

子午线轮胎有限元分析

第 7 讲 子午线轮胎有限元静态分析实例

洪宗跃, 吴桂忠

(北京橡胶工业研究设计院, 北京 100039)

中图分类号: U463.341⁺.6; O241.82

文献标识码: E

文章编号: 1006-8171(2006)04-0247-07

1 有限元模型建立

子午线轮胎主要包括胎面、胎肩、胎侧、胎体、带束层和胎圈等部件。胎侧、胎面和三角胶等使用硬度各不相同的纯胶料;胎体、带束层、胎圈包布和钢丝圈是帘线-橡胶复合材料。以 10.00R20 子午线轮胎为例进行分析,其子午面和材料分布如图 1 所示。

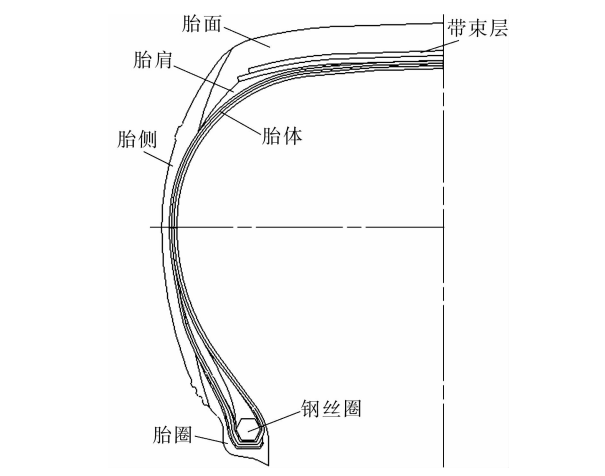


图 1 轮胎子午面和材料分布示意

1.1 网格划分

在 MARC 软件中调入 10.00R20 轮胎的材料分布图,划分网格,得到轮胎 1/2 子午面网格模型,如图 2(a)所示。为精确分析接触区域的应力-应变场,对可能接触的胎圈区域进行了网格细分,由平面网格旋转拉伸生成 1/4 三维模型,如图 2(b)所示,并且接地部分的网格划分得更细。

1.2 材料模型

胎面胶、胎肩胶、胎侧胶、气密层胶、胎圈护胶和三角胶采用 Mooney-Rivlin 非线性弹性材料模

型;带束层、胎体、钢丝圈和胎圈包布采用加强筋模型,对橡胶基体和帘线分别定义,橡胶基体采用 Mooney-Rivlin 模型,帘线采用线弹性模型。

Mooney-Rivlin 模型为

$$W = C_{10}(I_1 - 1) + C_{01}(I_2 - 1)$$

加强筋模型是将加强筋部分和基体部分分别由加强筋单元和实体单元来表示,即在基体单元中包括一层或更多层不同方向的增强帘线,如图 3 所示。加强筋单元是与其它实体单元(填充物或基体)结合起来使用的,用来表示一种增强了的物质,如钢筋混凝土结构。增强部分和基体部分分别由加强筋单元和实体单元来表示,但实体单元和加强筋单元采用相同的节点,因此没有引入附加的自由度。加强筋单元可以用来描述加强筋的小应变和大应变状态,任何材料性质都可以用到加强筋单元上。利用加强筋模型可以将基体和加强筋分别用不同的本构关系来描述,试验得到的组分材料材料参数可以直接用到分析中,并且基体和加强筋的应力状态可以分别得到。因此加强筋模型对于帘线-橡胶复合材料的几何和物理非线性分析非常有效。

加强筋材料的定义需要输入加强筋的材料性质、加强筋层的参考面或边(单元的面或边)、加强筋方向的参考轴以及加强筋偏离参考轴的角度、加强筋层的相对位置、单根加强筋的横截面积、单位长度加强筋的根数。针对不同问题,选择不同的加强筋单元,加强筋方向定义如图 4 所示,20 节点加强筋单元如图 5 所示。

