

子午线轮胎耐久破坏规律及破坏机理的有限元分析

冯希金¹, 谭惠丰¹, 杜星文¹, 单国玲², 王传铸²

(1. 哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 三角集团有限公司, 山东 威海 264200)

摘要:通过对国内外多种规格子午线轮胎耐久试验后的破坏断面进行分类整理, 总结了子午线轮胎耐久试验后的破坏规律。利用哈尔滨工业大学开发的轮胎专用三维非线性有限元分析软件, 分别从最大剪切应变、等价应力、等价应变、应变能密度几个方面对胎肩脱层和胎圈脱层的现象进行了初步的机理分析, 从外因和内因两方面指出了提高轮胎耐久性能的方向。

关键词:子午线轮胎; 脱层; 疲劳; 应变能密度; 等价应力; 等价应变; 有限元分析

中图分类号: TQ336.1; TQ330.1⁺7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8171(2001)10-0596-06

子午线轮胎新产品开发过程中通常用转鼓上的轮胎耐久试验结果来衡量轮胎耐久性能的好坏。不同系列、不同种类的轮胎在耐久试验中破坏规律和破坏机理是不同的。对于脱层破坏的机理, 国际上有许多人进行过研究, 其中 J. D. Eskinazi 等^[1]利用三维有限元方法对轮胎进行了分析并重点研究了胎肩脱层的机理, 认为带束层的周向最大剪切应变、周向最大剪切应力、Von Mises 等价应力和应变、单元体的应变能密度可以作为衡量轮胎带束层耐久性能好坏的参数。

本工作利用哈尔滨工业大学轮胎专用三维非线性有限元分析软件对轮胎进行了有限元分析, 研究了轻载子午线轮胎胎圈脱层和全钢子午线轮胎带束层脱层机理, 旨在初步总结子午线轮胎在耐久试验中的破坏规律, 为研究和提高子午线轮胎的耐久性能提供依据。

1 子午线轮胎耐久试验后的破坏规律

1.1 全钢子午线轮胎的破坏规律

本工作通过对多种规格的全钢子午线轮胎耐久试验后的破坏断面进行研究, 发现全钢子

午线轮胎耐久试验后的破坏形式基本上有两种: 一是胎肩部位胎面胶和带束层之间的脱层; 二是胎圈包布和胎体反包层之间的脱层, 以胎肩部位的脱层最多, 如图 1 所示。

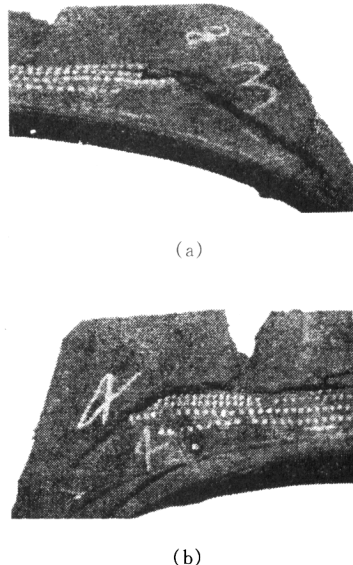


图 1 全钢子午线轮胎耐久试验后的断面(局部)

1.2 半钢子午线轮胎的破坏规律

1.2.1 大规格轻载子午线轮胎的破坏规律

大规格轻载子午线轮胎在耐久试验后的破坏形式主要是胎圈包布和胎体反包层之间的脱层破坏, 或者是胎圈包布和胎圈加强层之间的脱层破坏(如图 2 所示)。

作者简介:冯希金(1970-), 男, 山东新泰人, 三角集团有限公司工程师, 哈尔滨工业大学在读硕士研究生, 主要从事轮胎力学方面的研究。

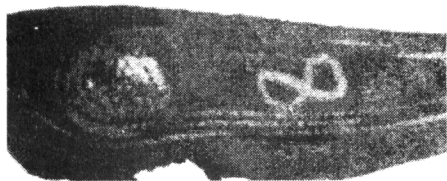


图 2 轻载子午线轮胎耐久试验后的断面(局部)

