高温条件下的固-固界面接触热阻测试方法与系统

宣益民^{1,2*}, 李强¹, 张平³

1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 电子设备热控制工业和信息化部重点实验室, 南京 210094;

2. 南京航空航天大学能源与动力学院, 航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室, 南京 210016;

3. 桂林电子科技大学机电工程学院, 桂林 541004

* E-mail: ymxuan@njust.edu.cn

收稿日期: 2019-02-26; 接受日期: 2019-03-27; 网络版发表日期: 2019-04-24

摘要 高温条件下的固-固界面接触热阻是航空航天、能源、热核反应等领域中热控制和热防护系统设计的关键参数之一. 针对高温条件下界面接触热阻测量系统设计与研制中存在的高温界面温差的高精度测量、热流量和压力的精确加载与计量、高温测试本体的绝热防护等技术问题, 本文提出了一种上下对称布置稳态双向加载热流的高温条件下界面接触热阻测试方法, 分析阐明了影响高温条件下接触热阻测量数据准确性的主要因素, 建立了高温接触界面温差的红外热像测试与分析方法, 攻克了钨热流计和接触界面处压力的精确加载与计量技术, 设计了功率、温度全闭环精确控制的盘式钨丝高温加热器和高温测试本体的真空多层隔热结构, 研制了高温条件下界面接触热阻的测试系统, 实验测试了高温合金、C/C材料等材料对之间的接触热阻. 结果表明, 本文建立的高温条件下界面接触热阻测试方法和系统, 实现了界面温度达1200℃的高温条件下接触热阻的高精度测量, 测试误差小于10%.

关键词 接触热阻, 高温, 测试方法, 热控制, 热防护

1 引言

高温条件下的固-固界面接触传热现象广泛存在于航空航天、能源动力和热核反应等领域. 由于高温环境条件大多对应于高或超高热流密度, 接触热阻的变化与偏差可能导致大的温差, 接触热阻参数的精确确定对装置或系统的安全可靠设计尤为重要. 以高超声速飞行器为例, 由于气动加热作用, 飞行器外表温度将超过1000℃, 需要敷设热防护系统以保障飞行器安全, 热防护系统的性能除了受到热防护材料热物

性、结构尺寸等因素影响之外, 热防护材料之间的高温界面接触热阻是高超声速飞行器热防护系统设计中的关键参数之一. 以往, 由于缺乏高温条件下界面接触热阻的测试方法和系统, 无法获得准确的高温界面间接触热阻数据, 只能采用估计方法或沿用常温条件下接触热阻数据, 将可能导致热防护系统的设计存在较大偏差, 直接影响热防护系统设计的经济性、合理性与有效性. 例如: (1) 基于保守型设计方法, 设计出的热防护系统体积庞大、效率较低. 假定热防护材料与机身合金材料间的实际接触热阻为 $100 \text{ cm}^2 \text{ K/W}$, 如设

引用格式: 宣益民, 李强, 张平. 高温条件下的固-固界面接触热阻测试方法与系统. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 491–500

Xuan Y M, Li Q, Zhang P. Measurement method and instrument of thermal contact resistance at high temperature (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 491–500, doi: 10.1360/SST-2019-0074

计时选取值为 $50 \text{ cm}^2 \text{ K/W}$, 为了控制机身合金材料温度达到设计指标要求, 将导致热防护材料的厚度比合理值增大1倍, 大大增加了飞行器的体积与重量, 造成设计成本和资源的浪费. (2) 接触热阻设计选取值过大, 比如设计选取值为 $200 \text{ cm}^2 \text{ K/W}$, 将导致热防护材料用量不足, 会造成飞行器机身金属材料超温, 严重时会发生烧蚀而使飞行器失效. 因此, 亟待研究高温条件下界面接触热阻的测试方法与系统, 获取高温条件下材料对界面接触热阻数据, 为热控制和热防护系统的设计提供基本参数.

