DOI: 10.19666/j.rlfd.202602007

烟气热解回收废旧风电叶片技术研究

程广文[1]，赵新山[2]，徐明新[3]，杨 嵩[1]，郭中旭[1]，
靳廷雪[2]，兰 昊[1]，陈 卓[2]
（1. 西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054；
2. 华能聊城热电有限公司，山东 聊城 252000；
3. 华北电力大学新能源学院，北京 102206）

［摘 要］【目的】热解法是废旧风电叶片回收的主流技术，存在能耗高、次生污染大、回收纤维品质差等缺点，限制了其大规模工程应用。为解决上述问题，本文研究了燃煤烟气热解回收废旧风电叶片新技术。【方法】在模拟燃煤烟气工况下，考察了烟气温度、热解时间、烟气组分和加热方式对回收纤维品质的影响，分析了热解机理；同时，搭建中试试验台在真实烟气条件下验证了所开发的回收技术，并制定了工程应用方案。【结果】结果表明：用燃煤烟气直接加热风电叶片，可使叶片的树脂基体先碳化后氧化，得到较为纯净的玻璃纤维，从而实现风电叶片的回收利用。模拟烟气工况下，叶片热解最佳工艺是：烟气温度500~530 ℃，热解时间 4~5 h。烟气中 SO_2 对回收纤维品质无显著影响。回收得到的玻璃纤维纯度大于 99%，其拉伸强度较原纤维下降小于 10%。利用风机分别从电厂锅炉省煤器入口烟道和空气预热器出口烟道抽取不同烟温的烟气混合均匀，再高温除尘后（烟气温度控制在 400~500 ℃）进入特制的热解炉中与叶片直接接触，热解叶片，可回收得到玻璃纤维，同时热解尾气被实时送入电厂锅炉炉膛，使尾气中的焦油和挥发性组分充分燃烧，生成 CO_2、H_2O 和少量 NO_x 等污染物，借助电厂现有环保装置协同处置后排入大气。热解过程微放热，热解尾气对电厂污染物排放影响甚微。【结论】烟气热解作为新型回收技术，清洁高效、能耗低、工程可实施性强，可有效破解风机退役引发的废旧叶片处置难题。

［关 键 词］风电叶片；回收；燃煤烟气；热解；氧化

［引用本文格式］程广文，赵新山，徐明新，等. 烟气热解回收废旧风电叶片技术研究[J]. 热力发电，2026, 55(10): 119.
Cheng G W, Zhao X S, Xu M X, et al. Waste wind turbine blades recycling technology using flue gas pyrolysis[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(10): 119.

Waste wind turbine blades recycling technology using flue gas pyrolysis

Cheng Guangwen[1], Zhao Xinshan[2], Xu Mingxin[3], Yang Song[1], Guo Zhongxu[1],
Jin Tingxue[2], Lan Hao[1], Chen Zhuo[2]
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. Huaneng Liaocheng Thermal Power Co., Ltd., Liaocheng 252000, China;
3. School of New Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: [Objective] Pyrolysis represents a mainstream technology for the recycling of waste wind turbine blades. Nevertheless, it is plagued by several shortcomings, including high energy consumption, severe secondary pollution, and inferior quality of recovered fibers, which have restricted its large-scale engineering application. To tackle the aforementioned issues, a novel technology for recycling waste wind turbine blades via pyrolysis using coal-fired flue gas was investigated in this study. [Methods] Under simulated coal-fired flue gas conditions, the influences of flue gas temperature, pyrolysis duration, flue gas composition, and heating mode on the quality of recovered fibers were examined, and the corresponding pyrolysis mechanism was analyzed. Meanwhile, a pilot-scale test rig was

