

The Influence of Tyre Itself Factors on the Tire Rolling Resistance

Kun Wei¹, Xiaomin Liu¹, Zhonglei Man¹, Jie Su¹, Hui Song², Tingxi Li²

¹Inspection and Quarantine Technical Center of Shandong Entry & Exit Inspection and Quarantine Bureau, Qingdao Shandong

²Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong
Email: litx@sdust.edu.cn

Received: Aug. 20th, 2016; accepted: Sep. 11th, 2016; published: Sep. 14th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Reducing the rolling resistance of tires can play a profound effect on energy conservation and environmental protection, because energy conservation is the future development of the car. This article focuses on the principle of tire rolling resistance and their own conditions that affect the tire's rolling resistance. Wherein the condition of the tire itself includes tread rubber material, matrix material, the mixing process, the cord angle of the crown, the aspect ratio of the tire section, rim diameter, weight of the tire, tread and the bead structure. This paper has provided a reference for improvement and perfection of the tire manufacturing process.

Keywords

Tire Rolling Resistance, Influencing Factors, Tire Material, Tire Construction

影响轮胎滚动阻力的自身因素

魏 堃¹, 刘晓民¹, 满忠雷¹, 苏 杰¹, 宋 慧², 李廷希²

¹山东出入境检验检疫局检验检疫技术中心, 山东 青岛

²山东科技大学, 山东 青岛
Email: litx@sdust.edu.cn

收稿日期: 2016年8月20日; 录用日期: 2016年9月11日; 发布日期: 2016年9月14日

摘要

节能是未来汽车的发展方向，降低轮胎的滚动阻力可以起到节约能源和绿色环保的效果。本文主要讨论了轮胎滚动阻力产生的原理和轮胎自身的条件对轮胎滚动阻力的影响，其中，轮胎的自身条件包括胎面胶材料、骨架材料、混合工艺、胎冠帘线角度、轮胎断面高宽比、轮辋直径、轮胎重量、胎面花纹以及胎圈结构。这些研究为改进和完善轮胎制造方法提供了参考。

关键词

轮胎滚动阻力，影响因素，轮胎材料，轮胎结构

1. 引言

随着人们生活的提高，汽车已经走进了千家万户，汽车给人们带来方便的同时，也为我们带来了一些危害，比如：交通拥挤、环境污染、意外事故等。随着全球能源危机的影响以及人们环保意识的增强，节能减排和绿色环保已成为各大轮胎厂家设计和制造轮胎的重要目标[1]。而轮胎滚动阻力的减小，将有利于汽车能源消耗的减少。有关实验证明滚动阻力降低 10%，载重子午线轮胎和小型子午线轮胎分别可节省燃料 3.94%和 1.22%。还有试验表明，轻型载重汽车轮胎或轿车轮胎用 5%左右的燃料来克服轮胎滚动阻力；载重汽车轮胎也用 13%左右的燃料来克服轮胎滚动阻力[2]。因此，关于汽车滚动阻力的研究对于降低汽车尾气排放、减少汽车燃料消耗、防止大气污染等具有十分重要的意义。

轮胎滚动阻力的影响因素很多，根据轮胎滚动阻力产生的原因，目前国内外大致提出了以下两个主要的因素：汽车的行驶条件和轮胎自身条件。其中轮胎的自身条件又包括轮胎的制造材料和轮胎的设计结构。本文着重论述了胎面胶材料、骨架材料、混合工艺、胎冠帘线角度、轮胎断面高宽比、轮胎的重量、轮辋直径、胎面花纹和胎圈结构等轮胎的自身因素对滚动阻力的影响，为生产厂家准确测量轮胎滚动阻力提供可靠而有价值的参考。

