

文章编号: 1000-8055(2009)09-1945-07

双参数传热实验的液晶瞬态测量不确定度分析

白江涛, 朱惠人, 刘存良
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 以气膜冷却为例, 利用多元隐函数求导的方法推导了双参数传热实验中采用液晶进行瞬态测量时的双参数不确定度计算关系式, 采用不确定度传递系数研究了双参数不确定度与温度测量不确定度的关系, 得到了不确定度传递系数随主流及二次流无量纲温度的变化曲线, 分析了主流及二次流无量纲温度参数对双参数测量不确定度的影响. 结果表明, 提高主流温度或者增大两次测量中二次流的温差可以减小实验双参数测量不确定度.

关 键 词: 双参数传热; 瞬态测量; 液晶; 不确定度

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Analysis of uncertainties in two-parameter transient heat transfer measurements with liquid crystal

BAI Jiang-tao, ZHU Hui-ren, LIU Cui-liang

(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: This paper introduced a method of measuring heat transfer coefficient and dimensionless heat transfer temperature in transient film cooling measurements with liquid crystal, and through the uncertainties of heat transfer coefficient and dimensionless heat transfer temperature, analyzed the impact of dimensionless main flow temperature and dimensionless secondary flow temperature on two-parameters' uncertainties amplification parameters. The results indicate that, increasing the main flow temperature or increasing the difference between two measurements' secondary flow temperatures will decrease the uncertainties of heat transfer coefficient and dimensionless heat transfer temperature.

Key words: two-parameter heat transfer; transient measurements; liquid crystal; uncertainties

传热实验有很多种测量方法, 其中液晶瞬态测量方法由于液晶的非接触、全表面、高分辨率及高空间分辨率等优点^[1]和瞬态实验极短的测试时间及低维护费用等优点, 而在国际上被广泛应用于传热实验研究中. 文献[2]详细介绍了液晶瞬态测量方法在涡轮叶片换热实验中的应用, 文献[3-4]研究了液晶瞬态测量方法在冲击换热中的应用, 文献[5]介绍了一种气膜冷却实验的液晶

瞬态测量方法, 文献[6-7]分别在 1995 年和 2000 年综述了多种液晶瞬态测量方案. 在国内, 该项测量技术还未受到普遍重视, 目前仅有少量研究报告, 文献[8-9]介绍了采用液晶测量传热系数的实验方案, 文献[10]介绍了气膜加热实验中使用一种液晶通过两次或者多次测量获取传热系数和无量纲换热温度双参数的实验方案.

目前的传热实验多数属于单参数传热实验或

收稿日期: 2008-08-31; 修订日期: 2009-03-25

基金项目: 国家 973 计划(2007CB707701).

作者简介: 白江涛(1984-), 男, 河南漯河人, 博士生, 研究领域: 航空发动机高温部件冷却技术.

双参数传热实验,单参数传热实验中仅有传热系数一个待求量,多数单股流流动换热实验属于此类实验;双参数传热实验中有两个待求量,例如气膜加热或冷却实验中,除了传热系数这个待求量以外,由于两股气流的掺混作用而使得气流换热温度在不同位置处数值不同,成为第二个待求量.

双参数传热实验的液晶瞬态测量方法有两种:一种是采用两种液晶通过一次瞬态测量获取两个待求量,另一种方法是采用一种液晶通过两次瞬态测量获取两个待求量.由于液晶瞬态测量方法涉及较为复杂的非稳态导热理论,在双参数传热实验中,需要求解两个或者更多隐函数方程才能得到两个待求量,因此其测量不确定度的分析较为复杂,相关的系统研究较少.文献[11]研究了第一种方法的测量不确定度,本文将研究第二种方法的测量不确定度.

1 双参数传热实验及液晶瞬态测量方法简介

1.1 双参数传热实验简介

气膜冷却实验是一种典型的双参数传热实验,气膜冷却的简单示意图如图 1 所示.换热实验需要测量求解传热系数,传热系数的定义为

$$h = \frac{q_w}{T_{aw} - T_w} \tag{1}$$

其中 h 为传热系数, q_w 为通过壁面的热流量, T_w 为壁面温度, T_{aw} 为气流的换热温度(气膜冷却中常称为绝热壁温,其实际物理含义为参与换热的气流温度,而不是壁面温度).气流的换热温度与主流和二次流温度、与主流和二次流流动掺混状况相关,在不同位置处气流的换热温度不同,直接测量极为困难,因此传热系数计算公式中存在传热系数和气流的换热温度两个待求量,故该类实验被称为双参数传热实验.

