

大型煤粉电站锅炉直接掺烧生物质研究进展

刘家利¹，王志超¹，邓凤娇²，屠竞毅¹，方顺利¹

(1.西安热工研究院有限公司，陕西西安710054；2.西安益通热工技术服务有限责任公司，陕西西安710032)

摘要：为提高生物质在大型煤粉电站锅炉直接掺烧的安全性和经济性，分析了多种典型生物质与典型煤种的煤质及燃烧性能差异，论述了掺烧生物质后对锅炉主机及辅机的设备适应性及运行的影响，同时分析了国内外煤粉锅炉直接掺烧生物质的典型掺烧方式及特点。结果表明，生物质具有水分高、密度低、挥发分和氧含量高、硫含量低、环保性能好等优势。大型煤粉电站锅炉掺烧生物质时，需充分考虑掺烧生物质对机组设备的适应性及运行参数的影响，重点考虑生物质的全水分、发热量、灰熔融温度和灰成分中 Fe_2O_3 、CaO、MgO和 K_2O 等碱性氧化物对燃料制备、储存和输送，锅炉效率，制粉系统出力，带负荷能力及锅炉的结渣、沾污和腐蚀等影响。通过优选生物质种类，掺烧5%~10%的成型生物质对大型煤粉电站锅炉主机、燃烧系统、制粉系统及其他辅机系统运行无明显影响。综合考虑技术可行性、经济性及运行安全性，采用独立喷燃工艺即利用锅炉备用制粉系统实现生物质独立掺烧的经济性更高。为防止生物质燃烧器的烧损，要求磨制生物质燃料的磨煤机进口风温在100℃以内，以保证磨出口一次风温不超过50℃，以40~45℃为宜。当生物质比例低或掺烧时间短时，可考虑共磨掺烧方案，但需严格控制生物质自燃，确保生物质掺烧的安全性。因此通过优选生物质种类和掺烧方式、控制掺烧比例、优化运行参数等可保证大型煤粉电站锅炉直接掺烧生物质的安全运行。在大容量高参数的煤粉锅炉上直接掺烧生物质具有投资和占地面积少、无或少量设备改造、热效率高、掺烧不受季节影响等优势，目前制约其大规模推广应用的主要原因是生物质不受人工干预的准确计量。

引言

生物质是世界上第四大能源，其主要特点是可再生、硫含量低，能有效降低烟气中 SO_2 浓度，且实现 CO_2

零排放，是一种清洁的低碳燃料。生物质发电兼具经济、生态与社会等综合效益，可缓解日益突出的能源短缺与环境恶化问题[1-5]。我国《可再生能源中长期发展规划》报告提出，2020年可再生能源消费量争取达到能源消耗的15%，并实施了生物质发电优惠上网电价以及燃煤机组掺烧生物质补贴电价等相关配套政策。国家发布了《关于开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作的通知》，要求依托现役煤电高效发电系统和污染物集中治理设施，兜底消纳生物质资源，促进煤电的低碳清洁发展[6-8]。

近年，国内纯燃生物质发电迅速发展，但存在燃烧效率低、发电成本高[9-11]、锅炉受热面结渣沾污和高温腐蚀[12-18]、设备可靠性差[19-22]等技术难题，严重影响了生物质发电企业的可持续发展。在大型煤粉电站锅炉掺烧生物质可通过有效控制手段避免前述直燃锅炉存在的问题，目前主要分为间接掺烧和直接掺烧2种[20-21]。间接掺烧技术是将生物质气化后的燃气送入煤粉锅炉燃烧，该技术的原料适应性较广，能避免炉内结渣和腐蚀等现象，但新建设备较多、投资相对较高。直接掺烧即在燃烧侧实现混烧，将生物质燃料处理成可与煤粉混烧的状态直接送入炉膛混烧[22-24]。在大容量高参数的煤粉锅炉上直接掺烧生物质具有投资和占地面积少、设备改造少或无、热效率高、掺烧不受季节影响等优势，值得大力推广[25-26]。为了提高生物质在大型煤粉电站锅炉直接掺烧的安全性和经济性，本文对生物质煤质特性、典型生物质直接掺烧特点、直接掺烧可能存在的问题及应对措施等进行全面分析，以期提高生物质在大型煤粉电站锅炉直接掺烧的安全性和经济性。

