

汽车轮胎与公路路面附着系数的研究

刘长生

(中南林学院工业学院 长沙市 410004)

摘 要: 对汽车轮胎与公路路面的附着系数进行了较详细地分析与计算公式的推导。指出,附着系数是一个极值函数,在轮胎气压、车辆载荷和路面粗糙度这三项指标其中之一选择不当时,都会出现附着系数的最小值而影响行车安全。对公路施工,司机安全驾驶和交通事故的判断,提出了基本建议。

关键词: 附着系数; 路面形貌; 摩擦学分析计算; 综合评价

汽车在公路上行驶时,时常会由于轮胎打滑而产生事故。在交警部门调查时,车况良好,车速也在允许范围内,操纵又没有失误,之所以出现因轮胎打滑而产生的事故,是由于路面太滑的缘故。公路部门则说,公路是按国家标准修建的,路面粗糙度也是经过有关部门验收合格后,才交付使用的。另外,交警查验事故地段的路面,也认为确属正常。那么,到底是谁的原因造成的事故呢,许多类似情况令交警部门难以做出准确的判断。本文从摩擦学的角度对这一问题做一分析。

1 附着系数

要保证汽车在公路上安全行驶,轮胎胎面与路面必须有足够的摩擦力(附着力),通常用附着系数来表示。附着系数 φ ,是路面对轮胎切向应力的最大值 τ_{\max} 与路面的法向应力 P_G 之比^[1]:

$$\varphi = \frac{\tau_{\max}}{P_G} \quad (1)$$

2 轮胎与路面的摩擦

从摩擦学上讲,轮胎胎面与路面是一对相接触运动的两个物体,也称一对摩擦副。在这对摩擦副中,由于胎面的制造误差以及路面的材料和施工的要求,使它们的接触表面都存在有大量的微小凸凹不平之处。这些凸起部分,称为微凸体;凹下去部分,称凹谷(峰谷)。

由于路面上的微凸体的高度不一致。当车辆处于正常载荷时,胎面与路面仅在接触区内的许多小

块面积上相接触(称接触斑点)。这些斑点的总和称为轮廓接触面积 A_G ,轮廓接触面积上的垂直(法向)载荷,则称为轮廓法向接触应力 P_G 。

2.1 胎面与路面的摩擦力

由于胎面与路面有摩擦存在,轮胎运动时必然会产生摩擦力。摩擦力可以理解为路面对胎面相对移动的阻力,其方向与轮胎运动方向相反。胎面与路面之间的摩擦,是属于固体的外摩擦。外摩擦力的大小,是由轮胎沿切线方向的位移所决定的。因此,要计算附着系数,必须首先确定胎面与路面之间的摩擦力 T 。分析表明,胎面与路面的摩擦力包括两个部分:一部分取决于路面的粗糙度、路面种类、污染(油污)、湿度以及轮胎材料和花纹等,这些称为粘附分量 T_M ;另一部分则是轮胎移动中,路面的微凸体压入胎面表层橡胶而使之产生变形时的阻力,称为变形分量 T_B 。应当指出,这两个分量是相互关联的。当计算总摩擦力时,作为近似计算,可采用两者算术和^[2]:

