

综述·专论

废旧轮胎粉碎技术及其应用进展

巩雨注,王小萍*,贾德民

(华南理工大学 材料科学与工程学院,广东 广州 510641)

摘要: 世界各国的废旧轮胎数量日益增加,废旧轮胎堆放不仅造成环境污染,还导致橡胶资源浪费,对废旧轮胎进行合理的回收利用已经势在必行。现阶段,粉碎废旧轮胎以制备胶粉因工艺优势而成为废旧轮胎的主要回收方式。综述国内外粉碎废旧轮胎制备胶粉技术,详细介绍干法粉碎和湿法粉碎技术及相关工艺,其中干法粉碎包括常温和低温粉碎,湿法粉碎主要包括RAPRA法、常温浸混粉碎法、全水相法和高压水射流冲击粉碎法。对主要粉碎设备及其粉碎原理进行概述。指出全水相法因制得的胶粉性能更加优异,且工艺成本低及环保性表现突出,有望成为未来废旧轮胎粉碎技术主要发展方向。

关键词: 废旧轮胎;胶粉;粉碎技术;干法粉碎;湿法粉碎;全水相法

中图分类号: TQ335;X783.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2021)01-0066-07

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2021.01.0066



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

全球汽车行业和交通运输业快速发展的同时,各种轮胎的需求量不断增大,进而导致废旧轮胎的累计量也不断增大。据报道,我国2008年产生的废旧轮胎量为740万t左右,2013年已经超过1 000万t,预计2020年达到2 000万t左右^[1]。世界各国高度重视废旧轮胎的回收利用问题,并相继颁布相关法律政策。例如:美国阿拉巴马州于2006年通过《废轮胎环境质量条例》法案,对废旧轮胎的相关处理做出了详细规定;为促进废旧轮胎资源回收行业健康持续发展,我国政府相继出台了一系列管理条例^[2],工信部于2012年7月发布《轮胎翻新行业准入条件》《废轮胎综合利用行业准入条件》。废旧轮胎是一种“放错位置”的橡胶资源,合理有效地利用这些资源,可将其变废为宝,带来一定的经济价值。目前,废旧轮胎的回收利用主要有以下几种方式:再生橡胶、轮胎翻新、胶粉生产、热能利用、热裂解等^[3-6]。我国废旧轮胎利用方式中,再生橡胶占71.3%,轮胎翻新占11.8%,胶粉生

产占7.5%,其他形式占9.38%^[7]。其中,再生橡胶生产工艺复杂,能耗大,存在污染环境等问题;轮胎翻新技术要求高,认可度低;热能利用和热裂解过程会产生废气、废渣及有害物质^[8]。相比之下,胶粉生产不但工艺简单、能耗低、回收率较高,而且胶粉使用范围广、经济价值高,因此生产胶粉是目前最有前途的轮胎回收再利用方式。

1 废旧轮胎粉碎技术

轮胎的主要成分是橡胶,而橡胶是一种具有高弹性的高分子材料,因其强大的交联网状结构而不容易粉碎,对此研究者从利用剪切和挤压等作用力,降低温度以及溶剂浸泡等不同角度探索出多种粉碎技术^[9]。按加工状态,废旧轮胎粉碎分为干法粉碎和湿法粉碎两种。

1.1 干法粉碎

1.1.1 常温粉碎

常温粉碎^[10]一般是指加工温度在(50±5)℃

基金项目: 广州市科技计划项目(201803030016)

作者简介: 巩雨注(1996—),男,安徽泗县人,华南理工大学在读硕士研究生,主要从事胶粉改性的研究。

*通信联系人(wangxp@scut.edu.cn)

引用本文: 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(1):66-72.

Citation: GONG Yuzhu, WANG Xiaoping, JIA Demin. Crushing Technology and Application Progress of Waste Tires[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(1): 66-72.

