

# 带补偿加热的 GH4169 间的接触热导测试研究

王宗仁, 张卫方\*, 唐庆云, 刘升旺

北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191

**摘要:** 针对航空发动机热端部件的材料特性和工作环境特点, 自主研制了带有补偿加热装置的高温、高压接触热导(TCC)测试系统。设计使用纯铜作为热流计材料, 使其对于热导率不明确或随温度变化较大的高温合金同样具有较好的适用性。针对航空发动机热端部件常用结构材料 GH4169/GH4169 在不同界面压力(60~180 MPa)和不同界面温度(150~500 °C)下的接触热导进行了试验研究。研究结果表明采用该系统进行高温、高压条件下的接触热导试验研究是可行的, 利用该测试系统得到了 GH4169 间的接触热导的变化规律, 并分析比较了有、无补偿加热装置条件下的接触热导变化情况。

**关键词:** 温度补偿; 航空发动机; 高温合金; 接触热导; 接触热阻

**中图分类号:** V232; TG132.32 **文献标识码:** A

航空科学技术的发展, 对航空发动机提出了越来越高的要求。对于燃气涡轮发动机而言, 涡轮温度决定了它的有效功率, 因此随着航空发动机的发展, 其热端部件的工作温度越来越高。为了提高对燃气涡轮发动机热性能的预测能力, 对接触热导进行深入了解是至关重要的<sup>[1]</sup>。

关于接触热导的理论计算和试验研究国内外已有大量的文献报道。在理论研究方面, 通常采用单点模型或多点模型进行分析, 最有代表性的为 Mikic 弹性模型<sup>[2]</sup>、CMY (Cooper、Mikic 和 Yovanovich) 塑性模型<sup>[3]</sup> 以及由 Sridhar 和 Yovanovich 提出的弹塑性变形模型<sup>[4]</sup>、Lambert<sup>[5]</sup>、Barzelay<sup>[6]</sup>、任红艳<sup>[7]</sup> 和张涛<sup>[8]</sup> 等分别综述了接触热导的一些理论模型。试验研究方面, Xu 等<sup>[9]</sup> 在低温接触热阻领域开展了大量研究, 顾慰兰<sup>[10]</sup> 和赵宏林<sup>[11]</sup> 等分别对金属平面接触时在不同压力、不同温度下的接触热阻进行了试验研

究, 黄明辉等<sup>[12]</sup> 利用瞬态法对大变形条件下的接触热导进行了测试, 刘冬欢等<sup>[13]</sup> 研究了 C/C 复合材料与 GH600 不同温度、不同压力下的接触热导, 张兴致<sup>[14]</sup> 研究了高温合金及钛合金与模具间的接触热导。笔者也对接触热导的理论模型与试验研究进行了综述<sup>[15]</sup>。值得注意的是, 目前国内外针对接触热导的研究大多在较小的压力下进行, 但是对于航空发动机来说, 热端部件材料间的压力可以达到 480 MPa, 因此必须研究高温、高压下它们之间的接触热导变化情况。

在保证轴向一维导热方面, Rosochowska 等<sup>[16]</sup> 提出了一种在接触试样界面处设置补偿加热器的思想用来减少横向热流损失, 但具体的实施方法未见相关报道。本文搭建了带有补偿加热装置的可用于高温高压接触热导试验研究的测试系统, 进而针对航空发动机热端部件常用结构材料高温合金 GH4169 进行了接触热导试验研究,

收稿日期: 2011-03-07; 退修日期: 2011-03-28; 录用日期: 2011-05-11; 网络出版时间: 2011-05-26 17:56

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110526.1756.020.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110526.1756.020

\* 通讯作者. Tel.: 010-82315759 E-mail: weifangzhang831@sohu.com

引用格式: 王宗仁, 张卫方, 唐庆云, 等. 带补偿加热的 GH4169 间的接触热导测试研究 [J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1945-1950.

Wang Zongren, Zhang Weifang, Tang Qingyun, et al. Experimental investigation of thermal contact conductance across GH4169/GH4169 interface with compensation heater [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1945-1950.

