

DOI: 10.19666/j.rlfd.202303036

超临界 CFB 锅炉深度调峰跨临界过程中 水冷壁动态特性的试验研究

卿 浩¹, 周妍君¹, 宋园园¹, 杨 冬¹, 黄 中², 吕俊复²

(1.西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2.清华大学能源与动力工程系热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

[摘 要] 为了保证超临界循环流化床 (CFB) 锅炉具有良好的宽负荷运行特性及深度调峰的能力, 对跨临界压力变化时工质与水冷壁间的动态特性进行试验研究。采用 $\Phi 25.0\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$ 的垂直上升光管, 在压力 20.0~23.0 MPa, 质量流速 400~800 kg/(m²·s) 试验工况范围内开展了近临界稳态传热试验和跨临界压力阶跃动态特性试验。结果表明: 近临界压力下, 增大质量流速、减小内壁热负荷、降低压力都能使传热恶化发生时的干度减小, 对应的流体焓值增大, 使传热恶化推迟发生; 跨临界压力阶跃变化时, 受热管内流体可能发生传热恶化导致壁温飞升, 但随着质量流速的增大温度又回落到正常值; 壁温飞升点与内壁面的传热随时间依次经历传热恶化阶段, 过冷沸腾传热强化阶段和单液相换热阶段; 各参数对跨临界压力阶跃变化时传热恶化的影响与对近临界稳态试验的传热恶化的影响相同, 质量流速减小和内壁热负荷增大会使传热恶化发生的位置提前, 同时壁温飞升的数值更大。

[关 键 词] CFB 锅炉; 深度调峰; 跨临界动态特性; 垂直上升管; 传热恶化

[引用本文格式] 卿浩, 周妍君, 宋园园, 等. 超临界 CFB 锅炉深度调峰跨临界过程中水冷壁动态特性的试验研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 29-38. QING Hao, ZHOU Yanjun, SONG Yuanyuan, et al. Experimental investigation on dynamic characteristics of water wall during transcritical process of deep peak regulation for supercritical CFB boilers[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 29-38.

Experimental investigation on dynamic characteristics of water wall during transcritical process of deep peak regulation for supercritical CFB boilers

QING Hao¹, ZHOU Yanjun¹, SONG Yuanyuan¹, YANG Dong¹, HUANG Zhong², LYU Junfu²

(1.State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2.Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to ensure that the supercritical CFB boiler has good wide-load operation characteristics and the ability of deep peak regulation, the transient heat transfer characteristics between the working fluid and the water wall under the change of transcritical pressure are experimentally studied. Experiment adopted $\Phi 25.0\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$ vertical upward tube, the near-critical steady heat transfer experiment and the transcritical pressure step transient heat transfer experiment were carried out under the experimental conditions of 20~23 MPa of pressure and 400~800 kg/(m²·s) of mass flow rate. The results showed that under the near-critical pressure, increasing the flow rate, reducing the heat flux on the inner wall, and reducing the pressure can reduce the dryness when the DNB heat transfer deterioration occurs, and increase the corresponding fluid enthalpy value, and delay the occurrence of the heat transfer deterioration. When the transcritical pressure step changes, the heat transfer deterioration may occur in the heating pipe, resulting in the wall temperature rising rapidly, but the temperature will fall back to the normal value with the increase of the flow rate. The heat transfer between the wall temperature rising point and the inner

收稿日期: 2023-03-10 网络首发日期: 2023-05-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB4100303)

Supported by: National Key Research and Development Program (2022YFB4100303)

第一作者简介: 卿浩 (1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流动传热与不稳定性, qhncepu@163.com。

通信作者简介: 杨冬 (1967), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为多相流与传热、超 (超) 临界锅炉水动力, dyang@mail.xjtu.edu.cn。

wall surface goes through the heat transfer deterioration stage, the subcooled boiling heat transfer enhancement stage and the single liquid phase heat transfer stage. The influence of each parameter on the heat transfer deterioration in the transcritical pressure step change experiment is the same as that in the near-critical steady state experiment. The decrease of flow rate and the increase of heat flux on the inner wall will advance the location of the heat transfer deterioration, and the wall temperature rise will be greater.

Key words: CFB boiler; deep peak regulation; transcritical dynamic characteristics; vertical upward tube; heat transfer deterioration

随着我国的发展需求日益增长, 能源问题始终处于十分重要的地位, 其中超临界循环流化床 (CFB) 锅炉具有燃烧效率高、 NO_x 生成低和高效的石灰石炉内脱硫等性能^[1]。目前, 我国已发展出一系列大容量的 CFB 锅炉, 实现了 350~600 MW 等级超临界 CFB 锅炉的投产应用, 新研制的 CFB 锅炉具有结构相对简单、污染物控制成本低、燃料适应性广等特点^[2-4], 十分适合与高参数的超临界发电技术相结合^[5-9]。由于光伏、风电等新能源装机容量的快速增加, 火电必须能够深度调峰以提高新能源的消纳能力^[10-11]。在深度调峰过程中, 超临界 CFB 锅炉需要在满负荷或高负荷工况快速降低到低负荷工况下运行, 不可避免地要经历超临界与亚临界压力的跨越阶段, 这会极大地影响系统的经济性与安全性^[12-15]。在跨临界压力变化时, 水冷壁内工质状态发生改变, 容易引起闪蒸缺液或流动不稳定现象, 威胁到水冷壁的安全性^[16]。为了保证超临界 CFB 锅炉具有良好的宽负荷运行特性及深度调峰的能力, 对跨临界压力变化时工质与水冷壁间的动态传热特性进行研究十分必要。

超临界 CFB 锅炉水冷壁动态特性的研究主要有数值计算与实验研究 2 种方法。数值计算方法中, 反应堆热工水力系统分析程序是用来计算水冷壁动态过程非常实用的工具。该程序主要基于 RELAP5^[17-18]和 ATHLET^[19-20]等系统分析程序上开发, 但程序在计算跨临界水冷壁动态特性时, 首先要解决临界压力处空泡份额会产生突变的问题, 其次实现跨临界动态特性的模拟常对亚临界两相流体进行简化, 其计算结果的准确性较难保证。

关于跨临界压力瞬态过程的实验研究相对较少, 现有的实验研究主要有静止容器中的跨临界泄压过程^[21-22]和单管或环管系统的跨临界降压过程^[23-27]。Gebben 等人^[22]研究了压力容器内超临界二氧化碳跨临界降压到亚临界状态的过程及流体温度和压力的变化情况。Kang 等人^[26]在跨临界压力变化下观察到单管后半段出现了壁温飞升现象, 但实验过程的降压速度较慢。张思宇^[27]在竖直圆管

