

圆柱和圆台形空腔内冲击式传质的实验研究*

康海军 马雅玲 陶文铨

(西安交通大学, 710049, 西安)

摘要 采用蔡升华技术, 对圆柱和圆台形一端开口的冲击式射流在紊流范围的传质规律进行了实验研究。实验结果表明: 底面和侧面的平均 Sh 数先是随着 s/d_j 增加; 达极大值后, 又随着 s/d_j 的增加而减小; 在 $s/d_j = 3$ 时, Sh 数最大。底部的局部表面传质系数随径向距离的增加而减小, 达最小值后又上升。侧面的局部表面传质系数呈现出边界层型流动的换热特性。

关键词 冲击射流 蔡升华 质传递

中国图书资料分类法分类号 TK124

冲击式冷却由于具有换热效率高的特点而在玻璃钢化、燃气轮机叶片的冷却、木材干燥、大规模集成电路芯片的冷却等领域得到了广泛的应用^[1~4]。本文采用蔡升华技术对玻璃器皿的常用形状——圆柱、圆台形一端开口的空腔的传质特性进行了研究。从边界条件而言, 蔡升华试验模拟的是恒壁温边界条件, 但由于冲击式冷却中绝大部分情况下气流的流动均已进入紊流, 因而边界

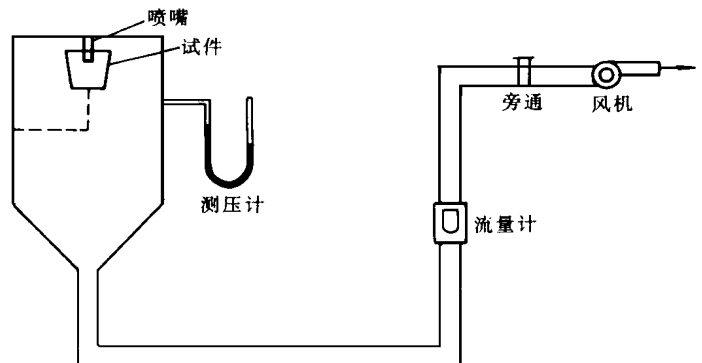


图1 实验系统

条件的影响大为减弱, 大量实验结果表明^[5], 用蔡升华实验得到的冲击式冷却规律与用加热法得到的结果是完全吻合的, 因此蔡升华技术在冲击式冷却规律的研究中应用十分广泛, 但以往的研究多注重于平均换热特性, 而在钢化玻璃等的生产中, 特别关心局部换热特性, 因为如果局部换热特性变化太剧烈会导致内应力的不均匀, 从而使产品爆裂^[6]。鉴于此, 本文不仅测定

收到日期: 1996-06-26 康海军: 男, 1962年11月生, 能源与动力工程学院热工教研室, 讲师

* 国家自然科学基金资助项目。

了空腔底面和侧面的平均换热特性,而且对它们的局部换热特性进行了仔细地实验研究

1 实验装置及测试过程

实验系统见图1. 空气由大空间被引风机吸入喷嘴($d_j=9\text{ mm}$),然后气流冲击流过萘试件($d=40\text{ mm}$, $L=45\text{ mm}$). 箱体侧面有一测压孔,用于测量箱体中的真空度,流过萘试件的气流经流量计后,由引风机排至室外. 引风机前的旁通阀用以调节风量,以改变实验段的风速

实验试件的结构见图2和图3

腔体内层为所浇铸的萘. 由圆柱形喷嘴喷出的空气冲击流过换热表面的底面部分,受空腔壁面的限制,流动方向改变 180° 后流过换热表面的侧面部分,最后流出该开口系统

实验过程中,总的质交换量由1台分辨率为 0.1 mg 、最大称量为 200 g 的电光分析天平测定,整个测量试件采用套筒法定位,局部变化值由自动控制台测定^[7]. 本实验中所得的局部值之和与由天平称质所得之值之间的相对偏差保持在9%以内. 实验中,风机启动和停机的不稳定过程的传质量和自然升华量是对试件只进行启动和停机过程后测量得出的,实验数据已考虑了这一部分.

