

聚酯帘线的热—力学性能对 PCI 和非 PCI 轮胎的影响(二)

姚钟尧 译

(华南理工大学材料学院高分子系 广州 510640)

(续上期)

2.2 收缩力

图 12 显示 PET 帘线在温度升高和没有负荷时的收缩。然而,假如施加负荷于帘线并且足够大,收缩将不会出现。在这种情况下,在帘线中随着温度升高存在一个在发展的收缩力。为了测量收缩力,再次应用 DMA2980,用恒定位移方式进行测试。首先施加一个小恒定应变 0.1% 到帘线,使其保持平直,然后夹具固定位置。在测试开始时,温度以每分钟 1℃ 的速率从室温升到 160℃,收缩力同时用附在夹具上的负荷装置测量。

结果如图 13 所示,表明收缩力像热收缩一样,也以相似的方式随温度升高。实际上,特殊温度的收缩力和自由热收缩与帘线的模量是完全互相关联的。测量收缩力实验时,如果解除帘线一端的约束,则与当时温度有关的完全自由收缩将出现。也就是说,收缩力是使帘线在特殊温度保持零收缩所需的最小力。

2.3 张力测试

为了表征 PET 1000/2 帘线的应力—应变行为,做了张力测试。试样帘线测试前被预处理,以便逼真模拟在 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎中的帘线。为了模拟在 PCI 轮胎中的帘线,取 PET 1000/2 帘线放在 173℃ 的烘箱中 15min,帘线两端被约束以防止热收缩,173℃ 是本研究中乘用车轮胎的硫化温度。然后,在帘线冷却到室温后进行张力测试。另一方面,为了模拟在非 PCI 轮胎中的帘线,所接纳的帘线以自由状态放在烘箱中 15min,以实现帘线的完全自由收缩。在这种情况下,帘线用 152℃、173℃ 和 180℃ 三种不同温度处理,以便研究自由热收缩对帘线的应力—应变行为的影响。在帘线冷却到室温后进行张力测试。

张力测试结果显示在图 14 中。因为帘线在测试前于预处理期间是受约束的,模拟 PCI 条件的帘线的应力—应变曲线,与原样帘线的应力—

应变曲线很相似。而另一方面,模拟非 PCI 条件的帘线的应力—应变曲线的陡度,比原样帘线和受约束帘线的应力—应变曲线小得多。此外,图 14 也显示模拟非 PCI 条件的帘线的应力—应变曲线跟着处理温度向下移,表明帘线的模量随着帘线的热收缩量增大而减小。

