

用热膜风速仪对气膜 冷却流场湍流强度的测量

力学所一室 气膜冷却研究组
化冶所射流组

一、前言

平板气膜冷却流场里,主流和射流混合后,形成半壁射流的内外两个混合边界。如图 1 所示。主流和射流的初始湍流强度直接影响两股气流的掺混程度。因而影响了气膜冷却的效率和气膜层的稳定性。

近年来,人们开始研究用降低湍流强度的方法,提高气膜冷却效率的可能性。研究湍流强度对气膜冷却效果的影响是有意义的。朱哈茨和马雷克(Juhasz—Marek, 参^[7])提出了气膜冷却绝热温比的湍流强度修正公式:

$$\eta = \frac{1}{1 + C_0 \frac{x}{Ms}} \quad (1)$$

式中 C_0 是湍流混合系数。它是由主流的初始湍流强度 ε_r 和射流的初始湍流强度 ε_s 所组成。 ε_r 和 ε_s 两者在 C_0 中所占比例,可采用维诺格拉多夫(ВИНОГРАДОВ)等^[11]的计算公式:

$$C_0 = \varepsilon_r + 0.4 (|\varepsilon_s - \varepsilon_r|) \quad (2)$$

本文的目的是测出气膜冷却实验台的 ε_r 和 ε_s 值,对以前在该实验台上做出的有效温比公式^[12]进行湍流强度的修正,进而提高气膜冷却壁温计算的准确性。同时,测量非等温气膜流场湍流强度分布,找出其基本规律。

设计平板气膜冷却实验段时,为了控制边界层的形成,平板的隔板前端,加了一个劈体起始段,见图 1。测量结果表明,劈体产生一定的湍流。^[9]曾用氢气泡示踪法定性地观察了劈体产生的湍流流动。图 1 也给出了^[10]氢气泡的示踪图。由于本实验台的湍流强度较低,所以得出的绝热温比 η 偏高。在实际燃气轮机的燃烧室和叶片通道里,由于掺混孔、涡流器、转动叶栅等复杂部件的存在,显著增加了气流的湍流强度,因而使 η 值降低。

最近,我们用热膜风速仪在平板气膜冷却实验台上进行了湍流强度的测量。同时,用热膜风速仪测量了非等温流场的速度分布和脉动速度。速度分布的测量结果与皮脱管

的测量结果进行了对比。气膜冷却流场是非等温的。温度场的变化给热膜风速仪的标定带来一定的困难。目前文献中很少有这方面的报导^[6,8]因而,本实验过程中,需要对这些方面的测试和标定技术进行探索。并通过实践,提出了热膜测头电桥电压随皮克列堤准则变化的校正曲线,以及气流速度为零时测头电桥电压随环境温度变化的曲线。从而得出了平板气膜冷却非等温流场的湍流强度分布,以及流场的速度分布和脉动速度分布。

为了解决温度场的不均匀给热膜风速仪的标定带来的困难,我们先用恒温槽标定了速度为零时,热膜测头在不同温度下的电桥电压 V 。根据这条曲线进行了热膜测头的静态温度修正。然后,根据热膜测头的换热量与皮克列堤准则 Pe 成比例的关系,建立了电桥电压 V 和皮克列堤准则的动态校正曲线。从这些校正曲线即可确定流场的速度 U ,电桥电压随速度的变化梯度 dV/dU ,脉动速度的均方根值 $\sqrt{u^2}$ 和湍流强度 ϵ 等。

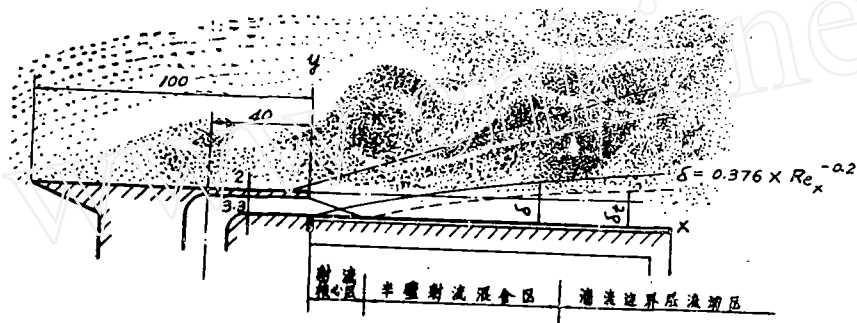


图1 本文平板湍流气膜冷却流场和^[8]氢气泡示踪图

二、热膜风速仪的标定

2.1 热膜风速仪测头的湍流换热

用热膜风速仪测定气流的平均速度 U 和脉动速度的均方根值 $\sqrt{u^2}$ 时,实际上是分别测定电加热的热膜测头与气流间的平均换热量和脉动换热量的均方根值。所以,热膜风速仪的测量原理是测定热膜测头与气流间的湍流换热特性。热膜风速仪在等温条件下(即CTA条件下)工作时,热膜测头与气流间的湍流换热量直接由加热电桥的电压 V 反映出来。本实验中,热膜测头DISA 55R33的工作温度调到 $T_{\text{SENSOR}} = 320^\circ\text{C}$ 。脉动换热量和速度脉动值的方均根则通过真空热电偶的原理,由方均根电压表的方均根值 $\sqrt{e^2}$ 显示之,即:

