{H^2}{2L_2} = \frac{H^2}{2} (\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2});$$

$$\varepsilon = \frac{X}{L} = \frac{\frac{H^2}{2} (\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2})}{L_1 + L_2} = \frac{H^2}{2L_1L_2}$$

由上述梭口前后部的相对伸长可知:在开口过程中,梭口前后部碳纤维丝束的相对伸长量与其长度的平方成反比。一般情况下梭口前部经纱长度小于梭口后部经纱长度,则梭口前部经纱的相对伸长量将大于后部经纱的相对伸长量,使得前部经纱张力大于后部经纱张力,后部经纱将在综丝眼内向前移动。

当不计碳纤维丝束与综丝眼处的摩擦时,梭口前后部经纱的相对伸长应与全部经纱的相对伸长相等,此时梭口前部和后部经纱的绝对伸长  $X'_1$  和  $X'_2$  分别为:

$$X'_1 = L_1 \varepsilon = L_1 \times \frac{H^2}{2L_1L_2} = \frac{H^2}{2L_2} = X_2;$$

$$X'_2 = L_2 \varepsilon = L_2 \times \frac{H^2}{2L_1L_2} = \frac{H^2}{2L_1} = X_1$$

经纱在综丝眼内的移动量  $\delta$  为

$$\delta = X_1 - X'_1 = X_1 - X_2 = \frac{H^2}{2L_1} - \frac{H^2}{2L_2} = \frac{H^2}{2} (\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2}) \tag{1}$$

将  $I = L_1/L_2$  和  $L = L_1 + L_2$  代入式(1)得:

$$\delta = \frac{H^2}{2} (\frac{I+1}{IL} - \frac{I+1}{L}) = \frac{H^2(1-I^2)}{2IL}$$

式中 I 为对称度。选择  $I = 0.6, H = 30 \text{ mm}, L = 160 \text{ mm}$ ,则碳纤维丝束在综丝眼中的移动量  $\delta$  为 3 mm。

## 2 碳纤维丝束简化模型的建立与实验验证

### 2.1 丝束简化模型的建立

课题组为研究碳纤维织造在开口运动过程中丝束与综丝眼之间的滑动摩擦损伤情况,先在综丝眼内镀

不同有色金属,然后碳纤维丝束在综丝眼内进行滑动摩擦,最后对比碳纤维丝束与不同金属间滑动摩擦造成的损伤情况,发现综丝眼内部镀铜时碳纤维的损伤最小。本研究所用的碳纤维丝束为东丽 T300-3K,密度为  $1.76 \text{ g/cm}^3$ ,单根碳纤维直径为  $5 \mu\text{m}$ ,抗拉强度为  $3.5 \text{ GPa}$ ,弹性模量为  $230 \text{ GPa}$ ,综丝眼尺寸为  $3.14 \text{ mm} \times 1.70 \text{ mm}$ ,厚度为  $0.5 \text{ mm}$ ,如图 2 所示。根据碳纤维丝束的实际尺寸先在 SolidWorks 软件中建立碳纤维丝束与综丝眼的三维模型,然后在有限元软件 ABAQUS 中进行摩擦损伤分析,丝束与综眼三维模型如图 3 所示。

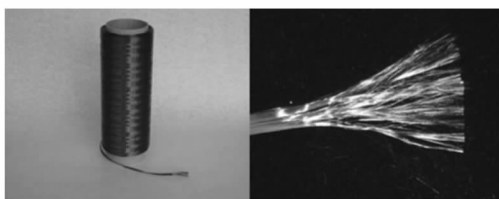


图 2 T300-3K 碳纤维丝束实物图

Figure 2 Physical picture of T300-3K carbon fiber bundle

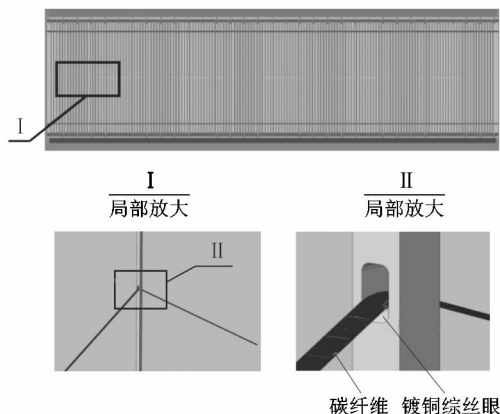


图 3 镀铜综丝眼与碳纤维丝束三维模型

Figure 3 Three-dimensional model of copper-plated heddle eyes and carbon fiber bundle

