芳纶纤维骨架轮胎的自由滚动数值模拟分析

谭　晶[1,2],吴　潇[1,2],刘肖英[1,2],张金云[1,2],杨卫民[1,2],安　瑛[1,2*]

(1.北京化工大学 机电工程学院,北京　100029;2.轮胎设计与制造工艺国家工程实验室,北京　100029)

摘要:以165/75R13和185/65R14两种常用规格轮胎为例,利用数值模拟法研究用芳纶替代钢丝作带束层或锦纶作冠带层骨架材料对高速自由滚动工况下轮胎力学性能的影响。结果表明:将芳纶用于带束层,在减小轮胎质量的同时不降低使用性能;芳纶冠带层轮胎在承载能力、耐久性和强度等方面与现有轮胎及芳纶带束层轮胎相比都有显著优势,且轮胎规格越大,芳纶冠带层对轮胎性能的改善效果越明显。

关键词:芳纶纤维;子午线轮胎;带束层;冠带层;自由滚动;有限元分析

中图分类号:U463.341^{+}.4/.6;O241.82　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1006-8171(2016)04-0199-06

骨架材料是保证轮胎强度、承受负荷以及保持轮胎尺寸稳定性的关键。随着轮胎向子午化、高速化及环保化发展[1],对骨架材料的强度、刚度、耐疲劳等性能提出了更高的要求。

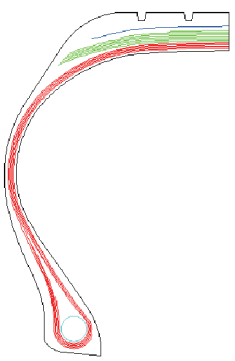
近年来,耐高温、高强度、高模量、变形小的芳纶纤维广泛应用于航空轮胎,相关研究表明芳纶骨架可以减小轮胎质量,降低滚动阻力,对轮胎的抗刺扎、抗切割性能有很大改善。欧美各大轮胎公司已利用芳纶替代钢丝作为高性能轿车轮胎带束层及载重子午线轮胎胎体和工程机械轮胎缓冲层的骨架材料,生产的轮胎质量小、滚动阻力低[2]。我国广州市华南橡胶轮胎有限公司和桦林佳通轮胎有限公司等企业也已将芳纶用作高性能轿车子午线轮胎的骨架材料[3-4]。试验结果直观地验证了芳纶帘线比传统骨架材料具有无可比拟的优势,但由于受试制轮胎型号、数量以及人为偶然因素的影响,试验结果无法系统地说明芳纶帘线的密度、强度及角度等参数对轮胎性能的影响规律。

本工作采用Abaqus有限元分析软件,以165/75R13和185/65R14两种常用规格轮胎为例,模拟分析用芳纶替代钢丝作带束层或锦纶作冠带层骨架材料对高速自由滚动工况下轮胎力学性能的影响,为开发新型高性能芳纶轮胎提供准确的理论基础和方向性指导。

1　轮胎有限元模型的建立和验证

1.1　模型建立

本研究拟采用芳纶替代现有轮胎的带束层或冠带层骨架材料进行对比分析,以设计出轻量化、高性能的新型轮胎。子午线轮胎骨架材料一般应用于胎体帘布层、带束层、冠带层和胎圈等,如图1所示。



