

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.09.018

# 氮气流速对废旧电视电路板热解的影响

曾抗庆<sup>1</sup>,刘承飞<sup>2</sup>,刘大方<sup>2</sup>,张威<sup>1</sup>,辛椿福<sup>1</sup>,夏洪应<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院,昆明 650093;

2. 楚雄滇中有色金属有限责任公司,云南 楚雄 675000)

**摘要:**研究了废旧印刷电视电路板的热解,探索了氮气流速对热解产物产率和成分的影响,并采用SEM、XRF、GC、GC/MS等检测手段对热解产物进行了分析表征。结果表明,液体产率随着氮气流速的增大而减少,气体产率随氮气流速增大呈上升趋势,两者分别在0.3 L/min时达到最小值10.85%和最大值14.4%。Cu、Sn和Ag等金属在固体产物中得到富集,随氮气流速增大而波动,可作为铜冶炼的原材料;H<sub>2</sub>是气体产物中的主要成分,在氮气流速为0.3 L/min时含量最大,达到68.21%,H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>的总含量在80.12%~82.39%,是富氢的优良燃气;液体产物主要产物是苯酚、4-异丙基苯酚等,可作为化工原料。废旧印刷电视电路板热解得到的气、液、固产物可实现综合高效利用。

**关键词:**废旧印刷电视电路板;热解;产率;产物成分;氮气流速

中图分类号:X76

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)09-0111-06

## Effect of Nitrogen Flow Rate on Pyrolysis of Waste TV Circuit Board

ZENG Kang-qing<sup>1</sup>, LIU Cheng-fei<sup>2</sup>, LIU Da-fang<sup>2</sup>,ZHANG Wei<sup>1</sup>, XIN Chun-fu<sup>1</sup>, XIA Hong-ying<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Chuxiong Dianzhong Nonferrous Metals Co., Ltd., Chuxiong 675000, Yunnan, China)

**Abstract:** Conventional pyrolysis of waste printed TV circuit boards was studied. Effect of nitrogen flow rate on yield and composition of pyrolysis products were explored, and pyrolysis products were analyzed and characterized by SEM, XRD, GC, GC/MS and other tests means. The results show that liquid yield decreases with increase of nitrogen flow rate and reaching the minimum value of 10.85% at 0.3 L/min; gas yield rises with increase of nitrogen flow rate and reaching the maximum value of 14.4% at 0.3 L/min. Metals such as Cu, Sn and Ag are enriched in solid product, which fluctuate with increase of nitrogen flow rate, and can be used as raw material for copper smelting. H<sub>2</sub> is main component in gas product, and the maximum content is 68.21% when nitrogen flow rate is 0.3 L/min; the total content of H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> is 80.12%—82.39%, which is a good hydrogen-rich gas. Main liquid products are phenol, 4-isopropylphenol, etc., which can be used as chemical raw materials. The gas, liquid and solid products obtained from pyrolysis of waste printed TV circuit boards can be comprehensively and efficiently utilized.

**Key words:** waste printed TV circuit boards; pyrolysis; product yield; product composition; nitrogen flow rate

收稿日期:2021-04-13

基金项目:云南省万人计划产业技术领军人才计划资助项目(云发改人事[2019]1096号);云南省万人计划青年拔尖人才计划资助项目(云人社发[2018]73号)

作者简介:曾抗庆(1995-),男,江西抚州人,硕士研究生;通信作者:夏洪应(1981-),男,重庆人,博士,教授

废旧印刷电路板组成复杂,种类繁多,主要成分可分为三大类:30%含有卤素阻燃剂的塑料或其他有机高聚物,30%含主要成分为铝、硅氧化物的玻璃纤维和陶瓷以及40%的银、铜、钯等金属材料。废旧印刷电路板中所包含的元素几乎涵盖了整个元素周期表,回收价值很高。随着科技的进步和电子信息行业的快速发展,电子产品的广泛使用和更新速率加快直接导致了废弃电子产品的数量猛增<sup>[1-4]</sup>。废旧印刷电路板如果不妥善处理,其中的有害物质进入自然环境中,将会对地下水、土壤造成严重污染<sup>[5-10]</sup>。近年来,国内外针对废旧印刷电路板的回收研究出了很多回收技术,有物理机械回收技术、焚烧回收技术、微生物处理技术、等离子体熔融气化回收技术以及热解回收技术<sup>[11-13]</sup>。其中热解回收技术是将废旧印刷电路板放置在无氧或缺氧环境下加热,树脂中的化学键断裂,使网状的大分子分解为有机小分子,有机物裂解形成了新的气态产物、液态产物以及固态产物,其中金属可以在固态产物中得到富集,得到的热解渣可制成活性炭投入工业使用,而气态和液态产物经过处理后能够变成燃料和化工原料。

