

# 全自动兰伯恩橡胶磨耗试验机的使用研究

李帛儒, 隗思傲, 陈兆彬, 王晓建

(中国科学院长春应用化学研究所, 中国科学院高性能合成橡胶及其复合材料重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 介绍一种全自动兰伯恩磨耗试验机(FPS)设备组件及其结构, 试验不同砂纸目数、滑移率、滑石粉流量、载荷等因素对胎面胶磨损量及摩擦系数稳定性的影响。固定条件下, 不同炭黑补强胎面胶的磨损体积相对平均偏差均可控制在5%以内, 并且有明显的耐磨区分性。

**关键词:** 磨耗试验机; 胎面胶磨损; 重复性; 区分性

**中图分类号:** TQ330.491

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-797X(2024)08-0031-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2024.08.007

## 0 前言

轮胎的磨损是力学因素和化学因素综合作用的结果, 摩擦力大、磨耗速度快时, 机械破坏占主导, 表面有明显的磨纹图案; 摩擦力小、磨耗速度慢时, 化学因素占主导, 几乎没有磨纹<sup>[1]</sup>。轮胎企业在评估轮胎耐磨性优劣时, 通常先在室内对胎面胶进行加速磨损试验, 然后再在外场进行路试。常见的室内摩擦磨损表征仪器有DIN、Akron、Pico、Taber、Lambourn、Williams等<sup>[2]</sup>, 日本上岛公司针对Lambourn试验机进行改装、开发了一款全自动兰伯恩型磨耗试验机(FPS), 该试验机可以模拟轮胎在转弯、启(制)动时胎面胶与路面之间产生的滑移行为<sup>[3]</sup>, 并且有报道称该设备测试结果与实际轮胎磨损寿命具有较高的相关性<sup>[4]</sup>。

本文使用胎面胶基础配方, 详细研究加载载荷、速度、路面温度、路面糙度等参数对磨损量的影响, 考察试验机在不同摩擦条件下的控制能力及耐磨性区分能力。

## 1 实验

### 1.1 主要原材料

仿生橡胶<sup>[5]</sup>、顺式-1,4-丁二烯橡胶(BR9000,  $M_L(1+4)100^\circ\text{C}=46$ , 独山子石化, 中国); 炭黑N134、N220、N234、N330、N339(美国卡博特公

司); 其他材料如活性剂(氧化锌、硬脂酸)、抗硫化返原剂PK900(1,3-双(柠康亚酰胺甲基)苯)、促进剂NS(N-叔丁基-2-苯并噻唑次磺酰胺)、硫磺S、防老剂4010NA(N-异丙基-N'-苯基对苯二胺)等均为市售工业品。

### 1.2 主要设备与仪器

橡胶密炼机8060M、开炼机8060K(松怒检测仪器); 平板硫化机, GT-7014-H50 高铁检测仪器公司; 电子天平, QUINTIX224-1CN 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司。

### 1.3 FPS运行原理与结构参数

图1为FPS各部件照片与机械手运行过程。设备主要包含加热单元、集尘单元、对偶单元、试样单元、滑石粉单元及机械臂单元。其中, 橡胶轮与具有键槽的金属芯组装, 然后由搬运机械手将其在试样轴上完成装卸, 非同轴安装状态或者有应变的试验轮会破坏机械手旋转平衡, 不能正常使用。正常安装状态下, 储样杆最多可以储存56个试样轮以供机械手进行全自动抓取及试验, 同时大幅度缩短人机配合时间。砂纸粘贴在铝合金金属轮上构成路面轮, 根据路面类型选

作者简介: 李帛儒(1991-), 女, 科研助理, 本科, 主要从事橡胶摩擦磨损测试方法方面研究工作。

基金项目: 中国科学院C类先导专项子课题XDC06020301  
收稿日期: 2024-04-12

择砂纸目数,同时,出风孔对路面轮进行加热,加热范围是室温-80℃。试样轮与路面轮接触区的线速度矢量方向一致,在进行磨损试验时可任意调节二者的相对速率,以模拟轮胎在不同行驶状态中的滑移率。为防止在磨损过程中磨屑粘附到砂纸上,磨损过程中需开启滑石粉供给器,保证在较宽范围内的磨损条件下,对偶面保持稳定,提高数据准确性。