内开展跨临界动态实验研究发现, 在传热恶化工况压力降至拟临界点附近时, 出现了壁温飞升现象, 将压力按相同速率恢复到初始水平时, 壁温响应有数秒至数十秒延迟。以上实验表明, 跨临界压力阶跃变化时, 一定条件下会出现传热恶化现象, 壁温快速上升, 威胁超临界 CFB 系统安全, 但相关研究目前仍在起步阶段。一方面已有的实验研究中壁温测点较少并且压力变化较为缓慢; 另一方面单管或环管系统实验的工质大多数为二氧化碳与氟利昂, 较少使用水; 因此, 跨临界压力阶跃变化时的动态特性实验研究还存在较大的空缺。

本文通过试验的方法对跨临界压力阶跃变化过程中的流动与动态特性进行了研究, 补充了水作为工质的试验数据, 更符合超临界 CFB 锅炉的实际情况, 并对其跨临界压力阶跃变化的机理进行了分析解释。相较于以往的实验研究, 本试验采用了压力阶跃变化和沿管长方向更密集的壁温测点设置, 可以更好地确定壁温飞升的焓值范围, 有利于说明跨临界压力下壁温响应的一般规律。本文对比了跨临界压力阶跃变化时发生的传热恶化与近临界稳态传热恶化在换热特性与发生位置的异同, 并分析了不同壁面热负荷与质量流速对跨临界压力变化时发生的传热恶化特性的影响规律, 为超临界 CFB 锅炉系统在跨临界压力深度调峰时, 机组的安全稳定运行提供了一定的理论基础。

1 试验系统

1.1 试验装置

本次研究使用的试验系统如图 1 所示。该试验环路由去离子水水箱、泵、质量流量计、再热器、试验段以及冷却水塔等构成。给水离开水箱后, 经过过滤器进一步除去管通道内的焊渣等杂质, 通过高压柱塞泵升压, 随后就分成 2 路。一路经旁路系统管道回到水箱; 另一路进入试验主回路系统, 进入试验主回路系统的工作介质依次流经质量流量计、回热器壳侧、预热加热段, 之后流入全周加热的试验段。流出试验段的工作介质经过回热器管侧

初步放热,再进入冷凝器充分冷却,最后经主回路控制阀节流降压,流经转子流量计所在管路返回给水箱中,从而循环利用。在整个试验系统中加热管段均采用变压器电加热的方式。

1.2 试验段简介

试验段垂直上升布置,采用 $\Phi 25.0\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$ 的1Cr18Ni9Ti光管,长度为2 m,前后均设置有稳定段。试验管段外壁包裹保温棉以减少散热损失。主回路系统质量流速的测量分别由RHM15质量流量计和LZB-25/50转子流量计完成,以相互验证。试验段压力和压差分别由Rosemount压力与压差变送器测得,工质温度采用 $\Phi 3.0\text{ mm}$ 的K型铠装热电偶测量。试验段选取了9个测量截面,其外壁温度通过固定在每个截面管的 $\Phi 0.5\text{ mm}$ 的NiCr-NiSi K型热电偶测量。在热电偶接近管壁的位置,包装玻璃纤维套管,以防止热电偶丝被烧毁。9个测量截面

的位置以及热电偶的布置情况如图2所示。将此9个测量截面按位置顺序分别命名为1号—9号截面。

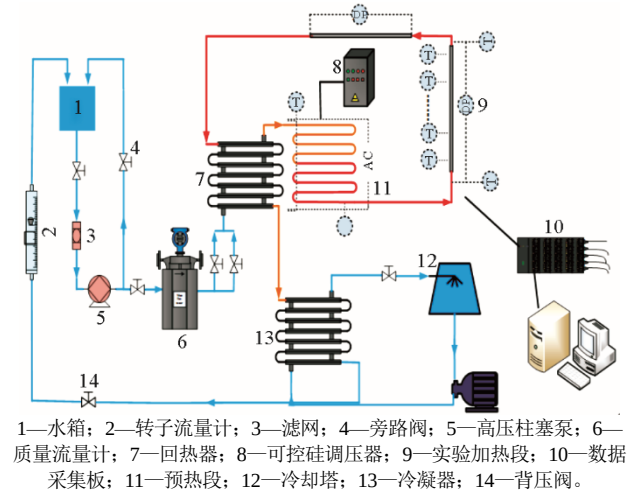


图1 试验系统
Fig.1 Experimental system

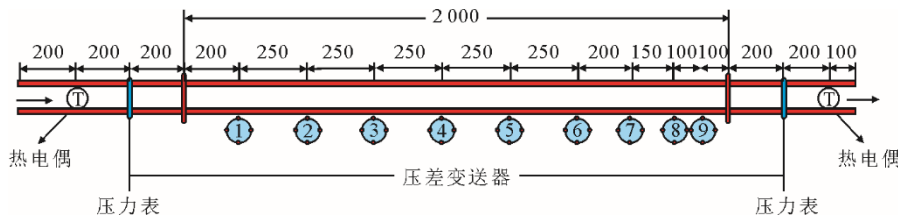


图2 试验管段测点布置 (mm)
Fig.2 Measurement arrangement of test section (mm)

本次试验通过加在试验段上的恒定电功率以满足该工况下所需的热流密度,近临界压力下的稳态试验采用背压阀和旁路阀进行调节至指定质量流速和压力,通过不断增加预热段功率来实现试验段入口焓值的增加,增加功率后待参数稳定则记录数据。跨临界压力的阶跃变化试验采用敲击背压阀的方式,实现系统压力和质量流速在较短时间内变化,同时通过数据采集系统每隔1s读取1次数据,以记录该动态过程中各个参数的变化情况。

在参数选取方面,以国内某超临界350 MW CFB锅炉为例,从75%THA负荷降至50%THA负荷时,水冷壁内工质将不可避免地经历跨临界压力变化过程,此时单管最小质量流速从 $638\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 降至 $407\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。本试验流量范围选取在 $400 \sim 800\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,稳态传热试验选取了21.0 MPa与21.9 MPa 2个压力, q/G 的值在 $0.4 \sim 0.5^{[28]}$ 。在跨临界压力的阶跃变化试验中,压力均是由23.0 MPa阶跃变化至21.0 MPa,压降速率改变仅表现为壁温增量的微弱变化^[16,24],对壁温飞升点的焓值没有产生影响,飞升后的恢复时间也不变。本试验进行跨临

