

生物质与煤混合燃烧的技术评述

北京博奇电力科技有限公司 马志刚 吴树志 白云峰

摘要：生物质与煤混合燃烧技术是一种低成本、低风险可再生能源利用方式。依据给料方式的不同，混燃可以分为直接混燃和间接混燃两种方式。受生物质特性的影响，混燃会对原有的锅炉系统产生一定的影响。系统介绍了混燃过程对系统燃烧特性的影响、对SO₂、NO_x等污染物排放的影响、以及混燃对锅炉系统的积灰、结焦及腐蚀的影响；并在此基础上对混燃的经济性进行了评价，最后给出了目前的混燃研究中存在的问题以及发展的方向。

生物质能是太阳能以化学能形式贮存在生物质中的能量形式，生物质具有高挥发分，低N、S含量、低灰份的特性。其燃烧过程具有CO₂零排放的特点，这对于缓解日益严重的“温室效应”有着特殊的意义。我国是一个农业资源大国，具有丰富的生物质资源，研究生物质资源的充分利用具有十分重要的意义。常规的生物质直燃发电技术受原料收集储运等条件的限制，存在着投资运行成本高和效率低等缺点。生物质与煤混燃技术不仅对生物质进行了资源化利用，同时减少了常规污染物和温室气体的排放，是一种低成本、低风险的可再生能源利用方式。

国外从20世纪90年代开始进行生物质和煤混燃技术的相关研究及测试^[1, 2]

，迄今为止已经在多种炉型上进行了尝试，机组的规模从50MW一直到500MW以上。荷兰Gelderland电厂635MW煤粉炉是欧洲大容量锅炉混燃技术的示范项目之一^[3]

，以废木材为燃料，其燃烧系统独立于燃煤系统，对锅炉运行状态没有影响。系统于1995年投入运行，每年平均消耗约60000t木材(干重)，相当于锅炉热量输入的3%~4%，年替代燃煤约45000t。芬兰Fortum公司于1999年在电厂的一台315MW四角切圆煤粉炉上进行了为期3个月的混燃测试^[4]

，煤和锯末在煤场进行混合后送入磨煤机，采用含水率50%~65%（收到基）的松树锯末，锯末混合比例为9%~25%的质量比（体积混合比为25%~50%）。系统基本上运行良好，但是磨煤机系统出现一些问题。

我国生物质混燃技术的研究起步较晚，目前也已经先后进行了理论及工业混燃试验。国内首套混燃发电项目于2005年在山东十里泉发电厂投产^[5]

，在原锅炉系统的基础上增加一套秸秆输送、粉碎设备，增加两台30MW的秸秆燃烧器，增加一个周转备料场。改造结果表明，混燃不会对机组的安全稳定运行造成影响。此后，山东通达电力公司将一台130t/h循环流化床锅炉的左右侧下部的各一个二次风喷嘴改造为秸秆输送喷嘴，同时增加一套物料输送系统，使改造后的锅炉可以同时燃烧煤矸石和秸秆^[6]

。除试验分析外，

国内外的很多研究者也针对不同炉型

内的混燃过程进行了相关的理论分析及模拟^[7, 8]。下面将对生物质和煤混燃的技术现状进行系统的分析。

1 生物质与煤混燃技术的分类

关于生物质和煤混燃的技术分类并不一致，大体上可以分为如下几种^[9-11]：

1.1 生物质与煤直接混燃

根据混燃给料方式的不同，直接混燃分为以下几种方式：

(1)煤与生物质使用同一加料设备及燃烧器。生物质与煤在给煤机的上游混合后送入磨煤机，按混燃要求的速度分配至所有的粉煤燃烧器。原则上这是最简单的方案，投资成本最低。但是有降低锅炉出力的风险，仅用于特定的生物质原料和非常低的混燃比例。对于煤粉炉，如果采用木质生物质，生物质的混合比例应该小于5%质量比；对于旋风炉，生物质的混合比例可以高达20%的质量比。因为多数生物质含有大量纤维素并且容积密度非常小，会影响原有磨煤系统的效率，容易产生加料系统堵塞问题；如树皮由于富含纤维可能会造成磨煤机故障；当柳枝稷和稻草的给料尺寸为25~50mm时，很容易导致煤仓堵塞等^[2]。

