

文章编号:1674-7607(2025)03-0366-08

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2025.240002

生物质锅炉富氧燃烧性能评估及适应性分析

蒋晓锋¹, 崇培安¹, 朱晓磊¹, 谷朋泰¹, 刘向民¹, 王海峰²

(1. 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240;

2. 济南锅炉集团有限公司, 山东济南 250023)

摘要:以130 t/h生物质炉排锅炉为对象,构建富氧燃烧热力计算方法,完成性能评估并进行适应性分析。结果表明:在含氧量为26.7%的配风条件下,过热器喷水量适宜,炉膛燃烧温度与空气工况相当,排烟温度低于除尘器允许工作温度;相比空气工况,富氧工况的锅炉效率提高0.7个百分点,烟气量减小25%,高温腐蚀速率有加快的风险,磨损风险减小,积灰加剧,低温腐蚀风险不大,锅炉适应性良好,烟尘质量浓度增大33%,SO₂体积分数基本不变,NO_x体积分数降低,环保系统适应性良好;富氧工况的高浓度CO₂为低成本绿碳捕集创造了有利条件。

关键词:生物质锅炉;富氧燃烧;热力计算;性能评估;适应性

中图分类号:TK227

文献标志码:A

学科分类号:470.30

Performance Evaluation and Adaptability Analysis of Oxygen-enriched Combustion in Biomass Boilers

JIANG Xiaofeng¹, CHONG Peian¹, ZHU Xiaolei¹, GU Pengtai¹,
LIU Xiangmin¹, WANG Haifeng²

(1. Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China;

2. Jinan Boiler Group Co., Ltd., Jinan 250023, Shandong Province, China)

Abstract: Thermal calculation method was constructed to complete the performance evaluation and adaptability analysis of a 130 t/h oxygen-enriched biomass combustion grate boiler. Results show that under the air supply condition with 26.7% oxygen content, the superheater water spray rate is appropriate, the furnace combustion temperature is equivalent to the conventional air combustion condition, and the exhaust gas temperature is lower than the maximum allowable operating temperature of the dust collector. Under oxygen-enriched combustion conditions, the boiler efficiency increases by 0.7%, and the flue gas volume decreases by 25% compared with air conditions. The risk of high-temperature corrosion and ash accumulation increases, the wear risk decreases and the low temperature corrosion risk is small. The boiler shows good adaptability. The dust concentration in the flue gas increases by 33%, the SO₂ volume fraction remains basically unchanged, the NO_x volume fraction decreases, and the environmental protection system demonstrates good adaptability. The high concentration of CO₂ under oxygen-enriched combustion conditions creates favorable conditions for low-cost green carbon capture.

Key words: biomass boiler; oxygen-enriched combustion; thermal calculation; performance evaluation; adaptability

收稿日期:2024-01-02 修订日期:2024-01-19

基金项目:国家电投上海发电设备成套设计研究院有限责任公司科研资助项目(202305156J)

作者简介:蒋晓锋(1982—),男,四川达州人,正高级工程师,硕士,主要从事清洁火电及节能环保技术研究,

E-mail:jiangxiaofeng@speri.com.cn.

在“双碳”愿景下,国家能源结构正加速向以清洁能源为主的新型电力系统变革。作为21世纪终极能源的氢能,将其与可再生能源消纳耦合则成为构建新型电力系统的热点^[1]。由于氢储运成本居高不下,被称为“液态阳光”的甲醇则成为低成本储氢的有效利用手段。将可再生能源生产的绿氢与CO₂转化为甲醇,不仅实现了CO₂资源化利用,亦可将氢能储存于液体燃料,实现绿电转化^[2]。欧盟遵循碳排放强度对绿色甲醇的定义,其碳源需来自大气或生物质。

至此,基于生物质的碳捕集技术成为构建绿色甲醇产业链的关键环节。按照燃烧工艺划分,碳捕集技术分为燃烧前捕集、富氧燃烧和燃烧后捕集3个方向^[3]。其中,富氧燃烧技术可消纳新能源制氢副产物O₂,是耦合新能源最具应用前景的碳捕集技术^[4]。富氧燃烧技术是指将纯氧和循环烟气代替空气作为助燃剂的碳捕集技术,可大幅提高烟气中的CO₂浓度,降低CO₂的捕集成本。针对燃煤机组碳减排技术,国内已开展了一系列前瞻性的燃煤富氧燃烧技术研究,并取得了一定的研究成果^[5-7],但针对生物质锅炉富氧燃烧技术的相关研究工作,行业内鲜有涉足。在燃料特性和燃烧方式方面,生物质锅炉与燃煤锅炉有较大区别^[8],针对存量生物质锅炉进行富氧燃烧改造及适应性研究具有现实意义。

生物质锅炉主要分为炉排和流化床2种燃烧方式,其中振动炉排锅炉因其控制方式简洁、燃料适应性强、运行可靠性高、厂用电率低等优点在国内市场占70%以上。笔者以某电厂130 t/h生物质振动炉排锅炉为例,开展生物质富氧燃烧适应性分析。

