

特约来稿

电动汽车轮胎的发展现状与设计思路

曾季¹, 阙元元¹, 蔡尚迈¹, 蔡庆^{1*}, 李文东¹, 徐立¹, 张俊伟², 罗建刚²

(1. 北京橡胶工业研究设计院有限公司, 北京 100143; 2. 四川海大橡胶集团有限公司, 四川 简阳 641402)

摘要: 电动汽车是未来汽车的发展趋势, 开发电动汽车轮胎迫在眉睫。电动汽车轮胎要求充气压力大, 滚动阻力和噪声低, 抗湿滑性能好, 质量小。对滚动阻力C级以上的轮胎分析得出, 低滚动阻力轮胎具有质量较小, 胎面胶硬度低、定伸应力大、60℃时的损耗因子较小的特点。对抗湿滑性能B级以上的轮胎分析得出, 轮胎抗湿滑性能与质量相关性不大, 胎面胶生胶应采用纯溶聚丁苯橡胶(SSBR)或其与少量天然橡胶(NR)的并用胶, 并保证稍高的填充油用量。从力学分析、结构设计、配方设计分析得出, 在不损失胎面胶抗湿滑性能的同时降低滚动阻力是电动汽车轮胎开发的关键, 方法有开发合适的胎面花纹, 减小轮胎质量, 胎面胶采用分子链末端改性SSBR或其与NR的并用胶为生胶, 采用白炭黑/硅烷偶联剂为主要补强剂, 胎面胶混炼采用恒温混炼工艺, 骨架材料采用芳纶帘线等新型的骨架材料等。

关键词: 电动汽车轮胎; 滚动阻力; 抗湿滑性能; 噪声; 轻量化; 溶聚丁苯橡胶; 天然橡胶; 白炭黑

中图分类号: TQ336.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2019)12-0883-12

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2019.12.0883



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

1 电动汽车发展概况

电动汽车靠电池驱动, 具有低噪声、零排放、综合利用能源等突出优点, 是集汽车技术、电化学技术、新材料技术、新能源技术于一体的高新技术产品。发展电动汽车既可以保护环境, 又可以缓解能源短缺, 切合了当前环保节能的理念, 因此电动汽车在全球范围内快速推广。

2014年国务院办公厅《关于加快新能源汽车推广应用的指导意见》中明确指出: 要贯彻落实新能源汽车的国家战略, 以纯电驱动为新能源汽车发展的主要战略取向, 重点发展纯电动汽车、插电式(含增程式)混合动力汽车和燃料电池汽车。

我国有关新能源汽车的相关政策与推广力度



作者简介: 曾季(1977—), 女, 河南镇平人, 北京橡胶工业研究设计院有限公司高级工程师, 硕士, 主要从事轮胎配方设计及橡胶新材料的研究和应用工作, 负责全钢载重子午线轮胎、工程机械子午线轮胎、巨型工程机械子午线轮胎、电动汽车轮胎和空气弹簧等的配方设计工作, 以及新型橡胶材料的研究和应用工作, 先后主持或主要参与省部级以上重点项目3项, 技术转让项目十数项, 发表论文15篇, 获授权国家发明专利1项。

*通信联系人(cai_qing@126.com)

均走在了世界前列^[1]。在政府与企业的共同努力下, 我国新能源汽车行业近几年取得了爆发式增长。2018年在我国汽车销量整体下降的形势下, 电动汽车销量取得了30%以上的增长, 1—11月累计销量为1 023 514辆, 其中纯电动汽车为789 171辆, 见图1。

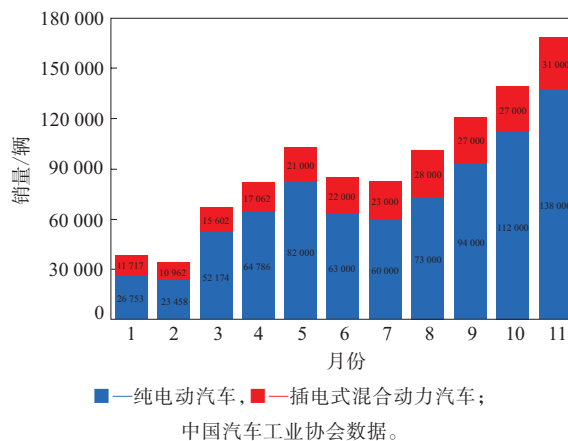


图1 2018年1—11月电动汽车产销量数据

公安部数据显示, 2018年我国新能源汽车保有量达261万辆, 占汽车总保有量的10.9%, 同比增长70%。其中纯电动汽车保有量为211万辆, 占新能源汽车总保有量的81.06%。

根据国务院发布的《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》,到2020年国内新能源汽车累计产销量需达500万辆,这意味着在今后2年时间内,国内新能源汽车产销量还将继续快速增长。在2030年的愿景中,我国新能源乘用车年销量将突破1 300万辆。2018—2030年,新能源乘用车和新能源大中型客车带来的市场空间将达13.9万亿元。全球范围内,预计2022年新能源汽车销量将达600万辆,2030年有望达到1.03亿辆。

电动汽车的快速发展,对轮胎行业提出了新的要求。开发适合电动汽车的专用轮胎已经迫在眉睫。

2 电动汽车对轮胎的特殊性能要求

由于电动汽车与传统汽车之间存在差异,轮胎制造商需要从不同角度平衡电动汽车轮胎的性能,见图2。



图2 电动汽车轮胎的性能要求

(1)纯电动汽车的质量在一般情况下要比同尺寸的燃油汽车大20%左右,因此电动汽车对轮胎负荷能力提出了更高的要求。同时由于电动汽车增加了电池质量,这就要求电动汽车在其他方面进行轻量化的设计。轮胎的轻量化是电动汽车对轮胎的要求,这就需要采用高强度的轻质材料来实现,因此对轮胎新材料的应用研究提出了更高要求。

(2)电动汽车的质量增大,导致其制动距离延长,制动性能尤其是湿滑路面的制动性能是关系到轮胎行驶安全的重要因素,因此要求电动汽车轮胎具有高抗湿滑性能。

(3)电池技术发展的滞后使得电动汽车的充电容量受限,单次充电续航里程短。为了减少电池的电力消耗,延长续航里程,电动汽车轮胎要求

具有更低的滚动阻力。

(4)新型电动机的引入,导致电动汽车的转向、制动、驱动和噪声等方面也随之改变。电动机初始扭矩大,车辆提速快,需要轮胎具有更好的抓着性能,避免轮胎打滑,保障行驶安全。这就要求电动汽车轮胎在滚动阻力、抓着性能和耐磨性能之间取得一个良好的平衡。

