

用改性二氧化硅实现节能生产： 轮胎行业的解决方案

章羽

(全国橡塑机械信息中心, 北京 100143)

摘要：本文分析了改性二氧化硅在轮胎行业中的应用，指出其能克服传统二氧化硅的生产局限，如降低能耗、提高效率以及满足可持续交通需求。改性二氧化硅的使用有助于节能和提升橡胶性能，减少温室气体排放，促进工业可持续性。文章还提到，未来研究将探索新型改性二氧化硅和改进的混炼、硫化工艺，以进一步优化橡胶产品性能和降低能耗。最后，强调了改性二氧化硅在全球范围内的应用对行业可持续发展的重要性。

关键词：改性二氧化硅；节能；可持续性；可持续发展

中图分类号：TQ330.8

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2024)09-0076-04

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2024.09.017

不断上涨的燃料成本、范围广泛的环境立法以及公众对能源使用和环境的日益关注，都在不断鼓励人们追求燃油效率高、使用寿命更长的汽车轮胎。这些需求要求轮胎行业的“神奇三角”（包括燃油效率、牵引力和胎面耐磨性）得到充分发挥。本文将探讨在乘用车、卡车和公共汽车轮胎中使用改性二氧化硅作为填充料的问题，以及使用改性沉淀二氧化硅如何克服传统高分散二氧化硅（HDS）/原位硅烷技术在生产方面的局限性。

1 制造业和供应商的重要性

安永会计师事务所（Ernst & Young）最近对供应链高管进行的一项调查显示，每 10 家公司中就有 8 家在加强对供应链可持续发展的关注。但是，制造商在工厂内部所做的工作只是成功的可持续发展战略和相应结果的一部分。事实上，供应商（包括原始设备制造商（OEM）及其供应商）的作用同样重要。根据“负责任投资原则”（PRI），供应商数据是衡量环境、社会和政府治理（ESG）结果的重要组成部分。

现在，制造业正努力寻求可持续的解决方案，同时显然需要加快向更清洁、更安全、更具包容性的交通系统（或称“可持续交通”）过渡。机遇不仅属于制造商，也属于供应商和原始设备制造商，他们需要发现、创新并向市场推出新的解决方案。

2 汽车、轮胎和橡胶行业趋势

随着汽车行业面向未来的创新不断涌现，城市化、交通需求激增和气候行动的迫切需求等全球大趋势将加速向可持续交通转型。这包括更清洁、更安全、更具包容性的交通系统。轮胎和橡胶行业在这一转型中发挥着重要作用。

近年来，轮胎和橡胶行业在降低能耗和提高利用效率方面面临着越来越多的挑战。不断上涨的燃料成本、范围广泛的环境立法以及公众对能源使用和环境的日益关注，继续推动着人们对节油和更耐用汽车轮胎的追求。因此，轮胎行业不得不扩大对燃油效率、牵引力和胎面耐磨性这“神奇”三角的关注，以满足这些需求。

3 二氧化硅历史快照

轮胎行业开发可持续轮胎配方的历史可以追溯到 20 世纪 90 年代。20 世纪 90 年代，二氧化硅成为乘用车轮胎中备受青睐的补强填料，因为与轮胎胶料中的传统炭黑填料相比，二氧化硅能够提高燃油效率和牵引力。虽然研究人员早在 20 世纪 70 年代就开始使

译者简介：章羽（1991-），男，本科，主要从事橡塑技术装备方面的研究，已发表论文多篇。

该文摘编自 *RUBBER WORLD* NO.9/2023(By Lucas Dos Santos Freire, PPG)

收稿日期：2023-06-28

用传统的二氧化硅，但米其林在 20 世纪 90 年代率先为二氧化硅的使用申请专利，将其作为可持续轮胎的一种选择。

2009 年，PPG 推出改性二氧化硅后，滚动阻力降低了 30%，燃油效率提高了近 6%。经过处理的二氧化硅的引入保持了传统二氧化硅所提供的牵引力，实验室测试表明其耐磨性提高了 10%，从而改善了胎面磨损。2015 年，固特异推出了第一款使用改性二氧化硅制造的轮胎。

4 传统轮胎制造中的二氧化硅

尽管二氧化硅可降低滚动阻力，并在轮胎的整个使用寿命期间节省燃料消耗，从而减少了二氧化碳排放，但它对轮胎制造过程中的能源使用也有重大影响。轮胎行业普遍知道，在胶料中混炼二氧化硅需要较长的混炼时间和较高的温度，以提供足够的二氧化硅分散和高效的硅烷化反应。

