

超临界变压运行直流锅炉内螺纹管螺旋管 圈水冷壁的传热特性研究

唐人虎, 尹飞, 陈听宽

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西省 西安市 710049)

AN INVESTIGATION ON HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF SPIRAL WALL WITH INTERNAL RIB IN SUPERCRITICAL SLIDING-PRESSURE OPERATION ONCE-THROUGH BOILER

TANG Ren-hu, YIN Fei, CHEN Ting-kuan

(National Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Within the range of pressures from 9 to 28MPa, mass velocities from 600 to 1200kg/(m²s), and heat fluxes from 200 to 500kW/m², experiments have been performed to investigate the heat transfer to water in the inclined upward internally ribbed tube with the inclined angle of 19.5 degree, the maximum outer diameter of 38.1mm, and the thickness of 7.5mm. Based on the experiments, it was found that heat transfer enhancement of the internally ribbed tube could postpone departure from nucleate boiling at the sub-critical pressure. However, the heat transfer enhancement decreased near the critical pressure. At supercritical pressure, the temperature difference between the wall and fluid increased near the pseudo-critical temperature, but the increasing of wall temperature was less than that of departure from nucleate boiling at sub-critical pressure. When pressure was close to the critical pressure, the temperature difference between the wall and fluid greatly increased near the pseudo-critical temperature. Heat transfer to supercritical water in the inclined upward internally ribbed tube was enhanced or deteriorated near the pseudo-critical temperature with the variety of ratio between the mass velocity and the heat flux. Due to the rotational flow of the internal groove reducing the effect of nature convection, the internal wall temperature of the inclined upward internally ribbed tube uniformly distributed along the circumference. The maximum internal wall temperature difference of the inclined upward internally ribbed tube along the circumference was only 10 degree Centigrade when the fluid enthalpy exceeds

2000kJ/kg. Considering the effect of acute variety of the fluid property on heat transfer, the correlation of heat transfer coefficient on the top of the inclined upward internally ribbed tube have been provided.

KEY WORDS: Thermal power engineering; Heat transfer; Supercritical pressure boiler; Internally ribbed tube; Departure from nucleate boiling

摘要: 在压力 9~28MPa, 质量流速 600~1200kg/(m²s), 内壁热负荷 200~500kW/m² 的工况范围内, 研究了 $F_{38.1 \times 7.5\text{mm}}$ 倾斜上升内螺纹管 (倾角 $\alpha=19.5^\circ$) 中水的传热特性。试验结果表明: 在亚临界压力区, 内螺纹管传热强化作用明显, 有效地抑制了膜态沸腾的发生, 但在近临界压力区此传热强化作用有所减弱。超临界压力区拟临界温度附近, 内螺纹管内壁面与流体之间的温差较之前有所增加, 但是此增幅远没有亚临界压力区发生传热后的壁温飞升幅度大。随着系统压力接近临界压力, 拟临界点附近管壁与工质的温差显著增加。在超临界压力区, 不同的质量流速与热负荷比例下, 在大比热区内螺纹管内流体传热可能被强化也可能被恶化。在超临界压力下, 由于螺旋内槽的旋流作用减弱了自然对流的影响, 倾斜上升内螺纹管内壁温度的周向分布比较均匀。在高焓值区内螺纹管的周向最大温差只有 10℃左右。文中提出了在考虑大比热区工质物性剧烈变化对传热影响的情况下, 倾斜上升内螺纹管顶部内壁传热系数的试验关联式。

关键词: 热动力工程; 传热; 超临界锅炉; 内螺纹管; 膜态沸腾

1 引言

由于超临界变压运行直流锅炉具有循环热效率高、排污率低、机组热经济性好以及蒸汽工况良

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50323001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50323001).