针对废旧印刷电路板的热解,近年来已经有很多学者进行了深入研究。WILLIAMS等<sup>[14]</sup>在氮气气氛下对废旧印刷电路板进行热解试验发现,将玻璃纤维从固体残渣中分离的热解终温需高于500℃,当热解终温高于400℃时,固体残渣中各组分含量相对稳定,热解终温上升,油气比改变,并且热解产物基本不变。针对真空条件下废旧印刷电路板的热解,许鹏等<sup>[15]</sup>研究认为,当热解温度在350~400℃时,热解液和热解气的产生速率相对较快,气体、液体和固体产物的产率分别为8.5%、18.13%和73.37%。LONG等<sup>[16]</sup>把真空热解技术和机械加工的工艺结合从而回收废旧电路板,第一阶段先用固定床反应器对废旧电路板进行热解,得到气体产物和液体产物,第二阶段把固体产物通过机械加工等手段分离和回收固体产物中的金属。DAVID等利用微波加热热解回收废旧电路板。他们把粉碎后的电路板先用低功率加热,有机物全部逸出后,加大热解功率,使热解温度达到1400℃,等冷却后,固体产物中的金属呈现为小球状,从而将它们分离出来<sup>[17]</sup>。王小玲等<sup>[18]</sup>利用惰性气氛热解废旧电路板发现热解过程主要发生在300~380℃,HBr在最大失重处被释放出来,并且废旧电路板的主链断裂是和HBr挥发逸出同时发生的。李飞等<sup>[19]</sup>利

用熔融盐气化炉对废旧印刷电路板进行热解试验时发现,当空气当量为40%时,碳转化率和气体产率分别达到96%和840 mL/g,空气当量比增加,热值下降,在空气当量比为20%时气化效率达到最大值94%。国内对于电路板的热解特性和动力学分析也有很多文章进行报道<sup>[20-22]</sup>,关于热解条件对各热解产物分布的影响,液体、气体产物成分报道较少。

本文主要研究在氮气气氛下对废旧印刷电视电路板进行热解,研究分析氮气流速对热解产物产率及成分的影响,使得废旧电路板热解产物得到综合利用。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

将废旧印刷电视电路板上大的元器件拆除,用马弗炉把电路板板材加热20 min,从室温升至250℃,再通过人工去除针脚和锡,最后把电路板拿出冷却至室温,人工把电路板剪切成1 cm<sup>2</sup>左右,作为试验原材料,简称TXDS,元素分析结果(%):C 18.18、H 2.135、O 7.276、N 0.51、S 0.797、Cu 15.37、Sn 2.60、Ag 0.02、Br 21.37。可以看出,金属Cu、Sn含量很高,有较高的回收价值,但是溴的含量也很高,这是因为电路板是一种环氧树脂玻璃覆铜板(简称绝缘板、环氧树脂板、阻燃板、环氧板等),含溴量高。

### 1.2 试验装置与方 法

热解所使用的设备为额定温度1100℃、额定功率1.5 kW的电阻加热式管式炉,设备连接示意图见图1。试验称取10 g物料,热解温度为500℃,通入氮气(氮气流速分别为0.1、0.2、0.3 L/min),按照程序设置升温至预定温度,保温1 h,使电路板充分热解。

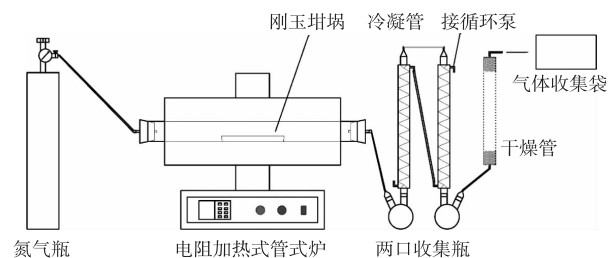


图1 常规热解设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of conventional pyrolysis equipment