界压力阶跃变化,可以更加清晰、直观地观察到壁温随压力变化的飞升和回落过程。

1.3 数据处理

本试验直接测量的参数为流体温度、外壁温度以及加在试验段两端的电流电压值,其余参数均需要通过一定计算得到。

试验段效率为进出口流体焓差与电功率之比:

$$\eta = \frac{\Delta H}{Q_E} = \frac{\Delta H}{UI} = \frac{h_{\text{out}} - h_{\text{in}}}{UI} \quad (1)$$

式中: η 为电加热效率; Q_E 为电功率,W; U 为电压,V; I 为电流,A; ΔH 为试验段进出口工质焓增,J/kg。

内壁热负荷为有效电功率与内壁面积的比:

$$q_i = \frac{Q_E \eta}{\pi d_i L} \quad (2)$$

式中: d_i 为试验段内径,m; L 为加热长度,m。

试验段任意位置处对应的流体焓值为:

$$h_x = h_{\text{in}} + 4 \frac{q_i x}{G d_i} \quad (3)$$

式中: x 代表该位置处加热的长度, m ; G 为质量流速, $kg/(m^2 \cdot s)$ 。

采取周向平均温度来计算截面上的表面传热系数:

$$h = \frac{q_i}{T_{iw,ave} - T_f} \quad (4)$$

式中: $T_{iw,ave}$ 和 T_f 分别为周向热电偶测得的平均温度和流体温度, $^{\circ}C$ 。

内壁温度可由由测量的外壁温度计算得到:

$$T_{iw,ave} = T_{ow,ave} - \frac{q_i d_i}{2k_w} \left[\frac{1}{2} - \frac{d_i^2}{d_o^2 - d_i^2} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right) \right] \quad (5)$$

式中: $T_{ow,ave}$ 为外壁平均温度, $^{\circ}C$; k_w 为管壁导热系数, $W/(m \cdot K)$; d_o 为外径, m 。

2 跨临界阶跃动态过程机理分析

在热力学平衡条件下, 亚临界压力下的气液相转换的边界称为饱和曲线, 饱和曲线左右两边分别是气相和液相, 中间区域则是气液相共存。在实际情况中常常会有热力学不平衡的情况, 例如锅炉的瞬态失压、失电、闪蒸现象等。这时工质达到相应的平衡相变点不会发生相变, 仍然保持以前的状态, 这种形态称为物质的亚稳态, 此时的两相转换边界则是极限过热 (过冷) 曲线, 将其表示在压强-体积 ($p-v$) 图中, 如图 3^[29]红色虚线所示。

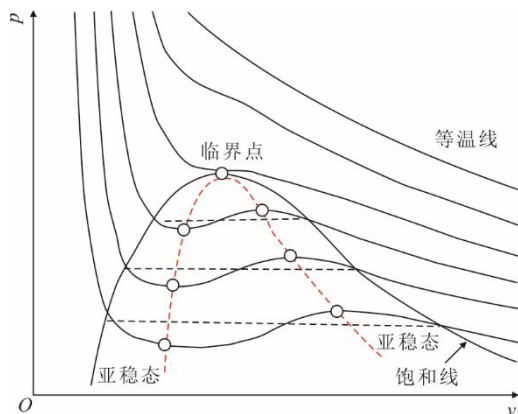


图 3 极限过热 (过冷) 曲线
Fig.3 Spinodal line

理论的极限过热曲线是由范德瓦耳斯方程^[29]确定。范德瓦耳斯方程是描述实际流体常见的状态方程, 其在低温低压区和高于临界温度区域较为适用, 但在两相区域的描述与实际并不符合。实际等温线应是一条水平线, 而范德瓦耳斯方程求出的等温线则是波浪形, 但它在气液相变区的等温线上的极值点可以确定热力学非平衡情况下的极限过热

(过冷) 度。理论上, 亚稳态区域的液相为过热液体状态, 气相为过冷气体状态, 但亚稳态结构受到微小扰动就会失稳, 变为气液相共存的稳态结构。

跨临界降压过程中, 流体所处的初始状态不同, 会导致不同的相变情况, 具体如图 4 所示。流体处在 A、B、C 3 个不同的状态, 分别从同一压力快速降压, 快速降压时流体状态的变化可以看作等熵膨胀过程。在状态 C, 等熵线与饱和线无法相交, 流体保持单相变为亚临界气相。在状态 B, 穿过饱和线的亚临界气相会变为过冷气相的亚稳态, 在微小的扰动或状态点与极限过冷度曲线相交后, 就会发生气相凝结产生液相, 并随着压力的变化, 液相液滴继续发展。在状态 A, 穿过饱和线的亚临界液相会变为过冷液相的亚稳态, 在微小扰动或与极限过热曲线相交后, 亚稳态液相会出现闪蒸, 产生气相, 并随着压力继续下降, 气相气泡继续发展。在跨临界压力阶跃变化过程中, 气泡产生并达到临界半径, 形成宏观的气相, 会导致缺液或传热恶化引起壁温飞升, 这对系统的安全性至关重要, 因此以状态 A 为初始条件的跨临界压力阶跃过程是本次研究的重点, 将通过试验现象进一步说明。

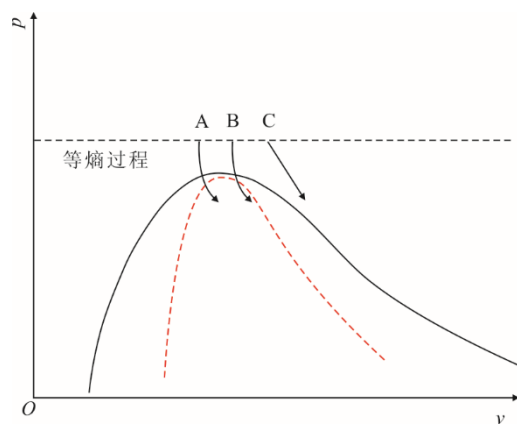


图 4 跨临界过程示意
Fig.4 Schematic diagram of trans-critical process

3 试验结果与分析

3.1 近临界工况分析

当锅炉在近临界压力下运行时, 由于气液两相段长度缩短, 相比于亚临界流体, 气液两相的密度比和定压比热容随压力变化更为剧烈, 传热容易由核态沸腾变为偏离核态沸腾 (DNB), 导致传热恶化的发生。本文通过对近临界压力区域的稳态传热试验说明质量流速, 压力等参数对传热的影响。