无定形沉淀二氧化硅由于其低成本和低性能，通常用作胶料中的填料。然而，未改性二氧化硅有一定的局限性，例如在橡胶中的分散性差，这会使其难以掺入胶料中。因此，用传统二氧化硅填充的胶料的制造缺点可能包括：由于混炼时间延长而导致生产率降低、密炼机能耗增加、密炼机磨损加剧以及挥发性有机胶料（VOC）排放增加。为了克服这些局限性，二氧化硅可以用各种表面涂层进行处理，以改变其特性。

经过化学改性处理的二氧化硅可提高其性能。它们具有独特的表面特性，可以提高胶料的性能，降低轮胎制造过程中的能耗。它们可用于各种工业应用，包括涂料、粘合剂、密封剂、塑料和工业橡胶。该行业历来关注轮胎性能，以实现可持续发展的改进；而现在，有了 PPG Agilon 高性能二氧化硅等产品，他们可以专注于生产效率，以实现可持续发展的目标。

5 处理后二氧化硅的优点

在轮胎工业中，经过处理的沉淀二氧化硅（如 PPG Agilon 二氧化硅产品）已成为实现节能和提高胶料性能（尤其是在轮胎生产中）的一种有效方法。

经过处理的二氧化硅可提高与橡胶的相容性，无需在密炼机中进行硅烷化反应，从而有助于降低混炼过程中的能耗，并改善轮胎性能，包括降低滚动阻力和在轮胎使用寿命期间节省燃料消耗。

经过处理的二氧化硅的主要优点之一是能够改善

胶料的补强性能。经过处理的二氧化硅表面涂层可增强填料与橡胶基体之间的相互作用，从而提高机械性能，如拉伸强度、蓄热性、抗撕裂性和耐磨性。与传统二氧化硅相比，这可以使橡胶产品更加持久耐用。

此外，使用改性二氧化硅还有助于减少混炼过程中所需的能量。经过预硅烷化处理的二氧化硅有助于减少混炼胶料所需的能量，提高混炼过程的整体效率。这在轮胎制造等应用中尤其有用，因为在这些应用中需要混炼大量胶料，能耗是一个重要问题。

6 改性二氧化硅与可持续性：案例研究

Agilon 高性能二氧化硅使用硅烷偶联剂和其他相容剂进行预混合。硅烷偶联剂和其他相容剂会首先反应到二氧化硅表面，因此轮胎和工业橡胶生产商无需在混炼过程中进行硅烷化反应。由于硅烷已经与二氧化硅表面共价结合，因此无需在混炼过程中进行原位硅烷化，而且可以减少混炼过程中的能耗。

多项研究表明，Agilon 产品在实现节能和提高胶料性能方面非常有效。例如，Okel 和 Martin 研究了在 NR 胶料中使用 Agilon 二氧化硅（使用不同类型的转子）与未处理的二氧化硅和炭黑相比的节能效果。

图 1 显示了在使用 Agilon 454G 二氧化硅时，由于省去了一次混炼过程而节省的能源。研究还发现，使用 Agilon 产品可以改善胶料的机械性能，从而生产出更持久耐用的橡胶产品。

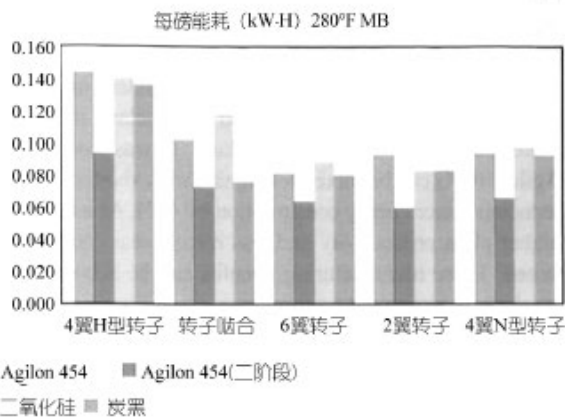


图 1 天然橡胶胶料的能源使用情况

PPG 最近进行的一项橡胶混炼研究使用了两种二氧化硅：Agilon 400G-D 二氧化硅和 PPG Hi-Sil EZ160G 二氧化硅以及其他胶料成分。混合物在带有啮合转子的 Farrel IM1.5E 密炼机中进行混炼，并使用 Advise ES2.3 软件对混炼曲线进行分析。混炼过程