开口过程中机构每提综一次,丝束在综眼中的移动损伤动程为  $3 \text{ mm}$ ,考虑到若直接对 3K 碳纤维丝束进行建模分析的复杂性,需要很多的单元节点,计算量非常大,计算时间长,并且需要较大的内存空间,容易产生较大的误差。因此,课题组采用体积单元法对碳纤维丝束进行简化建模,使用最小重复单元单胞来构成宏观的碳纤维丝束,并对该简化模型进行拉伸验证,保证其单胞边界处满足位移和应力连续条件,将其仿真结果与宏观上碳纤维丝束的拉伸实验数据进行类比验证<sup>[7]</sup>。根据上述碳纤维丝束的实际尺寸建立如图 4 所示丝束简化模型,该简化模型尺寸如表 1 所示。

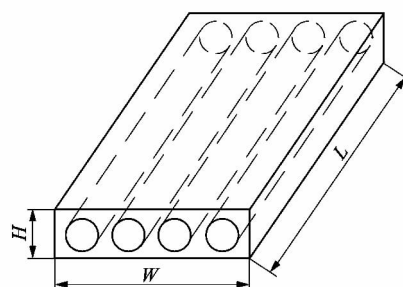


图 4 碳纤维丝束简化模型

Figure 4 Simplified model of carbon fiber bundles

表 1 碳纤维丝束简化模型几何尺寸  
Table 1 Simplified model geometric dimension of carbon fiber bundle

长度 $L/\mu\text{m}$	宽度 $W/\mu\text{m}$	厚度 $H/\mu\text{m}$
75.0	28.0	9.0

## 2.2 丝束模型拉伸性能仿真

碳纤维丝束简化模型建立完成后,在有限元软件 ABAQUS 中对其进行拉伸性能的验证<sup>[8]</sup>。本研究所用的环氧树脂为 JC-02A + JC-02B,弹性模量为  $2.4 \text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.35$ ,环氧树脂均匀分布在碳纤维丝束的周围。在拉伸性能分析时,将丝束与环氧树脂之间设置为耦合接触,保证其在加载过程中不会脱离,然后对该丝束模型施加边界条件和约束载荷。将丝束模型的一端 6 个自由度完全固定约束,即  $U_1 = U_2 = U_3 = U_{R1} = U_{R2} = U_{R3} = 0$ ;对另一端施加载荷。随后使用完全六面体单元进行网格划分,单元类型为 C3D8,在 ABAQUS 隐式求解模块 Standard 中使用横观各向同性非线性本构方程和牛顿迭代法进行计算,得出如图 5 所示拉伸应力云图。

