

# 红外成像仪用于传热实验的研究

闻 洁

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 北京 100083)

赵桂林

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

陶 智

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 北京 100083)

彭 辉

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 探讨了将红外成像仪用于传热实验的可能性, 分析了几种影响因素: 如被测实验件的材料、表面粗糙度, 以及用于内流传热实验时需使用的能透过红外线的特殊材料的透射率等对实验结果的影响. 分析认为, 红外成像仪用于温度测量分析是一种先进的非接触温度测量技术, 但必须针对具体情况, 确定各个影响参数.

**关 键 词:** 传热; 红外成像; 实验

**中图分类号:** TK 124

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2003)08-0700-04

## Studies on infrared camera using in heat transfer experiments

Wen Jie

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Zhao Guilin

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Tao Zhi

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Peng Hui

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The possibility of using infrared camera in heat transfer experiments was discussed and the various influential factors was analysed, such as the radiation ratio of materials, roughness of surface and the transmissivity of special materials for infrared ray transmission. The studies indicate that the infrared camera can be used in heat transfer experiments, but need to determine various influential factors according to the special experimental cases.

**Key words:** heat transfer; infrared imaging; experiment

使用红外成像仪进行传热实验研究的方法国外主要在外流中使用<sup>[1,2]</sup>, 用于内流传热实验研究的不多, 国内也很少见到用红外成像仪进行传热实验研究的文献报导.

使用红外成像仪进行传热实验是一种先进的温度测量分析技术, 通过对所得到的实验件被测表面的红外图像的分析, 可以直观地观察到被测实验件表面的温度分布, 而不破坏实验件. 但是, 红外成像仪用于传热实验的准确性受到多种因素

的影响, 需要对实验件的材料有比较详细地了解, 同时由于许多材料不能透过红外线, 因此对被测表面是内表面的情况, 需要使用能够透过红外线的特殊材料, 这限制了红外成像仪用于传热实验的使用范围.

本文通过对红外成像仪用于传热实验的几种影响因素的分析, 探讨了将先进的红外成像仪用于传热实验研究的可能性.

收稿日期: 2002-05-23

作者简介: 闻 洁(1964—), 女, 辽宁沈阳人, 副教授, wenjie@buaa.edu.cn.

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

## 1 实验件和温度测量技术

实验是在北京航空航天大学航空发动机气动热力国防科技重点实验室的旋转换热实验台上进行的, 对旋转换热实验台的详细介绍见文献[3]. 实验中, 设计、加工了一个矩形实验通道(图 1), 实验通道的材料是酚醛层压玻璃布板, 是一种隔热绝缘材料, 矩形实验通道的一个侧边没有封闭, 加工了两块矩形盖板(图 2), 材料也是隔热绝缘的酚醛层压玻璃布板, 用来封闭实验通道. 矩形实验通道由可方便地安装在旋转换热实验台上, 并可方便地拆卸, 有利于更换实验件. 图 2 中矩形实验通道的一块盖板上开有矩形视窗, 称之为红外视窗, 加工了与红外视窗相匹配的锗单晶, 锗单晶是能够透过红外线的特殊材料, 是对被测表面为内表面时进行红外照相不可缺少的材料.

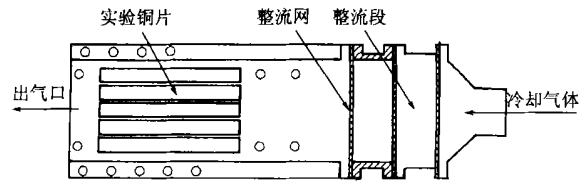


图 1 实验通道示意图

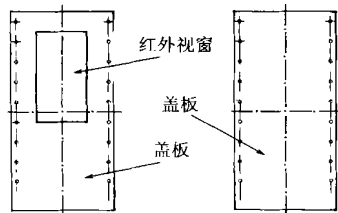


图 2 两种实验通道盖板示意图

图 3 是表面具有纵向条纹的实验铜片示意图, 每个小的条纹是等边三角形, 图中  $h$  表示纵向条纹的高度, 实验中加工了一种光滑表面实验铜片, 4 种具有纵向条纹的实验铜片, 纵向条纹的高度  $h$  分别为  $100\mu\text{m}$ ,  $150\mu\text{m}$ ,  $200\mu\text{m}$ ,  $250\mu\text{m}$ . 每块实验铜片的背后, 在实验铜片的中部, 打孔埋置  $0.2\text{mm}$  镍铬-镍硅热电偶用来测量温度.