1 富氧燃烧改造方案

1.1 设备概况

某电厂130 t/h生物质振动炉排锅炉为高温、高压参数自然循环、单锅筒、单炉膛、平衡通风、固态排渣、全钢架支撑结构锅炉。锅炉设计燃料以农作物秸秆为主。

锅炉采用生物质炉排的燃烧方式。锅炉汽水系统采用自然循环,锅炉采用“M”型布置,炉膛和过热器通道采用全封闭的膜式壁结构。过热蒸汽采用四级加热,三级喷水减温方式。尾部竖井内布置有七级省煤器。空气预热器布置在烟道外,采用给水加热的方式。锅炉额定参数如表1所示。

1.2 烟风系统

锅炉烟风系统采用平衡通风,设置单台送风机

表1 锅炉主要参数

Tab. 1 Main parameters of the boiler

参数	数值
额定蒸发量/(t·h ⁻¹)	130
额定蒸汽压力/MPa	9.2
额定蒸汽温度/℃	540
额定给水温度/℃	220
热风温度/℃	199
排烟温度/℃	129
锅炉效率/%	89.1
燃料消耗量/(t·h ⁻¹)	39.6
喷水量/(t·h ⁻¹)	18.6

和单台引风机。热风管道在炉前分为一、二次风,一、二次风量比例约为3:7。采用协同净化系统脱除锅炉烟气污染物,除尘、脱硫、脱硝工艺分别采用旋风除尘器+布袋除尘器、湿法烟气脱硫工艺和选择性非催化还原(SNCR)脱硝方式。

1.3 系统改造方案

富氧燃烧技术的主要改造原理为使用氧气替代空气作为助燃剂强化燃烧,通过掺混再循环烟气(即CO₂)来控制O₂浓度在合适范围内,保证锅炉正常燃烧和换热。富氧燃烧的烟气再循环分为湿烟气循环和干烟气循环2种方式^[9]。湿烟气循环方式可充分利用烟气余热,锅炉效率高,但循环烟气湿度大,烟气酸露点高,且送风机和除尘器不耐高温需改造。干烟气循环方式与常规运行方式接近,主辅机和环保设施可良好适应。生物质锅炉采用单送风机+布袋除尘器方式,干烟气循环方式更适合生物质富氧燃烧。

针对案例锅炉制定的富氧燃烧适应性改造系统如图1所示,改造范围包括:(1)从引风机出口烟道上引出全流量烟气再循环旁路烟道,汇流至送风机吸风口;(2)烟气再循环旁路烟道布置喷淋塔,将烟温降至60℃以下;(3)从烟气再循环旁路烟道(喷淋塔后)引出烟道支路至碳捕集工艺;(4)在送风机吸风口增加氧气供应管道。

2 富氧燃烧性能评估

2.1 热力计算方法

锅炉性能评估依据锅炉热力计算,生物质振动炉排炉为层燃炉,计算方法流程与室燃炉有所差异,主要区别在于:(1)室燃炉没有炉拱设计,炉膛结构与燃烧方式截然不同,炉膛热力计算存在巨大差异;(2)空气预热器不同于常规的烟风换热形式,空气

