

国产燃煤锅炉燃烧优化调整试验

王 巍, 崔艳艳

(国家能源集团胜利发电厂, 内蒙古 锡林浩特 026000)

摘要: 锅炉燃烧状态的好坏将直接影响发电机组的安全性与可靠性, 因此研究分析锅炉燃烧的调整措施十分重要。本文以某电厂锅炉为研究对象, 为了改善其燃烧状况, 提高锅炉热效率, 降低发电成本, 应利用热平衡法求解锅炉燃烧效率, 并通过锅炉燃烧优化调整试验验证各项参数是否在规定范围内。从而使该电厂的锅炉能安全、经济、稳定地运行, 同时为其他同类型电厂的锅炉燃烧调整措施提供参考。

关键词: 燃烧优化; 调整; 反平衡法

中图分类号: TK227

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2022.24.015

文献标识码: A

中国作为能源消耗大国, 在所有发电形式中, 燃煤电厂的总装机容量位居全国第一位。截至 2020 年年底, 中国燃煤火电机组容量为 12 亿 kW, 达到了我国总装机容量的 60%。各发电厂均以挖潜增收、降耗节能为工作重点, 这就要求燃煤发电厂在提高能源利用率以及节约能源上有很大的突破。其中实施燃烧优化调整是火电机组提高机组热效率、达到节能减排最有效的方法之一。其通过燃烧优化调整试验来查找风煤比、配风方式、煤粉细度及含氧量等参数的最佳值, 并进行调整优化; 进行机组参数优化, 并通过数据分析受热面是否超过设计温度、气温偏差等问题, 确保机组能长期稳定运行。对于新投产的、与设计煤种有较大变化的、检修技改后的燃煤机组, 均要进行锅炉燃烧调整优化试验。下面通过研究锅炉机组的热效率计算来分析最佳优化参数。

1 锅炉机组的热效率计算

火电厂进行热平衡试验的目的是计算锅炉的燃烧效率, 定量计算出锅炉各项损失, 从而分析造成损失的原因并寻找减少损失的方法, 确定各项可调参数与机组负荷及效率的关系, 提高锅炉的燃烧效率, 减少发电成本。其中, 热平衡法计算锅炉热效率包括正平衡法及反平衡法。

1.1 正平衡法

正平衡法是根据锅炉实际可利用的热量与消耗燃料所产生的热量的比值, 求出锅炉热效率的方法。其公式如 (1-1) 所示:

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 Q_1 ——锅炉实际可利用的热量 (kJ/kg);

Q_r ——消耗燃料所产生的热量 (kJ/kg)。

只要利用正平衡法掌握燃料消耗量, 就能得到锅炉的热效率, 但在试验过程中, 对条件要求苛刻, 既要求机组长时间保持稳定运行且蒸汽压力及机组负荷等保持不变, 同时需要精确地测量出有效吸收的热量和燃料消耗量。这在生产现场很难实现, 所以正平衡法应用较少。

1.2 反平衡法

反平衡法仅需明确机组的各项损失, 就可以求出锅炉的燃烧效率。其公式如 (1-2) 所示:

$$\eta = q_1 = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \% \quad (1-2)$$

式中 q_1 ——被锅炉有效吸收的热量百分数 (%);

q_2 ——排烟热损失百分数 (%);

q_3 ——化学未完全燃烧热损失百分数 (%);

q_4 ——固体未完全燃烧热损失百分数 (%);

q_5 ——锅炉散热损失百分数 (%);

q_6 ——灰渣物理热损失百分数 (%).

锅炉的各项损失分析如下:

(1) 排烟热损失

排烟热损失 q_2 指燃料燃烧后部分热量未被锅炉利用, 而被排放到大气中的热损失。计算公式为 (1-3) 所示:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 q_2 ——排烟热损失 (%);

Q_2 ——排烟带走的热量 (kJ/kg);

Q_r ——1kg 燃料进入炉膛产生的热量 (kJ/kg)。

(2) 化学未完全燃烧热损失

化学未完全燃烧热损失 q_3 是由于烟气中有未燃烧完的气体而被排出炉外, 引起的热量损失。其公式如下:

$$q_3 = 0.032\alpha_{py}CO \times 100\% \quad (1-4)$$

对于大型燃煤机组, q_3 可不用考虑。其数值一般与燃煤的挥发、炉内的过氧量、煤粉燃烧器的构造等有关。

(3) 固体未完全燃烧热损失

固体未完全燃烧热损失 q_4 是由于煤粉中固态颗粒在炉膛内没有彻底燃尽而产生的损失。

一般情况下, 对于固态排渣燃煤锅炉, 炉渣量较少, 通常炉渣中的含碳量也小于飞灰中的含碳量, 因此可不计炉渣可燃物。其计算公式如 (1-5) 所示:

$$q_4 \approx 0.95 \times \frac{32892A_{ar}}{Q_{daf}} \times \frac{C_{fh}}{(100 - C_{fh})} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 A_{ar} ——燃料中收到基灰分含量 (%);

