特约来稿

制动胶管编织骨架层正交各向异性力学性能与 管体扭转变形仿真分析及试验验证

张一川1,刘 枫1,符寿康2,王亮燕2,孙克俭2,李凡珠1*,卢咏来1*

(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:采用代表体积单元理论的细观力学分析法,推导出制动胶管纤维编织骨架层(简称编织层)正交各向异性力学性能分析方法,并通过编织层轴向拉伸试验对等效拉伸模量进行验证;开发了编织层的快速建模和等效力学性能分析软件,基于编织层的正交各向异性本构方程建立了制动胶管的高精度有限元模型,并进行扭转变形仿真分析和试验验证。试验表明制动胶管编织层正交各向异性力学性能的分析方法和管体扭转变形的仿真分析方法均合理和可靠。

关键词:制动胶管;编织骨架层;正交各向异性;力学性能;扭转变形;仿真分析 中图分类号:TO336.3 文章编号:1000-890X(2020)02-0083-08 ● 法法法律
● 日本

制动胶管是汽车制动系统中的重要元件,在 汽车制动时通过传递制动介质,将制动力传递到 制动蹄或制动钳,以产生制动力,使得汽车随时安 全制动^[1]。制动胶管一般由3层橡胶层及其间2层 骨架层构成,如图1所示。其中内外橡胶层起到防 漏、耐高温和耐化学腐蚀等作用,骨架层则承受外 部载荷、防止软管因高温、高压而导致径向过度膨 胀变形^[2]。制动胶管的骨架层通常以编织或缠绕 结构出现。本工作只关注编织结构的纤维骨架层 制动胶管。由于制动胶管长期处于波动剧烈的高 温、高压、高脉冲、高屈挠的工况下,胶管易发生失 效,从而导致油液浪费、环境污染,甚至会引起车 毁人亡的交通事故^[3],因此有必要深入研究制动胶 管的力学性能。

文献标志码:A

纤维编织骨架层(简称编织层)所具备的特殊 三维结构导致其具有各向异性的力学响应,通过 仿真分析方法研究制动胶管力学性能时增大了构 建精准编织层三维模型的难度。大多数国内外学 文章编号:1000-890X(2020)02-0083-08 DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2020.02.0083



图1 制动胶管结构剖析

者将编织层简化为各向同性材料,这种处理方法 值得质疑且无法保证胶管力学性能的准确性^[4-6]。

本工作首先采用代表体积单元(Representative Volume Element, RVE)理论的细观力学分析方法, 推导出编织层正交各向异性力学性能的分析方 法,并通过编织层轴向拉伸试验对等效拉伸模量 进行验证;同时开发了编织层的快速建模和等效 力学性能分析的软件,进而基于编织层正交各向 异性本构方程建立了制动胶管的高精度有限元模 型,并进行扭转变形仿真分析和试验验证。

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资助项目(ZY1911)

作者简介:张一川(1993一),男,辽宁鞍山人,北京化工大学硕 士研究生,主要从事橡胶软管的高精度有限元分析研究。

^{*}通信联系人(lifanzhu@mail.buct.edu.cn;luyonglai@mail. buct.edu.cn)

编织层各向异性力学性能仿真分析与试验 验证

1.1 编织层模型的建立

1.1.1 编织层单胞的选取

基于细观力学原理分析编织层的力学性能, 需要选取一个RVE结构作为研究对象,目前共有 矩形、平行四边形和锯齿形3种RVE结构。具体采 用何种RVE结构分析编织层等效力学性能,需要 从其几何结构、尺寸大小和边界施加3个方面进行 考虑。