1 典型生物质与燃煤的煤质特性差异

1.1 典型生物质的煤质特性

国内典型农业生物质和典型褐煤及烟煤的基本煤质参数见表1。

表 1 典型生物质与典型煤种的煤质参数对比

Table 1 Comparison of coal quality parameters between typical biomass and typical coals

样品	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{net,ar}/$ (MJ · kg ⁻¹)	
	M_1	M_{ad}	A_{ar}	V_{daf}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	$S_{t,ar}$		
典型生物质	玉米	35.1	5.96	5.84	79.27	29.61	3.63	25.27	0.44	0.11	9.78
	花生秧	34.3	7.89	12.63	79.81	25.82	3.27	22.84	1.00	0.14	8.72
	树皮	32.7	6.22	5.30	78.02	31.81	3.78	25.77	0.50	0.14	10.88
	玉米秸秆	28.6	7.56	5.55	81.49	32.36	3.85	28.90	0.66	0.08	11.58
	麦秆	9.6	8.12	7.08	81.27	40.43	5.06	36.80	0.81	0.22	14.73
典型煤种	年轻褐煤	50.0	14.33	12.2	62.88	25.28	2.22	9.80	0.24	0.26	8.83
	年老褐煤	35.4	13.28	7.22	44.19	42.83	2.77	11.12	0.49	0.17	15.11
	长焰煤	25.3	10.81	5.49	32.76	55.24	2.53	10.63	0.46	0.35	19.63
	烟煤	14.9	7.01	12.07	36.17	59.84	3.46	8.47	0.71	0.55	22.41

尽管这些生物质都属于农业生产废弃物，但不同生物质的煤质特性差异较大，全水分10%~40%，灰分总体偏低，热值主

要受全水分影

响较大，通常情况下水分越

高热值越低。与国内典型煤种相比，生物质的主要特点

是： V_{daf}

高达80%左右，比青年褐煤还偏高；收到基碳含量与国内典型褐煤相当；氢含量偏高；氧含量高，达到20%~40%；硫含量低，均在0.3%以下；发热量与国内典型褐煤接近。

生物质的挥发分、高氢、高氧特性使得生物质的燃烧性能优良、极易着火和燃尽，燃烧性能明显优于国内典型煤种，而低硫特性可减少烟气中SO₂

浓度。与燃煤相比，生物质燃料还具有流动性差、密度小、体积大、颗粒大及能量密度低等特点。

1.2 典型生物质与燃煤的煤灰特性差异

典型生物质与燃煤的灰熔融温度和灰成分比较见表2。生物质灰熔融温度低，与国内典型的褐煤和侏罗纪烟煤接近

。不同种类生物质的CaO、K₂O、MgO、Al₂O₃、Fe₂O₃

等成分含量偏差较大，如树皮CaO含量达30

%，其余多在10%以下；麦秆K₂

O含量达30%，其余多在15%以下；MgO、Al₂O₃和Fe₂O₃

含量大多在10%以下。与国内典型煤

种比较，生物质的主要特点是灰成分中的K₂

O和MgO含量明显偏高

。灰成分不同导致结渣机理不同，常规燃煤大

多是由于煤灰中CaO和Fe₂O₃含量较高，而生物质主要是由于煤灰中K₂

O和MgO等碱（土）金属含量较高，当生物质煤灰中CaO含量高时，将进一步加剧结渣[26]。表3为神华烟煤与玉米和

麦秆2种生物质掺混后的煤灰成分特性，通常生物质掺烧比例越高，混煤煤灰成分中碱金属含量越高，通过控制掺烧

比例，可将混煤灰成分中的碱性氧化物控制在安全范围

，如K₂O含量高达30.65%的麦秆生物质，掺烧质量比控制在10%时，混煤中的K₂O仅为3.88%。

表 2 典型生物质与典型煤种的煤灰熔融温度和灰成分比较

Table 2 Comparison of ash melting point and ash composition between typical biomass and typical coals