### 1.3 产物的表征方 法

#### 1.3.1 热解产物的产率计算

液体产物和固体产物质量通过天平称量获得,

其中固体产物产率和液体产物产率分别定义为固体产物和液体产物质量占原料质量的百分比,气体产物产率通过质量守恒法计算获得<sup>[23]</sup>。

### 1.3.2 气相色谱(GC)分析

气体产物通过气相色谱仪(Trace 1310)进行定性、定量分析。毛细管色谱柱使用 TG-BOND Q (30 m-0.32 mm-10  $\mu$ m, max Temp 280  $^{\circ}$ C/300  $^{\circ}$ C)。用热传导检测器(TCD)进行检测,载气为高纯氮气。采用的标准气成分为(摩尔百分数,%):  $H_2$  10.04、CO 19.95、 $CH_4$  15.05、 $CO_2$  30.0、 $C_2H_4$  1.0、 $C_2H_6$  10.0、 $C_3H_8$  4.97。每个热解气体样品检测两次,取平均值,计算各种气体成分占比。

### 1.3.3 气相色谱-质谱联用(GC-MS)分析

采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS Trace 1310-ISQ)对比检测液体产物组分含量<sup>[23]</sup>。

### 1.3.4 X射线荧光光谱(XRF)分析

采用 AXios max 型 X-射线荧光光谱仪测定原料和固体产物的元素含量。

### 1.3.5 扫描电镜(SEM)和能谱(EDS)分析

采用 XL30ESEM-TMP 型扫描电镜观察与分析固体产物的表面形貌和表面元素组成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 氮气流速对 TXDS 热解产物产率的影响

图2为TXDS在常规热解温度500 $^{\circ}$ C保温60 min的条件下,氮气流速(0.1、0.2、0.3 L/min)对热解产物产率的影响。可以看出,气体产率在0.3 L/min时达到最大值14.4%;液体产率在0.3 L/min时达到最小值10.85%;固体产率在氮气流速为0.2 L/min时最高为78%。从图2还可以看出,氮气流速分别为0.1和0.3 L/min时电路板热解较为充分,这是因为,电路板热解的主要过程发生在350~480 $^{\circ}$ C,最大质量损失温度大概在450 $^{\circ}$ C,且树脂发生亚甲基和醚桥键的断裂产生可挥发的小分子以及树脂交联结构的破坏,反应产生可挥发小分子的温度在450~500 $^{\circ}$ C;另外,热解是一个受传热、传质共同影响的过程,氮气的通入会减弱这一过程。当氮气流速较小时,氮气流速对热解效果的影响较小,加之通入的氮气带走挥发分,促进了电路板的热解,但是当氮气流速继续增大,会减弱热解效果,影响电路板的热解,因此固体产率增大。但是当氮气流速增大到一定程度,热解产生的挥发分可以被迅速带走,促进电路板的热解,从而抵消氮气流速对热解效果的减弱。当氮气流速在0.3 L/min时,

液体和气体的总产率达到了最大值25.25%,电路板的热解效果最好,且气体产率最大。

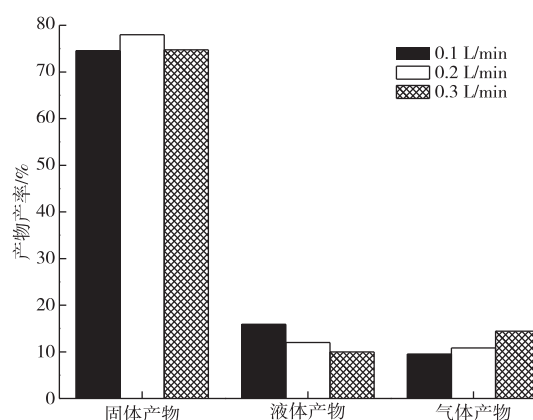


图2 氮气流速对热解产物产率的影响  
Fig. 2 Influences of nitrogen flow rate on yield of pyrolysis products

