功能性树脂对二氧化硅填充胎面胶料流变性能及硫化特性的影响研究

宁卫明[1]，徐岩[1]，董梓亮[2,3]，张宁[1]，龙飞飞[1]，刘加强[1]，郑涛[1]，王林杰[2,3]

（1. 山东丰源轮胎制造股份有限公司，山东　枣庄　277300；
2. 青岛科技大学，智能制造学院，山东　青岛　266061；
3. 青岛科技大学，轮胎先进装备与关键材料国家工程研究中心，山东　青岛　266061）

摘要：随着绿色轮胎技术的发展，高分散二氧化硅 / 硅烷偶联剂体系在胎面胶中的应用日益成熟。而功能性树脂作为重要的配合助剂，对胶料的加工性能、硫化特性及物理机械性能都具有重要影响。本文以实验室快检流变数据为基础，研究了四种不同型号功能性树脂（5600、CSR6383、HB103、WSR6100）在二氧化硅填充天然胶 / 顺丁胶 / 丁苯胶并用体系中的应用效果。从最小转矩（M_L）、最大转矩（M_H）及焦烧时间（t_{10}）等流变参数出发，分析不同树脂对胶料黏度、交联密度及加工安全性的影响原理。实验结果表明，HB103 树脂显著提高胶料模量，但加工黏度也相应增大；5600 树脂表现优异的加工安全性；而 CSR6383 与 WSR6100 两种树脂在性能上较为平衡。因此本文为高性能绿色轮胎胎面胶的配方设计提供了数据支撑与理论参考。

关键词：功能性树脂；二氧化硅；流变性能；硫化特性；绿色轮胎

引用论文：宁卫明，徐岩，董梓亮，等 . 功能性树脂对二氧化硅填充胎面胶料流变性能及硫化特性的影响研究 [J]. 橡塑技术与装备，2026, 52(11):60-64.

中图分类号：TQ333.93　　**文章编号**：1009-797X(2026)11-0060-05

文献标识码：B　　DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.11.012

在现代橡胶工业中，尤其是高性能子午线轮胎的生产制造中，要通过降低滚动阻力以提高燃油经济性的同时保持优异的抗湿滑性和耐磨性，是其配方设计的核心目标（即“魔鬼三角”平衡问题）。传统炭黑补强体系在耐磨性上表现极佳，但在降低滚动阻力方面有明显的不足[1]。因此，白炭黑（二氧化硅）配合硅烷偶联剂（如 Si69）的“绿色轮胎”配方体系已逐渐成为行业主流[2]。

然而，二氧化硅粒子表面含有大量硅羟基，极易形成团聚，导致胶料门尼黏度高、混炼分散困难。为解决这一问题，除了使用硅烷偶联剂进行表面改性外，引入功能性树脂是一条有效的技术路径。功能性树脂在橡胶中可充当增黏剂、增塑剂或补强剂，其极性、分子量及软化点等参数直接决定与橡胶基体及填料的相互作用[3]。

由于市场上功能性树脂种类繁多，诸如石油树脂、萜烯树脂、松香树脂及改性酚醛树脂等，不同树脂在特定配方中的表现有明显差异[4]。本文以一组系统的实验室快检流变数据为基础，对四种典型的功能性树脂在二氧化硅填充胎面胶配方中的应用表现进行分析，通过门尼焦烧及硫化仪数据总结出树脂结构对胶料流变行为的影响规律，为实际生产制造中的树脂选型提供科学依据[5~7]。

