

# 炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦差异性分析

徐召来, 刘震, 孔祥朋, 吉欣宇, 李汉华

(怡维怡橡胶研究院有限公司, 山东 青岛 266045)

**摘要:** 研究不同负荷和速度下炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数, 并对其磨损表面进行了扫描电子显微镜和透射电子显微镜表征。结果表明: 炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随着速度的增大呈线性下降, 随着负荷的增大略有降低, 而白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随着速度的增大呈非线性下降, 随着负荷的增大先迅速下降后缓慢降低; 白炭黑填充硫化胶摩擦面橡胶膜较薄, 裸露白炭黑粒子, 过渡区摩擦力较大, 不能忽略; 炭黑填充硫化胶摩擦面的橡胶膜厚度较大, 表面炭黑粒子被橡胶大分子覆盖, 过渡区摩擦力小, 可以忽略。

**关键词:** 炭黑; 白炭黑; 硫化胶; 湿摩擦因数; 抗湿滑性能; 负荷; 速度

**中图分类号:** TQ330.38<sup>+</sup>7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-8171(2021)09-0548-05

**DOI:** 10.12135/j.issn.1006-8171.2021.09.0548



OSID 开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

轮胎的抗湿滑性能一直是轮胎技术人员、汽车厂技术人员和性能测试人员重点关注的对象。自欧盟轮胎标签法规实施以来, 消费者对轮胎的抗湿滑性能也越来越关注。因此设计开发高抗湿滑性能轮胎成为轮胎技术人员的一个重要课题。以溶聚丁苯橡胶(SSBR)和白炭黑配合技术为基础的绿色轮胎被发明以来, 技术人员普遍认识到填充白炭黑胎面胶相比填充炭黑胎面胶轮胎具有更加优异的抗湿滑性能<sup>[1-2]</sup>。目前市场上开发的抗湿滑轮胎胎面胶配方都涉及到白炭黑的应用。虽然有研究者提出较高的0℃损耗因子( $\tan\delta$ )和模量等<sup>[3-5]</sup>是白炭黑胎面胶具有优异抗湿滑性能的原因, 但在不同测试条件下填充炭黑和白炭黑硫化胶湿摩擦规律性的相关研究很少。

王梦蛟等<sup>[6-7]</sup>在研究新型补强材料——双相炭黑的抗湿滑性能时, 提出了轮胎与路面接触分为3个区(即水润滑区、水润滑区与界面润滑区的过渡区和界面润滑区), 并指出负荷、硬度、 $\tan\delta$ 、路面粗糙度和花纹形状等因素与抗湿滑性能的相关性。

本工作利用综合摩擦试验机(RTM)模拟特定湿路面条件, 研究炭黑和白炭黑填充硫化胶在不同测试条件下湿摩擦因数的变化规律, 同时利用

扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)对硫化胶的磨损表面进行表征, 并引用王梦蛟湿滑三区理论分析导致炭黑和白炭黑填充硫化胶湿摩擦因数在不同条件下变化规律差异的原因。

## 1 实验

### 1.1 主要原材料

SSBR, 牌号2466, 台橡股份有限公司产品; 顺丁橡胶(BR), 牌号9000, 中国石化齐鲁石化公司产品; 氧化锌, 大连氧化锌厂产品; 炭黑N234, 上海卡博特化工有限公司产品; 白炭黑1165MP, 确成硅化学股份有限公司产品; 偶联剂Si69, 南京曙光化工集团有限公司产品。

### 1.2 配方

炭黑填充胶料配方: SSBR2466 75, BR9000 25, 氧化锌 3.5, 硬脂酸 2, 炭黑N234 变量, 防老剂4020 2, 防护蜡 2, 硫黄 1.4, 促进剂CBS 2。

白炭黑填充胶料配方: SSBR2466 75, BR9000 25, 氧化锌 3.5, 硬脂酸 2, 白炭黑1165MP 变量, 偶联剂Si69 白炭黑用量的8%, 防老剂4020 2, 防护蜡 2, 硫黄 1.4, 促进剂CBS 2, 促进剂DPG 2.1。

### 1.3 主要设备和仪器

XSM-1/10-120型密炼机, 上海科创橡塑机

**作者简介:** 徐召来(1984—), 男, 山东日照人, 怡维怡橡胶研究院有限公司工程师, 硕士, 主要从事半钢子午线轮胎配方开发工作。

**E-mail:** xuzl@everi.com.cn

械设备有限公司产品; XK-160型开炼机, 青岛光越橡胶机械制造有限公司产品; MDR2000型无转子流变仪, 美国阿尔法科技有限公司产品; XLB-D600×600型平板硫化机, 浙江湖州东方机械有限公司产品; RTM, 日本上岛制作所产品; 邵氏硬度计, 中国台湾高铁检测仪器有限公司产品。

