

废旧轮胎资源化的能量与物质流分析

许江林 孙承亮 于佳雪 黄菊文 李光明

同济大学环境科学与工程学院; 上海污染控制与生态安全研究院

摘要: 随着社会经济的快速发展,轮胎的使用量也在逐年增加,废旧轮胎的处理已成为社会关注的热点问题。基于生命周期的清单分析原理,对废旧轮胎的处理过程建立了初步的物质与能量的理论模型和计算方法,并分析了废旧轮胎三种资源化处理方法的物质流和能量流过程,阐述了其中物质和能量的输入输出量,从物质流和能量流方面对三种资源化处理方法进行了比较,结果表明废旧轮胎的热解利用相较于机械粉碎和能源化发电的利用方式可以更好地回收利用废旧轮胎中的物料和能量,是废旧轮胎资源化处理的未来发展方向。

关键词: 生命周期; 废旧轮胎; 资源化; 物质流; 能量流

DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2018.11.005

Analysis on Energy and Material Flow in Resourcing Waste Tyre

Xu Jianglin, Sun Chengliang, Yu Jiaxue, Huang Juwen, Li Guangming*

College of Environmental Science and Engineering, Tongji University

Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security

Abstract: With the rapid development of the social economy, the use of tires is also increasing rapidly year by year, and the disposal of used tires has become a hot issue of social concern. Based on the life cycle inventory analysis principle, this paper establishes a preliminary theoretical model and calculation method for the treatment of waste tires, and analyzes the material flow and energy flow process of the three resource treatment methods of waste tires. The input and output of matter and energy are compared. The three resource treatment methods are compared from the aspects of material flow and energy flow. The results show that the pyrolysis utilization of waste tires can be compared with the mechanical pulverization and energy utilization. Better recycling of materials and energy in used tires is the future direction of recycling waste tires.

Key words: Life Cycle, Waste Tire, Resource, Material Flow, Energy Flow

【作者简介】

许江林, 同济大学环境科学与工程学院研究生

1 废旧轮胎的资源环境问题

随着经济的发展和橡胶制品开发技术的进步,各类机动车辆及其他运输工具的轮胎需求量逐年大幅增加。全世界每年生产的橡胶制品约3 100万吨,其中约50%是轮胎。橡胶制品数量的增长使其废弃品的数量也越来越多^[1]。橡胶制品是除废塑料外,居第二位的废旧高分子材料,其中以废旧轮胎居多,轮胎报废率高达55.4%。据统计,每年全世界的轮胎废弃量约15亿条总计约900万吨,还有25亿条陈旧废胎未经处理^[2]。

2017年,我国废旧轮胎产生量达到约3.2亿条,重量超过1 000万吨。翻新轮胎受条件限制影响,预计800万标准折算条左右。再生橡胶产量达到约450万吨,橡胶粉产量达到约40万吨。随着汽车的普及,废旧轮胎等垃圾也逐渐增多。废旧轮胎属于不溶或难溶的高分子弹性材料,很难靠自然界中的生物自然降解。废旧轮胎还是一种需要占用大量环境空间的废物,并且难以压缩、收集和消除。另外,越积越多的废旧轮胎长期露天堆放,极易滋生蚊虫传播疾病,严重恶化自然环境,并可能引发火灾,威胁人们的生命及财产安全。

废旧轮胎其本身是一种再生资源,对废旧轮胎进行回收处理,不仅可以缓解其对环境的压力,降低污染,更能实现资源回收利用。世界各国,尤其是发达国家,都在致力于废旧轮胎的回收利用,并制定了相关的法规。欧盟已将废旧轮胎列为需优先处理的废弃物,目前已禁止将废旧轮胎碎片进行填埋处理。美国早在1991年已通过立法推动废旧轮胎的再利用,规定每处理一条废旧轮胎政府将补贴2.5美元~4美元。目前世界上废旧轮胎回收利用率最高的国家是芬兰,接近100%(整个欧盟接近80%),美国废旧轮胎回收利用率超过90%,日本废旧轮胎回收利用率接近90%。与发达国家相比,我国废旧轮胎资源却浪费严重,废旧轮胎的回收率低,回收技术落后。尤其近年来各地兴起了利用废旧轮胎土法炼油,一方面这对我国本已十分匮乏的橡胶资源来说是一种毁灭性破坏;另一方面,产生