本实验中采用了 3 种温度测量技术, 包括点

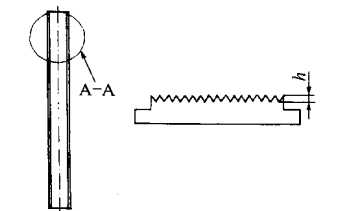


图 3 表面具有纵向条纹的实验铜片示意图

温度计测温、热电偶测温、红外图像温度分析技术. 点温计是接触测温技术, 必须接触到实验件表面的被测点, 然后直接读出被测点的温度, 测得的温度是被测点的表面温度, 这一测温技术受到被测表面的粗糙度、平整度以及探头与被测表面接触的垂直度等因素的影响, 精度较低. 热电偶也是接触测温技术, 是将直径为  $0.2\text{mm}$  的镍铬-镍硅热电偶埋置在实验件内来测量温度, 其精度为  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 本实验中在每个实验铜片中间位置处埋置一个热电偶, 因为铜的导热率很高, 所以认为这个热电偶测得的温度就是实验铜片的平均温度, 另外, 热电偶是埋置在实验件内, 可以从实验件的背面埋置, 不破坏实验件的被测表面, 这一优点对本实验研究的纵向条纹表面十分有利. 红外图像温度分析技术是一种非接触温度测量技术, 首先用红外成像仪拍摄下所要研究的实验件的红外图像, 然后使用红外图像处理软件, 对红外图像进行详细处理, 可以得到需要的各种数据和图像. 本实验中用的是 AGEMA THV-570 红外成像仪, 本文中将对红外图像温度分析技术受到的影响因素进行比较详细的讨论.

## 2 实验结果和分析

### 2.1 材料辐射率的影响

图 4 是实验通道盖板上红外视窗未被封闭时, 实验平面的红外图像, 红外图像中越亮的位置处表示温度越高, 其中线 1, 2, 3 分别是在实验铜片 2, 3, 4 上画出, 线 4, 5, 6, 7 则是在实验铜片之间的酚醛层压玻璃布隔板上画出, 实验铜片的表面都是光滑的. 从图中直观地观察到, 线 4, 5, 6, 7 位置处更亮些, 反映的是隔板的温度高, 而线 1, 2, 3 所在的实验铜片位置处要暗些, 反映出的是实验铜片的温度要低. 但实际情况却不是这样的, 因为每块实验铜片的后面都有单独的加热丝, 而隔板后面则没有加热丝, 实验铜片是被加热丝直接加热的, 温度应该高, 而隔板则只是得到了实验铜片传热, 温度应该低, 最多只能达到实验铜片的温度, 而不应该比实验铜片的温度高. 表 1 中用点温计测得的结果表明, 实验铜片的温度高, 隔板的温度稍低, 可见图 4 中红外图像没有正确地反映出实验平面的温度分布. 产生这一问题的原因是, 实验铜片和隔板的材质不同, 实验铜片是铜, 而隔板则是酚醛层压玻璃布板, 两者的热辐射率不同, 所以造成图 4 没有正确反映被测实验面的温度分布, 对这样的红外图像进行分析, 不可能

得到准确的结果. 根据红外成像仪生产厂家提供的不同材料的参考热辐射率范围, 选择酚醛层压玻璃布板的热辐射率为 0.95, 实验铜片的热辐射率为 0.25. 由此对图 4 中的红外图像进行分析处理, 得到的结果也在表 1 中给出, 这一结果与点温计测得的结果比较吻合, 说明对实验铜片的热辐射率选用 0.25 是正确的.

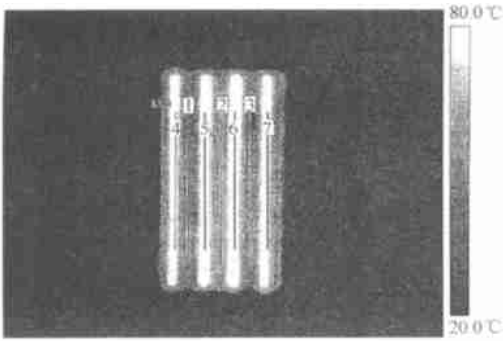


图 4 红外视窗未被封闭时实验平面的  
红外图像(热辐射率 0.95)

表 1 材料辐射率对红外图像温度分析结果的影响			
测温位置	点温计温度/℃	热辐射率	红外图像温度/℃
铜片	1	0.25	62.9
	2		99.1
	3		61.1
铜片	1	0.95	26.7
	2		40.4
	3		26.0
隔板	4	0.95	54.4
	5		60.8
	6		61.1
	7		53.9

