

# 近临界及超临界压力区垂直光管和内螺纹管传热特性的试验研究

胡志宏, 陈听宽, 孙 丹

(西安交通大学 多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 阐述了垂直上升布置的内螺纹管和光管在近临界及超临界压力区的传热特性的试验结果。在近临界压力区, 随着压力向临界压力靠近, 光管的传热特性变差, 传热恶化的临界干度下降得很厉害, 甚至在过冷区就会发生壁温飞升; 内螺纹管在近临界压力区可以消除传热恶化, 但是随着靠近临界压力其抑制传热恶化的能力下降。传热恶化后的光管和内螺纹管的最小传热系数分别在压力为 21.0 MPa 和 22.0 MPa。超过临界压力后, 光管和内螺纹管的传热特性得到改善, 内螺纹管在高焓值区可以降低壁温。

**关键词:** 内螺纹管; 传热恶化; 近临界压力; 超临界压力; 超临界压力锅炉

中图分类号: TK124 文献标识码: A

## 1 前言

众所周知, 内螺纹管在亚临界压力下可有效抑制传热恶化的发生, 这在许多文献中均有报道<sup>1~3</sup>, 因此许多国家都把采用内螺纹管作为防止大型电站锅炉水冷壁超温爆管的主要措施, 并对各自采用的内螺纹管的传热特性进行了试验研究。但是, 以往的研究多集中在亚临界压力区, 而对内螺纹管在近临界和超临界压力区的传热特性研究较少。为发展我国 600 MW 超临界变压运行锅炉垂直上升内螺纹管水冷壁, 本文针对哈尔滨锅炉厂 600 MW 机组锅炉采用的内螺纹管进行了近临界和超临界压力范围的传热特性试验研究, 为进行对比, 还在相应的实验条件下研究了光管的传热特性。

## 2 试验装置和方法

试验在西安交通大学高压汽水两相流试验系统上进行。

试验用光管为  $\Phi 20 \times 2$  mm 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管; 内螺纹管为哈尔滨锅炉厂设计的 600 MW 直流

锅炉实际采用  $\Phi 28 \times 6$  mm 12Cr1MoV 四头内螺纹管, 用充水法确定其平均内径为 15.24 mm, 实测螺纹高度为 0.81 mm, 螺纹宽度为 9.0 mm, 间距 20.5 mm, 导程为 82 mm, 螺旋升角为  $61.15^\circ$ 。光管和内螺纹管的试验段加热长度均为 1 000 mm, 沿管子两侧共布置 22 对  $\Phi 0.2$  mm 镍铬—镍硅热电偶, 用来测量管子外壁温度。试验段均垂直布置, 流体在其中自下向上流动。流体压力用装在试验段前的 HP-1151 压力变送器测量, 流体温度用  $\Phi 3$  mm 镍铬—镍—硅铠装热电偶测量, 流量用孔板测量。所有测量参数都用计算机采集和处理。

实验压力为 19.0, 21.0, 21.5, 22.0, 22.5, 23.0, 24.0 MPa, 质量流速为 400~1 400 kg/(m<sup>2</sup>·s), 内壁热负荷为 200~650 kW/m<sup>2</sup>。

## 3 光管传热特性

垂直上升管的壁温分布主要受压力、质量流速、壁面热负荷和工质焓值等因素的影响。图 1 给出了压力  $P=21.5$  MPa 条件下不同质量流速和热负荷时光管的内壁温度变化特性。由图可见, 在给定工况下, 当处于核态沸腾时, 壁温略高于流体温度且随工质焓值增大而基本保持不变。当达到某一焓值时, 发生传热恶化, 壁温迅速飞升, 并出现一个峰值。在此峰值之后, 随着蒸汽干度增大, 由于汽相流速增大, 壁温迅速下降, 直到工质接近蒸干, 成为过热蒸汽时, 再由于蒸汽温度升高而再度升高。对于同一质量流速  $G=600$  kg/(m<sup>2</sup>·s), 若热负荷从 300 kW/m<sup>2</sup> 提高到 400 kW/m<sup>2</sup>, 发生传热恶化的焓值将减小。对于同一热负荷  $q=300$  kW/m<sup>2</sup>, 若质量流速由 600 kg/(m<sup>2</sup>·s) 提高到 1 000 kg/(m<sup>2</sup>·s) 时, 传热恶化的发生将从过冷沸腾区推迟到饱和沸腾区, 壁温峰值从 595 °C 下降到 465 °C。由此可见, 在近临界压力条