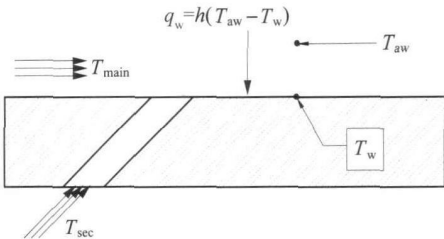


图 1 气膜冷却示意图

Fig. 1 Illustration of film cooling

气流的换热温度常被定义为

$$T_{aw} = \eta(T_{sec} - T_{main}) + T_{main} \tag{2}$$

其中 T_{aw} 为气流的换热温度, η 为无量纲换热温度(气膜冷却中亦称为绝热有效温比或气膜冷却效率)且 $\eta \in [0, 1]$, T_{main} 为主流温度, T_{sec} 为二次流温度.文献[12]证明,气膜冷却实验中不同位置处的无量纲换热温度

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_{main}}{T_{sec} - T_{main}} \tag{3}$$

与主流和二次流的温度无关,仅仅与主流和二次流的流动相关,因此在双参数传热实验研究中,多数研究者采用无量纲换热温度和传热系数这两个仅仅与流动相关的量进行双参数传热实验研究.

1.2 液晶瞬态测量方法简介

液晶瞬态测量方法在文献[7-11]中有较为详细的介绍,文献[7-11]给出瞬态实验中主流温度和二次流温度均为阶跃变化时壁面温度的变化公式

$$\frac{T_w - T_i}{T_{aw} - T_i} = 1 - e^{\left(\frac{h}{\sqrt{k}}\right)^2} \operatorname{erfc}\left(h \sqrt{\frac{t}{k}}\right) \tag{4}$$

其中 T_w 为壁面温度, T_i 为实验初始温度, T_{aw} 为气流的换热温度, h 为传热系数, t 为瞬态实验时间, $k = \rho c_p \lambda$ 为壁面材料的吸热系数.将公式(2)代入公式(4)可得

$$\frac{\eta(T_{sec} - T_{main}) + T_{main} - T_i}{T_{aw} - T_i} = 1 - e^{\left(\frac{h}{\sqrt{k}}\right)^2} \operatorname{erfc}\left(h \sqrt{\frac{t}{k}}\right) \tag{5}$$

由公式(5)可知,在给定传热系数 h 、无量纲换热温度 η 、主流温度 T_{main} 、二次流温度 T_{sec} 和初始温度 T_i 条件下,可以计算得到温度发生阶跃变化后任意 t 时刻的壁面温度 T_w .液晶瞬态测量方法利用上述相反的思路,实验中液晶颜色变化时的壁面温度 T_w 可以通过校准获得,同时记录壁面液晶变色的时刻 t ,利用公式(5)可以计算传热系数 h 和无量纲换热温度 η .实验采用的窄带液晶变色温度固定唯一,这使得液晶仅能测量出一个壁面温度值 T_w ,实验中通过改变主流或者二次流温度使得掺混后气流的换热温度改变,这同时使得液晶达到变色温度的时间 t 改变,这样经过两次测量构造两个方程,就可以计算出传热系数 h 和无量纲换热温度 η 两个参数.本文将研究通过改变二次流温度进行两次测量获得传热系数和无量纲换热温度这种实验方法的测量不确定

度; 两次测量时的主流温度相同, 二次流温度不同, 并且主流温度与二次流温度的变化均为阶跃变化, 即

$$T_{\text{main}} = \begin{cases} T_i & t \leq 0^- \\ T_{\text{main}} & t \geq 0^+ \end{cases}, \quad T_{\text{sec1}} = \begin{cases} T_i & t \leq 0^- \\ T_{\text{sec1}} & t \geq 0^+ \end{cases}, \\ T_{\text{sec2}} = \begin{cases} T_i & t \leq 0^- \\ T_{\text{sec2}} & t \geq 0^+ \end{cases}, \quad T_{\text{sec1}} \neq T_{\text{sec2}}.$$

2 双参数测量不确定度分析

2.1 双参数不确定度

实验时, 通过改变二次流温度, 进行两次测量, 根据公式(4)由两次测量构造出两个方程

$$\eta \left(\frac{T_w - T_i}{T_{\text{sec1}} - T_{\text{main}}} + \frac{T_{\text{main}} - T_i}{T_{\text{main}} - T_i} \right) = \Theta_1 = f(\alpha_1) = f \left(h \sqrt{\frac{t_1}{k}} \right) \quad (6)$$

$$\eta \left(\frac{T_w - T_i}{T_{\text{sec2}} - T_{\text{main}}} + \frac{T_{\text{main}} - T_i}{T_{\text{main}} - T_i} \right) = \Theta_2 = f(\alpha_2) = f \left(h \sqrt{\frac{t_2}{k}} \right) \quad (7)$$

