

脲醛树脂类废弃建筑垃圾热解处理研究

张德升¹, 刘林¹, 左宗良^{2,*}

(1. 青岛市市政公用工程质量安全监督站, 青岛 266022; 2. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

摘要:脲醛树脂是一种优异的黏合剂,在建筑材料领域有着广泛的应用,传统的处理方式难以有效处置脲醛树脂类废弃建筑垃圾。创新性提出使用热解方法处理废旧脲醛树脂,通过热重-红外联用(TG-FTIR)系统分析脲醛树脂热解的反应行为与气相产物,为脲醛树脂热解处理提供理论依据和数据支撑。研究表明,脲醛树脂的热解主要分为水分及添加剂的挥发和树脂的裂解两个阶段,且主要以第 2 阶段为主;900 °C 时 UF1(呈块状的脲醛树脂)的累计产气率比 UF2(呈颗粒状的脲醛树脂)高 32.6%,且随着温度从 600 °C 提高到 900 °C,累计产气率提高不大;通过 Coats-Redfern 法确定了脲醛树脂热解的反应级数为 1.4,UF1 的活化能比 UF2 稍高;通过 FTIR 分析发现,脲醛树脂热解的气相产物主要是 CO₂, H₂O 以及含有 C—H 键、N—H 键、羰基的化合物,N 元素主要以氮氢化合物而不是高污染的氮氧化合物形式存在。

关键词:脲醛树脂;建筑垃圾;热解反应;热解动力学;热重-红外联用

中图分类号:X783.2

文献标志码:A

文章编号:1673-4602(2024)02-0117-08

Study of the pyrolysis of construction waste containing urea-formaldehyde resins

ZHANG Desheng¹, LIU Lin¹, ZUO Zongliang^{2,*}

(1. Qingdao Municipal Public Works Quality and Safety Supervision Station, Qingdao 266022, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Urea-formaldehyde resin is an excellent adhesive with a wide range of applications in the field of building materials. Traditional disposal methods are difficult to effectively dispose of building waste containing urea-formaldehyde resin. In this paper, the pyrolysis method was innovatively proposed to treat urea-formaldehyde resin waste. The reaction behavior and pyrolysis gas-phase products of urea-formaldehyde resin pyrolysis were systematically analyzed by thermogravimetric infrared coupling (TG-FTIR) system, which provided theoretical basis and data support for urea-formaldehyde resin pyrolysis treatment. The results show that the pyrolysis of urea-formaldehyde resin is mainly divided into two stages: the volatilization of water and additives and the cracking of resin, and the second stage plays the main role. At 900 °C, the cumulative gas production rate of UF1 (bulk urea-formaldehyde resin) was 32.6 % higher than that of UF2 (granular urea-formaldehyde resin), and the cumulative gas production rate increased little with the increase in temperature from 600

收稿日期:2022-06-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52104397)

作者简介:张德升(1981-),男,山东青岛人。高级工程师,研究方向为固体废弃物能源化处理。E-mail:642339516@qq.com。

* 通信作者:左宗良(1990-),男,山东潍坊人。博士,副教授,主要从事固体废弃物能源化处理方面的研究。

E-mail:1353451117@qq.com。

to 900 °C. The reaction order of urea-formaldehyde resin pyrolysis was determined to be 1.4 by the Coats-Redfern method, and the activation energy of UF1 was slightly higher than that of UF2. FTIR analysis shows that the gas-phase products of urea-formaldehyde resin cracking are mainly CO₂, H₂O and compounds containing C-H bonds, N-H bonds and carbonyl groups. The nitrogen element is mainly in the form of nitrogen-hydrogen compounds rather than in the form of highly polluting nitrogen oxides.

Key words: urea-formaldehyde resin; construction waste; pyrolysis reaction; pyrolysis kinetics; TG-FTIR