模型中各部位胶料的材料参数如表 1 所示,各部位加强筋的材料参数如表 2 所示。

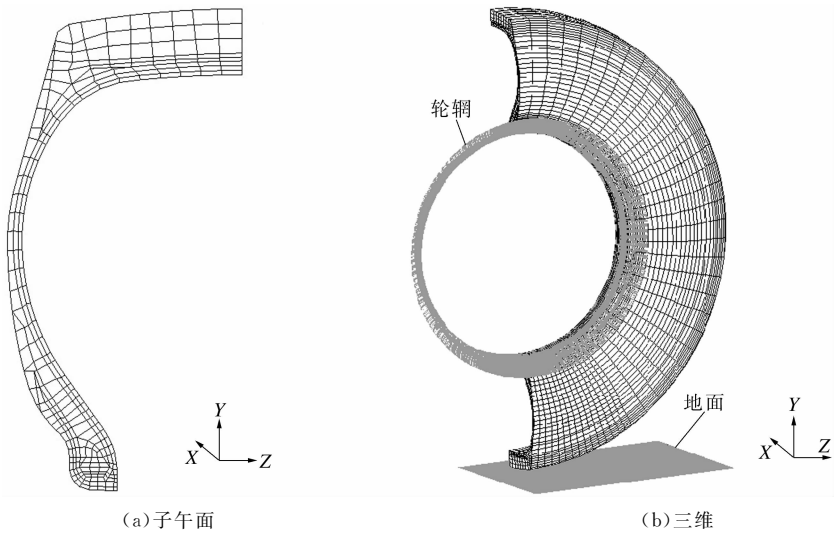


图 2 有限元网格划分

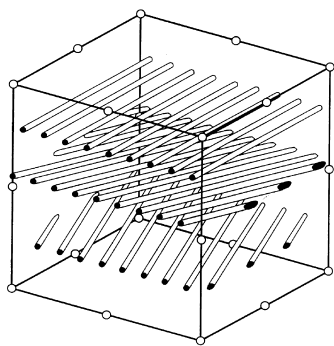


图 3 加强筋单元模拟增强帘线层

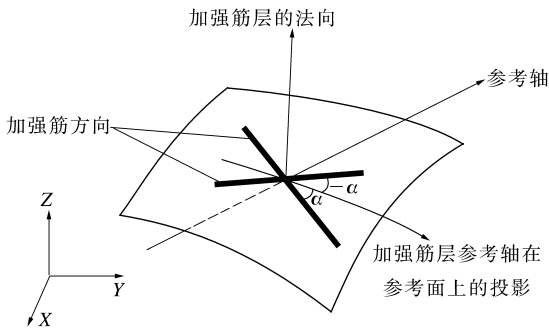
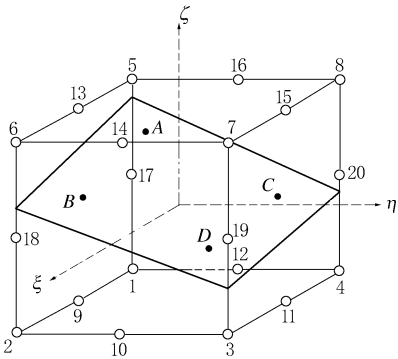
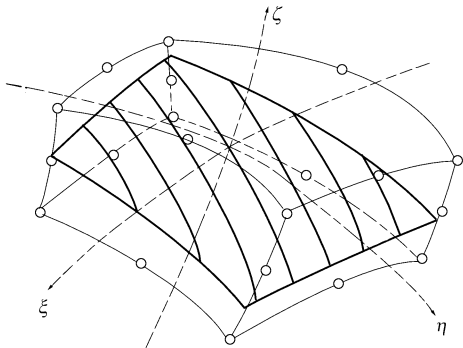


图 4 加强筋方向的定义



(a) 母单元



(b) 映像

图 5 典型的 20 节点加强筋单元

表 1 橡胶材料的 Mooney-Rivlin 模型参数 MPa

材料部位	C_{10}	C_{01}	材料部位	C_{10}	C_{01}
1	0.198 1	0.316 5	8	0.348 9	0.155 3
2	0.574 1	0.471 6	9	0.318 9	0.124 6
3	0.574 1	0.471 6	10	0.577 5	0.259 5
4	0.574 1	0.471 6	11	0.273 3	0.757 9
5	0.574 1	0.471 6	12	0.198 1	0.316 5
6	0.273 3	0.757 9	13	0.293 1	1.944 1
7	0.273 3	0.757 9			