1　实验部分

1.1　原材料

实验所用主要原材料如下：

1.1.1　橡胶基体

天然橡胶（TSR20）、顺丁橡胶（BR9000/SOL5251H）、丁苯橡胶（SBR SOL5251H/SOL6440H）。基体橡胶总用量设定为 100 份。

1.1.2　补强填充体系

高分散二氧化硅（1165MP，75 份）、炭黑（N375，4 份）。

1.1.3　硅烷偶联剂

双 -[3-（三乙氧基硅）丙基]四硫化物（Si69-Liquid，6 份）。

作者简介：宁卫明（1980-），男，高级工程师，学士，主要从事轮胎结构设计、配方设计及管理工作。

1.1.4 软化增塑剂

芳烃油（TDAE，5 份）。

1.1.5 功能性树脂（变量）

分别选用 5600、CSR6383、HB103、WSR6100 四种树脂，添加量均为 21.5 份。

1.1.6 硫化及防护体系

氧化锌（ZnO）、硬脂酸（SAD）、防老剂 4020、微晶蜡 C36、促进剂 CZ、促进剂 DPG—FM、硫磺（S）。

1.2 配方设计

实验采用基础配方不变，仅改变功能性树脂种类的对比设计方法。所有配方胶料总份数控制在 230.75 份左右。

1.3 测试方法与条件

1.3.1 混炼工艺

采用两段混炼法。一段混炼加入橡胶、填料、树脂、硅烷及油，排胶温度控制在 150 ℃以下以确保硅烷偶联反应充分；二段混炼加入硫化体系。

1.3.2 流变测试

使用无转子硫化仪（MDR）进行测试。

1.3.3 测试条件

190×3 min。

1.3.4 测试参数

最小转矩（M_L，反映胶料流动性）、最大转矩（M_H，反映交联密度及模量）、焦烧时间（t_{10}，反映加工安全性）、RPA 测试、DMA 温度扫描。

2 结果与讨论

2.1 物理机械性能分析

2.1.1 190 ℃×3 min 的快检测试

在 190 ℃×3 min 的快检测试条件下，四种不同的功能树脂配方的流变特性有较为明显的差异，如图 1 知，M_H 值在 17.93~19.10 dN·m 之间，917313—B02 配方（使用 HB103 树脂）的 MH 值最高，因此其配方硫化后交联密度最大。M_L 值则以 917313—B02—R03 配方（使用 CSR6383 树脂）最低（4.26 dN·m），故其加工流动性较好。由图 2 知 t_{10}（焦烧时间）在 0.28~0.56 min 之间，其中 917313—B02—R02 配方（使用 5600 树脂）焦烧时间最短，生产制造过程中应格外注意加工安全。

