

不同硫化体系对橡胶物理机械性能及动态特性的影响研究

张宁¹, 刘加强¹, 董梓亮^{2,3}, 龙飞飞¹, 潘思华¹, 徐岩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: 本研究以优化轮胎胎面胶配方为目的, 研究促进剂组合 (CZ+DM、CZ+TiBTD) 以及硫磺用量对橡胶硫化动力学、物理机械性能及动态性能的影响, 通过门尼黏度、拉伸、DIN 磨耗及压缩生热测试对不同配方橡胶的性能作了定量分析。结果表明: CZ/DM 体系硫化效率极高, 但加工安全窗口较窄; 而基于 TiBTD 低硫高促体系可延长焦烧时间, 因而加工安全性较好。其中 A39 配方综合性能优异: 拉伸强度 15.87 MPa、断裂伸长率 416%, 兼具高回弹性、低压缩温升; A37 配方的耐磨性最优, 而 A38 配方抗疲劳性能突出。本文明确了硫化体系性能调控机制, 并确定了 A39 配方作为高性能节能轮胎胎面胶开发的优选方案, 为低硫高促体系的应用提供实验依据。

关键词: 硫化体系; 胎面胶; 物理机械性能; 动态特性

引用论文: 张宁, 刘加强, 董梓亮, 等. 不同硫化体系对橡胶物理机械性能及动态特性的影响研究 [J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(10):10-15.

中图分类号: TQ330.385

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2026)10-0010-06

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.10.002

轮胎胎面胶作为轮胎与地面接触的部件, 其力学强度、耐磨性、低生热及低滚动阻力等都直接关系到轮胎的使用寿命、行驶安全性以及节能效率^[1-3]。随着汽车工业向节能化、高性能化快速转型, 环保法律法规对橡胶制品加工安全性提出更严格的要求, 因此传统硫化体系已无法同时兼顾加工效率、机械性能与动态节能特性^[4-6]。目前, CZ+DM 并用体系因其较高的硫化效率而被广泛应用于胎面胶生产中, 其加工安全窗口窄、易焦烧等问题限制了其在高精度加工场景中的应用^[7]; 相较之下, 低硫高促体系因环保性与加工安全性突出正逐渐成为研究热点, TiBTD 作为高效的磺酰胺类促进剂, 在硫化网络结构的控制和动态性能优化方面都已有明确的优势, 然而其与 CZ 并用及硫磺用量匹配对橡胶综合性能的协同影响研究仍不够充分^[8-10]。因此, 本文通过设计具有不同促进剂组合与硫磺用量的配方, 系统对比分析其硫化动力学及关键性能上的差异, 目的在于明确性能调控规律, 为高性能、节能型轮胎胎面胶的配方优化提供理论支撑与技术参考^[11]。

1 实验部分

1.1 实验材料

本实验所用基体橡胶为天然橡胶 (NR, SCR5); 硫化剂为硫磺 (S, 工业级, 纯度 $\geq 99.5\%$); 促进剂包括 N-环己基-2-苯并噻唑次磺酰胺 (CZ, 工业级)、二硫化二苯并噻唑 (DM, 工业级)、N-叔丁基-2-苯并噻唑次磺酰胺 (TiBTD, 工业级, 纯度 $\geq 98\%$); 其他配合剂包括炭黑 N330 (工业级)、氧化锌 (ZnO)、硬脂酸 (SA)、防老剂 4010NA (工业级), 所有材料均未经进一步处理直接使用。

1.2 实验配方

本研究设计 4 组轮胎胎面胶配方, 基础配方 (质量份) 统一为: NR (100 份), 炭黑 N330 (50 份), ZnO (5 份), SA (2 份), 防老剂 4010NA (2 份), 仅调整硫化体系组分 (促进剂与硫磺用量), 具体配方参数如表 1 所示。其中 A36 为传统 CZ+DM 并用体系, 作为对照组; A37-A39 为引入 TiBTD 的低硫高促体