生物质和煤混燃时，其比例宜控制在20%热值以下^[12]

。此外，生物质和煤混燃时还应注意其混合流动特性，二者的混合流动特性取决于生物质的形态^[13]。

(2)生物质与煤使用不同的加料设备和相同的燃烧器。生物质经单独粉碎后输送至管路或燃烧器。该方案需要在锅炉系统中安装生物质燃料输送管道，容易使混燃系统的改造受限。

(3)生物质与煤使用不同的预处理装置与不同的燃烧器。该方案能够更好地控制生物质的燃烧过程，保持锅炉的燃烧效率；灵活调节生物质的掺混比例。但是该方案投资成本最高。生物质和煤单独给料时需要将生物质颗粒的粒径进行考虑[2]。

1.2 生物质与煤间接混燃

根据混燃的原料不同，生物质和煤间接混合燃烧可以分为生物质气与煤混燃和生物质焦炭与煤混燃两种方式。生物质气与煤混燃方式指将生物质气化后产生的生物质燃气输送至锅炉燃烧。该方案将气化作为生物质燃料的一种前期处理形式，气化产物在800~900℃时通过热气管道进入燃烧室，锅炉运行时存在一些风险。生物质焦炭与煤混燃方式是将生物质在300~400℃下热解，转化为高产率（60%~80%）的生物质焦炭，然后将生物质焦炭与煤共燃。上述两种方案虽然能够大量处理生物质，但是都需要单独的生物质预处理系统，投资成本相对较高。

2 生物质与煤混燃对锅炉运行及污染物排放的影响

2.1 混燃对锅炉运行的影响

生物质与煤混燃的燃烧过程分成两个燃烧阶段[14~16]。由于生物质的挥发分析出温度要远低于煤的挥发分析出温度，混燃对于煤燃烧前期的放热有增进作用，促使煤着火燃烧提前。随着生物质加入量的不同，煤的着火性能得到不同程度的改善。混合燃烧对煤的燃尽性能影响很小。但是不同变质程度的煤（褐煤、烟煤和无烟煤）和生物质混燃时所表现出的燃烧特性变化不一^[17]。

。褐煤和烟煤与生物质混合后的燃烧最大速率都有所增加，对应温度有前移的趋势，最大燃烧强度也有所增加；但无烟煤与生物质混合时最大燃烧速率及其对应温度变化不大。由于生物质的发热量低于煤，因此生物质与煤混燃时有可能造成锅炉输出功率的下降

，因而掺烧比例会受到限制。Marek Pronobis的分析表明^[18]

，在煤粉炉混燃时，生物质燃料的特性会造成锅炉效率的下降以及锅炉操作参数的改变（如减温水的喷射量、热风温度等）。

选择混合燃烧方案时应尽量不干涉整个系统的正常运行，又要秸秆中碱金属和氯的含量相对较高，同时秸秆飞灰的熔点较低，因此应当选择合适的混燃比例。根据丹麦BWE公司经验，秸秆输入热量不超过20%，对锅炉飞灰性质的影响较小，不会对锅炉尾部受热面造成较大的侵蚀和堵塞^[5]。芬兰Fortum公司的测试表明^[4]

，当锯末的混合比较大时（大于14%质量比），磨煤机能力出现不足，造成给煤能力受限；当锯末的混合比达到25%（质量比）时，锅炉的出力只有75%。和单纯燃煤相比，当锯末的混合比为9%时，飞灰中的未燃炭变化不明显，但是当锯末混合比为14%（质量比）时，飞灰中的未燃炭增加了1%，这主要是由于采用生物质和煤采用同一磨煤机进行混合粉碎时造成煤的粒度变化，进而影响煤的燃尽程度。混燃对于锅炉的燃烧及受热面没有明显影响，除尘器及FGD系统的运行也没有变化。

2.2 混燃对SO₂排放特性的影响

^[9]，因此混燃能够有效降低SO₂的排放量。不同的生物质和煤混烧降低SO₂和NO_x

的能力不同，含氮、硫越低，挥发分越高的生物质，降低污染物的效果越显著。这是因为生物质燃料中含有高含量挥发分，燃烧初期的氧气主要供生物质挥发分燃烧，从而使生物质和煤混烧的过程中形成贫氧区，限制了煤中燃料N的中间产物向NO_x的转化和SO₂