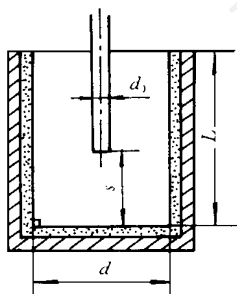


图2 圆柱形试件

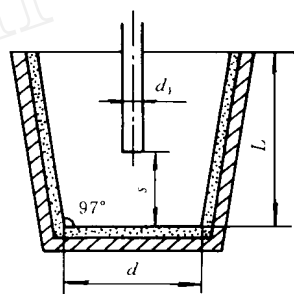


图3 圆台形试件

2 数据处理方法

质量传递数值以无量纲准则数 Sh 表示: $Sh = \beta d / D$,其中 d 为试件的底面直径; D 为质扩散率. 引入 $Sc = \nu / D$,这样 $Sh = (\rho d / \nu) Sc$,对萘在空气中的 Sc 数取为 2.5 ^[8]. 质交换系数 $\beta = (\Delta M / \tau A) / (\rho_{nw} - \rho_{nj})$, τ 为时间间隔,此处来流的萘浓度 $\rho_{nj} = 0$, ρ_{nw} 引用蒸气压方程^[8]及由埋入萘中的热电偶温度值求取. 局部值的数据处理与整体的处理方法相同,只是以局部的交换量 ΔM_i 代替 ΔM 、局部表面积 A_i 代替 A . 根据热质比拟的关系式,可得到 Nu 数, $Nu / Sh = (Pr / Sc)^n$,指数 n 一般取为 0.4

3 实验结果及讨论

3.1 平均质交换系数的变化特性

圆柱及圆台形腔体的底面及侧面平均 Sh 数的变化情况示于图4和图5中. 从图中可以看出它们的共同规律:一般地说,当 Re 数不很高时,对底面而言, Sh 数先随 s/d_j 的增加逐渐增加;达极大值($s/d_j = 3$ 处)后,又逐渐减小. 根据文献[4], Sh 数随 s/d_j 的这种变化特性可解释如下:随着 s/d_j 的增加,自由射流区长度增加,自由射流区与环境间的动量交换增加;随着距

