

微钢管轴向导热对对流换热的影响

刘志刚¹, 赵耀华²

(1. 山东省科学院 能源研究所, 济南 250014; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022)

摘 要:以氮气为工质, 流过内径为 168 μm 、外径 406 μm 微钢管, 采用直接通电法进行加热, 并使用红外成像仪加红外专用放大镜头测量了在恒定的流量下、不同加热功率以及相同加热功率、不同流量下的微钢管壁面的温度场, 获得精确的微管外壁温度分布, 同时测量了氮气的进出口温度和流量。根据实验结果分析了微管轴向导热对管内部对流换热的影响。研究表明, 在氮气为工质下, 微钢管轴向导热导致内部换热的减弱, 减少量超过总对流换热量的 2%。

关键词:微管; 轴向导热; 对流; 热; 红外成像仪; 温度场

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2006)12-1125-05

微细通道内部的换热一直是近年来的研究热点, 许多实验研究表明^[1-4], 相对于常规通道内部换热, 微细通道内部的换热得到明显加强。研究人员希望获得微细通道内部对流换热强化机理, 以便更好地应用于超高热流的冷却、MEMS(微机械)、生物工程、制药及航天系统等方面。

许多微尺度研究^[5]表明, 众多微尺度效应会影响到微细通道内的传热。由于尺度关系, 有的微尺度效应在定性尺寸到微米量级甚至纳米量级时, 作用才明显^[6], 而有的在毫米量级时就会起作用^[7]。有些微尺度的效应可能会增强内部对流换热, 有的可能会减弱内部的换热效果^[8]。文献[8]认为在常规尺寸下, 沿壁面的轴向热传导被忽略是因为相对于槽或管的水力直径来说, 其壁厚可以被忽略, 而在微尺度下, 微管或微槽的壁厚与水力直径在同一数量级甚至比水力直径还要大, 因此轴向导热必然会影响到微管或微槽内部的对流与换热。

到目前为止, 还没有可靠的实验数据来验证以上的定性分析。主要原因是微尺度实验中温度测量的误差较高, 而且传统测量方式很难得到准确的温度分布场。常规测量方法如使用热电偶或热电阻不能准确测量到微管内部由黏性耗散引起的温升, 原因 1) 微管直径很小, 测头与微管直径在同一量级甚至比微管直径还大, 当测头与微管接触时, 产生肋片现象将破坏原来的温度场; 2) 测头不可能与微管充分接触。为了避免上述测量的缺点, 作者采用非接触式温度测量方法——红外成像方法来测量微钢管壁面温度场, 精确测量了微钢管的壁面温度场分布, 并根据实验结果定量分析了轴向导热对管内部对流换热的影响。

1 实验台装置

实验台采用高压氮气作为压力源, 气瓶装有氧气减压阀。氮气经过氧气减压阀后与供压系统相连。供压系统由快开阀、气态过滤器、精密调压阀及储气罐等组成。精密调压阀能准确调节实验所需的压力, 储气罐能使氮气的流动更加平稳因而能提供更加稳定的压力, 过滤器是为了过滤氮气中的颗粒杂质, 供压系统能提供 0~1.1 MPa 的压力。

实验段进出口处采用聚氨酯软管与供压系统相连, 如图 1 所示。实验段进出口处的聚氨酯软管内插入 K 型热电偶, 用于测量进出口氮气温度; 压力传感器用于测量进出口的压力值。流量测量采用浮子流量计, 当微管进出口端的温度不随时间变化时, 直接从流量计读出氮气的流量。

收稿日期: 2005-10-11.

