

轮胎的摩擦与粘弹性

芥川惠造等著 王秀霞摘译 谢忠麟校

汽车轮胎中橡胶的摩擦行为与轮胎所要求的基本性能密切相关,在各种路面(如干、湿、结冰或恶劣路面等)状况下,轮胎摩擦起着把发动机的驱动力和制动器的制动力传送给路面,并产生转弯向心力的作用。从安全性方面考虑,这些作用都要求轮胎的摩擦力要大;而从提高车辆运输效率和降低油耗方面考虑,则要求轮胎的滚动摩擦力要小。因此,轮胎的运动性能标准规定:通用轮胎在沥青路面上的摩擦因数为 $1.0\sim 1.2$,在湿路面上的摩擦因数为 $0.4\sim 1.0$,滚动摩擦因数为 $0.01\sim 0.02$ 。汽车及轮胎行业都从实用性角度出发,对轮胎的摩擦行为进行了反复研究。1929年Ariano发现橡胶的摩擦与金属的摩擦不同,它具有随滑动速度提高而增大的特点,从而把橡胶粘弹性作为橡胶摩擦理论形成的主要原因进行研究。本文以干路面上轮胎摩擦行为与橡胶摩擦行为之间的关系为重点进行论述。

1 轮胎的摩擦行为

一般来讲,充气轮胎的摩擦行为在接地面内同时形成附着区和滑动区,其比率为车辆运动状态的函数,这一点与橡胶摩擦行为不同。当轮胎旋转时,因施加了负荷而产生下沉量,因此轮胎的滚动半径减小,在接地部分轮胎的周向速度与对路面的相对速度之间产生了差值,从而形成了附着区和滑动区的分布。如图1所示,胎面胶在产生速度差的方向变形,当因变形产生的力小于橡胶与路面之间发生的摩擦力(附着摩擦力——以实线表示)时,则不会产生滑动。此外,还可以通过计算滑动摩擦因数与接地压力的乘积求

出在滑动区内产生的滑动摩擦力(以虚线表示)。

轿车轮胎(195/65R15)在干路面上速度为 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、负荷为 3.43 kN 时的制动力与滑动因数之间的关系见图2。

由图2可见,轮胎的制动力随滑动因数的增加先是增大,当滑动因数达到约 0.1 后,制动力开始逐渐减小。这是因为接地面内附着区与滑动区的比例随滑动因数的变化而改变。当采用自动防抱死装置(ABS)时,为了

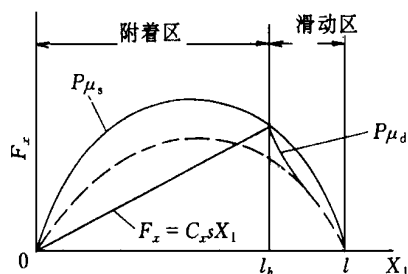


图1 制动时在轮胎接地面内发生的周向摩擦力分布

图中 $P\mu_d$ 应指向虚线——编者注

P —接地压力; F_x —摩擦力; X_1 —接地面内周向位移;

s —滑动因数; C_x —周向剪切弹簧常数; μ_s —附着

摩擦因数; μ_d —滑动摩擦因数

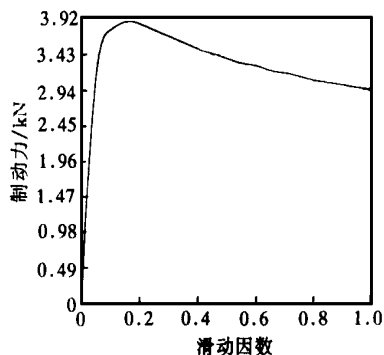


图2 制动力与滑动因数之间的关系

最大限度地发挥轮胎的制动力,应很好地控制滑动因数。在轮胎完全抱死的状态下,会产生滑动因数为 1.0 的制动力。制动力是在轮胎接地面内发生的力,它可以通过将图 1 所示的摩擦力分布情况在接地面内进行积分而求出。这可以利用 Fiala 轮胎模型扩大后的模型轮胎加以说明。当接地面内接地压力分布呈近似于二次抛物线时,发生在附着区内前后的力 F_x' 可按下式计算:

$$F_x' = \frac{C_x s W l_h^2}{6} \quad (1)$$

式中, W 表示接地宽度, l_h 表示滑动起始点处的周向位移。所谓滑动起始点是指当胎面胶变形而产生的力超过附着摩擦力时开始滑动的点。 l_h 可以用下式表示:

$$l_h = l - \frac{C_x l^3 W}{6 F_z \mu_s} s \quad (2)$$

式中, F_z 表示负荷, l 表示接地长度。另外,发生在滑动区内前后的力 F_x'' 可用下式表示:

$$F_x'' = \frac{6 \mu_d F_z}{l^3} \left\{ \frac{l^2}{4} (l - l_h) - \frac{1}{3} \left[\frac{l^3}{8} - (l_h - \frac{l}{2})^3 \right] \right\} \quad (3)$$

轮胎制动时在接地面内发生的力可用 $F_x' + F_x''$ 求出。

利用公式(1)~(3),可以计算出当胎面周向剪切弹簧常数 C_x 变化时制动力与滑动因数之间的关系,结果见图 3。由图 3 可见,随着 C_x 的增大,赋予制动力最大值的滑动因数减小。滑动因数越小,在低滑动区的制动力越大。用这种方法可以得出当附着摩擦因数 μ_s 和滑动摩擦因数 μ_d 变化时制动力与滑动因数之间的关系,结果分别见图 4 和 5。由图 4 可见,随着 μ_s 的增大,制动力最大值增大。由图 5 可见,随着 μ_d 的增大,在滑动因数较大的范围内,即轮胎抱死的状态下,制动力增大。

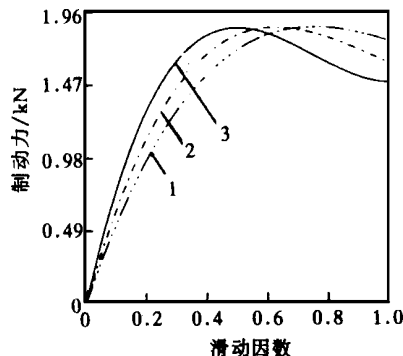


图 3 轮胎模型中胎面周向剪切弹簧常数 C_x 变化时制动力与滑动因数的关系

1 — $C_x = 1.0$; 2 — $C_x = 1.2$; 3 — $C_x = 1.5$

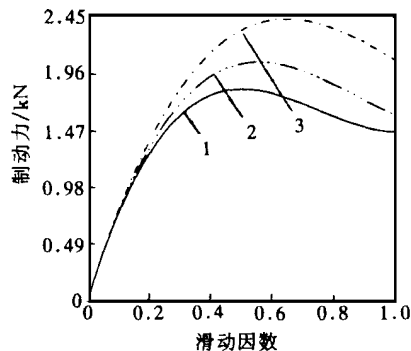


图 4 轮胎模型中胎面附着摩擦因数 μ_s 变化时制动力与滑动因数的关系

1 — $\mu_s = 1.0$; 2 — $\mu_s = 1.2$; 3 — $\mu_s = 1.5$

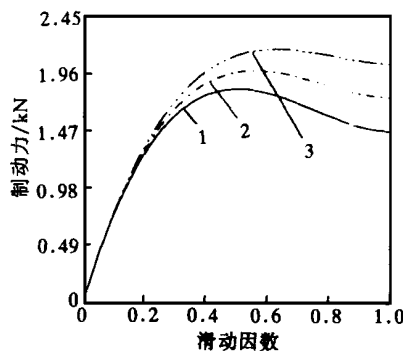


图 5 轮胎模型中胎面滑动摩擦因数 μ_d 变化时制动力与滑动因数的关系

1 — $\mu_d = 1.0$; 2 — $\mu_d = 1.2$; 3 — $\mu_d = 1.4$

通过以上轮胎模型的计算结果可以看出,控制轮胎摩擦力的关键是掌握胎面剪切弹簧常数 C_x 、附着摩擦因数 μ_s 和滑动摩擦

因数 μ_d 。其中 C_x 不仅可以通过采用材料配方设计技术计算橡胶模量的方法来控制,而且还受因胎面花纹形状和沟深所致花纹块刚度的影响。在进行材料的配方设计时,应考虑轮胎的使用温度和速度。同样地, μ_s 和 μ_d 也可以通过采用材料配方设计技术控制橡胶粘弹性的方法而得到。一般在进行轮胎胎面配方设计时,通常利用由经验所得的温度范围与轮胎性能之间的关系(见图6)。由于轮胎的摩擦力和滚动阻力与橡胶部件变形导致的能量损耗有关,因此利用形变指数的分析方法可以得到每个温度范围内粘弹性值与轮胎性能的关系。

