

DOI: 10.19666/j.rlfd.202507127

燃煤锅炉耦合风电叶片热解气化方案研究

张东旺^{1,2}, 滕达³, 周托², 杨海瑞², 徐波⁴, 别如山¹, 张曼²

(1. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;

3. 国能龙源环保有限公司, 北京 100039;

4. 北京巴布科克·威尔科克斯有限公司, 北京 100043)

[摘要] 风电机组“退役潮”临近, 大量退役风电叶片的无害化处理是风电产业实现完整绿色闭环的重要瓶颈。在国家积极实施煤电节能降碳改造的背景下, 燃煤锅炉协同处理退役风电叶片可以实现固废的减量化、资源化、无害化。针对退役风电叶片规模化连续热处理的需求, 提出一种燃煤锅炉耦合风电叶片热解气化的工艺路线; 通过抽取锅炉烟气作为热解气化的热源, 热解气化产生的可燃油气送入炉膛燃烧, 简化了风电叶片处理流程, 减少了初投资。采用 ASPEN Plus 软件对该工艺进行了模拟和验证, 结果表明: 当风电叶片的处理速度为 1 t/h 时, 抽取总烟气的比例不超过 0.6%, 即可满足热解气化的能量需求; 基于 7 MW 的链条炉进行中试试验研究, 发现烟气中含氧量为 5%~10% 时, 可以通过“一步热解气化”得到干净的玻璃纤维; 基于模拟结果和试验数据, 提出一种带有烟气调质协同处理工艺, 即通过掺混省煤器出口烟气、加入空气的方式, 控制烟气温度为 600~700 °C、含氧量为 5%~10%, 以提高回收纤维的强度, 并进一步简化风电叶片处理流程, 为风电叶片的规模化处理提供参考。

[关键词] 退役风电叶片; 热解气化; 耦合锅炉; ASPEN Plus 软件; 烟气再循环

[引用本文格式] 张东旺, 滕达, 周托, 等. 燃煤锅炉耦合风电叶片热解气化方案研究[J]. 热力发电, 2026, 55(1): 20-29.
ZHANG Dongwang, TENG Da, ZHOU Tuo, et al. Research on the pyrolysis and gasification scheme of coal-fired boilers coupled with wind turbine blades[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 20-29.

Research on the pyrolysis and gasification scheme of coal-fired boilers coupled with wind turbine blades

ZHANG Dongwang^{1,2}, TENG Da³, ZHOU Tuo², YANG Hairui², XU Bo⁴, BIE Rushan¹, ZHANG Man²

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. China Energy Longyuan Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100039, China;

4. Babcock & Wilcox Beijing Co., Ltd., Beijing 100043, China)

Abstract: The “retirement wave” of wind turbines is approaching, and the harmless treatment of a large number of decommissioned wind turbine blades is an important bottleneck for the wind power industry to achieve a complete green closed loop. Under the background of the country’s active implementation of energy conservation and carbon reduction renovations in coal-fired power plants, the co-processing of decommissioned wind turbine blades by coal-fired boilers can achieve the reduction, resource utilization and harmless treatment of solid waste. In response to the demand for large-scale continuous heat treatment of decommissioned wind turbine blades, a process route of

收稿日期: 2025-07-23 修回日期: 2025-08-19 接受日期: 2025-08-25 网络首发日期: 2025-10-24

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目 (2024B03031)

Supported by: Key Research and Development Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2024B03031)

第一作者简介: 张东旺 (1996), 男, 博士研究生, 主要研究方向为退役风电叶片处理技术, 18810551680@163.com。

通信作者简介: 张曼 (1971), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为循环流化床燃烧技术, zhangman@mail.tsinghua.edu.cn;

别如山 (1965), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为循环流化床燃煤锅炉技术, Rushan@hit.edu.cn。

coupling coal-fired boilers with pyrolysis-gasification of wind turbine blades is proposed. By extracting the flue gas from the boiler as the heat source for pyrolysis-gasification, the combustible oil and gas produced by pyrolysis-gasification are sent into the furnace for combustion, simplifying the processing procedure of wind turbine blades and reducing the initial investment. The process was simulated and verified by using Aspen Plus software. The results indicate that when the processing rate of wind turbine blades was 1 t/h, the proportion of flue gas extracted did not exceed 0.6%, thereby meeting the energy requirements for pyrolysis-gasification. A pilot-scale experimental study was conducted based on a 7 MW chain grate boiler, and it was found that when the oxygen volume fraction in the flue gas was 5%~10%, clean glass fibers could be obtained through "one-step pyrolysis-gasification". Based on both simulation results and experimental data, a flue gas conditioning-based integrated treatment process was proposed: control the flue gas temperature at 600~700 °C and the oxygen volume fraction at 5%~10% by blending flue gas from the economizer outlet and adding air, so as to enhance the strength of the recovered fibers and further simplify the wind turbine blade treatment process, providing a reference for the large-scale treatment of wind turbine blades.

Key words: decommissioned wind turbine blades; pyrolysis-gasification; coupled with boiler; ASPEN Plus; flue gas recirculation

风能由于其经济、高效、可持续、近零排放等优势,在过去几十年得到快速发展,中国风电装机容量已连续 15 年居全球第一^[1-3]。然而,风力机组的设计寿命通常为 20~25 年^[4],“以大代小”等技术改造方案的实施导致部分机组提前退役。2025 年是第 1 波大规模风电机组“退役潮”,退役机组达 1 800 多台,退役规模超 1.2 GW^[5]。风电机组退役将产生大量固废,其中叶片是最难回收处理的部分,每千瓦的风电机组需要 10 kg 的叶片材料^[6]。以 3 MW 风电机组为例,每个叶片质量达 8~15 t。叶片的主要成分为玻璃纤维增强树脂热固性复合材料,有着轻质高强、耐腐蚀的特性,自然降解需数百年。因此,规模化处理退役风电叶片成为电力行业固废处理的重大挑战之一,受到国内外学者的广泛关注。

