

我国废旧电冰箱聚氨酯泡沫塑料管理现状及对策研究

李金惠^{1*},董庆银¹,姚志通²,刘丽丽¹ (1.清华大学环境学院,北京 100084; 2.杭州电子科技大学材料与环境工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要: 随着科技进步和电冰箱产品更新换代速度的加快,报废电冰箱数量不断增大.冰箱拆解处理产生的大量聚氨酯泡沫塑料,由于其中含有 CFCs 类发泡剂且其难以降解等,增加了处理难度,如何对其进行有效处理处置成为国内外广泛关注的焦点.目前我国废弃电冰箱聚氨酯泡沫塑料一般送至生活垃圾处理厂进行焚烧或填埋处置,而未进行资源化利用.在调研电冰箱聚氨酯泡沫塑料国内外现有处理处置技术基础上,比较了热能回收法、物理法、化学法、生物法和热解法等处理技术的优缺点,并对其经济性和实用性进行分析.同时分析了我国废旧电冰箱聚氨酯泡沫塑料环境管理面临的主要问题,结合国家相关管理政策需求,提出了针对性建议.

关键词: 冰箱; 聚氨酯泡沫塑料; 管理; 对策

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2013)12-2262-06

Study on the management status and countermeasures for waste polyurethane foam from refrigerators in China. LI Jin-hui^{1*}, DONG Qing-yin¹, YAO Zhi-tong², LIU Li-li¹ (1.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.College of Materials and Environmental Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China). *China Environmental Science*, 2013,33(12): 2262~2267

Abstract: The amount of waste refrigerators has been increased gradually with the scientific and technological progress and accelerated rate of replacement products. A large amount of polyurethane foam generated from dismantling of refrigerators, are difficult to be degraded owing to many CFCs containing. How to effectively treat and dispose the polyurethane foam has become the global concern. While in China, the polyurethane foam generated are usually landfilled or incinerated rather than comprehensively utilized. Based on investigation for the amount of polyurethane foam generation and disposal techniques, this paper has made a comparison of five different types of treatment technologies, including thermal recovery method, physical method, chemical method, biological method and pyrolysis method, and analyzed their economy and practicability. Meanwhile, combined with the relevant state policy requirements, the paper analyzed main problems faced by the management on polyurethane foam and provides specific suggestions.

Key words: refrigerator; polyurethane foam; management; countermeasures

目前我国已进入废旧家电报废高峰期,截至 2011 年底,我国电冰箱的社会保有量约 3 亿台,以年报废率 3%进行估算,每年废弃冰箱就高达近千万台;加之高新技术的不断更新应用,冰箱产品的更新换代周期将大大缩短.传统电冰箱绝热材料普遍采用的是以聚氨酯为基体、氯氟烃(CFCs)为发泡剂制成的硬质泡沫塑料.聚氨酯泡沫塑料一般占冰箱总重量的 10%,CFCs 又占聚氨酯泡沫塑料重量的 14%左右^[1].根据清华大学^[2]相关研究,以 2011 年报废电冰箱估算值 1280 万台,每台冰箱含聚氨酯泡沫塑料 6.36kg 进行测算,2011 年废旧冰箱聚氨酯泡沫塑料产生量约

8.14 万 t.

1 国内外聚氨酯泡沫塑料的处理处置现状

由于电冰箱中聚氨酯泡沫塑料与部分塑料、金属材料连成一体,用手工拆解无法实现彻底分离.实际操作过程中,通常是先采用破碎技术对箱体进行整体粉碎.为防止 CFCs 发泡剂泄露到大气中,冰箱主体应送入密闭系统进行负压整体破碎,然后再使用分选装置将聚氨酯泡沫塑料与其

收稿日期: 2013-04-17

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201109035)