分为三个阶段，每个阶段的温度、转子速度和填充系数都经过精心选择。每个阶段结束后，胶料在双辊开炼机上混炼 60 s。根据 ASTM 标准，对混炼胶料进行了各种测试，包括邵 A 硬度、应力/应变特性、动态特性、回弹、热积聚、永久变形和撕裂强度。研究结果为二氧化硅在橡胶混炼中的应用提供了有价值的作用，有助于提高橡胶产品的质量。

在最近的 PPG 研究中，该公司展示了经过处理的二氧化硅产品如何具有独特的表面特性，从而提高胶料的补强性能并降低胶料的粘度，从而节约能源并提高效率。

图 2 和图 3 显示了在使用不同填充系数时，第一混炼阶段混合过程中的柱塞位置。根据密炼机制造商的建议，第一段混合时间的填充系数应使密炼机柱塞在混炼时间结束时触底。图 2 显示，对于使用 PPG Hi-Sil EZ160G 硅胶的混合物，79% 的填充系数过高，即使搅拌 6 min 后，柱塞也不会触底。图 3 显示，当使用 Agilon 400G-D 硅胶时，79% 的填充系数是可能的。此外，使用 Agilon 二氧化硅时，柱塞位置的波动也不大。据推测，出现这种情况的原因是二氧化硅更好地融入了密炼机，而且没有挥发性有机物试图从密炼机中逸出。

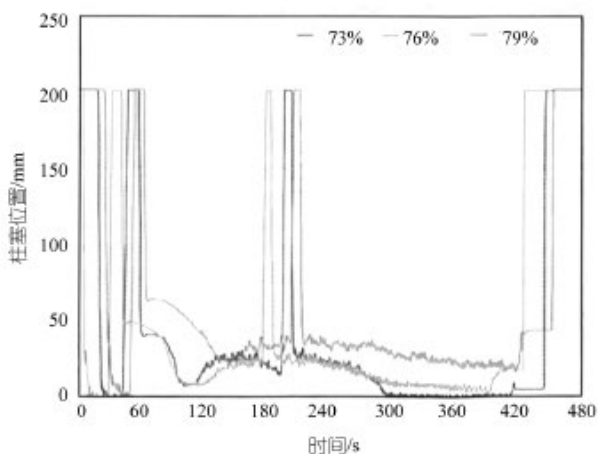


图 2 混炼 Hi-Sil EZ160G 二氧化硅胶料时的柱塞位置

在确定了最佳填充因子后，使用未改性二氧化硅的标准混炼程序制备了胶料，并进行了硅烷化处理，同时缩短了混炼时间，因为 Agilon 二氧化硅不需要硅烷化处理。研究表明，缩短混炼时间会对未改性二氧化硅胶料的性能产生负面影响。另一方面，在混炼 Agilon 胶料时缩短混炼时间，甚至减少一次混炼和降低温度，胶料的性能就会提高。对混炼过程中的能耗

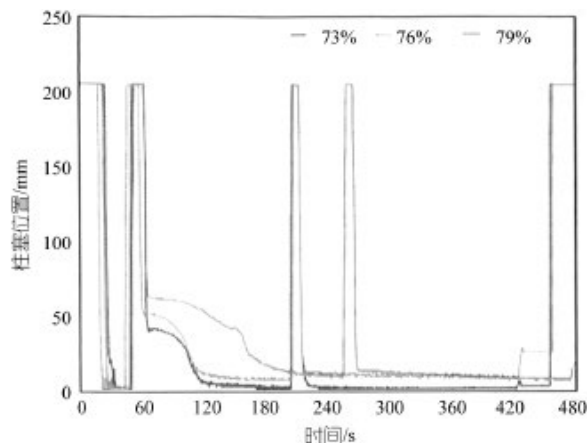


图 3 Agilon 400G 二氧化硅胶料混炼过程中的柱塞位置

进行了监测，每个混炼阶段的累计能耗见图 4。将每种胶料在每个阶段的能耗相加，可以发现制备 Agilon 胶料的能耗降低了 48%。在实现这一目标的同时，还获得了良好的胶料性能。