一般地, 国内外研究人员主要开展了常温条件下界面接触热阻的测试方法研究^[1,2], 研制了稳态法与瞬态法接触热阻测试系统, 而在高温条件下界面接触热阻的测试方法与系统方面研究尚不多见, 从公开发表的几篇文献报道可看出, 大多存在测试精度低、测试温度不高等局限. 例如, Kneer等人^[3,4]采用热像法对温度区间 $60^\circ\text{C}\sim 280^\circ\text{C}$ 的界面接触热阻进行了测试, 实验系统主要在MTS 810液压加载机基础上改装而成, 采用红外摄像机对材料对接触界面温度进行测量, 通过采集温度数据反问题求解得到热流量, 从而获得界面接触热阻. 由于该测试系统未采取有效的热防护措施, 且反问题求解热流量, 其测量精度有限. Zheng等人^[5]开发了常温 $\sim 640^\circ\text{C}$ 的界面接触热阻实验台, 但是由于界面温度测量误差大、系统热损失大等原因影响了测试数据的精度.

影响高温界面接触热阻的因素众多, 包括温度、外加压力、界面材料、表面属性和漏热损失等, 相比常温条件界面接触热阻的测量, 实现高温条件下界面接触热阻的高精度测量, 面临一些新的技术难点: (1) 要测量界面温度达到 1200°C 时样品对之间的接触热阻, 加热体等部件的温度甚至接近 2000°C , 在如此高温条件下, 很多材料会发生热变形、氧化、脆化现象, 给高温加热系统的设计和研制带来了很大难度. 因此, 如何将测试样品加热并稳定控制在 1200°C 温度范围, 是测量高温界面接触热阻的前提. (2) 在 1200°C 高温条件下, 传统热电偶接触式测量界面温差的方法难以适用, 而采用非接触辐射测温方法也面临着如何减小辐射热损失、确定测温表面发射率以及如何从测量温度图像中精确定界面温差等难点. 因此, 精确测量 1200°C 高温接触界面的温差, 是实现接触热阻高精度测量的关键. (3) 在高温环境中, 如何对测试本体采取

有效且可靠的绝热保护, 保证加载热量在试样对界面间一维传递, 是接触热阻精确测量的重要保障. 因此, 研究高温条件下界面接触热阻的测试方法, 研制高精度的高温界面接触热阻测试系统, 需要深入研究高温界面的热量加载、高温接触界面温差的高精度测量、热流量和压力的精确加载与计量、高温环境热防护等关键技术. 本文针对界面温度达 1200°C 的接触热阻高精度测量问题, 研究高温条件下界面接触热阻测试方法、测试系统误差分析与误差分配、测试系统设计与研制以及实验测试, 旨在系统建立高温条件下固-固界面接触热阻测试方法与系统.

2 高温条件下的界面接触热阻测试方法

2.1 设计原理与方法

接触热阻的测试方法分为瞬态法和稳态法, 瞬态法虽适合快速测量, 但测量过程易受各种因素影响, 测试精度难以保证, 误差一般大于30%^[6,7]; 稳态法主要依据美国国家标准ASTM E1105和ASTM D5470-06^[6], 其物理意义明确, 避免了瞬态法在计算推导过程中引入不确定性参数的影响, 故测试精度相对较高. 接触热阻稳态测试法一般是基于一维导热公式, 具体如下:

$$R = \frac{\Delta T_c}{q}, \quad (1)$$

式中, R 为接触热阻, ΔT_c 为界面温差, q 为界面处热流量. 通过热流计可测量出界面热流量:

$$q = -k_t \cdot \frac{dT_t}{dx}, \quad (2)$$

式中, k_t 为热流计的导热系数, dT_t/dx 为热流计的温度梯度.

