

DOI: 10.7652/xjtuxb201703008

低真空压力下横掠圆柱体强制对流传热特性的实验研究

谢福寿^{1,2}, 厉彦忠^{1,2}, 王鑫宝¹, 陈鹏玮¹, 王磊¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 100028, 北京)

摘要: 为了研究低真空状态下空气横掠圆柱体强制对流传热特性, 搭建了速度、压力可控的变密度风洞实验台和数据采集系统, 得出了压力变化对气体传热特性的影响规律。实验研究表明: 气体横掠圆柱体强制对流传热随压力降低而衰减, 压力越低, 传热衰减越快; 压力恒定时, 传热随 Re 减小而减弱; 气体流态属于连续流或滑移流时, 压力变化对传热影响很小, 可直接采用传统经验关联式计算, 推荐 Hilpert 关联式; 气体流态属于过渡流或自由分子流时, 压力变化对传热影响很大, 传统经验关联式已不再适用, 需要修正。本实验不确定度小于 4.5%, 实验数据可靠, 为工程实际应用提供了实验基础。

关键词: 低真空压力; 强制对流传热; 横掠圆柱体; 气体流态

中图分类号: V511.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)03-0043-05

Experimental Study on the Forced Convection Heat Transfer Characteristics of Air Flow Across a Cylinder under Low Vacuum Pressures

XIE Fushou¹, LI Yanzhong^{1,2}, WANG Xinbao¹, CHEN Pengwei¹, WANG Lei¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Beijing 100028, China)

Abstract: When launch vehicles pass through near space (20~100 km), the flow regimes of gas can go through continuum flow, slip flow, transition flow, and molecular free flow in sequence. In order to study the forced convection heat transfer characteristics of air flow across a cylinder under low vacuum pressures, an experimental rig of variable density wind tunnel and data acquisition system were set up. The influenced heat transfer characteristics of air flow were obtained. The experimental research showed that the forced convection heat transfer coefficient of air flow across a cylinder decreases with the decrease of pressure; and the lower the pressure, the faster the attenuation of heat transfer characteristics. The heat transfer intensity attenuates as Reynolds number decreases at a constant pressure. The pressure change has slightly effect on heat transfer at continuum flow or slip flow, and Hilpert's correlation is recommended. The pressure change has great influence on heat transfer at transition flow or molecular free flow, and conventional empirical correlations are no longer applicable, needing correction. The experimental uncertainty is less than 4.5%, which indicates the experimental data are reliable and can be used to guide engineering applications.

Keywords: low vacuum pressure; forced convection heat transfer; across a cylinder; gas flow regime

随着我国航天事业的大力发展,液氢/液氧推进剂由于具有无毒、无污染、高比冲、大推力等优势而广泛应用于低温运载火箭之中。然而,其劣势是具有沸点低、密度低、表面张力小等特殊性质,导致低温推进剂很容易受外界的热侵而气化^[1]。因此,外部漏热的精确计算直接决定了运载火箭的有效载荷。但是,低温运载火箭在升空的过程中存在着强烈的能量交换,特别是穿过临界空间区域(20~100 km),如随着运载火箭上升,大气环境密度逐渐减小,空气稀薄效应的影响会导致不同高度下运载火箭与大气有不同的换热状况,当气体密度降到一定程度时,传统的传热关联式可能已不再适用。

国际空间站或我国未来的“天宫”在轨空间站不仅可以作为人类探索太空的前沿哨所,还可彰显各国的综合实力。空间站正常运行时,舱内压力与地球表面的大气压力差不多,但万一空间站遭到太空碎片的撞击,出现微量的泄漏,舱内压力逐渐降低,舱内各种仪表的散热就会降低,导致仪表的温度上升,当升到一定程度时,精密仪表就会烧坏,此时就需要一个精确的低真空环境状态下的对流换热关联式,来采取合适的补救措施。

与此同时,工业技术的发展使得人们对真空环境的利用越来越多,如大型真空环境模拟仓,真空管道磁悬浮列车等相继建造,而低真空内设备或仪器的精确热设计,仍缺乏实验数据;火星作为人类准备登陆的下一个星球,该现象尤其突出,因为火星的大气密度大约只有地球的1%^[2],但又不像月球大气那样稀薄,对于火星登陆器热管理仍缺乏精确的设计。值得一提的是,2015年6月美国NASA在夏威夷美海军太平洋导弹靶场进行第二次低密度超声速减速器(LDSD)的实验,按照设计,LDSD将以超声速飞行,并生成大气阻力。NASA希望,这将成为使大型航天器在火星探索任务中实现减速的解决方案。