2.2 锗单晶透射率的影响

图 5 是实验通道盖板上红外视窗用锗单晶封闭时, 同一被测实验面的两张红外图像, 图中实验铜片的表面都是光滑的. 根据上一节的研究结果, 热辐射率选为 0.25. 比较两个图可以发现, 两个图的亮度不同, 在红外图像中, 越亮的位置处表示的温度越高, 由此两个图反映的温度不同, 图 5b 要亮些, 反映的温度要高. 同一个实验平面会得到亮度不同的红外图像, 这是因为红外线在穿过锗单晶时必定被吸收一部分, 红外线穿过锗单晶时被吸收的量用透射率来表示, 透射率是小于或等于 1.0 的系数, 透射率越小, 表示锗单晶吸收的红外线越多, 反之, 透射率越大, 则锗单晶吸收的红外线越少.

正确地选用锗单晶的透射率, 通过对红外图像的分析处理, 就能得到被测实验件真实的温度值. 图 5a 和图 5b 两个红外图像的不同之处在于

选用的锗单晶的透射率不同, 图 5a 选择的是 1.0, 图 5b 选择的是 0.75. 根据锗单晶加工单位提供的测量结果, 本实验中使用的锗单晶的透射率应为 0.75, 因此图 5b 反映的是被测实验面的真实温度分布. 对图 5a 和图 5b 红外图像分析得到的不同位置处的温度在表 2 中给出. 可见, 在将红外成像仪用于内流传热实验时要选用能透过红外线的特殊材料, 同时为了正确的进行温度处理分析, 对能透过红外线的特殊材料要选用正确的透射率.

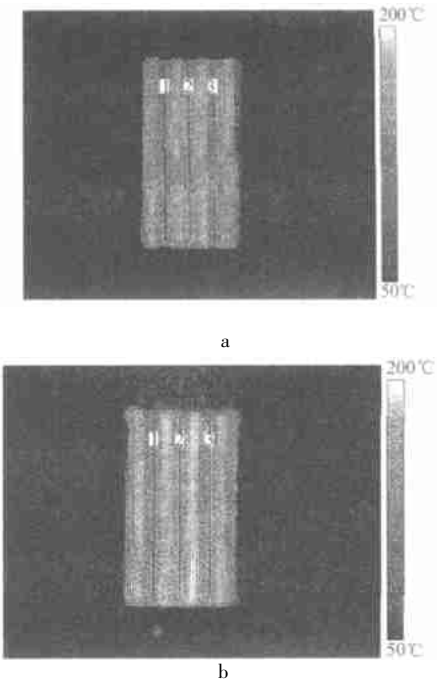


图 5 红外视窗用锗单晶封闭时实验平面的  
红外图像(热辐射率 0.25)

由表 1 和表 2 可见, 实验中以位置 2 为中心的对称位置上的实验铜片 1, 3 的温度相差很小, 绝对值最大相差 1.8℃, 相对值相差不超过 5%, 这说明在对称位置上加热丝对实验铜片的加热是均匀的.

表 2 锗单晶的透射率对红外图像温度分析结果的影响				
测温位置	热电偶温度/℃	热辐射率	透射率	红外图像温度/℃
铜片	1	0.25	1.00	72.1
	2			93.2
	3			73.2
铜片	1	0.25	0.75	80.2
	2			103.5
	3			81.5

2.3 被测实验件表面粗糙度的影响

图 6 是实验通道盖板上红外视窗未封闭时实验平面的红外图像, 选用的热辐射率都为 0.25. 3 个图的相同之处是被测实验面相同, 且线 1 和线 2 位置处实验铜片的表面都是光滑的, 3 个图

的不同之处是线 3 位置处的实验铜片的表面粗糙度不同, 图 6a 中线 3 位置处实验铜片的表面是光滑的, 图 6b 中线 3 位置处实验铜片的表面是具有纵向条纹(纵向条纹高度  $h=150\mu\text{m}$ )的表面, 图 6c 中线 3 位置处实验铜片的表面也是具有纵向条纹(纵向条纹高度  $h=250\mu\text{m}$ )的表面. 从这 3 个图可以看出, 图 6a 中线 1 和线 3 位置处的亮度几乎相同, 说明其温度相等, 这与前面得到的加热丝对实验铜片的加热是均匀的结论相吻合. 图 6b 和图 6c 中线 1 和线 3 位置处的亮度明显不同, 线 3 位置处要亮得多, 根据红外图像反映温度的原理, 这反映出线 3 处的温度要比同一图中对应的线 1 位置处的温度高, 但是, 根据前面实验验证的加热丝对实验铜片的加热是均匀的这一结论, 线 3 位置处的温度应与线 1 位置处的温度近似相等, 可见图 6b 和图 6c 结果显然是错误的. 产生这一错误的原因就是, 3 个图中线 3 位置处实验铜片表面粗糙度发生了变化, 图 6b 和图 6c 中线 3 位置处的实验铜片的表面都具有纵向条纹, 表面粗糙度变化的最直接影响是导致实验件热辐射率发