2. 轮胎滚动阻力产生的原理

轮胎的滚动阻力是一种能量损失的量度，它定义为轮胎滚过单位距离所损耗的能量，也称为轮胎滚动损失。轮胎滚动损失主要包括轮胎滚动时粘弹性材料克服应变滞后所消耗的迟滞功、轮胎滚动时搅动空气引起的流体阻力消耗的功、轮胎与地面接触克服外摩擦消耗的功以及轮胎花纹拍打地面所消耗的功等，其中轮胎材料内部的粘弹滞后损失是最主要的[3]。

汽车在行驶中，轮胎转动会受到各种复杂的周期变形形式，对此的研究和描述是非常复杂的。但就轮胎滚动阻力而言，无论是接地部位还是胎侧，轮胎最主要的变形形式就是弯曲变形。当然，除此之外，接地部位的轮胎还会受到剪切变形和压缩变形的作用。在以上这些循环变形作用下，加之轮胎中各种橡胶及其复合材料的粘弹特性，使得轮胎在加载过程中释放出来的功在卸载过程中不能全部回收，这些能量损失就是粘弹滞后热损失，约占轮胎滚动阻力的 90%~95% [4]。

轮胎滚动行驶时，轮胎上的每一点都相当于小的弹簧或减振器，轮胎变形所产生的阻尼功损失不能全部收回，这个过程所产生的能量如图 1 所示。

3. 轮胎制造材料对轮胎滚动阻力的影响

轮胎滚动阻力减小的方法是减小轮胎材料的滞后损失，轮胎材料的滞后损失主要集中在胎面、胎圈、

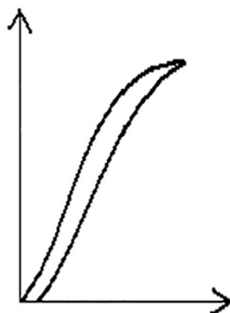


Figure 1. Hysteresis loss of the tire
图 1. 轮胎迟滞损失

三角胶、带束层、内衬层、胎侧胶、胎体帘布和基部胶等方面，图 2 为它们所占整个轮胎滚动阻力的百分比分别为 39%，14%，13%，8%，8%，7%，6%和 5%。下面主要介绍一下胎面胶、胎体帘线、带束层钢丝、混合工艺、轮胎花纹、轮胎的重量和胎圈结构等因素对轮胎滚动阻力的影响。

3.1. 胎面胶材料的影响

由于胎面滚动阻力约占整个轮胎滚动阻力的 50%，所以，使用低滚动阻力的胎面胶配方对轮胎滚动阻力的降低起到非常大的作用。胎面胶主要由各种橡胶、填充剂(如炭黑)、操作油、活性分散剂、硫化剂和其他辅助剂组成，不同材料对轮胎滚动阻力的影响也不同。

3.1.1. 橡胶

用于制造轮胎的胎面胶的主要原料是橡胶，因此，橡胶的选择对于降低轮胎滚动阻力有很大的影响。文兴[5]等人叙述了一种新的功能化合成橡胶，对于降低轮胎的滚动阻力有明显的效果。这种功能化的合成橡胶在制备过程中，采用新的钨系催化剂体系研制高顺式聚丁二烯橡胶，然后再将它与充油功能溶聚丁苯橡胶混合，采用白炭黑或炭黑填充，然后就可以用此类合成橡胶来制造低滚动阻力且具有最佳湿路面抓着力与耐磨性能平衡的轮胎。

另外，还有实验得出结论在负荷固定的条件下，不同胶种的胎面胶滚动阻力的大小为顺丁橡胶(f_{BR}) < 丁苯橡胶(f_{SBR}) < 天然橡胶(f_{NR})；而在变形条件固定的条件下，则为 $f_{NR} < f_{SBR} < f_{BR}$ [6]。

胎面胶若采用丁苯橡胶时，乳聚丁苯橡胶为胎面胶所制备的轮胎滚动阻力大于溶聚丁苯橡胶为胎面胶的轮胎滚动阻力。如果在采用溶聚丁苯橡胶的同时，加入适量的硅烷偶联剂和白炭黑，对于降低轮胎的滚动阻力更加有效[7]。

