

高速列车U型橡胶外风挡低温下收缩性能分析

顾 铖¹ 徐 磊² 俞成涛¹ 王加政²

(1. 江苏理工学院 机械工程学院, 常州 213000)

(2. 常州今创风挡系统有限公司, 常州 213000)

摘要: 基于橡胶的低温拉伸试验数据,利用 Ansys 软件拟合得到橡胶材料 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型参数,并根据 3 种实际工况对 U 型橡胶外风挡进行热固耦合仿真分析,研究不同工况对 U 型橡胶形变的影响;并且对 U 型橡胶外风挡和 3 块不同厚度压条预紧的橡胶样件进行低温试验,研究温度及压条厚度对其形变的影响。结果表明,U 型橡胶的形变主要因温度变化产生,U 型橡胶高度明显减小,而侧壁厚度与橡胶长度的形变量较小;另外,压条的厚度对螺栓孔处橡胶的形变量影响较大,相对于 5、6 mm 厚度的压条,4 mm 压条在螺栓预紧力作用下产生了较大的形变,导致螺栓孔处形变较大,进而增加压条的厚度可有效减小脱孔风险;将有限元仿真数据与低温试验的结果对比发现两者基本一致,表明有限元分析的可行性与低温试验的可靠性。研究结果对 U 型橡胶外风挡低温下应用的可靠性提供了一定的指导依据。

关键词: U 型橡胶外风挡; Mooney-Rivlin 超弹性本构模型; 热固耦合; 有限元分析; 低温试验

中图分类号: U270 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.01.010

0 引言

高速铁路集中反映了一个国家铁路线路结构、列车牵引动力、高速运行控制、高速运输组织等多方面的技术水平,代表了一个国家的整体科技和工业水平^[1]。德国、日本等传统制造业强国早在 20 世纪就开始了相应的研究,进行了大量的理论与试验工作^[2]。我国于 20 世纪 90 年代开始发展高速铁路技术,先后成功研制最大速度 212.6、240、321.25 km/h 的高速列车。其中,高速列车所用风挡设计技术是四大连接技术之一^[3]。高速动车组的风挡分为内风挡和外风挡两部分:内风挡主要作为旅客安全通道,而外风挡主要用来降低车辆运行时产生的噪声,同时还使两个车辆之间弧面连接平滑一致,以降低高速动车组运行时的空气阻力^[4]。高速列车外风挡的主要形式有半包式裙板型橡胶外风挡、半包式 U 型橡胶外风挡、全包式外风挡和隔音风挡等^[5]。

目前,对于高速列车外风挡,许多学者从不同方面进行了研究。白夜等^[6]进行了系统试验,给出了研究风挡腔内流场气动特性可行的试验方案,此方案为局部减阻之后的研究提供依据。NIU 等^[7-8]分别对 U 型橡胶外风挡结构在列车空气动力作用下产生变形及振动问题进行了研究,结果表明,当气动载荷的激励频率接近外风挡结构固有频率时易引起共振现象,此时会严重影响列车运行稳定性、乘客舒适性以及外风

挡结构安全性。唐明赞等^[9]采用计算流体力学数值计算的方法研究了外风挡与车体外表面的安装间距对风挡气动特性的影响规律。刘国庆等^[10]针对不同车型,使用大涡模拟和基于 FW-H 方程的声类比方法分析了高速列车气动噪声分布的特点。刘翰林等^[11]采用数值模拟的方法对 400 km/h 的高速列车气动声学设计研究给予一定参考价值。杨加寿等^[12]对不同风挡形式的气动性能进行研究,通过数值模拟的方法得出了上、下和两侧闭式的风挡形式更适合高速列车的结论。蔡鉴明等^[13-14]分别采用不同材料本构模型,研究了模态试验激励点与响应位置对模态参数的影响。DAI 等^[15]提出了一种混合方法来研究风挡区域周围的运动噪声,为风挡辐射气动噪声研究提供新思路。TANG 等^[16]通过双向迭代非线性流固耦合模型仿真得到外风挡周围的流场特性,分析其振动机制及特性,为高速列车外风挡的空气弹性问题研究提供参考。谭莲影等^[17]探讨了风挡橡胶基材三元乙丙橡胶的防老体系、填充体系以及硫化体系对外风挡橡胶材料性能的影响,并成功开发了性能满足技术要求的风挡橡胶材料。欧阳黎健等^[18]分析了风挡的应用情况及相应特点,为风挡选型提供依据。高军等^[19]结合相关标准对外风挡进行结构分析及计算,从选材、减阻和隔声方面对外风挡的结构设计优化进行探讨。

收稿日期: 2023-06-16 修回日期: 2023-07-01

基金项目: 江苏省青蓝工程优秀青年骨干教师项目(202111)

作者简介: 顾铖,男,1998年生,江苏无锡人,硕士研究生;主要研究方向为轻量化设计与分析;E-mail: 249554628@qq.com。

俞成涛(通信作者),男,1987年生,安徽舒城人,博士,副教授,硕士研究生导师;主要研究方向为机械创新设计;E-mail: yuct@jst.edu.cn。

引用格式: 顾铖,徐磊,俞成涛,等. 高速列车 U 型橡胶外风挡低温下收缩性能分析[J]. 机械强度,2025,47(1):84-91.

GU Cheng, XU Lei, YU Chengtao, et al. Analysis of shrinkage performance of u-shaped rubber outer windshield of high-speed train at low temperature[J].

Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(1):84-91.