收稿日期: 2000-03-31; 修订日期: 2000-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59776044); 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G1999022308)

作者简介: 胡志宏(1970-)男, 山东滕州人, 西安交通大学博士研究生。

件下,随着热负荷增大,传热恶化提前,即发生传热恶化的焓值减小,而壁温飞升的峰值增大;随着质量流速增加,传热恶化推迟,壁温飞升的峰值减小,进一步增加质量流速,则可使传热恶化消除。

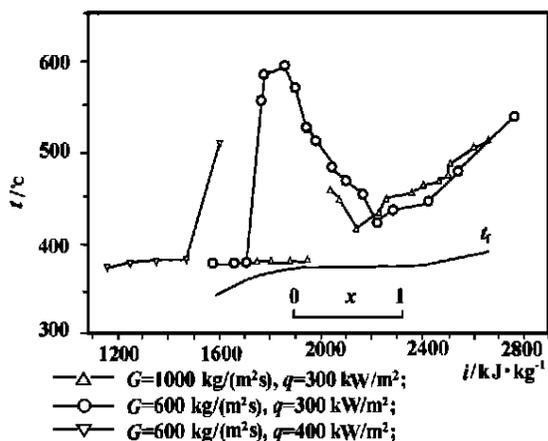


图 1  $P = 21.5 \text{ MPa}$  时光管的壁温特性

图 2 给出了压力  $P = 24.0 \text{ MPa}$  时不同质量流速和热负荷条件下的壁温变化特性。由图可见,超临界压力下在相变点附近仍然存在壁温突升,但其上升幅度比近临界压力的壁温飞升要小得多。超临界压力下质量流速和热负荷对壁温的影响与亚临界压力相似,提高质量流速同样可以降低壁温飞升。

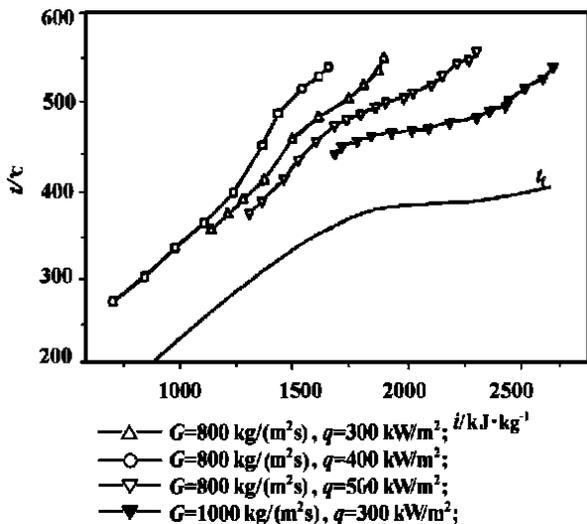


图 2  $P = 24.0 \text{ MPa}$  时光管的壁温特性

图 3 给出了质量流速为  $600 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、热负荷为  $300 \text{ kW}/\text{m}^2$  时,在近临界及超临界压力区不同压力条件下的壁温变化特性。由图可见,在近临界压力区,随着压力升高,传热恶化明显提前,一般在低含汽率甚至欠热条件下发生,同时壁温飞升的峰值

也随之提高。当压力提高到  $21.5 \text{ MPa}$ ,壁温峰值开始下降,当超过临界压力后,内壁温的升高趋向更低的焓值,但是它明显低于近临界区的温度峰值,因此可以认为超临界压力区的传热特性有显著改善。发生传热恶化后不同压力条件下的最小传热系数与压力的关系如图 4 所示,很明显,发生传热恶化后的最小传热系数出现在压力  $P = 21.0 \text{ MPa}$  ( $P/P_{CR} = 0.95$ ) 附近,在  $P = 21.0 \sim 21.5 \text{ MPa}$  的范围内其传热系数都较低。文献[4]中报道了高压水和氟里昂 R-22 在  $P/P_{CR} = 0.96 \sim 0.98$  的区域内传热恶化最明显,这和本试验结果是吻合的。