收 稿 日 期：2026-02-04 修 回 日 期：2026-04-08 接 受 日 期：2026-05-16
基 金 项 目：中国华能集团有限公司总部科技项目（HNKJ25-H206）
Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ25-H206)
第一作者简介：程广文（1980），男，博士，研究员，主要研究方向为新能源固废回收技术开发，chengguangwen@tpri.com.cn。

established to validate the developed recycling technology under real flue gas conditions, and an engineering application scheme was formulated. [Results] The results indicate that direct heating of wind turbine blades with coal-fired flue gas can induce sequential carbonization and subsequent oxidation of the resin matrix in the blades, yielding relatively pure glass fibers and thus realizing the recycling of waste wind turbine blades. Under simulated flue gas conditions, the optimal pyrolysis process parameters for the blades are determined as follows: a flue gas temperature of 500-530 ℃ and a pyrolysis time of 4-5 h. SO_2 in the flue gas exerts no significant effect on the quality of recovered fibers. The purity of the recovered glass fibers is higher than 99%, and the reduction in tensile strength is less than 10% compared with virgin fibers. Flue gases at different temperatures are separately extracted from the inlet flue of the economizer and the outlet flue of the air preheater in the power plant boiler by a fan, mixed uniformly, and subjected to high-temperature dust removal (with the flue gas temperature controlled at 400-500 ℃) before entering a specially designed pyrolysis furnace for direct contact with waste blades to accomplish pyrolysis. Glass fibers can be recovered from the pyrolyzed blades, while the pyrolysis tail gas is synchronously fed into the furnace of the power plant boiler to achieve sufficient combustion of tar and volatile components in the tail gas, generating CO_2, H_2O, and a small amount of NO_x. The treated tail gas is finally discharged after collaborative disposal by the existing environmental protection facilities of the power plant. The pyrolysis process is slightly exothermic, and the pyrolysis tail gas has a negligible impact on the pollutant emission performance of the power plant. [Conclusion] As an innovative recycling technology, flue gas pyrolysis features cleanliness, high efficiency, low energy consumption and strong engineering feasibility, which can effectively address the disposal challenges of waste blades caused by decommissioned wind turbines.

Key words: wind turbine blade; recycling; coal-fired flue gas; pyrolysis; oxidation

随着风电装机容量的快速增加，以及首批投运风电机组的逐渐退役，废旧风电叶片已成为一种亟待处理的高附加值新兴固废。风电叶片的主要材质为玻璃纤维增强环氧树脂复合材料，通过热解方式将其降解为焦油、热解碳和玻璃纤维再进行资源化利用，是近年来学术界处理该种固废的主要思路之一[1-6]。例如 Ma 等人[7]系统研究了纤维增强环氧树脂复合材料的热解动力学及热解产物，发现高浓度的氧可加速环氧树脂的初级分解并降低（热解）炭的氧化温度。Yousef 等人[8]研究了 ZSM-5 型沸石在环氧树脂复合材料热解过程中的催化作用，发现该催化剂可提高热解尾气中芳香族化合物的含量与产量。Lopez、Guo 等人[9-10]对环氧树脂复合材料的热解工艺及关键参数进行了优化，发现高温热解可回收得到洁净的增强纤维，若对热解尾气进行高温再处理可获得富氢气体。Wu 等人[11]研究了在 $KCl/ZnCl_2$ 熔盐体系中热解回收环氧树脂复合材料的可能性，发现在 TiO_2 催化剂存在下，该熔盐体系能在 350 ℃下快速（数十分钟）将复合材料降解，回收得到增强纤维。上述研究表明热解法可用于处理废旧风电叶片，但在工程应用时存在以下问题：1）高温导致能耗高且对回收纤维的热损伤严重，影响回收价值；2）热解尾气（包括焦油）难处理，易产生次生环境污染。

鉴于此，本文提出以燃煤烟气为气氛热解回收风电叶片，搭建模拟烟气试验台研究了热解温度、热解时间、烟气组分，以及加热方式对回收纤维性能的影响，同时，分析了热解机理；接着搭建中试试验台在真实烟气条件下验证了所得的回收技术，最后制定了工程应用方案。该研究结果将为解决废旧风电叶片这种新兴工业固废提供新思路，具有重要的科学意义与工程价值。