大量的废渣,排放大量的SO₂等有害气体,造成了严重的环境污染。

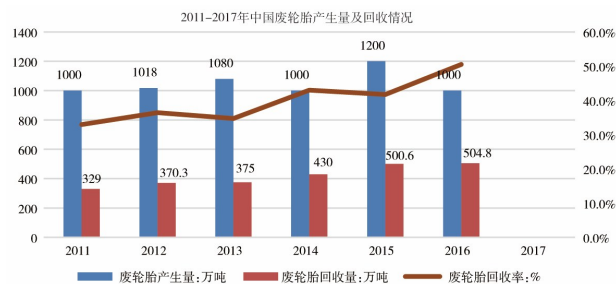


图 1-1 2011-2017年中国废轮胎产生量及回收情况

2 废旧轮胎的资源化途径分析

2.1 废旧轮胎的资源化利用途径

目前对废旧轮胎再利用的途径主要为原形直接利用、燃料热能利用、生产再生橡胶、生产硫化橡胶等途径^[4]。

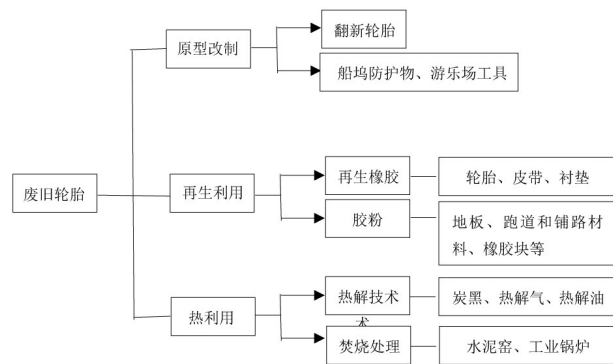


图 2-1 废旧轮胎的几种利用途径

2.2 原型或改制利用

原形改制是通过捆绑、裁剪、冲切等方式,将废旧轮胎改造成有利用价值的物品。虽然原形改制是一种非常有价值的回收方法,但是该方法消耗的废旧轮胎量并不大,不到废旧轮胎总量的10%。

2.3 再生利用

轮胎的再生利用指的是没有将废弃轮胎转换成原材料,而是利用废弃材料进行的几项活动。废旧轮胎通过冲压,捆包,粉碎进行再利用。其中制作再生胶是利用最多的一种再利用方式^[5],但这种方法耗能大,污染高,已经被发达国家所抛弃。

2.4 热利用

(1) 燃料热能利用

燃料热能利用就是将废旧橡胶作为燃料使用,热能利用通常通过以下两种方式进行:一是直接焚烧然后回收热量,此法虽然简单,但会造成大气污染;二是将废旧轮胎破碎,按照固定比例进行混合,制成固体垃圾燃料代替煤等资源火力发电。

(2) 热解回收

废旧橡胶在高温下可以分离提取出燃气、炭黑、钢铁等资源。其过程是将粉碎后的胶粒送入热裂解炉中,使其处于高温高压状态下发生裂变分解,其中气体经过分流进入冷凝设备,被凝结的部分作为油品回收,不可凝结的部分作为燃气回收。热裂解产生的碳粉可以作为炭黑使用,这种经过再加工的炭黑可以作为吸附剂对水中的重金属污染有极强的吸附作用。此外热裂解的产物还有钢铁成分,即可以回收利用轮胎中的钢丝,具有很好的物质和能量回收效果。

3 废旧轮胎资源化能量模型

3.1 能量消耗模型

废旧轮胎的整个生命周期中都存在着能量的输入和输出,本文主要针对废旧轮胎资源化利用过程建立相应的可量化的能量模型^[6-7]。 FE_2 为废旧轮胎资源化过程的能量输入。

$$FE_2 = \sum_i (RM\rho_i \times RM_i) + \sum_j (RM\rho_j \times RE_j)$$

式中: $RM\rho_i$ 为资源化阶段物料i的能量密度; RM_i 为资源化阶段物料i的消耗量; $RM\rho_j$ 为资源化阶段能源j的能量密度; RE_j 为资源化阶段能源j的消耗量。