表 2 加强筋材料参数

材料部位	E_c/MPa	μ_c	材料部位	E_c/MPa	μ_c
1	136 955	0.3	5	70 494	0.3
2	121 365	0.3	6	136 955	0.3
3	121 365	0.3	7	210 000	0.3
4	95 439	0.3			

1.3 单元模型

单元三维模型采用8节点实体单元,有17 010个单元14 674个节点。为了解决橡胶材料的不可压缩性,橡胶材料单元采用基于Herrmann公式的不可压缩单元,其中心点增加了静水压自由度;加强筋材料采用相应的加强筋单元。

1.4 边界条件

模型中考虑了轮胎与轮辋、轮胎与路面的接触边界条件以及对称边界条件,这里通过直接约束法来解决接触问题。将轮辋和路面定义为刚体,给定轮辋沿轴向的位移和路面移向轴心的位移,将可能与轮辋、路面发生接触的单元定义为可变形体。

1.5 载荷工况

对模型先后施加下述3种载荷:

(1)轮辋定位载荷:通过轮辋沿轴向(X方向)的位移来实现;

(2)充气压力:施加在轮胎的内表面;

(3)静负荷:通过路面相对于轮胎轴心的下沉量来实现。

本研究模拟的试验条件:充气压力为0.81 MPa、静负荷为3 000 kg(对应路面的下沉量为33 mm),静负荷是充气后加上去的,即路面的下沉量是从轮胎充气后的位置计算的。

该模型采用了全拉格朗日格式的增量方法来处理轮胎的大变形几何非线性,并考虑了随动载荷。

2 模型处理和计算分析

2.1 模型特殊处理

(1)轮辋与胎圈的过盈配合

轮辋与胎圈是过盈配合,考虑到轮辋定位后的实际位置与定位前的胎圈是相交的,本模型先将轮辋沿轮胎轴线移动-40 mm,使轮辋与胎圈有一定间隙,再给轮辋定义一个沿轴向的位移(40 mm),通过定义接触边界条件来真实地模拟轮辋与胎圈的配合。

(2)下沉量的模拟

试验中的下沉量是从轮胎充气后的胎面位置开始计算的,即充气过程中路面对轮胎没有约束,由于预先不知道充气后胎面的位置,为了真实地

模拟试验,本模型将路面从胎面的初始位置沿径向向外移动10 mm(大于估计的胎面径向位移量),保证充气过程中路面对轮胎没有约束。分析包括下述两个计算过程。

过程1:首先计算轮辋定位→充气过程,最大充气压力为1 MPa,将轮辋定位载荷、充气压力以1:4的时间比例分步加载,该计算过程分为250步,同时生成重启动文件(每50步记录一次),从而可以确定路面与充气后轮胎胎面之间的间距(d_1)。

过程2:以过程1中充气压力为0.75 MPa(第200步)的计算结果为基础,先将充气压力增加到0.81 MPa,再使路面沿径向移动 d_1 ,即将路面移动到充气后胎面位置,最后将路面沿径向再移动40 mm(下沉量),这3个阶段以1:1:4的时间比例完成,该计算过程分为60步,即从第200步到第260步,则第253步对应的下沉量为33 mm。

按照上述分析过程,还可得到不同下沉量时充气压力与路面反力(对应静负荷)间的关系。

2.2 计算结果分析

2.2.1 整体分析

图6示出胎面位移随充气压力的变化关系。从图6可以看出,充气开始阶段胎面位移有波动,随着充气压力增大,胎面位移量增大,且与充气压力基本呈线性关系。

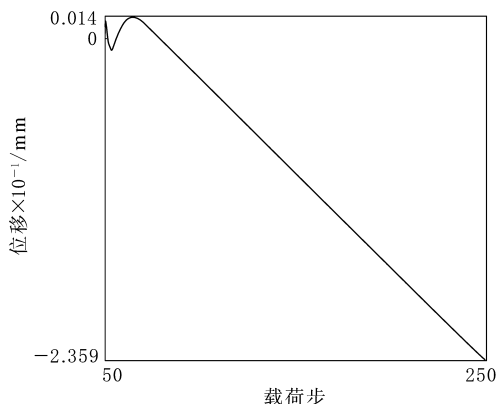


图6 胎面位移随充气压力的变化

图7示出不同阶段轮胎的整体变形情况,图8示出不同阶段轮胎接地区域子午面的变形及等效Cauchy应力分布情况。从图7和8可以看出,轮辋定位后,胎圈部位向内收缩;充气后轮辋和胎

