

轮胎断面弯曲刚度分布研究

周乾龙, 谢 汇

[上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司 轮胎研究所, 上海 200245]

摘要:针对轮胎产品普遍存在的变形过大,特别是胎侧段的屈挠变形过大问题,提出轮胎断面弯曲刚度的概念,研究弯曲刚度的影响因素,得出不同胶料和胎体帘布的截面弯曲刚度计算方法,并对成品轮胎进行分析,为轮胎屈挠变形的评判和改善提供了参考途径。

关键词:子午线轮胎;弯曲刚度;胎侧

中图分类号:TQ336.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-8171(2014)06-0380-04

轮胎产品普遍存在变形过大的问题,特别是胎侧段的屈挠变形。断面弯曲刚度与轮胎变形存在直接联系,弯曲刚度决定了轮胎的屈挠变形。然而现有的刚度测试只能测量轮胎整体的径向和侧向刚性,对弯曲刚度分布无能为力。因此有必要针对弯曲刚度进行专门的研究。

1 弯曲刚度的定义和计算

弯曲刚度被定义为 EI , 其中 E 是材料的杨氏模量, I 是界面的二次轴矩。梁的屈挠线微分方程^[1]为

$$\frac{d^2\omega}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (1)$$

两次积分后得

$$EI\omega(x) = \int \left[\int M(x) dx + C_1 \right] dx + C_2 \quad (2)$$

式中 ω ——杆的挠度;

C_1 和 C_2 ——常数。

对于两端简支、中间处受力的杆(见图1)的弯曲应用式(2)进行计算,则杆内剪切力为

$$\begin{cases} F_s(x) = F/2 & (0 \leq x < L) \\ F_s(x) = 0 & (L \leq x < L+L') \end{cases} \quad (3)$$

因此,弯矩为

$$\begin{cases} M(x) = F(L-x)/2 & (0 \leq x < L) \\ M(x) = 0 & (L \leq x < L+L') \end{cases} \quad (4)$$

作者简介:周乾龙(1988—),男,江苏连云港人,上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司助理工程师,学士,主要从事轮胎基础力学研究工作。

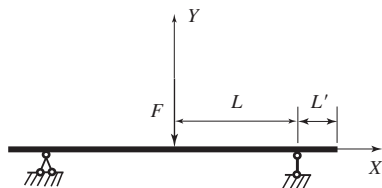


图1 受力杆示意

L' 段弯矩为零,计算时舍去。由式(2)得

$$\begin{aligned} EI\omega(x) &= \int_x^L \left[\int_x^L M(x) dx \right] dx = \\ &= \int_x^L \left[\frac{F}{4}(x-L)^2 + C_1 \right] dx = \\ &= \frac{F}{12}(L-x)^3 + C_1(L-x) + C_2 \end{aligned} \quad (5)$$

利用边界条件: $\omega'(0) = 0$, $\omega(L_1) = 0$, 可以得出

$$C_1 = -\frac{F}{4}L^2, C_2 = 0$$

所以

$$EI\omega(x) = \frac{F}{12}(L-x)^3 - \frac{F}{4}L^2(L-x) \quad (6)$$

对于受力的 $x=0$ ($\omega=\omega_0$) 处:

$$EI = -\frac{FL^3}{6\omega_0} \quad (7)$$

由式(7)可知,对于给定杆件,只要找到 F 和 ω 的关系即可计算出 EI 的值。由于弯曲刚度是材料的固有属性,因此在计算时通常不考虑正负号:

$$EI = \frac{FL^3}{6\omega_0} \quad (8)$$

2 弯曲刚度测试

对于轮胎断面,在研究如图2所示的特定截面 A-A 的弯曲刚度时,很难对断面直接进行弯曲测量。

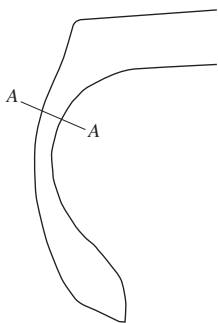


图2 轮胎断面特定截面

为了应用计算公式,可以按照某截面处的材料分布情况制作1个足够长的模拟杆件。利用仪器可以方便地测量该试件弯曲挠度与压力的关系(如图3所示),将试件紧贴两筒支辊摆放,并用压杆压弯,支辊到压头的水平距离为100 mm,即式(8)中的 L 为100 mm。记录下弯曲过程中的压杆位移和压力,进而研究试件弯曲刚度。