在上述貌似简单的接触热阻表达式中, 隐含着众多影响测试数据准确性的复杂因素. 本文作者在前期的研究中发现^[2], 传统的单向加载热流测量接触热阻方法无法消除一些附加误差, 因此, 在前期的常温条件下界面接触热阻测试方法研究基础上, 如图1所示, 本文提出了一种高温条件下上下对称布置稳态双向加载热流测试方法, 在测试本体的中间位置布置高温加热体, 提供上下两部分的双向热流, 热量分别沿上下两个方向依次传递给热流计和测试样品对, 通过测量热流量和界面温差, 即可计算出接触热阻. 相比较于

图1 (网络版彩图)高温条件下双向加载热流的接触热阻稳态测试方法

单向热流方法,其主要优点如下:(1)可消除由单向加载热流引起的附加误差,提高测试精度^[2];(2)利于高温加热体的热防护处理。因为保持接触界面达到1200℃高温条件,加热体自身温度可能将高达1800℃甚至更高,传统的单向加载热流方法,加热体在测试本体端部,给加热体热防护提出了相当大的难题。而双向加载热流方法,加热体布置在测试本体中心位置,通过在加热体周围布置多层真空隔热屏,相比较于端部更容易进行绝热处理,实现样品对的一维导热。

从式(1)和(2)可知,影响接触热阻测试精度的因素如下:

$$R = f(\Delta T_c, T_r, L_r, k_r, q_{\text{热损失}}), \quad (3)$$

主要包括, ΔT_c 接触界面温差, T_r 热流量计上的测量温度, L_r 热流量计温度测点对应位置, k_r 热流量计材料的导热系数, $q_{\text{热损失}}$ 系统热损失。

根据各个误差项的分析,得到系统总体的误差传递函数如下:

$$\frac{U_R}{R} = \sqrt{\frac{U_{\Delta T_c}^2}{\Delta T_c^2} + \frac{U_{k_r}^2}{k_r^2} + \frac{U_{\Delta T_r}^2}{\Delta T_r^2} + \frac{U_{\Delta L_r}^2}{\Delta L_r^2} + \left(\frac{q_{\text{loss}}}{q}\right)^2}. \quad (4)$$

如表1所示,为保证接触热阻的测量误差小于15%,考虑到现有技术实现的可能性和所采用的一次测量仪表的测量精度,进行了接触热阻测试系统的误差分配。具体如下:热流量计选用NIST SRM 730钨标准材料,300℃~1800℃温度区间其热导率误差在2%~5%范围,设计相对误差选取5%;热流量计温度选用经过标定后的钨铼热电偶测量,设计相对误差选取300℃~1800℃温度区间的最大可能误差7.8%,热电偶位置误差选取机加工钻孔的最大偏差3.3%;热像仪温度测量误差选取厂家提供的最大误差5%;通过初步计算多层真空热防护屏的隔热性能,系统热损失误差预估10%取值。

2.2 测试系统的设计

高温接触热阻测试系统的总体设计如图2所示,主要包括:高温真空测试腔、高精度稳定加热系统、高稳定性压力加载系统、热防护系统、高稳定性冷却系统、高真空系统和数据采集控制系统。为减小对流热损失,整个测试本体放置在真空腔体内,真空度设计为 10^{-3} Pa,测试本体真空处理,也利于防止钨、钨铼等高温材料的氧化发脆。加热系统由高精度可控硅程控电源和高温加热体内的钨铼热电偶测温组成全闭环控制。高温界面的温差采用微距热像仪测量,热像仪通过在真空腔体上开设蓝宝石视窗观测待测试样的接触界面,热像仪微距镜头的焦距调焦范围最远可达30 cm。设计选用NIST(The National Institute of Standards and Technology)的标准钨材料作为热流量计,采用经过高精度干体炉标定后的0.5 mm钨装热电偶,进行热流量计上精确激光打孔加工定位位置处的温度测量。高稳定性压力加载系统由上下对称布置的直线电机和

