

帘线形状的微观力学研究

Kocak S, Pidaparti R M

中图分类号: TQ330.38⁺9 文献标识码: B 文章编号: 1006-8171(2002)09-0521-05

钢丝、芳纶和锦纶加捻帘线常用于轮胎中,以达到某些力学和疲劳等性能要求。

通常由于加捻特性,帘线显示出轴向-扭转耦合作用。Costello 指出,帘线捻度的影响是显著的。与刚性复合材料相比,由于帘线和橡胶之间的复合作用,加捻帘线增强橡胶复合材料在伸长、弯曲和扭转之间显示出较强的相互作用。Shield 和 Costello 运用基于 Kirchhoff 平板理论的平衡方法研究了包括拉伸-扭转耦合行为在内的单层和双层帘线-橡胶复合板的弯曲。Padovan 等讨论了加捻帘线骨架层橡胶复合材料中帘线-橡胶相互作用的一些特点。它们包括由于帘线旋转及帘线和橡胶中轴向应力的差异造成的帘线-橡胶单元弯曲导致的橡胶材料轴向和弯曲扭转。当轮胎经历不利环境,如急刹车或经过坑洼地时,这些特性变得很重要。Padovan 等运用包括橡胶复合材料响应的局部机理发展了新的加捻-增强复合材料微偏振理论。运用微偏振理论,Padovan 研究了加捻帘线-橡胶复合材料的边缘效应。尽管在他们的模型中包括拉伸-扭转耦合,但没有研究帘线形状对负荷-传递机理的影响。

当受到高应力时,帘线-橡胶复合材料最初的破坏产生于帘线-橡胶的界面上以及橡胶中。例如,当轮胎旋转时,帘线与橡胶间的定伸应力不匹配引起了帘线-橡胶界面的应力集中。这一应力集中会使界面产生裂缝,并最终导致轮胎的破坏。在微观范围内,破坏机理源于帘线和橡胶材料的相互作用以及加工条件。

为了设计高效和耐久的帘线-橡胶复合体系,帘线和橡胶界面粘合的控制非常重要。轮胎制造商通常依据帘线抽出试验得到的界面剪切强度来研究帘线-橡胶体系的粘合。根据试验得到的抽

出力,简化有关界面应力状态(恒定剪切应力)的假设后,可得到界面剪切强度的平均值。而事实上,帘线和橡胶之间的界面是不均匀的,与几何形状和材料本身有关。

以前,轮胎带束层结构中一直使用非圆形帘线,但据作者所知,还没有人研究帘线形状是如何影响界面应力和形变的。这些认识对避免轮胎带束层结构的破坏很重要。

1 微观力学模型

该微观力学模型集合了固态橡胶有限元和加捻帘线有限元,并考虑到各种耦合效应。系统研究了不同负荷下帘线形状对形变和界面应力的影响。提出了形变和界面应力分布的数据结果,以证明帘线形状、帘线性能和橡胶厚度的影响。

用复合三维有限元分析法(FEA)分析了一个橡胶和加捻帘线的三维单元。假定单元模型由一根帘线和外面包裹的橡胶材料组成,而帘线和橡胶的界面是完美的。为了简化模型,假设没有纤维之间的滑动。因此,可通过分析单元模型在不同负荷条件下的行为得到其负荷传递性能。一旦弄清了其负荷传递和局部力学行为,为了进行更切合实际的表述,就需要考虑帘线的非粘合和粘弹性能的影响。

每个帘线-橡胶单元均用外面包裹橡胶元的帘线元来模拟[见图 1(a)]。这种模型能预测帘线-橡胶复合材料界面的破坏。在 Pidaparti 和 May 所进行的早期研究中,商品的 ABAQUS 软件中的三维固态程序块常用来同时代表橡胶和帘线。但在目前的研究中,一个三维柱形有限元常用来获得微观力学模型中加捻帘线的性能,而且研究方法也进一步发展为可将三维固态块和三维

