

热化学法处置退役风电叶片污染物生成特性

熊小鹤, 张一楠, 李良钰, 张京晶, 谭厚章

(西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 风电叶片由于重量轻、强度大、叶片长等特点, 一直是固废行业回收处置的难点。热化学法处置退役风电叶片是一项较为有潜力规模化工业推广的技术。针对热化学法处置过程中的污染物排放问题, 在管式电炉实验台上对风电叶片样品分别在 N_2 、 CO_2 和空气气氛下进行了 400、600、800、1 000 $^{\circ}C$ 四个不同温度下的热转化实验, 测试了含氮、含氯污染物排放情况。发现 CO_2 和氮气气氛下, HCN 和 NO 是主要的含氮污染物, 随着温度增加, HCN 逐渐增加, 在 1 000 $^{\circ}C$ 时, HCN 形态氮是最主要的含氮组分, 占总氮比例达到 88.3%, 而 HCl 形态氯占总氯比例波动不大, 维持在 5% 上下波动。空气气氛下, NO 是最主要的含氮污染物, 峰值体积分数达 918.3×10^{-6} , 并且, 生成的 NO 中的氧主要来自风电叶片自身, 而非外部空气。随着温度增加, HCl 和 HCN 逐渐减小, 在 400 $^{\circ}C$ 达到最大, 占总氯、总氮比例分别为 46%、8.4%。 CO_2 对产物的分布有显著的促进作用, 这种促进作用与温度、组分相关。1 000 $^{\circ}C$ 高温下 CO_2 能显著促进 HCN 和 NO 的生成, 但是在 400 $^{\circ}C$ 低温下, 促进作用并不明显。在 400 $^{\circ}C$ 低温下, CO_2 对 NO_2 的生成有显著的促进作用, 1 000 $^{\circ}C$ 高温下, CO_2 对生成 NO_2 促进作用不明显。考虑到生成 NO 的氧主要来自叶片自身, 传统的空气分级对降低氮氧化物并不明显, 中试开发需要专门配套烟气除氮、除氯装置。

关键词: 热解; 燃烧; 气化; 风电叶片; 玻璃纤维; NO; HCl

中图分类号: **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)02-1331-08

Pollutants generation characteristics from retired wind turbine blades treated with thermochemical methods

XIONG Xiaohe, ZHANG Yinan, LI Liangyu, ZHANG Jingjing, TAN Houzhang

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China 710049)

Abstract: Due to the light weight, high strength, and long blades of wind turbine blades characteristics, it has been a difficult problem for the recycling in the solid waste industry. The thermochemical treatment of retired wind turbine blades is a technology with great potential for large-scale industrial application. In response to the issue of pollutant emissions during the thermochemical treatment process, the pre-treated wind turbine blades thermal conversion experiments were conducted on a tubular electric furnace experimental platform under four different temperatures of 400, 600, 800, and 1 000 $^{\circ}C$ during N_2 , CO_2 , and air atmospheres, respectively. The pollutants emissions containing nitrogen and chlorine were tested. Under the CO_2 and N_2 ambience, HCN and NO are the main nitrogen-containing pollutants. As the temperature increases, HCN gradually increases. At 1 000 $^{\circ}C$, HCN-N is the most important nitrogen-containing component, accounting for

收稿日期: 2024-03-06 策划编辑: 钱小静 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0231

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 2023YFC3905703

作者简介: 熊小鹤 (1986—), 男, 湖北京山人, 副教授, 博士。E-mail: xiongxx@xjtu.edu.cn

引用格式: 熊小鹤, 张一楠, 李良钰, 等. 热化学法处置退役风电叶片污染物生成特性[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1331-1338.

XIONG Xiaohe, ZHANG Yinan, LI Liangyu, et al. Pollutants generation characteristics from retired wind turbine blades treated with thermochemical methods[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1331-1338.



移动阅读

88.3% of total nitrogen. However, the proportion of HCl-Cl to total chlorine fluctuates little, maintaining around 5%. Under the air ambience, NO is the main nitrogen-containing pollutant, with a peak concentration of 918.3×10^{-6} . Moreover, the oxygen in the NO mainly comes from the wind turbine blades themselves, rather than the external air. As the temperature increases, HCl and HCN gradually decrease, reaching their maximum at 400 °C, accounting for 46% and 8.4% of total chlorine and total nitrogen, respectively. CO₂ has a significant promoting effect on the distribution of products, which is related to temperature and composition. CO₂ can significantly promote the generation of HCN and NO at a high temperature of 1 000 °C, but the promotion effect is not significant at a low temperature of 400 °C. At a low temperature of 400 °C, CO₂ has a significant promoting effect on the generation of NO₂, while at a high temperature of 1 000 °C, CO₂ has no significant promoting effect on the generation of NO₂. Considering that the oxygen generated by NO mainly comes from the blades themselves, traditional air classification is not effective in reducing nitrogen oxides. Therefore, pilot development requires specialized flue gas nitrogen and chlorine removal devices.