1 材料与方法

1.1 原料

研究对象风电叶片为华能某风场退役叶片，拆除金属构件后切割成块，其长×宽×高为 80 mm×80 mm×(30~40) mm。

1.2 模拟烟气实验

实验室搭建模拟烟气试验台，如图 1 所示。试验台主要由配气系统、反应炉系统及尾气处理系统 3 部分组成。选取燃煤烟气的基本组成（N_2+O_2）和有可能对回收过程产生影响的组分（SO_2）组成模拟烟气，这 3 种气体均由相应的高压气瓶供气，质量流量计定量，经混气罐混合后进入反应炉系统。反应炉系统由三温区管式炉、石英管和相应的温控、密封件组成；三温区管式炉为可开启卧式，炉膛直径 100 mm，恒温区长 700 mm，加热温度（可调）为室温至 1 000 ℃，加热精度±2 ℃；石英管进气端为平口，出气端为收口；由冷阱和活性炭组成尾气处理系统，冷阱用来冷却尾气并收集焦油，活性炭用来吸附去除少量小分子污染物气体。

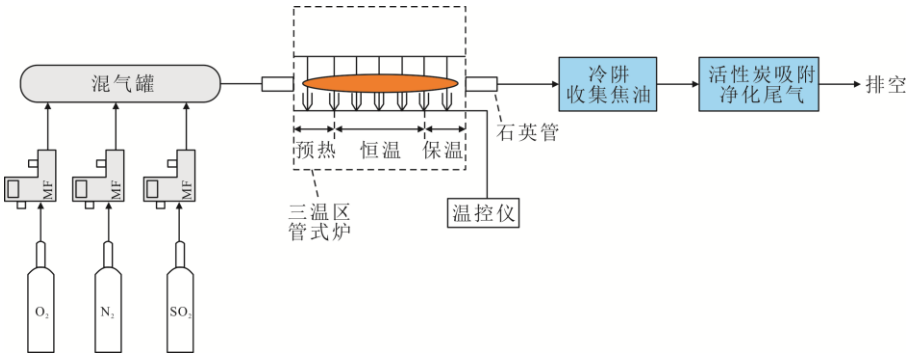


图 1 模拟烟气试验台示意

Fig.1 Schematic diagram of the simulated flue gas experimental bench

将切割成块的风电叶片（特指玻璃纤维增强环氧树脂复合材料，下同）试样放入石英管，再将石英管置入管式炉中，并使试样处于恒温区。设置不同的温度及模拟烟气条件热解叶片。

1.3 中试试验

在华能某电厂搭建中试试验台，如图 2 所示。试验台由烟道、高温除尘器、回收反应炉和变频风机等设备组成。试验台入口烟气取自电厂 4 号机组（600 MW）锅炉立式低温过热器附近，依次经过除尘器和回收反应炉后，经风机返回锅炉炉膛。叶片放置在回收反应炉中与烟气直接接触进行热解氧化，反应结束后得到回收纤维，从反应炉出料口排出。烟温随电厂负荷实时波动，烟气量通过风机频率控制。试验台总功率为 37.5 kW，设计烟气量 3 000 m^3/h（标准工况，下同），单批次叶片处理量为 250 kg，叶片样品尺寸 25 cm×25 cm×(30~40) mm。热解回收炉进口烟气条件：烟温 400~500 ℃，烟气中氧体积分数 6%~9%，NO_x 体积分数为 150~160 μL/L，SO_2 体积分数为 480~530 μL/L，粉尘质量浓度为 1~3 mg/m^3，H_2O 体积分数为 9%~10%。



图 2 中试试验台现场照片

Fig.2 Picture of the pilot test bench

1.4 叶片及纤维表征

回收纤维纯度测试：称取质量为 m_0 的回收纤维样品放入坩埚后，称重记为 m_1，再将带有样品的坩埚置于 600 ℃马弗炉中恒温加热 30 min，然后将坩埚取出放入干燥器中冷却至室温，称重记为 m_2，回收纤维纯度 C 则为：

$$C = 1 - \frac{m_1 - m_2}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

用光学显微镜观测回收纤维表面状态，以表征回收纤维纯度。

回收纤维单丝拉伸强度测试：用 YG004 单纤维电子强力仪测试回收玻纤单丝的强力值（F_b/N），用光学显微镜测试纤维单丝的直径（d/m），纤维单丝的拉伸强度 $\sigma = 4F_b/(\pi d^2)$。

