

内螺纹管近临界压力区两相流 沸腾传热特性的研究

陈听宽 陈宣政 陈学俊 庄文贤 丁惠民
(西安交通大学) (上海锅炉厂)

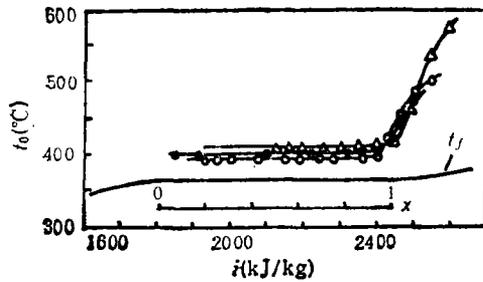
一、试验装置与方法 锅炉水冷壁管采用内螺纹管结构是锅炉中防止传热恶化的主要措施之一。目前国内外有关内螺纹管在近临界压力区汽水两相流沸腾传热特性方面的研究资料还甚少。为了加速我国 300MW 直流锅炉的完善化,并考虑炉膛水冷壁将在近临界压力条件下工作,因此作者在西安交通大学高压汽水两相流试验装置上对这一课题进行了试验研究工作。试验用内螺纹管为我国 300MW 直流锅炉实际采用的 $\phi 22 \times 5.5\text{mm}$ 四头碳钢内螺纹管。用充水法确定其平均内径为 11.69mm, 螺距高度为 0.58mm, 螺距宽度 5.38mm, 间距 10.04mm, 导程为 40.16mm, 螺距升角 49.3° 。试验段加热长度为 4544mm, 垂直向上布置,沿管子两侧共布置 36 对 $\phi 0.2\text{mm}$ 镍铬-镍硅热电偶,用来测量管子外壁温度。试验压力为 19.6、20.6、21.1、21.6、22.1 及 22.6MPa, 质量流速 $650-1750\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 按平均内径计算的内壁热负荷为 $200-610\text{kW}/\text{m}^2$ 。

试验是在一定压力、流量和热负荷条件下,逐步增加预热段功率,直到试验管壁温发生飞升,在足够宽的蒸汽干度范围内测定受热管的壁温分布,从而得出内螺纹管在不同参数条件下的传热特性。

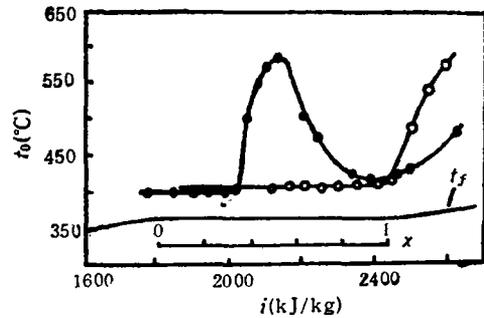
二、试验结果及讨论 在不同质量流速和热负荷条件下, $p = 19.6\text{MPa}$ 时内螺纹管的壁温变化特性如图 1 所示。随着蒸汽干度的增加,管壁温度一直维持在略高于流体温度的水平上,直到蒸汽干度接近于 1.0 时,才出现由于液膜蒸干而引起的壁温升高。在图 1 所示的参数范围内,质量流速和热负荷对传热特性的影响不大。图 2 示出 $p = 19.6\text{MPa}$ 时内螺纹管壁温特性与光管的比较。可见,内螺纹管能十分有效地消除由于膜态沸腾所引起的传热恶化。图 3 表示 $p = 21.1\text{MPa}$ 时不同质量流速和热负荷条件下内螺纹管的壁温特性。在此近临界压力条件下,在相当宽的蒸汽干度范围内,管内流体仍能维持核态沸腾。当蒸汽干度超过某临界值时,壁温开始飞升。如与 $p = 19.6\text{MPa}$ 比较,发生传热恶化的蒸汽干度减小,即传热恶化提前。随热负荷增加,传热恶化提前,壁温飞升峰值增大。图 4 示出 $p = 21.1\text{MPa}$ 时,内螺纹管与光管壁温特性的比较。由图可见,低干度区,内螺纹管仍有抑制传热恶化的优点,但到一定含汽率以后,内螺纹管出现传热恶化,其壁温值高于光管。

