

600 MW 低质量流速垂直管圈超临界煤粉锅炉设计开发

张 纘, 张 海, 吕俊复, 吴玉新

(清华大学 热能工程系 热科学与动力工程教育部重点实验室 北京 100084)

摘 要: 分析现有几种常见的超临界煤粉炉水冷壁布置型式的特点、切圆和前后墙对冲燃烧方式以及垂直管圈水冷壁关键参数的选取原则, 设计开发了低质量流速垂直管圈 600 MW 超临界煤粉锅炉。满负荷工况下, 水冷壁设计质量流速为 $940 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。这一方案使用西门子公司低质量流速垂直管技术, 结合垂直水冷壁结构简单、低质量流率工质具有自补偿特性的优点, 取消了节流孔圈, 避免了水冷壁及下集箱的复杂结构, 同时消除了运行过程中孔圈结构堵塞造成管壁超温的安全隐患, 在炉膛上、下水冷壁之间设置中间混合集箱, 将来自下炉膛的工质进行混合, 以减小由吸热不均匀和炉膛结构差异所导致的工质侧温度偏差。最后介绍了锅炉结构, 并对其性能进行了预测。

关 键 词: 600 MW 超临界煤粉锅炉; 低质量流速; 垂直管圈; 设计

中图分类号: TK229.6⁺³ 文献标识码: A

引 言

垂直管圈水冷壁由于结构简单、制造工艺成熟, 在亚临界参数锅炉中获得广泛应用, 但在超临界变压运行直流锅炉中, 由于管间热偏差大, 该技术相对发展受限。20 世纪 70 年代末, 美国燃烧工程公司、前苏联苏尔寿公司和日本三菱重工等在已运行过多年的复合循环锅炉基础上, 利用内螺纹管具有的在强化传热、抑制传热恶化发生等优势, 开发了适用于变压运行的超临界内螺纹管一次上升垂直管圈技术, 并进行了大量的试验和各种设计方案研究^[1]。

三菱重工在苏尔寿超临界锅炉技术以及超临界变压运行内螺纹管水冷壁技术基础上, 成功发展了变压运行超临界内螺纹管垂直管圈直流锅炉, 迄今已有多台垂直管圈水冷壁的超临界锅炉投入商业运行。该技术的特点是炉膛采用较高质量流速的内螺

纹管垂直水冷壁, 约 $1800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的较高的质量流速能保证在锅炉变压运行的 4 个阶段即超临界直流、近临界直流、亚临界直流和启动及低负荷再循环运行阶段控制金属壁温、控制高干度蒸发、防止低干度高热负荷区的膜态沸腾以及保证水动力的稳定性。此外, 由于水冷壁中间混合集箱和设置在集箱外水冷壁入口节流孔圈的使用, 使水冷壁的流量偏差和温度偏差得以很好地控制^[2]。垂直管圈水冷壁在锅炉变压运行时, 不但可以保证水动力安全, 而且具有结构简单、安装工作量较小、工质流动阻力小以及水冷壁热应力较小等一系列优点^[3]。

一般认为, 在锅炉满负荷工况下, 水冷壁工质质量流速小于 $1200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 属于低质量流速范围, 此时水冷壁流量分配具有汽包锅炉的自然循环特性, 即吸热越强的管子, 其工质的流率越大^[4-5]。对于 600 MW 超临界锅炉采用低质量流速垂直管圈, 不仅可以满足炉膛所需断面的设计要求, 而且可以取消水冷壁入口的节流孔圈, 简化了锅炉设计, 同时为锅炉的安全运行和维护提供了有利条件。另外, 由于质量流速较低, 水冷壁流动阻力明显减小, 从而降低了给水泵的电耗。内螺纹管不但可以强化传热, 而且能够在低质量流速下破坏膜态沸腾的发生。因此, 低质量流速内螺纹管在超临界锅炉的应用中具有明显的优势。

低质量流速内螺纹管在姚孟电厂 300 MW UP 型直流锅炉水冷壁改造中得到验证。改造前, 锅炉在 100% BMCR(锅炉最大连续运行负荷) 时的工质质量流速高于 $1800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 具有较高质量流速的直流锅炉水冷壁内流量分配取决于流动阻力, 其结果是吸热量多的管子质量流速低, 从而加剧了由于热偏差引起的出口温度偏差。三井巴布科克公

