

用于复杂流动传热测量的片状热流传感器

唐贵明 陈雪冬

中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室

摘要: 本文概要介绍密集测点的片状铂金薄膜电阻温度计的制造过程、工艺要求, 以及在高超声速流中, 高速飞行器复杂干扰流动测热实验的广泛应用。例如用于表面突出物台阶、圆柱、通信天线、尾舵、部件对接缝隙和凹槽引起的干扰流气动热特性和热环境实验研究, 为我国航天器的防热分析和防热设计提供了大量实验数据, 同时揭示了复杂流动的流动特征及其规律。

1、前言

自上世纪 60 年代开始, 我国脉冲风洞瞬态热流测量技术日趋成熟, 已得到了广泛应用^[1]。但大多采用单点圆柱式的铂金薄膜电阻温度计, 因为它制作简单, 安装方便。它用于大面积而热流变化不大的区域是很好的一种传感器, 但用于热流梯度变化很大的复杂流动区域, 或较薄构件表面的热流测量, 就变得很不适应了。热流梯度大, 热流分布变化快, 要求测点密, 才能测出真实的热流分布。随着我国航天飞行器性能的提高, 飞行器外形变得更为复杂。高速航天飞行器表面不可避免的存在各种形状和不同尺寸的突出物、凹槽和缝隙等不规则形状。例如用于通信的遥控天线、用于气动控制的气动舵(气动控制面)或翼等形成表面突出物, 例如姿控发动机喷口和传递指令的天线窗形成空腔, 又例如用于防热的防热瓦之间, 航天器各部件连接处之间, 都存在缝隙或台阶等。这些表面突出物、台阶、空腔和缝隙的存在, 会引起激波边界层干扰, 出现流动分离和再附; 头部弓形激波也可能与天线、舵前缘激波相撞, 产生激波与激波干扰, 这样不但使局部压力和热流值成倍增加, 而且使流动变得十分复杂, 给这些部件的防热分析和设计带来很大困难。因此在地面设备中, 测量这些区域的详细热流分布, 为防热分析和设计提供气动热数据变得非常重要。在这样的形势下, 我所研制了稠密测点的片状铂金薄膜电阻温度计, 用于复杂流动的气动热测量, 取得了很好的效果, 有多项实验研究成果获奖。这种片状热流传感器, 制备简单, 测点密度大, 安装方便, 适合复杂外形模型和复杂流动中大热流梯度区域的热流分布测量。为了将这种热流传感器能广泛应用, 为我国先进航天器研制提供更为准确的详细的气动热环境数据, 本文特简要介绍我所常用的片状和型面热流传感器的制备过程及其典型热流测量实验结果。

2、制备工艺

片状传感器依用途不同可分为薄片、厚片和型面三种。典型热流传感器构造简图示如图 1 中, 它由铂金薄膜电阻、银膜引线 and 基片或基座组成。片状传感器照片在后面使用例子中可以看到。铂金膜电阻温度计的制备过程相当复杂, 包括基片材料选择、磨制、镀膜夹具设计加工、溅射镀膜、铂金膜电阻热处理、, 烧结银膜引线、铂金膜通电加热处理、电阻温度系数标定等程序和基片热物性参数测定等。下面将简要逐一介绍。