叶片的热失重测试在 TGA/DSC 3+仪器上完成。测试条件为空气气氛，升温速率为 10、20、30 ℃/min。

2 结果与讨论

2.1 热解温度

图 3 为叶片在空气气氛、不同升温速率下的热失重曲线。由图 3 可见，在温度 250~350 ℃和 400~550 ℃之间明显存在 2 个失重平台，说明叶片材料的热解可能主要集中在上述 2 个温度区间。此外，由于测试气氛中的氧气参与了热解反应，而氧气与样品的接触时间和接触几率会影响热解速率，因此不同升温速率下样品的热失重率略有不同。

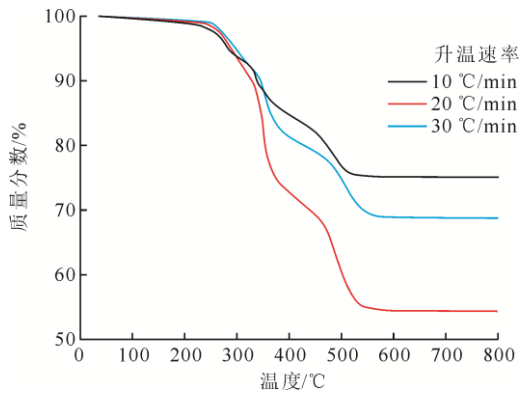


图 3 叶片的热失重曲线

Fig.3 TGA curves of the wind turbine blades

图 4 为叶片在管式炉中 350 ℃模拟烟气条件下（N_2 + 6% O_2 + 1 000 μL/L SO_2，下同）热解 5 h 得到的产物照片，产物主要为纤维与热解碳的混合物。表明叶片在此温度下主要发生的是基体树脂热解成碳，无法实现叶片中玻纤的回收。



图 4 叶片在 350 ℃模拟烟气条件下的热解产物
Fig.4 Pyrolysis products of the wind turbine blades in the simulated flue gas at 350 ℃

图 5—图 6 为叶片在管式炉中 550 ℃模拟烟气条件下热解 4 h 得到的产物照片，产物主要为白色的玻璃纤维。说明要从废旧风电叶片中回收纤维，其热解温度应处于图 3 中的高温平台段即 400~550 ℃。



图 5 叶片在 550 ℃模拟烟气下的热解产物
Fig.5 Pyrolysis products of the wind turbine blades in the simulated flue gas at 550 ℃

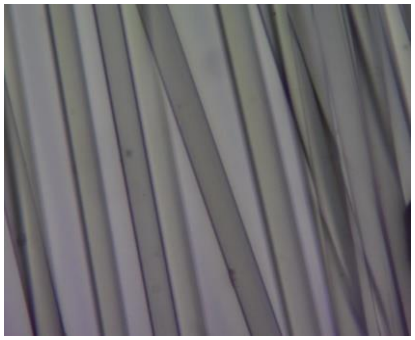


图 6 叶片在 550 ℃模拟烟气下的热解产物显微镜照片（放大倍数为 350）
Fig.6 Microscope image of pyrolysis products of the wind turbine blades in the simulated flue gas at 550 ℃ (magnification: 350×)

固定模拟烟气条件（流量 15 L/min，6% O_2，1 000 μL/L SO_2）、叶片试样尺寸 80 mm×80 mm×40 mm、以及热解时间 5 h，改变热解温度，测得回收纤维品质如表 1 所示。从表 1 可看出，400 ℃以下、有限的热解时间内，很难获得较高纯度的玻璃纤维，但热解温度过高如 550 ℃易对纤维强度产生影响。风电叶片用玻纤单丝的原始拉伸强度在 2 200 MPa 左右，当热解温度大于 530 ℃，得到的玻纤其拉伸强度较原纤维下降超过 10%。因此，综合考虑确定叶片热解最佳温度范围为 500~530 ℃。