2.1.2 150℃×60 min 流变测试

在 150℃×60 min 的实验室流变测试中，M_H 值显著高于快检结果，表明长时间硫化后交联更充分。如

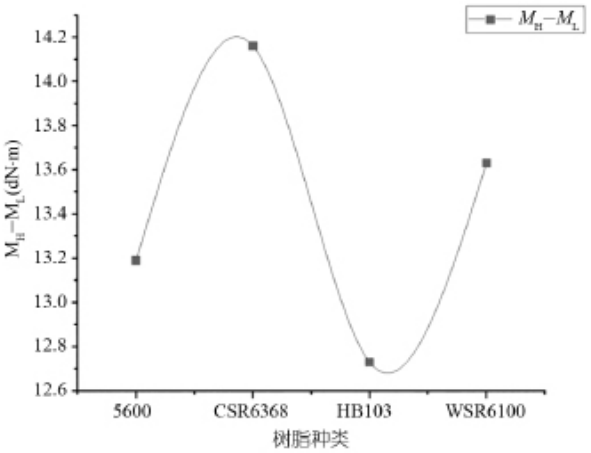


图 1 快检测试条件下 M_H–M_L

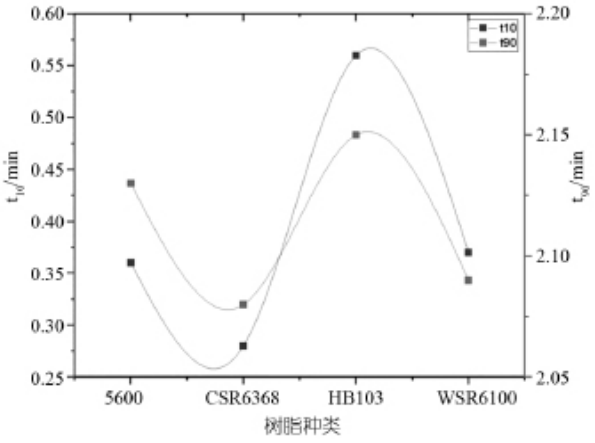


图 2 快检测试条件下不同配方硫化时间点（t_{10}/t_{90}）波动图

图 3 所示，917313—B02 配方的 M_H 值最高（24.52 dN·m），再次验证其交联密度最大。由图 4 所示 t_{10} 时间差异显著，917313—B02 配方的 t_{10} 最长（5.13 min），故其硫化起步较慢，对加工操作的安全性十分有利。

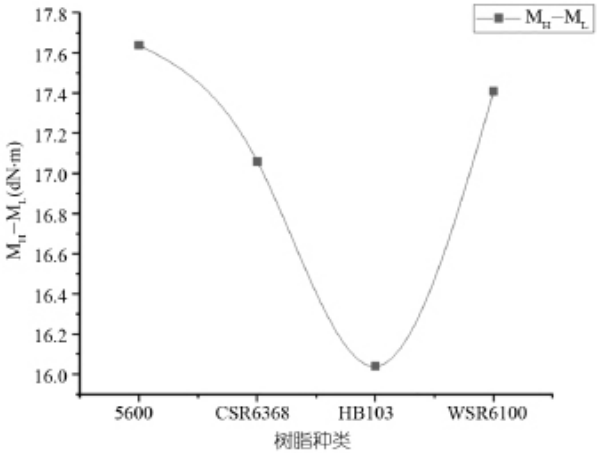


图 3 实验室流变测试条件下 M_H–M_L

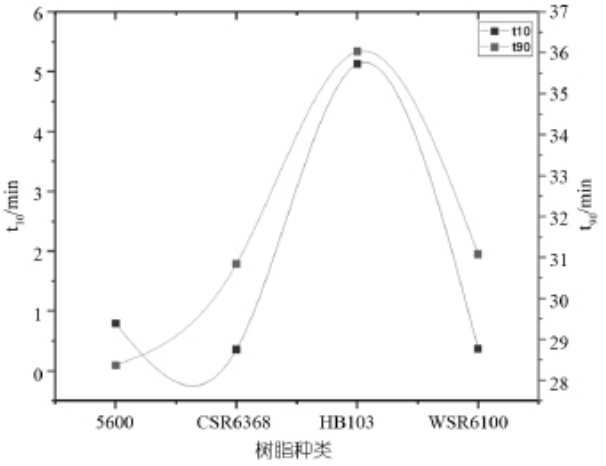


图 4　实验室流变测试条件下不同配方硫化时间点（t_{10}/t_{90}）波动图

2.1.3　四种配方在 150 ℃ ×40 min 硫化后的物理性能如下

（1）硬度：如图 5 所示，硬度均在 66~67 邵 A 之间，彼此差异不大。

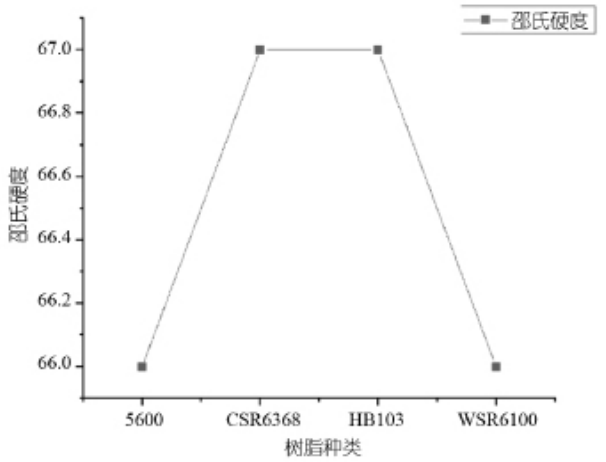
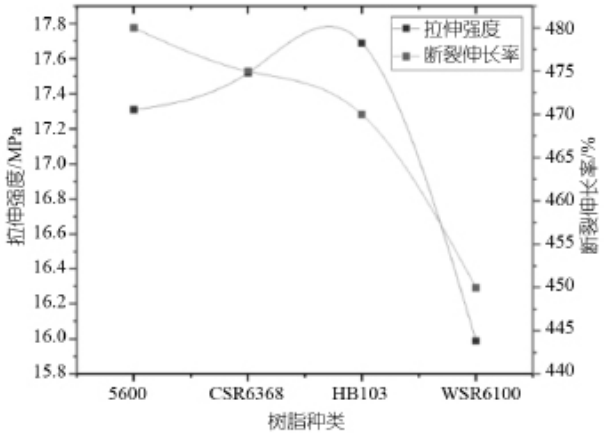