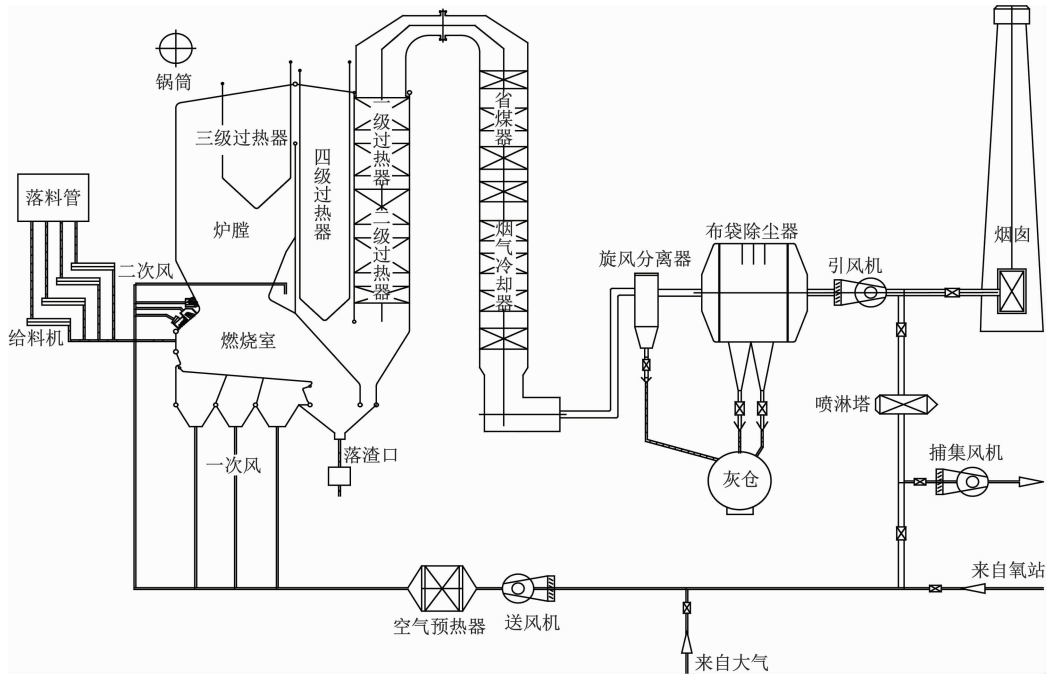


图 1 富氧改造烟风系统图

Fig. 1 Flue gas and air system diagram after oxygen-enriched combustion retrofit

预热器独立于烟气流程,采用给水加热空气的形式;
(3) 给水加热系统更为复杂,省煤器之前布置有烟气冷却器,多级组相互串联;(4) 锅炉容量虽小,但过热器系统较复杂,过热器分四级布置,设置有三级减温器。

热力计算标准规定了空气氛围下锅炉热力计算方法,但该方法并不适用于富氧工况。富氧工况入炉风由 O_2/N_2 变为 $O_2/CO_2/H_2O$,其中氧气体积分数为 21%~27%。计算模型需对标准中的空气焓、烟气焓、对流传热系数、辐射传热系数的计算方法进行修正,才能适用于富氧燃烧^[10]。主要修正包括:

(1) 焓温表。空气工况的入炉空气焓按平均空气成分取值。富氧工况的入炉风随配风比例变化,单位焓值由组分确定。富氧工况的烟气组分中 N_2 变为高浓度 CO_2 和 H_2O ,单位体积焓明显大于空气工况。

(2) 物理特性参数。涉及传热计算的烟风物理特性参数包括导热系数、黏度、密度、普朗特数 (Pr)。空气工况的烟风按单一介质考虑,仅对水分进行修正。富氧工况烟风中 CO_2 和 H_2O 的体积分数大,由组分加权确定,既考虑温度变化又考虑成分变化。

(3) 辐射传热系数。根据辐射传热原理,双原子气体属于辐射透明介质,而三原子气体具有辐射特性。富氧工况下具有辐射特性的 H_2O 和 CO_2 的体积分数远大于空气工况。

(4) 对流传热系数。富氧工况下管外烟气冲刷对流传热系数的计算根据实际的烟气特性确定,相同流速下的对流传热系数大于空气工况。

2.2 计算公式修正

依据锅炉热力计算标准中各参数的定义,对以下计算公式进行修正。

2.2.1 氧气量

空气工况下,根据燃料成分计算理论燃烧所需的空气量 V^0 :

$$V^0 = 0.0889 \times [\omega(C_{ar}) + 0.375 \times \omega(S_{ar})] + 0.265 \times \omega(H_{ar}) - 0.0333 \times \omega(O_{ar}) \quad (1)$$

富氧工况下,直接计算理论需氧量:

$$V^0 = 0.01866 \times \omega(C_{ar}) + 0.007 \times \omega(S_{ar}) + 0.0555 \times \omega(H_{ar}) - 0.007 \times \omega(O_{ar}) \quad (2)$$

式中: $\omega(C_{ar})$ 、 $\omega(S_{ar})$ 、 $\omega(H_{ar})$ 、 $\omega(O_{ar})$ 为燃料应用基成分 C、S、H、O 的质量分数, %。

2.2.2 烟气密度

空气工况下,每千克燃料产生的烟气质量 G_{yq} 与空气过量系数相关,计算公式为

$$G_{yq} = 1 - \omega(A_{ar}) + 1.306 \times \alpha_{av} \times V^0 \quad (3)$$

$$V_{yq} = V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{RO_2} + (\alpha_{av} - 1) \times V^0 \quad (4)$$

$$\rho_{yq} = G_{yq} / V_{yq} \quad (5)$$

式中: α_{av} 为烟气平均过量空气系数; V_{yq} 、 V_{H_2O} 、 V_{N_2} 、 V_{RO_2} 为烟气、 H_2O 、 N_2 、 RO_2 体积, m^3/kg ; $\omega(A_{ar})$ 为应用基灰分质量分数, %; ρ_{yq} 为烟气密度, kg/m^3 。

富氧工况下,烟气由燃料生成的烟气和再循环

CO₂ 以及漏风空气等组成,其密度 ρ_{yq} 为

$$\rho_{yq} = \frac{M_{O_2}}{22.4} \varphi_{O_2} + \frac{M_{CO_2}}{22.4} \varphi_{CO_2} + \frac{M_{H_2O}}{22.4} \varphi_{H_2O} + \frac{M_{N_2}}{22.4} \varphi_{N_2} \quad (6)$$

