

· 发电技术 ·

## 超临界机组锅炉管内壁清洁程度与流动压降的关系分析

徐洪

(江苏方天电力技术有限公司,江苏南京 211102)

**摘要:** 利用流体力学定常流动动量方程分析了流动压降与管内粗糙度的关系,并在此基础上利用某超临界机组现场运行数据和检修收集的管内氧化膜量等数据,总结了该机组炉管压降与省煤器入口氧化物沉积量的数量关系,可用于近似评估运行过程中氧化物的沉积量。该方法对实现在线评估管内清洁度有一定指导意义。

**关键词:** 超临界;直流机组;锅炉压降;沉积物量

**中图分类号:** TK222

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2010)05-0061-03

超临界机组炉管内壁的清洁程度关系到给水处理工艺的合理与否和锅炉的传热效率,对锅炉的经济、安全运行具有一定的影响。通常的做法是利用机组停运检修的机会进行割管检查,评价炉管内壁的清洁程度。该方法不但机会难得,而且对锅炉产生一定损伤。因此,研究开发可用于在线评估超临界机组炉管内壁清洁程度的方法很有必要。

## 1 压降计算

设单相流体在一等截面圆管中作一元稳定流动,管子截面上的压力是均匀分布的。圆管与水平的倾斜角为 $\theta$ 。根据动量守恒原理可得<sup>[1]</sup>:

$$-dp = \lambda \frac{dl}{d_n} \frac{w^2}{2} \rho + \rho g f dl \sin\theta + \rho w dw \quad (1)$$

式中: $p$ 为压力,kgf/m<sup>2</sup>;  $f$ 为管子流通截面积,m<sup>2</sup>;  $d_n$ 为管子内直径,m;  $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>;  $l$ 为管子轴线方向长度,m;  $\rho$ 为单相流体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $w$ 为体积流速,m<sup>3</sup>/s;  $\lambda$ 为摩擦阻力系数。

单相流体在稳定流动时,管内质量流速( $\rho w$ )为常数,管内的流动压降可由式(2)计算:

$$\Delta p = \int_{p_1}^{p_2} dp = \frac{\lambda}{d_n} \frac{(\rho w)^2}{2} \int_{l_1}^{l_2} v dl + g \sin\theta \int_{l_1}^{l_2} \rho dl + (\rho w)^2 \int_{v_1}^{v_2} dv \quad (2)$$

式中: $v$ 为流体比容,m<sup>3</sup>/kg。

如果工质在管段内焓增不大,则比容和密度随焓的变化近似线性关系,那么流体的平均焓、平均密度和平均比容就可以按其进、出口参数的算术平均计算。在大比热区(1 700~2 700 kJ/kg)内或者计算管段中工质焓增大于 209 kJ/kg 时,水的密度和比容随焓的变化明显偏离线性关系(此时按算术平均

计算的误差可能高达 40%),在此情况下,应按积分平均计算,则有:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d_n} \frac{(\rho w)^2}{2} \bar{v} + g \sin\theta l \bar{\rho} + (\rho w)^2 (v_1 - v_2) \quad (3)$$

式中: $\bar{v}$ 为流体沿管长的积分平均比容,m<sup>3</sup>/kg;  $\bar{\rho}$ 为流体沿管长的积分平均密度,kg/m<sup>3</sup>;  $l$ 为计算管段的长度,m;  $v_1$ 、 $v_2$ 分别为管子出口和进口处工质比容,m<sup>3</sup>/kg。

