

中国废旧轮胎利用途径的环境影响评价^{*}

李兴福 徐 鹤[#]

(南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘要 运用生命周期评价方法, 比较了中国废旧轮胎 4 种利用途径(常温生产 60 目胶粉、动态脱硫生产再生胶、微负压热裂解、土法炼油)的环境影响。结果表明, 根据环境影响(以生态指数表征), 中国废旧轮胎利用途径的优先度排序为微负压热裂解>常温生产 60 目胶粉>动态脱硫生产再生胶>土法炼油。其中, 前 3 种利用途径产生的环境影响主要是由燃料生产过程产生的间接环境影响构成。

关键词 废旧轮胎 生命周期评价方法 生态指数 间接环境影响

随着我国人民生活水平的提高和公路里程数的增加, 汽车保有量逐年增加, 轮胎产量大幅增长, 在消耗大量橡胶资源的同时, 废旧轮胎的产生量也不断增加。据统计, 2001 年我国产生的废旧轮胎约 0.5 亿条, 2006 年跃升到 1.5 亿条^[1]。2010 年, 我国废旧轮胎将超过 2 亿条, 如何妥善处理数量庞大的废旧轮胎已经成为非常紧迫的环境问题和社会问题。

废旧轮胎是有高再生价值的产品类废弃物, 具备环境污染潜在性和资源性的双重性质。目前, 我国关于废旧轮胎问题的研究还处于起步阶段, 有关废旧轮胎回收利用的研究主要集中在旧轮胎翻新^[2]、废轮胎资源化技术^[3,4]和回收管理政策方面^[5,6]。由于数据的缺乏, 从整体上对废旧轮胎的各种利用途径进行定量分析的研究很少。笔者将对现有的废旧轮胎处理技术进行分析, 并运用生命周期

评价方法, 比较废旧轮胎 4 种主要利用途径的环境影响, 以期为我国废旧轮胎回收利用行业的发展提供量化的参考。

1 我国废旧轮胎循环利用的主要途径

当前, 我国废旧轮胎主要利用途径的技术特点及发展现状见表 1。其他利用途径还包括原型改制和最终填埋。而焚烧发电等热能利用途径由于设备投资费用较高、灰分较难处理等问题, 目前只在一些发达国家得到应用, 在我国尚无工业化应用。2008 年我国废旧轮胎的产生量约 800 万 t, 其利用结构见图 1。

2 废旧轮胎利用途径的生命周期影响评价

2.1 研究目标与系统边界

以我国常见的废旧轮胎利用途径(常温生产 60

表 1 2008 年我国废旧轮胎主要利用途径的技术特点及发展现状

利用途径	技术特点及发展现状
旧轮胎翻新	指轮胎经局部修补或重新更换胎面胶的加工过程。轮胎一般可进行 2~3 次翻新再利用, 翻新轮胎行驶里程是新轮胎的 80% 以上, 而价格仅为新轮胎的 35%~40%。但由于受检测技术及国内轮胎可翻性限制, 我国轮胎翻新率偏低且主要是载重轮胎, 轿车轮胎翻新率为 0
生产胶粉	通过物理法或化学法将废旧轮胎粉碎或研磨成不同粒径的颗粒。低温冷冻粉碎胶粉技术能耗高, 国内基本采用常温粉碎法。国内胶粉市场不大, 多用于生产再生胶的原料。目前, 胶粉用量最大的是作为改性沥青的原材料之一, 应用在公路工程 and 公用工程方面, 而利用胶粉生产高附加值产品面临技术和经济的双重因素制约
生产再生胶	我国是世界上最大的再生胶生产国。废轮胎经过物理化学过程, 使其高弹性状态变成具有可塑性和粘弹性的并能够硫化的再生橡胶。我国橡胶资源 65% 以上依赖进口, 再生胶可以代替部分橡胶生产橡胶制品, 因而有着巨大的市场需求。目前, 我国生产的再生胶 90% 以上采用国内自主研发的废橡胶动态脱硫新技术, 基本淘汰了能耗高、污染大的油法和水油法。但工艺流程长、能耗较高及再生胶产品质量低仍是该利用途径面临的主要问题
热裂解	轮胎经过多次翻新再制造使其不能作为生产胶粉和再生胶的, 可用热裂解实现废轮胎的“吃干榨尽”。热裂解产物有燃料油、可燃气体、钢丝和炭黑等。但热裂解和尾气处理设备投资成本高, 炭黑、燃料油等热裂解产物价值低, 目前在国内利用的比例不高。近年来, 废轮胎热裂解发展很快, 不久有望成为废旧轮胎循环利用的主要方法
土法炼油	民间通过简单的罐或土窑炉, 采用不完全燃烧的方法将废轮胎烧融炼制油质极差的“轮胎油”并非非法掺入到成品油中, 严重扰乱我国油品市场。土法炼油生产工艺简单、投入低、利润高, 但生产过程中产生的大量有害气体和废渣严重污染大气和土壤, 是国家明令禁止和严厉打击取缔的对象之一。2005 年, 用于土法炼油的废轮胎高达 174 万 t ^[7]

