

# 生物质燃料再燃研究进展

段 佳, 罗永浩, 陈 曦

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘 要:** 生物质能是可再生能源, 生物质燃料具有  $\text{CO}_2$  净排放为零的特性, 对它的利用可减少温室气体排放, 符合实现可持续发展的要求。生物质燃料再燃方式包括直接再燃、间接再燃和高级再燃等 3 种方式, 都能有效减少  $\text{NO}_x$  排放。利用木柴直接再燃的研究较多, 采用人工模拟生物质气化合气是研究间接再燃的有效途径。生物质燃料种类、尺寸、组分, 燃料携带气, 燃料喷入位置、燃尽风、再燃区过量空气系数等多种因素影响再燃。对我国开展生物质燃料再燃研究提出了建议。

**关 键 词:** 生物质燃料; 直接再燃; 间接再燃; 高级再燃

中图分类号: X511

文献标识码: A

## 1 前 言

生物质能, 是指利用自然界的植物、粪便以及城乡有机废物转化成的能源<sup>[1]</sup>。生物质能是一种可再生能源, 是植物通过光合作用将太阳能转变为化学能而储存在生物质内部的能量<sup>[2]</sup>。与煤相比较<sup>[3]</sup>, 生物质燃料具有 C、N、S、Cl 含量低, O 含量高, 挥发份含量高, 热值低, 易着火, 燃烧生成  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_x$ 、燃料型  $\text{NO}_x$  低等特性。燃烧生物质燃料所释放的  $\text{CO}_2$  可在植物进行光合作用时被吸收, 如果适当利用生物质能则可以构成一个封闭的  $\text{CO}_2$  循环, 因此从长远来看, 燃用生物质燃

料可以实现  $\text{CO}_2$  净排放为零。利用生物质能符合实现可持续发展的要求, 许多国家加大了生物质能研究与开发力度, 我国于 2006 年实施《中华人民共和国可再生能源法》, 将生物质能等可再生能源的科学研究和产业化发展列为国家科技发展与高技术产业发展的优先领域<sup>[4]</sup>。

我国生物质资源量巨大, 据预测到 2010 年我国农业产生的废料约合  $12 \times 10^{15}$  kJ, 相当于  $4.09 \times 10^8$  t 标准煤<sup>[4]</sup>。尽管生物质资源量非常大, 但由于生物质资源供应具有季节性, 分散分布, 能量密度小, 运输、储存成本较高, 从而限制了生物质能在大型电站的利用规模。在燃煤锅炉上采用生物质燃料再燃方式, 一方面能控制生物质能利用规模, 另一方面能降低燃煤锅炉  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  等污染物排放, 是具有优势的生物质能利用方式。

## 2 再燃概念

“再燃”概念最初由 John Zine 公司和 Wendt 等人提出和发展, 是在炉膛内采用二次燃料(又称再燃燃料)作为还原剂, 减少  $\text{NO}_x$  排放的技术<sup>[5~6]</sup>。再燃过程分 3 步, 炉膛相应地被分为 3 个区域(见图 1)。主燃区在炉膛下部, 约 80%~90% 的锅炉燃料

在此区域内燃烧, 过量空气系数  $SR_1 > 1$ , 生成  $\text{NO}_x$  等产物; 在主燃区下游的再燃区内, 再燃燃料被喷入炉膛, 再燃燃料约占锅炉燃料的 10%~20%, 过量空气系数  $SR_2 < 1$ , 形成具有很强还原性的富燃料气氛, 在初级燃区内生成的部分  $\text{NO}_x$  被还原为  $\text{N}_2$  及其它含氮分子, 如  $\text{HCN}$ 、 $\text{NH}_3$ ; 燃尽风(OFA)在燃尽区被喷入, 该区域过量空气系数  $SR_3 > 1$ , 形成贫燃料气氛, 氧化剩余可燃物, 剩余的含氮分子( $\text{NO}$ 、 $\text{HCN}$ 、 $\text{NH}_3$ )被转化为  $\text{NO}$  或(和) $\text{N}_2$ 。