柱形有限元汇集于一个计算机程序中。这种模型比传统的帘线三维固态单元(块状)模型效率更高而且费用少。帘线元和橡胶元结合于一个有限元计算机程序中用于帘线增强橡胶复合材料的微观力学分析。

1.1 橡胶有限元

将简化积分后可适用于任意几何形状和形变的 20 节三维等参数有限元[每个节点在 U_x , U_y 和 U_z 三个正交方向上的位移见图 1(b), 每个单元共有 60 个自由度]用于橡胶材料。Pidaparti 和 Kakarla 早期曾将这一有限元用于帘线-橡胶复合材料的研究,发现它可令人满意地描述橡胶材料。假设橡胶模型是线性弹性材料的模型。但在实际描述时,应使用非线性材料模型,如 Neo-Hookean 或 Mooney-Rivlin 材料模型。

1.2 帘线有限元

沿帘线长度方向使用 3 节等参数柱形有限元。每一个帘线节有 6 个自由度(3 个位移,3 个旋转)。除此之外,还有轴向的可变弯曲以计算非圆形横截面帘线的形变[见图 1(b)]。

用 8 节等参数单元表示任意帘线形状的横截面。这些 8 节帘线几何单元与帘线节相结合构成

加捻帘线的三维有限元模型。帘线的轴向扭转耦合通过弯曲形变模拟。通过这种弯曲,当受到轴向张力时帘线可以捻合,反之亦然。本研究运用了由 Pidaparti 提出的考虑到由轴向、弯曲和扭转形变导致的刚性连接问题的加捻帘线有限元模型。这一帘线元已经用于研究帘线在不同负荷下的刚性特性,其结果与试验数据相吻合。

2 试验结果

在本研究中将帘线元看作是有圆形、非圆形(由 3 根长丝加捻而成的芳纶帘线)和六边形横截面的方形单元。

研究了 3 种负荷情况(见图 2)。情况 1 和 2 分别表示向帘线施加单位轴向作用力和扭矩。情况 3 表征轮胎结构在刹车和转弯时受力情况下的小面积橡胶上分布的单位垂直和剪切负荷。所用圆形帘线的直径(d)为 1.4 mm,包裹帘线的方形单元的周长(D)为 12 mm,单元的长度(L)为 37.5 mm。

试验用材料性能:橡胶的 E 为 5.52 MPa,泊松比为 0.49;钢丝帘线的 E 为 210 GPa,泊松比为 0.3;芳纶和聚酯帘线的 E 分别为 26.1 和 4.78 GPa,泊松比为 0.3。沿着单元长度方向形成汇聚的 5 个帘线元的有限元网格。在 FEA 微观力学模型中,用 20 个 8 节元表征帘线的几何形状,包裹帘线的橡胶用 180 个 20 节橡胶元表示。

为了确认该帘线-橡胶复合材料微观力学模型,分析了一个轴向负荷下的带有圆形帘线的方形单元。将这一模型得到的结果与应用 ABAQUS 软件的三维固态有限元模型的结果进行了对比。综合来看,形变和应力结果非常一致,

