

轮胎滚动阻力文献述评

王登祥

[上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司 200002]

摘要 对近 10 年来有关轮胎滚动阻力的文献进行述评,特别对最近几年的文献予以特别关注,联系到国际上各大公司的研究动向、美国朝野对设立轮胎滚动阻力标准之争,指出建立轮胎滚动阻力标准是大势所趋。综合各种文献,总结出影响轮胎滚动阻力的各种因素,最后归纳出需要高温滞后损失减小、低温滞后损失增大的胶料,达到既满足降低轮胎滚动阻力要求,又兼顾到轮胎湿牵引性。

关键词 滚动阻力,滞后损失,损耗因子,轮胎

如果说子午线轮胎开创了节能轮胎的新纪元,那么 70 年代的能源危机则是轮胎子午化的催生婆。降低了轮胎的滚动阻力也就节约了燃料消耗,达到了节能目的。自从 1989 年以来,世界各地发表的重要的有关轮胎滚动阻力的论文已超过 450 篇,围绕如何降低轮胎滚动阻力,各大轮胎公司在胎面配方设计上狠下功夫。米其林公司凭着自己在低轮胎滚动阻力方面的优势游说美国政府,要求美国交通部(DOT)对轿车轮胎原有的“统一轮胎质量分级”(UTQG)标准加上燃油经济性/轮胎滚动阻力等级指标。米其林是迄今为止轮胎公司中唯一竭力主张推行强制性的、以燃料经济性为目的的按轮胎滚动阻力等级分级的,它企图说服克林顿总统将降低轮胎滚动阻力放到他的全球气象活动计划中去^[1]。固特异、普利司通/费尔斯通和库珀等轮胎公司则通力反对这样一个分级系统,双方斗智斗法。在这场争斗中米其林公司差点获胜,甚至美国国家公路运输安全管理局(NHTSA)已经提出了法规草案:在美国的统一轮胎质量分级标准中,用轮胎滚动阻力/燃

料经济性等级来取代轮胎的温升等级,并以 1995 年 6 月作为法规投票最后期限;但是以固特异为代表的另一方成功地游说了美国国会,国会投票冻结 NHTSA 用于实施推行轮胎滚动阻力标准的资金^[2]。一场恶战虽然暂告平息,但是笔者认为推行轮胎滚动阻力等级是大势所趋,反对一方只是因为技术在略输一筹,要借推迟来赢得时间,好作技术上的准备。

根据现在掌握的信息,各个轮胎公司都在全力研究不损害轮胎牵引性的低滚动阻力胎面胶配方;合成橡胶公司在继续开发低滞后损失的聚合物的同时扩大溶聚丁苯橡胶(SSBR)的生产能力。据国际合成橡胶制造商协会(IISRP)预测,西欧对 SSBR 的消耗在 2000 年前可望达到 8.8 % 的年增长率,以满足对低滚动阻力轮胎日益增长的需要^[3];有消息说^[4],米其林集团在泰国投资的“米其林暹罗聚合物公司”,年生产能力 11 万 t,将于 1999 年开始生产 SSBR 和 BR,供应米其林生产“绿色轮胎”;生产白炭黑的德固萨公司抓住有利时机在比利时安特卫普投入 6 360 万美元,使 Si69 的生产能力达到 1.2 万 t,于 1996 年 10 月投产^[5];炭黑公司不甘于白炭黑大量用于胎面胶配方中(多达 80 份),要收复因降低轮胎滚动阻力所失去的市场,卡博特公司最近推出低滚动阻力炭黑 E-

作者简介 王登祥,男,53 岁。高级工程师。上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司轮胎研究所美国阿克隆分部 TRTR 公司总经理。参加的子午线轮胎研究开发项目多次获得上海市科技进步奖,并获得国家科技进步三等奖;曾获国家专利二项。先后发表论文 18 篇,并出版专著 1 本。

coblack CTX 2000,与白炭黑相匹敌,并申请了专利;美国通用汽车公司将2种滚动阻力测试程序列入了原配轮胎的配套考核标准。不管是意识到还是没有意识到,一场降低轮胎滚动阻力的竞争正在各个相关行业紧锣密鼓地进行。