第一作者: 李兴福, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 主要从事生命周期影响评价研究。[#] 通讯作者。

^{*} 天津市科技支撑项目 (No. 09ZCGHHZ00700)。

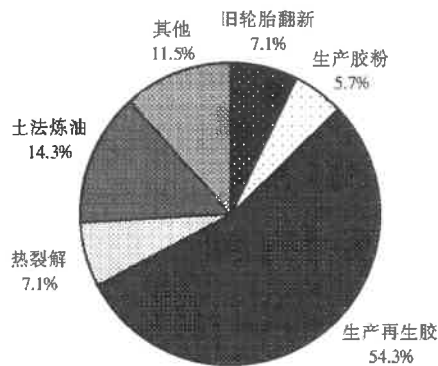


图 1 2008 年我国废旧轮胎利用结构

目胶粉、动态脱硫生产再生胶、微负压热裂解和土法炼油)为研究对象,建立生命周期清单并评价其环境影响。功能单位选取 1 000 kg 废旧轮胎。由于是对比研究,评价过程只考虑 4 种利用途径的差异部分,不包括废旧轮胎回收、运输及处理后最终固体废弃物填埋等过程。废旧轮胎的 4 种利用途径系统边界见图 2。

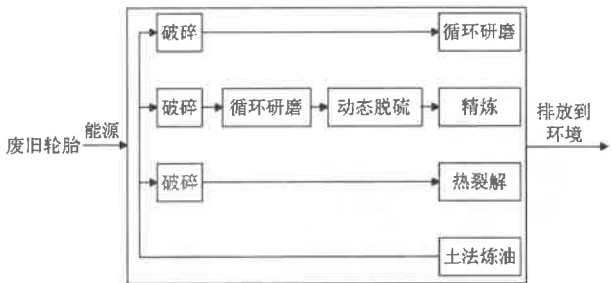


图 2 废旧轮胎 4 种利用途径的系统边界

2.2 数据来源

由于废旧轮胎循环利用企业统计数据的欠缺,研究仅考虑每种利用途径总计的数据,不分工序进行统计。数据来源主要包括:

(1) 常温生产 60 目胶粉、动态脱硫生产再生胶和微负压热裂解 3 种利用途径清单数据主要来源于国内典型企业的实际生产和设计数据,同时参考了《第一次全国污染源普查工业源产排污系数手册》和国内相关大气污染物排放标准。部分数据根据废旧轮胎处理行业的平均情况和专家意见有所调整,如电力消耗采用“十一五”期间该行业平均水平(见表 2)。

(2) 土法炼油属于非法利用途径,很难获取具体的排放数据。由于其利用方式类似于热裂解(只是热裂解效率和污染控制不同),因此参考张志霄等^[8]研究回转窑中试热裂解(600 ℃)废轮胎的实验数据。同时,土法炼油环境排放还包括了不加任何控制措施下的燃煤排放。