图 5 为相同压力 (21.0 MPa) 和内壁热负荷

(175 kW/m^2)的情况下,不同质量流速下内壁温度和表面传热系数的变化曲线。从图5可以看出,2个质量流速下都发生了传热恶化现象。当质量流速增大时,发生壁温飞升的焓值增大,飞升的温度降低,此时传热系数也急剧下降。 $430 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 工况温度飞升对应的工质焓值在 $1\,997\sim 2\,019 \text{ kJ/kg}$,而 $530 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 工况温度飞升对应的工质焓值 $2\,025\sim 2\,039 \text{ kJ/kg}$ 。无论是在过冷区或者两相区和过热区,质量流速对传热系数数值的影响并不是十分明显, $530 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 工况的传热系数的值略大于 $430 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 工况。由此可见,随着质量流速的增加,雷诺数增大,紊流强度增大,传热性能增强,因此内壁温降低,换热系数增大。

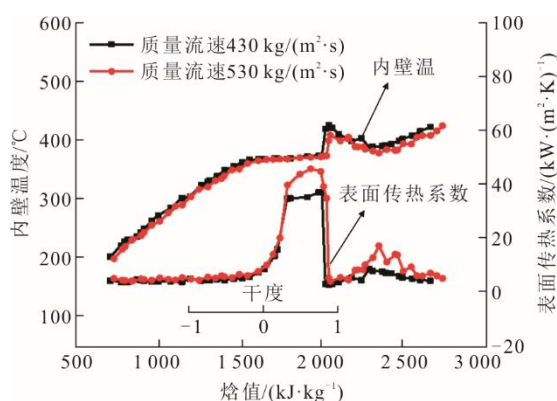


图5 质量流速对传热的影响
Fig.5 Influence of mass flow rate on heat transfer

在相同压力(21.9 MPa)和质量流速($500 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$)情况下,不同壁面热负荷下内壁温和传热系数的变化曲线如图6所示。

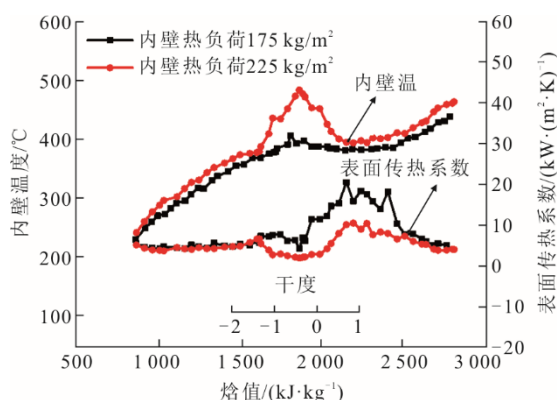


图6 内壁热负荷对传热的影响
Fig.6 Influence of heat flux of inner wall on heat transfer

由图6可见:2个热负荷工况都在过冷水状态(干度小于0)时发生传热恶化。内壁热负荷为 225 kW/m^2 工况发生壁温飞升对应工质焓值在

$1\,614\sim 1\,624 \text{ kJ/kg}$,而 175 kW/m^2 工况发生壁温飞升对应工质焓值在 $1\,787\sim 1\,805 \text{ kJ/kg}$;同时 225 kW/m^2 工况飞升的温度更高,其传热系数的值也更小。在近临界压力区,表面张力和汽化潜热较小。随着壁面热负荷增大,产生气泡的速率进一步加快,更容易在低干度区形成过多的气泡阻塞到管壁表面现象,从而造成换热性能的减弱。2个工况并没有像亚临界区域一样表现出一段稳定的两相段换热区,在发生传热恶化后,内壁温先下降后上升,传热系数略有升高但很快下降。

图7为相同壁面热负荷(175 kW/m^2)和质量流速($500 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$)情况下,不同压力对内壁温和传热系数的影响曲线。由图7可见,2个工况发生传热恶化对应的工质焓值不同。 21.0 MPa 工况在工质焓值 $2\,076\sim 2\,094 \text{ kJ/kg}$ 时发生壁温飞升,而 21.9 MPa 工况则在工质焓值 $1\,787\sim 1\,805 \text{ kJ/kg}$ 时发生。由于压力越接近临界压力,饱和水与饱和蒸汽之间的密度差越小,壁面处生成的气泡受到的浮力作用减弱,因此很难从壁面逃逸出来,结果导致临界热流密度降低,传热恶化发生的更早。

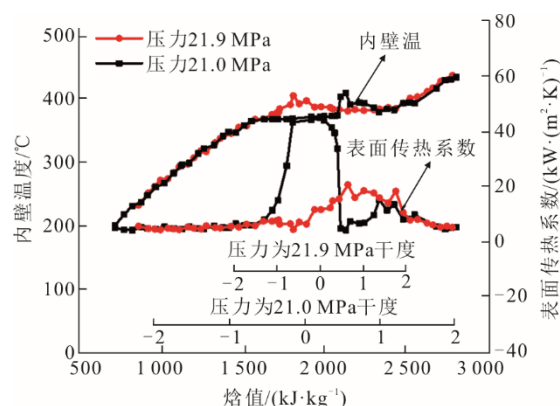


图7 压力对传热的影响
Fig.7 Influence of pressure on heat transfer

通过对试验数据的分析,可以得出在近临界压力下,增大质量流速、减小内壁热负荷、降低压力都能使传热恶化发生时的干度减小,对应的流体焓值增大,即传热恶化越晚发生。压力靠近临界压力时,两相段换热区相比于亚临界压力不明显,内壁温仅呈现出缓慢升高后下降的趋势。

3.2 跨临界压力阶跃工况分析

图8为当试验段出口压力从 23.0 MPa 阶跃至 21.0 MPa 时,管内质量流速、出口流体温度和9号测量截面内壁温随时间的变化情况。试验开始时的稳态阶段,质量流速为 $500 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$,试验段入口

流体焓值为 $1\ 600\ \text{kJ/kg}$ ，试验段内壁热负荷为 $225\ \text{kW/m}^2$ 并在跨临界过程中保持不变； $40\ \text{s}$ 时，通过调节主路背压阀，使试验段出口压力阶跃降低至 $21.0\ \text{MPa}$ 。由图 8 可以看出：随着出口压力的阶跃下降，质量流速几乎同时响应，快速上升；当压力降至临界点 $22.06\ \text{MPa}$ 附近时，9 号截面内壁温快速升高，发生了壁温飞升现象；在 $308\ \text{s}$ 时升高到最大值 $530.79\ ^\circ\text{C}$ ， $440\ \text{s}$ 时降至 $376.31\ ^\circ\text{C}$ ，之后变化缓慢。出口流体温度在压力阶跃下降时，从 $368.18\ ^\circ\text{C}$ 下降至 $361.08\ ^\circ\text{C}$ ，这主要是质量流速的快速升高引起的；之后在整个跨临界过程中保持缓慢下降。由此可以看出在跨临界过程中，出口压力阶跃降低时，有可能发生壁温飞升现象。为了探索此现象发生的条件和机理，研究在一定焓值范围内，当压力发生阶跃降低时，各个截面内壁温的变化情况。