从式(3)可以看出,压力降由 3 部分组成,即单相流体的摩擦阻力压力降、重位压力降和加速压力降。下面分别进行讨论。

式(3)等号右边的第 1 项是用以克服摩擦阻力的摩擦阻力压力降。单相流体的摩擦阻力损失  $\Delta p_m$  计算如下:

$$\Delta p_m = \lambda \frac{l}{d_n} \frac{(\rho w)^2}{2} \bar{v} \quad (4)$$

单相流体的局部阻力损失  $\Delta p_{jb}$  计算如下:

$$\Delta p_{jb} = \zeta \frac{(\rho w)^2}{2} \bar{v} \quad (5)$$

式中: $\zeta$ 为局部阻力系数。

式(3)等号右边第 2 项是克服流体重力的重位压力降。重位压力降是由于介质在管内流动时,因垂直标高不同而引起的压力差,单相流体的重位压力降  $\Delta p_{zw}$  可表示为:

$$\Delta p_{zw} = \bar{\rho} g \Delta h \quad (6)$$

式中: $\Delta h$ 为管子进出口之间的水平标高差; $\bar{\rho}$ 为工质沿管长的平均密度。当工质向上流动时,重位压降取正值,下降流动时取负值。

式(3)等号右边的第 3 项是用以造成流体加速所需的加速压力降。加速压力降是通过计算管段的出口和进口的单位截面工质流量的动量差值得到的。单相流体的加速压降为:

$$\Delta p_{js} = (\rho w)^2 (v_1 - v_2) \quad (7)$$

式中: $\rho w$ 为计算管段的工质质量流速; $v_2$ 、 $v_1$ 分别为出口和进口截面上的工质比容。

## 2 锅炉压降差值与炉管内壁清洁程度的关系

超临界直流锅炉给水泵出口压力最大,给水沿途流经高加、省煤器、水冷壁等,至汽水分离器,由于克服阻力,压力会有所降低。炉管内壁越沉积物量越大就越粗糙,因而摩擦阻力越大,使得压降增大。

超临界机组投产前均须进行化学清洗。炉前系统金属材料一般为碳钢,省煤器及水冷壁管材质一般为珠光体合金钢。化学清洗结束后金属表面较清洁。机组投入运行后不可避免会产生一定量的沉积物,沉积物量的多少取决于给水处理工艺、水质及运行时间等。

定义给水泵出口至汽水分离器贮水箱的压差为 $\Delta p$ 。假设机组投产初期某管段压降为 $\Delta p_s$ ,机组运行一段时间后压降增加至 $\Delta p_e$ 。当机组在额定工况(满负荷)下运行,式(3)等号右边第二、三项均保持不变,第一项则发生变化。由式(3,5)式得:

$$\sum (\Delta p_e - \Delta p_s) = \sum \left\{ \left[ (\lambda_e - \lambda_s) \frac{l}{d_n} + (\zeta_e - \zeta_s) \right] \frac{(\rho w)^2}{2} v \right\} \quad (8)$$

式(8)中 $\sum (\Delta p_e - \Delta p_s)$ 表达了直流锅炉从给水泵出口至汽水分离器所有管段的压降差值之总和。

摩擦阻力系数 $\lambda$ 与管内的流动情况和管子的粗糙程度有关,而管内的流动情况又与雷诺数 $R_e$ 有关。由于介质温度高,水的黏度较小,水和蒸汽的 $R_e$ 一般大于 $10^5$ 。在绝大部分情况下,蒸汽和水的流动都处于自模化区,此时 $\lambda$ 与 $R_e$ 数无关,摩擦阻力系数 $\lambda$ 计算如下:

$$\lambda = \frac{1}{4 \left[ \lg \left( 3.7 \frac{d_n}{\kappa} \right) \right]^2} \quad (9)$$

式中: $\kappa$ 为管子内壁绝对粗糙程度,文中对碳钢及珠光体合金钢管取 $\kappa = 0.08 \text{ mm}$ ,对奥氏体钢管取 $\kappa = 0.01 \text{ mm}$ <sup>[2]</sup>。

局部阻力系数 $\zeta$ 与雷诺数 $R_e$ 、相对粗糙度、局部几何形状等因素有关,选用实验测定的数据。

将式(9)代入式(8),得:

$$\sum (\Delta p_e - \Delta p_s) = \sum \left\{ \left[ \left( \frac{1}{4 \left[ \lg \left( 3.7 \frac{d_n}{\kappa_e} \right) \right]^2} - \frac{1}{4 \left[ \lg \left( 3.7 \frac{d_n}{\kappa_s} \right) \right]^2} \right) \frac{l}{d_n} + (\zeta_e - \zeta_s) \right] \frac{(\rho w)^2}{2} v \right\} \quad (10)$$