1 轮胎的滚动阻力

降低滚动阻力10%,对小型子午线轮胎和大型载重子午线轮胎分别可节约燃料1.22%和3.94%。

汽车燃料的消耗,对装用轿车轮胎或轻型载重轮胎来说,燃料用途的3.4%~6.6%用于克服轮胎的滚动阻力;对装用载重子午线轮胎来说,燃料用途的12.4%~14.5%用于克服轮胎的滚动阻力^[6]。

1.1 滚动阻力的测定

1.1.1 测定胶料的损耗因子 $\tan\delta$

损耗因子 $\tan\delta$ 是非常有用的物理量,它是用来表征轮胎能量损失(滞后损失)的一个重要参数,与轮胎滚动阻力成正比关系^[7],这个数值越低,则轮胎的滚动阻力越小。 $\tan\delta$ 与轮胎所用材料的性能有关,轮胎配方人员想尽办法,改善轮胎用材料,降低 $\tan\delta$ 的值。

在具体应用上会遇到下列技术术语(ASTM D 2231—82):

如用剪切方式来测定得到的模量,用 G 来表示,分别有 G 和 G'' ;用拉伸或者压缩方法来测定得到的模量用 E 来表示,分别有 E 和 E'' 。

G' ——剪切弹性模量(或称剪切储存模量);

G'' ——剪切粘性模量(或称剪切损耗模量);

E' ——拉伸或压缩弹性模量(或称拉伸储存模量或压缩储存模量);

E'' ——拉伸或压缩粘性模量(或称拉伸损耗模量或压缩损耗模量)。

无论是用剪切方法测得的 G 和 G'' ,还是用拉伸或压缩方法测得的 E 和 E'' ,都用来计算损耗因子 $\tan\delta$ 。

定义损耗因子

$$\tan\delta = \frac{G''}{G'} = \frac{E''}{E'}$$

轮胎胎面胶的 $\tan\delta$ 一般在 0.32 左右,而 $\tan\delta$ 要达到 0.16 就是非常不容易的了。

目前在用的测定损耗因子 $\tan\delta$ 的动态模量仪有多种,如固特异公司的 Vibcotester,前尤尼罗伊尔公司的 Rheovibron 等,执行 ASTM D 2231 标准。

1.1.2 测定轮胎的滚动阻力

目前有些汽车公司和测试公司参照美国汽车工程师学会 SAE J-1269 制定了测试轮胎滚动阻力程序,已知的有2种:

(1)转鼓直径为 1.7 m 的转鼓试验,转速达到 $257.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ [见美国标准试验实验室(Standards Testing Labs)轮胎动态试验样本,1994],轮胎充气压力为 193 kPa,80%设计负荷^[8]。

(2)通用汽车公司制定的 TWP 4950 程序(双滚筒测试程序,每个滚筒直径 0.22 m,滚筒彼此间距 0.44 m),轮胎充气压力 310 kPa,80%设计负荷^[8]。

1.2 轮胎部件对轮胎滚动阻力的贡献^[9]

轮胎滚动阻力的成分及其比例为:轮胎部件胶料的滞后损失,占 90%~95%;轮胎移动的空气阻力+轮胎/路面摩擦,占 5%~10%。

表1为对典型的轿车子午线轮胎用2种室内轮胎滚动阻力试验测得的轮胎部件对滚动阻力的贡献。试验1和2分别采用上述转鼓直径为 1.7 m 的转鼓试验和转鼓直径为 0.22 m 的双滚筒转鼓试验。双滚筒转鼓试验测出的轮胎滚动阻力值将比 1.7 m 直径转鼓试验的值大 2.64 倍。

1.3 影响轮胎滚动阻力的外部因素^[6,9]