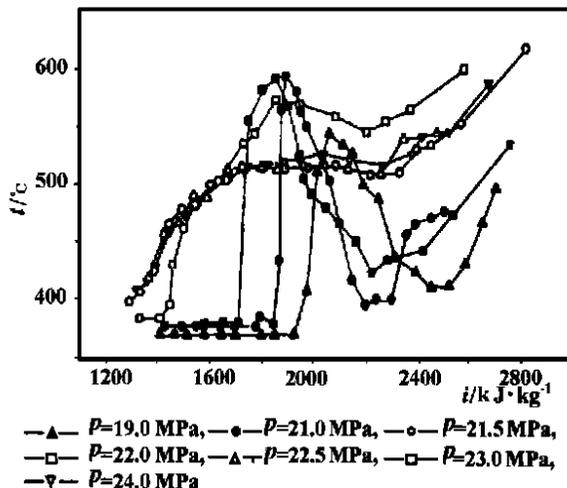


图 3  $G = 600 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $q = 300 \text{ kW}/\text{m}^2$  时不同压力条件下光管的壁温变化特性

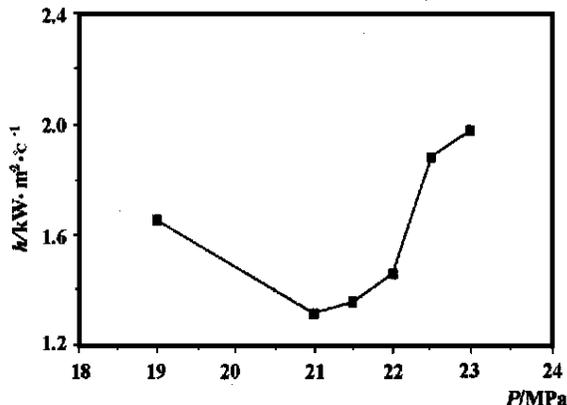


图 4  $G = 600 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $q = 300 \text{ kW}/\text{m}^2$  时最小传热系数与压力的关系

#### 4 内螺纹管传热特性

##### 4.1 壁温分布

图 5 给出了  $P = 21.5 \text{ MPa}$  时在不同质量流速和

热负荷条件下内螺纹管的壁温变化特性。由图可见, 在相当宽广的蒸汽干度范围内, 内螺纹管内流体仍能保持核态沸腾, 当蒸汽干度超过某一临界值时, 才出现由于液膜蒸干而引起的壁温升高。提高质量流速或降低热负荷均能推迟壁温飞升的发生, 降低壁温飞升峰值。图 6 给出了  $P = 21.5 \text{ MPa}$  时内螺纹管和光管壁温特性的比较。试验表明, 内螺纹管可以大大推迟传热恶化的发生, 使传热恶化的发生由欠热区推迟到高干度区, 在低干度区内螺纹管可以抑制传热恶化, 但到了一定干度以后, 内螺纹管会出现传热恶化, 使其壁温高于光管。

