

# 发展超临界循环流化床的讨论

辛 建<sup>1</sup>, 吕俊复<sup>1</sup>, 岳光溪<sup>1</sup>, 于 龙<sup>2</sup>

(1. 清华大学 热能工程系, 北京 100084; 2 哈尔滨锅炉厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150046)

**摘 要:** 综述了设计超临界循环流化床时工质侧若干需要注意的问题。介绍了超临界压力下的汽水特性、超临界流化床的特点、工质在水冷壁内的流动特性和水冷壁的选型。

**关 键 词:** 超临界; 循环流化床; 水冷壁

中图分类号: TK229.2

文献标识码: A

## 1 引 言

自从 20 世纪 80 年代以来, 国内外同时起步开发循环流化床燃烧技术, 该技术商业化过程中显示出优良的环境排放特性, 其污染控制成本是目前其它技术无可比拟的, 然而其高效供电方面尚无法满足电力行业日益严格的需要, 亦即大型化、高参数尚未达到电力行业的要求。

随着循环床大型化的发展和 250 MW 再热循环床的顺利运行, 国际上多家循环床发展商均展开了超临界循环床的研究。原则上, 循环床及超临界均是成熟技术, 两者的结合相对技术风险不大, 结合后的技术综合了循环床低成本污染控制及高供电效率两个优势, 因此, 其商业前途十分光明。许多公司研究的共同结论是:

(1) 超临界循环床在燃料价格、材料成本、制造水平上, 具有巨大的商业潜力, 是一个异军突起的新方案。

(2) 超临界循环床技术实现难度低于超临界煤粉炉。

超临界蒸汽循环可以提高热效率、减少排放、减少泵的电耗。循环流化床技术具有燃料的灵活性、低的排放、高的可靠性和成熟的设计特性等优点。超临界循环流化床锅炉结合了两者的优势, 其燃烧是循环流化床燃烧发展的必然趋势。然而, 超临界循环床现在还处在研究起步阶段, 有很多问题需要通过计算或实验解决, 还有很多在设计时需要注意的问题。

## 2 超临界压力下的汽水特性研究

随压力的升高, 水的饱和温度也相应增加, 汽化潜热相应减少, 饱和水与饱和汽的密度差也随之减少。在压力达到 22.12 MPa 时, 汽化潜热等于零, 汽水间的密度差也等于零, 该压力称为临界压力。水在该压力下加热到 374.15 °C 时即被汽化, 该温度称为临界温度, 即相变点。超临界

压力时的情况与临界压力时相同, 当水温加热到相变点温度时, 水即全部变为蒸汽。因此, 超临界压力工质不再存在两相流区。

### 2.1 25 MPa 压力下水的物理特性

图 1 给出 25 MPa 下水的物理性质<sup>[1]</sup>。在临界压力以上, 水在加热过程中, 实际并不发生真正的相变, 但其物性随温度的变化规律与在临界压力以下迥然不同, 即当温度达到临界温度时, 其比热剧烈变化达最大值(最大比热点), 随后又迅速下降, 这个比热剧烈变化的区域通常称最大比热区。在此区域内, 水的物性参数如比容、导热系数、粘度等均发生显著的变化, 随温度增高而剧烈下降。因此当导热性差的气相工质与管壁接触, 其流速又远小于主流流速时, 即发生烧毁现象。

### 2.2 超临界流体的特点

超临界流体的特点在于它的热物理性质随温度和压力的变化非常剧烈, 并且呈非单调性。这就决定了相应的流动和传热传质过程更加复杂, 需要专门予以研究。尽管近几十年来国际传热传质学界对超临界条件下流体的流动和对流传热进行了大量研究, 但是到目前为止, 有许多问题仍

没得到很好的研究和解决。例如:超临界条件下流体在管内的受迫与混合对流传热有时强化,有时恶化,对其规律性研究得还不够;当圆管表面受热不均匀时,变工况下的流体受迫与混合对流传热研究得很少;超临界参数下流体在强化管中的流动和对流传热传质的理论研究几乎是空白,而且实验研究也很不充分;超临界流体在管内尤其在强化管中的湍流传热和传质模型尚不十分明确;工质中的金属腐蚀物质在换热表面上沉积成垢的机理及强度研究尚有待进一步加强;对流传热和传质的计算准则关系式尚有待进一步完善。而所有这一切对于真正掌握超临界机组技术、进一步发展超临界技术以及安全可靠地运行、对事故进行预报、诊断和分析,均具有重要意义。

到目前为止,我国对超临界条件下流体在管道中的流动及对流传热与传质进行系统研究的单位尚很少,尤其是对超临界压力条件下竖直壁面和水平圆管表面上的层流自然对流传热与传质、竖直圆管内的层流及湍流受迫或混合对流传热与传质的实验研究、理论探讨和数值模拟;超临界压力条件下流体的受迫对流、自然对流及水中的金属腐蚀物质在换热表面上沉积或结垢的机理方面的实验与理论研究。