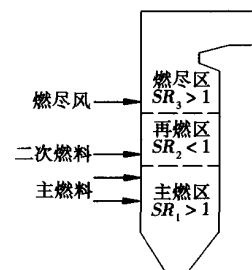


图 1 再燃过程

## 3 生物质燃料再燃

### 3.1 生物质燃料直接再燃

生物质直接再燃是指将未经热化学处理(热解、气化)的生物质燃料作为二次燃料的再燃方式。

生物质燃料再燃能降低

$NO_x$  排放。生物质、细煤粉、水煤浆、碳化废物衍生燃料(CRDF)和沥青乳液等再燃实验表明<sup>[7]</sup>, 这些再燃燃料都能有效减少  $NO_x$  排放, 其中高挥发份、高碱金属、低氮的生物质燃料和 CRDF 再燃能减少  $NO_x$  排放 50%。在较短的停留时间内, 天然气再燃效果较好, 因为天然气无须再析出挥发份, 但停留时间超过 0.5 s 后, 所有燃料再燃效果相同<sup>[7]</sup>。

在小型滴管炉进行的再燃还原模拟烟气中 NO 的热态实验表明<sup>[8]</sup>, 采用木屑、橘皮和稻壳等 3 种再燃燃料可减少 NO 排放 50%~70%, 由于 3 种生物质燃料中木屑中挥发份含量最高, 其还原 NO 的效果最好。

无烟煤、秸秆、象草、木柴、天然气再燃实验表明<sup>[9]</sup>, 无烟煤再燃最低  $NO_x$  排放浓度为 500  $mg/m^3$  (6%  $O_2$ ), 生物质燃料再燃最低  $NO_x$  排放浓度在 250~300  $mg/m^3$  (6%  $O_2$ ) 以内, 天然气再燃最低  $NO_x$  排放浓度为 260  $mg/m^3$  (6%  $O_2$ )。Rüdiger 等人指出影响最低  $NO_x$  排放量的最重要因素是燃料挥发份含量, 其次是氮含量<sup>[9]</sup>。高挥发份可有效降低  $NO_x$  排放; 再燃过程中, 生物质燃料氮以  $NH_i$  的形式大量释放, 将  $NO_x$  直接还原为  $N_2$ 。实验表明, 各种燃料再燃方式都存在与之对应的  $SR_2$  范围, 如天然气再燃时为 0.65~0.9, 生物质燃料再燃时为 0.75~0.85<sup>[9]</sup>。实验还研究了再燃时生物质燃料颗粒尺寸对燃尽的影响, 表明增大象草颗粒尺寸后, 燃烧燃尽率降低, 虽然木柴颗粒尺寸更小, 但其燃烧燃尽率比象草颗粒低, 这可能与燃料结构不同有关, 因此燃尽率是对固体生物质

燃料再燃的一个限制<sup>[9]</sup>, 值得进一步加以研究。

多种生物质燃料都可用于再燃, 其中采用木柴作为再燃燃料的研究较多。木柴中氮含量低, 不含硫, 木片向炉膛内喷射时具有弹道特性, 可与烟气较好混合。Harding 等人的研究表明, 木柴颗粒尺寸对再燃效果几乎没有影响<sup>[10]</sup>, 实验对比了 3 种再燃燃料携带气对再燃的影响, 3 种携带气分别是空气、氮气和模拟烟气 (含 3%  $O_2$ 、97%  $N_2$ )。当  $SR_2 < 0.97$  时, 3 种携带气的实验结果几乎相同;  $SR_2 > 0.97$  时, 携带气为空气时减少  $NO_x$  排放效果最好。还对发电功率为 265 MW 旋风炉采用木柴颗粒再燃进行了全尺度数值模拟, 研究了影响再燃过程混合的多种因素, 认为再燃燃料喷嘴要尽量接近旋风燃烧器, 才能获得充分的混合及燃烧时间; 采用木柴颗粒与主燃区烟气逆向喷入方式, 可以获得二者较好的混合; OFA 高速喷入能产生更好的混合, 从而降低 CO, 在过热器管屏入口处形成均匀的过量空气系数分布。对比空气和烟气作为携带气的再燃效果表明, 采用空气作为再燃燃料携带气时可减少  $NO_x$  排放 45%~48%, 采用烟气时为 55%<sup>[11]</sup>。另外,  $SR_2$  在 0.8~0.93 范围内每降低 0.02 可减少  $NO_x$  排放 5%, 这可通过增加再燃燃料木柴量实现。

