生物质再燃降低燃煤锅炉NOx排放研究综述

林鹏云，罗永浩，胡元

(上海交通大学热能工程研究所，上海200240)

摘要：我国能源结构以化石燃料为主，不可再生且污染严重，开发和推广应用可再生能源，逐步调整与优化能源结构，意义重大。生物质能是一种清洁可再生能源，也是当前世界能源研究热点之一。重点介绍了生物质再燃利用技术的原理和应用现状，生物质再燃技术包括直接再燃、气化再燃以及高级再燃，使用生物质用于燃煤锅炉再燃，既可以合理利用生物质，又能有效降低燃煤锅炉的NOx排放，NOx减排率可达50%~90%，具有广阔的推广和应用前景。

1前言

我国是一个能源生产大国，也是一个能源消费大国。2003年，全国能源生产总量为16.03亿吨标准煤，比2002年增长11%，其中：煤炭产量16.67亿吨、原油产量1.7亿吨、天然气产量345亿立方米；2003年能源消费总量约为16.8亿吨，比2002年增长13%，其中：煤炭占67.1%、石油占22.7%、天然气占2.8%、水电等占7.3%，石油进口达9700万吨。能源是国民经济发展的重要基础，目前能源供应不足已经成为制约经济发展的重要因素，从长远来看，能源问题仍将是中国经济发展面临的最重要的问题。当前，我国能源发展主要存在以下问题：能源资源约束十分严重；能源供应过分依赖煤炭，环境污染问题严重；能源利用技术落后，能源利用效率低。优化能源结构，提高可再生能源利用比例，是今后我国能源发展的重要方向。

生物质能是种类众多的可再生能源的一种，世界上许多国家特别是经济发达国家，都很重视生物质能的开发和利用。特别是近几十年来，许多国家特别是发达国家，大力研究、开发利用生物质能转型优化技术，也就是将低品味的生物质能转化成液体、气体、固体、电力等形式的优质能源利用技术以及高效节能技术；并开发种植能源植物，增加生物质能源的资源储备，作为建立可持续发展能源系统的一项战略措施。生物质再燃作为生物质能利用的一种方式包括直接再燃、气化再燃以及高级再燃等技术，可以降低燃煤锅炉的NOx排放，幅度可达50%~90%，具有很好的应用前景。

2生物质能的利用

生物质能，又称为绿色能源，是以生物质为载体的能源。生物质是一切有生命的可以生长的有机物质，包括动物、植物和微生物及经其派生、排泄和代谢的许多有机质，是地球上最广泛存在的物质。它是一种古老的可再生能源。

人类自从发明火以来，至今仍在大量消耗薪材等生物质能源。目前，全球生物质能消费量仅次于煤、石油、天然气，位居第4位。由于地球上生物数量巨大，由这些生命物质排泄和代谢出许多有机质，这些物质所蕴藏的能量是相当惊人的。

根据生物学家估算，地球上每年生长的生物质能总量约1400亿吨~1800亿吨(干重)，相当于目前世界总能耗的10倍。我国的生物质能也极为丰富，现在每年农业中的秸秆量约为6.5亿吨，到2010年将达7.26亿吨，相当于5亿吨标煤。

薪材和林业废弃物数量也很大，林业废弃物(不包括薪炭林)每年约达3700万立方米，相当于2000万吨标煤。如果考虑日益增多的城市垃圾和生活污水，禽畜粪便等其他生物质资源，我国每年的生物质资源达6亿吨标煤以上，扣除了部分作饲料和其他原料，可开发为能源的生物质资源达3亿多吨标煤。随着农业和林业的发展，特别是随着速生薪炭林的开发推广，我国的生物质资源将越来越多，有非常大的开发和利用潜力。生物质能的利用对于国家的能源可持续发展具有重大的意义，因此很多发达国家都非常重视生物质能利用技术的研究和开发，其中生物质再燃技术就是目前较为关注的一项研究内容。

3再燃技术

再燃降低NOx排放的方法是将燃料分级送入炉膛，在燃烧区火焰的上方喷入另外的碳氢燃料，以建立一个富燃料区使生成的NOx还原，比较典型的就是，将80%~85%的燃料(称为一次燃料)送入第一级燃烧区(主燃料区)，在>1的条件下燃烧并生成NOx。其余15%~20%的燃料(称为二次燃料、再燃燃料)则在主燃烧器的上部送入二级燃烧区(再燃区)，在<1的条件下形成很强的还原性气氛，在主燃烧区生成的NOx就会通过反应(1)~(5)被还原成氮分子(N2)。