#### 1.4 试样制备

##### 1.4.1 混炼工艺

炭黑填充胶料采用3段混炼工艺。一段和二段混炼转子转速为 $90\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 密炼机温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 一段混炼工艺为: 加生胶塑炼 $30\text{ s}$ →加 $2/3$ 炭黑, 混炼 $1\text{ min}$ →加剩余 $1/3$ 炭黑混炼 $2\text{ min}$ →排胶(温度超过 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开通冷却水); 二段混炼工艺为: 加一段混炼胶( $30\text{ s}$ )→加氧化锌和硬脂酸, 混炼 $1\text{ min}$ →排胶(温度超过 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开通冷却水); 三段混炼密炼机温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 转子转速为 $60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 混炼工艺为: 加入二段混炼胶, 混炼 $30\text{ s}$ →加硫黄和促进剂CBS, 混炼 $1\text{ min}$ →排胶(温度超过 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开通冷却水)。终炼胶在XK-160型开炼机上薄通3次, 下片备用。

白炭黑填充胶料采用3段混炼工艺。一段混炼密炼机温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 转子转速为 $90\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 混炼工艺为: 加生胶塑炼 $30\text{ s}$ →加 $2/3$ 白炭黑和 $2/3$ 偶联剂Si69, 混炼 $1\text{ min}$ →加剩余 $1/3$ 白炭黑和 $1/3$ 偶联剂Si69, 温度达到 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ →排胶, 开炼机薄通3次后停放 $2\text{ h}$ 以上; 二段混炼密炼机温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 转子转速为 $85\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 混炼工艺为: 加入一段混炼胶, 混炼 $30\text{ s}$ →加氧化锌、硬脂酸、防老剂和防护蜡, 混炼 $2\text{ min}$ →清扫→ $2.5\text{ min}$ 后排胶, 开炼机薄通3次后停放 $2\text{ h}$ 以上; 三段混炼密炼机温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 转子转速为 $50\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 混炼工艺为: 加入二段混炼胶, 混炼 $30\text{ s}$ →加入硫黄和促进剂, 混炼 $1\text{ min}$ →清扫→ $2\text{ min}$ 后排胶。终炼胶在XK-160型开炼机上薄通3次, 下片备用。

##### 1.4.2 硫化工艺

将混炼胶停放 $24\text{ h}$ 后在平板硫化机上硫化出厚度为 $16\text{ mm}$ 、直径为 $80\text{ mm}$ 的圆形试样。硫化条件为 $165\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ MPa}\times(t_{90}+10\text{ min})$ 。

#### 1.5 性能测试

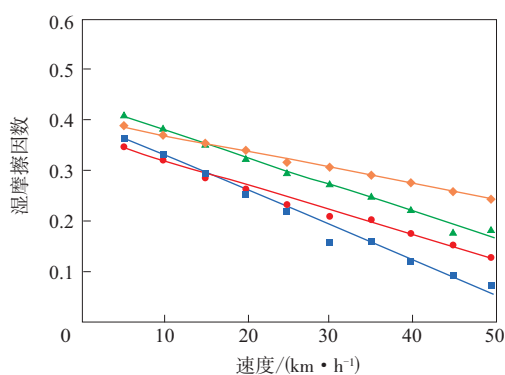
采用RTM对胶料的湿摩擦因数进行测试, 条

件为: 湿路面(路面 $106\text{ }\mu\text{m}$ 磨砂玻璃), 水流量恒定, 滑移率为 $20\%$ , 以速度和负荷为试验变量, 常温测试。

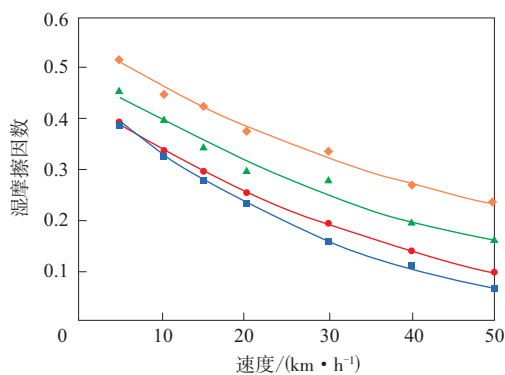
## 2 结果与讨论

### 2.1 速度对硫化胶湿摩擦因数的影响

负荷为 $40\text{ N}$ 时不同用量炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随速度的变化曲线如图1所示。



