

# 航天材料热物理性能测试技术的发展现状

何小瓦

(航天材料及工艺研究所 北京9200信箱73分箱15号100076)

**摘要** 根据航天材料热物理性能测试技术的特点,系统介绍了国内航天材料热物理性能测试技术的发展状况和发展趋势,并详细介绍了目前我国航天材料热物理性能测试领域中所具备的测试技术和测试装置、航天热物理性能所涉及的研究领域和内容以及目前正在开展的研究工作。

**关键词** 航天材料 热物理性能 测试技术 动态测量 高温 介电性能

## Actual State of Thermophysical Properties Measurement Technologies for Aerospace Materials

HE Xiao-wa

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 9200-73-15 100076)

**Abstract** Based on the characteristics of thermophysical properties measurement technologies of aerospace materials, the actual state and the tendency in research on thermophysical properties measurement technologies of aerospace materials are introduced. The current technologies and apparatus in the area of thermophysical properties measurements are described in detail. The research areas and items, related to thermophysical properties measurement technologies, are also presented.

**Key words** Aerospace material Thermophysical property Measurement technology Dynamic measurement High temperature Dielectric property

## 1 引言

材料的热物理性能是材料的基本性能,也是进行航天材料研制和航天工程设计的重要参数,这些参数主要包括:热导率、热扩散率、热膨胀系数、比热、热辐射系数、电阻率、介电常数和损耗角正切等,这些参数对热应力计算、热稳定性设计、各种防热隔热材料研究及吸波和透波材料的研究都是必不可少

的。

航天材料热物理性能测试分析可以用三个字来概括它的特点,即“广”、“全”和“宽”。“广”即广泛测定了上百种航天材料的热物理性能。“全”即可以全面地测试分析材料的各种热物理性能。“宽”即测试的温度区间宽,可以从低温到高温( $-196^{\circ}\text{C}$ ~ $3\,000^{\circ}\text{C}$ 以上)。另外,随着航天科学技术的发展,对热物理性能测试技术提出了更多的要求。

## 2 航天材料热物理性能常规测试技术

航天材料热物理性能测试技术研究始于60年代,随着中国航天事业的迅速发展,在其后的几十年中,航天材料的热物性测试技术研究取得了很大的进展,为满足航天事业的迫切需要,建立了一系列能适用于广宽温度范围的有相当高水平的热物性测量装置,在热物性测试研究标准化和系列化方面与国际接轨,开展了大量工作,制定了许多热物性测量方法的各种标准,由此,建立起了比较系统和完备的热物理性能测试分析实验室,为航天材料的研制生产提供了大量测试分析数据,并在此基础上,建立了航天材料热物理性能数据库。

目前,航天热物理性能测试分析实验室的主要常规性测试技术手段主要包括。

### 2.1 热导率测试仪器

由于航天材料所涉及的材料种类繁多,在不同材料和不同温度范围之间,材料的热导率数值将有巨大的差异,必须采用不同的测试技术和相应的测试系统才能满足需要。这些热导率测试系统主要包括双试样小平板低温热导率测试仪器、单试样大平板热导率测试仪器、单试样小平板热导率测试仪器、热流计式热导率测试仪器和激光脉冲法热导率测试仪器。通过这些测试系统,使得材料热导率的测试温度覆盖了从 $-196^{\circ}\text{C}$ ~ $3\,000^{\circ}\text{C}$ 的宽广范围,被测的材料种类可以是各种金属、非金属均质刚性材料,也可以是非均质绝热材料、涂层和油脂类材料。

### 2.2 热膨胀系数测试仪器

在航天材料热膨胀系数测试技术中,一般采用顶杆法进行测量。而在超高温条件下,只能采用非接触探测技术进行测量。目前所建立的常规热膨胀系数测试仪器主要有低温立式顶杆法热膨胀系数测试仪器、中温立式顶杆法热膨胀系数测试仪器、中温立式顶杆法大试样热膨胀系数测试仪器、高温卧式顶杆法热膨胀系数测试仪器和激光扫描式超高温热膨胀系数测试仪器,测试温度覆盖了从 $-196^{\circ}\text{C}$ ~ $3\,000^{\circ}\text{C}$ ,同时还可以进行金属材料熔点测量、高温热电偶标定和材料烧结过程的模拟分析试验。在所有的顶杆法热膨胀系数测试仪器中,采用了最先进的光栅位移测量技术,整个测试过程由计算机进行控制,很好地满足了材料研制和生产质量控制的检测需要。

### 2.3 比热容测试仪器

比热容测试仪器的配备也是根据不同材料类型、试样大小和测试温度范围来确定的,主要有低温比热容测试仪器、下落式铜卡计法中温比热容测试仪器、多试样下落式量热计法中温比热容测试仪器、DSC示差扫描量热计法比热容测试仪器和下落式铜卡计法高温比热容测试仪器,测试温度覆盖了从 $-196^{\circ}\text{C}$ ~ $3\,000^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.4 微波介电性能测试仪器