作者简介: 张宁 (1984-), 男, 本科, 工程师, 主要从事轮胎经营管理及结构配方相关研究。

系,通过调整 CZ 与 TiBTD 复配比例及硫磺用量,探究协同作用对橡胶性能的影响。

表 1 不同硫化体系配方参数(质量份)

组分	配方编号			
	A36	A37	A38	A39
CZ	1.50	1.30	1.65	1.30
DM	0.50	0	0	0
TiBTD	0	0.45	0.45	0.45
硫磺(S)	1.50	1.00	0.70	0.70

1.3 实验设备及材料制备

橡胶混炼采用 XK-160 型开放式炼胶机,遵循“先加基础橡胶,后加配合剂”的原则,混炼工艺参数如下:前辊温度 50~55 °C,后辊温度 45~50 °C,辊距 2~3 mm。首先将天然橡胶投入炼胶机塑炼 5 min 至表面光滑,依次加入 ZnO、SA、防老剂 4010NA,混炼 3 min 后加入炭黑 N330,继续混炼 4 min 至分散均匀,最后加入促进剂(CZ、DM、TiBTD)与硫磺,混炼 2 min 后薄通 3 次,出片得到混炼胶,室温放置 24 h 后备用。

硫化成型采用 XLB-D 型平板硫化机,根据后续硫化动力学测试确定的正硫化时间(t_{90})进行硫化,硫化温度 145 °C,硫化压力 10 MPa,硫化完成后自然冷却至室温,得到标准硫化胶试样,用于后续性能测试。

1.4 实验测试设备与方法

1.4.1 硫化动力学测试

采用 GT-M2000-A 型无转子硫化仪,按照 GB/T 16584—1996 标准,测试温度 145 °C,测试时间 30 min,记录焦烧时间(t_5)、正硫化时间(t_{90})等关键硫化参数,评价不同配方的硫化特性与加工安全性。

1.4.2 物理机械性能测试

拉伸性能按照 GB/T 528—2009 标准,采用 CMT4104 型电子万能试验机测试,试样为哑铃型 1 型样条,拉伸速率 500 mm/min,测试拉伸强度、断裂伸长率;DIN 磨耗性能按照 GB/T 9867—2008 标准,采用 DIN 磨耗试验机测试,负荷 10 N,转数 4 000 r/min,计算磨耗体积,评价耐磨性。

1.4.3 动态性能测试

回弹率采用 LX-A 型邵氏硬度计配套回弹测试装置,按照 GB/T 1681—2009 标准测试;压缩生热性能按照 GB/T 1687—1993 标准,采用 MR-C 型橡胶压缩生热试验机测试,测试条件为温度 55 °C,负荷 2.0 MPa,频率 30 Hz,测试时间 2 h,记录试样中心温升,

评价低生热特性。

2 结果与讨论

2.1 硫化动力学分析

由于硫化特性是评估胶料加工安全性和生产效率的核心依据,因此本次实验考察不同促进剂组合与硫磺用量对硫化动力学的影响。

(1) 图 1 焦烧时间(t_5)反映混炼胶在加工过程中的安全窗口。从结果来看,A36 配方(CZ+DM 体系)的 t_5 最短(11.1 min),显著短于对照组(13.2 min)。这表明 DM 作为一种准超速促进剂单独使用时活性较低,但与主促进剂 CZ 配合使用时,产生强烈的协同效应,显著降低了硫化起始温度,提高起硫速率。A37-A39 配方(引入 TiBTD 降低 S 单质用量)的 t_5 均延长至 15 min 左右。TiBTD 虽为高效促进剂,但其硫化诱导期较长,因此有更宽裕的加工安全期,便于复杂部件的成型制造。