再燃区中不仅能使已生成的NOx得到还原，同时还抑制了新的NOx生成，可使NOx的排放浓度进一步降低。此外，再燃区的上面还需布置燃尽风喷口以形成第三级燃烧区(燃尽区)，以保证在再燃区中生成的未完全燃烧产物的燃尽。图1为再燃技术原理的示意图。

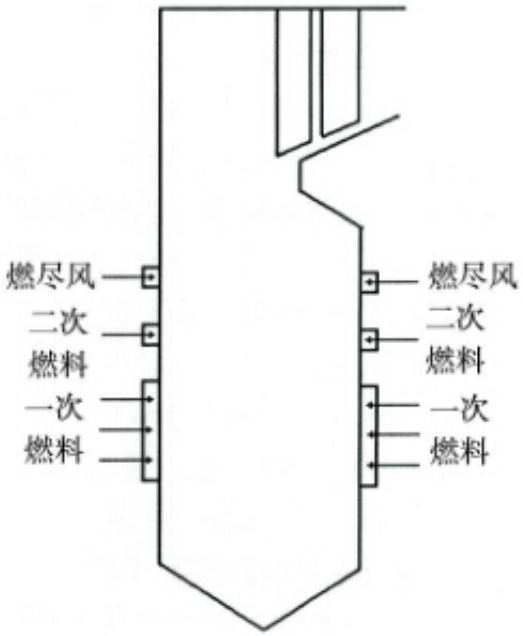

图 1　再燃烧布置示意图

燃料分级燃烧时所使用的二次燃料可以是固体燃料，例如煤粉炉可以利用煤粉或木屑等生物质来作为二次燃料，也可以采用碳氢类气体或液体燃料作为二次燃料。但是由于燃料分级燃烧时在炉膛内需要经过燃尽区燃烧完全，这使得燃料和烟气在再燃区内的停留时间相对较短，所以二次燃料宜于选用容易着火和燃烧的燃料。

4生物质再燃

4.1直接再燃

生物质直接再燃，通常是把固体生物质燃料进行适当的预处理之后，作为再燃燃料喷入炉膛，这样才能比较容易完全燃烧，起到降低NOx的效果。预处理包括干燥、粉碎成较小的颗粒等。这方面的研究国内开展得比较少，而国外已经广泛进行了试验研究，并且有的已经进入工业示范阶段，取得了较好的效果。

浙江大学李戈等人在小型滴管炉内进行了采用生物质废弃物木屑、桔皮和稻壳作为再燃燃料还原烟气中的NOx的热态试验，在一定的条件下可以达到50%~70%的NOx减排效果。

B.R.Adams等人对使木屑作为再燃燃料喷入煤粉炉的可行性进行了数值模拟，结果显示，至少可以实现40%的NOx减排，如果使用烟气来携带木屑，NOx减排效果可以达到55%。J.Brouwer等人对使用木屑作为再燃燃料进行了实验研究，结果显示，在再燃区过量空气系数<0.9，再燃燃料在再燃区的停留时间>0.3s，再燃燃料喷入位置的温度>1650K时，NOx减排效果可以达到60%。美国能源部的生物质项目也对生物质直接再燃作了研究，VladimirM.Za-mansky等人的研究报告显示，家具废木料和核桃壳作为再燃燃料与天然气再燃的效果相近，NOx减排分别达到58%和65%，柳木作为再燃燃料的NOx减排效果可以达到50%。由于大部分的生物质成分中都含有氯、碱金属和重金属等成分，所以作为再燃燃料直接燃烧对普通锅炉也存在加剧腐蚀、影响热效率等问题，实际应用中需要特别注意。

4.2气化再燃

生物质除了可以直接燃烧使用之外，还可以对生物质进行预处理，使其热解成为生物质气，也就是生物质气化，然后作为再燃燃料喷入燃煤锅炉使用。这种方法的优点，在于那些并不想要的组分，例如：碱金属、氯成分、重金属成分等，都可以不进入锅炉，以免影响现有锅炉的操作和运行，而且考虑到环境效益和经济效益也使生物质气化再燃技

术成为关注的焦点。气化之后，生物质原料被分成了可作为能源的气体和固体残余物，而且生物质气被用作燃煤锅炉再燃燃料时对氮氧化物(NOx)的减排有显著的效果。

固体残余物还可以进一步利用或处理。气化预处理的目的是把生物质中那些有问题的成分固定在固体残余物中，以免出现锅炉的操作问题。生物质气化利用技术是近几年来国内外能源领域研究的一个重要分支，该技术通过一定的气化装置将可再生固态生物质转换成高品位气态可燃物质，在有效利用生物质能源的同时，避免了直接焚烧带来的有毒、有害气体，同时也缓解了长期存在的化石燃料短缺问题，对于像我国这样的高能耗国家具有重要的经济效益和社会效益。