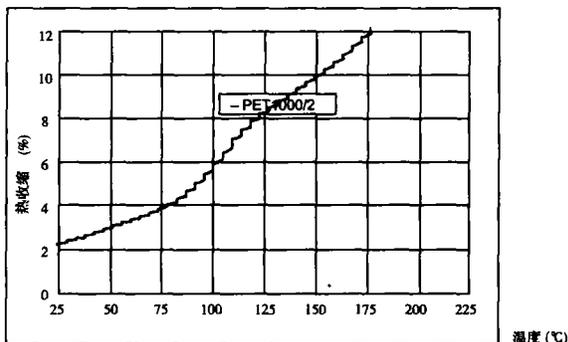


图 12 PET 1000/2 帘线的热收缩

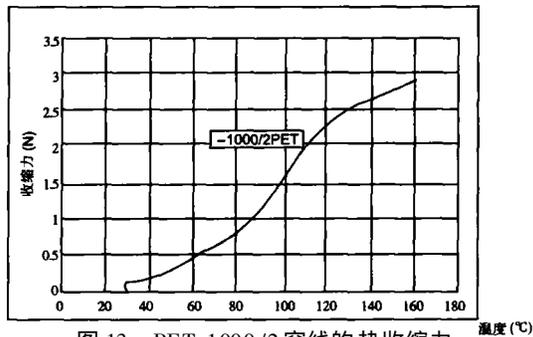


图 13 PET 1000/2 帘线的热收缩力

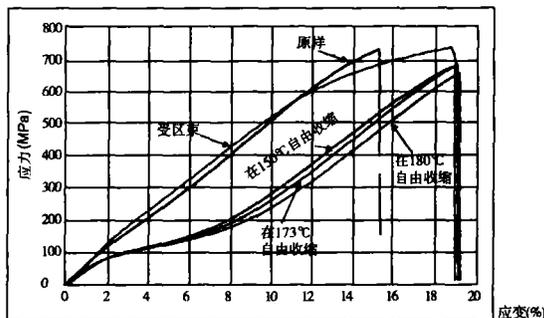


图 14 原样帘线、受约束帘线和自由收缩帘线的张力测试结果

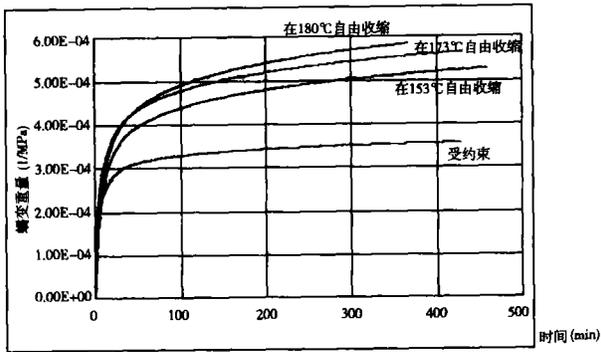


图 15 原样帘线、受约束帘线和自由收缩帘线在 60℃ 的蠕变柔量

2.4 蠕变测试

轮胎的尺寸稳定性与帘线蠕变有关。为了表征蠕变性能，试样帘线首先用张力测试中讨论的相同方式预处理。再次应用 DMA2980 于蠕变测试。测试温度设定为 60℃，以便加快试验，施加负荷 10N。图 15 表示蠕变柔量随时间变化的测试结果。结果表明，蠕变柔量也是随着帘线的热收缩量增加而增大。这预示在里程试验时，非 PCI 轮胎一般将比 PCI 轮胎呈现较大的尺寸变化，与前面讨论的实验观察一致。

3 数值分析和讨论

为了模拟乘用车轮胎 235/75R15 有和没有 PCI 的硫化后冷却过程，用 ABAQUS® 构建和执行一种轴对称的三维轮胎有限元模型。轴对称模型的网格表示在图 16 中。



图 16 用于数值分析的有限元分析(FEA)网格

三维模型通过将轴对称模型旋转 360° 生成。在分析中，所有橡胶组分都应用尼 - 虎克模型 (the neo Hookean model) 作为超弹性材料处理，通过最具代表性的乘用车轮胎试验选择材料常数。

在 ABAQUS® 中模式中，钢丝和聚酯增强材料组分定为“rebar”单元。如图 14 所示，胎体帘线 1000/2 的非线性应力 - 应变行为应用一个用户子程序模式化。此外，前面讨论过，PET 帘线的应力 - 应变行为强烈地依赖于自由收缩水平，这与轮胎的硫化后冷却条件密切关联。在分析中考虑轮胎的硫化后冷却条件，非线性应力 - 应变行为对自由收缩水平的这种依赖性也被模式化。虽然在本文中并没有讨论，但是用在带束层和胎圈中的钢丝帘线由于捻合，它们的应力 - 应变行为也是非线性的，也像聚合物帘线一样用相同的方式模式化。

图 17 是 FEA 分析的示意框图。首先，设计轮胎和生成网格。其次，指定包括各种橡胶胶料和帘线的所有材料的性能。第三，选择硫化后冷却条件 (PCI 或非 PCI)。通过选择硫化后冷却条件，测定相应的 PET 帘线的热 - 力学性能，包括应力 - 应变关系、热收缩、收缩力和蠕变性能。为了将里程试验轮胎的尺寸变化模式化，帘线蠕变行为的时间 - 温度关系通过 WLF 公式处理。然而，由于缺少精确的多轴滞后模型，对滚动中的轮胎的温度预测不准确。结果，里程试验轮胎的数值分析是定性的，这种数值分析的主焦点是定量地确定新胎的尺寸和印痕。最后，进行分析，做出 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎两者的轮胎尺寸和印痕的预测。