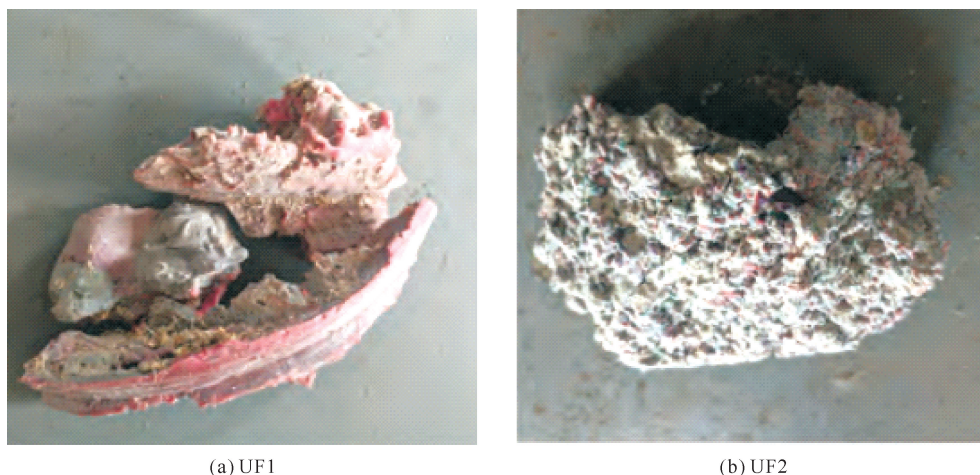
脲醛树脂(UF)制品因价格实惠、耐腐蚀性好、耐磨性高等优点,作为胶粘剂在建筑材料中被广泛使用,尤其是人造板^[1]。脲醛树脂的广泛应用促进了生活的便利,但废弃的脲醛树脂制品如何处理成了新的问题^[2]。2021年修订的《国家危险废物名录》已将废脲醛树脂等树脂类废弃物列为第13类危险废弃物,如处理不当容易产生新的环境问题^[3]。当前常用的树脂类废弃物处理方式有2种:一是简单的堆砌或掩埋^[4];二是焚烧处理^[5]。脲醛树脂类废弃物主要是由尿素和甲醛缩聚得到,密度低且具有很强的抗降解性^[6],简单堆砌或掩埋会占据大量土地且难以令树脂类废弃物自然分解,反而有可能引发火灾事故。树脂类废弃物一般属于易燃品,因而目前大部分废旧树脂类制品通过焚烧处理^[7]。由于目前大多数焚烧处理采用露天开放式燃烧,燃烧不充分,并且没有高效的尾气处理设备^[8],因此会产生大量的氮氧化物、二噁英、氯化氢等毒性气体以及重金属元素的粉尘等二次污染物^[9]。对于脲醛树脂无论是简单的堆砌、掩埋还是焚烧处理都无法实现其中碳和有机成分的高效利用^[10]。

针对焚烧处理存在的上述问题,尝试使用真空热裂解处理废脲醛树脂^[11-12]。因为真空热解没有氧气参与,随着温度的升高,脲醛树脂逐渐裂解成小分子物质,而不像燃烧一样生成复杂、有毒性的物质,而且真空裂解的残渣——炭黑可以加工处理后用以制造吸附剂或填充剂等^[13-14]。本文主要使用热重-红外联用(TG-FTIR)法对脲醛树脂样品热解的反应行为和气相产物进行了分析,使用 Coats-Redfern 法^[15]确定了脲醛树脂热解反应级数和活化能,为脲醛树脂真空热解处理提供数据支撑和理论依据。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验样品均取自济南某建筑装修产生的废弃人造板。按照样品用途与形态的不同,将硬度较硬、呈块状的脲醛树脂编号为 UF1,形状如图 1(a)所示;硬度较软、呈颗粒状的脲醛树脂编号为 UF2,形状如图 1(b)所示。先将原始样品在烘箱中 105 °C 环境下干燥 24 h,再将样品粉碎后研磨至 80 目备用。



(a) UF1

(b) UF2

图1 脲醛树脂废弃物

1.2 工业分析、元素分析和热值测定实验

取约 2 g 样品,使用鹤壁创新仪器公司生产的全自动工业分析仪 CXGF-3300 进行工业分析(水分、挥发分、固定碳、灰分),测试方法基于《固体生物质燃料工业分析方法》(GB/T 28731—2012)。

取约 10 mg 样品,使用 Elementar 公司生产的有机元素分析仪 Vario EL cube 进行元素组成测定,测定模式采用 CHNS/O。

取 0.9~1.1 g 样品,使用上海密通机电科技有限公司生产的氧弹量热计 MTZW-A4 测定原料收到基的低位热值($Q_{\text{net,ar}}$)和原料空气干燥基的低位热值($Q_{\text{net,ad}}$)。

1.3 热重-红外联用(TG-FTIR)实验

称取约 10 mg 左右的样品,在高纯 N_2 (99.8%) 氛围中利用热重分析仪耐驰 209F3 将样品从环境温度以 $15\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升高到 $900\text{ }^\circ\text{C}$,将热解产物通入傅里叶红外变换光谱仪布鲁克 TENSOR27 进行检测,气体流量为 $25\text{ mL}/\text{min}$ 。光谱记录范围为 $4000\sim 440\text{ cm}^{-1}$,分辨率为 4 cm^{-1} ,每秒进行 16 次扫描^[6]。

1.4 产气率测定实验

称取 10 g 左右的样品,置于高温移动管式炉左侧,关闭所有出气阀后打开真空泵将管式炉炉膛内空气抽出,然后以 $15\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率将右侧加热区加热到不同的实验温度,再将加热区域移动到左侧样品放置区域使样品迅速热解,维持实验设定温度持续 60 min 后停止加热。待冷却至室温时,打开左侧出气阀,由于脲醛树脂热解产生气体量很大,不需要通入 N_2 气体也会在管内压力作用下迅速进入到与出气口相连的集气袋内。先测量集气袋内收集的气体体积,再计算管式炉炉膛体积,二者之和即为脲醛树脂热解产生的气体总体积。