Adams 等人采用数值模拟研究了旋风炉木柴再燃过程<sup>[11]</sup>, 其中木柴颗粒的反应包括 3 个过程, 即水分蒸发、析出挥发性轻质气体和木炭燃烧。得到了与文献 [10] 一致的结论, 并进一步研究了再燃燃料喷嘴布置、再燃燃料携带气的作用和 OFA 喷入的影响。文献 [11] 指出将再燃燃料喷

嘴都设计在炉内同一面墙上所形成的混合效果比在相对的两面墙上的混合效果差; 再燃喷嘴在旋风燃烧器上方约 2.4 m 处时, 至少能减少  $NO_x$  排放 40%。利用烟气代替空气作为木柴颗粒携带气, 富燃料气氛更强, 再燃效果更好, 但混合不好将形成局部贫燃料气氛, 降低再燃效果。OFA 高速喷入能改善混合, 但高速射流将产生较高压降。

生物质燃料, 尤其是农业废弃物及木柴中钠、钾等碱金属含量高, 容易导致灰熔点降低。采用生物质燃料直接再燃, 将导致受热面积灰、沾污等问题, 尤其是安装了高温过热器的锅炉内受热面积灰、沾污十分严重。此外, 生物质灰和煤灰的掺混不可避免, 导致飞灰很难再加以利用, 降低了锅炉运行经济性。采取将生物质气化再燃的方式则可将生物质灰和煤灰分离, 从而可以解决直接再燃给燃煤锅炉运行造成的飞灰难以再利用、受热面积灰、沾污和腐蚀等问题。

### 3.2 生物质燃料间接再燃

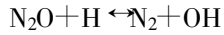
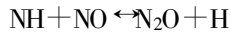
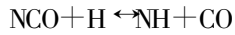
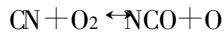
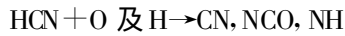
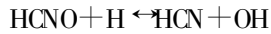
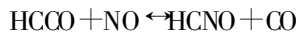
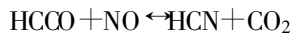
生物质燃料间接再燃是采用生物质热解油和气化气作为二次燃料的再燃方式。由于将生物质热解油作为化工原料利用具有更高的经济性, 因此研究集中于采用气化气再燃。Berge 等人分析了模拟过热器管在不同再燃条件下的灰沉积样本<sup>[12]</sup>, 指出生物质气化气再燃方式所生成的灰与不采用再燃方式所生成的灰没有显著差别, 有利于飞灰的利用。

生物质气化气的主要可燃成份包括  $CO$ 、 $H_2$  及  $CH_4$  等烃类。分别采用  $CO$ 、 $H_2$  再燃时, 随着再燃燃料温度升高,  $NO_x$  排放浓度下降, 减少  $NO_x$  排放可达到 20%~30%<sup>[13]</sup>。生物质气化气中烃