目前针对外风挡的研究主要集中在气动性能、噪声、模态参数、选型等方面,而 U 型橡胶外风挡的低温性能尚未有研究。由于高速列车特殊的工作环境,在国内由南到北的线路上存在从最高温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到最低温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的可能性。本处于相互挤压的两 U 型橡胶,在低温时其间可能会产生一定的缝隙,而当外风挡存在缝隙时,缝隙起到了导流作用,将高速气流导入两车连接处,导致列车风阻增加,同时气动噪声也可能增强^[20]。因此,对 U 型橡胶外风挡低温特性的研究尤为重要。

本文以半包式 U 型橡胶外风挡为研究对象,采用有限元分析方法分别对 3 种工况下 U 型橡胶的收缩性进行研究并比较分析,使用低温试验分析的方法对工况 3 下的 U 型橡胶外风挡低温收缩性进行研究,然后对低温试验结果与有限元计算结果进行相互验证,并研究了不同厚度压条对橡胶螺栓孔厚度的影响。

1 U 型橡胶外风挡的有限元分析

1.1 橡胶低温性能

橡胶作为超弹性材料,具有材料非线性和几何非线性的特点,为得到低温 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下橡胶的力学性能,需对试样在低温环境下做拉伸试验得到应力-应变曲线,为消除偶然因素的影响,本文采用 4 块相同试样进行试验,试验结果如图 1 所示。

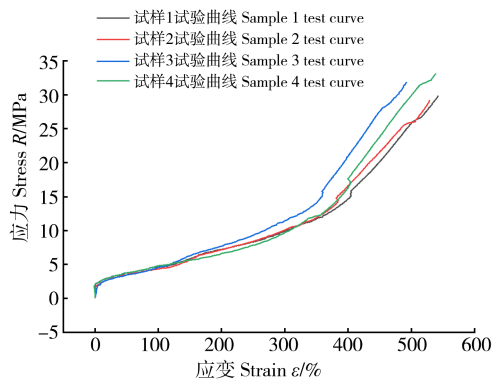


图 1 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 拉伸试验各试样应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of each sample in the $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ tensile test

对橡胶试样进行有限元分析时,主要难点在于本构关系和接触特性的定义和选择,本文采用最常用的 Mooney-Rivlin 本构模型分别对 4 块试样在 $0\sim 150\%$ 应变范围内做拟合^[21]。该模型在伸长应变为 100% 之内与压缩应变为 30% 之内的中小变形有较好的适用性^[22]。各试样拟合曲线如图 2 所示,可以发现,4 块试样的试验数据与拟合数据重合度较高,可以用来描述三元乙丙橡胶的超弹性力学行为。取拟合重合度最高的试样 3 得出的 3 个参数: $C_{10}=13\ 995$ 、 $C_{01}=979\ 864$ 、 $C_{11}=-1.8111$,作为有限元分析的橡胶本构模型参数。

1.2 U 型橡胶外风挡的有限元模型

图 3(a) 所示为 U 型橡胶模型及原始尺寸参数,高度 $H_1=243.5\text{ mm}$,侧壁厚度 $H_2=16.5\text{ mm}$,长度 $H_3=$

400 mm ,圆弧顶部厚度为 6 mm ,底部孔距为 150 mm 。图 3(b) 所示为装配完整的 U 型橡胶外风挡安装示意图,主要部件为 U 型橡胶、内安装条和底座框,并通过螺栓连接装配。在处理模型时,螺栓部分进行相应的简化,便于后续的计算。

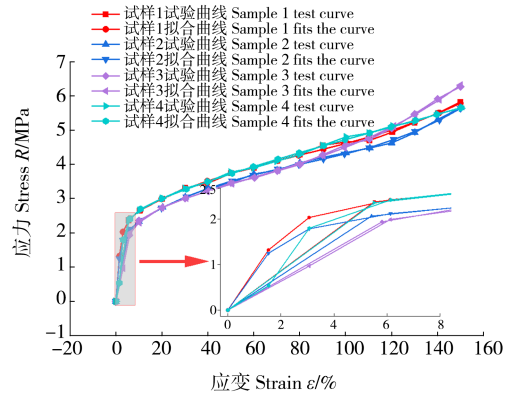
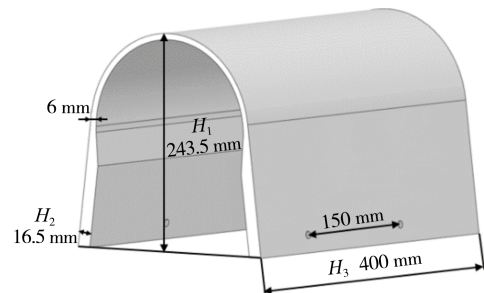


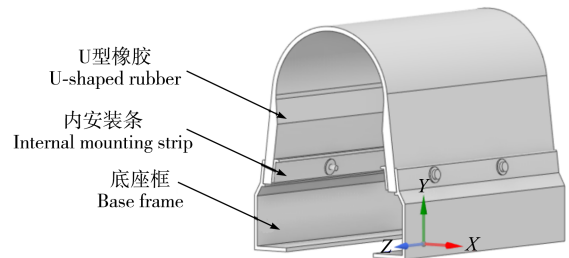
图 2 各试样应力-应变曲线与拟合曲线

Fig. 2 Stress-strain curve and fitting curve of each sample



(a) U 型橡胶尺寸参数

(a) U-shaped rubber size parameters



(b) U 型橡胶外风挡安装示意图

(b) Schematic diagram of U-shaped rubber outer windshield installation

图 3 U 型橡胶外风挡三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model of U-shaped rubber outer windshield