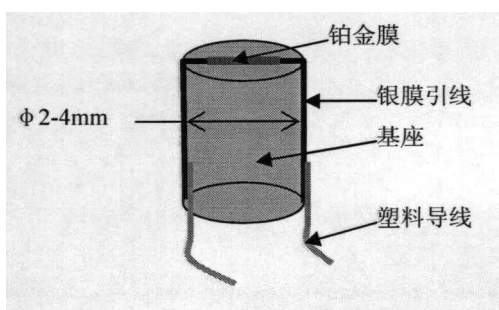


图 1-1 单测点柱状传感器

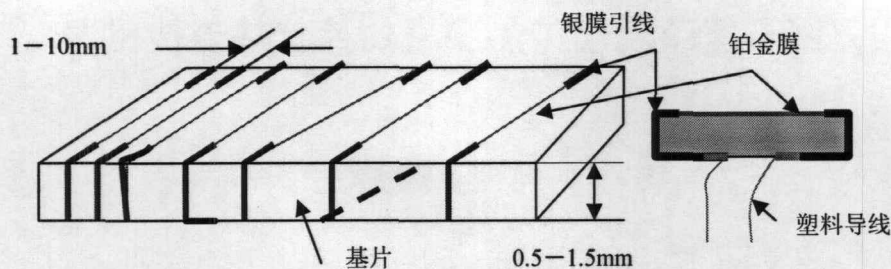


图 1-2 多点片状传感器

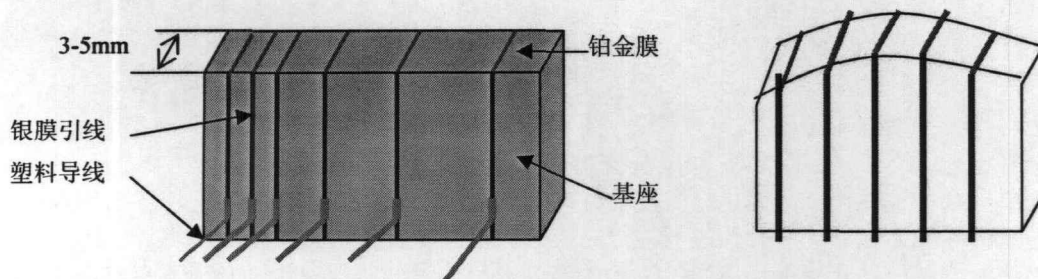


图 1-3 厚片传感器图 1-4 型面传感器

2.1 基片

片状传感器制备工艺与圆柱形的基本相同。差别主要是基片制备和镀膜夹具不同。基片通常为耐高温绝缘材料，例如玻璃、石英、硅片、云母和陶瓷等。根据用途及实验模型形状，基片可制成正方形、长方形或其他形状，也可制成曲面。基片厚度要大于热渗透深度，一般大于 0.3mm 就可满足一维半无限体的测量原理的要求。实验中最小厚度通常取 1mm，因为太薄，基片易于碎裂。其宽度通常为 4—10mm，长度为 6—50mm。

选取合适的基片材料并剪裁成毛坯尺寸后，精磨至所需尺寸，然后镀膜面抛光成镜面光，最后将基片用有机溶剂清洗和烘干，准备真空镀膜用。在传感器制备整个过程务必要注意保持基片干净，无污染。

2.2 真空镀膜

铂金薄膜采用真空阴极溅射和钼片掩模镀制。钼合金掩模片上用线切割加工宽约 0.2mm，长约 8mm 的缝隙，缝间距根据需要而定，最小间距为 1 至 2mm。钼片覆盖在基片上并用镀膜夹具定位，将钼片上狭缝与基片的相对位置调整好，锁紧夹具，放入镀膜机中铂金靶之下一定距离，准备镀膜。铂金靶与钼片的间距，要根据他们的尺寸而定。设计和加工一套好的镀膜夹具是非常重要的，它不仅可以提高镀膜效率，而且还可以大大提高铂金膜质量。

阴极溅射镀膜参数因镀膜机、阴极靶材尺寸和真空度而不同。通常在正常情况下，我们采用较小的铂金靶，在真空度大约 2—5mm 汞柱，溅射电压 1600—2000 伏，溅射电流 25—30 毫安的条件下，镀膜十几分钟，膜电阻大约 150 欧姆左右。刚镀好的铂金膜还不能直接使用，还需进行热处理和铂金膜两端制作银膜引线等多道工序。

2.3 铂金膜热处理（俗称热老化）

刚溅射好的铂金膜组织松散，电阻大，附着力不好，电阻温度系数很小，而切非常不稳定。因此需要进行热处理，提高膜的机械性能和电稳定性。热处理通常在高温炉中进行。在室温条件下，基片放在炉中从室温开始加热，到达指定温度后，恒温一小时，然后关闭电源，在炉中自然冷却到室温。热处理时，一定要将基片贴面放平，并将铂金膜朝上，以免基片变形和铂金膜损坏。热处理温度因基片材料不同而不同，大概温度范围为 500-700° C。热处理完后，膜电阻通常大约为 30—60 欧姆，电阻温度系数在 $2.4-3.0 \times 10^{-3}/\text{度}$ 之间，低于纯铂金的电阻温度系数。

2.4 烧结银膜引线

铂金膜两端引线用银浆烧结而成。根据基片材料，选用合适烧结温度的导电银浆，在铂金

膜两端用笔或丝网印刷方法制作银浆引线。银浆亮干或烘干后，放入高温炉中加热至烧结温度，并恒温半小时之后自然冷却至室温。银浆烧结温度的选取原则是尽可能接近铂金膜热处理温度，但要稍低于膜热处理温度。为避免烧结时龟裂，银浆一次不能涂得太厚。如采用两次或多次涂描和烧结，可以获得质量较好的银膜。

2.5 铂金膜通电加热老化和焊接塑料导线

在银浆引线两端焊接塑料导线后，通电‘老化’处理。所谓‘电老化’就是对铂金膜加载实验测量时 1.5—2 倍的直流电压，并保持 2—3 小时，也即电加热处理。其目的是进一步提高膜的电稳定性和淘汰掉不合格产品。这样处理后的铂金膜电阻温度计电稳定性特别好，即使存放十年，其电阻温度系数的变化除个别的最大达 3% 外，最多不超过 2%，绝大部分变化在 1% 以内。焊接塑料导线时，动作要快，烙铁头一点即可，否则银层会脱落或被焊锡溶化。

2.6 电阻温度系数标定

铂金电阻温度系数需要在恒温水浴中逐个测量。铂金电阻置于封闭容器中，浸入水中加热。在每一恒定温度测量封闭容器中的温度及铂金电阻值，然后求出相应铂金电阻的点温度系数。现代恒温水浴，采用程控温度和数据采集系统，自动测量温度和铂金电阻值，给出电阻温度系数。电阻温度系数测量误差小于 1%。