$$\sqrt{u^2} = \frac{\sqrt{e^2}}{\frac{dV}{dU}} \quad (2)$$

电加热金属丝的直径是 d ,长度是 l ,质量是 m ,比热容量是 s 。电阻 R_{T_H} 被电流 I 加

热。金属丝温度 T_H 随时间 τ 的变化等于电加热量减去气流的对流散热量。其热平衡式的形式是：

$$ms \frac{dT_H}{d\tau} = 0.239I^2R - \pi d l \alpha (T_H - T_0) \quad (3)$$

如果我们测量的是气流的平均速度，并假定测量过程中气流速度不变。达到热平衡状态时，上式变成：

$$0.239I^2R = \pi d l \alpha (T_H - T_0) \quad (4)$$

皮克列堤准则 Pe 的定义式是：

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{Ud}{a} \quad (5)$$

它的物理意义是对流散热量和热膜附近气体的热传导量的比值。当皮克列堤准则大于 0.08 时，金氏 (King, 1914, 参 [4,10]) 最早提出了热线的换热公式如下：

$$\pi d l \alpha (T_H - T_0) = \lambda l \left(1 + \sqrt{\frac{2\pi\rho c_p d U}{\lambda}} \right) (T_H - T_0) \quad (6)$$

若将上式写成无因次准则形式后，得：

$$Nu = \frac{1}{\pi} + \sqrt{\frac{2}{\pi} Pe} \quad (7)$$

式中 $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ = 努谢尔准则，

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \text{热扩散系数，}$$

$$n = 0.45 \sim 0.50$$

另外，科利斯和威廉斯 (Collis-Williams, 参 [6]) 的实验结果表明，在 $0.02 < Re < 44$ 的范围内， n 值宜取 0.45。在高 Re 范围内，他们的热丝换热公式是：

$$Nu \left(\frac{T_m}{T_f} \right)^{-0.17} = A + B Re^n \quad (8)$$

表 1 n 和 A, B 值

	$0.02 < Re < 44$	$44 < Re < 140$
n	0.45	0.51
A	0.24	0
B	0.56	0.48

上式表明指数 n 随着 Re 和马赫数的增加而略有增加。我们这次使用的热膜测头标定的结果表明， n 的值是 0.5。 T_m 是壁面温度 T_w 和主流温度 T_f 的平均值。

现在，所金氏公式（7）为基础，对热膜测头（55R33型）的速度校正曲线进行对流换热和气流温度的修正。

计算Nu和Re时，由于测头的定性尺度d没有改变，所以不必将实际d值直接代入。

用正规的等温流场方法，测定了热膜测头电桥电压V随气流速度 U_{10} 的变化规律。测量结果绘成图2。图中并给出测头使用完毕后的复测结果。由于测头外部积有少量的灰尘，复校值略有上升。使用该校正曲线时取先后两次校正结果的平均值。

如果被测气流的温度不同于热膜测头速度校正时的数值，则校正曲线图2还满足不了速度换算的要求。这时，应从上述对流换热原理出发，使实际测量时的皮克列堤准则与标定时数值相等，即对流换热的条件相似。这时，将校正曲线图2绘制成 $V - \frac{Pe_{10}}{d}$