式中: M 为各组分的相对分子质量, g/mol; φ 为各组分的体积分数。

2.2.3 辐射减弱系数

富氧工况下,在计算三原子气体辐射减弱系数时必须考虑 CO₂ 和 H₂O 光带部分重叠带来的影响,通常对该辐射减弱系数的修正量采用 Lechner

$$k_{qzx} = k_q - \Delta k = \left[\frac{7.8 + 16\varphi_{H_2O} + \varphi_{CO_2}}{3.16 \sqrt{p_{H_2O} + p_{CO_2}} S} - 1 \right] \left(1 - 0.37 \frac{\theta'_i + 273}{1000} \right) - \left(\frac{\zeta}{10.7 + 101\zeta} - 0.089\zeta^{10.4} \right) \lambda_0^{2.76} \quad (10)$$

式中: θ'_i 为炉膛出口烟气温度, °C。

同样,由于富氧工况下烟气密度发生变化,灰粒辐射减弱系数 k_h 也需进行修正。

2.2.4 对流换热计算

受热面传热计算与烟气对流传热系数强关联,其对流传热系数 α_d 的通式为

$$\alpha_d = X \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu} \right)^m Pr^n \quad (11)$$

式中: X 、 m 、 n 为常数; λ 为导热系数, W/(m·K); d 为管子外径, m; w 为烟气流速, m/s; ν 为运动黏度, m²/s。

空气工况下对流传热系数以平均成分烟气特性为基础进行计算。富氧工况下采取先组分后混合的方式对这些物性参数进行计算。

混合气体导热系数 λ_m 的计算公式为

$$\lambda_m = \sum y_i \lambda_i M_i^{1/3} / \sum y_i M_i^{1/3} \quad (12)$$

式中: λ_i 为 i 组分的导热系数, W/(m·K); M_i 为混合物中 i 组分的摩尔质量, g/mol; y_i 为混合物中 i 组分的摩尔分数或体积分数。

2.3 关键运行参数选择

利用修正后的富氧燃烧热力计算程序对富氧工况进行校核计算,计算流程与常规工况基本一致。其中,富氧燃烧运行调整参数包括含氧体积分数(以下简称含氧量)、过氧系数和漏风系数,依据锅炉运行工况和系统控制要求原则选取上述参数。

2.3.1 含氧量

含氧量是富氧工况特有的性能参数,也是评估锅炉性能的核心参数,可通过控制烟气再循环量进行调节。根据燃煤富氧燃烧相关文献^[11-12],含氧量取 26%~29%时,理论燃烧温度、传热系数与空气工况接近。生物质富氧燃烧的含氧量同样应考虑多种因素变化。笔者对 3 个富氧工况进行了分析

的宽带模型修正式^[11]:

$$\Delta k = \left(\frac{\zeta}{10.7 + 101\zeta} - 0.089\zeta^{10.4} \right) \lambda_0^{2.76} \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O} + p_{CO_2}} \quad (8)$$

$$\lambda_0 = \lg[(p_{H_2O} + p_{CO_2})S] \quad (9)$$

式中: p_{H_2O} 、 p_{CO_2} 为水蒸气和 CO₂ 的分压, MPa; Δk 为修正系数; S 为有效辐射层厚度, cm。

修正后的三原子气体辐射减弱系数 k_{qzx} 为常规燃烧气氛下的减弱系数 k_q 减去修正系数 Δk , 即

计算,性能参数对比如表 2 所示。

表 2 富氧工况参数对比

Tab. 2 Comparison of parameters between oxygen-enriched combustions and conventional combustion conditions

参数	富氧工况			空气工况
循环烟气倍率	2	2.5	3	
锅炉蒸发量/(t·h ⁻¹)	130	130	130	130
含氧量/%	30.3	26.7	22.5	21.0
绝热燃烧温度/°C	1 710	1 556	1 430	1 514
炉膛出口烟温/°C	854	863	860	904
排烟温度/°C	153	145	140	129
喷水量/(t·h ⁻¹)	7.4	13.9	18.8	18.6
锅炉效率/%	90.2	89.8	89.4	89.1
省煤器烟气流速/(m·s ⁻¹)	5.67	6.44	7.25	9.07

根据表 2 数据,富氧工况下,随着含氧量增大,炉膛绝热燃烧温度升高,过热器喷水量下降,锅炉效率升高,烟气流速下降。在含氧量为 30.3% 的配风条件下,炉膛绝热燃烧温度达 1 710 °C(炉膛结焦风险大),排烟温度达 153 °C(除尘器超温),喷水量为 7.4 t/h(过热蒸汽调温困难)。

在含氧量为 26.7% 的配风条件下,过热器喷水量适宜,炉膛燃烧温度与空气工况相当,排烟温度低于除尘器允许工作温度。因此,富氧工况的含氧量推荐取值为 26.7%。

2.3.2 过氧系数

为保证燃料充分燃烧,需要提供足够的氧气量,锅炉富氧燃烧时采用过氧系数来表征炉内燃烧供氧量是否充足,类似于空气燃烧时的过量空气系数。过氧系数越低,获得的烟气 CO₂ 浓度越高,燃煤富氧燃烧的过氧系数选取 1.15^[13]。考虑到生物质燃料的易燃性以及炉排配风的不均匀性,生物质富氧