* 责任作者, 教授, jinhui@tsinghua.edu.cn

他材料进行分离,破碎过程中所逸出的 CFC-11 发泡剂,经过滤、分离,活性炭吸附后解吸、液化贮存,最后送至具危险废物处理资质的企业焚烧处理.目前国内部分企业已具备用于处理 CFCs 类有机废气的活性炭吸附回收设备的生产能力;中小企业由于不具有密闭设备系统,对于废电冰箱中含泡沫材料的箱门、箱体等部件用直接切割、拆解的方法将钢板包覆层剥下再利用,聚氨酯泡沫塑料再去处理.这种做法在切割和分拆钢板与泡沫层时,拆开部位的 CFCs 会泄露到大气中,对大气层会造成破坏,造成环境影响.Stratford^[3]对冰箱破碎过程中 CFCs 的释放进行了研究,结果表明聚氨酯泡沫塑料中 60%~70%的 CFCs 以气相形式存在,30%~40%以液相形式存在,溶解部分在冰箱破碎过程中很难释放出来.杨勇等^[4]研究表明,当聚氨酯泡沫塑料(PUR)破碎粒径<0.5mm 时,颗粒中的泡孔完全被打开,可认为颗粒中包裹的以气态形式存在的 CFC-11 量与破碎过程释放的量相等,这部分 CFC-11 量约占 PUR 中 CFC-11 总量的 75.16%,其余部分为 PUR 吸附的 CFC-11,约占总量的 24.84%.加热后 4 种粒径 PUR 颗粒的 CFC-11 吸附量以<8.0mm 为最大,占 CFC-11 总量的 1.03%,并且短期内很难释放出来.刘景洋等^[5]对冰箱箱体切割过程、金属板剥离过程和 PUR 破

碎后常温放置时的 CFC-11 释放量进行了测定.结果显示,箱体切割和金属板剥离过程中 CFC-11 的释放量分别占 PUR 中 CFC-11 总量的 0.75%和 2.32%.随着放置时间的延长, CFC-11 释放速度减缓.放置第 15d 时,<0.5、<1.0、<4.0、<8.0mm 4 种粒径的颗粒中 CFC-11 累计释放量均高于箱体切割和金属板剥离过程中的 CFC-11 释放量.研究认为,箱体切割和金属板剥离过程中释放的 CFC-11 主要源于 PUR 中包裹的以气态形式存在的 CFC-11.粒径≥1.0mm 的 PUR 颗粒仍有部分泡孔没被打开,放置时释放的 CFC-11 不仅源于其吸附的 CFC-11,还有包裹在 PUR 泡孔中的穿透泡孔壁而释放的 CFC-11.粒径<0.5mm 的 PUR 颗粒中的泡孔完全被打开,释放的 CFC-11 主要源于 PUR 的吸附.

美国、日本等发达国家早在 20 世纪 70、80 年代就开始针对聚氨酯泡沫塑料的回收处理进行研究.20 世纪 50 年代末我国聚氨酯工业才开始起步,废弃聚氨酯对环境造成的压力不太明显,聚氨酯泡沫塑料的回收利用研究也还处于起步阶段,部分高等院校和科研院所对聚氨酯泡沫塑料的回收利用进行了探索性研究.目前国内外关于聚氨酯泡沫塑料的处理处置方法主要有热能回收法、物理法、化学法和生物法等^[6]等,各种方法的优缺点见表 1.

表 1 聚氨酯泡沫塑料处理处置方法优缺点分析

Table 1 Analysis on the treatment and disposal technologies for polyurethane foam of their advantages and disadvantages

处理方法	优点	缺点
热能回收法	具有显著减容效果,可回收利用热能	不完全燃烧时易造成二次污染
物理法	可直接利用废物,资源化利用率高	再生产品的实际应用效果还有待考察
化学法	可提供再生原料等,资源化利用率高	前期投入相对较高,工业化应用还有待推进
生物法	对环境产生的影响较小,前期投入相对较少	选择性较高,处理能力有限
热解法	回收热解油或热解气	目前以实验室小规模研究为主,缺乏大规模工业化应用

1.1 热能回收法

热能回收法即通过焚烧聚氨酯泡沫塑料从中回收热能.聚氨酯在空气中完全燃烧时能释放大 量热能(25~28MJ/kg),与其他废物混合燃烧时可取代部分燃料;但是不完全燃烧会产生有毒有

