

旋转盘腔稳态换热试验的时间相关性

丁水汀^{1,2,3}, 赵 罡³, 邱 天³, 于 航³

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院
北京市航空器/发动机复杂系统安全性重点实验室, 北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在稳态换热试验中, 试验没有达到稳定就测量会增大误差, 常见工况中盘面平均努塞尔数 Nu 误差的半衰期为 2500~2700 s。为判断试验是否达到稳定或可测量状态, 采用瞬态计算方法对旋转盘腔换热试验的稳定时间的判定方法进行了研究。数值计算结果表明: 对于旋转盘腔换热试验, 稳定时间较长。提供了一种通过试验精度判定稳定时间和可测时间的方法, 试验前可以由固体非稳态导热的傅里叶数估算可测时间。建议试验过程中每隔一段时间观测传感器数值, 观测时间间隔按对数规律确定, 直到传感器数值不变以确定达到稳定状态。

关 键 词: 旋转盘腔; 换热试验; 稳定时间; 误差分析; 瞬态导热

中图分类号: V235.11

文献标志码: A

Time-related steady heat transfer experiments in rotating disk cavity

DING Shuiting^{1,2,3}, ZHAO Gang³, QIU Tian³, YU Hang³

- (1. Beijing Key Laboratory on Safety of Integrated Aircraft and Propulsion System,
School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;
3. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Errors in steady heat transfer experiments increase if it is measured before steady state, and the half-life period of errors of average Nusselt number is about 2500~2700 s in general conditions. In order to modify the state of heat transfer experiments, rotating disk cavity heat transfer experiments were performed by transient numerical simulation. Results presented showed that it was a long time before steady state in heat transfer experiment of cavity. An approach of predicting steady time and allowable measurement time was developed by permissive errors of experiments, and allowable measurement time can be pre-calculated before experiments by Fourier number. It's also suggested that the sensors be ob-

收稿日期: 2016-09-05

基金项目: 航空发动机复杂系统安全性教育部长江学者创新团队(IRT0905); 中国博士后科学基金(2016M591047)

作者简介: 丁水汀(1967—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事燃气轮机热端旋转部件流动与换热机理及航空发动机适航性设计与验证技术研究。E-mail: dst@buaa.edu.cn

引用格式: 丁水汀, 赵罡, 邱天, 等. 旋转盘腔稳态换热试验的时间相关性[J]. 航空动力学报, 2018, 33(3): 513-520. DING Shuiting, ZHAO Gang, QIU Tian, et al. Time-related steady heat transfer experiments in rotating disk cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 513-520.

served per minutes by regularity of logarithm until the numbers of sensors are constant, then the experiment is in steady state.

Key words: rotating disk cavity; heat transfer experiment; steady time; error analysis; transient heat conduct

旋转盘腔的换热研究有重要意义,盘腔的特性影响着涡轮叶片的流量,对叶片冷却起关键作用;同时可以为寿命限制件涡轮提供热边界,对涡轮寿命计算提供可靠依据。旋转盘腔的换热研究大多为稳态换热,但都没有提及和关注试验稳定时间,而是直接给出试验结果,并认为是稳态结果。换言之,多数文章进行试验的误差分析时,仅仅分析了由于测量器材等引起的误差,并没有分析测试时刻的不准确而引入的误差。对于气体冷却高温转盘的试验,未达到稳定状态便进行测量转盘迎风面温度会导致高估其值,其他值不变时,表面传热系数会被低估;对于气体加热转盘的试验则刚好相反。

大多数研究者没有提及到测试时刻不准而引起的误差,这种误差在温度测量中尤其显著。葛萍等^[1]研究了热电偶测温系统的误差来源并给出误差的分析,文献^[1]主要分析了测温系统本身属性造成的误差。应用到具体试验中,国外 Gunther 等^[2]针对径向通流结构,采用热电偶测量传热试验中的温度,进行稳态测量的标准是约 33 min 内温度波动范围为 $\pm 0.2\text{ K}$,但并未给出这么做的依据,也未给出这种做法引起的误差。国内佟显义等^[3]、雷震等^[4]分别应用热电偶测温系统测量航空发动机燃气稳态温度和液氧主容器温度,都给出了测量的误差分析,但没有考虑测量时刻不准造成的误差。丁水汀等^[5-8]、徐国强等^[9-12]针对转静系旋转盘腔结构,研究盘缘加热热流密度、盘罩间隙比、进气半径位置、进气预旋角度等对换热及盘面热应力水平的影响,文献中转盘温度测量采用热电偶测温系统,热流密度也是由所测温度计算获得,忽略测量时刻的差异会造成表面传热系数等参数的额外误差。红外测温也是航空工业中常用的测温方法,闻洁等^[13]研究了红外热像仪用于换热试验的可能性并做了误差分析,作者认为试验件的材料、表面粗糙度,以及用于内流传热试验时需使用的能透过红外线的特殊材料的透射率等测量系统自身属性都会影响到红外温度的精度。在具体试验中,Pelle 等^[14]、张达等^[15]分别采用红外测温系统研究了某结构盘腔的换热特性和风阻温升特性,但都没有提及进行稳态测