好等诸多优点，已经成为了当今国内外火力发电的主力机组。国内各大锅炉厂和研究机构也都加大了对超临界变压运行直流锅炉研发工作的投入。2000年4月，河南华能沁北电厂2×600MW工程已被作为600MW超临界火电机组设备国产化项目的依托工程。

针对超临界变压运行直流锅炉传热方面的研发工作，不但需要进一步探讨炉膛侧的传热情况^[1-2]，还需要深入研究其水冷壁管变压运行时，在较大范围工况内的传热特性。国外对于超临界流体的传热在上世纪五、六十年代就进行了研究^[3-7]。相隔30多年，从上世纪末至今，由于超临界锅炉及超临界反应堆发展的需要，超临界流体的传热又重新被研究者所重视^[8-9]。国内对于超临界流体传热也已开展了广泛研究。西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室对于垂直光管^[10]、垂直螺旋管^[11-12]以及倾斜光管^[13]内流体在超临界压力下的传热特性均进行了研究。此外，国内还对超临界机组的蒸汽发生器^[14-15]开展了一些计算机模拟的研究。

但是，针对类似于华能沁北电厂锅炉机组中所采用的内螺旋管螺旋管圈水冷壁内流体传热特性

的研究，国内、外还都非常少。因此，本文采用沁北电厂锅炉水冷壁的实际管型，即直径 $F38.1 \times 7.5\text{mm}$ 、水平夹角 19.5° 的六头内螺旋管，从亚临界到超临界较宽的工况范围内进行传热试验研究，目的是为超临界变压运行直流锅炉水冷壁的设计提供参考依据。

2 超临界变压运行锅炉及其水冷壁简介

华能沁北电厂的锅炉机组是由东方锅炉（集团）股份有限公司与日本日立—巴布科克公司联合设计的600MW超临界复合变压运行本生直流炉。锅炉运行工况如表1所示。

炉膛水冷壁分为上下两个部分，下部水冷壁采用螺旋盘绕水冷壁，上部水冷壁采用垂直水冷壁，适于变压运行及锅炉调峰。水冷壁全为膜式结构，并采用微负压炉膛设计，炉内烟气不泄漏；下部螺旋盘绕水冷壁管全部采用内螺旋管，可防止水循环不稳定现象的发生，降低最低质量流速，减小水冷壁流动阻力，可得到更低的最小直流负荷。水冷壁结构参数如表2所示。

表 1 锅炉运行工况参数

Tab. 1 Working parameter of boiler

参 数	数 值								
负荷率/%	B-MCR	THA	TRL	切高加	75%	60%	50%	45%	启动
连续蒸发量/t/h	1900	1660.8	1807.9	1470.2	1425	1140	950	855	475
过热蒸气出口压力/MPa	25.4	25.1	25.3	24.9	22.8	18.4	15.4	13.7	8.4
过热蒸气出口温度/℃	571	571	571	571	571	571	571	571	—
再热蒸气流量/t/h	1607.6	1414.1	1525.5	1447.6	1225.6	994.2	836.4	756.5	—
再热蒸气进口压力/MPa	4.61	4.05	4.37	4.14	3.49	2.81	2.35	2.11	—
再热蒸气出口压力/MPa	4.42	3.88	4.19	3.97	3.34	2.69	2.25	2.02	—
再热器出口温度/℃	569	569	569	569	569	569	569	562	—
省煤器进口给水温度/℃	284	275	280	189	266	253	242	236	—
省煤器出口给水温度/℃	321	315	317	296	312	289	271	265	—

表 2 水冷壁结构参数

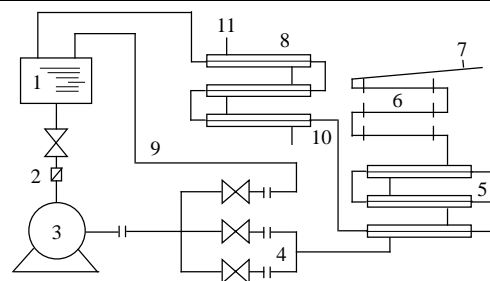
Tab. 2 Water wall structural parameter

水冷壁布置型式	管型	材质	外径×壁厚/mm	管距/mm	根数	螺旋管圈与水平倾角/圈数	受热面积/m ²
螺旋管圈	内螺旋管	SA-213T2	$F38.1 \times 7.5$	50.8	456	$19.5^\circ/1.8$	4550
垂直管圈	光管	SA-213T2	$F31.8 \times 8.2$	50.8	988	—	1720

3 试验系统装置及试验方法

试验装置采用电加热的方式，直接在内螺旋管壁上通以低电压、大电流，凭借管子本身的电阻所产生的热量来加热管内工质。试验在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室的高压汽水两相流及传热实验台上完成。试验回路系统如图1所示。