收稿日期: 2013-12-10; 修订日期: 2014-01-15

作者简介: 张 纘(1971-), 女, 黑龙江泰来人, 清华大学副教授。

司提供的改造方案中,水冷壁采用较大直径的内螺旋纹管,水冷壁的工质质量流速在 100% BMCR 时小于 $700 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ [6]。此时水冷壁系统的流量分配呈现正响应特性,具有自补偿能力,降低了管间温度偏差,如图 1 所示。运行实践证明,虽然改造后水冷壁管内工质质量流速大大降低,但锅炉在调峰及低负荷运行工况下,均可以保证水动力的稳定性及避免膜态沸腾的发生 [5]。

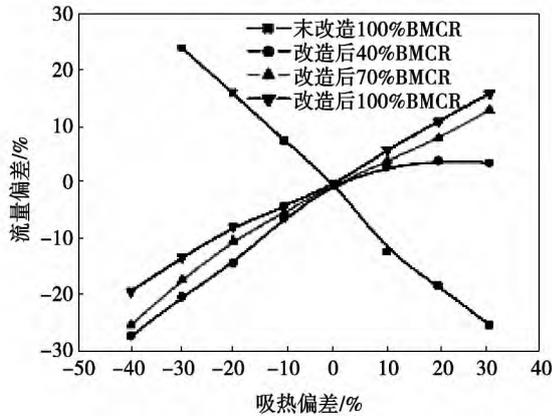


图 1 姚孟电厂 1 号炉改造前后流动特性比较

Fig. 1 Comparison of the flow characteristics of No. 1 boiler in Yaomeng power plant before and after the modification

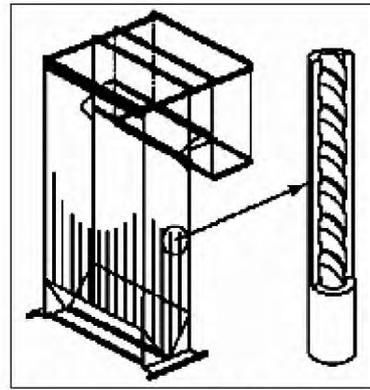
目前 600 MW 超临界锅炉的水冷壁主要是螺旋管圈,在 BMCR 工况下,水冷壁工质质量流速约为 $2800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ [7-9]。此外,哈尔滨锅炉厂在超超临界参数锅炉设计时,采用节流管圈垂直管高质量流速技术,已有数十台投入商业运行。

为了进一步降低生产、安装和运行成本,本研究基于目前超临界煤粉锅炉的运行经验,提出了采用低质量流速垂直管圈水冷壁的设计方案,将具有明显优势的 low mass flow rate vertical tube technology 应用于超临界锅炉,以 600 MW 超临界锅炉为例,开发了具有自主知识产权的超临界煤粉锅炉方案。

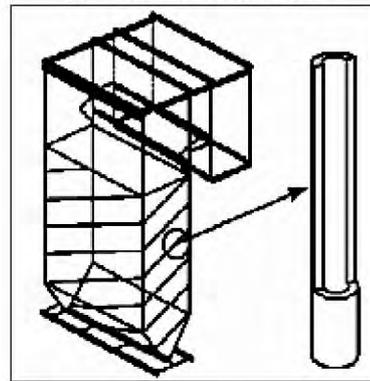
1 整体方案的设计原则

1.1 超临界锅炉水冷壁型式

水冷壁的选型通常要考虑超温爆管、管子温度偏差、炉膛烟温偏差、腐蚀磨损、介质流速、制造难度和安装难度等。目前投运的超临界直流锅炉水冷壁主要有螺旋管圈水冷壁和垂直管圈水冷壁两种形式,其结构示意图如图 2 所示。



(a) 一次垂直上升管屏水冷壁



(b) 螺旋上升管屏水冷壁

图 2 螺旋上升管屏和一次垂直上升管屏水冷壁布置

Fig. 2 Arrangement of the spiral riser and primary vertical riser water wall

超临界机组中锅炉的水冷壁型式,除 W 火焰锅炉外,大多在炉膛下部布置螺旋管圈,炉膛上部布置垂直管圈。螺旋管圈水冷壁具有温度偏差小、抗干扰能力强、管子规格选取比较灵活等优点,但是这种结构的水冷壁系统支撑困难、制造成本高、制造精度要求高和安装难度大;螺旋盘管有一定倾角,受加工及运输尺寸的限制,现场对接焊缝的数量巨大,约为垂直管圈的 4 倍;由于采用高质量流速,炉膛水冷壁系统的压降较大,增加了给水泵的电耗;水冷壁管螺旋倾斜上升,水冷壁燃烧器开孔等变得困难;水冷壁管螺旋管圈运行过程中热应力较大 [10]。