校正曲线图3。其中，

$$\frac{Pe_{10}}{d} = \frac{U_{10}}{\nu_{10}} \cdot Pr_{10}$$

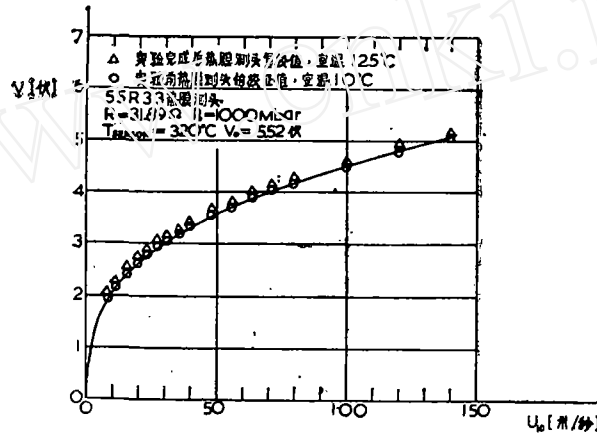


图2 热膜测头电桥电压和气流速度的标定曲线

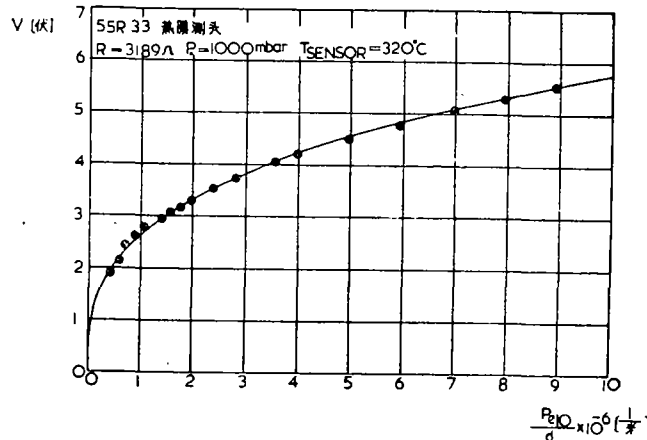


图3 热膜测头的电桥电压随皮克列堤准则变化的校正曲线

被测气流的温度 T_0 高于测头标定温度 10°C 时，可以利用公式 (7) 计算相当于 T_0 时的气流速度 U_1 。它的依据是皮克列提准则相等。

$$Pe_1 = Pe_{10} \quad (9)$$

$$\text{即 } \frac{U_1 d}{\nu_1} \cdot Pr_1 = Pe_{10}$$

$$\text{则得: } U_1 = \frac{Pe_{10}}{d} \cdot \frac{\nu_1}{Pr_1} \quad (10)$$

$$\text{或 } U_1 = U_{10} \left(\frac{\nu_1}{Pr_1} \right) / \left(\frac{\nu_{10}}{Pr_{10}} \right) \quad (11)$$

U_{10} 是气流温度为 10°C 时的速度标定值。

我们用 55M 型热线风速仪和 55D90 型速度标定设备对热膜测头进行了速度标定。由图 3 可以看出电桥电压 V 是随 Pe_{10}/d 作曲线变化的。这是因为式 (7) 里， Nu 与 Pe 成 n 次方的关系。 Nu 与 V^2 则是线性关系。图 4 是式 (10) 和式 (11) 中的空气热物性修正曲线。

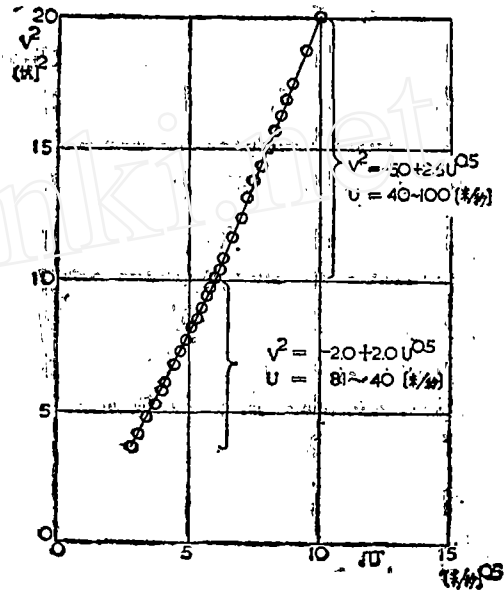


图 4 气流温度 T_0 大于 10°C 时空气热物性的修正曲线

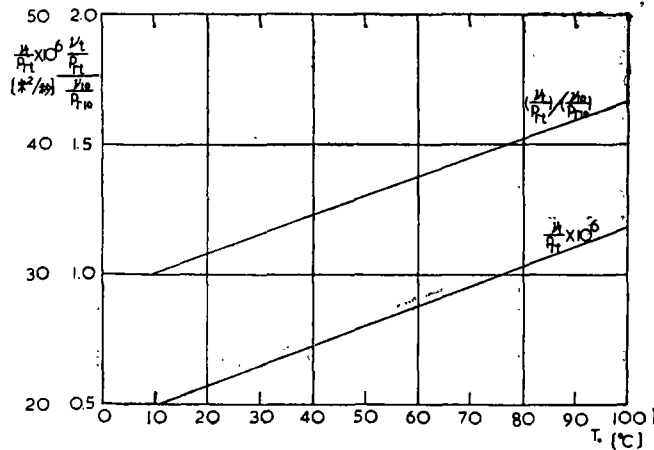


图 5 热膜测头的 $V^2 \sim \sqrt{U}$ 标定曲线

2.2 热膜测头换热与电桥电压间的关系

从式(4)和(6)可以得出热膜测头的热平衡公式:

$$0.239I^2R = \lambda l \left(1 + \sqrt{\frac{2\pi\rho c_p d U}{\lambda}} \right) (T_R - T_0) \quad (12)$$