1.3 边界条件

使用 Ansys 软件计算低温环境下 U 型橡胶的形变,需要利用温度场与静力结构场耦合。在温度场中需设定材料参数、模型接触、网格划分与温度,U 型橡胶材料使用的是前面拟合出的 Mooney-Rivlin 本构模型参数,热膨胀系数为 $2.5\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;内安装条与底座框都为铝合金材质,弹性模量为 71 GPa ,泊松比为 0.33 ,密度为 2.77 g/cm^3 ,热膨胀系数为 $2.3\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;接触设置中 U 型橡胶与其他部件都为摩擦接触,摩擦因数为 0.25 ,其余接触默认为绑定,温度根据实际工况设定。

如图 4 所示,先设定好温度场相关边界条件进行计

算,并将温度场的计算结果输入到静力结构场中作为计算边界条件,进入静力结构场设定其余的边界条件。

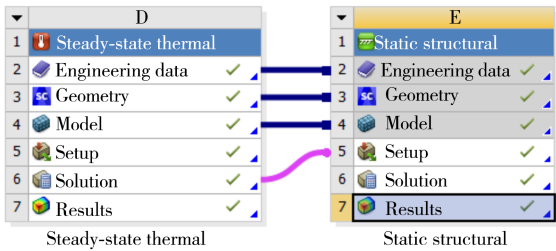


图4 温度场与静力结构场耦合

Fig. 4 Coupling of the temperature field and the static structure field

外风挡实际安装过程中,底座两边螺栓使用扭力扳手拧紧,转矩为 $14 \text{ N}\cdot\text{m}$,扭力系数为 0.13 ,螺栓选择为 $M8$,材料为 $A2-70$,由扭力与预紧力换算公式可得预紧力为 13.5 kN ,按实际安装设定边界条件,分析时2个底座框底部固定,边界条件如图5所示。

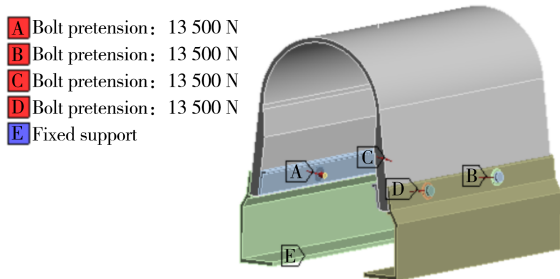


图5 外风挡边界条件设定

Fig. 5 Setting of boundary conditions of the outer windshield

1.4 温度场的有限元理论

为分析橡胶因低温而引起的形变,需要了解其温度场的分布,由热力学第一定律、傅里叶导热定律及能量守恒定律可知,需要从3个维度对温度场进行分析,并且根据热传递理论来建立温度场的导热微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中, x, y, z 为温度场的3个维度; k 为物体的导热系数; T 为温度场的数学表达式; q''' 为单位体积内的能量转换速率; ρ 为密度; c 为比热容。

导热微分方程是对导热物体内部温度场内在规律的描述,适用于所有导热过程,当需要研究特定情况下的导热问题时,必须给予适当的特定条件,称为定解条件;定解条件包括时间条件和边界条件。

1.4.1 时间条件

初始(时间)条件即物体初始瞬间温度分布规律,其数学表达式为

$$\tau = 0 \quad (2)$$

$$T = f(x, y, z) \quad (3)$$

1.4.2 边界条件

1)第1类边界条件,规定物体边界上任何时刻的温度分布为

$$T_b = f(x, y, z, \tau) \quad (4)$$

2)第2类边界条件,规定物体边界面上的热流密度分布为

$$q_b = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_b = f(x, y, z, \tau) \quad (5)$$

式中, q 为导热热流密度。

3)第3类边界条件,规定物体边界面的对流条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_b = h(T_b - T_f) \quad (6)$$

式中, h 为介质与物体之间的换热系数; T_f 为周围介质的温度。

1.5 网格无关性验证

在进行有限元分析时,由于外风挡模型较为简单,故无须做多余的简化。将模型导入物理场,进行网格划分,底座框底部做固定支撑,温度场设定温度 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 求解。为了更加高效地完成有限元分析,首先使用 Ansys 软件对划分的网格与分析结果进行无关性验证。橡胶部分采用六面体网格划分方法,其余采用四面体网格划分方法,对橡胶的前后端面与内外圆弧面进行网格大小的设置,如图6所示。经计算得到的网格无关性验证结果如表1所示,其中 M_1 代表前、后端面, M_2 代表内、外圆弧面。

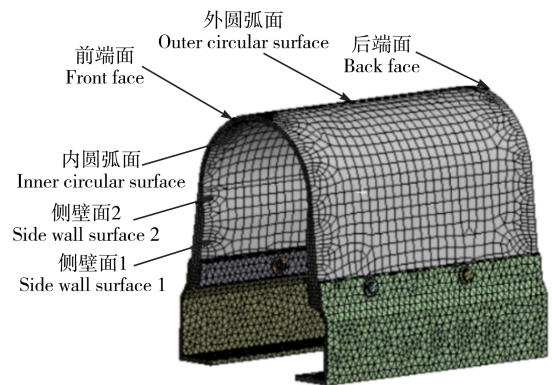


图6 U型橡胶外风挡网格划分

Fig. 6 Meshing of U-shaped rubber outer windshields

表1 网格无关性验证结果

Tab. 1 Mesh independence verification of front and rear faces

编号 Number	M_1 网格尺寸 Size of M_1 mesh/mm	M_2 网格尺寸 Size of M_2 mesh/mm	网格数量 Mesh quantity	最大形变 Maximum deformation/mm
1	6	20	20 645	7.418 4
2	6	15	22 192	7.388
3	6	10	26 867	7.412 4
4	4	20	22 473	7.396 5
5	2	20	33 993	7.436