相比之下,垂直管屏直流锅炉具有结构简单、安装工作量小、流动阻力小和各种工况下热应力较小等特点,因此在锅炉大型化的进程中越来越受到人们的关注。质量流速对压降影响的计算表明,当质量流速低于 $1200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,垂直管圈水冷壁的摩擦压降在总压降中所占比例变得很小,而重力压降所占比例增大,系统体现出具有汽包锅炉的正

流量响应特性,从而使水冷壁管内工质流量分配能够自动与热负荷分布相匹配,即热负荷高的管子,内部工质流量相应增大,热负荷低的管内工质流量相应减小。因此,在总流量不变的情况下,由于吸热偏多而引起的出口温度偏高的现象会得到有效抑制。这样就大大降低了管屏对热偏差的敏感度,使水冷壁出口温度较均匀,从而保证了锅炉的安全运行。同时,采用低质量流速的垂直管屏技术能简化水冷壁的固定结构,降低给水泵电耗,因此锅炉成本和发电机组的供电效率得到改善。

通过对现有工程中几种常见的超临界锅炉水冷壁布置型式的特点进行分析,在西门子低质量流速试验研究结果的基础上,将垂直水冷壁布置方式和低质量流率结合起来应用于超临界机组锅炉。这一方案能够结合垂直水冷壁结构简单和低质量流速工质自补偿特性的优点,同时,取消节流孔圈,避免了水冷壁管及下集箱的复杂结构,并且消除了运行过程中孔圈结构堵塞造成管壁超温的安全隐患。

1.2 超临界锅炉燃烧方式

直流燃烧器切圆燃烧和旋流燃烧器前后墙对冲燃烧是目前国内外应用最为广泛的两种超临界煤粉锅炉燃烧方式。切圆燃烧方式燃料适应性强,风粉混合均匀,我国煤种分布较广,与切圆燃烧方式相适应,因此,我国设计制造的超临界锅炉有许多采用这种燃烧方式。然而切圆燃烧方式在炉膛上部,烟气旋转速度虽然较低,但仍然存在部分残余旋转,使烟气速度场分布左右不对称,从而导致炉膛出口以及水平烟道内的过热器、再热器对流传热不对称,而此区域受到的炉内火焰辐射传热却是内高外低的对称辐射场,将对流传热与辐射传热简单叠加,导致炉膛出口处过热器、再热器传热特性出现偏差,从而造成汽温偏差甚至超温爆管。双切圆燃烧技术在一定程度上改善了不均匀问题,单炉膛内两个切圆旋转方向相反,将两个相对独立的燃烧系统对流热偏差与整体火焰辐射内高外低的对称辐射热偏差合理互补,使过热汽、再热汽的温度偏差问题得到改善^[11]。

对冲燃烧中旋流燃烧器沿前后墙均匀布置,因此沿炉膛宽度方向热负荷均匀,炉膛出口及水平烟道的烟温偏差很小且易控制,此为对冲燃烧炉的最大优点之一。实际运行情况表明,除一般认为直流燃烧器切圆燃烧方式 NO_x 的生成量比旋流燃烧器前后墙对冲燃烧方式稍低外,在大容量煤粉炉的燃

烧经济性、结渣与高温腐蚀特性、着火及低负荷稳燃特性等方面,旋流燃烧器前后墙对冲燃烧方式与直流燃烧器切圆燃烧方式并没有明显的优劣之分。本例锅炉方案中,采用旋流燃烧器前后墙对冲布置,当然,也可以采用切圆燃烧。

1.3 垂直管圈水冷壁的关键参数选取

1.3.1 水冷壁工质质量流速

对于超临界变压运行直流锅炉而言,在锅炉从启动至满负荷时,运行状态变化如下:当锅炉负荷在最低直流负荷以下时,水循环方式为依靠循环泵控制循环,随着锅炉负荷的提高,蒸汽压力经过高压、超高压、亚临界,最后升为超临界,水冷壁管内工质有两种状态,即单相流动和双相流动,工质的温度和干度也有很大的变化,如果出现流量偏差或运行参数的脉动,则容易出现传热恶化或金属温度波动,造成超温或疲劳破坏,因此防止出现水动力的不稳定成为超临界变压运行直流锅炉水冷壁设计的关键。

超临界直流锅炉变压运行时,水冷壁汽水参数变化范围大,因此其传热特性变化也较大,设计时需考虑如下4个工况:(1)在超临界压力下,管内单相介质比亚临界区双相介质的换热系数低、同时工质温度较高,因此,水冷壁壁温为各运行工况下的最高值;(2)在近临界压力工况运行时,两相介质具有较高的干度,特别在上部水冷壁中,更高干度的工质将出现蒸干,因此为防止蒸干时的壁温骤升,应将蒸干点设置在较低的炉膛热负荷区;(3)在亚临界压力区间运行时,炉膛下部燃烧器区热负荷较高,要防止发生膜态沸腾;(4)当锅炉运行在最低直流负荷及以下工况时,汽水密度差由于压力的降低而增大,容易出现流动的不稳定和较大的热偏差^[12]。