热膜电阻R与 T_R , T_0 成线性关系, 见式(20)。则上式可简化为:

$$\frac{V^2}{R} = (A_R + B_R U^{n(U)}) (R - R_0) \quad (13)$$

上式最后可写为:

$$V^2 = V_0^2 + B U^{n(U)} \quad (14)$$

式中V = 电桥平衡电压, 用55D31型数字电压表测量, [伏],

V_0 = 速度为零时的电桥电压, [伏],

U = 气流的平均速度, [米/秒],

$n(U)$ = 热平衡公式的指数, 它随U略有变化, 一般情况下取 $n(U) = 0.5$ 。

图5是测头55R33按式(14)测出的标定曲线。它表明在速度范围 $U = 8.1 \sim 40$ [米/秒]和 $U = 40 \sim 100$ [米/秒]内分别呈线性关系:

$$V^2 = -2.0 + 2.0U^{0.5}, \quad U = 8.1 \sim 40 \text{ [米/秒]}$$

$$V^2 = -5.0 + 2.5U^{0.5}, \quad U = 40 \sim 100 \text{ [米/秒]}$$

$n(U) = 0.5$ 时, 式(14)成为:

$$V^2 = V_0^2 + B\sqrt{U} \quad (15)$$

上式微分后, 得:

$$\frac{dV}{dU} = \frac{1}{4V} \frac{B}{\sqrt{U}} \quad (16)$$

波动速度u和波动电压方均值的定义关系式是:

$$\overline{u^2} = \frac{\overline{e^2}}{\left(\frac{dV}{dU}\right)^2} \quad (17)$$

上两式合并后, 得:

$$\overline{u^2} = \frac{16U (V^2 + B\sqrt{U})}{B^2} \overline{e^2} \quad (18)$$

将已知 $\overline{e^2}$, V, \sqrt{U} 等测量结果和标定值B代入上式后, 即可得出波动速度值 $\overline{u^2}$ 。

在图2上用作图法得出梯度 dV/dU 随U的变化曲线, 即图6, 该曲线将用来计算湍流强度。

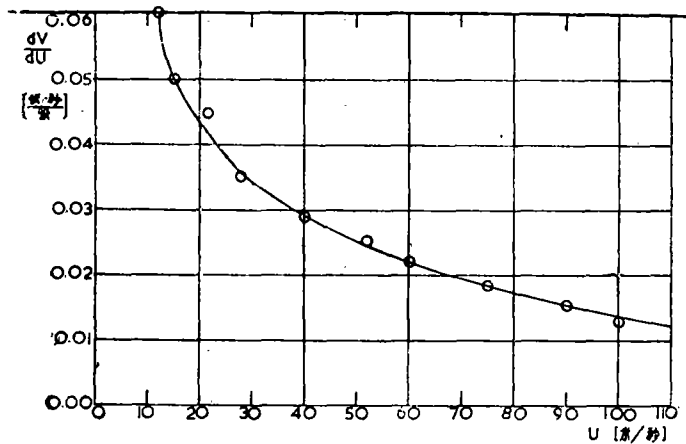


图6 梯度dV/dU随U的变化

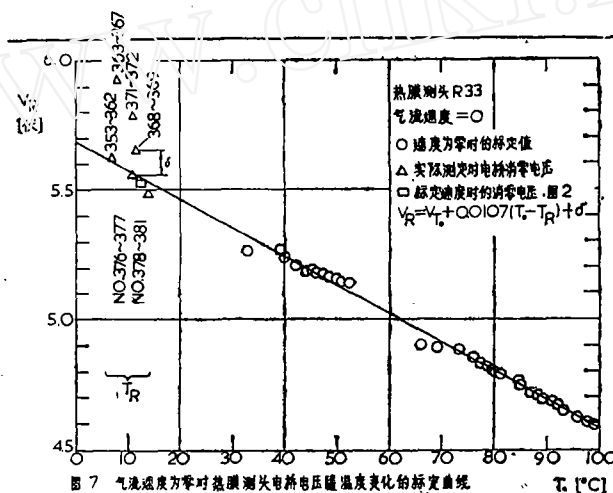


图7 气流速度为零时热膜测头电桥电压随温度变化的标定曲线

2.3 空气速度为零时热膜测头电阻随温度的变化

在55M热膜风速仪里，可用信号适调器55D26的消零电位器，使气流速度为零时数字电压表的读数调整到零。这里调零的电压值就是式(14)中的 V_0 。这样做的目的是可以尽可能地使用数字电压表的低量程档，以获得较高精度的读数。同时，速度为零时 V 值亦为零，这样读数时比较直观。

在气膜冷却实验台里，主流风机启动后才能启动主流电加热器。所以无法使气流在静止状态时升温，也就无法在升温条件下进行速度为零的电位器消零。

为了弥补这一缺点，在气膜冷却实验台上进行测量之前，先在室温条件下，在静止空气里进行电桥电压消零。图7中三角符号是各次实验时的消零电压值 V_0 和当时的室

温。四方符号是标定速度时的消零电压值。从图7看出，三角符号一般比标定曲线高出一个 δ 值。这是由于消零时，环境气流的自然对流带来的电压上升值。有时三角符号也低于标定曲线。不管 δ 值是正或是负，只要当时正确地记录了 V_0 读数，再根据图7进行必要的修正即可。它不会影响测量的准确性。