(1)充气压力。增加轮胎的充气压力将

表 1 典型的轿车子午线轮胎各部件对轮胎滚动阻力的影响(80 %设计负荷) %

轮胎部件	试验方法	
	1	2
胎面和下层胎面	33	73
胎冠部其余部件	28	21
胎侧	39	6

降低轮胎的滚动阻力(例:将轮胎的充气压力由 165 kPa 提高到 200 kPa ,轮胎的滚动阻力将降低 10 %)。

(2) 负荷。轮胎的滚动阻力与负荷的增加成正比。将滚动阻力除以负荷得出滚动阻力系数是一种很好的方法,可以比较不同规格轮胎的滚动阻力系数。美国通用汽车公司对 P215/ 70R15 轮胎的配套要求是达到滚动阻力系数 ≤ 0.00548 。

(3) 速度。在高速公路上以正常速度行驶,当操作状态稳定时(温度达到平衡),随着速度的增大,滚动阻力只有稍微增大。当冷启动时,滚动阻力较高,但是只要轮胎温度达到平衡,滚动阻力就逐渐减小。一旦轮胎速度高到出现驻波的速度,轮胎的滚动阻力将显著增加。

(4) 环境温度。较高的环境温度驱使轮胎达到较高的平衡温度,在这种环境下滚动阻力将轻微地降低。

(5) 轮胎的侧滑。在轮胎匀速直线行驶时,轮胎的侧滑或者说轮胎和路面之间的相对滑移是很小的;当刹车、加速或转弯时,这种滑移就加剧,增加了滑移也就增加了滚动阻力。

(6) 路面材料和路面粗糙度。路面材料只影响到轮胎,不影响到车轮悬挂系统;但是路面粗糙度就影响到车轮悬挂系统。路面材料轻度影响到轮胎的滚动阻力,但是路面越粗糙,轮胎的滚动阻力越大,而因悬挂系统的振动而带来的能量损失则更大。

(7) 道路曲率。就室内试验结果而言,道路的曲率半径越小,轮胎的变形越大,因而产生的轮胎滚动阻力越大。

(8) 积水路面。路面积水或雪将增加轮胎滚动阻力, 结冰则不会。

(9) 轮胎行驶时的空气阻力。轮胎行驶时的空气阻力对滚动阻力影响很小。

1.4 影响轮胎滚动阻力的内部因素

1.4.1 轮胎结构设计^[6,9]

(1) 轮胎结构。子午线轮胎的滚动阻力比斜交轮胎的要低 40 %。

(2) 轮胎规格。较大的轮胎产生较小的轮胎滚动阻力系数(因为滚动阻力系数 = 滚动阻力/ 负荷,大轮胎负荷高,所以滚动阻力系数小)。

(3) 轮胎质量。减小轮胎的质量总是能减小轮胎的滚动阻力。

(4) 断面高宽比。许多研究结果自相矛盾,但是有一点是清楚的:增加轮胎的断面高将减小轮胎的滚动阻力。

(5) 轮辋宽度。一般而言,增加轮辋的宽度将减小轮胎的变形,因而减小轮胎的滚动阻力。

(6) 部件影响。试验结果表明各部件对轮胎滚动阻力的影响如下:

接地印痕区	34 %
胎肩区	27 %
上胎侧	16 %
下胎侧	9 %
胎圈区	14 %

(7) 胎面结构设计。

胎面花纹:研究表明,有花纹胎面的滚动阻力比光胎面的大 8 %;块状花纹的滚动阻力比条形花纹的大 15 %左右。

胎冠半径:平坦的胎冠将具有较低的滚动阻力。

胎面宽度:较窄的胎面宽度将具有较低的滚动阻力。

胎肩厚度:较薄的胎肩将具有较低的滚动阻力。

花纹深度:较小的花纹深度具有较低的滚动阻力。因而轮胎使用到后期,其滚动阻

力有所改善。

(8) 轮胎帘线。

带束层角度:减小带束层角度将降低滚动阻力,因为限制了轮胎的变形。

帘线规格:尚没有文献提及增大帘线粗细、减少帘线根数对轮胎滚动阻力的影响。

胎体层数:尚没有文献讨论胎体帘布层多寡对轮胎滚动阻力的影响。

带束层材料:有几篇文章提到采用芳纶带束层改善了轮胎的滚动阻力,猜想至少有一部分理由是减小了轮胎的质量。

1.4.2 配方设计^[6,9]