燃烧过氧系数选取 1.1 较为合适。

2.3.3 漏风系数

锅炉以负压运行,由于门孔、炉墙和穿墙管等处不严密,生物质炉排锅炉设计漏风系数为 10%。富氧工况下,漏风系数对烟气中 N_2 体积分数的影响非常大。 N_2 的体积分数随漏风系数的增大线性升高,且因烟气循环累计效益加倍增大。漏风也会引起烟气中 O_2 体积分数增大。 N_2 和 O_2 体积分数过高会显著降低 CO_2 的体积分数,进而增加 CO_2 捕集成本。因而需要采取漏风控制措施,将漏风系数控制在 6% 以内。

2.4 计算结果及分析

2.4.1 计算结果及分析

富氧工况详细计算结果如表 3 和表 4 所示。富氧工况的各项性能参数相比于空气工况变化较大,差异如下:(1) 富氧工况氧气分压增加,烟气流速减小 25%,烟气流速明显下降,绝热燃烧温度略有升高;(2) 由于三原子气体分压大,富氧工况的炉膛辐射换热和炉膛吸热增强,炉膛出口烟温降低;(3) 烟气流速下降,对流传热系数减小,但辐射传热系数增加,总的传热系数增加;(4) 富氧工况的锅炉效率相比空气工况提高约 0.7 百分点。

表 3 富氧工况性能参数

Tab. 3 Performance parameters for oxygen-enriched combustion conditions

参数	蒸发量/ ($t \cdot h^{-1}$)	蒸汽压力/ MPa	蒸汽温度/ $^{\circ}C$	冷风温度/ $^{\circ}C$	热风温度/ $^{\circ}C$	排烟温度/ $^{\circ}C$	锅炉效率/ %	燃料量/ ($t \cdot h^{-1}$)	喷水量/ ($t \cdot h^{-1}$)
数值	130	9.2	540	60	208	145	89.8	38.8	13.9

表 4 富氧工况受热面参数

Tab. 4 Heating surface parameters under oxygen-enriched combustion conditions

名称	入口烟温/ $^{\circ}C$	出口烟温/ $^{\circ}C$	入口工质温度/ $^{\circ}C$	出口工质温度/ $^{\circ}C$	烟气流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	工质流速/ ($m \cdot s^{-1}$)
炉膛	1 556	863	0	0	0	0
三级过热器	863	710	339	482	2.90	18.78
水冷吊挂管	710	703	0	0	4.60	0
四级过热器	703	550	467	540	3.70	17.92
二级过热器	550	418	312	346	3.85	9.52
一级过热器	418	342	313	335	5.16	8.20
省煤器	342	228	211	256	6.44	0.85
烟气冷却器	228	145	138	201	5.39	0.79
给水空气预热器	60	208	220	138	5.96	1.32

2.4.2 烟气成分分析

富氧工况进风侧及排烟侧气体成分如表 5 所示。富氧工况下送风量明显下降, N_2 体积分数大幅降低, O_2 、 CO_2 和 H_2O 体积分数升高。排烟量下降, CO_2 体积分数由 12% 大幅提高至 39.9%,去除水分后的干烟气 CO_2 体积分数可达到 70% 以上,高浓度 CO_2 烟气为后端低成本碳捕集创造了有利条件。

3 适应性分析

3.1 锅炉适应性

3.1.1 高温腐蚀

生物质锅炉过热器高温腐蚀是因为生物质燃料中含有大量的碱金属氯化物和少量的硫化物,这些

碱金属的氯化物和硫化物在高温(550~900 $^{\circ}C$)缺氧条件下变成黏稠和熔化状态附着在受热面管子外表面,破坏氧化膜,当其与氧气接触时,部分氯被置换出来,强氧化性的氯再次腐蚀管材。氯被置换后,氧化物形成了最终的氧化皮。温度是腐蚀产生的条件之一,只有在高温条件下,碱金属的氯化物和硫化物发生熔化时才会造成严重腐蚀。

生物质锅炉高烟温区域的过热器采用不锈钢材料 TP347H,不锈钢材料中高含量的 Cr、Ni 对钢材的抗氧化性有明显的增强效应,确保受热面安全运行。有关耐腐蚀特性的研究表明,TP347H 适用于生物质锅炉过热器^[14]。在富氧工况下,高浓度 CO_2 烟气氛围下,受热面腐蚀速率有加快的趋势^[15]。富氧工况下还应合理配风,严格控制高温过热器壁温

表5 富氧工况烟风参数

Tab.5 Flue gas and air system parameters for oxygen-enriched combustion conditions