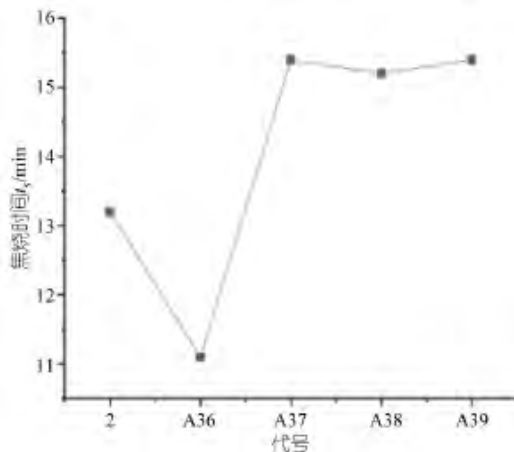
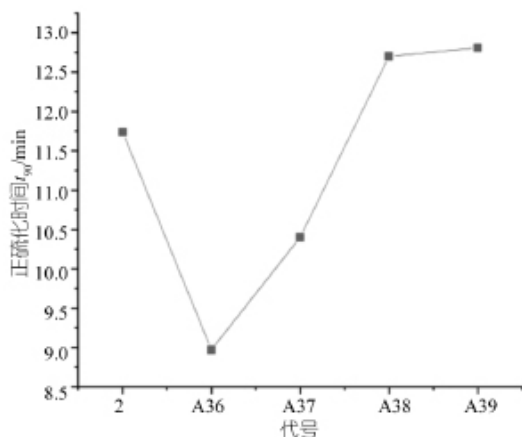


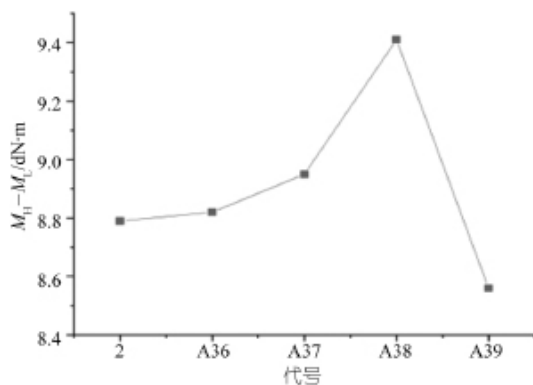
图 1 门尼焦烧时间 t_5

(2) 在图 2 中,A36 配方 t_{90} 最短(8.97 min),再次证实 CZ/DM 并用体系的高效性,该体系适用于对生产率要求较高的场景。A37 配方(TiBTD, 1.0 份 S 单质)的 t_{90} 为 10.4 min,效率适中。值得注意的是,A38 和 A39 配方中,硫磺降至 0.7 份, t_{90} 延长至 12.7 min 以上,主要原因是硫磺是直接交联剂,减少其用量直接降低可供形成的交联点数量,从而延迟达到最大交联密度所需的时间。然而这种“缓硫”体系有助于形成更均匀的交联网络,具有更优异的应力分布特性。

(3) 图 3 中的最大扭矩(M_H)是反映了胶料的最终交联密度的间接指标。根据数据得出结论:A38 配

图2 正硫化时间 t_{90}

方有最高的 M_H 值 (11.52 dN·m)，这是 TiBTd 促进剂及低硫磺用量两者协同作用的结果。因为在低硫磺促体系中，促进剂有利于形成效率更高的交联类型，故每个硫原子所形成的交联密度更高，在总硫量减少的情况下仍能获得较高的整体交联水平。

图3 转矩差值 $M_H - M_L$

(4) 由图4，不同配方所测得的 $M_H - M_L$ 值，而后者是胶料交联程度及硫化程度的指标，故可以很自然地得出结论：A38 配方有最高 $M_H - M_L$ 值，因而交联网络结构最佳。其根本原因即 TiBTd 促进剂在低硫体系中发挥了较好的作用，提高了单位硫原子形成的有效交联键的数量，因此硫化效率及性能都得到极大提高。

2.2 物理机械特性分析

硫化体系的调整从根本上改变了橡胶三维网络的结构，从结构原理上改变其宏观力学性能。

(1) 如图5所示，A37 配方的 100% 定伸模量最大 (3.26 MPa)，表明其在微小形变下具有最大的抗性变能力，这是致密的交联网络或较强的填料-橡胶相互作用的结果。由图5、图6可知，A38 硫用量低