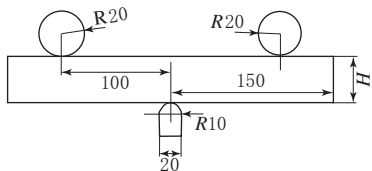


图3 试件紧贴两筒支辊摆放示意

测试所用试件规格(长×宽)为300 mm×50 mm,厚度以及各层材料的布置依据测试需要设定,测试结果如图4所示。

从图4可以看出,试件的压力-位移呈线性关

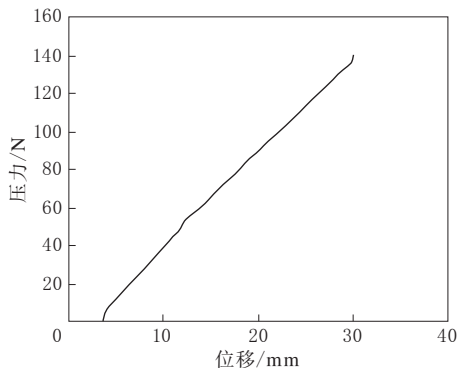


图4 试件压力-位移关系曲线

系,通过线性拟合可以得到图形的斜率 k :

$$k = \frac{F}{\omega_0} \quad (9)$$

由式(8)可知:

$$EI = \frac{FL^3}{6\omega_0} = \frac{L^3}{6} k \propto k \quad (10)$$

即弯曲刚度也可以由 k 值进行表征。

轮胎断面的主要屈挠段为胎侧,因此应首先考虑从带束层边缘到钢丝圈包布不含带角度钢丝的段落,其中以胎侧为主要部分。至于胎肩以上和胎圈附近的弯曲刚度,有待于今后进一步探究。

选定段落各个节点处截面的主要变化因素为胶种、帘布种类,各材料层的厚度和位置。希望通过典型结构截面的研究,找出各个因素与弯曲刚度的关系,最终得到定量计算公式,给定节点,即可直接计算弯曲刚度。

为了获得上述各变化因素对弯曲刚度的影响,进行了纯胶试件的同种胶料不同厚度、不同胶料相同厚度测试;带钢丝试件的同种胶料、帘布、试件尺寸,不同帘布位置测试,同种胶料、帘布位置、试件尺寸,不同帘布测试,并依据结果总结了各因素对弯曲刚度的影响。

2.1 纯胶试件的同种胶料不同厚度测试

该测试使用同种胶料制作了厚度分别为15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 mm的7个试件,采用弯曲刚度测试机进行测试。根据矩形截面二次轴矩的公式:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (11)$$

式中 b ——矩形截面的宽度,mm;

