

轿车轮胎附着因数-滑移率特性的测试及其与整车制动效能的相关性研究

朱 遥, 陈志强, 杨 振

(中汽中心盐城汽车试验场有限公司, 江苏 盐城 224100)

摘要: 研究拖车法测试轿车轮胎在干湿路面的附着因数(μ)-滑移率(s)特性, 以及轮胎的峰值附着因数与整车制动效能之间的关系。结果表明: 采用拖车法可有效测试轮胎的 μ - s 特性; 拖车法测试的轮胎峰值附着因数与整车制动效能有明显的相关性, 峰值附着因数越大, 制动距离越短。该方法可用于制动效能比对及轮胎选型。

关键词: 轿车轮胎; 附着因数; 滑移率; 测试; 制动效能

中图分类号: U463.341.4; TQ336.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2019)10-0785-05

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2019.10.0785

轮胎作为车辆与路面接触的唯一部件, 起到保证车辆行驶性能、支撑车辆载荷、吸收冲击和路面不平整引起的振动作用, 而车辆的驱动、制动和转向能力均来源于路面与轮胎之间的摩擦^[1]。轮胎与路面之间的附着因数(μ)对整车制动效能有较大影响, 近几年国内主机厂对轮胎的 μ -滑移率(s)特性的关注程度不断上升。在配套选型时需要轮胎供应商提供轮胎 μ - s 测试的相关数据。因国内缺少高精度的轮胎牵引力测试拖车, 整车企业一般通过车辆法测试轮胎的 μ - s 特性, 中国第一汽车股份有限公司技术中心于2016年利用车辆法开展了相关研究^[2]。有关拖车法测试轮胎 μ - s 特性的研究报道较少。

本工作采用拖车法测试不同品牌轿车轮胎在干湿地面的 μ - s 特性及制动效能, 研究轮胎 μ - s 特性对整车制动效能的影响。

1 原理分析

在车辆制动过程中, 卡钳与刹车盘之间产生的摩擦阻力会使车轮转速减小, 而轮胎与地面之间的附着力会使汽车减速, 前者称为制动器制动力, 后者称为地面制动力^[3]。制动时, 若只考虑车轮的运动为滚动和抱死拖滑两种状况, 当制动器制动力较小时, 制动器摩擦力矩不大, 地面制动力随着制动器制动力的增大成正比增大。当制动器制动力或制动系统液压上升到某一值时, 车轮出现抱死拖滑现象, 此时地面制动力不再随着制动器制动力的增大而增大, 而是等于轮胎与路面之间的附着力^[3]。由汽车理论可知

$$F_{\mu} = F_n \mu \quad (1)$$

式中, F_{μ} 为地面附着力, F_n 为路面对轮胎的法向反作用力。

车辆制动过程中, 车速与轮速之间存在速度差, 轮胎与地面之间会出现相对滑移现象。 s 可以表征制动过程中轮胎相对于车辆的滑移程度:

$$s = \frac{v - r}{v} \times 100\% \quad (2)$$

式中, v 为车速, r 为轮速。

纯滚动状态时, $v=r$, $s=0$; 纯抱死状态时, $r=0$, $s=100\%$; 边滚动边滑移状态时, $0 < s < 100\%$, 因此 s 可表征制动过程中车轮滚动的程度。

典型的轮胎 μ - s 关系曲线如图1所示。曲线在A点前阶段近似于直线, μ 随 s 的增大而迅速增大; A点至B点阶段增长缓慢, 至B点达到最大值(制动力因数的最大值称为峰值附着因数); B点以后 μ 随着 s 的增大有所下降, 当 s 达到100%时, 制动力因数称

作者简介: 朱遥(1990—), 男, 江苏盐城人, 中汽中心盐城汽车试验场有限公司工程师, 学士, 主要从事轮胎场地试验技术研究工作。

E-mail: zhuyao@catarc.ac.cn

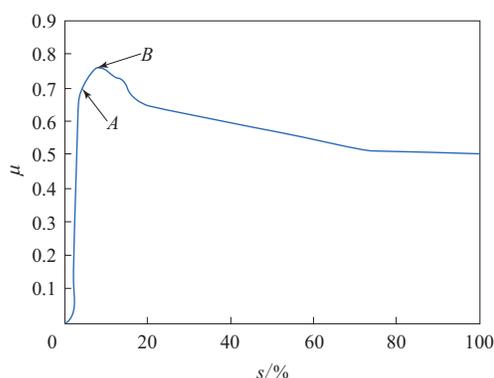


图1 轮胎 μ - s 关系曲线

为滑移附着因数。

2 实验

2.1 测试设备

Dynatest 995-2型轮胎牵引力测试系统, Dynatest北美公司产品; VBOX3i-V3型GPS车速仪, 英国Racelogic公司产品; Fluke F561型手持式红外测温仪, 美国Fluke公司产品; Testo 110型数字温度计, 德国Testo公司产品; DAC1C08C型胎压表, 英国PCL公司产品。