由表1可知,对局部网格进行加密,并不会导致最终结果有很大的变化,为提高计算效率,最终选择了前、后截面网格尺寸为 6 mm ,内、外圆弧面网格尺寸为 20 mm 。

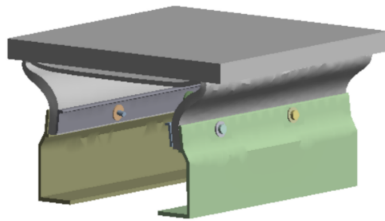
1.6 实际工况与仿真结果分析

1.6.1 实际工况

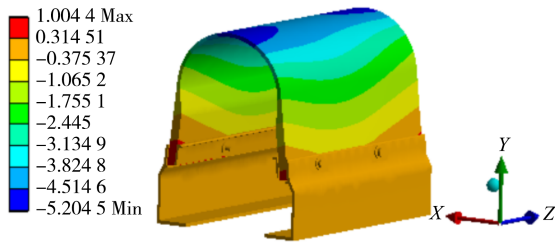
根据高速列车实际运行工况,在实际过弯时,内侧 U 型橡胶受压,外侧处于松开状态,同时考虑温度变化对橡胶的影响,给出 3 种模拟工况:①在常温 20 °C 下,U 型橡胶外风挡受挤压后松开的形变状态;②初始温度 20 °C,最终温度 -40 °C,U 型橡胶产生的形变状态;③结合前两种工况模拟低温环境下 U 型橡胶受压后松开的形变状态。由于工况 3 结合了前两种工况,因此下面对工况 3 进行重点分析。

1.6.2 结果分析

根据工况 3,设置初始温度 20 °C,最终温度 -40 °C,保持一段时间 -40 °C 后,橡胶产生冷缩形变,再将橡胶压缩 140 mm,持续 30 min 后松开。仿真时,应用静力学模块,设置一块平板对橡胶实行 140 mm 的压缩,如图 7(a)所示。图 7(b)所示为模拟工况 3 得到的 U 型橡胶的 Y 方向形变量。由图 7(b)可以发现,橡胶的顶部圆弧面和底部均有收缩现象,顶部的收缩较为明显,有 5.205 mm 的收缩量,U 型橡胶整体在 Y 方向上收缩了 6.209 mm。



(a) U 型橡胶受压
(a) U-shaped rubber under pressure



(b) 外风挡 U 型橡胶 Y 方向 (H_1) 形变
(b) Y-direction (H_1) deformation of U-shaped rubber outer windshield
图 7 工况 3 下 U 型橡胶形变

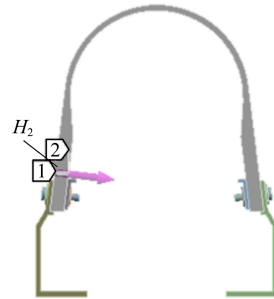
Fig. 7 U-shaped rubber deformation under working condition 3

图 8 所示为 U 型橡胶侧壁厚度的形变。应用图 8(a)所示的在静力学模块中插入指定路径的方法,能够得到侧壁在这条路径上的形变,得到路径收缩量约为 0.246 mm,如图 8(b)所示。

图 9 所示为 U 型橡胶长度沿 Z 方向的形变。图 9(a)所示为插入指定路径方法得到 Z 方向长度的形变,如图 9(b)所示,路径两端向内产生形变收缩,产生的收缩量为 1.772 mm。

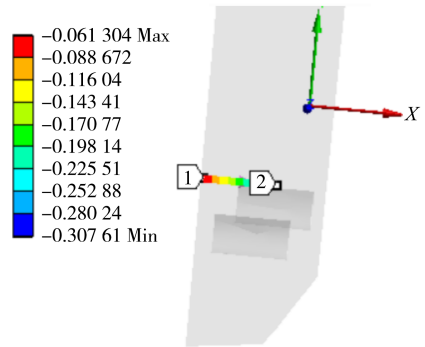
应用相同的方法,对工况 1 和工况 2 进行了模拟,得到如表 2 所示的 3 种工况下 H_1 、 H_2 、 H_3 的形变量。由

表 2 可知,工况 1 下 3 个尺寸的形变量都很小,可忽略不计;而在工况 2 与工况 3 下,相应尺寸之间的形变量较为接近。由表 2 可知,U 型橡胶在常温的环境下受压后具有较强的回弹性,可恢复至原始尺寸,而温度的降低使得橡胶产生较为明显的收缩。



(a) U 型橡胶侧壁方向路径(1→2)

(a) Direction path(1→2) of U-shaped rubber side wall

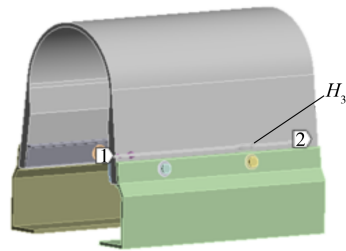


(b) U 型橡胶侧壁 X 方向路径(1→2)变化

(b) X-direction path (1→2) change of the U-shaped rubber side wall

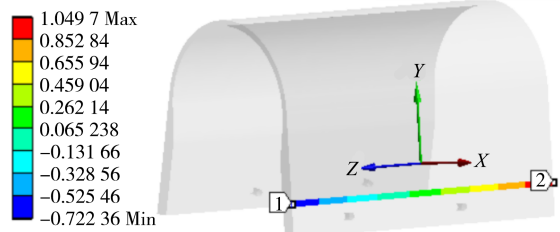
图 8 U 型橡胶侧壁厚度 X 方向(H_2)形变

Fig. 8 Thickness deformation in X-direction(H_2) of the U-shaped rubber side wall



