

# 用废旧轮胎制成的特种工程模压制品

章羽 编译

(全国橡塑机械信息中心, 北京 100143)

传统上, 交通运输生态系统面临的重大难题之一便是废旧轮胎的处理问题。当轮胎因磨损或无法修复的损坏而不再适用时, 废旧轮胎便会引发巨大的健康与生态危害。诚然, 在废旧轮胎的处置与回收领域, 可持续实践的发展已取得重大进展。然而, 其中部分方案仍缺乏说服力。更重要的是, 随着新技术与回收实践的持续涌现, 可持续轮胎回收始终是一个动态目标。

在独家专访中, 丘沙乌伊先生探讨了废旧轮胎处理与回收领域的最新趋势, 以及新应用为该行业带来的新机遇。丘沙乌伊毕业于加拿大蒙特利尔理工学院和滑铁卢大学。他的专业领域是材料和计算机模拟, 包括计算机辅助工程 (CAE)、有限元分析 (FEA) 和计算流体力学 (CFD)。Chouchaoui运营温莎工业发展实验室 (WIDL), 该机构通过模拟技术而非试错法, 协助橡胶制造商和用户开发最优产品。其分支机构EcoUS致力于生产工程橡胶及橡胶制品, 以促进橡胶循环利用及橡胶产品循环经济。

## 1 当人们审视当今废旧轮胎的处置方式时, 这些年来发生了哪些变化?

首先需要认识到, 全美注册的乘用车约有2.85亿辆。每辆车平均每3~4年更换全部四条轮胎, 相当于每年消耗一条轮胎, 这意味着美国每年产生约2.85亿条废旧轮胎。随着道路车辆增多、电动汽车自重更大、廉价轮胎更换频率更高、恶劣路面及非铺装道路行驶需求增加等因素, 这一数字将持续攀升。非公路车辆、卡车、巴士、工程机械、未注册车辆等同样需要轮胎。此外, 橡胶行业另有30%产品属于非轮胎类橡胶制品。废弃物分为工业废料和消费后废料两类, 其中消费后废料 (特别是废旧轮胎) 尤其受到公众和固体废物管理部门的关注。

过去, 废旧轮胎通常被运往当地垃圾填埋场或直接焚烧, 这两种处理方式都对环境造成危害。焚烧橡胶和轮胎会向大气中释放危险毒素和污染物。此外, 由于热固性橡胶无法生物降解, 它们在垃圾填埋场中占据的空间日益增多, 很快成为老鼠和蚊子的滋生地, 传播致命疾病。它们还会渗入地下, 污染地下水并降低土壤肥力。

在20世纪80年代各州开始颁布废旧轮胎法规之前, 全美各地垃圾填埋场堆积着约20亿至30亿条轮胎, 其中科罗拉多州尤为严重。如今, 这些堆积的轮胎中已有高达90%得到较为成功地处理。过去25年间, 废旧轮胎已从环境公害转变为多种用途的资源。据美国环境保护署 (EPA) 统计, 目前每年约有85% (约25万条) 废旧轮胎被回收利用, 用于能源或材料再生。

过去十年间, 地方政府转向实施生产者延伸责任制 (EPR)。其原因包括:

- (1) 将产品生命周期末端的处置成本转移至生产者;
- (2) 减轻市政部门和纳税人承担产品报废处理费用的负担;
- (3) 激励生产者重新设计产品以降低报废管理成本;
- (4) 强制生产商从产品中去除有害物质;
- (5) 推动更易回收的绿色未来设计发展;
- (6) 促进回收技术创新;
- (7) 创造降低消费者成本的潜力;
- (8) 为持续项目发展建立稳固框架;
- (9) 减轻政府立法颁布、管理与执行的负担;
- (10) 通过增加再生材料使用降低碳足。

生产者责任延伸制度通过将所有轮胎供应商、汽车经销商及其他轮胎零售商转化为回收方来运作。这

些回收方必须免费接收消费者送至其场所的废旧轮胎（只要轮胎形状尺寸与所售轮胎相似），无论该轮胎是否由其销售。回收商随后需直接与生产者责任组织（PRO）签订商业协议，该组织将负责组织废旧轮胎运输，且不向回收商收取任何费用。

如今购买新轮胎时，经销商通常会把回收旧轮胎进行再利用。当然，部分民众可能将旧轮胎改造为秋千或园艺花盆等新用途。此外，社区回收中心也设有旧轮胎回收点。增强公众意识并教育年轻一代正确处置废旧轮胎至关重要，这样才能将废旧轮胎引导至商业再加工厂进行处理，最终分解为可用于制造新材料的材料。