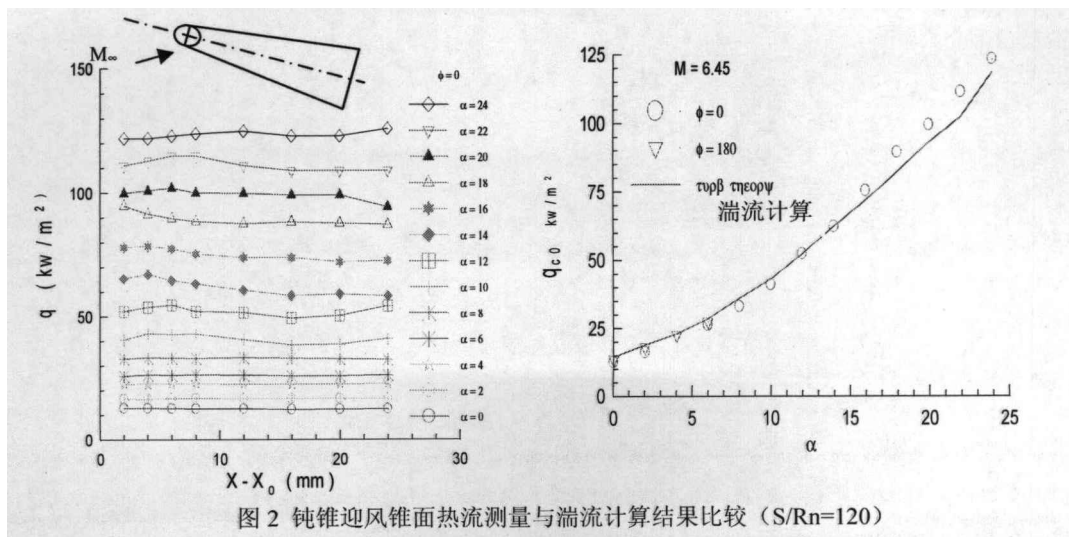
最后基片材料的热物性参数热传导系数 k ，密度 ρ 和热容 c 可用双电标定方法抽样测量。铂金薄膜电阻温度计就制作完成后，放入密闭容器中保存，准备用于气动热实验。

3、多点片装热流传感器的应用

片状热流传感器是因为复杂流动实验研究需要而发展的，研制成功后已广泛用于各种复杂流动和复杂外形的气动热实验研究，例如表面台阶、圆柱和气动控制舵面干扰流及缝隙流的传热实验研究，为这些部件的气动热环境分析和设计提供了大量实验研究数据。下面仅举几个例子来证实片状热流传感器的在复杂流动测热中优势和重要作用。

3.1 锥面热流分布测量

在用于复杂流动热流测量之前，看看多点片状热流传感器在附着流动中热流测量的结果，了解片状薄膜电阻温度计热流测量的可靠性。图 2-1 表示尺寸为 $8 \times 30 \times 1.5\text{mm}$ ，有 8 个测点的片状传感器在迎风锥面的热流分布测量结果。数据点虽稍有波动，但曲线很光滑，在不足 30 毫米范围内热流虽表面距离的变化是很小的，分布曲线近似为水平线。理论计算也表明，在此距离范围内热流变化大约不到 1%。为了与理论计算结果比较，将每一攻角的热流数据平均值随攻角的变化表示在图 2-2 中。从图中可以看到，实验数据与湍流热流理论计算值符合的很好，说明这种传感器的可靠性。在较大攻角时，测量数据稍高于计算值，是由于实验模型受气动力的影响，模型稍有抬头，使实际攻角稍大于设置攻角，计算中没有考虑这一攻角变化。



3.2 台阶干扰区热流分布测量

在超声速和高超声速流中，表面台阶诱导激波可使边界层发生分离与再附（图4），导致局部热流成倍增加。图4表示平板上圆柱、方柱和二维台阶实验模型，台阶前附近安装有密集测点片状热流传感器。图5表示方台阶干扰流的油流和液晶热图显示的图像，表明台阶上游及两侧存在复杂的分离流区域。由于台阶干扰流动影响，使台阶附近上游分离区和台阶迎风面热流成倍增加，最高峰值分别达到平板无干扰值的10倍和20倍（图6）。图6中还标出了干扰区流动特征点位置，它们与热流分布的峰值和谷值点一一对应。从图7可以看到，台阶前峰值热流出现在台阶根部前0.1倍台阶高度附近。如果台阶高度为10mm，峰值点离台阶只有1mm的距离。如用传统的单点柱状热流传感器，是不可能测得干扰峰值热流及图7所示的峰形热流分布。由于用了片状热流传感器，台阶前附近热流峰形分布及其峰值才能获得。右详细热流分布曲线可确定干扰区流动特征点位置，例如分离点、再附点等。因此，根据干扰区详细热流分布和流动显示图像就可以确定干扰流动特征及其分离流漩涡结构。文献[2]根据台阶实验热流数据获得了估算台阶干扰流动特征参数相关公式，如特征点位置，峰值热流，分离激波角等，为台阶干扰流防热分析提供了重要依据。