得到了不同温度、不同压力下的接触热导变化规律,并比较了有、无补偿加热装置条件下接触热导的变化情况。

## 1 试验方法

### 1.1 试验原理

接触热阻(TCR)是由于固定表面微观接触点热流收缩效应导致的额外传热阻力。接触热阻的倒数即为接触热导(TCC),它可以根据界面处的温度降 $\Delta T$ 和轴向的热流 $q$ 得到。接触热导的定义式为

$$h_c = \frac{q}{\Delta T} \quad (1)$$

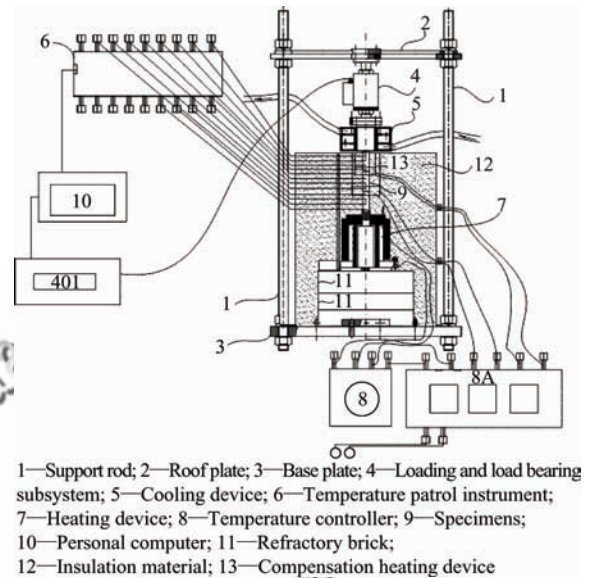
本试验采用稳态法进行测量,基本原理是:将两根等截面测试试样和一根热流计试样在一定的压力下保持轴向接触,对最底端试样的端面进行加热。通过轴向上等间距分布的热电偶确定轴向上的温度梯度,反推到界面处得到界面温度跳变值 $\Delta T$ 。通过傅里叶定律 $q = k\Delta T/\Delta X$ 可以得到轴向热流 $q$ ,其中: $k$ 为两测试点间的平均热导率; $\Delta T$ 为两测试点间的温差; $\Delta X$ 为两测试点间的距离。进而根据接触热导的定义可以得到其测量值。

为实现稳态法测量的关键技术——轴向一维导热,本试验除采用传统的隔热材料和冷端设置冷却装置外,还在试样界面处设置了补偿加热装置。补偿加热器工作原理为:待试样上的热电偶读数稳定后,通过热电偶温度反推得到界面处的平均温度,然后通过温控仪调整补偿加热装置的加热温度,如此循环,直至界面处的平均温度与补偿加热器温度近似相等( $\pm 1^\circ\text{C}$ )。根据传热学的基本原理,界面处与周围的补偿加热装置温度相等,故可认为不存在横向的热流损失。

本测试系统引入了纯铜材料作为热流计,对于热导率不明确或热导率随温度变化较大的高温合金,可以用热流计测得的热流代替试样中的轴向热流 $q$ 。在 $q$ 的计算过程中,由于纯铜材料硬度较小,试验载荷下的变形量对试验误差的影响不容忽视,因此,在计算过程中应根据实际变形情况调整两测试点之间的距离 $\Delta X$ 。

### 1.2 试验设备

本试验所用设备为笔者所在课题组自主研制的接触热导测试系统,设备结构示意图见图1。



1—Support rod; 2—Roof plate; 3—Base plate; 4—Loading and load bearing subsystem; 5—Cooling device; 6—Temperature patrol instrument; 7—Heating device; 8—Temperature controller; 9—Specimens; 10—Personal computer; 11—Refractory brick; 12—Insulation material; 13—Compensation heating device

图1 测试系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

该测试系统由加载-承载系统、加热系统、冷却系统、温度控制与测试系统和保温系统5部分组成。一个圆柱形纯铜热流计和两个测试试样位于设备的中间位置,12根K型热电偶插在试样中以测量试样的轴向热流分布,热电偶测得的数据输出在计算机上显示,以便随时控制轴向的温度分布;纯铜热流计的顶端为冷却装置和加载装置,冷却水箱固定在加载装置的力传导杆上,加载装置通过力传导杆给试样施加压力,并通过压力传感器测量压力的大小,该设备的载荷范围为0~500 MPa;试样周围为保温材料,该设备采用珍珠岩和保温棉作为保温材料,在试样界面处各有一个自主研发的补偿加热器,以补偿横向热流损失,最大可能地实现轴向一维导热;试样底端为主加热器,主加热器由加热丝、加热块和加热筒组成,加热丝材料为0Cr21Al16Nb(国家标准),功率为1500 W,加热块材料为K417高温合金,该合金在1000 $^\circ\text{C}$ 时仍能保持较高的机械强度。