$$T = T_M + T_B \quad (2)$$

2.2 影响摩擦力的因素

为了提高轮胎与路面的摩擦力(附着力),防止其在路面上打滑。胎面均设计了各种花纹。实际测试表明,胎面花纹对轮胎的工作性能起着十分重要的作用。

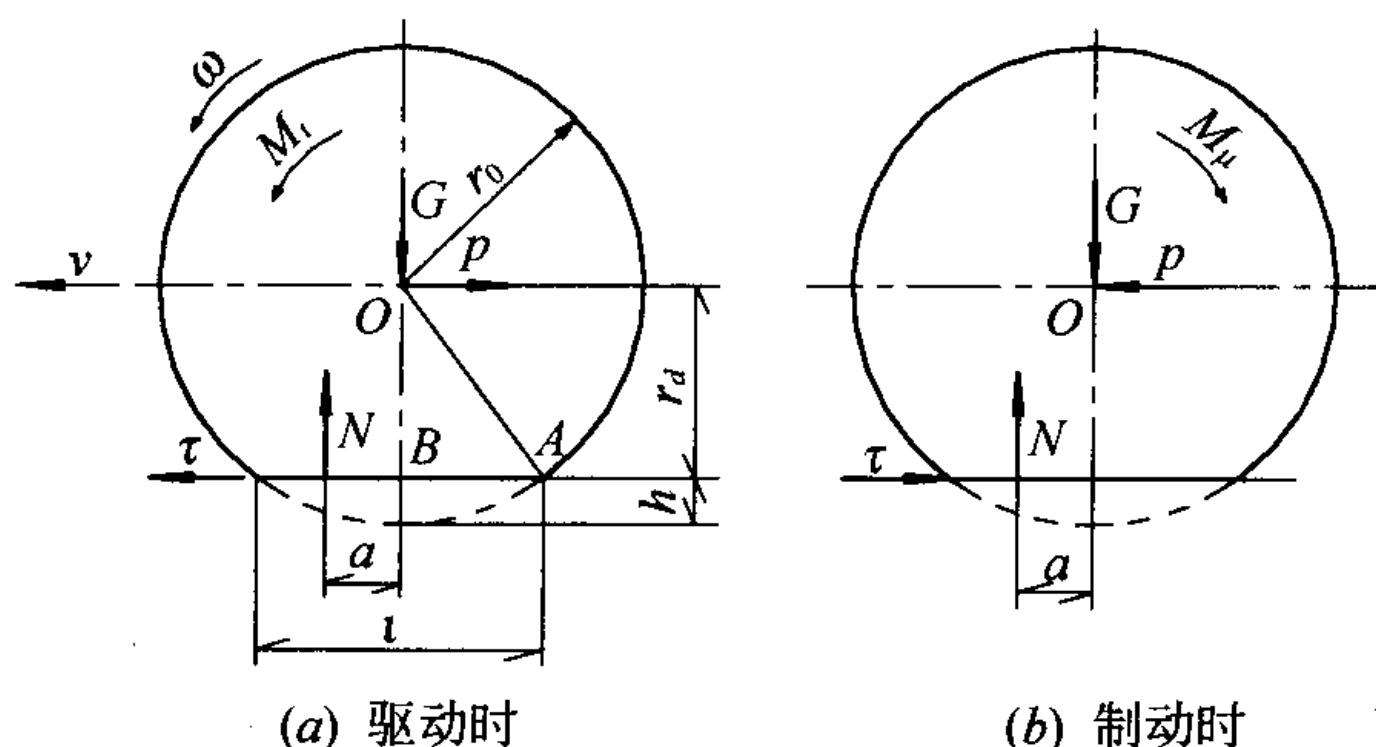
胎面花纹主要是用来清除雨雪天气中胎面与路面实际接触区内的水分,增大总摩擦力中的粘附分量。由于胎面花纹突出于胎面,它会造成实际接触

应力明显大于不计胎面花纹时的接触应力。另外,轮胎的结构、胎面花纹形状、车辆载荷、车轮的驱动力矩和制动力矩、轮胎气压,都会影响胎面上的接触应力的大小和分布特性。

3 轮胎与路面的受力分析

3.1 轮胎的受力分析

图1为汽车以速度 v 行驶时,驱动轮上的受力简图。由于轮胎本身还充有压缩空气,具有一定的内压力。这样,它在内、外力、扭矩的作用下,会产生变形。



G 为作用在车轴上的径向载荷, N ; p 为车轴作用在轮胎上的水平推动力, N ; τ 为路面作用在轮胎上的切向反力, N ; r_0 为轮胎半径, m ; r_d 为轮胎动力半径, m ; l 为轮胎与路面接触长度, m ; h 为轮胎压平量, m ; N 为路面法向反力, N ; ω 为轮胎转动角速度; M_d 为驱动力矩, $N \cdot m$; M_μ 为制动力矩, $N \cdot m$; a 为力臂, m 。

图1 汽车轮胎的受力

由图1可以看出,由于轮胎的迟滞现象,使法向反力 N 的作用点向前移动了一段距离 a 。不过, a 值并不大,故计算轮胎与路面的摩擦力和轮廓法向接触应力时,可将 a 值的影响略去。轮胎上承载的载荷,使轮胎下面一小部分压平而形成与路面的轮廓接触面积 A_G ,压平量 $h=r_0-r_d$ 。当 h 不大时,轮廓接触面积呈椭圆形;当 h 较大时,轮廓接触面积近似矩形。压平量可按下式计算^[2]:

$$h \approx \frac{\alpha_2 G}{2p_w} + \sqrt{\frac{\alpha_2^2 G^2}{4p_w^2} - \alpha_1 G} \quad (3)$$

式中: p_w 为轮胎内充气压力, MPa ; α_1, α_2 分别为常数(卡车轮胎 $\alpha_1 \approx 0.0022 \text{ MPa}^{-1}$, 轿车轮胎 $\alpha_1 \approx 0.0037 \text{ MPa}^{-1}$, $\alpha_2 = 1/2\pi \sqrt{r_0 r_{tr}}$, r_{tr} 为胎面横向曲率半径(m))。