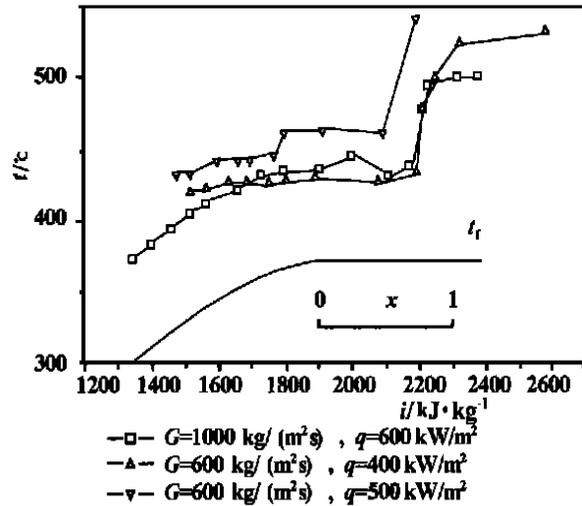


图 5  $P = 21.5 \text{ MPa}$  时内螺纹管的壁温特性

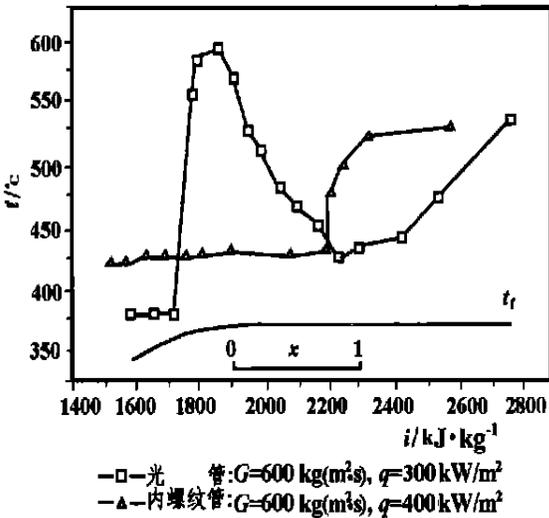


图 6  $P = 21.5 \text{ MPa}$  时内螺纹管与光管壁温特性的比较

和光管壁温特性的比较。实验结果表明, 超临界压力条件下, 在内壁温超过拟临界温度的高焓值区域, 内螺纹管可以消除传热恶化, 有效降低壁温; 在内壁温低于拟临界温度的低焓值区, 内螺纹管的传热强化效果不明显, 内螺纹管和光管的壁温无明显差别。文献[5]中也报道了在超临界压力下内螺纹管可消除传热恶化。

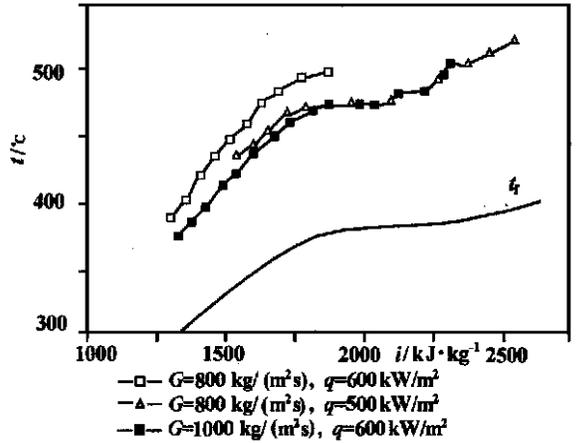


图 7  $P = 24.0 \text{ MPa}$  时内螺纹管的壁温特性

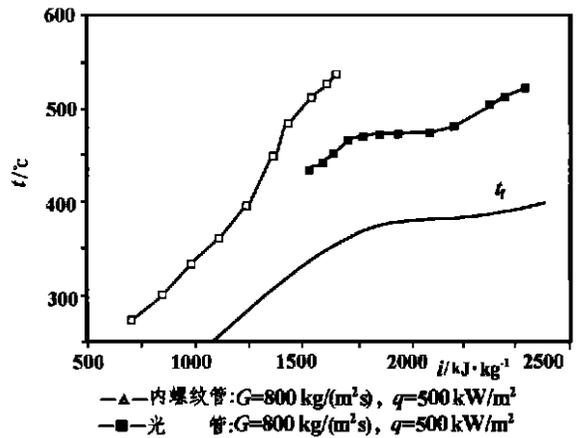


图 8  $P = 24.0 \text{ MPa}$  时内螺纹管的壁温特性的比较

不同压力条件下内螺纹管的壁温变化特性如图 9 所示。随压力接近临界压力, 内螺纹管的传热特性有变坏的趋势, 抑制传热恶化的能力有所降低, 传热恶化发生点向过冷区域移动。当达到压力  $P = 22.0 \text{ MPa}$  时, 传热恶化发生得最早, 内壁温最高, 对应的传热系数最小, 可认为此压力下的传热最差。当超过临界压力后, 其传热特性又得到改善, 内壁温有所下降。

比较光管和内螺纹管在近临界压力区的壁温特性, 可以发现, 光管和内螺纹管在压力  $P = 21.0 \sim 22.0 \text{ MPa}$  的范围内传热特性均较差, 易于发生传热

图 7 给出了压力  $P = 24.0 \text{ MPa}$  时内螺纹管的壁温变化特性。图 8 给出了  $P = 24.0 \text{ MPa}$  时内螺纹管

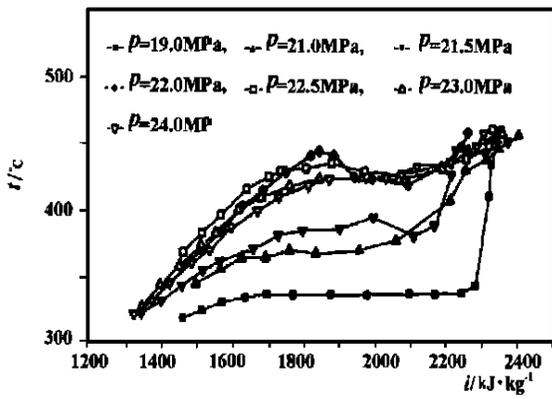


图 9  $G = 1\ 000\ \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $q = 600\ \text{kW}/\text{m}^2$  时不同压力条件下内螺纹管的壁温分布特性