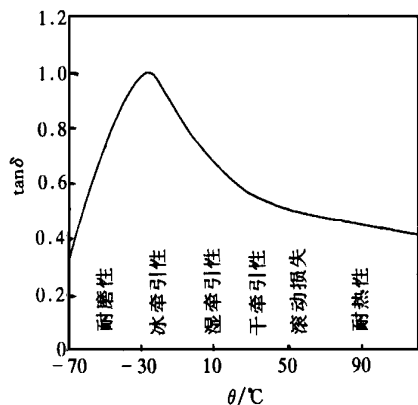


图6 轮胎性能与胎面胶动态粘弹性温度范围的关系

2 橡胶的摩擦行为与粘弹性

2.1 附着摩擦和滞后摩擦

根据橡胶摩擦理论可知,橡胶与路面之间产生的摩擦大致分为附着摩擦和滞后摩擦。Moore 等认为,在轮胎接地面内,附着摩擦因数 μ_s 和滑动摩擦因数 μ_d 分别对应于附着摩擦和滞后摩擦。附着摩擦可以用橡胶表层分子因热活化而产生的粘滑现象来说明。也就是说,附着是指由于橡胶分子与路面之间形成结合和切断,使橡胶分子发生伸缩,从而引起能量损耗的现象。这已成为利用橡胶粘弹性说明附着摩擦的背景。另一方面,滞

后摩擦与橡胶内部的能量损耗有关,如图7所示,当越过凹凸不平的路面时,橡胶边滑动边反复变形,以热的形式放出的能量即表现为滞后摩擦。这是由于在湿路面上,橡胶与路面之间的附着力显著减小,对橡胶内部产生的损失几乎没有影响,因此可以认为滞后摩擦是轮胎完全抱死时产生的现象。虽然微观行为与宏观行为之间存在差别,但橡胶的摩擦现象仍可以用橡胶粘弹性来说明。

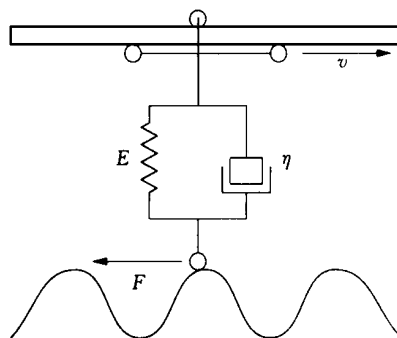


图7 滞后摩擦模型

E —模量; η —粘度; v —速度; F —摩擦力

2.2 橡胶的摩擦与微观结构

一般来讲,橡胶的粘弹性不仅受橡胶分子微观结构和胶料配方的影响,而且还受温度和频率的影响。图8示出了贮存模量 E' 和损耗因子 $\tan \delta$ 与温度 θ 和频率 ω 的关系。随着温度从低温区向高温区变化, E' 以 10^2 级急剧减小,从玻璃态转变为橡胶态。另外,在 E' 急剧变化的转变温度范围内, $\tan \delta$ 出现峰值。

以 SBR 中苯乙烯质量分数作为参数来改变其微观结构, SBR 硫化胶的拉伸贮存模量 E 和 $\tan \delta$ 与温度的关系分别示于图9和10。由图9和10可见,随着苯乙烯质量分数的增大, E 转变范围的温度和 $\tan \delta$ 的峰值温度升高。这与分子的凝聚性有关,即随着温度的升高,橡胶分子链的分子运动加剧,使分子凝聚解开,引起模量降低,于是从玻璃态转变为橡胶态,橡胶分子链的流动性随之增加,故内部粘度降低, $\tan \delta$ 减小。由于苯乙烯质

