

轿车轮胎胎面胶湿牵引性与粘弹性的相关性

Nahmias M 等著 董 屹摘译 涂学忠校

湿牵引性是讨论得最多的轮胎特性之一。轮胎在湿路面上的摩擦因数(μ)可以通过制动试验进行测量,它与胎面胶配方、胎面花纹设计、轮胎特性、界面条件(温度、路面温度、水深)、轮胎承载负荷、速度、路面和打滑值等有关。

μ 可用下列不同作用的因数和来表示:

$$\mu = \mu_{adh} + \mu_{def} + \mu_{abr} + \mu_{bdl}$$

式中 μ_{adh} ——附着力作用因数;

μ_{def} ——变形作用因数;

μ_{abr} ——磨损作用因数;

μ_{bdl} ——界面条件(润滑剂的种类和涂层厚度以及环境因素)作用因数。

磨损和界面条件的作用一般小于其它两种作用。

Moore 导出了胎面作用公式:

$$\mu = K_1 \left(\frac{P}{G} \right)^n \tan \delta + K_2 \left(\frac{G'}{P} \right) \tan \delta \quad (1)$$

$$r \approx 0.2, n \geq 1$$

式中 P ——标准压力;

G' ——弹性模量;

K_1, K_2 ——常数;

$\tan \delta$ ——损耗因子。

式(1)中右边第1项为滞后损失分量,第2项为附着力分量。

设定 $n = 1$, 根据 Moore 推导,公式(1)变为:

$$\mu = K_3 \left(\frac{\tan \delta}{G'} \right) + K_4 G'' \quad (2)$$

$$G'' = G \tan \delta$$

$$\frac{\tan \delta}{G'} = \frac{G''}{G^2} \approx J''$$

式中 K_3, K_4 ——常数;

G'' ——损耗模量,与恒定应变能量损耗成正比。

$\frac{\tan \delta}{G'}$ 与恒定应力能量损耗成正比。

胎面胶对 μ 的影响则与胎面本身的由应力-应变条件引起的能量损耗现象有关:

$$\mu = a G'' + b J'' \quad (3)$$

式中 J'' ——损耗柔量;

a, b ——常数。

这两项是试验条件的函数, Futamura 提出了一个新的能量损耗函数式,在这个函数式中,用指数(n)将两项合并成一项:

$$\mu = K \frac{G''}{(G^*)^n} \quad (4)$$

式中 K ——常数。

当 $n = 0$ 时, μ 与恒定应变能量损耗有关;

当 $n = 2$ 时, μ 与恒定应力能量损耗有关。

Futamura 分别计算了湿路面上的牵引力和滚动阻力以及干路面上的牵引力的 n 值。发现:对于湿牵引力, $n = 0$; 对于滚动阻力, $n = 0.8$; 对于干牵引力, $n = 2$ 。

由此可见,湿牵引力基本上为恒定应变现象。

Veith 研究了表面粗糙度对湿牵引性与粘弹性相关性的影响,发现随着表面粗糙度的增大,能量损耗从恒定应变向恒定应力转变。

在分析胶料特性对轮胎使用性能的影响时,必须考虑胶料粘弹性对于温度和应变的依赖性。

为了研究应变对湿抓着力与粘弹性相关性的影响,本研究在两种不同粗糙度的路面上进行了制动试验。

1 实验

根据轮胎通常速度级要求,设计了6种试验胶料进行轮胎制动试验评估。

选择应用范围较大的175/65R14H型轮胎作为中等性能轮胎,以便能对所选胶料进行良好的表征。全部轮胎的胎面花纹设计均相同,并且以同样的硫化周期在同一硫化模型中进行硫化。所选胶料列于表1。

表 1 试验胶料

胶料	轮胎速度级	聚合物	填料
A	S(低滚动阻力)	S-SBR/ E-SBR	炭黑/ 白炭黑
B	S ~ T	E-SBR/ BR/ NR	炭黑
C	T ~ H	E-SBR	炭黑
D	H ~ V	E-SBR	炭黑
E	H ~ V	E-SBR	炭黑/ 白炭黑
F	V ~ Z	E-SBR/ BR/ NR	炭黑/ 白炭黑