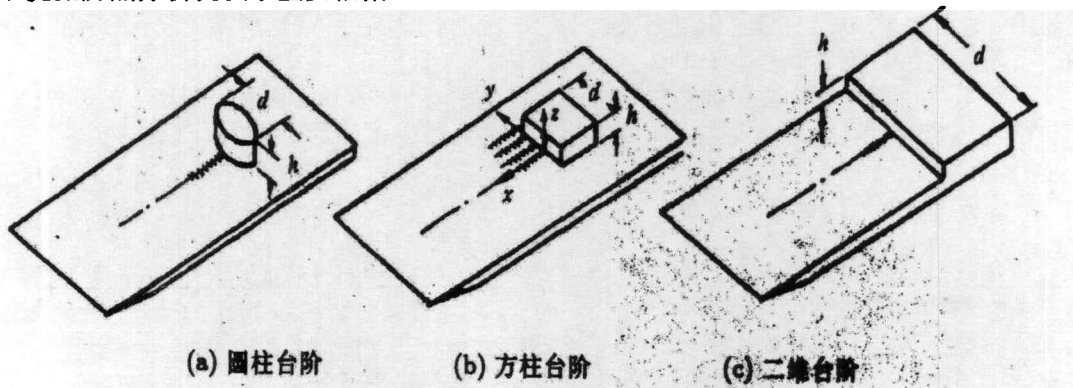


图3. 平板台阶实验模型

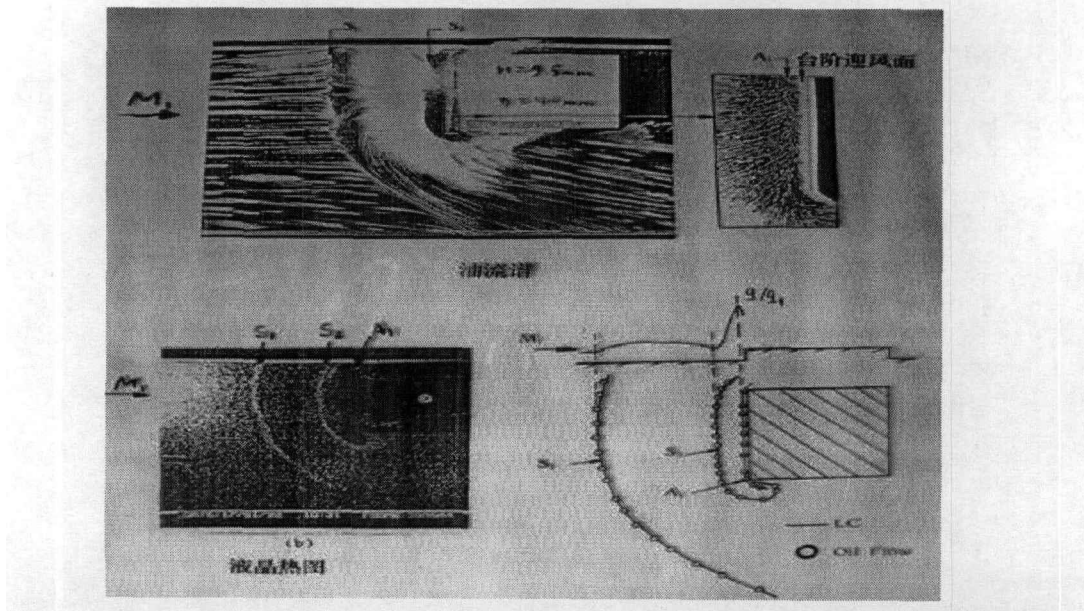


图4. 方台阶干扰流油流和液晶热图流动显示与热流分布的比较

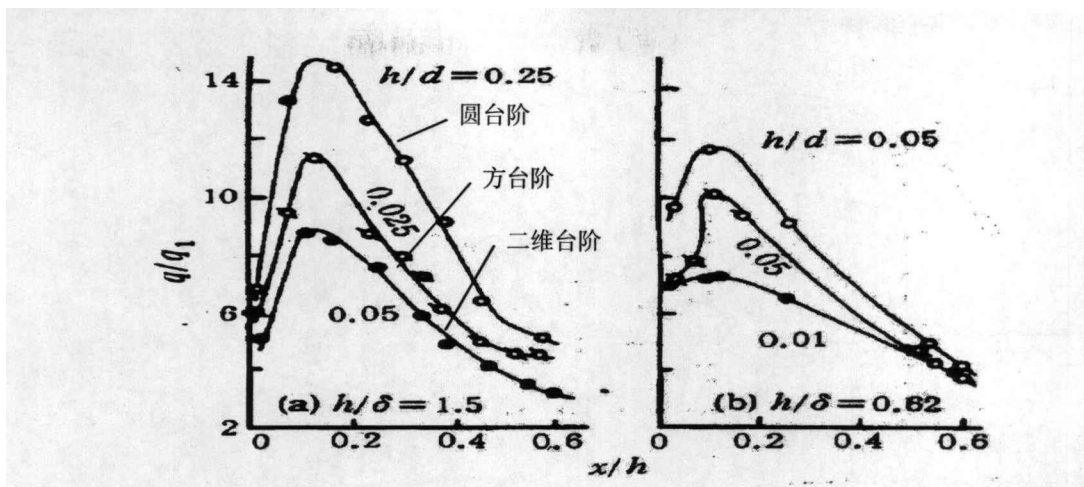


图 5. 方台阶干扰区热流分布与流动特征点位置

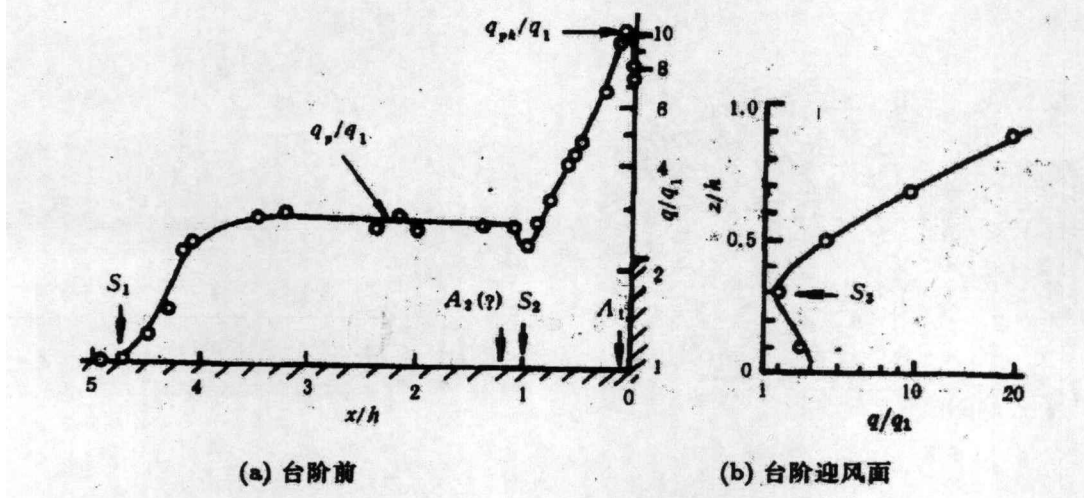


图 6. 台阶前峰值热流区域热流分布 ($M_1=5$)

3.3 平板上偏转舵干扰区热流分布测量

通常高性能航天飞行器都具有气动控制尾舵，通过偏转舵面来控制飞行姿态。图 7 表示在平板上模拟气动舵热环境的平板模型简图及其测量圆盘上的薄膜温度计照片。图 8 表示偏转 30° 时，舵上游干扰流动的油流和液晶显示图像，前者显示表面流线形状，后者表示表面温度分布。说明干扰流结构是非常复杂的，因而干扰热流分布也是很复杂的，存在多峰多谷形状的热流分布（图 9）。紧靠舵根部前附近热流分布变化很快，最高热流峰值是无干扰值的 14 倍，最高压力峰值是无干扰压力的 18 倍。舵迎风侧面热流最高峰值高达光平板值的 25 倍。只有用密集型测点片状热流传感器才能反映真实的变化复杂的热流分布，才能测到接近真实的干扰峰值。如果测点稍微稀疏一点，最高峰值可能差好几倍。文献[3]根据 $M_1=5-10$ 气流条件下的偏转舵干扰区热流和压力分布数据，验证和改进了 Neumann 和 Hayes 的干扰峰值热流工程估算方法，并将他们的方法推从马赫 6 推广到马赫数 10，此结果得到了 Neumann 的肯定。