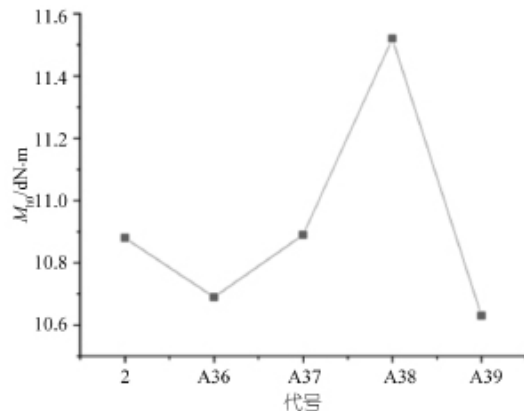
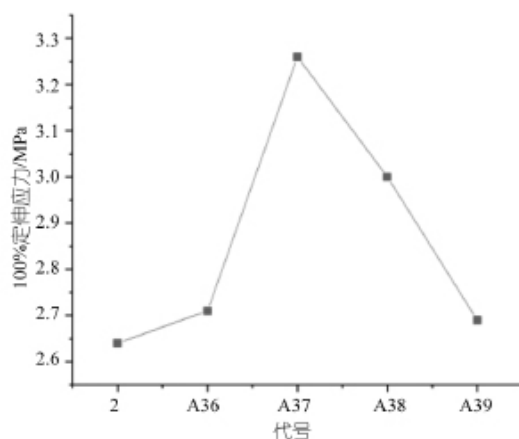
图4 最大扭矩 M_H 

图5 100% 定伸应力

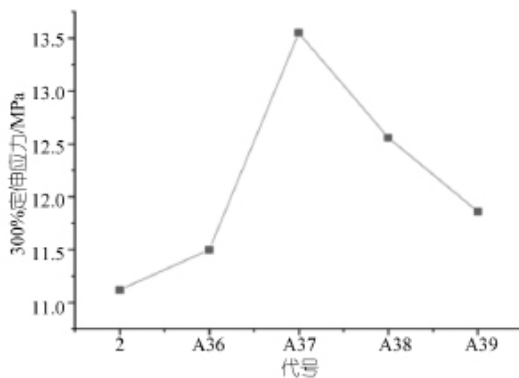


图6 300% 定伸应力

于 A37，而其 100% 和 300% 定伸模量均呈下降趋势，这一趋势并不完全与交联密度的变化相符，表明网络结构的类型对定伸模量的影响可能比单纯的交联点数量更为明显，多硫键含量高的网络更加柔顺，定伸应力相对较低，而断裂伸长率较高。

(2) 拉伸强度和断裂伸长率都是材料韧性的综合指标。由图7、8，A39 在拉伸强度和断裂伸长率之间表现均衡，其拉伸强度相较最高 (15.87 MPa)，同时

断裂伸长率也达到 416%，其交联密度适中，网络结构优良，低硫用量与高效促进剂 TiBTB 配合得当，因而形成了大量短而均匀的交联键，该类交联键具有高键能，故能很好地分散拉伸时的应力，延缓裂纹扩展，因此既强又韧。与此形成极好对照的是，A37 的断裂伸长率最低（361%），很自然地与其较高的定伸模量及相对刚性的网络结构有关。