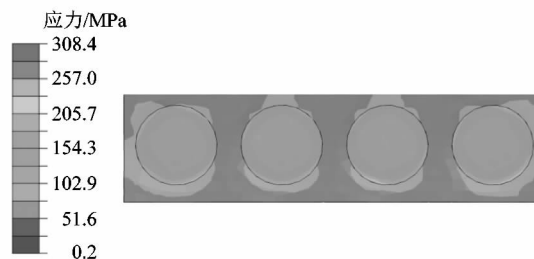


图 5 碳纤维丝束模型拉伸应力云图

Figure 5 Tensile stress cloud diagram of carbon fiber bundle model

从图 5 中可以看出树脂区域的应力低于纤维区域的应力,较大的应力主要分布在纤维和树脂的交界处,该模型的最大应力为  $308.4 \text{ MPa}$ 。

### 2.3 碳纤维丝束拉伸实验

课题组采用 INSTRON5500R 型电子万能试验机对 T300-3K 碳纤维丝束进行拉伸性能的测试,包括纤维断裂延伸率、拉伸强度及弹性模量等指标<sup>[9]</sup>。本试验的条件设定:等速伸长,夹持间隔距离为 160 mm,拉伸速度为 2 mm/min,预加张力为 2 mN/tex,环境湿度为 45%,环境温度为 21 ℃,环氧树脂的质量分数为 35%。实验共测试 3 组,每组 6 个试样,每个试样表面光滑和平直且无缺陷,试验参考 GB/T 3362—2017《碳纤维复丝拉伸性能试验方法》进行测试,可以保证本试验符合国家标准,试验方法如图 6 所示。

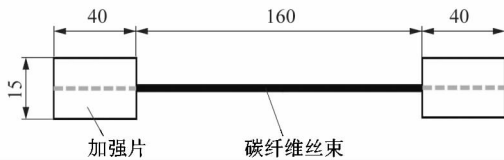


图 6 丝束拉伸试验方法

Figure 6 Method of bundle tensile test

### 2.4 实验结果

碳纤维丝束拉伸实验数据经处理后得出如表 2 ~ 4 所示结果。

表 2 第 1 组碳纤维丝束拉伸实验数据

Table 2 First group of carbon fiber bundle tensile test data

编号	断裂延伸率/%	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa
1	2.300	5 310.0	234.0
2	2.100	5 090.0	238.0
3	2.300	5 550.0	238.0
4	2.200	5 150.0	235.0
5	2.100	5 020.0	242.0
6	2.400	5 440.0	230.0
平均值	2.200	5 260.0	236.0
标准差 S	0.120	210.0	4.1
离散系数 $C_V$ /%	5.400	4.0	1.7

表 3 第 2 组碳纤维丝束拉伸实验数据

Table 3 Second group of carbon fiber bundle tensile test data

编号	断裂延伸率/%	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa
1	2.200	5 430.0	246.0
2	2.300	5 570.0	244.0
3	2.400	5 370.0	224.0
4	2.400	5 480.0	233.0
5	2.200	5 180.0	236.0
6	2.300	5 370.0	234.0
平均值	2.300	5 400.0	236.0
标准差 S	0.089	130.0	8.0
离散系数 $C_V$ /%	3.900	2.4	3.4

表 4 第 3 组碳纤维丝束拉伸实验数据

Table 4 Third group of carbon fiber bundle tensile test data

编号	断裂延伸率/%	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa
1	2.000	4 590.0	234.0
2	2.000	4 640.0	233.0
3	2.000	4 940.0	248.0
4	2.100	5 000.0	239.0
5	2.100	4 930.0	239.0
6	1.900	4 480.0	230.0
平均值	2.000	4 760.0	237.0
标准差 S	0.075	220.0	6.4
离散系数 $C_V$ /%	3.700	4.6	2.7

由于图 4 中的丝束模型是由 3 mm 的碳纤维丝束简化成 76 μm 的微观模型,结合碳纤维丝束的拉伸实验结果中的应力标准差的大小可以说明图 5 中碳纤维丝束在该丝束简化模型中具有较大的承载力,该丝束简化模型的拉伸性能符合碳纤维材料高模量、高强度的特点,从而验证了丝束简化模型的正确性。

## 3 碳纤维丝束与综眼摩擦损伤有限元分析

### 3.1 纤维增强复合材料渐进损伤模型

课题组利用上述丝束简化模型对碳纤维丝束和镀有色金属的综丝眼之间的滑动摩擦进行损伤分析。该模型中碳纤维丝束周围的环氧树脂材料类别选用 JC-02A + JC-02B,弹性模量为 2.4 GPa,泊松比为 0.35;假设环氧树脂均匀分布在碳纤维周围,上文中已对该模型进行仿真拉伸验证,表明了其可用性。此过程中还用到了单向纤维增强复合材料渐进损伤失效模型<sup>[10]</sup>,结合三维应力状态下单向纤维复合材料失效的 Hashin 强度准则和 Puck 作用面断裂准则来判断碳纤维树脂复合材料纵向和横向损伤。渐进损伤模型实质上是一种基于材料应变状态的材料弹性性能劣化方案,劣化的弹性性能和应变状态是由损伤变量维系的,渐进损伤模型结构如图 7 所示。