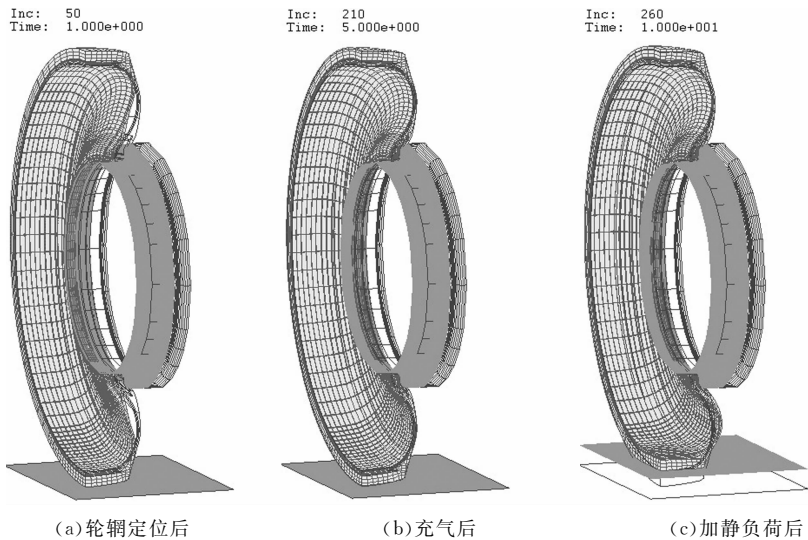


图 7 不同阶段轮胎的变形

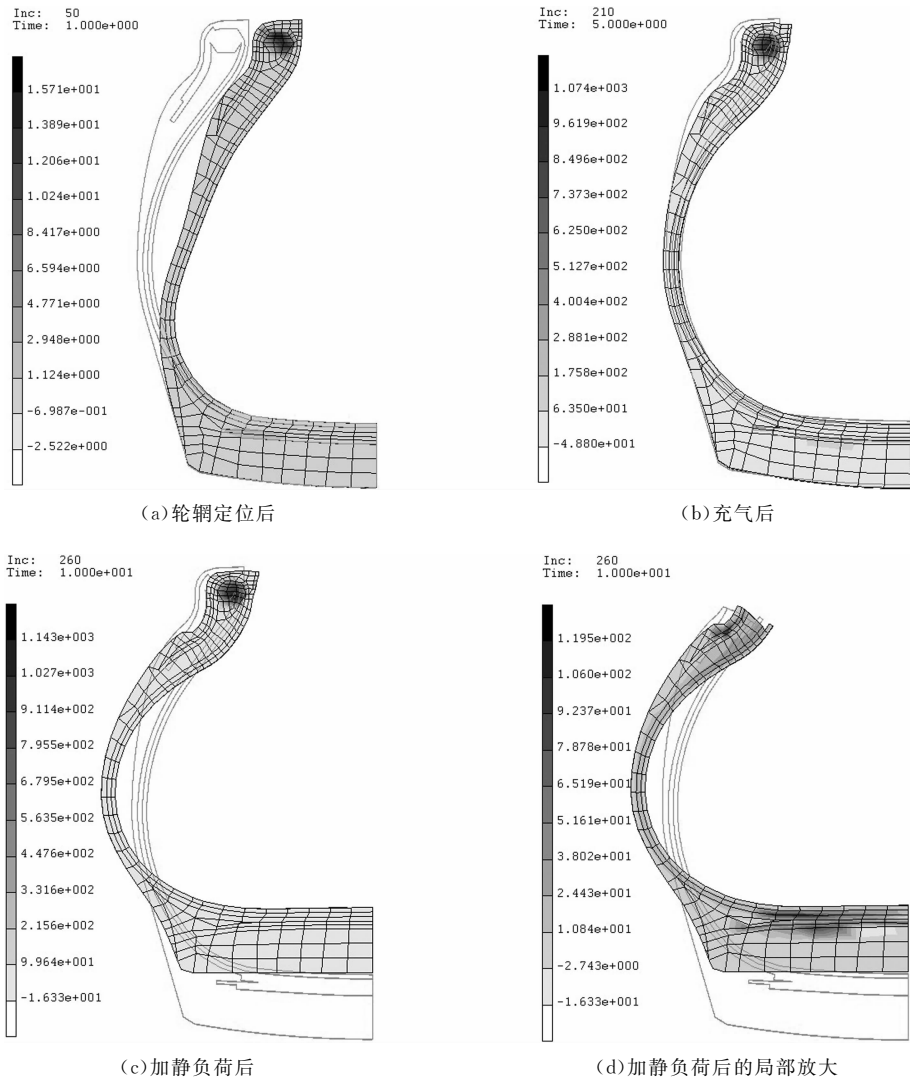


图 8 轮胎接地区域子午面变形和等效 Cauchy 应力分布

圈配合紧密,轮胎整体向外膨胀;加静负荷后,接地部位受路面的压缩,胎面上升,胎侧向外膨胀,轮胎在垂直方向(即 Y 方向)的位移有所增大。从图 8 还可以看出,应力主要集中在钢丝圈上,其次是带束层边缘以及胎圈包布末端,胎圈和胎面脱层为轮胎的主要破坏形式,这与实际情况相符。

图 9 示出远离接地地区胎面的中心点(节点 447)和接地地区的胎面中心点(节点 4 412)沿径向(Y 方向)位移与载荷步(时间)的变化趋势。从图 9 可以看出,充气阶段 2 个节点的位移基本是等大反向;加静负荷后,接地地区中心点的位移远大于远离接地地区中心点的位移。

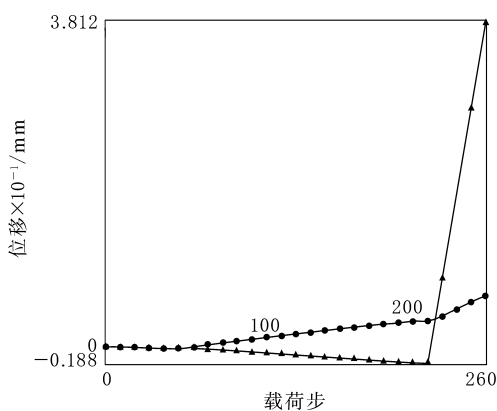


图 9 胎面中心点径向位移随载荷步的变化

●—节点 447; ▲—节点 4 412。

图 10 示出远离接地地区胎侧某一点(节点 399)和接地地区胎侧某一点(节点 4 076)沿轴向(X 方向)位移随载荷步(时间)的变化趋势。从图 10 可以看出,充气阶段 2 个节点的位移基本是等值的;加静负荷后,接地地区胎侧点的位移远大于远离接地地区胎侧点的位移。

2.2.2 接地区域分析

图 11 示出第 260 步(垂直载荷加载完毕)时轮胎接地区域的垂直位移及变形情况。从图 11 可以看出,垂直位移主要集中在与地面接触的节点上,即图中所示深色部分。

图 12(a)~(d)分别示出第 230 步(下沉量 10 mm)、第 240 步(下沉量 20 mm)、第 250 步(下沉量 30 mm)和第 260 步(下沉量 40 mm)时接地地区接触压力的分布情况。从图 12 可以看出,随着下沉量的增大,接地区域扩大,接触压力增大,并且接地区域近似为 1/4 椭圆形。