试验段采用直径 $F38.1 \times 7.5\text{mm}$ ，长度2000mm，水平夹角 19.5° 倾斜上升的SA-213T2六头内螺旋管。内螺旋管的结构参数见表3。试验工质采用由



1-水箱；2-滤网；3-高压柱塞泵；4-孔板流量计；5-换热器；6-预热段；7-试验段；8-冷却器；9-旁路；10-冷却水入口；11-冷却水出口

图 1 试验回路系统图

Fig. 1 Schematic diagram of the test loop

离子交换法处理过的硬度为0、电导率小于 $0.5\mu\text{s}/\text{cm}$ 的去离子水,以保证受热管壁面不结垢、不腐蚀。

表3 内螺纹管参数

标记	名称	尺寸	公差
OD	外径/mm	38.1	± 0.15
ID	大内径/mm	23.23	± 0.15
MID	最小内径/mm	20.49	0
T	壁厚/mm	7.5	$\pm 10\%$
L	导程/mm	126.37	± 19.05
P	螺距/mm	21.06	± 3.17
H	螺纹高度/mm	0.99	± 0.17
TW	螺纹宽度/mm	5.59	± 1.27
a	螺纹角度	50°	$\pm 15^\circ$
	螺纹头数	6	
	上升角/ $^\circ$	60	

工质流量由锐边孔板和 ST3000/S900 智能差压变送器测量,试验前对孔板进行了称重法标定。工质质量流量的不确定度为 $\pm 6\%$ 。试验段的压力采用 ST3000/S900 智能压力变送器(装在试验段出口处)进行测量。试验压力的测量不确定度为 $\pm 4\%$ 。试验段及预热段的电加热功率均由试验测得的电压和电流有效值计算而得。电加热功率的试验不确定度为 $\pm 5\%$ 。工质温度由布置在9个位置的 $F3\text{mm}$ 镍铬-镍硅热电偶测得。试验段的外壁面温度由布置在15个截面上的 $F0.5\text{mm}$ 镍铬-镍硅热电偶测得。温度测量的不确定度为 $\pm 0.7\%$ 。试验中的所有测量数据均由英国 Schlumberger 公司生产的 Solarton IMP3595 分散式采集系统自动采集,并且输入工控机内进行处理。试验主要参数:试验压力 $p=9\sim 28\text{MPa}$,质量流速 $G=600\sim 1200\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,内壁热负荷 $q=200\sim 600\text{kW}/\text{m}^2$ 。

试验段外壁热流密度由热平衡算得。计算内壁温度和内壁热流密度时,其内壁面的边界条件既非定热流,也非定壁温,而是由流体换热和管壁导热耦合决定的二维温度场的导热反问题。

4 试验结果及分析

4.1 亚临界压力区传热

当超临界变压运行直流锅炉启动或在较低负荷下运行时,水冷壁会在亚临界压力下运行,因此可能发生膜态沸腾(DNB),导致管壁金属超温爆管。所以,对于超临界变压运行直流锅炉水冷壁中工质在亚临界压力区传热特性的研究是非常必要的。

图2表示质量流速 $G=600\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、压力 $p=21\text{MPa}$ 时,热负荷对倾斜上升内螺纹管顶点内壁温度分布的影响曲线。图3为质量流速 $G=600\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、压力

$p=16\text{MPa}$ 时热负荷对倾斜上升内螺纹管顶点内壁温度分布的影响曲线。图中 t_{wi} 为内壁温度; H 为工质焓值。从两图中均可以发现,随热负荷增加,倾斜上升内螺纹管发生传热恶化的干度值减小。

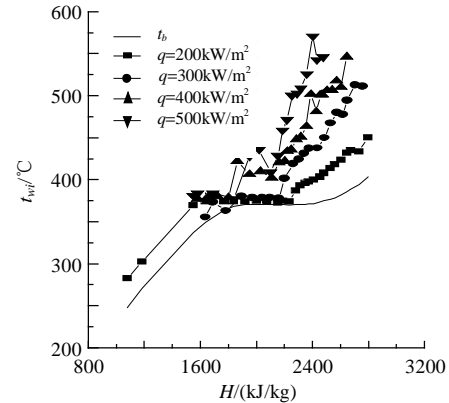


图2 $G=600\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $p=21\text{MPa}$ 热负荷对内壁温度的影响
Fig. 2 Effect of heat flux on internal wall temperature at $G=600\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $p=21\text{MPa}$