从脱层面上看,脱层主要发生在界面上,并且在橡胶基体一侧扩展。脱层破坏部位的高度一般位于轮胎胎圈的最下一条装配线附近。

1.2.2 轿车子午线轮胎的破坏规律

轿车子午线轮胎主要是胎肩部位的脱层破坏。轮胎没有冠带层时,脱层主要发生在两层带束层之间(如图 3 所示),裂纹在两层带束层之间的橡胶基体内进行扩展,裂纹的长度一般不超过第 1 层带束层的端部。轮胎有冠带层时,脱层主要发生在胎面胶和冠带层之间(如图 4 所示),并在胎面胶和冠带层的界面上扩展,裂纹可以向下延伸到第 1 层带束层的端部以下。

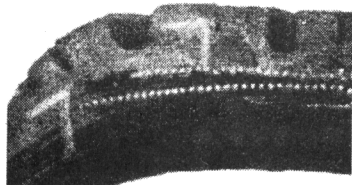


图 3 无冠带层轿车子午线轮胎耐久试验后断面(局部)



图 4 有冠带层轿车子午线轮胎耐久试验后断面(局部)

2 脱层破坏的机理分析

轮胎脱层破坏是其内部应力-应变异常的宏观反映。求解轮胎在实际工况条件下的应力和应变目前最好的方法是有限元法。本工作利用哈尔滨工业大学开发的子午线轮胎三维非线性有限元分析软件,分别对某种规格的轻载子

午线轮胎和某种规格的全钢子午线轮胎进行了静态力学分析。下面首先对所用到的力学参数和有限元模型进行简单介绍,然后给出相关的有限元分析结果。

2.1 相关力学参数简介

2.1.1 Von Mises 等价应力和等价应变

通过有限元分析可以得到轮胎在静态和稳态时的应力-应变场,经过后处理可以得到轮胎各层材料的应力-应变状态。由于应力-应变状态是用 6 个应力分量或 6 个应变分量来表示的,因此不是很直观,而等价应力或等价应变则是综合考虑了 6 个分量后的值,更加直观和便于理解。等价应力和等价应变的表达式为:

$$\sigma_e = \frac{1}{2} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2)] \quad (1)$$

$$\epsilon_e = \frac{1}{2} [(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2 + 6(\epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{xz}^2)] \quad (2)$$

从式(1)和(2)可见,Von Mises 等价应力和等价应变分别是包含了各个应力分量和各个应变分量的物理量,可以从整体上反映物体的受力状态。

2.1.2 应变能密度

应变能密度 W 是指物体在单位体积内所具有的应变能,单位为 $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$,用公式表示为:

$$W = \frac{1}{2} \{\sigma\}^T \{\epsilon\} \quad (3)$$

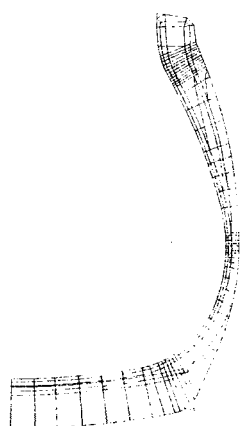
式中 T 代表对 $\{\sigma\}$ 求转置。

可见,只要求出了单元体的应力和应变,就可以求出其应变能密度。

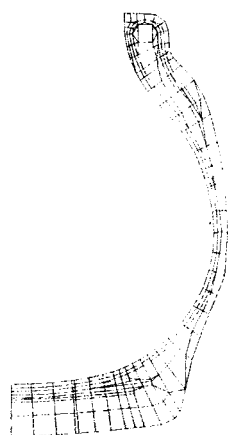
2.2 有限元模型

图 5(a)为某种规格的轻载子午线轮胎的二维有限元网格图。在图 5(a)中对关键部位都进行了细化。由程序处理后可成为有限元分析时所需要的三维模型图。在三维情况下共有 7 350 个节点,5 780 个单元。计算时在胎圈处给予可变约束,气压为 550 kPa,下沉量为 29 mm。

图 5(b)为某种规格的全钢子午线轮胎的二维有限元网格图,由程序处理后可成为有限



(a) 轻载子午线轮胎



(b) 全钢子午线轮胎

图5 轻载子午线轮胎和全钢子午线轮胎的有限元模型示意图

元分析所需要的三维模型图。在三维情况下共有 5 649 个节点, 4 860 个单元。计算时在胎圈处给予可变约束, 气压为 840 kPa, 下沉量为 33.5 mm。