其中 $\Theta = \theta_w / \theta_{\text{aw}}$, $\theta_w = T_w - T_i$, $\theta_{\text{aw}} = T_{\text{aw}} - T_i$, $f(\alpha) = 1 - e^{\alpha^2} \operatorname{erfc}(\alpha)$, $\alpha = h \sqrt{t/k}$. 易知传热系数 h 和无量纲换热温度 η 为主流温度 T_{main} 、二次流温度 T_{sec1} T_{sec2} 、初始温度 T_i 、液晶变色壁面温度 T_w 、液晶变色时间 t_1 , t_2 和物性参数 k 的函数, 即

$$h = g_1(T_w, T_i, T_{\text{main}}, T_{\text{sec1}}, T_{\text{sec2}}, t_1, t_2, k) \quad (8)$$

$$\eta = g_2(T_w, T_i, T_{\text{main}}, T_{\text{sec1}}, T_{\text{sec2}}, t_1, t_2, k) \quad (9)$$

由文献[13]不确定度传递公式知

$$P_h^2 = \left(\frac{\partial h}{\partial T_w} \right)^2 P_{T_w}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_i} \right)^2 P_{T_i}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_{\text{main}}} \right)^2 P_{T_{\text{main}}}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_{\text{sec1}}} \right)^2 P_{T_{\text{sec1}}}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_{\text{sec2}}} \right)^2 P_{T_{\text{sec2}}}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial t_1} \right)^2 P_{t_1}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial t_2} \right)^2 P_{t_2}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial k} \right)^2 P_k^2 \quad (10)$$

$$P_\eta^2 = \left(\frac{\partial \eta}{\partial T_w} \right)^2 P_{T_w}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T_i} \right)^2 P_{T_i}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T_{\text{main}}} \right)^2 P_{T_{\text{main}}}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T_{\text{sec1}}} \right)^2 P_{T_{\text{sec1}}}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T_{\text{sec2}}} \right)^2 P_{T_{\text{sec2}}}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial t_1} \right)^2 P_{t_1}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial t_2} \right)^2 P_{t_2}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial k} \right)^2 P_k^2 \quad (11)$$

其中 P_x 为 x 变量的不确定度.

2.1.1 传热系数不确定度推导

从公式(6)和公式(7)出发, 构建不包含无量纲换热温度 η 的关系式 S

$$0 = \eta_1 - \eta_2 = \frac{(T_w - T_i) / \Theta_1 - (T_{\text{main}} - T_i)}{T_{\text{sec1}} - T_{\text{main}}} - \frac{(T_w - T_i) / \Theta_2 - (T_{\text{main}} - T_i)}{T_{\text{sec2}} - T_{\text{main}}} = \frac{(T_w - T_i) / f \left(h \sqrt{\frac{t_1}{k}} \right) - (T_{\text{main}} - T_i)}{T_{\text{sec1}} - T_{\text{main}}} - \frac{(T_w - T_i) / f \left(h \sqrt{\frac{t_2}{k}} \right) - (T_{\text{main}} - T_i)}{T_{\text{sec2}} - T_{\text{main}}} = S \quad (12)$$

S 是传热系数 h 的隐函数, 利用隐函数的偏导数关系, 求出式(10)中所需的偏导数, 最终整理得到

$$\frac{P_h^2}{h^2} = \left\{ \left[\frac{1}{\Theta_1} - K \frac{1}{\Theta_2} \right]^2 \frac{P_{T_w}^2}{\theta_w^2} + \left[- \left(\frac{1}{\Theta_1} - 1 \right) + K \left(\frac{1}{\Theta_2} - 1 \right) \right]^2 \frac{P_{T_i}^2}{\theta_w^2} + [(-1 + \eta)(1 - K)]^2 \frac{P_{T_{\text{main}}}^2}{\theta_w^2} + (-\eta)^2 \frac{P_{T_{\text{sec1}}}^2}{\theta_w^2} + (K\eta)^2 \frac{P_{T_{\text{sec2}}}^2}{\theta_w^2} \right\} \setminus \left[- \frac{1}{\Theta_1} \frac{1}{\Phi} + K \frac{1}{\Theta_2} \frac{1}{\Phi} \right]^2 + \left[- \frac{1}{2} \right]^2 \left[\frac{1}{(-1 + K \frac{\Theta_1}{\Theta_2} \frac{\Phi_1}{\Phi_2})^2} \frac{P_{t_1}^2}{t_1^2} + \left[- \frac{1}{K \frac{\Theta_2}{\Theta_1} \frac{\Phi_2}{\Phi_1} + 1} \right]^2 \frac{P_{t_2}^2}{t_2^2} + \frac{P_k^2}{k^2} \right] \quad (13)$$

其中 $K = \theta_{\Delta 1} / \theta_{\Delta 2}$, $\theta_{\Delta} = \theta_{\text{sec}} - \theta_{\text{main}}$, $\theta_{\text{main}} = T_{\text{main}} - T_i$, $\theta_{\text{sec}} = T_{\text{sec}} - T_i$, $\Phi = f(\alpha) / [\alpha f'(\alpha)]$, $f'(\alpha) = df/d\alpha = 2[\alpha(f(\alpha) - 1) + \pi^{-1/2}]$.