(a) U 型橡胶长度方向路径(1→2)

(a) Length direction path (1→2) of the U-shaped rubber



(b) U 型橡胶长度 Z 方向路径(1→2)变化

(b) Z-direction path (1→2) change of the length of the U-shaped rubber

图 9 U 型橡胶长度 Z 方向(H_3)形变

Fig. 9 Z-direction(H_3)deformation of the length of the U-shaped rubber

表 2 3种工况有限元数据

Tab. 2 Finite element data for three working conditions

形变量 Deformation	工况 1 Working condition 1	工况 2 Working condition 2	工况 3 Working condition 3
H_1 形变量 H_1 deformation/mm	0.002	6.054	6.209
H_2 形变量 H_2 deformation/mm	0.001	0.25	0.246
H_3 形变量 H_3 deformation/mm	0.001	1.681	1.772

2 U型橡胶外风挡样件试验分析

2.1 外风挡样件试验方案

为验证上述仿真结果准确性,制作了U型橡胶外风挡样件,并进行了低温试验,如图10所示。图11所示为试验过程展示,首先将外风挡安装在试验箱内;然后,设置温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,并持续1h;接着,采用工装压板对U型橡胶压缩140mm,维持30min后松开。试验过程总共维持2h,试验结束后拆除压缩工装并取出样件,测试样件的各尺寸 H_1 、 H_2 、 H_3 。



(a) U型橡胶外风挡样件
(a) U-shaped rubber outer windshield sample

(b) 高低温试验箱
(b) High and low temperature test chambers

图 10 U型橡胶外风挡样件与高低温试验箱

Fig. 10 U-shaped rubber outer windshield sample and high and low temperature test chambers



(a) 外风挡安装图
(a) Installation drawing of the outer windshield

(b) 试验箱温度设置图
(b) Temperature setting diagram of test chambers



(c) 外风挡下压图
(c) Pressure diagram of the outer windshield

图 11 高低温试验箱内部安装及温度设置

Fig. 11 Internal installation and temperature setting of high and low temperature test chambers

2.2 仿真结果与低温试验比较分析

为了减小测量误差每个尺寸均测量了3次,并计算了与原始尺寸对比的平均形变量,结果如表3所示。由表3可知, H_1 、 H_2 、 H_3 尺寸测量值的平均形变量与仿真形变量分别存在1.258、0.013、0.205 mm的误差。导致误差产生的原因:一方面是在实际测量中 H_1 尺寸与 H_3 尺寸过大,选用钢尺测量,缺少测量的精确度,且 H_1 尺寸顶部为圆弧面,底部为平面的测量方式,进而加大了测量误差,而 H_2 尺寸较小,使用游标卡尺测量精确度较高;另一方面是由于橡胶低温拉伸试验存在一定误差,使拟合出的超弹性参数不够准确进而导致仿真结果存在偏差。

表 3 U型橡胶样件有限元结果与低温试验比较

Tab. 3 Comparison of finite element results of U-shaped rubber samples and low temperature test

名称 Name	H_1	H_2	H_3
原始尺寸 Original size/mm	243.5	16.5	400
有限元仿真 Finite element simulation/mm	237.291	16.248	398.23
仿真形变量 Simulation deformation/mm	6.209	0.246	1.772
测量 1 Measurement 1/mm	236	16.3	398.5
测量 2 Measurement 2/mm	235.5	16.12	399
测量 3 Measurement 3/mm	236.6	16.38	397.8
平均形变量 Average deformation/mm	7.467	0.233	1.567

结果表明,3个尺寸误差都在较为合理范围内,因此证明了仿真结果的正确性。

3 橡胶样件试验方案

为研究外风挡橡胶螺栓孔厚度方向形变与压板厚度及低温下的关系,以补充外风挡试验中卡尺无法测量螺栓孔厚度方向的尺寸问题。图12所示为准备的1块无压条橡胶样件及3块安装压条橡胶样件。其中,3块安装压条橡胶样件都按实际螺栓预紧要求进行预紧,两侧压板厚度分别为4、5、6 mm。

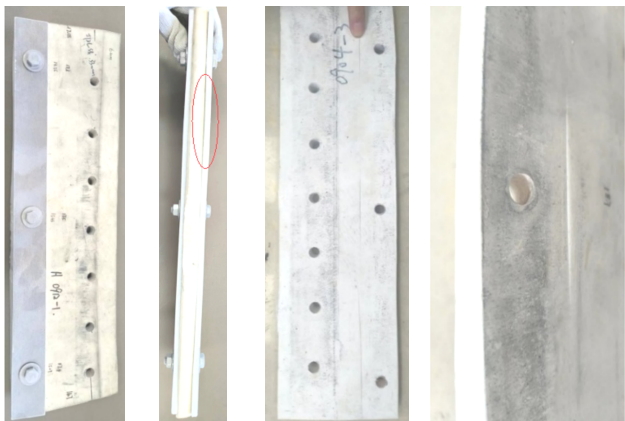


图 12 橡胶样件

Fig. 12 Rubber samples

首先测量各橡胶样件 3 个螺栓孔处厚度的原始尺寸, 分别用 D_1 、 D_2 、 D_3 表示, 然后测量压条预紧后的尺寸, 之后将所有橡胶样件放入试验箱内, 将试验箱温度设置为 $-40\text{ }^\circ\text{C}$, 维持 2 h。试验结束后, 对每个样件 3 个螺栓孔处厚度进行测量并拆除压条后再次测量, 记录每次测量数据。