(5)电动汽车没有发动机的噪声,比常规汽车更安静,轮胎的噪声就格外引人注目。所以电动汽车的发展也对轮胎噪声的控制提出了更严格的要求。

(6)电动汽车轮胎充气压力比普通轮胎大,一是可以提高刚性,降低滚动阻力;二是可以提高负荷能力。这就要求轮胎能够适应高充气压力的使用条件。

综上所述,一款好的电动汽车轮胎,需要具有非常低的滚动阻力和噪声、高抗湿滑性能和负荷能力。以上许多性能相互制约,给轮胎制造企业带来了新的挑战。

3 电动汽车轮胎的性能分析

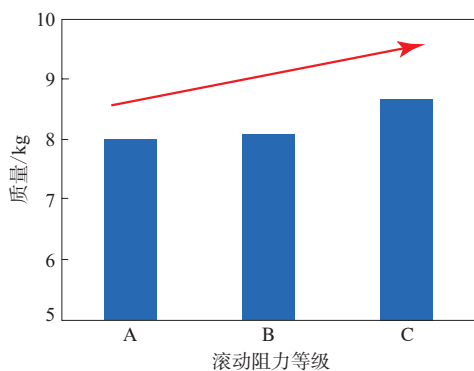
目前各国或地区通过不同的轮胎标签法规对高性能轮胎进行界定,如美国、日本、欧盟均制定了适应自身国情的轮胎标签法规,其中欧盟标签法规由于准入门槛较高,各项指标测试方法可操作性强,与绿色环保要求密切相关,对我国轮胎行业影响较大。本研究选用不同欧盟标签等级的国外知名品牌高性能乘用车轮胎,对其进行胎面胶性能和组分分析,为开发高性能电动汽车轮胎提供可借鉴的设计思路。

3.1 滚动阻力

轮胎滚动阻力的影响因素很多,如轮胎使用条件(温度、压力、负荷、路面状态等)和设计因素(结构、花纹、胎面材料和配方等)等。本工作对12条国外不同品牌滚动阻力C级及以上的205/55R16规格轮胎主要进行了胎面胶性能和组分分析(滚动阻力A,B,C级轮胎编号分别对应A,B,C系列)。

3.1.1 与轮胎质量的关系

轮胎滚动阻力与质量的关系如图3所示。两条滚动阻力A级轮胎质量分别不到8.5和8.0 kg。



滚动阻力A,B和C级的轮胎质量均取平均值。

图3 轮胎滚动阻力与质量的关系

滚动阻力B级轮胎中,除了B3轮胎质量接近9 kg以外,其余4条轮胎质量均接近或小于8 kg,说明低滚动阻力轮胎基本上都采用了轻量化设计。滚动阻力C级轮胎在质量方面进一步放宽,均在8 kg以上,个别超过了9 kg。

3.1.2 与胎面胶物理性能的关系

滚动阻力A级轮胎的物理性能如图4和5所示。从图4和5可以看出,两条滚动阻力A级轮胎均具有硬度低、定伸应力大的特点。

滚动阻力B级轮胎的物理性能如图6和7所示。从图6和7可以看出,与滚动阻力A级轮胎相比,滚动阻力B级轮胎的硬度稍高、定伸应力稍小。

滚动阻力C级轮胎的物理性能如图8和9所示。从图8和9可以看出,滚动阻力C级轮胎胎面胶物理性能数据特征并不明显,硬度和定伸应力范围较大,定伸应力最小接近12 MPa,最大超过18 MPa,数据较为离散。

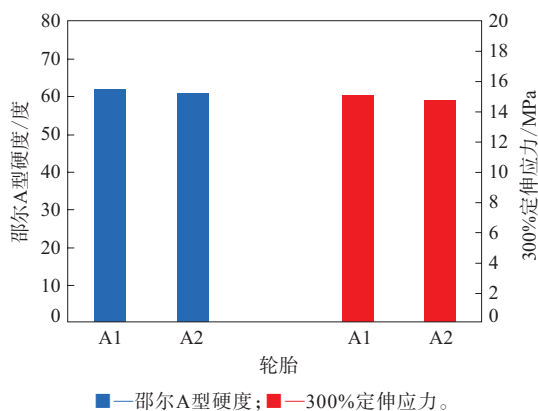


图4 滚动阻力A级轮胎胎面胶的硬度和定伸应力

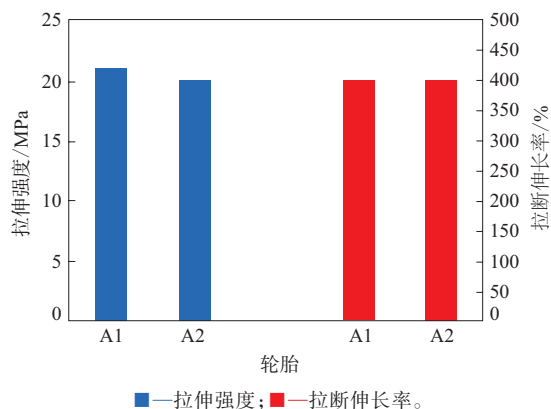


图5 滚动阻力A级轮胎胎面胶的拉伸强度和拉断伸长率

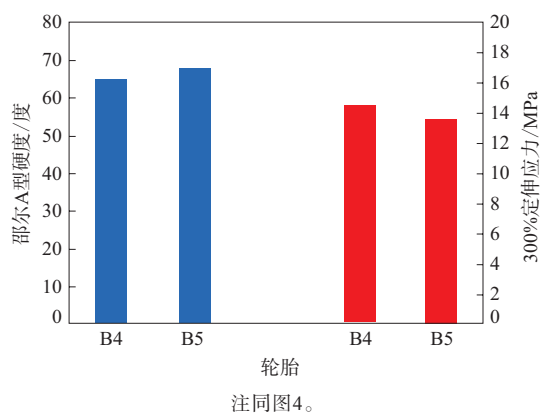


图6 滚动阻力B级轮胎胎面胶的硬度和定伸应力

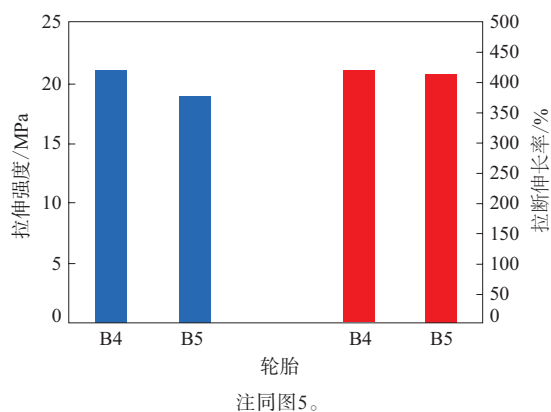
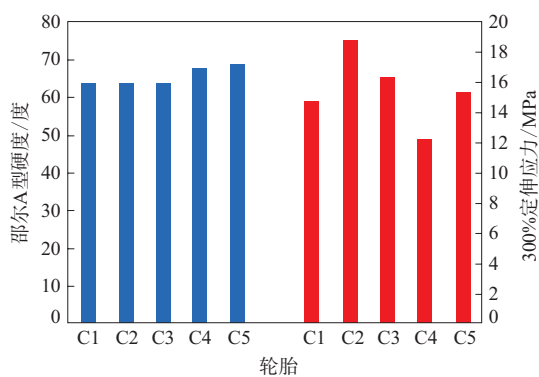


