

TK6生物质燃料结渣特性分析与判别

阎维平，陈吟颖

(华北电力大学能源与动力工程学院，河北保定071003)

摘要：生物质与煤同为固体燃料，尽管组成成分存在明显的区别，但在气化、燃烧与成灰特性等方面有许多共性，本文在分析各种生物质燃料的灰渣组成成分及其对结渣倾向影响的基础上，主要研究了若干煤结渣判别指数和生物质结渣判别指数对判别生物质结渣特性的适用性，基于11种常见生物质燃料灰渣成分的分析，对各自的结渣特性进行了判别，并与以往文献的结渣试验结果进行了比较，建议了各种判别方法的适用程度，推荐了具有较高可靠性的生物质结渣判别方法。

引言

随着化石燃料的紧缺、对环境污染严重及温室效应加重，利用生物质等可再生能源已引起广泛、高度的重视。生物质能具有可再生、低污染、分布广、储量等优点，且是可再生能源中唯一可储存、运输的能源。我国生物质能资源相当丰富，据测算，我国每年理论生物质能资源50亿吨左右，资源总量估计每年可达6.5亿吨标煤以上，其中各类农林业废弃物的资源量每年即有3.8亿吨标煤。

生物质能是蕴藏在生物质中的能量，是绿色植物通过光合作用将太阳能转化为化学能而贮存在生物质内部的能量。在现代化火力发电装置中利用生物质燃料高效洁净发电，是大规模有效利用生物质的重要途径之一。生物质作为燃料时，由于生物质在生长时需要的CO₂量相当于它燃烧时排放的CO₂量，因而对大气的CO₂净排放量近似于零，SO₂、NO排放量降低，同时，由于生物质碱性物含量较大，熔融温度较低，且软化温度和流动温度相差较小，致使生物质结渣可能性增大。随着生物质的开发与应用，研究生物质的积灰、结渣特性等关键基础科学问题日益引起重视。

生物质灰渣与煤灰渣相比，碱性氧化物含量高，灰熔融温度低，含灰量高的生物质燃料结渣倾向大，其结渣判别是否准确可靠将极大程度地影响到生物质燃烧或热转化工艺及设备设计、受热面的布置，以及吹灰系统的选择和布置等。关于煤在热力转化过程中的结渣特性，已经有大量的研究成果与若干成熟可靠的判别方法，并被广泛应用指导工程实践[1]，而纯生物质结渣性能的研究国内外研究的文献均很少见文献报导[2]，但由于生物质与煤在成灰特性上相近，只是成分含量上差异较大，因此，可以利用已有的煤结渣特性研究成果，但需要深入考虑生物质灰分的特征。

文献[1]对生物质与煤共燃的结渣性能进行了分析，在生物质输入热量占总输入热量20%的工况下，认为煤和生物质混合物的灰渣的化学结构与煤相近，可以采用原有判别煤的结渣指数；文献[3]在0.5MW的煤和生物质混合燃烧设备中生物质的结渣特性，主要对麦秆、木材、污泥等生物质与煤掺混燃烧后进行研究，直接从炉膛取样，将表观结渣程度与其灰元素组成、特性及灰熔点进行分析比较。文献[4]对低温热解生物质（花生壳、谷壳、锯屑）与煤共燃的结渣、积灰和磨损特性进行了分析，主要采用灰熔点、碱酸比、硅比、硅铝比等指数对结渣特性进行分析，认为其研究的热解生物质燃料结渣倾向均为严重，但没有分析煤结渣指数判别生物质结渣特性的可靠性；文献[5]认为评价生物质结渣的主要指标为灰成分，但并没有基于灰渣组成成分的试验数据的计算分析；文献[6]采用碱酸比、硅铝比、硅比等判别方法，分析了甘蔗渣、花生壳、谷壳、松木屑的结渣特性，认为硅铝比不宜作为判别指数。

1 生物质灰的组成

生物质的基本化学组成元素：C、H、O、N、碱金属元素（Na、K等）及微量元素（Sn、Co等）组成。生物质的灰含量随生物质的

种类、产地的不同而不同，并受种植

条件的影响，一般地，灰的组成主要有SiO₂，Fe₂O₃，Al₂O₃，CaO，MgO，TiO₂，SO₃，K₂O，Na₂O，P₂O₅

等。生物质中的灰分有两种来源：一是燃料本身固有的，形成于植物生长过程中，本身固有的灰分是相对均匀地分布在燃料中，其中Si，K，Na，S，Cl，P，Ca，Mg，Fe等是导致结渣、积灰的主要元素；另一来源是燃料加工处理过程中带入的，如：砂子、土壤颗粒，其组分与燃料固有的灰分差别很大。表1为11种常见生物质燃料的灰分分析（数据分别来源于以上文献[2~5]）。