参数	空气工况	富氧工况
入口风量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	123 288	87 687
过量空气/氧气系数	1.2	1.1
送风侧		
O_2 体积分数/%	21.00	26.70
水蒸气体积分数/%		15.44
CO_2 体积分数/%		37.42
N_2 体积分数/%	78.00	20.44
锅炉出口烟风量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	167 628	125 740
排烟温度/ $^{\circ}\text{C}$	129	145
排烟侧		
CO_2 体积分数/%	12.00	39.90
水蒸气体积分数/%	20.00	33.30
O_2 体积分数/%	6.00	5.00
N_2 体积分数/%	62.00	21.80

不高于设计值,可有效缓解高温腐蚀的发生。此外,还应加强吹灰措施以避免碱金属盐的大量黏结,也是控制腐蚀发生的必要手段。

3.1.2 磨损积灰

受热面积灰与烟气流速、露点温度、结构布置等因素有关。生物质燃料燃烧产生的灰分熔点较低,具有很强的黏附性,容易附着在受热面管子上。同时,低温烟气冷却器还容易发生由飞灰冲刷引起的磨损泄漏。生物质锅炉通过设置吹灰器和防磨罩,保证了烟道的畅通及换热。但根据实际运行情况,低温烟气冷却器因烟温低、灰粒硬度大、烟气流速不均匀等因素,少数生物质锅炉的烟气冷却器局部区域仍出现了明显的磨损情况。

富氧工况下,烟气量大幅降低,烟气流速低,省煤器区域平均烟气流速由 9.07 m/s 降低至 6.44 m/s。磨损速率与烟气流速平方成正比,富氧工况下磨损风险可完全避免。与此同时,烟气流速降低引起的积灰趋势明显加剧,建议根据运行情况加强尾部受热面的吹灰频率。

3.1.3 低温腐蚀

锅炉采用给水加热冷风的复合空气预热器,将其布置在烟气流程之外,避免空气预热器的低温腐蚀。末级烟气冷却器采用耐腐蚀 09CrCuSb 管子,防止低温腐蚀问题。而生物质燃料的硫含量很低,仅 0.03%,烟气冷却器的入口水温为 115 $^{\circ}\text{C}$,高于烟气酸露点温度值(89.8 $^{\circ}\text{C}$)。锅炉实际运行情况表明,通过严格控制壁温,基本可杜绝低温腐蚀的风险。

富氧工况下,因烟气湿度增加,烟气酸露点温度升至 103 $^{\circ}\text{C}$ 。通过将烟气冷却器的入口水温控制在 120 $^{\circ}\text{C}$ 以上,仍可确保烟气冷却器不发生低温腐蚀。

3.2 环保适应性

3.2.1 除尘

富氧燃烧的污染物控制基于原机组烟气污染物脱除的协同净化系统。由表 5 可知,相比空气工况,富氧工况的烟气量减少 25%,烟尘质量浓度增大 33%, CO_2 体积分数提高 28% 左右,叠加烟气再循环效应,烟气湿度和 SO_2 体积分数都会增大。

锅炉配置旋风除尘器十布袋除尘器两级除尘工艺,对富氧燃烧工况的适应性良好。烟尘浓度虽然增大,但烟尘总量不变,旋风除尘器可脱出大部分粉尘,对布袋除尘器出力的影响不大。理论上因烟气流速下降,布袋除尘器的粉尘排放浓度更低,特别是对捕集细微粒子更有利。

布袋除尘器对烟气含尘浓度和湿度有一定的适用范围,但是生物质硫含量不高,飞灰比例不高,其烟气的酸露点温度也较低,控制合理的烟气再循环量和烟温,可确保除尘器工作正常且不结露。

3.2.2 脱硫

富氧工况下,燃烧气氛中含有高浓度的 CO_2 ,使燃料的 SO_2 生成特性有别于常规的空气工况。由于生物质设计燃料的硫含量低,炉排炉低温燃烧生成的 SO_2 量并不高。在富氧工况下,因烟气密度大、比热容高,炉膛燃烧温度较高,燃烧效率高, SO_2 的初始生成速度会加快,但 SO_2 总量变化不大。文献[16]采用动力学模型研究了富氧燃烧 SO_3 的生成机理, SO_3 浓度达到常规燃烧的 2 倍。

富氧燃烧技术采用干烟气循环方式,尾部烟气通过脱硫塔进行脱硫,避免污染物的叠加效应,使硫化物排放指标控制在环保要求以内。

3.2.3 脱硝

生物质锅炉采用炉排层燃方式,属于低温燃烧,采用 SNCR 脱硝技术。炉膛燃烧生成的 NO_x 有热力型、快速型和燃料型 3 种类型,其中燃料型 NO_x 是最主要的,热力型 NO_x 的生成与燃烧温度有很大关系,燃烧过程中快速型 NO_x 的生成量较少。

富氧工况以 CO_2 代替 N_2 的烟气氛围,更利于控制 NO_x 的生成量。首先,富氧工况下 N_2 极少,避免了热力型 NO_x 大量生成。其次,相比 N_2 , CO_2 的比热大、热扩散率小, CO_2 气氛下燃料燃烧速率慢,富氧工况下燃料型 NO_x 生成量减少。