3.2 能量替代模型

在资源化阶段有产品的产生,将其视为替代能量,其值为直接生产该产品所需能耗,即:

$$SE = \sum_i (RPE\rho_i \times RPP_i) + \sum_j (RPE\rho_j \times RPE_j)$$

式中: $RPE\rho_i$ 为资源化阶段资源产品i的能量密度; RPP_i 为资源化阶段资源产品i的产量; $RPE\rho_j$ 为资源化阶段能源产品j的能量密度; RPE_j 为资源化阶段能源产品j的产量。

3.3 能量评价指标

(1) 净能量盈余

废旧轮胎资源化阶段的能量输入与替代能量输出之间的关系可用净能量盈余NE即1t轮胎在资源化阶段的净能量盈余来表示:

$$NE = SE - FE_2$$

(2) 能量回收率

在废旧轮胎资源化阶段,用能量恢复率ERR衡量各种资源化工工艺对输入能量的回收程度。其值为资源化阶段输出能量占输入能量的百分比。其中 FE_1 为生产过程中消耗的总能量。

$$ERR = \frac{SE}{FE_1 + FE_2} \times 100\%$$

4 物质流模型的建立

4.1 废旧轮胎资源化物质输入-输出模型

废旧轮胎的整个生命周期中都存在着物质的输入和输出,基于物质守恒原理,本文主要针对废旧轮胎资源化利用过程建立相应的可量化的物质流模型。

$$W_{\text{输入}} = W_{11} + W_{12} + W_{13} + \dots + W_{1n}$$

式中 W_{11} 为输入的第一种物料, W_{12} 为第二种物料, W_{1n} 为第n种物料

$$W_{\text{输出}} = W_{01} + W_{02} + W_{03} + \dots + W_{0n}$$

式中 W_{01} 为输出的第一种物料, W_{02} 为第二种物料, W_{0n} 为第n种物料

4.2 物质流评价指标

物料回收率

$$MRR = \frac{W_{\text{输出(可回收)}}}{W_{\text{输入}}} \times 100\%$$

5 能量—物质分析清单

本文选取了三种典型的废旧轮胎资源化处理的方法进行物质和能量分析^[8],其中机械粉碎制胶粉、能源化发电数据来源于文献^[3]的研究结果;热解数据直接来源于上海某生态经济科技有限公司的实测数据,生产阶段的数据来源于中国橡胶轮胎行业报告,表5-1为生产1吨轮胎能量和物料输入清单^[10]。

废旧轮胎资源化阶段的能量和物质输入包括资源化过程的物料输入和能源输入,能量输出为资源化产品的替代能量^[9]。输入—输出清单如表5-2~表5-4所示。

6 结果讨论

6.1 物质流分析

由清单分析的结果可以得到,三种废旧轮胎的资源化处理途径都可以在一定程度上回收利用废旧轮胎。从物料回收率的角度来看,再生做胶粉>热解>能源化发电,其中再生做胶粉和热解利用都可以做到废旧轮胎物料的高效回收,相较于热解工艺,再生做胶粉的工艺虽然做到了物料的高效回收,但其对环境污染严重,已逐渐被发达国家所弃用。能源化发电的利用方式主要是将废旧轮胎当作燃料使用,燃烧产生的能量中主要回收燃烧产生的热量,对其它如钢丝、炭黑等固相物料的回收率不高,所以导致了其物料的回收率偏低。

表5-1 生产1t轮胎能量和物料输入清单

种类	名称	数量	能量密度	能量
物料	丁苯橡胶	590 kg	179.90 MJ/kg	1.06 × 10 ⁶ MJ
	炭黑	300 kg	126.50 MJ/kg	3.80 × 10 ⁴ MJ
	钢丝	30 kg	27.80 MJ/kg	8.34 × 10 ² MJ
	纤维	80 kg	43.49 MJ/kg	3.48 × 10 ³ MJ
能量	水	208.2m ³	7.536 MJ/kg	1.57 × 10 ³ MJ
	烟煤	686 kg	26.370 MJ/kg	1.81 × 10 ⁴ MJ
	重油	16 kg	46.06 MJ/kg	7.37 × 10 ² MJ
	电	1016 kW·h	11.47MJ/(kW·h)	1.17 × 10 ⁴ MJ
小计				1.80 × 10 ⁶ MJ