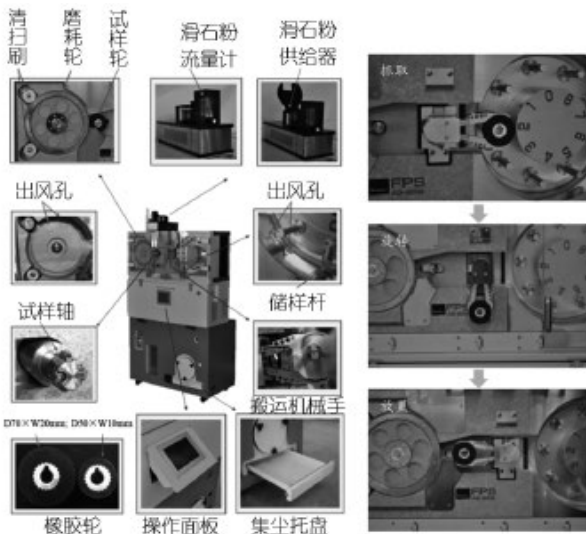


图1 FPS设备组件与机械手运行过程

### 1.4 试样制备

配方:按重量份数计如下:橡胶100份、炭黑50份、氧化锌5份、硬脂酸2份、4010NA 1.5份、NS 1份、S 2.2份、其他3.5份。

密炼:设置进料温度70℃,转速60 r/min,取橡胶加入密炼机中破胶2 min,然后加入氧化锌、硬脂酸、防老剂等密炼2 min,加入炭黑混合4 min,于8 min 抬上顶栓、扫料后,10 min 排胶。

开炼:设置辊温50℃,前辊转速16 r/min,前后辊速比1:1.25。在开炼机上加入硫化剂、促进剂混合均匀后,打三角包4次,打卷3次,下片。停放4 h 硫化。

硫化:在平板硫化机上硫化试样,硫化条件为145℃、23 MPa、45 min。停放16 h 后进行磨耗测试。

### 1.5 磨耗测试

滑石粉流量试验:载荷30 N,试样轮速度80 m/min,滑移率25%,测试时间9 min,温度30℃,240目砂纸,滑石粉供给器转速变量。

砂纸寿命试验:载荷30 N,试样轮速度80 m/min,滑移率10%,测试时间10 min,温度30℃,

滑石粉供给器转速0.4 r/min。

滑移率试验:载荷30 N,试样轮速度80 m/min,滑移率变量,测试时间6 min,温度30℃,砂纸240目,滑石粉供给器转速0.4 r/min。

温度试验:载荷30 N,试样轮速度80 m/min,滑移率15%,测试时间4 min,温度变量,砂纸240目,滑石粉供给器转速0.4 r/min。

载荷试验:载荷变量,试样轮速度80 m/min,滑移率10%,测试时间7 min,温度30℃,砂纸240目,滑石粉供给器转速0.4 r/min。

速度试验:载荷30 N,试样轮速度变量,滑移率15%,滑移距离等同,温度60℃,砂纸240目,滑石粉供给器转速0.4 r/min。

配方试验:载荷30 N,试样轮速度80 m/min,滑移率10%,测试时间8 min,温度30℃,砂纸240目,滑石粉供给器转速0.4 r/min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 滑石粉流量

在橡胶摩擦磨损过程中,因硬质凸起物的撕扯、长时间周期性的疲劳磨损而产生的橡胶碎屑极易转移到磨损面凹凸不平的孔隙中,导致磨损面受到污染,改变自身的粗糙度稳定性,从而造成数据发生明显的波动。FPS带有滑石粉(扑打粉)冲洗功能,即在试验过程中,对试样轮与路面轮接触区域进行淋洗,从而将产生的磨屑快速吹扫,以便集尘器回收。图2为不同淋洗速率对N134炭黑补强胎面胶磨损数据稳定性的影响,可以看到,磨损体积随淋洗速率的增加呈现缓慢增加的趋势,这表明滑石粉对摩擦接触面并非起到润滑、降低磨擦的作用。在没有滑石粉淋洗的情况下,橡胶表层撕裂部位的舌状长条未经滑石粉的润滑发生脱落,而是粘附在橡胶表层随周期性运动搓成卷状,并在经过接触区域时,产生周期性的震动,造成载荷施加不稳定。当卷曲状聚集体足够大时,离心力超过其与橡胶轮的粘附力,卷曲状磨屑会被甩出,因此适当的增加淋洗速率对提高数据稳定性和降低设备损坏率都大有裨益,综合考虑,滑石粉淋洗速率设置为0.4 r/min具有较高的性价比。