Key words: pyrolysis; combustion; gasification; turbine blade; glass fibre; NO; HCl

0 引 言

近年来,我国风电市场高速发展,截止 2023 年底,风电装机总量已超过 4.4 亿 kW。由于风电机组的设计寿命通常为 20~25 a^[1-2],随着风电机组的大规模投运,早些年陆续投运的风电机组面临退役后如何处理的难题^[3],预计我国第一波风电退役潮将于 2025~2030 年来临^[4-5]。由于风电机组的主要部件如机舱罩、变速箱、电机、塔筒等均为金属^[6],这部分退役部件能够得到较好的回收处理,而风电叶片长而轻,其材料为热固性玻璃纤维增强复合材料^[7-8],强度较大,有“玻璃钢”^[9]的形象比喻,破碎、运输成本高,处理困难。因此,退役叶片的回收处理已成为固废行业的一道难题。

风电叶片材料,可以分为 3 类:树脂大类、玻璃纤维、金属^[9]。树脂大类包括环氧、酚醛、呋喃等类型树脂以及固化剂、填充剂、增塑剂等^[10]。从重量占比看,玻璃纤维占 65% 左右,树脂大类占 30% 左右,金属占 5% 左右^[11]。

目前对退役叶片的处理主要有 3 种方式,机械(物理)回收、热化学回收、溶剂回收^[1-4]。机械回收主要是将叶片进行切割、破碎后当作填料用到玻璃钢管道、纤维毡等机械强度低一级的复合材料加工生产中。溶剂回收侧重于回收树脂大类,添加化学试剂后(如乙二醇)合成得到经济价值更好的树脂类材料。热化学回收主要是采用热化学的方式除去退役叶片中的树脂大类,提取玻璃纤维。由于热化学法有较大的规模化处置退役叶片的能力,近年来得到了较多关注。YOUSEF 等^[12]利用热重反应器研究了退役风电叶片的催化热解焦油产物,发现主要是苯、甲苯类芳香有机物。CHEN 等^[13]发现当热解温度从 500 °C 升高到 800 °C 时,酚类、羧酸类、酮类和醛类产率下降,醇类、

烷烃类和烯烃类产率增加。GE 等^[14]研究了环氧树脂和碳纤维的共热解行为,发现气态产物中主要包含 CO_x、CH₄、烷烃、烯烃、羧酸、芳香化合物等产物,还有研究者关注了热解产物中苯乙烯^[15]、双酚 A^[16]的回收。综上可以看到,热化学法研究较多集中在有机物生成物上,对热转化过程中的污染物关注较少。作为有潜力规模应用的中试技术,在环保日趋严厉的背景下,研究污染物组分对该技术的中试放大至关重要。同时,作为基础研究,希望将研究的温度范围拓宽至更高的温度范围,观察玻璃纤维在高温下的变化,因此,本文选取了空气、氮气、CO₂ 三种气氛,分别模拟燃烧、热解、气化 3 种热化学过程,在 400~1 000 °C 范围研究了退役风电叶片热转化过程中的污染物生成特性。

2 实 验

2.1 实验台

实验台布置如图 1 所示,包括气源(CO₂、O₂、N₂、Ar 等)、质量流量计、管式电加热炉、瓷舟坩埚、推杆、水浴槽、烟气分析仪、笔记本。实验时,先将电炉升温,待温度达到目标温度(400、600、800、1 000 °C)后,瓷舟中装入 0.4 g 风电叶片样品,用推杆推至炉中心恒温区,反应 8~10 min。为了模拟热解、燃烧、气化 3 个不同的热化学过程,配置 100% N₂、80% N₂/20% O₂、80% Ar/20% CO₂ 三种模拟气氛,控制总载气流量 5 L/min,其中,Ar 和 N₂ 均为惰性气体,不参与反应,在实验中仅起载气作用,认为 Ar 和 N₂ 对反应产物分布没有影响。反应后的气体进入烟气分析仪(Gasmet DX 4 000)分析,数据最后导入笔记本电脑分析。为保证准确性,每个工况进行 2-3 次实验,取平均值。反应后的玻璃纤维形貌采用 SU3500 钨灯丝扫描电镜(SEM)进行表征。

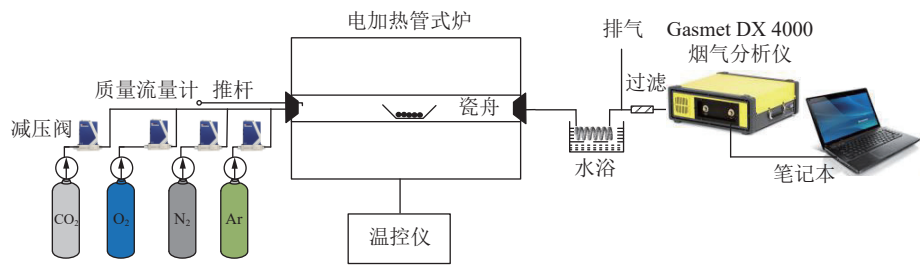


图 1 实验台布置

Fig.1 The schematic diagram of the rig

2.2 样品制备

叶片来自某风电场的退役叶片, 先将退役风电叶片切割, 制成长度为 400 mm×100 mm×65 mm 左右的长条状, 再进入破碎机破碎成厚度为 2 mm 左右的薄