生变化, 而在图 6b 和图 6c 中对线 3 位置处都采用与光滑实验铜片相同的热辐射率, 因此产生了上述错误的结果. 根据红外成像仪生产厂家提供的铜的热辐射率范围, 以及线 3 位置处的温度应与线 1 位置处的温度近似相等的结论, 在对图 6b 和图 6c 中线 3 位置处的温度进行处理时, 根据材料表面粗糙度的大小热辐射率分别选为 0.75 和 0.85, 得到的分析处理结果在表 3 中给出.

表 3 表面粗糙度对红外图像温度分析结果的影响

测量位置	热辐射率	红外图像温度/℃			
		图 6a	图 6b	图 6c	
铜片	1	0.25	63.2	73.6	81.4
	2	0.25	101.1	101.6	100.5
		0.25	64.1	163.4	181.6
	3	0.75		73.2	88.2
		0.85		69.0	81.2

3 结 束 语

本文对使用红外成像仪开展传热实验的几种影响因素进行了研究、讨论, 使用这一温度测量技术开展传热实验研究, 优点是通过红外图像可直观地观察到实验件的温度分布, 而且, 实验中不破坏实验件, 但是, 实验中使用这一温度测量技术要考虑多种影响因素, 例如实验件的材料、被测实验表面的粗糙度、透过红外线的特殊材料如锗单晶对红外线的透射率等, 材料不同、表面粗糙度不同都会改变热辐射率, 这些影响因素稍有不同, 就会影响红外照相分析技术得到的实验结果. 本研究的结果也说明, 在使用红外成像仪进行传热实验时, 在实验前要进行非常细致的准备工作, 对被测实验件的特性、使用的材料等要有准确的了解, 只有这样, 才能得到准确可靠的实验结果.

参考文献 (References)

[ 1 ] Cramer K E, Winfree W P. Thermal characterization of defects in aircraft structure via spatially controlled heat application[ A] . Thermosense XVIII[ C] . Orlando, Florida, 1996

[ 2 ] Blanchard R C, Wilmoth R G, Glass C E. *et al*. Infrared sensing aeroheating flight experiment; STS-96 Flight Results[ R] . AIAA 2001-0352, 2001

[ 3 ] 徐国强. 转静系旋转盘腔内冷气的流动与换热特性研究[ D] . 北京航空航天大学动力系, 2000

Xu Guoqiang. Flow and heat transfer characteristics of coolant through a shrouded rotating disk system[ D] . Beijing: Dept. of Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000(in Chinese)

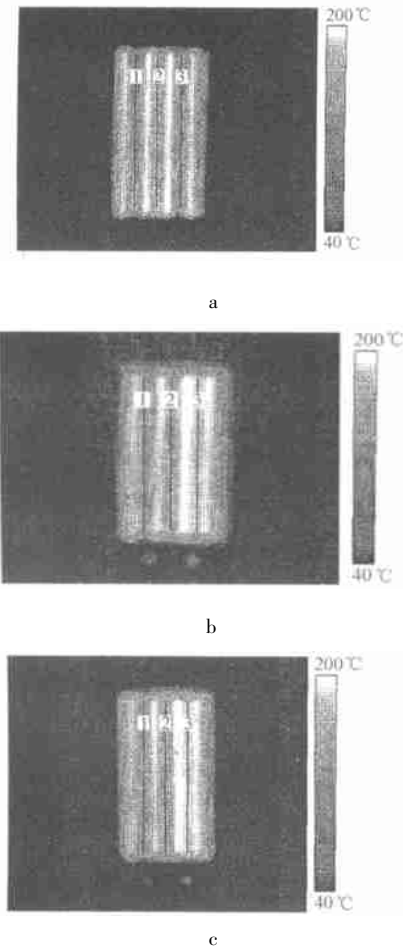


图 6 红外视窗未封闭时实验平面的  
红外图像(热辐射率 0.25)