表1 高温接触热阻测试系统的设计误差分配

名称	符号	设计相对误差
热流量计热导率误差	U_{k_r} / k_r	5%
热电偶温度误差	$U_{\Delta T_r} / \Delta T_r$	7.8%
热电偶位置误差	$U_{\Delta L_r} / \Delta L_r$	3.3%
热像仪温度误差	$U_{\Delta T_c} / \Delta T_c$	5%
系统热损失误差	$q_{\text{热损失}} / q$	10%
系统总体误差	U_R / R	14.89%

图 2 (网络版彩图)高温条件下接触热阻稳态测试系统示意图

压力传感器组成全闭环精确控制系统, 确保能不受高温下材料热胀冷缩产生的热应力影响. 高稳定性冷却系统由高精度的恒温油槽给上下对称布置的油冷板提供冷却液. 温度、压力数据信号通过真空密封数据接头和外部数据采集控制系统连结.

3 高温条件下界面接触热阻测试系统的研制

3.1 关键技术和解决方法

(1) 高温接触界面温差的高精度测量

高温条件下温度测量主要有接触式和非接触式测量方法. 由于普通的接触式温度测量范围有限, 且温度探头需嵌入到试件内部, 可能破坏试件温度分布, 导致测量结果出现偏差. 更为重要的是, 采用接触式方法无

法直接测量高温接触界面处温度, 需要在试件轴向方向布置多个测点, 然后外推计算出界面温度, 其测量误差大, 而且在厚度只有十几毫米的试件上开孔定位也很难实现. 因此, 本文建立了高分辨率红外热像仪进行高温界面温差的非接触式测量方法. 如图3所示, 采用TELOPS的制冷型热像仪(型号: TEL-1000-MW-MCT, 640像素 $\times$ 512像素, 波长3.7~4.95 μm)对测试样品对的界面温差进行360°周向旋转测量, 该红外热像仪加设显微镜头后调焦范围为0~30 cm, 因测试腔体需要真空处理, 故在真空腔体上对应位置开设了蓝宝石视窗, 热像仪和蓝宝石视窗经过原厂多温度区间的温度校准. 为减小热像仪与待测接触界面的辐射热损失, 在多层热防护屏上开设了直径约10 mm的观察孔, 此观察孔内横穿一导光筒, 内喷涂炭黑处理. 高温红外测温的另一关键因素是确定测试样品表面发射率,

由于测试本体(加热器、热流计和测试样品对)处于1200℃以上的高温环境,且在测试过程中需要保证热流计和测试样品对的温度分布具有一维性,因此,高温测试本体的绝热防护是测试系统的关键环节之一。为了防止对流热损失,测试本体腔体进行了高真空处理,通过高真空机组将测试腔体真空度保持在 10^{-3} Pa。由于在高温条件下,各种材料的热膨胀系数不一致,会造成高真空环境密封泄露,本文将密封接口尽可能布置在测试腔上下两端温度较低区域,同时在测试腔外罩中设置水冷套通道,对所有密封接口进行水冷处理,防止密封接口处温度过高,有效地解决了密封泄露问题(图5)。为减小辐射和导热热损失,通过理论模型设计计算和实验研究^[8],在测试本体外加装了多层隔热结构,内部高温区域采用碳纤维材料隔热,外部区域采用多层反射隔热屏进一步减小辐射热损失,多层反射隔热屏依次为钨材料镜面抛光隔热屏、高温钼材料镜面抛光隔热屏等,考虑单位质量的隔热材料对辐射能量的衰减能力,当反射屏层数为5层时为最优结构。通过以上措施,有效实现了高温测试本体的绝热防护,保证了加载热量在试样对界面间