—冠带层;—胎体;—带束层;—胎圈。

图1　子午线轮胎骨架结构示意

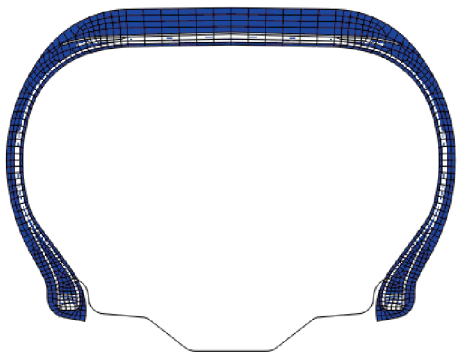
165/75R13和185/65R14轮胎的有限元模型如图2所示。

1.2　材料与试验工况

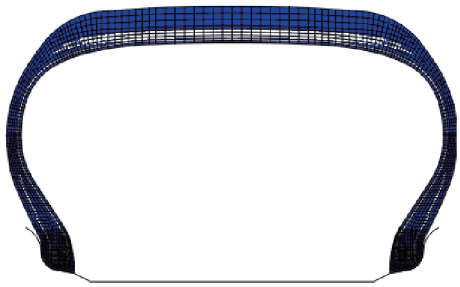
综合考虑性能和经济性,建立A,B和C型3种不同骨架材料的轮胎模型:A型轮胎为聚酯胎体、钢丝带束层、锦纶冠带层;B型轮胎为聚酯胎体、芳纶带束层、锦纶冠带层;C型轮胎为聚酯胎体、钢丝

作者简介:谭晶(1980—),女,黑龙江肇东人,北京化工大学讲师,博士,主要从事高分子材料成型加工及先进制造研究。

*通信联系人



(a) 165/75R13



(b) 185/65R14

图2 轮胎有限元模型

带束层、芳纶冠带层。

设定3种轮胎的三维有限元模型结构、负荷和边界条件等完全相同，研究B和C两种使用芳纶作为骨架材料的轮胎相对使用传统骨架材料的A型轮胎在力学性能上的优势。

本研究芳纶采用神马实业股份有限公司开发的1670dtex/2＋1400dtex/l 88EPD规格芳纶-锦纶复合帘线，该帘线的经向密度、帘线直径和断裂强度等参数指标均优于钢丝帘线。

汽车轮胎一般处于静止和匀速前进的状态，本研究在静负荷下验证模拟的可行性，进而对轮胎在自由滚动工况下的力学性能进行分析。轮胎静负荷工况为：充气压力 250 kPa，径向负荷4.5 kN。

自由滚动状态即轮胎处于纯滚动而没有滑动的状态。模拟轮胎自由滚动工况时，在静负荷工况的基础上对轮胎和轮辋施加自由滚动速度，设定的水平速度为200 km·h^{-1}。

1.3 模拟验证

为了确保所用模型及模拟分析方法的正确性，在充气压力250 kPa、径向负荷4.5 kN的条件下，对165/75R13和185/65R14轮胎进行静负荷模拟及试验。两种轮胎的刚度特性模拟和试验结果对比如表1所示。

表1 轮胎的刚度特性对比 N·mm^{-1}

项 目	模拟值	试验值	误差/%
165/75R13			
径向刚度	192.46	193.38	0.47
横向刚度	92.01	92.43	0.46
纵向刚度	177.96	178.38	0.23
185/65R14			
径向刚度	224.80	210.49	6.80
横向刚度	108.13	108.27	0.13
纵向刚度	183.15	192.07	4.64

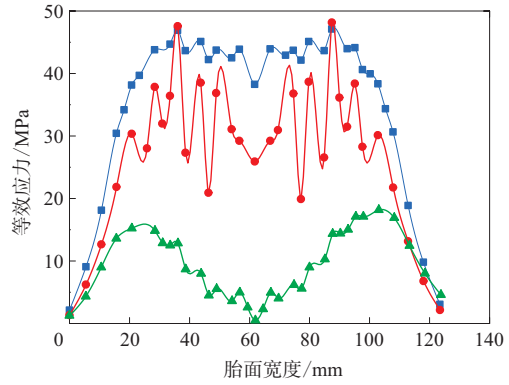
由表1可知，仿真结果与试验结果相差很小，满足工程要求，因此可用该模型和分析方法进行轮胎力学性能研究。