片, 最后送入粉碎机粉碎, 粉碎完毕利用振筛机筛分, 筛分后的样品按粒径分成三类: 小于 0.2 mm, 0.2~2 mm, 大于 2 mm, 如图 2 所示。本文实验中采用的样品为 0.2~2 mm 粒径范围。



图 2 实验样品制备

Fig.2 The preparation process of experimental samples

2.3 样品成分分析

表 1 给出了退役风电叶片的工业分析和元素分析结果, 可以看到, 退役叶片中含水量很低, 空干基水分仅 0.46%, 主要由灰分和挥发分组成, 干基灰分达

到 70.7%, 干基挥发分达到 26.2%, 从污染物元素看, 硫含量很少, 氮和氯是主要污染元素, 分别占 0.82%、0.32%(干燥基), 热值较低, 空干基低位热值 1849 kcal/kg, 热值主要来自挥发分, 而非固定碳。

表 1 退役叶片工业分析和元素分析

Table 1 The proximate and elemental analysis of the retired turbine wind blade

样品	工业分析/%				元素分析/%						发热量kcal/kg
	Ma_d	A_d	V_d	FC_d	C_d	H_d	N_d	O_d	S_d	Cl_d	$Q_{net,ad}$
退役叶片	0.46	70.7	26.2	3.09	22.4	1.49	0.82	4.53	0.01	0.32	1 849

注: 氧元素的计算为差减法得到。

2.4 数据处理

反应过程中, 不同组分产物质量可以通过下式计算得出。

$$m = q \int_0^{t_0} g(t) dt M \div 22.4 \div 1\,000$$

式中: m 为组分产物质量, mg; q 为总载气流量 5/60=1/12, L/s; $g(t)$ 是组分产物浓度随时间 t 变化的函数曲线, 10^{-6} ; t_0 为反应时间, s; M 为组分产物的分子量, g/mol; 22.4 为通用气体常数, L/mol。

得到反应期间不同组分产物的质量后, 根据不同

组分的分子式, 计算出氮以不同的组分形态释放量。由于每次实验, 放入瓷舟中的样品量固定为 0.4 g, 即反应前的总氮质量固定为 3.26 mg, 因此, 不同组分形态氮与反应前总氮质量比, 即为反应释放的不同形态氮占总氮比例。同理, 可以求出以 HCl 形态释放的氯占总氯的比例。

3 实验结果

图 3 给出了在氮气、CO₂、空气气氛下, 5 种不同组分氮占样品总氮比例随温度的变化规律。可以看

到,在氮气气氛下,随着温度增加,HCN 释放显著增加,在 1 000 ℃ 时 HCN 占总氮的比例达到最大 (59.6%),而 NO 则是在 800 ℃ 时占总氮比例达到最大 (12.6%),随后下降。在 CO₂ 气氛下,HCN 和 NO 随温度的变化规律和在氮气气氛下类似。不同的是,在 1 000 ℃

高温下,CO₂ 气氛的峰值比例更大,HCN 形态氮、NO 形态氮占比最高分别达到 88.3%、29.3%;而在 400 ℃ 低温下,HCN 形态氮、NO 形态氮占总氮比例在 CO₂ 气氛和在 N₂ 气氛相差不大。这说明高温下 CO₂ 气氛能促进 HCN 和 NO 的生成。