表 1 热解温度对回收纤维品质的影响
Tab.1 Effect of pyrolysis temperature on the recycled fiber

热解温度/℃	回收纤维品质		
	纯度/%	拉伸强度/MPa	外观
410	55.9	无法测	黑色产物，热解碳完全包裹玻纤
440	82.5	无法测	灰白色产物，热解碳部分包裹玻纤
480	95.7	1 985	白色玻纤+少量热解碳粉
500	99.1	2 134	白色玻纤
530	99.8	2 045	白色玻纤
550	99.9	1 961	白色玻纤

2.2 热解时间

固定模拟烟气条件（流量 15 L/min，6% O_2，1 000 μL/L SO_2）、叶片试样尺寸 80 mm×80 mm×40 mm、以及热解温度为 530 ℃，而改变热解时间，测得回收纤维品质如表 2 所示。从表 2 可看出，随着反应时间的增加，回收纤维纯度增加，但强度略有下降。因此，叶片的最佳热解时间应控制在 4~5 h。

表 2 热解时间对回收纤维品质的影响
Tab.2 Effect of pyrolysis time on the recycled fiber quality

热解时间/h	回收纤维品质		
	纯度/%	拉伸强度/MPa	外观
1	56.1	无法测	黑色产物，热解碳完全包裹玻纤
2	84.3	无法测	灰白色产物，热解碳部分包裹玻纤
3	92.1	2 145	白色玻纤+少量热解碳粉
4	98.5	2 134	白色玻纤
5	99.3	2 030	白色玻纤
6	99.4	2 001	白色玻纤

2.3 烟气组分

固定模拟烟气的流量 15 L/min、6% O_2，叶片试样尺寸 80 mm×80 mm×40 mm，热解温度为 530 ℃，热解时间为 5 h，改变烟气中 SO_2 体积分数，测得

回收纤维品质如表 3 所示。可以看出，在常规燃煤烟气中，SO_2 对回收纤维的纯度与强度影响不大，可能与反应温度偏低或反应时间偏短有关。

表 3 烟气中 SO_2 对回收纤维品质的影响
Tab.3 Effect of SO_2 in flue gas on the recycled fiber quality

SO_2 体积分数/($\mu L \cdot L^{-1}$)	回收纤维品质		
	纯度/%	拉伸强度/MPa	外观
500	99.1	2 140	白色玻纤，直径 1~12 μm
1000	99.3	2 142	白色玻纤，直径 1~12 μm
1 500	99.1	2 138	白色玻纤，直径 1~12 μm

2.4 加热方式

叶片回收过程中，有 2 种加热方式：一种为高温烟气与叶片直接接触（上述研究均属这种方式）；另一种是烟气与叶片不直接接触，烟气只加热热解炉使炉膛升温来热解叶片（间接加热）。从理论上讲，间接加热方式可保障回收纤维的高品质，且尾气处理量小。为了探索这种加热方式的可行性，将试验台中的模拟烟气关闭，直接用管式炉加热带有风电叶片试样的石英管，在 500~550 ℃，加热时长 8~10 h 的条件下，均无法获得玻璃纤维，只能得到热解碳包裹玻纤的黑色产物（图 7）。这可能与叶片热解的微观过程有关。



图 7 间接加热方式得到的回收产物
Fig.7 Products recycled by indirect heating

2.5 热解机理

根据上述实验结果及文献研究[12-18]，提出利用高温燃煤烟气回收风电叶片，反应路径如图 8 所示。

叶片（纤维+树脂）$\xrightarrow{\text{特定气氛}}$ 纤维 + 碳 + 尾气↑

纤维 + 碳 $\xrightarrow{\text{特定气氛}}$ 纤维 + CO_2↑

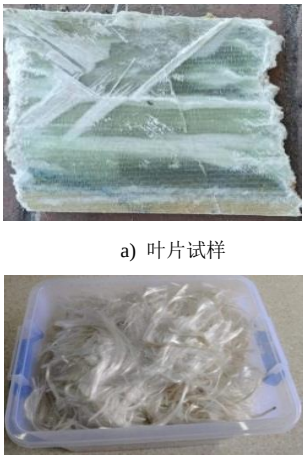
图 8 风电叶片在烟气中的反应路径
Fig.8 Pyrolysis reaction pathway of the wind turbine blades in flue gas