(3) 从公开文献中获取数据,如电力生产数据参考文献^[9]。

2.3 清单分析

4 种利用途径过程输入输出清单见表 2(以处理 1 000 kg 废旧轮胎计),消耗能源主要为电、煤、水,环境排放主要为废气排放,土法炼油工艺还考虑了炼油废渣对土壤的污染。

表 2 4 种利用途径过程输入输出清单

项目		常温生产 60 目胶粉	动态脱硫生产再生胶	微负压热裂解	土法炼油
消耗能源	电/(kW·h)	390	800	200	
	煤/kg		80		150 ¹⁾
	水/kg	150	450	90	
	CO ₂ /kg		170.4	8.98	328
	CO/kg		0.21		4.86
	CH ₄ /kg				18.12
	碳氢化合物/kg		0.014		0.027
废气排放的污染物	SO ₂ /kg		0.72	3.55	13.08
	NO _x /kg		0.38	1.41	2.48
	H ₂ S/mg		0.18		
	烟尘/kg		0.16	0.31	4.24
	粉尘/kg	0.29	0.19	0.27	1.78
	非甲烷总烃/kg		0.76		67.64
	苯/kg				0.84
排入土壤的污染物	苯系物/kg				7.65
	多环芳香烃/kg				9.80
	Zn/kg				19.14
	Fe/kg				10.20
	Ca/kg				7.99
	Cu/g				759
	Al/g				363

注:1) 燃煤 150 kg 可炼制 0.33 t“轮胎油”。

表3 环境影响类型及对应环境负荷项目¹⁾

环境影响类型	主要环境负荷项目	单位
酸化和富营养化	NO _x 、SO ₂	PDF · m ² · a/kg
生态毒性	重金属、芳烃	PDF · m ² · a/kg
致癌效应	重金属(镉、镍、砷)、芳烃	DALY/kg
气候变化	CO ₂ 、非甲烷挥发性有机物(NMVOC)、CH ₄	DALY/kg
呼吸系统影响(无机物)	烟尘、粉尘、NO _x 、SO ₂	DALY/kg
呼吸系统影响(有机物)	非甲烷总烃、NMVOC、CH ₄ 、碳氢化合物	DALY/kg
化石燃料使用	原煤、原油、天然气	MJ/kg

注: ¹⁾物种消失潜能(PDF)表示在单位时间(年)、单位面积内环境负荷引起的物种减少值;失能调整生命年(DALY)表示因伤残疾所造成的生命减少年数。

表4 废旧轮胎4种利用途径的环境影响比较

项目	常温生产60目胶粉		动态脱硫生产再生胶		微负压热裂解		土法炼油	
	工艺过程	燃料生产过程	工艺过程	燃料生产过程	工艺过程	燃料生产过程	工艺过程	燃料生产过程
酸化和富营养化	0	1.359 0	0.230 0	2.788 0	0.913 0	0.697 0	2.164 0	0.003 0
生态毒性	0	0.375 0	0	0.769 0	0	0.192 0	4.577 0	0
致癌效应	0	0.418 0	0	0.857 0	0	0.214 0	25.381 0	0
气候变化	0	2.182 0	0.929 0	4.563 0	0.049 0	1.119 0	3.862 0	0.165 0
呼吸系统影响(无机物)	0.833 0	29.209 0	4.011 0	60.137 0	11.320 0	14.979 0	70.583 0	0.414 0
呼吸系统影响(有机物)	0	0.005 0	0.000 2	0.010 0	0	0.002 0	1.472 0	0.000 5
化石燃料使用	0	2.392 0	0	5.699 0	0	1.226 0	0	1.488 0
总计	0.833 0	35.940 0	5.170 2	74.823 0	12.282 0	18.429 0	108.039 0	2.070 5