轮胎牵引力测试系统由皮卡牵引车和拖车组成(见图2), 拖车车轴上装有两轴力传感器, 可实时记录拖车制动期间轮胎纵向牵引力和垂向负荷^[4]。同时, 牵引车和拖车车轴上均安装编码器, 配合软件系统, 可实时显示拖车制动期间牵引车车速、拖车轮速及试验轮胎在制动期间受到的纵向牵引力和垂向负荷。



图2 Dynatest 995-2型轮胎牵引力测试系统

2.2 参照轮胎及试验轮胎选型

轮胎 μ - s 特性测试使用的参照轮胎为满足ASTM E 1136—2017^[5]要求的P195/75R14 Uniroyal品牌轮胎。试验轮胎规格为205/55R16 91V, 测

试共选取3套不同品牌的轮胎, 各轮胎信息如表1所示。

表1 参照轮胎和试验轮胎信息

项 目	参照轮胎	试验轮胎编号		
		A	B	C
轮胎规格	P195/75R14	205/55R16	205/55R16	205/55R16
负荷指数	92	91	91	91
速度级别	S	V	V	V
最大负荷能力/kg	635	615	615	615
最大充气压力/kPa	240	350	300	300
轮毂型号	5.5J×14	7J×16	7J×16	7J×16
轮胎花纹				

2.3 试验车辆

试验车辆为CAF7154M5型福特牌紧凑型轿车, 车辆参数如下: 类型 M1, 排量/最大净功率 1.5 L/83 kW, 整车装备质量 1 255 kg, 变速箱类型 手动变速箱(MT), 前制动器类型 通风盘式, 后制动器类型 盘式, 原配轮胎规格 195/65R15 91V和205/55R16 91V, 轮毂规格 7J×16。

2.4 测试流程

2.4.1 轮胎 μ - s 特性测试

轮胎 μ - s 特性测试会对试验轮胎产生不同程度的磨损, 为最小化轮胎胎面磨损对测试结果的影响, 参照GMW 15208—2013^[6]试验规程, 按照湿地、干地工况的顺序进行。湿地工况执行滑移测试, 拖车的制动系统在试验过程中一直施加制动力矩, 直至车轮抱死; 干地工况执行峰值测试, 轮胎出现制动力因数峰值立刻解除制动, 以避免轮胎在抱死期间出现花纹过度磨损、胎面胶颗粒脱落等现象, 保证测试结果的稳定性。

2.4.1.1 试验条件

(1) 干地工况测试道路。试验道路为干净、水平的粗糙沥青路面。该路面上满足ASTM E 1136—2017要求的参照轮胎在测试速度64 km·h⁻¹下的峰值附着因数和滑移附着因数分别为0.95±0.05和0.70±0.05。

(2) 湿地工况测试道路。试验道路为干净、水平的沥青测试道路, 经卢森堡交通部认证, 满足

ECE R117 02. Rev4法规对路面各项参数的要求。该路面上满足ASTM E 1136—2017要求的参照轮胎在测试速度 $32 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下的峰值附着因数和滑移附着因数分别为 0.70 ± 0.05 和 0.45 ± 0.05 ;在测试速度 $97 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下的峰值附着因数和滑移附着因数分别为 0.63 ± 0.05 和 0.34 ± 0.05 。

(3) 试验配载。参照轮胎的试验配载为468 kg, 试验轮胎的试验配载为其最大负荷能力的70%, 即430.5 kg。

(4) 试验充气压力。参照轮胎和试验轮胎的试验充气压力均为250 kPa。

(5) 轮胎预跑。每条试验轮胎在试验负荷下以 $32 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度进行10次峰值制动测试。