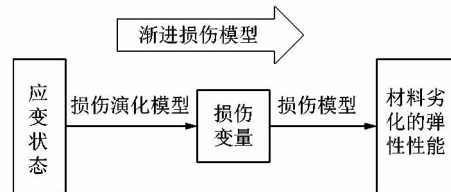


图 7 渐进损伤模型的结构

Figure 7 Structure of progressive damage model

碳纤维复合材料的力学行为可以类比为正交各项异性材料,有 3 个性能对称平面和 9 个刚度系数,其应

力-应变关系为:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \\ & C_{44} & \\ & & C_{55} \\ & & & C_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \end{Bmatrix} \circ$$

式中: $\sigma_{ij}$ 表示应力张量分量; $\varepsilon_{ij}$ 表示应变张量分量; $C_{ij}$ 表示刚度矩阵分量。

刚度矩阵通常由弹性模量 $E_i$ 、剪切模量 $G_{ij}$ 和泊松比 $\nu_{ij}$ 组成,具体公式如下:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{E_1(1-\nu_{23}\nu_{32})}{\Delta}; C_{12} = \frac{E_2(\nu_{12}+\nu_{32}\nu_{13})}{\Delta}; \\ C_{22} &= \frac{E_2(1-\nu_{13}\nu_{31})}{\Delta}; C_{13} = \frac{E_3(\nu_{13}+\nu_{12}\nu_{23})}{\Delta}; \\ C_{33} &= \frac{E_3(1-\nu_{12}\nu_{21})}{\Delta}; C_{23} = \frac{E_1(\nu_{23}+\nu_{21}\nu_{31})}{\Delta}; \\ C_{44} &= G_{12}; C_{55} = G_{23}; C_{66} = G_{13} \circ \end{aligned}$$

其中, $\Delta = 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{13}\nu_{32} \circ$

课题组所使用的渐进损伤模型先确立了损伤变量和材料劣化弹性性能之间的关系,将受损材料的柔度张量转化为 $6 \times 6$ 的柔度矩阵,对柔度矩阵求逆得出受损材料的刚度矩阵;通过损伤演化模型建立材料应变状态和损伤张量主值之间的关系,根据损伤后的应力暴露因子和指数应变软化来确定材料损伤后的机械本构行为。材料损伤演化模型方程为

$$d_M = 1 - \sqrt{\frac{1}{r_M} \exp[A_M(1-r_M)]} \circ$$

式中: $d_M$ 为损伤变量; $r_M$ 为应力暴露因子; $A_M$ 为软化曲线待定参数。

渐进损伤过程中损伤是不可逆的,因此损伤变量在整个模拟过程中不会出现减小的情况,材料的应力应变关系会出现应变软化的特征,在模拟过程中会导致收敛困难,因此采用黏性化规则来改善,定义黏性损伤变量为

$$\dot{d}_M^v = \frac{1}{\eta} (d_M - d_M^v) \circ$$

式中: $\eta$ 为黏性系数; $d_M^v$ 在UMAT子程序运算中替代 $d_M$ 参加相应的应力向量和雅可比矩阵的计算。

### 3.2 丝束与有色金属摩擦损伤的有限元前处理

先在ABAQUS中对碳纤维树脂复合材料建模并对其进行切片处理,将已建好的碳纤维、环氧树脂和铜块的三维模型进行装配,并且将材料属性分别赋予,让

铜块沿着纤维的轴线方向运动;建立分析步,使用动态显示算法,设置加载时间为0.2 s,模拟铜块和碳纤维复合材料模型的接触摩擦作用过程;铜块与碳纤维复合材料模型之间的接触采用通用接触算法,切向摩擦因数设置为0.2,法向采用硬接触来模拟铜块与碳纤维复合材料模型之间的相互作用;碳纤维复合材料模型底部采用固支边界约束,同时对铜块设置函数位移条件,然后采用显示实体单元对铜块和碳纤维复合材料模型进行网格划分,具体流程如图8所示。