1914年,King为开发热线风速仪,以细铂丝为研究对象,开展了气体横掠细圆柱体强制对流传热研究,关联了最早最经典的传热关联式^[3],但由于该关联式是针对热线风速仪的,雷诺数 Re 范围(0.055~55)很小,所以很难在工业上大范围应用。1933年,Hilpert为了满足当时工业需求,以空气为工作介质,关联了适用范围很广的表达式,但起初关联的参数没有使用定性温度,且采用了不准确的空

气热物性(Hilpert使用的空气热导率比最新公布的数据低2%~3%),致使通过Hilpert关联式计算出的努塞尔数 Nu 比实验值要高,不过后来Knudsen在Hilpert关联式基础上,采用定性温度和准确的热物性,重新修正了Hilpert关联式中的系数,成为目前使用最普遍的一套关联式,雷诺数范围为 $0.4 \sim 4 \times 10^{5[4-5]}$ 。1971年,Fand开发了一个单一的关联式,雷诺数范围为 $0.01 \sim 2 \times 10^5$,避免了不同雷诺数范围下选用不同参数的麻烦^[6-7]。其余学者的研究大多集中在对雷诺数范围拓展上,如低速或极低速下自然对流的影响、高速或超高速湍流的影响、流体物性的影响等^[8-20]。但是,上述关联式都是在常压或近常压状态下进行关联的,能否直接应用于低真空状态下,并没有得到验证。

2016年,王晶等人搭建了一个能提供不同真空压力和环境温度的封闭试验舱,对在不同压力环境下几种固定加热量的竖直平板表面自然对流散热进行了实验研究^[21]。结果表明:自然对流换热系数在绝对气压小于1 kPa时非常小,可以视作0;在绝对气压大于1 kPa时,自然对流换热系数随压力的升高呈2次方增加。但是,其研究的状态是自然对流,并未涉及强制对流。

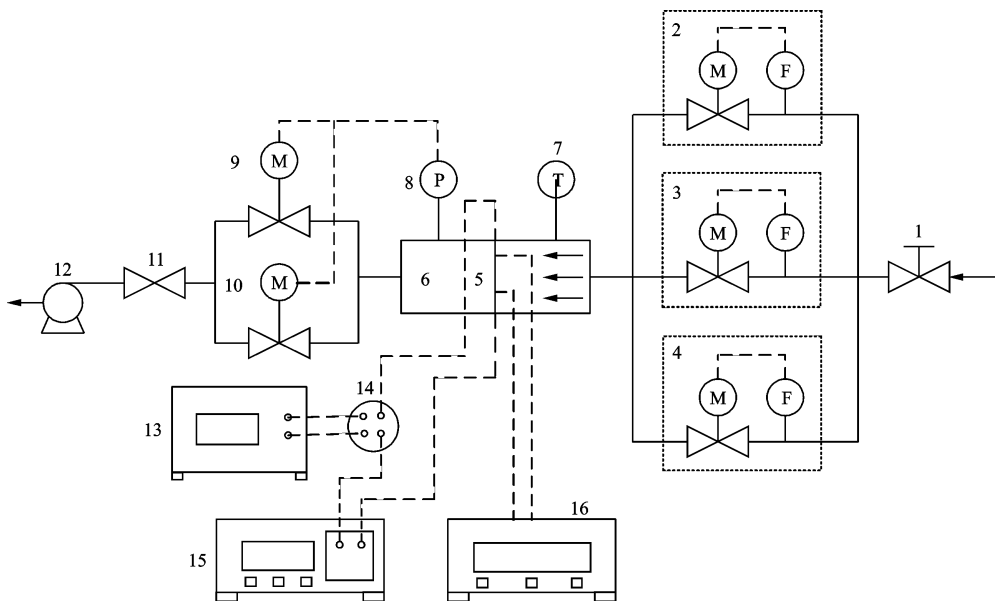
通过大量的国内外文献调研可知,对于低真空压力下横掠圆柱体强制对流传热特性的研究未见相关报道。针对上述航空航天领域遇到的实际问题,本文拟搭建速度、压力可控的变密度风洞实验台和数据采集系统,找出压力变化对气体强制对流传热的影响,以验证低真空状态下传统经验关联式是否适用,以期为我国航空航天领域相关技术进行设计时提供实验参考。

1 实验系统及测量方法

1.1 实验系统

变密度风洞实验台由速度、压力调节系统和数据采集系统组成,该系统可保障气体在压力100 Pa~100 kPa、速度0.2~20 m/s下稳定流动,如图1所示。

低真空环境下气体流动方案采用一端恒定压力源,另一端选用旋片真空泵不断抽气,两端产生压差实现气体流动。压力和速度的动态调节采用可编程逻辑控制器(PLC)SP7-200自动控制充气调节阀和