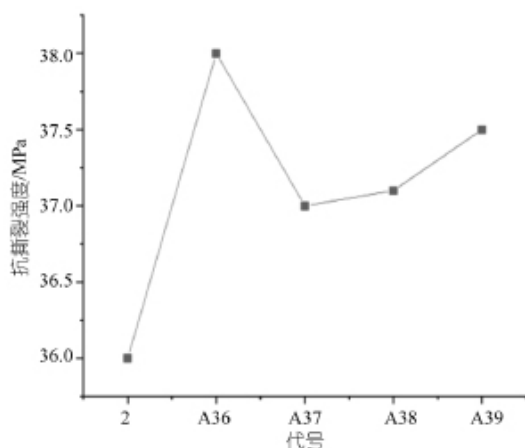


图 7 抗撕裂强度

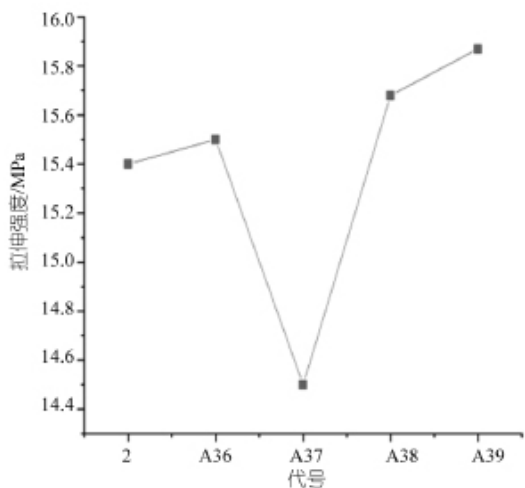


图 8 拉伸强度

(3) DIN 磨耗是评价轮胎胎面胶的关键指标。因此，A37 配方的耐磨性最好（147 cm³），优于对照组（168 cm³）及 A36（151 cm³）。优良的耐磨性一般与材料高撕裂强度、适当的模量及良好的动态疲劳性能有关。具体而言，A37 具有高定伸模量及极好的网络结构，故在磨耗过程中更难发生撕裂、更不易发生磨粒脱落。其压缩温升最低（33.9 °C），即动态变形时发热少、滞后损失小，因此滚动时热积累造成的材料软化及由此加速的磨损都大大降低，表明其耐磨性优

异。

2.3 动态生热与弹性行为分析

压缩温升和回弹率是评估胶料动态性能（生热与滚动阻力）的实用指标。

(1) 压缩温升直接反映了材料在周期性变形下的滞后损失。如图 9 所示，A38 配方的温升最低（33.3 °C），A39 次之（34.4 °C），均显著低于对照组（37 °C）。这与它们较长的 t_{90} 以及相对“温和”的硫化特性有关。合理的解释是：低硫高促体系形成的交联网络以较短的单/双硫键为主，这些键在形变过程中具有良好的可逆性，链段运动的内部摩擦较低，因此滞后效应导致的生热较少，相较之下，传统的高硫体系（如对照组）容易形成柔顺但可逆性较差的多硫键，导致滞后生热较多。

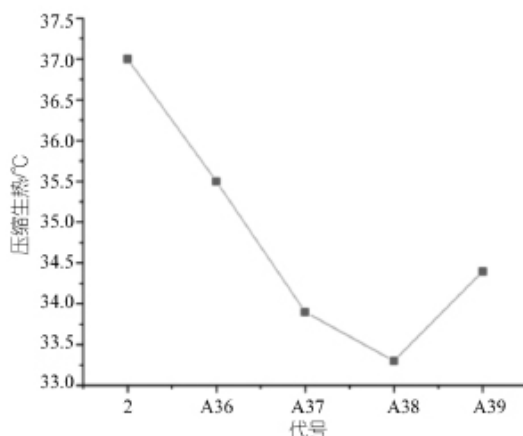


图 9 压缩生热

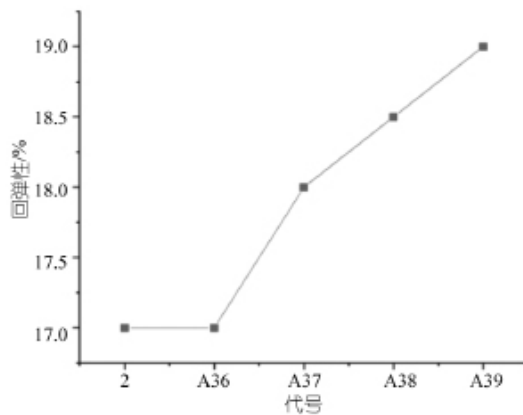


图 10 回弹率

(2) 由于回弹率与滚动阻力呈负相关，因此判断：A39 配方有最高回弹率（19%），其具有最低的滚动阻力。高回弹性即材料卸载后能迅速恢复原形，因而储存的变形能更有利于转化为动能而不是以热能形式耗