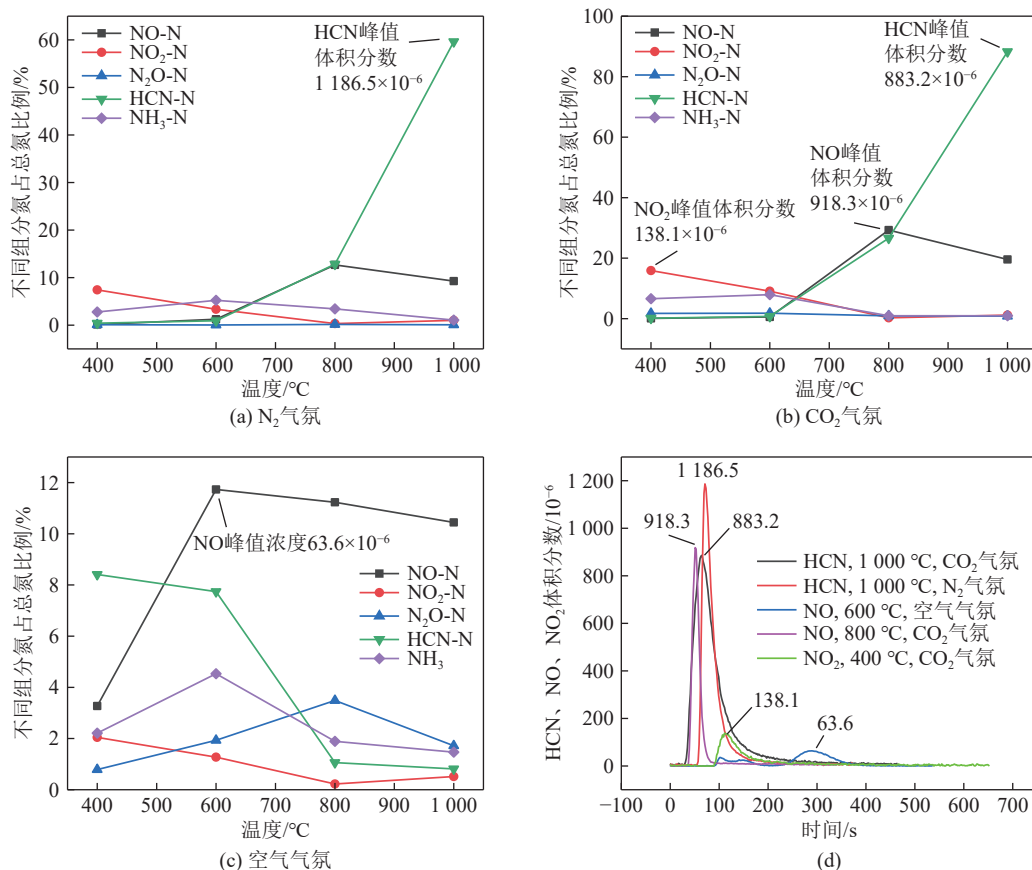


图 3 N₂、CO₂、空气 3 种气氛下不同含氮组分占总氮比例随温度变化关系

Fig.3 The nitrogen ratios of nitrogen containing species to the total nitrogen of samples under N₂, CO₂ and air ambiances

CO₂ 对反应的影响具有双重性^[17],一方面,CO₂ 消耗 H 自由基,表现为抑制反应,如式 (1) 所示;



另一方面,CO₂ 与碳表面发生气化反应,破坏 C-N 结构,使得更多的 N 原子能暴露在基体表面,表现为促进反应,如反应 (2) 所示,其中 C_f 为反应表面的活性空位。



CO₂ 对反应的最终效果却取决于抑制反应和促进反应哪个占据主导地位。根据 HCN 和 NO 的实验结果,在高温下,CO₂ 表现为促进反应,低温下表现为抑制反应。

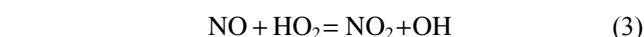
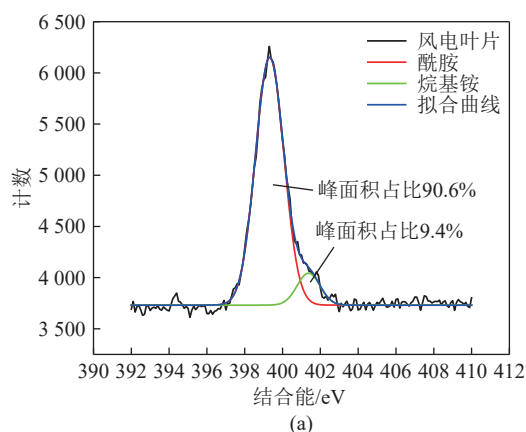
在空气气氛 600 ℃ 工况下,以 NO 形式释放的氮占总氮比例最大 (11.7%),随着温度增加,NO 释放量略有降低,HCN 则是与 NO 完全相反,在 400 ℃ 时占

总氮比例达到最大 (8.4%),随着温度增加,HCN 被空气氧化,释放量显著降低。对比在 800 ℃、1 000 ℃ 氮气气氛和空气气氛下 NO 生成量,发现空气气氛下 NO 形态氮占比与氮气气氛下 NO 形态氮占比非常接近 (相差小于 1.2%),这说明空气气氛下,NO 生成过程中,氧主要来自风电叶片材料内部自身,而非外部空气。这意味着中试应用采用热化学法技术路线时,传统的空气分级、燃料分级等降氮措施会失效,需要配合尾气净化装置才能有效脱除 NO。同时,空气气氛下,NO 中的氧来自叶片自身也能解释为何叶片燃烧时随着温度增加,NO 生成量降低。因为叶片中氮和碳同时竞争叶片内部氧,高温下,氧更多的与碳结合生成 CO 和 CO₂^[18],导致 NO 生成量下降。

考虑到环保要求超低排放的严格标准 (NO_x 小于 50 mg/m³),图 3d 还给出了典型工况的含氮组分体积分数随时间的演化曲线,峰值体积分数 (最大值) 也标

示在图 3a—图 3c 中。可以看到 HCN 峰值体积分数达到了 1185.5×10^{-6} , NO 峰值体积分数达到了 918.3×10^{-6} , 由于生成 NO 的氧来自风电叶片内部自身, 因此, 需要配套烟气净化装置才能实现 NO_x 达标。

在 3 种气氛下, 随着温度增加, NO_2 形态氮占总氮比例逐渐降低。400 °C 下, 在氮气和 CO_2 气氛中, NO_2 形态氮占总氮比例是最高的, 尤其是在 CO_2 气氛下, NO_2 形态氮占总氮比例达到了 15.9%, NO_2 峰值体积分数也达到了 138.1×10^{-6} , 是同温度下氮气气氛工况的 2 倍, 这说明 CO_2 对 NO_2 的生成有显著的促进作用, 但是与 CO_2 对 HCN 和 NO 的促进相反, 在 400 °C 低温下, CO_2 对 NO_2 促进作用明显, 在 1000 °C 高温下, CO_2 对 NO_2 促进作用不明显。NO₂ 的生成, 与反应 (3) 密切相关^[19-21]。