害气体,造成二次污染.Chambers 等^[7]对 ¹³C 标记的 MDI 基聚氨酯高温分解产物进行了分析检测,发现 HCN 和腈类物质.该方法具有操作简单,减容效果显著等优点,目前国内废电冰箱处理企业将拆解产生的聚氨酯泡沫塑料运送至生活垃圾

处理厂,利用该方法进行处理。

1.2 物理法

物理法是在不破坏聚氨酯泡沫塑料化学结构和不改变其组成的前提下,将其粉碎后利用黏结、热压、挤出等方法制成再生品。物理法主要包括黏结成型、热压成型、挤出成型和用作填料等,其中以黏结成型为主。Bom^[8]采用单螺杆挤出机制备了不同 PUR 含量的 ABS/PUR 复合材料,并对其力学性能进行了研究。复合材料弹性模量与 PUR 含量成线性增长,最大张力随 PUR 含量增大而减小。基于复合材料的力学性能和流动特性,利用聚氨酯泡沫塑料制备不同类型的复合材料是可行的。Zhang 等^[9]在挤出机中利用二乙醇胺对聚氨酯进行预处理,然后采用熔融共混法制备了再生 PU/PP 复合材料,并对其力学性能和热稳定性进行了研究。结果表明,再生 PU 可作为 PP 的增塑剂,对其热稳定性无显著影响。江博新等^[10]向粉碎后的聚氨酯泡沫塑料中加入黏合剂,热压固化制成保温材料。江苏省物资再生利用研究所 2005~2006 年承担的江苏省技术开发重大产业化项目《废家用电器回收利用技术研究及工程化应用》也成功开发了利用聚氨酯泡沫塑料制备隔热保温板的新工艺^[11]。Gutiérrez-González 等^[12]研究了聚氨酯泡沫塑料不同掺入量和颗粒粒径对灰泥性能和热行为的影响。结果显示,随着聚氨酯掺入量的增大,灰泥密度和力学性能有所下降,热阻反而升高,聚氨酯泡沫塑料可以替代传统材料用来制备轻质灰泥。采用物理法回收聚氨酯泡沫塑料生产填料和强度要求不高的建材产品,不需采用复杂的生产设备,操作工艺和生产条件要求不高,具有一定的实用性和经济性。

1.3 化学法

化学法是利用聚氨酯聚合反应的可逆性,在化学降解剂的作用下将高分子聚氨酯解聚为具有反应活性的低聚物,为生产新的聚氨酯产品提供原料。根据降解剂和反应条件的不同,可分为水解法、醇解法、碱解法、加氢裂解和氨解等^[13]。其中,醇解法研究较多,适于多种不同类型的聚氨酯泡沫塑料,且反应在中低温度下即可完成。醇解法一般生成多元醇混合物,通常选用 1,4-丁二醇

为主醇解剂,碱金属氢氧化物为助醇解剂,但多元醇对钾钠离子较为敏感。Campbell 等^[14]在 232~316℃使用过热水蒸汽对聚氨酯泡沫塑料进行降解,可回收 40%~55%的多元醇,回收的多元醇可掺和 20%左右的新品多元醇混合使用。王西峰等^[15]采用超临界水对聚氨酯氧化分解后收集二元胺和多元醇混合物,考察了原料配比、反应温度和时间对降解反应的影响。研究确定的适宜反应条件为温度 280~300℃,原料配比 3:1,反应时间 1~1.5h,油品收率 90%以上。朱萍等^[16]以二元醇为醇解剂对聚氨酯泡沫塑料进行醇解得到多元醇,将其与新鲜组合聚醚多元醇混合后,再与异氰酸酯反应合成新的硬质聚氨酯。郭双华^[17]采用醇-磷酸酯法降解聚氨酯泡沫塑料,降解产物作为发泡原料制备新的聚氨酯泡沫塑料。结果表明,以一缩二乙二醇和磷酸三正丁酯作为降解剂可得到羟值为 102~110mgKOH/g 的聚醚多元醇,回收率达 80%以上。新制备的聚氨酯力学性能分析表明,降解产物替代部分原料对聚氨酯泡沫塑料的力学性能影响不大。张良^[18]以 1,4-丁二醇为主醇解剂,自制的磁性固体催化剂 $\text{CaO/MgO/SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 为助醇解剂对聚氨酯泡沫塑料进行醇解。在催化剂用量为醇解剂 0.12(质量百分比),聚氨酯:醇解剂=1:1(质量比)的条件下得到多元醇和多元胺混合物。电冰箱生产企业目前尚未开展聚氨酯泡沫塑料的再生利用工作,一方面是由于冰箱用聚氨酯泡沫塑料生产原料来源相对广泛、生产工艺相对简单,另一方面是生产过程对生产原料的纯度要求较高。利用聚氨酯泡沫塑料进行化学分解回收的多元醇种类较多,需进行提纯,工艺繁琐,加之醇解需要较高的温度(200℃以上)和压力(20MPa 左右),设备投资和日常运行成本较大,经济性不高。