图7中的圆圈是气流速度为零时的电桥电压标定值。标定的方法是将热膜测头55R33（测头形状是 90° 弯头的垂直尖劈体，热膜元件在尖劈体的顶端）插进一个内径为30毫米，长度约为350毫米的密闭铜管内。同时，铜管内装一只 $\frac{1}{10}^\circ\text{C}$ 分度的标准水银

温度计，测量测头附近空气的温度。为了防止管内空气的自然对流，铜管内安装了三片塑料横隔板。热膜测头和温度计装进铜管后，再将铜管插入精密恒温槽，用以调节铜管内的空气温度。这样可以用热线风速仪测出不同环境温度下测头加热电桥的电压值 V_0 ，即图7。测量结果表明，温度上升 1°C 时，电桥电压下降约 10.7mV 。

被测气流的温度 T_0 高于热膜风速仪消零时的室内温度 T_R ，如图7所示。电桥在 T_R 时应有的电压 V_R ，和以室温 T_R 为基准消零后，在气流温度 T_0 测得的电桥电压 V_{T_0} 之间的关系是：

$$V_R = V_{T_0} + 0.0107 (T_0 - T_R) + \delta \quad (19)$$

其中 δ 是实验过程中信号适调器消零电位器消零时引起的过消值。室温 T_R 在 10°C 左右。换算速度前需根据式(19)求出 V_R 。

测头和导线的电阻值分别是：

$$R_{20} = 12.65 \text{ 欧姆}, R_1 = 1.40 \text{ 欧姆}$$

电阻随温度的变化关系式是：

$$R = (R_{20} + R_1) + \frac{0.47}{100} R_{20} (T_{\text{SENSOR}} - T_0) \quad (20)$$

测头的 R 和 T 呈线性关系， V 和 T 如图7所示，也呈线性关系。实验时 $T_{\text{SENSOR}} = 320^\circ\text{C}$ ，

$$\text{则 } R = (12.65 + 1.40) + \frac{0.47}{100} \times 12.65 (320 - 20) = 31.89 \text{ 欧姆}$$

测头的过热比 a 是：

$$a = \frac{R - R_{\text{TOT}}}{R_{\text{TOT}}} = \frac{31.89 - 14.05}{14.05} = 1.27$$

三、湍流强度的计算

气流的湍流强度由下述公式表示：

$$\epsilon = \frac{\sqrt{u^2} \times 100}{U_1} \% \quad (21)$$

U_1 是气流的平均速度， u 是沿气流方向上的波动速度。波动速度可用下式计算：

$$\sqrt{\overline{u^2}} = \frac{\sqrt{\overline{e^2}}}{\frac{dV}{dU}} \quad (22)$$

上两式合并后得湍流强度的表达式如下：

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\overline{e^2}} \times 100}{U_1 \frac{dV}{dU}} \% \quad (23)$$

用公式(23)计算湍流强度时，先代入测量的方均根电压值 $\sqrt{\overline{e^2}}$ 。然后根据测量出来的数字电压表读数 T_{T_0} 和气流温度 T_0 代入式(19)求出 V_R 。用 V_R 值在图 3 中求出 $\frac{Pe_{10}}{d}$ 值。再根据 T_0 从图 4 求出 $\frac{v_1}{Pr_1} \times 10^8$ 。用式 (10) 将求出的 $\frac{Pe_{10}}{d}$ 值和 $\frac{v_1}{Pr_1} \times 10^8$ 值相乘后，得气流速度 U_1 。从图 6 的 U_1 值可以查出 $\frac{dV}{dU}$ 值。最后，将气流温度为 T_0 时的 U_1 值和 $\frac{dV}{dU}$ 值代入式 (23) 即可求出湍流强度 $\varepsilon\%$ 。

四、用热膜风速仪测速度分布

我们用热膜风速仪进行了速度分布的测量。为了验证本文提出的非等温流场下热膜风速仪的标定方法起见，我们用实验台上原有的孔板流量计和皮脱管，与热膜风速仪一起，对同一流场进行了速度分布的对比测量。孔板流量计和热膜风速仪测出的射流速度值基本符合，测量结果见图 8。孔板流量计测出的是射槽截面的平均值，而热膜测头测量的是射槽缝口上部几个点的平均值。两者间有少许差别。图 9 是热膜风速仪和皮脱管测得的主流和射流速度剖面的对比。图 10 是热膜风速仪测出的平板气膜冷却流场各截面的速度分布。为了用式(19)修正热膜测头在不同气流温度下的影响，应事先知道各测量截面上的温度分布。图 11 是温度分布曲线。从图 9 可以看出，在靠近射槽出口处，热膜风速仪和皮脱管的测量结果符合得较好。在隔板的上部，皮脱管测出的速度值偏低。这可能是皮脱管在隔板处的阻塞面积较大而引起的读数下降。