量的时机与依据。在测壁面高温时也经常采用示温漆,徐凤花^[16]研究了影响示温漆精度的因素,认为温升速度、恒温时间、环境、漆膜厚度、颜料体积分等数等均会影响到测温的精度。熊庆荣等^[17]将示温漆应用于燃烧室火焰筒壁温的测量,分析了恒定温度时间造成的误差,并申明是在稳定后测量的,但没有提及稳定的判定依据。

现有的旋转盘腔换热试验涉及到各种测试手段,也给出了详细的误差分析,但具体到试验应用,鲜有文章提到过稳态测量的依据。未稳定便进行测量会造成系统误差,而且每次试验的误差也可能不一样(也属于随机误差),因此试验误差分析过程中需要考虑未稳带来的误差。本文关注旋转盘腔稳态换热试验过程中,达到稳定和可以测量的依据。下文通过分析软件 ANSYS 研究旋转盘腔稳态换热试验过程中的稳定时间和可测时间。

1 盘腔实际工况的稳定时间

首先定义本文中涉及的几个概念。稳定时间指从换热过程开始到盘体(试验体)各项参数几乎不变的时间。文献^[2]在测量旋转盘面温度分布及平均温度时,判断是否达到稳定的依据为平均 100 个测试间隔(约 33 min)内温度波动不超过 $\pm 0.2\text{ K}$ 。下文给出一个较具体的稳定时间的判据,具体需要满足以下两个条件:

1) 盘体(试验体)相邻某物理量 M 两次测量值分别与初值的差值的绝对值的比值满足以下关系,可表达为

$$\alpha < \frac{|M_{n+1} - M_0|}{|M_n - M_0|} < \beta \tag{1}$$

式中 α, β 为接近 1 的值,根据不同试验精度要求, α, β 值不同,根据试验实际情况确定。

2) 盘体(试验体)相邻两次测量值差值的绝对值与两次测量间隔时间的比值小于 ϵ 。可用下式具体表达:

$$\frac{|M_{n+1} - M_n|}{|t_{n+1} - t_n|} < \epsilon \tag{2}$$

式中 ϵ 为一小量,根据不同试验精度要求,其值可灵活确定。 M_{n+1} 为 $n+1$ 次某物理量的测量值, M_n 为 n 次某物理量的测量值, M_0 为初始时刻某

物理量的测量值, t_{n+1} 为 $n+1$ 次测量的时刻, t_n 为 n 次测量的时刻。

可测时间即可以测量的时间,指从换热过程开始到满足试验误差要求的最早时刻的时间段。在某换热试验过程中,可测时间比稳定时间短。

1.1 算例说明

本算例采用文献[18]的二维模型,模型如图 1 所示。物理模型分为两部分:固体转盘部分回转半径为 0.18 m,盘厚为 0.035 m,材料为钢;流体部分盘罩间隙为 0.058 m,有效半径为 0.18 m,进口的半径高度为 0.155 m,进口环缝宽为 0.001 m,出口环缝宽为 0.005 m。计算域物性参数如表 1 所示。

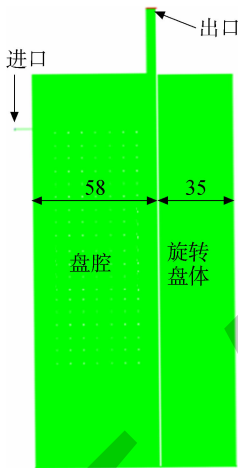


图 1 旋转盘腔模型(单位:mm)

Fig.1 Model of rotating disk cavity (unit:mm)

表 1 计算域物性参数列表

Table 1 List of physical parameters of computational domain

物性参数	数值	
	固体域	流体域
密度/(kg/m ³)	7 840	理想气体方程
比定压热容(J/(kg·K))	470	1 005
导热系数/(W/(m·K))	47	线性插值
弹性模量/GPa	200	
动力黏度/(Pa·s)		萨瑟兰公式