或略高温下通过辊筒或其他粉碎设备的剪切和挤压等作用力对废旧橡胶进行粉碎的技术。传统的常温粉碎技术最早使用的是辊筒粉碎机,经过粗碎和细碎两个工序得到的胶粉粒径一般为0.3~1.4 mm,胶粉表面粗糙、呈毛刺状,具有较大的比表面积,有利于活化改性,在模压时有利于提高其与基质橡胶的粘附性^[11],但辊筒粉碎时产生大量热,难以实现连续化生产。随后,日本、德国、俄罗斯等国家开发出常温粉碎连续化生产工艺。日本神户制钢所最早采用破碎机和细碎机连用的方式对废旧轮胎实施连续粉碎^[12],胶粉粒径小于5 mm,但仍偏大。G. Gundisch等^[13]利用高压作用将废旧轮胎推挤进入带有多孔的机筒内,然后将挤出的胶粒送入旋盘式粉碎机进行细碎,这种高压粉碎技术生产的胶粉粒径约为0.5 mm。德国和俄罗斯等国家于1988年采用螺杆挤出机对废旧轮胎进行挤出粉碎^[14-15],胶粉粒径范围在0.05~0.5 mm之间。以上常温粉碎工艺中存在一个共同问题,即在一定程度上都会产生粉碎热,可能导致胶粉过热焦化,不仅影响胶粉性能,甚至还存在引发火灾的安全隐患。

1.1.2 低温粉碎

常温下对废旧轮胎这样的高弹性体粉碎时不仅会产生大量粉碎热,影响胶粉性质,而且机械设备磨损大,能耗高。当温度低于橡胶脆化温度时,橡胶中仅有小部分链段可以运动,宏观表现为橡胶整体变得脆化,在受外力作用时很容易发生破碎。利用橡胶的这一特性,在低温条件下粉碎废旧轮胎可以得到粒径较小、表面光滑、热氧化程度低的精细胶粉。工业上用于低温粉碎以生产胶粉的制冷源主要为液氮,但我国液氮价格昂贵,利用液氮制冷生产胶粉的工艺成本偏高,为此探索出其他制冷方式来代替液氮制冷,如利用空气膨胀制冷和液化天然气(Liquified natural gas, LNG)制冷。

1.1.2.1 液氮冷冻粉碎

液氮的沸点为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$,低温效果理想,且无色、无味、无毒、无污染,因此液氮是冷冻粉碎较理想的制冷源,当废旧轮胎温度降低至脆化温度以下时,再用辊筒粉碎机或锤式粉碎机将其粉碎。美国联合碳化物(Union Carbide Corporation, UCC)公司开发出的UCC粉碎技术^[16]是世界上最早

的冷冻粉碎工艺之一,1971年完成了废旧轮胎的冷冻粉碎并得到粒径在0.03 mm以下的胶粉。日本关西环境开发株式会社结合了常温粉碎与冷冻粉碎两种工艺开发出日本关西环境开发株式会社粉碎技术^[16],并于1978年实现了工业化,其生产的废旧轮胎冷冻胶粉粒径全部在0.27 mm以下,其中粒径在0.15 mm以下的胶粉约占1/3。乌克兰国家科学院低温物理工程研究所开发的液氮冷冻粉碎废旧轮胎制备胶粉技术^[17]包括粉碎和研磨两部分,微磨机在液氮条件下将粉碎得到的胶粒研磨成粒径为0.05~1.25 mm的精细胶粉。德国INTEC公司采用INTEC RC400/05生产线^[17]在 $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 深冷条件下进行废旧轮胎粉碎以制备胶粉,粉碎后胶粉、金属和纤维能彻底分离,胶粉的纯净度可高达99.99%。加拿大Recoutry公司开发出一套液氮低温粉碎工艺^[18],该工业化生产线年生产废旧轮胎胶粉13 500 t。以上工艺均需要大量的液氮,生产成本偏高,不适合我国国情。

1.1.2.2 空气膨胀制冷粉碎

废旧轮胎的低温粉碎技术并非一定要达到或低于胶料脆化温度才能得到精细胶粉,当冷冻温度在脆化温度附近时,硬化的轮胎橡胶就可以实现有效细碎,这样会比液氮深冷粉碎节约工艺成本。基于这一思路,P. Wang等^[19]在1986年研制出了空气涡轮制冷技术,并成功地将其应用于废旧轮胎粉碎工艺,可制得 $250\text{ }\mu\text{m}$ 以上的精细胶粉,称ATCG法。中国航空附件研究所自行研发出空气循环低温粉碎技术,并由南京飞利宁深冷工程公司建立可年产万吨级精细胶粉生产线^[20]。国内外学者在探索制冷方式的同时,也在不断改进制冷系统和粉碎装置,以期获得更好的低温粉碎效果。S. B. Liang等^[21]提出了由热分离器和涡流磨建立的新型低温粉碎系统,制备的胶粉具有尖锐的角和光滑的表面。H. Uwitonze等^[22]提出将低温液氮粉碎与涡流磨粉碎装置合并,可得到粒径更小、形貌更光滑的超细胶粉。