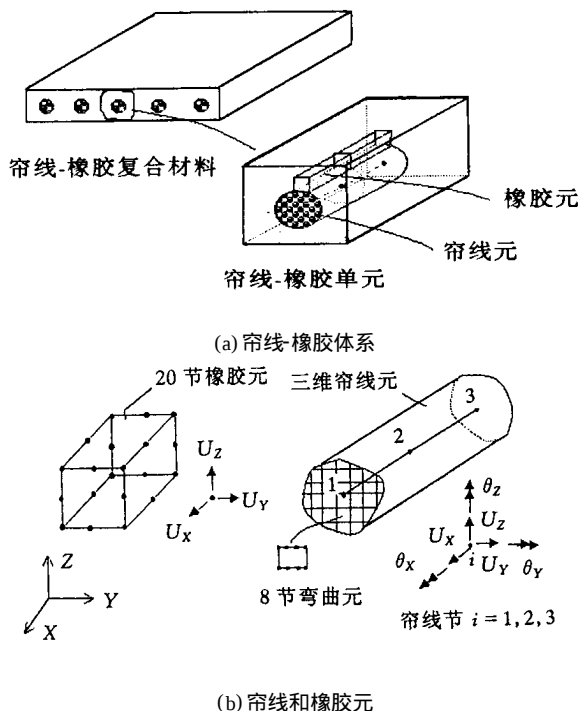


图 1 用橡胶和帘线有限元对帘线-橡胶复合材料的微观力学模拟

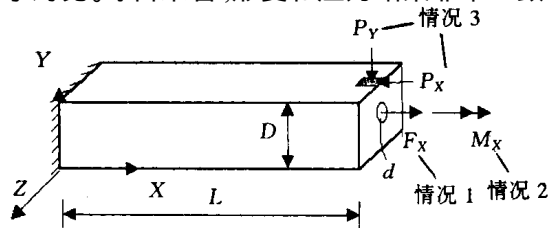


图 2 几何形状和 3 种负荷条件示意

情况 1—向帘线施加轴向负荷;情况 2—向帘线施加扭矩;
情况 3—向橡胶施加垂直和剪切负荷

充分证明该模型可用于帘线-橡胶复合材料的微观力学分析。之后运用该模型研究了帘线形状、帘线性能、负荷类型和包裹帘线的橡胶厚度等各种因素对复合材料性能的影响,结果概括如下。

由于缺少试验或数值结果,没有进行其它相对更精确和有效的对比。尽管如此,所得到的分析结果已经可以证明他们是否满意由材料近似法机理得到的平衡条件。在研究的例子中,根据角度 θ 确定的沿帘线-橡胶界面存在的界面应力开始于帘线顶端的对称点。

2.1 帘线形状的影响

由 FEA 得到的在轴向负荷作用下(图 2 中的情况 1)3 种不同横截面的帘线-橡胶界面应力示于图 3。由图 3 可以看出,帘线-橡胶界面周围的垂直和剪切应力都是非均匀的。根据不同帘线形状的试验结果可以得出,非圆形帘线的应力高于圆形帘线的应力(约 55%)。

图 4 示出了在轴向负荷下不同帘线横截面界面应力最大值(满圆)和最小值(非满圆)的位置及大小。与圆形帘线相比,施加于非圆形帘线的轴向负荷会导致较大的轴向应力(约 55%)和横向剪切应力(约 63%)。六角形横截面帘线的应力

介于非圆形和圆形帘线应力之间。向帘线施加捻合力矩时,帘线-橡胶界面的纵向剪切应力(σ_{yx} 和 σ_{zx})和轴向应力(σ_{xx})非常小(约 56 kPa)。在同一情况下,帘线-橡胶界面的横向剪切应力(σ_{yz})和垂直应力(σ_{yy})最大(约 2 070 kPa)。在负荷情况 2 下,各种帘线横截面界面应力也得出类似结果。值得注意的是,在负荷情况 3 下,以 P_x/P_y 定义的负荷率 R 为 1,圆形帘线的垂直应力(约 813 kPa)大于非圆形帘线的垂直应力(约 197 kPa)。在这种负荷情况下,所有剪切应力都非常小(约 25~38 kPa)。图 3 和 4 示出的结果表明,帘线形状和负荷对界面应力有很大影响。

2.2 负荷的影响

由 3 种负荷条件下非圆形帘线-橡胶界面周围的相对轴向和剪切应力分布可以看出,在负荷情况 1 下帘线-橡胶界面周围具有非均匀应力分布,在 θ 为 135 和 340 时有最大值;在负荷情况 2 下,轴向应力和剪切应力 σ_{yx} 是非对称的,在 θ 为 90 和 270 时有最大值。但应力 σ_{zx} 是对称的(约 180°,在 θ 为 0 和 180 时有最大值),应力 σ_{zy} 也是对称的(约 180°,在 θ 为 90 时有最大值)。在负荷情况 3 下,应力 σ_{xx} 和 σ_{yx} 是对称的(大约 180°,