在额定工况下,式(10)中各管段 $d_n$ 、 $l$ 、 $\rho$ 、 $w$ 、 $\bar{v}$ 等参数基本恒定不变, $\kappa_s$ 、 $\zeta_s$ 也仅取决于系统初始状态,因此式(10)中 $\sum (\Delta p_e - \Delta p_s)$ 实际上仅与系统运行一定时间后各管段内壁沿程绝对粗糙度 $\kappa_e$ 和局部相对粗糙度 $\zeta_e$ 有关。由此可见, $\sum (\Delta p_e - \Delta p_s)$ 实际上可以用来在线评估机组运行某个时间段后管子内壁的清洁程度。管子内壁越清洁, $\sum (\Delta p_e - \Delta p_s)$ 值就越小,反之亦然。

以上在公式推导过程中,为方便起见,所用压力单位为 $\text{kg f/m}^2$ 。在我国,超临界压力锅炉所使用的压力单位一般为 $\text{MPa}$ ,换算关系为:1 $\text{MPa} = 1.0197 \times 10^5 \text{ kg f/m}^2$ 。

## 3 压降差值实例

江苏省太仓某发电厂8号600MW超临界火电机组于2005年11月份投产,给水处理方式为还原性全挥发处理(AVT(R))。至2006年底检查性大修,其间运行一年时间。割管检查发现:锅炉水冷壁管垢量 $95 \text{ g/m}^2$ ;省煤器出口 $120 \text{ g/m}^2$ 、入口 $220 \text{ g/m}^2$ 。垢的主要成分(99%)为氧化铁,见图1<sup>[2]</sup>。



图1 江苏太仓某电厂8号锅炉水省煤器管内表面

根据《火力发电厂锅炉化学清洗导则》(DL/T794—2001)规定,直流锅炉水冷壁向火侧垢量达到 $200 \sim 300 \text{ g/m}^2$ 时必需进行化学清洗。因此,利用2006年底机组大修机会进行了乙二胺四乙酸(EDTA)化学清洗。酸洗液中总铁为 $5 \times 10^{-3}$ 左右。清洗前额定工况(600MW)下锅炉压降(给水泵出口至汽水分离器贮水箱压差)为: $29.65 - 26.63 = 3.02 \text{ MPa}$ ;2007年2月上旬机组大修结束后投运,额定工况下锅炉压降下降为: $28.34 - 26.35 = 1.99 \text{ MPa}$ 。其后,锅炉压降逐月上升。至2007年8月下旬,锅炉压降已上升至 $3.05 \text{ MPa}$ 。运行仅半年左右时间,锅炉压降差值高达 $1.06 \text{ MPa}$ 。利用机组停机机会进行割管检查,省煤器入口沉积物量为 $200 \text{ g/m}^2$ 左右。锅炉压降的增加已影响机组的正常力,遂再次进行机组化学清洗。太仓某超临界600MW机组锅炉压降差值如图2所示。

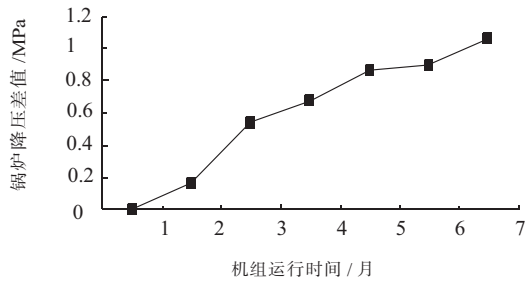


图2 太仓某超临界 600 MW 机组锅炉压降差值

从江苏太仓某电厂 8 号 600 MW 超临界机组的情况看,炉管内壁的最大沉积物量在数量上大约为锅炉压降差值的 20 倍,即:

$$D = 20 \sum (\Delta p_e - \Delta p_s) \quad (11)$$

式中: $D$  为炉管内壁最大沉积物量,  $\text{g}/\text{m}^2$ 。

鉴于目前超临界机组炉管内壁的最大沉积物量及锅炉压降差值的对应数据还很少,因而式(11)还有待进一步修正。需要指出的是,不同类型的锅炉,额定工况下的锅炉压降差值与炉管内壁的清洁程度之间的关系是完全不同的;即使是同样类型的锅炉,管子内径的差异也会导致两者之间关系的明显差异。

#### 4 结束语

在额定工况下,超临界机组投运一段时间后给水泵出口母管与汽水分离器贮水箱出口蒸汽之间的压降较投产初期的增加量反映了高压给水系统、省煤器及水冷壁管内壁的清洁程度。对于超临界机组,省煤器入口的磁性氧化铁沉积量往往最大,其数值大致相当于压降差值的 20 倍。鉴于目前超临界机组炉管内壁的最大沉积物量及锅炉压降差值的对应数据还很少,因而两者之间的定量关系还有待进一步研究。需要指出的是,不同类型的锅炉,额定工况下的锅炉压降差值与炉管内壁的清洁程度之间的关系是完全不同的;即使是同样类型的锅炉,管子内径的差异也会导致两者之间关系的明显差异。但对于同一台锅炉,其额定工况下流动压降的变化可以用来定性甚至定量在线评估炉管内壁的清洁程度。

#### 参考文献:

- [1] 洛克申 B A,董祖康译. 锅炉机组水力计算标准方法[M]. 北京:电力工业出版社,1981.
- [2] 徐洪.超临界火电机组的金属腐蚀特点和沉积规律[J].动力工程,2009,29(3):210-217.

#### 作者简介:

徐洪(1961-),男,江苏如皋人,高级工程师,工学硕士。研究方向为火电厂水汽循环化学、金属腐蚀与防护、热力设备化学清洗以及可再生能源等。

## Analysis on Relationship between the Flowing Pressure Drop and Cleanness of Tube Inner Surface in Supercritical Pressure Boiler

XU Hong

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co.Ltd, Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The relationship between the cleanness of tube inner surfaces and the flowing pressure drop is analyzed in the paper using the momentum equations for steady flow. With the actual data of oxide scale obtained during the period of maintenance and normal operation, the quantitative relationship between the pressure drop and the weight of oxide scales at the entrance of the economizer is proposed in the paper to provide measures for the assessment of oxide scales. The method can provide reference for the assessment of the cleanness of inner surfaces.

**Key words:** supercritical; once-through plant; pressure drop; deposition weight

## 六措施推动节能与新能源车发展

中国发展节能与新能源汽车需要充分落实六大措施。首先,要大力推进企业自主创新,掌握核心技术。其次,要合理规划重点和产业布局,要优先发展小型纯电动汽车和小型节能汽车,积极推进混合动力汽车发展,持续跟踪燃料电池汽车发展技术,因地制宜发展替代燃料汽车。第三,要完善标准法规体系,加强标准技术法规的制订力度,切实加强标准技术法规对行业的指导作用,争取在短时间内基本建立与产业发展和能源规划相适应的节能与新能源汽车标准法规体系。第四,进一步做好节能与新能源汽车示范推广工作,大力推进节能汽车的推广普及工作,扎实推进新能源汽车的试点、示范工作,稳步扩大公务领域和私人消费领域推广数量,形成一批优质的新能源汽车服务企业 and 专业化电池回收企业。第五,要充分发挥财税政策对产业发展和市场的引导作用,出台鼓励新能源汽车基础设施建设的财税引导政策,尽快建立居民燃料消耗量的税收奖惩制度。第六,要营造良好的使用环境,稳步推进新能源汽车充电设施建设,逐步形成与市场规模相适应的基础设施体系。