h ——矩形截面的厚度,mm。

可以将弯曲刚度 EI 表示为

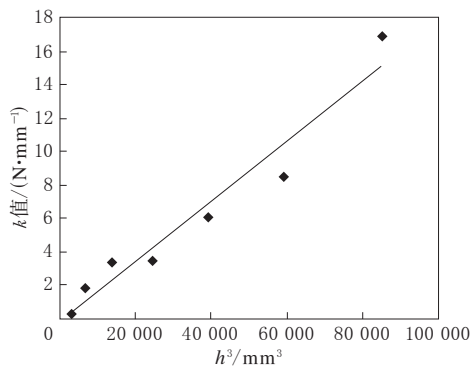
$$EI = E \frac{bh^3}{12} \quad (12)$$

根据式(12)预计试件的弯曲刚度应当和 h^3 成正比,实测结果如图5所示。

从图5可以看出,式(12)给出的理论预期是准确的。

2.2 带钢丝试件不同帘布位置测试

对于含有多层材料的试件,其等效弯曲刚度为

图5 试件 k 值与厚度的关系曲线

$$EI = \sum_{i=1}^n E_i I_i \quad (13)$$

式中, E_i 是各层材料的杨氏模量, 可通过数据库获得, I_i 是各层材料对整个截面惯性中心的等效二次轴矩。如图6所示, 先设截面惯性中心为 d 。

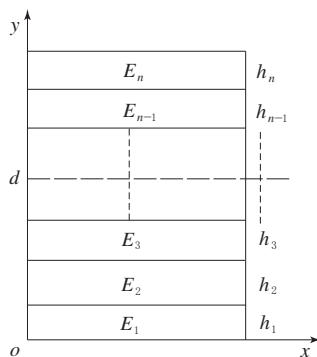


图6 二次轴距变化示意

则该截面中任意层 i 的二次轴距可以表示为

$$I_i = \int_{y_{i-1}}^{y_i} (y-d)^2 b dy \quad (14)$$

其中 $y_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} h_j, y_i = \sum_{j=1}^i h_j$

由于中性面是令 EI 值最小的面, 因此将式(14)代入式(13), 并对 d 求导, 令导数等于零:

$$\left(\sum_{i=1}^n E_i I_i \right)' = 0 \quad (15)$$

即可计算出 d 的值:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n E_i h_i (h_i + 2 \sum_{j=1}^{i-1} h_j)}{2 \sum_{i=1}^n E_i h_i} \quad (16)$$

为探究钢丝埋设位置对弯曲刚度的影响, 采用同种胶料制作尺寸(长×宽×厚)为 $300 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的试件, 分别在厚度方向 5, 10,

15, 20, 25, 30 和 35 mm 的位置埋设钢丝层, 钢丝沿试件长度方向, 并进行刚度测试。假定胶料模量为 $5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, 钢丝层模量为 $2000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, 钢丝层厚度为 2 mm, 利用式(13), (14)和(16)可以计算出试件的理论弯曲刚度值。试件弯曲刚度与钢丝埋设位置关系的计算结果如图7所示。

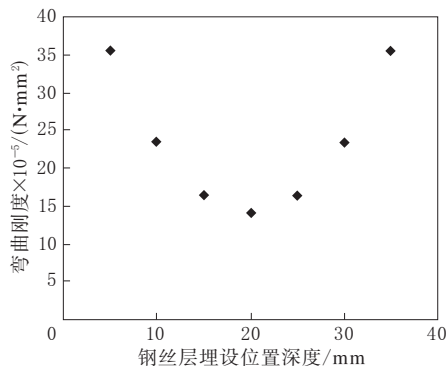


图7 试件弯曲刚度与钢丝埋设位置关系的计算结果

从图7可以看出, 弯曲刚度的计算值呈抛物线形, 钢丝层越远离几何中心, 越接近外表面, 则试件的弯曲刚度越大。钢丝层埋于几何中心的试件弯曲刚度最小, 钢丝层关于几何中心对称的2个试件的弯曲刚度相等。试件弯曲刚度与钢丝埋设位置关系的实测结果如图8所示。

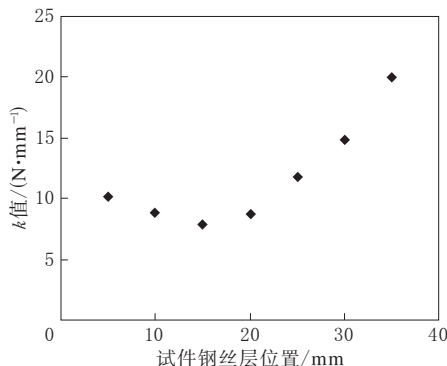


图8 试件弯曲刚度与钢丝埋设位置关系的实测结果

从图8可以看出, 试件的弯曲刚度随着钢丝层的向外分布而逐渐增大, 这同理论计算结果相一致。但弯曲刚度最小的试件并非钢丝位于正中的试件(即钢丝层位于 20 mm 处试件), 两侧数据也不关于 $x=20$ 对称, 同理论预期不符。这是由于在实测过程中胶料在压缩和拉伸时的模量是不同的(如图9所示), 而理论计算时为了凸显钢丝