要计算附着系数,必须首先确定附着力。附着力的大小取决于轮廓法向接触应力。由于路面上微凸体的高度不一致,即轮廓接触面积上各处的法向应力的变化规律相当复杂,若要详细计算,公式变得十分复杂。但从文献[2]可知,该应力取决于轮胎的结

构、充气压力,但变化不大。因此,我们假定轮廓接触面积 A_G 内,路面与胎面为密接触状态,然后用该接触面积上的平均法向接触应力来计算附着系数。这样,轮廓法向接触应力为:

$$p_G = G/A_G \quad (4)$$

式中: G 为作用在车轴上的径向载荷。

为了防滑,汽车轮胎的胎面均设置了多种花纹,胎面花纹的存在,使得胎面与路面的接触面积的形状更近似于矩形^[2]。其矩形宽度为胎面宽度 B ,长度为 l (见图1(a)), l 可按图1(a)的直角三角形 OAB 来计算:

$$l = 2AB = 2\sqrt{OA^2 - OB^2} = 2\sqrt{r_0^2 - (r_0 - h)^2} = 2\sqrt{2r_0 h - h^2}$$

上式中,由于 h 值很小(当轮胎气压和车辆载荷处于正常范围时, h 仅为百分之几 m), h^2 则更小,故将 h^2 项略去,即:

$$l \approx 2\sqrt{2r_0 h} \quad (5)$$

由于轮胎表面有花纹存在,胎面花纹表面才与路面接触。因此,轮廓接触面积 A_G ,就应该再乘以胎面花纹密度系数 k' (公路车辆轮胎的花纹密度系数为 $65\% \sim 80\%$ ^[5]),即:

$$A_G = k' l B \quad (6)$$

再将式(3)、式(5)代入式(6),就可得轮廓接触面积:

$$A_G = \frac{2k' B r_0^{1/2} \alpha_2^{1/2} G^{1/2} [1 + (1 - 4\alpha_1 p_w^2 / \alpha_2^2 G)^{1/2}]^{1/2}}{p_w^{1/2}}$$

令 $\theta = 1 + (1 - 4\alpha_1 p_w^2 / \alpha_2^2 G)^{1/2}$,代入上式则:

$$A_G = \frac{2k' B r_0^{1/2} \alpha_2^{1/2} G^{1/2} \theta^{1/2}}{p_w^{1/2}} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4),可得轮廓法向接触应力:

$$p_G = \frac{p_w^{1/2} G^{1/2}}{2k' B r_0^{1/2} \alpha_2^{1/2} \theta^{1/2}} \quad (8)$$

