

复杂花纹子午线轮胎水滑特性仿真研究

王长建, 臧孟炎

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:基于 LS-DYNA 非线性有限元分析软件, 建立具有复杂胎面花纹的 175/65R14 子午线轮胎三维有限元模型。通过轮胎径向刚度试验验证所建轮胎有限元模型的有效性, 并在此基础上构造轮胎水滑仿真分析模型。使用 ALE 算法处理轮胎与水流间的流固耦合关系, 仿真分析轮胎从静止到水滑现象产生的全过程, 获得的轮胎临界水滑速度与经验公式的计算结果具有较好的一致性。3 种不同花纹轮胎水滑速度仿真结果在趋势上与预期一致, 进一步说明了有限元方法对轮胎水滑特性仿真评价的有效性。

关键词:子午线轮胎; 水滑特性; 临界水滑速度; 有限元分析

中图分类号: TQ463.341⁺.6; Q241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2011)10-0620-06

轮胎是汽车的重要组成部分, 同时也是汽车与地面直接接触的唯一有效部件。因此, 轮胎性能严重影响车辆的行驶安全。

P. V. Hight 等^[1]指出, 汽车引发的交通事故在雨天比正常情况下高得多, 主要原因有以下 2 个: 一是轮胎与路面的附着系数下降, 二是由于水滑现象的产生。众所周知, 胎面花纹形式影响轮胎排水效果, 从而直接影响轮胎的水滑性能。随着商业有限元分析软件的不断完善和计算机的飞速发展, 在设计阶段通过仿真方法评价轮胎的水滑性能既非常迫切也已成为可能。H. Grogger 等^[2]使用 FEM/FVM 方法对光面轮胎模型进行了分析, 得到了轮胎周围流体的压力场。T. Okano 等^[3]使用 DYTRAN 软件对光面轮胎、纵向花纹轮胎、V 型胎面花纹轮胎和实际花纹轮胎进行了水滑分析, 得出了轮胎的临界水滑速度。J. R. Cho 等^[4]利用自编程序对比了纵向花纹轮胎和真实花纹轮胎的水滑性能, 并分析了轮胎滚动速度对轮胎-地面间法向接触力的影响。S. T. Jenq 等^[5]使用 LS-DYNA 软件对光面轮胎和纵向花纹轮胎进行分析, 得出 2 种花纹轮胎的临界水滑速度, 并比较了 3 种水膜厚度下轮胎的水滑性能。

基于 LS-DYNA 非线性有限元分析软件, 本

研究建立了具有复杂胎面花纹的 175/65R14 子午线轮胎三维有限元模型。通过轮胎径向刚度试验检验所建模型的有效性, 并在此基础上构造轮胎水滑仿真模型, 分析轮胎从静止到水滑现象产生的全过程, 并获得临界水滑速度。

1 复杂胎面花纹轮胎模型的建立

1.1 网格划分

本研究基于 175/65R14 子午线轮胎, 使用 AutoCAD 建立轮胎主体部分的二维几何模型并使用 UG 软件建立胎面花纹的三维几何模型。

复杂胎面花纹轮胎网格划分过程如图 1 所示。对于复杂胎面花纹轮胎, 难以将轮胎主体与胎面花纹共节点建模。因此, 本研究先在 Hypermesh 软件中对二维截面模型划分网格, 并通过该软件中的旋转功能旋转一周得到三维轮胎主体网格, 同时对三维胎面花纹进行网格划分, 最后将两者固连在一起。

由于 LS-DYNA 软件没有描述钢丝帘线等的 rebar 单元, 因此为表达轮胎冠带层及带束层等部位的各向异性特性, 在将基体橡胶材料划分为各向同性材料实体单元的同时, 在其表面添加一层与橡胶实体单元共节点的壳单元, 并以正交各向异性材料定义。

