

用红外技术测量液滴表面温度

李宝星 叶梦眉 陆大有 刘彦

(北京航空学院)

摘要——本文介绍用红外技术测量微小液滴表面温度的方法。通过对液体辐射特性和光谱透射特性的分析,确定测得的液滴红外辐射是由液滴表面发射的。用比较定标的方法消除了液滴发射率及环境对测试结果的影响。实验结果表明液滴表面温度与液滴内部温度不相同。

一、引 言

单个燃油液滴的汽化过程,对航空发动机燃烧室和加力燃烧室的设计研究有重要的实际意义。目前,在单个液滴汽化过程的实验研究中,液滴的表面温度是用直径小于 0.07 mm 的温差电偶测量的,温差电偶的热接点同时又是悬挂液滴的支持物。一般认为液滴内部温度与表面温度是相同的。这一结论是 M. M. El Wakil 等人提出的,用液滴内部存在着环流的理论加以解释,且用照像方法摄取了液滴内部环流运动的图片^[1]。

红外测温技术能直接测量低温且快速变化的微小目标的温度,因此,可用红外显微测温仪测量液滴的表面温度。但要测出液滴的表面温度就必须了解液滴的辐射特性并解决定标方法。

二、液滴的辐射特性

液滴的初始直径约 2 mm,随汽化不断缩小,直到消失。液滴基本上属于半透明体,因此,测温仪所接受的目标辐射,除来自液滴表面外,还包括来自半透明液滴内部某一深度范围内液体的辐射,这样,测温仪指示的温度就不一定是液滴的表面温度。

对于半透明液滴,除表征固有性质的透射率、吸收率和发射率等外,还要有表征特定样品性质(厚度及表面状态)的相应的透射比、吸收比和发射比等。当液滴被测区的深度超过其红外辐射的贯穿深度时,贯穿深度区域外的红外辐射在向边界传播过程中全部被吸收。在上述特定情况下,表征某一类半透明液滴固有性质的量与表征此类特定液滴性质的量相同,例如,透射率和透射比相同^[2]。因此,红外测温仪所接受的红外辐射是其表面与贯穿深度区域内发射的红外辐射之和。测量悬挂在支持物上的液滴表面温度,当液滴半径小于其贯穿深度时,除液滴的红外辐射外,支持物的红外辐射亦必然对测温仪所指示的液滴温度有所影响。

本文 1985 年 4 月 29 日收到。最后修改稿 1986 年 3 月 29 日收到。

为了确定所测液体的贯穿深度，我们用红外分光光度计测量了水与煤油等液体在不同厚度下的光谱透射比，参见图1。由图1中曲线a看出，在 $2.7\sim 3.4\mu\text{m}$ 及 $5.8\sim 6.3\mu\text{m}$ 波段内，可认为水的贯穿深度 δ 不大于 0.05mm 。图1中曲线b表明在 $2.7\sim 3.6\mu\text{m}$ 及 $5.3\sim 10\mu\text{m}$ 波段内， δ 不大于 0.1mm 。若在探测器前加一个 $2.7\sim 3.4\mu\text{m}$ 的带通滤光片，则测温仪所接受的红外辐射是水滴由表面到 0.05mm 深度层的红外辐射的总贡献。在水滴由原始直径到消失的整个汽化过程中，可认为其发射率与发射比相同。由于水滴支持物的红外辐射对探测器无贡献，所以红外显微测温仪所测出的温度是水滴的表面温度。