样品	灰熔融温度/℃				灰成分/%										
	DT	ST	HT	FT	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	MnO ₂	
典型生物质	玉米	1 140	1 150	1 160	1 170	58.74	7.34	3.70	6.95	5.35	1.76	12.74	0.58	1.80	0.087
	花生秧	1 220	1230	1 240	1 250	55.04	8.97	5.71	8.20	8.17	0.87	9.58	0.64	2.05	0.095
	树皮	1 200	1 210	1 220	1 230	44.60	5.80	4.06	30.56	4.49	1.61	7.31	0.48	0.47	0.071
	玉米秸秆	1 130	1 140	1 150	1 180	49.47	8.59	6.56	10.98	4.8	1.89	11.99	0.15	2.08	0.191
	麦秆	1 100	1 110	1 130	1 220	49.55	0.88	1.46	4.04	1.89	1.02	30.65	0.96	7.27	0.033
典型煤种	年轻褐煤	1 260	1 310	1 320	1 330	52.93	22.58	11.68	4.28	0.93	0.60	1.57	0.47	3.96	0.255
	年老褐煤	1 140	1 150	1 160	1 170	44.44	12.19	16.50	14.97	2.34	1.13	1.78	1.14	4.90	0.016
	长焰煤	1 200	1 210	1 220	1 230	27.34	8.16	17.24	20.25	6.02	5.32	0.52	0.30	13.68	0.412
	烟煤	1 220	1 230	1 240	1 250	48.56	17.97	9.58	15.53	1.20	0.85	2.14	1.01	2.37	0.047

表 3 典型生物质与典型煤种混煤的灰成分比较

Table 3 Comparison of ash composition between typical biomass and typical coals

项目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	MnO ₂	%
神华烟煤：玉米=95：5	48.81	17.71	9.43	15.32	1.30	0.87	2.40	1.00	2.36	0.05	
神华烟煤：玉米=90：10	49.08	17.43	9.28	15.09	1.41	0.90	2.68	0.99	2.34	0.049	
神华烟煤：麦秆=95：5	48.59	17.46	9.34	15.19	1.22	0.86	2.99	1.01	2.52	0.047	
神华烟煤：麦秆=90：10	48.62	16.92	9.08	14.83	1.24	0.86	3.88	1.01	2.67	0.046	

2 生物质直接掺烧方式

生物质直接掺烧技术在现行的混燃电站中占绝大多数。国外统计的200多家生物质掺烧电厂中，直接掺烧发电占比达到了84%。直接掺烧技术主要包括：

- 1) 共磨工艺。将生物质与燃煤按照一定掺烧比例进入磨煤机，在磨煤机内共同磨制，然后进入对应的燃烧器，该方案最为简单。
- 2) 共管工艺。先将生物质燃料单独破碎，然后将破碎后生物质燃料输入原磨煤机出口的粉管道中，与煤粉混合后进入锅炉原燃煤燃烧器，该方案管道布置及切换控制系统复杂，实际应用较少。
- 3) 独立喷燃工艺。生物质单独粉碎后进入纯烧生物质的燃烧器后入炉燃烧。该种工艺可分为2类，一类是建立独立的生物质粉碎机和独立的生物质燃烧器，燃烧器位于原锅炉主燃烧器区，即独立喷燃工艺1；另一类是利用电厂备用的磨煤机和对应的燃烧器燃用生物质，即独立喷燃工艺2。
- 4) 再燃工艺。类似独立喷燃工艺，只是生物质喷入位置不同，生物质经粉碎机粉碎后送入锅炉炉膛上部燃尽区的再燃燃烧器，可进一步降低炉内NO_x生成浓度。

4种掺烧方案的工艺流程及技术特点的比对分析参见表4，综合考虑技术可行性、经济性及运行安全性，采用独立喷燃工艺2，即利用锅炉备用制粉系统使生物质在已投运机组上独立掺烧的经济性更高。当生物质比例低或掺烧时间短时，可考虑共磨掺烧方案，但需要严格控制生物质自燃，确保生物质掺烧的安全性。

