

快速切割、水射流分离与表面脱硫技术在废轮胎回收中的应用

唐帆¹, 聂卫云²

(1. 安徽世界村新材料有限公司, 安徽 马鞍山 243000 ;
2. 南京鲸翼电力新能源有限公司, 江苏 南京 211200)

摘要: 随着越来越多的废轮胎的产生, 其危害及回收处理中存在多种的问题, 主要为处理中易产生二次污染且产品性能及稳定性较差等。本文针对废轮胎处理存在的问题, 优选出一条快速切割、水射流分离与表面脱硫技术组合的废轮胎回收工艺路线, 系统分析其每个阶段对于废轮胎回收中的显著的优势, 并阐述其如何真正实现废轮胎高效高质绿色应用。同时展望在橡胶市场、国家政策等多重因素的大力推动下, 废轮胎回收创新技术的未来发展趋势。

关键词: 快速切割; 水射流; 表面脱硫; 回收; 废轮胎

进入21世纪以来, 全世界各行各业都得到快速发展, 尤其科技变革日新月异的今天, 人类对于日常生活需求将越来越多, 寻求日益便利的生活需求将成为人类关注的焦点。汽车作为人类日常生活中所依赖的重要交通工具正飞速的发展着, 同时伴随汽车轮胎的需求和产量也在不断提升。目前伴随着产生的废轮胎即汽车等替换或淘汰下来已失去作为轮胎使用价值的轮胎及工厂产生的报废轮胎等, 已成为全世界最具问题和挑战性的固体废弃物之一^[1]。

1 废轮胎的产生与危害

1.1 废轮胎的产生

目前全国较为发达地区很多家庭为方便出行都会购买小汽车, 一定程度上增加汽车的需求量, 也增加轮胎的使用量及消耗量。据公安部发布统计数据, 截至2022年9月底, 全国机动车保有量达4.12亿辆, 其中汽车达3.15亿辆。同时我国的私家车保有量和货车的数量也保持逐年提高, 进而由此产生的废轮胎的数量也越来越多^[2-3]。

据世界卫生组织统计, 全世界废轮胎积存量已约达到30亿条, 并正在以每年约新增10亿条的速度保持着快速增长。其中在美国, 每年废轮胎产生量已超过3亿条; 在中国, 每年废轮胎产生量约3.5亿条, 折算成重量约1 600万t, 中国每年废轮胎产生量仍以

6%~8%速度保持着快速增长。同时, 我国废轮胎回收利用率仅为50%左右, 远低于西方发达国家废轮胎回收利用率, 这对于我国造成极大的环境污染和资源浪费^[4]。

1.2 废轮胎的危害

废轮胎主要包括天然橡胶、合成橡胶、炭黑、金属、纺织物及多种助剂等, 其中主要成分橡胶(天然橡胶和合成橡胶, 主要起到平衡轮胎负载、回弹性及耐磨防滑等作用)在废轮胎中的占比高达55%~60%, 而金属(通常为钢丝等, 主要起增强其钢性和强度的骨架作用)在废轮胎中的占比约为25%。

废轮胎中的主要成分之一橡胶属于高分子弹性材料之一, 由于其本身构造和成分的特殊性, 使其具有不熔或难熔性、回弹性、强耐热、耐候性、耐机械性、耐生物等特点。因此, 其在自然状态下非常难以降解, 甚至存放几十年都不会自然的消失掉^[5-6]。

鉴于此, 中国作为世界上主要的轮胎生产和消耗国之一, 陆续不断产生的大量废轮胎的露天堆放, 其在自然状态下难以发生降解, 有的甚至几十年都不会自然消失掉, 这不仅会在一定程度上占用大量土地资源, 而且还会造成极易滋生蚊虫、传播疾病等危害, 一旦发生因高温难以散热而引发火灾燃烧便很难控制和扑灭, 并且在燃烧的过程中会产生大量烟雾和有毒有害污染物, 这在一定程度上严重污染人类周围的环

境和威胁人体自身的健康，废轮胎是工业领域中有毒废弃物中危害最大的垃圾之一，其与传统的废塑料白色污染相对应被人们称之为黑色污染^[7-8]。

2 当前废轮胎回收主要方式与存在问题

2.1 当前废轮胎回收主要方式

目前我国传统工业化的废轮胎处理方法主要包括破碎分离生产胶粉、脱硫再生生产再生胶、裂解炼油、原型利用等处理方式。其中脱硫再生生产再生胶占总量的54%，其占比最大；破碎分离生产胶粉占总量的6%；裂解炼油占总量的25%；原型利用占总量的8%。