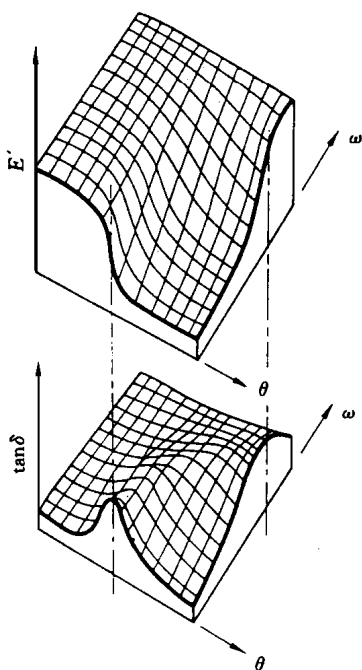


图8 贮存模量和损耗因子与温度和频率的关系

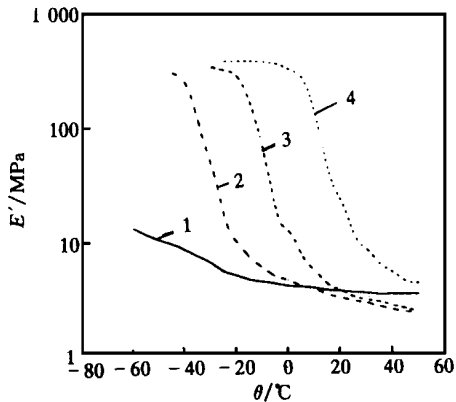


图9 贮存模量与温度的关系

1—苯乙烯质量分数为0;2—苯乙烯质量分数为0.235;3—苯乙烯质量分数为0.45;4—苯乙烯质量分数为0.60

量分数的增大使分子凝聚的频度增加,从而促使转变温度升高。

同种胶料的附着摩擦因数和滞后摩擦因数与温度的关系分别示于图11和12。

可以看出,摩擦因数与温度的关系和 $\tan \delta$ 与温度的关系相同,即都是在 E 急剧变化的转变温度范围内具有峰值。因此可以认为,聚合物的分子运动性支配着橡胶的摩擦