热解法^[7-9]在退役风电叶片处置领域展现出显著的综合效益,其不仅能实现树脂基体的可控裂解与玻璃纤维/碳纤维的回收,更以全流程近零排放特性规避了填埋法的土地占用风险与机械破碎法的粉尘污染问题,尤其适合作为高值化回收与能源再生协同的优选技术路径。

与此同时,我国积极实施煤电节能降碳改造,严控煤炭消费总量。近年来,对于燃煤锅炉协同处理固废的需求日益旺盛,这一模式不仅能有效减少煤耗,还能有效解决固废处理难题^[10-13]。风电叶片热解产生的油气可以直接送入锅炉进行掺烧发电,同时锅炉充足的高温烟气可以作为风电叶片热解的热源。这样,既实现了燃煤锅炉协同处理退役风电叶片,又避免了直接燃烧产生二噁英的风险,油气的掺烧又降低了煤耗。

在热解和气化工艺过程的建模与分析中,

ASPEN Plus 作为一款功能强大且应用成熟的化工流程模拟平台,其强大的单元操作模型库能够准确描述热解气化中的热化学转化行为。杨毅梅等^[14]结合 RGibbs 和 RYield 模块,研究了温度、当量比对稻壳气化过程的影响。刘根等^[15]利用 RGibbs 和 RStoic 模块模拟了生物质热解过程,考察了热解温度、蒸汽与生物质质量比(S/B)的影响。赵坤等^[16]利用差减法得到了热解焦油的 C、H、O 元素质量比,将其定义为 $C_xH_yO_z$ 。Peters 等人^[17]提出一种动力学反应模型,基于 ASPEN Plus 预测了热解产物的元素组成。Gao 等人^[18]采用 10 个串联的 RCSTR 模块取代 RGibbs 模块,可以更准确地表示生物质气化过程。刘亮等^[19]选择 $C_{20}H_{42}$ 作为焦油的组分,将试验结果代入 RYield 模块得到热解产物的组成。上述研究表明,该 ASPEN Plus 软件可以精确预测合成气组分与热值、焦油及焦炭产率以及整个系统的能量效率和碳转化效率等,进而指导试验设计和工艺改进。

本文提出了燃煤锅炉耦合风电叶片热解气化方案,利用 ASPEN Plus 软件搭建了工艺流程,基于玻璃纤维回收利用需保持一定强度的目标,设定了热解边界条件,模拟分析了锅炉与热解气化装置的能质匹配特性,阐明含氧烟气作为热解热源“一步法”(即热解气化在单一反应器内一步完成)回收玻璃纤维工艺的可行性,并在 7 MW 燃煤锅炉上开展了中试验证。

1 工艺路线

目前,固废与燃煤机组耦合处置方式包括:直接耦合、间接耦合和并联耦合^[20]。其中,直接耦合是将退役叶片直接送入锅炉与煤掺烧,需将高强度

风电叶片破碎, 预处理环节成本显著高于常规废弃物, 这是制约叶片回收经济性的主要瓶颈, 此外, 叶片中的玻璃纤维在炉内高温下会熔融, 与飞灰粘附在一起, 造成锅炉积灰结渣。并联耦合是建立单独的叶片燃烧装置, 该装置产生的蒸汽和烟气分别与燃煤锅炉的蒸汽和烟气耦合, 可以大幅提高耦合比例, 但投资成本很高, 且面临和直接耦合同样的破碎成本高以及锅炉积灰结渣等问题。间接耦合是将叶片气化或热解产生的可燃气体送入锅炉, 这样可以降低预处理成本, 同时避免燃烧带来的积灰结渣问题。

考虑到叶片中纤维资源化回收利用需求, 本文在传统固废与锅炉间接耦合的基础上, 提出一种退役风电叶片热解气化耦合燃煤锅炉的工艺路线。退役风电叶片热解气化耦合燃煤锅炉协同处理工艺流程如图 1 所示。该工艺根据后续回收纤维的应用场景, 将叶片切割成所需尺寸, 通过连续进料装置送入热解气化装置内。热解气化装置为移动炉排, 可根据叶片尺寸调整炉排转速, 进而控制炉内反应速度。热解气化产生的热解油气送入炉膛燃烧, 根据分散控制系统 (DCS) 数据调整空气量。考虑到热解油气中可能含有少量卤素气体 (如 HCl), 热解油气管路需要选择合适的耐腐蚀材料。从锅炉烟道适当位置抽取高温烟气, 直接送入热解气化装置中作为热源。与传统热解介质不同, 烟气中含有一定的氧, 不但可以加速环氧树脂的一次分解, 还可以使树脂的氧化温度降低^[21], 同时, 考虑到纤维的回收利用, 热解后纤维表面的残碳会被烟气中的氧气氧化去除, 省去了传统工艺的二级氧化环节。

本处理工艺具有以下优势:

1) 简化风电叶片处理流程, 降低投资成本, 在原有锅炉的基础上, 仅需增加热解装置、气体输送装置等;

2) 区别于传统热解气化工艺常用的电加热、燃气或惰性气体加热方式, 本处理工艺利用锅炉烟气作为热解热源, 热解气化产生的油气送入锅炉燃烧, 不需要额外供能, 处理能耗、煤耗均较低;

3) 利用锅炉烟气量大, 对可燃成分兼容性强的特性, 可以实现风电叶片连续处理, 对锅炉的出力影响较小;

4) 省略了传统热解后需要氧化脱碳的环节, 处理得到的玻璃纤维完整性较好, 有较高的强度保留率, 可用于混凝土、催化剂等加强材料, 应用前景广泛;

5) 相较于大容量电站锅炉而言, 热解气化产生的可燃油气占烟气比例极低, 且在还原性气氛下, 叶片几乎不产生二噁英等有毒、有害气体, 依然可以满足火电厂污染物控制标准。