其中脱硫再生生产再生胶主要用于生产胶管、胶垫、胶板、输送带、力车胎等，也可以按一定比例添加到新制轮胎中使用，可一定程度上节约天然橡胶、合成橡胶等橡胶资源；破碎分离生产胶粉主要用来添加到沥青中铺设公路，可以节约大量沥青并对其进行改性提升其综合性能；通过热解方式来裂解炼油，主要使用其分解出重油、碳黑等作为重要的化工原料；原型利用主要利用其打造各种景观装饰。同时回收利用废轮胎，还可以用来作为翻新轮胎循环使用。在我国，目前拥有几百家轮胎翻新企业，但其轮胎的翻新率仅仅约3%，不仅远远低于世界第一轮胎翻新大国美国约14%的翻新率，也低于世界平均6%的翻新率^[9-10]。

2.2 存在问题

我国废轮胎脱硫生产再生胶为其最主要处理方式。自美国人于1846年采用热法成功脱硫制造再生胶，并于1858年实现工业化起，再生胶生产历经油法、水油法及高温高压动态脱硫法、常压连续塑化（脱硫）法、螺杆挤出法等持续的改善与发展过程，但其未从根源上真正解决生产再生胶过程中所存在的二次污染严重、生产效率低、能耗大及产品质量不稳定等重要问题，其主要的原因在于以上传统的生产再生胶的方法具备一个共同点即都是通过外力如热、化学助剂、机械元件剪切等作用来最大限度破坏废橡胶中含硫键进而破坏其内部三维网络结构，促使其由弹性转变为可进行加工的塑性，但是在此过程中无论如何控制其加工条件参数均无法真正避免在切断废橡胶中C—S和S—S键交联网点而保持C—C主链键不断裂这一关键问题^[11]。

考虑到现今在全球范围内大力倡导低碳环保，要求以废旧物资“减量化，无害化，资源化，再使用，再循环”为社会经济活动的行为准则，因为广大研发人员可通过打破传统的惯性思维，从废轮胎生产再生胶的方式基本原理着手，寻求一种真正能够实现废橡胶稳定还原再生且绿色环保的方法，以实现如何真正实现废轮胎的无害化、减量化处理与资源化利用已成为人们关注的焦点^[12-13]。

3 快速切割、水射流分离与表面脱硫在废轮胎回收中的应用

3.1 快速切割技术实现废轮胎分类处理

考虑到目前大多数车辆的轮胎在日常行驶使用过程中对于轮胎本身的胎侧和胎面等不同部位的性能要求各不相同，因而在其生产过程中通常通过采用的橡胶配方及所含钢丝、纤维的比例来共同调节胎侧和胎面的橡胶性能，导致其胎侧和胎面的橡胶性能存在很大的差异，若通过传统的方法直接整胎进行破碎分离，主要存在以下缺点：

(1) 破碎分离的轮胎中所含钢丝、纤维等杂质无法得到完全彻底的分离干净进而影响后续得到的产品的综合性能。

(2) 其中性能相对好的橡胶与性能相对差一些的橡胶共同混合，整体轮胎中橡胶性能优势无法得到最大限度的利用，进而得到的产品仅仅只能用于低端的橡胶制品生产中，无法最大限度的提升其利用价值。

然而采用通过快速切割技术很好的实现了胎面胶和胎侧胶的分类分级处理，一方面可针对胎侧橡胶和胎面橡胶的综合性能特点进行更加合理针对性的使用，充分最大限度发挥其应用价值，另一方面相比与整个轮胎堆放，通过快速切割技术将胎面胶和胎侧胶切割开并进行分类分级存放，这样可以大大节省轮胎橡胶的存放空间^[14-16]。