散。与此结果高度一致的是 A39 的压缩温升极低, 故可得出结论: A39 动态节能性能优异。因此, A39 在新能源汽车轮胎及低滚阻轮胎产品中都有极佳的应用前景。

3 结论

(1) 由于硫化体系的设计对胶料加工及制品性能具有重要的调节作用, 故可认为: CZ/DM 并用体系硫化速度最快, 但是焦烧安全性较差, 而以 TiBTD 为基础的低硫高促体系在保证加工安全性的前提下, 有利于对硫化速度、交联密度、网络结构的精细控制。

(2) 从对静态性能、动态性能的实验数据中得出结论: A39 (1.30 份 CZ+0.45 份 TiBTD+0.70 份 S) 具有极好的综合性能, 即拉伸强度高、韧性好, 又具有最高回弹率及最低压缩温升, 因此其耐磨性、低滚动阻力、低生热性诸种优点兼备, 是高性能、节能型轮胎胎面胶配方很有前景的方向。

(3) A38 (1.65 份 CZ+0.45 份 TiBTD+0.70 份 S) 有极好的低动态生热特性, 适用于对耐疲劳性和低生热有特殊要求的商用轮胎或高负载工况。

参考文献:

[1] 马建华, 张立群, 吴友平. 轮胎胎面胶料性能及其机理研究进展 [J]. 高分子通报, 2014(5):9.

- [2] Marion, G, Pottinger A, et al. Relationship Between Tire Tread Physical Properties and Tire Force and Moment Properties [J]. Tire Science and Technology, 1989, 17(2):109-125.
- [3] 王浩, 李兰阁, 王日国, 等. 高性能载重子午线轮胎天然橡胶 / 反式丁戊橡胶胎面胶的配方优化 [J]. 橡胶工业, 2020, 67(9):5.
- [4] 李爱娇, 李伟, 李键, 等. 不同硫化体系对载重轮胎胎面胶性能影响的正交试验分析 [J]. 橡胶科技, 2022, 20(4):11.
- [5] Lolage M, Parida P, Gupta A, et al. Synergistic effects of silica and nanoclay on curing characteristics, processing behaviour and mechanical properties of solution styrene butadiene rubber (SBR)-based tire tread compounds [J]. Emergent Materials, 2022.
- [6] 张先华, 徐瑾, 吕国正, 等. 硫磺硫化体系对天然橡胶性能的影响研究 [J]. China Rubber Industry, 2024, 71(6).
- [7] 李旭, 万纪君, 邓涛. 不同 DM/CZ/S 用量对含氯丁 V 带压缩胶性能的影响 [J]. 橡塑技术与装备, 2019, 45(03):18-25.
- [8] 刘会迎, 姜斌, 汪燕, 等. 高抗湿滑性能, 低滚动阻力全天候轮胎胎面胶配方的开发 [J]. 轮胎工业, 2025(9).
- [9] Soloveva O, Solovev S, Kochkareva T, et al. Investigation of non-stationary thermal conductivity in a multilayer rubber-metal product during post-vulcanization cooling and before vulcanization [J]. E3S Web of Conferences, 2023, 458(000):7.
- [10] 李再琴, 刘强, 单振, 等. 湿法混炼白炭黑母胶在全钢载重子午线轮胎胎面胶中的应用 [J]. 橡胶工业, 2020, 67(1):39-44.
- [11] 王恒, 钱坤, 柯玉超, 等. 天然橡胶 / 三元乙丙橡胶合金弹性体的共硫化及耐热氧化性能 [J]. 合成橡胶工业, 2021, 44(4):6.