### 2 监督废旧轮胎回收的组织或实体承担哪些责任？

负责处理报废轮胎的机构应持续拥抱新技术以提升工作成效。废旧轮胎回收应由行业主导并辅以政府支持，这两方面在各州存在显著差异。不久前，政府曾将废旧轮胎（以及其他有机废弃物）作为替代燃料进行焚烧发电，这种被称为“废物资源化”的项目至今仍在实施。该过程本质上是为快速处理大量废旧轮胎。事实上，轮胎行业本身也常采用焚烧方式处理生产废料与次品，并自产热能与电力。该工艺同样常见于水泥窑、工业锅炉、污水处理厂、钢铁厂、热电厂及造纸厂。在水泥生产过程中，极高温（约1998℃）可确保轮胎成分完全燃烧，将钢材转化为氧化铁，硫转化为硫酸盐——这些都是最终产品中的有效成分。

轮胎焚烧意味着橡胶损失，需要补充。如今，废旧轮胎经机械粉碎后用于土木工程和制造业已相当普遍。近期应用包括农业和景观覆盖物、游乐场及运动跑道铺面等。粉碎橡胶被添加到地砖和互锁砖等基础产品中。切碎橡胶、橡胶颗粒和粉碎橡胶替代了砾石、砂子和填充材料。

不同比例的轮胎再生橡胶（GTR）可与热塑性塑料（如聚乙烯PE、聚苯乙烯PS、聚丙烯PP及聚氯乙烯PVC）混合，用于挤出成型和注塑成型制品。橡胶中增加（仍硫化的）GTR含量用于生产传送带、鞋底和鞋跟、型材、汽车地垫、床垫、电池盒等。然而，直

接将GTR掺入原始橡胶中会缺乏填料—基质粘合的反应位点，并降低物理性能。此外，GTR还会影响橡胶在硫化过程中的行为，导致硫化GTR中硫或促进剂迁移。

尽管如此，许多研究人员和工业生产者仍成功地在天然橡胶和合成橡胶中掺入高达30%的GTR，而不会显著损害最终产品的主要机械性能。相反，他们报告了诸如增强阻尼等优势。此外，由于GTR与基体粘合性差，需要通过引入极性基团来提高GTR的表面反应性。这些技术可分为物理类（等离子体、臭氧、高能伽马射线或紫外线照射）和化学类（酸、偶联剂和氯化处理）。

过去十年间，研究人员和工业界还利用GTR对水泥、混凝土和沥青进行改性：GTR可提高混凝土的抗裂性，降低其密度，并增强吸热、吸音和减震性能。将GTR与沥青混合可提升道路性能与使用寿命，降低车辆噪声，增强抗裂性并提升驾驶舒适度。最后，在污泥处理厂中，GTR基质可吸收重金属、汞（II）和有机溶剂，如硫醇和硫固定金属离子。

与焚烧或其他低价值生产相比，由废旧轮胎衍生出的新产品能创造更高的经济效益，同时减少废物流，且不会产生与回收操作相关的过度污染和排放。美国有完善的轮胎回收业务。该工艺具有连续性，并持续从TDF（轮胎衍生燃料）向覆盖物（天然或着色）、碎屑及细粉方向演进。加工后的轮胎所含钢材与纤维均可回收利用。热固性橡胶的脱硫（或称硫化逆转）技术，对橡胶可持续性发展及橡胶产品循环经济展现出更广阔前景。

### 3 您对回收橡胶化合物及其他废料制造新轮胎有何看法？

首先必须承认，从多方面来看这都极具挑战性。全球约有450家轮胎工厂生产充气轮胎。轮胎生产始于橡胶、炭黑和化学品等大宗原材料，经加工制成众多专用部件，再进行组配和硫化。生产过程中使用多种橡胶，最常见的是丁苯橡胶（SBR）。各制造商均采用内部配方，这些配方大多属于商业机密。

此外，为应对日益延长使用周期的严苛工况，轮胎采用复杂设计与制造工艺生产。因此，其回收利

用带来了巨大的技术与工业挑战。当前针对废旧轮胎的处置策略——包括焚烧、再生橡胶颗粒生产及填埋等均收效甚微。废旧轮胎橡胶的回收或再生对橡胶可持续性发展及橡胶产品循环经济具有重要意义。过去10年间，多种脱硫工艺实现了硫化物交联的选择性断裂，同时试图保留主链聚合物网络。EcoUS（温莎工业发展实验室WIDL的商标衍生品）提出对热固性橡胶进行脱硫处理。这将实现橡胶的无限循环利用，使其转化为有用材料（如用于路面铺设的脱硫橡胶颗粒）或产品。鉴于废旧轮胎问题的严重性，该方案旨在开发大型产品。