2.3 轻载子午线轮胎胎圈脱层的机理分析

2.3.1 胎圈包布

(1) 胎圈包布的应变状态

图 6 所示为胎圈包布在标准负荷、标准气压下的应变状态, 6 个图分别代表 6 个应变分量。

由图 6 可见, 在胎圈与轮辋轮缘接触的部位(即图中的“中部”)各个应变分量都达到最大值。其中厚度方向的正应变 ϵ_{22} 和剪切应变 ϵ_{12} 最大, 可以达到 30% 以上。这表明这个部位受到轮辋较大的挤压作用, 在长期交变载荷的作用下, 此部位最易萌生裂纹, 然后裂纹扩展而导致胎圈部位的脱层破坏。实践表明, 轻载子午线轮胎也正是最容易在这个部位损坏。

(2) 等价应力

图 7 为胎圈包布有限元模型中各单元的分布图。图 8 为胎圈包布的等价应力图。图 9 为轮胎载荷状态下的接地断面与自由状态的断面比较。

图 8 中胎圈包布第 7~11 单元的 Von Mises 等价应力较大, 与图 6 所示的应变现象一致。

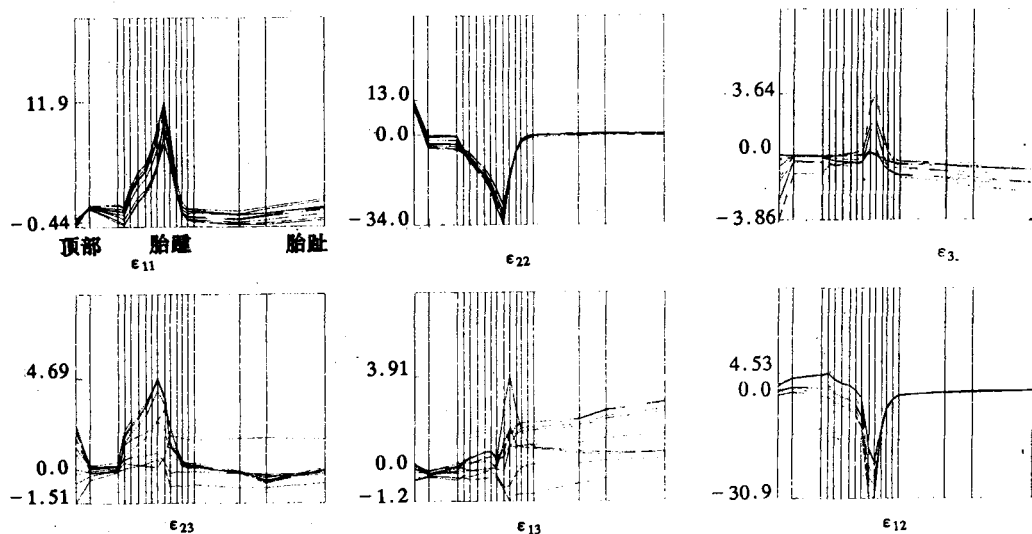


图6 胎圈包布的应变(%)状态

每幅图最左侧为“顶部”, 中间密线部分为“中部”, 最右侧为“下部”

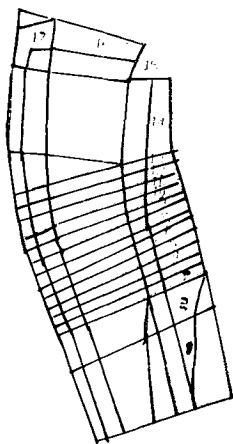


图 7 胎圈包布有限元模型中的单元分布

的应变和应力。这就是该部位产生裂纹的原因。

(3)胎圈包布的应变能密度

图 10 为胎圈包布的应变能密度图。

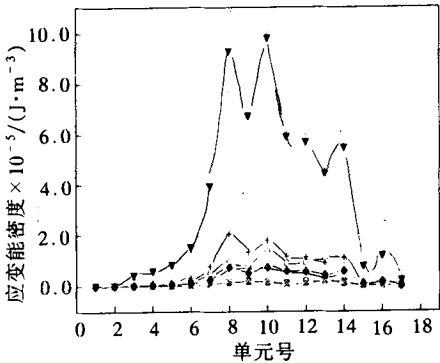


图 10 胎圈包布的应变能密度图

■—1 断面; □—4 断面; ●—7 断面; ○—11 断面;
▲—14 断面; ▼—17 断面; +—18 断面;
◆—19 断面; 空白—20 断面

由图 10 可见,也是在第 7~11 单元上还有最大的应变能密度,这说明这个部位有较大的能量积累,容易引起材料的疲劳破坏。

2.3.2 胎体反包层

(1)胎体反包层的应变状态

图 11 所示为胎体反包层的应变状态。

由图 11 可见,胎体反包层中部处的 6 个应变分量都比较大,尤其是厚度方向的正应变 ϵ_{22} 和剪切应变 ϵ_{12} ,这是轮胎在胎圈部位发生脱层的重要原因。