注: C 为参比胶料。

采用 RDA 流变仪测量胶料的粘弹性。在 1 Hz 的频率下使圆柱形试样(半径为 5 mm,高为 6 mm)经受扭转正弦变形。

在 4 个不同温度(- 10,0,10 和 23)和应变范围为 0.05 % ~ 40 %的条件下,采用 2 组试样进行应变试验。

第 1 组试样从非等温模型硫化轮胎上解剖获得。图 1 为 0 时的一个应变试验实例。

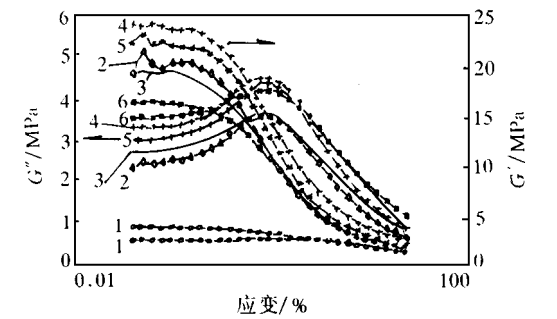


图 1 轮胎解剖试样应变试验结果

1—胶料 A;2—胶料 B;3—胶料 C;4—胶料 D;5—胶料 E;6—胶料 F。温度 0 ;频率 1 Hz

第 2 组试样从挤出胎面上切割获得,该胎面是实验室等温模型硫化的,硫化温度为轮胎模型硫化所能达到的最高温度,硫化时间为完全等效硫化时间。全部结果均为 5 个试样的平均值。

制动试验按 ASTM 标准进行,测量 μ 为 0 ~ 0.4 时的打滑值和滑动值。

按 ASTM 标准,在恒定速度为 96 km·h⁻¹、恒定载荷为 3 924 N 的条件下,在两种不同粗糙度和打滑等级的路面上进行试验。一种路面是打滑等级为 45 的中等粗糙度的沥青路面(路面 H),另一种路面是打滑等级为 10 的花岗岩路面(路面 L)。路面 L 的 μ 最小。全部试验轮胎在试验前已试跑 100 km,轮胎内压为 220 kPa,花纹单位面积的排水率为 60 mm³·mm⁻²·h⁻¹。

参比胶料 C 的试验结果为 10 条轮胎的平均值,其它结果为 3 条轮胎的平均值。每条轮胎进行了 10 次制动试验。

2 结果与讨论

2.1 制动试验数据统计分析

在两种不同路面的不同打滑值下, μ 达到了最大值。在数据分析中,考虑了打滑值为 10 %和 100 %的两种情况。

在较为粗糙的路面 H 上,每种胶料的 μ 均在打滑值为 10 %时接近其峰值。在路面 L 上,虽然打滑值为 10 %时 μ 并不对应着峰值,但此值仍被选用于保持恒定滑动速度和尽量减小弹性流体动力学效应的研究,这些将在以后讨论。打滑值为 100 %的滑动距离为滑动值。

ASTM 方法要求在每两个试验轮胎中插入一个参比轮胎,用来校验温度、湿度和其它可能的环境因素的日常变化。以参比轮胎为基础的线性回归用于校正试验轮胎的试验结果。

采用统计分析的方法控制参比轮胎在 3 天试验中可能发生的明显变化。在这 3 天的试验中,未观察到不同的试验结果。

路面的变异因数定义为 $\frac{\text{标准偏差}}{\text{平均值}} \times 100\%$ 。变异因数非常小,最大值为 4 %。

路面 L 的 μ 比路面 H 小很多。在路面 L 上,滑动距离接近打滑值为 10 %的滑动值。这些数据非常分散,变异因数接近 7 %。

与路面 H 上的情况一样,路面 L 上参比轮胎的统计分析表明,试验时间对试验结果无影响;试验 3 天后,全部参比轮胎均显示出相同的试验值。表 2 和 3 分别列出打滑值为 10 %和 100 %的路面 H 和路面 L 的 μ 。