2019年，全球轮胎销售额达2580亿美元。每年产生超过30亿条废旧轮胎，使轮胎制造成为橡胶消费的主力军。因此，即使轮胎是车辆的关键部件，使用再生橡胶制造新轮胎也是合乎逻辑的。基本上有两种可行的方案：第一，将回收轮胎产生的细粉状橡胶作为填充剂加入新轮胎的橡胶混合物中；第二，将再生橡胶颗粒进行脱硫处理，再与未回收的橡胶混合制成新轮胎。

#### 4 目前废旧轮胎处理有哪些可选方案？

轮胎回收与处理其他废弃物并无本质差异，尤其从环境保护角度考量。处理废旧轮胎的基本方案可归纳为“四R原则”：减少、再利用、回收和资源化。

优先级最高的方案是“减少”，即降低废弃物产生量。这是减少温室气体排放的最佳途径，既能节约自然资源，又能避免固体废弃物的源头产生。

关于轮胎的“再利用”（受安全因素限制），翻新磨损轮胎的市场依然旺盛。美国每年向墨西哥运送大量卡车载量的旧轮胎进行翻新再利用。卡车轮胎翻新是延长轮胎使用寿命的最佳范例之一。事实上，大多数商用车辆和飞机轮胎胎体在报废前可翻新数次。然而乘用车轮胎情况截然不同，除小众利基市场外，其翻新机会极为有限。

轮胎制造商通过不断发展的技术延长了汽车和卡车轮胎的使用寿命（对新轮胎的需求下降；然而，汽车制造商每年仍在持续销售更多新车）。公众同样能做出有益贡献：驾驶员只需保持适当胎压、按建议轮换轮胎、确保车轮正确对齐并养成良好驾驶习惯，即

可将轮胎寿命延长多达30%。

从无法修复的废旧轮胎中“回收”橡胶及其他材料是当前最大市场。多数技术聚焦于材料“回收”及由此衍生的新产品开发。然而，目前市场上可见的产品主要包括：将橡胶颗粒用环氧树脂或聚氨酯（PU）粘合用于游乐场和运动场地（这并非可持续解决方案），或将回收橡胶转化为地垫、铺路砖等简单三维制品。一种范式转变是将橡胶脱硫（打破长分子链之间的键），通过该工艺可制造新产品（根据应用场景的严格要求，按特定比例与未回收橡胶混合，业内称之为混炼工艺）。

硫化橡胶无法像热塑性塑料那样重新熔融并用于新用途。目前，废旧轮胎（ELT）及其他橡胶制品的主要处置方式包括填埋、焚烧（如水泥厂利用或垃圾发电项目）以及粉碎成细颗粒。后者会产生大量粉末，有价值的橡胶未能实现可持续回收利用。

此外，轮胎已成为高科技产品，在同时提升湿地牵引力、滚动阻力和耐磨性方面仍面临巨大挑战。2022年加拿大注册在案的公路机动车约达2.85亿辆，这意味着每年产生约33万t废旧轮胎。此外，来自工程机械（OTR）、卡车、巴士、拖拉机、农用及工程机械等车辆的废弃轮胎也持续增加。通过对报废轮胎进行脱硫处理，可生产出具有优良机械性能且环境足迹优于新材料的再生原料。脱硫技术——即通过机械、化学、热物理或生物手段断裂硫键——为橡胶可持续性发展及橡胶产品循环经济开辟了广阔前景。

在硫化过程中，硫元素能使乳胶中的不饱和聚合物链形成键合，从而生成天然橡胶，同样适用于合成橡胶；在高温条件下添加的促进剂可加速生产进程。硫化加速法根据促进剂/硫磺比值(A/S)在0.1~12之间，分为常规硫化(CV)、半高效硫化(semi-EV)和高效硫化(EV)三类。

硫化赋予天然或合成橡胶特定性能。脱硫旨在选择性断裂C—S键的同时保持C—C键完整。废橡胶脱硫需向材料施加能量，以完全或部分破坏硫化过程中形成的三维交联网络。该过程难以实现，因为断裂S—S键和C—S键所需能量（分别为227和273 kJ/mol）较低，但接近断裂C—C键所需能量（348 kJ/mol）。

