

制动胶管编织骨架层的参数化建模

刘 枫¹, 王亮燕², 岳小雪², 李凡珠^{1*}, 杨海波¹, 鞠建宏²

(1. 北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029; 2. 南京利德东方橡塑科技有限公司, 江苏 南京 210028)

摘要: 介绍制动胶管编织骨架层(简称编织层)参数化建模的方法。以规则编织层为例, 基于Abaqus软件, 采用Python脚本语言编写内核和图形用户界面代码, 实现编织层参数化建模。该程序不仅具有编织层三维建模功能, 还具有纤维相互作用设置、边界条件施加、网格划分和任务提交等功能, 有效地简化了编织层力学性能分析, 缩短了研究周期。

关键词: 制动胶管; 编织骨架层; 参数化建模; 有限元分析; Abaqus软件

中图分类号: TQ336.3; TQ330.38⁺9

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2019)12-0895-09

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2019.12.0895



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

制动胶管是汽车制动系统中的重要元件之一, 制动介质经制动胶管传递到制动蹄或制动钳, 以产生制动力, 使汽车随时安全制动^[1]。汽车用制动胶管是由2层编织骨架层(简称编织层)和3层橡胶层构成的橡胶制品, 如图1所示。在高温、高压、高脉冲、高屈挠工况下使用时, 橡胶层起到防漏、耐高温、耐化学腐蚀等作用, 骨架层承受外部载荷、防止软管因高温、高压而导致的径向过度膨胀变形^[2-3]。

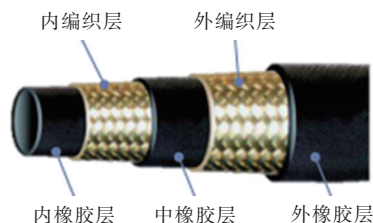


图1 胶管结构示意图

编织结构和缠绕结构是胶管常用的骨架层结构, 其中编织结构按其编织模式可分为菱形编织结构、规则编织结构和赫格利斯编织结构。编织结构内经纬线上下交织的数目是这3种结构的主要区别: 菱形编织结构是1根经线和1根纬线交

替交织, 也称为 1×1 编织结构; 规则编织结构是2根经线和2根纬线交替交织, 也称为 2×2 编织结构; 赫格利斯编织结构是3根经线和3根纬线交替交织, 也称为 3×3 编织结构。3种编织结构如图2所示^[4-5]。

制动胶管制造企业在实际生产中更关注编织骨架层的编织工艺参数和纤维材料参数。编织工艺参数主要包括编织角、导程(pitch)、合股

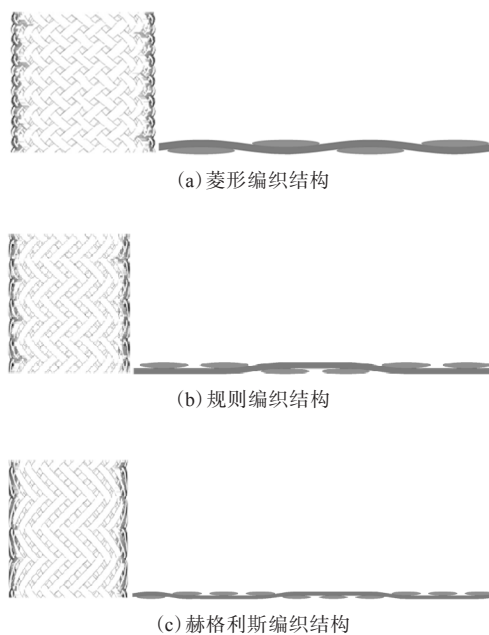


图2 3种编织结构示意图

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1502501); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(ZY1911)

作者简介: 刘枫(1993—), 男, 福建莆田人, 北京化工大学硕士研究生, 主要从事橡胶及骨架材料本构方程的研究。

*通信联系人(lifanzhu2013@163.com)

数和锭数。以轴向偏移至编织方向形成的角度为编织角,按照编织方向不同,编织角可以为 $-\alpha_H$ 和 $+\alpha_H$,如图3(a)所示。管状编织层的编织角一般为 $15^\circ \sim 75^\circ$ ^[6],如图3(b)所示,图中螺旋线起始点(即 m 和 n 两点)的垂直距离为编织层的导程,将一个导程的编织结构展开,导程与编织角存在式(1)的关系。

$$\tan \alpha_H = \frac{E}{D \times \pi} \quad (1)$$

式中, D 为编织层直径,mm; E 为导程,mm。

胶管编织层的经纬线由多股纤维束合股形成,如图3(c)所示。以图3(b)中的 m 为起始点,沿着螺旋线轨迹至 n 点,此轨迹上的合股数称为编织层的锭数,如图4所示。