2 结果与讨论

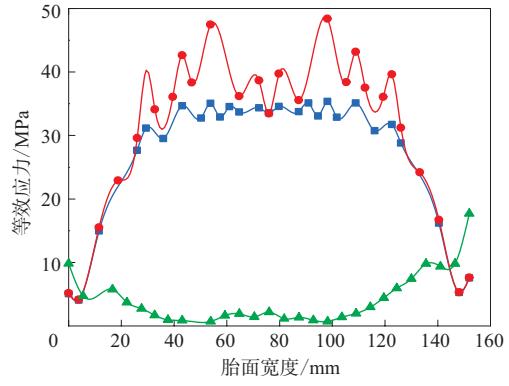
轮胎高速滚动时，带束层和冠带层作为承受负荷和保持轮胎外形的主要支撑部件[5]，承受高频周期性变化负荷，其承载能力、耐久性和强度等力学性能是轮胎高速行驶安全性的重要保障。对于子午线轮胎，带束层是箍紧胎体的主要部件，也起一定的缓冲作用。如果冠带层分担带束层的部分应力，则可降低带束层的等效应力，提高轮胎整体强度，减小变形，进而提高轮胎的耐疲劳和承载性能。耐久性试验中的破坏形式通常是带束层端点脱层、胎体反包端点脱层和胎肩脱层，因此带束层端点的受力分布是评价轮胎耐久性的重要指标，而中点应力沿周向的变化规律能反映带束层整体的应力分布，因此选取带束层端点和中点周向等效应力作为分析参数研究轮胎的耐久性。本研究通过分析轮胎带束层和冠带层的轴向等效应力及其中点和端点周向等效应力讨论高速自由滚动工况下轮胎的力学性能。

2.1 轴向等效应力

165/75R13和185/65R14两种规格轮胎带束层沿滚动轴线方向的等效应力分布如图3所示。165/75R13规格B型轮胎的等效应力最大值与A型轮胎非常接近，其余节点的等效应力明显小于A型轮胎；而C型轮胎的等效应力最大值仅为A型轮胎的1/3；其余各节点的等效应力均远小于A和B型轮胎。对于185/65R14规格，B型轮胎的等效应力大



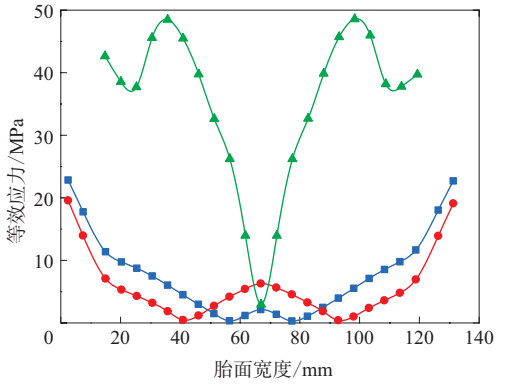
(a) 165/75R13



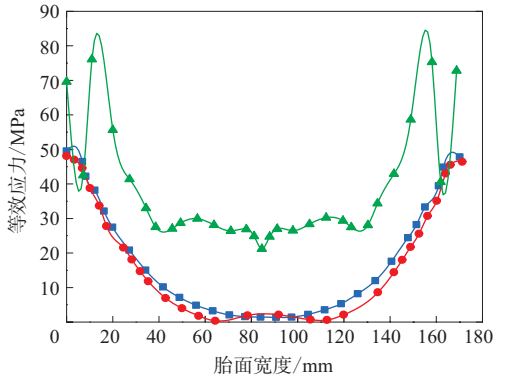
(b) 185/65R14

■—A型；●—B型；▲—C型。

图3　轮胎带束层轴向等效应力分布



(a) 165/75R13



(b) 185/65R14

注同图3。

图4　轮胎冠带层轴向等效应力分布

于A型轮胎，C型轮胎的大部分对应节点等效应力远小于A和B型轮胎。

165/75R13和185/65R14两种规格轮胎冠带层沿滚动轴线方向的等效应力分布如图4所示。A和B型轮胎的等效应力值相差很小；C型轮胎各节点的等效应力基本明显大于A型轮胎。