图5 (网络版彩图)热防护仿真及实物图

一维传递。

3.2 测试系统搭建

基于以上设计分析结果,研制了高温条件下界面接触热阻测试系统,如图6所示。整个测试系统按前述的上下对称布置稳态双向加载热流测试设计方法,内部通过定位工装保证上下测试区的对中定位,上下对称布置的电机推杆通过动密封和布设的压力传感器构成全闭环压力加载控制系统,为实现对测试接触对的界面温差采用轴向360°周向旋转测试,在真空测试腔上下端部设置了旋转密封平台和旋转驱动电机。在测试过程中,通过工装安装好上下测试区的测试样,使得接触界面能通过导光筒对准蓝宝石视窗以便于红外热像仪能观测。整个测试过程实现全自动控制与数据记录,采集热像仪拍摄的接触界面的温度场和热流量计上的热电偶温度,分析计算得到所需要测试温度和压力条件下的接触热阻数据。

4. 高温条件下界面接触热阻实验

4.1 数据处理方法

根据前述的式(1)和(2),只要测量出接触界面处的热流量和温差即可得到接触热阻值。相对而言,热流量的测试数据处理相对简捷,通过计算处理热流计上温度测点和测点对应位置的数据,可以得到热流量的实验数据。而接触界面的温差需要通过红外热像仪拍摄的图像进行分析处理得到,下面以界面温度为1000℃

图6 (网络版彩图)高温条件下接触热阻稳态测试系统和高温真空测试腔内部照片

条件下C/C材料对的热像仪图像为例, 介绍界面温差的数据处理方法. 如图7所示, 图7(a)为热像仪所拍摄的温度场图像, 图像大小为512个像素点(高度)×640个像素点(宽度), 对应实际大小约为5120 μm ×6400 μm . 可以发现, 在C/C材料对接触界面处有着明显的温度差异. 为提高界面温差的取值精度, 对接触界面处90个像素点(高度)×100个像素点(宽度)的图像进行放大处理, 所得到的温度图像如图7(b)所示. 此时可以发现, 接触界面处温度分布呈现出3个不同温度范围的区域, 通过对图7(b)的每个像素点温度数据进行宽度方向100个数据点的平均处理, 可以得出在高度方向不同位置处所对应的温度值, 如图8所示. 从图中可以清楚地看到, C/C材料对接触界面处的温度数据有着斜率不同的3条线, 上下两条温度数据线分别为上下C材料的温度值, 而中间的温度线即为C/C材料接触界面间的温度值, 取3条线型交点之间的温差可以为界面温差, 而界面间距也可通过像素点的多少确定. 至此, 通过接触界面周向不同位置红外热像图像的处理, 可以得

到测量样品对360°周向的界面温差, 结合测量的热流量, 即可计算得出测试材料对界面间接触热阻.

4.2 系统测试误差

4.2.1 界面热流测试误差

(1) 热流计热导率 k_r

热流计选型标准材料导热系数: NIST SRM 730 钨, 经校准其热导率与理论值的差值为 $U_{k_r} / k_r \approx 2\%$ (300~2000 K).

(2) 热流计测温热电偶的间距 ΔL_r

热电偶间距为30 mm, 热电偶直径0.5 mm, 经三坐标测量热电偶位置的相对误差为 $U_{\Delta L_r} / \Delta L_r = 1.41 d / \Delta L_r = 2.35\%$.

(3) 热流计测温热电偶的温差 ΔT_r

对热电偶进行标定, 标准对比参照器件的精度为0.1℃, 标定数据拟合误差为0.12℃, 热电偶测温误差为 $U_{T_r} = 0.156^\circ\text{C}$, 热电偶间距温差的误差为 $U_{\Delta T_r}$

图 7 (网络版彩图)界面温度1000℃条件下C/C材料对的红外热像图(a)以及放大图(b)

图 8 (网络版彩图)界面温度1000℃条件下C/C材料对界面温差数据处理结果

$$1.41 U_T / 1.41 = 0.156^\circ\text{C}.$$

于是, 界面热流测量误差为

$$\begin{aligned} \frac{U_R}{q} &= \sqrt{\frac{U_{k_r}^2}{k_r^2} + \frac{U_{\Delta T_r}^2}{\Delta T_r^2} + \frac{U_{\Delta L_r}^2}{\Delta L_r^2}} \\ &= \sqrt{(2\%)^2 + (2.35\%)^2 + \left(\frac{0.156}{\Delta T_r}\right)^2}. \end{aligned}$$