类组分也具有还原  $\text{NO}_x$  的作用<sup>[14]</sup>。

在再燃研究中,通常采用人工模拟生物质气化气代替真实生物质气化气。范志林等人采用由  $\text{CO}/\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{C}_3\text{H}_6$  构成的人工模拟生物质气化气<sup>[13]</sup>,实验研究了生物质气化气组成成份、再燃温度、停留时间、烟气初始  $\text{NO}$  浓度等条件对  $\text{NO}$  还原效果的影响,指出生物质气的成份,尤其是  $\text{C}_3\text{H}_6$  对  $\text{NO}$  还原效果有显著的影响,烟气中较高的  $\text{NO}_x$  初始浓度以及水分和  $\text{SO}_2$  的存在不利于  $\text{NO}$  还原,并且含量越高不利程度越大。Rüdiger 等人对比了人工模拟生物质气化气与天然气的再燃效果<sup>[9]</sup>。人工模拟生物质气化气各组分 ( $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_x$ ) 体积百分数分别为 26.5/5.35/7.75/53.1/7.3 及 41.5/0/37.5/10.8/10.2,分别代表生物质燃料中温和高温气化产生的燃气。两种人工模拟生物质气化气再燃减少  $\text{NO}_x$  排放的效果与天然气再燃的差别很小,相差最大不到 10%。Glaborg 等人研究了烃类在生物质气化气再燃中的作用<sup>[13]</sup>。所采用的人工模拟生物质气化气中  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  的体积百分数相同,混入  $\text{CH}_4$  作为人工模拟生物质气化气中的烃类,研究表明生物质气化气再燃效果与再燃气体烃浓度有关,但烃的作用效果随反应条件变化,当  $SR_2$  为 0.9 时,生物质气化气中烃浓度越高,减少  $\text{NO}_x$  排放效果越显著;当  $SR_2$  为 0.7 时,采用烃浓度低的生物质气化气减少  $\text{NO}_x$  排放效果更显著。

Dagaut 等人总结了人工模拟生物质气化气 ( $\text{CO}/\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_2$ ) 再燃还原  $\text{NO}_x$  的机理<sup>[16]</sup>。主要步骤有:



范志林等人建立了充分搅拌反应器和柱塞流反应器串联模型<sup>[17]</sup>,模拟生物质气化气还原  $\text{NO}$  的过程。模型假设在再燃燃料喷嘴出口局部有  $x$  份额的气体在充分搅拌反应器中还原  $\text{NO}$ ,另外  $(1-x)$  份额的气体未经混合从该局部区域绕过后与充分搅拌反应器出口气体混合一起进入柱塞流反应器,进行还原  $\text{NO}$  的反应。模拟采用了 C、H、N、O、S 五元素、145 种组分、1 006 个基元反应的机理。模拟曲线与实验曲线在总体走势上基本一致,模拟表明在不同条件下反应过程中控制  $\text{NO}$  脱除的基元反应并不相同。

生物质燃料气化过程中将产生焦油,通常采用的“焦油”定义是气化气中所有芳香烃及多环芳香烃<sup>[18]</sup>,包括了从单环到 5 环及以上的多种芳香烃、杂环芳香烃,如甲苯、酚、萘、茚、呋喃等。生物质气化气中焦油含量级可高达  $100 \text{ g}/\text{m}^3$ <sup>[19]</sup>。实验表明,生物质气中焦油有助于减少  $\text{NO}_x$  排放<sup>[9,20]</sup>。Guameri 等人采用试验和数值方法研究了呋喃在激波管内还原  $\text{NO}$  的作用<sup>[21]</sup>。描述呋喃/ $\text{NO}$  系统的化学反应模型整合了呋喃热解模型和烃/ $\text{N}$  氧化模型,其中呋喃通过裂解生成烃基和烃类,烃类通过氧化发生裂解生成烃基<sup>[21]</sup>。研究表明,在由呋喃/ $\text{NO}/\text{Ar}$  构成的热解环境中,温度达到 1 300 K,  $\text{NO}$  才开始转化,在 1 600 K 时  $\text{NO}$  转化达 40%;在由

呋喃/ $\text{NO}/\text{O}_2/\text{Ar}$  构成的氧化环境中,温度达到 1 300 K 以上,  $\text{NO}$  浓度迅速降低,到 1 600 K 可降低  $\text{NO}$  浓度 80%。目前有关焦油或焦油组成成份还原  $\text{NO}_x$  机理研究的公开报道较少。

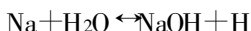
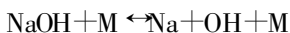
### 3.3 生物质燃料高级再燃