图 5　不同树脂样品邵氏 A 硬度测试结果

（2）拉伸性能：如图 6 所示，917313−B02−R03 配方（CSR6383）的拉伸强度最高（17.52 MPa），而 917313−B02−R01 配方（WSR6100）的拉伸强度最低（15.99 MPa）。

（3）伸长率：如图 6 所示，四种不同的树脂配方的断裂伸长率均在 450%~480% 之间，其中 917313−B02−R03 配方表现最佳。

（4）模量：如图 7 所示，M100~M300 模量差异很小，说明树脂类型对中高应变下的刚度影响较小。



（测试条件：室温 /23 ℃）

图 6　不同树脂样品拉伸性能测试结果

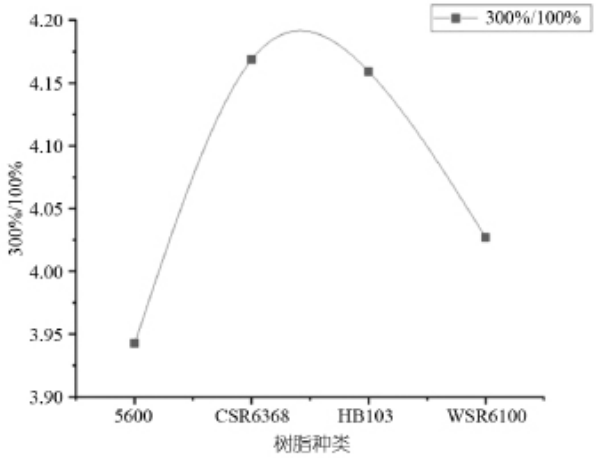


图 7　不同树脂定伸应力（模量）测试结果

2.2　动态力学性能分析

2.2.1　RPA 测试

917313−B02 配方的 G'@1.000% 最高（2099.97 kPa），表明其在小应变下填料网络较强；tanδ 值在 0.175~0.21 之间，917313−B02−R01 配方的 tanδ@5.000% 最低，表明其滚动阻力较小。

2.2.2　DMA 温度扫描

玻璃化转变温度（T_g）：在 −11.71~−9.76 ℃之间，917313−B02 配方 T_g 最低（−11.71 ℃），低温性能较好；tanδ 峰值：均在 0.52~0.551 之间，917313−B02−R01 配方最高，说明其阻尼特性较强；储能模量（E'）：在 −20~70 ℃范围内，917313−B02 配方在低温下模量较低，高温下也相对平稳，说明其温度依赖性较小。

2.3　各配方优劣

2.3.1　配方 917313−B02（HB103）

优势：具有较高的交联密度，硫化后形成的三维网络结构紧密，材料具有较高的模量、优异的耐热性和抗压缩永久变形能力。其低温玻璃化转变温度（T_g）较低，耐低温性能好，高温模量稳定，抗蠕变性能突出，适用于长期承受热负荷的工况。

不足：硫化起步缓慢，焦烧时间（t_{10}）偏长，因此要达到正硫化所需要更长的硫化周期或者提高硫化温度，可能影响生产效率；加工流动性一般，混炼、压延、注模时阻力较大，故用其加工结构复杂的制品应调整工艺条件如提高温度或加入软化剂来改善充模性能。