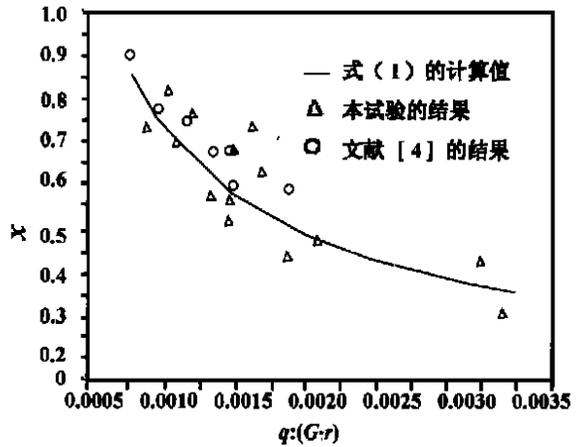


图 10 内螺纹管临界干度计算式与试验值的比较

恶化, 究其原因, 是由于在接近临界压力时, 汽水密度差减小, 壁面处产生的气泡不易脱离, 滞留在壁面上形成汽膜, 使传热变差; 当压力超过临界压力后, 超临界水可视为单相流体, 汽水的相界面消失, 传热反而改善。内螺纹管的最小传热系数发生在比光管更高的压力下是由于内螺纹管抑制传热恶化的能力随压力升高而减弱造成的。在设计超临界变压运行锅炉时, 对于近临界压力区  $P = 21.0 \sim 22.0\ \text{MPa}$  范围内, 必须给予特别重视。

#### 4.2 临界干度

确定传热恶化发生时的临界干度, 对于工程实际应用具有重要意义。根据试验结果, 内螺纹管的临界干度随热负荷增加而减小, 随质量流速增加而增大。在  $P = 19.0 \sim 22.0\ \text{MPa}$ 、质量流速  $G = 600 \sim 1\ 400\ \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、热负荷  $q = 200 \sim 650\ \text{kW}/\text{m}^2$  的试验范围内, 内螺纹管发生传热恶化的临界干度可用下式计算:

$$x_c = 1.107 \times 10^{-2} q / (G \cdot r)^{-0.609} \quad (1)$$

式中  $q / (G \cdot r)$  —— 沸腾数, 其物理意义是垂直于管壁的蒸发质量流速与管内的总质量流速之比;  $r$  —— 汽化潜热。

若采用上式计算得到的临界干度值大于 1, 可认为不发生传热恶化。将本试验得到的临界干度值与式(1)的计算值进行比较, 发现绝大部分试验点的偏差在  $\pm 20\%$  以内, 如图 10 所示。图 10 中还给出了文献[4]在压力  $P = 19.6\ \text{MPa}$  和  $P = 20.6\ \text{MPa}$  时的试验结果, 其试验值与公式(1)符合良好。

#### 5 结论

(1) 在近临界压力区, 随着向临界压力接近, 垂直上升光管的传热特性变差, 临界干度急剧下降, 甚至在过冷区即可发生传热恶化; 内螺纹管在近临界压力区可以消除传热恶化, 但是随着靠近临界压力其抑制传热恶化的能力下降。光管和内螺纹管在传热恶化发生后的最高壁温峰值及其对应的最小传热系数分别在压力为  $21.0\ \text{MPa}$  和  $22.0\ \text{MPa}$  处。

(2) 在超临界压力区, 光管和内螺纹管的传热特性得到大大改善。内螺纹管在高焓值区能抑制传热恶化, 降低壁温, 在低焓值区, 内螺纹管的传热特性与光管基本相同。

(3) 设计超临界变压运行锅炉时, 必须对近临界区的安全运行给予特别注意。保证锅炉在近临界压力区安全运行的一项重要措施就是提高质量流速。

#### 参考文献:

- [1] KOHLER W, KASTNER W. Heat transfer and pressure loss in rifled tubes [A]. Proc 8th Int Heat Transfer Conf [C]. USA: San Francisco Hemisphere, 1986: 2861-2865.
- [2] NISHIKAWA K, FUJII T. Investigation into burnout in grooved evaporator tubes [J]. Journal of Japan Soc Mech Eng, 1972 75(6): 700-707.
- [3] 上海锅炉厂研究所. 亚临界压力直流锅炉传热特性的试验研究 [J]. 锅炉技术, 1967, 7(9): 16-33.
- [4] MAKIO IWA BUCHI, MIKIO TATEIWA, HISAO HANEDA. Heat transfer characteristics of rifled tubes in the near critical pressure region [A]. Proc of 7th Int Heat Transfer Conf [C]. Germany: Munich, Hemisphere 1982: 313-318.
- [5] ACKERMAN J W. Pseudoboiling heat transfer to supercritical pressure water in smooth and rifled tubes [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1970, 92(4): 490-498.