生物质燃料高级再燃是在生物质燃料基本再燃基础上,采用向炉内高温烟气中喷入氨或尿素的方式,可减少  $\text{NO}_x$  排放 90%。

Berge 等人研究了采用掺混了含氮杂质的丙烷 ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) 为初级燃料时的 3 种再燃形式<sup>[12]</sup>,即仅喷入低热值生物质气化气、喷入低热值生物质气化气与氨的混合物、氨在生物质气化气下游且在 OFA 上游喷入。在仅喷入低热值生物质气化气实验中,当  $SR_2$  为 0.77 时,  $\text{NO}$  浓度从再燃区进口  $800 \text{ mg}/\text{m}^3$  ( $6\% \text{O}_2$ ) 降低到再燃区出口  $200 \text{ mg}/\text{m}^3$  ( $6\% \text{O}_2$ ); 喷入低热值生物质气化气与氨的混合物实验中,  $0.92 > SR_2 > 0.77$  时,再燃区出口  $\text{NO}$  浓度低于  $200 \text{ mg}/\text{m}^3$  ( $6\% \text{O}_2$ ); 氨在生物质气化气下游且在 OFA 上游喷入实验中,  $\text{NO}$  浓度由再燃区进口  $800 \text{ mg}/\text{m}^3$  ( $6\% \text{O}_2$ ) 降低到再燃区出口  $120 \sim 140 \text{ mg}/\text{m}^3$  ( $6\% \text{O}_2$ ),氨喷嘴离再燃燃料喷嘴越近降低  $\text{NO}$  排放越多。 $SR_2 < 0.90$  时,低热值生物质气化气与氨的混合喷入的再燃效果最佳; $SR_2 > 0.90$  时,氨在再燃燃料下游 0.25 ~ 0.5 m 位置喷入能有效降低  $\text{NO}$  排放。

Maly 等人采用生物质燃料、碳化废物衍生燃料 (CRDF)、细煤粉和天然气为再燃燃料<sup>[7]</sup>,尿素作为还原剂进行了高级再燃实验。再燃燃料热量占炉膛输入热量 10%,尿素喷入温度在 1 200 ~ 1 560 K 范围内。喷入温度为 1 200 K 尿素溶液时,天然气再燃

能减少 NO<sub>x</sub> 排放 81%；喷入温度为 1 300 K 尿素溶液时，CRDF 和超细煤粉能减少 NO<sub>x</sub> 排放 83%；喷入温度为 1 260 K 尿素溶液时，生物质燃料再燃能减少 NO<sub>x</sub> 排放 92%。生物质燃料灰具有钠钾含量高的特性。在高级再燃过程中，碱金属通过生成自由基强化 NH<sub>3</sub>-NO 的相互作用，其中最具活性的碱基助催化剂是钠。高温下 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 转变为 NaOH，并裂解为 Na 原子和 OH 离子，Na 原子与水分子反应生成 NaOH：



然后，反应生成的 OH、H 自由基与 NH<sub>3</sub> 反应生成 NH<sub>2</sub>，最后 NH<sub>2</sub> 还原 NO。

Maly 等人采用 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 为助催化剂的高级再燃实验表明，生物质能减少 NO<sub>x</sub> 排放 96%，天然气能减少 NO<sub>x</sub> 排放 91%，CRDF 能减少 NO<sub>x</sub> 排放 94%，细煤粉能减少 NO<sub>x</sub> 排放 78%。

## 4 建 议

我国学者已经开展了生物质燃料再燃还原 NO<sub>x</sub> 的实验和数值模拟研究，分析了生物质种类、生物质气化气主要组成成份、再燃温度、停留时间等因素对再燃的影响。必须看到，我国在生物质燃料再燃方面的研究与国外相比还有较大差距。对开展生物质燃料再燃研究，提出以下建议：

(1) 加强生物质燃料预处理方法及有效的炉内措施的研究，以减少直接再燃中沾污、腐蚀，提高燃料燃尽率，降低锅炉热损失。

(2) 通过实验和理论研究，探索再燃过程中生物质燃料热解、气化产物各组成成份还原

NO<sub>x</sub> 的机理、各组成成份影响其它组成成份还原 NO<sub>x</sub> 的机理，为控制生物质燃料热解、气化和燃烧，优化再燃提供依据。

(3) 增加生物质再燃燃料种类，尤其要关注秸秆等农业废弃物及能源作物的再燃研究。

(4) 开展生物质燃料处理、再燃集成系统研究，评估锅炉系统采用生物质燃料再燃技术的效益，优化生物质再燃系统。

## 参 考 文 献：

[ 1 ] 中华人民共和国全国人民代表大会. 中华人民共和国可再生能源法[ R ]. 北京: 中华人民共和国全国人民代表大会, 1996.