2.1.2 无量纲换热温度不确定度推导

从公式(6)和公式(7)出发, 构建不包含传热系数 h 的关系式 Q

$$0 = h - h = \frac{\alpha_1}{(t_1/k)^{0.5}} - \frac{\alpha_2}{(t_2/k)^{0.5}} = \frac{F^{-1}(\Theta_1)}{(t_1/k)^{0.5}} - \frac{F^{-1}(\Theta_2)}{(t_2/k)^{0.5}} = \frac{F^{-1} \left[\frac{T_w - T_i}{\eta(T_{\text{sec1}} - T_{\text{main}}) + T_{\text{main}} - T_i} \right]}{(t_1/k)^{0.5}} - \frac{F^{-1} \left[\frac{T_w - T_i}{\eta(T_{\text{sec2}} - T_{\text{main}}) + T_{\text{main}} - T_i} \right]}{(t_2/k)^{0.5}} = Q \quad (14)$$

Q 是无量纲换热温度 η 的隐函数, 利用隐函数的偏导数关系, 求出式(11)中所需的偏导数, 最终整

理得到

$$\begin{aligned} \frac{P_{\eta}^2}{\eta^2} = & \left\{ \left[\frac{1}{\eta} (\Theta_1 - \Theta_2) \right]^2 \frac{P_{T_w}^2}{\Theta_w^2} + \right. \\ & \left. \left[\frac{1}{\eta} [\Theta_1 (-1 + \Theta_1) - \Theta_2 (-1 + \Theta_2)] \right]^2 \frac{P_{T_i}^2}{\Theta_w^2} + \right. \\ & \left. \left[\left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) (-\Theta_1 \Theta_1 + \Theta_2 \Theta_2) \right]^2 \frac{P_{T_{\text{main}}}^2}{\Theta_w^2} + \right. \\ & \left. (-\Theta_1 \Theta_1)^2 \frac{P_{T_{\text{sec1}}}^2}{\Theta_w^2} + (\Theta_2 \Theta_2)^2 \frac{P_{T_{\text{sec2}}}^2}{\Theta_w^2} + \right. \\ & \left. \left[-\frac{1}{2\eta} \right]^2 \frac{P_{t_1}^2}{t_1^2} + \left[\frac{1}{2\eta} \right]^2 \frac{P_{t_2}^2}{t_2^2} \right\} \setminus \\ & \left[-\left[-\Theta_1 \Theta_1 \frac{\Theta_{\Delta 1}}{\Theta_w} + \Theta_2 \Theta_2 \frac{\Theta_{\Delta 2}}{\Theta_w} \right] \right]^2 \end{aligned} \quad (15)$$

至此, 公式(13)和(15)给出了传热系数和无量纲换热温度测量不确定度的计算关系式, 可以看出计算关系式比较复杂, 下面我们对计算式作一定假设并简化计算式.

2.1.3 双参数不确定度传递系数

实验中, 壁面温度 T_w 由使用热电偶校准的窄带液晶测量获得, 其余温度 T_{main} , T_{sec1} , T_{sec2} , T_i 由热电偶直接测量获得, 所有温度值的测量不确定度均取决于热电偶, 校准与测量使用同一型号热电偶时可以假定 $P_{T_w} = P_{T_i} = P_{T_{\text{main}}} = P_{T_{\text{sec1}}} = P_{T_{\text{sec2}}} = P_T$ (或者, 所有温度的测量不确定度均取最大的测量不确定度, 这将使得双参数不确定度略微放大), 同时由于 t_1 , t_2 , k 的不确定度很小, 可以忽略掉, 则传热系数和无量纲换热温度的不确定度公式可以整理为

$$\frac{P_h^2}{h^2} = \Phi_h^2 \frac{P_T^2}{\Theta_w^2} \quad (16)$$

$$\frac{P_{\eta}^2}{\eta^2} = \Phi_{\eta}^2 \frac{P_T^2}{\Theta_w^2} \quad (17)$$

