高原环境下生物质层燃锅炉热效率及排放特性的影响分析

王伟棚¹ 刘超¹ 李江²

1. 低碳热力发电技术与装备全国重点实验室 国家市场监管重点实验室(特种设备安全与节能) 中国特种设备检测研究院 北京 100029

2. 青海省特种设备检验检测院 青海 西宁 810003

摘要: 文章以DZL2-1.25-T型层燃生物质锅炉为例, 针对其热效率展开研究, 通过测试锅炉热效率, 分析影响锅炉热效率的四个主要因素, 即燃料、氧量、漏风情况、受热面结渣及积灰, 进一步验证锅炉热效率优化的必要性, 进而针对性提出优化措施, 为企业节能减排提供参考。

关键词: 高原; 生物质层燃锅炉; 热效率; 优化措施

引言: 高原地区, 由于大气压力降低使得生物质燃料的燃烧过程稳定性变差, 热效率降低, 能耗增加。本文针对高原环境下生物质层燃锅炉热效率及排放特性的影响展开分析, 对企业节能减排及节约成本具有良好的现实意义。

1 锅炉概况

以青藏高原地区某单位的DZL2-1.25-T型锅炉为例, 额定负荷为2.00t/h, 设计热效率为91.11%, 额定压力为1.25MPa, 排烟温度为113.35℃, 排烟处过量空气系数为1.50, 燃料消耗量为373.72kg/h, 稳定运行的负荷范围为80%~100%。燃料为生物质成型燃料, 配套有省煤器。

2 锅炉热效率试验

为确定该锅炉的能效情况, 对锅炉的负荷、热效率、排烟温度、排烟处过量空气系数等进行测试。

2.1 测试方法

根据TSG91-2021《锅炉节能环保技术规程》^[1]、GB/T10180-2017《工业锅炉热工性能试验规程》^[2]相关要求, 测试按照1次反平衡法方法进行, 并实时读取和记录实测参数^[3]。

运行情况: 鼓风机、引风机电机为工频, 风机挡板开度约为60%, 进料闸门打开, 炉排上料层很薄, 炉排转速调至最大。

2.2 测试结果

能效测试结果见表1所示。

表1 测试结果

项目	符号	单位	测试数据
输出蒸汽量	D_{out}	kg/h	1100.89
锅炉折算蒸发量	D_{con}	kg/h	1087.76
反平衡热效率	η_2	%	79.31
排烟温度	t_{ds}	℃	114.90
排烟处过量空气系数	α_{ds}	—	2.62
排烟热损失	q_2	%	8.60
气体未完全燃烧热损失	q_3	%	1.49
固体未完全燃烧热损失	q_4	%	8.18
散热损失	q_5	%	1.93
灰渣物理热损失	q_6	%	0.49
热损失之和	$\sum q$	%	20.69

从表1中可以看出, 该锅炉的热效率(79.31%)比较低, 远未达到设计要求值; 排烟温度为114.90℃; 热损失之和达到20.69%, 说明该锅炉实际运行中热效率比较低。

3 热效率影响因素

高原环境下, 由于气压的影响, 生物质层燃锅炉易产生热效率不足问题。为了提高该锅炉的热效率, 需确定影响该锅炉的热效率因素。具体来说, 影响锅炉热效率的因素有燃料、氧量、漏风情况、受热面结渣、积灰等^[4]。

3.1 燃料对排烟温度的影响

燃料是影响生物质层燃锅炉热效率的直接因素, 其影响具体包括发热量、含水量、灰份及挥发份。

3.1.1 发热量

在锅炉运行过程中, 燃料发热量会直接影响排烟温度, 且在锅炉出力既定的工况下, 燃料的发热量与其消耗量为反比关系。当燃料发热量减小时, 燃料的实际消耗量便会增加, 进而增大烟量及烟气流动速度, 相应的排烟温度会增大。同时, 由于燃料消耗量增大, 炉膛中固体不完全燃烧热损失会随之增大, 最终降低锅炉热

作者简介: 王伟棚(1990-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事高耗能特种设备安全节能环保检测与评价工作。

基金项目: 市场监管总局科技计划项目(2022MK119)

效率。

3.1.2 含水量

生物质燃料和煤炭对比来说, 前者的含水量较大。因此, 实际燃烧过程中, 生物质燃料会产生更多水蒸气, 进而会改变燃气性质, 增加排烟温度。

3.1.3 灰份

灰份对锅炉热效率的影响与含水量类似, 若燃料中灰份比较大, 则会改变烟气特性, 并增大烟气量和比热, 使对流区烟气温降减小, 进而增大排烟温度, 降低锅炉热效率。

3.1.4 挥发份

挥发份大小是决定锅炉炉膛中燃料燃烧时间长短的关键因素, 且挥发份和燃料燃烧时间为反比关系, 即燃料挥发份减小, 则燃料燃烧时间会增长, 相应的会增高炉膛出口的温度, 进而排烟温度会随之增高, 并降低锅炉热效率。