### 2.2 氮气流速对热解气体产物成分的影响

图3为氮气流速对TXDS热解气体产物成分的影响。可以发现,电路板热解气体产物的主要成分是 $H_2$ 、CO、 $CH_4$ 、 $CO_2$ ,热解气中 $C_2H_2$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_3H_6$ 、 $C_3H_8$ 的体积分数相对较低。氮气流速为0.3 L/min时, $H_2$ 含量最高,为68.21%;氮气流速为0.1 L/min时,CO、 $CH_4$ 、 $CO_2$ 的含量较高,但含量变化不大。气体产物中 $H_2$ 的含量在64.25%~68.21%, $H_2$ 、CO、 $CH_4$ 的总含量在80.12%~82.39%。

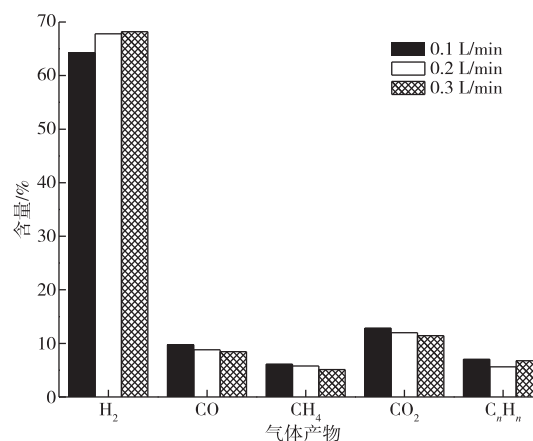


图3 氮气流速对热解气体产物成分的影响  
Fig. 3 Influences of nitrogen flow rate on pyrolysis gas product composition

### 2.3 氮气流速对热解液体产物成分的影响

表1为氮气流速对热解液体产物成分的影响<sup>[23]</sup>。在热解温度500 $^{\circ}$ C,氮气流速分别为0.1、0.2、0.3 L/min的条件下,液体产物中主要的成分

有苯酚、4-乙基苯酚、2-甲基苯并呋喃、2,3-二氢-2-甲基苯并呋喃、4-异丙基苯酚、对苯基苯酚、1,3-二苯氧基-2-丙醇,这些化合物的总含量在 79.21%~80.60%,其中苯酚和 4-异丙基苯酚为最主要的化合物。没有检测出 HBr 可能由于其含量太少,不在检测范围内<sup>[24]</sup>。氮气流速在 0.1~0.3 L/min 时,随着氮气流速的增加,苯酚含量先减少后增加,在流

速为 0.2 L/min 时为最小值 56.52%; C<sub>12</sub>H<sub>10</sub>O、C<sub>15</sub>H<sub>16</sub>O<sub>2</sub> 的含量上升,C<sub>9</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub>、C<sub>9</sub>H<sub>11</sub>ClO<sub>2</sub> 在流速为 0.2 L/min 出现,含量随着流速的增大而增大。

从产物的碳、氢、氧比例来看,与以碳氢化合物为主的燃料油有明显的不同,判断其热值不高。但是苯酚系化合物含量很高,做进一步处理可作为化工原料。

表 1 氮气流速对热解液体产物成分的影响

Table 1 Composition of pyrolysis liquid products under different nitrogen flow rate /%