2.4.1.2 测试步骤

(1) 试验循环。按照C1-T1-T2-C2-T3-C3顺序进行, C代表参照轮胎, C1, C2, C3分别表示参照轮胎第1, 2, 3次测试; T1, T2, T3分别代表品牌A, B, C试验轮胎。湿地工况和干地工况均参照此循环执行。根据GMW 15208—2013标准要求, C1, C2, C3均应使用全新的满足ASTM E 1136—2017要求的P195/75R14参照轮胎。考虑到该轮胎进口难度大、周期长等特点, 此次测试只使用一组参照轮胎。

(2) 湿地工况测试。牵引力测试拖车在启动路段加速至 $(100 \pm 2) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 为保证制动在同一区域内进行, 制动起始路段放置一个反光桩桶, 牵引力测试拖车上安装光栅触发装置, 拖车经过桩桶时即触发车辆制动。湿地制动测试采取滑移制动方式, 即拖车的制动系统在试验过程中一直施加制动力矩, 直至车轮抱死。湿地工况每组轮胎进行10—12组制动, 最终保留8组有效数据。

(3) 干地工况测试。试验车速及制动触发方式同湿地工况。考虑到参照轮胎过度磨损会对后续参照轮胎制动力因数修正产生影响, 干地工况测试选择峰值测试, 即拖车制动过程中, 当轮胎出现峰值附着因数后, 即立刻解除制动, 避免轮胎抱死。干地工况每组轮胎进行7—9组制动测试, 最终保留5组有效数据。

2.4.1.3 数据修正

测试时尽量保证无关的变量稳定, 将变量变化引起的误差控制在最小。对参照轮胎进行重复性测试, 即考虑测试当天各项环境参数(路面温

度、环境温度、水膜、风速等)的变化可能对轮胎制动性能产生的影响, 利用参照轮胎修正试验轮胎的试验结果。

参照轮胎的峰值附着因数和滑移附着因数建立在每条轮胎的变量数和试验轮胎数量上, 参照轮胎变量越多, 在加权平均中所得到的权重越小。按照C1-T1-T2-C2-T3-C3的试验顺序, 加权参照轮胎的总权重均值(C_a)、第1和2次测试权重均值(C_{12})、第2和3次测试权重均值(C_{23})计算如下:

$$C_a = \frac{\frac{C_1 \sqrt{N_1}}{\sigma_1} + \frac{C_2 \sqrt{N_2}}{\sigma_2} + \frac{C_3 \sqrt{N_3}}{\sigma_3}}{\frac{\sqrt{N_1}}{\sigma_1} + \frac{\sqrt{N_2}}{\sigma_2} + \frac{\sqrt{N_3}}{\sigma_3}} \quad (3)$$

$$C_{12} = \frac{\frac{C_1 \sqrt{N_1}}{\sigma_1} + \frac{C_2 \sqrt{N_2}}{\sigma_2}}{\frac{\sqrt{N_1}}{\sigma_1} + \frac{\sqrt{N_2}}{\sigma_2}} \quad (4)$$

$$C_{23} = \frac{\frac{C_2 \sqrt{N_2}}{\sigma_2} + \frac{C_3 \sqrt{N_3}}{\sigma_3}}{\frac{\sqrt{N_2}}{\sigma_2} + \frac{\sqrt{N_3}}{\sigma_3}} \quad (5)$$

式中, C_1, C_2, C_3 为第1, 2, 3次测试的制动力因数均值; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为第1, 2, 3次测试的标准方差; N_1, N_2, N_3 为第1, 2, 3次测试的轮胎数量。品牌A, B, C试验轮胎的制动力因数均值 T_1, T_2 和 T_3 分别用 $T_1 C_a / C_{12}, T_2 C_a / C_{12}, T_3 C_a / C_{23}$ 来修正。

2.4.2 整车制动距离测试

当轮胎装配在车辆上作为一个整体存在时, 需考虑轮胎与车辆ABS匹配的影响。为分析不同牵引力特性的轮胎对整车制动效能的影响, 进行了速度 $100 \sim 0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 制动测试, 试验流程参照欧盟法规ECE R117 02. Rev4^[7], 但是在试验车辆速度、配载设置上略有不同, 本次测试制动初始速度为 $(105 \pm 2) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 试验配载为车辆空载(但有1个驾驶员), 此外, 本次测试未使用参照轮胎。