1.2 轮胎的材料模型

轮胎结构的材料基本上可分为两类, 即纯橡

作者简介:王长建(1986—), 男, 福建福清人, 华南理工大学在读硕士研究生, 主要从事汽车整车及零部件安全仿真分析与应用研究。

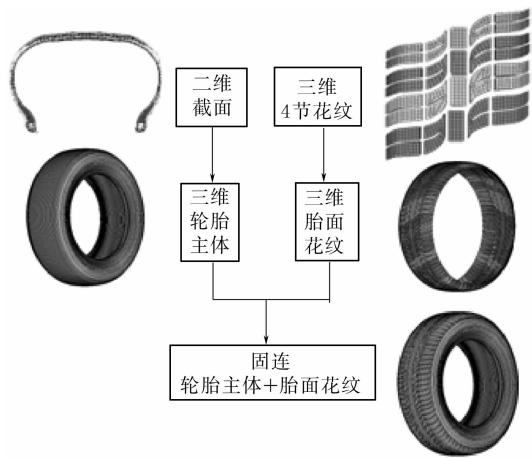


图 1 复杂胎面花纹轮胎网格划分过程

胶材料和橡胶-帘线复合材料。

1.2.1 橡胶材料模型的选用

橡胶材料属超弹性材料,具有近似体积不可压缩性和非线性本构关系,常用 Mooney-Rivlin 模型来描述。然而对轮胎进行水滑特性仿真分析时,相对轮胎结构中其他各部分,胎面花纹的材料与形状是影响轮胎水滑特性的最重要因素,为了提高计算效率,本研究除了胎面花纹采用 Mooney-Rivlin 超弹性材料外,其余各实体层橡胶均采用弹性材料。其中 Mooney-Rivlin 材料的应变能密度函数为

$$W = A(I_1 - 3) + B(I_2 - 3) \quad (1)$$

式中, W 为应变势能; I_1 和 I_2 为变形张量; A 和 B 为 Rivlin 常数。

根据橡胶单轴拉伸试验结果,通过 ABAQUS 软件拟合出 Mooney-Rivlin 模型的参数。利用 $G=2(A+B)$ 和 $E=6(A+B)$ 计算出除花纹外各实体层橡胶的泊松比与弹性模量。式中 G 和 E 分别为剪切模量和弹性模量, Rivlin 常数 A 和 B 均为正定常数^[6]。

1.2.2 橡胶-帘线复合材料模型的建立

轮胎中的胎体帘布层、带束层和冠带层由帘线-橡胶复合物构成,为各向异性,本研究采用复合壳单元来模拟,其材料类型在 LS-DYNA 软件中选用正交各向异性材料。相关材料参数由 Halpin-Tsai 方程式^[7]确定,其中橡胶材料与钢丝材料均认为是各向同性材料。

各层壳单元正交各向异性材料的材料主轴方向由单元坐标系来确定。实体单元坐标系与单元

节点位置关系如图 2 所示,假定主轴为 a 轴,节点 n_1 和 n_2 连线所指方向即为 a 轴方向,而 n_1 和 n_4 的连线则为 d , $c = a \times d$, 而 $b = c \times a$, 从而确定 a - b - c 局部坐标系。壳单元的单元坐标系与实体单元的单元坐标系的不同点在于:对于壳单元,材料的 c 方向总是垂直于壳单元平面,而 a 和 b 方向则位于壳单元平面内。然而,此 a - b - c 坐标系确定的材料主轴方向并非正交各向异性材料的最终方向,各层壳单元材料主轴方向的最终确定是由由此 a - b - c 坐标系绕 c 轴旋转 β 角而得来。 β 即各层壳单元定义的材料主轴方向与全局坐标系下各层钢丝方向之间的锐角(逆时针为正,顺时针为负)。