表 1 11 种生物质灰分的组成成分
Tab.1 Ash composition of 11 kinds of biomass

灰样	谷壳	花生壳	甘蔗秆	玉米秆	麦秆	稻壳	稻秆	木屑	柳木	白杨木	紫花苜蓿	
空气干燥基灰分 $A_{ad}/(\%)$	19.36	3.58	2.44	3.25	7.02	20.26	18.67	3.6	1.71	2.70	5.27	
干燥基 $S_d/(\%)$	0.05	0.02	0.04	0.18	0.16	0.05	0.18	0.094	0.07	0.02	0.2	
SiO_2	91.02	21.14	46.61	72.2	55.32	91.42	74.67	12.21	2.35	5.90	5.79	
Fe_2O_3	0.93	2.21	14.14	4.69	0.73	0.14	0.85	1.94	0.73	1.40	0.30	
Al_2O_3	0.77	5.30	17.69	4.30	1.88	0.78	1.04	2.54	1.41	0.84	0.07	
CaO	1.34	19.74	4.47	5.15	6.14	3.21	3.01	38.88	41.20	49.92	18.32	
MgO	0.76	8.23	3.33	3.92	1.06	<0.01	1.75	7.37	2.47	18.40	10.38	
灰组成成分/ (%)	TiO_2	0.03	0.35	2.63	0.22	0.08	0.02	0.09	0.25	0.05	0.30	0.02
	SO_3		2.08	0.15	4.40	0.72	1.24	1.85	1.83	2.04	1.93	
	K_2O	3.42	36.22	0.15	4.41	25.60	3.71	12.30	30.13	15.00	9.64	28.10
	Na_2O	0.16	0.99	0.79	1.29	1.71	0.21	0.96	1.14	0.94	0.13	1.10
	P_2O_5	1.21	5.49	2.72	1.05	1.26	0.43	1.41	2.88	7.40	1.34	7.64
	CO_2			4.0					18.24	8.18	14.8	
	未确定	0.36	0.33	1.39	2.62	1.82	-0.64	2.68	0.81	8.38	1.91	11.55
干燥基高位发热量/ (MJ/kg)	13.11	20.71	18.99	18.42	17.94	15.84	15.09	18.26	19.59	19.02	18.67	

由表1可知，稻壳灰分中 SiO_2 含量最高，高达91.42%，柳木的灰分中 SiO_2 含量最低为2.35%；甘蔗秆灰中 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 含量最高，分别为14.14%和17.69%；白杨木灰中 CaO 和 MgO 含量最高；麦秸灰中 SO_3 ， K_2O 和 Na_2O 含量较高，特别是 K_2O 含量占25.60%，超出总灰分的四分之一，木材灰中碱金属含量次之；紫花苜蓿灰中 P_2O_5 含量较高为7.64%。以上11种生物质中，木材灰中 CaO 含量约占总灰分的一半，高于全国煤平均值8倍以上，11种生物质灰中碱金属氧化物（ K_2O+Na_2O ）含量大都远远高于全国煤的平均值（1.99），约为全国煤的平均值的2~16倍。分析还表明，对大多数生物质灰，若 CaO 含量较大，则 SiO_2 含量相对减少，若 SiO_2 含量较多，则 CaO 含量较少。据试验数据统计，木质生物质灰的熔融温度为1200~1250℃，麦秆、农作物为750~1100℃ [4]。

SiO_2 和 CaO 含量，在大多数生物质灰中的含量均超过总灰分的50%以上，大多数生物质灰中的碱金属氧化物（ K_2O+Na_2O ）含量远远高于我国煤灰渣中的平均值，这均是造成生物质比煤的灰熔点低且易结渣的主要原因。