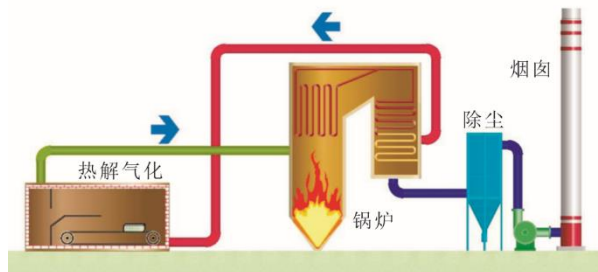


图 1 退役风电叶片耦合燃煤锅炉协同处理工艺流程
Fig.1 Process flow for the co-processing of decommissioned wind turbine blades coupled with a coal-fired boiler

2 建立模型

2.1 确定模型参数

2.1.1 锅炉参数

为进一步判断该工艺的可行性, 以 1 台 350 MW 超临界燃煤机组锅炉耦合叶片处理量为 1 t/h 的热解气化装置为例, 采用 ASPEN Plus 软件对耦合系统开展能质平衡模拟计算。锅炉的性能参数如表 1 所示。BMCR 工况下, 锅炉的过热蒸汽流量为 1 221 t/h, 过热蒸汽温度为 571 °C, 压力为 25.4 MPa, 总烟气量为 $1.27 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$ (标准状况下)。

表 1 350 MW 锅炉设计参数
Tab.1 Design parameters for a 350 MW boiler

项目	BMCR 工况	额定负荷 BRL 工况
燃烧方式	对冲燃烧	
过热蒸汽流量/(t h ⁻¹)	1 221	1 130
过热蒸汽压力/MPa	25.400	25.220
过热蒸汽温度/°C	571	571
给水温度/°C	287	281
再热蒸汽流量/(t h ⁻¹)	1 031	953
再热蒸汽进口压力/MPa	4.915	4.531
再热蒸汽出口压力/MPa	4.735	4.365
再热蒸汽进口温度/°C	331	323
再热蒸汽出口温度/°C	569	569

为确定工程设计中烟气的抽取位置, 本文沿着锅炉烟气流程, 选取了 5 个不同位置, 同时考虑到在当前能源结构转型背景下, 火电机组普遍处于低负荷工况运行, 故本研究计算了锅炉不同负荷的耦合工况。选取的锅炉负荷 30%、50%、75%、100%,

选取 5 个换热器位置在不同负荷下的烟气作为热解热源,通过调节烟气流量调节热解气化平衡温度,使热解温度控制在 550 ℃。锅炉负荷和抽气位置如表 2 所示。表 2 中,低过为低温过热器,低再为低

温再热器,高再为高温再热器,末过为末级过热器。值得注意的是,不同负荷下,烟气含氧量存在差异,30%、50%、75%、100%负荷下的烟气含氧量分别为 7.64%、5.10%、3.65%、2.52%。

表 2 不同负荷与不同位置处烟气温度
Tab.2 Flue gas temperatures at different loads and locations

单位: ℃

负荷	低过进口	低再进口	高再出口	高再进口	末过进口
100%	713	798	850	938	1 010
75%	618	704	761	832	897
50%	549	636	685	733	784
30%	533	599	643	679	717

2.1.2 风电叶片组成

风电叶片取自国家能源集团某风电厂,经去除金属成分后切割为合适的尺寸。样品密度为 $1.99 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,主要成分为无碱玻璃纤维(质量分数 76.4%)和环氧树脂等(质量分数 23.6%)。样品

工业分析和元素分析如表 3,其灰分质量分数高达 76.40%,主要源自高熔点的玻璃纤维,这也是导致其热值偏低的原因。表 4 为风电叶片 X 射线荧光光谱(XRF)分析,结果表明, SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 和 MgO 占比较高,与玻璃纤维的化学组成特性一致。

表 3 风电叶片的工业分析和元素分析
Tab.3 Proximate and ultimate analysis of wind turbine blades

工业分析/%				元素分析/%					低位热值
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	$Q_{\text{net,ar}}/(\text{kJ kg}^{-1})$
0.23	76.40	22.25	1.12	15.73	2.17	4.74	0.71	0.02	7 050.3

表 4 风电叶片 XRF 分析
Tab.4 XRF analysis of wind turbine blades

单位: %

项目	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	TiO_2	Cl	Fe_2O_3	K_2O
质量分数	56.28	15.51	14.62	8.78	1.91	1.04	0.70	0.60

2.1.3 风电叶片失重特性

风电叶片在不同升温速率下的 TG 曲线和 DTG 曲线见图 2。由图 2 可知:最低加热速率下,风电叶片质量从约 260 ℃开始下降,在 522 ℃时基本不变,此时热解反应完成,失重率约 17.5%;最高加热速率下,从约 278 ℃开始发生热解反应,在 530 ℃基本完成,失重率约 18.0%。不同升温速率下对应 DTG 峰值分别为 356、363、380、385 ℃。TG 和 DTG 曲线变化规律相同,不同升温速率下,DTG 曲线均有 1 个峰,这表明风电叶片的热解只经历 1 次快速失重过程。随升温速率提高,TG 和 DTG 曲线往温度升高方向移动,这是由热重试验中有限的热传递引起的,在较高升温速率下,材料表面温度迅速上升,而内部温度较低,出现热延迟现象^[22]。

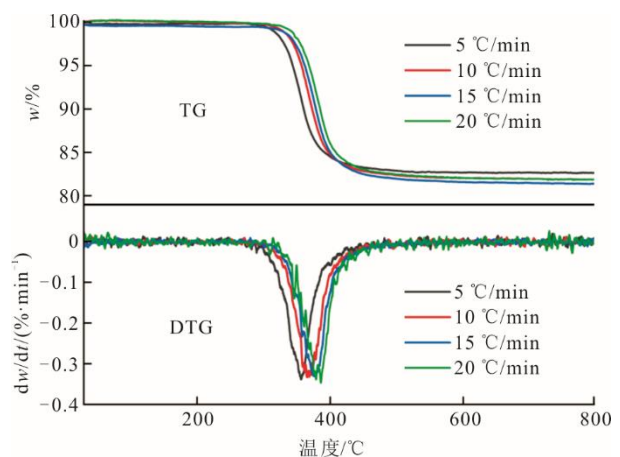


图 2 风电叶片在不同升温速率下的热重曲线
Fig.2 Thermogravimetric curves of wind turbine blades at different heating rates