在 3 种气氛下, 随着温度增加, NH_3 、 N_2O 先增加后降低, 高温下, NH_3 和 N_2O 易分解。与 HCN 和 NO 相比, 这 2 个含氮组分占总氮比例较低, 这里不再主要分析。

为进一步分析风电叶片中的官能团结构, 对风电叶片样品进行了 XPS 分析。含氮官能团结果如图 4 所示。采用分峰拟合发现主要含氮官能团峰值位于 399.3 eV 和 401.5 eV 两处, 根据文献^[22]提供的 XPS 峰位置结果, 399.3 eV 处对应的是酰胺结构, 401.5 eV 处对应的是烷基胺结构。根据两个官能团各自峰面积, 计算得酰胺与烷基胺比例为 90.6%: 9.4%。胺类物质主要是在生产玻璃纤维布的过程中作为树脂类物质的固化剂而引入, 其是热化学处理过程中含氮污染物的主要来源。

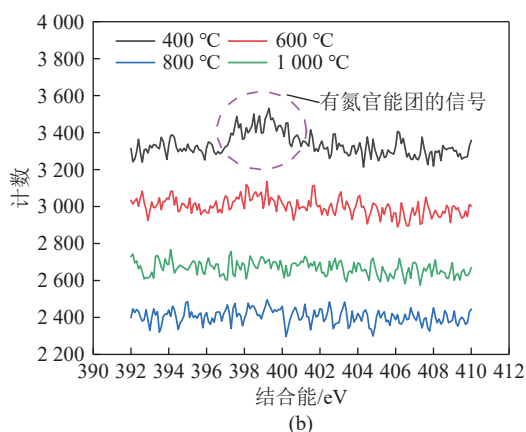


图 4 风电叶片元素氮 XPS 测试结果

Fig.4 The nitrogen XPS test of retired turbine wind blades

图 4b 展示的是在 400、600、800、1000 °C 四个温度下风电叶片在氮气气氛热解后样品的 XPS 分析结果。可以看到风电叶片样品在 400 °C 热解后, 仍能观察到氮官能团的信号 (虽然信号已变得较弱), 通过分峰拟合, 得到酰胺与烷基胺比例为 92.3%: 7.7%。热解温度升高后, 未能检测到氮官能团的信号, 说明风电叶片中的固相氮已全部向气相氮转化。

另外, 对风电叶片中的氧进行 XPS 分析, 结果如图 5 所示, 可以看到氧的峰值 531.5 eV, 氧官能团全部为羰基 $\text{C}=\text{O}$ 氧, 这与前文所述的氮官能团主体为酰胺是一致的。早些年服役的风电叶片在制造过程中, 所用的复合材料树脂基体主要为聚酯类树脂, 所占比例超过了 80%^[23]^[9], 其次为环氧树脂, 酚醛树脂和环氧树脂是近些年才开始在叶片加工中使用^[9]。

风电叶片中, 氯的来源主要是 PVC 芯材^[24-25], 用于代替部分巴萨轻木。XPS 结果显示, 风电叶片中的

氯为有机氯, 如图 6 所示。在 N_2 和 CO_2 气氛下, 以 HCl 形态释放的氯随温度变化关系不大, 在 400~1000 °C 下, 其占总氯比例在 5% 左右。但是在空气气氛下, 随着温度的增加, 以 HCl 形态释放的氯急剧减少, 类似