2.3.2 配方 917313−B02−R01(WSR−6100)

优势：由于胶料具有较低的滚动阻力，能够有效减少能量损耗，提升燃油经济性；加工流动性较好，故胶料在混炼、挤出和成型过程中表现出良好的浸润性和变形能力，生产效率高，制品尺寸精度易保证。

不足：由于其拉伸强度较低，可能影响制品在动态负荷下的耐久性；其配方损耗因子（tanδ）偏高，动态变形时滞后损失大，生热较高，在高速或高频往复运动场合中温升对材料老化影响较大。

2.3.3 配方 917313−B02−R02(5600)

优势：胶料焦烧时间短，硫化起步快，能够缩短硫化周期，提升生产效率。同时加工安全性好，在常规混炼和挤出温度下不易发生早期硫化（焦烧），适合快速成型工艺。

不足：胶料交联密度一般，导致硫化胶的模量和耐热性较弱，高温下性能保持率较低，高温性能较弱。

2.3.4 917313−B02−R03（CSR−6383）

优势：胶料具有优异的拉伸强度和断裂伸长率，故能够兼顾高强度与高弹性，综合力学性能优异，能适用于复杂的受力环境。

不足：滚动阻力略高，故在动态使用时能耗较高，不利于节能需求；低温模量偏高，低温环境下材料刚度增大、弹性下降，不适宜用于寒冷地区。

3 总结

（1）树脂类型对硫化特性的影响：不同树脂对硫化起步、交联密度和加工流动性有显著影响，HB103 树脂交联密度高但起步慢，适合对强度要求高、加工节奏允许的场合；5600 树脂适合快节奏生产。

（2）动态力学性能与适用场景：WSR6100 树脂在滚动阻力方面表现突出，适用于低滚阻轮胎配方；CSR6383 在强度与伸长率方面均衡，适合综合性能要求高的产品。

（3）低温与高温性能平衡：如图 8 所示 HB103 树脂在低温模量（−20 °C 下 E' 最低）和高温损耗（60°C 下 tanδ 最低）方面表现平稳，低温柔韧性最佳，适合宽温域使用环境。

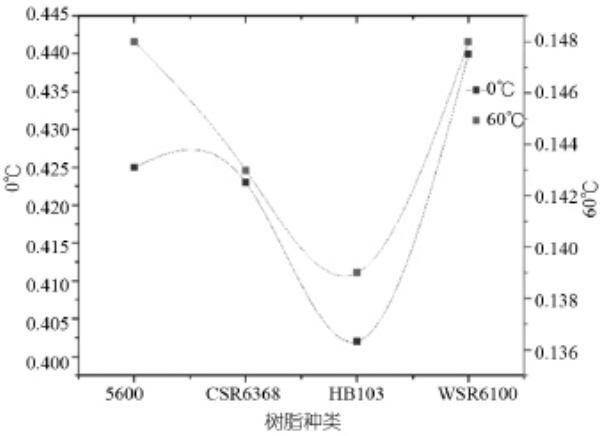


图 8 损耗因子（tanδ）在不同温度下的测试结果

参考文献：

[1] 任福君 . 高性能轿车轮胎胎面材料应用发展趋势 [J]. 轮胎工业，2021, 41 (03):162−166.

[2] 李威，赵光芳，贾进义，等 . 新型硅烷偶联剂 IMLV 在白炭黑填充胎面胶中的应用 [J]. 轮胎工业，2024,44(06):353−357.

[3] 赵菲，房师涛，赵树高 . 功能树脂在半钢子午线轮胎胎面胶中的应用 [C]// 中国化工学会橡胶专业委员会，全国橡胶工业信息中心 .“ 科迈杯 ” 第 12 届全国橡胶助剂生产和应用技术研讨会论文集 . 青岛科技大学橡塑材料与工程教育部重点实验室，2016:386−388.