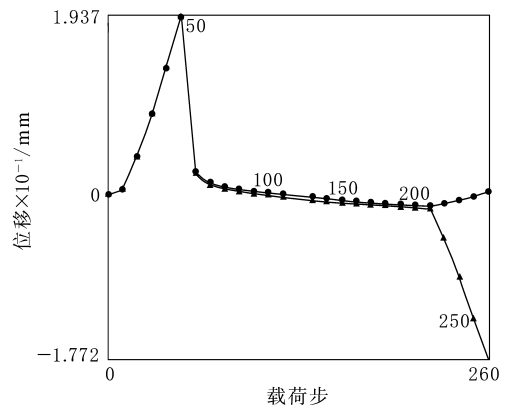


图 10 胎侧轴向位移随载荷步的变化

●—节点 399; ▲—节点 4 076。

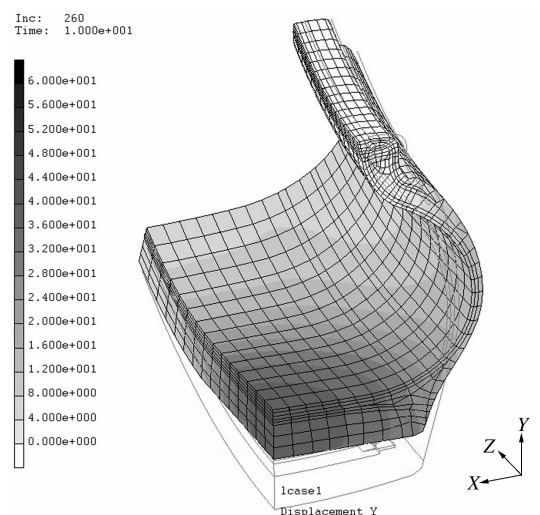


图 11 轮胎接地区域垂直位移及变形

图 13 示出下沉量为 40 mm 时接地地区沿横轴(轴向)、纵轴(周向)的接触压力分布情况。

图 14 示出路面接触反力随下沉量的变化情况。从图 14 可以看出,随着下沉量增大,接触反力增大,并与下沉量近似呈线性关系。

另外,还分析了充气压力对路面接触反力的影响,图 15 示出下沉量一定时路面接触反力与充气压力的关系。从图 15 可以看出,一定下沉量下,随着充气压力提高,路面接触反力增大,并且两者基本呈线性关系。

2.2.3 计算值与试验结果对比

充气轮胎主要尺寸的计算值与实测结果对比如表 3 所示,静负荷下轮胎主要尺寸的计算值与实测结果对比如表 4 所示,图 16 示出第 253 步(下沉量 33 mm)时的接地地区,其计算值与试验结