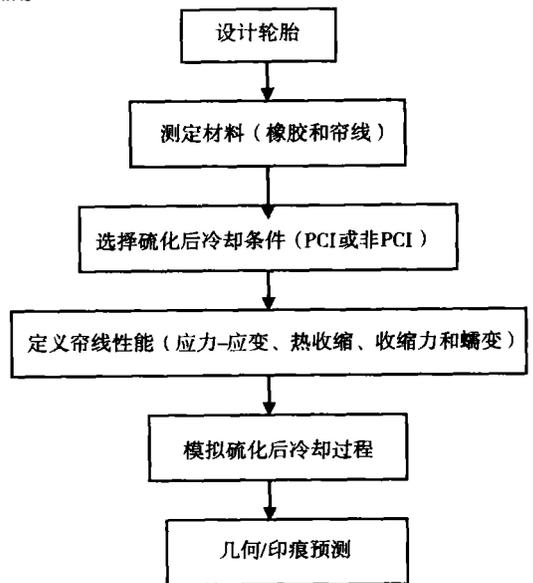


图 17 FEA 分析的示意框图

4 轮胎轮廓

图 18 表示通过分析获得的 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎两者在充气压力 0.24MPa 下的轮胎轮廓。在分析中,假设轮胎是新的,因此不应用轮胎帘线蠕变性能。此图表明比 PCI 轮胎具有比较小的断面宽度和比较小的胎冠半径。像前面讨论的那样,与 PCI 轮胎比较,因为非 PCI 轮胎在硫化后冷却期间不存在充气压力,在 PET 帘线中出现的自由热收缩量比较大。因此,在这两类轮胎之间形成尺寸和形状的差异。如图 18 中用轮廓形状和断面宽度值标明的那样,FEA 结果与从图 3 所示的实验轮胎所获得的测量定量一致。

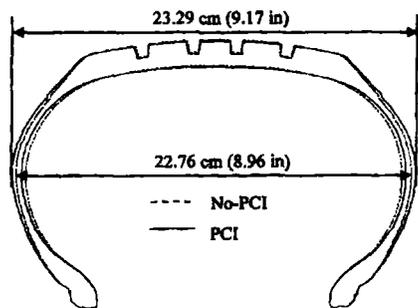


图 18 235/75R15 规格的新 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎两者在充气压力 0.24MPa 下的预测轮廓

在图 19 中有 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎新胎在充气压力 0.24MPa 条件下的预测直径,虽然需要更多时间去完成分析,但这个微小偏差可能被排除。FEA 的轮胎轮廓和用激光描图机获得的实测轮胎轮廓之间直接对比。此图显示预测的和实测的轮胎轮廓不仅在断面宽而且在整个轮胎形状都是一致的。这种一致进一步验证数值分析是有效的,对轮胎硫化后冷却过程的物理解释是准确的。图 19 也显示在预测和实测的轮胎轮廓之间存在一个轮胎外直径的小偏差(小于 1%)。这个偏差也许是由于在 FEA 分析中忽略胎面花纹引起的。如果花纹被模式化,则这个小偏差可排除,虽然分析将需要更多的时间去完成。然而,对于本研究,模型的精度可认为是足够的,胎面花纹影响早期讨论是可忽视的。

图 20 所示为新的和试验后的 PCI 轮胎两者在充气压力 0.24MPa 下的预测轮廓。作为与图 3 和图 10 之间差异的比较,分析结果定性地说里程试验时轮胎尺寸和形状的演变。对于非 PCI 轮胎也已得到一个相似的结果。然而,如前面说