2.4.2.1 试验条件

(1) 测试道路。与轮胎附着力因数测试道路相同。

(2) 试验配载。车辆空载, 车上仅有1名驾驶员及测试设备, 无额外的沙袋等配载。

(3) 试验充气压力。冷态时轮胎充气压力为220 kPa。

(4) 轮胎预跑。试验车辆以 $(105 \pm 2) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

的速度进行2次制动行驶作为轮胎预跑。

2.4.2.2 测试步骤

车辆从起步阶段加速至 $(105 \pm 2) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，为保证每次制动都在同一区域内进行，测试起始区域放置一个提示桩桶，当车辆经过桩桶时立刻全力制动。

每次制动应保证纵向误差不大于5 m，横向误差小于0.5 m。

制动时，踩下离合器或挂入空挡，踩住制动踏板直至车辆刹停。

每次试验前2次试验数据舍弃不用，每套试验轮胎进行8次有效制动，提取车辆制动过程中 $100 \sim 0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 制动距离和平均制动减速度，去除其中的最大值和最小值，保留6组有效数据。完成测试后更换下一组试验轮胎，整个循环试验轮胎按品牌A-品牌B-品牌C的顺序执行。测试过程应保证车手为同一个人，避免不同车手之间的操作差异对测试结果的影响。根据ECE R117 02. Rev4，平均制动减速度计算公式为

$$a = \left| \frac{v_f^2 - v_0^2}{2d} \right| \quad (6)$$

式中， a 为平均制动减速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ； v_f 为车辆终止速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； v_0 为车辆起始速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； d 为制动距离，m。

3 结果与讨论

3.1 轮胎 μ - s 特性

参照轮胎和试验轮胎在速度为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下湿地和干地工况下测试的峰值附着因数均值、滑移附着因数均值及峰值处对应滑移率均值分别见表2和3。

3.2 整车制动效能

试验轮胎在速度 $100 \sim 0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下湿地和干

表2 湿地工况轮胎 μ - s 测试数据

测试顺序	峰值附着因数均值	滑移附着因数均值	峰值附着因数均值(修正后)	滑移附着因数均值(修正后)	峰值处对应滑移率均值/%
C1	0.549	0.365	—	—	9.7
T1	0.944	0.366	0.952	0.354	4.5
T2	0.801	0.349	0.808	0.337	5.2
C2	0.589	0.341	—	—	7.6
T3	0.823	0.353	0.810	0.359	8.1
C3	0.585	0.329	—	—	8.5

表3 干地工况轮胎 μ - s 测试数据

测试顺序	峰值附着因数均值	滑移附着因数均值	峰值附着因数均值(修正后)	滑移附着因数均值(修正后)	峰值处对应滑移率均值/%
C1	0.940	—	—	—	11.9
T1	1.194	—	1.120	—	12.5
T2	1.081	—	1.086	—	11.2
C2	0.942	—	—	—	15.3
T3	1.065	—	1.064	—	7.9
C3	0.946	—	—	—	14.8

地工况制动效能测试数据分别见表4和5。3组样品轮胎在干湿地工况下轮胎峰值附着因数均值和制动距离均值见表6。

由表6可以看出：轮胎峰值附着因数越大，整车制动距离越短；品牌A轮胎的干湿地峰值附着因数均最大，制动距离均最短。由此表明，利用轮胎 μ - s 特性评价整车的制动性能是有效的。

表4 湿地工况整车制动性能测试数据

序号	品牌A		品牌B		品牌C	
	d/m	$a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	d/m	$a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	d/m	$a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
1	46.17	8.36	52.08	7.41	51.68	7.46
2	45.12	8.53	52.73	7.32	51.81	7.45
3	45.05	8.56	52.49	7.35	51.97	7.42
4	45.26	8.52	52.25	7.38	51.45	7.50
5	45.35	8.51	51.94	7.43	51.22	7.53
6	45.05	8.56	51.61	7.47	52.17	7.39
均值	45.35	8.51	52.18	7.39	51.72	7.46

表5 干地工况整车制动性能测试数据

序号	品牌A		品牌B		品牌C	
	d/m	$a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	d/m	$a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	d/m	$a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
1	38.74	9.96	40.65	9.49	41.64	9.27
2	38.67	9.98	41.02	9.41	41.24	9.35
3	38.75	9.96	41.21	9.36	41.45	9.31
4	38.28	10.08	41.27	9.35	41.75	9.24
5	38.24	10.09	41.14	9.38	41.47	9.30
6	38.61	9.99	40.26	9.58	40.92	9.43
均值	38.55	10.01	40.93	9.43	41.41	9.32