(a) 炭黑



(b) 白炭黑

用量/份: ■—45; ●—55; ▲—65; ◆—80。

图1 负荷为 $40\text{ N}$ 时不同用量炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随速度的变化曲线

从图1可以看出, 随着速度的增大, 炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数均呈下降趋势, 但炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随速度的增大呈线性下降, 而白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随速度的增大呈非线性下降。

邵尔A型硬度相同的炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随速度的变化曲线如图2所示。

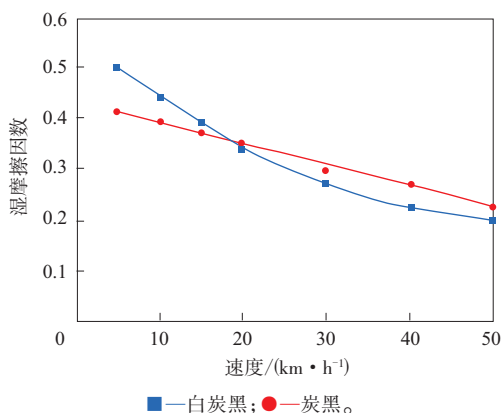


图2 邵尔A型硬度相同的炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随速度的变化曲线

从图2可以看出,炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随速度的增大呈线性下降趋势,而白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数则随速度的增大呈非线性下降趋势。

根据三区理论,胶料的湿摩擦因数由三区相对大小和各区摩擦因数共同决定<sup>[6-7]</sup>(见图3)。其中水润滑区的摩擦力取决于水的剪切力,其值非常小可以忽略不计;界面润滑区摩擦因数较大,其面积和摩擦因数共同决定了湿摩擦因数的大小。在速度增大的条件下,水润滑区和过渡区面积增大,界面润滑区面积减小,进而导致湿摩擦因数降低。炭黑填充硫化胶过渡区的摩擦因数接近于零,其湿摩擦因数取决于界面润滑区面积,而界面润滑区面积与速度呈线性关系,因此其湿摩擦因数随速度的增大而线性降低;白炭黑填充硫化胶的过渡区摩擦因数不等于零,随着速度的增大,其过渡区面积增大,过渡区的湿摩擦因数增大,同时随着速度的增大,界面润滑区面积线性减小,界面区的湿摩擦因数线性下降,在过渡区和界面区共同作用下,随着速度的增大,湿摩擦因数呈非线性下降。

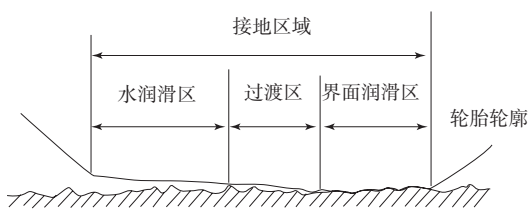
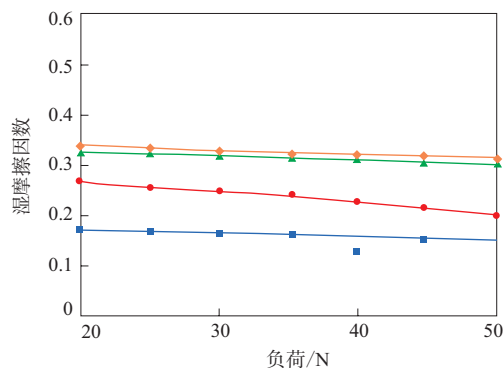


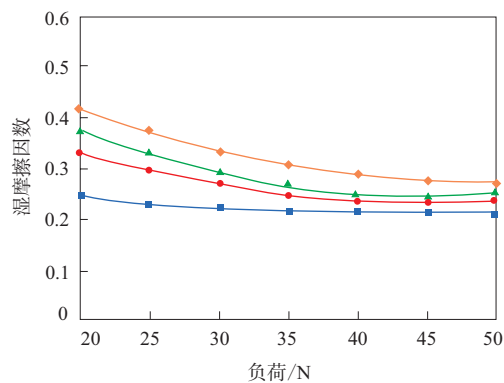
图3 润湿条件下滚动轮胎与路面接触的三区示意

## 2.2 负荷对硫化胶湿摩擦因数的影响

速度为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时不同用量炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随负荷的变化曲线如图4所示。