内螺纹管可有效破坏膜态沸腾的生成,哈尔滨锅炉厂设计制造的超超临界垂直管圈锅炉的运行经验表明,即使在热负荷较高的燃烧器区域,工质干度达到0.5时,仍然不会出现传热恶化,而且在近临界区,两相介质干度达到0.9出现蒸干现象时,壁温仍可控制在安全范围内。此外,具有正响应特性的低质量流速垂直管圈对锅炉低负荷水动力的稳定性十分有利^[13],如图3所示。

综上所述,水冷壁工质质量流速的选取必须要大于某一临界值,使得锅炉水冷壁在不同压力区间内管壁温度不超过材料的最高允许使用温度。也就是说,当超临界锅炉变压运行时,水冷壁工质质量流速应分别高于最低直流负荷状态时保持水动力稳定

性、亚临界区不发生膜态沸腾、近临界区控制蒸干以及超临界区不发生拟膜态沸腾 4 个运行区间的临界质量流速^[14]。

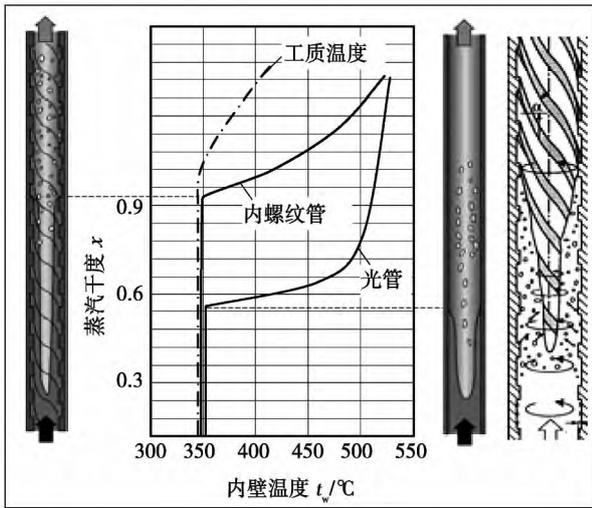


图 3 内螺纹管内的汽液两相流动行为
Fig. 3 Behavior of the steam-liquid two-phase flow inside internally threaded tubes

锅炉设计时,通常以最低直流负荷工况为基础,所选质量流速应高于该工况下的临界质量流速,并反推满负荷工况下的质量流速,不同水冷壁型式的工质质量流速最低要求如图 4 所示。考虑到低质量流速的特点,本方案选取 BMCR 工况下水冷壁管内工质的质量流速为 $940 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,水冷壁材质为 15CrMoG,最低直流负荷为 25% BMCR,锅炉的最低直流负荷较低,可缩小再循环泵的运行范围,从而减少电耗和启动损失。选取的质量流速可以保证锅炉在最低直流负荷时,水冷壁的质量流速仍可满足启动阶段保持水动力稳定性和控制水冷壁出口温度偏差在许可范围内的临界质量流速约 $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ^[15],而且可以保证在所有压力运行区间水冷壁工作的安全性。

1.3.2 水冷壁工质出口过热度 and 入口欠焓

在亚临界自然循环锅炉中,汽包作为蒸发受热面和过热受热面的分界点,而对于超临界锅炉,两者之间没有固定的分界点,水冷壁出口温度的确定主要是保证出口工质在最低直流负荷时仍有一定的过热度,从而避免低负荷时,本生点提高,甚至造成过热器带水。同时应考虑到水冷壁及汽水分离器材料选取的安全性和经济性,因此工质温度又不宜过高,此外,过高的水冷壁出口工质温度,对水冷壁温度偏

差的控制也是不利的。本研究提出的锅炉方案中,汽水分离器的材质为 WB36,其最高允许使用温度为 $450 \text{ }^\circ\text{C}$,锅炉额定负荷下,设计水冷壁出口的工质平均温度为 $423 \text{ }^\circ\text{C}$,锅炉最低直流负荷(25% BM-CR)时,水冷壁出口工质平均温度为 $340 \text{ }^\circ\text{C}$,不但考虑了汽水分离器材料的安全余量,也保证了最低直流负荷时,水冷壁出口工质具有 $34 \text{ }^\circ\text{C}$ 的过热度。