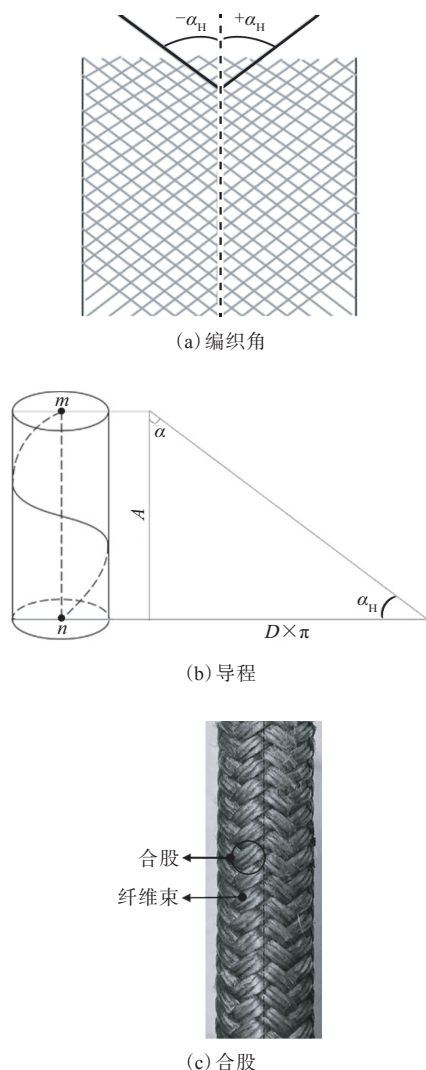


图3 编织层的编织角、导程和合股示意

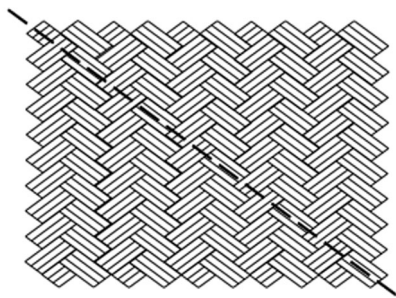


图4 编织层的锭数

纤维材料参数包括纤维细度、纤维弹性模量和纤维密度。纤维细度用于衡量纤维粗细的程度,通常以10 000 m长纤维质量(dtex)作为纤维细度衡量指标;纤维弹性模量也称为初始模量,是指纤维拉伸曲线上开始一段直线部分的应力与应变比值。在实际计算中,一般取拉伸曲线上伸长率为1%时的斜率来求得纤维弹性模量^[7]。

胶管编织层编织工艺参数、几何参数和纤维材料参数之间的数学关系如式(2)和(3)^[8]。

$$a = \frac{E}{2 \times C_r \times N_c \times \cos \alpha_H} \quad (2)$$

$$b = \frac{d}{a \times \pi \times \rho} \quad (3)$$

式中, a 和 b 分别为纤维束的椭圆形横截面长短轴半径,mm; C_r 为编织层锭数; N_c 为经纬线包含的纤维合股数; d 为纤维细度,dtex; ρ 为纤维单丝密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

胶管由编织层和橡胶层构成,可将其视为管状编织复合材料制品。编织层的存在使得胶管复合材料的力学响应呈各向异性,利用传统的研究方法不仅无法有效研究其应力分布情况,而且研究过程成本高、周期长、效率低。而用有限元方法能有效研究胶管复合材料的应力分布情况,研究过程成本低、周期短、耗材耗资少、效率高、结果可靠性强。精准的几何模型构建是进行有限元分析的基础,但由于编织层的复杂性使得模型构建难度增大,为了缩短建模周期和降低建模成本,在利用有限元方法研究胶管时将编织层简化成各向同性材料^[9-11],此种处理方法值得质疑,无法保证最终结果的准确性。

针对建模问题本工作提出一种快速、便捷的三维编织层模型构建方法,且已实现参数化建模。该方法具有以下优点:(1)基于Abaqus软件

平台开发,不存在因软件兼容性问题而导致模型细节丢失的问题;(2)实现图形用户界面(GUI)操作,提高建模效率和便捷性;(3)以编织工艺参数和纤维材料参数作为GUI输入参数,与企业实际生产工艺相贴合,可快速掌握;(4)可实现对编织层模型进行多参数调整;(5)不仅可解决编织层网格划分的问题,而且能实现网格密度的控制。

下面以规则编织层为例,详细介绍制动胶管管状编织层建模方法。

1 建模思路

编织层的实际形状如图3(c)所示,为确保胶管力学分析结果的准确性,有限元分析模型应以该形状为建模依据。虽然一个导程是整根胶管的一个重复单元且包含整根胶管的信息,但该单元尺寸过大,不适用于有限元分析,编织层是由经纬线周期性交织排列形成的结构,因此一个导程内存在一个最佳尺寸的重复单元。结合这两点以及考虑边界条件的施加难易程度,最终编织层的三维模型如图5(a)所示。编织层中纤维可分为经线和纬线两大类,通过分析可知经纬线中的纤维实体可归类为图5(d)和(e)两种纤维实体,即1系列和2系列起伏状纤维实体。编织层模型的构建可以简化成这两种纤维实体的构建及其空间位置的确定。编织层建模流程如图6所示。

(1)扫掠生成柱状纤维实体,1系列和2系列纤维实体长度(L)组成如图7所示,按照式(4)~(6)计算得到。

$$L_{\text{single}} = 2 \times N_c \times 2 \times a_{\text{real}} + L_{\text{gap}} \quad (4)$$

$$L_{\text{cut}} = a_{\text{real}} \times \cos(180^\circ - 2 \times \alpha_H) \quad (5)$$

$$L = i \times L_{\text{single}} + (i+1) \times L_{\text{gap}} + 2 \times L_{\text{cut}} \quad (6)$$