### 3 设计超临界直流循环床锅炉工质侧应注意的问题

要想设计出具有优良特性的超临界循环床,必须研究:超临界条件下气液两相流动及传热机理,炉内变工况及交变气氛下的传热传质特性、含湿颗粒的传热传质机理,以及超临界循环流化

床锅炉的变负荷安全性。

与锅筒锅炉相比,直流锅炉水冷壁出口干度是有限制的,亚临界范围内,直流锅炉传热更加复杂。流动方式受质量流速、操作压力、蒸汽干度和热流等参数影响。不同流动方式的传热情况密度不同,使水与管内壁之间的传热系数不同<sup>[2]</sup>。

设计时必须注意,当负荷运行在最小直流负荷时,由于工质流速低,要防止蒸干或膜态沸腾的传热状态。在这个区域,内部传热系数达到最低值时,管壁温度突然增加,经验表明蒸干不仅可以发生在高干度区,而且也可以发生在低干度区。

在设计滑压运行超临界锅炉时,主要考虑的是:在直流运行中,应提供足够的质量流率冷却水冷壁;另一个需要考虑的是沿炉膛宽度应使水冷壁温度偏差最小。必须正确分配在入口集箱与供给集箱之间的节流圈的压降,以使温度偏差在全部运行负荷下均在可接受的范围之内<sup>[3]</sup>。直流锅炉中,工质在水冷壁的出口有点过热。因为沿炉膛管子吸热率有很大不同,所以如果循环系统设计不当,就会产生过大的温度偏差。

研究超临界循环流化床的一个重点是要掌握循环流化床燃烧侧传热系数的分布规律及随负荷变化规律。在“九五”期间立项的100 MW级循环流化床全套工程设计攻关项目中,有关科研单位对此做了深入的热态实验及理论分析工作,这些规律性研究结果在工业设计中的实际应用证明了其可靠性,为进一步的技术开发提供了坚实基础。

垂直管在确定质量流速条件下,传热危机的产生及不同管型

的传热系数实验也在20世纪90年代作为国家科技攻关项目完成了大量的研究工作<sup>[4]</sup>。

上述工作为我国开展超临界循环流化床可行性研究奠定了良好的基础,我们完全可以尽早起步,在这一重大高科技领域有所作为。

一台具有滑压系统的超临界(SPSC)循环流化床锅炉循环系统,除了水冷壁与SPSC煤粉炉有所不同以外,其它并无两样。

## 4 水冷壁的研究

### 4.1 水冷壁内工质研究

超临界压力下工质的热物理特性显著的影响着水动力的稳定性和下部受热区水冷壁出口工质的温度,进一步影响到自动调节性能。超临界参数锅炉的技术关键是水冷壁。经过长期的发展,适于循环流化床锅炉布置的垂直管屏可用于超临界条件下运行。高负荷运行工况下,水冷壁在超临界压力下工作时,管内工质温度随着吸热量的增加而提高。工质比容的急剧变化必然导致膨胀量增大,从而引起水动力不稳定或类膜态沸腾。在大比热区外,工质比热很小,因而温度随吸热变化很大。循环流化床燃烧的主要特点之一是其热负荷的均匀性,相对于煤粉炉而言热负荷较小。根据超临界压力下工质的热物理特性,控制各段水冷壁的吸热量,是超临界锅炉机组设计和运行的关键。

超临界压力下水冷壁管内可能发生的类膜态沸腾,主要是由于在管子内壁面附近的流体粘度、比热、温导系数、密度等物性参数发生显著变化引起的。这些物性参数随温度升高而剧烈下

降,管中心的流体粘度大,而壁面处的流体粘度小,由此产生粘度梯度,引起流体边界层的层流化。同时在边界层中的流体密度低,产生浮力,促进紊流传热层流化,使边界层中的流体导热系数降低,导热性差的流体与管壁接触,且壁面处的流体速度远低于管中心的流体速度,在热负荷较大时就可能导致传热恶化。这种现象类似于亚临界参数下的膜态沸腾。

#### 4.2 水冷壁选型研究

水冷壁选型包括:选择水冷壁结构形式;计算并选择水冷壁采用光管还是内螺纹管,在两者都选用时,计算其选用比例及分布情况;选择鳍片的位置及其面积。

研究适用于循环流化床的不同水冷壁结构型式在启动、变负荷及低负荷运行下的安全性和可靠性,提出对于不同机组容量、锅炉总体布置方式、燃烧器布置方

式下保证水冷壁安全、可靠地运行,同时满足便于制造、安装、运输要求的水冷壁结构型式的选型准则和设计方法。研究适用于循环流化床的垂直管屏水冷壁在启动、变负荷以及低负荷工况下的热力及水力计算方法。