(1) 滞后损失。轮胎的滞后损失是轮胎受力变形、再恢复其原来形状时的能量损失。粘弹性材料的滞后损失通过动态试验来确定。损耗因子 $\tan\delta(E''/E')$ 是一基本参数。

(2) 胎面胶料。胎面胶是影响轮胎滚动阻力的关键部件,这基于胎面胶所在的部位和材料的用量。取决于不同的轮胎规格和试验条件,胎面胶产生的滞后损失占轮胎总的滚动损失的 25%~50%不等。因而胎面胶配方历来是研究滚动阻力的焦点。高达 80 份的 SBR(SSBR)和 20 份的 NR 并用已成为原配轿车轮胎胎面配方的基本特色。

(3) 性能的平衡。采用现有的具有低滚动阻力的原材料通常要影响轮胎的使用性能,通常损害轮胎的牵引性和耐磨性,特别是轮胎的湿牵引性。

(4) 理想胶料。一种理想的胎面胶料应该在低温下(-20~20)具有较高的 $\tan\delta$ (得到好的牵引性);在较高的温度下(50~70)具有较低的 $\tan\delta$ (得到低的滚动损失)。测试比较需在相同的频率下进行。频率范围一般在 1~110 Hz。

(5) 设计低滚动阻力配方考虑的方面。首先要考虑低滚动阻力、牵引性(干牵引性和湿牵引性)、原材料成本;其次要考虑耐磨性、抗龟裂性、轮胎硫化条件、工艺操作(密炼和挤出)性能、胶料模量以及硬度。

1.5 原材料对轮胎使用性能的影响

胎面配方的原材料对轮胎使用性能的影响列于表 2^[9]。

表 2 胎面配方的原材料对轮胎使用性能的影响

原材料类型	滚动阻力	牵引性	耐磨性
聚合物品种(玻璃化温度)			
NR(-75)	很低	中等	中等
乳聚 SBR(-55)	高	高	高
溶聚 SBR(-40)	高	很高	低
溶聚 SBR(-75)	低	低	中等
BR(-100)	低	很低	很高
炭黑粒径			
小	高	高	高
大	低	低	低
操作油品种			
芳烃油	中等	高	低
环烷基油	低	中等	中等
炭黑和油的填充量			
高	高	高	中等
低	—	低	高

注:1)评价分 5 个档次:依次为很高、高、中等、低、很低;2)滚动阻力越低越好,牵引性越高越好,耐磨性越高越好;3)溶聚 SBR(-40)指 Cariflex 1215,溶聚 SBR(-75)指 Cariflex 1210。