的形成；同时生物质本

身具有一定的木质素和腐植酸，它们具有巨大

的比表面积，同时对SO₂有较强的吸附能力，延缓了SO₂

的析出速度，增加了反应表面；另外，生物质燃料含有相对较多的K、Ca、Na活性成分，可以促进固体硫酸盐的形成，例如CaSO₄、K₂SO₄、Na₂SO₄等，从而降低污染物排放^[19]。

2.3 混燃对NO_x排放特性的影响

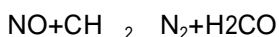
燃烧过程中生成的含氮污染物主要有NO、NO₂、N₂O等，还包括HCN、NH₃等含氮中间产物。其产生的种类和生成量与燃料种类、燃烧温度以及燃烧区域过量空气系数等密切相关。生物质与煤混燃能够降低NO_x的排放浓度的主要原因如下^[20]：

(1)生物质含有大量挥发分，在低温下迅速析出进而燃烧，生物质挥发分与煤抢氧燃烧，从而形成较低氧气浓度，而床内NO_x的形成取决于燃料中氮的氧化过程与床内还原物质（如焦炭和HCN、NH₃含氮物质）对NO_x的还原分解过程之间的平衡，当床内过量空气系数低时，有利于NO_x的还原分解反应^[21]。

(2)生物质本身N含量远低于煤，因而对总体NO转化率起“稀释”作用。同时生物质与煤在燃烧过程中相互影响，在800~900℃有较明显的协同降低NO排放作用^[22]。

(3)生物质释放出的挥发分组分中含有一定量的HCN和NH₃，NH₃能够分解成NH₂和NH，它们能够将NO还原成N₂，从而起到降低NO_x作用；而HCN能在O₂的作用下分解成NCO，它进一步与NO反应会生成污染物N₂O。但是混燃对降低燃烧过程中NO_x的作用随生物质本身的含N量、煤种（灰成分）以及燃烧方式的不同而差别较大^[23]。

(4)生物质秸秆属于纤维结构，当挥发分析出后形成大量多孔性焦炭，促进了NO_x与焦炭的还原反应。化学反应方程式如下：



但是生物质的加入对降低NO_x的作用随温度的升高而降低，很可能是因为一方面高温下的热力NO_x的产率增加

；另一方面生物质秸秆

燃点低，温度越高，残余挥发分就越少，这样

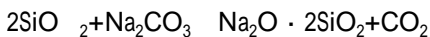
挥发分释放的物质对NO_x的还原作用就降低^[23]。随混燃比例增加，N₂

O的削减率幅度减少，而NO_x的削减率幅度基本不变^[24]。国外的有关研究表明^[2]

，生物质和煤混燃时，尤其是采用稻草及其他高灰、高活性碱金属的草本类生物质时，会出现SCR系统的催化剂失活现象。

2.4混燃对积灰结焦及腐蚀的影响

生物质一般含有较高的碱金属氧化物和盐类，单纯将生物质进行流化床燃烧时，容易造成床料颗粒的严重烧结。其原因是碱金属氧化物和盐类可以与SiO₂发生以下反应^[25]：



研究表明^[6]，生物质在燃烧过程中形成的绝大多数碱金属盐不会被烟气带走，而是沉淀在燃烧后所形成的灰中。

这些碱金属盐本身的熔点较低，并且当多种碱金属盐（K₂SO₄、K₂CO₃、KCl、Na₂SO₄

等）与碱土金属盐（CaSO₄、MgSO₄等）共存时，将形成熔点更低的共晶体^[26, 27]

。而煤灰属于铝硅酸盐，其中Fe、Ca、K和Mg等造渣元素含量相对较低，难以熔解，具有较低的结渣和腐蚀趋向。

秸秆灰是由石英和简单无机物（如Fe、Ca、Mg和Na等）以及S、磷酸盐和Cl组成，熔点较低，具有较高的结渣、结垢和腐蚀趋向。木材灰的化学成分在许多方面与秸秆灰类似，但SiO₂、CaO和P₂O₅含量有较大不同。