2 实验结果与分析

2.1 工业分析与元素分析

通过表 1 的工业分析可以发现,脲醛树脂中含量最高的工业成分均是挥发分 V_{ad} ,含量均超过 80%,UF1 比 UF2 含量高约 4.23%,挥发分很容易在热解过程中分解释放出来。UF2 中水分 M_{ad} 含量更高,比 UF1 高 7.76%。通过元素分析可以发现,O 是脲醛树脂中含量最高的元素,C、N 比 O 含量稍低,H 的含量较少。两种脲醛树脂均不含 S。其中 UF2 中 O 含量比 UF1 高 10.74%,其余元素含量则相差不大。

表 1 脲醛树脂的工业分析和元素分析

名称	工业分析/%				元素分析/%					热值(MJ/kg)	
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	$Q_{\text{net,ar}}$	$Q_{\text{net,ad}}$
UF1	5.84	3.2	87.18	3.78	33.66	5.47	35.83	17.51	0	15.26	17.51
UF2	13.60	1.3	82.95	2.15	33.64	5.61	46.57	17.36	0	13.81	16.61

注:水分(M_{ad})、灰分(A_{ad})、挥发分(V_{ad})、固定碳(FC_{ad})和碳(C_{ad})、氢(H_{ad})、氧(O_{ad})、氮(N_{ad})、硫(S_{ad})分别为原料空气干燥基下测定的工业组分和元素组分; $Q_{\text{net,ar}}$ 为测定的收到基低位热值; $Q_{\text{net,ad}}$ 为测定的空气干燥基低位热值。

2.2 TG-DTG 分析

图 2 分别为 UF1 和 UF2 热解 TG/DTG 曲线。从图 2(a)中 TG 曲线可以看出,UF1 从加热即开始缓慢失重,到 $215\text{ }^\circ\text{C}$ 时失重逐渐加速,到 $580\text{ }^\circ\text{C}$ 时热解基本完成,质量不再发生变化。此时,整个热解过程失重率为 79.61%,残渣率为 20.39%。从图 2(a)中 DTG 曲线可以看出,UF1 的热解过程主要分为 2 个阶段。第 1 阶段从加热开始到 $215\text{ }^\circ\text{C}$,失重率为 11%左右,在 $181\text{ }^\circ\text{C}$ 左右到达第 1 个失重峰,此时失重速率为 $-3.70\%/ \text{min}$ 。第 1 阶段主要是脲醛树脂中水分的挥发,失重率相对较小。第 2 阶段从 $215\text{ }^\circ\text{C}$ 开始一直到 $580\text{ }^\circ\text{C}$ 热解完成,失重率为 68.61%,在 $340\text{ }^\circ\text{C}$ 左右到达第 2 阶段失重峰,此时失重速率为 $-16.50\%/ \text{min}$ 。第 2 阶段主要是脲醛树脂的热解阶段,是整个热解过程的主要阶段。