1.1.2.3 LNG制冷粉碎

由天然气经压缩、冷却至 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 而成的LNG通常在0.1 MPa下储存,当其重新气化时可产生 $830\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的冷能^[23],充分利用这些冷能完全可以实现废旧橡胶的低温粉碎。LNG制冷是探索

出的另一种实现废旧轮胎低温粉碎的方式,它不仅提高了冷能利用率,还降低了生产成本,故利用LNG制冷粉碎比传统的常温粉碎和液氮制冷粉碎具有明显优势。其工艺有两种:一种是将LNG用于空气分离,得到液氮用于废旧轮胎冷冻;另一种是以氮气为冷媒回收LNG的冷能,得到液氮用于废旧轮胎冷冻^[24]。2011年,中国海洋石油集团有限公司深冷精细胶粉项目以废旧轮胎为生产原料,依托空气分离液态产品,通过采用深冷低温粉碎技术生产出75~180 μm高附加值的精细胶粉,填补了国内高端精细胶粉技术空白^[23,25-27]。LNG冷能的利用减少了废旧轮胎冷冻成本,但需要大型的运输、冷冻和粉碎设备,设备成本高,占地面积大,不适合小工厂生产。

1.2 湿法粉碎

湿法粉碎^[10]是在溶剂(包括水)中进行粉碎以生产胶粉的技术,制备的胶粉比常温 and 低温粉碎胶粉更为精细,且表面粗糙,还能实现胶粉部分脱硫,胶粉性能优势明显。湿法粉碎主要包括英国橡胶与塑料研究协会(Rubber and Plastics Research Association, RAPRA)法、常温浸混粉碎法、全水相法和高压水射流冲击粉碎法。

1.2.1 RAPRA法

RAPRA法是由英国RAPRA开发的一种典型的湿法粉碎生产工艺^[28]。粉碎过程一般可分为3步。(1)先对废旧轮胎粗碎得到粗胶粉。(2)用化学试剂(包括水)对粗胶粉进行预处理。根据溶剂的不同,该步又可分为3种方式:用油酸对粗胶粉进行膨润增塑,然后在辊筒上薄通,同时加固体碱进行压炼,使橡胶变脆;用四氢呋喃、乙酸乙酯、丁酮、三氯甲烷等极性溶剂作为膨胀液加入到粗胶粉中,使其膨胀软化;用3倍以上的水对粗胶粉进行浸泡。(3)将处理的粗胶粉投入圆盘式胶体研磨机中进行超细研磨。RAPRA法生产的超细胶粉粒径为2~20 μm,表面凹凸、呈毛刺状,补强效果好。但RAPRA法也存在一些不足,如所用溶剂对环境有所影响,而且生产成本低,产品多用于高档制品中,适用范围不广。

1.2.2 常温浸混粉碎法

无锡博大橡塑粉体技术有限公司对常温粉碎出现的生热问题进行了研究,于1999年实施了常

温浸混粉碎技术,即先用化学溶剂对粗胶粒进行预浸混使其变性,然后采用剪切、挤压和研磨相结合的方式粉碎得到75~180 μm之间的精细胶粉,同时采用风冷和水冷进行除热,从而解决了常温粉碎工艺中易出现的高温成糊和生热降解等问题^[29],但溶剂的应用还是会面临着环保性问题,该法也存在不足。

1.2.3 全水相法

RAPRA法和常温浸混粉碎法两种粉碎技术对环境均有一定程度的影响,为解决环保性问题,广州爱其科技股份有限公司采用全水相法粉碎技术,建立起了国内首条无三废湿法制备精细胶粉生产线。胶块破碎、筛分和传输等工序都在全密闭的充满水介质的环境中进行,实现了废气、废水和废渣零排放,也杜绝了粉尘外扬和噪声问题,生产的胶粉粒径为75~180 μm,胶粉具有颗粒均匀、比表面积大、表面活性高、表面无焦化层、表面不带静电和难以发生团聚等优点^[30-31]。全水相法粉碎技术在环保性、生产成本和胶粉性能各方面均表现突出,在绿色循环利用废旧轮胎行业中具有无限的潜力。