### 2.2 对偶面粗糙度

粘贴在铝合金金属轮上的不同粗糙度的砂纸用以模拟真实路面,砂纸与橡胶反复的摩擦造成砂纸粗糙度降低是在所难免的,因此,了解不同粗糙度砂纸对

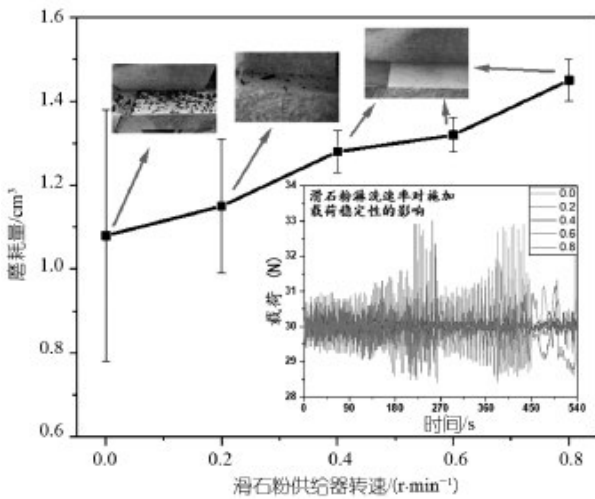


图2 滑石粉淋洗速率对磨损量及加载稳定性的影响

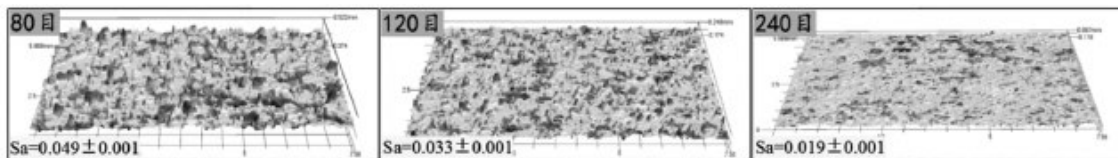


图3 三种目数砂纸三维形貌图及表面粗糙度

程度较大, 进而可能导致磨损过程中试样的弹性与塑性响应发生变化, 磨损形貌与磨损速率产生改变。除此以外, 应力集中程度还受试样本身硬度的影响<sup>[7]</sup>, 达到一定限度后将减小。这两种情况综合导致磨损速率并不随砂纸粗糙度的增加而单调增加, 而是取决于配方及设置的加载条件。

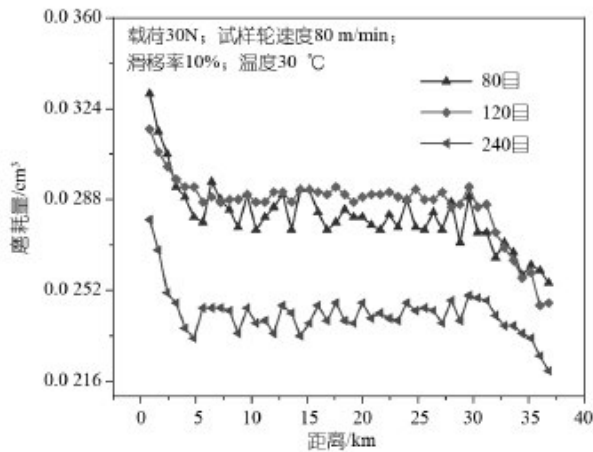


图4 不同粗糙度砂纸使用寿命

### 2.3 滑移率

FPS 中定义, 滑移率 (slip ratio) = (Sample speed - Drum speed) / Sample speed × 100%, 因此通过固定试样轮转速, 改变路面轮转速可以获得不同滑移率