序号	化合物名称	分子式	流速/(L·min <sup>-1</sup> )		
			0.1	0.2	0.3
1	苯酚	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	60.34	56.52	57.14
2	4-甲基苯酚	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	3.00	1.73	1.41
3	4-乙基苯酚	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	1.61	1.83	2.08
4	2-甲基苯并呋喃	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O	1.26	0.66	0.31
5	2,3-二氢-2-甲基苯并呋喃	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	1.65	0.83	0.57
6	4-异丙基苯酚	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	17.08	17.67	17.29
7	对丙环氧基甲苯	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O	0	0.32	0.58
8	2-叔丁基苯酚	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	0.29	0.35	0.30
9	1-乙酰基茚满	C <sub>11</sub> H <sub>12</sub> O	0	0.31	0.44
10	4-(1,1-二甲基-2-丙基氧基)甲苯	C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> O	0.28	0.25	0.29
11	3-溴-4-羟基苯乙酮	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> BrO <sub>2</sub>	0.84	1.10	1.51
12	苯并二氢吡喃-3-醇	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0	0.77	0.97
13	1-氯-3-苯氧基-2-丙醇	C <sub>9</sub> H <sub>11</sub> ClO <sub>2</sub>	0	0.32	0.62
14	3,6-二溴-2,5-二甲基苯胺	C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> Br <sub>2</sub> N	0.12	0.19	0.13
15	对苯基苯酚	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> O	1.57	3.19	3.21
16	4,6,8-三甲基-1-偶氮丙烯醛	C <sub>14</sub> H <sub>14</sub> O	0.19	0.75	0.81
17	1,3-二苯氧基-2-丙醇	C <sub>15</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	2.74	3.66	4.20
18	2-(4'-羟基苯基)-2-(4'-甲氧基苯基)丙烷	C <sub>16</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	0.10	0.27	0.19

### 2.4 氮气流速对热解固体产物成分的影响

温度 500 °C,氮气流速从 0.1 L/min 增加到 0.3 L/min 的条件下, TXDS 热解固体产物的成分见表 2。从表 2 可以看出, Cu、Sn、Ag 等金属在固体产物中得到了富集,且氮气流速对固体产物中的金属含量影响较小。从表 2 还可以看出, Sn 的含量很低,说明对物料进行脱锡预处理是有必要的。固体产物中含有大量热解过程中产生的不饱和物质发生环化或聚合等反应生成的焦炭。氮气流速对废旧印刷电路板热解后固体中 Br 的含量变化没有明显的影响,说明氮气流速对热解过程中溴化物的分解影响不大,但是与原料中的溴的含量相比,电路板通过热解可以很好地去除其中的溴。

### 2.5 热解固体产物电镜分析

图 4 为 TXDS 在热解温度 500 °C、氮气流速

0.3 L/min 条件下热解所得固体产物的 SEM 形貌及 EDS 能谱图。通过分析图 4 可知,热解固体产物中主要包含有黑色柱状结构(标记 1)和白色块状结构(标记 2),黑色柱状结构主要成分是 Si、Al 和 Ca,应该是玻璃纤维,其中有少许 Cu 的混合颗粒;白色块状结构主要成分是 Cu,混杂着少量 Si、Al、Sn 和 Ca。

表 2 不同氮气流速时的热解固体产物成分

Table 2 Composition of pyrolysis solid products under different nitrogen flow rate /%

流速/ (L·min <sup>-1</sup> )	C	Cu	Sn	Ag	Br
0.1	9.168 1	22.515 1	0.829 6	0.021 9	1.604 1
0.2	9.049 5	21.901 5	0.833 5	0.021 4	1.620 9
0.3	9.328 7	22.491 3	0.837 3	0.022 2	1.699 0