叶片（玻璃纤维增强环氧树脂复合材料）在（模拟）燃煤烟气这种欠氧（含氧量 4%~6%）环境下，先于较低的温度下发生基体树脂的裂解，生成玻纤、裂解碳（图 4）和尾气；接着裂解碳与烟气中的氧气在高温下反应生成二氧化碳（CO_2），最后留下较为纯净的玻璃纤维（图 5）。

由于间接加热方式，裂解炉中的氧气没法得到有效补充，特别在反应后期，裂解炉中处于严重缺氧甚至零氧含量的状态，导致裂解碳没法有效转化为二氧化碳，故该方式无法回收得到纯净的玻璃纤维，只能得到图 7 中的黑色产物。

2.6 中试验证

向回收反应炉中添加 250 kg 叶片，调控风机频率抽取 2 600 m^3/h 的燃煤烟气，对叶片进行热解回收，得到 131 kg 玻璃纤维（图 9）。同时，测试回收反应炉进出口烟温及出口烟气中 NO_x 体积分数，结果见图 10—图 11。



a) 叶片试样

b) 回收纤维

图 9 中试时的叶片样品及回收纤维样品照片
Fig.9 Pictures of the blade samples and the recycled fiber in the pilot test

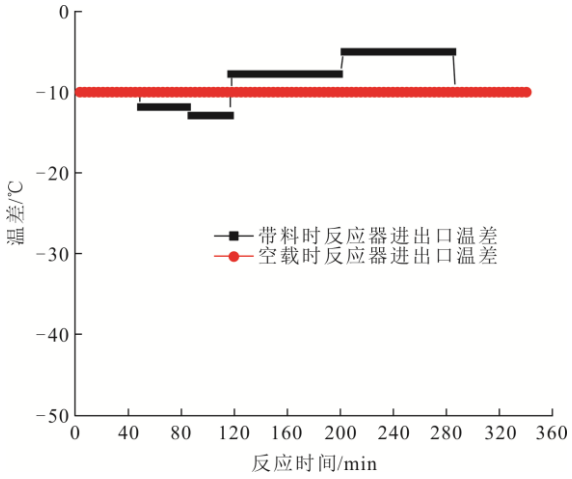


图 10 中试时反应炉进出口烟温的变化
Fig.10 Changes of the flue gas temperature at inlet and outlet of the reactor during the pilot test

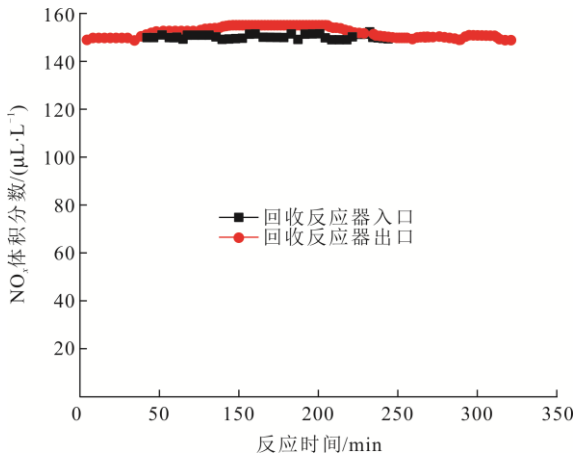


图 11 中试反应炉进出口烟气中 NO_x 体积分数变化

Fig.11 Changes of the NO_x volume fraction in flue gas at inlet and outlet of the reactor during the pilot test

一般来说，风电叶片中纤维的质量百分数在53%左右。根据图 9 结果，可以推断所开发的技术可 100%回收废旧叶片中的纤维。叶片回收过程中，伴随着热解和氧化过程，前者吸热后者放热[12,17,19]，由图 10 可见：回收反应开始阶段，回收反应炉进出口烟温差较大，说明此阶段以热解反应为主；回收反应后期，反应炉进出口烟温差明显缩小，说明此阶段以氧化反应为主。由于叶片成型过程中通常以有机胺作固化剂，热解过程中会生成 NO_x[20-21]。从图 11 可看出，回收反应的早、中期确实存在明显的 NO_x 释放，导致原烟气中 NO_x 体积分数增加，但增加幅度较小（<3%），满足电厂脱硝工艺要求，即回收过程对电厂污染物排放影响甚微。