C_{fh} ——飞灰中碳的含量 (%);

Q_{daf} ——干燥无灰基发热量。

它在所有热损失中所占份额仅少于排烟热损失。干 / 湿式排渣锅炉的 q_4 约为 0.5% ~ 5%, 主要是由于炉渣可燃物和飞灰可燃物中所残留的碳造成的热损失。

(4) 锅炉散热损失

锅炉的散热损失 q_s ，指在机组运行过程中因锅炉本身的构造及锅炉周围的所属管道等保温设备所散发的热量。此热量将对流及辐射形式向周围环境散失，而散失的热量占有热量和的百分比。

机组在额定负荷时锅炉散热损失 $q_{s, ed}$ ，计算公式如 (1-6) 所示：

$$q_{s, ed} = 5.82(D_{ed})^{-0.38} \quad (1-6)$$

机组在非额定负荷时锅炉散热损失 q_s ，计算公式如 (1-7) 所示：

$$q_s = q_{s, ed} \frac{D_{ed}}{D} \quad (1-7)$$

式中 $q_{s, ed}$ ——在额定负荷下，锅炉的散热损失 (%)；

D_{ed} ——额定蒸发量 (t/h)；

D ——实际蒸发量 (t/h)。

散热损失的大小通常跟锅炉本身容积、整体外表面积、构造、各管道的保温效果及外界环境等相关。

(5) 锅炉灰渣物理损失

灰渣物理热损失 q_6 ，指从锅炉排出的具有一定温度的灰渣中未能被利用的热量。其计算公式如 (1-8) 所示：

$$q_6 = \frac{A^y \alpha_{Lz} L(u)_{Lz}}{Q_r}, \% \quad (1-8)$$

式中 A^y ——应用基燃料灰的百分含量 (%)；

α_{Lz} ——炉渣占燃料灰分的百分数 (%)；

$L(u)_{Lz}$ ——炉渣比热，即 1kg 灰在 u 温度时的焓可查表，其中固态排渣时 u 取 600°C 。

它的大小跟煤粉含有的灰分和炉渣所占的灰分的份额、温度及排渣形式等相关。而在煤粉的折合灰分 $< 10\%$ 以下时，固态的排渣锅炉将忽略不计。对于非燃煤锅炉， $q_6 = 0$ 。

反平衡法是在得出机组热效率的同时，可了解各项热损失所占的比重，以方便确定机组的具体运行状况，从而提出改善机组热效率的方法。因锅炉的各项热损失之和与燃煤的热量相比比重不大，故其测量误差对机组热效率的影响较小。同时，反平衡法不要求机组负荷在整个试验阶段稳定，所以反平衡法更具有普遍适用性。

2 内蒙古某电厂燃烧优化调整试验结果分析

内蒙古某电厂由于长时间运行，设备在严重漏风，煤粉细度较粗，锅炉结焦、结渣较为严重，排烟温度偏高，燃烧状况不理想等现象，故该厂决定进行燃烧优化调整试验。

2.1 过量空气系数调整试验

针对某热电厂设备存在漏风、排烟温度高等问题，需通过过量空气系数试验来调整，炉内总风量与锅炉燃烧效率息息相关。锅炉总风量增加的同时，其排烟量也会相应增加，从而导致 q_2 增加；而锅炉总风量减低，会导致煤粉中的碳不能燃尽，导致 q_4 增多。因此，系统必将有一个最优的过量空气系数，以实现机组的能耗最小、 η 最大值。

本次试验其他数据不发生改变，分别在 60%BMCR、80%BMCR 和 100%BMCR 三个不同负荷下做实验，在设计值范

围内取三个不同的氧量值进行试验。通过监测省煤器出口含氧量来调整送风机动叶开度。

在 180MW 负荷下进行的含氧量试验，含氧量分别是 3.34%、4.10%、4.75%。试验结果如表 1 所示。在该负荷下，随着含氧量由 3.34% 升至 4.75%， q_4 从 5.16% 降低至 3.78%。又由于炉膛内烟气量增多，使 q_2 从 5.03% 升至 5.19%。当氧量为 4.75% 时，锅炉热效率达到最高值 90.68%，且过量空气系数与氧量关系为 $\alpha = 21/(21 - O_2)$ ，从而可以得出此时的过量空气系数 α 为 1.29。