(2)胎体反包层的等价应力

图 12 是胎体反包层有限元模型中各单元的分布图。

图 13 是胎体反包层的等价应力图。

由图 13 可见,第 4~6 单元和第 13~20 单元的等价应力较大,第 4~6 单元位于三角胶的顶部位置,第 13~20 单元位于胎圈与轮辋接触部位。

(3)胎体反包层的应变能密度

图 14 为胎体反包层的应变能密度图。

由图 14 可见,第 15~20 单元的应变能密度比较大,这表明在这个部位有较大的能量积累,容易造成材料的疲劳破坏。

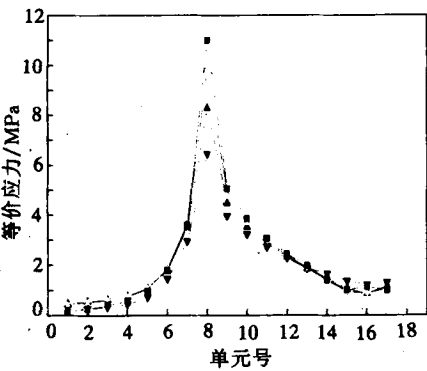


图 8 胎圈包布的等价应力

▼—1 断面; ▲—11 断面; ○—18 断面; ■—20 断面

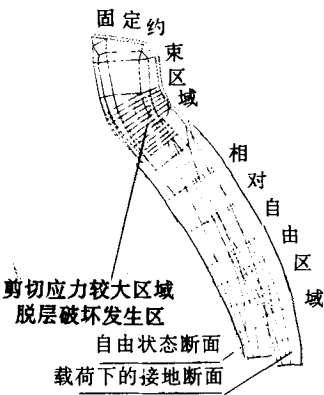


图 9 轮胎在载荷状态下的接地断面与自由状态的断面比较(局部)

由图 9 可见,第 7~11 单元正是胎圈与轮辋上缘接触的部位。这个部位的材料由于受胎侧影响有发生大位移的趋势,但其外面有轮辋的箍紧作用,这种冲突造成此部位材料有较大