另外, 相比较而言, 燃料的发热量及含水量对锅炉热效率及排烟温度影响比较大, 可通过折算水分公式来进一步说明发热量及含水量对锅炉热效率的综合影响。折算水分公式如下:

$$M_{zs} = 4187 \times M_{ar} / Q_{net,ar} \quad (1)$$

式中: M_{zs} ——燃料的折算水分;

M_{ar} ——燃料含水量;

$Q_{net,ar}$ ——燃料发热量。

从公式(1)中得知, 燃料发热量 $Q_{net,ar}$ 减小, 含水量 M_{ar} 增加, 则折算水分 M_{zs} 便会增大, 相应的燃料消耗量便增大, 进而锅炉排烟温度升高, 降低其热效率。经实际计算证明, 排烟温度和折算水分之间为线性关系, 折算水分值增大0.1, 则锅炉排烟温度便随之增大约0.5°C。

3.2 氧量对锅炉热效率影响

从表2测试结果可以看出, 锅炉测试中排烟处过量空气系数为2.62, 相较于额定值1.50来说, 实际测试排烟处过量空气系数过大, 这样便会导致锅炉中供氧量过多, 并

导致生物质燃料不能完全燃烧, 进而会产生大量的氧化不完全燃烧物(CO等)。这既会浪费燃料, 并降低锅炉的燃烧效率, 也会产生更多的CO排放, 对环境造成负面影响。同时, 过量供氧也会导致排烟体积增大, 致使排烟温度升高, 进而增大排烟热损失, 最终降低锅炉的热效率。这也正是表1中排烟温度及排烟热损失比较的原因。

3.3 漏风对锅炉热效率影响

生物质层燃锅炉运行过程中, 易在炉膛、烟道、空预器等位置发生漏风, 漏风位置不同, 对锅炉热效率影响不同。不同部位漏风对锅炉热效率的影响, 可以通过出口过量空气系数 α_i^* 表示, 该系数表达式如下:

$$\alpha_i^* = \Delta\alpha_l + \alpha_{yd} + \beta_{ky}^* \quad (2)$$

式中: $\Delta\alpha_l$ ——炉膛漏风系数;

$\Delta\alpha_{yd}$ ——烟道漏风系数;

β_{ky}^* ——空预器出口过量空气系数。

由公式(2)可知, 在锅炉运行期间, 出口过量空气系数 α_i^* 既定的情况下, 若炉膛漏风系数 $\Delta\alpha_l$ 和烟道漏风系数 $\Delta\alpha_{yd}$ 增大, 则空预器出口过量空气系数 β_{ky}^* 便会降低, 即炉膛内送风量降低, 空预器内流经的冷风量变化随之降低, 则炉内空气流速则会减小, 传热系数也相应的减小, 而空预器的传热量也会降低。这种情况下, 当空预器传热面积既定, 则其出口空气温度变化增大, 传热温差减小, 并进一步降低传热量, 影响锅炉热效率。

3.4 受热面结渣、积灰对锅炉热效率的影响

在锅炉运行过程中, 受热面上附着的结渣及积灰会降低锅炉的受热面的导热系数。结渣、积灰后的受热面介质的导热系数相比其自身材料导热系数要低许多, 这就是为什么受热面结渣、积灰后, 其传热效果大幅度下降的原因。经试验得知, 炉膛中积灰层从1mm增厚至2mm, 则其传热量会降低约28%; 当厚度增加到3mm后, 传热量会降低约40%, 相应的炉膛出口烟气温度可升高约300°C。另外, 炉内受热面结渣、积灰也易导致其管壁温度增高, 甚至引起受热面损坏, 产生安全事故。

表2 不同介质的导热系数

介质	结渣、积灰	铁	镍镉合金	氧化铁垢	碳酸钙(镁)水垢
导热系数/W/(m·K)	0.03~3	80	12.3~171	0.116~0.233	0.581~6.98

4 锅炉热效率优化

4.1 热效率优化计算

为提高生物质层燃锅炉热效率优化的效率及准确性, 基于锅炉热效率表达式, 采用遗传算法对热效率进行建模。锅炉热效率表达式如下:

$$\eta_{gl} = q_1 = 100 - \sum_{i=2}^6 q_i \quad (3)$$

式中: η_{gl} ——锅炉热效率;

q_1 ——净吸热量;

q_i ——热损失量, $i = 2, 3, 4, 5, 6$; q_2 表示排烟热损失; q_3 表示燃料化学未完全燃烧热损失; q_4 表示燃料机械未完全燃烧热损失; q_5 表示散热损失; q_6 表示炉渣显热损失。

由于锅炉热效率表达式比较复杂, 且是一个非线性

的关系式，故为方便计算，利用偏微分法对其进行简化建模，保留主要影响因素，剔除次要影响因素^[5]，进而得

$$\eta_{gl} = f(\theta_{py}, V_{CO}, C_{hz}, C_{fh}, A_{ar}, Q_{net,ar}, V_{O_2}) = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7) \quad (4)$$