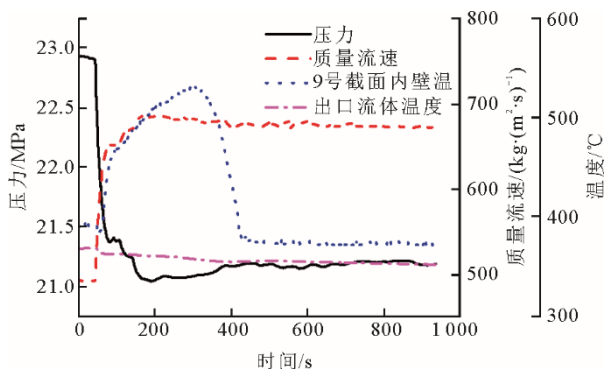


图 8 压力阶跃时各参数动态响应特性
Fig.8 Dynamic response characteristics of various parameters during pressure step

图 9 和图 10 为初始稳态质量流速均为 $740\ \text{kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ ，试验段压力由 $23.0\ \text{MPa}$ 阶跃降低至 $21.0\ \text{MPa}$ 时，入口流体焓值分别为 $1\ 700\ \text{kJ/kg}$ 和 $2\ 050\ \text{kJ/kg}$ 时各个测量截面内壁温的响应情况。

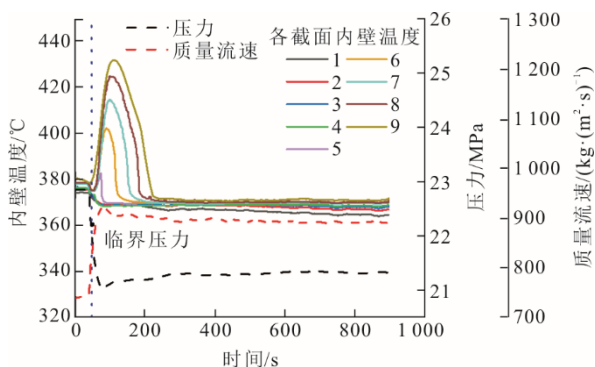


图 9 入口焓值为 $1\ 700\ \text{kJ/kg}$ 时内壁温变化情况
Fig.9 Response curves of inner wall temperature at the inlet enthalpy of $1\ 700\ \text{kJ/kg}$

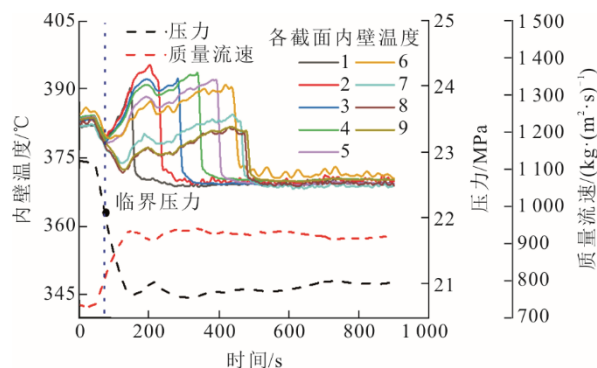


图 10 入口焓值为 $2\ 050\ \text{kJ/kg}$ 时内壁温变化情况
Fig.10 Response curves of inner wall temperature at the inlet enthalpy of $2\ 050\ \text{kJ/kg}$

从图 9 可以看出：当入口流体焓值为 $1\ 700\ \text{kJ/kg}$ 时，压力阶跃变化后，1—5 号截面均未发生壁温飞升现象，仅是随着质量流速升高而缓慢降低；6—9 号截面发生了壁温飞升现象，并且随着截面越靠后，壁温飞升的幅值越大，发生壁温飞升的起始点与压力降至临界点（压力为 $22.06\ \text{MPa}$ ）时的时刻基本相同。这说明这个工况在超临界状态下并不会发生传热恶化现象。当压力降至临界点时，处于一定焓值范围内的流体快速达到了传热恶化发生的条件，使内壁温快速上升，之后由于质量流速升高的影响，流体温度逐渐下降，传热恶化现象消失，内壁温度下降。

由图 10 可见：1—6 号截面发生壁温飞升的起始点与压力降至临界点的时刻基本相同；但 7—9 号截面则是先受到质量流速增大的影响，内壁温度先开始降低，到最低点温度时，7 号截面在 $145\ \text{s}$ 时发生壁温飞升，8、9 号截面则是在 $166\ \text{s}$ 与 $171\ \text{s}$ 时发生壁温飞升。3 个截面飞升的温度幅度都较小，相比于最低点温度，7—9 号截面分别飞升了 10.84 、 8.36 、 $7.72\ ^\circ\text{C}$ 。由此可以看出，其他条件不变，不同流体焓值处发生的壁温飞升现象有所不同。由于管长的限制，一次试验所包含的流体焓值范围有限。为了进一步说明流体焓值对跨临界压力阶跃变化时的壁温响应情况的影响，综合几次试验的数据，沿管长方向选取了 A—F 6 个点，其所对应焓值见表 1。

图 11 和图 12 是各个焓值点对应的内壁温度和局部传热系数在跨临界压力变化下的响应情况。从图 11 可以看出，A 点未发生壁温飞升现象。随着流体焓值的增大，对应的内壁温从平稳缓慢变化到开始发生壁温飞升，说明此时的流体焓值即为临界点附近发生传热恶化的临界焓值。随着焓值的增加，

飞升的幅度随之逐渐增大, D 点飞升的幅度达到最大值, 此时流体焓值继续增加, 飞升的幅度开始减小。当流体焓值继续增加到一定的值时, 壁温飞升滞后于压力阶跃变化, 如 F 点的壁温在 $t=166\text{ s}$ 时才开始升高。这是因为此时的流体焓值较大, 在降至临界点以下不会发生传热恶化。在质量流速增加后, 由于加热功率不变, 流体焓值下降; 当下降到对应压力下传热恶化的焓值范围内时, 开始出现壁温飞升, 并且飞升的幅度不大。由此可知, 如果继续增加流体焓值, 在质量流速增大后, 流体焓值仍然在对应压力下发生传热恶化焓值范围外, 便不会发生壁温飞升。

表1 沿管长方向不同位置所对应的焓值 单位: kJ/kg
Tab.1 Enthalpy values corresponding to different positions along the pipe length