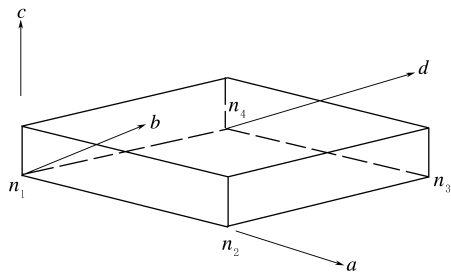


图 2 实体单元坐标系确定的材料主轴

为了检验正交各向异性材料壳单元模拟帘布层等各向异性特性的有效性,本研究比较了轮胎径向刚度的仿真与试验结果,如图 3 所示,二者有很好的一致性,说明模型中复合材料的模拟、橡胶材料模型的选用及轮胎的简化是可行的。

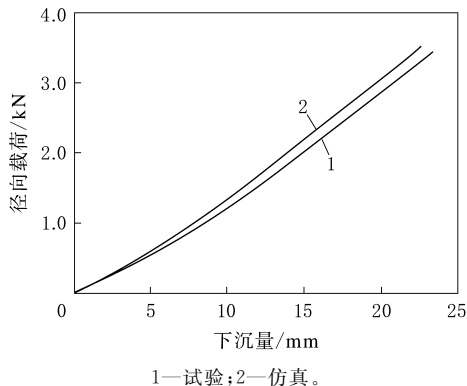


图 3 轮胎径向刚度曲线

2 复杂花纹子午线轮胎水滑分析

2.1 水滑模型的建立

2.1.1 流体模型

现实中,汽车在湿路面上行驶时,流体区域覆

盖了整个轮胎所滚过的纵向路面长度。为提高计算效率,本研究约束轮胎中心轴沿纵向路面方向的移动,让水流与路面以相同速度相对轮胎运动,通过轮胎与路面的摩擦使轮胎绕其中心轴转动。这种情况下,只需要在轮胎的正下方处建立流体模型,就可以大幅缩小模型规模,节省计算资源。

由于水流只能在空气层所包含的区域内流动,因此空气层区域越大,水流流动的可视范围也就越大。考虑计算效率,确定流体区域的大小为 $316\text{ mm} \times 246\text{ mm}$ 。在 LS-DYNA 软件中通过定义水膜欧拉实体单元的截面属性,使水流以水泵的形式按照设定速度的大小和方向源源不断地流出,包含水膜和空气单元在内的流体模型如图 4 所示,水膜厚度为 10 mm ,空气厚度为 20 mm 。为有效求解水膜与轮胎花纹间的流固耦合效果,在每个花纹沟槽宽度方向至少应有 2 个流体单元,因此将轮胎与流体接触区域的网格进行细化。

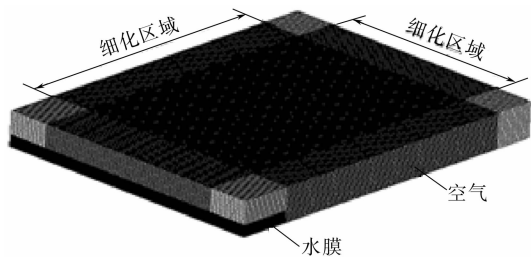


图4 流体有限元模型

2.1.2 流固耦合

在流固耦合分析时,结构与流体的网格可以重叠在一起,本研究中轮胎采用拉格朗日单元,而流体采用欧拉单元,两者之间的接触行为使用 ALE 算法中的罚函数约束法处理,如图 5 所示。

另外,在轮胎外表面定义一层共节点接触壳单元,以很好地解决流固耦合中流体渗漏的问题。

2.1.3 载荷及边界条件

轮胎水滑现象仿真加载过程如图 6 所示,横坐标为加载时间,纵坐标为工作任务。轮胎充气压力为 0.2 MPa , $1/4$ 车重为 3 kN ,水流与路面在 0.15 s 内同时从静止开始等加速到 $100\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,路面与轮胎间摩擦因数定义为 1.0 。

为了提高计算效率,在 $0 \sim 0.05\text{ s}$ 内利用 *DEFORMABLE_TO_RIGID_AUTOMATIC 功能将流体转为刚性体,之后再将其转为变形体。