图7 滚动阻力B级轮胎胎面胶的拉伸强度和拉断伸长率

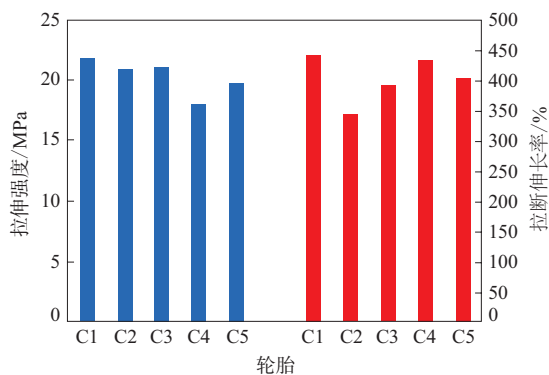
3.1.3 与胎面胶组分和动态力学性能的关系

滚动阻力A级轮胎胎面胶生胶组分如图10所示。从图10可以看出,A级轮胎胎面胶生胶采用纯丁苯橡胶(SBR)或SBR/天然橡胶(NR)并用胶,其中SBR是主要胶种,并用NR可以起到改善胎面胶加工性能、降低滚动阻力的作用,但对抗湿滑性能



注同图4。

图8 滚动阻力C级轮胎胎面胶的硬度和定伸应力



注同图5。

图9 滚动阻力C级轮胎胎面胶的拉伸强度和拉断伸长率

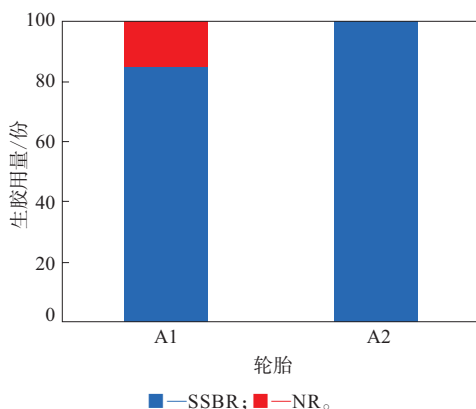


图10 滚动阻力A级轮胎胎面胶生胶组分

不利。此外,结合滚动阻力A级轮胎胎面胶动态粘弹数据(见后图12)中A2轮胎(纯SBR配方)玻璃化温度(T_g)高于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,基本可以确定配方中SBR为溶聚丁苯橡胶(SSBR)。SSBR可以通过分子结构设计得到 T_g 不同的胶料,大多数采用SSBR的胎面胶的 T_g 相比采用乳聚丁苯橡胶(ESBR)的胎面胶更高,可以更好地平衡滚动阻力和抗湿滑性能。

滚动阻力A级轮胎胎面胶填充组分如图11所示。可以看出,滚动阻力A级轮胎胎面胶在补强剂和填充油的应用上特点很突出,均采用了低填充的设计,较低的填充量保证了胶料自身网络结构稳定,降低了交变应力下胶料-填料网络结构破坏所形成的滞后损失,能有效地降低胎面胶的滚动阻力。

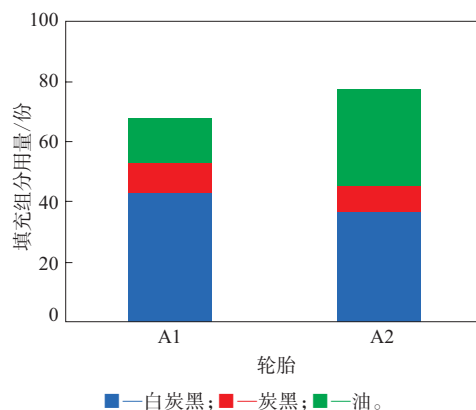


图11 滚动阻力A级轮胎胎面胶填充组分

滚动阻力A级轮胎胎面胶的动态粘弹数据如图12所示($\tan\delta$ 为损耗因子)。对图12进行分析可知,滚动阻力A级轮胎的胎面胶 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 $\tan\delta$ 均很小,尤其是A1轮胎,显示了其在材料应用和配方设计上的独到之处。

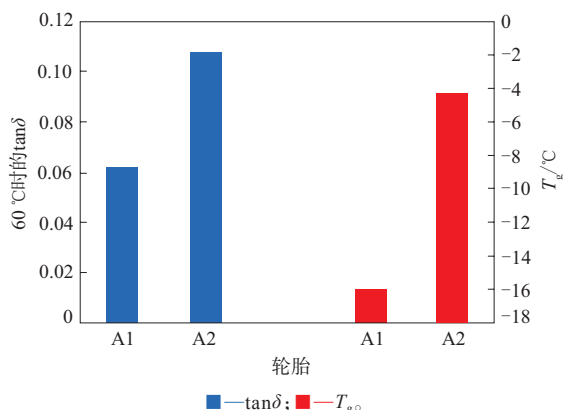
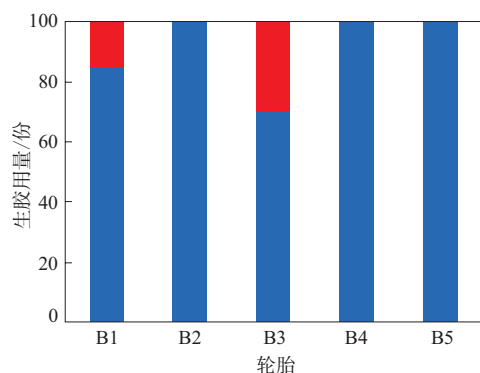


图12 滚动阻力A级轮胎胎面胶动态粘弹数据

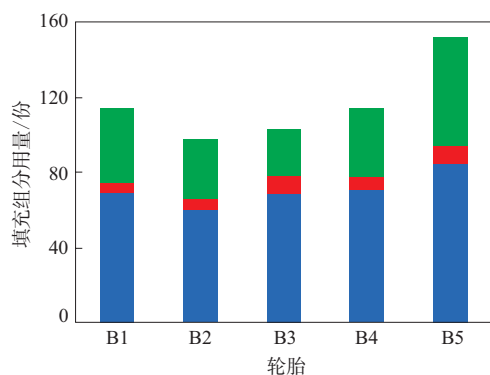
滚动阻力B级轮胎胎面胶生胶组分和填充组分如图13和14所示。从图13可以看出,与滚动阻力A级轮胎相同,滚动阻力B级轮胎胎面胶生胶也采用纯SSBR或SSBR/NR并用体系,且SSBR是主要胶种。由于滚动阻力B级轮胎对滞后性能的要求不如滚动阻力A级轮胎苛刻,因此SSBR/NR并

用体系胎面胶中SSBR用量稍有提高,其中3条轮胎胎面胶采用了纯SSBR配方。从图14可以看出,滚动阻力B级轮胎胎面胶补强剂和填充油一般采用中等填充量,既能保持胎面胶较低的滞后损失,同时能有效控制配方的整体成本。