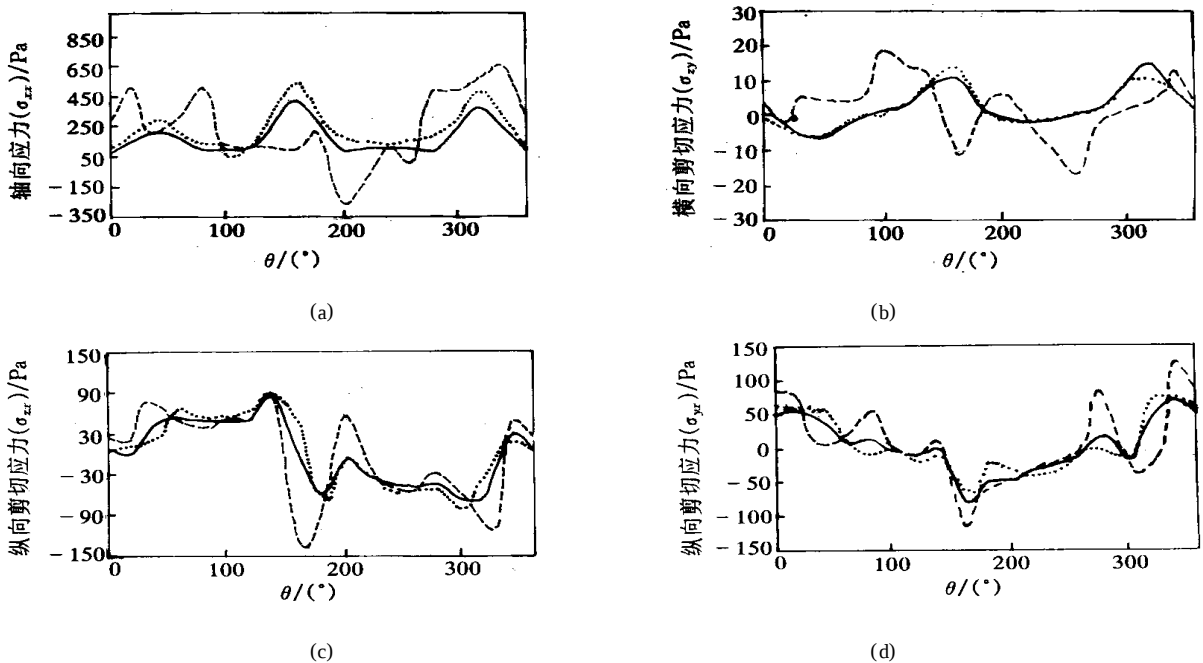


图 3 负荷情况 1 下帘线形状对帘线-橡胶界面应力的影响

—圆形;---非圆形;...六角形

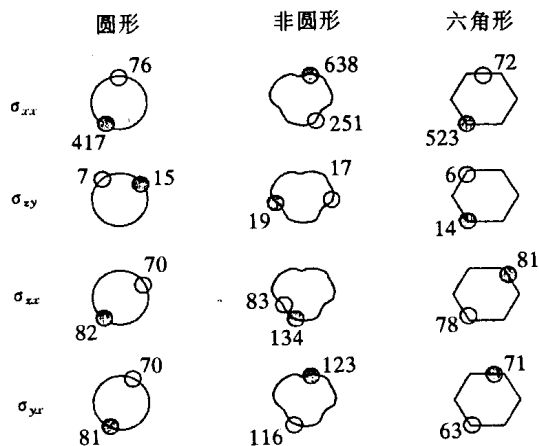


图4 轴向负荷下不同帘线截面形状界面应力(Pa)及最大和最小值的位置及大小

在接近 90 和 270 时有最大值),而应力 σ_{xz} 和 σ_{yz} 是非对称的(θ 约为 180°)。帘线-橡胶界面剪切应力的趋势类似于由 Pidaparti 和 May 用三维固态 FEA 模型得出的结果。

不同负荷情况下帘线-橡胶界面应力的最大(满圆)及最小(非满圆)值的位置及大小见图 5。由图 5 可以看出,不同负荷条件下最大界面应力的位置发生变化,可能集中在帘线曲率变化的拐角处。图 5 中的结果说明了不同负荷情况对非圆形帘线最大界面应力的位置和大小影响。