作者简介: 刘志刚(1973-), 男, 江苏江都市人, 副研究员。

万方数据

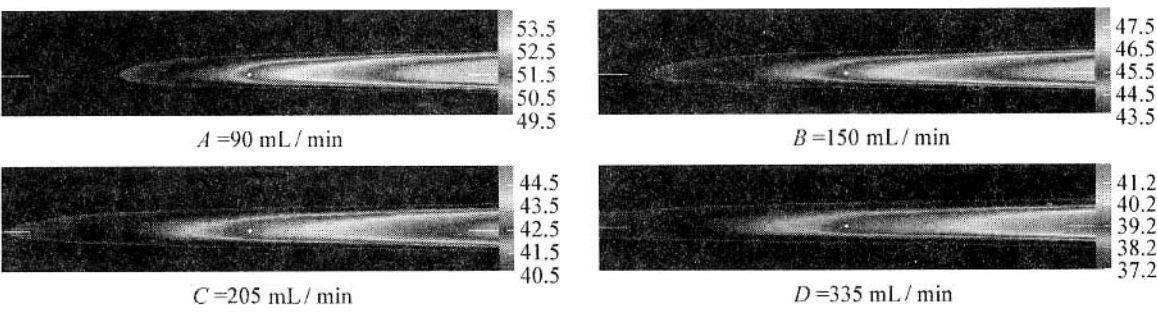


图 3 加热功率为 2.41 W 时 不同流量下的钢管壁面轴向温度分布

Fig. 3 Axial surface temperature distribution photos on the micro steel tube at 2.41 W and different flux

$$Q_1 = -\lambda F \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{1}$$

式中 Q_1 为轴向导热量(W); λ 为导热系数($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)实验钢管材质为 0.5% 的碳钢 $\lambda = 49.6 W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$; F 为钢管的截面积(m^2).

令 $Q_1/Q_2 = A$. 根据式 (1),计算得到 A 与加热功率及流量的关系如图 5 所示.

取进出口平均温度与压力作为计算氮气密度及定压比热容的温度和压力值 ,可计算得到管内部的对流换热量的数值. 对流换热量 Q_2 与加热功率及流量的关系如图 6 所示.

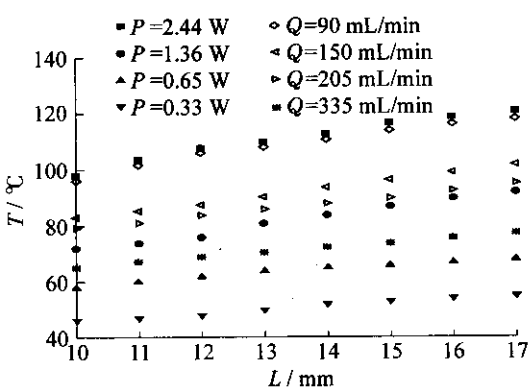


图 4 沿管轴向的温度分布

Fig. 4 Surface temperature distribution along axial microtube wall

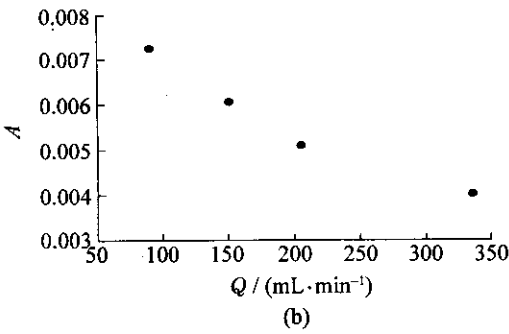
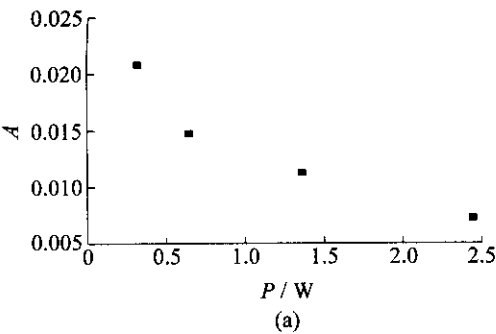