1:截止阀;2:大流量控制器;3:中流量控制器;4:小流量控制器;5:钨丝;6:有机玻璃实验段;7:温度测量铂电阻;8:电阻规;
9:大抽气调节阀;10:小抽气调节阀;11:压差阀;12:旋片真空泵;13:电位差计;14:标准电阻;15:恒流源;16:数据采集仪

图1 低真空环境下气体强制对流换热实验系统示意图

抽气调节阀的开度,实现在不同低真空压力下气体以不同速度稳定流动。由于考虑到实验压力范围跨度较大(100 Pa~100 kPa),单个气体流量计量程无法满足测量要求,所以在系统中并联了3台不同量程的热式气体质量流量控制器,并通过多次实验确定了各流量控制器之间的分界点。当气体流量小于 $0.34 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,采用小流量控制器;当气体流量大于等于 $0.34 \text{ m}^3/\text{h}$ 、小于 $5.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,采用中流量控制器;当气体流量大于等于 $5.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,采用大流量控制器和中流量控制器共同控制,其控制条件为总流量计算值与大流量测量反馈值之差在 $1.5 \sim 4.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 之间,此时保持大阀开度不变,调节中阀开度,当之差小于0或大于 $5.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,停止调节中阀,再次调节大阀,直至系统稳定。为提高压力控制精度,采用大、小抽气阀进行压力调节。同样,通过多次实验确定了各抽气阀之间的分界点,当压力小于 0.3 kPa 时,采用大、小抽气阀共同调节;当压力大于 0.3 kPa 时,采用大抽气阀调节。

1.2 实验件选择

实验件通过细陶瓷管做骨架从实验段两端引出。由于钨丝的电阻温度系数高、机械抗拉强度大,所以实验件材料选用直径为 0.02 mm 的钨丝,长度为 29.56 mm 。

1.3 实验件标定

本文采用Fluke 9173高精度计量炉、Fluke 5698-25一级标准铂电阻温度计、Keithley 2400恒

流源、Agilent 34970数据采集仪和陶瓷支架,标定了同一批钨丝电阻率与温度之间的表达式,该表达式温度范围为 $50 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$,其合成标准不确定度为 $0.009 \text{ }^\circ\text{C}$,即

$$T_w = 49.70418 + 49.02272\rho - 0.57351\rho^2 + 0.00201\rho^3 + 2.16913 \times 10^{-4}\rho^4 \quad (1)$$

式中: $\rho=10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 为钨丝电阻率。

1.4 测量方法

由于实验件钨丝又细又短,其电阻很小,为了精确测量钨丝电阻值,本文采用四线制的电位差计法进行测量。四线制测量法是从钨丝两端分别引四根导线出来,形成电流回路和电压测试回路,由于电压测试回路的阻抗高,流过的电流可以忽略不计,减小了导线和环境温度带来的误差,所以该方法测量小电阻是最精确的。

2 实验原理及不确定度分析

2.1 实验原理

根据牛顿冷却公式,气体流过钨丝表面时平均对流传热系数为

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_f)} \quad (2)$$

式中: $Q=UI$ 为钨丝加热的功率,通过测量其直流电压和直流电流计算得到; A 为钨丝换热表面积,通过测量钨丝直径 D 和长度 L 计算得到,即 $A=\pi DL$; T_w 为钨丝加热时壁面温度; T_f 为流体温度,通过实

验段前端放置的铂电阻测量得到。根据能量平衡原理,钨丝产生的焦耳热依靠对流热量 Q_h 、传导热量 Q_c 和辐射热量 Q_r 传递,即 $Q=Q_h+Q_c+Q_r$ 。通常,由于钨丝的工作温度不会超过 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此辐射相对来说是较小的,可忽略其效应。同时,亦忽略热电汤姆逊效应。钨丝轴向导热问题在实验件制作之前已考虑,实验采用细陶瓷管做骨架,直径 0.05 mm 的康铜丝做引线,灌胶密封,增加钨丝长径比,轴向导热已降低到很小,同样可忽略不计。因此,加热电流在钨丝中产生的热量应该等于流体所带走的热量。