另外,富氧工况下 O_2 浓度提高使得挥发分的析出和燃烧反应速度更快,高浓度 CO_2 与碳发生还

原反应生成大量的CO,CO对NO_x进行还原。文献[17]通过实验得出,富氧燃烧下NO排放量可以降低到常规空气燃烧的1/7。

4 结论

(1) 在含氧量为26.7%的配风条件下,过热器喷水量适宜,炉膛燃烧温度与空气工况相当,排烟温度低于除尘器允许工作温度。

(2) 对比空气工况,富氧工况的锅炉效率提高约0.7个百分点,烟气量减小25%。

(3) 富氧工况下,高温腐蚀速率有加快的风险,磨损风险减小,积灰加剧,低温腐蚀风险不大。锅炉适应性良好,通过加强吹灰、控制壁温等措施可确保生物质锅炉安全运行。

(4) 富氧工况下,烟尘质量浓度增大33%,SO₂浓度基本不变,NO_x浓度降低。环保系统适应性良好,可确保排放指标控制在环保要求内。

(5) 富氧工况下,干烟气CO₂体积分数可达到70%以上,为后端低成本绿碳捕集创造有利条件。

参考文献:

- [1] 许传博,赵云灏,王晓晨,等. 碳中和愿景下考虑电氢耦合的风光场站氢储能优化配置[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 10-18.
XU Chuanbo, ZHAO Yunhao, WANG Xiaochen, et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage for wind and solar power stations considering electricity-hydrogen coupling under carbon neutrality vision[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(1): 10-18.
- [2] 舒斌,陈建宏,熊健,等. 碳中和目标下推动绿色甲醇发展的必要性分析[J]. 化工进展, 2023, 42(9): 4471-4478.
SHU Bin, CHEN Jianhong, XIONG Jian, et al. Necessity analysis of promoting the development of green methanol under the goal of carbon neutrality [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(9): 4471-4478.
- [3] 马双忱,樊帅军,武凯,等. 双碳战略背景下燃煤电厂CCUS技术发展:挑战与应对[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 1-13.
MA Shuangchen, FAN Shuaijun, WU Kai, et al. CCUS technology development of coal-fired power plant under the background of dual carbon strategy: challenges and countermeasures[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(6): 1-13.
- [4] 徐钢,张钟,吴志聪,等. 基于绿氢和生物质富氧燃

烧技术的零碳甲醇合成系统[J]. 动力工程学报, 2022, 42(10): 925-932.

XU Gang, ZHANG Zhong, WU Zhicong, et al. Zero carbon methanol synthesis system based on green hydrogen and biomass oxygen enriched combustion technology[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(10): 925-932.

- [5] 刘建华. 国内燃煤锅炉富氧燃烧技术进展[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 48-54.
LIU Jianhua. Research and development of oxy-fuel combustion for coal-fired boiler in China[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(7): 48-54.
- [6] 郑楚光,赵永椿,郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3856-3864.
ZHENG Chuguang, ZHAO Yongchun, GUO Xin. Research and development of oxy-fuel combustion in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(23): 3856-3864.
- [7] 卢雄,魏博,王建江,等. 基于准东煤富氧燃烧的660 MW超超临界锅炉热力系统结构优化分析[J]. 动力工程学报, 2023, 43(10): 1276-1284.
LU Xiong, WEI Bo, WANG Jianjiang, et al. Structure optimization analysis of thermal system in a 660 MW ultra-supercritical boiler with Zhundong coal oxygen-enriched combustion[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43(10): 1276-1284.
- [8] 朱艳艳,张林华,崔永章,等. 基于富氧条件的生物质颗粒燃烧特性实验研究[J]. 山东建筑大学学报, 2013, 28(1): 36-41.
ZHU Yanyan, ZHANG Linhua, CUI Yongzhang, et al. Experimental research on biomass particle combustion characteristics based on oxygen-enriched conditions[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2013, 28(1): 36-41.
- [9] 汪丽芬,王恩禄,刘磊,等. 富氧燃烧锅炉热平衡计算方法研究[J]. 锅炉技术, 2014, 45(1): 31-36.
WANG Lifen, WANG Enlu, LIU Lei, et al. Research on the heat balance calculation method of the oxy fuel combustion boilers[J]. *Boiler Technology*, 2014, 45(1): 31-36.
- [10] 谢妍,王赫阳,赵军,等. 炉内烟气成分对富氧燃烧锅炉传热特性的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2022, 28(3): 283-291.
XIE Yan, WANG Heyang, ZHAO Jun, et al. Influence of flue gas composition on the heat transfer characteristics of oxy-fired boiler[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2022, 28(3): 283-291.
- [11] 吴海波. 不同O₂/CO₂配比下锅炉的富氧燃烧特性