2 生物质热转化过程中灰成分的转化与迁移

生物质灰中的碱金属元素、非金属元素等在转换和燃烧过程中，不同的元素其含量、赋存和转化形式不同[7]，了解其转化与迁移规律有助于理解其结渣与受热面污染的特性。钾元素在秸秆和一些草本生物质原料中含量最高，析出形式分别为氯化钾，氢氧化钾；钠元素相当部分来源于外部杂质，钠的存在形式非常稳定，一般不会参与热解转化；氮元素脱挥发分中析出比煤中的氮早得多，高温下相对较不稳定，易于挥发，在热化学转化的较早阶段就会以氮气、氮氧化物的形式进入气相[8]；氯元素存在对于碱金属在热解中的析出至关重要，因氯元素与生物质中的碱金属物质反应生成相对稳定且易挥发的碱金属氯化物，所以往往是氯的含量而不是碱金属的含量决定了挥发相中的碱金属浓度。

氯元素是高度挥发性元素，几乎所有的氯在热解过程中都进入了气相[9]，除了与碱金属结合成氯化钾、氯化钠蒸汽外，氯化氢也是一种重要的析出形式[10]。一般认为，有机硫在热解过程中倾向于被氧化，而硫酸盐则可能根据具

体环境析出、分解,或驻留在固态残渣中[11]。钙元素在热解过程中不会挥发,而且形成的含钙化合物具有相当高的稳定性,在固态产物内可以找到生物质原料带入的所有的钙;硅元素在热解过程中几乎全部残留在物质中。在热化学转化中,生物质中的硅通常是水合氧化物形式,一般无定形态,偶尔也会以结晶态出现[12]。

3 生物质灰分的危害

由于生物质灰分组成与煤不同,因此,其灰分的危害也与煤不同。一些生物质含有高的碱性氧化物,主要是K或Cl,或者两者皆有

,可能导致受热面灰污染清除难

度更大的问题,譬如,灰中常见的碱金属化合物 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_7$ 的熔点为401, $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ 为325, $\text{Na}_3\text{K}_3\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_6$ 为552, $\text{Na}_2\text{S}-\text{FeS}$ 为640 [13]。在高温燃烧环境下,碱金属及其相关化合物可能在炉膛壁上形成熔渣,或进入气相,以蒸汽或飞灰颗粒的形式沉积于尾部受热面;在采用流化床作为燃烧或气化反应器时,生物质原料中的碱金属可能与床料反应形成低熔点的共晶化合物而引起团聚[14],造成流态恶化。燃烧气体中的氯在高温下,可以导致燃烧系统的加速腐蚀[15]。

对于高氯和碱性氧化物含量高的生物质,要限制其对对锅炉燃煤的掺混比例,在15%或低于15%[16],或用燃料添加剂,或增强吹灰。农作物残留物,包括草和麦秆,一般都有较高的氯和碱性氧化物;而大多数的木质物质和废纸中的氯和碱性氧化物含量较低。硫的污染问题主要是碱性的硫酸盐形式存在,如果碱金属含量低于规定值,硫对受热面的污染问题就不严重。另外,由硫或氯形成的不同形式的酸物质会导致污染与腐蚀问题。

因此,在利用一种新的生物质燃料前要测定其氯和碱性氧化物的含量,以可靠评估其灰渣特性与受热面玷污特性。

4 结渣特性判别

由于生物质灰熔融温度较低,燃用纯生物质的锅炉炉膛出口烟温约在850~950,丹麦某燃用稻壳的发电厂炉膛出口烟温更低至760。国外的一些燃用纯生物质的电厂运行实际情况表明,当炉膛出口烟温超过灰熔融温度时,灰在受热面上的沉积速度加快,且观察到沉积物下面有腐蚀现象[16]。

国内已有燃用秸秆和煤混合发电装置投入运行,但还未见到纯烧生物质的电厂投入商业运行的报道(垃圾发电除外),因此,对燃用生物质锅炉结渣性能的实际运行状况还缺乏可参考的经验数据。本文根据生物质燃料及其灰的组成特性,试图用在工程上有较好适用性的煤结渣判别指数分析纯生物质的结渣性能,筛选出适合纯生物质的结渣判别指标,与文献已有的结渣试验结果比较,判别其结渣倾向,为电站燃用生物质燃料的结渣性能判别提供理论参考。

迄今为止,工程界对煤的结渣性能的研究与实践较多,通常采用的判定依据为灰熔点判定(t_2)和煤灰化学组成判定(包括碱酸比B/A、硅比G、硅铝比S/A)等判别指数,并基于大量的试验数据,给出了各个判别指数的界限值,均在燃煤工程上具有较好的适用性[17~20]。由于生物质灰与煤灰渣的差异较大,并非已有的判别煤结渣指数均能可靠地预测生物质结渣特性。