### 5 结论

(1) 我国电力工业在今后的发展中应大力发展超临界循环流化床锅炉。已进口的超临界煤粉炉,可以为设计超临界循环床提供一些工程数据和实践经验。

(2) 超临界循环流化床结合了循环流化床低成本污染控制及高供电效率两个优势。因此,其商业前途十分光明。

(3) 由于超临界循环床除了水冷壁与煤粉炉不同外,其它地方没有太大区别,所以工质侧的设计在整个设计中就显得非常重要。我们今后的工作也应围绕着

水冷壁的设计与计算开展。

(4) 推荐在超临界循环流化床中采用一次垂直上升管水冷壁。

(5) 应加强对超临界循环流化床基础研究工作,尤其是对水冷壁内工质参数的变化还应做一些实验研究。

#### 参考文献:

- [1] 陈之航. 气液双向流动和传热[M]. 北京:机械工业出版社,1983.
- [2] SKOWYAR R S, CZARNECKI T S, SUN C Y, *et al.* Design of a supercritical sliding pressure circulating bed boiler with vertical water walls [A]. 13<sup>th</sup> International Conference on Fluidized Bed Combustion [C]. USA: Orlando FL, 1995. 17-26
- [3] 杨力洲. 超临界压力火力发电技术[M]. 上海:上海交通大学出版社,1990
- [4] 黄锦涛,陈听宽. 超临界直流锅炉蒸发受热面动态过程特性[J]. 西安交通大学学报,1999,33(9):5-13.

(渠源 编辑)

## 电站设备

### 电站设备组合焊接接头的超声波检验

据《Электрические станции》2002年2月号报道,由不同组织等级钢制成的管道对接接头实际上能够以不低于或略低于对于由珠光体等级单个不连续性允许性标准规定的检查灵敏度进行超声波检查。

为了解决有关检查可能性的问题,必须预先对具体接头的声学特性进行试验研究,根据研究结果决定检查适用性、检查可达性和检查的灵敏度。

在制定焊道具有余高的组合接头检查工艺时,为了提高检查可达性和接头检查适用性,合理地利用直射和一次反射的横波射线。

在除去焊道余高的情况下,利用直射纵波射线能显著增加具有较大直径管道组合接头检查的信息量。

对于4~6 mm和20~30 mm厚度,制定了组合接头(组合的奥氏体-珠光体接头)超声波检查的工艺。

(思娟 供稿)

发展超临界循环流化床的讨论 = **A Discussion Concerning the Development of Supercritical Circulating Fluidized Beds** [刊, 汉] / XIN Jian, LU Jun-fu, YUE Guang-xi (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), YU Long (Harbin Boiler Works Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 439 ~ 441

Summed up are some issues demanding due attention at the working medium side during the design of a supercritical circulating fluidized bed. Also presented are the steam-water characteristics under a supercritical pressure and the specific features of a supercritical fluidized bed as well as the flow characteristics of the working media in water walls and the type selection of the latter. **Key words:** supercritical, circulating fluidized bed, water wall

大型汽轮机状态综合评价的理论与系统研究 = **Theoretical and Systematic Study of the Comprehensive Evaluation of the Operating State of a Large-sized Steam Turbine Unit** [刊, 汉] / LI Lu-ping, ZHANG Xiao-ling, WANG Chun-mei, et al (Changsha University of Electric Power, Changsha, China, Post Code: 410077) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 442 ~ 444

The theory concerning the comprehensive evaluation of the operating state of a large-sized steam turbine unit is studied followed by the establishment of a mathematical model for that evaluation. On this basis a software system for the above evaluation has been developed. The main function of the software system consists in realizing a real-time comprehensive evaluation of the current operating condition of a steam turbine unit, thereby providing a basis for a decision-making concerning the condition maintenance/repair of the steam turbine unit. The above-mentioned software has also been employed for evaluating the operating state of a Chinese-made 300MW steam turbine unit. **Key words:** steam turbine unit, operating state evaluation, mathematical model, relative inferiority degree

船用汽轮机末级叶片抗蚀技术试验研究 = **Experimental Study of Erosion Resistance Techniques for the Last-stage Blades of a Marine Steam Turbine** [刊, 汉] / LI Dian-xi, FAN Yi, LUO Chun-xin, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 445 ~ 446

Through hot-state erosion tests using four kinds of erosion resistance method a surface erosion-resistance technique with highly promising prospects has been identified, which conforms to the specific requirements of the last-stage blades of a marine steam turbine. This has laid a solid basis for the further engineering research of various erosion-resistance techniques. **Key words:** blade erosion resistance, laser quenching under phase transformation conditions

循环灰为热载体的移动床煤热解室数学模型 = **Mathematical Model of a Moving-bed Coal Pyrolysis Chamber with Cycling ash Serving as a Heat Carrier** [刊, 汉] / LIU Qing-hui, LU Zi-an, LI Ding-kai (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 447 ~ 450

A moving-bed coal pyrolysis chamber with cycling ash serving as a heat carrier represents a key equipment item in a coal gas - steam cogeneration system. On the basis of the following factors set up is an integrated mathematical model for a moving-bed coal pyrolysis chamber. The factors include: a sub-model based on coal drying and pyrolysis, the theory of flow and heat transfer in non-sintered porous media as well as the theory of contact heat conduction between solids and the criteria of "restricted particle diameter". With the help of the above-cited model a simulation calculation was conducted of the pyrolysis process of Longkou lignite and satisfactory results were obtained. **Key words:** coal, pyrolysis, moving bed, mathematical model