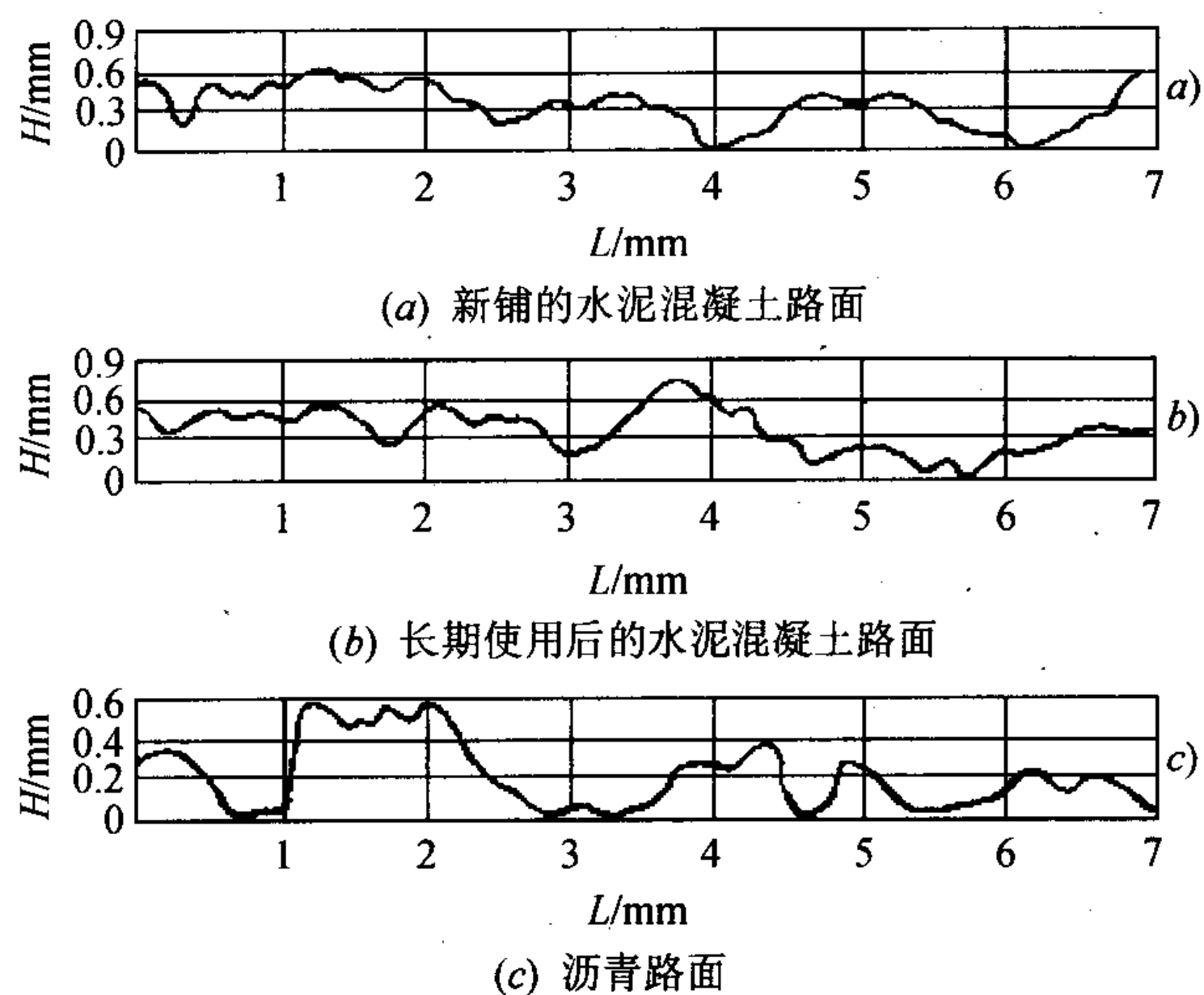
在算式 $\theta = 1 + (1 - 4\alpha_1 p_w^2 / \alpha_2^2 G)^{1/2}$ 中,从式(3)的注释可知: $\alpha_1 \ll 1$, $\alpha_2 \approx 100 \alpha_1$, $\alpha_1 p_w^2 \ll \alpha_2^2 G$;另外,由于 $G > 10 p_w^2$,因此, $4\alpha_1 p_w^2 / \alpha_2^2 G \approx 0$,即 $\theta \approx 2$ 。作为近似计算时,可取 $\theta = 2$ 。