式中, L_{single} 为单根经线或纬线的相邻间隙部位之间的距离,mm; a_{real} 为真实纤维束的截面(即裁切前)长轴半径,mm; L_{gap} 为经纬线间距,mm; L_{cut} 为纤维裁切端面长度,mm; i 为起伏状纤维实体中经纬线交织区域个数。

(2)分别以纤维头尾端面为基准顺时针旋转 $2\alpha_H - 90^\circ$,以此角度裁切柱体两端形成纤维实体新端面,这是使编织层具有不同编织角度的关键步骤。

(3)利用Abaqus软件3点构造参考面的工具,做与纤维实体新端面相平行的参考面(图8和9中点划线代表参考面),计算构建参考面3个点的坐标。

①1系列纤维实体参考面的3个坐标。

第*i*个参考面的3个点坐标如下。

$$\text{point}(i)_1: [i \times L_{\text{gap}} + (i-1) \times L_{\text{single}}, a, 0]$$

$$\text{point}(i)_2: [2 \times L_{\text{cut}} + i \times L_{\text{gap}} + (i-1) \times L_{\text{single}}, -a, b]$$

$$\text{point}(i)_3: [2 \times L_{\text{cut}} + i \times L_{\text{gap}} + (i-1) \times L_{\text{single}}, -a, 0]$$

(7)