表6 轮胎干湿地工况峰值附着因数均值和制动距离均值

项目	品牌A	品牌B	品牌C
湿地工况			
峰值附着因数均值	0.952	0.808	0.810
峰值制动距离均值/m	45.35	52.18	51.72
干地工况			
峰值附着因数均值	1.120	1.086	1.064
峰值制动距离均值/m	38.55	40.93	41.41

4 结论

利用轮胎牵引力测试系统可以实时测量轮胎在制动期间的纵向牵引力、垂向负荷、车速、轮速等参数,这些参数对整车制动效能的评价有重要作用。主机厂可通过轮胎的 μ - s 特性进行轮胎制动效能比对及轮胎匹配选型。通过轮胎牵引力测试系统得到的测量结果可以更加客观地反映轮胎的 μ - s 特性。

参考文献:

[1] Gent A N, Walter J D. 轮胎理论与技术[M]. 危银涛,等,译.北京:

清华大学出版社,2013.

[2] 王宣锋,蒋帅,石光,等. 轮胎纵向滑移特性测量方法及试验研究[J]. 汽车技术,2016(8):39-42.

[3] 余志生. 汽车理论(第5版)[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[4] 朱遥,陈志强,杨振. 路面湿摩擦特性和轮胎负荷对C1轮胎湿地抓着性能的影响[J]. 轮胎工业,2018,38(6):328-330.

[5] ASTM E 1136—2017, Standard Specification for P195/75R14 Radial Standard Reference Test Tire[S].

[6] GMW 15208—2013, Tire Braking Traction[S].

[7] ECE R117—2016, Uniform Provisions Concerning the Approval of Tyres with Regard to Rolling Sound Emissions and/or to Adhesion on Wet Surfaces and/or to Rolling Resistance Annex5[S].

收稿日期:2019-04-12

Test of Grip Coefficient-Slip Ratio Characteristics of Passenger Car Tire and Its Correlation with Vehicle Braking Efficiency

ZHU Yao, CHEN Zhiqiang, YANG Zhen

(CATARC Yancheng Automotive Proving Ground Co., Ltd, Yancheng 224100, China)

Abstract: The grip coefficient(μ)-slip ratio(s) characteristics of passenger car tire on wet and dry road surface tested by trailer method and the relationship between the peak grip coefficient of the tire and the braking efficiency of the vehicle were investigated. The results showed that the trailer method could effectively test the μ - s characteristics of tire. The peak grip coefficient of the tire tested by trailer method had a significant correlation with the braking efficiency of the vehicle. The larger the peak grip coefficient was, the shorter the braking distance was. This method could be used for braking performance comparison and tire selection.

Key words: passenger car tire; grip coefficient; slip ratio; test; braking efficiency

一种具有防雾功能防护力强的橡胶头盔 由如皋沐晨塑胶制品有限公司申请的专利(公开号 CN 107647520A, 公开日期 2018-02-02)“一种具有防雾功能防护力强的橡胶头盔”,涉及的橡胶头盔外壳(材质为橡胶)的一端设有空气通孔,另一端设有气体泄压阀,空气通孔的表面设有防雾隔膜,气体泄压阀的上面安装过滤槽,空气通孔的上方设有圆弧状防护镜片(材质为强化玻璃)。该发明采用在护鄂上面设置内置活性炭过滤器的呼吸器来排出呼出气体的方法,确保了防护镜片干燥,避免了因雾气影响防护镜片清晰度而造成的意外事故,从而保障了安全。该橡胶头盔结构简单,外形精美,使用范围广。

(本刊编辑部 赵 敏)

一种工业设备电缆护套用氯磺化聚乙烯橡胶材料 由佛山市北朝源科技服务有限公司申请的专利(公开号 CN 107652615A, 公开日期 2018-02-02)“一种工业设备电缆护套用氯磺化聚乙烯橡胶材料”,涉及的材料配方(质量分数)为:氯磺化聚乙烯橡胶 0.4~0.5,氯丁橡胶 0.001~0.03,丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 0.4~0.6,二甲基乙醇胺 0.001~0.01,聚二甲基硅氧烷 0.001~0.03,辛酸亚锡 0.001~0.03。该材料致密性好,减震能力强,耐老化性能优异,在高温条件下长期使用的热稳定性好,且能减少内部缺陷和空洞,可有效缓解弯曲、冲击等外力作用,衰减共振。

(本刊编辑部 赵 敏)