1.2.4 高压水射流冲击粉碎法

匈牙利潘依喷射(Pannon Jet)公司以废旧子午线轮胎为破碎对象,开发出基于超高压水射流的破碎技术^[32],得到了部分脱硫再生的胶粉,一步即可实现从废旧轮胎到再生胶粉的再生过程。S. X. Song等^[33]利用超高压水射流冲击粉碎废旧轮胎,喷射压力接近220 MPa时脱硫效果最理想。Z. F. Wang等^[34]对超高压水射流粉碎废旧轮胎进行了探究,制得的胶粉平均粒径和比表面积分别约为270 μm和0.153 m²·g⁻¹,且表面粗糙;废旧轮胎橡胶的共轭双键、S—C键和S—S键在粉碎后被部分破坏。

1.3 其他粉碎技术

四川大学徐僖等^[35]于1996年发明了磨盘形反应器,该固相力化学粉碎法为回收废弃高分子材料提供一种新途径^[36]。X. X. Zhang等^[37]在常温下通过磨盘形反应器碾磨,成功制备了溶胶质量分数为0.198、平均粒径约为1 μm的脱硫氟橡胶超细粉末。臭氧粉碎技术^[38]是一种新颖的粉碎方式,其过程是将废旧轮胎整体置于密封装置内,装置

内是高达空气中臭氧浓度一万倍的高浓度臭氧,经过1 h后,开启内部配置的10 kW动力装置进行粉碎,得到的胶粉粒径分布较宽。试验^[39]结果表明,随着臭氧处理时间的延长,胶粉的含氧基团、表面活能和润湿性呈增大趋势。吕俊等^[40]提出了将常温粗粉碎和低温精细粉碎工艺相结合的方法,该技术既克服了常温粉碎时胶粉粒径大及物理性能差等问题,又克服了全低温粉碎设备投资大和生产成本高等问题,生产的粒径小于180 μm的胶粉占90%,且胶粉表面光滑均匀。高压爆破粉碎技术^[41]是将轮胎整体放于一高压容器中,利用50 MPa的高压使橡胶与骨架材料分离,可得到粒径为1~1.7 mm的胶粉,胶粉粒径较大。卢苇等^[42]研究了爆炸法处理废旧轮胎时不同炸药对回收效果的影响,与机械粉碎相比,爆炸粉碎消耗的能量低,同时也避免了钢丝对机械设备的磨损。此外,还有定向爆破技术、高温超速粉碎技术和电磁冲击粉碎技术等。

2 废旧轮胎粉碎设备及原理

胶粉性能由粉碎技术和粉碎设备共同决定,不同的粉碎设备对粉碎技术的优劣势也有着不同影响,例如:分别在常温和低温下用同种粉碎设备进行粉碎,低温粉碎得到的胶粉粒径明显更小^[43-44];同样是低温粉碎,采用辊压式、磨盘式、剪切式粉碎机得到的胶粉粒径也有所不同,磨盘式粉碎机更适合于精细化生产^[45]。因此,了解不同设备的粉碎原理很有必要。前述粉碎技术中所用到的粉碎设备主要有辊筒粉碎机、磨盘形固相力化学反应器、螺杆挤出机、涡轮磨、高能球磨和高压水枪等。

辊筒粉碎机主要由两个相向转动的辊筒组成,两个辊筒的尺寸一般不同,转速也不同,两辊间的工作间隙决定了胶粉粒径的大小。胶块从辊筒上方喂入后可认为经历了两个粉碎过程,先是大胶块被相向转动的辊筒带入粉碎区,受到辊筒的挤压力和剪切力而被粉碎成小胶粒;然后小胶粒随辊筒继续向下运动,胶粒再次受到挤压剪切作用而被二次粉碎^[46]。

四川大学高分子研究所高分子材料工程国家重点实验室发明了磨盘形固相力化学反应器^[35],

反应器的核心部分为镶嵌式磨面(如图1所示),静盘和动盘相向放置。磨面分为8个区间,每个区间由平行于区间分界线且具有一定倾斜角度的齿形磨槽组成,不同区间的磨槽深浅和倾斜角度都有一定的差异。碾磨过程中上下磨面夹角逐渐减至零,使其间的物料受到强烈的挤压、剪切、摩擦作用而被粉碎;与此同时物料以旋转方式从中心向磨面边缘移动,物料又受到环向应力。故该反应器像一把三维剪子一样提供了强大的挤压、剪切及环向应力等多重作用,可有效粉碎传统设备难以粉碎的粘弹性高分子材料。碾磨时,磨盘空腔中通有循环冷却水,可以控制磨面温度,不会出现球磨法产生的高温现象,该反应器试验条件更温和,且能连续批量生产^[47]。