表 4 不同生物质掺烧工艺对比
Table 4 Comparison of different biomass blending technologies

项目	共磨工艺	共管工艺	独立喷燃工艺 1	独立喷燃工艺 2
工艺流程	生物质在给煤机上游与煤预混,在磨煤机中与煤共同磨制后送至对应的燃烧器	先将生物质燃料单独破碎,然后将破碎后生物质燃料输入原磨煤机出口的粉管道中,与煤粉混合后进入锅炉原燃煤燃烧器	需要配置专用的生物质粉碎机和燃烧器,生物质经粉碎机粉碎后,送入生物质燃烧器后入炉燃烧	利用锅炉备用给煤机、磨煤机、一次风管道及燃烧器实现生物质的磨制、输送及燃烧
技术特点	工艺简单,对机组设备无影响	管道布置及切换控制系统复杂,实际应用较少	独立的管道布置及切换控制系统,系统更为复杂	利用锅炉备用系统,对机组设备无影响
改造范围及成本	无改造	改造较小,设备投资低	改造大,设备投资成本高	无改造
生物质掺烧比例	较低,5%~10%,受限于生物质自燃及磨出力	较高,20%,受限于生物质自燃	高,20%乃至全烧	较低,5%~10%,受限于磨出力
代表电厂	芬兰 Fortum 电厂、英国 Ferry-bridge C 电厂 2 台机组 英国 Fiddlers Ferry 电厂	西班牙 Enel 电厂	波兰 Ostroleka B 电厂、荷兰 Egon 电厂、英国 Ferrybridge C 电厂 2 台机组、英国 Drax 电厂、山东十里泉电厂	宝鸡第二发电公司

3 生物质直接掺烧存在问题及应对措施

由于生物质与常规燃煤的煤质特性及燃烧性能相差较大,且不同生物质之间的煤质特性差别也较大,因此大型煤粉电站锅炉掺烧生物质时,需根据制粉系统及锅炉设备特点,充分考虑掺烧煤种对机组运行性能的影响,重点考虑生物质的全水分、发热量、灰熔融温度和灰成分中 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 和 K_2O 等碱性氧化物灰成分对锅炉效率、制粉系统出力、带负荷能力及锅炉的结渣、沾污和腐蚀等的影响。

3.1 燃料制备、储存和输送

生物质燃料具有低能量密度、高亲水性以及高纤维素等特点,对其运输、储存和制备影响较大。电厂直接采购成型生物质燃料更为经济方便。需要注意的是在雨水天气要避免成型生物质淋雨,否则成型生物质可能会软化变形,影响输送、磨制和后期燃烧,且会散发大量气味,影响周围环境。建议到厂后及时燃用,避免长时间堆放。

3.2 结渣、沾污及腐蚀

生物质煤灰熔融温度低且灰成分中 K_2O 含量远高于常规煤种,生物质中的活性 K_2O 是引起结渣、沾污和腐蚀的主要原因[27]。

另外,部分生物质氯含量较高,且氯化物(主要是 $NaCl$ 和 $CaCl_2$)

均溶于水,在较低温度下氯以 HCl 形式释放,温度升高时,释放速度加速,进一步加剧沾污和腐蚀。因此,在掺烧生物质特别是高氯生物质时,碱金属氯化物腐蚀需额外关注[28]。同样,控制高氯生物质掺烧比例,避免与氯含量较高的煤种掺烧,可将受热面的腐蚀控制在安全范围。

3.3 制粉系统分离器堵塞及自燃

生物质秸秆或稻壳等无法直接送入制粉系统,需新增一套生物质输送及粉碎系统将其制成成型燃料,如十里泉电厂生物质掺烧改造,这将改变电厂现有设备,增加投资。生物质自身密度低,经粉碎后压制成8~33mm颗粒状,密度提高,但进入磨煤机破碎后,密度将大幅降低,部分较大颗粒未经充分磨制即被一次风带走进入分离器,较长的纤维可能堵塞制粉系统进而影响制粉系统出力。当生物质给料量过大,可能造成一次风管道堵塞和磨煤机磨制困难。另外,生物质为极易着火燃料,当磨煤机进出口温度较高时可引起自燃。

3.4 其他问题

生物质挥发分极高,着火温度较常规煤粉明显偏低、着火提前[29],可能引起燃烧器区温度升高,造成燃烧器区结

焦和燃烧器烧损。

部分生物质的全水分高，发热量低，折算水分高，随着生物质掺烧比例增加，炉膛燃烧温度降低，炉膛辐射吸热量降低，排烟温度升高[26]。另外燃烧性能优良的生物质在炉内存在“抢风”问题，可能导致飞灰含碳量升高，降低锅炉效率。