2.2 粘弹性与打滑值 10 %的相关性

对用轮胎解剖试样测得的粘弹性数据进行分析。表 4 示出了在恒定应变、恒定应力和恒定能量条件下,两种路面的 3 个不同温度

表 2 打滑值为 10 %和 100 %时路面 H 的 μ

项 目	胶料					
	A	B	C	D	E	F
打滑值 10 %	0.820	0.857	0.866	0.873	0.880	0.889
打滑值 100 %	0.423	0.424	0.447	0.440	0.435	0.432

表 3 打滑值为 10 %和 100 %时路面 L 的 μ

项 目	胶料					
	A	B	C	D	E	F
打滑值 10 %	0.111	0.152	0.139	0.161	0.175	0.156
打滑值 100 %	0.157	0.108	0.100	0.090	0.090	0.090

表 4 打滑值为 10 %时两种不同粗糙度路面的 R^2

温度/	路面 H			路面 L		
	恒定	恒定	恒定	恒定	恒定	恒定
	应变	应力	能量	应变	应力	能量
- 10	0.893	0.785	0.534	0.613	0.719	0.204
0	0.999	0.796	0.545	0.878	0.814	0.236
10	0.545	0.805	0.787	0.562	0.734	0.692

(- 10,0 和 10) 的 μ 和 G' 的最大相关因数 R^2 。由于温度高于 10 的试验结果明显差于温度为 10 的试验结果,故没有报告温度高于 10 的 R^2 。

如果 R 的绝对值高于 0.811,回归具有 95 %统计意义的置信度。

在 0 时可观察到最佳相关性,并且与恒定应变能量损耗现象相符。正如预料的,恒定应力能量损耗的影响是随路面粗糙度增大而增大的。

图 2 为在路面 H 上,3 个温度(- 10,0 和 10)条件下, R^2 与粘弹性试验中施加的应变的关系曲线。

最佳相关性曲线呈现两个出人意料的峰。曲线有两个相对最高点,第 1 点在较小应变处,第 2 点靠近应变 10 %处。

考虑到粘弹性,这种现象是可以解释的。Medalia 将此种能量损耗现象描述为是由填料附聚体的二级网络结构的解聚作用和复聚作用造成的。按照这一解释,这两个区域均可由二

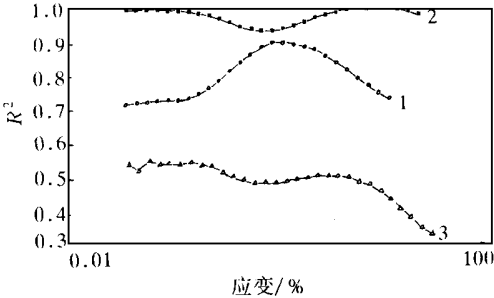


图 2 在路面 H 上打滑值为 10 %时 R^2 与应变的关系曲线
温度:1— 10 ;2—0 ;3—10

级网络的影响较小来说明:第 1 种情况是应变太小以致于填料网络不能解聚,第 2 种情况是应变太大,填料网络不能复聚。

这一解释还不能阐明胎面花纹块在制动试验中的真正应变。图 3 是路面 H 的符合预测公式的最佳相关性曲线,在确定常数时考虑了由水膜深度和车速决定的界面条件。

图 4 为在 3 个不同温度下,在路面 L 上打滑值为 10 %的 R^2 与应变的关系曲线。最佳关系曲线的形状是完全不同的, R^2 在能量损耗峰值范围内只有单一的最大值。在最平滑路面上,最佳相关性对应的应变值向低值转变(2 %)。

图 5 是温度 0 ,频率 1 Hz 和应变 2 %条件下, μ 与 G' 的线性回归和二次回归曲线。最佳相关性由二次回归曲线获得。这可能是由弹性流体动力学效应的起始作用引起的,这种效应是滑动过程中胶料行为的控制因素,这一点将在下一部分讨论。按 Moore 的论述,对于非