图 5 A 与加热功率及流量关系

Fig. 5 The relationship between A and heating power and flux

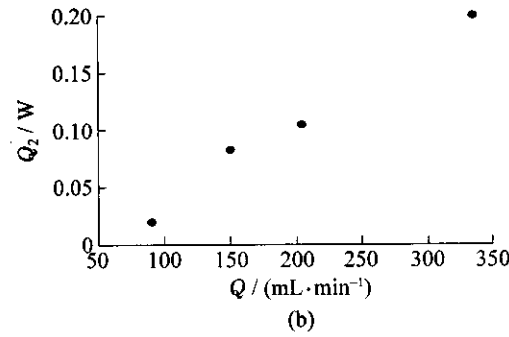
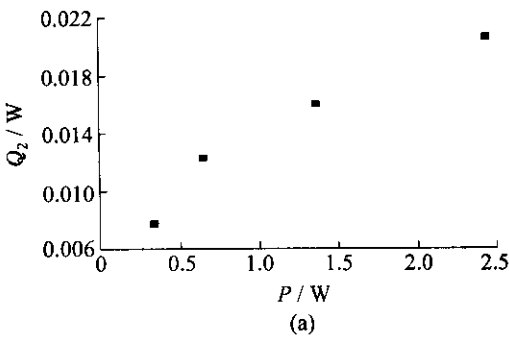


图 6 对流换热量与加热功率及流量关系

Fig. 6 The relationship between convective heat transfer and heating power and flux

3 轴向导热对对流换热的影响

加载在微管上的总的热量 Q_1 分成 3 部分:管壁轴向导热 Q_1 、管外壁对外自然对流与辐射散热量 Q_w 、管内部对流换热量 Q_2 。如果没有 Q_1 (事实上,在直径为常规尺度下的管时,轴向导热足够小,以至于完全可以忽略),那么通过 Q_1 带走的热量将加载在管壁上,使得管壁温度上升,从而导致 Q_w 、 Q_2 提高。因此如果没有 Q_1 ,这部热量将分成 2 部分,即用于对外散热 Q_a 和增加管内部的对流换热 Q_3 。

由图 5 可知 Q_1 相对于 Q_1 是非常小的,在实验中 Q_1 最大仅占 Q_1 的 2% 左右。

令 $Q_2/Q_1 = B$ 。根据图 6 计算可知,尽管 Q_2 随着 Q_1 的增加而增加,但是 B 值却随着 Q_1 的增加而减少,也就是说,随着加热功率的提高,将有更多的热量用于对外散热。因此,如果忽略轴向导热,那么类似于给微管增加一个小的功率,其值为 Q_1 ,于是有

$$\frac{Q_w}{Q_2} < \frac{Q_w + Q_a}{Q_2 + Q_3} \quad (2)$$

化简得

$$\frac{Q_3}{Q_2} < \frac{Q_a}{Q_w} \quad (3)$$

由于 $Q_1 = Q_3 + Q_a$,所以

$$\frac{Q_3}{Q_2} < \frac{Q_1}{Q_w} \quad (4)$$

实际上,根据图 6 计算可知, Q_2/Q_w 的值非常小,最大也仅为 2% 左右,而随着加热功率的提高,将会有更多比例的热量用于对外散热,也就是说 Q_2/Q_w 的值将更小。由此可以认为

$$Q_1 \approx Q_a \quad (5)$$

由图 5、6 线性插值计算可知,如果微量增加加热功率(如增加 Q_1) A 、 B 减少均不超过 0.1%。

令 $Q_2/Q_w = C$ 。根据上述分析可知, A 与 B 的比值在加热功率微量增加时, C 也有微量变化。因此认为,尽管 $Q_3/Q_2 < Q_1/Q_w$,但事实上 2 者差别并不明显。

令 $D = Q_3/Q_1$,并由式(5)得到

$$D = \frac{Q_3}{Q_2} \approx \frac{Q_a}{Q_w} \approx \frac{Q_1}{Q_w} \quad (6)$$