通常生物质中K和Ca等碱性成分高，碱金属如果与催化剂表面接触，能够直接与活性位发生作用而使催化剂钝化。

4掺烧生物质与锅炉主机及辅机的适应性

4.1合适的生物质掺烧方式和掺烧比例

Hughes等[30]研究表明，如果直接磨制未成型的生物质，磨煤机很难将生物质磨至与煤粉同样的粒径，且由于生物质密度轻体积大，掺烧比例将大大受限。采用共磨工艺的英国Ferrybridge

C电厂4×500MW单炉膛前墙燃烧自然循环煤粉

炉，前墙配48台低NO_x

煤粉燃烧器，其中2台锅炉于2004年改成共磨生物质混烧，但生物质混烧比不能超过3%，否则影响磨煤机出力、细度，甚至正常运行。英国Fiddlers

Ferry电厂采用捶击式磨煤机共磨燃煤和生物质，生物质掺烧比例可达20%。采用独立喷燃工艺1的波兰Ostroleka

B电厂和独立喷燃工艺2的宝鸡二电厂生物质掺烧比例均控制在5%左右。Ferrybridge C电厂另外2台机组锅炉于2006年改成单独的生物质处理、磨制及专门的生物粉旋流预燃室燃烧器，即独立喷燃工艺1掺烧方式，6台燃烧生物质的旋流预燃室燃烧器安装在后墙，掺烧效果良好，混烧生物质比例可达20%。可见，掺烧方式对生物质的掺烧比例有明显影响，需根据设备特点选择合适的掺烧方式和掺烧比例，也可保证锅炉效率不会大幅降低。

另外，受制粉系统出力、炉膛结渣沾污、催化剂失效等影响，同样需要控制生物质掺烧比例，将燃煤与生物质混合物灰成分中的Fe₂O₃、CaO、MgO、Na₂O、K₂O等物质控制在较低水平。

推荐生物质掺烧在较高负荷进行，避免造成短时间内低负荷下生物质掺烧比例过高，对机组安全运行产生影响。

4.2与燃烧器的适应性

生物质单独燃烧时着火距离短，可能出现燃烧器烧损，控制生物质燃料一次风温度在较低值，在一定程度上可延迟着火，避免燃烧器烧损。此外，生物质燃烧温度低于煤粉，同样有利于避免燃烧器结焦和烧损。实际运行中，应加强生物质燃烧器喷口附近看火孔的监测，通过调整配风和制粉系统运行方式等手段保障设备正常运行。宝鸡二电厂掺烧生物质期间控制措施得当，并未出现上述问题。与燃煤混合燃烧时，生物质先于煤着火，可能出现“抢风”现象，不利于煤粉的着火和燃尽，由于生物质掺混比例通常低于15%，上述问题可避免。无论采用共磨方案还是单独燃烧方案，生物质燃料均与燃烧系统有较好的适应性，可通过掺配手段避免风险。

4.3与制粉系统的适应性

控制磨煤机进出口温度可避免生物质燃料在磨煤机及一次风管内自燃。根据宝鸡二电厂生物质掺烧经验，磨入口一次风温通常控制在100℃以内，以保证磨出口一次风温不超过50℃，以40~45℃为宜，则不会出现生物质燃料自燃的情况。生物质单独燃烧时该方法易实现，但当生物质与煤混合磨制时，如果仍采用该温度控制方式，不利于煤粉着火，如果磨出口温度过高，则有可能出现生物质自燃，不利于机组安全稳定运行。另外，一次风量需根据实际磨煤机运行情况进行调整，风量大小的原则即为确保磨煤机电流处于合理区间且不出堵磨问题。