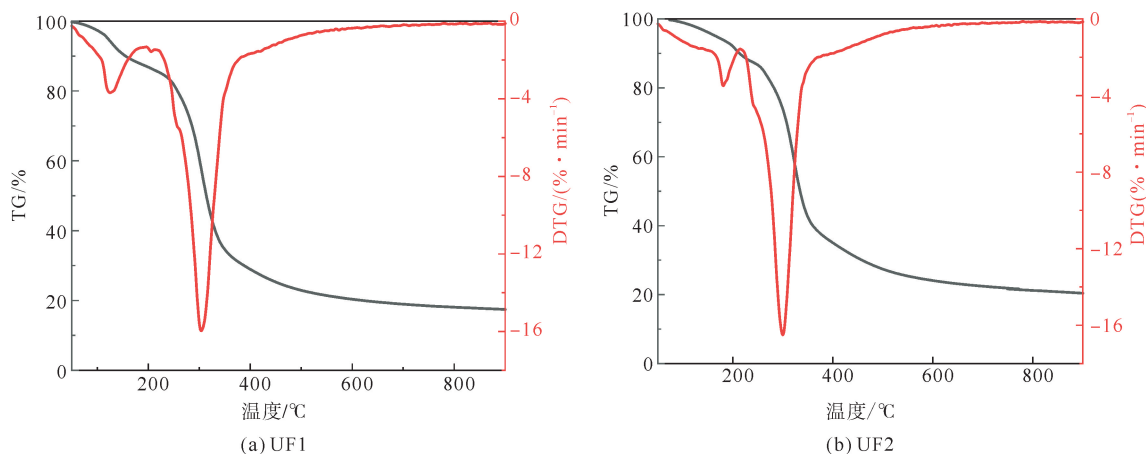


图2 脲醛树脂热解TG/DTG曲线

—TG; —DTG

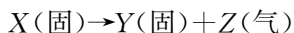
与UF1的热解过程类似,UF2的热解过程也主要分为2个阶段。从图2(b)可以看出第1阶段从开始加热到195℃,在125℃左右为第1个失重峰,失重速率为-3.69%/min;第2个阶段为195~430℃,在304℃达到第2个失重峰,失重速率为-15.96%/min。UF2整个失重过程失重率为82.60%,残渣率为17.40%。与UF1热解过程相比,UF2第1阶段的失重率为13%,比UF1多2%;失重峰在125℃,这比UF1失重峰处温度要低56℃,这主要是由于两种脲醛树脂物理形态差异以及在脲醛树脂制造过程中添加剂种类和浓度差异不同所导致的。

2.3 脲醛树脂热解累计产气率

由表2可以看出,UF1的累计产气率明显高于UF2,900℃时UF1的累计产气率比UF2高32.6%,这主要是由于UF1的挥发分含量比UF2高。且随着温度的升高,UF1与UF2的累计产气率均逐渐上升,但是变化幅度并不大。从600到900℃,UF1与UF2的累计产气率分别提高了4.19%与3.72%。

2.4 热解动力学分析

脲醛树脂热解的过程可以表示为



式中:X为样品;Y为固体产物;Z为气体产物,包括二氧化碳、水蒸气、一氧化碳、氨气、甲醛等。

根据Coats-Redfern方程,假设升温速率 $\beta = \frac{dT}{dt}$ 为定值,整理可得

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T e^{-\frac{E}{RT}} dT \quad (1)$$

式中: α 为失重率,%;A为频率因子; β 为升温速率,取为15℃/min;T为温度,K; T_0 为初始温度,K;E为活化能,kJ/mol;R为理想气体常数,取为8.314 J/(mol·K); $f(\alpha)$ 为仅与反应机理相关的函数,假定 $f(\alpha) = (1-\alpha)^n$,其中n为反应级数。

对式(1)的处理方法有多种,其中最常用的是微分法和积分法^[8]。由于积分法可以避免计算DTG引起的误差,故本文使用积分法进行分析:

$$\ln \left[\frac{G(\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[\left(\frac{AR}{\beta E} \right) \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (2)$$

其中, $G(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)}$ 。

表2 脲醛树脂热解累计产气率

名称	温度/℃	累计产气率/(L·g ⁻¹)
UF1	600	0.5542
	700	0.5645
	800	0.5715
	900	0.5774
UF2	600	0.4198
	700	0.4273
	800	0.4318
	900	0.4354

对一般的反应温度区间和大部分 E 值而言, $\frac{E}{RT} \gg 1$, 因此 $1 - \frac{2RT}{E} \approx 1$, 故式(2)可简化为

当 $n \neq 1$ 时,

$$\ln\left(\frac{1-(1-\alpha)^{1-n}}{(1-n)T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right) - \frac{E}{RT} \quad (3)$$

当 $n = 1$ 时,

$$\ln\left(-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right) - \frac{E}{RT} \quad (4)$$

当 $n \neq 1$ 时, $\ln\left(\frac{1-(1-\alpha)^{1-n}}{(1-n)T^2}\right)$ 对 $1/T$ 作图应为一条直线; 当 $n = 1$ 时, $\ln\left(-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right)$ 对 $1/T$ 作图应为一条直线。

以 $n=0.2$ 为步长, 在 $0 \sim 2$ 按照相关系数较大原则确定反应级数 n 。然后根据直线的截距和斜率即可求出脲醛树脂热解反应的活化能 E 与频率因子 A 。

通过表 3 计算结果可以明显发现, 当反应级数 $n=1.4$ 时, 相关系数 $R^2=0.97473$ 最大且残差平方和 $\sigma^2=0.01032$ 最小, 因此 UF1 的动力学模型函数为 $f(\alpha) = (1-\alpha)^{1.4}$, 回归方程为 $y = 1.19819 - 0.04347x$, 拟合直线如图 3 所示。

通过表 4 计算结果可以明显发现, 当反应级数 $n=1.4$ 时, 相关系数 $R^2=0.97339$ 最大且残差平方和 $\sigma^2=0.01436$ 最小, 因此 UF2 热解的动力学模型函数为 $f(\alpha) = (1-\alpha)^{1.4}$, 回归方程为 $y = 1.12134 - 0.04773x$, 拟合直线如图 4 所示。

通过表 5 可以得出, UF1 和 UF2 拟合直线的相关系数 R^2 均大于 0.97, 这表明使用 1.4 级反应动力学方程能准确地反应脲醛树脂热解的动力学模型, UF2 的活化能比 UF1 稍高。