[ 2 ] 吴创之, 马隆龙. 生物质能现代化利用技术[ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[ 3 ] SAVOLAINEN K. Co-firing of biomass in coal-fired utility Boilers[ J ]. *Applied Energy*, 2003, **74**: 369-381.

[ 4 ] LEUNG D Y C, YIN X L, WU C Z. A review on the development and commercialization of biomass gasification technology in China [ J ]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, **8**: 565-580.

[ 5 ] WENDT J O L, STERNLING C V, MATOVICH M A. Reduction of sulfur trioxide and nitrogen oxides by secondary fuel injection[ A ]. *14th Symposium (International) on Combustion*[ C ]. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1972: 897-904.

[ 6 ] 徐华东, 罗永浩, 王恩禄, 等. 再燃烧技术及其在我国的应用前景[ J ]. *动力工程*, 2001, **21**(4): 1320-1323.

[ 7 ] MALY P M, ZAMANSKY V M, HO L. Alternative Fuel Reburning [ J ]. *Fuel*, 1999, **78**: 327-334.

[ 8 ] 李 戈, 池作和, 斯东坡, 等. 生物质废弃物再燃降低 NO<sub>x</sub> 排放的实验研究 [ J ]. *热力发电*, 2004, **33**(2): 42-44.

[ 9 ] RUDIGER H, KICHERER A, GREUL U. Investigations in combined combustion of biomass and coal in power plant technology [ J ]. *Energy & Fuels* 1996, **10**: 789-796.

[ 10 ] HARDING N S, ADAMS B R. Biomass as

a returning fuel; a specialized cofiring application [ J ]. *Biomass and Bioenergy*, 2000, **19**: 429-445.

[ 11 ] ADAMS B R, HARDING N S. Reburning using biomass for NO<sub>x</sub> control [ J ]. *Fuel Processing Technology*, 1998, **54**: 249-263.

[ 12 ] BERGE N, OSKARSSON J, RRDLING L, et al. flame with an LCV-gas combined with SNCR [ A ]. Reburning of a P F. *Clean Technology for Solid Fuels* (1996-1998) [ C ]. Bruxelles: European Commission, 1999. 665-694.

[ 13 ] GIARBORG P, KRISTENSEN P G, DAM-JOHANSEN K. Nitric oxide reduction by non-hydrocarbon fuels. Implications for reburning with gasification gases [ J ]. *Energy & Fuels*, 2000, **14**: 828-838.

[ 14 ] 钟北京, 傅维标. 气体燃料再燃对 NO<sub>x</sub> 还原的影响[ J ]. *热能动力工程*, 1999, **14**(6): 419-423.

[ 15 ] 范志林 张 军, 林晓芬, 等. 生物质气再燃还原 NO 的实验研究[ A ]. 中国工程热物理学会第十一届学术会议[ C ]. 北京: 中国工程热物理学会, 2005. 55-50.

[ 16 ] DAGAUT P, LECOMTE F. Experiments and kinetic modeling study of NO-reburning by gases from biomass pyrolysis in a JSR [ J ]. *Energy & Fuels*, 2003, **17**: 608-613.

[ 17 ] 范志林 张 军, 林晓芬, 等. 生物质气再燃还原 NO 的数值模拟[ A ]. 中国工程热物理学会第十一届学术会议[ C ]. 北京: 中国工程热物理学会, 2005. 226-231.

[ 18 ] MOERSCH O, SPLIETHO H, HEIN K R G. Tar quantification with a new online analyzing method [ J ]. *Biomass and Bioenergy*, 2000, **18**: 79-86.

[ 19 ] MILNE T A, EVANS R J, ABAZOGLOU N. Biomass gasifier "tars": their nature, formation and conversion [ M ]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 1998.