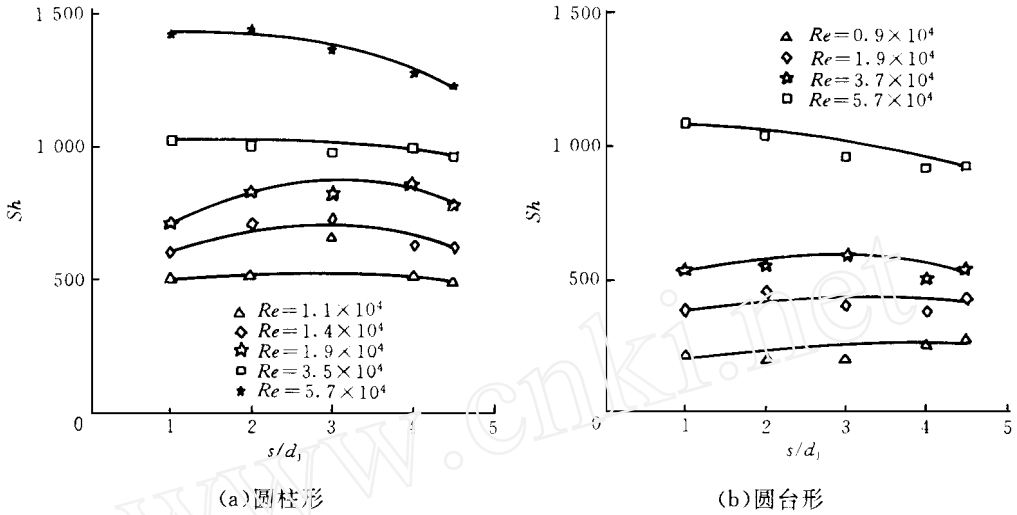


图4 在不同 Re 数下底面的平均 Sh 数与 s/d_j 的关系

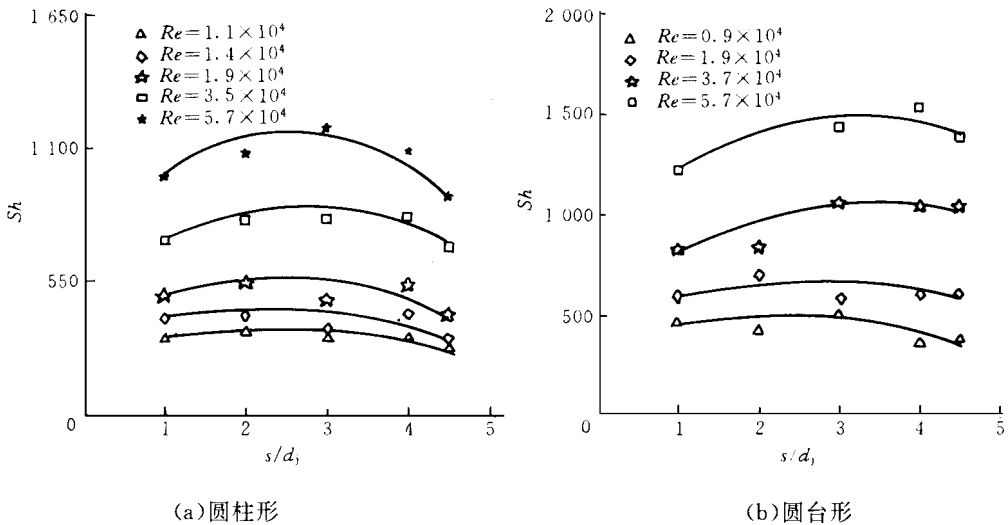


图5 在不同 Re 数下侧面的平均 Sh 数与 s/d_j 的关系

离的加大, 速度核的紊流强度增加, 传质系数随之增加; 当距离进一步增加时, 该速度核由于射流与周围流体的混合而被吞没, 结果导致冲击速度下降 这些变化致使图4和图5中传质系数的变化 但当 Re 数较高时(大约 5×10^4), 从喷嘴出来的射流核中本身的紊流强度已较大, 与环境的混合又会导致其紊流强度的降低, 因而无论对于圆柱或圆台, $Re = 5.6 \times 10^4$ 的曲线均呈现出随 s/d_j 的增加而 Sh 数单调降低的倾向 至于侧面, 平均 Sh 数随 s/d_j 的变化虽也呈现出上述的变化特性, 但其原因则应从自由射流的扩展角有否触及到侧面说明: 随 s/d_j 的增加, 自由射流扩展范围逐渐增大, 到一定的 s/d_j 时, 触及到侧面, 造成了对侧面的直接冲刷, 因而导致侧面换热系数的增强; 进一步增加 s/d_j 之值, 会使直接冲刷侧面的面积更大, 致使一部分气流没能流经侧面的最下部而直接从冲刷处流向外侧, 造成了整个侧面上的总体效果反而下降, 因而

当 s/d_j 大于一定值时, Sh 开始下降. 上述分析是否确切尚待通过进一步的紊流数值计算来证实, 本文作者正在进行这一工作.

比较图4和图5还可以发现, 圆柱形的底面及侧面的平均 Sh 数均高于同一 Re 数下对应的圆台形的值. 这是由于圆台形截面由底面向上逐渐扩大, 从而沿流动方向上的断面平均速度逐渐减小, 使得 Sh 值有所减小.

3.2 底面局部质交换特性

底面局部质交换系数 β 的变化如图6所示. 由图可见, β 值随着离滞止点距离的增加先减小, 然后又增加. 这是因为在滞止点处换热表面受到最强烈的冲击, 因而该点附近局部质交换系数最高. 然后, 气流沿着径线方向向外扩展, 在底面上形成了质交换边界层, 随着边界层的增厚, 局部质交换系数就不断下降. 但当气流冲刷到底面与侧面交汇处时, 由于受侧面的阻挡会在交角处形成一种回流旋涡, 这一回流旋涡的存在使交角附近的底面换热系数又有所提高.