同理，在 240MW 负荷下进行的含氧量试验，含氧量分别是 2.93%、3.58%、4.94%。 q_4 由 6.76% 下降到 4.75%， q_2 从 5.17% 升至 6.24%。而在含氧量为 3.58% 时锅炉热效率达到最高值 88.69%，其过量空气系数 α 为 1.2。

在 300MW 负荷下进行的含氧量试验，含氧量分别为 2.90%、3.54%、4.06%。 q_4 由 5.87% 下降到 4.12%， q_2 从 5.05% 升高到 5.49%。而在含氧量为 4.06% 时锅炉热效率值最高，为 90.04%，其过量空气系数 α 为 1.23。

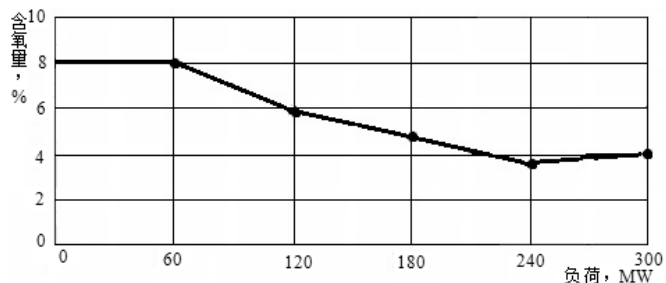


图1 氧量与负荷关系曲线

从图 1 含氧量与负荷的关系曲线中可以看出，当机组负荷较低时，需要的氧量较多，但随着负荷的增加，所需要的含氧量逐渐减少。该电厂的含氧量按上面的关系进行调整后，锅炉的烟囱出口温度明显下降，提升了其热效率。

2.2 煤粉经济细度的调整试验

针对该电厂的煤粉 R_{90} 偏大、锅炉 η 较低的现象，进行了煤粉细度的调整试验，从而使磨煤机耗电量与 q_4 的和为最小，使锅炉达到最优的经济运行效果。

机组功率在 80% BMCR 以上时，通过调整分离器的挡板门开度进行煤粉细度调整试验。该电厂本次试验是在 300MW 时进行的，烟气含氧量控制在 4% 左右。试验期间，保证机组各项参数以及燃烧煤种稳定，包括停止吹灰器运行、额外启动制粉系统。由此可以得出， R_{90} 从 18.7% 降低至 9.2% 时， q_4 从 5.29% 降至 4.81%， η 从 88.75% 增加至 89.52%。由此可知，煤粉颗粒 R_{90} 越细， η 越高。综合考虑，该锅炉煤粉经济细度应控制在 10% ~ 11%，节能降耗效果明显。而分离器特性曲线如图 2 所示。

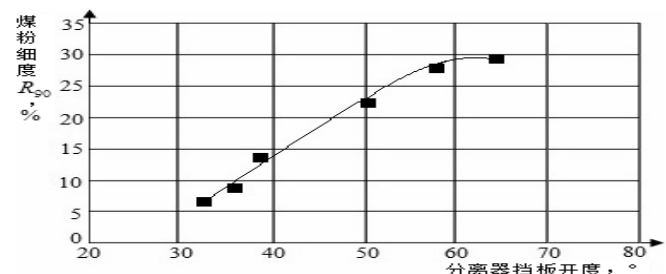


图2 分离器特性曲线

表1 配风方式与锅炉效率的关系

参数	单位	180MW				240MW				300MW			
		缩腰型	倒宝塔	正宝塔	均等型	缩腰型	倒宝塔	正宝塔	均等型	缩腰型	倒宝塔	正宝塔	均等型
蒸发量	t/h	551.6	549.1	550.8	550.3	755	756.8	755.7	756.1	756.5	757.1	756.8	755.9
给水温度	°C	250.1	251.2	250.3	251.4	265.3	266.1	265.8	266.0	265.7	266.1	264.8	265.3
排烟含氧量	%	5.49	5.10	5.37	5.42	3.21	3.58	3.89	4.07	4.13	4.25	4.06	4.01
排烟温度	°C	131.0	130.7	130.1	129.8	138.1	139.7	137.8	136.2	138	139.2	138.7	140.2
q_2	%	5.41	5.32	5.51	5.39	5.73	5.12	5.10	5.94	5.67	5.44	5.04	5.41
q_4	%	4.13	4.28	4.25	4.24	4.79	4.21	5.96	4.35	5.07	4.71	5.68	4.98
η	%	90.14	90.05	89.92	90.02	89.13	90.37	88.64	89.36	88.94	89.53	88.99	89.31