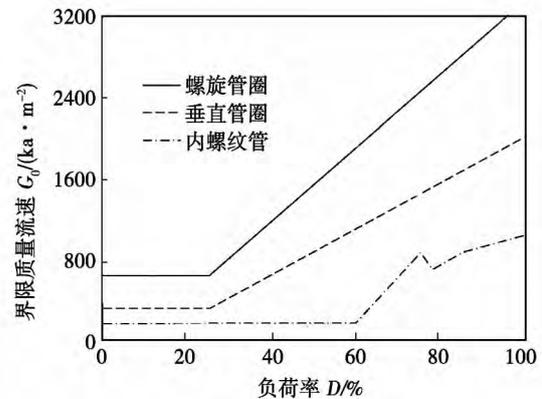


图 4 不同水冷壁的工质界限质量流速
Fig. 4 Limit mass flow velocities of the working medium in various water walls

为防止压力较低时,水冷壁工质在入口处汽化,从而造成水冷壁流量分配不均匀,因此工质的入口欠焓和过冷度不宜太小。当然,水冷壁进口工质的温度也不能过低(过冷度太大),以免引起水动力的不稳定,其入口欠焓应小于产生水动力多值性的极限欠焓。本方案采用了启动再循环泵,在锅炉启动及低负荷运行阶段,水冷壁具有强制流动的特性,因此,不会发生倒流现象。此外在最低直流负荷时,垂直水冷壁压降大于管屏的最大停滞压差,因此,也不会发生停滞现象^[12]。本方案中,锅炉满负荷工况下,设计水冷壁入口的工质温度为 $315 \text{ }^\circ\text{C}$,在最低直流负荷时,设计工质入口温度为 $265 \text{ }^\circ\text{C}$,此时,过冷度为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.3.3 降低水冷壁出口温度偏差的措施

尽管低质量流率垂直管水冷壁与螺旋管圈相比,各种负荷下均有正响应特性,但由于炉膛水冷壁的结构不完全相同以及吸热不十分均匀,因此会引起相应的温度偏差,为此,本方案在上、下部水冷壁之间加装了中间混合集箱。混合集箱的高度适宜,在锅炉最低直流负荷工况下混合集箱进口工质平均干度为 0.79,可有效防止汽水两相混合物的流量分配不均匀问题。

2 低质量流速垂直水冷壁超临界锅炉开发

根据上述原则,以 600 MW 为例,开发了低质量

流速垂直管圈超临界煤粉锅炉。锅炉的主要规范依据汽轮机确定,如表 1 所示,设计燃料为烟煤,如表 2 所示。

表 1 锅炉主要参数

Tab. 1 Main parameters of the boiler

主汽流量 /t · h ⁻¹	主蒸汽压力 /MPa	主蒸汽温度 /°C	再热蒸汽流量 /t · h ⁻¹	再热器入口		再热器出口		给水温度 /°C
				压力/MPa	温度/°C	压力/MPa	温度/°C	
1 970	25.4	571	1 649	5.2	339	5.01	569	294

表 2 燃料元素分析

Tab. 2 Elementary analysis of the fuel

碳 C _{ar} /%	氢 H _{ar} /%	氧 O _{ar} /%	氮 N _{ar} /%	硫 S _{ar} /%	灰分 A _{ar} /%	水份 M _{ar} /%	挥发份 V _{daf} /%	热值 Q _{ar,net} /MJ · kg ⁻¹
56.22	3.58	5.78	1.01	0.85	23.06	9.5	37.42	21.65

本例 600 MW 低质量流速垂直管圈超临界煤粉锅炉,为变压运行、超临界参数、一次中间再热,锅炉总体布置为 II 型、全钢架、悬吊结构、燃烧器布置采用前后墙对冲方式、启动系统带有再循环泵,汽水分离器布置在炉前上部。整体布置如图 5 所示。经省煤器加热的给水进入炉膛下部冷灰斗入口集箱,从冷灰斗进口一直到中间混合集箱之间为内螺旋管垂直管圈,中间混合集箱的高度为距冷灰斗入口集箱 38.5 m 处,下部水冷壁的工质在中间集箱内混合后进入炉膛上部垂直光管水冷壁,工质进入汽水分离器前,先经下降管引入水平烟道的两侧墙。来自汽水分离器的蒸汽进入炉膛的顶棚和尾部包墙过热器,之后进入位于尾部对流烟道内的低温过热器,再流经炉膛上部的屏式过热器和末级过热器,最后进入汽轮机高压缸。再热器分为两级布置,汽轮机高压缸排汽首先进入尾部对流烟道中的低温再热器,然后进入水平烟道中的高温再热器,加热后的再热蒸汽进入汽机中压缸。汽水分离器下部与贮水箱连接,为减少启动损失,贮水箱中的水与给水混合后进入省煤器,也可以将其排至除氧器给水箱。