首先采用全自动化的快速切割设备可以实现30s内将废轮胎切割成十分平整的三个部分（即2片胎侧胶和1片胎面胶）进行存放或使用；该方法的优势在于。

(1) 最大限度节省了废轮胎存储空间即在同一存储空间内，按照此种方式进行处理的废轮胎可比原先状态进行处理的废轮胎存储3倍的数量。

(2) 可实现标准化包装系统即针对性设计配套的专用扁平废轮胎部件的新型托盘,改善了废轮胎搬运的可操作性和提高了废轮胎的装载与卸载的速度。

(3) 通过进一步节省废轮胎的存储空间,实现了废轮胎的运输成本减少65%^[17-18],见图1所示。

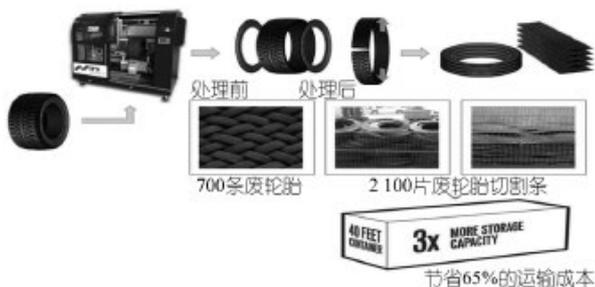


图1 废轮胎全自动化的快速切割与存放示意图

3.2 水射流分离技术实现废轮胎各组间绿色分离

传统废轮胎破碎分离最初主要采用“小三件”设备即切圈机+切条机+切块机+沟光辊破胶机组合来完成废轮胎的破碎分离工作,该方法存在间歇式生产、安全隐患高、劳动强度大、环境污染较大等缺点。历经多年的不断发展与创新,逐步发展成为以切圈机或拉丝机+双轴撕碎机+钢丝分离机(或中碎机)+橡胶破碎机(或细碎机)+磨粉机等为主的成套废旧轮胎破碎生产线,该生产线中最大的优势在于实现废旧轮胎到橡胶颗粒或橡胶粉的全流程自动化连续化,生产过程安全环保等。多年的发展中,其思路主要还是从如何实现自动化并降低劳动强度的角度考虑,并未从根源上解决通过综合考虑各部位的橡胶特性,实现废轮胎的分类且如何实现其中橡胶组分与钢丝、纤维等组分的彻底分离角度考虑,进而得到的产品则存在:

(1) 不同性能的橡胶混合在一起无法最大限度的提升橡胶的使用水平;

(2) 其中的杂质无法得到最大限度的彻底分离,大大降低了产品的综合性能^[19-23]。

中国有句成语叫做“水滴石穿”,它所道出的客观事实需要经历数百乃至上千年才能形成。然而,在科学技术飞速发展的今天,“超高压水射流技术”的应用使这一过程浓缩为一瞬间。通过从废轮胎中所含各组的特性角度进行分析,创新开发出超高压水射流分离技术,利用超高压水射流将其进行破碎并分离,生产出三种高品质的产品:高品质的橡胶粉、清洁钢丝和合成短纤维^[24-26]。

超高压水射流的破坏机理为废轮胎经过水射流切割后,其中含有的橡胶组分与钢丝、纤维相互之间受到强烈剪切、高频振荡、空泡溃灭和高速对流撞击等作用而发生动态断裂分离过程,其中脆性材料的劈坏主要以裂纹扩展为主,塑性材料符合最大拉应力瞬时断裂准则。HZ Kuyumcu等^[27]给出了水射流回收废旧轮胎的应用示例,高压水射流将废旧轮胎中的橡胶从钢丝带束层中分离开来,而不会破坏钢丝和胎体帘子布层。Yi Hu等^[28]人利用高压水射流技术回收废轮胎,分析了橡胶切口形状形成机理和参数对切割深度的影响,橡胶在高压水射流的冲击下受到强剪切力和拉伸力的作用而被切割,并通过试验研究了切割深度与泵压、靶距及喷嘴移动速度的关系。

3.2.1 技术优势

(1) 传统的废轮胎生产精细胶粉需要多个步骤处理方可完成,该技术可以无需对废轮胎进行拆解工序,大大减少了工艺流程的步骤。

(2) 可以实现连续化的进行废轮胎的橡胶层剥离,可实现彻底将橡胶与钢丝、合成纤维分离开来,促使废轮胎内层钢丝或金属可以完整取出再利用,让各部分材料有更高的利用价值。