计算采用 Fluent 软件基于压力的算法进行瞬态计算,湍流模型为标准 $k-\epsilon$,近壁面采用增强壁面函数,方程离散采用 2 阶迎风格式,流动方程求解采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equations) 算法。经网格无关性计算确定网格数量为 20 万,边界层第 1 层厚度为

0.01 mm。

定解条件参考文献[18]的计算:初始状态流体静止,零时刻盘两侧面温度为环境温度 300 K;进口给流量边界为 0.0556 kg/s,温度为 300 K;出口给压力为 10^5 Pa,旋转盘端面给二类边界热流密度为 27 221 W/m²,转速为 300 rad/s,流固交界面为 interface,其余边界为绝热,进出口延长段设置为自由滑移边界。瞬态计算采用自适应时间步长,计算总时长为 25 000 s。

1.2 结果分析

图 2 为盘面温度随时间变化的曲线,图 3 为温度监测点位置分布,图中 ave-tem 为盘体迎风面面积加权平均温度,point 1 处在盘中心位置,point 2 处在半径为 0.09 m 处,point 3 处在盘面盘缘处。从图中可以看出,时间 $t=24\,990, 25\,000$ s 时,盘面监测点温度及平均温度均趋于恒定,满足上文定义的稳定时间的两个条件,可以认为达到了稳定状态。对此工况,达到稳定需要将近 7 h,稳态试验在此之前采集的数据都有较大的误差。

对应工况下文献[9]的试验结果如图 4 中黑线所示,平均努塞尔数 $Nu=1\,500$ 。对比红线计算结果, $t=1\,500$ s 左右时盘面温度分布与试验较符合,此时平均努塞尔数的计算结果为 1 300,与试验结果偏差 13%。考虑到试验的误差,可以认为本文计算与文献是一致的,即文献试验在 $t=1\,500$ s 附近进行稳态测量,此时并没有达到稳定状态。因此,虽然热电偶测温系统的误差并不大,但未稳定的系统误差却是很大的。下面研究未稳定引起的换热特性的误差。

稳态换热试验关注旋转盘腔的换热特性,以本算例的工况为例,若要求表征平均换热强度的平均努塞尔数的误差在 1% 以内,则对盘缘加热

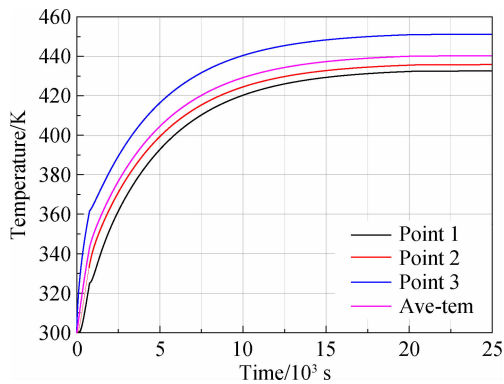


图 2 线性坐标下的温度曲线

Fig.2 Curves of temperature in linear coordinates

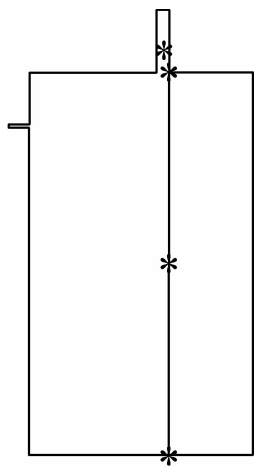


图 3 盘面温度监测点分布

Fig. 3 Distribution of temperature monitors in disk

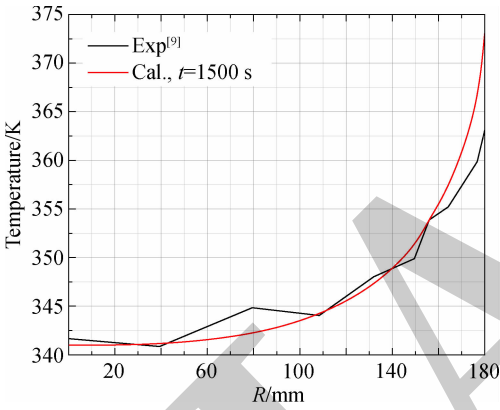


图 4 温度的试验值与计算值对比

Fig. 4 Comparison of temperature between experiment and calculation

功率 P 、进口气流温度 T_0 、转盘迎风面面积加权平均温度 T_w 、旋转盘半径 R 、盘体导热系数 λ 、盘侧面积 S 等的误差也有要求。以下通过误差传递公式推导对盘面平均温度 T_w 误差的要求:(假设旋转盘半径 R 、盘体导热系数 λ 、盘侧面积 S 的数值是准确的,认为功率也是准确的,进口气流温度 T_0 测量值的误差为普通热电偶传感器的最高分辨率 0.1 K)