脱硫过程的选择性越高，材料的机械性能越好。

科学家们开发了一种工具，用于研究硫化橡胶网链中网链破坏的机制。因此，橡胶的可溶（溶）部分随剩余不溶（凝胶）部分测得交联密度的增加而增加的速率，对于碳—硫键和碳—碳键的断裂是不同的。因此，通过对脱硫橡胶样品进行溶部分和交联密度的测量，可以指示网络破坏的主要机制。

关于使用寿命，轮胎可分为两类：可重复使用轮胎和不可重复使用轮胎。那些因严重损坏、结构变形或高度退化而无法翻新的轮胎，是ELT（End-of-Life Tires，废旧轮胎）回收的原材料。

在脱硫过程中，废旧轮胎通常被加工成胶粉（GTR），可嵌入橡胶沥青、沥青、水泥、混凝土、瓷砖、隔热隔音材料等。然而，将未经处理的胶粉直接混合到（弹性体）基质中会大大降低其机械性能，因为交联橡胶颗粒的界面粘附性和分散性较差。使用双螺杆挤出机进行热机械脱硫被证明是最实用的方法，因为这种机械在聚合物工业中应用广泛。此外，在挤出机方面，其可扩展到工业规模似乎是最佳解决方案。对于热化学挤出，使用超临界二氧化碳（scCO<sub>2</sub>）显示出优势。二氧化碳化学无毒、惰性、不易燃且价格低廉，其临界点易于达到（31.1 °C和7.38 MPa），且脱硫橡胶中残留的超临界二氧化碳可轻易排放到环境中。

### 5 如何在工业中实施真正的废旧轮胎回收机制，包括脱硫处理？

随着全球人口持续增长，自20世纪50年代以来，热塑性塑料、热固性塑料和弹性体等聚合物的消费量呈现显著增长态势，其中热塑性塑料占据绝对主导地位。2022年全球塑料产量达到惊人的4.003亿t，较上年增长约1.6%，这一增长态势在经历全球疫情及政治经济动荡的背景下尤为显著。自20世纪50年代以来，塑料产量持续攀升，其生产规模与市场份额不断扩大。然而，由于回收塑料制品（如水瓶）的压力日益增大，这种历史性的稳定年增长率在未来几年将趋于平缓。

原料回收似乎是聚合物实现原始单体回收的终极目标。对于某些纯聚合物而言这似乎可行；但对于橡胶等复杂产品混合物（其中大部分用于制造轮胎），

目前尚无法实现原料回收至异戊二烯及其他组分的过程。然而，一种逆向硫化工艺（称为脱硫）使弹性体材料重新具有可熔性和可加工性，为将废旧轮胎橡胶（ELTs）回收再利用制成高附加值材料和产品提供了途径。通过脱硫处理，天然橡胶和合成橡胶可以得到部分替代和节约，从而带来多重经济和环境效益。

### 6 轮胎回收过程通常如何运作？

轮胎被应用于各类车辆。使用数年后，因胎面磨损和/或在反复受力及环境因素影响下变得脆裂，需要更换。翻新主要适用于卡车轮胎，而乘用车轮胎多为一次性使用。报废轮胎主要通过两种途径回收：材料回收或能源回收。报废轮胎的热值接近煤炭，常用于造纸厂和水泥窑。通过热解可制取油料，但此过程往往导致大量排放。另一种可能的用途是油污修复。材料回收需要对报废轮胎进行颗粒化处理。研磨工艺涵盖常温、湿法及低温处理。多数轮胎回收技术涉及金属与纺织（帘布）材料的分离，并通过研磨过程显著缩减轮胎尺寸。在研磨过程中，通常可获得几万分之一英寸或更小的颗粒，其温度可能低于轮胎中聚合物在室温下的玻璃化转变温度（即低温研磨）。所得粉末可作为填料使用，例如用于新轮胎化合物中，但只能少量使用。为了提高新橡胶化合物与ELT粉末之间的相容性，必须通过破坏三维交联网络，或至少通过改性颗粒表面来对ELT粉末进行脱硫。

双螺杆挤出法是机械脱硫处理废旧轮胎在聚合物行业中最实用的方法。该工艺无需化学试剂和加热，可实现工业规模生产。采用超临界二氧化碳（scCO<sub>2</sub>）可使橡胶膨胀并拉伸长分子链间的交联结构；二氧化碳具有化学惰性、无毒、不可燃、成本低廉且环保的特性。该工艺可获得优质橡胶，挤出机每小时可处理0.5~3 t废旧轮胎，三班制年处理量达18 000 t，相当于约150万条废旧轮胎。脱硫橡胶可制成颗粒，与沥青混合用于道路橡胶化，或作为模塑或挤出产品的聚合物母料。