由于不同生物质灰熔融温度差异较大,变化幅度约在700~1400 范围内,且灰组成成分变化较大,在沿用以往判别煤的常用结渣指数判别生物质结渣程度时,需要对原有的煤判别指数进行筛选,找出适合生物质的判别指数。表2为判别煤结渣性能的判别指数和判定煤是否结渣的界限。

表 2 煤结渣指数判别界限

Tab.2 Judgement indexes for coal slagging

判别指数	程度		
	轻微	中等	严重
软化温度 ST /°C	≥1 350	1 260~1 350	<1 260
碱酸比 B/A	<0.206	0.206~0.4	>0.4
硅比 G	>78.8	78.8~66.1	<66.1
硅铝比 SiO ₂ /Al ₂ O ₃	<1.87	1.87~2.65	>2.65
铁钙比 FeO ₂ /CaO	<0.3 或 >3	0.3~3	接近 1
硫份结渣指数 R _s	<0.6	0.6~2	>2

4.1灰熔融温度对生物质结渣性能的影响

由表2可知，当煤的灰软化温度ST小于1260 时，锅炉受热面严重结渣。据统计，生物质灰的熔融温度大都低于1260 [4]，且为了避免纯燃生物质（农作物残余物）的锅炉对流受热面结渣，炉膛出口温度一般要低于950 ，因此，判别煤的结渣指数ST的判别界限已不适合判别生物质燃料的结渣。

据笔者统计，同一种生物质组成成分和热值虽然会受产地、环境等因素的影响而有所不同，但差异不大或很小，灰熔融温度变化范围较小，因此，可以近似认为不同产地和环境下的同一类生物质对锅炉的结渣倾向的影响基本相同。

生物质中的Ca和Mg元素通常会提高灰熔点，K元素可以降低灰熔点，Si元素在燃烧过程中容易与K元素形成低熔点化合物[14]。农作物中Ca元素含量较低，K元素含量较高，灰熔点较低，因此，燃用农作物的电厂，炉膛出口温度在850 左右或更低范围时，可减轻锅炉受热面结渣；木质生物质中Ca和Mg元素含量较高，其灰熔融温度一般在1100 以上，燃用木质生物质的电厂，锅炉炉膛出口温度可适当提高，甚至在1000 或稍高时仍可避免锅炉受热面结渣。

综上所述，用灰熔点判别生物质结渣性能时，对不同类生物质区别对待，可由特定生物质灰熔点的高低分区段确定判别指数。一般来说，锅炉炉膛出口温度受到燃用生物质的灰熔融温度限制，为避免锅炉受热面结渣，要求炉膛出口温度应低于生物质灰变形温度的50 ~100 。

4.2灰成分对生物质结渣性能的影响

本文采用判别煤结渣指数碱酸比、硅比、硅铝比、硫分结渣指数、铁钙比和综合判别指数及生物质结渣判别指数AI，分别根据11种生物质的灰渣成分分析数据计算得到各自的结渣指数值，并将结渣倾向判别结果与结渣倾向进行研究，寻找合理的生物质结渣判别方法和判别界限，表3为计算与判别结果汇总。

(1) 碱酸比B/A

$$B/A=(Fe_2O_3+CaO+MgO+Na_2O+K_2O)/(SiO_2+Al_2O_3+TiO_2)。 (1)$$

由表3与表4可知，用煤结渣指数碱酸比判别农作物残余物结渣特性时，农作物的B/A值基本在结渣界限的判别范围内。而在判别木质生物质和紫花苜蓿时，由于其灰分中碱性氧化物（主要是CaO、Na₂O或K₂O）含量较高，B/A值较大远远超出结渣指数划分界限，碱酸比判别结渣严重的界限是大于0.4为严重结渣，而柳木的碱酸比为98.92，杨木为11.29，紫花苜蓿为9.9。因此，若用煤结渣指数碱酸比判别生物质结渣倾向时，现有的判别界

限已经不再适用。

(2) 硅铝比 SiO_2/Al_2O_3 、硅比G

表3中生物质硅铝比（谷物的为112.61）大都超过了煤严重结渣判别界限2.65，需要进行修正，但在判别农作物结渣倾向时，判别结果基本与生物质碱性氧化物判别指数一致，但对木质生物质结渣性能的判别不太适宜。

$$G = (SiO_2 \times 100) / (SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO) \quad (2)$$

由表1可知，农作物残余物灰中 SiO_2 含量较大，有的生物质 SiO_2 含量超过了90%(如稻壳)，而木质生物质 SiO_2 含量较少，一般不超过总灰量的20%。计算结果表明，木质生物质G值较小，现有的煤判别界限也不适合木质生物质结渣倾向的判别。