微波介电性能测试仪器主要用于测量常温条件下低损耗材料(透波材料)和高损耗(吸波材料)在 $2\text{GHz}$ ~ $18\text{GHz}$ 频率范围内的介电常数和损耗角正切。对于低损耗透波材料,测试系统可以自动连续在此频率范围内扫频测量。

## 3 航天材料超高温热物理性能多参数测试技术

航天材料在使用过程中,经常会处于几千度以上的超高温,有时还伴随着高温突变过程。所以超高温热物理性能参数是航天材料和各种型号设计必须的关键数据。

为了测量材料在超高温下的热物理性能,需要对试样加热以达到某一要求的温度和在所指定的方向上建立一定的温度梯度。而传统的测试系统已经无法满足目前航天材料对超高温热物理性能的测试需求,这主要体现在以下几个方面。

3.1 传统的测量方法一般采用外部加热器,如前面所述的常规性热物理性能测试系统。这种加外部加热器的测量方法,其热惯性通常较大,当变换测试条件时,需要较长的时间恢复平衡。同时,还需严格的绝热及保护加热措施以达到一定的实验边界条件。这使得试验装置复杂化,测量所经历的时间较长。

3.2 在高温范围内辐射加热方式也使得测试过程受到很大限制,这主要是由于试样和外部加热器所用的发热体材料长时间的处于高温状态下,而对于大多数材料,当温度高于 $2\,000^{\circ}\text{C}$ 时,由于传热强化、化学反应蒸发扩散和机械强度降低等原因,会带来很多问题,甚至使得测量根本不可能进行。

3.3 随着航天材料的发展,高温材料采用了复合材

料的形式,这就使得这些非均质材料所做的试样无法满足传统测试方法的要求,因此,采用新的测试方法和缩短测量过程所经历的时间,在超高温热物理性能测试中尤显重要。

由此,根据航天材料的特殊需要,我们开展了超高温快速热物理性能测试技术的研究,采用大电流直接通过试样进行加热的方法较好地解决这些问题,整个测试系统可以进行 $3\ 000\ ^\circ\text{C}$ 以上的超高温热物理性能测试,如果被加热试样允许,可以进行更高温度的测量。

由于这种完全不需要外部加热器,且容易达到所需的边界条件,无论从测量过程经历的时间和试验难度来看,都大大地减小了。另外,所加入的能量可以通过电量的测量方便地计算出,无需热量计,因此,测量装置也有所简化,这样使得整个测试系统运行可以长期的稳定可靠。测量采用棒或条状试样以表征材料的不均匀性,当大电流(脉冲或恒定)通过时,通过控制系统的自动控制,温度能迅速上升至稳态。配以响应时间为微秒级的高速光学高温计和数据采集控制系统,能精确地控制整个测量过程,使其在试样状态恶化之前结束。

这种直接通电法的另一个显著特点是可以实现多个热物理性能参数的测试,即可在同一试验、同一试样上,可同时或相继测量热导率、热扩散率、比热容、线膨胀系数、电阻率、单色发射率和总半球发射率等多个热物理性能参数。

直接通电法最大的局限性在于被测试样必须是导电材料,但结合目前已配备的各种辐射加热式热物理性能测试仪器,基本上可以覆盖各种高温材料的热物理性能测试。

## 4 防热系统和材料的特殊热性能测试技术

在许多特殊的高温使用环境下,防热系统和材料的特殊热性能测试技术研究是其中一个重要研究项目。目前正在开展这方面的研究工作,这些特殊热性能测试技术主要包括以下几方面的内容。

4.1 有效热导率测试技术。在一些特殊防热系统和材料在使用过程中,外表面温度经常会达到很高

的温度,而内表面温度需要保持在室温状态,这就需要了解在大的温度梯度下防热系统和材料的整体有效热导率。在有效热导率的测试研究过程中,除了需要模拟防热系统和材料的大范围温度梯度外,还需要模拟不同的大气压力环境。在有效热导率测试技术中,测试环境要完全模拟真实的温度和压力环境,这样就必须要求被测试样的冷面始终保持在室温温度下。为了实现这一条件,其关键技术就是研究厚度为 $1\ \text{mm}$ 以下的薄膜式热流计以及相应的标定技术。

4.2 高温热辐射系数测试技术,测试温度范围为室温 $\sim 2\ 000\ ^\circ\text{C}$ 。

4.3 高温静态热震和高温氧化损失率测试技术。

## 5 航天材料生产和质量控制中热物理性能的动态多参数测试技术及其应用

随着我国航天事业和其它民用技术的发展,材料的生产已经从实验室小批量研制转向大规模多批量生产,相应的质量控制也越来越得到重视,由此对材料的热物理性能测试技术提出了更高的要求。例如,在运载火箭低温贮箱绝热材料、飞机刹车片、炼钢高炉碳砖、建筑保温材料和电冰箱、冷藏车等所用绝热材料的生产过程中,热导率是材料质量的关键技术指标。目前国内外在这类材料的热导率测试中,普遍采用护热板稳态测试方法,测试周期一般需要6小时以上,特别是对于低温隔热材料的测试,由于温度传感器的散热影响使得试样直径必须大于 $200\ \text{mm}$ 以上,这样造成测试周期更长。对于建筑隔热材料的热物性测量,测试周期也都在几个小时以上,并且测试系统庞大,测试样品制作复杂。而对于柔性绝热材料,目前还没有更好的隔热性能测试方法。