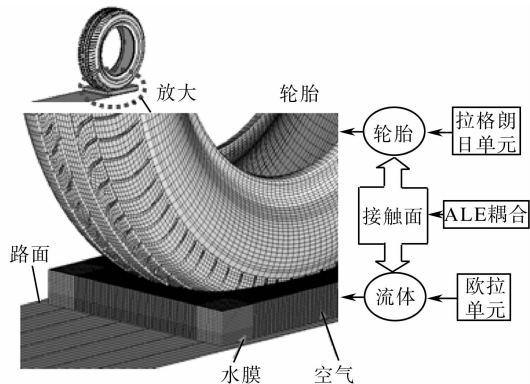


图5 流固耦合模型

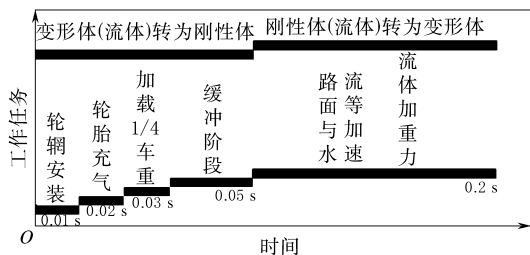


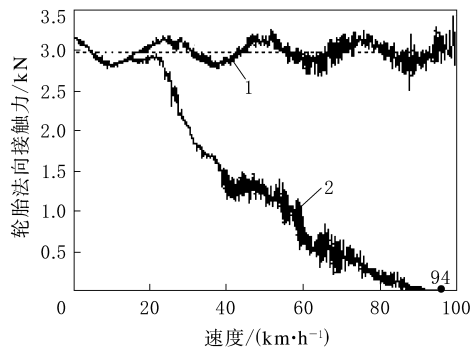
图6 轮胎载荷及边界条件加载示意

2.2 仿真结果分析

2.2.1 临界水滑速度

轮胎法向接触力与速度的关系曲线如图 7 所示。轮胎在干燥路面加速行驶时,法向接触力基本上在静态径向载荷附近小幅振动。当轮胎在有水路面加速行驶时,在水流时速低于 $20\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,法向接触力与干路面基本一致,这是由于仿真模型中水流尚未到达轮胎底部;当水流时速超过 $20\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 后,法向接触力随水流速度提高而急剧下降,这是由于水流进入轮胎与路面之间,水流的动压力不断增大而抬起轮胎所致;当水流时速达到 $94\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 后,法向接触力为零,说明水流动压力将轮胎完全抬起,该速度称为临界水滑速度。这一过程从图 8 所示的轮胎接地区域和水流分布与速度的关系可以得到验证。

水流速度为零时,轮胎尚未触及水流,仅与干路面接触,接地印痕如图 8(a) 所示;水流速度为 $20\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,水流进入轮胎与路面接触的前部区域,水流从横、纵花纹沟槽排出的同时,由于流体动压力的作用导致轮胎接地印痕面积缩小,如图 8(b) 所示;当水流加速到 $60\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,越来越多的水被挤入轮胎前部与路面接触的楔形区域