2.5 FTIR 分析

从图 5 中可以看出, 在 $1500, 1650, 2350$ 以及 3735 cm^{-1} 处有明显的红外吸收峰。由于 CO_2 振动频率主要位于 2349 cm^{-1} , N—H 键振动频率主要位于 3500 cm^{-1} , C=O 的振动频率主要位于 1655 cm^{-1} 处。因此热解产物主要有 CO_2 、 H_2O 以及含有 C—H 键、N—H 键、C=O 的化合物。此外, 在 $775, 725 \text{ cm}^{-1}$ 处也有峰值较小的红外吸收峰, 因此也有少量醇类物质以及氯代烃及其衍生物。NO、 NO_2 以

表 3 UF1 热解机理模型计算结果

反应级数 n	系数		相关系数 R^2	残差平方和 σ^2
	a	b		
0.2	-0.059 96	0.945 39	0.893 75	0.044 93
0.4	-0.057 68	0.981 28	0.914 45	0.036 17
0.6	-0.055 15	1.020 86	0.934 09	0.027 87
0.8	-0.052 18	1.066 43	0.950 76	0.020 82
1.0	-0.054 35	1.021 55	0.960 25	0.021 45
1.2	-0.046 51	1.152 62	0.970 70	0.011 97
1.4	-0.043 47	1.198 19	0.974 73	0.010 32
1.6	-0.040 42	1.243 43	0.973 86	0.010 54
1.8	-0.037 46	1.287 11	0.969 34	0.012 37
2.0	-0.034 65	1.328 27	0.961 82	0.015 40

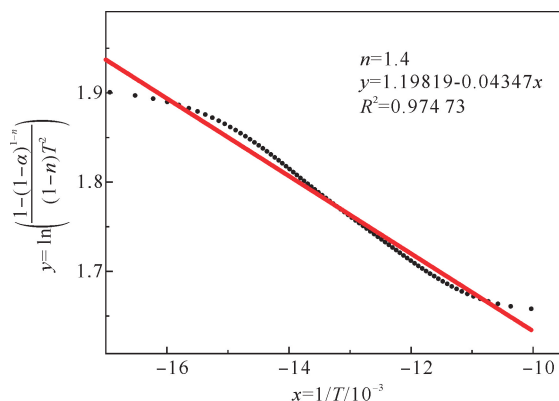


图 3 UF1 拟合直线

表 4 UF2 热解机理模型计算结果

反应级数 n	系数		相关系数 R^2	残差平方和 σ^2
	a	b		
0.2	-0.065 86	0.842 98	0.889 04	0.061 04
0.4	-0.063 37	0.882 41	0.910 44	0.049 27
0.6	-0.060 59	0.925 82	0.930 69	0.038 13
0.8	-0.057 35	0.975 58	0.947 94	0.028 64
1.0	-0.054 35	1.021 55	0.959 79	0.021 45
1.2	-0.051 09	1.070 92	0.968 87	0.016 61
1.4	-0.047 73	1.121 34	0.973 39	0.014 36
1.6	-0.044 35	1.171 40	0.972 55	0.014 65
1.8	-0.041 07	1.219 70	0.967 97	0.017 09
2.0	-0.037 97	1.265 18	0.960 34	0.021 16

表 5 脲醛树脂热解的动力学参数

名称	n	$E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$A/10^5 \text{ min}^{-1}$	R^2
UF1	1.4	36.14	2.161	0.974 73
UF2	1.4	39.68	2.197	0.973 39

及其他的氮氧化物是脲醛树脂燃烧处理产生的最典型的气相污染物,如何处理燃烧产生的氮氧化物也是脲醛树脂燃烧处理的主要研究方向之一,有一种思路是向产生的烟气中通入 NH_3 催化还原 NO , 产生无污染的 N_2 ($6\text{NO}+4\text{NH}_3=5\text{N}_2+6\text{H}_2\text{O}$), 但是效果并不理想^[8]。在红外光谱中并未发现明显的 NO 及 NO_2 的吸收峰, N 元素主要以氮氢化合物形式存在, 而不是以氮氧化物的形式存在, 这主要是因为真空裂解过程中并没有氧气的参与, 氧气的存在会将 NHCO 以及 NH_3 氧化成 NO_x 。

