聚酯帘线的热—力学性能对 PCI 和非 PCI 轮胎的影响(一)

姚钟尧 译
(华南理工大学材料学院高分子系 广州 510640)

摘要: 轮胎硫化后冷却过程中所采取的方式对轮胎的整体性能影响很大。硫化后充气(PCI)已经作为一种有效的方法,普遍用于控制轮胎的尺寸和形状。但是,由于在某些轮胎制造中引入尺寸稳定型聚酯作为胎体帘线材料,PCI 被认为是不必要的步骤,已从生产工艺中排除。按照惯例,经过 PCI 处理的轮胎叫做 PCI 轮胎,而没有经过 PCI 处理的轮胎叫做非 PCI 轮胎。基于硫化后冷却期间经历了不同的负荷历史,PCI 轮胎和非 PCI 轮胎呈现出不同的行为特点,包括尺寸和印痕的形状。比较特别的是,使用相同的模具,在 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎之间最明显的差异是轮廓。由于硫化后冷却期间帘线中出现热收缩,与 PCI 轮胎相比,非 PCI 轮胎断面宽度较小,胎冠半径比较扁。另外,非 PCI 轮胎在行驶中尺寸变化较大。

在本研究中,实验用 PCI 和非 PCI 乘用轮胎(235/75R15)都是用相同的硫化模具制造的,进行一系列试验以确定这两类轮胎之间的差别。聚酯轮胎帘线材料承受各种热 – 力学负荷后,测定硫化后冷却过程对帘线性能的影响。然后,构造轴对称的三维有限元模型,模拟有和没有 PCI 的硫化后冷却过程。输入通过材料表征化所获得的帘线材料性能,进行数值分析,成功地预测 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎两者的轮胎轮廓和印痕。所得的分析结果与从试验轮胎得到的测量结果吻合。

关键词: 轮胎帘线; 硫化后充气; 热收缩; 热—力学性能

充气轮胎是一种复杂的复合物。典型的乘用轮胎构成包括胎面、钢丝带束、增强胎体层的聚合物帘线诸如尼龙和聚酯(PET)、钢丝圈和胎侧,如图 1 所示。轮胎的总体性能和行为很大程度上依赖于每一分体的热 – 力学性能。制造期间,轮胎在模具中硫化时承受高温以便硫化橡胶组分,同时实现所设计的尺寸、形状以及胎面花纹和胎侧装饰。轮胎在完成硫化周期和从模具中卸脱之后,硫化过程仍在继续。实验和研究表明,这种硫化后冷却过程能够显著地影响轮胎的总体性能,包括尺寸、尺寸稳定性、印痕和滚动阻力等。

诸如尼龙和聚酯等多数聚合物帘线,由于它们特别的分子结构,在高温又没有载荷时都趋向于收缩。这种热收缩将影响帘线的热 – 力学性能。而轮胎的尺寸、印痕形状和滚动阻力与轮胎帘线的热 – 力学性能紧密相联系,所以这种热收缩行为将极大地影响轮胎总体性能。因此,在轮胎制造中,硫化后冷却过程的控制是生产均匀而且高质量的、具有所希望的尺寸和形状的产品的一个重要因素。

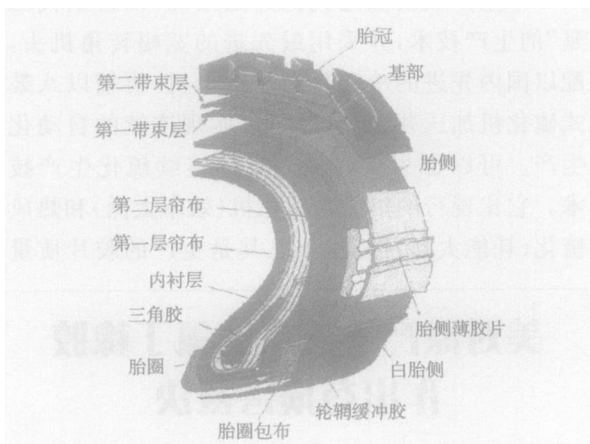

图 1 充气轮胎构成示意图

作为有效控制硫化后冷却过程的一种方法,硫化后充气(简称 PCI)已普遍用在轮胎制造中。在硫化周期结束之后,轮胎从硫化模具中卸下,然后即刻在其中充气并保持在相对高的压力上,轮胎温度在此期间下降。PCI 过程的周期可以等于 2 倍硫化周期。按照惯例,用 PCI 制造的轮胎叫做 PCI 轮胎。硫化后充气期间,因为有充气压力提供的约束,轮胎的帘线不收缩。PCI 过程完成