2.1.4 纤维强度变化特性

试验中发现,经过热解气化处理得到的玻璃纤维强度有明显损失。为了研究纤维强度损失的机理和原因,采用全自动单纤维万能测试仪测试不同纤维的抗拉强度,测试中拉伸速率设置为 10 mm/min。由于玻璃纤维是典型的脆性材料,拉伸强度分布范围较宽,单次测试容易造成误差偏高。因此,每组工况得到的纤维重复测试 50 次,并用双参数 WEIBULL 统计分析法计算纤维的抗拉强度^[22-24]。首先,对原生玻璃纤维(即用于生产风电叶片的玻璃纤维原材料)进行了 200~700 °C 不同温度下的热处理试验,经过 1 h 的热处理,冷却至室温进行强度测试,测试结果如图 3 所示。看到随着热处理温度的升高,纤维强度有明显的降低趋势,在 700 °C 下纤维强度只有初始值的 20%。综合考虑热解速率与纤维强度变化特性,本研究将热解温度设置为 550 °C。

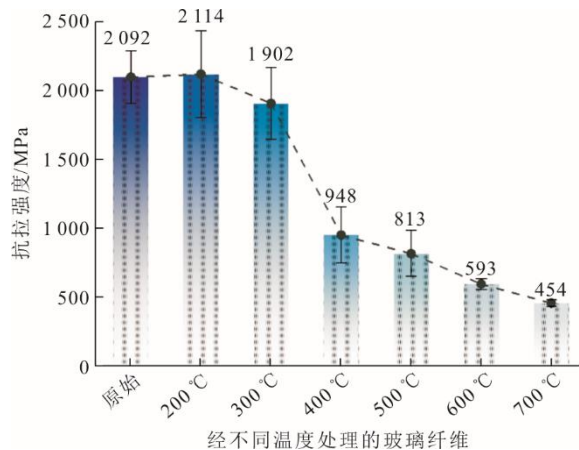


图 3 热处理温度对玻璃纤维拉伸强度的影响
Fig.3 Effect of heat treatment temperature on the tensile strength of glass fiber

2.2 确定假设条件

在模型中,使用 PR-BM 方法计算物质的物理

性质,使用 HCOALGEN 和 DCOALIGT 模型计算风电叶片的焓值和密度。由于风电叶片热解是复杂的物理化学变化,同时 ASPEN Plus 软件存在一定的局限性,无法完全模拟实际反应情况,因此,在建模时需要进行相应的简化和假设。

1) 选取风电叶片中的主要成分——玻璃纤维增强复合材料作为研究对象,其主要由玻璃纤维和热固性树脂组成。

2) 假设风电叶片中的玻璃纤维为惰性组分,认为其在热解气化过程中不与其他成分发生反应,也没有催化作用。

3) 假设热解气化过程是稳态过程,各反应器内的压力相同,不考虑反应装置及管路中的热损失和压力损失。

4) 假设热解气化产生的焦油与气体温度相同,高于焦油的沸点,油气在工艺温度下保持气态。

5) 不考虑风电叶片尺寸对于反应的影响,认为各组分在反应器内均匀混合,反应器内部温度分布均匀。

2.3 模拟流程

图 4 为 ASPEN Plus 软件模拟的风电叶片气化热解耦合锅炉工艺流程。该工艺由热解、气化、分离、除碳、燃烧 5 部分构成。热解模块与气化模块中的反应均由 RGibbs 反应器实现,热解模块将风电叶片材料转化为 C、H、O、N、S、灰分和水分,其产物与烟气在气化模块发生重整反应,生成可燃成分和焦炭。分离模块实现焦炭和气体分离后,焦炭在除碳模块发生氧化反应进行除碳,得到烟气和玻璃纤维。可燃油气进入燃烧模块发生燃烧反应,通过该模块可以计算油气的燃烧放热量。

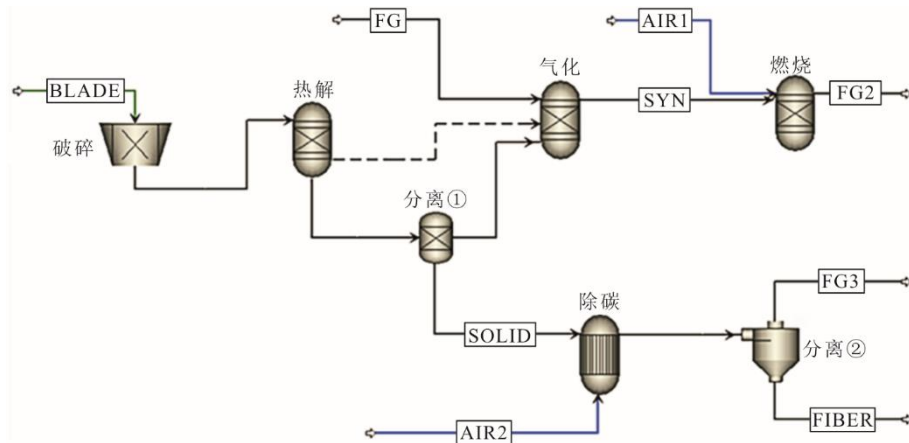


图 4 风电叶片热解气化耦合锅炉工艺流程
Fig.4 Process flow of the coupling of wind turbine blade pyrolysis-gasification and boiler

模拟设置的叶片流量为 1 t/h, 从风电叶片的热失重曲线发现, 热解温度为 550 °C 时有较快的热解速率, 同时能避免纤维强度发生严重损失。由于烟气温度低于 550 °C 时无法满足热解能量需求, 因此只选取表 2 中温度高于 550 °C 的工况进行模拟计算。