### 7 EcoUS实验室研究成果

EcoUS开发了从含橡胶产品（如轮胎）中回收橡胶的技术；对回收橡胶进行脱硫处理；对脱硫橡胶进

行混炼；并利用再生（脱硫且混炼）橡胶材料制造产品。目前，EcoUS提供两条产品线：

(1) 再生橡胶可包含再生丁苯橡胶（SBR）颗粒，用于替代沥青中的三苯乙烯丁二烯苯乙烯（SBS）聚合物，实现道路、停车场、车道等的橡胶化铺设。EcoUS还提供可用于混合的脱硫橡胶，以降低新混合物的成本。

(2) EcoUS承接的再生橡胶制品注塑业务包括为多伦多地区重型机械制造商生产的采矿业小型实心惰轮。该公司同时推出首款自主产品——乘用车前轮停车挡块。

(3) EcoUS同时提供工业后聚合物废料（含橡胶）的接收处理服务。典型应用案例包括为通用汽车密歇根州沃伦工厂提供车门临时密封条。

目前正在与多家汽车整车制造商（OEM）及不同层级的轮胎供应商展开洽谈。

EcoUS品牌下还有许多产品正在开发中，涵盖汽车、石油和天然气、休闲等各个市场和工业领域。目前的一些应用包括卡车前停车挡块、公交车前停车挡块、车道分隔器（自行车和车辆之间）、高速公路沿线的护栏柱接头、柱套盖、入口防疲劳垫、船用挡板和码头挡板。

温莎工业发展实验室开发了这些名为 EcoUS 的再生橡胶停车挡块，以替代大多数停车场使用的传统水泥块（图 1）。

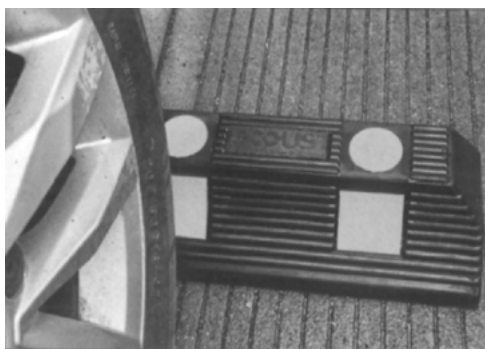


图1 再生橡胶停车挡块

此外，EcoUS还为客户开放工程应用。利用废旧轮胎回收的橡胶开发工程（功能性）产品涉及三大技

术要素：橡胶化学（特别是硫化橡胶的脱硫）；橡胶产品设计与工程（基于计算机辅助设计与仿真）；以及橡胶制造——通过流变学、模具设计和机械加工（制造）在计算机中优化后进行生产。EcoUS 团队及其合作伙伴由橡胶行业的资深人士组成，每位成员都拥有先进的学术资历和数十年的工业经验，涉及材料开发与特性分析、橡胶化学、产品设计与优化、制造、加工与微调、工具、原型制作和测试方面拥有数十年的行业经验。

## 8 EcoUS正在开发的产品相较于现有解决方案有哪些优势？

EcoUS再生橡胶停车挡块具备以下特性：

(1) 耐候性：水泥停车挡块易受天气影响产生裂缝、破损、变色及滋生霉菌。其笨重特性导致搬运困难且会损伤下方路面。橡胶挡块彻底解决这些问题，并避免车辆停靠时刮伤挡块下方的车轮挡泥板。

(2) 更长使用寿命：橡胶块比水泥块更能抵御天气侵蚀。水泥块裂缝中的积水冻结会导致其破裂。

(3) 更优经济性：水泥块需钢筋加固，且因固化需24 h而需大量模具。反之，单个模具每小时可生产多个橡胶块。

(4) 安全性提升：橡胶挡块上的标记清晰醒目，夜间及恶劣天气条件下停车更便捷。橡胶材质能吸收撞击力，缓冲滑倒跌落，且不会损伤车辆。

(5) 环保责任：利用废旧轮胎制造制品可循环利用大量本应被废弃的橡胶。在60个车位的停车场中，回收橡胶块可替代200条废旧轮胎。解决庞大的废旧轮胎废弃物问题，无需大型工程即可产生显著成效。仅美国每年就丢弃约360万t废旧轮胎，其中3/4可通过类似产品开发项目，避免进入焚烧或填埋处理。

译者：章羽

原文：RUBBER WORLD No.4/2025, by Ben

Chouchaoui, Windsor Industrial Development Laboratory.