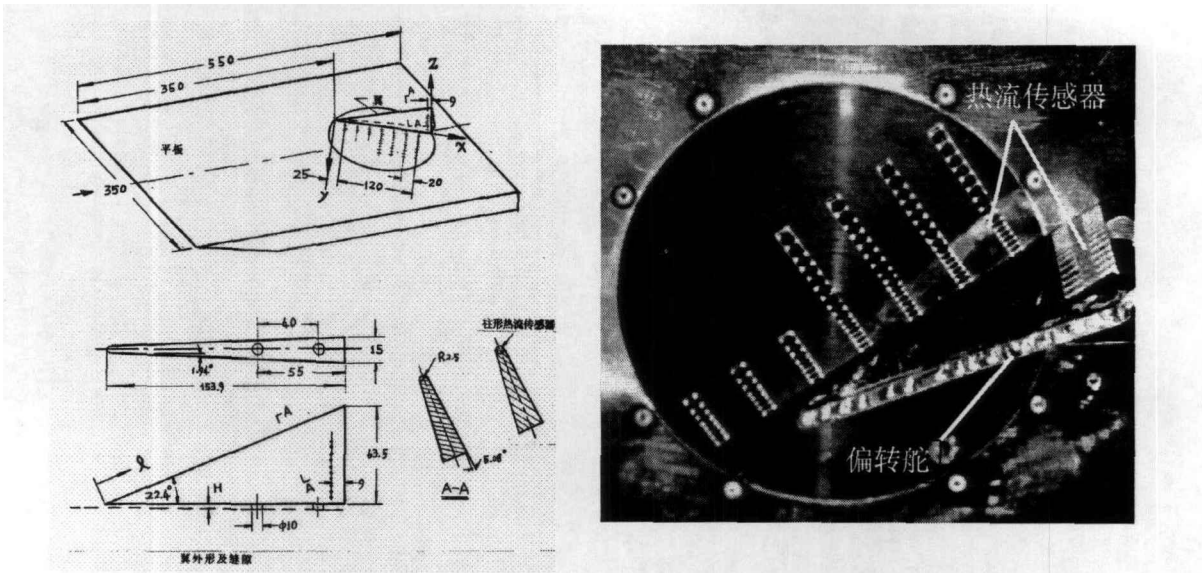


图 7. 偏转舵平板实验模型外形及其照片

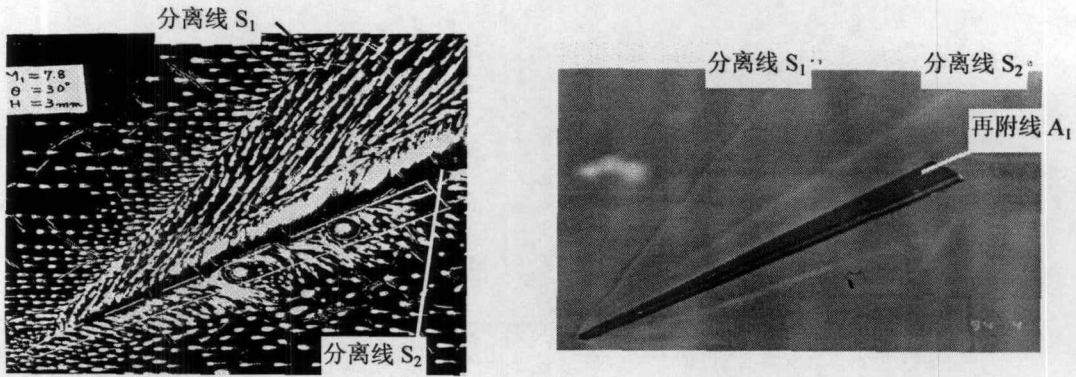


图 8. 偏转舵干扰流油流 (右) 和液晶热图 (左) 流动显示照片

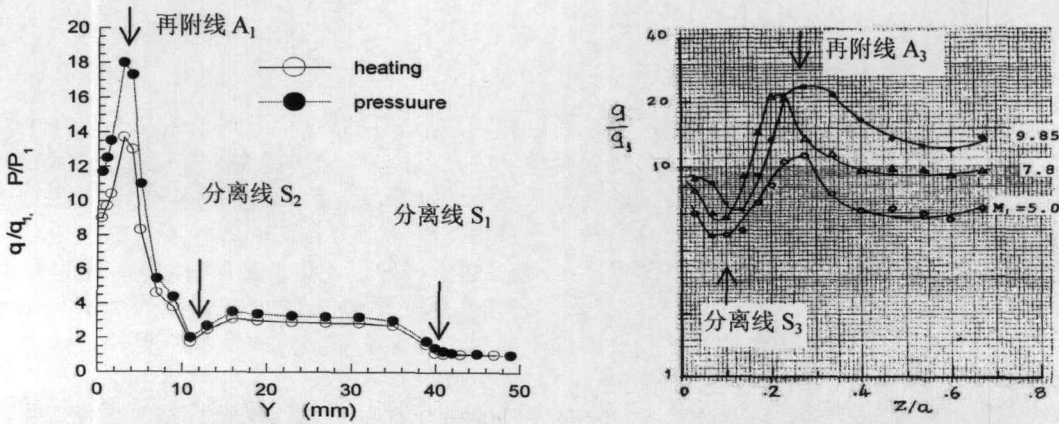


图 9. 舵上游和舵迎风线侧面干扰区热流分布

3.4 结构缝隙内热流分布测量

航天器各部件对接处、返回舱大底盖和天线窗周围都存在有一定宽度的缝隙，出现了缝隙气动热环境的问题。由于缝隙空间很小，不能用传统单点的柱状热流传感器测量缝隙内热力分布。图 10 和图 11 分别表示平板缝隙模型和纵向缝隙内壁热流分布测量典型结果^[4]。由于缝隙

与流向平行，缝内两侧壁面沿缝深热流分布基本对称，在缝口边缘热流接近或稍微超过光面平板值，沿缝深迅速降低。图 10 右边的缝隙测量圆盘，可绕中心旋转改变缝隙取向角，上下游缝壁各装有两片热流传感器，在相互垂直的两相邻两面各有 8 个测点，这样缝内缝外热流分布都能同时测到。