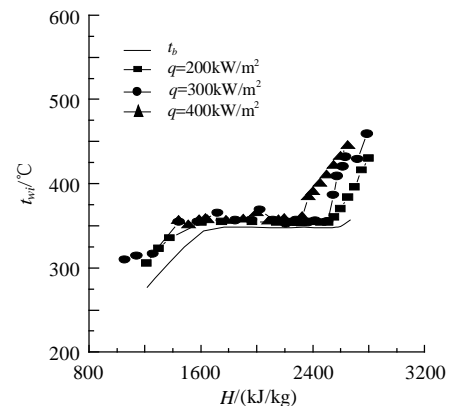


图3 $G=600\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $p=16\text{MPa}$ 热负荷对内壁温度的影响
Fig. 3 Effect of heat flux on internal wall temperature at $G=600\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $p=16\text{MPa}$

比较图2与图3可发现,在临界压力附近,热负荷对内螺纹管传热恶化的影响更为剧烈,随热负荷增加,内螺纹管发生传热恶化的起始蒸汽干度值减小很快,甚至会在过冷状态时就发生壁温飞升现象。同时发现,在热负荷较高的两个工况下($q=400\text{kW}/\text{m}^2$ 和 $q=500\text{kW}/\text{m}^2$),可以观察到两次壁温飞升的现象,而在热负荷较低的两个工况下($q=200\text{kW}/\text{m}^2$ 和 $q=300\text{kW}/\text{m}^2$),只观察到一次壁温飞升,并且壁温开始飞升的蒸汽干度值较大。在压力 $p=16\text{MPa}$ 时,即使在热负荷较高的工况下($q=400\text{kW}/\text{m}^2$)也没有观察到两次壁温飞升的现象,只是在其壁温飞升的起始蒸汽干度值较低的热负荷下有所减小而已,而且其减小的幅度也远不及临界压力附近大。

以上现象不但说明热负荷的升高加快了内螺

纹管内壁面附近液体的蒸发, 以致使传热恶化的发生提前, 而且还说明了在不同压力区, 热负荷对内螺纹管传热的影响是不同的。在临界压力附近, 当热负荷比较高时, 由于汽液密度差减小, 内螺纹旋流离心力作用减小, 内螺纹管内壁附近的液体会很快被蒸干, 以致发生了第一次壁温飞升, 但随着工质汽相速率增加, 内螺纹管内壁附近的传热情况又有所改善, 壁温开始下降, 可是很快由于液体干涸的影响, 又发生了第二次壁温飞升。然而, 在临界压力区热负荷较低或者亚临界压力的工况条件下, 在较低蒸汽干度时内螺纹管的传热强化作用使其内壁面保证很好的冷却, 因而不会发生壁温飞升现象, 只有在较高蒸汽干度时, 由于液体干涸的影响才会发生壁温飞升现象, 当然热负荷越高, 内螺纹管壁温飞升发生的相对也越早。

4.2 超临界压力区传热

图 4 为压力 $p=23\text{MPa}$ 时倾斜上升内螺纹管顶点内壁温度分布特性曲线。图 5 为压力 $p=25\text{MPa}$ 时倾斜上升内螺纹管顶点内壁温度分布特性曲线。

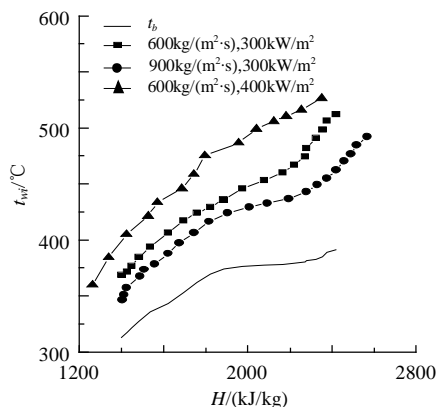


图 4 超临界压力下内螺纹管内壁温度分布特性 ($p=23\text{MPa}$)
Fig. 4 Internal wall temperature characteristics of internally ribbed tube at supercritical pressure ($p=23\text{MPa}$)