NR 虽然具有很低的滚动阻力,但是 NR 的填充量受到限制,不及 SR。

1.6 轮胎生产工艺条件对滚动阻力的影响

(1) 硫化外温。降低轮胎的硫化外温,对降低轮胎的滚动阻力有好处,但是将相应延长轮胎的硫化时间,从而降低了生产效率。

(2) 轮胎的不均匀性。Schuring^[6]和 Bandyopadhyay^[9]的文章都提到轮胎的不均匀性对轮胎的滚动阻力影响不大。

2 结语

要降低轮胎的滚动阻力,首先在选择聚合物上着眼,在考虑降低轮胎的滚动损失的同时,必须兼顾到轮胎的牵引性(特别是轮胎的湿牵引性)以及轮胎的耐磨性。

低滚动损失要求胶料在较高的温度下具有较低的 $\tan\delta$;高的湿牵引性要求在低温下

具有较高的 $\tan\delta$ 。

要达到好的湿牵引性,应提高聚合物的玻璃化温度;要达到低的滚动损失,应使聚合物网络自由链末端浓度减小,以改进炭黑的分散,炭黑的细分散能使聚合物有更好的力学性能^[10]。因此通过对 SBR 的改性——控制其组成和微观结构,使玻璃化温度、滞后损失和拉伸强度三者之间达到最好的平衡。最近报道的氢化锡偶联型 SBR 硫化胶,玻璃化转变温度降低、高温滞后损失减小、低温滞后损失增大、滚动阻力小、湿牵引性好,就是成功的一例^[11]。

在胎面胶配方方面,除了米其林公司沿用多年的高用量白炭黑和大用量硅烷偶联剂 Si69 组成的智能配方(Smart Compound)外,卡博特公司新近推出的低滚动阻力炭黑品种也已经登场,参与竞争^[12,13]。在下一个世纪来临之前,生产出更有效的节能轮胎,是我们必须要也一定会解决的课题。

参考文献

- 1 Miles Moore. 4 tire makers against rolling resistance plan. Tire Business, 1995-02-20(3)
- 2 Smithers Scientific Services Inc. The U. S. Congress has voted to block funding of any attempt by NHTSA. Smithers Report, 1995(10):2
- 3 Smithers Scientific Services Inc. Solution SBR consumption in western Europe. Smithers Report, 1996(3):3
- 4 Anon. Michelin enters into JV. Rubber & Plastics News, 1996-01-22(4)
- 5 Anon. Degussa boots capacity. Rubber & Plastics News, 1996-11-11(5)
- 6 Schuring D J, Futamura S. Rolling loss of pneumatic highway tire in the eighties. Rubber Chemistry & Technology, 1990, 63(3):315~367
- 7 庄继德. 汽车轮胎学. 北京:北京理工大学出版社, 1996:164
- 8 Schuring D J. The rolling loss of pneumatic tires. Rubber Chemistry & Technology, 1980, 53(3):715
- 9 Samar Bandyopadhyay, Arup K Chandra, Mukhopadhyay R. An overview of tyre rolling loss. India:R & D Center, J k Industries Ltd., 1992. 20~53
- 10 陈士朝. 溶聚丁苯胶的技术进展. 合成橡胶工业, 1997, 20(1):7
- 11 Yuichi Kitagawa, Akira Saito, Yasunobu Nakafutami. New technology polymer for tires. Rubber World, 1996, 214(6):38
- 12 Wang Mengjiao, Mahmud K, Murphy L. Carbon/silica dual phase filler, a new generation reinforcing agent for rubber part ——Characterization of carbon/silica dual filler. In: CA, USA. ACS, Rubber Division 151th Meeting, Anaheim:CA, USA, 1997. No. 24
- 13 William J Patterson, Wang Mengjiao, Brown T. Carbon/Silica Dual Phase Filler, a new generation reinforcing agent for rubber part ——Application of carbon/silica dual filler to tire tread compounds. In: CA, USA. ACS, Rubber Division 151th Meeting, Anaheim:CA, USA, 1997. No. 25

收稿日期 1997-07-04

Review for Papers on Tire Rolling Resistance

Wang Dengxiang

[Shanghai Tire and Rubber (Group) Corp. Ltd. 200002]

Abstract A review for the papers on tire rolling resistance published last 10 years was made with the emphasis on the papers published in recent years. It was pointed out based on the analysis of the research activities in global tire companies and the dispute about working out the standard of tire rolling resistance in America that it was the inexorable trend to work out the standard of tire rolling resistance. The effective factors on the tire rolling resistance were drawn from the vari-

ous papers and it was concluded that the compound with low hysteresis at high temperature and high hysteresis at low temperature could meet the requirements of both low rolling resistance and high wet traction of tire.

Keywords rolling resistance ,hysteresis , $\tan\delta$,tire