[ 20 ] STBERG M, GIARBORG P, JENSEN A. A model of the coal reburning process[ A ]. *27th Symposium (international) on Combustion*[ C ]. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1998. 3027-3035.

[ 21 ] GUARNERI F, IKEDA E, MACKIE J C. A study of furan as a model oxygenated return fuel for nitric oxide reduction[ J ]. *Energy & Fuel*, 2001, **15**: 743-750.

( 辉 编 辑 )

无烟煤流化床燃烧中热破碎现象的研究综述 = A Survey of the Research Findings Concerning the Thermal Fragmentation Phenomena of Anthracite During its Combustion in a Fluidized Bed [刊, 汉] / HE Hong-zhou (Energy and Power Engineering Research Institute under the Jimei University, Xiamen, China, Post Code: 361021), LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa (State Key Laboratory on the Clean Utilization of Energy Resources, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 221 ~ 226

The parameters used for judging fragmentation degrees are summarized. The mechanism governing the generation of thermal fragmentation is analyzed along with a study of the factors having an impact on thermal fragmentation and a discussion of the effect of fragmentation phenomena on combustion. Based on the above, the authors have come to the conclusion that during the process of combustion in a fluidized bed, the fragmentation of anthracite assumes a comparatively high random character and is greatly influenced by coal quality. Coal particle size, furnace bed temperature, residence time, fluidized medium and fluidization speed etc. also have an important influence on the fragmentation of coal. The fragmentation of coal is conducive to enhancing the combustion rate of coal tar particles, but at the same time increases the quantity of particles liable to be elutriated inside the furnace bed, thus resulting in an increase of unburned carbon content in fly ash. The realization of an exact and quick sampling of fragmented materials and the establishment of a proper relationship between average particle sizes before and after the fragmentation pertain to problems yet to be solved in the research of fragmentation phenomena. **Key words:** anthracite, fluidized bed, fragmentation, survey

生物质燃料再燃研究进展 = Recent Advances in the Study of Biomass Fuel Reburning [刊, 汉] / DUAN Jia, LUO Yong-hao, CHEN Wei (Mechanical and Power Engineering College under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 227 ~ 230

The biomass is a kind of regenerative energy source and biomass fuel features a zero amount of net CO<sub>2</sub> emissions. The use of biomass fuel can reduce greenhouse gas emissions meeting the requirements for realizing sustainable development. The modes of biomass fuel reburning include: direct reburning, indirect and advanced reburning. The above three modes can without exception effectively reduce the NO<sub>x</sub> emissions. A relatively large amount of research involves the use of wood for direct burning and the use of the gasified gas of artificially simulated biomass represents an effective means for the study of indirect reburning. A variety of factors can influence reburning. They include: biomass fuel types, its size, constituent elements, fuel-bearing gas, fuel injection location, burn-off air and excess air factor in the reburning zone. Finally, some proposals for furthering the study of biomass fuel reburning have been put forward. **Key words:** biomass fuel, direct reburning, indirect reburning, advanced reburning

燃气轮机入口空气冷却系统的技术经济性能 = Technical Performance and Cost-effectiveness of Gas Turbine Inlet Air Cooling Systems [刊, 汉] / LI Hui, FU Lin, ZHU Ying-xin (Department of Architectural Science and Technology, Qinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 231 ~ 234

Atmospheric ambient-temperature has a great influence on the performance of gas turbines. The adoption of cooling technology to cool down the air at the inlet of a gas turbine can improve its performance. The performance and cost-effectiveness of different inlet air cooling systems is compared and analyzed, which have been installed on machine units in Beijing, Harbin, Shanghai and Guangzhou. The research results indicate that in the above-mentioned four cities with typical Chinese climates, the evaporative cooling mode can maximally enhance the power generation capacity of gas turbines by 4% to 7%. However, such a cooling mode can only increase the annual power generation capacity by less than 1%. If the inlet air temperature is cooled down to 10 °C with the help of an electrical refrigerating machine or an absorber cooler, the power generation capacity of a gas turbine could be increased by a maximum of 9% to 15% and the annual ca-