(3) 可实现室温条件下废轮胎破碎与分离处理:不会因温度过高而影响得到的橡胶产品的质量。

(4) 水射流处理过程中不含任何化学物质或研磨材料。

(5) 工艺简单且节省空间,完全替代了机械法破碎的巨大生产线,占用厂房场地小且节能高效。

(6) 环保无污染,生产过程中的设备采用全封闭作业,因没有热效应不产生气体污染,而所用水因生产过程没有如何化学变化过程,经过过滤处理就可以重复循环使用,无烟、灰尘、气味等零排放^[29-23]。

3.2.2 产品优势

(1) 从废轮胎破碎分离出的橡胶粉粒径通常在 $50\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ (300目~18目)之间。

(2) 产品清洁且无污染,品质高端,杜绝了机械粉碎法因为热效应造成橡胶粉的碳化现象及生产过程产生的二次污染,橡胶粉基本保持其原有的质量特性。

(3) 创新的低温水射流粉碎过程得到的高表面积和无高温破坏结构的橡胶粉。

(4) 对比机械法和冷冻粉碎法生产的橡胶粉比

表面积最大：具有其他工艺无法达到的再使用效果，具有更好的融合性，橡胶粉无需二次清洗即可进行生物法处理表面脱硫^[34-37]，见图2所示。

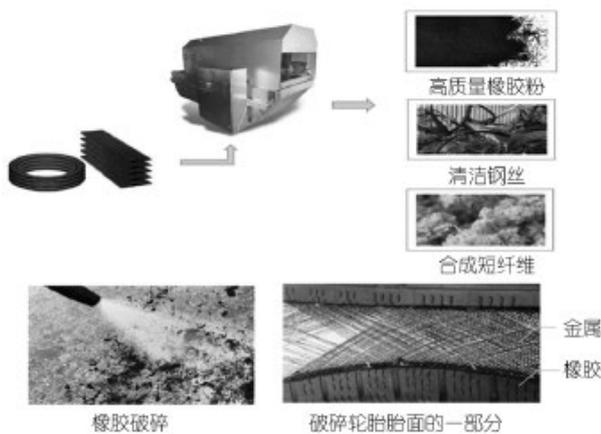


图2 切割后的废轮胎水射流绿色分离示意图

3.3 表面脱硫技术实现废轮胎中橡胶的还原再生

传统废橡胶脱硫再生方法，从最初的高温高压动态脱硫法到历经多年的创新发展至今陆续推出的常压连续脱硫工艺、螺杆连续脱硫再生工艺及无螺杆连续脱硫再生工艺等等，同事也再如何实现废橡胶脱硫再生的自动化且绿色环保上经过大胆创新改进，如引入机械手操作，整线采用DCS控制系统等智能化装备升级应用及引入废气废水处理环保设备，但如果从根源上分析可以发现，传统废橡胶脱硫再生方法都是考虑采用物理或化学方法与废橡胶进行作用，目的为破坏其中含硫键，破坏其三维网络结构，保持其主链碳碳键不被破坏，但是采用物理或化学方法与废橡胶进行作用无法真正彻底实现这一目标，仅仅是通过控制其工艺参数来尽可能达到这一目标，进而始终会造成其中的硫被彻底断开而产生有二次污染的气体，这一程度大大阻碍了废橡胶循环利用产业的发展^[38-40]。

从源头上分析，考虑到生物法表面脱硫存在选择性、温和等特点，同时结合到产品具体使用的需求，无需彻底促使废橡胶所有的含硫键断裂，可以仅仅通过表面含硫键部分断裂，再表面形成活性基团，则有利于产品的后续加工应用，同时不会使得其中的硫被脱出产生有害的二次污染气体，绿色环保。该技术是基于细菌作用下的废轮胎橡胶粉专有表面生物法脱硫过程，得到高质量表面脱硫橡胶粉。