图 13 所示为压条橡胶样件在 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 低温后的照片。图 13(a) 与图 13(b) 分别为橡胶样件的正视图与压条侧的侧视图, 图 13(c)、图 13(d) 所示为拆除压条后橡胶样件所留下的压痕, 证明压条经过预紧对橡胶样件造成一定程度的压痕。

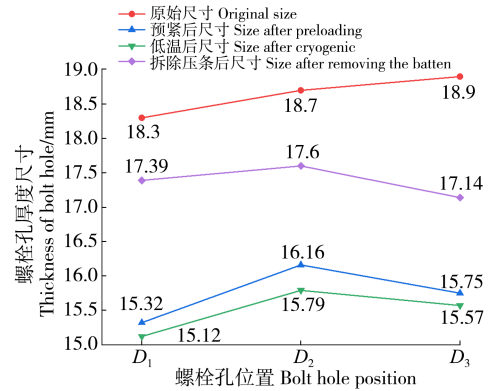


(a) 正视图 (b) 侧视图 (c) 压条压痕示意图 (d) 压痕放大示意图
(a) Front view (b) Side view (c) Schematic diagram of the indentation enlargement (d) Schematic diagram of the indentation enlargement

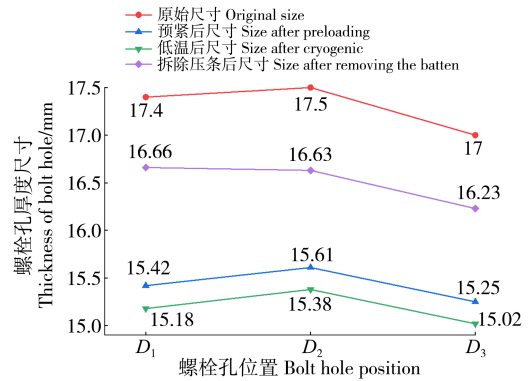
图 13 压条橡胶样件低温后示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the rubber sample of the batten after low temperature

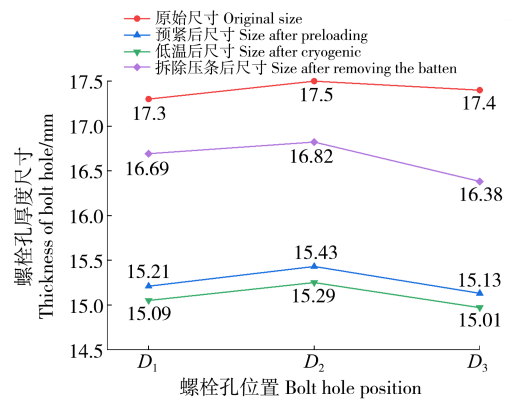
图 14 为 4 种橡胶样件螺栓孔厚度变化的折线图。其中, 图 14(a)、图 14(b)、图 14(c) 对 3 种不同厚度压条的橡胶样件给出了 3 种不同情况下的螺栓孔厚度变化。预紧后 4 mm 压条橡胶样件发生了最多 3 mm 的形变, 5 mm 与 6 mm 压条橡胶样件均发生最多 2 mm 的形变; 低温后 4 mm 压条橡胶样件发生了接近 0.3 mm 的形变, 5 mm 与 6 mm 压条橡胶样件发生的形变均在 0.2 mm 左右; 另外, 拆除压条后原本被预紧的橡胶发生回弹, 4 mm 压条橡胶样件发生了 2 mm 左右的回弹, 5 mm 与 6 mm 压条橡胶样件均发生 1 mm 左右的回弹, 回弹后尺寸与原始尺寸相比均收缩 1 mm 左右。以上结果说明了使用 4 mm 的压条相对于 5 mm 和 6 mm 的压条, 橡胶沿着压条方向各处的变形更加不均匀, 处于螺栓预紧的部位被压缩得较多, 而位于 2 个螺栓中间的橡胶可能并没有被压紧, 这可以从图 13(b) 中明显地观察到。这是因为压条的厚度较小时, 压条在被螺栓预紧后, 其在橡胶的反力作用下产生了较大的变形, 所以此时橡胶在承受高度方向的载荷时, 主要由螺



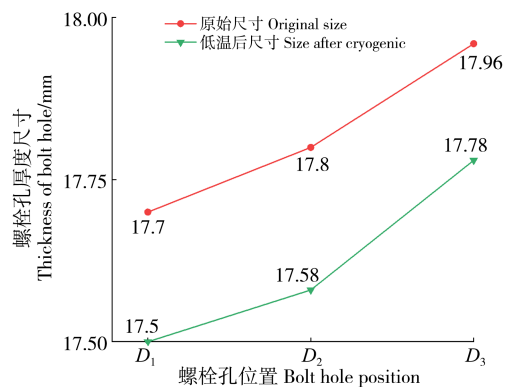
(a) 4 mm 压条橡胶样件螺栓孔处厚度变化
(a) Variation in bolt hole thickness for 4 mm strip rubber samples



(b) 5 mm 压条橡胶样件螺栓孔厚度变化
(b) Variation in bolt hole thickness for 5 mm strip rubber samples



(c) 6 mm 压条橡胶样件螺栓孔厚度变化
(c) Variation in bolt hole thickness for 6 mm strip rubber samples