Study on the effects of different vulcanization systems on the physicomechanical properties and dynamic characteristics of rubber

Zhang Ning¹, Liu Jiaqiang¹, Dong Ziliang^{2,3}, Long Feifei¹, Pan Enhua¹, Xu Yan¹, 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: This study aims to optimize the tire tread rubber formula by investigating the effects of accelerator combinations (CZ+DM, CZ+TiBTD) and sulfur dosage on rubber vulcanization kinetics, physical and mechanical properties, and dynamic performance. Quantitative analysis of the properties of different formula rubbers was conducted through Mooney viscosity, tensile testing, DIN abrasion testing, and compression heat build-up testing. The results indicate that the CZ/DM system exhibits extremely high vulcanization efficiency but has a narrow processing safety window; whereas the low-sulfur high-accelerator system based on

TIBTD can extend the scorch time, thus providing better processing safety. Among them, the A39 formula demonstrates excellent comprehensive performance: tensile strength of 15.87 MPa and elongation at break of 416%, combining high resilience and low compression temperature rise; the A37 formula has the best wear resistance, while the A38 formula exhibits outstanding fatigue resistance. This paper clarifies the performance regulation mechanism of the vulcanization system and determines the A39 formula as the preferred option for the development of high-performance energy-saving tire tread rubber, providing experimental evidence for the application of the low-sulfur high-accelerator system.

Key words: vulcanization system; tread rubber; physical and mechanical properties; dynamic characteristics

(R-03)

山东轮胎再落重子：AI 大模型深度植入制造链

Shandong Tire Group makes another significant move: deeply integrating AI large models into its manufacturing chain!

近日,继“化育天工”后,山东又在人工智能竞争的下半场推出“胶轮毓智”创新生态共建计划,将 AI 大模型、智能体深度植入轮胎生产全链条,开启传统轮胎产业智能化转型新阶段。

据了解，该计划由山东省工信厅指导推动，联动山东移动、青岛思锐卓远、北京化工大学、山东华盛橡胶、青岛星科瑞升、山东塑能节能设备等多方主体共同发起，聚焦行业两大核心痛点精准破局。

目前，轮胎产业质检普遍依赖人工肉眼判别，人工疲劳、主观偏差易造成质检误差，且老师傅实操经验难以传承。同时，沿用 80 余年的 Ω 型子午线轮胎传统蒸汽硫化工艺，存在温压、时长管控不精准问题，极大限制了 AI 质检技术的应用成效，多数 AI 设备仅能筛查次品，无法定位问题根源。

此外，北京化工大学杨卫民团队研发的电磁硫化技术，可替代传统蒸汽硫化模式，降低 70% 以上生产能耗，大幅提升轮胎生产精度与品质，是行业颠覆性技术，但硬核科研成果落地是一道难题。

“一项原创技术从提出到真正形成产业价值，还需要经历工程验证、装备开发、生产应用等多个环节。高校擅长基础理论和技术创新，企业擅长工程制造和市场应用，二者必须长期深入合作，才会有好的效果。”北京化工大学教授杨卫民说，单凭高校或是任何一家工厂单打独斗，这些实验室成果甚至都走不完完整的链条。

此次“胶轮毓智”计划构建政产学研用协同机制，打通技术落地堵点。高校输出前沿技术与科研方案，轮胎企业开放真实生产场景作为试验基地，山东移动部署 5G 专网与边缘算力，各科技服务商提供智能检测、设备配套等技术支撑，形成完整创新落地链条。据悉，计划首个落地场景落地东营广饶。

作为全国轮胎产业核心集聚区,山东轮胎产业核心指标连续三十年位居全国第一,2025 年年产量达 5.10 亿条,出口量、出口金额分别占全国 61.81%、56.91%,全球每三条流通轮胎便有一条产自山东。

广饶作为全国顶级轮胎研发制造出口基地，2025 年规模以上轮胎企业产值达 514.8 亿元。后续，试点成熟的智能质检、轻量化改造等方案将逐步向中小轮胎企业开放。该计划是山东“AI+ 制造”的又一重要布局，将持续为制造业转型升级注入新质生产力。

摘编自“中国轮胎商务网”

(R-03)