2.7 工程方案

根据前文研究结果，制定燃煤电厂协同处理废旧风电叶片的工艺路线如图 12 所示。从电厂锅炉省煤器之前和空气预热器之后分别引出 2 路不同烟温的烟气混合均匀，高温除尘后（烟温 400~500 ℃）进入特制的叶片回收炉中与叶片直接接触，热解叶片并回收叶片中的玻璃纤维，热解尾气经风机送入电厂二次风道或直接送入锅炉炉膛，充分燃烧烟气中的焦油组分，生成少量 NO_x、CO_2、H_2O 等随电厂污染物一起经烟气净化装置脱除后排入大气。主要设备包括烟气混合器、高温除尘器、回收炉和风机等，大多为常规工业设备，便于设计与加工。

整个工艺工程对电厂热效率及污染物排放的影响甚微。以华能某电厂 4 号机组为例，在设计煤种下，BMCR 工况烟气量约 1 695 000 m^3/h，抽取烟气 3 000 m^3/h 分 4 批处理 1 000 kg 废旧风电叶片。计算可知：抽取烟气量占机组满负荷烟气量的 0.18%；处理每批叶片释放 NO_x 约 255 mol，释放 CO_2 约 86 kg；这些污染物如果释放到二次风（按 1×10^6 kg/h）中，二次风中 NO_x 体积分数增加约为 7 μL/L，二氧化碳体积分数增加约 56 μL/L；热解尾气中混有微量焦油，由于尾气烟温较高，焦油不会冷凝析出；因此对电厂烟气污染物初始含量影响可忽略不计。同时，根据中试结果，整个回收过程表现为放热，以致热解尾气温度较热解前烟气温度略微升高，因此回收过程对电厂热效率呈正面影响。

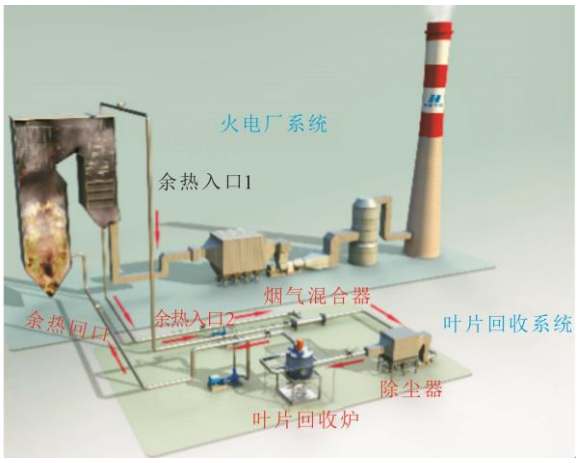


图 12 燃煤烟气回收风电叶片工程实施方案

Fig.12 Engineering implementation scheme for recycling the waste wind turbine blades by coal-fired flue gas

3 结 论

用燃煤烟气直接加热风电叶片，可使叶片的树脂基体先碳化后氧化，进而得到较为纯净的玻璃纤维，从而实现风电叶片的回收利用。烟气温度过高或过低、热解时间过长或过短都会显著影响回收纤维品质，烟气中 SO_2 含量对回收纤维影响甚微。从电厂锅炉尾部烟道引出少量高温烟气除尘后送入特制热解炉进行叶片回收，热解尾气经电厂二次风道进入锅炉炉膛燃烧后随电厂污染物一起净化后排入大气。整个回收过程对电厂锅炉热效率及污染物排放均影响甚微。

［参 考 文 献］

［1］ 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.
Xu C Y, Ge L C, Feng H C, 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.