(d) 无压条橡胶样件螺栓孔厚度低温变化
(d) Low temperature variation in bolt hole thickness of rubber samples without pressure strips

图 14 4 种橡胶样件螺栓孔厚度变化

Fig. 14 Variation of bolt hole thickness of four rubber samples

栓处的橡胶承载,而位于两个螺栓中间部分的橡胶,由于并没有被压条压实,无法提供承载能力,从而增加了螺栓处橡胶安装孔的形变甚至脱孔的风险。这就要求在实际安装过程中需要使用厚度得当的压条使橡胶在受压时受力更均匀,从而减小橡胶形变,避免发生脱孔的风险,这也可以作为一项重要的优化参数。

4 结论

通过对橡胶材料低温拉伸试验测定其应力-应变曲线并使用超弹性本构模型拟合,并对外风挡进行了有限元仿真与低温试验,研究橡胶形变量的大小及其影响因素,主要结论如下:

1) 橡胶材料通过低温拉伸试验获得应力-应变曲线,使用 Mooney-Rivlin 本构模型在 0~150% 小应变范围内进行拟合曲线,拟合度较高,对橡胶超弹性参数确定具有一定参考价值。

2) 基于试验获得的超弹性参数,使用有限元与低温试验相结合的方法,研究了 U 型橡胶外风挡在实际工况下的形变状态。分析结果表明,U 型橡胶外风挡受外力作用时,顶部受压的情况较为明显,且具有较强的回弹性,低温环境下,橡胶自身产生的收缩进一步增大橡胶圆弧顶部的收缩。两个相对安装的外风挡之间产生的这种收缩量,可能会使其间产生缝隙,从而造成一定的风阻,以致增加列车运行功耗。

3) 基于低温试验,进一步研究不同厚度的压条对橡胶样件螺栓孔厚度的影响,结果发现,相比于 5 mm 与 6 mm 的压条,采用 4 mm 的压条时,由于螺栓预紧力作用致使压条产生形变,同时橡胶件受压形变不均,螺栓孔处发生过大的形变,更加容易发生脱孔的风险。

4) 低温试验与有限元计算结果相互验证,这样的方法可以大量减少重复试验和经验判断带来的误差,有效提升后续优化效率,也同为 U 型橡胶外风挡后续优化提供有效方法。

参考文献(References)

[1] 李学伟. 中国高铁:新时代经济社会发展的重要引擎[J]. 北京联合大学学报(人文社会科学版),2019,17(3):1-8.
LI Xuewei. China's high-speed railway: the engine of economic and social development in the new era [J]. Journal of Beijing Union University (Humanities and Social Sciences), 2019, 17(3): 1-8. (In Chinese)

[2] 俞展猷. 日本与欧洲高速列车技术的发展和现状[J]. 铁道机车车辆,2003,23(1):16-27.
YU Zhanyou. Development and status quo of high-speed train technology in japan and europe [J]. Railway Locomotive & Car, 2003, 23(1): 16-27. (In Chinese)

[3] 张宝祥,袁彩霞,高军. 高速动车组外风挡橡胶的涂装工艺[J].

现代涂料与涂装,2011,14(9):54-56.
ZHANG Baoxiang, YUAN Caixia, GAO Jun. Coating process of high-speed trains on the outside windshield rubber [J]. Modern Paint & Finishing, 2011, 14(9): 54-56. (In Chinese)

[4] 刘珍. 高速列车风挡气动特性及气动疲劳强度研究[D]. 长沙:中南大学,2012:1-2.
LIU Zhen. Study on aerodynamic characteristics and aerodynamic fatigue strength of windshield high speed train [D]. Changsha: Central South University, 2012: 1-2. (In Chinese)

[5] 王兴伟,朱闰平,缪惠勇,等. 旅客列车风挡的发展方向[J]. 特种橡胶制品,2014,35(2):79-84.
WANG Xingwei, ZHU Rungping, MIAO Huiyong, et al. Development direction of passenger train windshield [J]. Special Purpose Rubber Products, 2014, 35(2): 79-84. (In Chinese)

[6] 白夜,杨俊,李建平,等. 高速列车风挡腔内流场分布试验分析方法探讨[J]. 铁道机车车辆,2021,41(6):29-34.
BAI Ye, YANG Jun, LI Jianping, et al. Discussion on experimental analysis of flow distribution inside windshield of high-speed train [J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(6): 29-34. (In Chinese)

[7] NIU J Q, WANG Y M, ZHOU D. Effect of the outer windshield schemes on aerodynamic characteristics around the car-connecting parts and train aerodynamic performance [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 130: 1-16.

[8] BAKER C. The flow around high speed trains [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6/7): 277-298.

[9] 唐明赞,熊小慧,钟睦,等. 高速列车外风挡安装间距对风挡气动特性的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(4):850-859.
TANG Mingzan, XIONG Xiaohui, ZHONG Mu, et al. Influence of installation spacing of external vestibule diaphragm of high-speed train on aerodynamic characteristics of the vestibule diaphragm [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(4): 850-859. (In Chinese)

[10] 刘国庆,杜健,刘加利,等. 车端风挡类型对高速列车气动噪声影响规律的研究[J]. 噪声与振动控制,2018,38(2):87-90.
LIU Guoqing, DU Jian, LIU Jiali, et al. Investigation on the influence of inter-car windshield types on the aerodynamic noise of high speed trains [J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(2): 87-90. (In Chinese)