针对这些存在的问题,我们开展了动态热物性测试技术的研究工作,并建立了相应的测试系统。在此项测试技术中,采用了类似于热线法的测试原理,但热线用薄膜热源来代替,并且此种薄膜热源本身也作为温度传感器来使用。由此技术所建立的测试系统可以几分钟的时间内测量热导率为 $500\ \text{W/mK}$ 以下的各种形态的材料,测试温度范围为室温 $\sim 700\ ^\circ\text{C}$ 。同时测试系统在测量热导率的同时还可

以测量出热扩散率和比热容。

此项测试技术由于对试样没有特殊的要求,这就可以在材料的制作现场检测出材料的热物理性能,并且此技术可以覆盖目前所有绝热材料在大多数使用环境下的热物理性能测试,同时还可以对各种金属材料、气体和液体的热物理性能进行测试。由于对环境和试样的要求低,这就为各种材料的研制生产提供有效的现场检测手段。

在许多领域中的各种特性也都可以用热物理性能参数来进行表征,如无损探伤、复合气体浓度、真空度、气体流速、土壤特性、岩石特性、食品特性、宝石鉴别、交流电量计量、微波功率测量以及微观热物理性能检测等。而这些特征表征的基础就是动态测试技术,所以此项动态多参数热物理性能测试技术在工业领域的测试中有着重要的意义,并且动态测试技术应用研究的市场潜力巨大。

另外,在传统的热物理性能测试技术的基础上,我们结合最新技术成果,对多参数动态测试技术进行了研究。如采用最先进的能同时测量温度和热辐射系数的红外温度测试技术,结合现有成熟的激光脉冲法测试仪器,研究了在激光脉冲法测试仪器上同时进行热扩散率、比热容和热导率的测试技术。

## 6 介电性能变温测试技术

在一些重要的介电材料中,介电性能与整体的电气性能有直接关系。介电性能中最主要的是介电常数、损耗角正切和透波率这三个参数,它们是衡量介电材料性能质量好坏的主要依据之一。因此在介电材料的研制、生产和使用过程中,这三个参数是考核、检验材料产品性能的关键指标。

在常温环境下的介电性能测试,国内目前的技术手段无论在测试精度和准确性上已经达到了国际先进水平,如前所述的宽频带扫频测试技术。但高温环境下的介电性能技术却与国外还有很大差距。所以目前国内的技术现状造成了无法在变温条件下进行准确的介电性能评估,由此介电材料变温测试技术研究是目前研究面临着一个重要课题。

目前我们已经开始进行此方面的研究工作,研究的内容就是针对介电材料在高温和宽频带范围内的介电性能参数需求,开展介电常数、损耗角正切在

以上高温和频谱范围内的测试技术研究,并研制相应测试系统和标准测试方法,同时根据准确的测量结果计算出变温透波率参数。并且通过以上研究工作,最终建立起有效的高温宽频谱介电性能测试手段,促进介电材料的优化设计,并使得介电材料的研制及产品质量达到一个新高度。

## 7 热物理性能标准参考材料

热物理性能测试方法有很多是在特定的条件下为特定的研究目的而建立的,即使是一些经典常规的方法也往往因为各种原因而引入种种偏差,因此对使用各种测试仪器所获得的材料热物理性能数据正确与否必须进行验证。从计量角度来说,热物理性能测试仪器也必须进行周期性的校验。

验证或校验的最有效和简单的方法就是采用由国家计量部门规定的标准参考材料,以此标准参考材料作为热物理性能量值的传递标准。

迄今为止国际上尚未建立各国公认的标准参考材料,并且国内多年来也未建立起热物理性能量值传递标准体系。所以,我们根据航天材料热物理性能测试的特殊情况,采用了美国国家标准局(NIST)的热物理性能量值传递标准体系,建立了一系列的热导率、比热容和热膨胀系数的标准参考材料。在 $2\ 500\ ^\circ\text{C}$ 以上,采用各种难熔纯金属材料作为热物理性能标准材料,以文献值作为标准参考数据。通过以上工作,我们建立起了比较完备的热物理性能标准参考材料体系,为热物理性能测试的准确可靠提供了保证。

综上所述,随着科学技术特别是航天技术和航天材料的飞速发展,航天材料热物理性能测试技术的研究范畴正在不断扩展和深化,其发展趋势主要体现为以下几个方面:

- (1)从稳态测量技术向动态测试技术发展;
- (2)从破坏性取样的测量向非破坏无损全场、实时测量发展;
- (3)由接触式测量向非接触测量发展;
- (4)由单一性能向一机多用、多种性能同时测量发展;
- (5)测量装置和试样向小型化发展;
- (6)向其它测试领域和特性表征方向发展。