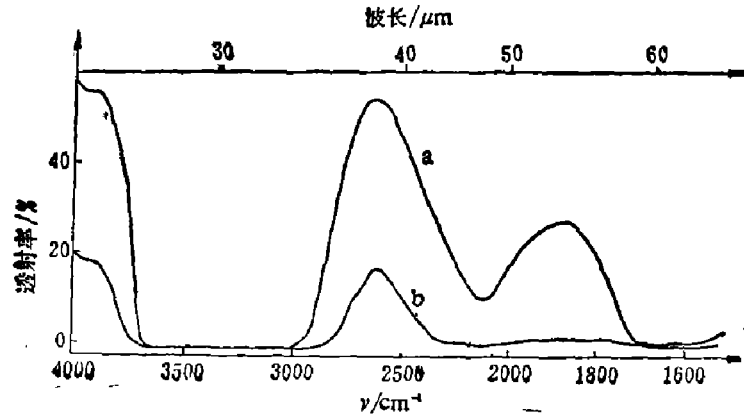


图1 水的透射光谱
(a) $\delta=0.05\text{mm}$, (b) $\delta=0.1\text{mm}$

Fig. 1 The transmission spectrum of water

三、红外显微测温仪的比较定标及误差分析

HGX-1型红外显微测温仪的温度分辨率为 1°C ，空间分辨率为直径 $40\mu\text{m}$ 的圆。

由于液滴的发射率 ϵ_λ 未知以及环境辐射的影响，无法由红外显微测温仪测定的等效温度求出目标的真实温度。为此，我们采用了比较定标法：将装有被测液体的大烧杯放在恒温水浴中，测量时保证液体的温度稳定。用 0.07mm 直径的锰铜-康铜温差电偶测量液体的表面温度 t 。温差电偶的热接点直径小于 0.1mm 。因此， t 是液体 0.1mm 表面层的温度。同时，用红外显微测温仪测量这一表面层的红外辐射，记录下与 t 相应的辐射信号 $h_{\text{定标}}$ ，绘出定标曲线 $h_{\text{定标}}=f(t)$ 如图2所示。

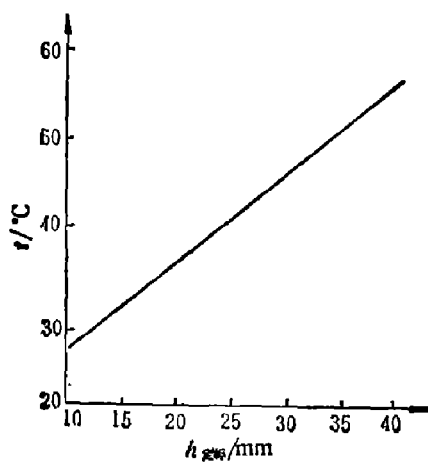


图2 红外显微测温仪定标曲线
Fig. 2 Calibration curve for the IR microscope-thermometer

在与定标环境（室温、距离、大气成份等）相同的条件下，用红外显微测温仪直接测出液滴汽化过程中表面层的红外辐射信号 $h=f(\tau)$ 曲线， τ 为从测温仪记录红外辐射信号算起的液滴汽化时间。由 $h=h_{\text{定标}}=f(t)$ 得到液滴在某瞬时的实际表面温度，用 \bar{t} 表示。由于红外显微测温仪的空间分辨率远小于悬挂液滴的温差电偶热接点直径，在汽化过程中，液滴的像总会充满仪器视场，另外，水可被近似地认为是朗伯辐射源^[3]，

因此在液滴整个汽化过程中所测的结果是可靠的。

定标时,除温差电偶自身误差对 t 有影响外,温差电偶的位置不准确也直接影响定标精度。若温差电偶的热接点露出液面一小部分,则 t 的数值有较大下降。同时,通过实验测量了热接点在液面下的位置变化对 t 的影响,用温差电堆测量液面温度 t 及其与液面下某一深度 Δh 的温差 Δt 。当被测液体为水时,不同 Δh 的 $\Delta t=f(t)$ 曲线和不同 t 的 $\Delta t=f(\Delta h)$ 曲线,如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可看出:温差电偶热接点位置偏离液面下 1mm、 t 在 30.5~58.5°C 范围内时, Δt 为 0.1~0.5°C。定标时,热接点位置能保证 Δh 小于 1mm,所以热接点位置不准而产生的误差小于 0.5°C。

图 4 表明, t 为定值时, Δh 增加到一定值后, Δt 随 Δh 的增加变化不大。这表明 Δt 是由液面汽化引起的,底部和侧面散热对所测量的微小区域的影响可忽略。