位置	A点	B点	C点	D点	E点	F点
流体焓值	1 736	1 787	1 848	1 905	2 057	2 134

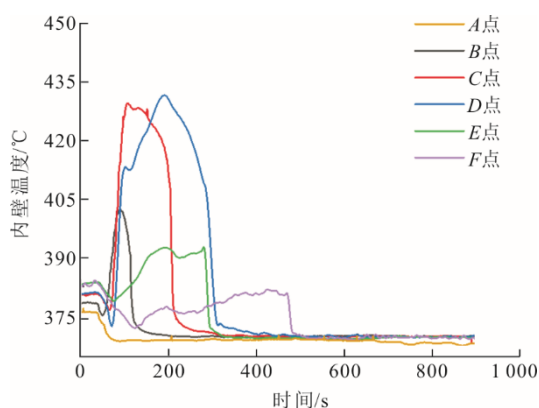


图11 各点的内壁温变化情况

Fig.11 Response curves of inner wall temperature at measure point

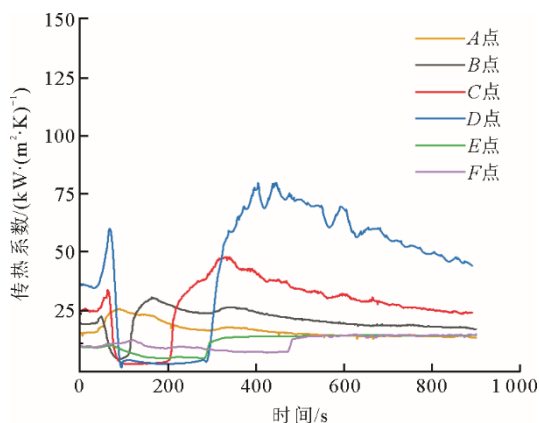


图12 各点的传热系数变化情况

Fig.12 Response curves of heat transfer coefficient at measure point

从图 11、图 12 可以看出, A 点在跨临界压力变化过程中, 没有发生壁温飞升, 流体温度低于对应亚临界压力下的饱和温度, 但管壁温度高于饱和温度, 发生了过冷沸腾, 局部换热系数增大; 之后随着质量流速的增大, 流体温度逐渐降低, 壁温也随之降低, 局部换热系数缓慢降低; 当壁温降低小到低于该压力下的饱和温度时, 过冷沸腾现象消失, 此时管壁与流体间为单相换热, 局部换热系数恢复到跨临界压力变化之前相当的水平。 B 、 C 、 D 、 E 4 个点在压力降至临界点附近时, 发生了传热恶化现象, 局部换热系数急剧减小, 之后随着流体温度的降低, 传热恶化现象逐渐消失, 壁温降低。此时, 流体温度低于该压力下的饱和温度, 但壁温仍然具有较大的过热度, 发生过冷沸腾, 局部换热系数增大; 之后管壁温度降低到该压力下饱和温度以下后, 管壁与流体间为单相换热。 F 点局部换热系数在 166 s 时开始减小, 477 s 时增大, 整体上看变化不大。

因此同一个工况点在跨临界压力阶跃变化时发生壁温飞升的整个过程中, 局部传热系数始终保持在极小的值, 该截面处的流体在压力降至亚临界后达到了传热恶化发生的条件。当流体焓值随着质量流速增加而减小后, 传热恶化现象消失, 但壁温高于该压力下饱和温度, 发生过冷沸腾, 局部换热系数升高, 之后壁温下降后, 流体与管壁之间为单相换热, 换热系数又逐渐下降。

在跨临界压力阶跃变化的过程中, 发生壁温飞升的工况点在一个焓值范围内, 即处在亚稳态过热液体的状态点在压力瞬变的扰动下产生宏观气相进而发生传热恶化现象。在超临界 CFB 锅炉深度调峰中, 应注意传热恶化开始时的临界焓值。当流体焓值远离该临界值, 传热恶化才不会发生。

3.3 不同参数在压力阶跃变化时的影响

为了研究不同参数在压力阶跃变化时壁温飞升点的移动与飞升的数值大小, 每个工况选取了压力阶跃变化时刚好发生壁温飞升的截面与前一个截面的温度变化情况进行分析。图 13 是壁面热负荷为 225 kW/m^2 , 压力从 23.0 MPa 阶跃变化到 21.0 MPa 后, 不同质量流速下 4、5 号截面壁温变化情况。由图 13 可以看出: 3 个质量流速下 4 号截面都未发生壁温飞升; 5 号截面发生壁温飞升的幅值不同, $400\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 工况壁温飞升了 $102.84\text{ }^\circ\text{C}$, 而 500 、 $560\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 工况分别飞升了 39.25 、 $36.44\text{ }^\circ\text{C}$, 随

着质量流速增大,壁温飞升的幅值逐渐减小,5号截面对应的流体焓值即传热恶化发生对应的流体焓值逐渐增大。从传热恶化持续的时间来看,3个工况下传热恶化持续时间分别为226、160、73 s,随着质量流速增大恶化持续时间逐渐减小。

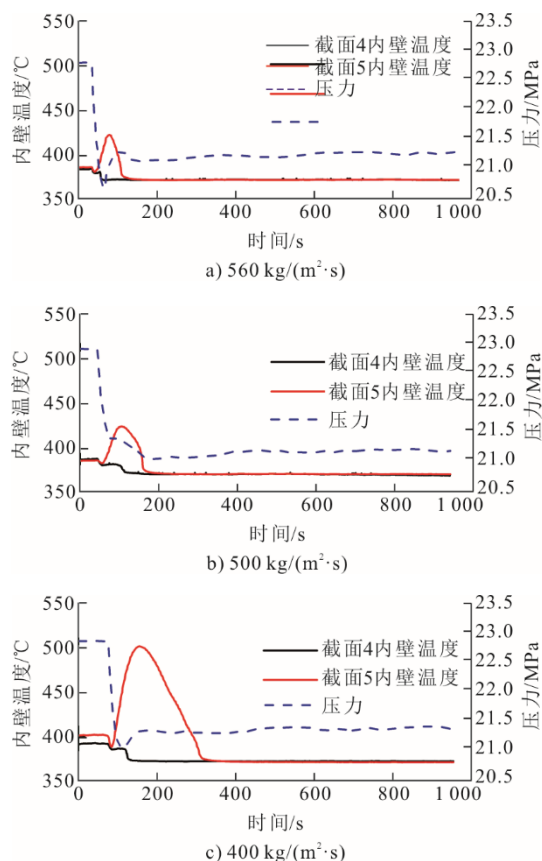


图 13 压力阶跃时质量流速对传热恶化点的影响
Fig.13 Influence of mass flow rate on heat transfer deterioration point during pressure step