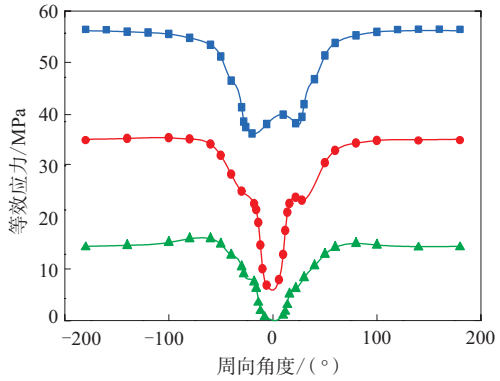
由此可见：芳纶用于轮胎带束层对冠带层轴向等效应力的影响并不明显；芳纶用于冠带层时，轮胎带束层等效应力大大降低，而冠带层等效应力上升明显。这表明用芳纶替代锦纶作冠带层骨架材料后，轮胎承载能力大大优于传统轮胎，这是因为传统轮胎和芳纶带束层轮胎的冠带层并不用于承载，而芳纶冠带层轮胎是冠带层和带束层同时作为主承载部件，因此轮胎的承载能力大大提高。另外，从图3和4可以看出，轮胎规格越大，等效应力改变幅度越大。

2.2　带束层周向等效应力

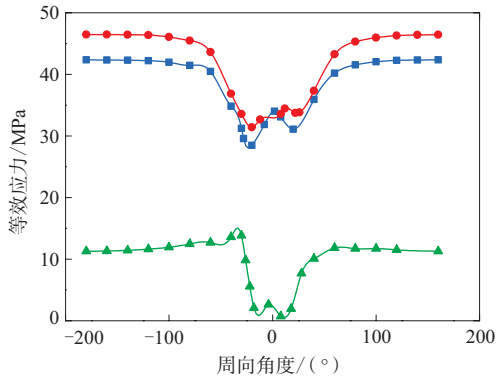
165/75R13和185/65R14两种规格轮胎带束层中点周向等效应力分布如图5所示。带束层在滚动工况下受拉伸应力，3种类型轮胎应力沿周向分布方式相似。l65/75R13规格A型轮胎的带束层等效应力最大，B型轮胎其次，C型轮胎最小。对于185/65R14规格，则是B型轮胎的带束层等效应力最大，其次是A型轮胎，C型轮胎最小。

由此可见，芳纶冠带层轮胎带束层中点周向等效应力分布规律与传统轮胎相同，但数值明显小于传统轮胎，轮胎耐久性有所提高。这是因为芳纶冠带层轮胎径向变形明显小于传统轮胎，承载部件受拉伸程度降低使受力减小。

165/75R13和185/65R14两种规格轮胎带束层端点周向等效应力分布如图6所示。两种规格轮胎在非接地区域的周向等效应力相对于接地区域明显较小，滚动前、后方分别出现应力峰值。165/75R13规格B型轮胎的两峰值应力比A型轮胎略小，而其余节点应力很接近，C型轮胎在接地区域的节点应力远大于 A和B型轮胎；185/65R14规