来自炉膛燃料燃烧产生的烟气依次流经屏式过热器、末级过热器和位于水平烟道内的高温再热器,然后进入尾部对流烟道,尾部对流烟道被中隔墙过热器分为前、后 2 个烟道,分别布置有低温再热器和低温过热器,烟道上部由膜式包墙过热器围成,下部为护板结构单烟道,布置有省煤器,省煤器出来的烟气进入 2 台回转式空气预热器。

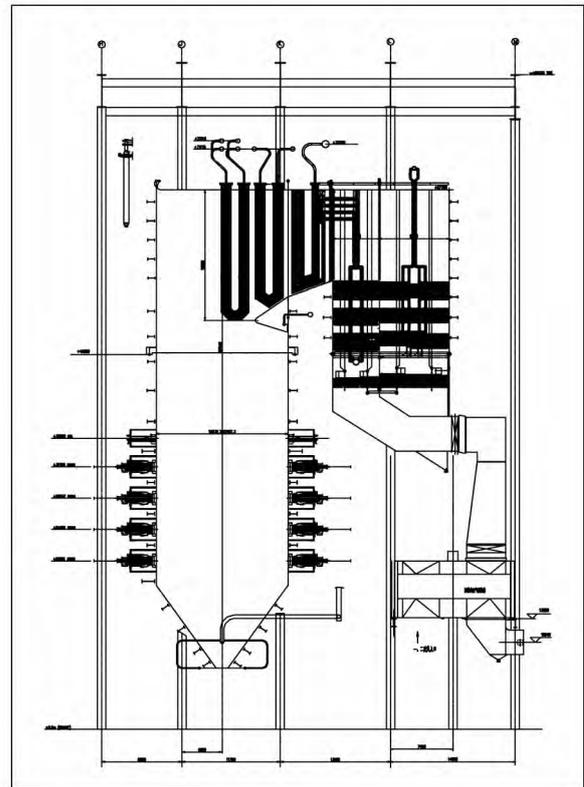


图 5 锅炉总体布置

Fig. 5 Overall arrangement of the boiler

过热蒸汽温度由水煤比调节,同时,在三级过热器之间设有二级喷水减温器进行汽温的微调。再热蒸汽温度通过位于尾部烟道下方的烟气挡板的开度进行调节,挡板开度不同,流经低温再热器侧的烟气量会随之改变,从而达到汽温调节目的。此外,为紧

急状况下调节再热器进口蒸汽温度,在低温再热器进口连接管道上也布置有喷水减温器。

在炉膛前后墙上布置 4 层燃烧器,每层 8 只(前后墙各 4 只),锅炉共有 32 只低 NO_x 旋流燃烧器,对冲燃烧。在 4 层燃烧器的上方,设有 1 层燃尽风,

共 14 个风口(前后墙各布置 7 个)。磨煤机为双进双出式,每台磨煤机为布置于前墙和后墙的一层燃烧器提供燃料,锅炉共配 4 台磨煤机^[16]。

对锅炉各种工况下进行性能预测,BRL 下锅炉设计效率为 93.8%,主要热力数据如表 3 所示。

表 3 锅炉不同负荷下的主要计算结果

Tab. 3 Main calculation results of the boiler at various loads

项 目	BMCR	BRL	75% BMCR	50% BMCR	30% BMCR	25% BMCR
过热器出口流量/t·h ⁻¹	1 970	1 808	1 223	985	591	493
再热器出口流量/t·h ⁻¹	1 649	1 512	1 058	867	533	412
省煤器进口流量/t·h ⁻¹	1 852	1 700	1 149	925	591	493
过热器一级喷水流量/t·h ⁻¹	56	53	35	27	0	0
过热器二级喷水流量/t·h ⁻¹	56	53	35	27	0	0
未级过热器出口汽温/°C	571	571	571	571	550	546
低温再热器进口汽温/°C	339	331	322	327	333	336
高温再热器出口汽温/°C	569	569	569	569	493	487
启动分离器出口汽温/°C	423	423	399	383	349	338
低温过热器出口汽温/°C	477	476	459	434	370	364
屏式过热器出口汽温/°C	547	546	543	532	479	469
省煤器进口水温/°C	294	287	264	253	226	219
省煤器出口水温/°C	332	326	307	299	270	264
屏底烟温/°C	1 412	1 391	1 260	1 171	1 002	991
炉膛出口烟温/°C	1 011	992	874	806	660	643
空气预热器出口烟温(未修正)/°C	129	124	112	108	103	97
过热汽出口压力/MPa	25.4	25.27	22.82	15.56	10.7	9.6