平均努塞尔数 Nu 表达式为(按照表面传热系数的定义,温差本该取迎风面平均温度与盘面附近流体平均温度之差,但取盘面附近多远距离的流体温度难以确定,且试验时难以准确测量距转盘一定微小距离附近流体的温度;取进口气流温度 T_0 为特征温度,可以比较方便地测量及同试验对比)

$$Nu = \frac{PR}{S(T_w - T_0)\lambda} \tag{3}$$

等式两边取对数为

$$\ln Nu = \ln(R/\lambda) + \ln(P/S) - \ln(T_w - T_0) \tag{4}$$

$\ln Nu$ 对各独立测量参数求一阶导数

$$\frac{\partial \ln Nu}{\partial T_w} = \frac{1}{T_w - T_0} \tag{5-1}$$

$$\frac{\partial \ln Nu}{\partial T_0} = \frac{-1}{T_w - T_0} \tag{5-2}$$

得到误差传递公式为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Nu}{Nu} &= \left| \frac{\partial \ln Nu}{\partial T_w} \right| \Delta T_w + \\ &\left| \frac{\partial \ln Nu}{\partial T_0} \right| \Delta T_0 = \frac{\Delta T_w + \Delta T_0}{|T_w - T_0|} \end{aligned} \tag{6}$$

代入上述参数可得

$$\frac{\Delta T_w + 0.1}{|T_w - 300|} = 0.01 \tag{7}$$

从式(7)即可得到满足平均努塞尔数 Nu 误差要求的盘面平均温度 T_w 与其误差 ΔT_w 之间的关系,下面阐述具体步骤。

从图 2 可以得到,试验达到稳定后,盘面平均温度 $T_w = 440.3\text{ K}$,为保证盘面平均努塞尔数的误差在 1% 以内,根据式(7)可得 $\Delta T_w = 1.3\text{ K}$,也即当测试所得盘面平均温度 $T_{w,m} = T_w - \Delta T_w = 440.3 - 1.3 = 439.0\text{ K}$ 时也可达到试验要求的精度, $T_{w,m}$ 对应的时刻为 $t = 17\,460\text{ s}$,即 $t = 17\,460\text{ s}$ 及之后任意时刻采集数据都可以保证平均努塞尔数 Nu 的误差在 1% 以内。所以,对本工况来说,在 $t = 17\,460\text{ s}$ 及之后任意时刻采集数据虽然没有达到稳定状态,但误差在可接受的范围内, $17\,460\text{ s}$ 即可测时间,而且随着采集时间的延后,付出的代价也是巨大的。

扩展到一般状况,若要求表征平均换热强度的平均努塞尔数 Nu 的相对误差在 N 以内,其他参数的误差同本部分上述假设。则对本算例的盘面平均温度 T_w 进行拟合,可得如下拟合公式:

$$T_w = T_{w,0} + 140.418 \exp(-t/3\,500.402) \tag{8}$$

其中 $T_{w,0}$ 表示初始时刻的平均温度, t 为试验进行的时间。

将式(8)代入式(7),即可得到平均努塞尔数 Nu 的误差 N 随时间 t 变化的表达式如下:

$$N = \frac{0.1 + 140.418}{140.418 \exp(-t/3\,500.402)} \tag{9}$$

如图 5 所示为平均努塞尔数 Nu 的相对误差随时间变化的曲线,从图中可以看出,相对误差

N 随时间变化的曲线呈现对数规律,也即当时间以对数规律变化时,平均努塞尔数 Nu 的误差将会以近似线性减小。本文工况范围内 Nu 误差的半衰期约在 2500~2700 s 的范围内,即每 2500~2700 s 的时间内,平均努塞尔数的误差将减小一半。从 100% 的误差降到 1% 需要经过 7 个半衰期。