1.4 生物法

生物法是利用环境中的微生物使聚氨酯泡沫塑料发生水解和氧化等反应,分子链断裂,形成低分子量的碎片,经微生物吸收、消化和代谢形成 CO_2 、 H_2O 等,最终达到降解目的^[19]。程玲等^[20]将可生物降解链段嵌入聚氨酯链段中制备了聚醚碳酸酯型聚氨酯泡沫塑料材料,并采用土埋法

考察了聚氨酯泡沫塑料的生物降解性能.实验结果表明,与普通聚醚多元醇制备的聚氨酯泡沫塑料材料相比,碳酸酯型聚氨酯泡沫塑料具有更好的生物降解性.Shah 等^[21]从土壤分离出铜绿假单胞菌 MZA-85,并对聚酯型聚氨酯的降解性能进行了研究.结果显示,聚氨酯泡沫塑料经微生物降解后,微观形貌发生了显著变化,有机酸官能团增加,酯基官能团减少.GPC 分析显示,长链聚氨酯降解为短链.MZA-85 不仅能有效降解聚酯二醇,产生 1,4-丁二醇和己二酸,而且能够利用降解产物作为碳源对聚氨酯泡沫塑料进行矿化.生物法的选择性较强,微生物筛选和培养过程各项条件要求较高,直接采用生物法回收聚氨酯泡沫塑料实用性较低.

1.5 热解法

基于火灾危险性分析和火灾预防,有学者对聚氨酯泡沫塑料的热分解特性进行了研究.Valencia 等^[22]利用 FTIR、FID 和 ND-IR 等手段研究了聚氨酯泡沫塑料燃烧过程中气体产物的释放特征,检出的 22 种气体产物主要为 CO₂、CO、H₂O、NO.研究显示,聚氨酯泡沫塑料的热分解大致可分为 2 个阶段,第 1 阶段聚氨酯分子分解释放出异氰酸盐,第 2 阶段多元醇燃烧生成水.Font 等^[23]研究了 N₂ 气氛下聚氨酯泡沫塑料的热解特性,热解产物含有苯、甲烷、乙烯,还检出 HCN 和氨.李响^[24]选用 4 种不同的升温速率(5、10、15、20℃/min)对硬质聚氨酯进行热解.聚氨酯发生热解的温度范围为 200~410℃,随着升温速率的升高,固体和气体产物都相应增加,液体产物呈减少趋势.热解油中检出苯、苯胺、对甲苯胺等 5 种化学成分.沈阳^[25]也采用热重法研究了不同升温速率下硬质聚氨酯泡沫塑料的热失重行为,并根据 Kissinger 法计算了反应动力学参数.元延军等^[26]在空气和氮气气氛下对硬质聚氨酯泡沫塑料进行热重分析,利用 Flynn-Wall-Ozawa 转化率法和非线性多参数回归法计算热动力学参数,并对聚氨酯硬泡在不同温度下的寿命进行了预测.结果表明,聚氨酯硬泡的寿命对温度较为敏感,同时受分解气氛等因素影响.李旭华等^[27-28]利用热重分析仪和管式炉研究了聚氨酯

泡沫塑料的热解特性及热解产物,气质联用检测结果显示,热解产物复杂,热解油含有苯胺、p-苯胺、苯甲腈等多种芳香类化合物,热解气以低碳的烷烃和烯烃为主,还检出氯代甲烷、一氟三氯甲烷和二氯甲烷等氯代有机物.热解法与化学法类似,聚氨酯泡沫塑料热解产生种类较多的有机物,难以一次性利用,而且会产生一定的环境污染,实用性不高.