3.1.2. 油

影响抗湿滑性能和轮胎滚动阻力的主要因素之一是芳烃油用量。低滚动阻力配方中，芳烃油的用量一般都比较少，芳烃油用量越多，胶料抗湿滑性能越高，轮胎滚动阻力也随之增大；芳烃油用量越少，轮胎滚动阻力也跟着越小[8]。

3.1.3. 填充剂

炭黑作为橡胶体系的填充材料，对轮胎滚动阻力的影响较大。根据前人的研究，可以得出结论：炭黑颗粒越大，轮胎滚动阻力越大；炭黑使用越多，轮胎滚动阻力也越大。另外在减小炭黑用量的条件下，炭黑 N299 可使胎面胶的滚动阻力、湿牵引性能和耐磨性能获得较好的平衡。

目前，我们经常用的填充材料是白炭黑。它属于低燃料消耗性的填充剂，通常与硅烷偶联剂并用，制造的轮胎具有良好的抗湿滑特性和抗滚动阻力。当然用白炭黑作为胶料的填充剂也有许多问题尚未解

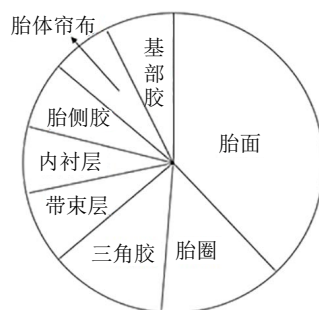


Figure 2. The influence of different parts of tire on rolling resistance
图 2. 轮胎各个部位对轮胎滚动阻力的影响

决，但是白炭黑填充制造轮胎已经实现了商品化，并且不断扩大，这对于炭黑行业来说也是一种挑战，炭黑行业也正在努力研究开发具有更多优良性能的新型炭黑[9]。

现在也有一些厂家选择短纤维作填充材料。试验表明，适当的使用短纤维，可使轮胎具有质量小、滚动阻力低、舒适安全、驾驶灵活稳定的优点。短纤维具有三种取向，即径向取向、周向取向和轴向取向，它的这些取向对轮胎性能有很大的影响，同时也是降低生热的关键因素[10]。

3.1.4. 其他材料

除了以上列出的胎面胶的几个主要的成分外，胎面胶的组成成分还有硫化剂和其他辅助材料。硫化剂用量增加，轮胎的滚动阻力也跟着增加[11][12]。另外，制造轮胎时添加偶联剂(如硅烷偶联剂)可以降低轮胎的滚动阻力[8]。胎面的原材料对轮胎滚动阻力的影响如下表 1 所示。

3.2. 骨架材料的影响

轮胎用的骨架材料通常包括两大类，一类是包括胎体层的帘线；另一类是带束层的钢丝。带束层和胎体层对轮胎的滚动阻力也存在较大的影响。

钢丝具有强度高的优点，用它作为轮胎的带束层，可以使滞后损失降低，同时也使轮胎的滚动阻力得到有效地降低；涤纶工业丝具有强力高、模量高、尺寸稳定、热收缩低等优点，可在低成本的投入下降低轮胎的滚动阻力；人造丝在高温条件下，具有良好的尺寸稳定性，用作轮胎的胎体是其它纤维所无法取代的；芳纶帘线具有模量高、质量小、动态性能好等优点，将其用在轮胎中，可使轮胎的耐久性能得到良好的改善，并且能够减轻轮胎的质量、降低轮胎的滚动阻力[13][14]。

此外，轮胎滚动阻力还受轮胎帘线层结构的影响。行驶面宽度小于带束层宽度能有效减小胎面与胎圈之间的变形，减小滞后损失，从而降低轮胎滚动阻力。有研究表明，采用新型带束层结构的 HT85 轮胎就是由中国公司生产的，其结构为由一层胶片从中间隔开两组交叉排列的钢丝帘线，这种设计结构能有效降低轮胎滚动阻力。另外，轮胎滚动阻力还受带束层角度的影响。小的带束层角度，可有效地降低轮胎滚动阻力[15]。从国内外轮胎的剖析结果来看，00 锦纶帘布作为保护层，具有一定角度的钢丝帘布作为工作层的带束层结构应用比较多[16]。