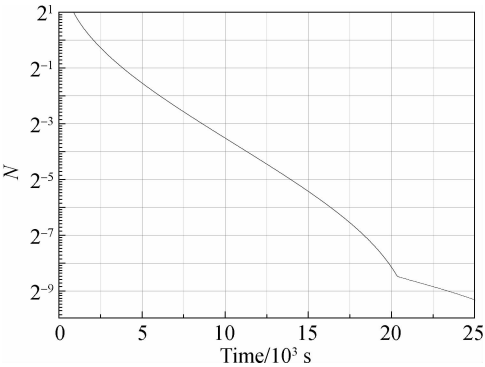


图 5 Nu 误差曲线
Fig. 5 Curves of error of Nu

其次, $t = 15\,000\text{ s}$ 时温度曲线的斜率为 0.000 891 1,这个斜率的意义为: $t = 15\,000\text{ s}$ 时,温度每秒升高 0.000 891 1 K,即 100 s 温度升高 0.089 K,不到 0.1 K,若保持这个速率,则对于普通热电偶,精度为 $\pm 0.1\text{ K}$,100 s 后也看不到传感器数值变化,而且温度变化速率逐渐减小,所以每隔一定时间观测传感器数值是否变化的操作需要改进。图 6 为监测点温度曲线在对数坐标下的形态,曲线的中间段大致为一条直线,即温度与时间的对数成线性关系,因此,在稳态换热试验中判定是否达到稳定状态的方法如下:每隔一段时间观测一次传感器,后一次观测时间间隔与前一次时间间隔比值约为 2,直到数值不再变化,这时可以认为试验达到了稳定状态。

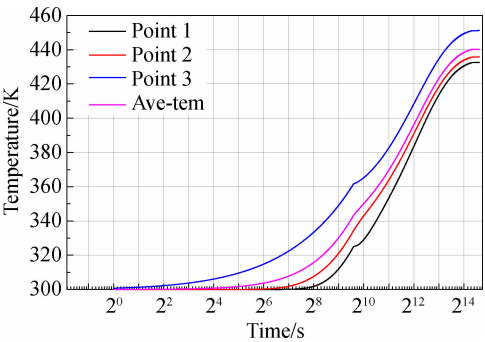


图 6 对数坐标下的温度曲线
Fig. 6 Curves of temperature in logarithmic coordinates

2 影响稳定时间的主要因素

对于旋转盘腔换热试验,盘体导热、冷气流态会影响其稳定时间。下面就两种因素分别考虑以研究哪种因素的影响更大。文中第 2.1 节研究热边界一定的情况下,流场状态稳定时间;文中第 2.2 节为固体瞬态导热计算,研究瞬态导热的稳定时间。

2.1 流场对稳定时间的影响

2.1.1 CFD 模型

本算例采用文中第 1.1 节计算模型,定解条件为:初始状态流体静止,零时刻给定盘体温度为 440 K,进口给流量边界,流量为 0.055 6 kg/s、温度为 300 K,出口给压力为 10^5 Pa ,转速为 300 rad/s,流固交界面为 interface,其余边界为绝热,进出口延长段为自由滑移边界。瞬态计算采用自适应时间步长,计算总时长为 20 s。

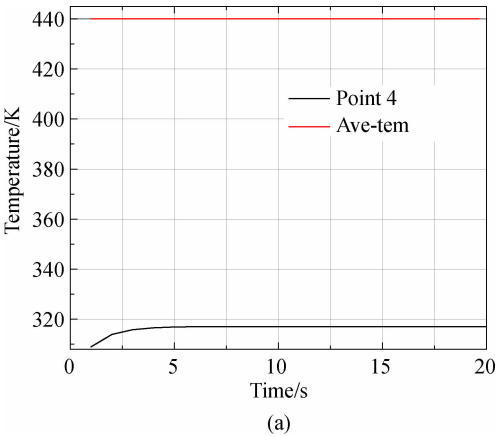
2.1.2 计算结果

计算结果如图 7 所示,point 4 为出口处温度监测点,处在出口环缝,离盘缘 0.01 m 处,如图 7 所示,ave-tem 为转盘迎风面面积加权平均温度,ave-pressure 为静盘面面积加权静压平均值。从图中各监测项可以看出,20 s 后流场即可达到稳定状态。换言之,当热边界稳定后,流场可迅速达到稳定状态。

2.2 导热对稳定时间的影响

2.2.1 计算模型

计算模型如图 8 所示,为一圆盘,回转半径为 0.18 m,盘厚为 0.035 m,材料为钢,物性参数参看表 1。该问题属纯导热问题,采用 Fluent 进行瞬态计算,网格数量为 30 万。边界条件为:零时刻加热,圆盘两个侧面给三类边界条件,具体数值取