注同图10。

图13 滚动阻力B级轮胎胎面胶生胶组分

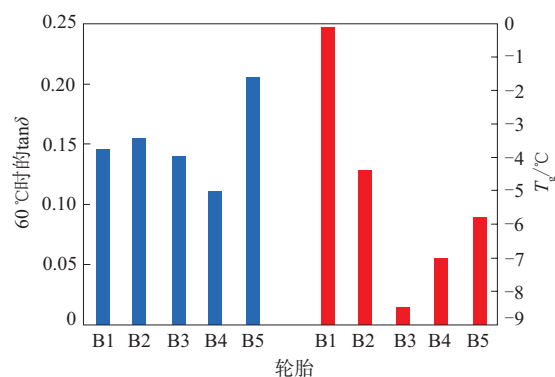


注同图11。

图14 滚动阻力B级轮胎胎面胶填充组分

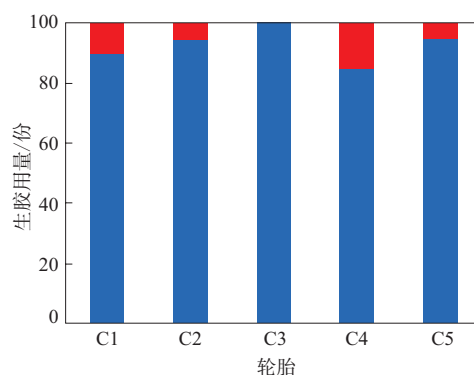
滚动阻力B级轮胎胎面胶的动态粘弹数据如图15所示。对图15分析可知,滚动阻力B级轮胎胎面胶60℃时的 $\tan\delta$ 也较小,除个别轮胎因采用轻量化设计适当放宽了对胎面胶滞后性能的要求外,其他轮胎60℃时的 $\tan\delta$ 均接近或小于0.150,表明滚动阻力B级轮胎胎面胶具有较低的滞后损失。

滚动阻力C级轮胎胎面胶生胶组分和填充组分如图16和17所示。从图16可以看出,滚动阻力C级轮胎胎面胶生胶组分与滚动阻力A级和B级轮胎相同,采用纯SSBR或SSBR/NR并用体系,SSBR是主要胶种。从图17可以看出,在补强剂和填充油方面,滚动阻力C级轮胎一般采用中高填充量,这



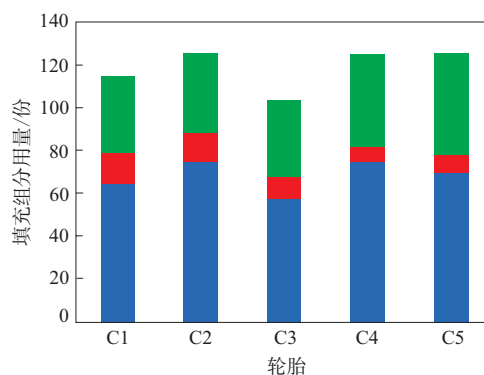
注同图12。

图15 滚动阻力B级轮胎胎面胶动态粘弹数据



注同图10。

图16 滚动阻力C级轮胎胎面胶生胶组分



注同图11。

图17 滚动阻力C级轮胎胎面胶填充组分

进一步降低了配方成本。

滚动阻力C级轮胎胎面胶的动态粘弹数据如图18所示。对图18分析可知,滚动阻力C级轮胎胎面胶60℃时的 $\tan\delta$ 差异较大,部分轮胎60℃时的 $\tan\delta$ 接近或小于0.150,部分轮胎60℃时的 $\tan\delta$ 超过了0.200,但平均值明显大于滚动阻力B级

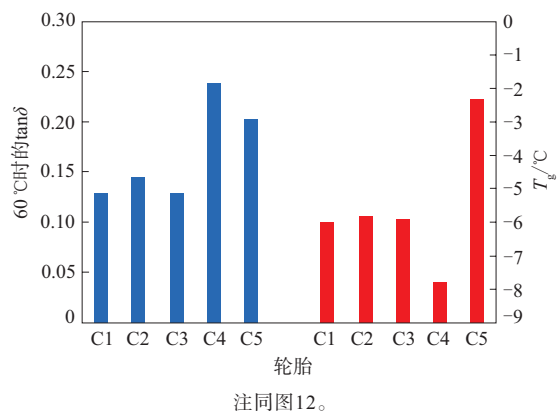
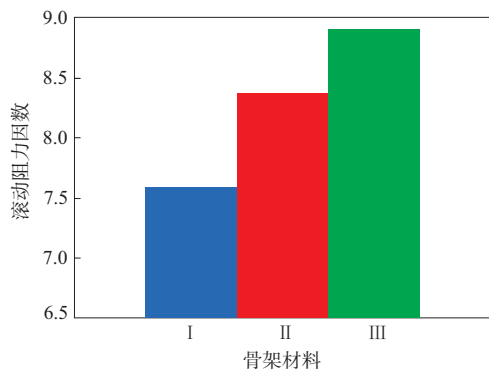


图18 滚动阻力C级轮胎胎面胶动态粘弹数据

轮胎。

3.1.4 与轮胎骨架材料层的关系

对所选用的不同滚动阻力等级轮胎进行了骨架材料层的初步归类。从归类结果看,剖析轮胎的骨架材料可以分成3种不同设计,分别是1层聚酯帘布+2层钢丝帘布+1层芳纶帘布、1层聚酯帘布+2层钢丝帘布+1层锦纶帘布和1层聚酯帘布+2层钢丝帘布+2层锦纶帘布(胎体层+带束层+冠带层)。不同骨架材料轮胎的滚动阻力因数(平均值)如图19所示。从图19可以看出,采用1层聚酯帘布+2层钢丝帘布+1层芳纶帘布的轮胎具有最小的滚动阻力因数。



I—1层聚酯帘布+2层钢丝帘布+1层芳纶帘布; II—1层聚酯帘布+2层钢丝帘布+1层锦纶帘布; III—1层聚酯帘布+2层钢丝帘布+2层锦纶帘布。

图19 不同骨架材料轮胎的滚动阻力因数

3.2 抗湿滑性能

轮胎抗湿滑性能的影响因素很多,也包含轮胎使用条件(温度、压力、负荷、路面水膜状态等)和设计因素(花纹、磨损限值、胎面材料和配方等)

等。本工作对12条国外不同品牌抗湿滑性能在B级以上的205/55R16规格轮胎主要进行了胎面胶性能和组分分析(抗湿滑性能A,B,C级轮胎编号分别对应A',B',C'系列)。

3.2.1 与轮胎质量的关系

轮胎抗湿滑性能与质量的关系如图20所示。从图20可以看出,轮胎质量数据较为离散,既有超过9 kg的轮胎,也有低于8 kg的轮胎,轮胎抗湿滑性能与质量之间没有明显的相关性。

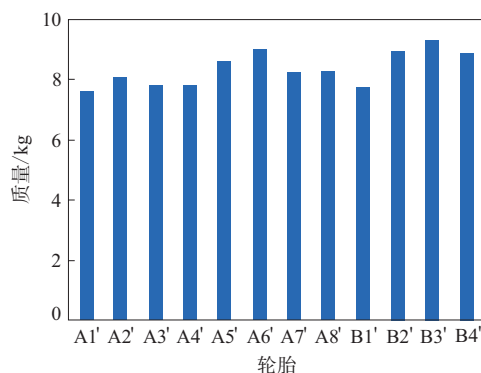
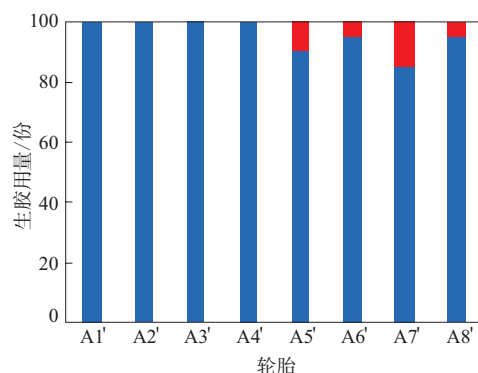