图 6 示出了在负荷情况 3 下 R 为 10 和 0.1 的两种负荷率时的最大帘线形变。在此,应注意

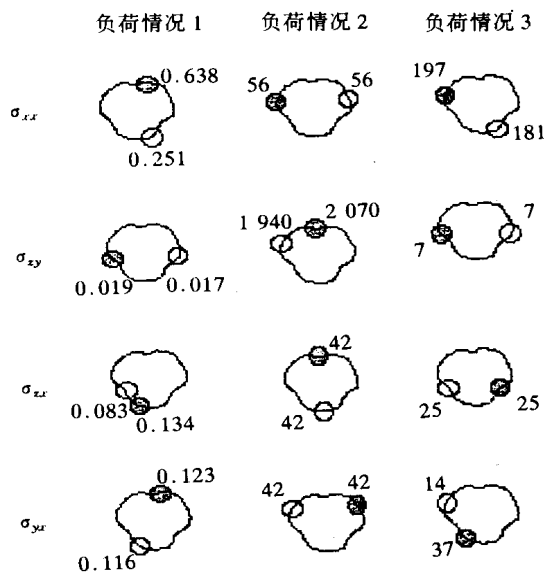


图5 不同负荷情况下非圆形帘线横截面界面应力(kPa)最大和最小值的位置及大小

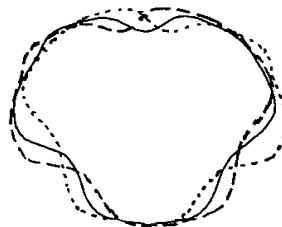


图6 两种负荷率 R (0.1 和 10)的复合负荷情况 3 下圆形单元的帘线形变

——未变形;--- $R=0.1$;... $R=10$

到图例说明帘线捻度的变化,扭转形变被放大,从而使帘线捻度在图中可以看出。帘线改变了加捻取向,当 R 为 10 和 0.1 时分别从顺时针方向(0.21×10^{-11})改为逆时针方向(-0.54×10^{-11})。应该注意,负荷对帘线形变的影响极大。

2.3 帘线性质的影响

为了研究帘线性质对界面应力的影响,我们讨论了钢丝、芳纶和聚酯 3 种帘线。表 1 示出了轴向负荷下(情况 1)非圆形帘线单元帘线-橡胶界面应力的最大值。帘线-橡胶界面的应力用由 FEA 的应变得到的橡胶定伸应力计算。

表1 帘线性能对非圆形帘线单元帘线-橡胶界面最大垂直和剪切应力的影响 kPa

帘线材料	最大垂直应力	最大剪切应力
钢丝	0.64	0.083
芳纶	5.02	-1.07
聚酯	26.46	-5.28

由表 1 可以看出,聚酯帘线的应力最大,然后是芳纶帘线和钢丝帘线。在所研究的负荷情况下,垂直应力大于剪切应力。帘线-橡胶界面周围的应力分布与图 3 中所示结果相似。表 1 中的结果说明,较软的帘线具有较高的界面应力且易于产生断裂。尽管如此,应小心以确保帘线和橡胶间的完美粘合。

2.4 橡胶厚度的影响

为了研究包裹圆形帘线的橡胶厚度的影响,我们考察一个圆形单元。图 7 示出了单元在复合负荷下(情况 3 中 $R=1.0$)轴向、弯曲和扭转变形的测定结果。由图 7 可以看出,轴向形变随橡胶厚度的增大而减小,当橡胶厚度接近 0.7 mm 时,轴向形变趋于零,并在此后改变了方向。弯曲和扭转变形均随橡胶厚度的增大从负值增大至正