在几何结构上,选取的编织层的RVE具有图 2(a)所示的实际结构,这既能保证整个编织层的 力学性能,又尽量不破坏纤维线的几何结构,RVE 结构能反映出经纬线之间的相互关系。在尺寸大 小上,一个导程内的编织层是整根胶管的一个重 复单元,它可提供整根胶管的几何结构和力学性能的信息,因此可以考虑用一个导程内的编织层作为编织层力学性能研究的分析模型[如图2(b)所示]。但进一步分析可知,一个导程内的编织层并非最佳的分析模型,其原因在于:首先一个导程内的编织层尺寸过大,以此为三维模型在网格划分时为保证计算精度,可能会产生上百万个节点和单元,对计算效率带来挑战,使整个力学性能的研究周期延长;其次编织层是由经线和纬线通过有规律的周期性交织和排列而形成的,一个导程内的编织层存在一个最佳尺寸的重复单元[如图2(c)所示]。综上原因,不考虑采取一个导程内的编织层作为研究对象。在边界施加上,首先在选取的RVE结构上施加与编织层实际受力方向一致的边界条件,其次选取的RVE结构有利于边界条件的施加。



图2 编织层RVE选取示意

(a)编织层实物

(b)一个导程内编织层展开

(c)编织层单胞

规则模式编织层结构如图3所示,图中黄色框 所示的平行四边形RVE结构虽然可提供编织层所 有的几何结构和力学性能信息,但是其沿着经纬 线方向施加的载荷与真实加载情况不符,不利于 编织层力学性能的研究。绿色框所示的矩形RVE 结构是目前研究编织物最常用的RVE结构,也是 3种RVE结构中尺度最小的一种结构,用于有限元



图3 规则模式编织层结构

分析可以提高分析效率。但由于矩形RVE结构是 沿着横向和纵向洗取,不可避免地直接破坏纤维 实体的完整性,导致矩形RVE结构可提供的编织 层结构和纤维线几何结构的信息较少。其次由于 矩形RVE结构的特点使其在进行三维几何模型构 建、网格划分和边界施加时变得困难。红色框所 示的锯齿形RVE结构是一种比较新的RVE结构^[7], 可提供编织层所有的几何结构信息,且锯齿形状 确保了RVE结构中纤维线的完整性。虽然锯齿形 RVE结构的尺度与平行四边形和矩形两种RVE结 构相比稍大,但比一个导程内编织层的尺度小,因 此锯齿形RVE结构作为编织层等效力学性能研究 的结构比较合适。如图2(c)所示,锯齿形RVE结构 左右两边各有4个齿,上下两边各有2个齿,这些齿 的位置相互正对,有利于施加与实际载荷相同的 边界。综上分析,本工作最终以锯齿形RVE结构作 为编织层力学性能分析的单胞。

1.1.2 编织层RVE三维结构剖析

对编织层锯齿形RVE三维结构进行剖析,可 知编织层中的纤维按方向可分为经线和纬线两大 类。经(纬)线中的纤维可归类为两种纤维实体, 即A系列和B系列起伏状纤维实体,两种系列纤维 实体的唯一区别在于起伏形状不一样,每个系列 纤维实体都含有长短不同、起伏周期不同的特征 单元。无论是A系列还是B系列纤维实体,通过截取1号纤维实体不同的长度即可得到其他纤维实体,即其他纤维实体能由1号纤维实体通过平移n个周期而得到。

由此分析得出,编织层RVE三维模型的构建 可以简化成A-1和B-1两种纤维实体的构建及其空 间位置的确定,如图4所示。





1.1.3 编织层建模技术路线

进行力学性能分析时,三维模型的构建主要 有两种方法:一种是直接在有限元软件前处理中 进行三维建模,再进行后续的相关分析;另一种是 利用第三方软件进行三维建模,然后导入有限元软 件中进行分析,其中第三方软件可分为通用三维 建模软件(如UG,SolidWorks和CATIA等)和专业 织物三维建模软件^[8-9](如TexGen和WiseTeX等)。

本工作在Abaqus前处理中进行编织层三维 建模,但该方法不是采用Abaqus的3种基本建模方 法构建出纤维实体三维模型,而是"制造"出纤维 实体,保证构建出具有不同编织角的编织层,同时 保证纤维实体间隙处的截面尺寸与整体纤维不一 致。此外,"制造"出的纤维实体解决了网格难以 划分以及网格划分不规则且易出错等问题。