［2］ 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(Part 13): 7124.
[3] Yang W, Kim K H, Lee J. Upcycling of decommissioned wind turbine blades through pyrolysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376: 134292.
[4] Fonte R, Xydis G. Wind turbine blade recycling: an evaluation of the European market potential for recycled composite materials[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 287: 112269.
[5] Chen Y, Liang S, Xiao K K, et al. A cost-effective strategy for metal recovery from waste printed circuit boards via crushing pretreatment combined with pyrolysis: effects of particle size and pyrolysis temperature[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280(Part 2): 124505.
[6] Rahimizadeh A, Tahir M, Fayazbakhsh K, et al. Tensile properties and interfacial shear strength of recycled fibers from wind turbine waste[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 131: 105786.
[7] Ma C, Sanchez-Rodriguez D, Kamo T. A comprehensive study on the oxidative pyrolysis of epoxy resin from fiber/epoxy composites: product characteristics and kinetics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 412: 125329.
[8] Yousef S, Kiminaitė I, Eimontas J, et al. Catalytic pyrolysis kinetic behaviour of glass fibre-reinforced epoxy resin composites over ZSM-5 zeolite catalyst[J]. Fuel, 2022, 315: 123235.
[9] Lopez-Urionabarrenechea A, Gastelu N, Acha E, et al. Production of hydrogen-rich gases in the recycling process of residual carbon fiber reinforced polymers by pyrolysis[J]. Waste Management, 2021, 128: 73.
[10] Guo L R, Xu L, Ren Y Y, et al. Research on a two-step pyrolysis-oxidation process of carbon fiber-reinforced epoxy resin-based composites and analysis of product properties[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(3): 107510.
[11] Wu T Y, Zhan W W, Jia X L, et al. Solvent-free rapid degradation of epoxy composites and recycling application of high performance carbon fibers through the synergic catalysis effect of molten salts and titanium dioxide[J]. Polymer Degradation and Stability, 2022, 196: 109849.
[12] Serras-Malillos A, Acha E, Lopez-Urionabarrenechea A, et al. Composite waste recycling: predictive simulation of the pyrolysis vapours and gases upgrading process in aspen plus[J]. Chemosphere, 2022, 300: 134499.
[13] Irisawa T, Aratake R, Hanai M, et al. Elucidation of damage factors to recycled carbon fibers recovered from CFRPs by pyrolysis for finding optimal recovery conditions[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 218: 108939.
[14] Mazzocchetti L, Benelli T, D'Angelo E, et al. Validation of carbon fibers recycling by pyro-gasification: the influence of oxidation conditions to obtain clean fibers and promote fiber/matrix adhesion in epoxy composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 112: 504.
[15] Tranchard P, Duquesne S, Samyn F, et al. Kinetic analysis of the thermal decomposition of a carbon fibre-reinforced epoxy resin laminate[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017, 126: 14.
[16] Liu J X, Wang H L, Zhang W J, et al. Mechanistic insights into catalysis of in-situ iron on pyrolysis of waste printed circuit boards: comparative study of kinetics, products, and reaction mechanism[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 431: 128612.
[17] Dwyer D B, Gallego N C, Niedziela J L, et al. Product specific thermal degradation kinetics of bisphenol F epoxy in inert and oxidative atmospheres using evolved gas analysis-mass spectrometry[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2022, 165: 105563.
[18] 宋金梅, 刘辉, 王雷, 等. 废弃碳纤维/环氧树脂复合材料的热解特性及动力学研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(1): 47.
Song J M, Liu H, Wang L, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of scrap carbon fiber reinforced epoxy resin matrix composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/ Composites, 2019(1): 47.
[19] Meyer L O, Schulte K, Grove-Nielsen E. CFRP-recycling following a pyrolysis route: process optimization and potentials[J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(9): 1121.
[20] Xiong X H, Li L Y, Chen F L, et al. Typical pollutant species evolution behaviors study in retired wind turbine blade and coal thermal conversion process[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2022, 168: 105771.
[21] Guo W J, Bai S X, Ye Y C. High-value-added reutilization of resin pyrolytic oil: pyrolysis process, oil detailed composition, and properties of pyrolytic oil-based composites[J]. European Polymer Journal, 2022, 166: 110969.

（责任编辑　杨嘉蕾）