国外自20世纪70年代开始研究生物质气化利用技术，目前已经取得了很大的进展。欧盟、日本、美国等发达国家已经建立了多个生物质气化发电示范工程，如瑞典的Varnamo电站，美国的夏威夷电站等。采用100%的生物质气化发电，气化效率已经超过80%，热值可以到20.0MJ/m3。利用生物质气化再燃可以有效降低燃煤锅炉的NOx排放，是一种经济可行、对环境有益的技术。国内外已经有大学和研究机构对此技术进行了研究与探讨。

德国斯图加特大学Hein等人以生物质气化所得到的气体作为再燃燃料在实验台上进行了实验，实验结果显示生物质气非常适合作为再燃燃料，有很好的NOx减排效果，对于不同的生物质类型(包括草、木屑和淤泥等)进行气化后作为再燃燃料都有明显效果，NOx减排可以达到<200mg/m3。丹麦科技大学P.Glarborg等人对混合模拟气作为再燃燃料对NOx减排的效果进行了实验，实验结果显示这些非碳氢化合物作为再燃燃料可以减排20%~30%的NOx，减排幅度随着反应温度的升高而升高，再燃燃料的热量输入比例越大，减排幅度也就越大，最终接近于碳氢化合物燃料作为再燃燃料的效果。

如果考虑到再燃燃料对于主燃燃料的部分替代作用，NOx的生成量也会同比例下降。法国国家燃烧实验室PhilippeDagaut等人[10]也对生物质气化所得到的气体作为再燃燃料进行了实验研究，得到类似的结果。研究表明：反应温度越高与相对再燃燃料浓度越高的情况下，NOx的减排效果越明显，与先前许多以其它简单碳氢化合物作为再燃燃料所得到的研究结果是一致的。

台湾工业技术研究所K-TWu等人对生物质气作为再燃燃料在煤粉锅炉的燃烧工况进行了数值模拟，通过数值模拟显示生物质作为再燃燃料对NOx的减排是有明显效果的。不同的再燃工况下，NOx减排效果的变化范围为12%~46%，最高46%的NOx减排是在再燃燃料输入量为23%时，在传统的再燃布置工况下达到的数值模拟结果同样显示，生物质气组分的小幅度变化对再燃效果并无显著影响。

4.3高级再燃

普通再燃包括前面所述的直接再燃和气化再燃，对于NOx的减排效果一般最高只能达到70%左右。所以，为了满足更高要求的NOx排放标准，高级再燃就是一种可供选择的技术方案。高级再燃(AdvanceReburning)是在再燃区下游添加了含氮的催化剂，例如氨或尿素。与常规再燃相比，高级再燃NOx减排效果更好，而且二次燃料的输入量可以减少。高级再燃通常将选择性非催化还原SNCR与普通再燃串联构成。这种联合形式的二次燃料的热量输入比例为10%~18%，可以达到80%以上的NOx减排效果。

生物质高级再燃的二次燃料可以是固体形式也可以是气化之后的生物质气，国外对于这2种生物质高级再燃都有研究报道。美国能源部的生物质项目对生物质高级再燃作了研究，VladimirM.Zamansky等人的研究报告显示，在再燃区或燃尽区或者与燃尽风一起喷入含氮的催化剂，如：氨或尿素，可以提高生物质再燃降低NOx的效率，如若含氮催化剂和碳酸钠(Na2CO3)一起喷入则效果更佳。以家具废木料和柳木作为再燃燃料的高级再燃，NOx减排效果最高分别可以达到83%和78%。欧盟委员会的JOULEIII项目中对生物质气的高级再燃进行了研究，在实验台架上，生物质气再燃结合喷入氨气可以使NOx浓度从800mg/m3降到40mg/m3~50mg/m3，在2MW规模的煤粉炉上也进行了工业应用，NOx排放浓度可以降到120mg/m3~130mg/m3，而且对锅炉的飞灰含碳量等参数都没什么影响。

5结束语

鉴于矿物、石油燃料资源的有限性以及它们燃烧时所排出的SO2、NOx，将加剧环境污染，所排出的CO2，将加剧全球的温室效应，人们不得不重新考虑使用那些在自然界不会枯竭的可再生能源的可能性，生物质能的利用就是其中的一例。

目前国内开展生物质直接再燃技术研究的报道不多，还没有开展生物质气化气直接用于锅炉再燃和高级再燃技术的研究。国内外研究查明，生物质直接再燃可以实现60%以上的NOx减排，气化再燃可以实现50%左右的NOx减排，而

生物质高级再燃则可以达到80%以上的NOx减排。因此，通过开展对这些技术的研究可以提高可再生生物质能源的利用效率，缓解目前的能源紧缺，对于国民经济发展和环境保护有着更重要的现实意义。

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/99146.html