

轮胎帘线的表征和帘线热力学性能对轮胎的影响(二)

姚钟尧

(华南理工大学材料学院, 广东 广州 510640)

(续上期)

2.3 热收缩对蠕变性能的影响

图6和图7显示PET 1300/3和尼龙840/2帘线的蠕变试验结果——蠕变柔量与时间的关系。

在这两个图中的蠕变柔量定义如下式:

$$C = \frac{\epsilon_t - \epsilon_0}{\sigma_0} \tag{1}$$

式中, ϵ_t 是在时间 t 的总应变; ϵ_0 是在时间 $t = 0$ 的瞬时应变; σ_0 是在蠕变试验中施加的恒定应力。

两图表明蠕变柔量随预处理温度升高而提高; 或者用另一种方式表达, 柔量随帘线的热收缩量增加而增大。尼龙帘线具有比PET帘线低得多的柔量。虽然蠕变性能主要由纱的分子结构决定, 但也受其他热-力学性能影响。尼龙帘线的蠕变性能部分地受两种事实的影响, 一是热收缩是可恢复的; 二是帘线不管热历史而对升高的加热趋向收缩。

2.4 蠕变硬化

对蠕变之后的帘线另外进行拉伸试验测试, 以便考察蠕变对帘线应力-应变行为的影响。图8为PET 1300/3帘线的试验结果。图中, “在150℃防热收缩处理和蠕变”的标记表示防热收缩处理的帘线在80℃蠕变6h之后执行拉伸试验。

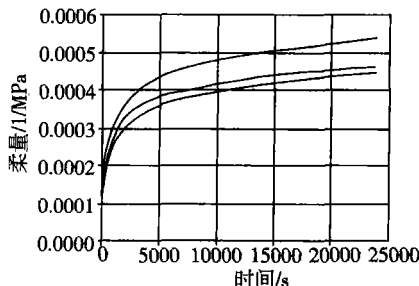


图6 在各种条件下预处理的PET 1300/3 帘线的蠕变试验结果

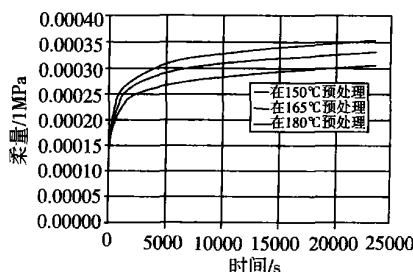


图7 在各种条件下预处理的尼龙840/2 帘线的蠕变试验结果

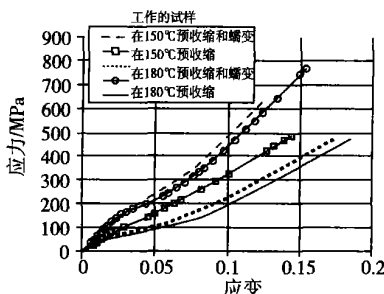


图8 在PET 1300/3 帘线的应力-应变曲线中观测到的蠕变硬化

在图8中可观察到下列现象:

1. 与“工作的”帘线的应力-应变曲线比较, 经过防热收缩处理的帘线的模量有明显的减小。就像前面讨论过的一样, 这种减小是因防热收缩处理后帘线的无定形区分子链的取向度减小引起的。

2. 在蠕变之后, 存在明显的帘线模量复位。帘线在蠕变后变硬。这是因为蠕变独有地出现在纱的无定形区, 链取向在蠕变后部分地恢复。这种蠕变过程与纱制造的热拉过程相似。由于纱中链取向恢复, 因此帘线硬化。

3. 虽然帘线在蠕变后硬化, 但是应力-应变曲线仍然在“工作的”帘线的下方, 这表明并非所有的链取向都在蠕变后得到恢复。

4. 即使蠕变条件相同, 蠕变后在 180°C 防热收缩处理的帘线比 150°C 处理的帘线更加硬化。这种现象表明, 帘线防热收缩处理的温度越高, 则蠕变后纱中链取向的恢复应当越多。