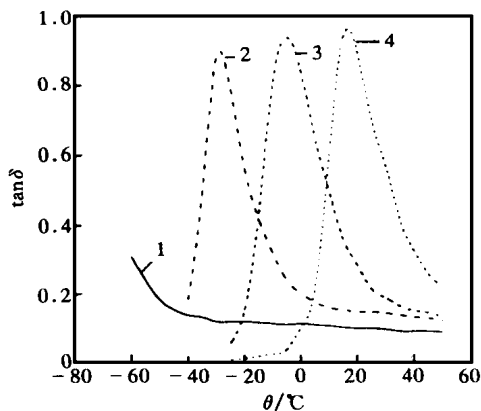


图10 损耗因子与温度的关系

注同图9

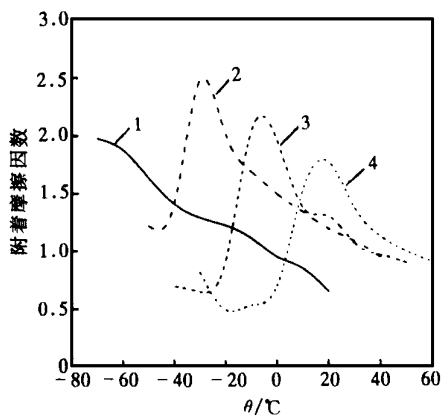


图11 附着摩擦因数与温度的关系

注同图9

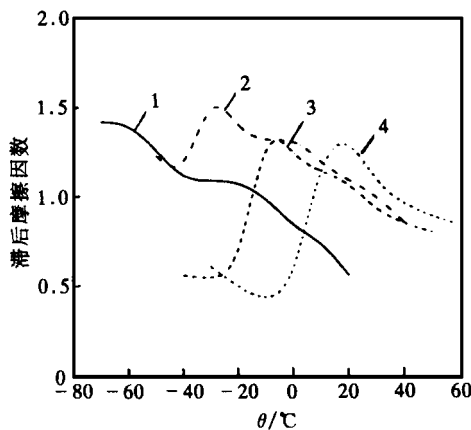


图12 滞后摩擦因数与温度的关系

注同图9

行为。在摩擦因数峰值的高温区,由于橡胶分子链的分子运动加剧引起了内部损失减少

和刚性下降,从而导致摩擦因数减小。而在摩擦因数峰值的低温区,随着温度的升高,由于分子运动加剧,接触面上橡胶的流动性促使真实的接触面积增大,导致摩擦因数增大。由此可见,在摩擦因数显示峰值的范围内,受滑动速度、温度和压力的影响非常显著。从分子动力学角度来看,在固体接触面上橡胶分子的运动性是摩擦理论的基础。作为表征橡胶与固体接触面行为的物理量——摩擦力,可以用接触面积、接地压力、滑动速度、温度和接触时间的函数来表示。由图8可见, $\tan \delta$ 峰值有随测定频率增大而向高温区移动的倾向。在通用轮胎胎面胶以速度作为参数时摩擦因数与温度的关系中也出现了这种倾向(见图13),这可以用温度-时间换算法进行说明。

将图13中的摩擦因数峰值温度与滑动速度的函数作图,如图14所示。由图14可见,峰值温度随着滑动速度的增大而升高,滑动速度在 1.0 cm s^{-1} 以下的范围内,当滑动速度提高10倍时,摩擦因数的峰值温度约增加 15°C 。Bulgin 等也得到了同样的结果。这表示用温度-时间换算法则可以说明橡胶的摩擦现象。因此,用温度-时间换算法分析橡胶摩擦的微观行为如下:采用图13的胶料在 50 Hz 下测定的 $\tan \delta$ 峰值温度约为 -20

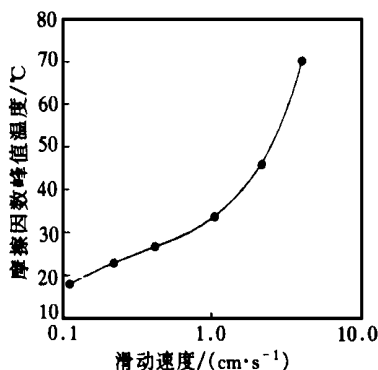


图14 摩擦因数峰值温度与滑动速度的关系

$^\circ\text{C}$ 。而滑动速度为 1.0 cm s^{-1} 时的摩擦因数峰值温度为 35°C ，两者之间约增加 55°C 。从图14的斜率可见，这个温度相当于滑动速度增加了 $10^{3.7}$ 倍，因此可以推算橡胶与路面之间橡胶分子的频率为 0.23 MHz 。而且，每个周期橡胶分子的振幅为 40 nm （用滑动速度 1.0 cm s^{-1} 除以频率 0.23 MHz 而得）。从以上计算结果可见，图13中橡胶摩擦的微观行为用温度-时间换算法分析可知，橡胶分子是以 0.23 MHz 的频率，在 40 nm 的距离内反复发生附着-脱离而变形。这表明存在着最大限度发生橡胶摩擦的最佳温度和最佳滑动速度区。假定这种变形遵从仿射形变，当交联点间距离为 10 nm 时，橡胶分子链约受到 300% 的变形，可以推断在摩擦面上橡胶分子链产生大变形和高频率的动态振动。

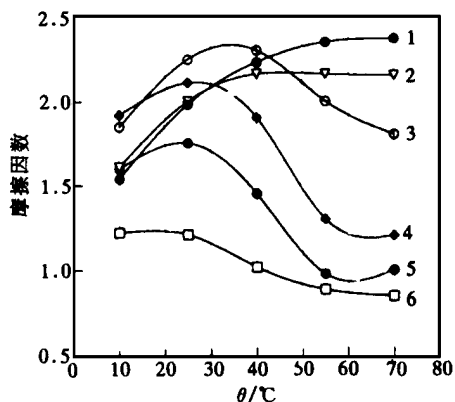


图13 摩擦因数与温度的关系

1— $v=4.02 \text{ cm s}^{-1}$; 2— $v=2.16 \text{ cm s}^{-1}$; 3— $v=1.06 \text{ cm s}^{-1}$; 4— $v=0.42 \text{ cm s}^{-1}$; 5— $v=0.22 \text{ cm s}^{-1}$; 6— $v=0.11 \text{ cm s}^{-1}$