初始质量流速为 $740 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 压力阶跃变化时不同内壁热负荷对应下的壁温变化情况如图 14 所示。随着壁面热负荷从 $225 \text{ kW}/\text{m}^2$ 升高至 $275 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时, 壁温飞升的截面从 6 号截面移动到 2 号截面。从 $275 \text{ kW}/\text{m}^2$ 升高至 $300 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时, 壁温飞升截面均为 2 号截面, 但传热恶化持续时间从 83 s 增加到 116 s。可以看出, 内壁热负荷越高, 壁温飞升点位置越提前, 且飞升的数值越大。

跨临界压力阶跃变化时, 质量流速和壁面热负荷对此动态过程中发生的传热恶化的影响与对近临界稳态传热恶化的影响相同, 质量流速减小和内壁热负荷增大会使传热恶化发生的位置提前, 同时壁温飞升的数值更大。跨临界压力阶跃变化过程中壁温飞升的实质是亚稳态过热液体的闪蒸导致传热恶化, 近临界压力稳态传热过程中的 DNB 传热

恶化是由于气相与核心沸腾区分离使壁面缺乏液相的润湿。两者发生传热恶化的原理不同, 但传热恶化对应的焓值相同, 都发生在低干度区甚至过冷区, 并且各个参数对传热恶化的影响相同。

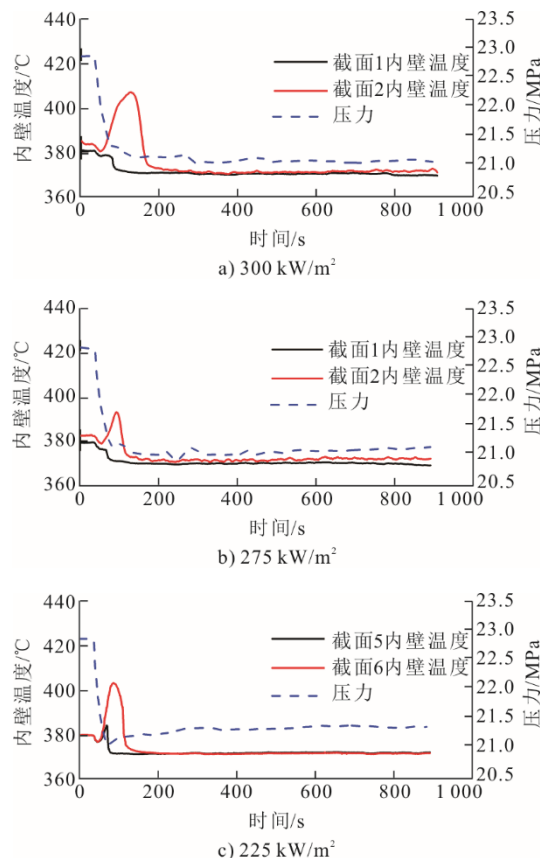


图 14 压力阶跃时内壁热负荷对传热恶化点的影响
Fig.14 Influence of inner wall heat flux on heat transfer deterioration point during pressure step

在相同质量流速和内壁热负荷条件下, 临界压力时发生 DNB 传热恶化的临界焓值最小, 但在临界压力处的流体热物性变化剧烈, 工况不稳定, 稳态传热试验很难开展。同时, 现有文献的传热关联式很少能准确预测临界点附近的传热恶化点。因此可以通过跨临界压力阶跃试验中发生壁温飞升的截面焓值作为预估, 具体见表 2。

一般而言, 超临界 CFB 锅炉可达到 30%THA 的深度调峰目标。以国内某超临界 350 MW CFB 锅炉为例, 在 75%THA 到 50%THA 的降负荷过程中水冷壁内工质将不可避免地经历跨临界压力变化过程。试验研究结果表明, 在跨临界压力变化过程中, 一旦工质焓值达到 $1680 \text{ kJ}/\text{kg}$ 左右时就有可能发生传热恶化现象, 导致壁温飞升。因此, 在超临界 CFB 锅炉深度调峰时, 经历跨临界过程需尽量使工质焓值远离该值。

表2 压力阶跃试验临界点传热恶化焓值参考
Tab.2 Reference of heat transfer deterioration enthalpy value at critical point of pressure step experiment

质量流速/ ($\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$)	内壁热负荷/ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	临界点传热恶化焓值/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
740	225	1 753~1 770
	275	1 717~1 738
	300	1 710~1 733
400	225	1 689~1 719
500	225	1 696~1 722
560	225	1 731~1 746

4 结 论

本文对垂直上升管在近临界压力区进行了稳态传热试验分析,对跨临界压力阶跃变化时各个参数的变化情况以及影响因素进行了机理分析和试验研究,为超临界CFB锅炉系统在跨临界压力深度调峰时,机组的安全稳定运行提供了一定的参考。主要有以下结论。

1) 跨临界压力阶跃降低时流体状态的变化可以看作等熵膨胀过程,穿过气液相饱和线后变为过冷气相或过热液相的亚稳态,其中过热液相在与极限过热曲线相交后会出现闪蒸,可能使管内发生传热恶化。

2) 近临界压力下,增大质量流速、减小内壁热负荷、降低压力都能使传热恶化发生时的干度减小,对应的流体焓值增大,使传热恶化推迟发生。压力靠近临界压力时,两相段换热区相比于亚临界压力不明显。

3) 本试验中跨临界压力阶跃变化时,壁温飞升点与内壁面的传热随时间依次经历传热恶化阶段、过冷沸腾传热强化阶段和单液相换热阶段。

4) 质量流速和壁面热负荷对跨临界压力阶跃过程中发生的传热恶化的影响与对近临界稳态传热恶化的影响相同,质量流速减小和内壁热负荷增大会使传热恶化发生的位置提前,同时壁温飞升的数值更大。

【参 考 文 献】

- [1] 刘建华. 国内燃煤锅炉富氧燃烧技术进展[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 48-54.
LIU Jianhua. Research and development of oxy-fuel combustion for coal-fired boiler in China[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 48-54.
- [2] 马子然, 周佳丽, 马静等. 燃煤电厂脱硝催化剂宽负荷运行的现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8415-8431.
MA Ziran, ZHOU Jiali, MA Jing, et al. Current status and development of wide-load operation of SCR catalysts in