1—干路面;2—湿路面。

图 7 轮胎法向接触力与速度的关系曲线

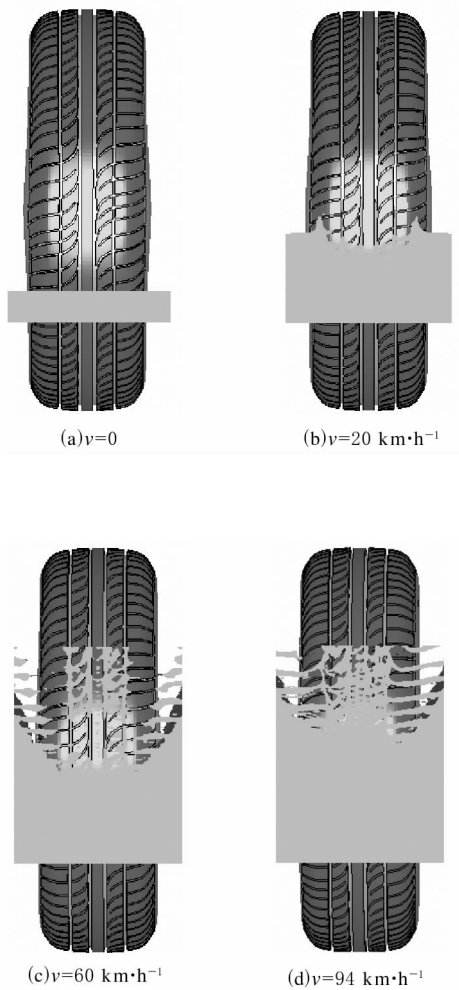


图 8 轮胎水滑过程示意

内,流体动压力变大,轮胎接地面积更小,如图 8 (c)所示;当水流速度增大到 $94 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,水流无法及时从花纹沟槽中排出,轮胎与路面的接触区域完全被水膜覆盖,轮胎与路面被水膜完全隔开,法向接触力为零,发生完全水滑现象,如图 8

(d)所示。

2.2.2 仿真与经验公式计算结果对比

由于国内还没有轮胎水滑特性试验设施,因此为了确认仿真分析的有效性,作为权宜之计,以临界水滑速度经验公式的预测结果与仿真结果进行比较。

1968 年 Horne 得到最小极限水上滑行速度计算公式^[8]:

$$v_p = 6.35p^{0.5} \quad (2)$$

式中, v_p 为临界水滑速度; p 为轮胎充气压力。

由于式(2)只适用于被水膜覆盖的路面,而对水膜相对较薄的情况, Dunlap 等在 1974 年根据试验结果提出了如下的水滑速度、胎面花纹深度和水膜厚度之间的关系式^[8]:

$$v_p = v_p^* + 12 \frac{D_T}{D_W} + 60 \exp\{-3[D_W - (3 + \frac{D_T}{T})]\} \quad (3)$$

式中, v_p^* 为由式(2)算出的水滑速度; D_T 为胎面花纹深度 ($1.6 \text{ mm} \leq D_T \leq 10 \text{ mm}$); D_W 为水膜厚度; T 为胎面宽度。

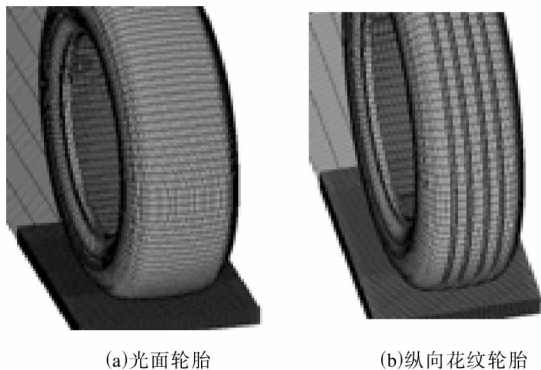
在轮胎充气压力 0.2 MPa 、水膜厚度 10 mm 、胎面花纹深度 8.2 mm 、胎面宽度 175 mm 条件下,由式(3)计算得到的轮胎临界水滑速度为 $99.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,仿真结果为 $94 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。理论计算值与仿真值的误差为 5.96% 。

由此可知,仿真结果与理论计算值有较好的一致性。

3 3 种不同花纹轮胎水滑速度比较

为进一步确认轮胎水滑特性仿真方法的有效性,本研究对与上述轮胎同规格的光面轮胎和纵向花纹轮胎(见图 9)进行了水滑过程仿真分析,并将 3 种不同花纹形式轮胎法向接触力与水流速度的关系曲线归纳于图 10。