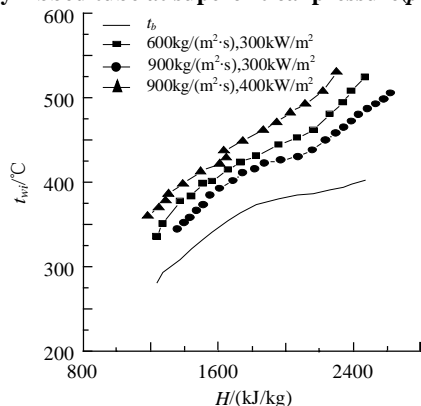


图 5 超临界压力下内螺纹管内壁温度特性 ($p=25\text{MPa}$)
Fig. 5 Internal wall temperature characteristics of internally ribbed tube at supercritical pressure ($p=25\text{MPa}$)

与亚临界压力区类似, 质量流速的提高可以强化传热; 而热负荷的提高则恰恰有着相反的影响。在拟临界温度附近, 内螺纹管内壁面与流体之间的温差较之前有所增加, 但是此增幅远没有亚临界压力区发生传热后的壁温飞升幅度大。总体来讲, 超临界压力区的传热要好于近临界压力区。由此可见, 当超临界锅炉水冷壁在超临界压力区工作的时候, 其传热工况良好。

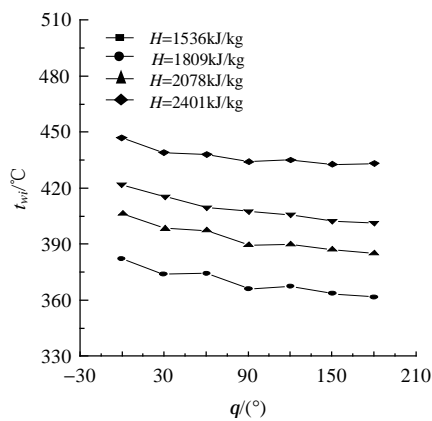
比较图 4 与图 5 可见, 在其他工况条件相同的情况下, 低于拟临界温度时, 压力 $p=25\text{MPa}$ 下倾斜上升内螺纹管内壁顶点与管内工质之间的温差较压力 $p=23\text{MPa}$ 时的相应值差别不大; 但达到或超过拟临界温度后, 前者较后者明显要小一些。这说明在超临界压力区, 越接近临界压力时管内流体的传热就越要差一些。这个现象可以用超临界流体在大比热区物性随温度的剧烈变化来解释。管内流体是通过管壁吸收热量的, 管内主流的焓增主要是通过径向导热以及对流换热来实现的, 因而管壁附近的流体温度要高于主流温度。当主流温度低于拟临界温度时, 随工质焓值的增加, 其比热逐渐升高到峰值, 使流体吸热能力增强, 同时近壁面流体湍流脉动增加, 这些变化强化了管内流体与管内壁面之间的换热。当主流温度达到、进而超过拟临界温度后, 工质比热的急剧下降, 使流体与管内壁的传热系数减小, 从而管壁与流体之间的温差增大。这种情况下当系统压力越接近临界压力, 工质物性随温度变化就越为剧烈, 拟临界点后管壁与流体之间的温差也就会越大。

同时, 从图 4 中还可以观察到, 在质量流速 $G=600\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、热负荷 $q=400\text{kW}/\text{m}^2$ 时, 倾斜上升内螺纹管顶点内壁温度在拟临界点附近有着明显的升高。这说明此时大比热区内工质物性的剧烈变化对内螺纹管内流体传热有着不良的影响。当质量流速 $G=900\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、热负荷 $q=300\text{kW}/\text{m}^2$ 时, 在拟临界点附近, 内螺纹管顶点内壁温度与工质温度相差较小, 说明此时大比热区内工质物性的剧烈变化对内螺纹管内流体传热起到了强化的作用。以上现象表明, 在超临界压力区, 不同的质量流速与热负荷比例下, 在大比热区内螺纹管内流体传热可能被强化也可能被恶化。

4.3 超临界压力区周向传热

整理试验数据, 绘制压力 $p=23\text{MPa}$ 、质量流速 $G=600\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、热负荷 $q=300\text{kW}/\text{m}^2$ 工况条件下,