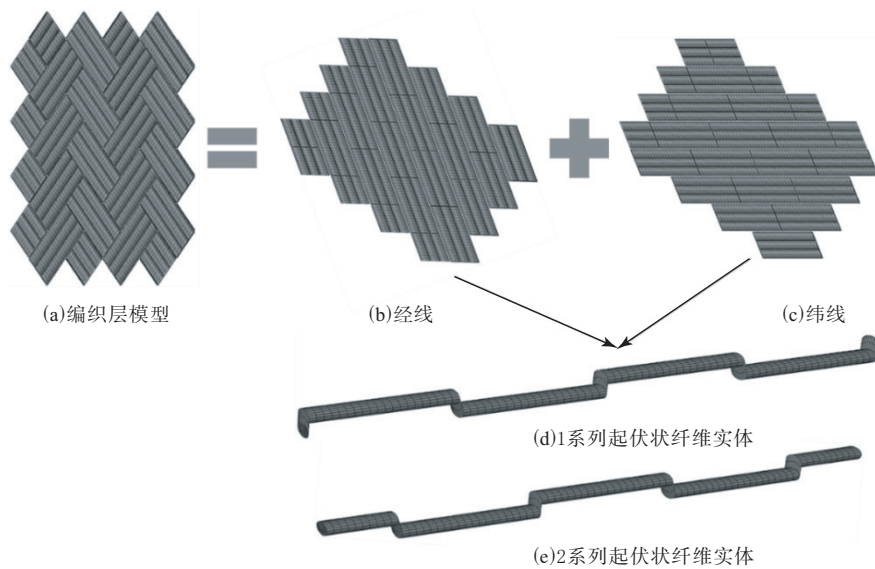


图5 编织层模型的组成

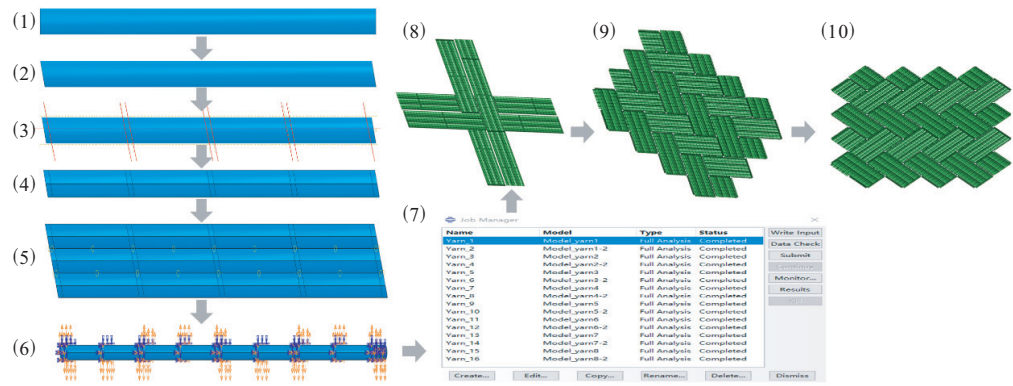


图6 编织层建模流程

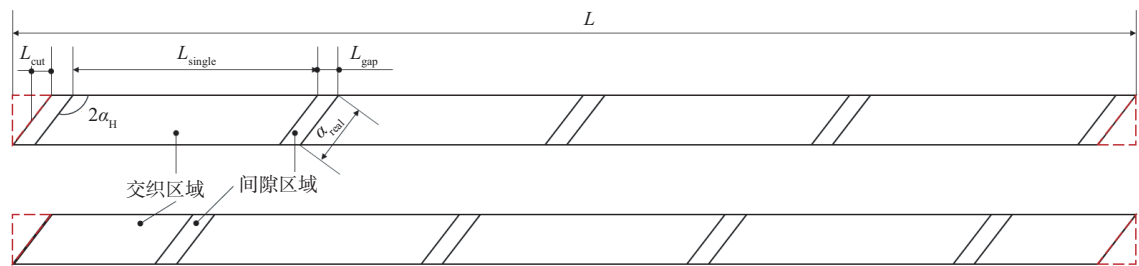


图7 纤维实体 L 组成示意

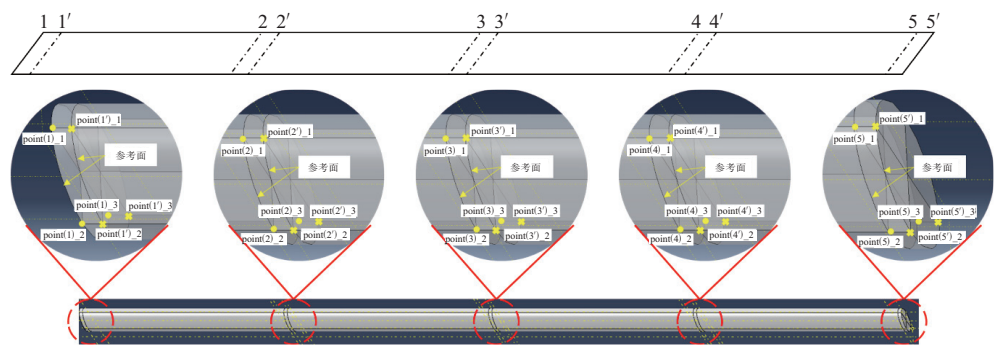


图8 1系列纤维实体参考面分布示意

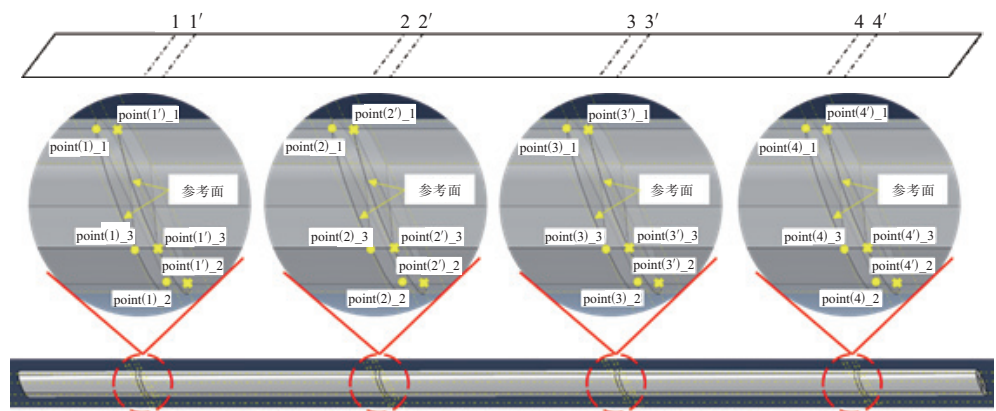


图9 2系列纤维实体参考面分布示意

第 i' 个参考面的3个点坐标:

$$\begin{aligned} \text{point}(i')_1: & (i' \times L_{\text{gap}} + i' \times L_{\text{single}}, a, 0) \\ \text{point}(i')_2: & (2 \times L_{\text{cut}} + i' \times L_{\text{gap}} + i' \times L_{\text{single}}, -a, b) \\ \text{point}(i')_3: & (2 \times L_{\text{cut}} + i' \times L_{\text{gap}} + i' \times L_{\text{single}}, -a, 0) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, i 和 i' 分别表示图8中的1—5和1'—5'。

②2系列纤维实体参考面的3个坐标。

第 j 个参考面的3个点坐标:

$$\begin{aligned} \text{point}(j)_1: & [(j-1) \times L_{\text{gap}} + (j-0.5) \times L_{\text{single}}, a, 0] \\ \text{point}(j)_2: & [2 \times L_{\text{cut}} + (j-1) \times L_{\text{gap}} + (j-0.5) \times L_{\text{single}}, -a, b] \\ \text{point}(j)_3: & [2 \times L_{\text{cut}} + (j-1) \times L_{\text{gap}} + (j-0.5) \times L_{\text{single}}, -a, 0] \end{aligned} \quad (9)$$

第 j' 个参考面的3个点坐标:

$$\begin{aligned} \text{point}(j')_1: & [j' \times L_{\text{gap}} + (j'-0.5) \times L_{\text{single}}, a, 0] \\ \text{point}(j')_2: & [2 \times L_{\text{cut}} + j' \times L_{\text{gap}} + (j'-0.5) \times L_{\text{single}}, -a, b] \\ \text{point}(j')_3: & [2 \times L_{\text{cut}} + j' \times L_{\text{gap}} + (j'-0.5) \times L_{\text{single}}, -a, 0] \end{aligned} \quad (10)$$