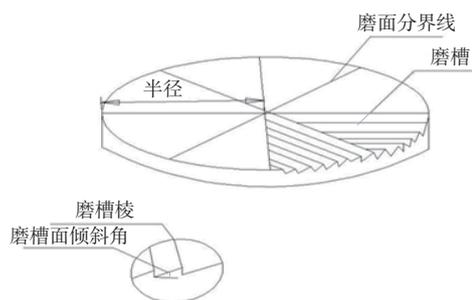


图1 磨盘形固相力化学反应器磨面示意
Fig.1 Grinding surface of disc solid state mechanochemical reactor

N. S. Enikolopow等^[48]设计的连续化固态剪切粉碎设备主要包括挤出机主轴上的一系列捏合、剪切单元以及加热和冷却装置,其原理是利用压力场-剪切力场-温度场的共同作用使橡胶发生弹性形变和破碎。在挤出过程中设置多个温区,在温度梯度场和应力场的共同作用下,促使橡胶在高压状态下发生弹性形变,并将储存的弹性势能在剪切作用下爆发式释放而引起内部微裂纹迅速扩展和贯通,最终转化为新生裂纹表面自由能,使橡胶颗粒细化。

涡轮磨的旋转体由多级叶片组和侧面连接的隔板形成的多个小室组成,机罩内装有许多带有沟槽的衬板,叶片与外壳间隙可调。由于多级反复粉碎,不仅有高速旋转的叶片对物料颗粒施加冲击和剪切作用,还有物料颗粒与衬板间的高速碰撞作用;同时,物料颗粒之间的相互碰撞以及由

高频振动产生的压碎也对物料起到粉碎作用,排出的物料粒径分布较窄^[49]。

高能球磨设备按运动方式可分为旋转式球磨机和振动式球磨机。旋转式球磨机工作时,在筒体内的研磨介质和物料一起随着筒体转动提升到一定高度,然后受重力作用而脱离筒壁沿抛物线下落,物料在研磨介质的冲击、滚动、滑动和研磨产生的摩擦和剪切共同作用下粉碎,其中以冲击和研磨为主。振动式球磨机粉碎时,物料和研磨介质装入弹簧支撑的磨机筒内,通过研磨介质的高频振动对物料作冲击、摩擦和剪切等作用而将其粉碎^[50]。

用高压水枪产生超高压水射流来破碎废旧轮胎的过程短暂且复杂,破碎过程与材料自身响应、轮胎原始裂纹、受力方式和内部应力分布等因素有关。因此,生产胶粉机理并不唯一,橡胶断裂与胶粉生成是多种破碎机理综合作用的结果,包括机械力化学、裂纹扩展、空泡溃灭和韧脆转变现象等机理,在不同因素和不同射流参数下,各机理比重也有所不同^[51]。

3 结语

我国是橡胶资源短缺的国家,合理地循环利用橡胶资源已成为当务之急,利用橡胶粉碎技术生产胶粉,一方面可以缓解我国橡胶资源匮乏的局面和解决环境污染问题;另一方面胶粉用途广泛,在实际应用中有很高的经济价值。胶粉粒径越小,比表面积越大,表面活性越高,经济价值就越高。比较几种粉碎技术可知,湿法粉碎废旧轮胎生产的胶粉粒径小,比表面积大,补强效果好,性能更优越。其中,全水相法粉碎技术凭借在胶粉性能、生产成本、环保性等方面的优秀表现而备受关注,在未来的废旧轮胎粉碎工艺中,全水相法将是最具潜力的粉碎方式。

参考文献:

[1] 中国废旧轮胎每年将达2000万吨[EB/OL]. 2014-09-06[2020-01-17]. <http://www.chinatiredealer.com/news/show-497.html>.

[2] Hu N, Cheng C M, Wen X F, et al. Comparison Study of Scrap Tires Management between China and the USA[J]. *Advanced Materials Research*, 2014(878): 90-98.