倾斜上升内螺纹管内壁温度周向分布曲线如图6所示。本文中定义倾斜上升内螺纹管顶点为 $q=0^\circ$ 处；其底点为 $q=180^\circ$ 处。从图中可以看出，在超临界压力下，倾斜上升内螺纹管内壁温度的周向分布比较均匀。管内流体焓值愈高，管壁周向温度愈趋于均匀。在低焓值区（ $H<2000\text{kJ/kg}$ ），内螺纹管的周向温差在 20°C 左右；到了高焓值区（ $H>2000\text{kJ/kg}$ ），内螺纹管的周向最大温差仅有 10°C 左右。这主要是由于当管内流体温度超过拟临界温度时，管内流体比容的升高，使主流速率增大，从而减弱了自然对流的影响。



注： $p=23\text{MPa}$ ； $G=600\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ； $q=300\text{kW}/\text{m}^2$

图6 超临界压力区内螺纹管内壁温度周向分布

Fig. 6 Internal wall temperature along circumference of internally ribbed tube at supercritical pressure

超临界压力区倾斜上升管内壁温度周向分布不均主要是由于自然对流的影响。倾斜上升管中自然对流方向与主流方向存在夹角，倾斜管与水平面的夹角为 q ，那么自然对流沿主流方向的分量为总量的 $\sin q$ 倍，而其垂直于主流方向的分量为总量的 $\cos q$ 倍。对于本文所研究的微倾斜管（ $q<20^\circ$ ），自然对流垂直于主流方向的分量远大于其沿主流方向的分量。此时，内壁底点容易被冷流体所补充，所以内壁底点的温度变化不大。而管壁顶部附近不易被冷流体所冷却，而且此时自然对流的影响可能会使管壁顶部附近流体发生脱体流动，更增大了顶部内壁面与主流体之间的热阻，使顶部内壁面与主流体之间的温差加大。在内螺纹管中，由于其螺纹内槽的旋流作用使自然对流的影响大大减小，因此管壁温度周向分布也更为均匀。这也说明在超临界压力区内螺纹管不但可以有效降低管壁温度水平，也可以有效控制倾斜上升管周向壁温分布的不均匀程度，减小管壁周向应力的影响。

根据以上分析，在不同焓值区，倾斜上升内螺

纹管内壁周向温度分布比较均匀，而且其周向最大温差在 20°C 以内，因此可以采用倾斜上升内螺纹管顶部内壁与工质之间的传热系数作为整个管壁与工质之间的传热系数，这样是可靠且安全可行的。参考过去对超临界流体传热的研究成果，在本文中考虑到大比热区工质物性剧烈变化对传热的影响，拟合试验数据，得到如下倾斜上升内螺纹管顶部内壁与工质之间传热系数的试验关联式。

$$Nu_b = 0.0198 Re_b^{0.783} Pr_b^{0.022} \left(\frac{r_w}{r_b}\right)^{-0.106} \left(\frac{l_w}{l_b}\right)^{0.918} \quad (1)$$

式中 下标 b 为流体参数；下标 w 为管壁参数； Nu_b 数和 Re_b 数的特征长度均为管子平均内径；上式与试验数据之间的均方根误差为10.4%。上式的适用范围为：压力 $p=23\sim 28\text{MPa}$ ，质量流速 $G=600\sim 1200\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ，热负荷为 $q=200\sim 500\text{kW}/\text{m}^2$ 。

5 结论

(1) 在亚临界压力区，内螺纹管传热强化作用明显，有效地抑制了膜态沸腾的发生，但在近临界压力区此传热强化作用有所减弱。超临界锅炉滑压运行时，要特别注意避开近临界压力区。

(2) 在超临界压力区拟临界温度附近，内螺纹管内壁面与流体之间的温差较之前有所增加，但是此增幅远没有亚临界压力区发生传热后的壁温飞升幅度大。总体来讲，超临界压力区的传热要好于近临界压力区。随着接近临界压力，拟临界点后管壁与工质的温差显著增加。在超临界压力区，不同的质量流速与热负荷比例下，在大比热区内螺纹管内流体传热可能被强化也可能被恶化。

(3) 在超临界压力下，由于螺旋内槽的旋流作用减弱了自然对流的影响，倾斜上升内螺纹管内壁温度的周向分布比较均匀。在高焓值区（ $H>2000\text{kJ/kg}$ ），内螺纹管的周向最大温差只 10°C 左右。

(4) 考虑了大比热区工质物性剧烈变化对传热的影响，提出了倾斜上升内螺纹管顶部内壁与工质之间的传热系数试验关联式。

参考文献

- [1] 韩小海, 赵宗让, 章明川. 电站锅炉炉膛传热过程数学模型及模拟计算[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 18-22.
Han Xiaohai, Zhao Zongrang, Zhang Mingchuan. Application study on the combustion technology by counter-offsetting primary air and coal streams for tangentially-fired boilers[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(1): 18-22.