图20 轮胎抗湿滑性能与质量的关系

3.2.2 与胎面胶组分和动态力学性能的关系

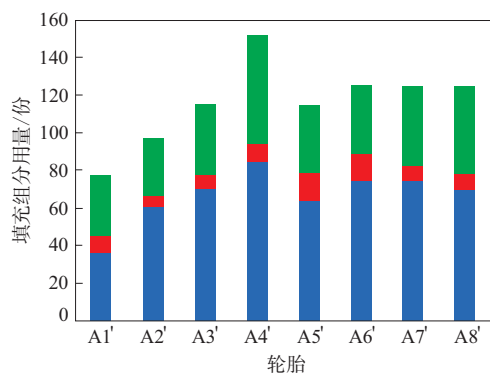
抗湿滑性能A级轮胎胎面胶生胶组分如图21所示。从图21可以看出,抗湿滑性能A级轮胎生胶采用纯SSBR和SSBR/NR并用体系,且SSBR是主要胶种。



注同图10。

图21 抗湿滑性能A级轮胎胎面胶生胶组分

抗湿滑性能A级轮胎胎面胶填充组分如图22所示。从图22可以看出,轮胎抗湿滑性能与胎面胶填充组分总用量相关性不大,但进一步分析可知,填充油用量与轮胎的抗湿滑性能有一定相关

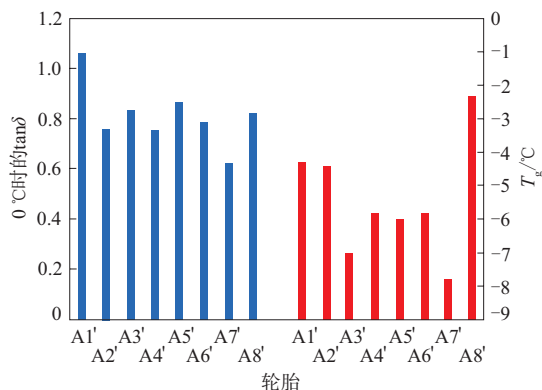


注同图11。

图22 抗湿滑性能A级轮胎胎面胶填充组分

性,高抗湿滑性能轮胎填充油用量一般较大,低相对分子量组分可以提高胎面胶的高频滞后性能,从而提高轮胎的抗湿滑性能。

抗湿滑性能A级轮胎胎面胶的动态粘弹数据如图23所示。由图23分析可知,抗湿滑性能A级轮胎胎面胶0℃时的 $\tan\delta$ 处于较高水平,均在0.80上下,个别已经超过1.00,表明该胎面胶在配合达到了较高的水平。

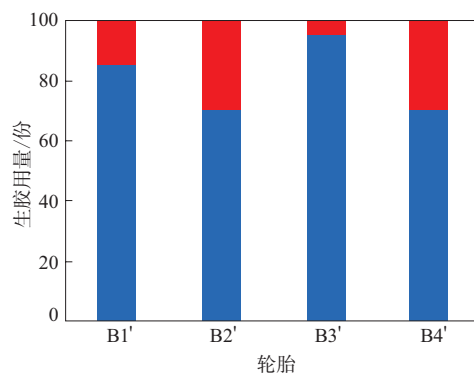


注同图12。

图23 抗湿滑性能A级轮胎胎面胶动态粘弹数据

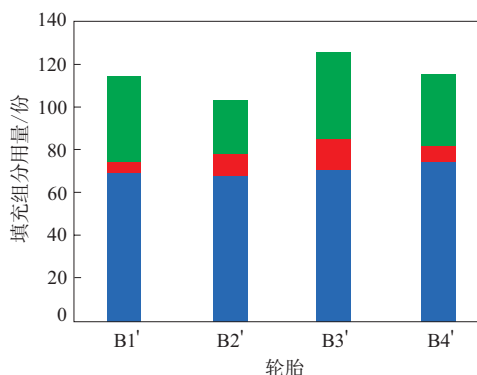
抗湿滑性能B级轮胎胎面胶生胶组分如图24所示。从图24可以看出,抗湿滑性能B级轮胎胎面胶生胶采用SSBR/NR并用体系,且SSBR是主要胶种。与抗湿滑性能A级轮胎相比,抗湿滑性能B级轮胎胎面胶中NR平均用量稍大。

抗湿滑性能B级轮胎胎面胶填充组分如图25所示。从图25可以看出,轮胎抗湿滑性能与胎面胶填充组分总用量相关性不大,同时抗湿滑性能B级轮胎也具有较大的填充油用量。



注同图10。

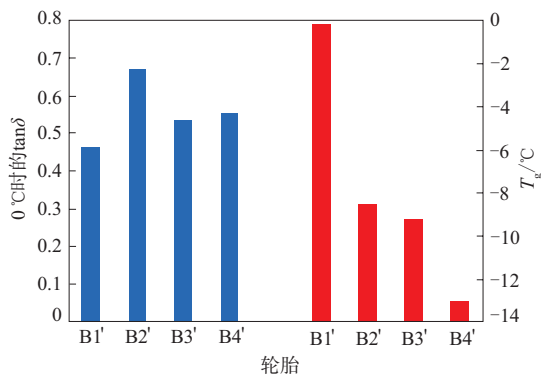
图24 抗湿滑性能B级轮胎胎面胶生胶组分



注同图11。

图25 抗湿滑性能B级轮胎胎面胶填充组分

抗湿滑性能B级轮胎胎面胶的动态粘弹数据如图26所示。从图26可以看出,抗湿滑性能B级轮胎胎面胶0℃时的 $\tan\delta$ 处于中等水平,均在0.550上下,结合抗湿滑性能A级轮胎0℃时的 $\tan\delta$ 数据可知,胎面胶0℃时的 $\tan\delta$ 与轮胎的抗湿滑性能确实具有很好的相关性。



注同图12。

图26 抗湿滑性能B级轮胎胎面胶动态粘弹数据

3.3 小结

目前一般电动汽车厂要求轮胎的滚动阻力和抗湿滑性能至少达到双B级,噪声不能超过71 dB限值,最好不高于70 dB。

开发滚动阻力B级以上的轮胎,必须进行轻量化设计。胎面胶动态力学性能中60 ℃时的 $\tan\delta$ 应低于0.150(拉伸测试型),若达到0.100及以下则更为保险。

开发抗湿滑性能B级以上的轮胎,SSBR的应用很有必要,同时应控制NR或顺丁橡胶的用量,保持稍高的填充油用量,使胎面胶动态力学性能中0 ℃时的 $\tan\delta$ 高于0.550(拉伸测试型),若高于0.800则更为保险。

4 电动汽车轮胎设计思路

目前全球各大轮胎企业都十分重视电动汽车轮胎的开发,纷纷推出自己的电动汽车轮胎产品。中国电动汽车市场占全球市场的将近一半,但目前国内轮胎企业很少有专门针对电动汽车的轮胎产品。为适应电动汽车的使用要求,相比普通节能型低滚动阻力轮胎,电动汽车轮胎在设计上有如表1所示的特殊要求。