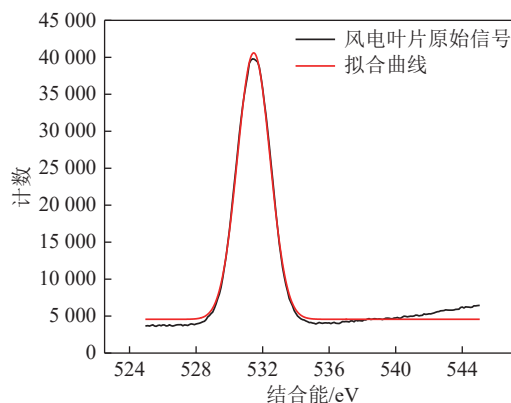


图 5 风电叶片元素氧 XPS 测试结果

Fig.5 The oxygen XPS test of retired turbine wind blades

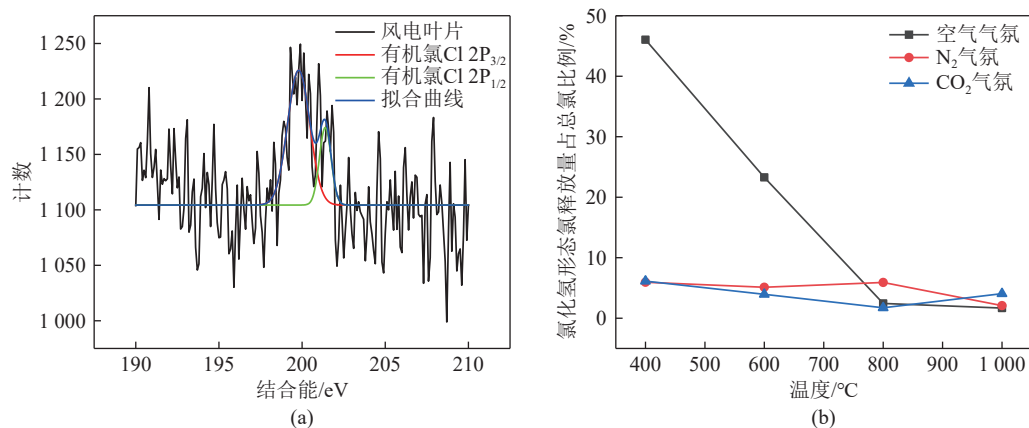


图6 风电叶片氯 XPS 分析和叶片在 N₂、CO₂、空气 3 种气氛下氯化氢形态氯占总氯比例

Fig.6 The chlorine XPS test of retired turbine wind blades and chlorine ratios of HCl to the total chlorine of samples under N₂, CO₂ and air ambiances

的规律文献[26]也曾经报道过。在 400 °C 下, HCl-Cl 释放量最大, 占总氯比例 46%。由于 C-Cl 键能较低, PVC 材料在 249 °C 下就能发生分解生成 HCl^[27], 随着反应温度的增加, Cl 更多以有机氯的形态释放。

图 7 给出了在空气气氛下, 400~1 000 °C 反应后的风电叶片扫描电镜微观结构。可以看到, 在 400 °C 下, 反应不完全, 反应后的玻璃纤维与树脂仍然粘连

紧密, 随着温度增加; 在 600、800 °C 下反应后, 包裹玻璃纤维的树脂脱除较为彻底, 在电镜视场下, 玻璃纤维呈现“一根一根”非常清晰的状态, 放大后测得玻璃纤维直径为 20 μm, 但同时也能观察到玻璃纤维断裂较为明显, 这表明热处理后, 玻璃纤维的强度下降, 随着温度进一步增加; 在 1 000 °C 下, 玻璃纤维发生了明显的熔融现象, 熔融后的玻纤表面呈现坑洼和多

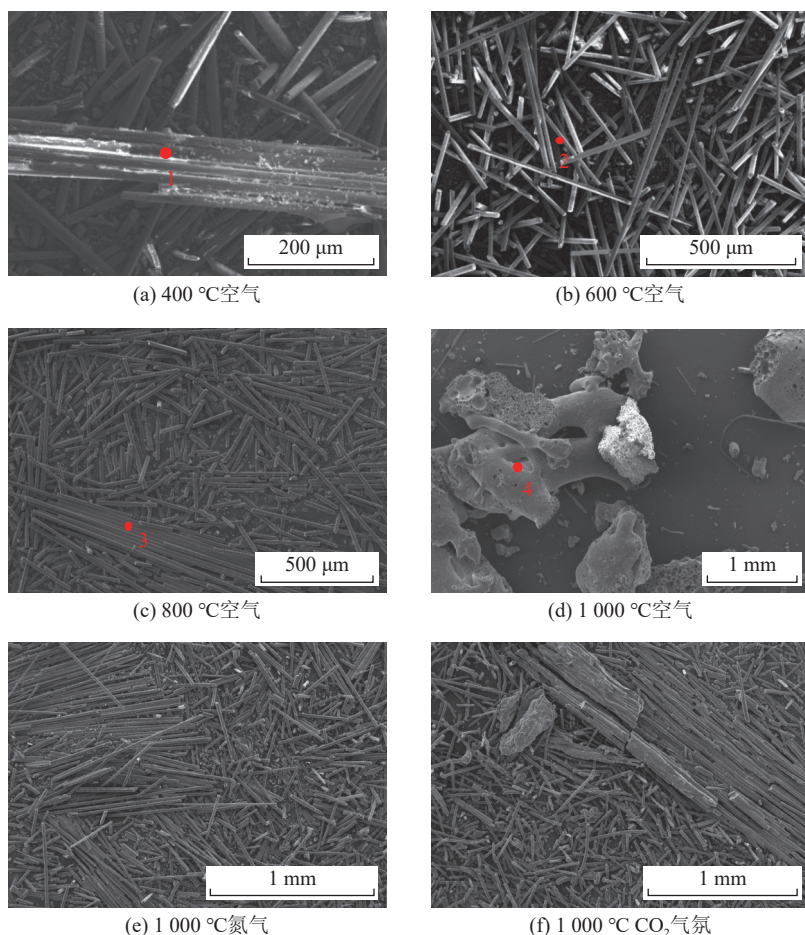


图7 风电叶片在空气气氛中不同温度下的反应后的扫描电镜形貌

Fig.7 The scanning electron microscopy morphology of retired turbine wind blades in air ambience under different temperatures