[3] 张明, 吴俊青, 刘俊亮. 废弃橡胶胶粉化工艺及胶粉再生利用研究

进展[J]. *橡胶工业*, 2020, 67(1): 3-9.

- [4] 王小萍, 张欣, 杜江华, 等. 胶粉的改性及工业应用[J]. *橡胶工业*, 2017, 64(7): 441-445.
- [5] 刘有山, 毕超, 白欣禹, 等. 工艺条件对废旧轮胎胶粉脱硫效果的影响[J]. *橡胶工业*, 2020, 67(3): 214-218.
- [6] 农丽娟, 任茂芳, 康佐成, 等. 铁氧体辅助微波脱硫活化胶粉及其与丁苯橡胶并用胶性能的研究[J]. *橡胶工业*, 2019, 66(5): 349-353.
- [7] 钱伯章. 我国废旧橡胶综合利用现状及发展[J]. *橡塑资源利用*, 2014(1): 19-35.
- [8] Kerekes Z, Lubloy E, Kopecsko K, et al. Behaviour of Tyres in Fire[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 133(1): 279-287.
- [9] 曾冬, 吴俊青, 刘俊亮, 等. 机械力化学改性胶粉及其与天然橡胶并用胶性能的影响[J]. *橡胶工业*, 2020, 67(3): 196-199.
- [10] 李和平. 再生橡胶门尼黏度反弹问题探讨[J]. *中国轮胎资源综合利用*, 2018(10): 32-37.
- [11] 隋建波, 向东, 牟鹏, 等. 废旧轮胎橡胶的常温粉碎及性能研究[J]. *橡胶工业*, 2012, 59(1): 33-37.
- [12] 刘超锋, 杨振如. 废橡胶制取细胶粉的技术开发及应用概况[J]. *上海塑料*, 2005(4): 23-26.
- [13] Gundisch G, Szots G, Lantos E, et al. Method and Device for Breaking Down Rubber Wastes, in Particular Rubber Tyres[P]. Europe: EP 0018664A1, 1980-11-12.
- [14] 尼科拉·瑟吉维奇·埃尼科洛波, 瓦勒里·瓦希利维奇·马利施, 阿格里·维亚彻斯拉沃维奇·比比彻, 等. 从天然或合成橡胶为基料的橡胶制取粉末的方法[P]. 中国: CN 88100680, 1988-09-07.
- [15] Wolfson S A, Nikolskii V G. Powder Extrusion: Fundamentals and Different Applications[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1997, 37(8): 1294-1300.
- [16] 黄胜强. 低温粉碎橡胶技术[J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(S2): 16-18.
- [17] 王春节, 王大伟, 张磊, 等. 低温橡胶粉碎技术发展综述[J]. *中国橡胶*, 2012, 28(2): 39-43.
- [18] Yamamoto M, Hirano Y, Matsuda S, et al. Low Temperature Waste Crushing System[P]. Europe: EP 1088591, 2001-04-04.
- [19] Wang P, Liu S Y. Recovery of Waste Rubber through Pulverization at a Low Temperature of Refrigeration by an Air Turbine[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 1999, 213(2): 135-138.
- [20] 李琳. 废旧橡胶胶粉低温粉碎技术研究进展及趋势[J]. *再生资源与循环经济*, 2011, 4(10): 38-41.
- [21] Liang S B, Hao Y C. A Novel Cryogenic Grinding System for Recycling Scrap Tire Peels[J]. *Advanced Powder Technology*, 2000, 11(2): 187-197.
- [22] Uwitonze H, Han S, Jangryeok C, et al. Design Process of LNG Heavy Hydrocarbons Fractionation: Low LNG Temperature