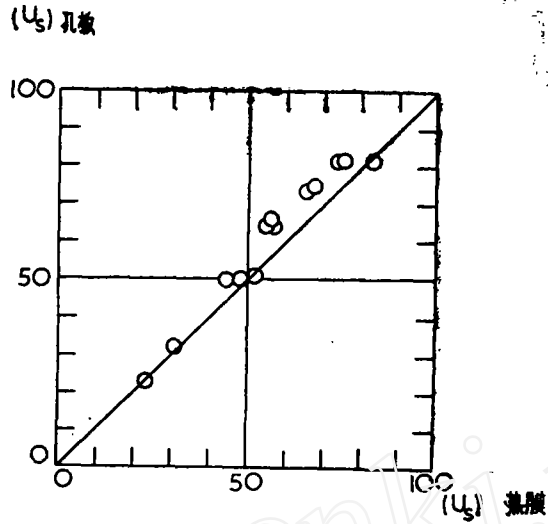


图8 热膜风速仪和孔板流量计测得的射流速度的对比

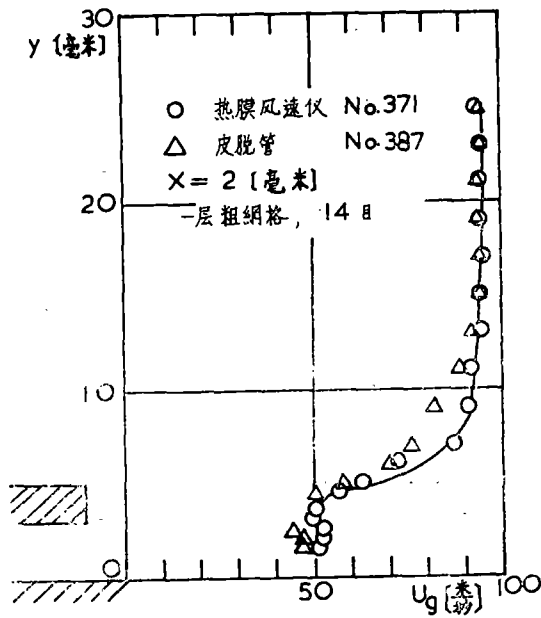


图9 热膜风速仪和皮脱管测得的主流和射流速度剖面的对比

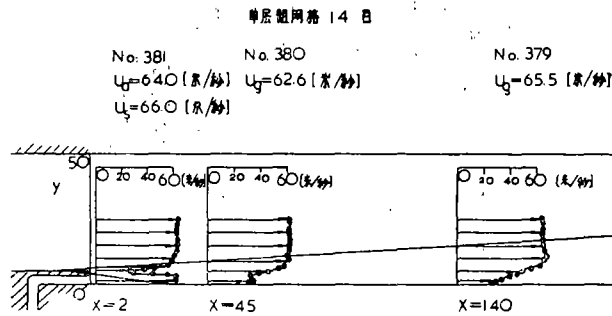


图10 平板气膜冷却流场各截面的速度分布，热膜风速仪的测量结果

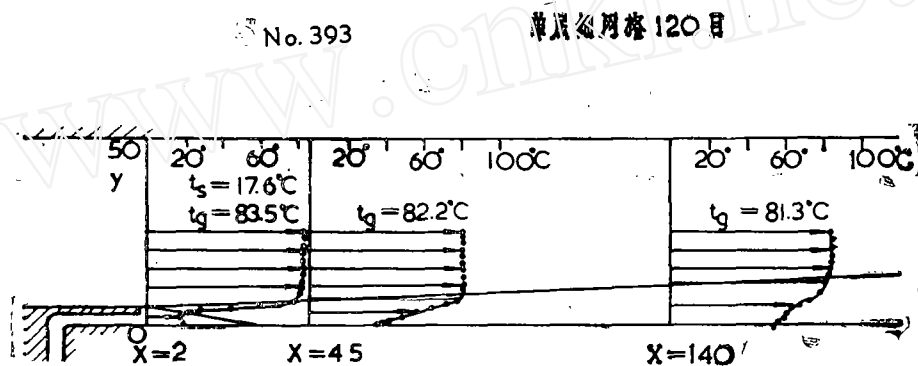


图11 平板气膜冷却流场各截面的温度分布

五、湍流强度的分布

图12是射流速度为零时，主流的速度、脉动速度和湍流强度的分布。图13、14是改变射流速度时，用热膜风速仪测出的速度分布和湍流强度分布。图15是不同截面上湍流强度的测量结果。图16是主流增设细网格后，不同射流速度时湍流强度的分布。