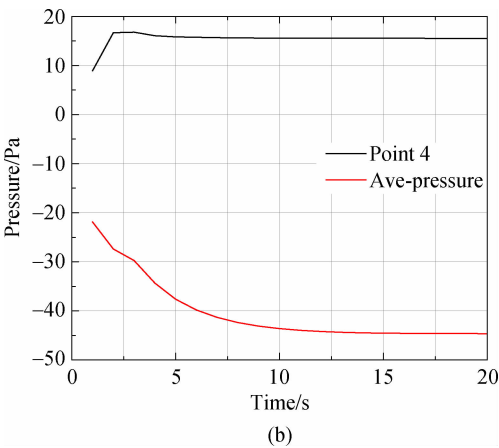


图 7 温度和压力曲线

Fig. 7 Curves of temperature and pressure

文中第 1 节稳定后的结果(也即假设流体状态一直是稳定后的状态,这高估了整个换热试验过程中的表面传热系数),左侧面(迎风面)表面传热系数为 $67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、右侧面(背风面)绝热,环境温度为 300 K ,圆盘端面给二类边界条件热流密度为 $27\,221 \text{ W}/\text{m}^2$ 。瞬态计算采用自适应时间步长,计算总时长为 $20\,000 \text{ s}$ 。

2.2.2 计算结果及分析

计算过程中监测点随时间变化曲线如图 9 所示,监测点分布如图 8 所示。从图中可以看出, $t=20\,000 \text{ s}$ 时,根据上文对稳定时间的定义,监测点温度满足稳定的两个条件,可以认为盘体温度已达到稳定,处于稳态。对比文中第 1 节的流固共轭计算的稳定时间为 $25\,000 \text{ s}$,导热过程在 $20\,000 \text{ s}$ 内完成,这是由于转盘迎风面的表面传热系数取稳定后的值,稳定后的表面传热系数较未

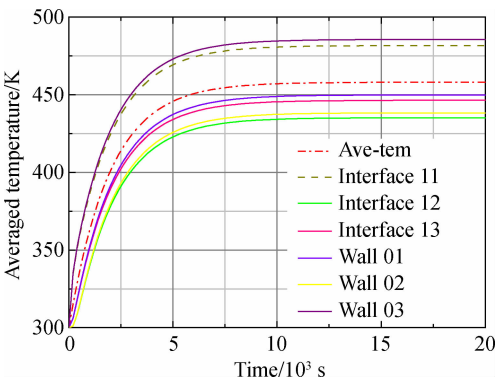


图 9 导热过程中温度曲线

Fig. 9 Curves of temperature in heat conduct

稳定大,较大的表面传热系数有利于盘体温度的均匀化。

综上,文中第 2.1 节算例考虑给定热边界后流动状态对盘腔换热试验稳定时间的影响,其稳定时间为 20 s ,相比文中第 1.2 节 $25\,000 \text{ s}$ 的盘腔试验稳定时间几乎可以忽略;文中第 2.2 节算例考察瞬态导热对盘腔换热试验稳定时间的影响,其稳定时间为 $20\,000 \text{ s}$,与文中第 1.2 节盘腔试验稳定时间量级相等。因此,对比本节内容与文中第 1.2 节,金属盘体的瞬态导热过程主导盘腔换热试验的稳定时间。可以通过瞬态导热稳定时间来估算盘腔换热试验的稳定时间。

3 可测时间的估算

对于盘腔换热试验,试验可测时间需要预估,但对每个工况都进行瞬态 CFD 计算需要花费较大的代价,因此需要一种简单的估算方法。盘腔换热试验的可测时间是由导热决定的,因此可以通过估算导热的可测时间来估算整个试验的可测时间。下面对导热过程进行无量纲分析。

对于圆盘的瞬态导热问题,导热可测时间 τ 与盘半径 R 、盘厚 L 、盘缘热流密度 q 、盘侧面表面传热系数 h_1, h_2 以及物性参数有关。取半径 R 为特征长度,类似傅里叶数的无量纲化可表达为