3 结果与讨论

3.1 模拟结果分析

3.1.1 烟气需求量分析

计算表 2 中不同参数下叶片热解气化的烟气需求量, 具体结果如图 5 所示。可以看出, 在相同负荷下, 不同抽气位置的烟气需求量随着烟气温度的升高而降低; 而对于同一位置的烟气, 总体趋势是随着锅炉负荷的降低, 烟气的需求量也随之减少。这主要是因为, 在低负荷条件下, 烟气中含氧量更高, 促进了树脂的氧化, 为热解气化反应提供额外的能量, 弥补了烟气温度低的劣势。因此, 烟气需求量受烟气温度和含氧量共同影响, 实际工业化应用中, 应严格控制烟气含氧量与温度。可以通过掺混氮气等惰性气体作为调节烟气温度和含氧量的控制手段, 从而避免烟气温度过高或含氧量过高对纤维的损伤。

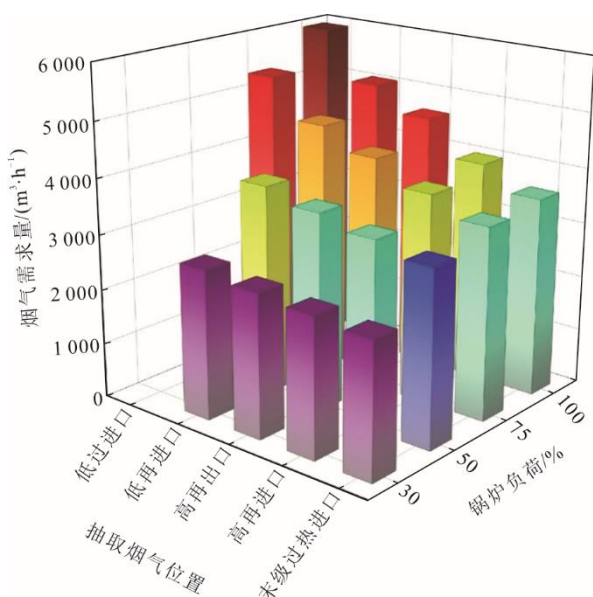


图 5 不同负荷及抽气位置的烟气需求量
Fig.5 Flue gas demand at different loads and extraction positions

图 6 展示了不同负荷及抽气位置烟气需求量占总烟气量体积分数。可以看到, 风电叶片处理量为 1 t/h 时, 抽取烟气量占锅炉总烟气量的比例不超过

0.6%, 占比极低, 对锅炉出力几乎没有影响。对于 1 t/h 的风电叶片处理量, 油气燃烧后产生的烟气同样在总烟气量中的占比很小。因此, 油气燃烧产生的污染物质量浓度对锅炉污染物排放的影响可以忽略不计。

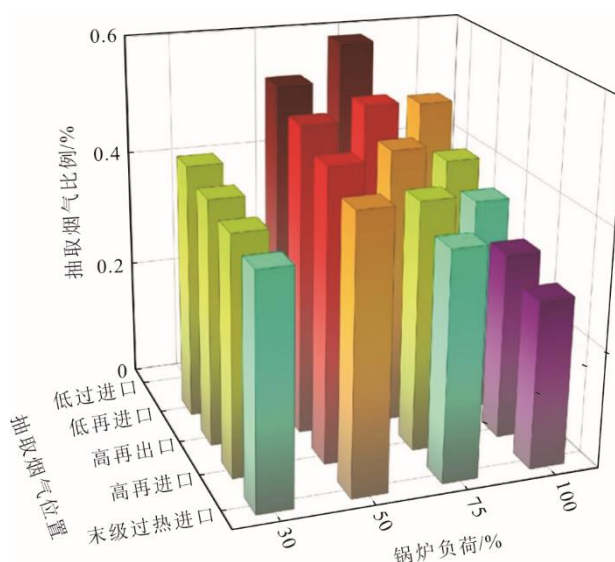


图 6 不同负荷及抽气位置烟气需求量占总烟气量的百分比
Fig.6 Percentages of flue gas demand at different loads and extraction positions relative to total flue gas volume

3.1.2 油气热值分析

计算了不同抽气工况下叶片热解产生热解气的热值, 结果如图 7 所示。由于烟气的稀释作用, 热解气热值低于 1 860.90 kJ/m³ (标准工况, 下同), 不同负荷下, 热值最高值分别为 1 860.54、1 604.98、1 669.46、1 801.25 kJ/m³。在同一负荷下, 热解气的热值随着烟气温度的升高而升高。这是因为烟气温度越高, 对烟气的需求量更低, 烟气的稀释效应更弱, 导致热解气热值更高。而对于同一位置的烟气, 在不同负荷工况下得到的热解气热值没有一致的规律, 热解气的热值是烟气温度与含氧量相博弈的结果。随着负荷的提升, 烟气温度升高有利于热解气热值升高; 而烟气含氧量降低导致烟气需求量升高, 又会导致热解气热值降低。当烟气温度过高时, 烟气输送成本会大幅升高, 因此, 综合考虑, 选取热负荷 75% 的低再进口或高再出口烟气作为热解热源, 75% 负荷下的烟气含氧量为 3.65%, 可以有效减少烟气需求量, 同时避免热解室内发生燃烧反应。而低再进口或高再出口的烟气温度适中, 可以减少烟气需求量, 并降低烟气输送成本。

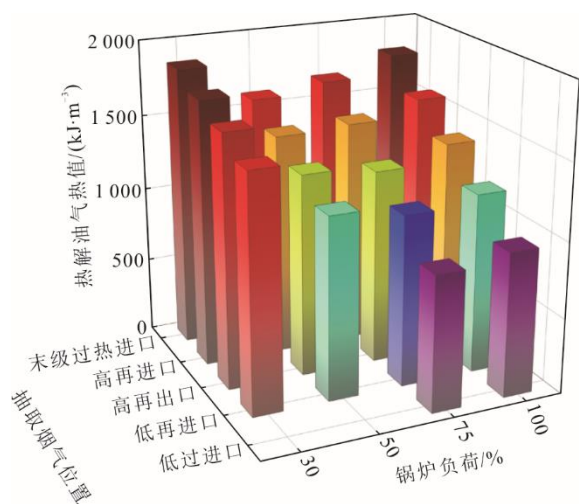


图7 不同负荷及抽气位置的油气热值
Fig.7 The calorific values of oil and gas at different loads and extraction positions