明的那样,里程试验轮胎的结果仅仅是定性的,为了准确地预测里程试验轮胎的尺寸和形状,还需要更加准确的多轴滞后模型。

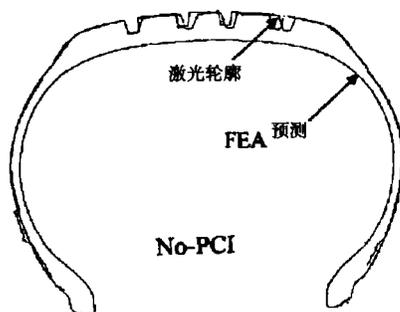
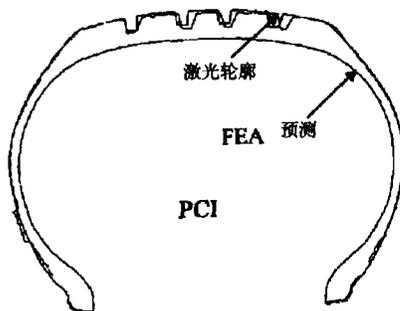


图 19 235/75R15 规格的新 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎两者在充气压力 0.24MPa 下预测和实测的轮胎轮廓之间的对比

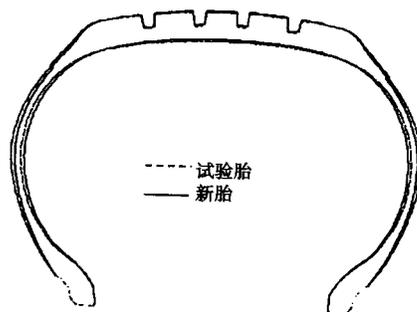


图 20 新的和试验过的 PCI 轮胎在充气压力 0.24MPa 下的预测轮廓

5 轮胎印痕和接触摩擦的影响

为了模拟轮胎印痕,在分析中应用了轮胎和路面之间接触的两种极端摩擦条件——零摩擦和“粗糙”接触(意味着在接触面之间没有滑移)。做这种简化主要目的在于减少计算时间但是仍然

能够研究接触摩擦的影响。实际状态一定是在这两种极端条件之间的某些情况。图 21 显示 235/75R15 规格的非 PCI 轮胎新胎在这两种极端条件下的预测印痕。印痕被规定为在正常分离小于 0.05mm 的接触表面之间的面积。此图显示, 由于无摩擦接触, 零摩擦的印痕比粗糙接触的有比较长的印痕长轴和比较大的肩部接触。另一方面, 印痕宽度几乎是相同的, 表明在轮胎承受垂直负荷时, 多数滑移沿着印痕长轴方向出现, 其中接触摩擦的作用也是最明显的。此外, 图 21 中的印痕大小, 也说明粗糙接触的印痕事实上比较接近图 4 和图 5 所示的非 PCI 轮胎测量的油墨印痕大小。因此, 将预测和实测的印痕迭合在一起做一种比较直接的相互比较。如图 22 所示, 粗糙接触的 FEA 结果相当好地预测油墨印痕的整体形状, 特别是印痕长轴长度和宽度。然而, 预测的印痕与油墨印痕相比, 由于相对短的肩部接触而比较圆。这种差别可能又是由于在分析中忽略胎面花纹引起的。由于胎面花纹, 实验轮胎的弯曲刚度比较低, 因此, 测量的油墨印痕比在 FEA 分析中获得的印痕方正。

图 23 表明, PCI 轮胎也已出现相似的情况, 其中, 用零摩擦和粗糙接触两条件分析所得的印痕与用新 PCI 轮胎实验测量的油墨印痕在一起显示。由于接触摩擦, 所以有粗糙接触的印痕比自由摩擦条件的印痕具有较短的印痕长轴和较小的肩部接触。在与所测量的油墨印痕比较时, 用粗糙接触的分析结果精确地预测印痕宽度和印痕长轴长度。但是, 因为在数值分析中忽略胎面花纹, 所以预测的印痕比油墨印痕圆。有限元分析也精确地预测在新 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎之间的尺寸差异, 通过比较图 22 和图 23 可以发现这种差异。与预测的 PCI 印痕比较, 预测的非 PCI 印痕有比较长的印痕长轴和比较短的宽度。此外, 预测的 PCI 印痕也稍方正。所有这些结果与从实验轮胎得到的测量是一致的。为了进一步调查接触摩擦的影响, 已获得规格为 235/75R15 的非 PCI 轮胎和 PCI 轮胎新胎的接触压力分布。如图 24 所示, 在接触是无摩擦和滑移时, 由于在印痕的边缘出现最大压力, 两种胎的印痕接触压力分布是相对均匀的。另一方面, 当接触是粗糙时, 接触压力的均匀度变小, 最大压力位置向内移