$$Fo = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) \tag{10}$$

其中

$$Fo = \tau \lambda / (R^2 c_p \rho) = \tau a / R^2 \tag{11}$$

式中 a 为热扩散率, Fo 表征从过渡过程开始到可以进行测量的无量纲准则数。

$$\pi_1 = L/R \tag{12}$$

式中 π_1 表征圆盘的相对厚度,为几何无量纲参数。

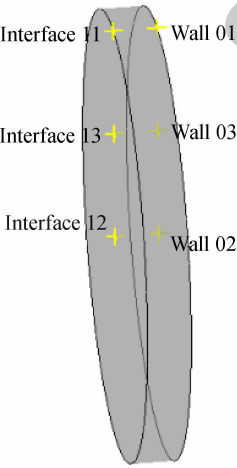


图 8 温度监测点分布

Fig. 8 Distribution of temperature monitors

$$\pi_2 = h_1 R / \lambda \quad (13)$$

$$\pi_3 = h_2 R / \lambda \quad (14)$$

式中 π_2 、 π_3 表征圆盘侧面表面传热系数与固体内部导热系数之比。

$$\pi_4 = q R^3 c_p \rho^2 / \lambda^3 \quad (15)$$

式中 π_4 为边界热流密度大小的无量纲参数, a 为热扩散系数, λ 为材料导热系数, c_p 为比定压热容, ρ 为材料密度。

以下采用文中第2节的模型为例说明估算可测时间的步骤。对于相对厚度不变的盘体, π_1 不变; 对于圆盘导热问题, 假设两个侧面的边界是相同的, 因此该问题是对称的, 仅有一个侧面的表面传热系数是独立的。所以, Fo 只与 π_2 、 π_4 有关, 图10曲线为不同 π_4 ($8.420 \times 10^{13} \sim 5.052 \times 10^{14}$) 及 π_2 ($0.0766 \sim 0.383$) 工况下 Fo 的变化曲线。

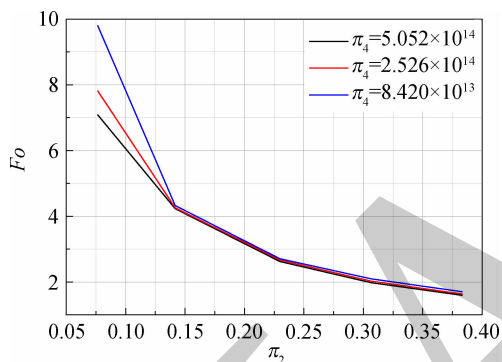


图10 Fo 曲线

Fig. 10 Curves of Fo

图10中 Fo 采用式(11)计算, 式中所使用 τ 取令 Nu 的误差在1%以内的可测时间, 其他参数的误差假设与文中第1.2节一致。从图中可以看出, 当 π_4 一定时, 随着 π_2 的增加, Fo 逐渐减小, 并且减小的程度放缓; 当 π_2 一定时, π_4 的增加会使 Fo 减小, 但当 π_2 较大时, Fo 对 π_4 的变化不敏感, 当 π_2 较小时, π_4 对 Fo 的影响增大, 约在 $\pi_2 = 0.1417$ 时存在转折点。对于其他工况, 可以从图中插值估算 Fo 的值, 进而通过式(11)估算可测时间。

4 结 论

本文探讨了旋转盘腔换热试验中稳定时间判定方法的问题。从文中的结果可以得到以下结论:

1) 旋转盘腔稳态换热试验中, 试验的稳定时间主要由金属旋转盘体的瞬态导热历程决定;

2) 旋转盘腔换热试验中, 本文工况附近 Nu 误差的半衰期约在 $2500 \sim 2700$ s 的范围。根据此方法可以估算不同精度要求的可测时间不必等到稳定时间再行测量采集;

3) 试验过程中每隔一定时间观测传感器数值, 判定试验达到稳定状态的方法有待改进, 可采取以下方案: 每隔一段时间观测传感器数值, 但观测间隔时间按照对数规律给定;

4) 旋转盘腔换热试验稳定时间可以通过瞬态纯导热估算, 本文试验范围内的工况可以通过图10插值计算, 后续的扩展可以考虑几何参数、盘面两侧表面传热系数不同对可测时间的影响。

参考文献:

- [1] 葛萍, 方勇, 解本政, 等. 温度测试系统中的误差分析与控制方法[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(6): 790-794.
GE Ping, FANG Yong, XIE Benzhen, et al. Error analysis and control in the temperature measuring system[J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(6): 790-794. (in Chinese)
- [2] GUNTHER A, UFFRECHT W, ODENBACH S. Local measurements of disk heat transfer in heated rotating cavities for several flow regimes[J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(5): 051016. 1-051016. 9.
- [3] 佟显义, 徐微, 辛欣, 等. 燃气稳态温度测量及误差分析[J]. 中国测试, 2015, 41(增刊1): 105-108.
TONG Xianyi, XU Wei, XIN Xin, et al. Gas steady temperature measurement and error analysis[J]. China Measurement and Test, 2015, 41(Suppl. 1): 105-108. (in Chinese)
- [4] 雷震, 李怡, 付琳琳. 液氧主容器温度测量误差分析与改进方法[J]. 火箭推进, 2015, 41(6): 92-98.
LEI Zhen, LI Yi, FU Linlin. Analysis and improvement methods for temperature measurement error of LO₂ main container[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(6): 92-98. (in Chinese)
- [5] 丁水汀, 张弓, 李烨, 等. 旋转盘腔盘缘热流密度的敏感性分析[J]. 推进技术, 2012, 33(2): 263-268.
DING Shuiting, ZHANG Gong, LI Ye. Sensibility analysis of the heat flux in the rotating cavity[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(2): 263-268. (in Chinese)
- [6] 丁水汀, 张弓, 李烨, 等. 旋转盘腔进气位置的敏感性分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1681-1687.
DING Shuiting, ZHANG Gong, LI Ye, et al. Sensibility analysis of the air inlet composition in the rotating cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1681-1687. (in Chinese)
- [7] 丁水汀, 李烨, 张弓, 等. 旋转盘腔盘罩间隙比的敏感性分析[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3): 528-535.
DING Shuiting, LI Ye, ZHANG Gong, et al. Sensibility analysis of gap ratio in the rotating cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 27(3): 528-535. (in Chinese)