表5-2 1t轮胎机械粉碎制胶粉能量和物料输入—输出清单^{[11],[12]}

种类	名称	数量	能量密度	能量
输入	电力	95kW·h	11.47MJ/(kW·h)	1.09 × 10 ³ MJ
	水	0.15kg	7.45MJ/kg	1.13MJ
	钢丝	0.44kg	27.80MJ/kg	12.23MJ
	燃油	0.01kg	45.47MJ/kg	0.45MJ
小计	总输入能量			1.1 × 10 ³ MJ
	总输入物料			1000.6kg
输出	精细胶粉	456kg	39.60MJ/kg	1.81 × 10 ⁴ MJ
	普通胶粉	225kg	37.10MJ/kg	8.35 × 10 ³ MJ
	钢丝	275kg	27.80MJ/kg	7.65 × 10 ³ MJ
	纤维	44kg	43.49MJ/kg	1.91 × 10 ³ MJ
小计	总输出能量			3.60 × 10 ³ MJ
	总输出物料			1000kg
	能量回收率			18.85%
	物料回收率			99.9%

表5-3 1t轮胎能源化发电能量和物料输入—输出清单

种类	名称	数量	能量密度	能量
输入	电力	0.04kWh	11.47MJ/(kWh)	0.46 MJ
	水	0.15 kg	7.54 MJ/kg	1.13 MJ
	钢丝	0.23 kg	27.80 MJ/kg	6.39 MJ
	燃油	0.01 kg	45.47 MJ/kg	0.45 MJ
	碳酸氢钠	120 kg	3.96 MJ/kg	4.75 × 10 ² MJ
小计	总输入能量			4.84 × 10MJ
	总输入物料			1120.39kg
输出	电力	132 kWh	11.47MJ/(kWh)	1.52 × 10 ³ MJ
	钢丝	225 kg	27.80 MJ/kg	6.26 × 10 ³ MJ
小计	总输出能量			7.78 × 10 ³ MJ
	总输出物料			225kg
	能量回收率			4.29%
	物料回收率			20%

表5-4 上海某公司的热解工艺的能量和物料输入—输出清单

种类	名称	数量	能量密度	能量
输入	电力	135 kWh	11.47MJ/(kWh)	1.55 × 10 ³ MJ
	燃油	1.25 kg	46.06 MJ/kg	57.58MJ
	水	0.15 kg	7.54 MJ/kg	1.13MJ
小计	总输入能量			1.61 × 10 ³ MJ
	总输入物料			1001.4kg
输出	气体	100 kg	21.75 MJ/kg	2.18 × 10 ³ MJ
	热解油	450 kg	39.58 MJ/kg	1.78 × 10 ⁴ MJ
	炭黑	350 kg	126.50 MJ/kg	4.43 × 10 ⁴ MJ
小计	钢丝	100 kg	27.80 MJ/kg	2.78 × 10 ³ MJ
	总输出能量			6.71 × 10 ⁴ MJ
	总输出物料			1000kg
	能量回收率			37.27%
	物料回收率			99.8%

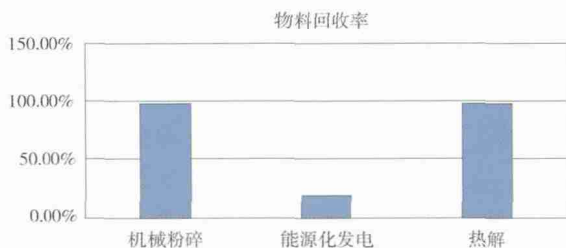


图6-1 三种资源化方式的物料回收率比较

6.2 能量流分析

根据三种资源化处理的清单分析结果,可以得到再生利用做胶粉、能源化发电和热解回收。三种处理方式的能源回收率分别为 18.85%、4.29%和 37.27%,其中主要原因是热解产物具有高的附加值可以补充到原有的工业体系中^[13]。如:炭经过处理

可以转化成活性炭或者炭黑甚至碳纳米管;液态产品中富含苯及其同系物,经过提纯可以转化为燃料油和苯;气态产品可以直接作为燃料燃烧,补偿或者提供热解过程所需的热量。可见热解是对废旧轮胎材料及其热能利用的最佳方式,主要原因在于在热解过程中,废轮胎中的有机物转化为可利用的能量,附加价值高^[14]。