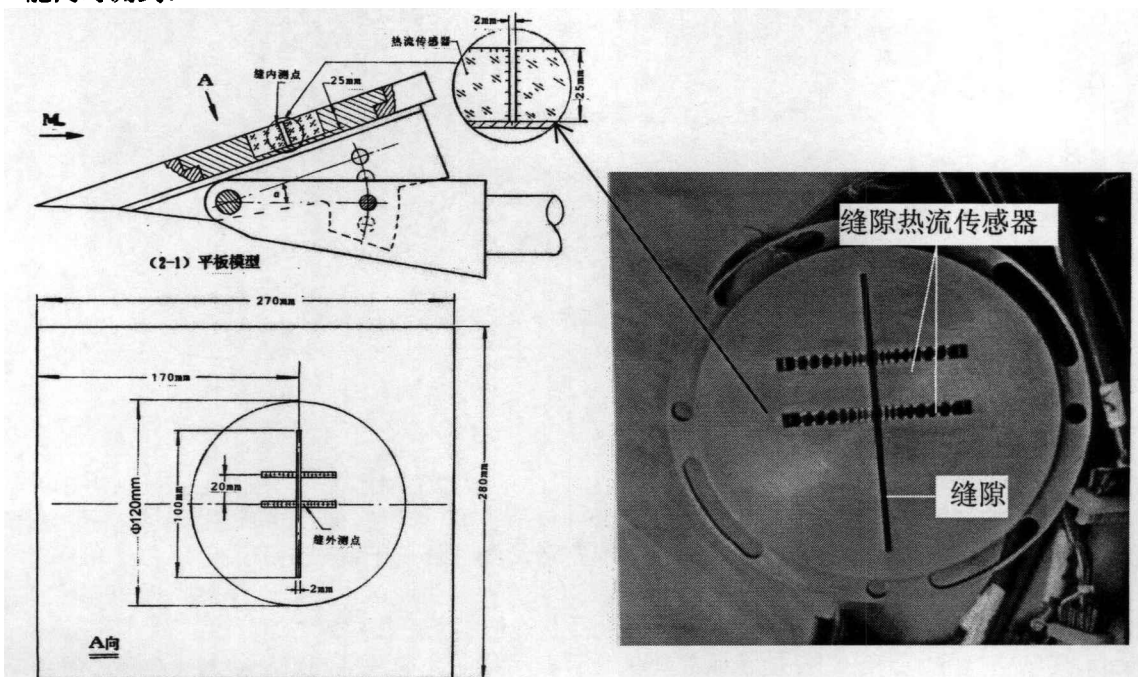


图 10 结构缝隙平板模型外形及缝隙测量圆盘照片

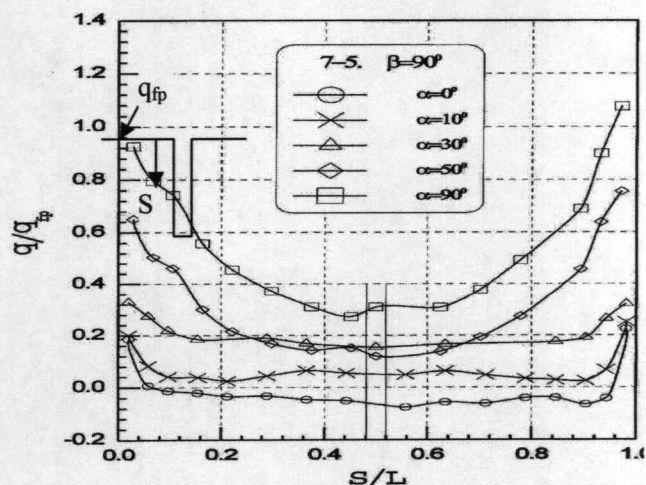


图 11 不同攻角纵向缝隙内热流分布

3.5 喷口空腔干扰热流分布测量

姿控发动机工作完后，留下一个大深空腔，气流在喷口上游壁处分离后，再附在下游壁面边缘，产生了很高的热流峰值（图 12 右），最高峰值将近 6 倍光面平板热流。同时，喷口下游附近平板上热流也增加一倍。喷口内第一点和第二点间距仅为 2mm，但第一点热流比第二点增加一倍。如此大的热流梯度，只能用片状热流传感器才能测得真实的热流分布。给防热分析提供更准确的数据。