- [2] 张腾飞, 罗锐, 冯文, 等. 炉膛辐射传热数学模型及其仿真[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 215-219.
Zhang Tengfei, Luo Rui, Feng Wen *et al.* A model and simulation for radiative heat transfer in a boiler furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 215-219.
- [3] Goldmann K. Heat transfer to supercritical water at 5000 psi flowing at high mass flow rates through round tubes[C]. International Developments in Heat Transfer, Part III, ASME, 1961: 561-568.
- [4] Swenson H S, Carver J R, Kakarala C R. Heat transfer to supercritical water in smooth-bore tubes[J]. Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, Series C, 1965, 87(4): 477-484.
- [5] Acherman J W. Pseudoboiling heat transfer to supercritical pressure water in smooth and ribbed tubes[J]. Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, 1970, 92(4): 490-498.
- [6] Vikrev Yu V, Lokshin V A. An experimental study of temperature conditions in horizontal steam generator tubes at supercritical pressure[J]. Thermal Engineering, 1964, 11(1): 105-109.
- [7] Shiralkar B S, Griffith P. Deterioration in heat transfer to fluids at supercritical pressure and high heat fluxes[J]. ASME, J Heat Transfer, 1969, 91(1): 27-36.
- [8] Igor L. Pioro, Hussan F, Khartabil *et al.* Heat transfer to supercritical fluids flowing in channels-empirical correlations (survey)[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 230(1): 69-91.
- [9] Liao S M, Zhao T S. An experimental investigation of convection heat transfer to supercritical carbon dioxide in miniature tubes[J]. Int. J. Heat and Mass Transfer, 2002, 45(25): 5025-5034.
- [10] 孙丹, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 垂直上升光管内临界压力区水的传热特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(1): 10-14.
Sun Dan, Chen Tingkuan, Luo Yushan *et al.* Research on the heat transfer performance of water in vertical upward smooth tube under near critical pressure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(1): 10-14.
- [11] 郑建学, 陈听宽, 陈学俊, 等. 600MW 变压运行直流锅炉水冷壁内螺旋管内壁换热特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 271-275.
Zheng Jianxue, Chen Tingkuan, Chen Xuejun *et al.* Investigation on internal surface heat transfer in internally ribbed tubes of sliding-pressure operation one-through boiler's water wall [J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4): 271-275.
- [12] 孙丹, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 内螺旋管临界压力区内水的传热特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(3): 234-238.
Sun Dan, Chen Tingkuan, Luo Yushan *et al.* Water heat transfer characteristics of internally ribbed tube in the near critical pressure region[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(3): 234-238.
- [13] 陈听宽, 罗毓珊, 胡志宏, 等. 超临界锅炉螺旋管圈水冷壁传热特性的研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 247-250.
Tingkuan, Luo Yushan, Hu Zhihong *et al.* Investigation on the heat transfer characteristics of supercritical pressure boiler spirally water wall tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2): 247-250.
- [14] 范永胜, 徐治皋, 陈来九. 超临界直流锅炉蒸汽发生器的建模与仿真(一)[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4): 246-253.
Fan Yongsheng, Xu Zhigao, Chen Laijiu. Modeling and simulation study on a supercritical once-through boiler steam generator[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(4): 246-253.
- [15] 范永胜, 徐治皋, 陈来九. 超临界直流锅炉蒸汽发生器的建模与仿真(二)[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(5): 350-356.
Fan Yongsheng, Xu Zhigao, Chen Laijiu. Modeling and simulation study on a supercritical once-through boiler steam generator[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(5): 350-356.

收稿日期: 2005-05-20。

作者简介:

唐人虎(1974-), 男, 博士研究生, 从事汽液两相流与传热方面的研究;

尹飞(1976-), 男, 博士研究生, 从事汽液两相流与传热方面的研究;

陈听宽(1935-), 男, 教授, 博士生导师, 从事汽液两相流与传热、热能工程的研究。