在轮胎制造和使用过程中, 轮胎帘线会经历各种热历程, 帘线的力学性能将按照上面讨论的试验结果规律连续变化。轮胎帘线的这种热 - 力学行为对轮胎性能将有显著的影响。

3 数值分析和讨论

为了说明轮胎帘线的热 - 力学行为对轮胎性能的影响, 本节应用有限元分析 (FEA) 举例说明两个应用问题。第一个例子是胎侧凹陷的模式处理, 第二个例子模拟冠带层对轮胎的作用。应用两个模式, 将在前面章节获得的材料性能作为输入, 数值分析结果与轮胎试验结果对比。

3.1 轮胎胎侧凹陷

胎侧局部凹进时, 胎侧凹陷出现, 就像酒窝。胎侧凹陷出现在轮胎胎体层的接合位置。每层接合处帘线有搭接。轮胎充气时, 因为该区域比轮胎的其它部分有更大的增强, 所以胎侧有接合的部分伸张不多。层接合做得越宽, 在搭接中便有越多的帘线, 胎侧凹陷更深。由于通常在轻卡车轮胎中采用的帘线比乘用车轮胎的帘线线性密度更高, 所以在轻卡车轮胎中的胎侧凹陷现象也更多。胎侧凹陷严重地影响轮胎外观, 也降低了消费者对产品质量的认可度。此外, 胎侧的凹进仍然可以影响轮胎的动态响应, 特别是在高速行驶中。因此, 模拟和预测胎侧凹陷, 对帘线的质量控制、轮胎设计和制造是大有帮助的。应用 FE 能够模拟胎侧凹陷, 也将有助于进一步检验凹陷对动态响应的影响。

模拟胎侧凹陷需要全 3D 轮胎模型。在轮胎模型的特别“部分”包含胎体帘布的特别层。特别部分的宽度取决于胎体帘布层的搭接宽度。模拟程序的难点是创建模型中胎体帘布特别层, 要求大量预加工工作。然而, 在本研究中, 采用简化的途径即模拟胎侧凹陷, 它利用帘线的热 - 力学性能的便利。

选择规格 235/75R15 的乘用车轮胎作为模拟对象。轴对称模型的网格显示在图 9 中。图 9 中每种阴影代表不同的材料或复合物。分析中所

有橡胶组分都作为超弹性材料用新虎克模型 (neo-Hookean model) 模拟。增强橡胶复合物的钢丝和聚酯帘线在 ABAQUS 中作为“加强筋”单元 (“rebar” element) 模拟。PET 胎体帘布的非线性应力 - 应变行为使用以试验数据为输入的用户程序模拟。3D 模型通过轴对称模型旋转 360° 产生。由于这种方法中每种组分材料性能在 3D 轮胎模型中是周向相同的, 轴对称分析一旦完成, 在 ABAQUS 中不允许重新定义材料的性能。这种方法虽然简单, 但是使得有可能在模型中建立胎体层接合区 (a carcass ply splice)。为了避免这种困难和模拟胎侧凹陷而不改变 3D 模型产生的方法, 可使用胎体帘线材料的其他热 - 力学性能。

如前所述, 胎体帘布由于搭接有双重的地方便出现胎侧凹陷, 在轮胎充气时, 轮胎的特别部分比轮胎的余下部分伸长得小。因此通过在轮胎的特别位置控制胎体帘线热收缩可模拟胎侧凹陷。