由图12~15可以看出，主流的初始湍流强度约为 $\epsilon_r = 2\%$ 。在现有的实验范围内，它不随速度改变。劈体起始段增加了隔板附近的湍流强度。这个影响在气流下游逐渐消失。隔板附近湍流强度虽然高些，但是由于隔板上下两个平面边界层的影响，这一地区的气流速度较低，所以湍流动量交换较弱。比较起作用的还是主流和射流的初始湍流强度。测量结果表明，射流的湍流强度较高。加之，加热板和射槽底板处有明显的接缝，与原来的绝热平板相比，增加了一定的初湍度。

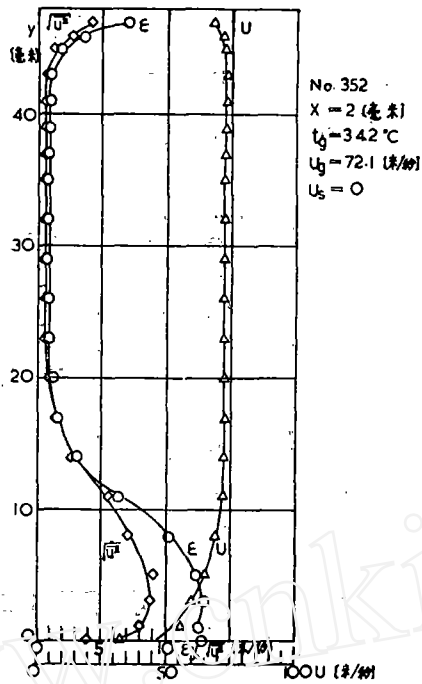


图12 射流速度零时主流的速度、脉动速度和湍流强度的分布，热膜风速仪的测量结果

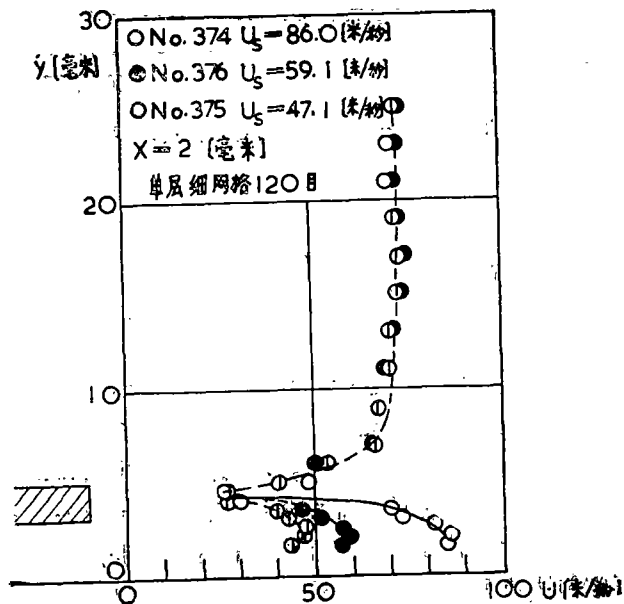


图13 不同射流速度时主流和射流的速度分布，热膜风速仪的测量结果

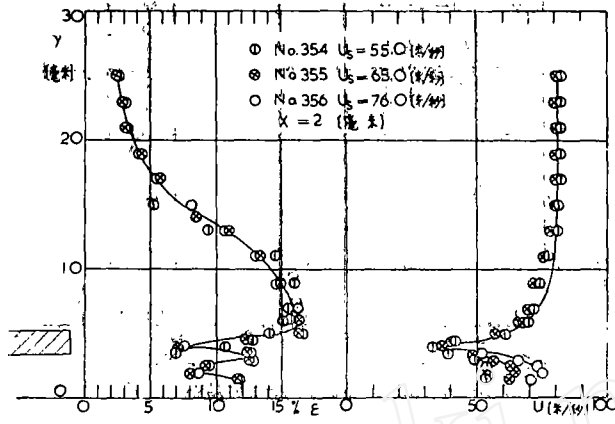


图14 不同射流速度情况下湍流强度和速度分布

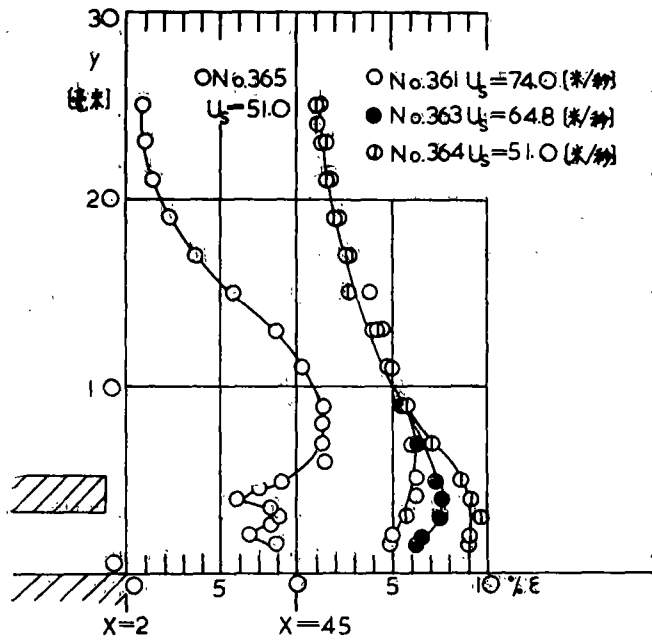


图15 不同截面和不同射流速度情况下的湍流强度分布

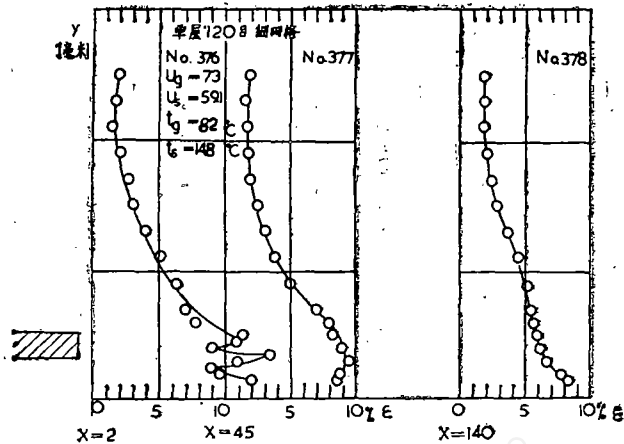


图16 加单层120目细网格后各截面的速度分布

根据测量结果，为了计算气膜冷却绝热温比起见，射流的初始湍流强度平均值可取：

$$e_s = 10\%$$

将 e_r 和 e_s 值代入式(2)后，得 ..

$$C_0 = 5\%$$

这些实验结果已在^[9]的气膜冷却壁温计算的计算机程序中得到应用。

为了改变主流的初始湍流强度，在实验段前的主流管道上，增设了单层120目细网格，和双层14目粗网格。图16是加网格后湍流分布的部分实验结果。初步测量结果表明，由于网格引起的湍流波动在网格下游很快的衰减。所以只对靠近网格的 $x = 2$ 毫米截面略有影响。实验平板较长，加热段为470毫米，网格引起的初扰度在加热平板前沿已衰减。因而增设网格对平板的换热没有引起明显的变化。今后应改变网格和整流框架的加设方法，进一步寻找湍流强度改变后，对气膜冷却影响的规律性。

六、结 论

实验结果表明：

1. 本文建立的校正方法可以计算出非等温流场的速度和湍流强度。校正方法的主要内容包括：(1) 热膜测头电桥电压随皮克列堤准则变化的校正曲线，和(2) 气流速度为零时，测头电桥电压随环境温度的变化曲线。用式(19)和式(23)即可算出速度和湍流强度。

2. 测出了平板气膜冷却非等温流场的速度分布、脉动速度和湍流强度分布。为气膜冷却规律的研究，提供了一组新的有益数据。

3. 主流和射流初湍度的实验值可供绝热壁面恢复温度湍流强度修正计算时使用。