式中, j 和 j' 分别表示图8中的1—4和1'—4'。

(4)以(3)中的参考面为剪切平面切出交织区域和间隙区域;为了便于计算的收敛性以形成起伏状纤维实体,间隙区域和交织区域分别赋予橡胶高弹本构方程和金属本构方程。

(5)以(4)中柱体进行装配,装配时实体数目与经纬线内纤维合股数一致,如图10所示。

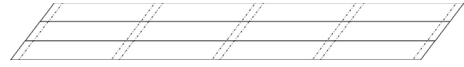


图10 纤维实体装配示意

(6)在交织区域间隔地施加交替的上下位移边界(v),位移大小为 e ,形成起伏状纤维实体,如图11所示。

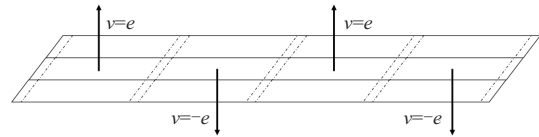


图11 交替边界施加

(7)提交任务得到数据库文件(ODB),提取ODB的最后一帧结构,即为起伏状纤维实体,如图12所示。

(8)新建一个模型并导入(7)的ODB作为部件,将这些部件导入装配模块进行装配时,1和2系列纤维实体相互重叠,如图13(a)所示,通过式(11)的向量将纤维实体平移至合适位置,如图13(b)所示,式中 i 取1—4。

$$\{ (4-i) \times [2 \times N_c \times L_{\text{cut}} + (0.5+C) \times L_{\text{gap}} + 0.5 \times L_{\text{single}}], -(4-i) \times (2 \times N_c \times a + B \times L_{\text{gap}}), 0 \}$$

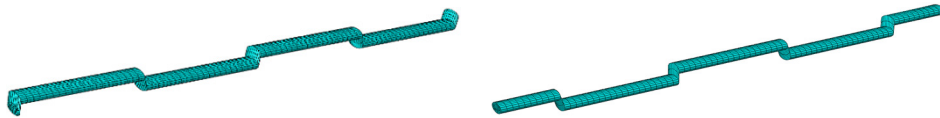


图12 由ODB最后一帧结构得到起伏状纤维实体

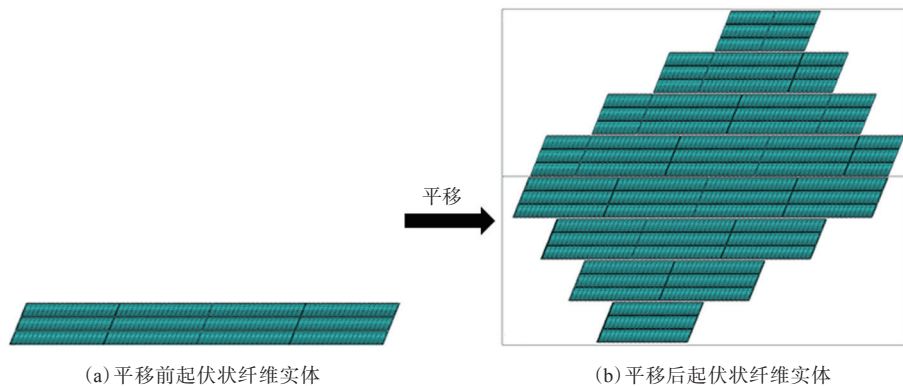


图13 平移前后起伏状纤维实体

$$\{(5-j) \times [-2 \times N_c \times L_{\text{cut}} + (0.5 - C) \times L_{\text{gap}} + (2 - 0.5 \times j) \times L_{\text{single}}], (5-j) \times (2 \times N_c \times a + B \times L_{\text{gap}}), 0\} \quad (11)$$

式中, B 为 $\sin(180^\circ - 2\alpha_H)$ 。

(9) 如前所述, 编织层是由经纬线构成, 需要先旋转 $2\alpha_H - 180^\circ$, 再旋转 180° , 使其中一组纤维实体成为经(纬)线, 如图14(a)所示, 之后按照式

(12)的向量平移经(纬)线, 使得经纬线装配成编织层, 如图14(b)所示。

$$[(2 - A - N_c) \times a - (8 \times N_c - 1) \times L_{\text{cut}} + (3 \times C + 2.5) \times L_{\text{gap}} + 1.5 \times L_{\text{single}}, (a + 3 \times L_{\text{gap}}) \times B + (8 \times N_c - 2) \times a, 0] \quad (12)$$