3.3.1 技术特点

(1) 原料来自废轮胎的黑色橡胶粉的粒径在在50

$\mu\text{m}\sim 1\text{ mm}$ 之间。

(2) 该技术采用细菌处理橡胶粉得到高质量表面脱硫橡胶粉，无任何有害化学物质。

(3) 高质量表面中。

(4) 考虑到实际应用中对气味的敏感性，故选择细菌处理可降低轮胎气味。

(5) 低碳足迹：非常绿色的生产方法^[41-42]。

3.3.2 工艺流程为

(1) 硫化橡胶粉与专有培育的细菌初步混合。

(2) 在工业化生物反应器中，通过连续混合细菌溶液和橡胶粉来实现硫化胶粉表面脱硫即细菌消耗破坏硫化胶粉表面的含硫键。

(3) 高质量表面脱硫橡胶粉依次经过排水、干燥、包装后运输至客户作为新的有价值的原材料使用，见图3所示。

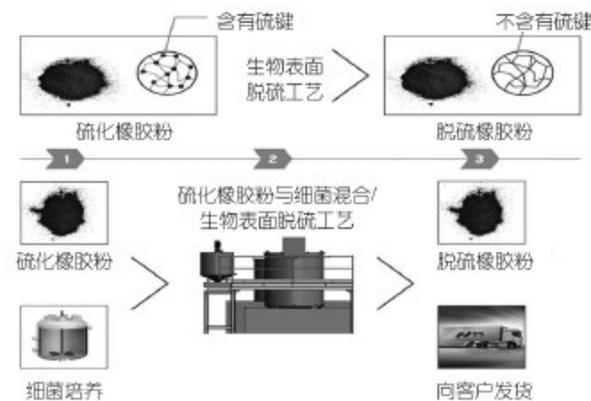


图3 硫化橡胶粉生物表面脱硫示意图

3.4 快速切割、水射流分离与表面脱硫组合实现废轮胎高效高质绿色应用

废轮胎本身难分解、长期堆放易滋生蚊虫且温度高散热慢而造成火灾等特性而被称之为“黑色污染”，现今其传统处理方式极易在处理过程中产生二次污染加大了对人类环境的破坏，如何真正实现废轮胎高效高质绿色应用在多年来一直成为困扰人们的难题^[43-44]。

要真正实现废轮胎高效高质绿色应用即：

(1) 废轮胎处理方式高效—以最大的能耗利用率且最低的劳动强度下实现其处理。

(2) 废轮胎处理过程绿色—针对不同种类废轮胎及废轮胎不同位置的废橡胶具体深入分析，结合其下游产品应用的具体需求，优选最佳的废轮胎最佳处理流程组合，真正实现有害物质零产生且零排放。

(3) 废轮胎处理产品高质—针对不同种类废轮胎及废轮胎不同位置的废橡胶具体深入分析优选处理方法结合其下游产品应用的具体需求, 针对性分类分级且温和状态下处理, 以防高品质橡胶与低品质橡胶混合处理、处理过程中收到高温或高剪切等条件的过渡处理而大大降低其本身的综合性能。

首先对于废轮胎进行精细化分级分类, 如货车大轮胎、工程车轮胎、汽车轮胎、电动车轮胎等其他轮胎进行分类, 采用快速切割技术实现废轮胎不同部位的废橡胶切割分离, 然后利用水射流分离技术实现废轮胎中各组分(橡胶、纤维、钢丝等)的最大限度的分离得到高质量的橡胶粉, 最后采用生物细菌表面脱硫, 在较为温和条件下消耗破坏硫化胶粉表面的含硫键, 不会产生二次污染, 促使高质量的橡胶粉表面活性基团产生极大拓展了其应用领域, 见图4所示。

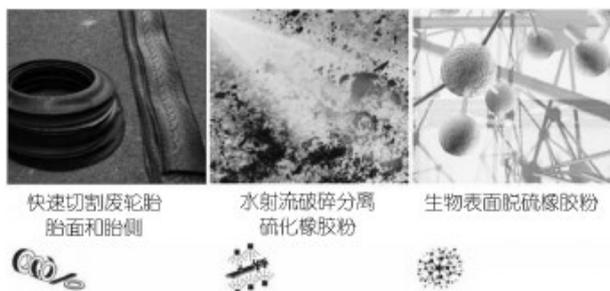


图4 废轮胎经快速切割、水射流分离与表面脱硫组合技术处理示意图

4 展望

随着国家产业政策的变化和国家经济的高速发展, 废轮胎的产生量也越来越大, 环保要求对固废处理多方面的要求也越来越高。然而未来, 在橡胶市场、国家政策等多重因素的大力推动下, 我国的废轮胎综合利用行业将进一步加快相关核心技术的创新研发, 大量先进的创新技术将不断涌现, 如针对智能化降低劳动强度的、针对提升处理得到的产品的稳定性与质量的、针对提升处理过程的环保性与安全性的、针对拓展处理产品应用领域的等等; 在众多的废轮胎处理技术中如何更好的优选出一条合理的最佳处理工艺, 需在了解废轮胎处理技术的基础上结合处理的产品实际应用需求来综合考量方可, 然而废轮胎处理在节能减排绿色发展方面未来实现创新的脚步也一定会越来越快。快速切割、水射流分离与表面脱硫组合技术的应用与推广, 对于废轮胎高效高质绿色发展具