动。如前面所说明那样, 既然这两种接触条件代表两种极端情况, 因此, 在图 24 中没有哪条曲线代表真实的印痕接触压力。然而, 通过这些研究了解接触摩擦对印痕压力分布的影响, 通过这样的数据外推可做出真实的接触压力分布的准确估算。通过 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎的比较, 图 24 也启示如果应用无摩擦接触, 则压力分布在这类轮胎之间是很相似的。另一方面, 在假设接触是粗糙时, 非 PCI 轮胎的压力分布比 PCI 轮胎的不均匀得多, 这就解释了前面讨论的在实验轮胎中观测到的油墨印痕形状的差异。这种结果也说明粗糙接触条件用在有限元分析中, 比无摩擦条件更现实。

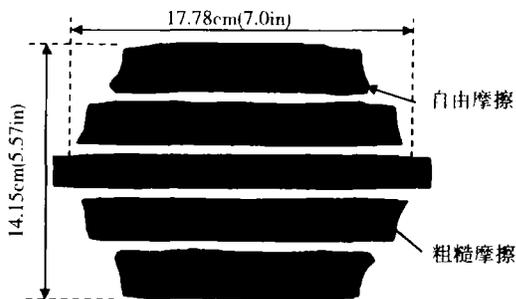


图 21 在 FEA 分析中得到的 235/75R15 规格的新非 PCI 轮胎在这两种极端摩擦条件下 (零摩擦和“粗糙”接触) 的预测印痕
注: 用于分析的充气压力为 0.24MPa, 垂直负荷为 5782.69N.

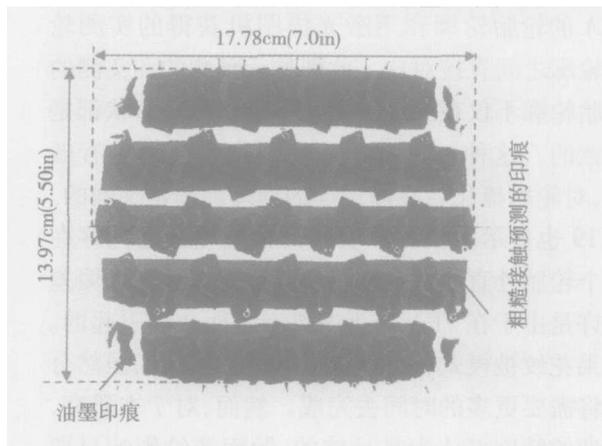


图 22 非 PCI 轮胎的 FEA 预测的印痕和实测油墨印痕之间的比较
注: 用于 FEA 分析的摩擦条件是粗糙接触, 充气压力为 0.24MPa, 垂直负荷为 5782.69N