3.3. 混合工艺的影响

轮胎胶料的混炼工艺通常采用两段法，首先，第一段将所有炭黑与一部分生胶进行混炼，得到高炭黑填充量的母炼胶，然后，第二段再将剩余的生胶与一段母炼胶进行混炼，这种方法既可以降低轮胎滚动阻力，又不会损害轮胎的牵引性能和耐磨性能。还有试验表明，母炼胶停放时间减小，有利于轮胎滚动阻力降低，因为胶料停放时间过长，可能会有炭黑粒子迁移到高溶解度参数相中[17]。

Table 1. The influence of raw material on tire rolling resistance**表 1.** 胎面的原材料对轮胎滚动阻力的影响

	原材料	滚动阻力
橡胶品种	顺丁橡胶	低
	天然橡胶	高
	乳聚丁苯橡胶	高
	溶聚丁苯橡胶	高
操作油品种	芳烃油	中等
	环烷基油	低
炭黑颗粒	颗粒小	低
	颗粒大	高
操作油和炭黑用量	用量多	高
	用量少	低

4. 轮胎设计结构对轮胎滚动阻力的影响

轮胎按结构可分为三大类，一类是子午线轮胎，另一类是斜交轮胎，最后一类是带束斜交轮胎。其中，子午线轮胎具有较低的轮胎滚动阻力。子午线轮胎结构包括胎面、带束层、帘布层、胎侧、三角胶、胎圈等。设计轮胎时，若采用适当的轮胎结构可以降低滚动阻力，轮胎的设计参数有胎冠帘线角度、胎体帘布层数、轮胎断面高宽比和轮辋宽度等。下面主要介绍其中的几种。

4.1. 胎冠帘线角度的影响

试验证明，胎冠帘线角度减小，可以提高使轮胎的径向刚度，从而轮胎的变形减小，滞后损失降低，轮胎的滚动阻力也就减小；增大轮胎轴向刚性，惯性损失减小，滚动阻力降低。从而，我们得出结论，无论胎冠帘线角度增大还是减小，这均有利于降低轮胎滚动阻力[10]。

4.2. 轮胎断面高宽比的影响

通常情况下，轮胎断面高宽比与轮胎和地面的接触面积有直接关系，一般轮胎断面高宽比减小，轮胎滚动阻力也随之减小。因此，国内外的轮胎制造商开始向轮胎断面结构的高宽比小的方向发展。这是因为随着轮胎断面高宽比的不断减小，在一定的负荷和充气压下，轮胎不易发生变形，所以滞后损失减小，从而降低了轮胎的滚动阻力[18]。P. S. Pilla 的研究表明轮胎的滚动阻力 F 与轮胎的负荷 L 、下沉量 d 、粘弹性 V 以及印痕尺寸 a 有以下关系[6]：

$$F = K(LdVW/a)$$

其中： W 和 a 分别为印痕的宽度和面积； K 为常数。吴桂忠[13]等探索了不同行驶速度下，不同断面高宽比对轮胎滚动阻力的影响，实验结果如表 2 所示。

4.3. 轮辋直径的影响

轮辋直径对轮胎滚动阻力也有比较大的影响。当轮胎的轮辋直径增大时，轮胎的滚动阻力反而降低。但是当车速速度增大时，滚动阻力数值的差距会越来越小。产生这种情况的原因是当增大轮辋直径时，在相等的充气压和垂直负荷下，轮胎的相对变形会减小，轮胎的滞后损失会降低，从而轮胎的滚动阻力也会降低[13]。吴桂忠[13]等还探索了不同行驶速度下，不同辋直径对轮胎滚动阻力的影响，实验结果如表 3 所示。