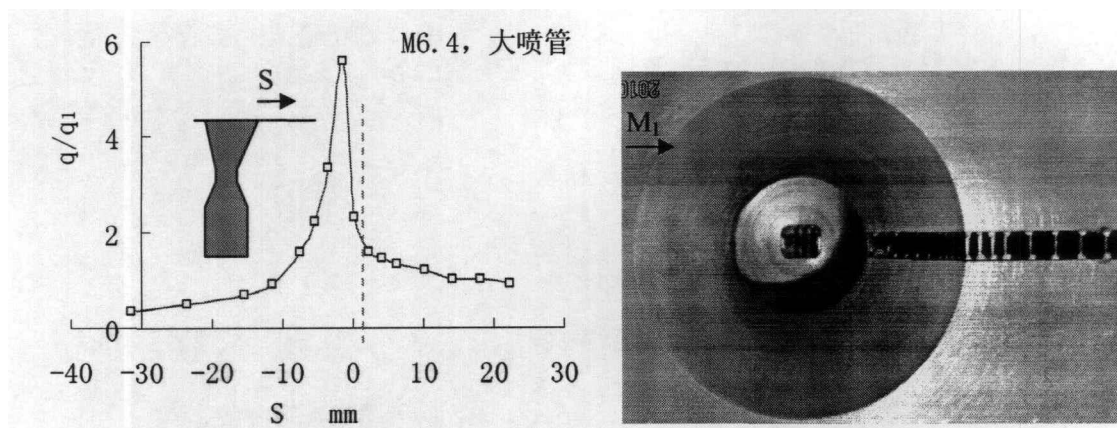


图 12. 喷口空腔干扰热流分布及喷口模型照片

3.6 平板上高圆柱干扰区热流分布测量

图 3 表示的是突出弹面圆柱天线杆在平板模型上的模拟实验结果^[5]。右图是圆柱附近平板上干扰油流图像，可以清楚看到两条环形分离线和近根部的再附线。左图为干扰区对称面上热流分布和纹影照片记录的激波迹线。由于圆柱弓形激波与边界层干扰产生了边界层分离和分离激波，而圆柱弓形激波又与分离激波相互干扰产生了‘λ’激波，使得在圆柱前附近和圆柱前缘很窄的区域出现了非常高的热流峰值。平板上最高峰值是光平板热流 27 倍，圆柱上是驻点热流的 5 倍。在左图中还标出了干扰流特征点的位置，可以看出热流分布特征点与干扰流特征点位置是一一对应的。充分证实了片状热流传感器在复杂流动传热测量中长处和优势，大大提高了热流测量的空间分辨率，是揭示复杂流动特征和规律的最好的技术。

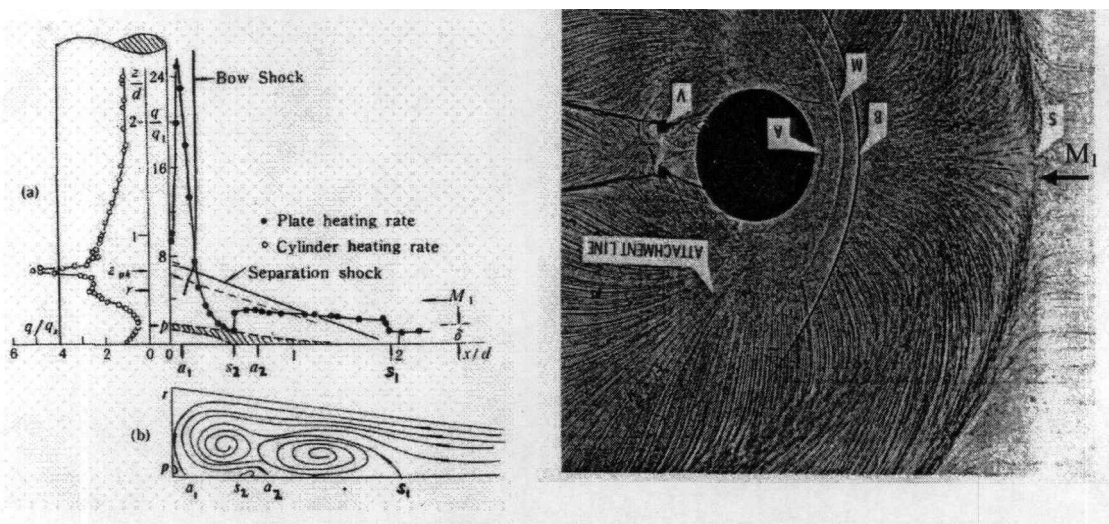


图 13. 平板上高圆柱干扰区对称面上热流分布与干扰流动油流照片

4、结论

与薄壳热电偶测热技术相比，多点片状铂金膜电阻温度计测热具有传感器制作简单，安装方便，测量精度高和数据处理简单等特点。与单点薄膜电阻温度计相比，易于安装，空间分辨率高，更适合用于复杂流动的实验研究。密集测点片状铂金薄膜电阻温度计经过实际应用中不断改进和发展，现可制备多种形状和规格的传感器。经过多年复杂外形和复杂流动的热流分布测量实验证实，能较真实的测得复杂流动中的多峰多谷的复杂热流分布，能较准确的提供干扰流热流峰值。它与油流、纹影等流动显示技术相结合，可以相当好揭示复杂干扰流的流动特征及其规律，为航天飞行器防热分析和设计提供可靠实验数据。值得推广密集测点片状铂金薄膜电阻温度计用于复杂流动和复杂外形的热流测量。

参考文献

1. 李钟发, 俞鸿儒, 激波风洞测量技术, 首届全国激波管学术会议, 1978
2. 唐贵明, 表面台阶引起的高超声速湍流边界层分离, 力学学报, Vol.26, No.1, 1994
3. Tang G. M., Heating characteristics of Blunt Swept Fin-Induced Shock Wave Turbulent Boundary Layer Interaction, Acta Mechanica Sinica, Vol.14, No.2, 1998
4. 唐唐贵明, 曾远金, 狭窄缝隙内的热流分布实验研究, 流体力学实验, No.3,1999
5. Tang G.M. and Yu, H.R., Aerodynamic Heating in the region of shock and turbulent boundary layer interaction induced by a cylinder, Acta Mechanica, Simica, Vol.8, No.3, 1992.