3 轮胎的摩擦与配方设计技术

当采用橡胶配方设计技术使轮胎摩擦达到最佳化时,应在充分了解了轮胎的胎面温度和滑动速度之后再改变橡胶的微观结构,或是通过添加其它配合剂来控制胶料粘弹性转变区与温度的关系。图15示出了采用规格和花纹都相同、而胎面胶不同的11种轿车轮胎在干沥青路面上制动时峰值摩擦因数数值(%)与形变指数(即以 $\tan \delta / |E^*|^{0.3}$ 作为粘弹性指标,其中 $|E^*|$ 表示复数模量)的关系。

一般来说,橡胶的能量损耗按变形类型

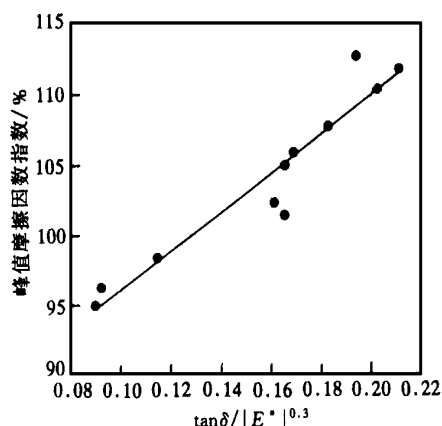


图 15 轿车轮胎在干沥青路面上制动时峰值摩擦因数指数与形变指数的关系

可分为恒应力、恒变形和恒能量 3 种,对于各种变形,能量损耗与损耗柔量、损耗模量和 $\tan \delta$ 成正比例。但是,实际的轮胎变形是很复杂的,由于这几种变形是混合存在的,因此轮胎的制动性能可以用形变指数来表示。采用该项指标,就可以利用橡胶粘弹性来控制干沥青路面上制动时的峰值摩擦因数。但是,粘弹性指标 $\tan \delta / |E^*|^{0.3}$ 外插至零的点不通过原点。这与上述轮胎模型的计算结果有所不同,因为在实际中轮胎制动力还包括

除了胎面胶以外的胎体等部件受变形而产生的力,因此,不能只用胎面胶的粘弹性来说明轮胎的全部制动力。而且,橡胶的摩擦现象在微观上还要考虑是大变形且高频率的高分子链运动,因此不能用低变形区的粘弹性来评价,而应利用大变形区的橡胶动态粘弹性,并联系微观水平的摩擦现象来阐明。

4 结语

综上所述,像汽车轮胎运动性能这样的宏观行为是受橡胶分子运动那样的微观行为所支配,这一点是轮胎橡胶配方设计人员十分感兴趣的问题。轮胎的摩擦现象随车辆使用条件的不同而呈多样化,为了满足这一条件而要进行各种各样的配方设计和粘弹性控制。特别是近年来,低滚动摩擦和干、湿摩擦并存已成为许多轮胎厂家的配方设计技术课题。乍一看轮胎只是一个黑黑的圆圈,可是在轮胎橡胶材料的开发上却投入了许多经费和人力,其技术内容在不断进步。

译自日本“日本 ゴム协会誌”,

70[4], 204~210 (1997)

炼胶工艺计算机监控系统研制成功

杭州中策橡胶(股份)有限公司新安江分厂与浙江大学智能公司联合研制成功炼胶工艺计算机监测系统。采用该系统后,现场设备的即时电流可用数值表示方法反映在总貌图中,也可用棒图形式直观地反映在分组图中;现场设备最近 1 h 的电流信号以模拟图形式反映在细目图中;在趋势图中,可随意调出以前的模拟图,且有图像放大功能,便于工艺分析。该系统有打印生产报表的功能,可打印出每班的生产情况。如某班某机台生产

的车数及每车的起始时间、结束时间和工作时间等。全部数据都以文件形式存放在硬盘中,该硬盘可存放 10 年左右的数据。

该系统于 1997 年 11 月 1 日正式投入使用。混炼胶一次合格率达到 94%,提高 10%。塑炼胶合格率达到 92%,提高 5%。外胎机床测试耐久性提高了 46%。

经有关专家认定,该系统技术先进,功能全面,且投资小,效益大。特别是开炼机塑炼的监控技术在国内轮胎行业尚属首家。

[杭州中策橡胶(股份)有限公司新安江分厂

杨小灵 郭好忠 骆光祥供稿]