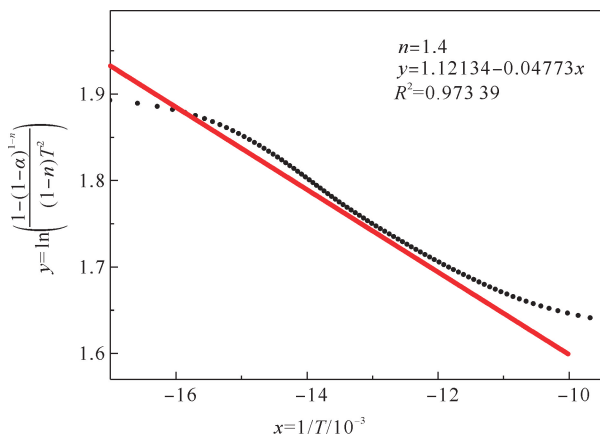


图4 UF2 拟合直线

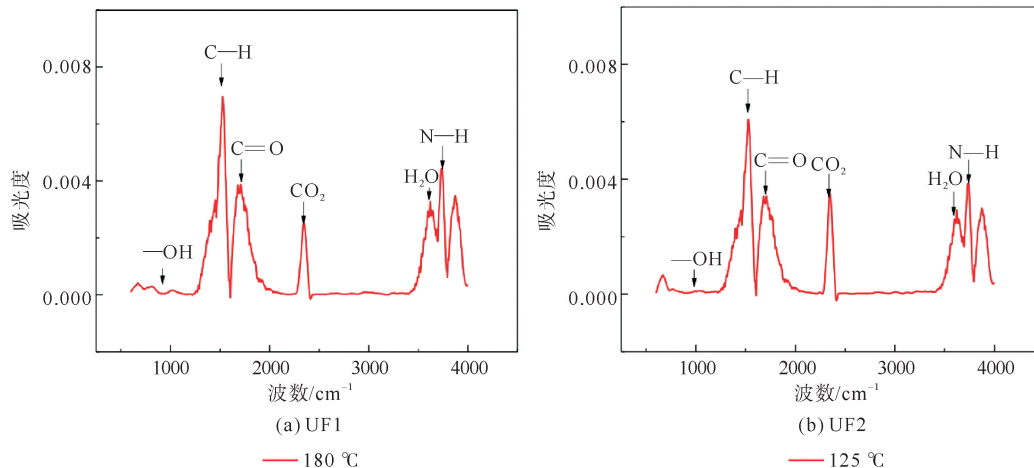


图5 脲醛树脂在第1个失重峰处 FTIR 图

从图6可以看出, 在第2个失重峰处, 脲醛树脂热解产生的大量 $\text{R}-\text{CHO}$ 、 $\text{R}-\text{COOH}$ 、 $\text{R}-\text{OH}$ 、 C_xH_y 迅速分解成 CO_2 和 H_2O 等物质。在 725 cm^{-1} 处有明显的红外吸收峰, 此处应为卤代物的收缩振动, 考虑到脲醛树脂制造过程中会有 NH_4Cl 的加入, 所以该物质应为氯代物。