图 5 示出不同压力条件下内螺纹管的壁温特性。随着压力接近临界压力,内螺纹管的传热特性有变坏的趋势,其抑制传热恶化的能力有所降低。当达到临界压力时,其传热

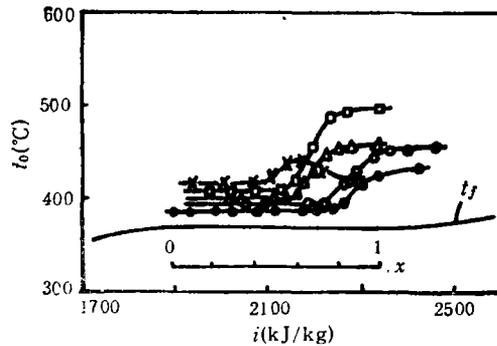
本文曾于 1988 年 11 月在上海召开的中国工程热物理学会第六届年会上宣读。



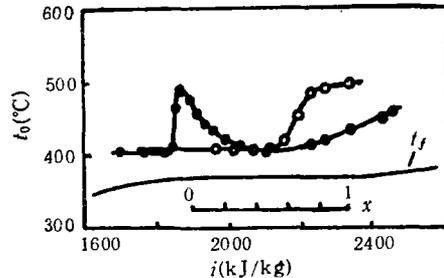
- $G = 1100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 360 \text{ kW/m}^2$;
- △ $G = 1100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 510 \text{ kW/m}^2$;
- $G = 820 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 320 \text{ kW/m}^2$.

图1 $p = 19.6 \text{ MPa}$ 时内螺纹管的壁温特性

- 内螺纹管 $G = 1100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 510 \text{ kW/m}^2$;
- 光管 $G = 1200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 495 \text{ kW/m}^2$.

图2 $p = 19.6 \text{ MPa}$ 时内螺纹管与光管壁温特性的比较

- $G = 650 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 200 \text{ kW/m}^2$;
- $G = 820 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 280 \text{ kW/m}^2$;
- △ $G = 1450 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 340 \text{ kW/m}^2$;
- $G = 1450 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 500 \text{ kW/m}^2$;
- × $G = 1750 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 610 \text{ kW/m}^2$.

图3 $p = 21.1 \text{ MPa}$ 时内螺纹管的壁温特性

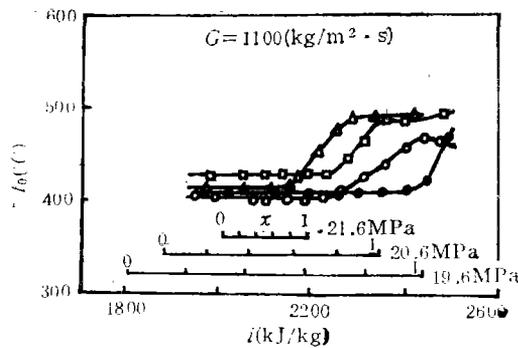
- 内螺纹管 $G = 1450 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 500 \text{ kW/m}^2$;
- △ 光管 $G = 1500 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q_i = 480 \text{ kW/m}^2$.

图4 $p = 21.1 \text{ MPa}$ 时内螺纹管与光管壁温特性的比较

特性又得到改善。根据试验结果,在临界压力以上时,内螺纹管与光管的壁温变化相近,均有较好的传热特性。在近临界压力区 $p = 20.6 \sim 22.0 \text{ MPa}$,内螺纹管与光管一样,较易发生传热恶化,在设计工作中应给以特别注意。