参 考 文 献

- [1]. 北京力学所气膜冷却组, 《气膜冷却火焰筒壁温和热流量计算机程序》, 气膜冷却研究报告第7号, (1975年10月)
- [2]. 北京力学所气膜冷却组, 《气膜冷却的研究》, 科学技术成果报告63号, 中国科学技术情报研究所, (1973年6月)
- [3]. 北京力学所气膜冷却组, 《具有湍流强度修正项的气膜冷却计算机程序》, 气膜冷却研究报告第11号, (1976年10月)
- [4]. S. Corrsin, Turbulence, Experimental methods, Handbuch der physik, vol. 8, Part 2, Springer, Berlin (1963)
- [5]. D. C. Collis, M. J. Williams, Two-Dimensional Convection from Heated Wires at low Reynolds Numbers, J. Fluid Mech. 6, 357, (1959)
- [6]. P. Bradshaw, An Introduction to Turbulence and its Measurement, Pergamon Press, P. 117, (1971)
- [7]. A. J. Juhasz, C. J. Marek, Combustor Liner Film Cooling in the presence of High Free-Stream Turbulence, NASA TN D-6360, (1971)
- [8]. Hua Wang, E. C. Nickerson, Response of a Turbulent Boundary Layer to Lateral Roughness Discontinuities, AD-749944, P. 38, (1972)
- [9]. J. T. Davies, Turbulence Phenomena, Academic Press, P. 40, (1972)
- [10]. Hot-Wire and Hot-Film Anemometry, DISA 55 M
- [11]. Ю. В. Виноградов, В. Н. Груэлев, А. В. Талантов, К вопросу о влиянии начальной турбулентности на смешение плоских изотермических струй, Турбулентности на смешение плоских изотермических струй, Ньюс Авиационная техника, NO. 2, (1972)