式中, A 为 $\tan(180^\circ - 2\alpha_H)$, C 为 $\cos(180^\circ - 2\alpha_H)$ 。

(10) 最终编织层形成过程如图15所示。由图

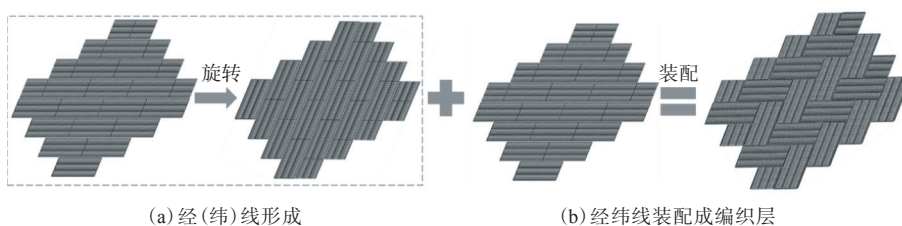


图14 编织层装配过程

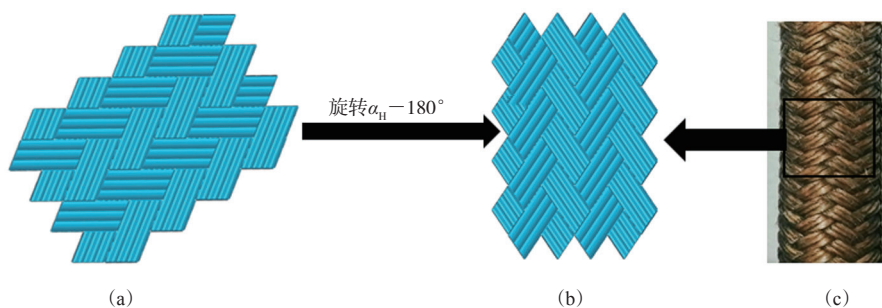


图15 最终编织层形成过程

15(c)可知, 胶管编织层轴向与胶管轴向同向, 且沿着纵向, 因此需要将(9)的编织层旋转 $\alpha_H - 180^\circ$, 得到最终编织层, 如图15(b)所示。

2 程序介绍

2.1 编织层参数化建模的GUI

胶管编织层参数化建模程序是利用Python语言^[12-13]编写, 实现如下功能: 几何建模、材料赋予、部件装配、网格划分、接触创建、边界施加和作业提交。程序从模型构建到最后计算出编织层的9个力学参数, 总运行时间不超过半小时, 极大地提高了计算效率。

图16所示为编织层参数化建模的GUI。GUI共有4个输入框和1个提示框。输入框1为编织层建模参数, 主要包括编织工艺参数、纤维材料参数以及经纬线间隙参数; 输入框2为经纬线间接触属性参数, 用于设置经纬线间库伦摩擦系数; 输入框

3为网格划分参数, 其中NOG用于控制经纬线间隙区域的网格密度, NOI_L用于控制经纬线交织区域的网格密度, NOB用于控制纤维截面区域的网格密度; 输入框4为计算机并行参数。输入上述参数后, 提示框会显示构建的编织层中纤维截面几何参数, 确认无误后程序会自动构建编织层, 同时自动设置编织层中经纬线间的相互作用并赋予边界条件, 提交分析, 计算出编织层的弹性模量、泊松比和剪切模量。