3 结 论

采用低质量流率垂直管圈技术的超临界煤粉锅炉可以保证水动力的安全性。本研究设计了 600 MW 低质量流速垂直管圈超临界煤粉锅炉、采用旋流燃烧器前后墙对冲燃烧、带再循环泵的启动系统。垂直管圈与螺旋管圈相比,结构简单,减少了锅炉现场安装的工作量,同时降低了水冷壁工质的流动阻力,而且水冷壁在各种工况下热应力得到改善。此外,由于水冷壁质量流速 < 1 000 kg/m²·s,并联管组中主要由工质重位压降决定各水冷壁管的流量分配,具有自补偿功能,从而降低了管屏对热偏差的敏感度,减少了水冷壁出口工质的温度偏差,同时取消了水冷壁入口节流孔圈,使水冷壁入口结构得到简化,也消除了运行过程中的安全隐患,并且在炉膛上下水冷壁之间加装中间混合集箱,可以进一步降低

水冷壁沿炉膛周界出口的工质温度偏差。

此外,考虑到制造、安装和维修,并充分利用亚临界控制循环中成熟技术,如内螺纹管、水冷壁固定以及刚性梁等结构,超临界变压运行锅炉中采用一次垂直上升内螺纹管水冷壁具有一系列优势,计算分析表明,该方案可以满足机组可靠运行的要求。

参考文献:

[1] 陈听宽. 超临界与超超临界锅炉技术的发展与研究[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(6): 43-47.
CHEN Ting-kuan. Development and research of the supercritical and ultra-supercritical boiler technology [J]. World Sci-tech R & D, 2005, 27(6): 43-47.

[2] 车东光, 华洪渊. 超超临界锅炉设计特点[J]. 锅炉制造, 2005, 12(4): 5-9.
CHE Dong-guang, HUA Hong-yuan. Features in the design of ultra-supercritical boilers [J]. Boiler Manufacturing, 2005, 12(4): 5-9.

- [3] 杨冬,于辉,华洪渊,等.超(超)临界垂直管圈锅炉水冷壁流量分配及壁温计算[J].中国电机工程学报.2008,28(17):32-38.
YANG Dong ,YU Hui ,HUA Hong-yuan ,et al. Flow rate distribution and wall temperature calculation of the water walls of an ultra-supercritical vertical tube-coil boiler [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2008 28(17): 32-38.
- [4] Goldmann K. Heat transfer to supercritical water at 5000 psi flowing at high mass flow rates through round tubes [C]. Int. Dev. Heat Transfer ,Part III. ASME ,1961:561-568.
- [5] 李燕,赵新木,岳光溪,等.低质量流速垂直管屏技术的原理与应用分析[J].热能动力工程 2006,21(6):640-643+647.
LI Yan ,ZHAO Xin-mu ,YUE Guang-xi ,et al. Analysis of working principle and application of low mass flow speed vertical tube-plate technology [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power. 2006 21(6):640-643+647.
- [6] 马本锋.国产300 MW 机组UP型直流锅炉调峰技术改造研究[J].中国电力 2003,36(3):5-9.
MA Ben-feng. Study of the reconstruction of domestically-made UP type once-through boilers for 300 MW units by using the peak-shaving technology [J]. China Electric Power ,2003,36(3):5-9.
- [7] 樊泉桂.超临界和超超临界锅炉水冷壁优化设计[J].动力工程 2006,26(4):457-461.
FAN Quan-gui. Optimized design of the water walls of a supercritical and ultra-supercritical boiler [J]. Journal of Power Engineering 2006 26(4):457-461.
- [8] 庄文贤,李瑜.直流锅炉与螺旋管圈水冷壁[J].锅炉技术,2001,32(9):1-4.
ZHUANG Wen-xian ,LI Yu. Once-through boilers and spiral tube-coil water walls [J]. Boiler Technology 2001 32(9): 1-4.
- [9] 吕俊复.超临界循环流化床锅炉水冷壁热负荷及水动力研究[D].北京:清华大学,2004.
LU Jun-fu. Heat load and hydrodynamic investigation of the water walls of a supercritical circulating fluidized bed boiler [D]. Beijing: Tsinghua University 2004.
- [10] 王振雷,李奕.哈锅1000 MW 超超临界锅炉技术特点简介[J].锅炉制造 2006,22(5):41-42.
WANG Zhen-lei ,LI Yi. Brief description of the features in the design of 1000 MW ultra-supercritical boiler made by Harbin Boiler Works Company [J]. Boiler Manufacturing ,2006,22(5):41-42.
- [11] 岳峻峰,高远,黄磊,等.600 MW 超临界旋流燃烧器锅炉优化运行研究[J].电站系统工程 2010,26(3):15-17,20.
YUE Jun-feng ,GAO Yuan ,HUANG Lei ,et al. Study of the optimized operation of a 600 MW supercritical boiler equipped with swirling burners [J]. Power Plant System Engineering ,2010,26(3):15-17,20.
- [12] 孙洪民,华洪渊.超超临界锅炉垂直水冷壁的结构特点和动力学特性[J].应用能源技术 2009,10(142):11-14.
SUN Hong-min ,HUA Hong-yuan. Structural features and hydrodynamic characteristics of the vertical water walls of an ultra-supercritical boiler [J]. Applied Energy Technology ,2009,10(142):11-14.
- [12] Ackerman W J. Pseudo-boiling heat transfer to supercritical pressure water in smooth and ribbed tubes [J]. Heat Transfer ,Trans. ASME ,1965,87:477-484.
- [13] WANG Jian-guo ,LI Hui-xiong. Investigation on the characteristics and mechanisms of unusual heat transfer of supercritical pressure water in vertically-upward tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2011,54:1950-1958.
- [14] 张大龙.低质量流率垂直管圈超临界煤粉锅炉开发[D].北京:清华大学,2012.
ZHANG Da-long. Development of low mass flow rate vertical tube-coil supercritical pulverized-coal-fired boilers [D]. Beijing: Tsinghua University 2012.
- [15] 张海,贾臻,毛健雄,等.通过煤粉浓缩预热低NO_x燃烧器实现高温空气燃烧技术的研究[J].动力工程,2008,28(1):36-39.
ZHANG Hai ,JIA Zhen ,MAO Jian-xiong ,et al. Research of the high temperature air combustion technology realized by using low NO_x burners preheated by pulverized coal after having been concentrated [J]. Journal of Power Engineering ,2008,28(1):36-39.