[8] 丁水汀,李焯,张弓,等. 旋转盘腔预旋角度的敏感性分析[J]. 航空动力学报,2011,26(10):2251-2257.
DING Shuiting,LI Ye,ZHANG Gong,et al. Sensibility analysis of inlet pre-swirl angle in the rotating cavity[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(10):2251-2257. (in Chinese)

[9] 徐国强,陶智,丁水汀,等. 高位垂直进气旋转盘流动与换热的实验研究[J]. 航空动力学报,2000,15(2):164-168.
XU Guoqiang,TAO Zhi,DING Shuiting,et al. Experimental investigation on flow and heat transfer in shrouded rotating disk with high-positioned air inflow[J]. Journal of Aerospace Power,2000,15(2):164-168. (in Chinese)

[10] 徐国强,张笙,罗翔,等. 高位垂直进气径向出流旋转盘腔换热的实验研究[J]. 航空动力学报,2006,21(5):820-823.
XU Guoqiang,ZHANG Sheng,LUO Xiang,et al. Experimental investigation on flow and heat transfer in shrouded rotating disk with high-positioned air inflow[J]. Journal of Aerospace Power,2006,21(5):820-823. (in Chinese)

[11] 徐国强,陶智,丁水汀,等. 中心进气旋转盘流动与换热的数值研究[J]. 航空动力学报,2000,15(2):169-173.
XU Guoqiang,TAO Zhi,DING Shuiting,et al. Numerical study on flow and heat transfer in shrouded rotating disk system with central air inflow[J]. Journal of Aerospace Power,2000,15(2):169-173. (in Chinese)

[12] 徐国强,赵熙,罗翔,等. 直接供气预旋转静系的换热[J]. 航空动力学报,2012,27(10):2161-2168.
XU Guoqiang,ZHAO Xi,LUO Xiang,et al. Heat transfer in direct transfer pre-swirl rotor-stator system[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(10):2161-2168. (in Chinese)

[13] 闻洁,赵桂林,陶智,等. 红外成像仪用于传热实验的研究[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(8):700-703.
WEN Jie,ZHAO Guilin,TAO Zhi,et al. Studies on infrared camera using in heat transfer experiments[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2003,29(8):700-703. (in Chinese)

[14] PELLE J,HARMAND S. Convective heat transfer in a rotor stator system air gap with multiple suctions of fluid through the stator[J]. Journal of Heat Transfer,2011,133(7):165-180.

[15] 张达,罗翔,徐国强,等. 转静系盘腔转盘风阻温升实验[J]. 航空动力学报,2015,30(5):1047-1056.
ZHANG Da,LUO Xiang,XU Guoqiang,et al. Windage heating experiment on rotating disc in cavity of rotor-stator system[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(5):1047-1056. (in Chinese)

[16] 徐凤花. 示温漆技术在航空发动机高温部件表面温度测试上的应用研究[D]. 成都:电子科技大学,2009.

[17] 熊庆荣,朱国成,钟明. 三头部燃烧室火焰筒壁面温度测试研究[J]. 航空动力学报,2016,31(4):775-779.
XIONG Qingrong,ZHU Guocheng,ZHONG Ming. Experiment investigation of temperature measurement on the wall of flame tube for a triple combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(4):775-779. (in Chinese)

[18] 徐国强,詹国治,丁水汀,等. 高位垂直进气转静系旋转盘流动与换热计算[J]. 推进技术,2000,21(4):40-43.
XU Guoqiang,ZHAN Guozhi,DING Shuiting,et al. Numerical calculation for flow and heat transfer of a shrouded rotating disk with high-positioned air-inlet[J]. Journal of Propulsion Technology,2000,21(4):40-43. (in Chinese)

(编辑:陈 越)