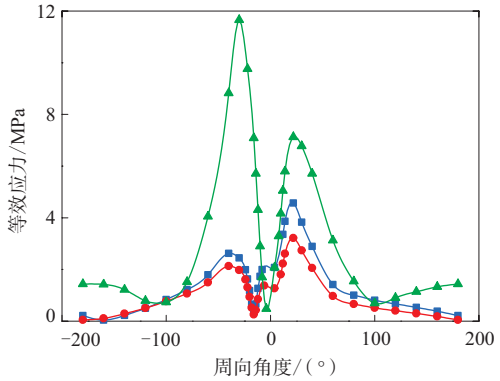
(a) 165/75R13



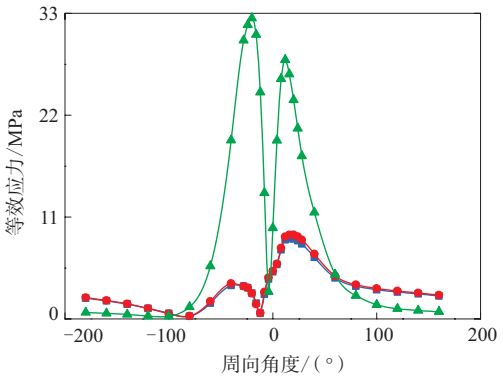
(b) 185/65R14

注同图3。

图5 轮胎带束层中点周向等效应力分布



(a) 165/75R13



(b) 185/65R14

注同图3。

图6 轮胎带束层端点周向等效应力分布

格A和B型轮胎的等效应力曲线基本重合,C型轮胎的应力明显大于A和B型轮胎。但用于加固带束层钢丝端头部位的芳纶冠带层帘线的拉伸强度远高于锦纶,最大应力未超过50 MPa的安全限值。

2.3 冠带层周向等效应力

165/75R13和185/65R14两种规格轮胎冠带层中点周向等效应力分布如图7所示。165/75R13规格A,B和C型轮胎的接地区域应力值大致相同,在非接地区域,C型轮胎应力是A和B型轮胎的数倍。185/65R14规格B型轮胎的应力曲线基本与A型轮胎相同,C型轮胎各节点的等效应力均明显大于A型轮胎,约为其5倍。分析原因是普通轮胎冠带层不是主要承载部件,而是以自身收缩力箍紧带束层限制其外扩变形[6],从而提高轮胎的强度。而芳纶冠带层的等效应力远大于带束层,C型轮胎冠带层对带束层的箍紧作用更强,在提高轮胎整体性的同时还起部分承载作用。相对而言,带束层材料对冠带层中点周向等效应力的影响不大。

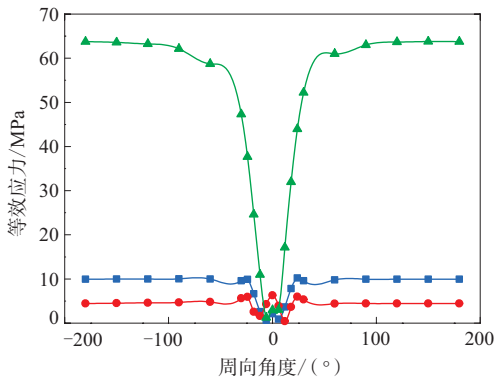
165/75R13和185/65R14两种规格轮胎冠带层端点周向等效应力分布如图8所示。两种规格的3种不同骨架材料轮胎的应力分布规律相同,B型轮胎应力曲线基本与A型轮胎相同,C型轮胎的应力明显大于A型轮胎。相对A和B型轮胎,C型轮胎应力下降、上升速度明显更高。185/65R14规格C型轮胎接地区域内应力上升速度略高于A和B型轮胎、小于165/75R13规格C型轮胎,这表明随着轮胎规格增大,芳纶冠带层轮胎骨架材料端点应力集中现象得到缓解。