(陈滨 编辑)

With CO₂ serving as the refrigeration agent, experimentally studied were the boiling heat exchange characteristics of a low temperature fluid inside a micro-channel having an inner diameter of 0.6 mm and 1.5 mm respectively and quantitatively analyzed was the influence of various parameters under various operating conditions on the heat exchange coefficient when the low temperature fluid flows through the pipeline under the test condition. The research results show that the model proposed in the literature^[7] has a relatively high prediction precision. When the error was controlled in a range of 30%, the theoretical prediction precision ratio (ratio of the test data and those obtained from the model) of the heat exchange coefficient before the dry-out takes place can be up to 79.8% and the average deviation can be up to 21.8% while after the dry-out has taken place, the theoretical prediction precision ratio of the heat exchange coefficient can be up to 18.4% and the average deviation can be up to 59.9%. **Key words:** carbon dioxide, heat exchange coefficient, dry-out, boiling heat exchange of a flow

600 MW 低质量流速垂直管圈超临界煤粉锅炉设计开发 = **Development of the Design of a 600 MW Low Mass Flow Speed Supercritical Pulverized Coal-fired Boiler With a Vertical Tube Coil** [刊, 汉] ZHANG Man, ZHANG Hai, LU Jun-fu, WU Yu-xin, ZHANG Da-long (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Science and Power Engineering, Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(3). - 267 - 273

Analyzed were commonly seen specific features of several water wall arrangement modes of supercritical pulverized coal-fired boilers, tangentially and wall opposed combustion modes and principles for choosing the key parameters of a vertical tube coil water wall and designed and developed was a low mass flow speed vertical tube coil 600 MW supercritical pulverized coal-fired boiler. Under the full load operating condition, the design mass flow speed of the water wall was 940 kg/m²s. The version under discussion adopted the low mass flow speed vertical tube technology developed by the Siemens Company. In combination with such merits as simple in the structure of vertical water walls and the self-compensated characteristics of the working medium at a low mass flow speed, the throttle orifice was removed, thus avoiding the complex structure of both water walls and lower headers, and at the same time, eliminating the safety hazard as the tube walls have exceeded the allowable temperature, created by any clogging in the structure of the throttle orifice during operation. An intermediate mixing header was provided between the upper and lower water wall in the furnace to mix with the working medium coming from the lower part of the furnace and minimizing the temperature deviation at the working medium side caused by non-uniform heat absorption and difference in the structure of the furnace. Finally, the authors described the structure of the boiler under discussion and predicted its performance. **Key words:** 600 MW, supercritical, low mass flow speed, vertical tube coil, design

掺水燃油中水珠粒径对锅炉热效率影响 = **Influence of the Water Drop Particle Diameter in Fuel Oil Dilu-**