孔结构,这是高温下逃逸气体与熔融的玻纤表面相互作用的结果。对4幅图中典型位置进行EDS元素分析,结果如图8所示,可以看到玻璃纤维与树脂粘连时(数字1),元素分析的主要结果是碳,这与树脂类有机物是对应的,当玻璃纤维脱除掉树脂后,其元素分析结果主要是硅铝钙镁等无机氧化物(数字2、3),这与玻璃纤维成分是一致的,其中,硅主要来自叶腊石,是生产玻璃纤维的主要原料^[28]。另外,注意到碱金属Na、K元素未检测到,说明风电叶片中的玻璃纤维是无碱的,无碱玻纤市场价格要高于有碱玻纤,这对于提升风电叶片回收的经济性是有利的。熔融后的玻纤元素成分(数字4)与未熔融时相比,未发生显著变化,仍然是硅铝钙镁等无机氧化物。在氮气和CO₂气氛下的玻璃纤维形貌与在空气气氛下观察到的一致,不同点只是在1000℃下,在氮气和CO₂气氛中玻璃纤维未发生熔融现象。

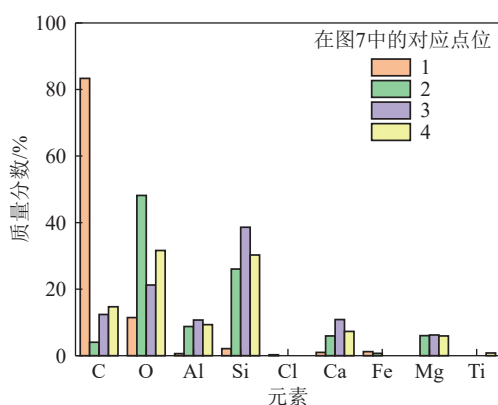


图8 风电叶片扫描电镜元素分析

Fig.8 The EDS analysis of scanning electron microscopy of retired turbine wind blades

4 结 论

1) 风电叶片热值较低,不足2000 kcal/kg,灰分较高,挥发分适中,固定碳较少,氮、氯元素含量较高,是主要的污染元素。目前退役风电叶片中的氧主要是羰基氧结构,氮主要是酰胺结构,氯主要是有机氯。

2) 气化和热解时,HCN和NO是主要的含氮污染物,燃烧时,NO是最主要的含氮污染物,并且,生成的NO中的氧主要来自风电叶片自身,而非外部空气,这意味着常规的空气分级等低氮燃烧技术在处理风电叶片时失效。

3) 气化和热解时,随着温度增加,HCN逐渐增加,在1000℃时,HCN形态氮是最主要的含氮组分,占总氮比例达到88.3%,而HCl形态氯占总氯比例波动不大,在5%左右。燃烧时,随着温度增加,HCl和

HCN逐渐减小,在400℃达到最大,占总氯、总氮比例分别为46%、8.4%。

4) CO₂对产物的分布有显著的促进作用,这种促进作用与温度、组分相关。1000℃高温下CO₂能显著促进HCN和NO的生成,但是在400℃低温下,促进作用并不明显。在400℃低温下,CO₂对NO₂的生成有显著的促进作用,1000℃高温下,CO₂对生成NO₂促进作用不明显。

参考文献(References):

- [1] JANI H K, SINGH KACHHWAHA S, NAGABABU G, et al. A brief review on recycling and reuse of wind turbine blade materials[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62: 7124–7130.
- [2] YANG W, KIM K H, LEE J. Upcycling of decommissioned wind turbine blades through pyrolysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376: 134292.
- [3] 张效林,杨梦豪,曹靖等.退役风电叶片资源化利用技术研究进展[J/OL]. *复合材料学报*: 1–11
Zhang Xiaolin, Yang Menghao, Cao Jing, etc. Research progress of decommissioned wind power blade resource utilization technology [J/OL]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*: 1–11[请检查引用格式]
- [4] 许淳瑶,葛立超,冯红翠,等.风力发电现状及叶片组成与回收利用综述[J]. *热力发电*, 2022, 51(9): 29–41.
XU Chunyao, GE Lichao, FENG Hongcui, et al. Review on status of wind power generation and composition and recycling of wind turbine blades[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(9): 29–41.
- [5] 郭盼,齐晓蕾,谢斐,等.浅析退役风电叶片处理回收与再利用[J]. *东方电气评论*, 2022, 36(4): 10–14.
GUO Pan, QI Xiaolei, XIE Fei, et al. Analysis on recovery and reuse of retirement wind turbine blades[J]. *Dongfang Electric Review*, 2022, 36(4): 10–14.
- [6] 张建川,张前峰,蔡红军.风力发电复合材料叶片废弃物的几种处理方法分析[J]. *材料科学与工程学报*, 2012, 30(3): 473–482.
ZHANG Jianchuan, ZHANG Qianfeng, CAI Hongjun. Analysis on treatment methods of composite blade wastes of wind turbines[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2012, 30(3): 473–482.
- [7] CHEN R Y, LI Q W, XU X K, et al. Comparative pyrolysis characteristics of representative commercial thermosetting plastic waste in inert and oxygenous atmosphere[J]. *Fuel*, 2019, 246: 212–221.
- [8] 胡辰玮,李彬,吴玉峰,等.废有机-无机复合材料热解回收技术现状与展望[J]. *材料导报*, 2021, 35(21): 21091–21098, 21112.
HU Chenwei, LI Bin, WU Yufeng, et al. Status and progress of recycling waste organic-inorganic composites by pyrolysis[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(21): 21091–21098, 21112.
- [9] 李国莱.腐蚀与防护全书-合成树脂及玻璃钢[M].北京:化学工业出版社,1995.
- [10] 王昌国,卢卫萍,秦燕.风力发电设备制造工艺[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [11] NAGLE A J, DELANEY E L, BANK L C, et al. A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades[J]. *Journal of*