Table 2. The influence of different cross-sectional aspect ratios on tire rolling resistance
表 2. 不同断面高宽比对轮胎滚动阻力的影响

行驶速度(km/h)	70 系列的滚动阻力(N)	65 系列的滚动阻力(N)
50	123.20	87.01
80	115.70	89.74
120	114.70	93.68

Table 3. The influence of different Rim diameters on tire rolling resistance
表 3. 不同辋直径对轮胎滚动阻力的影响

行驶速度(km/h)	5J*13 的滚动阻力(N)	5J*14 的滚动阻力(N)
50	89.1	75.9
80	98.1	79.9
120	101.0	85.9

4.4. 轮胎重量的影响

试验表明, 轮胎重量能在一定程度上也能影响轮胎的滚动阻力, 通常质量越小, 轮胎滚动阻力也越小。为此, 减小轮胎质量的一个有效方法是无内胎化。通常我们现在使用的汽车轮胎基本上都是无内胎子午线轮胎, 另外载重汽车的轮胎也在向无内胎化发展。有数据统计, 西欧的无内胎载重子午线轮胎的使用已接近 100%, 美国的无内胎轮胎的使用在 90%以上, 日本也已经超过了 55% [18]。

4.5. 胎面花纹的影响

轮胎与路面的接触主要是轮胎胎面花纹与路面的接触, 所以胎面花纹对滚动阻力的影响也不容忽视。轮胎胎面花纹与路面作用的机理比较复杂, 至今为止, 许多问题尚未得到清晰解答, 故在此只做简单分析。增大路面与轮胎胎面间的摩擦力是轮胎花纹的主要作用。因此轮胎花纹的设计对轮胎的生产具有重要的作用, 为车辆提供安全行驶的保证[19]。图 3 为几种常见的轮胎花纹。

一般来说, 纵向花纹轮胎的滚动阻力要低于横向花纹的。另外, 无论是横向花纹还是纵向花纹, 花纹沟条数越多, 滚动阻力也越大, 所以交叉花纹对胎面滚动阻力的影响最大。近年来, 仿生花纹成为研究热点, 利用仿生学原理设计类似动物掌纹、手指结构的胎面花纹, 可有效降低轮胎滚动阻力, 提高了轮胎综合性能[10]。另外, 胎面花纹沟细而浅可通过增大胎面刚性来降低滚动阻力。但对于中型载重子午线轮胎, 得出的结论与上述结果完全相反。因此, 花纹深度对滚动阻力的影响是比较复杂的, 轮胎滚动阻力降低的普遍趋势并不适用于所有情况。在使用过程中轮胎胎面磨损或人为磨损都会对轮胎滚动阻力产生影响。

4.6. 胎圈结构的影响

轮胎胎圈材料种类繁多, 结构复杂, 对轮胎滚动阻力的影响比较大。三角胶通常分为两段, 并且上段模量小于下段模量, 总体高度不能太大。因为总体高度过大, 变形区域容易发生上移, 从而胎肩变形增大, 能量损失也增大, 滚动阻力增大。材料配置时, 应该遵循刚度从上到下逐渐变大的配置顺序, 应变、应力合理分配, 从而降低能量损失、减小轮胎滚动阻力。另外, 采用的钢丝圈越接近于圆形的六边形结构越有利于轮胎滚动阻力的降低。因为钢丝增强层两侧分布产生的滚动能量损失小, 所以通常将它设置在钢丝圈两侧[17]。