其中 Φ_h 为传热系数的不确定度传递系数,

$$\begin{aligned} \Phi_h^2 = & \left\{ \left[\frac{1}{\Theta_1} - K \frac{1}{\Theta_2} \right]^2 + \right. \\ & \left. \left[-\left[\frac{1}{\Theta_1} - 1 \right] + K \left[\frac{1}{\Theta_2} - 1 \right] \right]^2 + \right. \\ & \left. [(-1 + \eta)(1 - K)]^2 + (-\eta)^2 + (K\eta)^2 \right\} \setminus \\ & \left[-\frac{1}{\Theta_1} \frac{1}{\Phi} + K \frac{1}{\Theta_2} \frac{1}{\Phi} \right]^2 \end{aligned} \quad (18)$$

其中 Φ_{η} 为无量纲换热温度的不确定度传递系数,

$$\begin{aligned} \Phi_{\eta}^2 = & \left\{ \left[\frac{1}{\eta} (\Theta_1 - \Theta_2) \right]^2 + (-\Theta_1 \Theta_1)^2 + (\Theta_2 \Theta_2)^2 + \right. \\ & \left. \left[\frac{1}{\eta} [\Theta_1 (-1 + \Theta_1) - \Theta_2 (-1 + \Theta_2)] \right]^2 + \right. \\ & \left. \left[\left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) (-\Theta_1 \Theta_1 + \Theta_2 \Theta_2) \right]^2 \right\} \setminus \\ & \left[-\left[-\Theta_1 \Theta_1 \frac{\Theta_{\Delta 1}}{\Theta_w} + \Theta_2 \Theta_2 \frac{\Theta_{\Delta 2}}{\Theta_w} \right] \right]^2 \end{aligned} \quad (19)$$

由本文 1.1 节知, 传热系数 h 和无量纲换热温度 η 与测量时的主流及二次流温度无关, 可以通过公式(6)和(7)两式联立解出; 实验测量中, 热电偶温度测量不确定度 P_T 和环境温度 T_i 均为确定值, 使用同种液晶测量时, 液晶变色时的壁面温度 T_w 恒定不变. 因此由公式(16)和(17)两式可知, 传热系数 h 和无量纲换热温度 η 的不确定度 P_h , P_{η} 取决于不确定度传递系数 Φ_h 和 Φ_{η} . 由于不确定度传递系数 Φ_h , Φ_{η} 中含有无量纲换热温度 η , 所以不确定度传递系数 Φ_h , Φ_{η} 在实验测量的不同无量纲换热温度 η 处数值不同, 但实验测量的不确定度由实验测量不同位置处最大的不确定度所决定, 也就是由最大的不确定度传递系数所决定, 因此我们主要分析在无量纲换热温度 $\eta \in 0 \sim 1$ 范围内的最大不确定度传递系数 $\Phi_{h, \text{max}}$, $\Phi_{\eta, \text{max}}$.

2.2 双参数不确定度传递系数曲线

传热系数和无量纲换热温度的不确定度传递系数 Φ_h , Φ_{η} 中包含了主流温度 T_{main} 、两个二次流温度 T_{sec1} , T_{sec2} 、壁面温度 T_w 和环境初始温度 T_i 这 5 个温度参数, 为便于分析, 将主流与二次流温度无量纲化为

$$K_{\text{main}} = (T_{\text{main}} - T_i) / (T_w - T_i) \quad (20)$$

$$K_{\text{sec1}} = (T_{\text{sec1}} - T_i) / (T_w - T_i) \quad (21)$$

$$K_{\text{sec2}} = (T_{\text{sec2}} - T_i) / (T_w - T_i) \quad (22)$$

易知不确定度传递系数 Φ_h , Φ_{η} 为 K_{main} , K_{sec1} , K_{sec2} 的函数. 根据 2.1 讨论, 我们将主要分析无量纲温度 K_{main} , K_{sec1} , K_{sec2} 对最大不确定度传递系数 $\Phi_{h, \text{max}}$, $\Phi_{\eta, \text{max}}$ 的影响.

由于(18), (19)两式比较复杂, 为便于研究者进行不确定度分析, 作者利用公式(18)和公式(19)计算不同 K_{main} , K_{sec1} , K_{sec2} , η 条件下传热系数和无量纲换热温度的不确定度传递系数, 整理 $\eta \in 0 \sim 1$ 范围内传热系数和无量纲换热温度最大

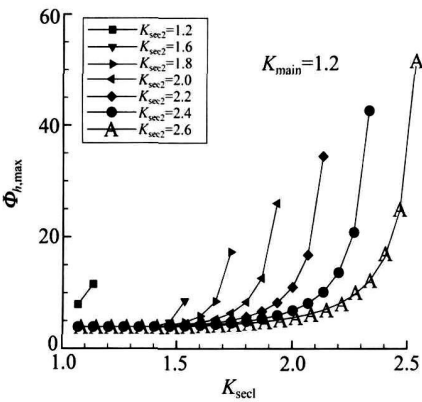


图 2 $K_{main}=1.2$ 时传热系数最大不确定度传递系数
Fig. 2 Maximum heat transfer coefficient uncertainties amplification parameters at $K_{main}=1.2$