备极大的推动作用。而我国的废轮胎综合利用行业也一定能借势摆脱“慢性自杀”的恶性循环, 乘风而起, 做大做强, 真正成为高效高质绿色的朝阳产业^[45-46]。

参考文献:

- [1] 张峰, 郇亮, 饶绮麟. 废旧轮胎再利用技术 [J]. 矿冶, 2011, 20(04):105-108.
- [2] 陈云信. 国内外废旧轮胎的回收利用现状 [J]. 轮胎工业, 2006, (12):715-717.
- [3] 谢忠设. 资本发力了, 废橡胶利用能否迎来大发展? [J]. 中国石油和化工, 2018, (07):34-36.
- [4] 林火灿. 我国废旧轮胎产生量居全球首位——热裂解技术有望变废为宝 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2018, (09):39-41.
- [5] 唐帆, 聂卫云, 路丽珠. 环保颗粒再生橡胶生产与应用现状及发展前景 [J]. 橡胶科技, 2021, 19(03):109-113.
- [6] 刘志远. 废旧橡胶处理及资源化利用现状 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2019, (05):33-35.
- [7] 卢娜, 辛振祥. 废旧橡胶资源化与环境 [J]. 世界橡胶工业, 2016, 43(07):1-5.
- [8] 唐帆, 路丽珠, 黎广, 等. 浅析废旧轮胎高值化综合利用新模式 [J]. 轮胎工业, 2020, 40(02):71-76.
- [9] W Zefeng, K Yong, W Zhao, et al. Recycling waste tire rubber by water jet pulverization: powder characteristics and reinforcing performance in natural rubber composites [J]. Journal of Polymer Engineering, 2018, 38(1):51-62.
- [10] 唐帆, 强金凤, 路丽珠, 等. 废橡胶再生工艺与高值化利用绿色化进展 [J]. 橡胶科技, 2020, 18(03):128-133.
- [11] 祁学智, 周洪, 刘家宏. 废橡胶综合利用应分类处置、梯次利用 [J]. 中国橡胶, 2021, 37(11):35-37.
- [12] 林辉荣, 阳杨, 毛小英. 废橡胶资源化利用的技术现状及展望 [J]. 四川化工, 2017, 20(04):4-6.
- [13] 胡彪, 张晓雨, 赵新, 等. 废旧橡胶制品资源化利用研究进展 [J]. 材料导报, 2014, 28(03):75-79.
- [14] 赵志正. 采用废轮胎构件分类粉碎新工艺制造高质量橡胶粉 [J]. 世界橡胶工业, 2007, (12):32-33.
- [15] 屈秀岗. 一种用于废旧轮胎回收处理的切割装置 [P]. CN201720279423.0, 2017-03-22.
- [16] 席刚, 李翰祥, 黄钰港, 等. 一种轮胎胎侧切割设备 [P]. CN202220863133.1, 2022-04-14.
- [17] 胡绪刚. 一种轮胎切割线及切割方法 [P]. CN202310060978.6, 2023-01-16.
- [18] 冯永苗, 冯浩烽, 宣桦渠, 等. 一种轮胎回收切割后的取料机构 [P]. CN202320823228.5, 2023-04-10.
- [19] 陈波. 高端橡胶粉生产新工艺——“超高压水切割”新技术分享 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2021, (08):44-47.
- [20] 陈波. 基于水射流技术的利用废旧轮胎制备橡胶粉的方法及装置 [P]. 中国: CN200610096128.8, 2006-09-21.
- [21] 宋守许, 刘志峰, 成焕波, 等. 基于超高压水射流技术可产业化回收废旧轮胎的装置 [P]. CN201120279803.7, 2011-08-03.
- [22] 巩雨注, 王小萍, 贾德民. 废旧轮胎粉碎技术及其应用进展 [J]. 橡胶工业, 2021, 68(01):66-72.