3.1.3 能效分析

从热解气化装置中抽出的可燃油气送入锅炉进行燃烧,在锅炉总出力基本不变的情况下,可以减少煤耗。采用 ASPEN 软件计算了油气完全燃烧的放热量对应的省煤量,结果如图 8 所示。在满负荷时不同抽取烟气位置,可以减少煤耗量 191.5~229.0 kg/h (标准煤),且随着负荷的升高及烟气温度的升高,节煤量也会相应增加。这主要是因为更高的负荷下,烟气含氧量越低,油气被氧化的更少,油气品质提升。而抽取烟气温度越高,烟气需求量越少,油气被稀释效应减弱,油气热值升高。锅炉满负荷下的煤耗为 118.4 t/h (标准煤),节煤量占比仅为 0.16%~0.19%,节煤量虽然占总煤耗量不高,但实现了固废减量化及煤电节能降碳的效果。此外,可燃油气还可以用于其他场景,如锅炉调峰及提升变负荷速率等。

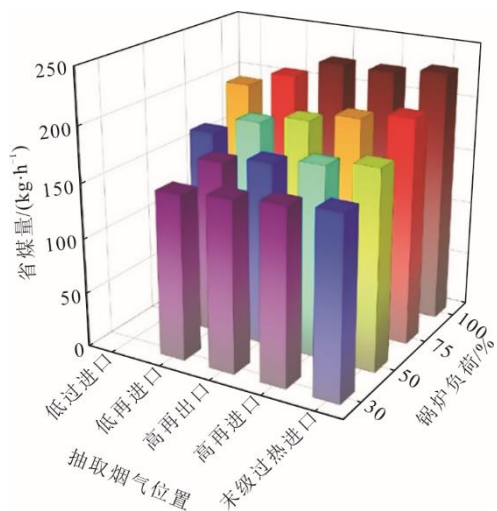


图8 不同负荷及抽气位置的省煤量
Fig.8 Fuel savings at different loads and extraction positions

从退役叶片处理全周期看,切割和运输能耗占比较高。1 t 叶片的切割能耗平均为 31.6 kW h^[25],以本研究中热解油气的放热量来看,切割能耗仅占总放热量的 2%。中小型分散式风场缺乏专业回收场地,导致预处理成本激增。为此,可以采用分布式预处理中心布局的方式进一步降低成本,建设小型预处理点,对叶片进行初步切割、分段,降低单件体积,便于后续运输。采用多场站联合的方式,集中收集和运输,实现批量化,提升运输效率、分摊成本。

3.2 中试验证与优化

为验证烟气作为热解热源一步法(无需热解后二次氧化)回收玻璃纤维工艺的可行性,选用 1 台 7 MW 燃煤炉排炉的沉降室作为热解气化反应空间,开展中试验证。该链条炉排是自动加煤燃烧、垂直列管式换热器间接换热型燃煤热风炉,主要由机械燃烧机、列管式换热器、除尘及电控装置组成。炉膛内设有前、中、后拱共 3 个拱,炉体与换热器之间设有烟尘沉降室。沉降室温度维持在 500~600 °C,同时,通过调节现场的给煤量改变烟气温度。叶片首先被切割成 20.0 cm×2.5 cm×2.0 cm,固定在底座上后送入沉降室。实时监测沉降室内的温度及气体成分变化,每隔 3 min 取出叶片进行拍照记录。图 9 为风电叶片在不同时间下的热解效果,可以看出,叶片热解过程中经历了颜色变黄→变黑的过程,主要热解反应在 9 min 左右基本完成。

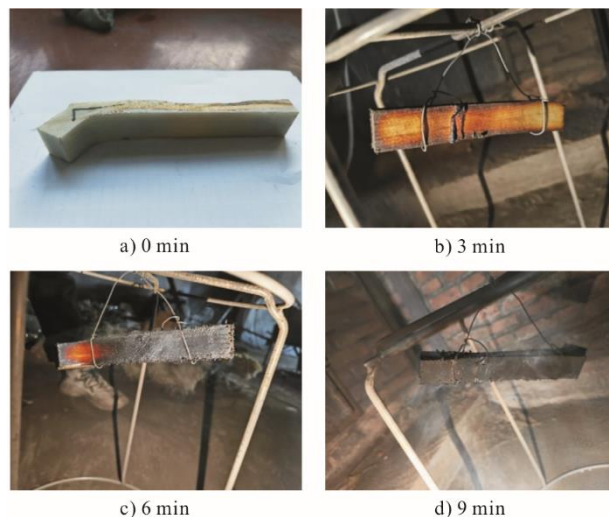


图9 风电叶片不同热解气化时间下的形貌
Fig.9 Morphologies of wind turbine blades with different pyrolysis-gasification times

在现场试验中发现,当含氧量为 15%时,反应 6 min 后取出的固体为白色纤维,没有焦炭附着,然

而热解完成后得到的纤维变得脆弱易碎, 抗拉强度仅为 328 MPa, 丧失了原有的高强度特性。试验中通过适当增加给风量, 增加烟气中的含氧量。多次试验发现, 含氧量为 5% 时, 热解反应速度较高, 同时热解后得到的纤维强度损失相对较小。值得注意的是, 烟气含氧量为 5% 时, 热解过程中, 挥发分脱除与焦炭氧化同时进行。图 10 为放入沉降室 15 min 后取出的热解固体, 固体表面基本为纯白色, 并有玻璃纤维的光泽, 表明焦炭基本脱除干净。含氧量为 10% 工况下得到的玻璃纤维抗拉强度为 597 MPa, 仍可用于水泥等建材行业, 而含氧量高于 10% 工况下得到的玻璃纤维再利用价值较低。因此, 建议含氧量控制在 5%~10%, 通过“一步法”即可得到干净的玻璃纤维, 既可简化风电叶片处理流程, 回收得到的玻璃纤维又有较高的再利用价值。