影响生物质灰沉积的因素可分为与固体颗粒有关因素（热迁移和惯性撞击）和与气体有关因素（凝结和化学反应）

。热迁移是由于炉内存在温度梯度而驱使灰分颗粒从高温区向低温区运动，这对直径小于10 μm的颗粒尤为重要。

对于直径大于10 μm的颗粒，惯性力是造成灰粒向受热面的壁面输送的重要因素，当含灰粒气流转向时，具有较大惯性动量的灰粒离开气流而撞击到受热面的壁面上。凝结和化学反应是指在火焰中，燃料中无机物组分处于极高温状态，许多无机物发生反应，然后以硫酸盐或氯化物的形式冷凝在飞灰颗粒和受热面的壁面上，从而使积灰层增厚^[10]。

生物质与煤混燃时还应注意Cl腐蚀。James等对英国20世纪70~80年代燃煤电厂再热器、过热器和炉墙等部位进行腐蚀研究^[28]

，发现煤中氯含量增加将加快金属的腐蚀速度，特别是炉墙火焰侧的腐蚀，Cl含量在0.20%以下对腐蚀无影响。国外的某80MW循环流化床锅炉烟气腐蚀试验表明^[3]，当煤和秸秆的热输入比为1:1时，过热器管壁腐蚀速率比单独使用煤时的速率快5~25倍。Blander等对麦秆燃烧的模拟也发现^[29]，麦秆中含量最高的两种元素Si和K在燃烧时形成低熔点的硅酸盐沉积在燃烧设备的金属上会造成燃烧设备的腐蚀，因为金属的氧化保护层会溶解在沉积的熔渣中。

玉米秸秆和石煤在流化床的混烧结果表明^[30]

：石煤灰能够在生物质流态化燃烧过程中有效地抑制流化床床料黏结现象的发生；因为石煤灰中的Al和Fe能够与生物质灰中的碱金属化合物以及低熔点共熔物发生化学反应生成高熔点物质，并且覆盖在生物质碳颗粒与石英砂颗粒表面形成

隔绝层，

从而阻止低熔点物

质的生成与迁移。李桂荣认为生物质

与煤混合燃烧的成灰特性受多种因素的影响^[31]

，主要包括燃料的混合比例、燃料成分以及燃烧温度等。温度是影响生物质与煤混合燃烧成灰特性的主要因素，会对灰中矿物质及灰的熔融性产生影响。生物质与煤的混合比例对灰渣成分有一定影响，但二者间不存在明显的线性关系。燃料中的碱金属、氯、硫是引起结渣积灰的主要物质。生物质与煤混合燃烧的成灰特性还受燃料颗粒粒径及燃料湿度等因素的影响，但影响效果不明显。

韩小梅等对流化床混燃时的除尘器测试发现^[32]

：生物与煤混燃时，烟气量有所增大；烟气中水蒸气含量较高，能一定程度上提高电除尘器的电气性能；混燃后粉尘粒径较大，易于电除尘器的捕集，生物质与高灰分煤混烧能适当降低电除尘器进口含尘浓度；飞灰中可燃物含量较高。D.A.Tillman认为混燃后的飞灰

作为水泥添加剂使用时会对水泥性能造成一定的影响^[2]，但是目前尚无更深入的研究结论及解决方案。

3 生物质和煤混燃的经济性评价

生物质和煤混燃的经济性主要是指改造成本和改造后的经济、社会效益等方面。Sara Nienow采用线性分析方法的分析表明^[33]

，混燃为电厂节约了成本，又改善了环境，减少了温室气体的排放，可谓一举两得。采用一次或者二次木材加工后的下脚料用于混燃，对于电厂而言是一种

比较经济的方式。国外的改造数据表明^[34]

，在电厂原有的燃料处理系统中预混合煤与生物质，再将预混燃料送入锅炉进行混烧时，系统的改造费用约为\$50~100/kW；当生物质和煤采用单独的进料系统时，系统的改造费用可达\$175~200/kW。

肖军等人认为将低温热解

后的生物质与煤预混合直接燃烧，可以节省大量设备改造费用^[20]