3 结论

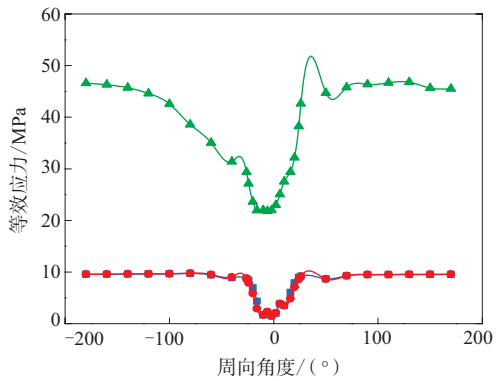
(1) 高速自由滚动工况下,3种不同类型轮胎对应部件的等效应力分布规律相似。

(2) 芳纶带束层轮胎的性能相对传统轮胎没有太大改善,但轮胎质量明显减小,在轻量化的同时满足了轮胎的使用性能要求。

(3) 芳纶冠带层轮胎的带束层等效应力大大



(a) 165/75R13

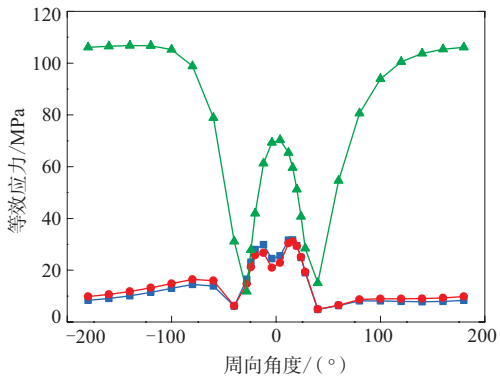


(b) 185/65R14

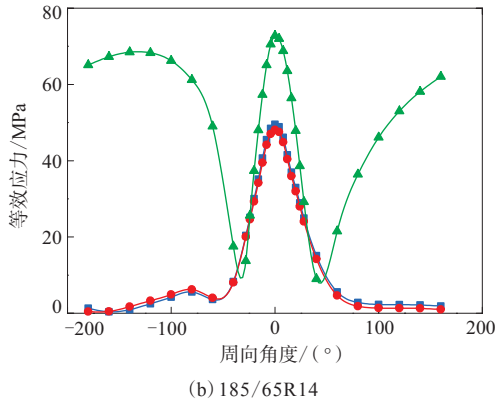
注同图3。

图7　轮胎冠带层中点周向等效应力分布

降低，强度较高的芳纶冠带层承受更大应力，与带束层同时作为主承载部件，因此承载能力比传统轮胎更好；轮胎带束层中点周向应力分布规律与传统轮胎相同，数值远小于传统轮胎，轮胎耐久性得到极大提高；轮胎冠带层周向应力提高，更好地起到箍紧带束层、减小轮胎外扩变形的作用，提高了轮胎强度，且轮胎规格越大，优势越显著。



(a) 165/75R13



(b) 185/65R14

注同图3。

图8　轮胎冠带层端点周向等效应力分布

参考文献：

[1] 丁剑平，俞淇，林惠音，等. 子午线轮胎用纤维骨架材料的发展概况[J]. 橡胶工业，2004，51(5)：302-305.

[2] 高称意. 纤维骨架材料的现状和新材料开发动态[J]. 橡胶工业，2004，51(6)：371-375.

[3] 刘晓彬，黎宁，魏静勋，等. 芳纶材料在高性能轮胎中的应用[J]. 中国橡胶，2011，27(19)：50-58.

[4] 周建全，姚秀红，陈祖全，等. 芳纶帘线在轿车子午线轮胎中的应用[J]. 轮胎工业，2005，25(5)：273-276.

[5] 管延锦，程钢，赵国群，等. 轮胎结构有限元分析应用于子午线轮胎帘线受力特性的研究[J]. 汽车技术，2005(3)：8-10.

[6] 高称意. 子午线轮胎冠带层用新材料[J]. 轮胎工业，2003，23(8)：467- 471.

收稿日期：2015-11-17

Numerical Analysis on Aramid Fiber Reinforced Tire under Free Rolling Condition

TAN Jing[1,2], *WU Xiao*[1,2], *LIU Xiaoying*[1,2], *ZHANG Jinyun*[1,2], *YANG Weimin*[1,2], *AN Ying*[1,2]

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing　100029, China; 2. National Engineering Laboratory of Tire Design and Manufacturing Process, Beijing　100029, China)

Abstract: Taking two normal tires, 165/75R13 and 185/65R14, as examples, the effect of using aramid

fiber to replace steel cord in the belt ply and nylon fiber in the cap ply on the mechanical properties of tires under high speed free rolling condition was studied by using numerical simulation method. The results showed that, aramid fiber belt ply reduced tire weight while the tire performance was maintained. With aramid fiber cap ply, the load carrying capacity, durability and strength of the tire were better than conventional tire and the tire with aramid fiber belt ply, and the benefit was more significant when the tire size was larger.