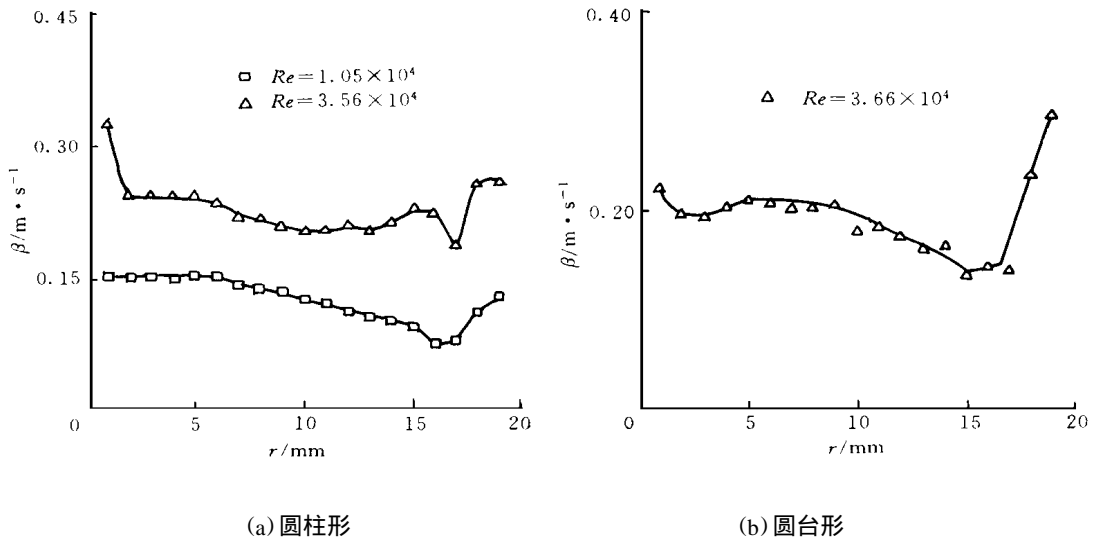


图6 底面质交换系数 β 沿半径 r 的变化

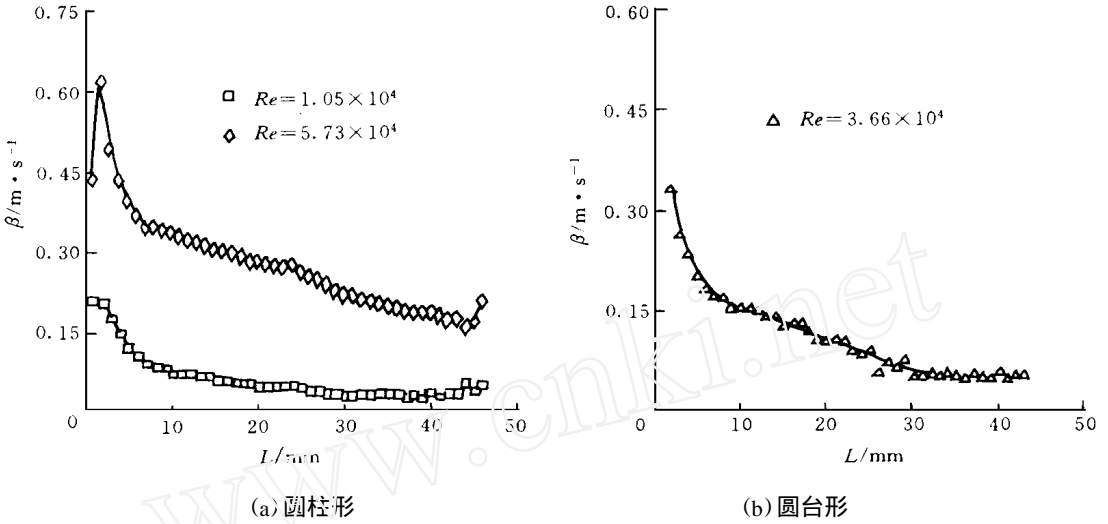
3.3 侧面局部值

侧面局部质交换率 β 的变化示于图7中. 由图可见, 侧面的局部 Sh 数呈现出十分典型的边界层流动特性, 从喷嘴喷出的高速气流冲击底面后形成了贴壁射流, 这股流体与侧壁碰撞, 使得靠近底面侧壁的 Sh 数值很高, 然后随着流动的向前进行, 边界层逐渐增厚, 因而 Sh 数逐渐减小. 在出口处, 由于出口效应, Sh 数值有略微升高.