表1 电动汽车轮胎的设计要求

项 目	普通轮胎	节能轮胎	电动汽车轮胎
滚动阻力	○	↓	↓↓
噪声	○	○	↓
舒适性	○	○	○
干路面抓着性	○	○	↑
抗湿滑性能	○	○	↑
耐磨性能	○	○	↑
负荷能力	○	○	↑
轮胎质量	○	↓	↓↓

从表1可以看出,电动汽车轮胎设计的关键是使轮胎具有更低的滚动阻力和更小的质量。

电动汽车轮胎的主要设计理念及方法如下。

(1) 轮胎轻量化。通过减小轮胎质量以降低轮胎滚动阻力,满足电动汽车的需要:

①在确保轮胎使用性能的前提下,通过控制轮胎各部件厚度来调节轮胎质量;

②采用新型轻质材料制备轮胎,优化轮胎结构,减少材料用量,如采用芳纶帘线代替钢丝帘线用作骨架材料效果十分显著。

(2) 减小材料滞后损失。通过对胶料配方的优化和对骨架材料的改进,实现降低滚动阻力的目标。

基于上述设计理念与方法,分别从力学分析、结构设计和配方设计等方面具体阐述电动汽车轮胎的设计思路。

4.1 力学分析

根据电动汽车轮胎的特点,除应用有限元分析方法对轮胎进行传统的应力-应变分析之外,还需要重点进行以下几方面的研究。

(1) 轮胎的花纹和轮廓设计在平衡滚动阻力与抓着性能之间的矛盾、降低轮胎噪声等方面尤为重要。可利用有限元分析方法重点对轮胎冠部的行驶面宽度、胎面弧度、花纹饱和度、花纹形式、花纹块刚性等结构参数对轮胎滚动阻力的影响进行探讨。

(2) 对胎面花纹在湿地行驶时的破除水膜行为 and 排水性能进行分析,进而指导花纹的设计,以提高轮胎的抗湿滑性能。

(3) 分析胎侧轮廓对空气阻力的影响。轮胎在行驶中除接地面滚动阻力外,也受到周围空气阻力的影响,降低空气阻力也是降低能耗的途径之一。

(4) 轮胎噪声的仿真研究。轮胎的噪声控制对电动汽车尤为重要,而轮胎噪声的产生机理非常复杂,目前对各种噪声所占比重还无定论。需要建立一种比较准确的噪声仿真系统,以缩短花纹设计周期,从而节约开发成本。

4.2 结构设计

(1) 根据电动汽车的特点对胎面花纹进行优化设计^[2]。

电动汽车轮胎需要在滚动阻力、抓着性能和噪声方面取得良好的平衡。轮胎花纹与上述三者均有直接关系。研究表明,横向刚性和纵向刚性都大的花纹滚动阻力低(见图27,方框内数据为滚动阻力指数),这是因为胎面压缩变形对滚动阻力的影响起支配作用。

为了在高充气压力下降低由于压缩变形产生的能量损失,电动汽车轮胎相对于普通轮胎可以减少纵向花纹沟和横向花纹沟,以增大花纹刚性,降低滚动阻力,同时降低轮胎噪声,但如此会影

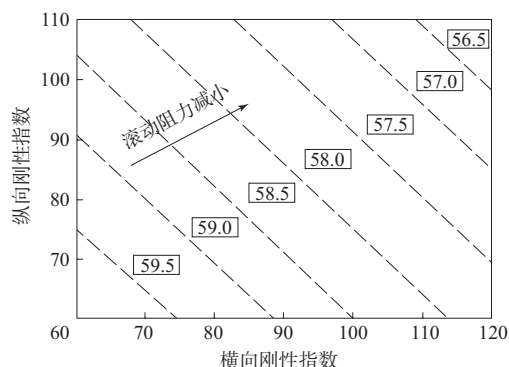


图27 胎面花纹刚性对滚动阻力的影响

响轮胎在湿路面和冰雪路面的抗滑性能。另外，还必须考虑提高充气压力带来的舒适性降低的问题。

电动汽车轮胎花纹的设计要素和设计方法如表2所示。

表2 电动汽车轮胎花纹的设计要素和设计方法

性能	花纹的设计要素	花纹的设计方法
滚动阻力	抗压缩性	花纹沟比例小、节距少
花纹噪声	花纹沟容积	花纹沟少且窄
湿滑路面行驶性能	对轮胎牵引力有影响的花纹边部	多采用细花纹,使花纹的径向边缘效果好
乘坐舒适性	花纹的纵向刚性	多采用细花纹,纵向刚性小

(2)通过带束层结构设计降低滚动阻力。

轮胎胎冠半径减小,即胎面曲率增大,轮胎滚动阻力降低。

带束层材料、层数以及帘线角度对轮胎整体刚性起决定性作用,对轮胎的滚动能量损失影响很大。合理设计带束层结构,增大冠部刚性,可减小周向变形,使轮胎具有较大的滚动半径,以降低胎面胶滞后损失以及减少在地面上的滑移,从而降低轮胎滚动阻力。

(3)对轮胎噪声进行控制。

轮胎的噪声除了花纹噪声和结构噪声外,车辆行驶过程中,滚动轮胎的气压变化会导致轮胎内空气产生空腔噪声,噪声通过共振从车身(方向盘、座椅、底盘)传导到车内。

除了通过花纹设计等途径降低轮胎噪声外,目前还在轮胎内侧添加一层聚氨酯泡沫隔层(见图28),该隔层能产生强大的阻尼减振效应,阻隔轮胎滚动时产生的声波传入车内,降低轮胎空腔产生的共鸣噪声,提升驾乘体验。

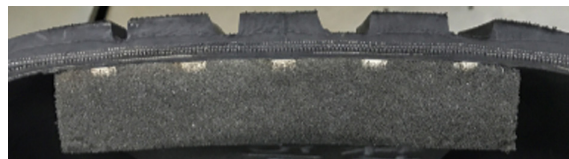


图28 聚氨酯泡沫隔层

(4)电动汽车轮胎需要较高的充气压力。

充气压力大对轮胎的骨架材料设计提出了较高的要求,在保证轮胎安全倍数的前提下,减薄胎体,减小轮胎质量^[2]。

芳纶帘线具有强度高、热收缩小、耐热性能好和蠕变性能极小的优点,已在航空、航天、国防、交通、通讯等领域获得广泛应用。可以采用芳纶帘线部分或全部取代钢丝帘线用作电动汽车轮胎的骨架材料。

目前芳纶帘线的应用主要有以下几种方式。

①以芳纶帘线部分取代钢丝帘线。芳纶帘线取代钢丝帘线作为带束层材料,用高模量低收缩聚酯帘线作为胎体材料。

②以芳纶帘线全部取代钢丝帘线。芳纶帘线取代钢丝帘线作为带束层材料,用芳纶帘线取代聚酯帘线作为胎体材料。

③以芳纶/锦纶混合帘线作为冠带层材料,可以减小轮胎在高速行驶或转向状态下花纹块的移动幅度,从而使车辆保持良好的抓着性能,同时保证良好的工艺性能,这是芳纶帘线重点的应用方向。