2.2 实验不确定度分析

数据分析中用到的流体热物性通过 NIST 的 Refprop V9.0^[22] 查得。传热系数的不确定度由文献^[23]中的方法计算得出,即

$$u(h)=\left\{\left[\frac{\partial h}{\partial U}u(U)\right]^2+\left[\frac{\partial h}{\partial I}u(I)\right]^2+\left[\frac{\partial h}{\partial L}u(L)\right]^2+\left[\frac{\partial h}{\partial T_w}u(T_w)\right]^2+\left[\frac{\partial h}{\partial T_i}u(T_i)\right]^2\right\}^{1/2}\quad (3)$$

以某一次独立完整的实验为例,算出实验中各个测量装置的测量范围和合成标准不确定度(见表 1),代入上式可得该次实验的传热系数相对标准不确定度小于 1.5% ,按照国家计量技术规范 JJF 1059.1—2012 的要求,传热系数的扩展不确定度范围小于 4.5% 。

3 实验分析及关联式比较

为确保实验系统的可靠性,本文在接近环境压力、钨丝壁面温度恒定($100\text{ }^{\circ}\text{C}$)的条件下,进行了空气横掠圆柱体强制对流传热的实验验证,其中实验系统中的气流速度是通过调节流量大小来维持恒定的,如图 2 所示。从图 2 中可知,在不同雷诺数下实验得出的努塞尔数处于不同经验关联式(King、Hilpert、Morgan、Eckert、van der Hegge Zijnen)得出的结果之间。这从侧面反映出,变密度风洞实验台

运行正常和实验数据采集可靠,能够满足实验要求。

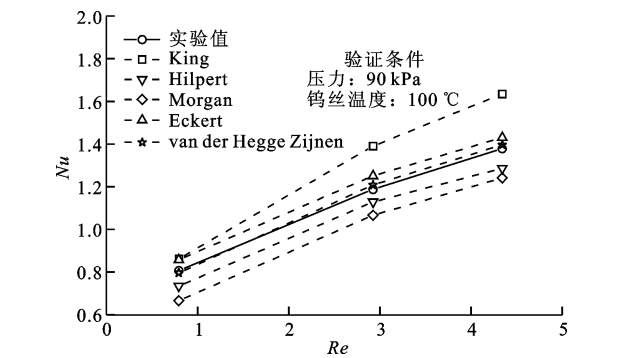


图 2 实验系统可靠性验证

变压力工况下气体横掠圆柱体强制对流传热时努塞尔数随雷诺数变化的规律如图 3 所示。从图 3 中可以看出,在 1 kPa 以上时,实验数据与传统经验关联式计算出的结果吻合较好,而在 1 kPa 以下时,实验数据与传统经验关联式计算出的结果出现了较大偏差,如同一雷诺数下,随着压力降低,传热减弱,但同一压力下,随着 Re 减小,传热减弱是符合传统规律的。根据 Re 的无量纲定义可知,当钨丝壁面温度、流体温度和钨丝直径一定时, Re 只与密度和速度有关,而密度与压力又密切相关。传统经验关联式基本都是在常压或常压附近,通过改变速度大小来获得 Re 与 Nu 之间的关系。随着 Re 降低,速度减小,此时自然对流效应开始起主导作用, Nu 的

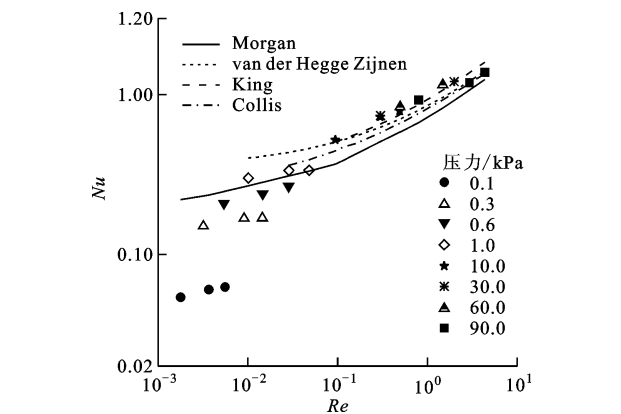


图 3 横掠圆柱体传热时努塞尔数随雷诺数的变化

表 1 测量系统的合成标准不确定度

测量参数	测量仪器	量程	A 类标准不确定度	B 类标准不确定度	合成标准不确定度
钨丝电压	Agilent 34970	0~10 V	2.651×10^{-3}	6.535×10^{-5}	2.652×10^{-3}
流体温度	WZPB-Pt100	-200~500 $^{\circ}\text{C}$	0.027 47	0.32	0.321 8
标准电阻电压	UJ33D-1 数字电位差计	0~2 V	2.44×10^{-5}	3×10^{-4}	3.01×10^{-4}
钨丝长度	游标卡尺	0~150 mm	0.060 13	0.011 55	0.032 27