对于具体的一辆汽车,其车辆载荷、轮胎结构参数和轮胎气压均为定值。这时,附着力的大小取决于胎面与路面的摩擦力,而摩擦力取决于路面的粗糙度,粗糙度则取决于路面形貌。

3.2 路面形貌

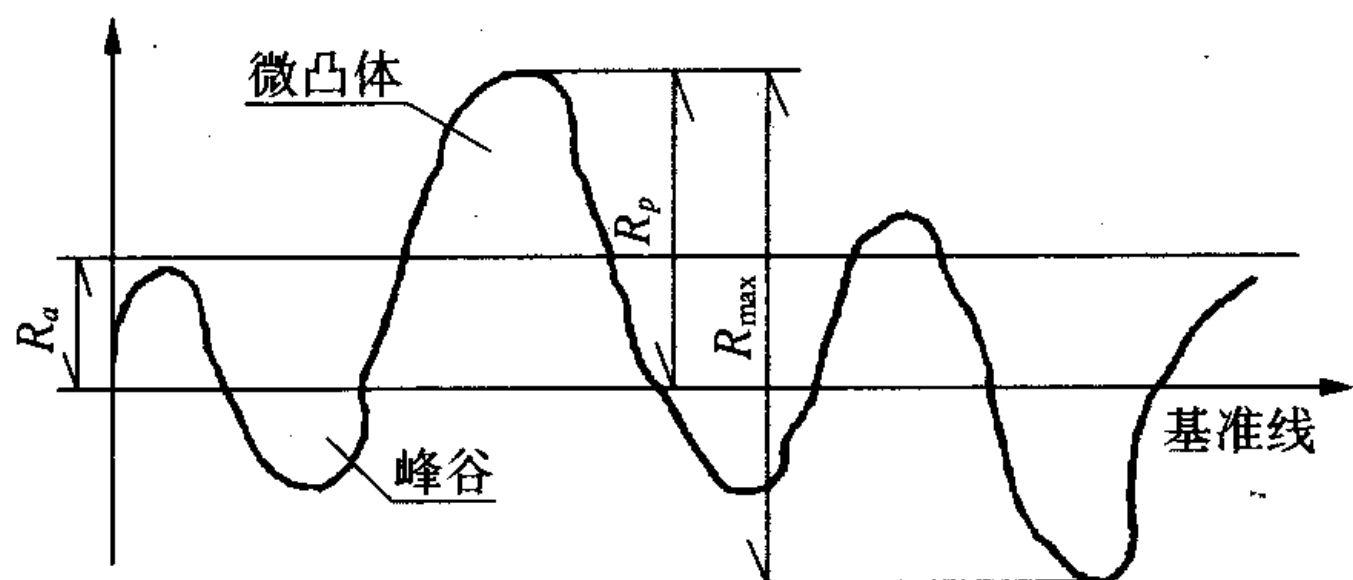
路面形貌是指路面施工后保留下来的路面几何

形貌,通常以单位面积上的微凸体个数,以及微凸体的几何形状和高度分布来表征。图2为水泥混凝土与沥青路面的截面轮廓图。从这些轮廓图可以看出,路面的微凸体形状近似于球截体。这些球截体位于某一基准线上且沿高度方向分布。图3为路面微凸体纵截面几何参数评定图。



H 为微凸体的高度; L 为路面取样长度

图2 水泥混凝土与沥青路面的表面轮廓



R_{\max} 为微凸体最大轮廓峰谷距; R_p 为微凸体轮廓最大高度;
 R_a 为微凸体轮廓峰谷距算术平均值; t_p 为微凸体轮廓支承线
长度(基准线上的粗黑线)

说明:算术平均值,为5个以上微凸体算术和除以微凸体的个数

图3 路面微凸体纵截面几何参数评定

根据文献[3]可知,我国路面规范对各级道路均提出了粗糙度标准——以路面细构造深度(TD)值来表征。标准规定,高速公路、一级公路:沥青路面, $TD \geq 0.55$ mm;水泥混凝土路面, $TD \geq 0.8$ mm;其他级别的水泥混凝土路面, $TD \geq 0.6$ mm。

由于微凸体近似于球截体,实际上 TD 值仅反映的是图3中微凸体轮廓峰谷距的算术平均值 R_a ,并不能反映整个微凸体的基本形貌。我们用图4来说明这一问题。

图4为一组粗糙度 TD 值相等的微凸体示意图。

从图上可以看出,(a)、(b)、(c)这3种微凸体虽然高度一样,但是由于其峰顶部的曲率半径 r 和支承面的尺寸 t_p 等参数不相等,使得微凸体与胎面的接触应力,以及压入胎面橡胶层的深度等数值均不可能相等,这会造成路面与胎面的摩擦力有很大区别。若不考虑这些条件,将会造成理论计算的附着系数与实测值有较大的出入。为此,特引进了反映路面微凸体形貌的几何参数 R_{\max} 、 r 、 v 、 b 、 Δ ,作为路面粗糙度的评定参数。这几个评定参数中的 v 、 b 、 Δ 值,可按式(9)计算,计算公式中所涉及微凸体其他参数见图3。

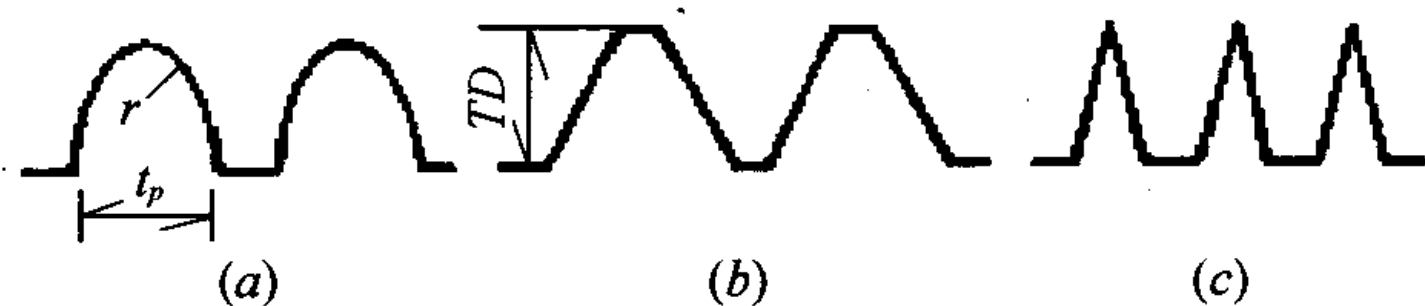


图4 路面微凸体纵截面轮廓示意

$$\left. \begin{aligned} v &= 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1 \\ b &= t_m \left(\frac{R_{\max}}{R_p} \right)^v \\ \Delta &= \frac{R_{\max}}{rb^{1/v}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: t_m 为微凸体纵截面支承线长度 t_p 的算术平均值; r 为微凸体顶部平均曲率半径($r = \sqrt{r_H r_V}$, r_H 、 r_V 为微凸体顶部的横向和纵向平均曲率半径)。