4.3 配方设计

轮胎胎面胶配方决定了胎面的滚动阻力、抗湿滑性能和耐磨性能,胎面胶滚动阻力约占整个轮胎滚动阻力的49%。在胎面胶配方设计方面,降低胎面胶动态变形滞后损失即降低了滚动阻力,同时应保证轮胎的抗湿滑性能、驱动性能、操纵稳定性和行驶安全性能等。

通常,胎面胶能量损失大致包含两方面:一是胎面胶屈挠变形产生的能量损失;二是胎面胶压缩变形产生的能量损失。

轮胎高充气压力下压缩变形产生的能量损失比普通充气压力下大,这是由于在高充气压力下轮胎的接地面积减小且接地压力上升,从而导致胎面胶压缩程度增大的缘故。

考虑到电动汽车轮胎在高充气压力下使用,因此要求胎面胶能减小因压缩变形而产生的能量

损失(与原有的低滚动阻力轮胎相比)。开发出因压缩变形小而产生的能量损失小的胶料,并将其用于胎面胶,这是电动汽车轮胎胎面胶配方设计的主要方向。

轮胎胎面胶由生胶组分、填充组分(炭黑、白炭黑、填充油)、硫化体系、操作助剂等组成,这些组分对胶料滞后损失和湿路面牵引性能的影响也各不相同。

4.3.1 生胶组分

一般而言,提高胎面胶的滞后损失可以改善抗湿滑性能,但会增大滚动阻力。控制滚动阻力的温度和频率与控制抗湿滑性能的温度和频率不同,后者是在较低温度和较高频率时发生,因此这两种性能在某种程度上可以平衡。

配方组分中关系到滞后损失的因素有:橡胶的 T_g ;橡胶-填料之间的相互作用;填料-填料之间的相互作用。在研究各项性能关系时,用弹性表示胶料的滞后损失,胶料的弹性和抗湿滑性能与 T_g 有关, T_g 越低,弹性越好,滞后损失越小,抗湿滑性能与 T_g 的关系则相反^[3]。通常用特定条件下0℃时的 $\tan\delta$ 表征胶料的抗湿滑性能,60℃时的 $\tan\delta$ 表征胶料的滚动阻力。

生胶组分和填充组分量占胎面胶组分用量的绝大部分,生胶组分选择是胎面配方设计最重要的一步,因为生胶组分决定了胎面胶的 $\tan\delta$,其他配合剂只是一定程度影响而非基本因素。选择 T_g 范围较宽或者增大 $\tan\delta$ 峰值范围的橡胶,能使胎面胶兼具低滚动阻力和高抗湿滑性能。对低滚动阻力轮胎而言,橡胶应在0~20℃下具有较大的 $\tan\delta$,在50~70℃下具有较小的 $\tan\delta$,符合K. H. Nordsiek^[4]提出的“理想胎面橡胶”概念。理想的胎面胶性能如图29所示。

对于SSBR,可通过分子设计控制其化学组成和微观结构,使其具有较窄的相对分子质量分布和较大的相对分子质量,能够较好地解决轮胎滚动阻力、抗湿滑性能和耐磨性能的矛盾。近年来新型SSBR采用分子链末端改性技术,使白炭黑填料在其中具有更好的分散性和结合性。新型SSBR被广泛用于低碳排放的环保型轮胎胎面胶。对于乘用车轮胎胎面胶,低滚动阻力型橡胶要有理想的分子链结构、相对分子质量分布和网络

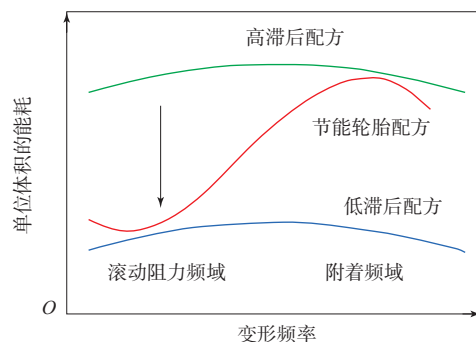


图29 理想的胎面胶性能

结构,其中相对分子质量分布最重要。如果橡胶中相对分子质量小的成分越多,其 $\tan\delta$ 越大(因为分子链末端起滞后损失作用)。而SSBR相对分子质量分布较窄,因此其 $\tan\delta$ 比ESBR小,低滚动阻力轮胎胎面胶主要用分子链末端改性SSBR或与其与NR的并用胶,得到的胶料滚动阻力较低,且抗湿滑性能变化不大。SSBR末端基改性程度越高,其弹性越好,滞后损失越小,而且在低温(-10℃)下的硬度也越小^[5]。

4.3.2 填充组分

一般而言,如果降低胎面胶的滞后损失,那么抗湿滑性能也将降低。然而,已发现采用高分散性沉淀法白炭黑和硅烷偶联剂以及优化混炼工艺可以克服上述不足。新胎面配合技术的主要特征之一是使用高分散白炭黑和硅烷偶联剂^[6]。

使用高分散性沉淀法白炭黑可以使胎面胶同时获得低滚动阻力、高抗湿滑性能和耐磨性能,因为其对降低滚动阻力最有效而对抗湿滑性能的负面影响最小,所以白炭黑被广泛应用于低碳排放的环保型轮胎胎面胶配方^[7-8],但其使用时必须配合硅烷偶联剂,以确保橡胶与填料之间的相互作用。硅烷偶联剂TESPT起相容剂作用,使沉淀法白炭黑与橡胶结合在一起,从而降低了白炭黑-白炭黑之间的相互作用。白炭黑-橡胶之间的作用类似于交联键。橡胶分子链段的大规模协同运动及分子链末端的自由运动受到约束,降低了高温(低频率)区域内的 $\tan\delta$,使胶料的弹性模量增大。胶料的抗湿滑性能取决于玻璃化区域内球状粘弹材料的性质,白炭黑-橡胶键合使橡胶硬化,键合程度越高,自由旋转的橡胶键越少,低温下滞后损失越大。因此,白炭黑-橡胶高键合作用、白炭黑-

白炭黑之间低相互作用、白炭黑对橡胶分子链末端自由运动的约束作用是获得低滚动阻力、高抗湿滑性能和耐磨性能的必要条件。

电动汽车轮胎的胎面胶配方应选择高比例的高分散性沉淀法白炭黑,甚至全白炭黑补强剂(包括硅烷偶联剂),以获得滚动阻力、抗湿滑性能和耐磨性能平衡的胎面胶。

4.4 炼胶工艺

在白炭黑和硅烷偶联剂的硅烷化反应中,由于含硫键的偶联剂相对分子质量较大,在混炼过程中需要较长的时间和较高的温度才能与白炭黑充分反应,而对于硅烷偶联剂如Si69,若混炼温度高于160℃,其多硫键就会发生断裂并参与橡胶硫化导致焦烧,因此应严格控制排胶温度。L. A. E. M. Reuvekamp等^[9]研究了不同混炼时间和温度对胶料性能的影响,结果表明胶料混炼温度保持在145℃左右并且至少混炼200s,可使白炭黑得以充分分散。但在实际生产中,尤其是大批量混炼过程中,要把加工温度长时间控制在145~160℃是极为困难的,因此目前轮胎行业普遍采用低速、多段混炼的传统混炼工艺来保证白炭黑与硅烷偶联剂充分反应。但传统混炼工艺无法保证混炼温度长时间稳定在一个范围内,同时还存在反复冷却,效率低的问题。为解决上述问题,可使用恒温混炼工艺和串联式密炼机混炼工艺,以确保硅烷偶联剂与白炭黑反应充分。