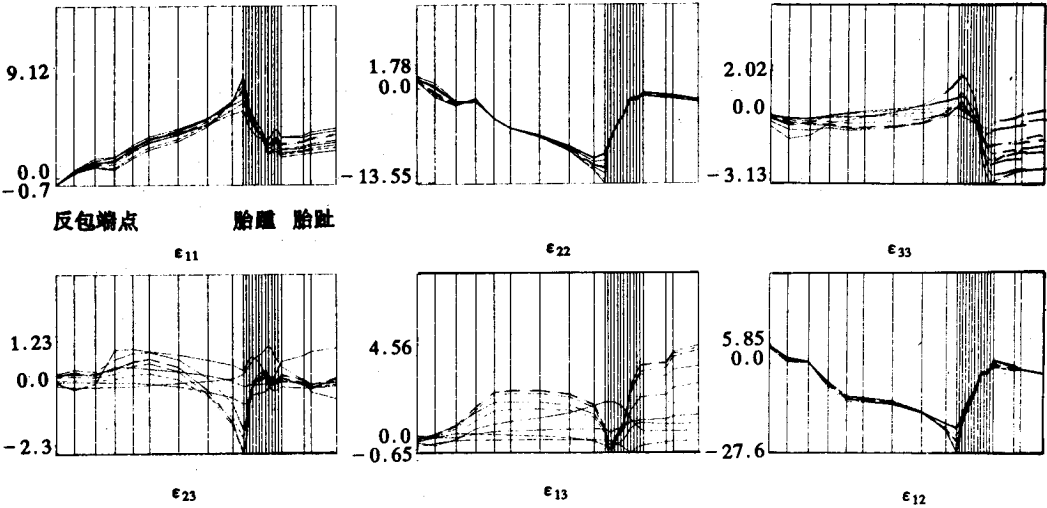


图 11 胎体反包层的应变(%)状态
注同图 6

2.4 全钢子午线轮胎胎肩脱层的机理分析

全钢子午线轮胎的脱层破坏主要发生在胎面胶和 0°带束层之间。通过三维有限元分析,重点研究了胎面胶和 0°带束层的等价应力和等价应变。

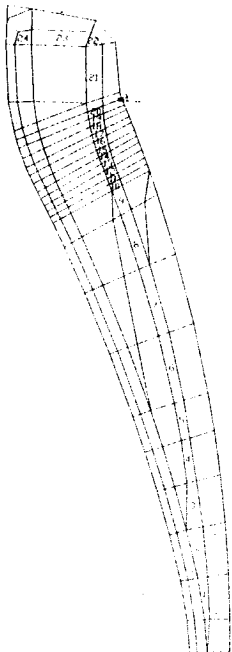


图 12 胎体反包层有限元模型中的单元分布

2.4.1 胎面胶的等价应力和等价应变

图 15 和 16 为胎面胶的等价应变和等价应力图。

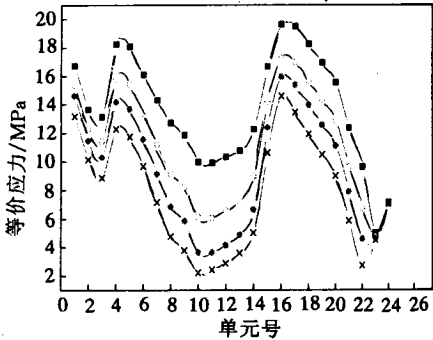


图 13 胎体反包层的等价应力
■—1 断面;○—11 断面;●—18 断面;×—20 断面

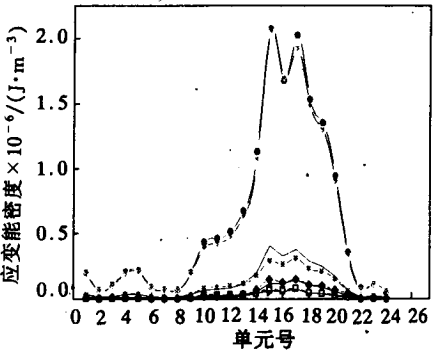


图 14 胎体反包层的应变能密度
■—1 断面;□—4 断面;·—7 断面;无—11 断面;▼—17 断面;
●—18 断面;◆—19 断面;×—20 断面

由图 15 和 16 可见,胎面胶的第 9~12 单元(参照图 17)在第 20 断面(接地断面)上具有较大的等价应力和等价应变,这个部位正好位

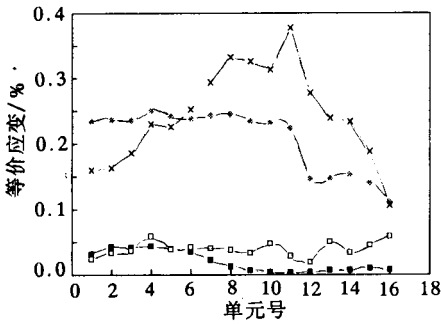


图 15 胎面胶的等价应变

■—1 断面；□—11 断面；●—18 断面；×—20 断面

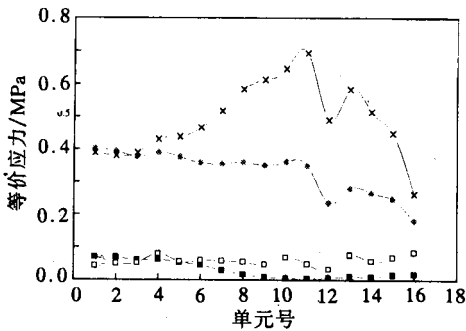


图 16 胎面胶的等价应力

注同图 15

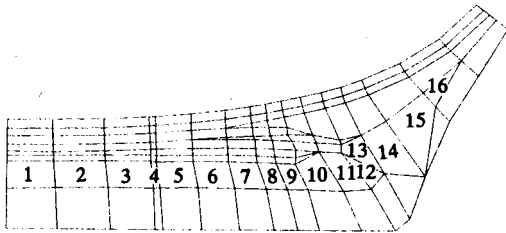


图 17 载荷状态下接地断面(局部)