因此可以说,由于 Q_1 的存在,使得管内部的对流换热量减少了 Q_3 。

考虑到 $Q_3/Q_2 \approx Q_1/Q_w$,以 Q_1/Q_w 作为计算 D 的值,得到 D 与加热功率及流量的关系如图 7 所示。由图 7 可以看到,在壁面自然对流条件、定流量下,壁面轴向导热对管内对流换热的影响随着加热功率的增大而减弱。在定加热功率下,壁面轴向导热对管内对流换热的影响随着流量的增大而减弱。在本次实验中,由于壁面轴向导热导致管内部对流换热减弱达到 2%。

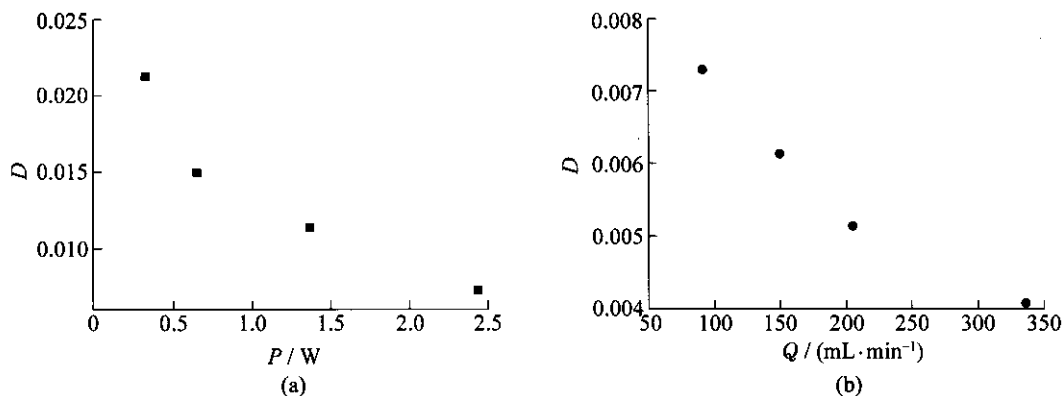


图 7 C 与加热功率及流量的关系

4 实验误差分析

实验的误差主要是测量进出口温度、流量、微管直径的误差以及红外成像仪测量的误差。测量进出口温度所用热电偶精度为 0.1℃,其进出口平均温度误差为 ±0.2℃;压力测量使用精度为 0.1% 的 CYB-10S 型溅射压力传感器,该压力传感器测量的误差小于 ±1 kPa;流量测量采用精度为 ±1.5% 的浮子流量计,因此流量测量误差较大,达到 1.5% 以上;测量微管直径用型号为 S-570 电子显微镜,其分辨率高于 0.1 μm。微管内径 d 的测量误差小于 0.5%;红外成像仪的测量精确为 0.1℃,用于校验红外成像图片的热电偶精度为 0.1℃^[9],在处理用红外成像仪拍摄得到的微管壁面温度场时,取点也会造成一定的误差,这种误差最大不超过 0.4℃。因此使用红外成像仪测量,最大不超过 ±0.5℃ 的误差。

5 结论

- 1) 轴向导热量的存在将会减小的管内部对流换量;
- 2) 在自然对流边界条件下,当流量不变时,轴向导热对管内部对流换热的影响随着加热功率的增大而减弱;当加热功率不变时,轴向导热对对流换热的影响随着流量的增加而减少;
- 3) 在本实验中,轴向导热将导致对流换热量的减少量最大超过 2%。

参考文献：

[1] YU D , WARRINGTON R , BARRON R , et al. Experimental and theoretical investigation of fluid flow and heat transfer in microtubes[C]// Proceedings of the 1995 ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference. ASAE , 1995 , 1 : 523-530.

[2] nGUYEN N T , BOCHNIA D , KIEHNSCHERRF R , et al. Investigation of forced convection in microfluid systems[J]. Sensors Actuators A , 1996 , 55(7) : 49-55.