4 结论

本文给出了在 $Re = (1.0 \sim 5.6) \times 10^4$ 范围内, 对高度与底面直径比为45/40的圆柱、圆台形(扩展角为7°)半开口空腔的圆形喷嘴冲击射流的质交换试验结果. 这些结果表明:

(1) s/d_j 之值对平均换热特性有一定影响. 对 Re 数低于 5×10^4 的情形, 当 $s/d_j = 3$ 时, 底面的平均 Sh 数达极大值; 在所试验的全部 Re 数范围内, 侧面的平均 Sh 数也呈现类似变化特

图7 侧面局部质交换系数 β 随高度 L 的变化

性

(2) 底面局部质交换系数在滞止点附近较大, 沿半径方向逐渐下降, 靠近拐弯处又有所回升

(3) 侧面局部质交换系数在靠近底面处达到最高, 沿着气流方向逐渐减小, 呈现出边界层类型流动的换热特性

上述关于极大值位置及局部值的结论对于空腔内冲击式冷却方式的组织具有参考价值

参 考 文 献

- 1 Hu ZM, Kang H J, Tao W Q. Effect of rotating speed on heat/mass transfer of jet impingement in cone-type cavities In: Prof of 1993 Winter Annual Meeting of ASME Reno, 1993
- 2 Kang H J, Tao W Q. Experimental study of heat/mass transfer for circular jet impingement on surfaces of cone-type In: Proceedings of 1st International Conference on Energy Conversion and Energy Sources Engineering Wuhan, China, 1990 410~ 416
- 3 Martin H. Heat and mass transfer between impinging jets and solid surfaces In: Hartel J P, ed Advances in Heat Transfer, Vol 13 New York: Academic Press, 1977
- 4 Sparrow EM, Xu Z X, Azevedo L F A. Heat (mass) transfer for circular jet impingement on a confined disk with annular collection of the spent air ASME J Heat Transfer, 1987, 109(2): 329~ 335
- 5 Deiban E P, Mazur A E. Convective heat transfer for jet impingement on solid surface (in Russian). Kiev: Haukova Dumka, 1982
- 6 西北轻工业学院 玻璃工艺学 北京: 轻工业出版社, 1982
- 7 康海军 圆柱、圆锥形空腔冲击式传热(传质)的实验研究和温度场的数值计算: [硕士学位论文] 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 1988
- 8 Sogin H H. Sublimation from disks to air streams flowing normal to their surfaces Trans ASME, 1958, 80(1): 61~ 71

(下转第9页)

- 3 Silveti B. Ejector expansion refrigeration cycle. Refrig and Air Cond Technol Workshop. ORNL-6797, Oak Ridge Nat Lab, 1993. 229~ 238
- 4 Tomasek M L, Rademacher R. A analysis of adomestic refrigerator cycle with an ejector. ASHRAE Trans, 1994, 101: 1 431~ 1 438
- 5 范晓伟, 阴建民, 陈钟颀等. 一种新型压缩/喷射混合制冷循环的探讨. 西安交通大学学报, 1996, 30(5): 5~ 11
- 6 郭航. 替代工质冰箱压缩机气阀的优化研究. [硕士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 1996

Experimental Study on a New Kind of Compression/Injection Refrigeration Cycle

Fan Xiaowei Yin Jianmin Chen Zhongqi

(Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an)

Abstract A new compression/injection hybrid refrigeration is proposed and an experimental apparatus is established accordingly. The effects of the diameter at nozzle output (d) on the new refrigeration system is investigated under the optimal charge quantity of refrigerant for the original compression system. It is found that the new cycle may save energy within $d=0.3\sim 0.4$ mm.

Keywords refrigeration cycle compression injection performance

(上接第5页)

Experimental Study of Mass Transfer for Circular Jet Impingement in a Cylinder and Diverging Conical Cavity

Kang Haijun Ma Yaling Tao Wenquan

(Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an)

Abstract The mass transfer for circular jet impingement in a cylinder and a converging conical cavity with one end open to the ambient air have been experimentally investigated via naphthalence sublimation technique. It is found that with increasing of s/d_j average Sherwood numbers of the bottom and the lateral surfaces increase first, reach their maximum and then decrease. The maximum Sherwood number occurs approximately at $s/d_j=3$. The local mass transfer coefficient of the bottom surface first decreases with the increase in radius, reaches its minimum, and then rises. The local mass transfer coefficient of the lateral surface along the height exhibits typical boundary layer type character.

Keywords jet impingement naphthalence sublimation mass transfer