橡胶磨损量及砂纸使用寿命是确保后续各项试验结果可信的前提。FPS 配套 80 目、120 目、240 目三种背胶砂纸, 对每种砂纸在显微镜下随机选取 30 个区域(单个区域面积约 30 mm<sup>2</sup>), 计算轮廓算数平均偏差  $S_a$  值, 不同目数砂纸的三维形貌与  $S_a$  值如图 3 所示, 可以看出三种砂纸表面粗糙度稳定性较好。

使用炭黑 N134 补强的配方在相同的条件下探索砂纸磨损寿命, 如图 4 所示, 不同目数的砂纸使用里程处于相同数量等级, 约 30 km, 单位里程下 240 目砂纸下试样的磨损量小, 120 目和 80 目砂纸磨损量大且接近。相同载荷下, 砂纸粗糙度不同反映了橡胶与表面微凸体接触时的局部应力集中程度的不同<sup>[6]</sup>, 一般低粗糙度应力集中程度较小而高粗糙度应力集中

对磨损体积与摩擦系数的影响规律。如图 5 所示, 用 N134 炭黑补强胎面胶为研究对象, 发现滑移率绝对值越大, 摩擦系数与磨损量越高, 当滑移率为 0 时, 此时摩擦系数最小, 但不为 0, 这源于橡胶的滞后, 在设定的磨损时间 (3 min) 下, 磨损前后并未发生明显的体积变化。磨损体积与滑移率的绝对值表现出类似幂函数的依赖规律, 另外, 值得注意的是, 相同绝对值下的滑移率, 正滑移率下的磨损体积明显高于负滑移率, 这可能是由于黏附摩擦力与橡胶滞后力的方向发生了反转, 进而导致了表观摩擦系数绝对值发生变化。

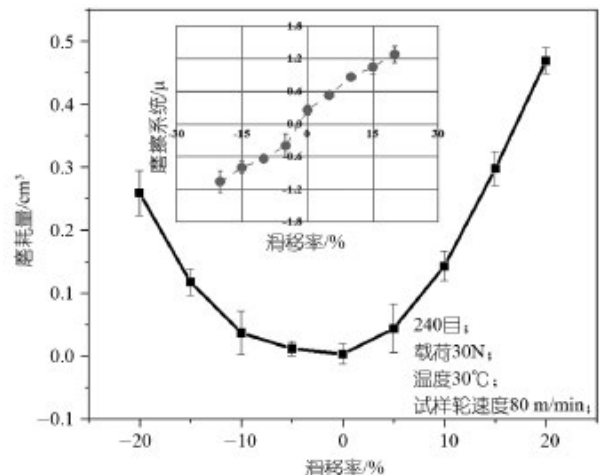


图5 滑移率对磨损体积与摩擦系数的影响

### 2.4 温度

不同的季节路面具有不同的温度，实际轮胎在路面行驶过程中，由于周期性的与路面摩擦作用和橡胶特有的应变滞后损失，胎面胶始终处在高于环境温度的状态。FPS 路面轮具备室温至 80 °C 区间内的温控功能，可以模拟不同季节胎面胶运行过程中的表面温度。图 6 为不同路面轮温度对 N134 炭黑补强胎面胶摩擦磨损的影响规律，可以看到，随着路面轮温度的提高，磨损量与摩擦系数呈现缓慢下降的趋势，但在研究温度区间内，表面温度对橡胶材料摩擦磨损的影响比较小。