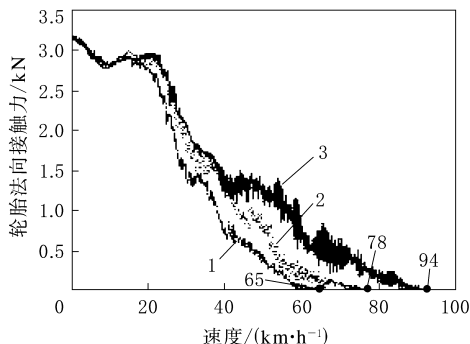
水流速度在 $0 \sim 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的区间内,3 种不同花纹形式轮胎法向接触力大小基本相同,如前所述,这是由于轮胎前端并未与水流接触所致;水流速度超过 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 后,光面轮胎的法向接触力明显小于纵向花纹轮胎和复杂花纹轮胎;水流速度超过 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 后,纵向花纹轮胎的法向接触力开始明显小于复杂花纹轮胎。光面、纵向



(a) 光面轮胎

(b) 纵向花纹轮胎

图9 光面和纵向花纹轮胎水滑模型



1—光面轮胎;2—纵向花纹轮胎;3—复杂花纹轮胎。

图10 不同花纹形式轮胎法向接触力
与水流速度的关系曲线

花纹和复杂花纹轮胎的临界水滑速度分别为 65, 78 和 94 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

轮胎法向接触力变化和临界水滑速度与 3 种轮胎的对应关系都与本研究的预测吻合。由此可见轮胎水滑特性仿真方法的有效性。

4 结语

本研究提出一种考虑复杂胎面花纹的轮胎有

限元建模和水滑分析方法,获得了从轮胎静止到水滑现象发生阶段轮胎和水流的变化情况以及水滑速度。通过临界水滑速度预测经验公式和不同花纹轮胎水滑特性的比较和评价,说明了这一仿真分析方法的有效性。轮胎水滑特性数值仿真方法的实现将为轮胎企业快速提高产品湿滑性能提供有益的帮助。

参考文献:

- [1] Hight P V, Wheller J B, Rust T J, et al. The Effects of Right Side Water Drag on Vehicle Dynamics and Accident Causation[Z]. SAE Special Publication, No. 900105.
- [2] Grogger H, Weiss M. Calculation of the Three Dimensional Free Surface Flow around an Automobile Tire[J]. Tire Science and Technology, 1996, 24(1): 39-49.
- [3] Okano T, Koishi M. A New Computational Procedure to Predict Transient Hydroplaning Performance of a Tire[J]. Tire Science and Technology, 2001, 29(1): 2-22.
- [4] Cho J R, Lee H W, Sohn J S, et al. Numerical Investigation of Hydroplaning Characteristics of Three-dimensional Patterned Tire[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, in Press, 2006(25): 914-926.
- [5] Jenq S T, Chiu Y S. Hydroplaning Analysis for Tire Rolling over Water Film with Various Thicknesses Using the LS-DYNA Fluid-Structure Interactive Scheme[J]. Computers Materials & Continua, 2009, 11(1): 33-58.
- [6] 王伟, 赵树高, 邓涛, 等. 子午线轮胎自由旋转的非线性有限元分析[J]. 橡胶工业, 2004, 51(8): 481-484.
- [7] Walter J D, Patel H P. Approximate Expressions for the Elastic Constants of Cord Rubber Laminates[J]. Rubber Chem. and Technol., 1979(52): 710-724.
- [8] 庄继德. 现代汽车轮胎技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001: 211-214.

收稿日期: 2011-04-08

Numerical Investigation of Hydroplaning Characteristics of Tire with 3D Complex Pattern

WANG Chang-jian, ZANG Meng-yan

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The detailed model for 175/65R14 radial tire with 3D complex pattern was constructed by LS-DYNA finite element analysis software. The model was validated with experimental data of radial stiffness and numerical model of hydroplaning was obtained based on it. Meanwhile, the fluid-structure coupling was characterized by the algorithm of ALE. Through the numerical analysis, the

whole tire hydroplaning phenomenon was simulated and critical hydroplaning speed was obtained, which was quite consistent with the theoretical value. Moreover, the effectiveness of model was further supported by comparison of hydroplaning speeds of tires with three different types of pattern.