本试验中所使用的补偿加热装置(图1中13)的结构示意图如图2所示。

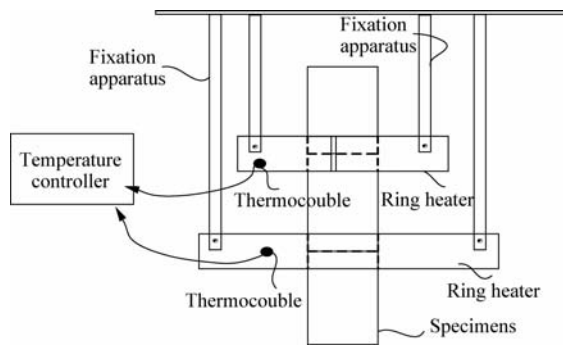


图 2 补偿加热装置结构示意图

Fig. 2 Schematic of compensation heater

补偿加热装置由热电偶、环形加热器和固定支架组成。热电偶固定在环形加热器上,并与温控仪相连,将环形加热器的温度反馈给温控仪,通过温控仪控制环形加热器的通断,使其温度与试样接触界面的温度一致。固定支架为倒“L”型,顶端设置两个螺纹孔,螺钉穿过螺纹孔将其固定在外筒壁的顶板上,底端为槽形孔,方便环形加热器调节轴向的位置。

热电偶是整个试验的基本测试单元,其测量的精度对试验结果有较大的影响。试验前对热电偶进行校对。将试验用 12 根热电偶捆绑在一起置于一小截金属棒的孔中,然后置于主加热器中加热,每隔 20 °C 升温一次,待温度稳定后记录各热电偶的读数,得到各热电偶之间的误差,最后以 1 号热电偶为基准,其他热电偶与它的差值为校对值。

### 1.3 测试试样

测试试样为航空发动机热端部件常用结构材料 GH4169 高温合金,试样被加工成直径 20 mm、长 60 mm 的圆棒,每个试样上均匀分布 4 个直径为 1 mm、深度为 10 mm 的热电偶安装孔。本试验选用纯铜作为热流计材料,热流计试样加工尺寸与测试试样相同。取热流计材料余料,加工成  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的薄片,采用 LFA427 的激光热导仪,运用激光闪射法对纯铜的热导率进行了试验标定,试验结果如图 3 所示。

试验测试 GH4169/GH4169 界面处的接触热导,两组测试试样的表面粗糙度分别为  $0.094 \mu\text{m}$  和  $0.588 \mu\text{m}$ 、 $0.096 \mu\text{m}$  和  $0.694 \mu\text{m}$ ,两组试样表面粗糙度相差较小,因此近似认为两

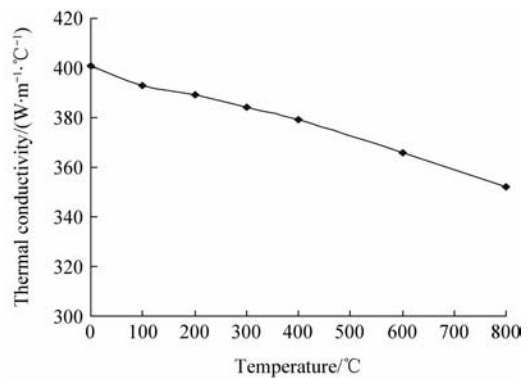


图 3 纯铜热导率随温度的变化情况

Fig. 3 Thermal conductivity vs temperature

组试样具有相同的表面形貌。其中表面粗糙度的测量采用了国防科技工业第一计量测试研究中心的 FTS-i120 触针式表面粗糙度仪。两组试验分别记为 1#、2#。

### 1.4 测试过程

试验过程中首先将测试试样和热流计安装在主加热器和冷却装置之间,并预加一定的压力以便热电偶的安装。热电偶安装在试样上的细孔中,细孔中填入适量的导热硅胶确保热电偶与测试试样能充分接触。在试样周围包裹一层石灰棉,在界面处安装补偿加热器,然后合上保温隔热层。