1.1.3.1 柱状实体纤维模型构建

柱状纤维实体建模流程如图5所示。

首先通过计算得到A系列和B系列柱状纤维实体长度,扫掠生成柱状纤维实体。分别以纤维实体头尾端面为基准顺时针旋转一定角度,以此角度裁切柱体两端以形成纤维实体新端面而生成编织角,将赋予编织角的纤维在Abaqus中利用参考平面校准,生成间隙并装配,最后在交织区域间隔地施加上、下位移边界(位移大小为纤维实体椭圆截面的短半轴),施加交替的上、下位移的目的在于"制造"起伏状纤维实体。



86

1.1.3.2 柱状纤维实体"制造"及编织层装配

将生成的柱状纤维实体提交到Abaqus求解器中,分析得到输出数据库文件(Output Database, ODB),提取ODB文件最后一帧结构即可"制造"出起伏状纤维实体,如图6所示。



图6 起伏状纤维实体

所谓的"制造"起伏状纤维实体,是指对柱状 纤维实体交织区域施加边界条件,类似于将1根圆 柱体人为地压出起伏状。在Abaqus软件中导入 ODB文件中的起伏状纤维实体作为Part,该Part即 为孤立网格。由于起伏状纤维实体是由柱状纤维 的ODB文件的最后一帧结构形成,因此由Part装配 得到的编织层也就是孤立网格,同时解决了网格 难以划分的问题。生成起伏状纤维实体后经过分 散、分离、装配、归正的步骤装配成编织层的三维 模型,如图7所示。



1.2 仿真结果验证

1.2.1 编织层材料的获取

为了解决试验材料获取的问题,采用低温法 从制动胶管中获取编织层。低温法获取编织层的 原理是橡胶材料和纤维材料在低温下具有不同韧 性。橡胶在低温下处于玻璃态,具有脆性,而纤维 材料在低温下具有韧性,利用二者脆韧的极大差 异,将橡胶材料脆碎即可获取编织层材料。具体 操作流程如图8所示。



图8 低温法获取编织层流程示意

取一小段胶管,将其浸入盛有一定量液氮的 搪瓷杯中,1 min后迅速取出,用两把钳子快速脆 碎,待橡胶层恢复弹性再将胶管浸入液氮中,1 min 后迅速取出脆碎。反复循环几次,可以将橡胶层 去掉,最后得到完整的管状编织层。

1.2.2 编织层轴向拉伸试验

整个编织层轴向长度为35.0 mm,编织层直径 为7.7 mm,厚度为0.5 mm。由于编织层的直径和 厚度过小,进行拉伸试验时无法夹持,因此只进行 编织层轴向拉伸试验,以验证有限元分析的合理 性。采用万能拉力机进行编织层轴向拉伸试验。 试样初始标距为15 mm,拉伸速率为20 mm・s⁻¹, 试验结果如图9所示。



以2^{*}试样的试验结果为例进行分析。编织层 的轴向力-位移曲线可以分为缓慢上升和快速上 升两个阶段。在第1阶段,编织层的轴向力-位移 曲线有两个特点:一是受到的外力较小;二是轴向 力-位移曲线呈非线性关系。编织层受到拉伸作 用前,整体处于"松弛"状态,当受到拉伸作用时, 随着位移的增大,编织层中空腔逐渐减小,编织层 从"松弛"状态缓慢向"绷紧"状态过渡,此时编织 层受到的轴向力较小;受到拉伸作用时,编织层经 纬线发生滑移,此时经纬线之间为滑动摩擦,导致 编织层的轴向力-位移曲线呈非线性关系。在第2 阶段,编织层处于"绷紧"状态,编织角较小,且编 织层不存在空隙,经纬线之间由于运动受限而无 相对滑移,滑动摩擦转为静摩擦,因此编织层受到 的轴向力会随位移的增大而呈直线上升。

以编织层第2个阶段的轴向力-位移曲线斜率为编织层轴向模量,计算得到1[#],2[#]和3[#]试样的轴向模量分别为177.7,133.1和178.4 MPa。可以看出,试验测量的编织层轴向模量范围为133.1~178.4 MPa。