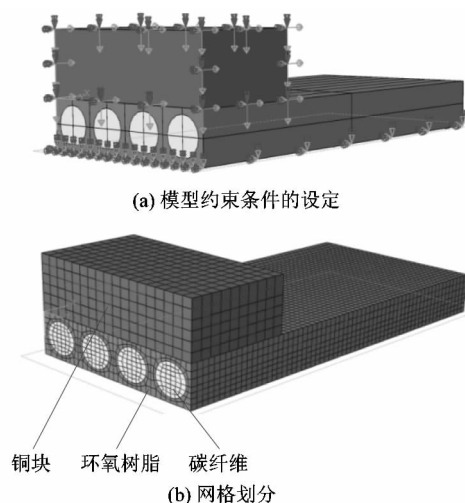


图8 有限元前处理部分

Figure 8 Pretreatment of finite element

课题组根据丝束磨损运动的要求设定2个分析步:第1步将碳纤维丝束与铜块整体模型压紧;第2步对模型施加边界条件和运动方式。在第1步分析中定义该丝束模型的接触压力约为2.5 MPa;在第2步分析中将整体模型的底部的6个自由度全部固定,即施加边界固定约束( $U_1 = U_2 = U_3 = U_{R1} = U_{R2} = U_{R3} = 0$ )。对上部模型施加位移条件,将纤维轴线方向移动距离设置为 $65 \mu\text{m}$ ,控制位移距离在 $5 \sim 70 \mu\text{m}$ 范围内,保证上下模型的主从面在磨损过程中不会分离,如图8(a)所示。

### 3.3 有限元仿真结果分析

图9和图10分别为铜、铝与树脂基碳纤维丝束的滑动摩擦损伤仿真应力云图。由于树脂基碳纤维与金属磨损仿真是一个动态过程,应力是不断变化的,从图9和图10的应力值可知树脂基碳纤维与铜、铝磨损时的最大应力相差不大;在同等条件下树脂基碳纤维与铜磨损时的应力相对于树脂基碳纤维与铝磨损时的应力要小。从图9(d)和图10(d)中模型损伤情况可以较为直观地看出铜与树脂基碳纤维磨损时纤维受到的