4.4结渣沾污及腐蚀防控

为避免入炉混合燃料的碱金属含量过高，出现影响锅炉安全运行的受热面结渣、沾污及腐蚀问题，可通过生物质掺烧种类选取以及生物质掺烧比例控制有效避免，如麦秆K₂

O含量高达30%，不建议与煤灰中K₂O含量偏高的神华煤掺烧，即使与低K₂

O煤种掺烧，也需控制掺烧比例。宝鸡二电厂自2009年掺烧生物质至今，锅炉检修并未发现明显沾污积灰及腐蚀问题，英国Fiddlers Ferry电厂4×500MW切向燃烧煤粉炉掺烧水分低于15%的废木屑颗粒、炼制橄榄油的废品等，生物质掺烧比例可达20%，未出现结渣和积灰问题，锅炉可用率达95%，锅炉效率只降低0.4%。英国Drax电厂6×660MW前后墙对冲燃烧锅炉是世界上容量最大的生物质混烧电厂。其中3台改造成有单独生物质磨制和燃烧的掺烧方式，生物质

混烧比例为10%的BMCR输入热量，锅炉运行良好，未出现严重的结渣沾污及腐蚀。

4.5与辅机系统的适应性

不同生物质的煤质特性偏差较大，需根据具体工程进行脱硫、脱硝及除尘系统复核计算。生物质的硫含量较低，掺烧后炉内SO₂

生成浓度和总量会有所降低，对脱硫系统运行

影响不大。影响燃烧NO_x

生成浓度的主要因素包括燃料自身的含氮量和燃料的燃烧性能，燃料燃烧性能优良时，可采用更为严格的低氮燃烧措施，进而将NO_x

生成浓度降低。尽管生物质的氮含量与常规煤种接近，但生物质的燃烧性能优于常规煤种，可采用更为严格的低氮措施降低炉内NO_x

生成浓度，且对于高水分低热值的生

物质，理论燃烧温度较低，也为更低的NO_x

生成浓度控制创造了条件[31-32]。宝鸡二电厂通过掺烧生物质降低了NO_x生成浓度。

实炉试验结果表明，飞灰量的增加对除尘器无太大影响，对飞灰品质几乎没有影响，说明除尘系统与生物质燃料的适应性较好，且不影响飞灰的综合利用。

5结语

大型煤粉电站锅炉直接掺烧生物质在技术上可行，掺烧比例主要受制粉系统限制。通过生物质种类优选，掺烧5%~10%生物质对大型煤粉电站锅炉主机、燃烧系统、制粉系统及其他辅机系统运行无明显影响。电站煤粉锅炉适宜掺烧成型生物质燃料，并在机组较高负荷（70%以上）下进行，采用独立喷燃工艺掺烧生物质最为简单经济，即利用锅炉备用制粉系统和燃烧器实现生物质独立掺烧。为了防止烧损生物质燃烧器，要求磨制生物质燃料的磨煤机进口风温在100℃以内，以保证磨出口一次风温不超过50℃，以40~45℃为宜。在大容量高参数的煤粉锅炉上直接掺烧生物质具有投资和占地面积少、设备改造少或无、热效率高、掺烧不受季节影响等优势，具有推广前景，目前制约其大规模推广应用的主要原因是生物质不受人工干预的准确计量。

参考文献 (References) :

- [1] 田红,廖正祝.农业生物质燃烧特性及燃烧动力学[J].农业工程学报,2013,29(10):203-210.
TIAN Hong, LIAO Zhengzhu. Combustion characteristics and combustion kinetics of agriculture biomass[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 203-210.
- [2] 马龙海,邓宇昆,董胜亮.我国生物质发电现状分析及研究[J].电力勘测设计,2012(3):70-74.
MA Hailong, DENG Yukun, DONG Shenliang. Research on current situation of biomass power plants in china [J]. Electric Power Survey & Design, 2012(3): 70-74.
- [3] 李忠正.可再生生物质资源——木质素的研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2012,36(1):1-7.
LI Zhongzheng. Research on renewable biomass resource: Lignin [J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition), 2012, 36(1): 1-7.
- [4] 蒋大华,孙康泰,元伟,等.我国生物质发电产业现状及建议[J].可再生能源,2014,32(4):542-545.
JIANG Dahua, SUN Kangtai, YUAN Wei, et al. Development of biomass power generation industry and suggestions in China [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(4): 542-545.
- [5] NICOLAE S, JEAN-FRANCOIS D, FABIO M F, et al. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy policies and facts [J]. Environmental Developmental, 2015, 15: 3-34.
- [6] 王侃宏,罗景辉,刘欢,等.我国生物质发电行业现状比较及发