后，解除充气压力。在轮胎温度降到较低时，可能只有最小量的帘线热收缩出现。轮胎的尺寸和形状在硫化后冷却过程期间维持不变，于是可生产具有所希望的尺寸、形状和均匀性的轮胎。

早在 1980 年，尺寸稳定型聚酯（DSP）纤维纱就已商品化，多年来 DSP 已广泛地用作轮胎的帘线材料。这种帘线的特点是具有低得多的热收缩、比较高的强度和比较好的抗疲劳性。采用 DSP 帘线，即使不用 PCI 过程也可能实现所期望的轮胎尺寸和均匀性，PCI 只会加重成本。因此，有些轮胎制造工艺已排除 PCI 步骤，轮胎在脱模之后，简单地冷却到环境温度。没有经过 PCI 过程制造的轮胎通常叫做非 PCI 轮胎。

虽然 DSP 帘线比较好了的控制轮胎尺寸和形状，但是用和不用 PCI 制造的轮胎却呈现许多差异。非 PCI 轮胎与用相同模具制造的 PCI 轮胎比较，具有比较小的断面宽和冠部半径。这种特点部分地示例在图 2 中，其中表示不同规格的 PCI 和非 PCI 轮胎。此外，在相同的充气压力和垂直负荷下，与 PCI 轮胎相比，非 PCI 轮胎的印痕长轴长度比较长。另一方面，在行驶时非 PCI 轮胎一般比 PCI 轮胎呈现更大的尺寸和印痕形状变化，这可能由于轮胎帘线的蠕变。为了透彻地理解硫化后冷却过程对轮胎的影响，对承受不同负荷历程的轮胎帘线的热 – 力学性能的综合研究是必要的；对于了解帘线性能和轮胎行为之间的相互关系，这也是必要的步骤。

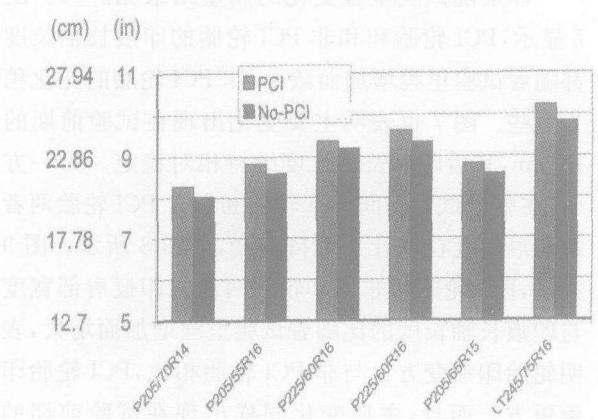

图 2　不同规格的 PCI 和非 PCI 轮胎的平均断面宽

在本研究中，实验用 PCI 和非 PCI 乘用轮胎都使用相同的硫化模具制造。然后，引入一系列测试，以便在诸如轮胎尺寸、印痕形状、滚动阻力和行驶效果等方面研究这两种类型轮胎之间的差异。在聚酯帘线的材料特性已表征，硫化后冷却过程对轮胎帘线的热 – 力学性能的影响已确定之后，建立一个轴对称的、三维非线性有限元轮胎模型，模拟有和没有 PCI 的两种硫化后冷却过程。由于输入所有组分的材料包括轮胎帘线的性能，数值分析量化了硫化后冷却期间材料的行为，成功地预测新的未行驶轮胎的尺寸和印痕形状。FEA（有限元分析）结果与从实验轮胎得到的测量结果很好吻合。此外，也获得实验轮胎的 FEA 结果，它定量地解释了轮胎在行驶时的尺寸估算。

1　轮胎测试和材料表征

1.1　轮胎测试

本研究选用规格为 235/75R15 的乘用轮胎，20 个实验轮胎用材料和硫化模具相同，以保持轮胎试样的均匀性。10 个实验轮胎用 PCI 制造，而另 10 个实验轮胎在硫化后冷却期间省略 PCI 过程。轮胎的硫化周期为 15min，PCI 过程为 30min。对于非 PCI 轮胎，在脱离硫化模具之后，没有充气压力，自然冷却到环境温度。然后实施一系列测试研究在 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎之间的差异。