2 聚氨酯泡沫塑料管理面临的问题

2.1 部分企业对于聚氨酯泡沫塑料进行不规范处理

根据《废弃电器电子产品处理资格审查和许可指南》(简称《许可指南》)^[29]要求,废弃电冰箱处理企业采用粉碎、分选方法处理废弃电冰箱保温层时,应具有专用负压密闭设备及聚氨酯泡沫塑料减容设备.《废弃电器电子产品处理污染控制技术规格》^[30]、《废电器电子产品回收利用通用技术要求》^[31]中,对于冰箱的保温层材料的处理没有具体统一的技术规定和指导,但规定应该在专用的负压密闭设备中进行粉碎和分选,并采取必要的防爆、防泄漏、阻燃措施,将释放出的 CFC11 统一收集、冷凝,以液态形式回收^[32].截至 2013 年 2 月,共有 2 批共计 64 家废弃电器电子产品处理企业纳入废弃电器电子产品处理基金补贴范围,大多数处理企业具有完善的电冰箱处理生产线.但由于废弃电冰箱处理设备和技术条件复杂,成本较高,不具备相应设备和技术条件的企业在手工拆解电冰箱过程中,不规范的操作可能导致 CFCs 等发泡剂释放,会对大气环境造成不利影响.企业采用专用设备将聚氨酯泡沫塑料进行减容处理后,均将其送至生活垃圾处理厂进行焚烧或填埋,国内尚无废电冰箱处理企业进行聚氨酯泡沫塑料的资源化利用.

3.2 聚氨酯泡沫塑料处理缺乏有效的利用技术,资源化技术亟待开发应用

目前国内外有部分聚氨酯泡沫塑料再生利用的专利和研究,但是其回收利用尚未实现规模化和工业化,无成熟的资源化技术,大都处于实验室研究阶段,无法得到高附加值的再生产品.同时,

由于冰箱用聚氨酯泡沫塑料生产原料成本较低、工艺较简单,很少有冰箱生产企业对聚氨酯泡沫塑料回收利用进行研究。

《废弃电器电子产品处理企业资格审查和许可指南》^[29]规定,电冰箱保温层材料作为一般工业固体废物,应当送至生活垃圾处理设施填埋或焚烧,或以其他环境无害化的方式利用处置,禁止随意丢弃。冰箱保温层材料的各种处理技术都有其特定的优缺点,由于技术、设备等前期成本投入较高、资源化前景和市场不明,大部分企业仍选择将聚氨酯泡沫塑料堆存,最后运送至生活垃圾处理设施进行处置,进而造成资源的浪费,亟待实现资源化利用的产业化。

3 对策与建议

3.1 加强废弃电冰箱回收处理管理

各地环境保护部门应根据《废弃电器电子产品处理企业建立数据信息管理系统及报送信息指南》的规定,追踪和掌握废弃电冰箱的处理动态,监管聚氨酯泡沫塑料的流向和处理处置活动。对不具备负压密闭整体破碎设备的企业,建议其将含有聚氨酯泡沫塑料的箱体和箱门集中送往具有负压封闭整体破碎设备和技术条件的企业进行处理,确保发泡剂充分回收,减少其释放对环境带来的影响。同时,由于新型发泡剂如环戊烷在冰箱中的使用率越来越高,且属于可燃物、容易爆炸,拆解企业应针对其在回收处理过程中的易燃易爆问题进行前瞻研究,借鉴冰箱生产过程中环戊烷发泡的安全措施,在操作区域设置戊烷实时监测报警系统和良好的排气通风设施,加强安全隐患的排查。