[4] 吴忠成，李红卫，刘华侨，等 . 功能性树脂在轮胎胎面胶中的应用研究 [J]. 橡胶科技，2018,16(04):17−21.

[5] 禹沙沙，苟金峰，秦增辉，尚荣武，赵淑霞 . 硫化温度对轮胎胎面胶结构及性能的影响 [J]. 橡塑技术与装备，2026, 52 (03): 58-60.

[6] 李虎，徐正润，李培军，等 . 高性能抗撕裂树脂 JT−6903 在轮胎胎面胶中的应用 [J]. 橡胶科技，2025,23(11):638−640.

[7] 潘义，韩德上，隋雁俊，等 . 增黏树脂在全钢子午线轮胎胎面胶中的应用 [J]. 橡胶工业，2023,70(08):589−595.

Study on the effects of functional resins on the rheological properties and vulcanization characteristics of silica-filled tread rubber compound

Ning Weiming[1], Xu Yan[1], Dong Ziliang[2,3], Zhang Ning[1], Long Feifei[1], Liu Jiaqiang[1], Zheng Tao[1], Wang Linjie[2,3]

(1. Shandong Fengyuan Tire Manufacturing Co. LTD., Zaozhuang 277300, Shandong, China;
2. College of Intelligent Manufacturing, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, Shandong, China;
3. National Engineering Research Center for Advanced Tire Equipment and Key Materials, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, Shandong, China)

Abstract: With the development of green tire technology, the application of highly dispersed silica/silane coupling agent systems in tread rubber has become increasingly mature. Functional resins, as important compounding aids, have a significant impact on the processing properties, vulcanization characteristics, and physical and mechanical properties of rubber compounds. Based on laboratory quick rheological test data, this paper studies the application effects of four different types of functional resins (5600, CSR6383, HB103, WSR6100) in silica-filled natural rubber/cis-polybutadiene rubber/styrene-butadiene rubber blends. Starting from rheological parameters such as minimum torque (M_L), maximum torque (M_H), and scorch time (t_{10}), the principles by which different resins affect the viscosity, crosslinking density, and processing safety of rubber compounds are analyzed. Experimental results show that HB103 resin significantly increases the modulus of the rubber compound, but the processing viscosity also increases accordingly; 5600 resin exhibits excellent processing safety; while CSR6383 and WSR6100 resins are relatively balanced in performance. Therefore, this paper provides data support and theoretical reference for the formulation design of high-performance green tire tread rubber compounds.

Key words: functional resin; silica; rheological properties; vulcanization characteristics; green tire

(R-03)

总投资5亿元，千万条丁基内胎项目落地投产

The project of producing ten million butyl inner tubes, with a total investment of 500 million yuan, has been put into operation

近日，朝阳皓珑橡胶制品有限公司在辽宁朝阳柳城经济开发区投建的“年产1 000万条丁基内胎项目”，正式开业。

此举标志着这家深耕丁基再生胶领域二十余年的企业，在轮胎制造环节完成关键产业延伸。

该项目总投资5亿元，占地面积124.08亩，总建筑面积5.45万m^2，构建集研发、生产、质检于一体的现代化生产体系。项目达产后，可年产丁基内胎1 000万条，预计实现年产值4.5亿元，用工规模约240人。

从产业背景看，皓珑橡胶此前长期从事丁基再生胶生产，此次新工厂并非简单的产能扩张，而是将再生胶产能向下游丁基内胎制造延伸的关键布局。

企业背后的朝阳骏业橡胶制品有限公司自2011年即扎根橡胶行业，为项目的技术积累与运营经验提供了支撑。

皓珑橡胶以再生胶原料自供优势切入丁基内胎赛道，在成本控制与产业链协同上具备差异化竞争力。项目落地朝阳柳城经济开发区，也与当地推动橡胶制品产业集群化发展的方向相契合。

摘编自“轮胎观察网”

(R-03)