- Cleaner Production, 2020, 277: 123321.
- [12] YOUSEF S, EIMONTAS J, STRIUGAS N, et al. Synthesis of value-added aromatic chemicals from catalytic pyrolysis of waste wind turbine blades and their kinetic analysis using artificial neural network[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2024, 177: 106330.
- [13] CHEN W M, YE M Y, LI M X, et al. Characteristics, kinetics and product distribution on pyrolysis process for waste wind turbine blades[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 169: 105859.
- [14] GE L C, LI X, FENG H C, et al. Analysis of the pyrolysis process, kinetics and products of the base components of waste wind turbine blades (epoxy resin and carbon fiber)[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 170: 105919.
- [15] YOUSEF S, EIMONTAS J, STRIUGAS N, et al. Recovery of styrene from waste wind turbine blades (fiberglass/polyester resin composites) using pyrolysis treatment and its kinetic behavior[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2024, 149(2): 521–538.
- [16] 雷志文. 废风机叶片热解特性及制备双酚 A 机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- LEI Zhiwen. Study on pyrolysis characteristics of waste fan blades and preparation mechanism of bisphenol A[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [17] XU M X, LI S Y, WU Y H, et al. Effects of CO₂ on the fuel nitrogen conversion during coal rapid pyrolysis[J]. *Fuel*, 2016, 184: 430–439.
- [18] 李良钰, 熊小鹤, 冯敬武, 等. 不同气氛下废弃风机叶片热转化产物研究[J]. *热力发电*, 2023, 52(3): 94–101.
- LI Liangyu, XIONG Xiaohe, FENG Jingwu, et al. Thermal conversion products of waste fan blades in different atmospheres[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(3): 94–101.
- [19] LIU S, LI H, LIEW C, et al. An experimental investigation of NO₂ emission characteristics of a heavy-duty H₂-diesel dual fuel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(18): 12015–12024.
- [20] LI Y, LI H L, GUO H S. A numerical investigation on NO₂ formation reaction pathway in a natural gas–diesel dual fuel engine[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 190: 337–348.
- [21] 需检查修改
- A numerical investigation on the formation of NO₂ and N₂O in laminar counterflow methane/n-heptane dual fuel flames
- [22] JANSEN R J J, VAN BEKKUM H. XPS of nitrogen-containing functional groups on activated carbon[J]. *Carbon*, 1995, 33(8): 1021–1027.
- [23] 吴玉莲, 黄雪艳, 方芳. 玻璃钢制品原料及界面设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [24] 梁小杰, 杨文涛, 游慧鹏, 谢宇飞, 刘宏伟, 张朝锋, 郑冰. 风电叶片用芯材应用进展[J]. *农业工程*, 2023, 13(10): 56–59.
- LIANG Xiaojie, YANG Wentao, YOU Huipeng, et al. Progress on application of core materials for wind turbine blades[J]. *Agricultural Engineering*, 2023, 13(10): 56–59.
- [25] 江一杭, 杨忠, 刘鲜红. 风电叶片 PVC 芯材的耐温性研究[J]. *天津科技*, 2021, 48(7): 38–39, 42.
- JIANG Yihang, YANG Zhong, LIU Xianhong. Study on temperature resistance of PVC core material for wind turbine blades[J]. *Tianjin Science & Technology*, 2021, 48(7): 38–39, 42.
- [26] 张永庆. 含氯高分子材料燃烧热分解氯化氢生成特性的研究[J]. *聚氯乙烯*, 1996, 24(4): 11–13.
- ZHANG Yongqing. Study on the formation characteristics of hydrogen chloride by thermal decomposition of chlorine-containing polymer materials during combustion[J]. *Polyvinyl Chloride*, 1996, 24(4): 11–13.
- [27] 杨明辉, 陈伟, 刘金和, 等. PVC 热解特性及 Cl 的析出过程研究[J]. *工业加热*, 2020, 49(5): 44–47.
- YANG Minghui, CHEN Yi, LIU Jinhe, et al. Study on the pyrolysis characteristics of PVC and the pyrolysis process of chlorine during PVC pyrolysis[J]. *Industrial Heating*, 2020, 49(5): 44–47.
- [28] 舒锋. 我国叶蜡石在玻璃纤维行业中的应用现状及发展趋势[J]. *玻璃纤维*, 2021(4): 39–41.
- SHU Feng. Application status and development trend of pyrophyllite in glass fiber industry in China[J]. *Fiber Glass*, 2021(4): 39–41.