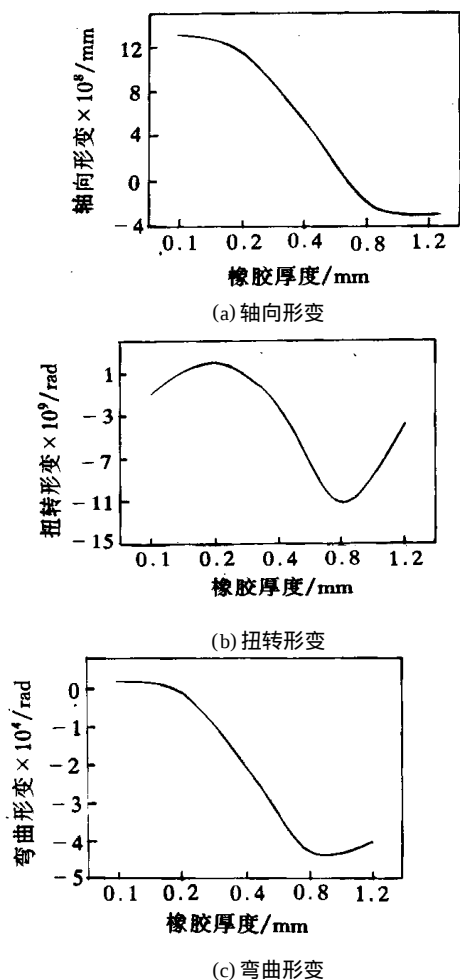


图7 负荷率 R 为 1.0 的复合负荷情况 3 下圆形单元橡胶厚度对轴向、扭转和弯曲形变的影响

值,直至橡胶厚度达到 0.8 mm (译注:原文如此),然后弯曲和扭转形变随着橡胶厚度的增大而减小。

与轴向和扭转形变相比,弯曲形变非常大。原因可能是当包裹帘线的橡胶厚度增大时,施加的负荷会引起单元的弯曲。这又引起了由各种耦合作用而造成的附加形变。图 7 中的结果说明了包裹帘线的橡胶厚度的重要性以及它对各种形变

的影响。

3 结论

进一步发展了三维微观力学模型,用于研究帘线-橡胶复合体系中帘线形状对负荷形变和应力特性的影响。这一微观力学模型汇集了固态橡胶有限元和加捻帘线有限元,并考虑到各种耦合作用影响。所得到的形变和界面应力分布的数值结果证明了帘线形状、帘线性能、负荷种类和包裹帘线的橡胶厚度对它们的影响。由此可得到如下结论:

® 非圆形帘线的界面应力比圆形帘线高 55%~63% (见图 4),而且,非圆形帘线的界面应力分布是非均匀的 (见图 3)。

® 帘线界面应力的位置以及最大值和最小值的位置和大小随着负荷条件的变化而改变 (见图 3 和 5)。不同负荷下帘线捻度变化较大 (见图 3 和 6)。

® 包裹帘线的橡胶厚度对轴向、弯曲和扭转形变影响较大 (见图 7)。

® 试验结果证明当帘线模量减小时,界面应力增大 (见表 1)。

所得的形变和界面应力分布的结果可以帮助我们进一步理解帘线-橡胶复合材料的负荷传递性能。得到的微观力学模型可用于轮胎带束层结构的初步设计。

设计的目标是给出一个能在帘线-橡胶界面产生对称剪切应力的帘线形状,以避免轮胎损坏。进一步的研究是要找到可减小界面应力的最佳帘线形状,并开发出耐用的轮胎带束层结构。

(吴淑华摘译 涂学忠校)

译自英国“Rubber Technology International 2000”, P55~60

5 条入闽公路年底通车

中图分类号:U412.36⁺4 文献标识码:D

福建省目前正在加紧建设的、预计总投资 8 亿多元的 5 条重要入闽公路通道将于今年年底通车。这 5 条进入福建的重要公路通道分别是:闽东寿宁双港-福安湖塘坂-浙江泰顺长 73 km 的公

路、闽北光泽-花山界城关-江西鹰潭长 39 km 的公路、闽北武夷山汾水关-石雄-江西上饶长 31.5 km 的公路、闽西武平万安-禾仓坑-广东蕉岭长 31 km 的公路以及闽南平和霞寨-松柏关-广东潮州长 36 km 的公路。

(摘自《中国汽车报》,2002-07-29)