[3] JIANG P X , FAN M H , SI G S , et al. Thermal-hydraulic performance of small scale micro-channel and porous-media heat-exchangers[J]. Int J Heat Mass Transfer , 2001 , 44(5) : 1039-1051.

[4] RAHMAN M M , GUI F J. Experimental measurements of fluid flow and heat transfer in microchannel cooling passages in a chip substrat[J]. Advances in Electronic Packaging , 1999(199) : 685-692.

[5] gUO Z Y , LI Z X. Size effect on microscale single-phase flow and heat transfer[J]. Int J Heat Mass transfer , 2003 , 46(1) : 149-159.

[6] REN L Q , QU W L , LI D Q. Interfacial electrokinetic effects on liquid flow in microchannels[J]. Int J Heat and Mass Transfer , 2001 , 44(16) : 3125-3134.

[7] cHIE Y Y , JIUNN C W , HSIN C T , et al. Friction characteristics of water , R-134 a , and air in small tubes[J]. Microscale Thermophysical Engineering , 2003 , 7(4) : 335-348.

[8] mORI S , SAKAIBARA M , TANIMOTO. A steady heat transfer to laminar flow in a circular tube with conduction in tube wall [J]. Heat Transfer-Jpn Res , 1974 , 2(3) : 37-46.

[9] LIU Z G , ZHAO Y H , TAKEI M. An experimental investigation of axial heat flux of wall in microtube[C/CD]// Masaaki Kawahashi. International conference on advanced optical diagnostics in fluids , solids and combustion. Tokyo : VSJ-SPIE , 2004.

(下转第 1152 页)

Effect of Rare Earth Element Er on Microstructure and Properties of Al-Si-Cu Solder Alloy

YU Yang , SHI Yao-wu , XIA Zhi-dong

(Beijing University of Technology , Beijing 100022 , China)

Abstract : In order to improve the properties of the brazing alloy Al-7Si-20Cu , a small amount of rare earth (RE) Er was added into Al-7Si-20Cu brazing alloy aiming at examining the effect of different amounts of Er on the physical properties , spreading property and mechanical properties of the solders. Results show that a small amount of Er has no obvious effect on the melting temperature of Al-Si-Cu solder alloy , but can notably improve spreading property of brazing alloy on LF21 surface , especially when the content of Er is within 0.05 ~ 0.1% . According to the examination on the microstructure of AlSiCu brazing alloy , with the increase of Er content the microstructure becomes finer and the length of acicular eutectic Silicon is shortening.

Key words : Al-Si-Cu alloy ; rare earth Er ; solder ; microstructure

(上接第 1129 页)

Experimental Study on Influence of Axial Conductive Heat on Convective Heat Transfer in Micro Steel Tube

LIU Zhi-gang¹ , ZHAO Yao-hua²

(1. Energy Research Institute , Shandong Academy of Sciences , Jinan 250014 , China ;

2. College of Architecture and Civil Engineering , Beijing University of Technology , Beijing 100022 , China)

Abstract : Nitrogen gas , used as a working fluid , flows through a micro steel tube with inner diameter 168 μm and outer diameter 406 μm . Using directly electrical heating method , the outer wall temperature fields of the micro steel tube are acquired by employing an IR Camera and specially magnifying lens for constant flow rate , different heating power and constant heating power , different flow rate , respectively. The flux and the temperature of the inlet and the outlet of the micro steel tube are measured synchronously. A correlation between the axial conductive heat and the convective heat transfer is obtained by a theoretical analysis based on the experimental results. Investigations clearly show that the axial conductive heat weakens the convective heat transfer in micro steel tube and the decrement may be more than 2% compared to the quantity of whole convective heat transfer when the working fluid is nitrogen gas.

Key words : micro tube ; axial conductive heat ; convective heat transfer ; IR Camera ; temperature field