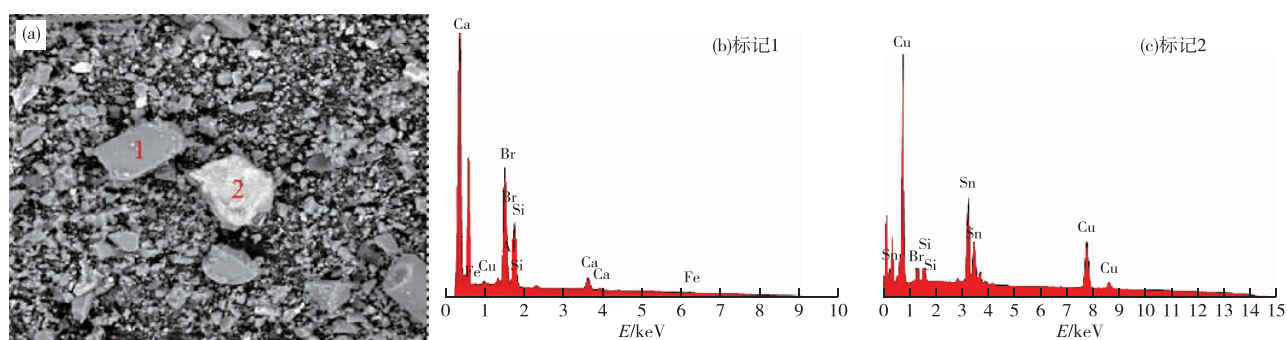


图4 热解固体产物的扫描电镜和能谱分析

Fig. 4 SEM and EDS analysis of pyrolysis solid products

### 3 结论

1) 废旧印刷电视电路板在氮气气氛下热解, 金属 Cu 和 Sn 在固体产物中得到了富集, 是铜冶炼的优质原料, 气体产物中  $H_2$  含量达到 60% 以上,  $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$  的总含量在 80% 以上, 可作为燃气使用; 液体产物经处理可作化工原料, 可实现热解产物的综合利用。

2) 废旧电视电路板经过热解可以很好地除去溴, 对后续处理固体产物是有利的。

3) 氮气流速对废旧电视电路板热解产物的成分组成和分布有显著影响, 氮气流速在 0.1 和 0.3 L/min 时, 固体产率较小, 电路板热解较为充分; 随着氮气流速的增大, 气体产物中  $H_2$  含量在 0.3 L/min 达到最高; 液体产物中苯酚的含量在流速为 0.1 L/min 时含量最大, 为 60.34%; 固体产物中溴的含量随着流速的增大而增大, Cu、Sn 和 Ag 的含量随流速升高小幅波动。

#### 参考文献

- [1] ORTUNO N, CONESA J A, MOLTO J, et al. Pollutant emissions during pyrolysis and combustion of waste printed circuit boards, before and after metal removal[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 499:27-35.
- [2] PATIL R A, RAMAKRISHNA S. A comprehensive analysis of e-waste legislation worldwide [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(13):14412-14431.
- [3] 智研科信咨询有限公司. 2019-2015 年中国电子废弃物处理行业专项调查研究报告[R]. 北京: 智研科信咨询有限公司, 2018. Zhiyan Kexin Consulting Co., Ltd. Special investigation report on China's electronic waste treatment industry from 2019 to 2015 [R]. Beijing: Zhiyan Kexin Consulting Co., Ltd., 2018.
- [4] 中国家用电器研究院, EPR 联盟. 中国废弃电器电子产品回收处理及综合利用行业白皮书 2018[R]. 安徽滁州: 中国家用电器研究院, EPR 联盟, 2019. China Household Appliances Research Institute, EPR Alliance. White paper on recycling and comprehensive utilization of waste electrical and electronic products in China 2018[R]. Chuzhou: China Household Appliances Research Institute, EPR Alliance, 2019.
- [5] 周兵, 王占华. 我国电子垃圾资源化处理对策研究[J]. *吉林建筑工程学院学报*, 2009, 26(3):37-40. ZHOU B, WANG Z H. Study on the countermeasures of e-waste resource treatment in China[J]. *Journal of Jilin Institute of Construction Engineering*, 2009, 26(3):37-40.
- [6] 刘俊场, 陈雯, 王智友, 等. 废弃旧印刷电路板的回收处理技术[J]. *有色金属加工*, 2008, 37(6):1-3. LIU J Y, CHEN W, WANG Z Y, et al. Recycling technology of waste printed circuit board [J]. *Nonferrous Metal Processing*, 2008, 37(6):1-3.
- [7] LINTON J. Electronic products at the end-of-life: Options and obstacles [J]. *Journal of Electronics Manufacturing*, 1999, 9(1):29-40.
- [8] 陈波. 废旧印刷电路板的热解脱溴试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2008. CHEN B. Experimental study on pyrolysis and debromination of waste printed circuit boards [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [9] 林文杰, 吴荣华, 郑泽纯, 等. 贵屿电子垃圾处理对河流底泥及土壤重金属污染[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(1):160-163. LIN W J, WU R H, ZHENG Z C, et al. Pollution of heavy metals in sediment and soil of river by electronic waste treatment in Guiyu [J]. *Journal of Ecological Environment*, 2011, 20(1):160-163.