- coal-fired power Plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8415-8431.
- [3] 蔡晋, 单露, 王志宁, 等. 超临界 350 MW 循环流化床锅炉变负荷特性[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 98-103.
CAI Jin, SHAN Lu, WANG Zhining, et al. Variable load characteristics of a supercritical 350 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 98-103.
- [4] 凌文, 吕俊复, 周托, 等. 660 MW 超超临界循环流化床锅炉研究开发进展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2515-2524.
LING Wen, LYU Junfu, ZHOU Tuo, et al. Research and development progress of the 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (09): 2515-2524.
- [5] 张缙, 蔡润夏, 姜孝国, 等. 660 MW 高效超超临界双炉膛循环流化床锅炉的设计开发[J]. 动力工程学报, 2018, 38(5): 341-346.
ZHANG Man, CAI Runxia, JIANG Xiaoguo, et al. Design and development of a 660 MW high efficiency ultra-supercritical double-furnace CFD boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(5): 341-346.
- [6] 柯希玮, 张缙, 杨海瑞, 等. 循环流化床锅炉 NO_x 生成和排放特性研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2757-2771.
KE Xiwei, ZHANG Man, YANG Hairui, et al. Research progress on the characteristics of NO_x emission in circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2757-2771.
- [7] 李仕成, 马素霞. 300 MW 循环流化床锅炉 SO_2 生成与控制的建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5966-5973.
LI Shicheng, MA Suxia. Model study on SO_2 generation and control of 300 MW CFB boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5966-5973.
- [8] 吕清刚, 宋国良, 王东宇, 等. 新型 660 MW 超超临界环炉膛循环流化床锅炉技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 3022-3032.
LYU Qinggang, SONG Guoliang, WANG Dongyu, et al. Study on new 660 MW ultra-supercritical CFB boiler technology with an annular furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (10): 3022-3032.
- [9] 张明理, 张娜, 武志锴, 等. 日前电能市场与深度调峰市场联合出清模型[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 138-144.
ZHANG Mingli, ZHANG Na, WU Zhikai, et al. Joint clearing model of day-ahead energy market and down regulation service market for accommodation of renewable energy[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 138-144.
- [10] 邓婷婷, 娄素华, 田旭, 等. 计及需求响应与火电深度调峰的含风电系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 8.
DENG Tingting, LOU Suhua, TIAN Xu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with wind power considering demand response and deep peak regulation of thermal power units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 8.
- [11] 黄中, 杨娟, 车得福. 大容量循环流化床锅炉技术发展应用现状[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 1-8.
HUANG Zhong, YANG Juan, CHE Defu. Application and development status of large-scale CFB boilers[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 1-8.
- [12] 陈艳波, 武超, 焦洋, 等. 考虑需求响应与储能寿命模

- 型的火储协调优化运行策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 16-24.
- CHEN Yanbo, WU Chao, JIAO Yang, et al. Coordinated optimal operation strategy of thermal power energy storage considering demand response and life model of energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 16-24.
- [13] 张松岩, 苗世洪, 尹斌鑫, 等. 考虑火电深度调峰的多类型储能经济性分析[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 132-142.
- ZHANG Songyan, MIAO Shihong, YIN Binxin, et al. Economic analysis of multi-type energy storages considering the deep peak-regulation of thermal power units[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 132-142.
- [14] 刘卓, 李建波, 龙潇飞, 等. 循环流化床燃烧高钠准东煤的床料颗粒聚团特性[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2248-2258.
- LIU Zhuo, LI Jianbo, LONG Xiaofei, et al. Bed particle agglomeration in circulating fluidized bed burning high-sodium Zhundong coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2248-2258.
- [15] 李银龙, 董乐, 牛田田, 等. 660 MW 超临界 CFB 锅炉机组跳闸后受热面安全性计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5957-5966.
- LI Yinlong, DONG Le, NIU Tiantian, et al. Calculation and analysis on the safety of heating surfaces for a 660 MW supercritical CFB boiler under boiler trip[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5957-5966.
- [16] 张戈. 跨临界过程相变行为的实验和数值研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 1.
- GE Zhang. numerical and experimental research on the phase change during transcritical transients[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015: 1.
- [17] GONG L X, PENG C H. Analysis of the heat-carrying performance of natural circulation loop using modified RELAP5/MOD3.4[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 39: 102387.
- [18] HANG M Q, PENG C H, LIU Z H. Analysis of depressurization ability for IRIS containment during SBLOCAs using RELAP5 and CONTEMPT[J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, 180: 109466.
- [19] MAZZINI G, MUSA A, FUKAC R. Simulation of the super critical water loop using ATHLET code during an abnormal scenario[J]. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2021, 7(2): 1-6.
- [20] FRIDMAN E, NIKITIN E, PONOMAREV A, et al. Extension of the DYN3D/ATHLET code system to SFR applications: models description and initial validation[J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, 182: 109619.
- [21] LEE D H, SWINNERTON D. Evaluation of critical flow for supercritical steam-water. Final report[R]. Winfrith: UKAEA Atomic Energy Establishment, 1983: 1.
- [22] GEBBEKEN B, EGGERS R. Blowdown of carbon dioxide from initially supercritical conditions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9(4): 285-293.
- [23] 刘佳伦, 李会雄, 冯渊, 等. 跨临界变压运行中水冷壁动态特性的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 9.
- LIU Jialun, LI Huixiong, FENG Yuan, et al. Experimental investigation on the transcritical dynamic flow and heat transfer characteristics of the water wall[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52 (11): 9.
- [24] 胡振泉. 超临界水稳态与跨临界瞬态流动传热特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019: 1.
- HU Zhenxiao. Investigation on the steady state and transcritical transients heat transfer of supercritical water[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019: 1.
- [25] HONG S D, CHUN S Y, KIM S Y, et al. Heat transfer characteristics of an internally-heated annulus cooled with R-134a near the critical pressure[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2004, 36(5): 403-414.
- [26] KANG K H, CHANG S H. Experimental study on the heat transfer characteristics during the pressure transients under supercritical pressures[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2009, 52(21-22): 4946-4955.
- [27] 张思宇. 超临界流体流动传热试验和模化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 1.
- ZHANG Siyu. Experimental and fluid scaling studies on the convective heat transfer of supercritical fluid[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015: 1.
- [28] 王文毓, 曲默丰, 赵云杰, 等. 近临界压力区低质量流速光管水冷壁临界热流密度试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 3015-3021.
- WANG Wenyu, QU Mofeng, ZHAO Yunjie, et al. Experimental investigation on critical heat flux of smooth water wall tube with low mass flux at near-critical pressures[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 3015-3021.
- [29] CAREY V P. Liquid-vapor phase-change phenomena[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 1992, 31(5): 327-328.

(责任编辑 刘永强)