- 研究[J]. *锅炉技术*, 2017, 48(2): 50-53.
- WU Haibo. Study on the characteristics of oxygen fuel combustion boiler in different O₂/CO₂ ratio[J]. *Boiler Technology*, 2017, 48(2): 50-53.
- [12] 张智羽, 杨勇平, 汪欣巍, 等. 600 MW 亚临界锅炉富氧改造热力学性能及焓分析[J]. *锅炉技术*, 2020, 51(2): 46-52.
- ZHANG Zhiyu, YANG Yongping, WANG Xinwei, et al. Thermodynamic properties and exergy analysis of 600 MW subcritical boiler with oxygen enrichment [J]. *Boiler Technology*, 2020, 51(2): 46-52.
- [13] 吴海波, 柳朝晖, 廖海燕, 等. 浅谈富氧燃烧锅炉的一二次风配风特性[J]. *华东电力*, 2014, 42(9): 1953-1956.
- WU Haibo, LIU Zhaohui, LIAO Haiyan, et al. Primary/secondary air distribution characteristics of oxygen-enriched combustion boiler[J]. *East China Electric Power*, 2014, 42(9): 1953-1956.
- [14] 印佳敏, 吴占松. TP347H 在生物质锅炉过热器气相条件下的腐蚀特性(II)[J]. *热力发电*, 2009, 38(8): 41-45.
- YIN Jiamin, WU Zhansong. Corrosion characters of TP347H steel under atmosphere of superheaters of biomass-burned boilers (II)[J]. *Thermal Power Generation*, 2009, 38(8): 41-45.
- [15] 张兰, 王昭, 张嘉烨, 等. 富氧燃烧模式下水冷壁高温腐蚀实验[J]. *热力发电*, 2018, 47(3): 18-25.
- ZHANG Lan, WANG Zhao, ZHANG Jiaye, et al. Experimental study on high temperature corrosion behavior of water wall materials during oxy-fuel combustion[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(3): 18-25.
- [16] 韩高岩. 富氧燃烧 SO₃ 的生成机理[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [17] 刘皓, 任瑞琪, 黄永俊, 等. 富氧燃烧系统中 NO 的还原及其排放 [J]. *化工学报*, 2011, 62(2): 495-501.
- LIU Hao, REN Ruiqi, HUANG Yongjun, et al. Reduction and emission of NO in oxy-fuel system[J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(2): 495-501.
- ~~~~~
- (上接第 358 页)
- [10] 张继东, 陈笔, 赵思嘉, 等. 1 000 MW 超超临界锅炉热效率正平衡和反平衡模型分析[J]. *锅炉技术*, 2019, 50(2): 21-26.
- ZHANG Jidong, CHEN Bi, ZHAO Sijia, et al. Analysis of the boiler thermal efficiency using direct and indirect heat balance models for 1 000 MW ultra-supercritical units[J]. *Boiler Technology*, 2019, 50(2): 21-26.
- [11] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 电站锅炉性能试验规程: GB/T 10184—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [12] 朱亚波. 煤质变化对锅炉运行的影响及优化措施 [J]. *化工设计通讯*, 2021, 47(2): 138-139, 149.
- ZHU Yabo. Influence of coal quality change on boiler operation and optimization measures [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2021, 47(2): 138-139, 149.
- [13] 苗鹏. 84 MW 煤粉炉煤质轻微变化燃烧适用性分析 [J]. *工业炉*, 2023, 45(3): 28-33.
- MIAO Peng. Analysis of combustion applicability for 84 MW pulverized coal boiler with slight changes in coal quality[J]. *Industrial Furnace*, 2023, 45(3): 28-33.
- [14] 杨琨, 丁士发, 张涛. 污泥掺烧对墙式切圆锅炉的影响分析 [J]. *动力工程学报*, 2022, 42(9): 800-805, 820.
- YANG Kun, DING Shifa, ZHANG Tao. Analysis of sludge blending combustion on wall type tangentially-fired boiler[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(9): 800-805, 820.
- [15] 樊锐. 某 600 MW 超临界机组褐煤掺烧经济性研究 [J]. *节能*, 2023, 42(7): 75-77.
- FAN Rui. Research of the economy of lignite blending in a 600 MW supercritical unit[J]. *Energy Conservation*, 2023, 42(7): 75-77.
- [16] 马牧野. 基于神经网络的深度调峰下燃煤锅炉 NO_x 排放预测研究[D]. 太原: 山西大学, 2023.
- [17] 叶恩清, 张定海, 何维, 等. 燃煤变化后发热量的计算及对锅炉效率修正 [J]. *电站系统工程*, 2018, 34(2): 11-12, 16.
- YE Enqing, ZHANG Dinghai, HE Wei, et al. Low heat value calculation and efficiency correction of boiler for burning coal changed[J]. *Power System Engineering*, 2018, 34(2): 11-12, 16.
- [18] GODBEER W G, SWAINE D J, GOODARZI F. Fluorine in Canadian coals[J]. *Fuel*, 1994, 73(8): 1291-1293.