4.2.2 界面温差测试误差

如前所述, 在采用红外热像仪测量高温界面温差之前, 通过已经过标定的热电偶对热像仪进行了标定, 热电偶的精度为 0.156°C , 标定数据的拟合误差为 1.043°C , 于是热像仪测温误差为

$$U_{T_c} = \sqrt{(0.156)^2 + (1.043)^2} = 1.055^\circ\text{C}.$$

热像仪测量界面温差的误差为

$$\frac{U_{\Delta T_c}}{\Delta T_c} = \sqrt{\left(\frac{1.41 U_{\Delta T_c}}{\Delta T_c}\right)^2} = \frac{2.11}{\Delta T_c}.$$

综上所述, 根据实验中测量的热流计上热电偶之间的温差 ΔT_r 和界面温差 ΔT_c , 可确定接触热阻的测量误差. 表2给出了界面温度为 1000°C 、压力 0.6 MPa 条件下C/C材料对接触热阻实验误差与设计误差的比较情况, 从表中可以看出, 系统测试误差小于设计误差, 测试相对误差可达9.15%.

众所周知, 接触热阻并无标准值可参照比对. 为检验该测试系统的精度与可靠性, 利用该系统可以同时测量高温条件下材料的导热系数的基本属性, 采用该测试系统进行了针对99.999%纯铜材料在 $100^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$ 区间的导热系数比对实验. 如图9所示的测试结果表明, 在整个温度变化区间内, 纯铜标准试样导热

图9 (网络版彩图)纯铜材料的导热系数比对实验

系数的测量值与NIST的纯铜导热系数标准值^[9]的平均相对误差小于5%, 从而也验证了该测试系统的准确性.

4.3 典型材料对界面接触热阻的实验结果

综上所述, 研制了高温条件下界面接触热阻的双向加载热流稳态测试系统, 该测试系统的主要性能指标如下: (1) 试样温度测量范围: $100^\circ\text{C} \sim 1200^\circ\text{C}$; (2) 压力加载范围: 材料自然接触 $\sim 2\text{ MPa}$ (压力波动: $\pm 2\%$); (3) 试样直径 25 mm 左右(可根据需要调整); (4) 接触热阻测量不确定度: $< 10\%$.

针对高温合金材料、C/C材料等典型热防护材料, 采用该测试系统测试了不同温度和压力条件下材料对之间的界面接触热阻, 测试结果见图10和11. 测试结果

表2 C/C材料对接触热阻实验误差与设计误差的比较

名称	符号	设计相对误差	实验相对误差
热流计热导率误差	U_{k_r} / k_r	5%	2%
热电偶温度误差	$U_{\Delta T_r} / \Delta T_r$	7.8%	5.49%
热电偶位置误差	$U_{\Delta L_r} / \Delta L_r$	3.3%	2.35%
热像仪温度误差	$U_{\Delta T_c} / \Delta T_c$	5%	4.38%
系统热损失误差	$q_{\text{热损失}} / q$	10%	5%
系统总体误差	U_R / R	14.89%	9.15%

图10 (网络版彩图)不同界面温度和压力条件下高温合金材料对的接触热阻

图 11 (网络版彩图)不同界面温度和压力条件下C/C材料对的接触热阻

表明,与常温条件下接触热阻类似,相同温度条件下材料对界面间接触热阻随着接触压力的增大而减小,例如,在界面温度530℃条件下,高温合金材料对的加载压力从自然接触增大到0.6 MPa时,界面接触热阻从 $2.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ 降低到 $1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ K/W}$,界面压力增大,界面间接触点增多,接触热阻降低。另外,测试结果还表明,随着界面温度的增大,相同压力条件下材料对界面间接触热阻随之减小,比如,在界面压力0.1 MPa