由表2可知,每处理1 000 kg废旧轮胎,常温生产60目胶粉工艺和微负压热裂解工艺分别需耗电390、200 kW·h。而动态脱硫生产再生胶工艺流程长,脱硫后的胶粉经过精炼工段(包括捏炼、滤胶、回炼、精炼和出片5个工序)后才能成为再生胶成品,消耗了大量的电和煤。废旧轮胎在热裂解过程中会放出大量的热,因此热裂解本身并不需要太多的能量供给,但由于土法炼油的炼油设备简陋,燃烧温度不稳定,造成燃煤效率低,平均每炼制约1 t“轮胎油”大概需消耗燃煤约450 kg。对于环境排放,常温生产60目胶粉工艺本身仅有少量粉尘排出。动态脱硫生产再生胶工艺的环境排放主要由对脱硫罐加热的燃煤蒸汽锅炉排放和脱硫罐尾气排放2部分组成。脱硫尾气净化技术日趋成熟,包括物理法^[10]和生物法^[11],经处理后苯和苯系物基本去除,仅有极少量SO₂、NO_x、H₂S和非甲烷总烃等排放。但目前对精炼过程中逸散的非甲烷总烃的控制措施很少。微负压热裂解工艺主要环境排放为SO₂和NO_x,分别为3.55、1.41 kg。土法炼油工艺由于没有对燃煤气体、热裂解气体和热裂解残渣进行任何控制措施,各项污染物排放量均很高。

3 环境影响评价与结果分析

采用生命周期评价软件GaBi 4.3提供的Eco-indicator 99评价方法对废旧轮胎常见利用途径的环境影响进行评价。具体步骤包括分类和特征化、标准化和加权评估。本研究主要考虑7种环境影响类型(见表3),其他环境影响类型如土地占用、土地流转、臭氧层破坏和辐射影响等暂不予考虑。尽管工艺过程中会产生造成这些环境影响类型的物质,但这些物质含量低、不易监测并对评价结果准确性影响较小而未列入排放清单中。同时,各环境影响类型的标准化基准值和权重值均采用Eco-indicator 99中的系数值,这在一定程度上影响了评价结果的全面性和精确性。但由于本研究是对4种利用途径的比较分析,参考统一标准对最终分析结果的影响不大。评价得到的最终环境影响包括2大类:直接环境影响(工艺过程产生的环境影响)和间接环境影响(燃料生产过程产生的环境影响)。环境影响以生态指数表征,生态指数越大,表明环境影响越严重(见表4)。

从环境影响看,土法炼油工艺的总环境影响值最大,其次是动态脱硫生产再生胶工艺、常温生产

60目胶粉工艺,微负压热裂解工艺的总环境影响潜值最小。土法炼油工艺的设备简陋且缺乏环保控制措施,直接外排的燃煤烟尘、热裂解产生的气体(非甲烷总烃、温室气体和 SO_2)、炭黑尘和废油渣对附近的村民和农作物都会产生严重的危害。动态脱硫生产再生胶工艺的总环境影响潜值分别是常温生产60目胶粉工艺和微负压热裂解工艺的2倍以上,主要原因是该工艺流程长,消耗了大量能源。因此,尽管污染物排放低于国家排放标准,但高能耗造成了巨大的间接环境影响(燃料生产过程),占该处理工艺总环境影响潜值的94%。常温生产60目胶粉工艺过程仅有少量粉尘排放,其环境影响也主要是燃料生产过程造成的。微负压热裂解工艺采用部分裂解气体和裂解油作为燃料加热裂解炉,节省了电力的使用,因此其环境影响相对较小。但微负压热裂解工艺过程污染物排放较大,应加强尾气排放的控制和粉尘的收集。