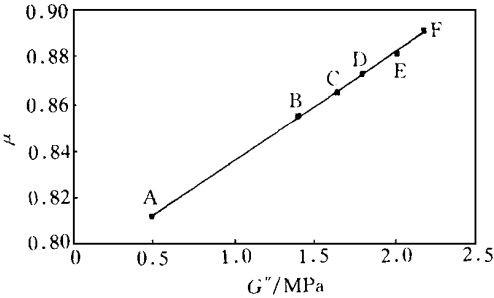


图 3 在路面 H 上打滑值为 10 %时 μ 与 G' 的关系曲线

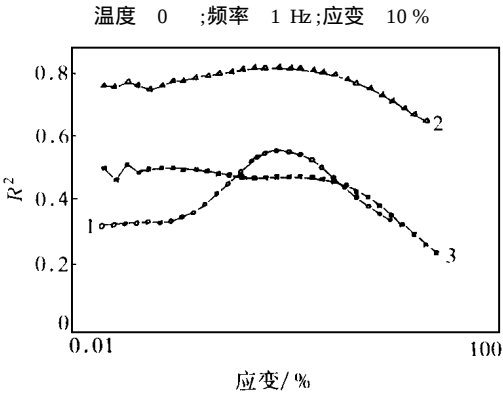


图 4 在路面 L 上打滑值为 10 %时 R^2 与应变的关系曲线
注同图 2

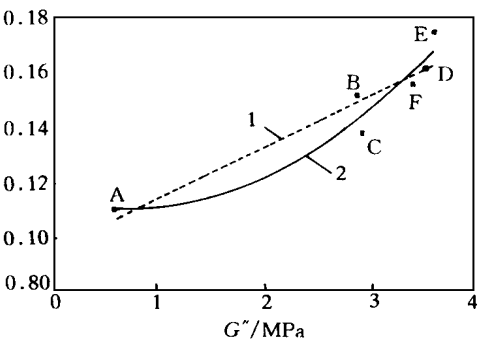


图 5 在路面 L 上打滑值为 10 %时 μ 与 G' 的关系曲线
1—线性回归;2—二次回归

常平滑路面和高滑动速度,弹性流体动力学效应显得非常重要,并趋向于消除滞后效应,以及形成一个趋向于将胎面与路面分离而且减轻摩擦的压力分布区。

在打滑值为 10 %时,低定伸应力软胶料的弹性流体动力学效应较小。在 0 时,胶料在应变为 2 %和 10 %条件下的粘弹性数据见表 5。

表 5 胶料在应变为 2 %和 10 %时的 G' 和 G''

性 能	胶料					
	A	B	C	D	E	F
G'						
应变 2 %	3.25	8.34	9.03	9.81	11.40	8.69
应变 10 %	2.36	3.19	3.90	3.62	4.66	3.71
G''						
应变 2 %	0.74	3.44	3.49	4.19	4.30	4.06
应变 10 %	0.62	1.48	1.70	1.86	2.06	2.22

注:温度 0 ;频率 1 Hz。

2.3 粘弹性与打滑值为 100 % (滑动距离) 时的试验数据的相关性

表 6 示出了恒定应变、恒定应力或恒定能量的情况下,根据损耗模型得到的打滑值为 100 %时的 4 个温度 (- 10 ,0 ,10 和 23) 下的 μ 的最佳相关因数 R^2 ,表中粘弹性数据用轮胎解剖试样试验获得。

粗糙路面 H 的最佳预测项是 G'' ,它证实了恒定应变能量损耗机理。尽管如此,温度和应变条件仍然与打滑值为 10 %时预测 μ 的不同。温度和应变应根据滑动过程中胶料工作状态的改变,即从 0 时应变 10 %到 10 时应变 40 % (见图 6) 而变化。考虑到胶料在接触区域