。董信光等人在400t/h四角切圆煤粉炉上进行了混燃试验及模型分析表明^[35]

，炉膛氧量是影响系统经济性和排放特性的最关键因素，其最佳控制值为3.7%。炉膛温度对NO的排放影响很大，对SO₂

的排放影响甚小。在一定范围内生物质粒径对经济性和排放特性没有影响。锅炉的最佳运行方式是：一次风配风采用上下均匀配风方式，二次风采用束腰型配风方式。

4 总结

生物质与煤共燃发电是有效利用生物质的一种经济和可持续发展方式，进行生物质与煤共燃的研究为解决我国能源短缺、改善污染问题有重要作用。采用混燃技术来改造50MW及以下的常规小火电机组，可以节约大量的基础投资，目前国内外关于生物质和煤的混燃技术研究虽然已经取得了一些相应的成果，但仍有很多问题等待进一步的探索。主要的技术问题包括^[36]：

- (1)生物质的品种繁多，如何选择适合混燃的生物质种类，混燃的最大比例与燃料前处理和燃烧技术的关系；
- (2)针对特定的锅炉系统，如何选择具有最佳技术经济性的生物质给料粒径以及燃料输送、上料和燃烧系统。
- (3)生物质中的某些元素，如碱金属、氯离子等，容易导致锅炉积灰、结焦和腐蚀，如何才能对其进行有效的抑制和清除。
- (4)生物质和煤混燃后的飞灰对SCR系统失效的影响，还有待进一步的研究。
- (5)各种不同类型的生物质原料和粒径对灰渣特性及飞灰销售的影响等。

参考文献

- [1] Evan E Hughes, David A Tillman. Biomass Cofiring: Status and Prospects 1996[J]. Fuel Processing Technology, 1998, (54): 127 ~ 142.
- [2] D A Tillman. Biomass Co-firing: the Technology, the Experience, the Combustion Consequences[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, (19): 365 ~ 384.
- [3] Sjaak van Loo, Jaap Koppejan. Handbook of Biomass Combustion and Co-firing[M]. Netherland: Twente University Press, 2002.
- [4] Kati Savolainen. Co-firing of Biomass in Coal-fired Utility Boilers[J]. Applied Energy, 2003, (74): 369 ~ 381.
- [5] 谢方磊. 十里泉发电厂140MW机组秸秆发电技术应用研究[J]. 山东电力技术, 2006, (2): 65 ~ 68.
- [6] 龙慎伟, 秦玲. 秸秆掺烧技术在循环流化床锅炉上的应用[J]. 中国设备工程, 2007, (3): 46 ~ 47.
- [7] Juan Ad á nez, Luis F de Diego, Pilar Gay á n, et al. Co-combustion of Biomass and Coal in Circulating Fluidized Bed. Modeling and Validation[A]. Proceedings of the 17th International Fluidized Bed Combustion Conference[C]. Florida, 2003.
- [8] 杜欣. 生物质能与煤共燃对污染物排放影响的数值模拟[D]. 河北：华北电力大学, 2007.
- [9] 段菁春, 肖军, 王杰林, 等. 生物质与煤共燃研究[J]. 电站系统工程, 2004, 20(1): 1 ~ 4.
- [10] 田宜水, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物质-煤混合燃烧技术的进展研究[J]. 水利电力机械, 2006, 28(12): 87 ~ 91.
- [11] 陈祎, 罗永浩, 陆方, 等. 生物质与煤共燃污染物的研究[J]. 锅炉技术, 2007, 38(2): 40 ~ 42.
- [12] Ayhan Demirba. Sustainable Cofiring of Biomass with Coal[J]. Energy Conversion and Management, 2003, (44): 1465 ~ 1479.
- [13] Mohammad Zulfiqar, Behdad Moghtaderi, Terry F Wall. Flow Properties of Biomass and Coal Blends[J]. Fuel Processing Technology, 2006, (87): 281 ~ 288.
- [14] 刘豪, 邱建荣, 董学文, 等. 生物质和煤混合燃烧实验[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(4): 319 ~ 322.
- [15] 黄海珍, 于秀敏, 陈海波, 等. 煤和生物质混合燃烧特性实验研究[J]. 化工进展, 2006, 25(增刊): 599 ~ 603.
- [16] 张海清, 程世庆, 尚琳琳. 生物质与煤共燃的燃烧特性研究[J]. 能源研究与利用, 2007, (2): 13 ~ 16.