表3 11种生物质结渣特性判别汇总
Tab.3 Judgement results of biomass slagging

判别指数	谷壳	花生壳	甘蔗秆	玉米秆	麦秸	稻壳	稻秆	木屑	柳木	白杨	紫花苜蓿
碱酸比	0.07	2.52	0.34	0.25	0.62	0.08	0.25	5.30	98.92	11.29	9.9
B/A	×	√	○	○	√	×	×	√	×	×	×
硅比	96.78	41.19	67.99	83.99	87.46	96.45	93.01	20.22	0.05	7.81	6.64
G	×	√	○	√	×	×	×	√	×	×	×
硅铝比	118.21	9.57	2.52	16.79	29.43	117.21	71.8	82.71	1.67	7.02	82.71
SiO_2/Al_2O_3	√	√	○	×	√	√	√	×	√	×	×
铁钙比	0.69	0.11	3.16	0.91	0.12	0.043	0.28	0.05	0.018	0.028	0.02
Fe_2O_3/CaO	×	×	√	×	×	×	×	×	√	√	√
硫份结渣指数Rs	0.004	0.05	0.014	0.045	0.099	0.004	0.045	0.50	1.98	0.23	1.98
碱性氧化物指数Al	×	×	√	√	×	×	×	×	○	√	○
碱性氧化物指数Al	0.53	0.64	0.06	0.1	1.07	0.50	1.64	0.62	0.14	0.14	0.82
物指数Al	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	×

注：表中打√表示判别结果与结渣试验结果基本吻合，打○表示判别结果与结渣试验结果基本接近，打×表示判别结果与结渣试验结果不符合。

(3) 硫分结渣指数Rs和铁钙比 Fe_2O_3/CaO

判别指数硫分结渣指数定义

$$Rs = B/A \cdot S_d \quad (3)$$

由于生物质S含量较少使得Rs值较小，大多数Rs值远远低于轻微结渣判别界限，与实际结渣倾向不吻合；因此，煤判别指数 SiO_2/Al_2O_3 和Rs不适合判别生物质结渣倾向。

Fe_2O_3

/CaO值虽然在判别界限范围内，但由于生物质中CaO含量较大，致使用铁钙比判别生物质结渣倾向时，基本为轻微，也不符合实际结渣倾向，因此，铁钙比也不宜作为生物质结渣性能判别指数。

(4) 碱性氧化物指数Al

文献[21~2

2]的作者提出采用碱性氧

化物指数，见式（4），即燃料中每GJ燃料热量含

有碱性氧化物（ K_2O+Na_2

O）的质量，来判别生物质燃料的结渣特性，表4给出了生物质燃料结渣判别界限，由表4可见，对多种生物质的判别结果与结渣试验结果吻合较好。

$$AI = \frac{K_2O + Na_2O}{Q_{ar,gr}} A_{ad}, \quad (4)$$

式中 $Q_{ar,gr}$ 为燃料干燥基高位热值，MJ/g； A_{ad} 为燃料中灰质量含量，%； K_2O ， Na_2O 为燃料灰中 K_2O ， Na_2O 成分质量百分数，%。

表 4 生物质燃料碱性氧化物结渣判别界限

Tab.4 Judgement indexes for alkali oxidant slagging of biomass fuels

判别指数	程度		
	轻微	中等	严重
AI ($\mu\text{g}/\text{J}$)	<0.17	0.17~0.34	>0.34

当碱性氧化物指数值大于0.34kg/GJ时，会出现显著的积灰或结渣现象。生物质中除碱性氧化物含量对积灰或结渣有影响外，燃料中Cl、S、K、Na的含量也会影响其积灰或结渣倾向，但未见研究文献报导。

5结论

用判别煤结渣的方法来预测生物质燃料的结渣特性时，由于生物质灰成分中某些成分含量与煤灰差异较大，ST、R_s和Fe₂O₃/CaO等判别方法不适合作为生物质结渣判别指数；B/A、SiO₂/Al₂O₃

和G判别方法与界限值对以农作物残余物为主的生物质燃料具有一定的适用性，但用于判别木质生物质结渣性能时，应研究合理的结渣判别界限值。比较而言，采用碱性氧化物指数AI判别生物质结渣特性具有相对较高的可靠性，可以在判别不同产地生物质的结渣特性或不同生物质混合燃料的结渣特性时作为重要的参考依据。