表 6 打滑值为 10 %时两种不同粗糙度路面的 R^2

温度/	路面 H			路面 L		
	恒定应变	恒定应力	恒定能量	恒定应变	恒定应力	恒定能量
- 10	0.138	0.684	0.328	0.796	0.902	0.372
0	0.446	0.672	0.487	0.992	0.925	0.356
10	0.960	0.669	0.776	0.746	0.923	0.893
23	0.644	0.628	0.837	0.839	0.915	0.953

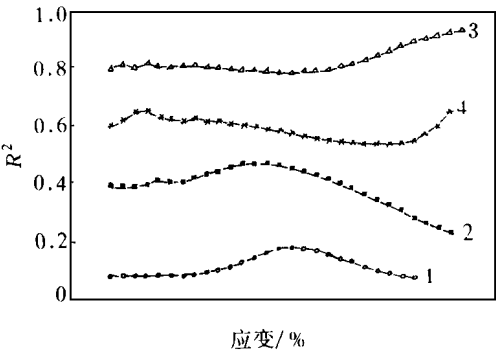


图 6 在路面 H 上打滑值为 100 %时 R^2 与应变的关系曲线

温度:1,2,3 同图 2;4—23

的工作状态明显不同,这似乎是非常合理的。胎面胶料在粗糙路面 H 上滑动时变形较大,这与应变 40 %下测得的 G' 的相关性较好有关。温度升高可能是两种效应作用的结果。首先是变形周期的频率增大,按 WLF 叠加原理,这将导致温度降低;但有一点也非常清楚,即滑动胶料的有效温度是随着胶料在路面上滑动速度的降低而大幅度升高的,因此频率增大和温度升高的组合导致了温度的有效升高。

在路面 L (花岗岩路面) 上的情况与前面所述路面的情况完全不同。弹性流体动力学效应随着打滑值的增大变得更为重要。在这种情况下,软胶料可获得较小的 μ ,并可由此对 μ 和 G' 的关系曲线的负斜率进行解释。

2.4 通过粘弹性测量描述湿牵引性

根据以前的观察,除在光滑路面 (花岗岩) 上滑动外,湿牵引性是一种恒定应变能量损耗现象。图 7 表明了在不同工作条件下, G' 可较好地预测有意义的湿牵引性区域。显然,有理由指出:在路面 H 上, μ 的峰值出现在应变 10 %的区域而不是出现在应变 0.1 %的区域。

2.5 硫化周期对抗湿牵引性预测的影响

一种令人满意的预测湿牵引性与胎面胶料粘弹性关系的预测方法必须以研究开发试验中

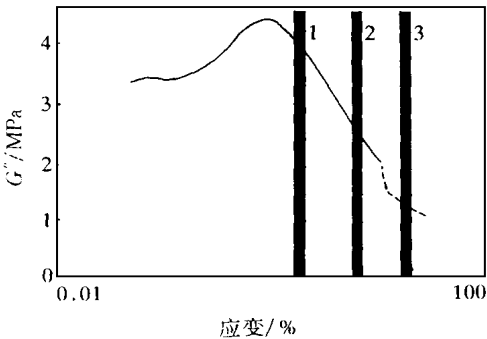


图 7 G' 预测有意义的湿牵引性区域

1—在路面 L 上打滑值 10 %的 μ ; 2—在路面 H 上打滑值 10 %的 μ ; 3—在路面 H 上打滑值 100 %的 μ 。 温度 10 °C, 频率 1 Hz; —温度 0 °C, 频率 1 Hz

在一定混炼和硫化条件下获得的胶料数据为基础。只有在这种情况下,预测模型才能有效地减少试验轮胎的数量,节约时间和经费。

轮胎解剖试样与实验室制得的试样的主要区别在于混炼和硫化周期不同^[7]。

所有轮胎制造商都有一套完善的内部技术诀窍,通过此诀窍可有效地在实验室中重现大规模生产中密炼机采用的混炼工艺。在实验室中很难模拟非等温硫化过程,这种情况下的结果也不理想。