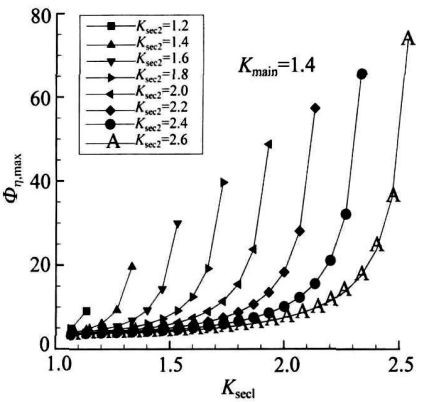


图 5 $K_{main}=1.4$ 时无量纲换热温度最大不确定度传递系数
Fig. 5 Maximum dimensionless heat transfer temperature uncertainties amplification parameters at $K_{main}=1.4$

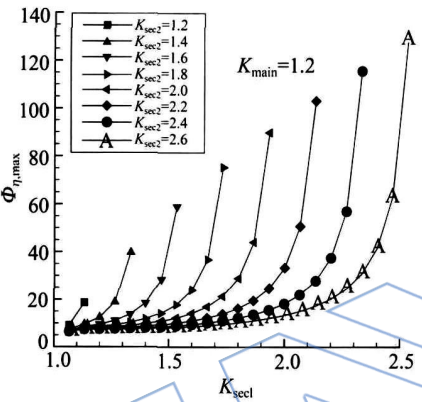


图 3 $K_{main}=1.2$ 时无量纲换热温度最大不确定度传递系数
Fig. 3 Maximum dimensionless heat transfer temperature uncertainties amplification parameters at $K_{main}=1.2$

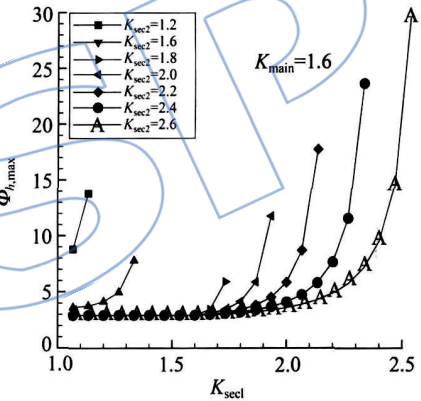


图 6 $K_{main}=1.6$ 时传热系数最大不确定度传递系数
Fig. 6 Maximum heat transfer coefficient uncertainties amplification parameters at $K_{main}=1.6$

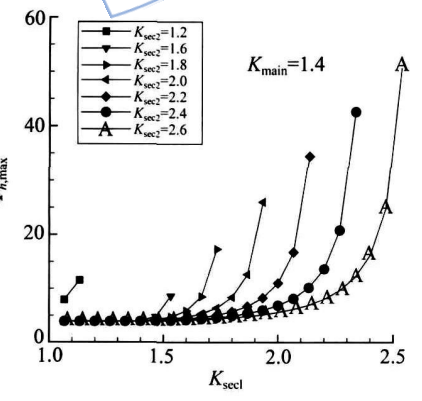


图 4 $K_{main}=1.4$ 时传热系数最大不确定度传递系数
Fig. 4 Maximum heat transfer coefficient uncertainties amplification parameters at $K_{main}=1.4$

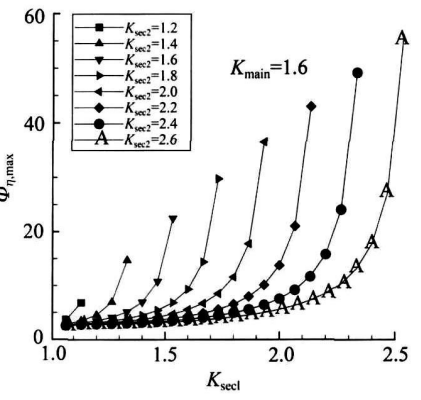


图 7 $K_{main}=1.6$ 时无量纲换热温度最大不确定度传递系数
Fig. 7 Maximum dimensionless heat transfer temperature uncertainties amplification parameters at $K_{main}=1.6$

不确定度传递系数 $\Phi_{h,max}$, $\Phi_{\eta,max}$ 随主流及二次流无量纲温度 K_{main} , K_{sec1} , K_{sec2} 的变化曲线如图 2 至图 11 所示。