首先，从 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎中各选择 3 个无瑕的新胎，并应用激光描图机描取轮胎在两种不同的充气压力 0.18MPa 和 0.24MPa 下的轮廓。然后在每种充气压力下测量这 6 个轮胎在多种垂直负荷下的油墨印痕，对充气压力 0.18MPa 所用的垂直负荷是 4448.22N、5782.69N 和 7562N，对充气压力 0.24MPa 所用的垂直负荷是 4448.22N、5782.69N 和 7562N。此后，印痕被统计分析以获得印痕形状的尺寸特征。

其次，在测量尺寸和印痕之后，按 SAEJ1269/70 程序测量这 6 个轮胎的滚动阻力。由于滚动阻力测量速度在 80.5km · h^{-1} 下实施，每个测 2h，因此这些测试本身也算入轮胎的试验里程。

第三，滚动阻力测量完成后，这些轮胎放在室内直到胎温降至环境温度。为了简化测试，只在垂直负荷 5782.69N 和充气压力 0.24MPa 下再进行轮胎油墨印痕测量。

滚动阻力和油墨印痕测量重复 4 次以上，直

至总试验里程达到 808km。

最后，进行激光轮胎描图以获得运转了 808km 后的轮胎轮廓。

1.2 轮胎测试结果

轮胎的测试结果显示在图 3 ~6 中。

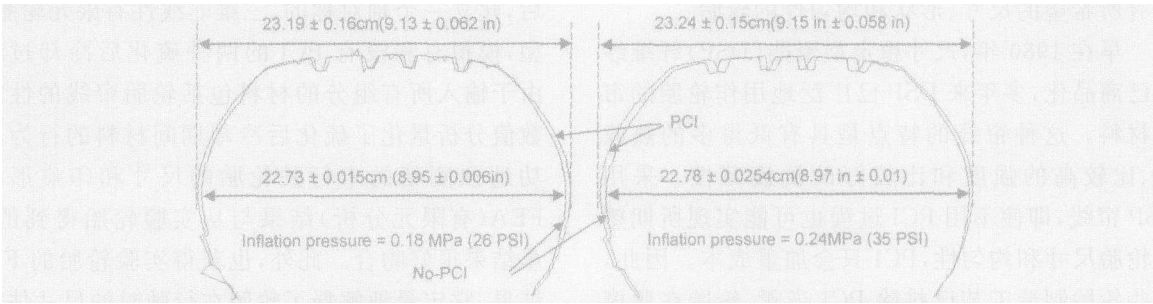

图 3 PCI 轮胎和和非 PCI 轮胎在充气压力 0.18MPa 和 0.24MPa 下的激光轮廓

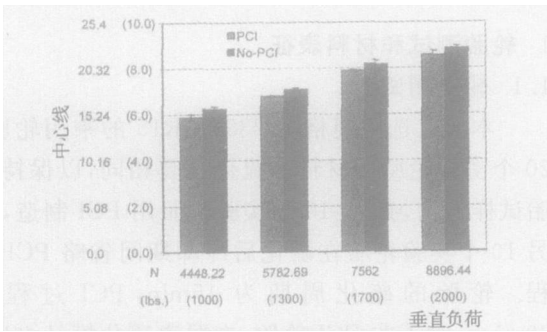

图 4 PCI 轮胎和和非 PCI 轮胎在充气压力 0.24M Pa 下的印痕长轴长度

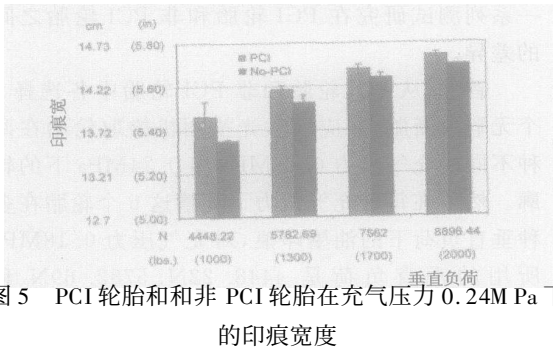

图 5 PCI 轮胎和和非 PCI 轮胎在充气压力 0.24M Pa 下的印痕宽度

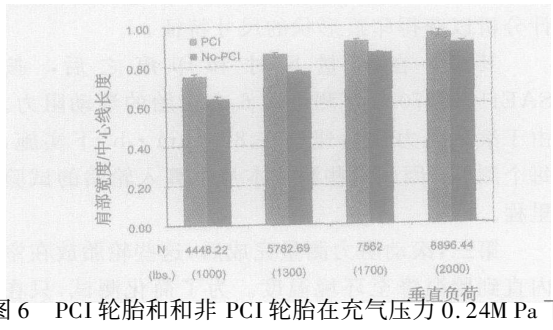

图 6 PCI 轮胎和和非 PCI 轮胎在充气压力 0.24M Pa 下胎肩宽与印痕长轴长度的比