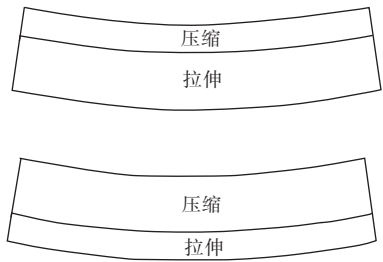


图 9 胶料在压缩和拉伸时的模量区别示意

层位置对弯曲刚度的影响规律,粗略地将拉伸和压缩模量视作相等,因此同实测结果不完全一致。

2.3 收集材料数据

为了进行弯曲刚度的计算,需要知道各类材料的杨氏模量 E ,这些数据也可以通过弯曲刚度测试获得。对于胶料的 E 值,利用纯胶试件测得 k 值,由式(10)可知:

$$E = \frac{kL^3}{6I} \quad (17)$$

即可得到胶料 E 值。

对于钢丝的 E 值,将待测钢丝置于单一胶料试件的中间层,根据式(10)和(13),有以下关系:

$$\frac{L^3}{6}k = E_r I_r + E_s I_s + E_r I_r \quad (18)$$

式中, E_r 是已经获得的胶料的杨氏模量, I_r 和 I_s 分别是橡胶、钢丝层材料的等效二次轴距。由此即可求出钢丝帘布的杨氏模量 E_s 。

3 轮胎断面弯曲刚度分布

在已经建立了材料杨氏模量数据库的情况下,即可对轮胎断面的某个截面,利用式(13)求解其弯曲刚度。对某规格轮胎进行节点划分,具体如图 10 所示。

对各截点处的材料模量、厚度进行取值,代入式(13),计算得到各截面的弯曲刚度。轮胎截面弯曲刚度与断面位置的关系如图 11 所示,横坐标为各截面与内轮廓交点在内轮廓上的位置,以起始截点“1”处为 0 mm。由于最后 4 个截面包含反包帘布层,同其他截面相比弯曲刚度极大,在绘图时舍去,以便图形能够清晰反映出其他部分的弯曲刚度变化趋势。

从图 11 可以看出,从 40 mm 处(即为垫胶结束点)附近开始,到 120 mm 处(即软三角胶起始点)附近结束的这段截面的弯曲刚度最小,且保持

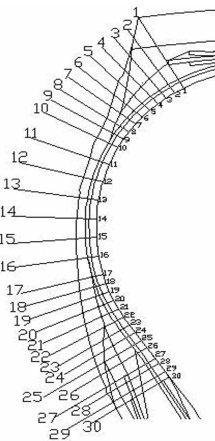


图 10 轮胎节点划分示意

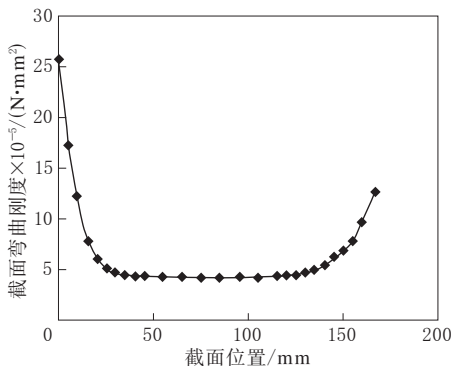


图 11 轮胎截面弯曲刚度与断面位置的关系

稳定,没有明显波动,是断面弯曲刚度的薄弱点,因此也是导致轮胎变形的主要部分。

4 结论

探讨了与轮胎变形有重要关系的弯曲刚度,并对其影响因素进行了理论和试验研究,得出了包含不同胶料和胎体帘布的截面弯曲刚度计算方法,并对成品轮胎进行了分析。轮胎断面弯曲刚度的提出及其影响因素的研究为轮胎设计和相关参数的优化调整提供了新的参考。

在理论性探讨钢丝层不同位置的变化时未考虑压缩和拉伸的区别,有待今后进一步精确地研究。另外带束层和钢丝圈包布等材料的钢丝角度变化对弯曲刚度的影响也应当是今后完善弯曲刚度计算方法的一项重要工作。

参考文献:

[1] 孙训芳. 材料力学(I)[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.