- 展建议[J].节能,2014,33(1):8-10.
- WANG Kaihong, LUO Jinhui, LIU Huan, et al. Current situation comparison and development suggestion for biomass power generation industry in China[J].Energy Conservation,2014,33(1):8-10.
- [7] 肖建军,黄卫东.浅析我国生物质发电产业现状及主要问题[J].广州化工,2012,40(8):23-25.
- XIAO Jianjun,HUANG Weidong. Brief analysis on the present status of biomass power imndustry and main problems[J]. Guangzhou Chemical Industry,2012,40(8):23-25.
- [8] 高宏志,高圣溥,王宇宏,等.生物质掺烧方案在火电企业中的应用研究及效益分析[J].绿色科技,2015(1):230-233.
- GAO Hongzhi,GAO Shenbo,WANG Yuhong,et al.Application research about mix-combustion of biological substances in power plant and its economic analysis[J].Journal of Green Science and Technology,2015(1):230-233.
- [9] 杨希刚,王双童.大容量燃煤机组生物质能利用技术探析[J].神华科技,2018,16(6):87-90.
- YANG Xigang, WANG Shuangtong. Study about biomass energy utilization technology of large capacity coal-fired units [J]. Shen-hua Science and Technology,2018,16(6):87-90.
- [10] 周国忠.生物质掺烧发电存在问题及探讨[J].科技视界,2017(9):242-243.
- ZHOU Guozhong.Discuss on the problems of biomass co-firing power generation technology [J].Science & Technology Vision,2017(9):242-243.
- [11] 肖志前,宋杰,宋景慧.生物质锅炉混煤掺烧对锅炉经济性 & 稳定性的影响[J].广东电力,2015,28(7):13-16.
- XIAO Zhiqian, SONG Jie, SONG Jinghui. Affect on boiler economy and stability by blended coal combustion of biomass boiler[J]. Guangdong Electric Power,2015,28(7):13-16.
- [12] 费芳芳,毕武林,陈洪世.生物质锅炉添加剂抗结焦性能试验研究[J].机电信息,2019(21):97,99.
- FEI Fangfang,BI Wulin,CHENG Hongshi. Experimental study on additives anti-slugging performance for biomass boiler [J]. Electromechanical Information,2019(21):97,99.
- [13] NICOLAE Scarlat,JEAN-FRANÇOIS Dallemand,FABIO Monforti-Ferrario,et al. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy:Policies and facts[J]. Environmental Development,2015,15:3-34.
- [14] 宋景慧,宋杰,李季.生物质锅炉混煤掺烧对高温腐蚀的影响及污染物排放特性研究[J].电站系统工程,2015,31(2):37-43.
- SONG Jinhui,SONG Jie,LI Ji. Study on influence of high temperature corrosion and pollutants emission of co-combustion of coal in biomass boiler [J]. Power Plant System Engineering,2015,31(2):37-43.
- [15] 刘洋,牛艳青,谭厚章,等.生物质锅炉二级过热器结渣恶化机制分析[J].中国电机工程学报,2011,31(14):8-12.
- LIU yang, NIU yanqing, TAN houzhang, et al. Mechanism of deterioration of the deposits on secondary super-heater in biomass-fired boiler [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(14):8-12.
- [16] 刘蕊,岳增武.燃用生物质锅炉末级过热器管腐蚀原因分析[J].热力发电,2013,42(2):98-100.