图 10 热解气化后的白色玻璃纤维

Fig.10 White glass fiber after pyrolysis-gasification

风电叶片产生的油气总热值远低于锅炉燃煤, 油气的输入对于锅炉性能和排烟系统的影响很小。当抽取的烟气温度过高时, 容易形成局部高温, 对纤维强度造成严重损伤。在原工艺(图 1)的基础上, 提出带有烟气调质的风电叶片热解气化耦合燃煤锅炉协同处理工艺流程, 流程示意如图 11 所示。抽取一股省煤器出口的烟气, 将其与受热面出口的烟气混合, 使得混合烟气温度为 600~700 °C。还可以在烟气中掺混空气, 调节烟气中的含氧量, 试验发现含氧量应控制在 5%~10%, 可加快热解速度, 通过“一步热解气化”即可得到干净的玻璃纤维。

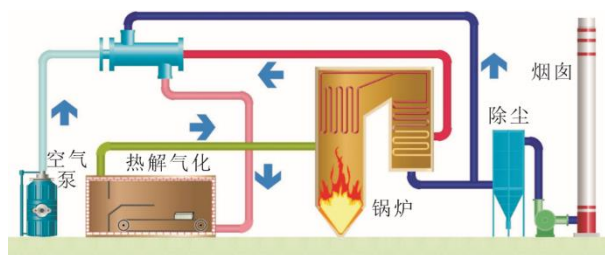


图 11 带烟气调质的风电叶片热解气化耦合燃煤锅炉协同处理工艺流程

Fig.11 Process flow for co-processing of wind turbine blades via pyrolysis-gasification coupled with coal-fired boiler with flue gas conditioning

3.3 污染物排放分析

热解气化产生的可燃油气会在锅炉炉膛内完全燃烧, 生成 CO_2 、 H_2O 及少量 NO_x 等污染物^[26-27], 这些污染物可以在锅炉的污染物净化装置中去除。以本文研究的锅炉为例, 满负荷烟气流量约为 $1.27 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$ (标准工况下), 热解气化抽取的烟气比例不超过 0.6%, 风电叶片处理量为 1 t/h 时, NO_x 释放速率约为 225 mol/h ^[28], 导致烟气中的初始 NO_x 体积分数增加约 4×10^{-6} , 未超过锅炉脱硝装置的裕量。因此, 风电叶片热解气化工艺对锅炉污染物排放的影响可以忽略不计。

4 结 论

本文提出一种燃煤锅炉耦合风电叶片热解气化“一步法”回收纤维的工艺路线, 通过抽取锅炉烟气作为热解气化的热源, 将热解产生的可燃油气送入炉膛燃烧, 从而简化了风电叶片处理流程, 减少了初投资。通过风电叶片热失重分析, 及玻璃纤维抗拉强度的影响特性试验; 并基于试验测试数据及锅炉参数搭建 ASPEN Plus 模型, 通过 7 MW 实炉验证了方案的可行性, 进一步通过烟气调质的方式优化工艺路线。

1) 风电叶片的低位发热量为 7 050.3 kJ/kg, 在不同升温速率下, 失重规律类似, 在 550 °C 时基本完全反应。高温会导致玻璃纤维的强度产生严重损失, 应控制热解气化温度, 以提高回收玻璃纤维的再利用价值。

2) 燃煤锅炉耦合风电叶片热解气化的工艺路线, 通过抽取锅炉受热面位置的烟气作为热解气化的热源, 将热解产生的可燃油气送入炉膛燃烧。该工艺简化了风电叶片的处理流程, 并利用锅炉烟气量大的特性, 实现风电叶片连续大规模处理。处理过程中的污染物排放量甚微, 可以忽略不计, 油气的燃烧对于锅炉效率提升有积极影响。