变化逐渐平缓,并没有考虑压力对传热的影响,故传统的经验关联式具有局限性,尤其是在压力很低的环境下已不再适用。

为了进一步研究压力对横掠圆柱体强制对流换热的影响,维持气体速度(5 m/s)不变,压力从100 kPa减小到100 Pa时, Nu 随克努森数 Kn 变化的规律如图4所示。从图4中观察可知,随着压力降低, Kn 从连续流到过渡流之间过渡, Nu 逐渐降低。在滑移流和连续流之间,实验数据与部分经验关联式计算得出的结果吻合较好,而在过渡流出现了较大的偏差。由文献[24]可知,气体流态依据 Kn 可划分为连续流($Kn < 0.01$)、滑移流($0.01 < Kn < 0.1$)、过渡流($0.1 < Kn < 10$)和自由分子流($Kn > 10$)。通过实验数据可知,气体流态在连续流或滑移流时,压力对横掠圆柱体强制对流换热影响不大,可以采用传统的经验关联式进行计算,其中 Hilpert、King 和 van der Hegge Zijnen 关联式计算的结果与实验数据吻合较好,虽然 Morgan 关联式适用范围很广, Re 最小可达到 10^{-4} ,但是其精度在适用范围内并不高。当气体流态为过渡流或自由分子流时,压力对横掠圆柱体强制对流换热影响很大,传统的经验关联式已不再适用。

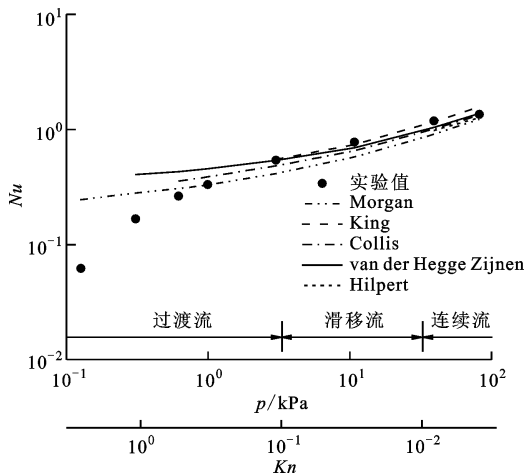


图4 横掠圆柱体换热时 Nu 随压力、 Kn 的变化

4 结 论

本文对低真空状态下气体横掠圆柱体强制对流换热特性进行了研究,找到了 Nu 随 Re 、 Kn 变化的规律。实验得出的主要结论如下:

(1)气体横掠圆柱体强制对流换热随着压力的降低而减弱,压力越低,传热衰减越快;

(2)压力一定时,气体流态无论处于任何流区, Nu 都随 Re 减小而降低;

(3)气体流态属于连续流或滑移流时,压力对横掠圆柱体强制对流换热影响很小,可忽略,直接采用传统的经验关联式进行计算是可行的,推荐采用 Hilpert 关联式;

(4)气体流态属于过渡流或自由分子流时,压力对横掠圆柱体强制对流换热影响较大,传统的经验关联式已不再适用,需要进行修正。

参考文献:

- [1] 谢福寿, 雷刚, 王磊, 等. 过冷低温推进剂的性能优势及其应用前景 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5): 16-23.
- [2] XIE Fushou, LEI Gang, WANG Lei, et al. Performance advantages and application prospects of subcooled cryogenic propellants [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(5): 16-23.
- [3] 黄飞, 吕俊明, 程晓丽, 等. 火星稀薄大气参数对进入器气动特性的影响 [J]. 宇航学报, 2015, 36(10): 1093-1100.
- [4] HUANG Fei, LV Junming, CHENG Xiaoli, et al. Impact of Martian rarefied atmosphere parameters on entry vehicle aerodynamics under hypersonic conditions [J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(10): 1093-1100.
- [5] KING L V. On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid; determination of the convection constant of small platinum wires with applications to hot-wire anemometry [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A, 1914(214): 373-432.
- [6] HILPERT R. Heat transfer from cylinders [J]. Forsch Geb Ingenieurwes, 1933, 4: 215-224.
- [7] KNUDSEN J D, KATZ D L. Fluid dynamics and heat transfer [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1958: 1-576.
- [8] FAND R M, KESWANI K K. A continuous correlation equation for heat transfer from cylinders to air in crossflow for Reynolds numbers from 10^{-2} to 2×10^5 [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1972, 15(3): 559-562.
- [9] FAND R M, KESWANI K K. Recalculation of Hilpert's constants [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1973, 95(2): 224-226.

(下转第 61 页)