- Recovery[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2014, 85: 187-195.
- [23] 吴小华, 蔡磊, 李庭宇, 等. LNG冷能利用技术的最新进展[J]. 油气储运, 2017, 36(6): 624-635.
- [24] 熊永强, 李亚军, 华贲. 液化天然气冷量利用的集成优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 20-25.
- [25] 国家石油和化工网. 首个LNG冷能低温胶粉项目启动[EB/OL]. <http://www.cpcia.org.cn/html/13/20113/869895712.shtml>.
- [26] 熊永强, 华贲, 贾德民. 利用液化天然气卫星站冷能的废旧橡胶低温粉碎装置[J]. 现代化工, 2009, 29(7): 59-62.
- [27] Xiong Y Q, Hua B, Li Y J, et al. Integration Analysis of LNG Cold Energy Utilization in Cryogenic Pulverization of Waste Rubber[J]. Journal of South China University of Technology, 2009, 27(12): 58-63.
- [28] 所同川, 李忠明. 废旧橡胶回收利用新技术[J]. 江苏化工, 2004, 32(6): 1-6.
- [29] 刘玉强, 殷晓玲. 胶粉的生产方法[J]. 弹性体, 2001, 11(3): 40-43.
- [30] 刘会林. 改性胶粉及其在橡胶和沥青的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [31] 吴建汀, 陈爱其, 罗伟川. 一种精细橡胶粉制备方法[P]. 中国: CN 107379333A, 2017-11-24.
- [32] 秋实. 超高水压: 轮胎回收的新方案[J]: 资源再生, 2009(7): 47.
- [33] Song S X, Zha H, Huang H H. Cavitation Desulfurization in Vulcanized Rubber Recycling under Ultra-high Pressure Water Jet[J]. Journal of Polymer Engineering, 2017, 37(5): 529-536.
- [34] Wang Z F, Kang Y, Wang Z, 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.
- [35] 徐禧, 王琪. 力化学反应器[P]. 中国: CN 1130545, 1996-09-11.
- [36] 王琪, 卢灿辉, 夏和生. 高分子力化学研究进展[J]. 高分子通报, 2013(9): 35-49.
- [37] Zhang X X, Li H, Tian D, et al. Enhancement of Thermal Aging Performance and Oil Resistance of Acrylic Rubber Vulcanisates by Adding Devulcanised Ground Fluoroelastomer Ultrafinepowderas Functional Filler[J]. Materials Research Innovation, 2012, 16(2): 143-149.
- [38] 王金凤, 张玉贞. 废胶粉在沥青改性中的应用[J]. 石油沥青, 2013, 27(4): 62-66.
- [39] Fan P, Lu C H. A Study on Functionalization of Waste Tire Rubber Powder through Ozonization[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2011, 19(4): 943-949.
- [40] 吕俊, 吕志榕. 常温和低温相结合的橡胶粉碎工艺[J]. 天然气工业, 2011, 31(6): 107-110, 133.
- [41] Xin Z X, Zhang Z X, Pa L K, et al. Study of Microcellular Injection-molded Polypropylene/Waste Ground Rubber Tire Powder Blend[J]. Materials and Design, 2010, 31(1): 589-593.
- [42] 卢苇, 刘天生, 王凤英. 爆炸法回收废旧轮胎实验研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(1): 46-48.
- [43] Berlin A A, Dudareva T V, Krasotina I A, et al. Tire-Rubber-Waste Recycling and Active Powder of Discretely Devulcanized Rubber[J]. Polymer Science: Series D, 2018, 11(3): 323-329.
- [44] Vincenzo G, Floriana L M, Federica L, et al. Cryo-comminution of Plastic Waste[J]. Waste Management, 2004, 24(7): 663-672.
- [45] 陈伟. 废旧橡胶轮胎低温粉碎工艺规程编制与设备的研发[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [46] 关宇. 废旧轮胎粉碎机的设计与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [47] 卢灿辉. 聚丙烯-铁-废旧橡胶的碾磨粉碎应力诱导效应及复合材料的研究[D]. 成都: 四川大学, 2002.
- [48] Enikolopow N S, Wolfson S A, Nepomnjaschtschie A I, et al. Method and Apparatus for Pulverizing Polymers[P]. USA: USP 4 607 797, 1986-08-26.
- [49] 邢磊, 王屏, 刘思永, 等. 空气涡轮制冷机在粉碎EVA技术中的应用[J]. 化工学报, 2008, 59(4): 1037-1043.
- [50] 王科. 复合式水力粉碎装置的研制及其粉碎机理探讨[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [51] 唐强. 超高压水射流下轮胎化学键断裂及胶粉成形机制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.