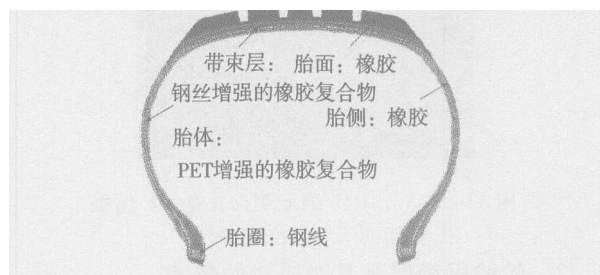


图 9 应用在数值分析中的
235/75R15 轮胎的有限元分析网格

在这种模拟过程中, 首先执行轮胎的有规则的轴对称充气分析, 析取没有任何接合的胎体帘线的筋应力。因为胎体层在凹陷出现的位置是双层的, 所以在轮胎中那局部的胎体帘线应力将是轮胎其它部分应力的一半。对于 150°C 预处理的 PET 1300/3 帘线的应力 - 应变曲线, 在出现凹陷的位置和其它部分的胎体帘线应力的差异示意表示在图 10 中, 胎侧凹陷处的胎体帘线应力是凹陷外边的应力的一半, 由于特别的增强, 造成在这两种区域之间的帘线应变差别 ϵ_0 。由于应力的差别, 凹陷处的帘线也将比凹陷外面的帘线有比较低的应变, 用如图 10 所示的 ϵ_0 标记, 这使凹陷处的帘线看起来像从凹陷外面“收缩”。在 3D 模型中应用旋转的方法和对胎体帘线强加收缩量 ϵ_0 , 通过在凹陷处局部升高温度, 胎侧凹陷可被模拟。

图 11 显示模拟结果。在这种情况下, 被模拟

的接合宽是 25.4mm。在模型中凹陷的最深点是 2.3mm。这种“局部冷却方法”包括在凹陷内部和外部之间应力和应变的相互关系以及通过控制热收缩模拟凹陷。使用这种方法,可避免建立真实接合的复杂预处理程序,应用相对简单的方法可评估胎侧凹陷。

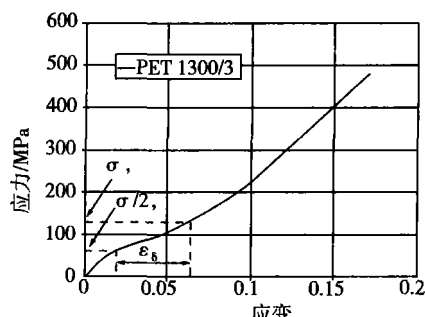


图 10 胎体帘线应力的差异示意图

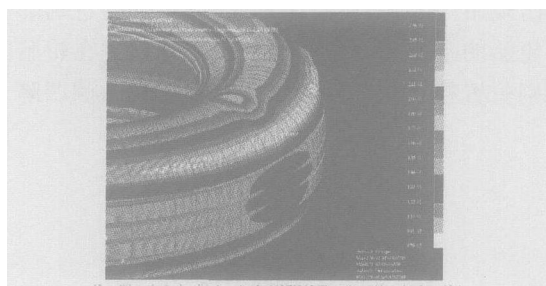


图 11 235/75R15 的胎侧凹陷的 FE 结果

注: 尺寸的单位是英寸

3.2 轮胎冠带层及其对轮胎的影响

冠带层通常放置在两钢丝带束层上面, 这层帘线是按轮胎的圆周方向定向的。在本研究中, 模拟两种轮胎——高性能轮胎(225/50R16ZR)和负荷范围 E 的轻卡车轮胎(LT245/75R16), 它们的冠带层由尼龙 840/2 帘线构成, 具有各种结构。前面试验获得的材料性能用作尼龙冠带层的输入。模拟考察以下方面:

1. 具有不同冠带层结构的轮胎的印痕形状。冠带层的不同结构对轮胎组分规定不同的约束, 考察冠带层结构对轮胎印痕的影响。

2. 在垂直负荷下以 $80.5\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 行驶的轮胎的帘线负荷。当轮胎在垂直负荷下行驶时, 轮胎的温度将由于橡胶组分的滞后行为而升高。如前面所讨论过的, 尼龙帘线的热收缩是可恢复的, 它们对升温趋向收缩而与热历史无关。由于尼龙帘线特有的可恢复的热收缩行为, 因此, 当轮胎在垂直负荷下行驶时, 将由冠带层提供特别约束, 于是冠带层中的帘线负荷将增大。