式中： θ_{py} ——排烟温度，单位 $^{\circ}\text{C}$ ；
 V_{CO} ——排烟中CO含量，单位%；
 C_{hz} ——炉渣含碳量，单位%；
 C_{fh} ——飞灰含碳量，单位%；
 A_{ar} ——收到基灰分含量，单位%；

出其数学模型如下：

$Q_{net,ar}$ ——低位发热量，单位 kJ/kg ；
 V_{O_2} ——排烟中氧含量，单位%。

在此基础上，采用遗传算法对其进行优化计算，计算过程中，设定种群变异概率取值0.05，交叉概率取值0.9，迭代次数为50次，最终计算结果见表3所示。

表3 锅炉热效率优化计算结果

项目	$V_{O_2}/\%$	$A_{ar}/\%$	$C_{fh}/\%$	$C_{hz}/\%$	$V_{CO}/\%$	$\theta_{py}/^{\circ}\text{C}$	$Q_{net,ar}/(\text{kJ/kg})$	热效率优化值/%	热效率实测平均值/%
结果	13.16	1.005	39.974	19.075	0.181	114.90	14980	91.11	79.31

从表3中可知，采用遗传算法计算得出的结果与仪器试验结果基本一致，锅炉运行热效率与优化热效率相差11.8%，说明该生物质层燃锅炉热效率还有较大提升空间。

4.2 生物质层燃锅炉热效率优化措施

4.2.1 控制燃料质量，精细管理燃料特性

燃料质量是影响生物质层燃锅炉热效率的关键因素。为了将燃料发热量、含水量、灰份、挥发份控制在合理范围内，需采取一系列措施。首先，应对燃料进行严格的筛选和分类，确保燃料的均质性和稳定性。其次，通过干燥、破碎等预处理手段，降低燃料含水量，提高燃料燃烧效率。同时，定期对燃料进行化验分析，及时调整燃料配比，以优化燃烧过程。此外，还可以考虑采用先进的燃料混配技术，将不同特性的燃料进行科学配比，以充分发挥各种燃料的优势，进一步提高锅炉的热效率。

4.2.2 选定合适的过量空气系数，实现高效燃烧

过量空气系数是影响锅炉燃烧效率和热效率的重要因素。选定合适的过量空气系数，可以确保燃料充分燃烧，同时减少不必要的热量损失。为了实现这一目标，需要对锅炉的燃烧过程进行深入研究和分析，了解不同燃料、不同工况下的最佳过量空气系数。在实际运行中，应根据锅炉的负荷、燃料特性等因素，动态调整过量空气系数，以实现高效、稳定的燃烧。

4.2.3 强化锅炉检修，减少系统漏风，提升密封性能

锅炉系统的漏风是导致热效率下降的主要原因之一。为了减少系统漏风，必须强化锅炉的检修工作。首先，应定期对锅炉的密封件进行检查和更换，确保密封性能良好。其次，对锅炉的烟风道板、膨胀节处、连接法兰等易漏风部位进行重点检查，及时修补漏洞。同

时，加强锅炉的日常维护和管理，减少因振动、磨损等原因导致的漏风现象。通过强化锅炉检修，可以有效减少系统漏风，提高锅炉的热效率。

4.2.4 加强锅炉日常监测，及时清理受热面结渣、积灰，保持清洁高效

受热面的结渣和积灰是影响锅炉热效率的重要因素。为了保持受热面的清洁高效，必须加强锅炉的日常监测工作。首先，应定期对锅炉的受热面进行检查，了解结渣和积灰情况。其次，采用先进的清灰技术和设备，如机械清灰、声波清灰等，及时清理受热面上的结渣和积灰。同时，加强锅炉的吹灰工作，确保受热面始终保持清洁状态。

5 结论

综上所述，高原环境下生物质层燃锅炉在运行过程中，由于气压低的影响，锅炉受燃料、氧量、漏风、受热面结渣、积灰等因素影响产生热效率低几率更大。因此，企业应从燃料质量、过量空气系数控制、定期检修、日常监测等方面入手，加强对锅炉燃烧的管控，提高其炉内燃烧效率及热效率，降低CO、HC、SO₂等污染物排放，为企业实现节能减排目标奠定基础。

参考文献

[1]TSG91-2021,锅炉节能环保技术规程[S].
 [2]GB/T10180-2017,工业锅炉热工性能试验规程[S].
 [3]郭勇,刘善民,李静,等.在用生物质层燃锅炉热效率偏低原因探析[J].特种设备安全技术,2023,(04):6-7+17.
 [4]向同琼,周黎明,郑邦华,等.生物质成型燃料锅炉能效分析与节能减排技术研究[J].中国特种设备安全,2022,38(04):82-86.
 [5]董龙标,刘效洲,朱光羽.基于遗传算法的生物质颗粒锅炉的热效率优化分析[J].冶金能源,2023,42(01):27-30.