4 附着系数的计算

从式(2)可知,附着力(摩擦力)为摩擦力粘附分量与变形分量之和。其中,摩擦力粘附分量,取决于实际接触区内胎面与路面材料分子之间的相互作用;摩擦力变形分量,则取决于路面微凸体压入胎面表层使之发生变形时产生的滞后损失。

对于单个微凸体,其附着力依式(2)可写为:

$$T_i = T_{Mi} + T_{Bi} \quad (10)$$

从文献[2]可知,其中:

$$T_{Mi} = (\tau_0 + \beta p_r) \pi r h_{yi}$$

$$T_{Bi} = 0.25 \alpha_{eff} h_{yi}^2 / \Theta$$

式中: T_{Mi} 、 T_{Bi} 为单个微凸体摩擦力的粘附分量和变形分量; τ_0 、 β 为摩擦参数,它们取决于路面状态(污染、湿度),橡胶材料 $\tau_0 = 2.5$ MPa、 $\beta = 0.03$ 或 $\beta = 0.05$; r 见式(9)注释; p_r 为实际接触应力, $p_r = 0.68(R_a/r\Theta^2)^{0.4} P_G^{0.2}$; h_{yi} 为单个微凸体压入胎面橡胶的深度,按 $h_y = 1.6r$ 计算; α_{eff} 为复杂状态下轮胎橡胶的滞后损失系数, $\alpha_{eff} = 2.5\alpha$ (α 为拉压状态下的

滞后损失系数,橡胶材料为 0.09~0.13); Θ 为材料的弹性常数, $\Theta=(1-\mu^2)/E$ 。

胎面与路面的总摩擦力(附着力)为:

$$T = \sum_{i=1}^{n_r} T_i \Delta n_r \quad (11)$$

式中: Δn_r 为任意截面上压入相同深度的微凸体数量。

对于一般路面,切向应力(单位摩擦力)为^[2]:

$$\tau_T = \frac{T}{A_G} = \frac{\alpha_{eff} \Delta^{1/3} P_G^{4/3} \Theta^{1/3}}{\pi b^{(3\nu-1)/3\nu}} + \left(\tau_0 + \frac{0.71 \beta \Delta^{1/3} b^{1/3\nu} P_G^{1/3}}{\Theta^{2/3}} \right) \cdot \frac{1.45 P_G^{2/3} \Theta^{2/3}}{\Delta^{1/3} b^{1/3\nu}} \quad (12)$$

对于典型路面(水泥混凝土和沥青路面, $b \approx 3.0$, $\nu \approx 3$)和汽车轮胎胎面橡胶材料(弹性模量 $E = 300 \sim 400$ MPa,泊松比 $\mu = 0.5$),切向应力为:

$$\tau = \frac{0.12 \alpha_{eff} \Delta^{1/3} P_G^{4/3}}{E^{1/3}} + (\tau_0 + \beta \Delta^{1/3} E^{2/3} P_G^{1/3}) \cdot \frac{P_G^{2/3}}{E^{2/3} \Delta^{1/3}} \quad (13)$$

当作用在车轴上的径向载荷与路面的法向反力相等,即 $G = N$ 时,附着系数等于静摩擦系数。

将式(13)代入式(1)可得胎面与水泥混凝土和沥青路面的附着系数:

$$\varphi = \frac{T}{N} = \frac{\tau}{P_G} = \frac{0.12 \alpha_{eff} \Delta^{1/3} P_G^{1/3}}{E^{1/3}} + \frac{\tau_0}{\Delta^{1/3} E^{2/3} P_G^{1/3}} + \beta \quad (14)$$

将式(8)中的 P_G 值代入式(14),则:

$$\varphi = \frac{2^{1/3} \tau_0 k'^{1/3} B^{1/3} r_0^{1/6} \alpha_2^{1/6} \theta^{1/6}}{\Delta^{1/3} E^{2/3} P_w^{1/6} G^{1/6}} + \beta + \frac{0.12 \alpha_{eff} \Delta^{1/3} P_w^{1/6} G^{1/6}}{2^{1/3} k'^{1/3} E^{1/3} B^{1/3} r_0^{1/6} \alpha_2^{1/6} \theta^{1/6}} \quad (15)$$

式(15)中,附着系数 φ 的前两项为粘附分量,最后一项则为变形分量。可见,附着系数主要取决于路面状态(摩擦参数 τ_0 和 β),胎面橡胶性质(弹性模量 E 、滞后损失系数 α_{eff});其次也取决于轮胎几何参数(k' 、 B 、 r_0 、 α_2)、轮胎气压 P_w 、车轮径向载荷 G 以及路面的粗糙度参数综合值 Δ 。