定标结果的总误差,由温差电偶刻度的传递误差、温差电偶的位置误差和测试系统误差确定。

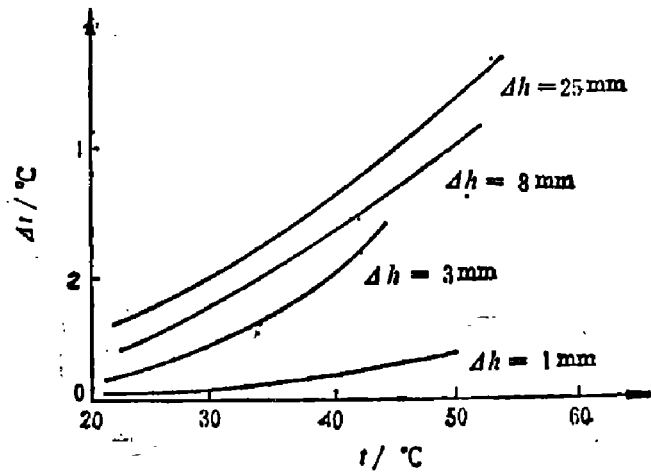


图 3 Δt 与 t 的关系

Fig. 3 The relation between Δt and t

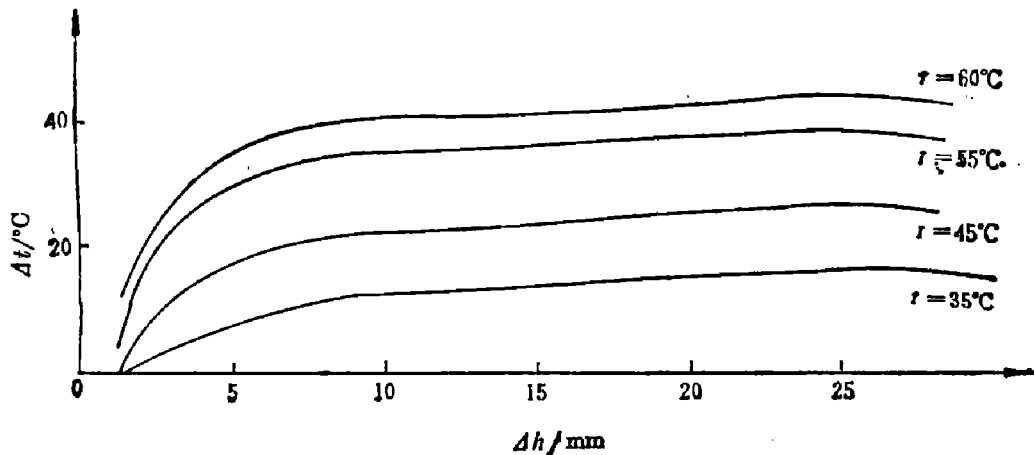


图 4 Δt 与 Δh 的关系

Fig. 4 The relation between Δt and Δh

四、实验结果

用注射器将所测液滴挂在温差电偶热接点上,测出液滴的内部温度 t_n ,其相应的温差电势 E_n 由六笔记录仪记录。与液滴相距 5mm 处用另一个温差电偶测量并记录与热气流温度 t_q 相对应的温差电势 E_q 。热气流由吹风机供给。红外显微测温仪的记录系统与六笔记录仪联动,六笔记录仪同时记录 E_q 和 τ ,从而保证所测出的 t_n 、 t_q 与红外显微测温仪所测出的液滴表面温度 \bar{t} 的同步性。