收稿日期: 2020-08-16

Crushing Technology and Application Progress of Waste Tires

GONG Yuzhu, WANG Xiaoping, JIA Demin

(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: With the increasing number of waste tires all over the world, the stacking of waste tires not only causes environmental pollution, but also leads to a waste of rubber resources. It is imperative to reasonably recycle waste tires. At the present stage, the preparation of rubber powder by crushing waste tires has become one of the main recycling methods of waste tires due to its technological advantages. In this paper, the technologies of crushing waste tires to prepare rubber powder at home and abroad were reviewed, and the dry and wet crushing technology and related processes were introduced in detail, in which the dry

crushing included room temperature comminution and cryo-comminution, and the wet crushing included RAPRA, room temperature immersion comminution, all-aqueous phase and high-pressure water jet impact comminution methods. The main crushing equipment and its crushing principles were summarized. It was pointed out that the rubber powder produced by the all-aqueous method had better performance, the process cost was low and environmental protection performance was outstanding; therefore, the all-aqueous phase method was expected to become the leading development direction of the crushing waste tires in the future.

Key words: waste tire; rubber powder; crushing technology; dry crushing; wet crushing; all-aqueous phase method

风神股份托管倍耐力载重和农业轮胎业务

根据风神轮胎股份有限公司(简称风神股份)与中国化工橡胶有限公司(简称橡胶公司)签署的《股权托管协议》,自2020年12月1日起,橡胶公司的倍耐力品牌载重轮胎和农业轮胎生产和销售业务交由风神股份托管3年。协议内容显示,橡胶公司将其间接持有的Prometeon Tyre Group S. r. l. (PTG) 52%的股权交由风神股份托管,托管期限为3年,到期后可自动延长。

目前,风神股份持有PTG 10%的股权。PTG总部位于意大利米兰,前身为倍耐力工业轮胎有限责任公司。PTG生产和销售包括倍耐力品牌在内的多种载重轮胎和农业轮胎,在埃及、土耳其、巴西等国家拥有生产基地,全球员工约为7 000人。此次股权托管协议的签订有利于解决同业竞争问题。双方将积极发挥优势,全面提升技术创新能力和先进制造能力,为客户提供更多、更优质的产品。双方将深度发挥协同效应,包括细分市场的渠道协同、全球范围的全价值链协同,为客户提供更便捷、更有价值的服务的同时,优化采购、供应链等方面的资源配置,与供应商等业务伙伴建立更紧密的合作关系。

(摘自《中国化工报》,2020-12-07)

一种高铁密封件用耐老化硅橡胶密封材料及其制备方法 由浙江翔宇密封件有限公司申请的专利(公布号 CN 111534105A,公布日期 2020-08-14)“一种高铁密封件用耐老化硅橡胶密封材料及其制备方法”,涉及的密封材料配方为:甲基乙烯基硅橡胶 60~70,氟硅橡胶 25~30,端羟基聚二甲基硅氧烷 6~8,沉淀法白炭黑 3~5,气相法白炭黑 2~3,硅烷偶联剂

0.7~0.9,二异氰酸甲苯酯 0.12~0.15,氧化锌 1.5~1.8,防老剂 2.5~4.5,热稳定剂 2~4,交联剂 2~4。该密封材料不仅具有良好的密封性能,还具有优异的耐老化性能(耐高温老化性能好),使用寿命长,耐油和耐溶剂性能以及弹性好,压缩永久变形小,力学性能良好。

(本刊编辑部 赵敏)

一种低气味、低压缩变形的橡胶密封材料及其制备方法 由扬州华通橡塑有限公司申请的专利(公布号 CN 111849041A,公布日期 2020-10-30)“一种低气味、低压缩变形的橡胶密封材料及其制备方法”,涉及的橡胶密封材料配方为:天然橡胶 50~70,聚氨酯橡胶 30~50,热塑性聚氨酯弹性体 10~20,炭黑 70~100,木质素 1~5,橡胶除味剂 1~5,防老剂 5~10,促进剂 3~5,硫化剂 2~6。该橡胶密封材料强度高,变形量小,耐磨性能好,且其密封制品使用寿命长,密封效果好,在使用过程中散发的气味少。

(本刊编辑部 赵敏)

一种新型橡胶开炼机 由天津中和胶业股份有限公司申请的专利(公布号 CN 111805789A,公布日期 2020-10-23)“一种新型橡胶开炼机”,涉及的开炼机包括底座和设置于底座上的左右机架;左右机架之间设置第一翻胶辊和第二翻胶辊;第一翻胶辊和第二翻胶辊的下方设置承接辊;承接辊下方设置1对炼胶辊;炼胶辊下方设置裁切机构;底座上位于裁切机构的两个环刀之间的下方设置传送带。该开炼机节省材料且环保,可减少人力,提高工作效率。

(本刊编辑部 赵敏)