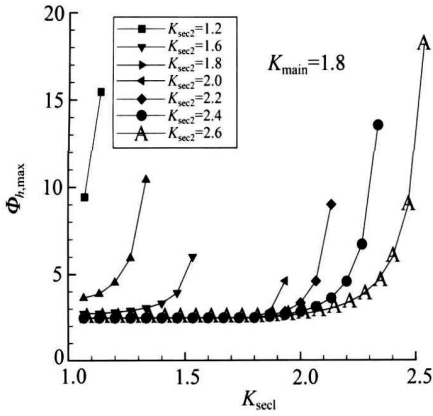


图 8 $K_{main}=1.8$ 时传热系数最大不确定度传递系数
Fig. 8 Maximum heat transfer coefficient uncertainties amplification parameters at $K_{main}=1.8$

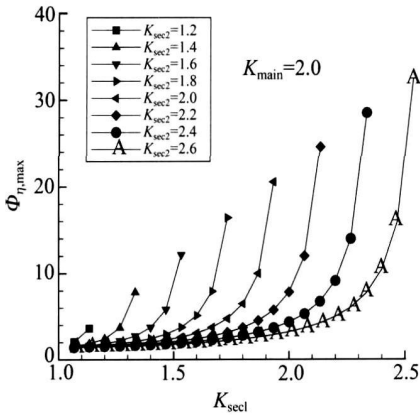


图 11 $K_{main}=2.0$ 无量纲换热温度最大不确定度传递系数
Fig. 11 Maximum dimensionless heat transfer temperature uncertainties amplification parameters at $K_{main}=2.0$

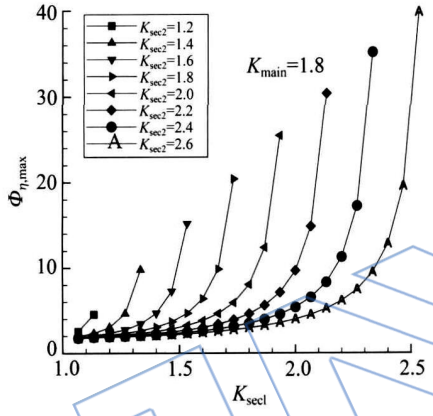


图 9 $K_{main}=1.8$ 时无量纲换热温度最大不确定度传递系数
Fig. 9 Maximum dimensionless heat transfer temperature uncertainties amplification parameters at $K_{main}=1.8$

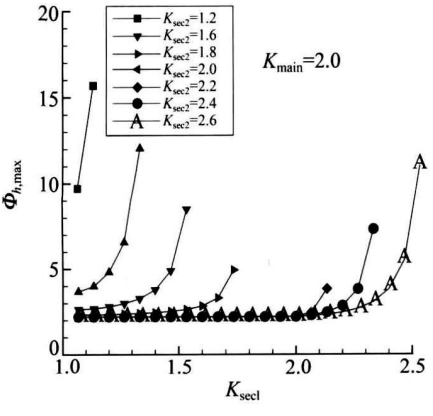


图 10 $K_{main}=2.0$ 时传热系数最大不确定度传递系数
Fig. 10 Maximum heat transfer coefficient uncertainties amplification parameters at $K_{main}=2.0$

3 不确定度分析讨论

图 2~ 图 11 给出了 5 个主流无量纲温度 K_{main} 、多个二次流无量纲温度 K_{sec1} , K_{sec2} 条件下的传热系数和无量纲换热温度最大不确定度传递系数曲线,基本上覆盖了实验中常用的无量纲温度范围,这些数据将方便研究者进行实验不确定度分析。

单独分析图 2 或图 3 可以看出,传热系数和无量纲换热温度的不确定度传递系数随两个二次流无量纲温度 K_{sec1} , K_{sec2} 差值的减小而增大,在两个无量纲温度相同的地方,最大不确定度传递系数无穷大;实际上,两个二次流无量纲温度相同时,由文章 1.2 节阐述可知,此时两次测量的所有条件就相同了,实验相当于仅仅进行一次测量而已,一次测量无法求解两个待求量。对比分析图 2、图 4、图 6、图 8、图 10 或者图 3、图 5、图 7、图 9、图 11 可以看出,随主流无量纲温度升高,传热系数和无量纲换热温度的最大不确定度传递系数降低。上述的最大不确定度传递系数 $\Phi_{h,max}$, $\Phi_{T,max}$ 随无量纲温度参数 K_{main} , K_{sec1} , K_{sec2} 的变化规律可以总结为:

- 1) 最大不确定度传递系数 $\Phi_{h,max}$, $\Phi_{T,max}$ 随主流无量纲温度 K_{main} 的增大而减小;
- 2) 最大不确定度传递系数 $\Phi_{h,max}$, $\Phi_{T,max}$ 在二次流无量纲温度 K_{sec1} , K_{sec2} 差值较大时较小。