- [23] 宋守许, 吴师强, 查辉. 水射流参数对废轮胎橡胶破碎效率的影响[J]. 橡胶工业, 2017, 64(09):556-560.
- [24] PL Rosendahl, M Drass, J Felger, et al. Equivalent strain failure criterion for multiaxially loaded incompressible hyperelastic elastomers[J]. International Journal of Solids and Structures, 2019, 166:32-46.
- [25] 魏利萍, 刘国栋, 辛振祥. 臭氧改性超高压水射流法废旧轮胎胶粉在NR中的应用研究[J]. 特种橡胶制品, 2020, 41(02):20-22.
- [26] 宋守许, 查辉, 吴师强. 超高压水射流脱硫轮胎胶粉的研究[J]. 橡胶工业, 2017, 64(05):300-304.
- [27] HZ Kuyumcu, L Rolf. Application of high-pressure waterjets for comminution[J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 74:S191-S198.
- [28] Y Hu, Y Kang, XC Wang, et al. Mechanism and experimental investigation of ultra high pressure water jet on rubber cutting[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(9):1973-1978.
- [29] 刘萍, 杨巧文, 张轲. 基于水射流的轮胎粉碎效率的试验研究[J]. 机械设计, 2016, 33(09):70-74.
- [30] 宋守许, 吴师强, 唐强. 基于响应曲面法的水射流破碎轮胎效率优化[J]. 中国粉体技术, 2016, 22(02):22-26.
- [31] W Zefeng, K Yong, W Zhao, et al. Recycling waste tire rubber by water jet pulverization: powder characteristics and reinforcing performance in natural rubber composites[J]. Journal of Polymer Engineering, 2018, 38(1):51-62.
- [32] 刘萍, 张轲. 水射流技术回收子午线轮胎的正交试验[J]. 中国机械工程, 2015, 26(14):1964-1968.
- [33] 谢仁婷, 宋守许, 王玉琳, 等. 水射流下含表面裂纹的轮胎橡胶的动态断裂[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(02):268-273.
- [34] Y Staudt, C Odenbreit, J Schneider. Failure behaviour of silicone adhesive in bonded connections with simple geometry[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 82:126-138.
- [35] 程效锐, 张舒研, 马亮亮. 高压水射流技术的应用现状与发展前景[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(8):1-6.
- [36] 肯尼斯·威廉·琼斯. 分离车辆轮胎胎面部分的橡胶组件和金属组件的方法和装置[P]. CN201380038126.1, 2013-07-15.
- [37] 苗思忠, 王岩. 基于水射流技术的回收轮胎胶粉颗粒参数分析[J]. 兰州工业学院学报, 2020, 27(05):73-76.
- [38] 让·玛丽·库瑞尔, 丹尼斯·施鲁欧芬内格, 塞尔日·索利尼亚克. 在胶合前硫化橡胶表面的处理方法及装置[P]. CN94119486.8, 1994-12-13.
- [39] 达维德·斯特德勒, 蒂博·斯皮内蒂, 克里斯汀·洛. 用于硫化橡胶颗粒的细菌脱硫的方法[P]. CN201580038487.5, 2015-07-15.
- [40] 王坤, 康永. 废胶粉表面微生物脱硫及其改性沥青的性能研究[J]. 橡塑技术与装备, 2017, 43(03):58-62.
- [41] Sk Faisal Kabir, R Zheng, AG Delgado, et al. Use of microbially desulfurized rubber to produce sustainable rubberized bitumen[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2021, 164:105144-105145.
- [42] 李元虎, 赵素合, 王雅琴, 等. 酵母菌生物脱硫胎面胶粉及其填充天然橡胶的力学性能[J]. 合成橡胶工业, 2011, 34(04):301-304.
- [43] G. Ramos, F. J. Alguacil, F. A. López. The recycling of end-of-life tyres. technological review[J]. Revista De Metalurgia, 2011, 47 (03):273-284.
- [44] 唐武, 金小华. 废旧轮胎综合处置技术的现状与发展方向[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2022, (09):45-48.
- [45] 郭庆民. 固废轮胎绿色利用低碳技术路线的研究[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2022, (02):44-48.
- [46] 田晓龙, 郭磊, 王孔烁, 等. 废旧轮胎循环与资源化利用发展现状[J]. 中国材料进展, 2022, (01):22-29.