图 3 为 PCI 轮胎和和非 PCI 轮胎在充气压力 0.18MPa 和 0.24MPa 下的典型轮廓，平均轮胎断面宽也用测量的标准偏差 ±1 一起标示。因为帘线热收缩，所以在两种充气压力下非 PCI 轮胎的断面宽均比 PCI 轮胎小。充气胎冠也是这种情况，在充气压力 0.24MPa 下变得更加明显。由于轮胎轮廓的这些差异，印痕内侧的压力分布也将变化，于是造成 PCI 轮胎和和非 PCI 轮胎印痕形状的差异，如图 4 和图 5 所示。与非 PCI 轮胎相比，在测试的所有垂直负荷水平下，PCI 轮胎的印痕长轴长度都比较短，而印痕宽度都较宽。此外，图 6 显示，在所有测试的垂直负荷下，PCI 轮胎的胎肩宽度与印痕的长轴长度的比都比非 PCI 轮胎的大。与 PCI 轮胎比较，非 PCI 轮胎在硫化后冷却期间由于在帘线中的热收缩造成比较圆的印痕。

印痕随试验里程变化的测量结果见图 7 ~9。图 7 显示，PCI 轮胎和和非 PCI 轮胎的印痕长轴长度都随着试验里程增加而减小，非 PCI 轮胎的变化稍为大些。图 7 也表明主要变化出现在试验前期的 161km，其后印痕长轴长度维持相对稳定。另一方面，在整个试验期间 PCI 轮胎和和非 PCI 轮胎两者的印痕宽度在统计上维持不变，如图 8 所示。图 9 显示，PCI 轮胎和非 PCI 轮胎两者的印痕肩部宽度与印痕长轴长度的比随着试验里程增加而增大，表明轮胎印痕变方。与非 PCI 轮胎相比，PCI 轮胎印痕更方。而且，主要变化同样出现在试验前期的 161km，以后比值在统计上趋于恒定。

图 10 为 PCI 轮胎和和非 PCI 轮胎在 808km 之后应用激光描图仪得到的典型轮胎轮廓。与图 3 比较表明，在里程试验之后 PCI 轮胎和和非

PCI 轮胎之间轮胎轮廓的差异明显变小，与在图 7～9 中结果一致。如前所述，这种尺寸的变化可能是由轮胎帘线蠕变引起的。由于橡胶复合物的滞后行为，轮胎在里程试验时温度升高，帘线蠕变可能加速，造成明显的轮胎尺寸变化。

滚动阻力数据见图 11。由图可见，PCI 轮胎新胎的滚动阻力明显比非 PCI 轮胎的低。然而，随着轮胎里程试验的进行，非 PCI 轮胎的滚动阻力下降得相当快，而 PCI 轮胎的滚动阻力在统计上保持不变。运转 322km 之后，两类轮胎之间的差异变得相对不明显。