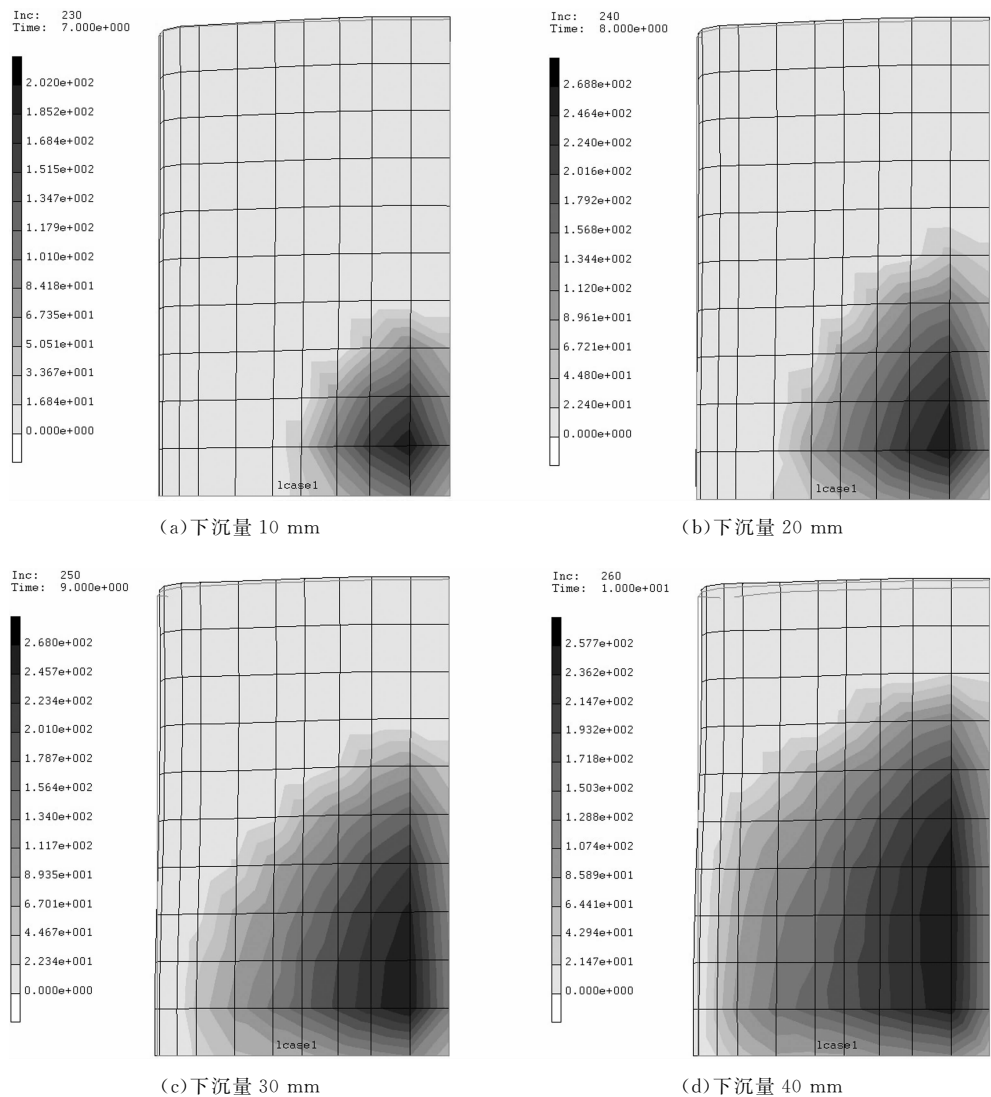


图 12 不同下沉量下接触压力分布

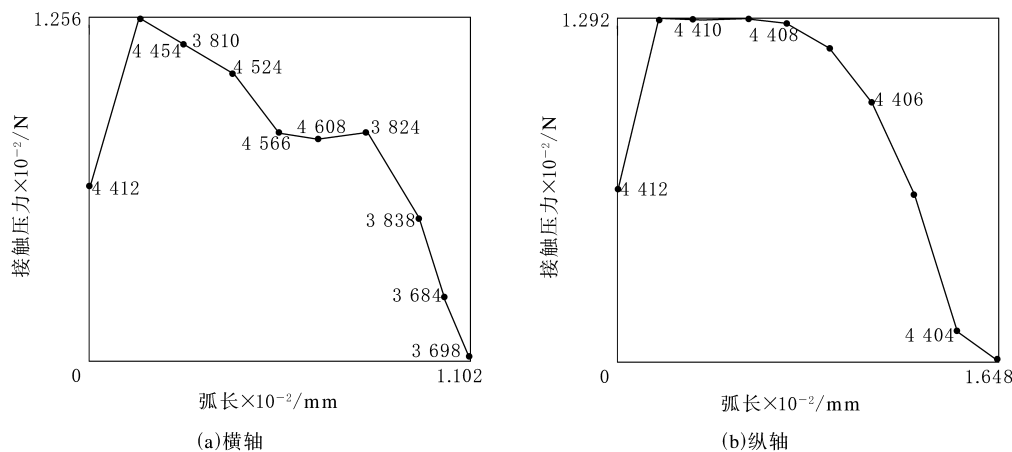


图 13 40 mm 下沉量下接地区接触压力分布

果的对比如表 5 所示。从表 3~5 可以看出,计算 值与试验结果是比较吻合的。

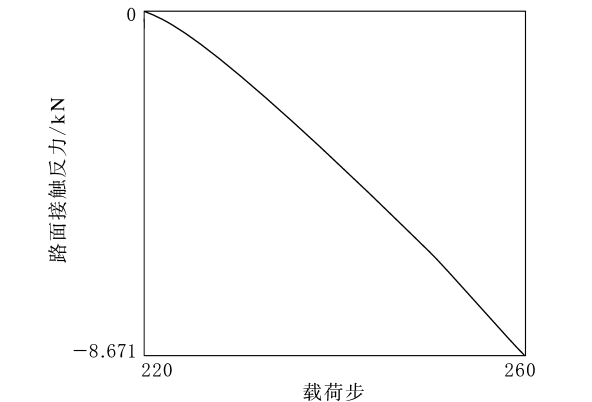


图 14 路面接触反力随下沉量的变化

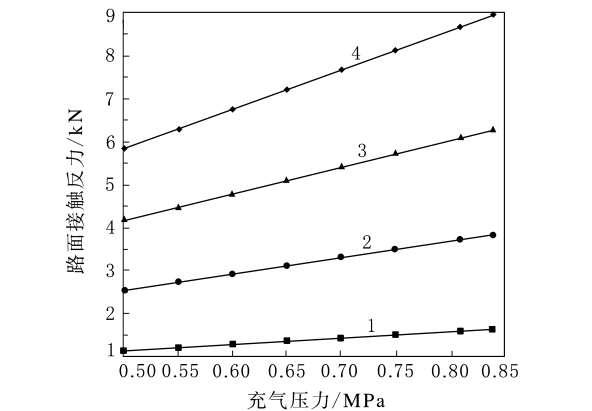


图 15 一定下沉量下路面接触反力与充气压力的关系
下沉量(mm):1—10;2—20;3—30;4—40。

表 3 充气后轮胎尺寸计算值与试验结果对比 mm

项 目	计算	实测	标准
外直径	1 053.95	1 052.55	1 053±5.27
断面宽	278.73	269.00	272±1.36
断面高	269.30	270.00	
胎肩宽	209.99	209.00	

3 结语

通过建立子午线轮胎的三维非线性有限元模型,模拟轮胎的轮辋装配→充气→加垂直载荷的过程。在模型中考虑了橡胶材料的非线性和不可

表 4 静负荷(下沉量 33 mm)下轮胎尺寸
计算值与实测结果对比

项 目	计算	实测
静半径	491.50	493.00
断面宽	305.25	298.00