1# 试验预加压力约为 120 MPa,通过温控仪控制热端温度从 300 °C 逐步升高到 900 °C,每隔 100 °C 升温一次,每个温度条件下分别进行有、无补偿加热装置的接触热导测试试验,并记录达到稳态时的温度数据,试验过程中通过压力调节装置调节各稳态时的界面压力,使得不同温度条件下的界面压力误差不超过 0.6 MPa。

2# 试验设置试样热端温度为 600 °C,调整界面处压力从 60 MPa 逐步升高到 180 MPa,每隔 20 MPa 升高一次,每个压力条件下分别进行有、无补偿加热装置的接触热导测试试验,并记录达到稳态时的温度数据。其中,稳态的判断标准为每个热电偶温度数据在 15 min 内的变化幅度不超过 0.2 °C。

试验过程中由于载荷较大,纯铜热流计会发生一定程度的变形。对试验条件下热流计的变形情况进行了有限元模拟,采用有限元模拟软件

ABAQUS 建立模型,弹性模量  $E=128 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu=0.35$ ,屈服强度  $\sigma_s=33.3 \text{ MPa}$ ,模型选用双线性各向同性硬化模型 BISO,采用三维实体单元进行网格划分,实体单元采用线性减缩积分。计算结果如表 1 所示。

表 1 纯铜热流计试验载荷下的应变情况

Table 1 Strain of pure copper heat-meter under test load

Load/MPa	Strain/%	Load/MPa	Strain/%
60	0.406 8	140	1.621
80	0.676 7	160	1.971
100	0.939 6	180	2.429
120	1.270		

本试验的误差通过误差传播定律进行分析。接触热阻测试过程中输入的不确定性因素有热电偶温度采集、测试点间距离和横向热流损失。因此,本试验的测试误差为这些不确定性因素的总和。热导率标定试验、PXR5 温控仪及数据采集系统和热电偶温度测量的不确定性分别是 1.8%、0.2% 和 0.8%。试验中热量损失主要体现在以下 3 个方面:残留在保温层中、热辐射和沿热电偶导线的传输。据测算,由于热量损失导致的试验误差为 2.0%。因此,由于热流传输造成的测试误差为 4.8%。温度降测量过程中的最大不确定度为 7.8%,根据误差传播定律,接触热阻测试过程中的总的试验误差为 9.2%。

## 2 结果与讨论

采用上述接触热导测试系统与方法,对高温合金 GH4169 材料间的接触热阻进行了试验研究。

图 4 所示为接触热导随界面平均温度的变化趋势。从图中可以看出,总体来说,当压力一定时,接触热导随界面平均温度的升高而增大,但是变化幅度较小,且不是单调递增的,在局部温度区间接触热导反而随温度的升高略有降低。这是由于温度的升高不仅会影响材料的力学性能和传热性能,还能造成界面处的氧化。一方面,界面平均温度的升高可以通过促进界面辐射传热等提高界面的传热性能,同时温度的升高还可以改变材料的力学性能,例如使得材料的弹性模量、硬度降低等,从而增大接触面积,最终对界面处的传热起到促进作用;另一方面,界面平均温度的升高会使得界面处产生氧化产物,氧化产物不仅硬度大于母

体而且热导系数较低,对界面处传热起到抑制作用。初始加热阶段表面氧化层对接触热导的抑制作用大于温度升高造成的促进作用,接触热导有所降低;随着温度的升高,促进作用逐渐大于表面氧化层的抑制作用,接触热导开始随温度的升高而增大。

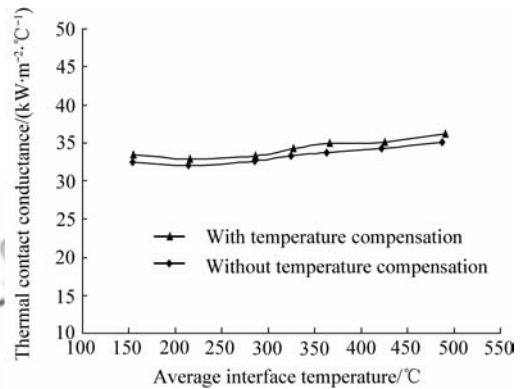


图 4 接触热导随界面平均温度的变化情况

Fig. 4 Variation of thermal contact conductance with average interface temperature