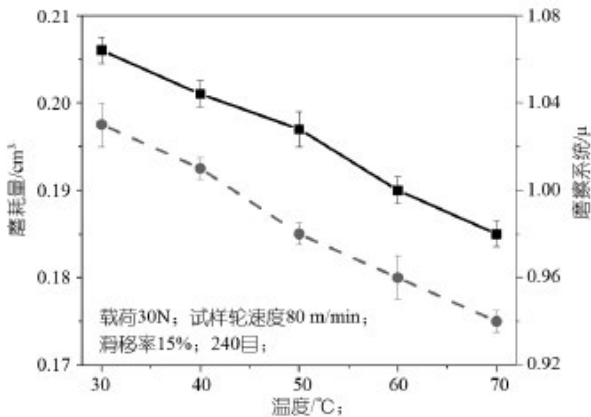


图 6 路面温度对磨损体积及摩擦系数的影响

### 2.5 载荷

轮胎的磨损速率受载荷影响很大，相关报道指出<sup>[4]</sup>，小型轿车与卡车、巴士轮胎的充气压不同，相应的，用于模拟的施加载荷就不同。根据轮胎接地印痕与压强测算得出，一般轮胎胎面胶所受载荷在 10~50 N 的区间。FPS 具有载荷调节功能，可在 0~80 N 区间内选择相应的载荷条件。根据实际的应用，本实验选择 10~50 N 区间考察 N134 补强胎面胶在不同载荷下的耐磨性能。如图 7 所示，随着载荷的增加，磨损率近似线性增长，但摩擦系数略有降低，分析认为是随着载荷的增加，形变增加，摩擦界面温度升高进而摩擦系数略有降低。

### 2.6 速度

速度对胎面磨损的影响一般体现在两个方面，一方面体现在施加机械作用的频率，与时间相对应；另一方面体现在作用过程中样品表面温度的累积，二者对磨损呈相反的影响。图 8 为相同滑移率不同速度对 N134 炭黑补强胎面胶摩擦磨损的影响规律，可以看到，随着试样轮速度的提高，磨损量与摩擦系数呈现缓慢

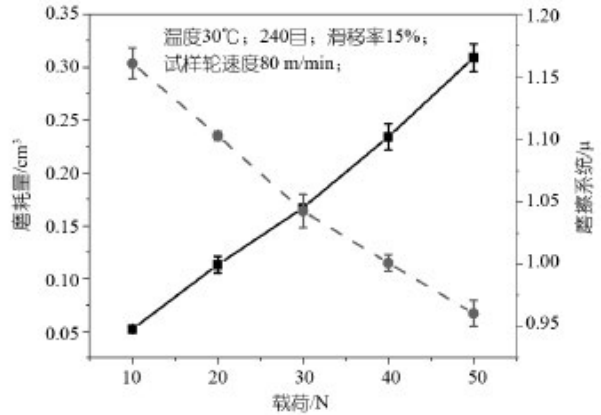


图 7 载荷对磨损体积及摩擦系数的影响

增长的趋势，相比较载荷、滑移率对胎面胶磨损的影响，速度的改变对磨损结果的影响较小，基本在误差范围之内。相比温度（图 6）对摩擦系数的影响，在所考察区间范围内，速度对磨损测试的影响略高于温度因素。FPS 磨耗试验机具备实时红外检测试样表面温度的功能，需要指出的是，路面设定温度不等同于橡胶表面实时温度，一般表现为低速下橡胶实时温度低于设定温度，达到一定时速后才与路面设定温度基本一致，然后超过。因此在实施磨损试验过程中，可通过观察试样轮表面的实际温度从而关联具有参考意义的滑移速度。

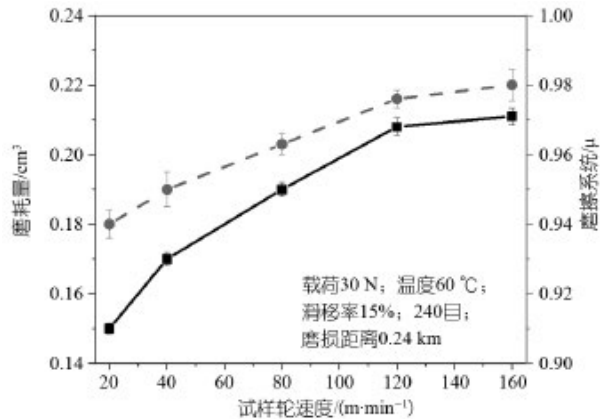


图 8 速度对磨损体积及摩擦系数的影响

### 2.7 配方

使用牌号分别为 N134、N220、N234、N330、N339 炭黑补强胎面胶配方，每个配方制备 5 个试样，磨耗测试结果如图 9 所示。可以看到，磨耗体积从小到大的排序为 V (N134) < V (N234) < V (N220) < V (339) < V (330)，与炭黑粒径、结构度对胎面胶耐磨性的影响相符。相应的，磨耗结果的相对平均偏差分别为 1.87%、1.94%、3.21%、0.50%、3.67%，