将测温仪记录的 $h=f(\tau)$ 曲线,根据定标曲线转换成液滴表面层的平均温度 \bar{t} ,结果如

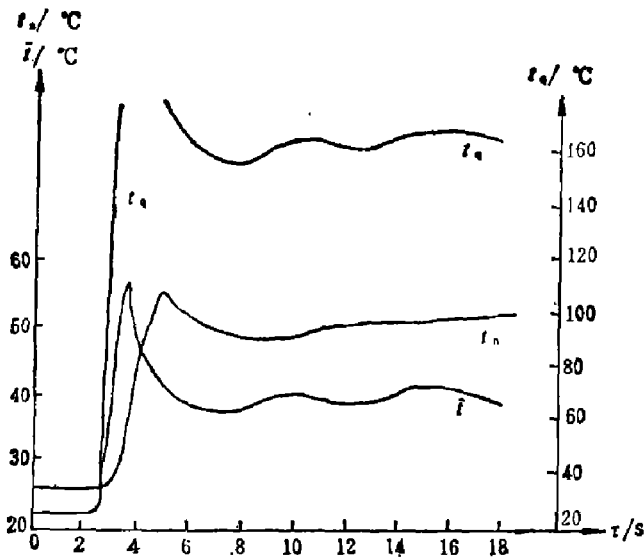


图5 \bar{t} 、 t_n 和 t_s 与 τ 的关系

Fig. 5 The curve of \bar{t} , t_n and t_s vs τ

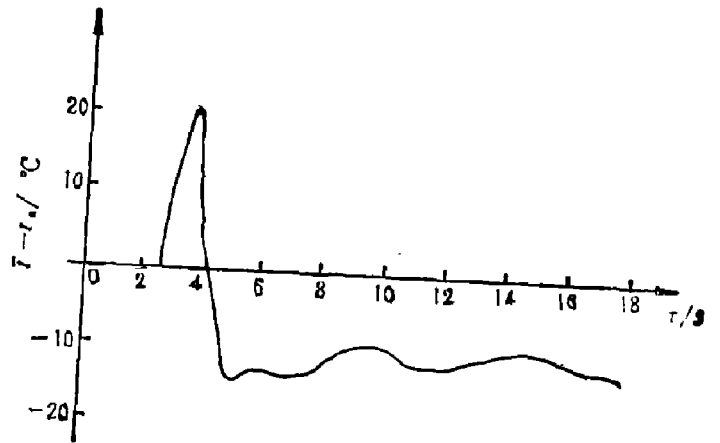


图6 $\bar{t}-t_n$ 之差值与 τ 的关系曲线

Fig. 6 The curve $\bar{t}-t_n$ vs τ

图5。图6给出了 $\bar{t}-t_n$ 随液滴汽化过程的变化。

五、结 论

(1) 当用带通滤光片($\lambda=2.7\sim 3.4\mu\text{m}$ 或 $\lambda=4.5\sim 10\mu\text{m}$)做为探测器的窗口时,水滴支持物的红外辐射对测试结果无影响,水滴发射率与发射比相同,能够测出水滴的表面温度。改用其他液体时,选用适当的窄带滤光片,仍能得到与水滴相同的结论。

(2) \bar{t} 与 t_s 变化趋势一致, t_n 滞后于 t_s 和 \bar{t} , 这说明 \bar{t} 真实地反映了水滴的表面温度。 t_n 滞后于 \bar{t} 的原因,一方面是红外显微测温仪的响应时间比温差电偶快,更主要的是由于水滴实际上不是一个等温球。

(3) 热气流对水滴加热的第一阶段, \bar{t} 高于 t_n , 差值由小渐增,后又逐渐减小到零,差值最大为 21.3°C 。以后 t_n 高于 \bar{t} , 最大差值为 14.3°C 。我们认为这是由于开始时水滴表面层被热气流加热,温度迅速升高,同时,热电极也通过导热对水滴内部加热。由于水滴内部的粘性远大于热气流的粘性,水滴内部的运动速度是有限的。因此,水滴表面温度比水滴内部温度高。差值出现峰值,是由于水滴直径逐渐缩小使表面与内部的温差减小,以及热电极导热作用的逐渐加强。以后 t_n 高于 \bar{t} , 是水滴直径变得更小和热电极导热成为对水滴加热的主要原因所致。

(4) M. M. El Wakil 等人用三个温差电偶测量十六烷液滴的中心温度和表面温度,实验结果相同^[4],但不能由此得出单个液滴是个等温球的结论。因为靠近液滴表面的两个温差电偶在汽化过程中不可能一直处于液滴表面的位置,所以, M. M. El Wakil 等人的实验方法不可能精确地测出液滴表面温度。不同位置的三个温差电偶具有相同的温度,我们认为除液滴内部的扩散和环流运动的影响外,热电极的相同导热起了主要作用。

(5) 为了减小支持物导热对液滴加热的影响,应选用导热系数小的非金属材料做支持物。将液滴悬挂改为自由下落,用跟踪办法测温也是可能的。这些都是温差电偶所不及的。

此项工作还有待深入,各种燃料液滴的实验及其理论解释等有待于进一步研究。

致谢——陈素琼、刘忠宏同学参加过这项工作，陈衡、张才根和屠家傲同志给予了帮助，在此一并表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Walil M. M. El et al., *NACA Technical Note 3490*, 1956.
- [2] 陈衡, 红外物理, 河北大学, 1982.
- [3] 杨世铭主编, 传热学, 人民教育出版社, 1981.

MEASUREMENT OF DROPLET SURFACE TEMPERATURE WITH INFRARED TECHNIQUE

LI BAOXING, YE MENGMEI, LU DAYOU, LIU YAN
(*Beijing Institute of Aeronautics*)

ABSTRACT

The measurement of droplet surface temperature with infrared technique is presented. By analysing the radiation characteristic and the transmission spectrum of liquid, it is found that the infrared radiation of a droplet comes from its surface. Using the relative calibration method, the effects of droplet emissivity and the environment are eliminated. The experimental result shows that the temperature at droplet surface differs from that inside the droplet.