(渠 源 编辑)

alkali metallic oxides on the NO reduction, the authors have specially investigated the effect of bituminous coal char after its being subjected to an impregnated catalyst treatment on the NO reburning process and NO reduction rate. The test was completed at an initial concentration of NO at  $1\ 000 \times 10^{-6}$  and under reaction temperatures of  $900\ ^\circ\text{C}$  and  $1\ 100\ ^\circ\text{C}$  respectively. The test results indicate that the metallic oxides in the coal ash have a very strong catalytic action on NO in the reburning zone. The bituminous coal char originally believed to have a very poor effect on NO reduction can exercise a great influence on heterogeneous reduction of NO after a cheap catalyst being added to the above-mentioned coal char. Under the condition of an appropriate reaction temperature and stoichiometric ratio (SR) the catalyst in the coal char can reduce the activation energy of NO reduction reaction and expedite the speed of that reaction, thus quickening the NO reduction speed. **Key words:** reburning, coal char, NO catalytic reduction

中储式热风送粉 W 型火焰锅炉炉内空气动力场实验研究 = **Experimental Study of Aerodynamic Characteristics in a W-shaped Flame Boiler Equipped with a Bin and Feeder System and Fed Tertiary Hot Air in the Boiler Furnace** [刊, 汉] / YAN Xiao, XU Wei-jiang, SUN Xin-guo, HUI Shi-en, XU Tong-mo (Energy & Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 263 ~ 266, 281

With regard to a W-shaped flame boiler imported from US Foster Wheeler Co. and fitted with dual-swirl separation type pulverized coal burners a cold model was set up based on an analog simulation. With the help of an hot-wire anemometer and by the use of a trace method measurements of in-furnace aerodynamic field were taken under different operating conditions. As a result, obtained under various operating conditions were the vector diagrams of in-furnace flow field, length of flame, curves of in-furnace main gas-flow distribution along the furnace depth direction and curves of variation of main gas-flow filling-fullness degree. On the basis of the experimental results an analysis was conducted of the in-furnace aerodynamic characteristics. The results of an experimental study indicate that the tertiary air fed into the furnace at high velocity along a horizontal direction has a significant effect on the in-furnace aerodynamic characteristics. **Key words:** W-shaped flame boiler, cold model experiment, aerodynamic field, dynamic flow rate

近临界及超临界压力区垂直光管和内螺纹管传热特性的试验研究 = **Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Vertical Smooth Tubes and Internally Ribbed Ones in Near-critical and Supercritical Pressure Zones** [刊, 汉] / HU Zhi-hong, CHEN Ting-kuan, SUN Dan (National Key Lab of Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 267 ~ 270

Presented in this paper are the test results of the heat transfer characteristics of vertical smooth tubes and internally ribbed ones in near-critical and supercritical pressure zones. In the near-critical pressure zone the heat transfer characteristics of the smooth tubes will deteriorate when the pressure increases to approach the critical pressure. The critical dryness of heat transfer deterioration will experience a drastic reduction. In extreme cases there emerges a dramatic rise in wall temperature even in a sub-cooled zone. As for an internally ribbed tube, its heat transfer deterioration in the near-critical pressure zone can be eliminated. However, with the pressure approaching a critical one the capacity of the internally ribbed tube to suppress heat transfer deterioration will decrease. The minimum heat transfer factor of the smooth tube and internally ribbed tube after a heat transfer deterioration will occur respectively at a pressure of 21.0 MPa and 22.0 MPa. After surpassing the critical pressure the smooth tube and the internally ribbed one will have their respective heat transfer characteristics improved. In a high enthalpy zone the internally ribbed tube can experience a reduction in wall temperature. **Key words:** internally ribbed tube, heat transfer deterioration, near-critical pressure, supercritical pressure, supercritical pressure boiler

50 MW 高压锅炉全燃高炉煤气的研究 = **A Study of Blast Furnace Gas-fired 50 MW High-pressure Boiler** [刊, 汉] / ZHUANG Zheng-ning, CAO Zi-dong, TANG Gui-hua, SHEN Yue-fen (Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power.