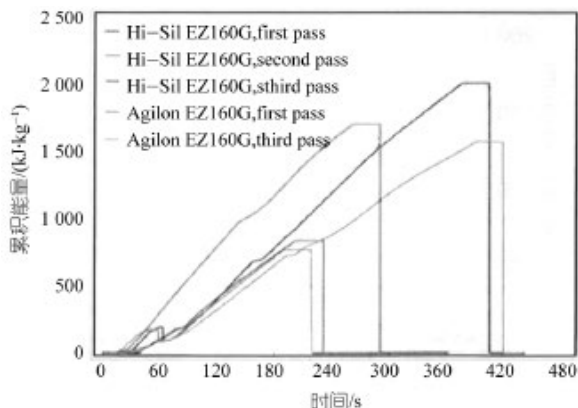


图 4 累计能耗曲线

7 案例研究结果

对使用 Hi-Sil EZ160G 和 Agilon 400G 二氧化硅填充合成橡胶的不同混合策略的效果进行了评估。首先，确定了每种二氧化硅的最佳混合填充系数。结果表明，Agilon 400G 二氧化硅的混合填充系数应略高于 Hi-Sil EZ160G 二氧化硅，这是因为混合过程中不会产生挥发性有机物，而且 Agilon 二氧化硅的疏水性更高。使用优化后的混炼填充系数，通常采用用于未改性二氧化硅-硅烷混合的标准混炼程序和一种更可持续的混炼程序对胶料进行混炼，得出的结论是 Agilon 400G 的混炼时间大大缩短，同时密炼机能耗降低 48%。Agilon 400G 可以大大缩短混炼时间，同时将密炼机能耗降低 48%，从而提高工厂生产率，减少密炼机磨损。在实现这些生产优势的同时，胶料的

性能也不会受到任何影响。

通过减少生产过程中的能源消耗，经过处理的二氧化硅有助于减少温室气体排放，提高工业的整体可持续性。此外，胶料机械性能的提高可使产品更持久耐用，减少频繁更换的需要，最终减少浪费。完整的案例研究，包括所有数字、表格和结果。

8 未来方向

尽管存在挑战和局限性，但在橡胶工业中，使用改性二氧化硅是实现节能和提高橡胶性能的一种解决方案。该领域的持续研究和创新为该行业的未来带来了巨大希望。

一个潜在的研究领域是开发新型改性二氧化硅，以实现更大的节能和性能改进。例如，研究人员可以探索在其他类型的橡胶产品（如密封件和垫圈）中使用改性二氧化硅，以在这些应用中实现节能。在轮胎方面，新的发展将继续进一步扩大轮胎工业的“神奇三角”，以降低滚动阻力、增加牵引力和提高耐磨性。

另一个潜在的研究领域是开发新的混炼和硫化工艺，以优化经改性二氧化硅的使用。例如，研究人员可以探索使用专门为改性二氧化硅设计的新型混炼设备和技术。这将有助于进一步降低与混炼胶料相关的能耗，并提高生产过程的整体效率。

随着对节能和高性能橡胶产品的需求不断增长，使用改性二氧化硅对于实现这些目标可能会变得越来越重要，同时还能促进行业的可持续发展并减少对环境的影响。

9 结论

全球制造商正面临着越来越大的压力，需要改进和加快其可持续发展战略和绩效。与价值链紧密合作并利用来自供应商和原始设备制造商的数据，是实现理想气候保护结果的关键组成部分。具体而言，在轮胎行业中，使用改性二氧化硅是实现橡胶行业节能和提高橡胶性能的一种很有前景的解决方案。通过提高胶料的补强性能和降低胶料的粘度，改性二氧化硅可帮助降低混炼和硫化过程中的能耗，并提高最终产品的整体效率。

包括 Agilon 产品在内的多个案例研究已经证明了改性二氧化硅在实现这些目标方面的有效性；该领域正在进行的研究和创新为行业的未来带来了巨大希望。随着对高能效和高性能橡胶产品需求的不断增长，改性二氧化硅的使用在实现这些目标方面可能会变得越来越重要，同时也会促进行业的可持续发展并减少对环境的影响。

Energy-efficient production with modified silica: solutions for the tire industry

Zhang Yu, Compiler

(National Machinery Information Center of Rubber &Plastics, Beijing 100143, China)

Abstract: This article analyzes the application of modified silica in the tire industry and points out that it can overcome the production limitations of traditional silica, such as reducing energy consumption, improving efficiency, and meeting sustainable transportation needs. The use of modified silica helps to save energy and improve rubber performance, reduce greenhouse gas emissions, and promote industrial sustainability. The article also mentioned that future research will explore new modified silica and improved mixing and vulcanization processes to further optimize rubber product performance and reduce energy consumption. Finally, the importance of the global application of modified silica for the sustainable development of the industry was emphasized.

Key words: modified silica; energy saving; sustainability; sustainable development

(R-03)