5 提高附着系数方法

5.1 增大摩擦力的变形分量

在干燥的水泥混凝土与沥青路面上,附着系数的变形分量很小,可以略去不计^[2]。从文献[4]可知,轮胎在湿路面上转动时,路面上的水分,可以理解为胎面与路面之间的润滑剂。由于润滑剂的存在,必然

使胎面与路面的摩擦力下降,最终造成轮胎与路面的滑动/滚动比例明显增大,即使式(15)中的前两项(附着系数的粘附分量)的值明显降低而造成轮胎在路面上打滑。但从文献[2]中可得知,轮胎在湿路面上滚动时,对式(15)中的最后一项(附着系数的变形分量)影响很小。因此,若要求轮胎在湿路面上也能保持足够的附着系数,应设法提高附着系数的变形分量,以弥补粘附分量的下降。对于变形分量的增加,可用:(1)增大路面粗糙度;(2)增大轮胎气压;(3)增大车辆载荷,等方法来实现。

第(1)种方法,应由公路部门做,如在公路的陡坡和弯道处修筑高粗糙度路面,或雨雪天在此处铺设麻袋、草帘等物;第(2),第(3)种方法,则由司机来完成。

5.2 避免出现附着系数的最小值

在增大上述 3 种附着系数的变形分量指标时,要注意一点,就是从式(15)可以看出,该式为一个极值函数。式中, τ_0 、 β 、 k' 、 B 、 r_0 、 α_2 、 θ 、 E 虽是变量,但对某一型号的轮胎以及路面状态(污染、湿度)来说,却是定值。而 P_w 、 G 、 Δ 这 3 个参数,则是受公路施工和汽车司机控制,而且其变化范围较大。这样,附着系数 φ 将随这 3 个参数的变化而发生较大的变化。我们利用函数极值的概念,可以证明在下列条件下,附着系数将达到最小值。

轮胎气压:

$$P_w = 2.31 \times 10^3 \left(\frac{\tau_0}{\alpha_{eff}} \right) \left(\frac{k' B}{\Delta} \right)^2 \frac{r_0 \alpha_2 \theta}{EG} \quad (16)$$

车轮上的载荷:

$$G = 2.31 \times 10^3 \left(\frac{\tau_0}{\alpha_{eff}} \right) \left(\frac{k' B}{\Delta} \right)^2 \frac{r_0 \alpha_2 \theta}{EP_w} \quad (17)$$

路面粗糙度:

$$\Delta = 48.1 \left(\frac{\tau_0}{\alpha_{eff}} \right)^{3/2} k' B (r_0 \alpha_2)^{1/4} \left(\frac{\theta}{EP_w G} \right)^{1/2} \quad (18)$$

5.3 避免粗暴制动

实验表明,附着系数不但取决于式(14)中所列的几项参数,而且还与制动轮被抱死的程度有关。通常用滑动率 s 表示车轮被抱死的程度^[5]:

$$s = (V - r_0 \omega) / V \times 100\% \quad (19)$$

式中: s 为滑动率,表示轮胎在滚动与滑动状态中,滑动部分所占的比例; V 为车速; r_0 为轮胎半径; ω 为轮胎转动角速度。

若司机踩下制动器使轮胎被完全抱死而使其在路面上做纯滑动时,由于轮胎的角速度 $\omega = 0$,代入式(19)得滑动率:

$$s=100\% \quad (20)$$

图5为文献[5]公布的附着系数 φ 与滑动率 s 的关系曲线($\varphi \sim s$ 曲线)。可以看出, φ 的最大值并不在 $s=100\%$ 处,而是在 $s=15\% \sim 20\%$ 附近。这就是说,轮胎被完全抱死而在路面上纯滑动时,并不是附着系数最大的时刻。相反,制动到刚开始出现一些滑动时,反而具有最大的附着系数。