每组结果最大值与最小值的相对偏差分别为 2.38%、2.54%、4.62%、0.62%、4.29%，可以保证数据的重复性与可对比性。

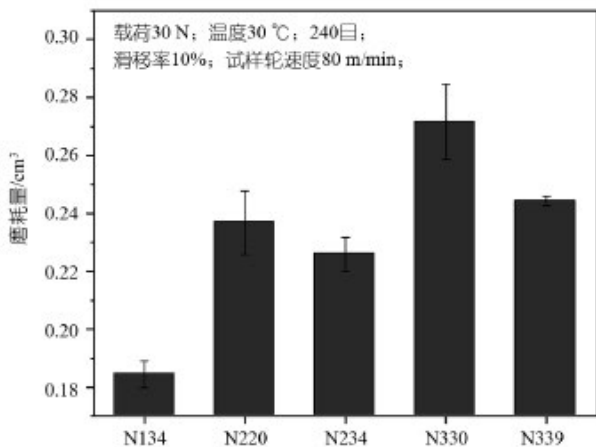


图 9 不同炭黑补强配方的磨损体积

### 3 结语

新型兰伯恩磨损试验机有望在轮胎胎面胶耐磨性评价精度与效率方面产生积极的作用，使用还需注意以下几点：

(1) 滑石粉淋洗速率明显影响加载稳定性与数据重复性，在确定试验条件前需要综合考虑滑石粉淋洗速率。

(2) 测试条件确定后，需要摸索砂纸的磨损寿命，明确砂纸更换的时间。

(3) 相比速度和温度对摩擦磨损的影响，载荷和滑移率对胎面胶磨损体积影响较大，应结合轮胎实际工况下的摩擦系数进行选择使用。

(4) 不同牌号炭黑补强胎面胶配方的测试结果显示，FPS 磨损试验机的重复性与可区分性很好，相对平均偏差可以控制在 5% 以内。

#### 参考文献：

- [1] SCHALLAMACH A. Friction and abrasion of rubber [J]. RUBBER CHEM. & TECHNOL., 1958, 31(5): 982-1 014.
- [2] ISO 23794:2015, Rubber, vulcanized or thermoplastic—Abrasion testing—Guidance.
- [3] GROSCHE K A. Type wear at controlled slip [J]. WEAR, 1961, 4: 356-371.
- [4] MOURI H. Optimized laboratory test condition to predict tire tread wear [J]. RUBBERWORLD, 2021: 26-30.
- [5] 冯展威, 代全权, 贺剑云等. 聚氨基酸接枝聚异戊二烯的仿生合成与性能 [J]. 高分子学报, 2023, 54(5): 593-600.
- [6] LIU CZ, WANG G L, ZHOU H C, et al. Design of two-wheeled motorcycle tire crown contour bioinspired by cat paw pads [J]. APPLIED BIONICS AND BIOMECHANICS, 2020: 1-10.
- [7] LV T, ZANG LG, XUE C, et al. Study on the effect of different design parameters of sidewall insert rubber on the mechanical characteristics of self-supporting run-flat tires [J]. LUBRICANTS, 2023, 11(11): 1-17.

## Research on the usage of fully automatic lamborn rubber wear testing machine

Li Boru, Kui Siao, Chen Zhaobin, Wang Xiaojian

(Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, Jilin)

**Abstract:** This article introduces a fully automatic Lambertian abrasion tester (FPS) equipment component and its structure, and tests the effects of different sandpaper mesh sizes, slip ratios, talc powder flow rates, loads, and other factors on the wear amount and friction coefficient stability of tire tread rubber. Under fixed conditions, the relative average deviation of the wear volume of different carbon black reinforced tread rubber can be controlled within 5%, and there is obvious wear differentiation.

**Key words:** abrasion testing machine; wear of tread rubber; repeatability; differentiation

(R-03)