图 5 为接触热导随界面压力的变化趋势图。从图中可以看出,接触热导随着界面压力的增大而增大。在加载的初始阶段曲线斜率较大,即接触热导随界面压力增大较快,当界面压力在 120 MPa 以上时,接触热导增加的幅度显著减小。这是由于接触面载荷的大小直接影响界面材料表面突起的变形程度和数量,随着界面压力的增大,界面发生弹性变形的微观突起数量增多,变形程度增大,实际接触面积增大,进而导致接触热导增大。在加载阶段初期,虽然载荷相对较小,但由于初始加

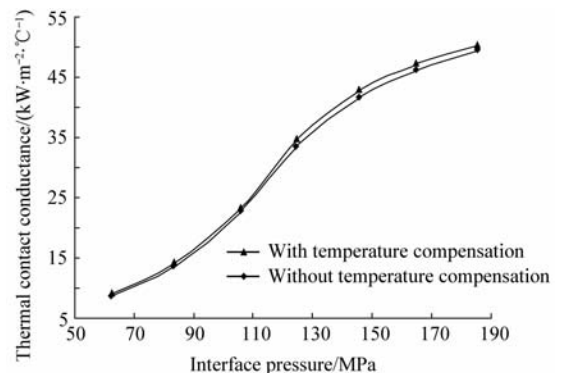


图 5 接触热导随界面压力的变化情况

Fig. 5 Variation of thermal contact conductance with interface stress

工材料表面突起较尖锐,平均到每个粗糙度峰时,将承受更大的压应力,从而产生较大的塑性变形和弹性变形,导致实际接触面积增大较快;当接触面积增加到一定程度后,接触面积随着压力的增大,增加幅度变缓,进而使得接触热导随界面压力的增大幅度减小。

比较图 4 和图 5 中有、无补偿加热装置的两条曲线可以看出:有、无补偿加热装置的情况下两曲线的变化趋势是一致的,并且有补偿加热装置时的接触热导值要大于无补偿加热装置时的接触热导值。这是由于在具有温度补偿的条件下,可以进一步减小横向热流损失,热流的传递更接近轴向一维导热。相对于没有补偿加热的情况,此时测得的  $q$  值更接近于样品中的实际传热值,且在数值上比无补偿加热时的大,由接触热导公式  $h_c = q/\Delta T$  可知接触热导测量值将增大。