在液晶变色温度 T_w 、环境初始温度 T_i 和热电偶测量误差 P_T 确定的条件下,提高主流温度

T_{main} 可以增大主流无量纲温度 K_{main} , 减小最大不确定度传递系数 $\Phi_{h_{\text{max}}}$, $\Phi_{1_{\text{max}}}$, 减小传热系数和无量纲换热温度的测量不确定度 P_h , P_{η} ; 调节两次测量时的二次流温度 T_{secl} , T_{sec2} 使之温值较大, 可以增大二次流无量纲温度 K_{secl} , K_{sec2} 的差值, 减小最大不确定度传递系数 $\Phi_{h_{\text{max}}}$, $\Phi_{1_{\text{max}}}$, 减小传热系数和无量纲换热温度的测量不确定度 P_h , P_{η} .

4 结 论

本文以气膜冷却双参数传热问题为例, 简单介绍了使用一种液晶进行两次测量获取传热系数和无量纲换热温度的瞬态实验方法, 推导了该测量方法中传热系数和无量纲换热温度的不确定度计算关系式, 采用不确定度传递系数研究了双参数不确定度与温度测量不确定度的关系, 得到了最大不确定度传递系数随主流及二次流无量纲换热温度的变化曲线, 分析了主流无量纲温度和二次流无量纲温度对传热系数和无量纲换热温度不确定度的影响. 结果表明, 使用确定变色温度的液晶在确定的初始温度条件下, 提高主流温度或者增大两次测量中二次流的温度差值可以减小实验不确定度. 文中所得到的不确定度计算关系式可以用于同类双参数传热实验测量不确定度分析, 同时本文给出了不确定度传递系数曲线以方便研究者分析双参数测量不确定度.

参考文献:

- [1] 吴宗善. 热色液晶定量测热显示技术[J]. 流体力学实验与测量, 1997, 11(1): 83-87.
WU Zongshan A measuring heat visualization technique using thermochromic liquid crystals[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics 1997, 11(1): 83-87. (in Chinese)
- [2] Ekkad S V, Han J C A transient liquid crystal thermography technique for gas turbine heat transfer measurements[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(7): 957-968
- [3] LIN Mingjie, WANG Ting A transient liquid crystal method using a 3D inverse transient conduction scheme[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(17): 3491-3501
- [4] WANG Ting, LIN Mingjie, Bunker R S Flow and heat transfer of confined impingement jets cooling using a 3D transient liquid crystal scheme[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(23): 4887-4903
- [5] CHEN Pinghe, DING Peipei, Al Di An improved data reduction method for transient liquid crystal thermography on film cooling measurements[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(7): 1379-1387
- [6] Baughn J W. Liquid crystal methods for studying turbulent heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 16(5): 365-375
- [7] Ireland P T, Jones T V. Liquid crystal measurements of heat transfer and surface shear stress[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 1(7): 969-985
- [8] 郭涛, 朱惠人, 许都纯, 等. 热色液晶瞬态测量全表面换热系数的技术研究[J]. 测控技术, 2006, 25(9): 67-69
GUO Tao, ZHU Huiren, XU Duchun, et al Research on transient measurement of heat transfer coefficient distribution with liquid crystal technique[J]. Measurement and Control Technology, 2006, 25(9): 67-69. (in Chinese)
- [9] 朱惠人, 郭涛, 张丽, 等. 瞬态液晶技术测量带侧向流扰流柱通道端壁换热[J]. 推进技术, 2007, 28(6): 620-623
ZHU Huiren, GUO Tao, ZHANG Li, et al Measurements of endwall heat transfer in pin fin array duct with lateral flow by using transient liquid crystal technique[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(6): 620-623. (in Chinese)
- [10] 梁卫颖, 朱惠人, 郭涛, 等. 利用液晶瞬态技术测量离散缝的气膜加热效率及换热系数[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(4): 501-504
LIANY Weiying, ZHU Huiren, GUO Tao, et al New transient state measurements of film heated effectiveness and heat transfer coefficients of the discrete slots with liquid crystal technique[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(4): 501-504. (in Chinese)
- [11] YAN Youyou, Owen J M. Uncertainties in transient heat transfer measurements with liquid crystal[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23(1): 29-35
- [12] Gritsch M, Baldauf S, Martiny M, et al The superposition approach to local heat transfer coefficients in high density ratio film cooling flows[R]. ASME 99-GT-168
- [13] Kline S J, McClintock F A. Describing uncertainties in single sample experiments[J]. Mechanical Engineering, 1953, 75(1): 3-8