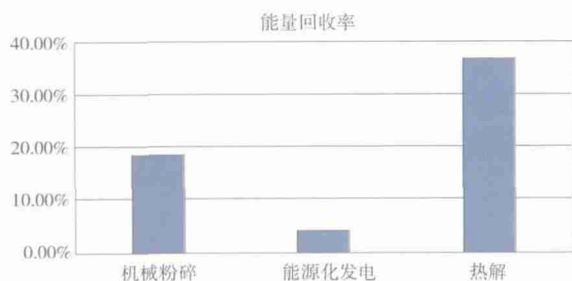


图6-2 三种资源化方式的能量回收率比较

6.3 结论

(1) 基于生命周期清单分析原理,建立了轮胎资源化阶段的能量消耗模型与物质的输入-输出模型及计算方法,并对废旧轮胎的三种资源化处理方法建立了物质流和能量流的清单。

(2) 废旧轮胎资源化过程能源回收效果的大小依次为热解 > 机械粉碎 > 能源化发电,表明热解技术是废旧轮胎资源化的未来发展方向。因此有效利用废旧轮胎,使宝贵的橡胶资源获得再生利用,达到节约能源,改善环境,减少污染的目的,是我国实现可持续发展和循环经济的重要途径。

(3) 对热解技术所具有的高能量回收率的原

因进行了分析,表明热解产物的高附加值是热解技术具有高能量回收率的主要原因,为废旧轮胎的高值化利用和绿色轮胎的制造与使用提供科学依据。

参考文献

- [1]李钊.我国废旧轮胎资源化的现状、问题与对策[J].低碳世界,2018(06):27-28.
- [2]蔡为民.中国轮胎工业发展现状及对橡胶的需求[C]//中国橡胶市场发展论坛暨2010世界橡胶高峰论坛,2010.
- [3]Corti A, Lombardi L. End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA[J]. Energy, 2004, 29(12):2089-2108.
- [4]Silke K, Eckhard K, Diethelm R, et al. Continental AG. Life Cycle Assessment of a Car Tire [R/OL].
- [5]王俏丽.基于LCA方法的废旧轮胎生产再生胶案例分析[A].中国环境科学学会.2014中国环境科学学会学术年会(第四章)[C].中国环境科学学会:中国环境科学学会,2014:6.
- [6]杨蕾.轮胎生命周期的经济、能量和碳排放分析[D].同济大学,2009.
- [7]黄菊文,李光明,贺文智,徐竟成,王华,杨蕾.轮胎生命周期的能量分析[J].汽车工程,2012,34(03):277-281.
- [8]Standards I. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines ISO 14044:2006[J]. 2006.
- [9]黄海鸿,戚赧徽,刘光复,等.面向产品设计的全生命周期能量分析方法[J].农业机械学报,2007, 38(11):88-92.
- [10]朱夏芳.基于工业工程的轮胎生产过程的研究[D].同济大学,2007.
- [11]金佳佳.基于生命周期评价方法的再生胶生产过程评价[D].浙江大学,2014.
- [12]高文廷,杜爱华,辛振祥.国内外再生胶生产研究现状[J].橡塑技术与装备,2012,38(02):31-35.
- [13]司康.绿色轮胎:节能减排的重要选择[J].物流技术与应用(货运车辆),2010(2):60-63.
- [14]李汉堂.绿色轮胎的开发及其发展前景(下)[J].橡塑技术与装备,2007, 33(7):7-15.



INFORMATION AND DYNAMIC

节能信息与动态

虹口区航运办与上海船东协会联合举办节能培训

10月16日,虹口区航运服务办公室与上海市船东协会在北外滩航运服务中心联合举办“航运企业节能降耗专题培训会”。

中船重工(上海)节能科技公司、上海市节能减排中心等单位负责人、专家分别作了专题报告。报告从企业节能减排、新船设计、技术改造、政策扶持等方面作了串联式讲解,帮助船企拓展节能降耗思路,提供了一系列节能解决方案。30余家单位参加培训。(虹口区)