从磨煤机分离器特性曲线可以看出,分离器挡板开度在33%~60%之间,煤粉细度呈线性关系。当分离器的挡板门开度在33%以下时,煤粉颗粒会迅速变粗,分离器性能变差;当开度在60%以上时,调节效果不明显,且煤粉粗细的均匀性降低,携带煤粉量少。

2.3 配风方式调整试验

针对该电厂燃烧效果不理想的问题,需更改配风方式,从而减少对锅炉热效率的影响。本次试验在保证其他各项参数稳定的前提下,在180MW、240MW和300MW负荷下,分别进行了正宝塔型、倒宝塔型、缩腰型、均等型四种配风形式试验,从而确定了最优的配风方式^[1]。试验结果如表1所示。

从试验数据中可以看出,在180MW负荷下,不同的配风形式对机组热效率的影响不大,不同配风形式对应的锅炉热效率之间最大仅相差0.22%;在240MW负荷时进行的配风形式试验中,正宝塔型对应的锅炉效率最低,比最高热效率的倒宝塔型低1.73%,很明显正宝塔型配风不适采用,而另外三种配风形式对锅炉热效率的影响相差不大;在满负荷下进行的配风形式试验中,缩腰型的效率最低,与锅炉效率最高的倒宝塔型相比,两者相差0.59%。

根据以上数据可知,采用倒宝塔型及均等型配风,无论在何种负荷下,对应的锅炉热效率都高于其他配风。所以,该电厂在实际运行过程中宜采取倒宝塔型和均等型两种配风形式。

2.4 额定负荷考核试验

锅炉额定负荷考核试验用于测试和考核锅炉各项参数在额定负荷下是否能达到考核标准,进而评估锅炉在额定负荷下的经济性能及机组的适应能力。

本项试验要求机组必须持续运行至少3天。试验开始前9小时,锅炉负荷不小于75%BMC。试验期间,机组负荷必须保持稳定^[2]。

该电厂锅炉额定负荷考核试验是在利用以上各燃烧调整试验得出的最优值的基础上进行的,其工况为:含氧量为4.06%,煤粉最经济细度为10%~11%,配风方式采用倒宝塔型。工况分别为301.5MW和300.2MW,对应的电导率为0.15~0.19,过热蒸汽硅含量为13.2~19.6,过热蒸汽钠含量为1.4~2.1,其锅炉效率分别为89.99%与90.04%,两者仅相差0.05%。综

上所述,该电厂通过以上燃烧调整试验,减少了炉内的结焦、结渣等现象^[3]。

3 结语

通过锅炉燃烧优化调整试验,内蒙古某电厂的锅炉热效率显著提高,锅炉受热面结焦、结渣状况也得到了相应改善。同时,改变了炉膛内的氧量分布,有效解决了炉内高温腐蚀的问题,大大降低了发电成本。

通过以上试验,最终发现由于炉内含氧量偏高,造成炉膛的排烟热损失大,烟气增多,锅炉效率低下。通过过量空气系数调整试验,确定了机组的过量空气系数最佳值 α 在1.2~1.3时,可有效降低排烟温度,使锅炉热效率得以提高;同时,通过调整分离器挡板开度调节煤粉细度,确定煤粉经济细度在10%~11%时,可使得煤粉燃烧着火迅速,燃烧更加完全,飞灰和炉渣所含碳量下降,大大减少了各种燃烧热损失;通过配风调整试验确定采用倒宝塔型和均等配风方式,有效缓解了锅炉的结焦、结渣等问题。

按照试验结果对锅炉各项参数进行合理调整,然后根据机组运行状况对锅炉各受热面进行定期吹灰工作,使得内蒙古某电厂的锅炉能安全、经济、稳定地运行。该调整试验的成功实施,为今后其他同类型电厂的燃烧调整指明了方向。

参考文献:

- [1] 蒲君彦. 燃煤锅炉烟气脱硝技术研究[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(06): 67-69.
- [2] 沈忠明, 叶飞, 钱晓峰. 燃煤锅炉低氮燃烧优化策略分析[J]. 科技资讯, 2020, 18(22): 64-66.
- [3] 张小桃, 张卫东, 张程俞, 等. 生物质气再燃喷口摆角改变耦合燃煤锅炉燃烧特性数值模拟[J]. 能源研究与管理, 2021, (01): 50-56, 62.

作者简介:王巍(1984-),男,河北保定人,硕士研究生,工程师,主要从事火电厂自动控制研究;崔艳艳(1985-),女,内蒙古呼伦贝尔人,硕士研究生,工程师,主要从事火电厂自动控制研究。