从环境影响类别来看,主要是呼吸系统影响(无机物)。根据表3分析的环境负荷项目,这主要是由工艺过程和燃料生产过程排放的烟尘、粉尘、 NO_x 和 SO_2 造成的。排放的 NO_x 和 SO_2 同时也带来了酸化和富营养化。生态毒性环境影响主要是因为燃料生产过程中向大气排放的重金属和土法炼油向附近土壤排放的含大量芳烃和重金属的废油渣。除土法炼油工艺外,各废旧轮胎利用途径的环境影响类别——致癌效应和呼吸系统影响(有机物)分别是因为燃料生产过程中排放的镉、镍、砷等重金属和NMVOC造成的。燃料生产过程和使用燃煤排放的温室气体(CO_2 、NMVOC、碳氢化合物)是造成气候变化的主要原因。

4 结论与展望

(1) 微负压热裂解工艺的总环境影响潜值最小,动态脱硫生产再生胶工艺、常温生产60目胶粉工艺次之。非法利用废旧轮胎炼油由于缺乏污染排放控制措施对环境影响最大,这也是国家明令禁止和严厉打击取缔的原因之一。

(2) 3种合法的废旧轮胎利用途径产生的环境影响,主要是由间接环境影响构成,即燃料生产过程产生的环境影响。因此,在不断改进污染物排放控制技术的同时,还应提高燃料利用效率,降低能耗。

(3) 考虑到数据可获性,废旧轮胎回收、运输和处理后最终固体废弃物的填埋过程都没有在考虑的系统边界内,同时各环境影响类别的标准化基准值和权重值均采用Eco-indicator 99中的系数值,这在一定程度上影响了评价结果的全面性和精确性。但由于本研究是对4种利用途径的比较分析,参考统一标准对最终分析结果的解释影响不大。

(4) 研究只是对评价对象在生态环境、人体健康、资源消耗等方面反映该对象系统边界的环境影响,并不涉及经济或社会因素,也不考虑产品质量、经济成本、市场需求等。例如:微负压热裂解工艺虽然环境影响很小,但热解设备投资高,热解产品市场需求不稳定,尤其是炭黑产品的价格和质量紧密相关;相反,尽管动态脱硫生产再生胶工艺的能耗高,但先进、有效的尾气处理技术和国内外市场对再生胶的高需求使得再生胶产量在国内废旧轮胎产品中一直占据统治地位。因此,对评价对象在整个生命周期的环境影响、经济效益进行全面综合的分析,是将来进一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 刘长. 中国轮胎资源循环利用行业发展及政策导向[J]. 橡塑技术与装备, 2008, 34(3): 5-15.
- [2] 程源. 轮胎翻新企业的生存与持续发展——轮胎循环利用高值化与创新开发[J]. 橡胶科技市场, 2008(9): 26-28.
- [3] 曹庆鑫. 亲历“动态脱硫”会战展望行业协会发展[J]. 中国橡胶, 2005, 21(15): 15-17.
- [4] 张志霄, 池涌, 阎大海, 等. 废轮胎回转窑中试热解产物特性[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(5): 715-722.
- [5] 朱坦, 金国平, 刘长. 我国废旧轮胎循环利用行业的发展情况及建议[J]. 环境保护, 2008(20): 12-15.
- [6] 钱伯章. 废旧轮胎回收利用的现状与进展[J]. 现代橡胶技术, 2008, 34(4): 8-14.
- [7] 庞谢华. 利用废轮胎非法炼油是环境污染的高增长源[J]. 资源再生, 2007(1): 16-17.
- [8] 张志霄, 池涌, 高雅丽, 等. 废轮胎热解油的成分分析及二次热解反应[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 159-162.
- [9] DI Xianghua, NIE Zuoren, YUAN Baorong, et al. Life cycle inventory for electricity generation in China[J]. Int. J. LCA, 2007, 12(4): 217-224.
- [10] 郭言. 再生胶生产工艺尾气净化技术和装置[J]. 中国橡胶, 2003, 19(17): 22.
- [11] 孙佩石, 杨显万, 黄若华, 等. 生物法净化再生胶生产废气工业试验研究[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(1): 8-12.

编辑: 贺锋萍 (修改稿收到日期: 2010-08-12)