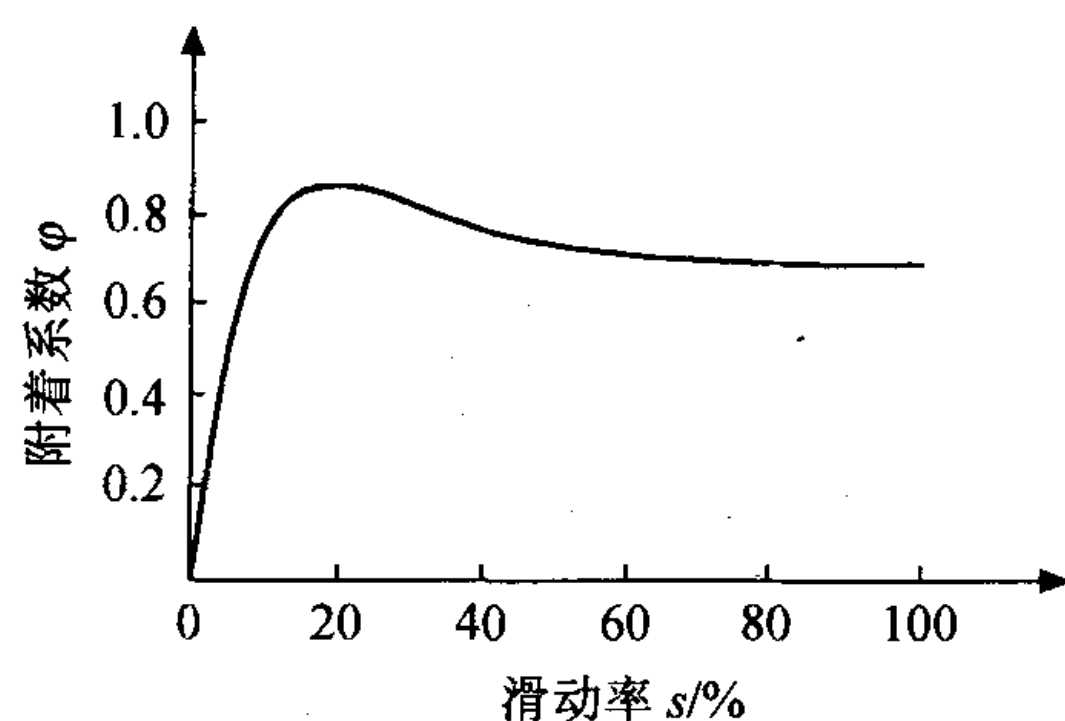


图5 附着系数与滑动率

6 结论

从上述分析可知,汽车在公路上行使时,因为附着系数不足产生打滑而造成的事故,并不能随便通过简单的判断就可以弄清责任。从式(16)、式(17)和式(18)就可以看出,附着系数在这3种情况之一出现时,汽车就可以因轮胎与路面产生的附着系数处于最小值而打滑。另外,上述3个公式中,前两式[式(16)、式(17)]与汽车的轮胎气压和车辆载荷有关,而式(18)才与路面的粗糙度有关。此外,从图2(a)、图2(b)也可以看出,水泥混凝土硬路面公路长期使

用后的路面形貌,与新铺设的无实质变化,即路面形貌无随使用时间而发生较大变化的趋势。换句话说,水泥混凝土一类硬路面的附着系数,不会随使用时间的延长而“衰老退化”。从以上结果看来,汽车在行驶过程中因附着系数不足而产生打滑的原因,属于司机一方的可能性更大一些。

当汽车在公路上行驶时,若司机发现轮胎打滑现象出现时,为了确保行车安全,可用增大轮胎气压或车辆载荷的方法来提高轮胎与路面的附着系数,但在调整这两个指标时,必须控制其调整量。否则,不但不能提高轮胎与路面的附着系数,还会使之下落,造成轮胎更容易在路面上打滑。另外,若司机需要制动时,特别是未安装ABS装置的车辆,不应当将制动器踩得过死,以免因轮胎被抱死而在路面上做纯滑动时造成附着系数下降而出现事故。

参考文献:

- [1] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] [前苏]И. В. Крагельский В. В. Алисин. Трение, изнашивание и смазка [M]. МОСКВА: МАШИНОСТРОЕНИЕ. 1979, книга I 50—55, 84—86, книга II 391—409
- [3] 陆鼎中,程家驹. 路基路面工程(第二版)[M]. 上海:同济大学出版社,1999.
- [4] M J 尼尔. 王自新,等译. 摩擦学手册[M]. 北京:机械工业出版社,1984.
- [5] 李江. 交通事故力学[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

Research on Adhesion Coefficient of Automobile Tire and Road Surface

LIU Chang-sheng

(College of Industry, Central South Forestry University, Changsha 410004, China)

Abstract: The adhesion coefficient of automobile tire and road surface is analyzed considerably and the formula about it conducted. And then it is pointed that adhesion coefficient is a function having the extreme. If one of the atmospheric pressure in the tire, the load of the vehicle and the degree of the coarse on the road surface is not selected properly, it will reach the least and affect the safety of the running automobile. Finally, some suggestions about highway construction, driving safely of the drivers and the judging of the traffic accidents are presented.

Key words: adhesion coefficient; shape of road surface; analysis and computing in tribology; evaluating synthetically