仿真模拟计算得到的编织层轴向模量为 372.9 MPa,与试验结果数量级相当,比试验结果 大2倍左右。具体的仿真分析结果的理论推导和 计算流程见前期研究报道^[10]。试验计算得到的轴 向模量比仿真计算得到的轴向模量偏小,可能有 以下原因: (1) 在材料获取过程中造成编织层材 料损伤,采用低温法获取编织层材料时,热胀冷缩 会对编织层的纤维表面造成损伤,降低了编织层 的强度; (2) 真实编织层结构具有一定缺陷,编织 层的有限元模型是一种理想化模型,假定编织层 中纤维的截面是规则的椭圆形,然而实际上编织 层中纤维的截面有多种形状,特别是经纬线交织 处的截面一般会比其他地方小,这种情况下编织 层的模量也会偏小; (3)由于不具备编织层力学 性能测试专用设备,因此只能利用万能拉力机对 编织层轴向进行拉伸试验,对试验过程观察发现, 编织层在拉伸过程中会因为夹持力不足而出现滑 脱现象,导致试验数据不准确,最终计算得到的轴 向力偏小。

2 编织层等效力学性能分析工具的开发

通过编织层三维模型构建方法和仿真分析 流程可知,求解编织层等效力学性能的整个过程 操作繁琐,费时费力,不利于研究不同参数(工艺 参数、纤维尺寸参数)与编织层力学性能及胶管力 学性能的关系。为了提高整个研究过程的效率, 本工作基于Abaqus软件,采用Python脚本语言编 写内核和图形用户界面(Graphical user interface, GUI)代码,开发出编织层等效力学性能分析的 GUI插件程序。程序实现几何建模、材料赋予、部 件装配、网格划分、接触创建、边界施加和作业提 交等功能,从模型构建到正交各向异性本构方程 的9个等效力学性能参数的获取,总运行时间不超 过30 min,大大提高了仿真分析的效率。

Abaqus为用户提供RSG(Really Simple GUI) 对话框构造器和Abaqus GUI工具包(Abaqus GUI Toolkit)两种方式来创建GUI插件^[11-13]。RSG对话 框构造器是Abaqus专门用于GUI插件开发的辅助 工具,包含大部分Abaqus GUI工具包的接口,具有 简单快捷、便于修改等特点,能满足简单GUI插件 重新开发的基本要求。

图10所示为制动胶管编织层分析软件 (HoseBraider)的GUI。通过该软件提交分析,可 快速计算出编织层的弹性模量、泊松比和剪切模 量等力学参数。

该软件的GUI字符说明如下。

(1)工艺参数: C_r为编织层的锭数, Alpha为编 织角, Pitch为编织层的导程, N_c为合股数。

(2)材料参数:Density为纤维密度,E为纤维 模量,dtex为纤维细度,Poissons_Ratio为纤维泊 松比。

(3) 网格参数:NOG为经纬线间隙区域的网格密度,NOI_S为经线纬线交织区域的网格密度, NOB为纤维截面区域的网格密度。

(4) 其他参数:L_gap为经纬线起伏交替处 的空隙, fraction_coeff为经纬线间的摩擦系数, numCPU为计算逻辑处理器。

(5)分析步参数:initial_Inc为初始分析步, min_Inc为最小分析步,max_Inc为最大分析步。



图10 制动胶管HoreBraider的GUI

利用HoseBraider可以构建出不同类型的编织 层结构,如图11所示。

3 制动胶管扭转变形的仿真分析及试验验证

为进一步验证编织层等效力学性能参数的有 效性,对制动胶管进行扭转变形的仿真分析。

首先将制动胶管的初始形状定位为U形,然后 左端固定,右端沿金属接头中心线所在轴方向扭 转180°,可得到胶管扭转变形的结果。通过前述分 析步骤可以得出内外编织层的正交各向异性的9 个等效力学性能参数,即3个弹性模量、3个泊松比 和3个剪切模量。

图12所示为基于编织层正交各向异性本构 方程的制动胶管的扭转变形仿真分析和试验结果 对比。

从图12可以看出,制动胶管用编织层正交各向异性力学性能的分析方法和管体扭转变形的仿 真分析方法均合理和可靠。若采用简单的各向 同性编织层的力学本构方程是得不到此分析结 果的。 4 结论