于 0°带束层的端部,说明在这个部位出现应力和应变集中,容易发生破坏。

2.4.2 第 2 层 0°带束层的等价应变和应力

图 18 和 19 分别为第 2 层 0°带束层的等价应变和应力图。

由图 18 可见,第 5 和 6 单元的等价应变最大,其中第 5 单元的材料是钢丝,第 6 单元的材料是胎面胶。第 6 单元的等价应力比较小,这是因为胎面胶的模量比较小。从图 19 来看,第 5 和第 6 单元位于带束层端部,说明在这个部位材料有较大的应变集中,在周期载荷作用下材料容易出现疲劳裂纹。

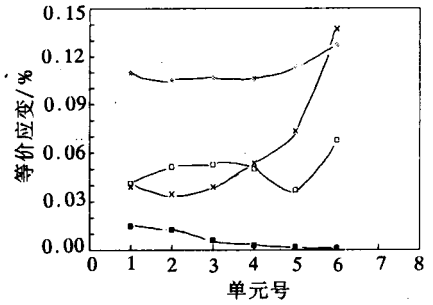


图 18 第 2 层 0°带束层的等价应变

注同图 15

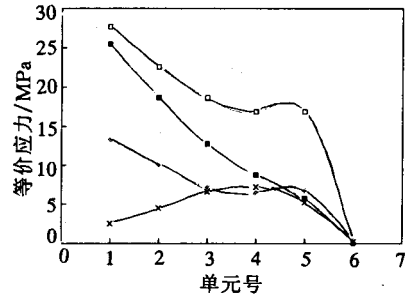


图 19 第 2 层 0°带束层的等价应力

注同图 15

3 结论

由上面的分析可知,轻载子午线轮胎胎圈与轮辋的接触部位(胎圈包布、胎体反包层)受到轮辋较大的挤压作用,有比较大的应变和应力,在轮胎的转动过程中该部位将产生较大的能量损失,损失的能量部分转化为热量使温度升高,导致材料力学性能下降,如模量、断裂强度和粘合力下降。Stephen Bobo^[2]研究了登录普公司的轮胎数据认为,橡胶基体的粘合力下降到 50% 时轮胎发生脱层。另一部分损失的能量积累起来, Y S Hung 和 O H Yeoth^[3]认为,轮胎内部积累的机械能超过一定的值,即橡胶材料开始出现裂纹的临界值时,材料内部开始产生裂纹,裂纹再进一步吸收能量进行扩展,最后引起轮胎的脱层破坏。

轻载子午线轮胎在耐久试验后主要有 3 种脱层模式,其发生脱层的部位正是剪切应变、剪切应力、等价应变、等价应力和应变能密度比较大的部位。要提高轮胎的耐久性,一方面要减

(下转第 603 页)

(上接第 601 页)

小这些部位的应力应变, 另一方面还要研究橡胶材料的疲劳行为, 提高橡胶材料裂纹扩展的临界应变能释放率。

参考文献:

[1] Eskinazi J D, Ishihara K, Vokl H, *et al.* Towards predicting

relative belt edge endurance method[J]. Tire Science and Technology, 1990, 18(4):216-235.

[2] Tephen B N. Fatigue life of aircraft tires[J]. Tire Science and Technology, 1998, 26(4):208-222.

[3] Huang Y S, Yeoh O H. Crack initiation and propagation in model cord-rubber composites[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1989, 62(9):709-731.

第 11 届全国轮胎技术研讨会论文

Analysis of failure pattern and mechanism for radial tire in endurance test with FEA

FENG Xi-jin¹, TAN Hui-feng¹, DU Xing-wen¹, SHAN Guo-ling², WANG Chuan-zhu²

(1. Haerbin University of Technology, Haerbin 150001, China; 2. Triangle Group Co. Ltd., Weihai 264200, China)

Abstract: Based on the analysis of the failed cross-sections for radial tires in many sizes after endurance test, the failure pattern of radial tire in endurance test has been summarized. The mechanism of shoulder and bead separations is primarily analysed in terms of the maximum shear strain, equal value stress, equal value strain and strain energy density with a 3D non-linear FEA analysis software special for tire developed by Haerbin University of Technology, and the potential measures for improving the tire endurance are proposed.

Keywords: radial tire; separation; fatigue; strain energy density; equal value stress; equal value strain; FEA