日本三菱公司 Iwabuchi 等^[1]和联邦德国 KWU 的 Köhler 等^[2]也对近临界压力区内螺纹管的传热特性进行了试验研究。根据 Iwabuchi 等的试验结果,他们采用的四头内螺纹管在 $p > 20.6 \text{ MPa}$ 的近临界压力区抑制传热恶化的能力迅速丧失,例如当 $p = 21.6 \text{ MPa}$ 、 $q_i = 470 \text{ kW/m}^2$ 、 $G = 1000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 时,在过冷区 $x = -0.2$ 的条件下就发生传热恶化。Köhler 等认为,内螺纹管抑制传热恶化的效果与其结构有关,内螺纹的旋流作用愈大,则效果愈好。他们用离心加速度与重力加速度之比这个无因次数来反映内螺纹结构参数对传热的影响。由于 Köhler 等所用内螺纹管的这个无因次数大于 Iwabuchi 等的管子,因而效果较好。

根据上海锅炉厂研究所^[3]的试验结果,内螺纹管的传热特性还与螺纹高度有关。螺纹高度不足,抑制传热恶化的效果将显著降低。因此可用无因次数 $N = \delta / (d_i \text{tg} \alpha)$ 来



$G = 1100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$;

● $p = 19.6 \text{ MPa}$, $q_i = 510 \text{ kW/m}^2$;

○ $p = 20.6 \text{ MPa}$, $q_i = 430 \text{ kW/m}^2$;

△ $p = 21.6 \text{ MPa}$, $q_i = 420 \text{ kW/m}^2$;

□ $p = 22.1 \text{ MPa}$, $q_i = 430 \text{ kW/m}^2$.

图5 不同压力下内螺纹管的壁温特性

反映内螺纹管的结构对传热特性的影响。其中 δ 为螺纹高度, d_i 为管内径, α 为螺纹升角。经核算, 本试验所用内螺纹管 N 值最大, Köhler 等的管子次之, Iwabuchi 等的管子 N 值最小。从上述分析可见, 我国 300MW 直流锅炉所用内螺纹管的结构较好, 因而具有较好的传热特性。

三、结论 根据试验结果可得出如下结论: 在 $p < 20.6 \text{ MPa}$ 条件下, 内螺纹管能有效地抑制传热恶化的发生, 在两相区内未发生明显的壁温飞升。在 $p > 20.6 \text{ MPa}$ 的近临界压力区, 内螺纹管的传热特性变差, 抑制传热恶化的能力下降。内螺纹管的结构对其传热特性

有显著影响, 采用具有更大旋流作用的内螺纹结构, 可进一步改善其传热特性。当压力达到或超过临界压力时, 内螺纹管与光管的传热特性相类似, 均具有较好的传热特性。

参 考 文 献

- [1] Iwabuchi, M., et al.: "Heat Transfer Characteristics of Rifled Tubes in the Near Critical Pressure-Region", Proc. 7th. Int. Heat Transfer conf., Munich, 5, (1982), pp. 313—318.
- [2] Köhler, W., et al.: "Heat Transfer and Pressure Loss in Rifled Tubes", Proc. 8th. Int. Heat Transfer Conf., San Francisco, 5, (1986), pp. 2861—2865.
- [3] 上海锅炉厂锅炉所: "亚临界压力直流锅炉锅内传热特性的试验研究", 锅炉技术, 9, (1976), pp. 16—33.

INVESTIGATION ON BOILING HEAT TRANSFER OF INTERNALLY RIBBED TUBES IN NEAR CRITICAL PRESSURE REGION

Chen Tingkuan Chen Xuanzheng Chen Xuejun Zhuang Wenxian Ding Huimin

(Xi'an Jiaotong University)

(Shanghai Boiler Works)

Abstract

This paper describes the experimental results on the boiling heat transfer characteristics of internally ribbed tubes in near critical pressure region. The experimental parameters range as follows: pressure $p = 19.6\text{--}22.6 \text{ MPa}$, mass velocity $G = 650\text{--}1750 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, heat flux of the inside wall $q_i = 200\text{--}610 \text{ kW/m}^2$. The outside wall temperature profile in the abovementioned parameter ranges is obtained, the effect of eliminating boiling heat transfer deterioration by using internally ribbed tubes is determined, and the heat transfer characteristics of three types of internally ribbed tubes of similar geometry are compared and evaluated.