(1)采用RVE理论的细观力学分析法,结合叠 加原理推导出制动胶管编织层正交各向异性力学 性能的分析方法,并通过编织层轴向拉伸试验对 等效拉伸模量进行验证。

(2) 基于Abaqus的二次开发平台和RGS对话 框构造器开发了编织层等效力学性能分析软件 HoseBraider,并构思出HoseBraider工作流程,利用 Abaqus中RSG对话框构造器创建出Hose Braider 的GUI。

(3)基于编织层的正交各向异性本构方程建 立了制动胶管的高精度有限元模型,并进行扭转 变形仿真分析和试验验证。制动胶管编织层各向 异性力学性能的分析方法和管体扭转变形的仿真 分析方法均是合理和可靠的。

参考文献:

 Kawahara H, Yoshimura S, Noda N. FEM Analysis for Sealing Performance of Hydraulic Pressure Brake Hose Caulking Portion[J].



图11 不同类型的编织层结构



图12 制动胶管的扭转变形仿真分析结果与试验结果对比

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] Kang M W. A Study on Prediction of the Brake Hoses Deformation Associated with a Vehicle Motion[EB/OL]. https://doi. org/10.4271/2012-01-0224.
- [4] 任九生,周琎闻,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.
- [5] 周琎闻. 高压胶管的力学响应和破坏分析[D]. 上海:上海大学, 2010.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [8] Long A C, Brown L P. Modelling the Geometry of Textile Reinforcements for Composites: Tex Gen[EB/OL]. https://doi.org/ 10.1533/9780857093714. 2. 239.
- [9] Verpoest I, Lomov S V. Virtual Textile Composites Software Wise Tex: Integration with Micro–Mechanical, Permeability and Structural Analysis[J]. Composites Science & Technology, 2005, 65 (15):2563– 2574.
- [10] 刘枫,李锦伟,李凡珠,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.
- [11] 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.
- [12] 曹金凤. Python语言在Abaqus中的应用[M]. 北京: 机械工业出版 社, 2011.
- [13] 曹金凤,纪乃华,黄伟,等. 轮胎多方案有限元分析结果自动后处 理系统的研发[J]. 橡胶工业,2019,66(1):51-56.

收稿日期:2019-08-16

Simulation Analysis and Experimental Verification of Orthogonal Anisotropic Mechanical Properties of Braided Framework Layer and Torsion Characteristics of Brake Hose

ZHANG Yichuan¹, LIU Feng¹, FU Shoukang², WANG Liangyan², SUN Kejian², LI Fanzhu¹, LU Yonglai¹ (1.Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2.Nanjing Orientleader Technology Co., Ltd, Nanjing 210028)

Abstract: By using micro-mechanics analysis method based on representative volume element theory, the analytical method of orthogonal anisotropic mechanical properties of the braided fibrous framework layer (referred to as braided layer) of the brake hose was derived. The equivalent mechanical modulus was verified by axial tensile experiment of the braided layer. The software of fast modeling and equivalent mechanical properties analysis of the braided layer was developed. Based on the orthogonal anisotropic constitutive equation of the braided layer, a high-precision finite element model of the brake hose was established, and the simulation analysis and experimental verification of the torsion deformation were carried out. The results showed that, the analysis method of orthogonal anisotropic mechanical properties of the braided layer and the simulation method of the torsion characteristics of the hose were reasonable and reliable.

Keywords:brake hose; braided framework layer; orthogonal anisotropic; mechanical property; torsion deformation; simulation analysis

一种橡胶砂轮的制备方法 由湖北磊鑫研 磨科技股份有限公司申请的专利(公开号 CN 109848876A,公开日期 2019-06-07)"一种橡胶 砂轮的制备方法",涉及的橡胶砂轮磨片配方为: 丁腈橡胶 30~40,天然橡胶 20~30,树脂粉 5~8,竹炭粉 1~3,氧化锌 1~3,硬脂酸 3~5,促进剂M 2~4,硫黄 6~10。其制备方 法为:将胶料各配方组分混合均匀,经成型和硫化 即制得产品。该橡胶砂轮磨片硬度大,打磨效率 高,生产成本低,且可使打磨工件表面具有良好的 光洁度和平整度。

(本刊编辑部 赵 敏)