(a) 炭黑



(b) 白炭黑

注同图1。

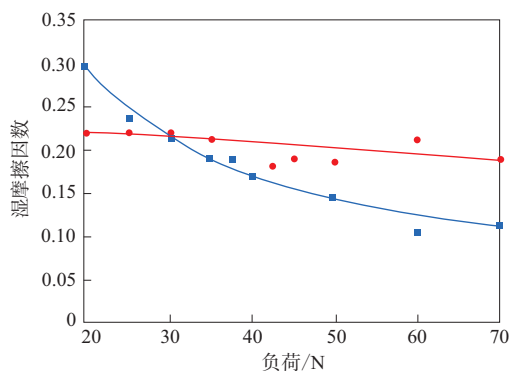
图4 速度为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时不同用量炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随速度的变化曲线

从图4可以看出,炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随着负荷的增大呈线性下降,而白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随着负荷的增大先快速下降再缓慢下降。

邵尔A型硬度相同的炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随速度的变化曲线如图5所示。

从图5可以看出,随着负荷的增大,炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数呈线性下降,而白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数先快速下降后缓慢下降。根据三区理论,过渡区面积的大小与橡胶的弹性模量( $E'$ )和表面粗糙度有关,与负荷无关。在硫化胶和路面表面粗糙度不变的条件下,负荷增大,过

渡区的面积不变。过渡区摩擦力取决于过渡区中弹性体与路面直接接触面的摩擦因数和硫化胶的 $E'$ ,如图6所示。



注同图2。

图5 邵尔A型硬度相同的炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随负荷的变化曲线

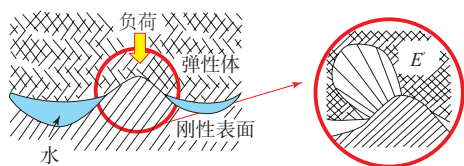


图6 润湿条件下滚动轮胎与路面接触过渡区的压力及实际接触区域示意

其中 $E'$ 和弹性体与路面直接接触面的摩擦因数仅取决于路面和胶料,因此在路面和硫化胶都固定的情况下,过渡区的摩擦力不受负荷影响,为常数。过渡区摩擦因数 $\mu_G = f_G/N$  ( $f_G$ 为过渡区摩擦力,  $N$ 为负荷),当 $f_G$ 恒定时,  $N$ 增大,则 $\mu_G$ 降低。炭黑填充硫化胶的 $f_G$ 非常小,基本等于零,随着 $N$ 的增大,  $\mu_G$ 基本不变;而白炭黑填充硫化胶的 $f_G$ 不等于零,随着 $N$ 的增大,  $\mu_G$ 呈非线性下降。 $f_G$ 不同造成炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随着负荷变化呈现不同的变化规律<sup>[8-9]</sup>。

### 2.3 硫化胶的TEM和SEM分析

炭黑和白炭黑填充硫化胶摩擦面的TEM照片如图7所示。由图7可见,相比白炭黑填充硫化胶,炭黑填充硫化胶摩擦面的橡胶膜厚度较大;通用橡胶模量在室温下较低,厚橡胶膜不利于微观尺度上刺穿水膜,容易形成水膜的压力楔,进而降低摩擦力。

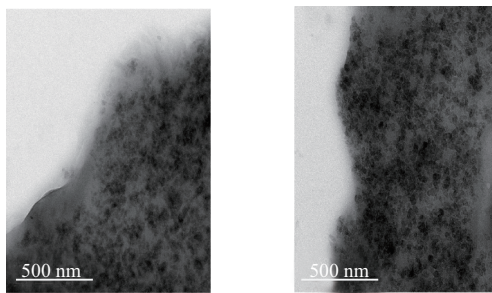
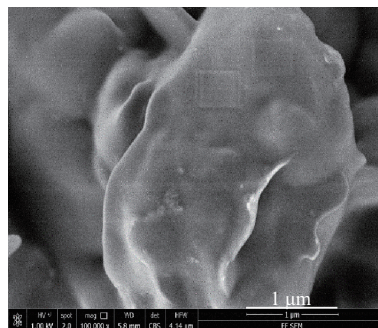
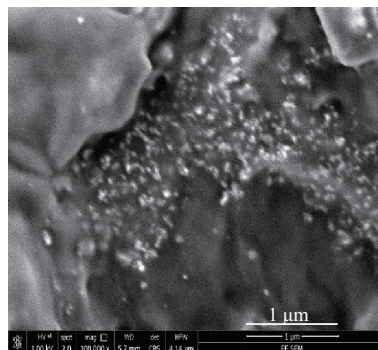


图7 炭黑(左)和白炭黑(右)填充硫化胶摩擦面的TEM照片

炭黑和白炭黑填充硫化胶摩擦之后表面的SEM照片如图8所示。由图8可见,白炭黑填充硫化胶的摩擦表面裸露大量的白炭黑,但是炭黑填充硫化胶的摩擦表面不存在裸露的炭黑,其表层被橡胶膜覆盖。这种裸露填料粒子的胶膜模量高,在微观尺度可以快速刺穿水膜。