4.5 小结

(1)电动汽车轮胎负荷较大,需要较高的充气压力,针对电动汽车的使用特点,轮胎结构设计方面,在保证轮胎安全倍数的前提下,减薄胎体,减小轮胎质量;对轮胎花纹和轮廓进行有限元优化设计,为减小高充气压力下由于压缩变形而产生的能量损失,减少纵向花纹沟和横向花纹沟,并采用细花纹来解决相互矛盾的性能;采用新型骨架材料芳纶帘线部分或全部取代钢丝帘线。

(2)电动汽车轮胎的胎面胶应采用分子链末端改性SSBR或其与NR的并用胶作为生胶,高分散白炭黑/硅烷偶联剂作为主要填充剂,采用恒温混炼工艺。

5 结论

电动汽车是未来汽车的发展趋势,迫切需要开发配套的电动汽车轮胎。

(1)电动汽车轮胎要求充气压力大、滚动阻力和噪声低。基于降低轮胎滚动阻力的关键技术要求,本研究对12条国外不同品牌滚动阻力C级以上的205/55R16规格轮胎进行分析得出,滚动阻力低的轮胎具有质量较小,胎面胶硬度低、定伸应力大、60℃时的 $\tan\delta$ 较小的特点,骨架材料采用1层聚酯帘布+2层钢丝帘布+1层芳纶帘布的轮胎具有较小的平均滚动阻力因数。

(2)通过对12条抗湿滑性能B级以上的205/55R16规格轮胎分析得出,轮胎抗湿滑性能与质量的相关性不大,高抗湿滑性能轮胎胎面胶生胶采用纯SSBR或SSBR与少量NR的并用,并保证稍高的填充油用量,胎面胶0℃时的 $\tan\delta$ 大于0.550。

(3)从力学分析、结构设计、配方设计方面阐述电动汽车轮胎设计思路,提出开发合适的胎面花纹、减小轮胎质量、在不损失胎面胶抗湿滑性能的同时降低滚动阻力是电动汽车轮胎开发的关键。指出电动汽车轮胎胎面胶应采用分子链末端改性SSBR或其与NR的并用胶作为生胶,采用高分散白炭黑/硅烷偶联剂并用作为主要补强剂,胎面胶混炼采用恒温混炼工艺;采用新型骨架材料,如采用芳纶帘线部分或全部取代钢丝帘线。

参考文献:

- [1] 赵三明. 新能源汽车是中国的机会[J]. 中国工业报, 2017(2): 17.
- [2] Schuring D J, Futamura S. Rolling Loss of Pneumatic High Way Tire in the Eighties[J]. Rubber Chemistry & Technology, 1990, 63(3): 315-367.
- [3] Suzuki F. Rubbers for Low Rolling Resistance[J]. Tire Technology International, 1997(1): 87.
- [4] Nordsiek K H. Model Studies for the Development of an Ideal Tire Tread Rubber[A]. The 125th Meeting of Rubber Division, ACS. Indianapolis, Indiana, USA: 1984: 48.
- [5] Yoshimura N, Okuyama M, Yamagishi K. The Present Status of Research on Rolling Resistance in Japan[A]. The 151st Meeting of Rubber Division, ACS. Anaheim, California, USA: 1997: 31.
- [6] Wolff S. Chemical Aspects of Rubber Reinforcement by Fillers[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1996, 69(3): 325-346.
- [7] 邵光谱, 丁乃秀, 彭迁迁, 等. 白炭黑改性剂对溶聚丁苯橡胶性能的

- 影响[J].橡胶工业,2019,66(1):27-31.
- [8] 王检,刘力.不同结构白炭黑对绿色轮胎胎面胶性能的影响[J].橡胶工业,2019,66(2):106-110.
- [9] Reuvekamp L A E M, Ten Brinke J W, Van Swaaij P J, et al. Effects

of Time and Temperature on the Reaction of TESPT Silane Coupling Agent during Mixing with Silica Filler and Tire Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2002, 75(2): 187-197.

收稿日期:2019-08-16

Development Status and Design Ideas of Electric Vehicle Tires

ZENG Ji¹, QUE Yuanyuan¹, CAI Shangmai¹, CAI Qing¹, LI Wendong¹, XU Li¹,
ZHANG Junwei², LUO Jiangang²

(1. Beijing Research and Design Institute of Rubber Industry Co., Ltd, Beijing 100143, China; 2. Sichuan Haida Rubber Group Co., Ltd, Jianyang 641402, China)

Abstract: Electric vehicles are the development trend of the vehicles in the future, and so it is urgent to develop electric vehicle tires. Electric vehicle tires require high internal pressure, low rolling resistance, low noise, good wet skid resistance and light tire weight. By analyzing the tires with rolling resistance above class C, it was found that the tires of low rolling resistance were featured with light weight, low hardness, high stress at definite elongation, and small $\tan\delta$ at 60 °C. By the analysis of the tires with wet skid resistance above class B, it was concluded that the correlation between wet skid resistance and tire weight was little, and in the tread compound, pure solution styrene-butadiene rubber (SSBR) or its blend with a small amount of natural rubber (NR) should be selected as the raw rubber material and the level of extending oil should be slightly higher. Based on the analysis of mechanical properties, structural design, and compound design, it was identified that the key problem to develop electric vehicle tires was to reduce the rolling resistance without losing wet skid resistance, and the methods to solve that were to design appropriate tread patterns, reduce tire weight, adopt SSBR with modified chain-ends or its blend with NR as raw rubber, use silane coupling agent modified silica as main filler, use constant temperature mixing process for tread compound, and apply new skeleton material such as aramid cord.

Key words: electric vehicle tire; rolling resistance; wet skid resistance; noise; lightweight; SSBR; NR; silica

优科豪马扩大Advan UHP产品线 美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com)2019年10月4日报道如下。

优科豪马轮胎公司的Advan超高性能(UHP)产品线新增Advan Sport A/S+全天候轮胎(见图1)。

该产品线W和Y速度级别轮胎有88 500 km(55 000英里)胎面磨损担保,轮辋直径为406.4~533.4 mm(16~21英寸),有65个规格。

据优科豪马称,Advan Sport A/S+轮胎采用高用量白炭黑胶料,可大幅提高湿地和冬季条件下的制动性能,确保全年具有可靠的抓地性能。

该轮胎超大的胎肩花纹块可提高转弯性能;



图1 Advan Sport A/S+全天候轮胎

优化的胎侧结构可提高弹性和操纵响应性;优化的接地印痕确保压力均匀分布和长时间均匀磨损;四节距花纹块排列可降低路面噪声,有助于舒适、安静地驾驶。

(吴秀兰摘译 赵敏校)