Key words: radial tire; hydroplaning characteristics; critical hydroplaning speed; finite element analysis

风神股份认为绿色轮胎不该孤独

中图分类号: TQ336.1

文献标志码: D

继 2008 年出口欧盟市场的全钢载重子午线轮胎实现绿色制造后,从 2011 年 5 月开始,风神轮胎股份有限公司(以下简称风神股份)扩大了环保原材料的使用范围,将全球市场的全钢载重子午线轮胎全部切换为符合欧盟 REACH 法规的绿色环保产品,在国内轮胎行业率先实现内销和外销产品环保标准一致。2011 年 7 月 9 日,风神股份在河南省焦作市举办了风神绿色轮胎全球上市发布会。风神股份会上宣布,为提高用户对绿色环保产品的认知与接受能力,2011 年还将举办 100 多场路演和产品推介会,并承诺将所有配套轮胎升级为绿色环保产品。

“风神敢于担当、勇于实践,再领行业发展方向,但不能做绿色制造孤独的践行者。希望有越来越多的轮胎生产企业加入绿色轮胎制造行列。”风神股份总经理、党委书记王锋坦言。王锋呼吁,国家和社会、原材料和汽车生产企业都要关注绿色轮胎的发展。发展绿色产品既是企业的责任,也应是全社会的共识。只有加快轮胎产业升级,进而带动整个产业链实现绿色制造,才能推动我国从轮胎生产大国跨入轮胎强国之列。

轮胎绿色制造的推动起始于欧盟。欧盟 REACH 法规要求从 2010 年 1 月 1 日起,所有进入欧盟市场的轮胎中苯并芘等 8 种多环芳烃的总含量必须小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。出口欧盟的中国轮胎被迫执行这一标准。

含有多环芳烃的芳烃油是轮胎最常用的软化剂,它与橡胶充分混合,最终存留在轮胎中,轮胎在使用时会挥发苯类致癌物质。这些物质在离地面约 1 m 的空气中飘动,会对身高 1 m 左右的儿童造成直接危害,而司机也会受其影响,这些物质还会渗入土壤和水中,危害子孙后代,而社会对这

一点的认识却普遍不足。

风神股份全面推广绿色轮胎,目前国内还是“孤独者”,我国绿色轮胎的规模市场尚未形成。环保芳烃油多为进口产品,轮胎制造企业使用环保芳烃油,生产成本将大幅度提高。我国至今没有明确限制多环芳烃的使用,国内轮胎制造企业一般只在出口欧盟的产品中才使用环保芳烃油,在内销轮胎中仍使用普通芳烃油,造成了轮胎出口和内销两种标准。即使具备技术和资金实力的外资企业,在中国销售的轮胎也达不到 REACH 法规要求,这显然是对中国市场的一种歧视。王锋说:“欧盟在享受着我们生产的绿色轮胎,而国内却基本不用,这一点令人痛心。认识上的缺失是绿色轮胎不能形成市场气候的关键。在绿色轮胎推广中,最重要的因素是国家相关法律法规的确立和支持。没有硬性的法规,轮胎产品的升级就不可能提速,因为成本关难过。”

王锋提出以下几点建议:(1)政府相关部门尽快制定与国际接轨的绿色轮胎环保法规以及行业标准,从国家政策层面使绿色轮胎的发展有章可循;(2)基于推动轮胎产业升级换代的目的,国内轮胎企业也要尽快实现绿色制造,使我国由轮胎大国向轮胎强国进军,并让绿色轮胎的推广成为全社会共识;(3)发展绿色轮胎能带动一系列产业的升级换代,相关原材料产业有了提升的机遇,都要朝着绿色环保的方向努力,加快绿色环保原材料的研制步伐;(4)汽车行业也要逐渐适应国际轮胎发展的大趋势,加快绿色轮胎的使用,主机厂家应发挥示范引领作用,为整车配备绿色轮胎;(5)国家相关机构和媒体应为绿色轮胎“鼓”与“呼”,使全社会和广大消费者尽快认识、熟悉绿色轮胎,倡导绿色消费,为绿色轮胎的推广营造社会氛围。

(摘自《中国化工报》,2011-08-18)