还进行了里程试验轮胎的印痕定性预测。通

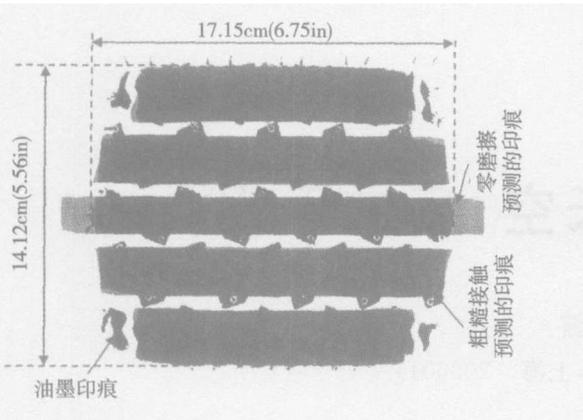


图 23 PCI 轮胎的 FEA 预测的印痕和实测油墨印痕之间的比较

注: 用于 FEA 分析的摩擦条件是粗糙接触, 充气压力为 0.24MPa, 垂直负荷为 5782.69N

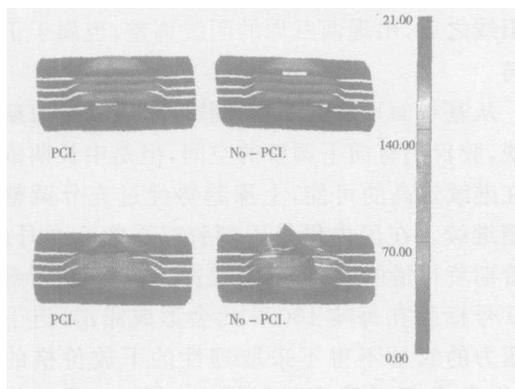


图 24 非 PCI 轮胎在零摩擦粗糙接触条件下印痕压力分布

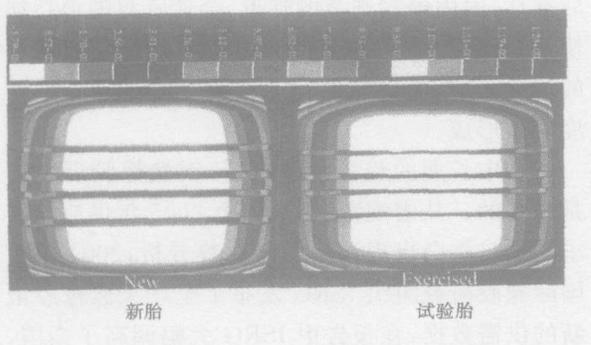


图 25 新的和里程试验的非 PCI 轮胎 235/75R15 的印痕比较

过应用 PET 帘线的蠕变性能和时间 - 温度叠合的 WLF 公式, 在分析中得到新的和试验后的 235/75R15 非 PCI 轮胎印痕, 如图 25 所示。这种结果说明, 由于 PET 帘线在非 PCI 轮胎中的蠕变, 里程试验后的印痕与新胎的对比变得更方正。

此外, 接触面积在试验后也增大。这些结果与本文前面讨论的实验观测是定性一致的。PCI 轮胎的相似的定性结果也已得到。

6 概括和结论

本文研究两种不同的硫化后冷却过程(PCI 和非 PCI)对轮胎尺寸和印痕形状的影响。基于这种研究, 做出下列结论:

1. 由于硫化后冷却过程的差别, 规格为 235/75R15 的非 PCI 轮胎与用相同模具制造的 PCI 轮胎相比, 具有比较小的胎冠半径。这些尺寸的差异是由非 PCI 轮胎在硫化后冷却期间 PET 帘线中出现的热收缩引起的。

2. PET 帘线的热收缩造成 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎的印痕不同。对于试验的乘用车轮胎 235/75R15, 与 PCI 轮胎比较, 非 PCI 轮胎的印痕长轴比较长、短轴宽度比较短、形状较圆。

3. 实验轮胎的测试结果显示 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎相比, 有较低的滚动阻力, 但其差异随试验里程增加而变小。

4. PET 1000/2 帘线的材料特征揭示聚合物帘线的基本的热 - 力学行为, 说明在 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎之间, 它们与尺寸大小和形状面的差异直接有关。

5. 由于将热 - 力学的材料行为适当模式化, 非线性有限元分析模拟了有和没有 PCI 的两种不同的硫化后冷却过程, 成功地预测了两者的尺寸和轮廓。

6. 通过有限元分析预测了所研究的 PCI 和非 PCI 轮胎的印痕, 研究了接触摩擦的影响。发现所预测的有粗糙摩擦的印痕在大小方面与实验轮胎测量的油墨印痕很接近。

7. 有限元分析也预测了 PCI 和非 PCI 轮胎两者在里程试验时的大小变化, 这些结果与实验数据定性一致。下一步工作, 将集中于 PCI 和非 PCI 轮胎试验时对滚动阻力和尺寸的变化预测的精确度。

编辑部声明:

作者投稿概不退稿, 请作者及时来电查询。