### 3 结 论

(1) 自主研制了带有补偿加热装置的高温、高压接触热导测试系统。

(2) 试验结果表明其他条件相同时,接触热导随界面平均温度的升高而增大,但是变化幅度较小,且不是单调递增的;接触热导随界面压力的增大而增大。

(3) 有、无补偿加热装置的条件下接触热导的变化趋势相同,但有补偿加热器时的测量值要大于无补偿加热器的情况,且更接近于实际值。

### 参 考 文 献

- [1] Fieberg C, Kneer R. Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(5-6): 1017-1023.
- [2] Mikic B B. Thermal contact conductance; theoretical considerations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1974, 17(2): 205-214.
- [3] Cooper M G, Mikic B B, Yovanovich M M. Thermal contact conductance[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1969, 12(3): 279-300.
- [4] Sridhar M, Yovanovich M. Elastoplastic contact conductance model for isotropic conforming rough surfaces and comparison with experiments[J]. Journal of Heat Transfer, 1996, 118(1): 3-9.
- [5] Lambert M A, Fletcher L S, Mirmira S R. Design graphs for thermal contact conductance of similar and dissimilar light alloys[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(4): 809-816.
- [6] Barzelay M E, Tong K N, Holloway G F. Effect of pressure on thermal conductance of contact joints[R]. Washington: Property Fairchild Engineering Library, NACA-TN-3295, 1955: 1-52.
- [7] 任红艳, 胡金刚. 接触热阻的研究进展[J]. 航天器工程, 1999, 8(2): 47-57.  
Ren Hongyan, Hu Jingang. The development of thermal contact resistance[J]. Spacecraft Engineering, 1999, 8(2): 47-57. (in Chinese)
- [8] 张涛, 徐烈, 熊炜, 等. 接触热阻研究中理论模型的分析与比较[J]. 低温与超导, 1998, 26(2): 58-64.  
Zhang Tao, Xu Lie, Xiong Wei, et al. Comparison and analysis of theoretical models in the research of thermal contact conductance[J]. Cryogenics and Superconductivity, 1998, 26(2): 58-64. (in Chinese)
- [9] Xu R, Xu L. An experimental investigation of thermal contact conductance of stainless steel at low temperatures[J]. Cryogenics, 2005, 45(10-11): 694-704.
- [10] 顾慰兰. 接触热阻的试验研究[J]. 南京航空学院学报, 1992, 24(1): 46-53.  
Gu Weilan. Experiment on thermal contact resistance[J]. Journal of Nanjing Aeronautical Institute, 1992, 24(1): 46-53. (in Chinese)
- [11] 赵宏林, 黄玉美, 徐洁兰, 等. 常用结合面接触热阻特性的试验研究[J]. 西安理工大学学报, 1999, 15(3): 26-29.  
Zhao Honglin, Huang Yumei, Xu Jielan, et al. Experiment research on thermal contact resistance of normal used joints[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1999, 15(3): 26-29. (in Chinese)
- [12] 黄明辉, 张云湘, 胡仕诚. 载荷对接触热导的影响的试验研究[J]. 有色矿冶, 2003, 19(6): 34-36.  
Huang Minghui, Zhang Yunxiang, Hu Shicheng. Research of loading effect on thermal contact conductance by using experimental method[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2003, 19(6): 34-36. (in Chinese)
- [13] 刘冬欢, 郑小平, 黄拳章, 等. C/C 复合材料与高温合金 GH600 之间高温接触热阻的试验研究[J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2189-2194.  
Liu Donghuan, Zheng Xiaoping, Huang Quanzhang, et al. Experimental investigation of high-temperature thermal contact resistance between C/C composite material and superalloy GH600[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2189-2194. (in Chinese)
- [14] 张兴致. 高温合金及钛合金与模具材料接触热导试验研究[D]. 大连: 大连理工大学材料科学与工程学院, 2009.  
Zhang Xingzhi. Experimental research on contact heat

transfer between die material and superalloy/titanium alloy [D]. Dalian: School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)

- [15] Wang Z R, Zhang W F, Tang Q Y, et al. Progress in thermal contact resistance[J]. Rare Metal Materials and Engineering. (in Press)
- [16] Rosochowska M, Chodnikiewicz K, Balendra R. A new method of measuring thermal contact conductance [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 145 (2): 207-214.

张卫方(1971—) 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:材料与性能表征、结构可靠性、高温合金。

Tel: 010-82315759

E-mail: weifangzhang831@sohu.com

唐庆云(1988—) 男,博士研究生。主要研究方向:材料损伤与性能表征、故障机理。

Tel: 010-82317968

E-mail: tangqingyunene@163.com

#### 作者简介:

王宗仁(1986—) 男,博士研究生。主要研究方向:高温合金、材料损伤与性能表征。

Tel: 010-82317968

E-mail: wangzongren12@163.com

刘升旺(1986—) 男,硕士研究生。主要研究方向:纤维增强树脂基复合材料。

Tel: 010-82317968

E-mail: countterrorists@sina.com

## Experimental Investigation of Thermal Contact Conductance Across GH4169/GH4169 Interface with Compensation Heater

WANG Zongren, ZHANG Weifang<sup>\*</sup>, TANG Qingyun, LIU Shengwang

*School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

**Abstract:** An experimental setup of high-temperature and high-pressure thermal contact conductance (TCC) with a compensation heater is independently developed according to the material properties and working environments of aero-engine hot-end components. A pure Cu bar is used as the heat-flow meter to measure the axial heat flux, which is also suitable for superalloys whose thermal conductivity is either unclear or exhibits great variation with temperature. An experimental investigation of TCC is conducted with pressed pairs of aero-engine hot-end component structure material GH4169/GH4169 contacts in the range of 150-500 °C and 60-180 MPa. The results show that the present experimental setup is feasible for the experimental investigation of high-temperature and high-pressure TCC, and the variation of the TCC across GH4169/GH4169 is obtained. Moreover, the variation of the TCC with and without a compensation heater is studied. The research results may serve as a significant reference for the prediction of aer-oengine thermal properties.

**Key words:** temperature compensation; aero-engine; superalloy; thermal contact conductance; thermal contact resistance