(a) 炭黑



(b) 白炭黑

图8 硫化胶摩擦后表面的SEM照片

TEM和SEM分析结果表明,白炭黑填充硫化胶的表层橡胶膜更薄,表面裸露白炭黑粒子,有利于微观尺度的水膜破坏。微观尺度的水膜破坏是影响 $\mu_G$ 的重要因素,因此白炭黑填充硫化胶的 $\mu_G$ 不

等于零,  $f_G$  不可忽视; 而炭黑填充硫化胶的摩擦面橡胶膜较厚, 未有裸露的填料粒子, 在微观尺度很难破坏水膜, 因此  $f_G$  很小,  $\mu_G$  接近于零。

### 3 结论

根据橡胶块接地的三区理论研究炭黑和白炭黑填充硫化胶湿摩擦因数随速度和负荷的变化规律, 结合TEM和SEM照片的形貌观察, 得出以下结论。

(1) 在一定测试条件下, 炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随着速度的增大呈线性下降, 随着负荷的增大略有下降; 白炭黑填充硫化胶的湿摩擦因数随着速度的增大呈非线性下降, 随着负荷的增大呈现先快速后缓慢下降。

(2) TEM和SEM照片显示, 炭黑填充硫化胶的摩擦面的橡胶膜覆盖填料, 橡胶膜厚度较大, 而白炭黑填充硫化胶的摩擦面裸露填料粒子, 有较薄的橡胶膜。炭黑填充硫化胶的过渡区摩擦力较小, 可以忽略; 白炭黑填充硫化胶的过渡区摩擦力较大, 不能忽略。

### 参考文献:

- [1] 王检, 刘力. 不同结构白炭黑对绿色轮胎胎面胶性能的影响[J]. 橡胶工业, 2019, 66(2): 106-110.
- [2] 张丽霞, 张辉, 林炳钦, 等. 轮胎湿滑路面附着性能的影响因素分析[J]. 轮胎工业, 2019, 39(11): 647-651.
- [3] VEITH A G, POTTINGER M G. Tire wet traction: Operational severity and its influence on performance[M]. New York: Springer US, 1974.
- [4] SCHALLAMACH A. A theory of dynamics rubber friction[J]. The Science Direct, 1963, 6(5): 375-382.
- [5] GROSCH K A. The relation between the friction and visco-elastics properties of rubber[J]. Royal Society, 1963, 274(1356): 21-39.
- [6] WANG M J, KUTSOVSKY Y. Effect of fillers on wet skid resistance of tires. Part I: Water lubrication vs. filler-elastomer interactions[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2008, 81(4): 552-575.
- [7] WANG M J, KUTSOVSKY Y. Effect of fillers on wet skid resistance of tires. Part II: Experimental observations on effect of filler-elastomer interactions on water lubrication[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2008, 81(4): 576-599.
- [8] MOORE D F. The friction and lubrication of elastomers[J]. The Aeronautical Journal, 1975, 79(769). DOI: 10.1017/S0001924000034795.
- [9] MOORE D F. Principles & Applications of Tribology[M]. Pennsylvania: Franklin Book Co., 1975.

收稿日期: 2021-03-12

## Difference in Wet Friction Properties between Carbon Black and Silica Filled Vulcanizates

XU Zhaolai, LIU Zhen, KONG Xiangpeng, JI Xinyu, LI Hanhua

(EVE Rubber Research Institute Co., Ltd, Qingdao 266045, China)

**Abstract:** The wet friction coefficients of carbon black and silica filled vulcanizates under different loads and speeds were studied, and the worn surfaces were characterized by scanning electron microscopy and transmission electron microscopy. The results showed that the wet friction coefficient of carbon black filled vulcanizate decreased linearly with the increase of speed, and slightly decreased with the increase of load, while the wet friction coefficient of silica filled vulcanizate decreased nonlinearly with the increase of speed, and decreased rapidly at first and then slowly decreased with the increase of load. The rubber film on the friction surface of silica filled vulcanizate was thin, and the silica particles were exposed; therefore the friction force in the transition zone was relatively large and could not be ignored. The thickness of the rubber film on the surface of carbon black filled vulcanizate was large, the surface carbon black particles were covered by the rubber macromolecules, and the friction force in the transition zone was small and could be ignored.

**Key words:** carbon black; silica; vulcanizate; wet friction coefficient; wet skid resistance; load; speed