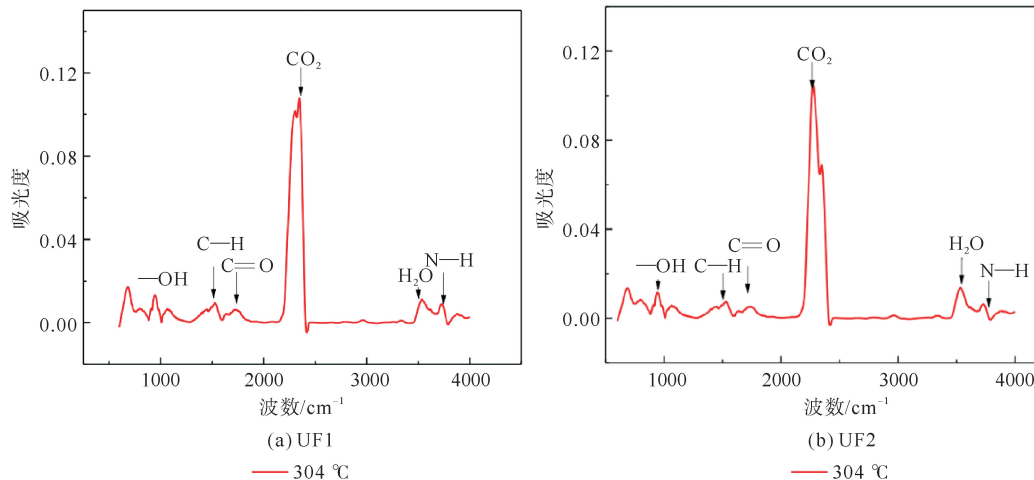


图6 脲醛树脂在第2个失重峰处 FTIR 图

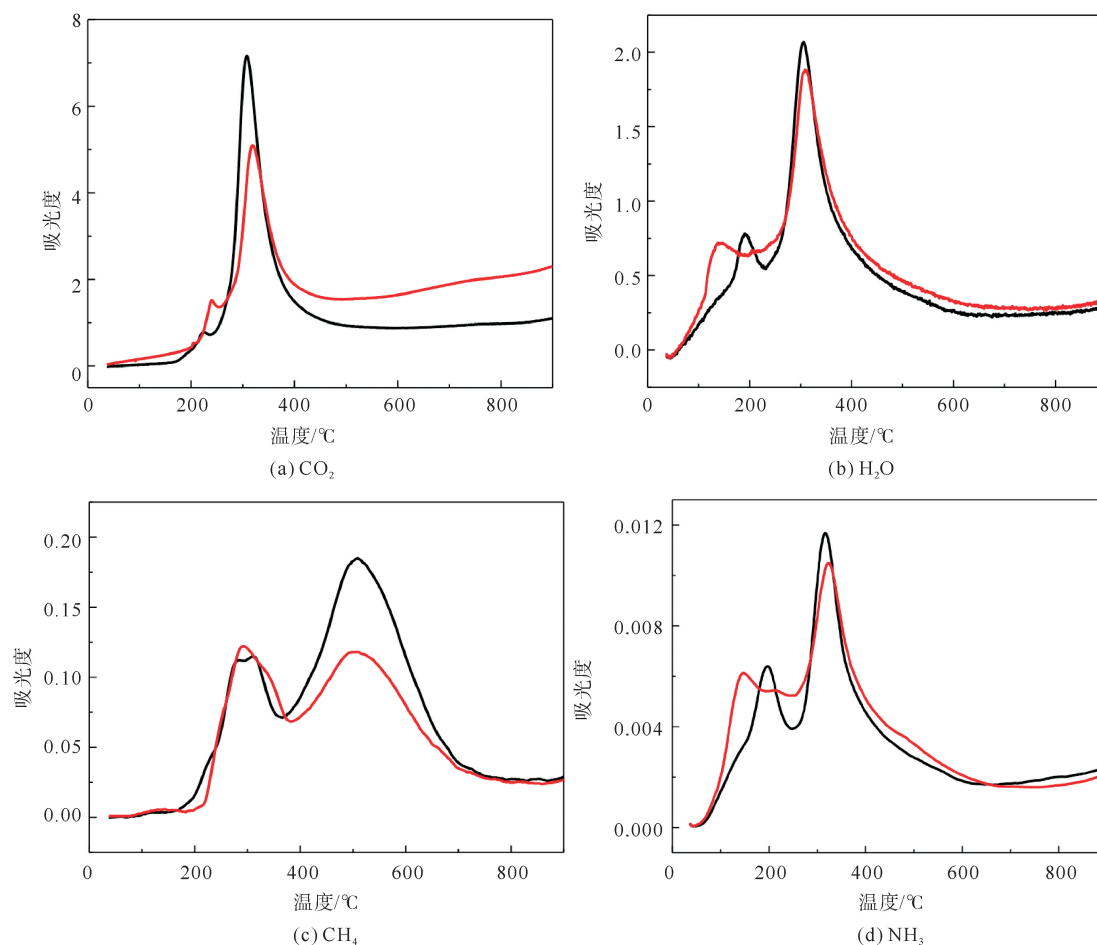
图7分别表示 CO_2 、 H_2O 、 CH_4 、 NH_3 4种气相产物随温度变化的规律。

图7 4种气相产物FTIR图

— UF1; — UF2

从图7(a)可以看出, CO_2 从200 °C开始大量析出,主要有2个析出峰,分别对应脲醛树脂热解的2个失重峰,在400 °C左右全部析出。 CO_2 的析出主要以第2阶段脲醛树脂的热解为主。热解初始UF1析出的 CO_2 比UF2稍少,但220 °C之后UF1析出的 CO_2 迅速上升,在300 °C左右超过UF2的 CO_2 析出强度。

从图7(b)可以看出, H_2O 从热解开始即开始析出,也存在2个析出峰,分别对应脲醛树脂热解的2个失重峰,600 °C左右全部析出。热解前期,UF2的 H_2O 析出量明显高于UF1,这主要是UF2的水分含量高于UF1,随后两者的 H_2O 析出曲线几乎完全重合,峰值处UF1的 H_2O 析出强度稍高于UF2,随后又几乎重合,直到热解结束。

从图7(c)中可以看出, CH_4 从200 °C开始析出,也存在2个明显的析出峰,第1个析出峰对应温度为300 °C,在第2个失重峰前40 °C左右;第2个析出峰对应温度为510 °C,在第2个失重峰后170 °C左右,并没有和失重峰重合,700 °C之后析出完成。这说明第1阶段 CH_4 的析出主要来自于脲醛树脂的热解;随着温度的升高,脲醛树脂裂解产生的大分子 $R-\text{COOH}$ 、 $R-\text{CHO}$ 、 $R-\text{COO}-R$ 以及 C_xH_y 等进一步裂解成小分子的物质,如 CH_4 等,形成了 CH_4 的第2个析出峰。也可以看到,由脲醛树脂热解(第1阶段)产生的 CH_4 ,UF1和UF2的析出强度几乎相同,而由大分子醛、酯、酸、烃等有机物断链(第2阶段)产生的 CH_4 ,UF1的析出强度则明显高于UF2。对于UF1,来自第2阶段的 CH_4 析出强度高于第1阶段;而对于UF2,来自第2阶段的 CH_4 则稍低于第1阶段。