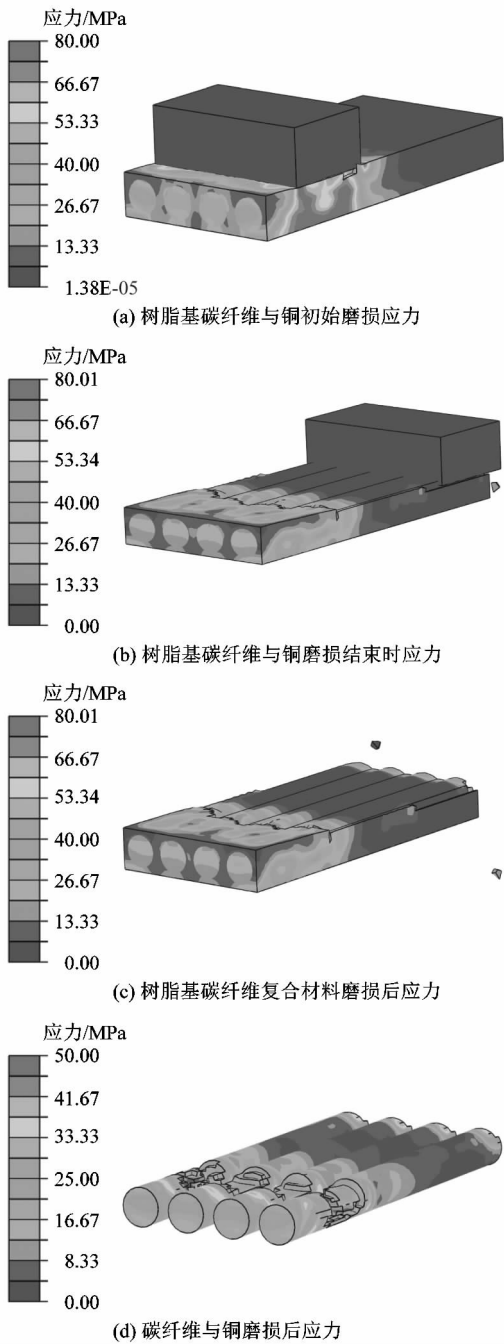


图 9 铜与树脂基碳纤维磨损应力云图  
Figure 9 Abrasion stress cloud diagram of copper and resin-based carbon fiber

损伤较小。通过计算得到碳纤维与铜磨损后单元失效的体积为 3 075.82, 而碳纤维与铝磨损后单元失效体积为 4 452.82, 由此可知树脂基碳纤维与铜的磨损量小; 并可以推断出宏观下的树脂基碳纤维丝束与铜磨损时的损伤相比于宏观下树脂基碳纤维与铝磨损时的损伤要小。图中还体现了损伤的不可逆性, 当碳纤维与有色金属磨损时由于纤维本身的耐磨性和弹性特

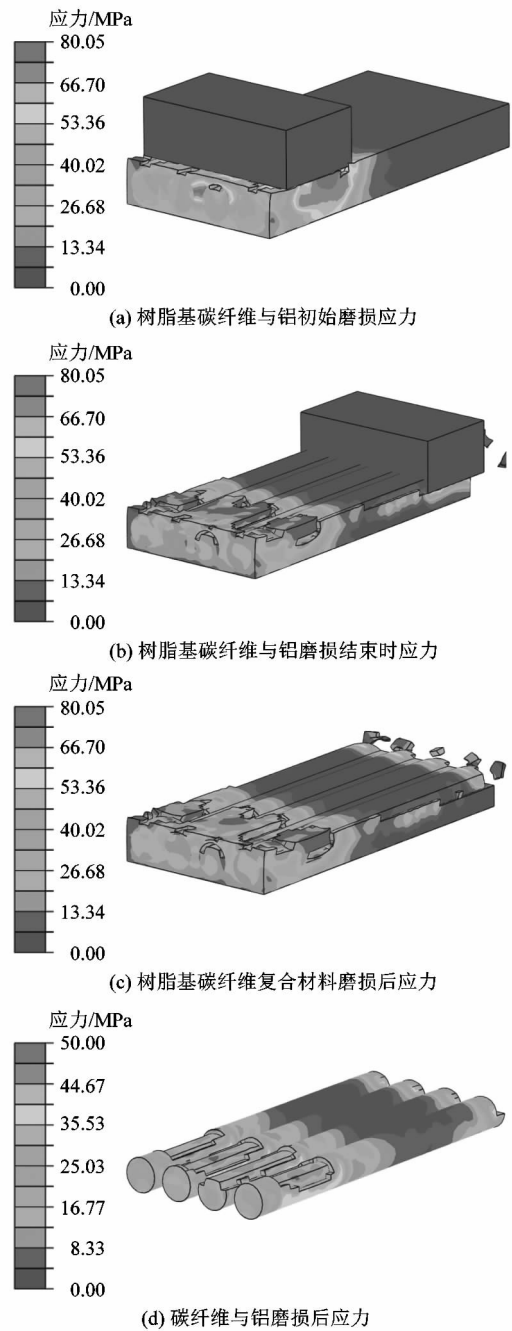


图 10 铝与树脂基碳纤维磨损应力云图  
Figure 10 Abrasion stress cloud diagram of aluminum and resin-based carbon fiber

质, 损伤到一定程度后会产生回弹现象来减小损伤。因此, 在综丝眼中镀铜可以有效减少碳纤维丝束在开口织造过程中的摩擦损伤, 减少了断经情况的发生。

#### 4 结语

课题组研究了织机开口过程中在综丝眼内镀有色金属来减少碳纤维丝束的摩擦损伤, 减少断经情况的

(下转第 23 页)