参考文献：

- [1]岑可法，樊建人，池作和，沈珞婵.锅炉和热交换器的积灰结渣磨损和腐蚀的防止原理与计算[M].北京：科学出版社[M]，1994，6.
- [2]MarekPronnbis.Evaluationoftheinfluenceofbiomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fuisibi-lity correlations[J].Biomass and Bioenergy，2005，28：275-283.
- [3]Heinzel T，Siegle V，Spliethoff H，et al.Investigation of slagging in pulverized fuel co-combustion of biomass and coal at pilot-scale test facility[J].fuel，1998，54：109-125.
- [4]肖军，段著春，王华，等.低温热解生物质与煤共燃的结渣、积灰和磨损特性分析[J].新能源及工艺，2003，（9）：9-13.
- [5]宋鸿伟，郭臣民，王欣.生物质燃烧过程中积灰结渣特性[J].节能与环保，2003，（9）：29-30.
- [6]JenkinsBM，BaxterLL，Miles TR.CombustionProperties of Biomass[J].FuelProcessing Technology，1998，54：17-46.
- [7]姚向君，田宜水.生物质能资源清洁转化利用技术[M].北京：化学工业出版社，2005.

- [8]Ingwald Obernbergr , Friendrich Biedrmann , Walter Wid-mann and Rudolf Riedl , Concertrations of inorganic ele-ments in biomass fuels and recovery in the different ash fractions[J].Biomass and Bioenergy , 1997 , 3 : 211-224.
- [9]Amiro BD , Sheppard SC , JohnstonF L , etal.Burning ra-dionuclide question : What happens to iodine , cesium and chlorine in biomass fires[J].The Science of the Total En-viroment , 1996 (187) : 93-103.
- [10]Valmari T , Lind T M , Kauppinen E I.Field study on ash behavior during circulating fluidized-bed combustion of biomass[J].Ash Formation , Energy & Fuels , 1999 , 13 : 379-389.
- [11]Thomas R M , Richard W B , Larry L B , et al.Alkalis in alternativebiofuels[J].FACT-Vol.18 , CombustionMod-eling , Scaling and Air Toxins ASME , 1994 , 18 : 211-219.
- [12]Thy P , Jenkins B M.High-temperature melting behavior of ourban woodfuelash[J].Energy&Fuels , 1999 , 13 : 839-850.[13]Kurkela E , Stahlberg P.Rrmoval of particulate and alkali metals forthe productgas of a pressurized fluidized bed gas-ifier[A].Proceedings of theinternationalFiltrationand Sep-aration conference[C].KarlsyueGermany , The Filtration Society , 1991 , 449-467.
- [14]OhmanM , NordinA.Bed agglomeration Characteristics duringfluidizedbed combustion of biomassfuels[J].Energy & Fuels , 2000 , 14 (1) : 169-178.
- [15]季守信 , 阎维平 , 方立军.电站锅炉受热面高温氯腐蚀的机理探讨[J].锅炉制造 , 1999 , 4 : 19-23.
- [16]Bruan M.Jenkins , Laurance L.Oden.Boiler Deposits from Firing Biomass Fuels[J].Biomass and Bioenergy , 1996 , 10 : 125-138.
- [17]阎维平 , 梁秀俊 , 周健等.330MW燃煤电厂锅炉积灰结渣计算机在线监测优化吹灰[J].中国电机工程学报 , 2000 , 20 (9) : 84-88.
- [18]樊泉桂 , 阎维平.锅炉原理[M].北京 : 中国电力出版社 , 2004.
- [19]陈吟颖 , 阎维平 , 石惠芳.330MW燃煤机组锅炉炉膛结渣性能分析研究[J].中国电机工程学报 , 2005 , 25 (11) : 79-85.
- [20]阎维平 , 陈吟颖 , 邢德山 , 等.煤粉锅炉掺烧强结渣煤的混煤结渣性能研究[J].中国电机工程学报
- [21]Jenkins B M , Baxter L L , Miles T R , et al.Combustion-properties of biomass[J].Fuel Processing Technology , 1998 , 54 : 17-46.
- [22]Vamvuka D , Zografos D.Predicting the behaviour of ash fromagricultural wastes duringcombustion[J].Fuel , 2004 , 83 : 2051-2057.
- [23]Miles T R , Baxter L L , et al.Alkai deposits found in biomass power plants : a preliminary investigation of their extent and nature.National Renewable Energy Laboratory , Golden , CO , 1995.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/117910.html>