3) 模拟计算结果表明, 当风电叶片的处理速度为 1 t/h 时, 抽取总烟气的比例不超过 0.6% 时, 即可满足热解气化的能量需求。

4) 7 MW 中试试验发现, 当含氧量为 5%~10% 时, 反应所需时间低于 15 min, 并可以实现“一步热解气化”, 省略了后续的除碳环节。

5) 对已提出的工艺路线进行优化, 在受热面抽取的烟气中掺混空气及省煤器出口的烟气, 对烟气进行调质。控制烟气温度为 600~700 °C, 含氧量为

5%~10%工况下,可提高回收纤维的强度,并进一步简化风电叶片处理流程。

【参考文献】

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室.《中国的能源转型》白皮书[EB/OL]. [2024-08-29]. http://www.scio.gov.cn/zfbps/zfbps_2279/202408/t20240829_860395.html. Information Office of the State Council of the People's Republic of China. White paper China's Energy Transition[EB/OL]. [2024-08-29]. http://www.scio.gov.cn/zfbps/zfbps_2279/202408/t20240829_860395.html.
- [2] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2024[R]. 北京: 中国电力出版社, 2024: 1. China Electricity Council. China electric power industry annual development report 2024[R]. Beijing: China Electric Power Press, 2024: 1.
- [3] 2025 年全球风能报告[R]. 里斯本: 全球风能理事会, 2025: 1. Global wind energy report 2025[R]. Lisbon: Global Wind Energy Council, 2025: 1.
- [4] 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.
- [5] 中国退役风电光伏设备循环利用产业调研报告[R]. 北京: 中国循环经济协会, 2024: 4. Research report on the recycling industry of decommissioned wind and photovoltaic equipment in China[R]. Beijing: China Association of Circular Economy, 2024: 4.
- [6] 牟书香, 贾智源, 邱桂杰, 等. 热塑性复合材料风电叶片的研究进展[J]. 新材料产业, 2011(11): 2-5. MU Shuxiang, JIA Zhiyuan, QIU Guijie, et al. Research progress of thermoplastic composite wind turbine blades[J]. Advanced Materials Industry, 2011(11): 2-5.
- [7] ZHANG D, HUANG Z, SHI X, et al. Experimental study and process simulation on pyrolysis characteristics of decommissioned wind turbine blades[J]. Energies, 2024, 17(13): 3229.
- [8] LEWANDOWSKI K, SKÓRCZEWSKA K, PISZCZEK K, et al. Recycled glass fibers from wind turbines as a filler for poly (vinyl chloride)[J]. Advances in Polymer Technology, 2019(1): 8960503.
- [9] 韩昊亮, 梁志刚. 真空热解在回收风电叶片中的研究[J]. 新技术新工艺, 2023(9): 57-61. HAN Haoliang, LIANG Zhigang. Research on vacuum pyrolysis in recycling wind turbine blades[J]. New Technology & New Process, 2023(9): 57-61.
- [10] 国家发展改革委. 锅炉绿色低碳高质量发展行动方案[EB/OL]. (2023-11-29) [2025-07-23]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202312/t20231219_1362772.html. National Development and Reform Commission. Action plan for green, low-carbon and high-quality development of boilers[EB/OL]. (2023-11-29) [2025-07-23]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202312/t20231219_1362772.html.
- [11] 生态环境部办公厅. 燃煤锅炉协同处理固体废物污染控制标准(征求意见稿)[EB/OL]. (2024-09-10) [2025-07-23]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202409/t20240913_1085852.html. Office of the Ministry of Ecology and Environment. Pollution control standards for co-processing solid waste in coal-fired boilers (exposure draft)[EB/OL]. (2024-09-10) [2025-07-23]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202409/t20240913_1085852.html.
- [12] 中国环境科学学会. 锅炉与工业窑炉协同处理固体废物配伍技术通则[EB/OL]. (2024-04-16) [2025-07-23]. <https://www.chinacses.org/web/141/202410/4303.html>. Chinese Society for Environmental Sciences. General specifications for compatibility assessment in co-processing solid waste using boilers and industrial kilns[EB/OL]. (2024-04-16) [2025-07-23]. <https://www.chinacses.org/web/141/202410/4303.html>.
- [13] 国家能源局. “十四五”能源领域科技创新规划[EB/OL]. (2021-11-29) [2025-07-23]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content_5683361.htm. National Energy Administration. The 14th five-year plan for scientific and technological innovation in the energy sector[EB/OL]. (2021-11-29) [2025-07-23]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content_5683361.htm.
- [14] 杨毅梅, 陈文义, 范晓旭, 等. 基于 ASPEN PLUS 的生物质气化模拟与分析[J]. 河北工业大学学报, 2011, 40(5): 49-52. YANG Yimei, CHEN Wenyi, FAN Xiaoxu, et al. Aspen plus-based numerical simulation and analysis of biomass gasification[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2011, 40(5): 49-52.
- [15] 刘根, 张榕江, 孙仲顺, 等. 生物质热解挥发分化学键重整工艺模拟与分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(6): 2351-2358. LIU Gen, ZHANG Rongjiang, SUN Zhongshun, et al. Simulation and process analysis of hydrogen-rich syngas production by chemical looping reforming of biomass pyrolysis volatiles based on decoupling strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(6): 2351-2358.
- [16] 赵坤, 肖军, 沈来宏, 等. 生物质热解制油系统性能分析[J]. 太阳能学报, 2012, 33(11): 1962-1967. ZHAO Kun, XIAO Jun, SHEN Laihong, et al. Performance investigation of biomass pyrolysis system for bio-oil[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(11): 1962-1967.
- [17] PETERS J F, BANKS S W, BRIDGWATER A V, et al. A kinetic reaction model for biomass pyrolysis processes in Aspen Plus[J]. Applied Energy, 2017, 188: 595-603.
- [18] GAO K, CHEN G, YAN B, et al. Modeling of biomass thermal decomposition/gasification in a downdraft gasifier under low pressure by Aspen plus[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 59: 103229.
- [19] 刘亮, 吴佳俊, 卿梦霞, 等. 落地油泥热解特性及工艺系统能量平衡分析[J]. 化工学报, 2025, 76(4): 1779-1787. LIU Liang, WU Jiajun, QING Mengxia, et al. Characteristics of landed oil sludge pyrolysis and energy balance analysis of the process system[J]. CIESC Journal, 2025, 76(4): 1779-1787.
- [20] 张东旺, 周托, 张亚宁, 等. 燃煤机组耦合生物质发电技术方案分析[J]. 电力学报, 2025, 40(3): 171-181. ZHANG Dongwang, ZHOU Tuo, ZHANG Yaning, et al. Analysis of Technical Scheme of Coupled Biomass Power Generation in Coal-fired Units[J]. Journal of Electric Power, 2025, 40(3): 171-181.
- [21] MA C, SÁNCHEZ RODRÍGUEZ 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.
- [22] YUN Y M, SEO M W, KOO G H, et al. Pyrolysis characteristics of GFRP (glass fiber reinforced plastic) under non-isothermal conditions[J]. *Fuel*, 2014, 137: 321-327.
- [23] 张晨, 孙国栋, 雷豹, 等. 单向纤维束 SiC/SiC 复合材料强度统计分布规律与微结构损伤分析[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(7): 4210-4225.
ZHANG Chen, SUN Guodong, LEI Bao, et al. Statistical distribution pattern of strength and microstructural damage analysis of unidirectional fiber bundle SiC/SiC composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(7): 4210-4225.
- [24] THOMASON J L. On the application of Weibull analysis to experimentally determined single fiber strength distributions[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 77: 74-80.
- [25] XU Y, WANG F, LIANG D, et al. A comparative pyrolysis study of different waste wind turbine blade parts: Kinetics, product distribution and evolution, and economics[J]. *Waste Management*, 2025, 200: 114782.
- [26] XIONG X, LI L, CHEN F, 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.
- [27] GUO W, BAI S, YE Y. 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.
- [28] CHENG G, YANG S, WANG X, et al. Study on the recycling of waste wind turbine blades[J]. *Journal of Engineering Research*, 2023, 11(3): 13-17.
- (责任编辑 杨嘉蕾)