[11] 刘翰林,杨志刚,吴雨薇,等. 250~400 km/h 高速列车气动声学性能的仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(9):3242-3250.
LIU Hanlin, YANG Zhigang, WU Yuwei, et al. Numerical simulation on aeroacoustic performance of 250~400 km/h high-speed [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(9): 3242-3250. (In Chinese)

[12] 杨加寿,蒋崇文,高振勋,等. 车厢间风挡形式对高速列车气动性能的影响[J]. 铁道学报,2012,34(11):29-35.
YANG Jiashou, JIANG Chongwen, GAO Zhenxun, et al. Influence of inter-car wind-shield schemes on aerodynamic performance of high-speed trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(11): 29-35. (In Chinese)

[13] 蔡鉴明,张森,汪海燕,等. 高速列车 U 型橡胶外风挡结构模态有限元计算与试验分析[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(7):

- 1620-1629.
- CAI Jianming, ZHANG Sen, WANG Haiyan, et al. Modal finite element calculation and test analysis on U-shaped rubber outer windshield structure of high speed train [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(7): 1620-1629. (In Chinese)
- [14] SCHWARZ B, MCHARGUE P, RICHARDSON M. ODS & modal testing using a transmissibility chain [J]. Sound & Vibration, 2018, 52(2): 1-6.
- [15] DAI W Q, ZHENG X, HAO Z Y, et al. Aerodynamic noise radiating from the inter-coach windshield region of a high-speed train [J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2018, 37(3): 590-610.
- [16] TANG M Z, XIONG X H, LI X B, et al. Vibration characteristics of outer windshield structures of high-speed trains based on fluid-structure interactions [J]. Nonlinear Dynamics, 2023, 111(3): 2111-2132.
- [17] 谭莲影, 苏韧伟, 黄良平, 等. 高速列车风挡用白色 EPDM 橡胶材料的研究应用 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38(增刊 1): 98-101.
- TAN Lianying, SU Renwei, HUANG Liangping, et al. Investigation of white EPDM based vestibule diaphragm for high-speed train [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38(Suppl. 1): 98-101. (In Chinese)
- [18] 欧阳黎健, 刘丰芹. 风挡在机车车辆上的应用 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2008, 31(2): 46-48.
- OUYANG Lijian, LIU Fengqin. Application of vestibule diaphragm on locomotive and railway vehicle [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2008, 31(2): 46-48. (In Chinese)
- [19] 高军, 邱彩玉, 李鹏, 等. 高速动车组外风挡结构设计探讨 [J]. 铁道车辆, 2019, 57(4): 21-23.
- GAO Jun, QIU Caiyu, LI Peng, et al. Discussion of the structure design of outside vestibule diaphragm on high speed multiple units [J]. Rolling Stock, 2019, 57(4): 21-23. (In Chinese)
- [20] 刘青波, 邢海英, 安哲. 冬季运营时高寒动车组外风挡缝隙问题分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(2): 79-81.
- LIU Qingbo, XING Haiying, AN Zhe. Analysis of outside windshield gap of alpine EMU in winter operation [J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(2): 79-81. (In Chinese)
- [21] 马富银, 吴伟蔚. 车用圆形支承橡胶部分承载力学性能研究 [J]. 机械强度, 2012, 34(3): 469-474.
- MA Fuyin, WU Weiwei. Study the mechanical properties in rubber of round bearing used in car [J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(3): 469-474. (In Chinese)
- [22] 段煜, 陶友瑞, 裴佳星, 等. 橡胶弹簧静态扭转刚度的实验和仿真分析 [J]. 机械强度, 2023, 45(1): 34-42.
- DUAN Yu, TAO Yourui, PEI Jiaying, et al. Study on the static torsion stiffness of rubber spring by experiment and simulation [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(1): 34-42. (In Chinese)

Analysis of shrinkage performance of U-shaped rubber outer windshield of high-speed train at low temperature

GU Cheng¹ XU Lei² YU Chengtao¹ WANG Jiazheng²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213000, China)

(2. Changzhou Jinchuang Windshield System Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: Based on the low temperature tensile test data of the rubber, Ansys software was used to fit the Mooney-Rivlin hyperelastic constitutive model of rubber material parameters, and the thermo-solid coupling simulation was carried out on the U-shaped rubber outer windshield according to three real working conditions, and the influence of different working conditions on the U-shaped rubber deformation was studied. The low temperature test was carried out on U-shaped rubber outer windshield and three rubber samples with different batten thicknesses, the influence of temperature and batten thickness on its deformation was studied. The results show that the U-shaped rubber deformation is mainly caused by the temperature change, the U-shaped rubber height decreases obviously, and the shape variable of the side wall thickness and the rubber length is small. In addition, the batten thickness has a greater influence on the rubber shape variable at the bolt hole. Compared with the batten of 5 mm and 6 mm thickness, the 4 mm batten produces a larger deformation under the bolt preload action, resulting in a larger deformation at the bolt hole, and then increasing the batten thickness can effectively reduce the hole removal risk. Comparing the finite element simulation data with the low temperature test results, it is found that the two results are basically consistent, which indicates the finite element analysis feasibility and the low temperature test reliability. The research results provide some guidance basis for the U-shaped rubber outer windshield under low temperature application reliability.

Key words: U-shaped rubber outer windshield; Mooney-Rivlin hyperelastic constitutive model; Thermo-solid coupling; Finite element analysis; Low temperature test

Corresponding author: YU Chengtao, E-mail: yuct@jsut.edu.cn

Fund: Jiangsu Qinglan Project Outstanding Young Backbone Teacher Project(202111)

Received: 2023-06-16 Revised: 2023-07-01