Key words: aramid fiber; radial tire; belt ply; cap ply; free rolling; finite element analysis

“一次法混炼新技术与应用”通过科技成果鉴定

中图分类号：TQ330.6^{+}3　　文献标志码：D

我国橡胶轮胎行业多年的高速发展，在创造了橡胶消耗、轮胎产销量世界第一业绩的同时，招致国际贸易保护主义频发，技术壁垒不断升级。轮胎结构性产能过剩、能源和资源消耗过大使行业遭遇了前所未有的困境。转型升级、结构调整势在必行，而创新是必由之路。2016年3月5日在山东枣庄通过科技成果鉴定的山东丰源轮胎制造股份有限公司“一次法混炼新技术与应用”项目，将带来炼胶技术的一次革命，推动橡胶工业向高品质方向发展。

据了解，该项目自2013年11月启动，至2016年1月开发成功。在项目开发和实施过程中，由5家单位密切合作，其中，山东丰源轮胎制造股份有限公司作为项目牵头、落地和实施单位；特拓（青岛）轮胎技术有限公司发挥技术引领作用；北京万向新元科技股份有限公司发挥在自动化、环保等方面的优势；大连橡胶塑料机械股份有限公司发挥大型橡胶机械制造的特长；青岛中海嘉新材料有限公司提供研发的新型材料。经过山东丰源轮胎公司实际生产运行验证，该生产线运转平稳，性能可靠，各项技术性能指标均达到设计要求。

该项目主要创新点有：开发了高压大功率变频驱动高速密炼机、全自动开炼机、打卷式混炼胶在线称重校核系统和低温升滤胶系统，生产线优化整合、无缝连接，形成了新一代一次法混炼新技术系统，技术成熟、稳定；创新应用了全水冷大功率电机和隔离房式除尘系统，生产环境更加安静、清洁；通过核心设备的专门研发和控制系统的智能化，实现了工艺过程的实时监控以及胶料生产全线自动化；率先应用了符合相关环保标准的环保固体操作油，称量更加简便、准确，胶料性能良好，同时减少了油料输送和称量系统等辅助设备的投入。

鉴定会由中国化工学会主持召开。与会专家一致认为，该项目具有炼胶质量好、自动化程度和生产效率高、能耗低、环境友好的特点，形成了配方、工艺与装备及产品应用的成套技术，创新性显著，达到了国际先进水平，建议扩大在橡胶行业中的推广应用。

据悉，我国轮胎行业“十三五”发展规划纲要已将“一次法炼胶”列为科技成果产业化项目第一位。此次“一次法混炼新技术与应用”科技成果的鉴定也引起了业界各方面的广泛关注，鉴定会后接着召开了成果推介会。推介会由中国化工学会新材料专业委员会、中国橡胶工业协会轮胎分会、山东省橡胶行业协会主办，山东丰源轮胎、特拓（青岛），北京万向新元、大连橡塑机械、青岛中海嘉等公司协办。出席会议的有主要轮胎、橡胶机械、原材料生产企业，以中橡科技为首的防扎漏气安全轮胎营销商，与橡胶专业密切相关的青岛科技大学、北京化工大学、华南理工大学以及相关的轮胎工程设计单位、中国国际广播电台、《轮胎工业》、《中国橡胶》、《中国化工报》等媒体单位共67家单位100多人。

推介会上，参与项目研制的5家单位详细介绍了相关研发内容，同时山东丰源轮胎发起创立《中国炼胶新技术创新联盟》倡议书，呼吁全国橡胶轮胎生产企业打破技术壁垒，共享共赢，加速炼胶技术升级换代，为橡胶轮胎“强国梦”添柴加薪。

（本刊编辑部　黄丽萍）