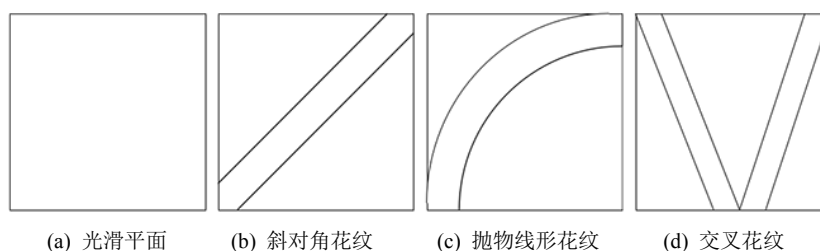


Figure 3. Several common tread patterns
图 3. 常见的几种轮胎花纹

5. 结束语

通过以上分析, 我们知道影响轮胎滚动阻力的自身因素很多, 某些影响因素之间还相互制约、相互联系。主要的影响因素是轮胎自身的性质, 因此, 我们在以后的发展中, 应该主要的研究胎体的材料和胎体的结构对轮胎滚动阻力的影响。但是, 鉴于安全标准的限定, 也不能一味的降低滚动阻力, 理想的情况是在降低轮胎滚动阻力的同时提高轮胎的综合使用性能, 这样才能使制备的轮胎更加畅销。

基金项目

国家质检公益性科研专项《轮胎安全环保关键技术与质控体系研究及应用》(201410067)。

参考文献 (References)

- [1] 段振亚, 樊丽娟, 王涛, 等. 轮胎滚动阻力影响因素试验分析[J]. 石油化工设备, 2016, 45(1): 6-10.
- [2] 薛风先, 王泽鹏, 朱由锋. 轮胎滚动阻力(因数)测定和数值计算方法[J]. 橡胶工业, 2006, 53(3): 174-178.
- [3] 叶进雄, 龚科家, 危银涛. 全钢载重子午线轮胎滚动阻力分析与试验[J]. 橡胶工业, 2008, 55(4): 245-250.
- [4] 韩秀枝. 子午线轮胎稳态滚动阻力及水滑特性的研究[D]:[硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2009.
- [5] 文兴. 轮胎用新的功能化合成橡胶[J]. 现代橡胶技术, 2015, 41(4): 18-26.
- [6] 罗俊. 影响轮胎滚动阻力的因素分析[J]. 自动化仪表, 2015, 36(2): 72-75.
- [7] 潘大海, 梅周麟. 低滚动阻力轮胎胎面胶的研究[J]. 橡胶工业, 2000, 20(9): 534-536.
- [8] 刘其林, 董长征. 降低轮胎滚动阻力方法的初步探讨[J]. 轮胎工业, 1999, 19(3): 131-136.
- [9] 那洪东. 降低轮胎滚动阻力的材料和技术[J]. 世界橡胶工业, 2006, 33(7): 22-26.
- [10] 赵敏. 降低轮胎滚动阻力的途径[J]. 轮胎工业, 2006, 26(10): 586-593.
- [11] 罗怀和. 胎面胶配方因素对滚动阻力的影响[J]. 轮胎工业, 1996, 16(4): 212-213.
- [12] 颜晋钧, 陈宏. 胎面胶对轮胎滚动阻力的影响[J]. 轮胎工业, 2007, 27(1): 16-18.
- [13] 吴桂忠, 郑光亮, 曲学新. 影响轿车子午线轮胎滚动阻力的因素初探[J]. 轮胎工业, 2001, 21(3): 131-134.
- [14] 陈忠茂, 罗吉良. 低滚动阻力轮胎的设计和开发探讨[J]. 中国橡胶, 2012(14): 38-40.
- [15] 于清溪. 轮胎滚动阻力特性的探讨[J]. 橡塑技术与装备, 2013, 39(2): 1-12.
- [16] 王登祥. 轮胎滚动阻力文献评述[J]. 轮胎工业, 1997, 17(12): 707-712.
- [17] 马改陵, 徐鸿, 崔义勇. 子午线轮胎滚动阻力的研究进展[J]. 橡胶工业, 2005, 52(8): 501-511.
- [18] 何燕, 张忠富. 轮胎滚动阻力影响因素及测试方法[J]. 轮胎工业, 2004, 24(4): 238-241.
- [19] 张兴皖, 朱家明, 王雪琪, 等. 轮胎花纹性能的优化设计[J]. 西昌学院学报·自然科学版, 2015, 29(3): 28-31.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>