3. 轮胎的印痕形状。与新轮胎比较, 行驶过一定里程后的轮胎通常呈现出尺寸变大。这主要是由使用期间胎体帘线蠕变引起的。行驶时, 轮胎温度将升高。这种升温也将加速蠕变过程。

3.2.1 冠带层结构对轮胎印痕形状的影响

代号 A 型和 B 型的两种冠带层结构如图 12 所示。A 型结构只有一层但覆盖整个带束层, 而 B 型结构有两层但只覆盖带束层边缘。两种结构都叠放超出 1[#]带束层的边缘。所研究的轮胎是载重范围 E 级的轻卡车轮胎 LT245/75R16, 所用的胎体帘线是 PET 1300/3, 冠带层帘线是尼龙 840/2。胎体帘线和冠带层帘线用 ABAQUS 的筋单元模拟。前面试验获得的帘线的材料性能在模拟中用作输入, 特别是在 150℃防热收缩处理的帘线的应力-应变曲线, 因为被模拟的轮胎在 150℃硫化但不进行硫化后充气。为了与模拟结果比较, 制造了试验轮胎并获得油墨印痕。所用的垂直负荷是 13478.1N。结果表明两种冠带层结构的印痕形状在数值模拟和实验数据之间有良好的 consistency。对比冠带层结构, A 型结构的轮胎更方。由于 B 型结构只覆盖带束层的边缘, 在胎肩区引入多加的径向刚性, 于是形成比较圆的印痕。

3.2.2 行驶中轮胎的冠带层的帘线负荷

A 型结构高性能轮胎 225/50R16ZR 被用于模拟分析。冠带层材料再次用 840/2 尼龙, 胎体帘线是 PET 1000/2, 测试材料的性能。对静态和行驶态引进两种结构和热分析。静态, 轮胎充气 222.0kPa, 垂直负荷 4448.2N; 行驶态, 轮胎初始充气 222.0kPa, 在垂直负荷 4448.2N 下以 $80.5\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 行驶, 对行驶的轮胎假设为稳态条件。在完成分析之后, 提取静态和行驶态轮胎的冠带层帘线负荷, 从中可做比较。

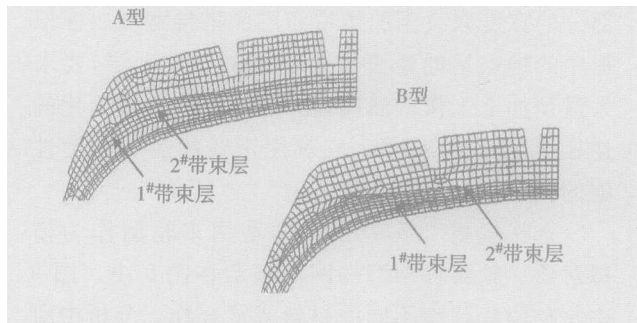


图 12 所研究的两种冠带层结构

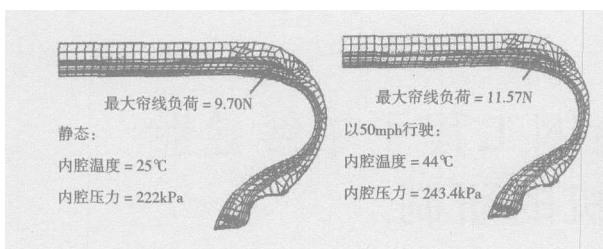


图 13 静态和行驶态轮胎(225/50R16Z R)的冠带层中的最大帘线负荷

图 13 为取自印痕中心的轮胎断面,并标明处于静态和行驶态的轮胎,围绕带束层边缘存在的冠带层的最大帘线负荷。在轮胎处于静态时,轮胎内腔温度是室温 25°C ,腔内压力等于初始充气压力 222.0kPa 。静态的冠带层的最大帘线负荷是 9.70N 。而轮胎在行驶时,轮胎温度因为橡胶组分的滞后行为而升高,所以轮胎内腔温度和压力也分别升高到 44°C 和 243.4kPa 。由于轮胎温度升高,在冠带层中的尼龙帘线也趋向收缩。作为温度、压力和收缩的综合效应结果,正在行驶的轮胎的冠带层的最大帘线负荷是 11.57N ,对比静态升高了 19.3% 。冠带层帘线负荷增大提供了对其他轮胎组分的外加约束。