从图7(d)可以看出, NH_3 从热解开始析出,存在2个析出峰,分别对应脲醛树脂热解的2个失重峰,600 °C左右析出完成。

3 结论

1) 脲醛树脂的热解主要分为2个阶段,分别为添加剂和水分的挥发阶段和脲醛树脂的热解阶段,其中第2阶段是脲醛树脂裂解的主要阶段。

2) UF1的累计产气率比UF2高约32.6%,从600到900℃脲醛树脂的累计产气率变化不大。

3) 两种脲醛树脂热解的反应级数均为1.4,UF1的活化能比UF2稍低。

4) 脲醛树脂热解的产物主要有CO₂、H₂O以及含有C—H键、N—H键、羰基的化合物。N元素主要以氮氢化合物而不是氮氧化合物的形式存在。CO₂、H₂O、NH₃析出过程大致与脲醛树脂热解过程一致,而CH₄则随着醛、酸、酯、烃等大分子有机物的断链进一步析出。

参考文献(References):

- [1] LIU M, WANG Y, WU Y Q, et al. Hydrolysis and recycling of urea formaldehyde resin residues[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 355(5):96-103.
- [2] 李永花, 李建章, 张世锋. 低甲醛释放量人造板用改性脲醛树脂制备及应用研究[J]. *化学与粘合*, 2009, 31(5):1-3.
LI Yonghua, LI Jiangzhang, ZHANG Shifeng. Preparation and application of modified urea-formaldehyde resins used for wood-based panel with low formaldehyde emission[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2009, 31(5):1-3.
- [3] ZHU H, XU S A. Synthesis and properties of rigid polyurethane foams synthesized from modified urea-formaldehyde resin[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 202:718-726.
- [4] 王思佳, 何晶晶, 邵立明, 等. 树脂纽扣废物的焚烧污染特征[J]. *化工学报*, 2016, 67(9):4004-4012.
WANG Sijia, HE Pinjing, SHAO Liming, et al. Characteristic pollutions during incineration of waste resin buttons[J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(9):4004-4012.
- [5] 欧国利, 高建峰, 胡拖平, 等. 由脲醛树脂制备炭材料及其对金属离子的吸附性能[J]. *过程工程学报*, 2015, 15(5):876-880.
OU Guoli, GAO Jianfeng, HU Tuoping, et al. Synthesis of carbon material from ureaformaldehyde resin and its adsorption to heavy metal ions[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2015, 15(5):876-880.
- [6] 张倩, 徐海云. 生活垃圾焚烧处理技术现状及发展建议[J]. *环境工程*, 2012, 30(2):79-81.
ZHANG Qian, XU Haiyun. Status and development suggestion of incineration technology of domestic garbages[J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(2):79-81.
- [7] 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 Zhihua, QIU Keqiang. Mechanism and kinetics of pyrolysis of discarded epoxy printed circuit boards[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(3):610-616.
- [8] JIANG X G, LI C Y, CHI Y, et al. TG-FTIR study on urea-formaldehyde resin residue during pyrolysis and combustion[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1/2/3):205-210.
- [9] GIRODS P, DUFOUR A, ROGAUME Y, et al. Pyrolysis of wood waste containing urea-formaldehyde and melamine-formaldehyde resins[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2008, 81(1):113-120.
- [10] SUN G, MA L, RAN J, et al. Templated synthesis and activation of highly nitrogen-doped worm-like carbon composites based on melamine-urea formaldehyde resins for high performance supercapacitors[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 194:168-178.
- [11] GULSEN Y, HALIL S. A pilot study for the pyrolysis of the urea formaldehyde-melamine formaldehyde resin paper waste[J]. *Thermal Science*, 2019, 23(Suppl 1):253-266.
- [12] WANG Y H, WANG F, FANG Y, et al. Self-assembled flower-like MnO₂ grown on Fe-containing urea-formaldehyde resins based carbon as catalyst for oxygen reduction reaction in alkaline direct methanol fuel cells[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 496:143566.
- [13] SOMMERHUBER P F, WANG T, KRAUSE A. Wood-plastic composites as potential applications of recycled plastics of electronic waste and recycled particle board[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 121(10):176-185.
- [14] 陈世华. UF胶粘剂对纤维板热解过程及产物转换的影响[D]. 北京:北京林业大学, 2013.
CHEN Shihua. The influence of UF adhesive on pyrolysis process and products transformation of MDF[D]. Beijing:Beijing Forestry University, 2013.
- [15] FANG L, LIU L, LUO S Y, et al. Study on the kinetics and pyrolysis behavior of waste containing urea-formaldehyde resins[J]. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2020, 14(4):444-452.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)