- LIU Rui, YUE Zengwu. Corrosion of TP347H final superheater on a biomass boiler [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(2): 98-100.
- [17] 罗必雄, 印佳敏, 吴占松. TP316L 在生物质锅炉过热器气相条件下的腐蚀特性[J]. 热力发电, 2011, 40(3): 34-38.
- LUO Bixiong, YUE Jiamin, WU Zhansong. Corrosion properties of TP316L steel under gaseous-phase condition in superheater area of biomass-burning boilers [J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(3): 34-38.
- [18] NIU Y Q, TAN H Z, MA L, et al. Slagging characteristics on the superheaters of a 12 MW biomass-fired boiler [J]. Energy Fuels, 2010, 24(9): 5222-5227.
- [19] 白兆兴. 生物质锅炉技术现状与存在问题 [J]. 工业锅炉, 2008(2): 29-32.
- BAI Zhaoxing. Present situation and existing problems of biomass boiler technology [J]. Industrial Boiler, 2008(2): 29-32.
- [20] 李宗瑞. 我国生物质直燃发电工程设计的若干问题 [J]. 电网技术, 2008, 31(S2): 268-271.
- LI Zongrui. Analysis of direct-fired biomass power plant design issues in china [J]. Power System Technology, 2008, 31(S2): 268-271.
- [21] MUN T Y, TUMSA T Z, LEE U, et al. Performance evaluation of co-firing various kinds of biomass with low rank coals in a 500 MWe coal-fired power plant [J]. Energy, 2016, 115: 954-962.
- [22] 王一坤, 张广才, 王晓旭, 等. 生物质气化耦合发电提升燃煤机组灵活性分析 [J]. 热力发电, 2018, 47(5): 78-82.
- WANG Yikun, ZHANG Guangcai, WANG Xiaoxu, et al. Analysis of flexibility improvement of coal-fired power plant by biomass gasification coupled power generation [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 78-82.
- [23] 刘建宏. 锅炉掺烧生物质简介 [J]. 锅炉制造, 2015(1): 30-31.
- LIU Jianhong. Synopsis of biomass burning in boiler [J]. Boiler Technology, 2015(1): 30-31.
- [24] 酃林俊, 王双童, 汪建平. 生物质能发电技术现状解析 [J]. 电力科技与环保, 2019(4): 46-48.
- LI Linjun, WANG Shuangtong, WANG Jianping. Analysis of the current status of biomass energy generation technology [J]. Electric Power Science and Technology and Environmental Pro-

- tection 2019(4):46-48.
- [25] 潘升全,谭厚章,刘潇,等.大型电厂煤粉炉掺烧成型生物质试验[J].中国电力,2012,43(12):52-54.
PAN Shengquan, TAN Houzhang, LIU Xiao, et al. Experimental investigation on biomass co-firing in large coal-firing utility furnace [J]. Electric Power, 2012, 43(12):52-54.
- [26] 陈海平,鲁光武,于鑫玮,等.燃煤锅炉掺烧生物质的经济性分析[J].热力发电,2013,42(12):40-43.
CHEN Haiping, LU Guangwu, YU Xinwei, et al. Economic analysis of co-combustion biomass in a coal-fired boiler [J]. Therm Power Generation, 2012, 43(12):40-43.
- [27] 鲁光武,陈海平,于鑫玮,等.生物质与煤掺烧对锅炉结渣特性影响的实验研究[J].节能,2013,32(3):28-31.
LU Guangwu, CHEN Haiping, YU Xinwei, et al. Experimental study on influence of biomass and coal blending on slagging characteristics of boiler[J]. Energy Conservation, 2013, 32(3):28-31.
- [28] 董信光,李荣玉,刘志超,等.生物质与煤混燃的灰分特性分析[J].中国电机工程学报,2009,29(26):118-124.
DONG Xinguang, LI Rongyu, LIU Zhichao, et al. Investigation on the ash characteristic during co-firing of coal and biomass [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26):118-124.
- [29] 王晓钢,鲁光武,路进升.生物质与煤掺烧燃烧特性的实验研究[J].可再生能源,2014,32(1):87-92.
WANG Xiaogang, LU Guangwu, LU Jinsheng. Experimental study on combustion characteristics of biomass and coal blended [J]. Renewable Energy, 2014, 32(1):87-92.
- [30] HUGHES Evan E, TILLMAN David A. Biomass cofiring: Status and prospects 1996 [J]. Fuel Processing Technology, 1998, 54(1/2/3):127-142.
- [31] NARAYANAN K V, NATARAJAN E. Experimental studies on cofiring of coal and biomass blends in India [J]. Renewable Energy, 2007, 32(15):2548-2558.
- [32] 董静兰,阎维平,李钧,等.电站燃煤锅炉掺烧生物质时理论燃烧温度的计算[J].热力发电,2010,39(3):45-48.
DONG Jinglan, YAN Weiping, LI Jun, et al. Calculation of theoretical combustion temperature for blending biomass on coal-fired power station boiler [J]. Therm Power Generation, 2010, 39(3):45-48.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/173763.html>