3.2.3 轮胎行驶后的印痕形状

选择高性能轮胎(225/50ZR16)模拟轮胎行驶后的尺寸膨胀。模型定义如前所述,除时间外,规定了 PET 1000/2 胎体帘线的蠕变性能。时间-温度叠合应用 WLF 公式处理。在分析中,假设了下列条件:(1)轮胎初始充气压力 222.0kPa ;(2)该轮胎已在垂直负荷 4448.2N 下以 $805\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 行驶过 2h ;(3)行驶期间迅速达到稳定状态;(4)行驶后轮胎处于静置使轮胎温度下降至 25°C 。

图 14 将行驶过的轮胎的预测印痕与的正在行驶的轮胎模拟印痕加以比较。结果表明轮胎运转后比正在行驶的轮胎具有更长的印痕,在行驶过的轮胎的胎体帘线中出现蠕变,这种蠕变行为是造成轮胎印痕变大的主要原因。而正在行驶的轮胎印痕比较圆,特别是在胎肩区。这是由于尼龙帘线特有的可恢复热收缩行为,正在行驶的轮胎的冠带层对轮胎提供了额外的约束。如图 14 所示。结果表明,聚合物帘线的热-力学性能对轮胎具有明显的影响,为了应用 FEA 预测轮胎性能,准确地模拟帘线的热-力学性能是必要的。

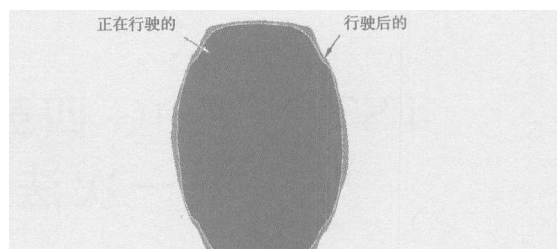


图 14 正在行驶的和行驶后的轮胎 225/50ZR16 的印痕

4 概括和结论

本文表征轮胎聚合物帘线的热-力学性能,并用两类实例研究这些性能对轮胎的影响。通过研究我们可以得出以下结论:操作条件不同,轮胎帘线的热-力学性能对轮胎的印痕形状具有不同和明显的影响。而且,为了准确地预测轮胎印痕和其他相关性能,严谨地表征和模拟轮胎帘线的材料行为是必要的。此外,用户可以利用轮胎帘线的热-力学性能去简化模拟过程。

参考文献:略

(完)

米其林新型起重机轮胎投放市场

米其林北美公司下属的重型推土机轮胎分公司,最近推出一种商品名为“X - Crane AT”的轮胎。这种轮胎是一种非对称胎面花纹轮胎,是专门为自动推进式全地形建筑用起重机而设计的。

这种新型轮胎可以减少起重机的停工期,使操作费用降到最低,缩短在湿地面上的刹车滑动距离,并改善在路面行驶和工作现场的操纵性能。另外,它和普通的起重机轮胎相比,滚动阻力降低了 6% ,因而也节省了燃料费用。这种轮胎与其商品名为“Michelin XGC”的上一代产品相比,使用寿命可提高 20% ,这是因为该种轮胎与地面的接触面积较大(接地面积增加 7%),与地面的接触压力分布更均匀,胎面花纹呈均匀磨耗。

目前上市的这种轮胎,其规格为 $445/95R25$ ($16.00R25$)。在 2007 年, $385/95R25$ ($14.00R25$) 和 $385/95R24$ ($14.00R24$) 两种规格的产品也将面市。

郭毅