3.2 鼓励研发聚氨酯泡沫塑料资源化利用技术和相关设备

国家和地方资源综合利用主管部门应推动开展聚氨酯泡沫塑料资源化利用技术研究,推荐聚氨酯泡沫塑料回收处理最佳可行技术,使企业能选择适宜的处理技术进行回收处理,避免处理过程中产生环境污染及资源浪费。政府和相关部门出台相应的优惠和税收减免政策,鼓励废弃电器电子产品拆解企业开展聚氨酯泡沫塑料资源

化利用技术和设备研究及环境友好产品研究,促进资源再生利用,创造良好的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 胡 彪,李 健.R11 发泡的聚氨酯硬泡沫废弃物环保处理工艺[J]. 中国资源综合利用, 2007,25(6):17-21.
- [2] Zhao Xiangyang, Duan Huabo, Li Jinhui. An evaluation on the environmental consequences of residual CFCs from obsolete household refrigerators in China [J]. Waste Management, 2011, 31(3):555-560.
- [3] Stratford D J. Cutting of fridges: estimating CFC releases & recommended best practice [J]. Scottish: Scottish Environment Protection Agency, 2002,1-27.
- [4] 杨 勇,刘景洋,郭玉文,等.废冰箱保温材料低温热解及气体成分分析 [J]. 中国环境科学, 2009,22(3):284-288.
- [5] 刘景洋,段 宁,杨 勇,等.废旧冰箱拆解及聚氨酯泡沫放置的一氟三氯甲烷释放量研究 [J]. 环境污染与防治, 2010,32(7):1-4,19.
- [6] 方 园,赵 新,胡嘉琦,等.废旧冰箱聚氨酯材料的回收利用技术研究 [J]. 日用电器, 2008,11:53-56.
- [7] Chambers J, Jiricny J, Reese C B. The thermal decomposition of polyurethanes and polyisocyanurates [J]. Fire and Materials, 1981,5(4):33-141.
- [8] Bom R P. Alternative of recycling residues of polyurethane rigid foam with ABS [J]. Matéria (Rio J.), 2008,13(2):388-397.
- [9] Zhang Shuling, Zhang Zhenxiu, Kim Jin Kuk. Influence of regenerated PU on mechanical properties and thermal stability of PP [J]. Materials Letters, 2008,62(10-11):1532-1534.
- [10] 江博新,薛红伟.硬质聚氨酯泡沫废料再生板材的技术研究 [C]. 中国聚氨酯工业协会第十三次年会论文集, 2006:215-218.
- [11] 耿 佳,冯 芳,王东田.聚氨酯泡沫在环境领域的应用及其回收处理 [J]. 材料导报, 2012,26(2):78-83.
- [12] Gutiérrez-González S, Gadea J, Rodríguez A, et al. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes [J]. Construction and Building Materials, 2012,28:653-658.
- [13] Al-Salem S M, Lettieri P, Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review [J]. Waste Management, 2009,29(10):2625-2643.
- [14] Campbell Gregory A, Meluch William C. Polyurethane foam recycling. superheated steam hydrolysis [J]. Environmental Science & Technology, 1976,10(2):182-185.
- [15] 王西峰,胡晓莲.超临界水氧化废旧聚氨酯的研究 [J]. 环境工程, 2007,25(5):61-63.
- [16] 朱 萍,章鑫炯,王良友,等.利用废弃冰箱聚氨酯废料重新合成硬质聚氨酯:中国, 201210102206.6[P].2012.04.10.