条件下,C/C材料对的界面温度从120℃增大到860℃时,界面接触热阻从 $4.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ 下降到 $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$,降低了89.8%,这主要是由于在高温环境中,两个接触界面之间的辐射换热量增大,强化了两个界面之间的热量传递过程,导致两接触界面间温差减小,从而降低了界面接触热阻。

5 结论

提出了一种基于双向加载热流的高温条件下界面接触热阻的测试方法,建立了高温条件下界面接触热阻测试系统的误差分析和设计方法,突破了高温接触界面温差的高精度测量、热流量和压力的精确加载与计量、高温环境热防护、高真空保持和漏热抑制等关键技术难题,研制了高温条件下界面接触热阻的测试系统。

实现了界面温度可达1200℃、压力加载范围0~2 MPa条件下材料对之间接触热阻的测量,通过误差分析和导热系数数据比对,该测试系统的误差小于10%,可用于高温条件下固-固界面接触热阻的高精度测量,为高温环境热控制和热防护系统的设计提供了基本方法与测试手段。

参考文献

- 1 张平,宣益民,李强. 界面接触热阻的研究进展. 化工学报, 2012, 63: 335–349
- 2 Zhang P, Xuan Y M, Li Q. A high-precision instrumentation of measuring thermal contact resistance using reversible heat flux. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2014, 54: 204–211
- 3 Fieberg C, Kneer R. Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements. *Int J Heat Mass Transfer*, 2008, 51: 1017–1023
- 4 Burghold E M, Frekers Y, Kneer R. Determination of time-dependent thermal contact conductance through IR-thermography. *Int J Thermal Sci*, 2015, 98: 148–155
- 5 Zheng X P, Liu D H, Feng J L. Experimental investigation of high temperature thermal contact resistance with interface material. In: International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Florida, 2011
- 6 Xian Y, Zhang P, Zhai S, et al. Experimental characterization methods for thermal contact resistance: A review. *Appl Thermal Eng*, 2018, 130: 1530–1548
- 7 Chiu C P, Maveety J G, Tran Q A. Characterization of solder interfaces using laser flash metrology. *MicroElectron Reliability*, 2002, 42: 93–100
- 8 Chen M J, Zhang P, Li Q. Design and heat transfer analysis of a compound multi-layer insulations for use in high temperature cylinder thermal protection systems. *Sci China Tech Sci*, 2018, 61: 994–1002
- 9 Drexler E S, Simon N J, Reed R P. Properties of copper and copper alloys at cryogenic temperatures. NIST, 1992

Measurement method and instrument of thermal contact resistance at high temperature

XUAN YiMin^{1,2}, LI Qiang¹ & ZHANG Ping³

¹ *MIT Key Laboratory of Thermal Control of Electronic Equipment, School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;*

² *Key Laboratory of Aero-engine Thermal Environment and Structure, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;*

³ *School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China*

The high temperature thermal contact resistance (TCR) is one of the vital parameters for system thermal management since the interfacial contact heat transfer process under high temperature conditions is widely existed in the fields of aerospace, energy, thermonuclear reaction, etc. The characterization method and experimental investigation of the TCR at a high temperature (~1200°C) are not systematically established so far and the pertinent researches are scarce. This paper carries out a research on high temperature TCR measuring system design and presents a steady-state bi-directional loading heat flow method with symmetrical test columns. A measurement instrument is developed and its performance (e.g., measuring accuracy, uncertainty and influence factors) is tested under high temperature condition. Furthermore, the high temperature TCR and conductivity experiments are conducted through the instrument. The results show that the high temperature TCR can be precisely measured and the measurement uncertainty is within 10%, which verifies the feasibility and reliability of the homemade instrument and the presented measuring method at high temperature.

thermal contact resistance, high temperature, measurement method, thermal control, thermal protection

doi: [10.1360/SST-2019-0074](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0074)