- [17] 闵凡飞, 张明旭. 生物质与不同变质程度煤混合燃烧特性的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(2): 236 ~ 241.
- [18] Marek Pronobis. The Influence of Biomass Co-combustion on Boiler Fouling and Efficiency[J]. Fuel, 2006, (85): 474 ~ 480.
- [19] 刘豪, 邱建荣, 吴昊, 等. 生物质和煤混合燃烧污染物排放特性研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 484 ~ 488.
- [20] 肖军, 段菁春, 王华, 等. 低温热解生物质与煤共燃的污染性能和经济性能评价[J]. 再生资源研究, 2003, (2): 28 ~ 33.
- [21] 张磊, 张世红, 王贤华. 生物质与煤流化床混烧的NO_x排放规律研究[J]. 电站系统工程, 2007, 23(1): 27 ~ 28.
- [22] 徐向乾. 生物质掺煤混烧氮析出规律及再燃脱硝特性试验研究[D]. 山东: 山东大学, 2008.
- [23] 高晋生, 沈本贤, 王曾辉. 煤燃烧中NO_x的来源和抑制其生成的有效措施[J]. 煤炭转化, 1994, 17(3): 53 ~ 57.
- [24] 沈伯熊, 姚强, 刘德昌. 流化床中煤和生物质混烧N₂O和NO_x排放规律研究[J]. 电站系统工程, 2002, 18(2): 51 ~ 52.
- [25] Bapat D W, Kulkarni S V, Bhandarkar V P. Design and Operating Experience on Fluidized Bed Boiler Burning Biomass Fuels with High Alkali Ash[A]. Proceedings of the 14th International Conference on Fluidized Bed Combustion[C]. New York, 1997.
- [26] Aho M, Silvenoinen J. Preventing Chlorine Deposition on Heat Transfer Surfaces with Aluminum-Silicon Rich Biomass Residue and Additive[J]. Fuel, 2004, 83(10): 1299 ~ 1305.
- [27] M J Fernandez Llorente, J M Murillo Laplaza, R Escalada Cuadrado, et al. Ash Behaviour of Lignocellulosic Biomass in Bubbling Fluidized Bed Combustion[J]. Fuel, 2006, 85(9): 1157 ~ 1165.
- [28] James P J, Pinder L W. Effect of Coal Chlorine on the Fireside Corrosion of Boiler Furnace Wall and Superheater/Reheater Tubing[J]. Materials at High Temperatures, 1997, 14(3): 187 ~ 196.
- [29] Blander M, Pelton A D. The Inorganic Chemistry of the Combustion of Wheat Straw[J]. Biomass Bioenergy, 1997, 12(4): 295 ~ 298.
- [30] 宁新宇, 李诗媛, 吕清刚, 等. 秸秆类生物质与石煤在流化床中的混烧与黏结机理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 105 ~ 110.
- [31] 李桂荣, 杨天华, 孙洋, 等. 生物质与煤混合燃烧成灰特性研究进展[J]. 可再生能源, 2009, 27(1): 32 ~ 37.
- [32] 韩小梅, 陈丽艳, 蒙骊. 循环流化床锅炉中生物质与煤混燃对电除尘器的影响[A]. 第十二届中国电除尘学术会议论文集[C]. 石家庄, 2007.
- [33] Sara Nienow. Assessing Plantation Biomass for Co-firing with Coal in Northern Indiana: A Linear Programming Approach[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, (18): 125 ~ 135.
- [34] Hughes Evan. Biomass Co-firing: Economics, Policy and Opportunities[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, (19): 457 ~ 465.
- [35] 董信光, 刘志超, 牛尉然, 等. 生物质与煤混燃经济性和排放特性的敏感因素优化[J]. 华东电力, 2008, 36(10): 1275 ~ 1278.
- [36] Larry Baxter. Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy[J]. Fuel, 2005, (84): 1295 ~ 1302.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/85495.html>