- [17] 郭双华.醇-磷酸酯法降解废旧聚氨酯的研究 [J]. 安徽化工, 2009,35(3):35-38.
- [18] 张 良.用于聚氨酯醇解的磁性固体碱催化剂 $\text{CaO/MgO/SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ [J]. 广东化工, 2012,39(1):215-216.
- [19] Helou Marion, Carpentiera Jean-François, Guillaume Sophie M. Poly(carbonate-urethane): an isocyanate-free procedure from α,ω -di (cyclic carbonate) telechelic poly(trimethylene carbonate)s [J]. Green Chemistry, 2011,2:266-271.
- [20] 程 玲,周建成,吴东方.基于碳酸乙烯酯开环聚合的生物降解聚氨酯材料制备 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012,42(3): 507-510.
- [21] Shah Ziaullah, Hasan Fariha, Krumholz L, et al. Degradation of polyester polyurethane by newly isolated *Pseudomonas aeruginosa* strain MZA-85 and analysis of degradation products by GC-MS [J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2013,77:114-122.
- [22] Valencia L B, Rogaume T, Guillaume E, et al. Analysis of principal gas products during combustion of polyether polyurethane foam at different irradiance levels [J]. Fire Safety Journal, 2009,44:933-940.
- [23] Font R, Fullana A, Caballero J A, et al. Pyrolysis study of polyurethane [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2001,58-59:63-77.
- [24] 李 响.废塑料硬软聚氨酯热解特性的比较研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [25] 沈 阳.硬质聚氨酯泡沫的热解动力学特性研究 [C]//2012 中国消防协会科学技术年会论文集(下), 2012,243-246.
- [26] 开延军,崔 崑,龚伦伦,等.聚氨酯硬泡外墙保温材料的热稳定性分析 [J]. 安全与环境学报, 2012,12(4):212-216.
- [27] 李旭华,段 宁,刘景洋,等.废聚氨酯的热解及产物分析 [J]. 环境污染与防治, 2009,31(3):6-9,15.
- [28] 李旭华,段 宁,林学钰,等.废旧聚氨酯硬泡热解特性 [J]. 环境科学研究, 2009,22(10):1176-1180.
- [29] 环境保护部.关于发布《废弃电器电子产品处理企业资格审查和许可指南》的公告(2010 年第 90 号公告)[EB/OL]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201012/t20101222_198999.htm
- [30] 环境保护部. 关于发布《废弃电器电子产品处理污染控制技术规范》的公告(2010 年第 1 号公告)[EB/OL]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201001/t20100111_184079.htm
- [31] GB/T 23685-2009 废电器电子产品回收利用通用技术要求 [S].
- [32] 李金惠,程桂石,等.电子废物管理理论与实践 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2010,192.

作者简介: 李金惠(1965-),男,北京人,教授,博士,主要从事固体废物及电子废物管理及处理处置技术研究.发表论文 200 余篇.

人类活动诱发的生态系统崩溃

长期、持久的人类活动干扰改变了生态系统的稳定性和多样性,一方面直接降低了生态系统的功能属性,如抵御入侵,另一方面减少了生态系统高生物多样性所带来的缓冲效应.理论预测表明,环境的改变和多样性的丧失会增加生态系统崩溃的风险,这种生态系统崩溃是突发的并且可能是不可逆的.但是这个理论预测缺少来自自然系统的长期经验证据证实.本研究在 1 个退化的但物种丰富的火成热带草原上论证这种关系.在这片草原上,防火、入侵、营养缺失的综合作用导致其物种贫瘠,但仍然有较强的生产力,能够适应每年的气候变化,抵御入侵,除非火灾再次发生的时候容易迅速崩溃.首先,我们论证了人类活动的干预是如何对生物多样性和生态系统功能带来负面影响的.自 19 世纪中期,防火措施就与植物种类的减少有着密切关系,防火措施使得高产区年产量稳定,并能够抵御入侵,这堪比 1 个管理良好、高产、多样性较低的农业系统.然而,防火措施的管理也有 1 个潜在问题,使生态系统不能够很好地应对突然发生的环境变化,而高生物多样性所带来的缓冲效应会消除这种环境突然变化带来的影响,这就解释了上述说法.当火灾再次来袭时,本地物种较多的草原地区能够坚守,在火烧过之后,该地区一些稀少和以功能性繁殖为主的植物就会迅速生长,以防止包括迅速转换成森林在内的大范围入侵.该研究表明,尽管之前在功能上似乎显得微不足道,但是生物多样性对维持生态系统稳定性十分重要.在全球范围内普遍存在的高强度的土地利用和物种丧失的情况下,这种关系对很多生态系统都适用.