- [10] 郑良,霍霞,齐宗利,等.电子垃圾拆解区儿童铅污染现状调查[J].汕头大学医学院学报,2006,19(4):233-235.  
ZHENG L, HUO X, QI Z L, et al. Investigation on lead pollution of children in e-waste dismantling area[J]. Journal of Shantou University Medical College, 2006, 19(4):233-235.
- [11] 郝娟,王海锋,宋树磊,等.废线路板热解处理研究现状[J].中国资源综合利用,2008,26(6):30-33.  
HAO J, WANG H F, SONG S L, et al. Research status of pyrolysis of waste printed circuit boards [J]. Comprehensive Utilization of Resources in China, 2008,26(6):30-33.
- [12] 周立杰,刘风华,邹结富,等.废线路板富氧顶吹熔池熔炼实践[J].有色金属(冶炼部分),2020(9):35-38.  
ZHOU L J, LIU F H, ZOU J F, et al. Practice of WPCBs oxygen-enriched top-blowing bath smelting technology [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(9):35-38.
- [13] 黎敏,李冲,徐小锋,等.废线路板热解处理技术和装置发展现状[J].有色金属(冶炼部分),2019(9):18-27.  
LI M, LI C, XU X F, et al. Development status of waste circuit board pyrolysis treatment technology and equipment [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(9):18-27.
- [14] WILLIAMS J P T. Recycling of fibre-reinforced polymeric waste by pyrolysis; thermo-gravimetric and bench-scale investigations[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2003,70(2):315-338.
- [15] 许鹏,马增益,赵劲潮,等.废弃印刷线路板真空热解产物的研究[J].能源工程,2015(3):49-53,60.  
XU P, MA Z Y, ZHAO J C, et al. Study on vacuum pyrolysis products of waste printed circuit boards[J]. Energy Engineering, 2015(3):49-53,60.
- [16] LONG L S, SUN S Y, ZHONG S, et al. Using vacuum pyrolysis and mechanical processing for recycling waste printed circuit boards [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,177(1/2/3):626-632.
- [17] 佟志芳,毕诗文,杨毅宏.微波加热在冶金领域中应用研究现状[J].材料与冶金学报,2004,3(2):117-120.  
TONG Z F, BI S W, YANG Y H. Research status of microwave heating application in metallurgy [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2004, 3(2):117-120.
- [18] 王小玲,赵增立,李海滨,等.印刷线路板热解过程中溴的迁移实验研究[J].环境工程学报,2011,5(6):1375-1380.  
WANG X L, ZHAO Z L, LI H B, et al. Experimental study on bromine migration during pyrolysis of printed circuit board [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011,5(6):1375-1380.
- [19] 李飞,赵增立,李海滨,等.废弃印刷线路板熔融盐气化特性研究[J].环境科学学报,2007,27(11):1851-1857.  
LI F, ZHAO Z L, LI H B, et al. Gasification characteristics of waste printed circuit board in molten salt [J]. Journal of Environmental Science, 2007, 27(11):1851-1857.
- [20] 湛志华,丘克强.废弃环氧树脂电路板的热解机理及动力学研究[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(3):610-616.  
ZHAN Z H, QIU K Q. Pyrolysis mechanism and kinetics of waste epoxy printed circuit board [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011,42(3):610-616.
- [21] 赵跃,薛勇,黄强,等.废旧印刷线路板的热重分析及热解动力学模型[J].化工环保,2011,31(6):482-485.  
ZHAO Y, XUE Y, HUANG Q, et al. Thermogravimetric analysis and pyrolysis kinetic model of waste printed circuit board [J]. Chemical Environmental Protection, 2011,31(6):482-485.
- [22] 王芳,刘玉卿,海热提.防溴型环氧树脂电路板热解动力学分析[J].化工学报,2011,62(10):2945-2950.  
WANG F, LIU Y Q, HAI R T. Pyrolysis kinetics of anti-Br printed circuit boards made epoxy resin [J]. CIESC Journal, 2011,62(10):2945-2950.
- [23] 刘承飞.废旧印刷电路板热解研究[D].昆明:昆明理工大学,2020.  
LIU C F. Study on pyrolysis of waste printed circuit board [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [24] 谢奕标.废旧电路板真空热解气相产物分析及控制研究[D].广州:广东工业大学,2016.  
XIE Y B. Analysis and control of gaseous products from vacuum pyrolysis of waste printed circuit boards [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.