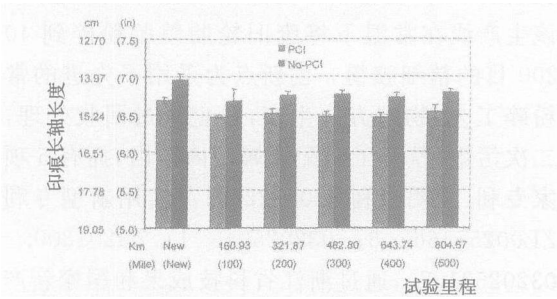

图 7　印痕长轴长度随轮胎试验里程的变化

注：在充气压力 0.24MPa 和垂直负荷 5782.69N 下测量，误差标杆代表±1 标准偏差。

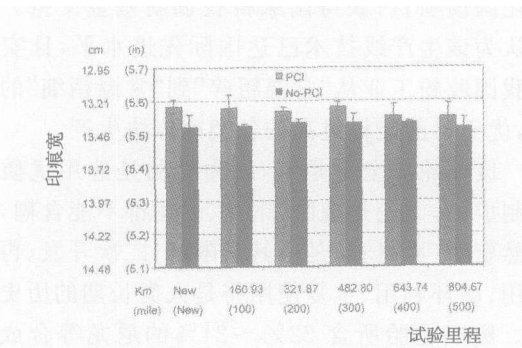

图 8　印痕宽度随轮胎试验里程的变化

注：同图 7

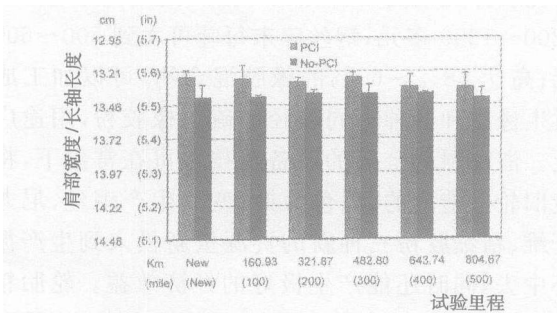

图 9　印痕肩部对印痕长轴的比随轮胎试验里程而变化

注：同图 7

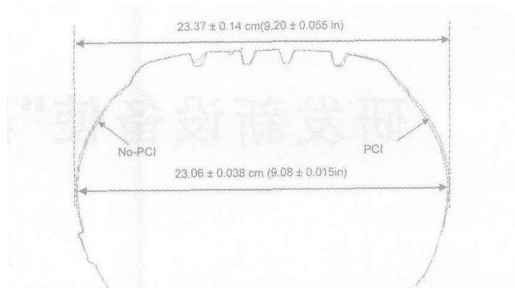

图 10　PCI 和非 PCI 轮胎在试验 808km 之后的轮胎轮廓

在充气压力 0.24 MPa 下测量，误差标杆代表±1 标准偏差。

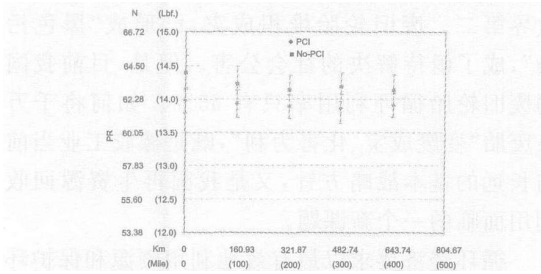

图 11 滚动阻力随轮胎试验里程的变化

数据对应于充气压力 0.24MPa 和垂直负荷 6236.41N 的条件，误差标杆代表±1 标准偏差。

2　聚合物帘线的材料特性

由于轮胎尺寸和形状与帘线的热－力学性能密切关联，所以透彻地了解聚合物帘线的特性是必要的。本研究中实验轮胎的胎体材料是尺寸稳定的 PET 1000/2 聚酯帘线，所测试的帘线试样在 RFL 溶液中预浸渍并直接从制造厂取样。测试下列帘线的材料特性：

2.1　自由热收缩

使用热分析(TA)装置 DMA2980 测量 PET 1000/2 帘线的自由热收缩作为温度的函数，测试在恒定负荷条件下进行。测试开始时施加恒定 0.1N 的小负荷使帘线伸直，然后以每分钟 1℃的速率升温至 200℃，从夹具位移记录计算帘线收缩。结果见图 12，表明帘线在温度升高和未施加负荷(不计算 0.1N 的力)时收缩，并且热收缩随温度升高而增大。非 PCI 轮胎硫化后冷却期间，因为没有充气压力，所以帘线一定会出现热收缩。而 PCI 轮胎在硫化后充气时，由于有充气压力所提供的约束，帘线在硫化后冷却期间不出现热收缩。虽然在 PCI 过程完成和排气后，小量的收缩可能仍然会在帘线中出现，但是，与在非 PCI 轮胎出现的收缩比较，这种收缩量是极小的。这种热收缩行为引起 PCI 轮胎和非 PCI 轮胎之间在尺寸和形状方面的差异。　　(未完待续)