断面高	236.30	239.00

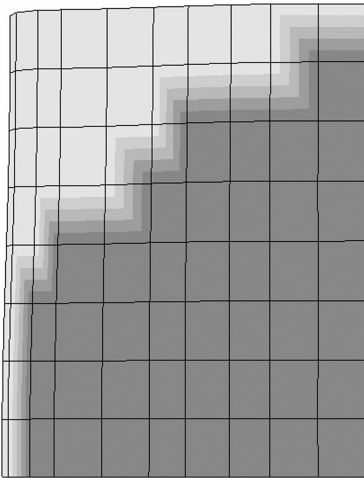


图 16 下沉量为 33 mm 时的接地区

表 5 轮胎接地区的计算值与实测结果对比
(下沉量 33 mm)

项 目	计算	实测
路面接触反力/kN	27.3	29.4
印痕面积/cm ²	515.93	518.00
纵坐标长/cm	28.9	26.1
横坐标长/cm	20.4	20.3

压缩性、帘线-橡胶复合材料的各向异性、轮胎大变形的几何非线性以及轮胎与轮辋、轮胎与路面的非线性接触边界条件。研究了轮胎整体和接地区的变形、应力-应变分布、接触区的印痕和地面接触反力,并将有限元计算值与试验结果进行对比。结果表明,该模型是合理的。轮胎与路面之间无摩擦静态正接触的分析成功为进一步进行轮胎动态分析和结构优化设计奠定了基础。

欧洲将禁用铅配重块

中图分类号:U463.345;TQ336.1 文献标识码:D
英国《轮胎与配件》2005 年 7 期 28 页报道:轿车或轻型载重车上将正式禁用铅配重块。尽管对到期车辆法令可能产生的负面影响议论纷纷,但整个欧洲轮胎行业似乎已经适应了这一新

形势,没有遇到任何重大困难。但是新的市场条件已经对生产商和销售商产生了影响。涉及到的所有各方都在加快研究从配重铅块改为替代材料时必须考虑的问题是什么。《轮胎与配件》研究了该法规的影响以及欧洲大陆各公司需要采取的步骤。