图 8 是 R^2 随着应变的变化趋势。此处的 R^2 是用轮胎解剖试样测得的 G'' 与用恒定时间、等温硫化的实验室试样测得的 G'' 之间的相关因数, R^2 随应变增大而减小,正如 Payne 指出的,在高应变下主交联网络结构对粘弹性的影响非常重要 (Medalia 也证实了这一点)。由此产生的后果是, R^2 显著下降时模型的预测准确性必然降低。

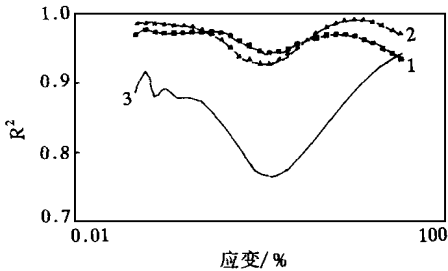


图 8 在路面 H 上打滑值为 10 %时 R^2 与应变的关系曲线

1—校正的等温硫化; 2—非等温硫化; 3—等温硫化。
温度 0 °C; 频率 1 Hz

在本研究中,预测准确性的下降是可以接受的。胎面胶料的粘弹特性值范围较宽,这样就可以对其适当排序。但是,在多数情况下,配方设计师仅对胶料配方作微小改变来改善湿牵引性。在这种情况下,采用实验室等温硫化法可能不适合。

采用的胎面胶料具有不同的 t_{90} 值,这些 t_{90} 值均小于确定的硫化时间,胶料未曾出现硫化返原现象。 G' 的校正因子被定义为参比胶料的 t_{90} 与试验胶料的 t_{90} 之比,因此,校正 G'' 的定义如下:

$$G''_{i,adj} = G''_i \frac{t_{90,ref}}{t_{90,i}}$$

式中 $G''_{i,adj}$ ——胶料 i 的 G'' 的校正值;
 G''_i ——胶料 i 的 G'' 的实测值;
 $t_{90,ref}$ ——参比胶料 C 硫化至 90 %的时间;
 $t_{90,i}$ ——胶料 i 硫化至 90 %的时间。

表 7 为试验胶料在温度 0 °C、频率 1 Hz 和应变 10 %时的 $t_{90,ref}/t_{90,i}$ 与 $G''_{i,adj}$ 值。

性 能	胶 料					
	A	B	C	D	E	F
$t_{90,ref}/t_{90,i}$	0.648	0.961	1.000	0.921	0.982	1.285
$G''_{i,adj}/\text{MPa}$	0.408	1.320	1.740	2.060	1.960	2.590

使用这种经验校正法可重新确立预测模型,该模型的预测水平可达到轮胎解剖试样在粘弹性测试中获得的模型的预测值。

因此,可以清楚地看到,在这一阶段,对等温硫化过程问题的研究仅是探索性的,还需对其进行多方面的研究。

改进的硫化系统可能需要更精确的校正因子,以保证用胶料的粘弹性来预测湿牵引性这一预测方法的准确性。

3 结 论

在 0 °C 下测得的胶料粘弹性可以很好地预测湿牵引性。 G' 是最佳的预测项,应变值随路面粗糙度和打滑值变化。对模拟最苛刻条件而言,研究中采用的两种路面是相对平滑的,这对粗糙路面上恒定应力下的能量损耗有影响。

(下转第 172 页)

(上接第 166 页)

在高应变和高温下,仅在路面 H 上, G' 可很好地预测滑动距离,而在光滑的花岗岩路面上,弹性流体动力学效应则变得十分重要,并趋向于消除滞后效应。

硫化周期对最佳预测结果的影响十分关键。通过对轮胎胎面解剖试样的粘弹性的测量,可获得两种路面的最佳湿牵引性与 G' 的相

关性。实验室等温硫化引起的湿牵引模型预测能力的下降,可能会导致新的试验胶料排序的错误。对模型胶料还需做更多的工作来深入研究等温硫化周期的作用,以便根据硫化体系和胶料硫化行为来确定 G' 的校正因子。

译自美国“Rubber World”,216[6],
38 ~ 42(1997)