图17所示为程序构建的不同类型编织层。

2.2 纤维相互作用

纤维间接触: 假定在边界条件作用下纤维编织层在整个变形过程中每股纤维是相互绑定的, 不产生相对位移, 因此可建立Tie约束以作为纤维之间相互作用^[14]。

经纬线间接触: 实际中经纬线之间存在摩擦力, 因此设定经纬线之间为有摩擦接触, 摩擦系数

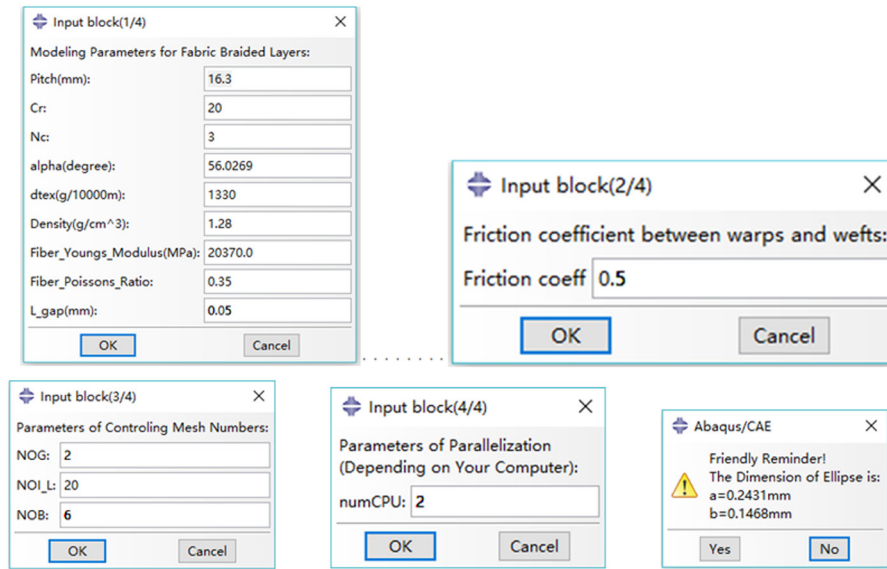


图16 编织层参数化建模的GUI

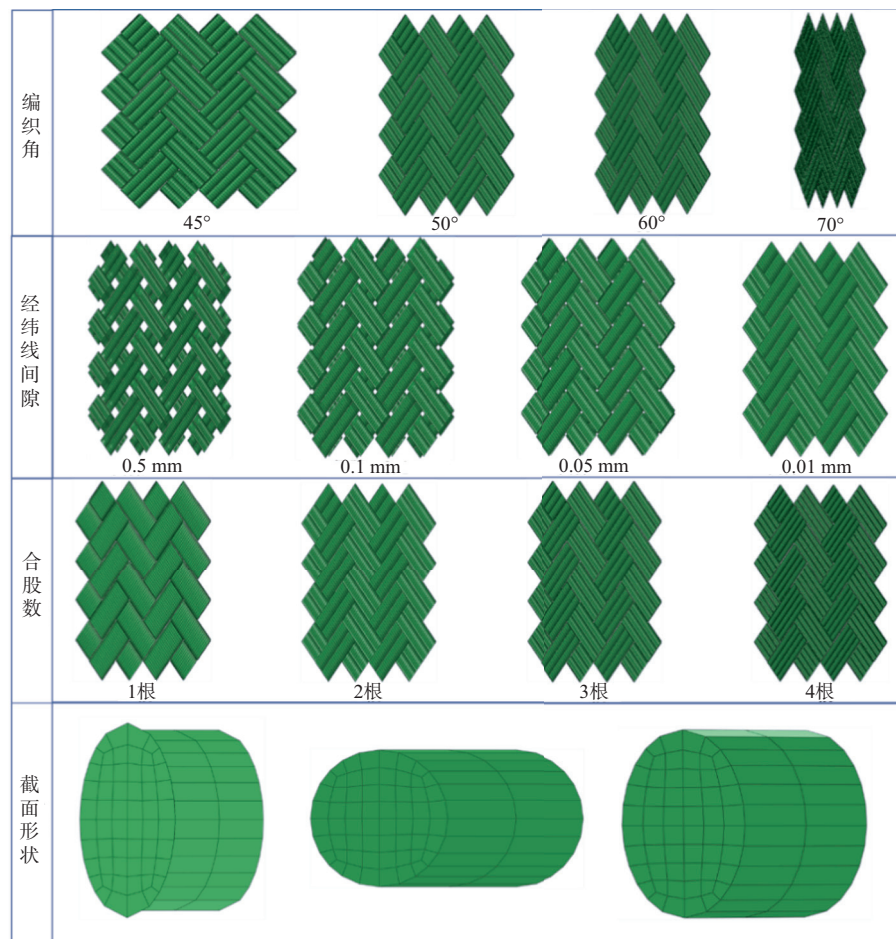


图17 程序构建的不同类型编织层

可以通过输入框2进行设定。

2.3 边界条件施加

本工作施加的边界条件主要分为拉伸边界条件和剪切边界条件^[14],其中拉伸边界条件的施加主要基于叠加原理^[15],而剪切边界条件则是采用材料力学中的简单剪切边界。由于采用的编织层三维模型是一个导程内编织层的一部分,其与周围其他纤维实体相连,因此编织层在变形过程中需要满足变形协同性;其次由于利用叠加原理求解编织层的弹性模量和泊松比时需要通过编织层的反作用力,出于便于提取反作用力考虑,编织层的边界需要施加在参考点上。

编织层变形协同性需要满足以下3个条件:

(1) 各边相邻两点保持相对位置不变(如图18所示);(2) 各边椭圆截面始终保持在同一平面上(如图18所示);(3) 整个变形过程中网格不发生畸变。通过建立如式(13)的约束方程,可以同时实现反作用力的提取。

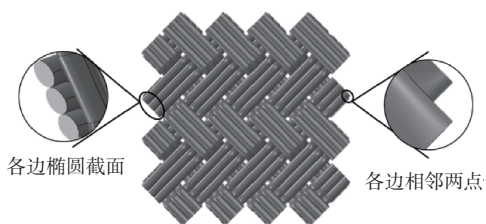


图18 编织层各边椭圆截面和相邻两点示意

$$U_{Dof}^{Reference} - U_{Dof}^{NodeSet} = 0 \quad (13)$$

式中,Reference为施加边界的参考点,NodeSet为与参考点耦合的点或点集,Dof代表二者约束的自由度。

2.4 网格划分

在Abaqus软件中导入ODB作为部件,该Part即为孤立网格。起伏状纤维实体由柱状纤维的ODB最后一帧结构形成,因此由这些部件装配得到的编织层也就是孤立网格,这同时解决了编织层网格难以划分的问题。通过输入框3设置纤维网格密度,即可间接地控制编织层网格密度。

3 结语

以规则编织层为例,介绍制动胶管编织层三维模型构建方法,并应用Abaqus软件强大的二次

开发技术,采用Python脚本语言分别进行内核代码和GUI代码编写,实现胶管中复杂编织层三维模型参数化建模的目标。本模型构建思路能够拓展到其他编织模式编织层的三维模型构建中。

参考文献:

- [1] Kawahara H, Yoshimura S, Noda N. FEM Analysis for Sealing Performance of Hydraulic Pressure Brake Hose Caulking Portion[J]. Key Engineering Materials, 2008, 385-387: 169-172.
- [2] Kwak S B, Choi N S. Micro-damage Formation of a Rubber Hose Assembly for Automotive Hydraulic Brakes under a Durability Test[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(4): 1262-1269.
- [3] 谢忠麟. 汽车用胶管的技术进展[J]. 橡胶工业, 2007, 54(6): 644-648.
- [4] Melenka G W, Carey J P. Braid CAM: Braided Composite Analytical Model[J]. Software, 2018, 7: 23-27.
- [5] Ayranci C, Carey J. 2D Braided Composites: A Review for Stiffness Critical Applications[J]. Composite Structures, 2008, 85(1): 43-58.
- [6] Xu L, Kim S J, Ong C H, et al. Prediction of Material Properties of Biaxial and Triaxial Braided Textile Composites[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(18): 2255-2270.
- [7] 杨东洁. 纤维纺丝工艺与质量控制(上册)[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2008.
- [8] Cho J R, Jee Y B, Kim W J, et al. Homogenization of Braided Fabric Composite for Reliable Large Deformation Analysis of Reinforced Rubber Hose[J]. Composites Part B Engineering, 2013, 53(7): 112-120.
- [9] 任九生, 周璿闻, 袁学刚. 钢丝编织高压胶管的力学性能及破坏强度[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2009, 15(6): 644-648.
- [10] 周璿闻. 高压胶管的力学响应和破坏分析[D]. 上海: 上海大学, 2010.
- [11] Lee G C, Kim H E, Park J W, et al. An Experimental Study and Finite Element Analysis for Finding Leakage Path in High Pressure Hose Assembly[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2011, 12(3): 537-542.
- [12] 苏景鹤, 江丙云. ABAQUS Python二次开发攻略[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [13] Sherburn M. Geometric and Mechanical Modelling of Textiles[D]. UK: University of Nottingham, 2007.
- [14] 刘枫, 李锦伟, 岳小雪, 等. 制动胶管纤维编织层的三维模型构建及其等效力学性能研究[J]. 特种橡胶制品, 2018, 39(4): 50-57.
- [15] Whitcomb J D. Three-dimensional Stress Analysis of Plain Weave Composites[A]. Composite Materials: Fatigue & Fracture (Third Volume)[C]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1991: 417-438.

收稿日期: 2019-08-16

Parametric Modeling of Braided Skeleton Layer for Brake Hose

LIU Feng¹, WANG Liangyan², YUE Xiaoxue², LI Fanzhu¹, YANG Haibo¹, JU Jianhong²

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Nanjing Orientleader Technology Co., Ltd, Nanjing 210028, China)

Abstract: The modeling of the braided tubular skeleton layer (abbreviated as braided layer) for brake hose was introduced. Taking regular braided layer as an example, the core and graphical user interface codes were written by using Python script language and Abaqus software, and the parametric modeling of the braided layer was established. The program not only had the function of three-dimensional modeling of braiding layer, but also had the functions of fiber interaction setting, boundary condition imposition, meshing and task submission. With the application of this program, analysis of the mechanical properties of braided layer was effectively simplified, and the research cycle was shortened.

Key words: brake hose; braided skeleton layer; parametric modeling; finite element analysis; Abaqus software

《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术)·2019版》近日发布,《橡胶工业》《轮胎工业》《橡胶科技》三刊学术影响力提升。日前,《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、中国科学文献计量评价研究中心、清华大学图书馆联合发布了《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术)·2019版》,显示《橡胶工业》《轮胎工业》《橡胶科技》三刊学术影响力明显提升。

在化学工程(TQ)类的171种统计源期刊中,北京橡胶工业研究设计院主办的《橡胶工业》《轮胎工业》《橡胶科技》按照影响力指数分别排在第36,76,96位。其中,《橡胶工业》影响力指数排名从2018年版的第50名上升到2019年版的第36名,复合影响因子从0.632提高到1.415,分区从Q2进入Q1,在橡胶领域期刊中排名第一;《轮胎工业》从2018年版的第133名上升到2019年版的第76名,分区从Q4进入Q2,进步明显;《橡胶科技》创刊6年即进入统计源(2013年从《橡胶科技市场》更为现名,被视为新刊),且取得尚佳的名次。

《中国学术期刊影响因子年报》每年发布1次,分为自然科学与工程技术版和人文社会科学版,力求反映科技创新与科技文献出版的趋势和特点,旨在客观、全面、规范、准确地报道科技期刊的

影响力指数、影响因子、被引频次、可被引文献量、下载率等期刊计量统计指标,并提供这些计量指标的文献统计来源信息,为科技期刊的发展提供参考。全国从事科研工作的单位均将其作为科研论文学术水平的重要评价指标。

《橡胶工业》《轮胎工业》《橡胶科技》三刊是橡胶轮胎领域专业化程度较高的期刊,均为国家新闻出版广电总局认定的学术期刊,且报道方向各有侧重。作为发表、传播和积累学术成果的载体,多年来三刊在推动橡胶行业学术发展和学科理论创新、培养技术人才、提升学术水平和学术规范方面起到积极作用。近年来,三刊通过围绕研究热点和基金项目进行专家约稿、办理中文DOI码业务、加强编辑委员会作用、发展热心办刊的通讯员、加入OSID(Open Science Identity)开放科学计划、组织国内外学术活动等举措,学术影响力大幅提升。

三刊取得的每一点进步都离不开编委、通讯员、作者和读者的关心和支持,在此表示衷心感谢!三刊也将继续努力,用更优质的出版物和服务回馈业界同仁的支持和厚爱!

(本刊编辑部 胡 浩 马 晓)