**文章编号:**1000-6893(2010)11-2189-06

# 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

刘冬欢,郑小平,黄拳章,姚福印,刘应华 (清华大学航天航空学院,北京 100084)

# Experimental Investigation of High-temperature Thermal Contact Resistance Between C/C Composite Material and Superalloy GH600

Liu Donghuan, Zheng Xiaoping, Huang Quanzhang, Yao Fuyin, Liu Yinghua (School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘 要: 在高超声速飞行器翼前缘的热防护技术方面,采用内置高温热管是一种新型高效的热防护方法,其 中 C/C 复合材料结构与内置高温热管之间的界面接触热阻对传热效率及热力耦合起着至关重要的作用。本 文自主搭建了一套高温接触热阻试验平台,并针对三维编织 C/C 复合材料与高温合金 GH600 在不同界面应 力、界面粗糙度及界面温度下的接触热阻进行了试验研究。研究结果表明本平台在进行高温接触热阻试验研 究上是切实可行的,利用该试验平台得到了三维编织 C/C 复合材料与高温合金 GH600 之间接触热阻的变化 规律,有关结果可以为中国新型内置高温热管热防护结构的设计及安全评估提供参考。

关键词:接触热阻;C/C复合材料;高温合金;试验研究

**中图分类号**: V214.9 **文献标识码**: A

**Abstract**: The heat pipe cooled leading edge is a novel and efficient thermal protection method in hypersonic aircraft design, and the thermal contact resistance between the C/C composite material structure and high-temperature heat pipes plays a very important role in heat transfer efficiency and thermomechanical coupling. A testing platform of high-temperature thermal contact resistance is established, with which the thermal contact resistance between a three-dimensional braid C/C composite material and a superalloy GH600 specimen is tested under different interface pressures, interface roughnesses and temperatures. The results show that the present testing platform is feasible for the experimental investigation of high-temperature thermal contact resistance, and the thermal contact resistance between three-dimensional braid C/C composite material and superalloy GH600 is obtained, which can be an important reference for the design and safety evaluation of heat pipe cooled thermal protection structures.

Key words: thermal contact resistance; C/C composite material; superalloys; experimental investigation

近空间高超声速飞行器是当前国内外研究的 热点之一,其中热防护技术对整个研究的成败起 着至关重要的作用<sup>[1]</sup>,采用 C/C 复合材料结构内 置高温热管是一种新型高效的高温热防护方 法<sup>[2]</sup>。高温热管是一种利用热管内部工质相变进 行热量传递的高效传热组件,这种热防护结构由 于能够经受高超声速飞行过程中长时间高热流密 度的加热,同时维持结构气动外形基本不变,再加 上可重复使用性好等优点,因此在高超声速飞行 器的热防护方面具有广阔的应用前景。国外已经 开展了将此技术应用于高超声速飞行器翼前缘热 防护的研究<sup>[3]</sup>,而中国在这方面的研究才刚刚

基金项目:9. 国家自然科学基金(1987249段) Journal Electronic Pu 通讯作者:郑小平 E-mail: zhengxp@mail. tsinghua. edu. en

起步<sup>[2,4]</sup>。

内置高温热管热防护结构涉及到 C/C 复合 材料结构与内置高温热管之间的装配,因此它们 之间的接触热阻极大地影响着整个结构热防护的 效果。对接触热阻的过高估计会使整个结构过于 笨重且效率低下,而过低估计则可能给结构带来 安全隐患。因此,必须建立合理的 C/C 复合材料 与高温合金之间的接触热阻模型。

分布及接触热阻, M. Bahrami 等<sup>[11]</sup>综述了粗糙表 面接触热阻的试验结果及理论模型,顾慰兰<sup>[12]</sup>和 赵宏林<sup>[13]</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,钟明 等[14]采用瞬态技术在宏观上给出了不同材料在 不同压力下接触热阻的试验结果。值得注意的 是,目前国内外关于接触热阻的研究大多是在中 低温条件下进行的,此时通过间隙辐射交换的热 量较小,可以忽略间隙辐射换热对接触热阻的影 响。高温接触热阻试验研究不仅要求有稳定的高 温加热装置,同时要在试件低温端有高效的强制 冷却装置,并且有满足试件侧面绝热的保温隔热 装置,所以试验难度很大。但是,对于内置高温热 管热防护结构来说,C/C复合材料结构与高温热 管之间的温度可以达到 700 ℃以上,必须研究它 们之间的接触热阻在高温条件下的变化情况<sup>115</sup>。

本文首先搭建了可用于高温接触热阻试验研 究的测试平台,进而针对内置高温热管热防护结 构中可能采用的三维编织 C/C 复合材料与高温 合金 GH600(热管管材)间的接触热阻进行了试 验研究,得到了不同界面应力、界面粗糙度及界面 温度条件下接触热阻的变化规律。

1 试验方法

### 1.1 试验原理

接触热阻是由固体表面间的不完全接触引起的,在存在接触热阻的界面两侧热流 q 是连续的, 但温度值存在跳变  $\Delta T$ 。接触热阻的定义为

$$R = \Delta T/q \tag{1}$$

测量接触热阻时广泛采用的方法是静态热流 法。其基本原理是:将两根等截面圆柱试件在一 定压力下保持轴向接触,对其中一根试件(C/C) 的端面进行加热,由于两个试件的侧向是绝热的, 因此热量只能沿轴向传递,虽然在接触界面附近 的区域热流是三维的,但是这个区域很小,因此可 以近似将该问题按照一维热传导问题处理。通过 测量试件沿轴向不同位置的温度,得到轴向热流 及界面处的温差,进而根据接触热阻的定义可以 得到其测量值。

本试验中,在 C/C 复合材料试件和 GH600 材料试件上温度测点的布置如图 1 所示。

由试验可以测得各点的温度  $T_i$  (i=2,3,...,©1994-2011 China Academic Journal Electronic 8),界面位置设为点 1,其左右两侧界面的温度分



# 图 1 试件中温度测点布置示意图

Fig. 1 Illustration of temperature measurement point in specimen

別用  $T_1^+$  和  $T_1^-$  表示。任意两个测点间的轴向热 流密度  $q_{ij}$ 可由 Fourier 热传导定律得到:

$$q_{ij} = k_{ij} \frac{T_i - T_j}{x_j - x_i} \tag{2}$$

式中: $k_{ij}(i,j=2,3,...,8)$ 为测点i和j之间的平 均热导率; $x_i$ 为各个测点的位置坐标。对于 C/C 复合材料,假设其热导率不随温度变化,均为 66.1 W/(m·C)。而 GH600 材料考虑其热导 率随温度的变化,详细数据参见文献[4]。本试验 中各个测点的位置坐标如表1所示。

表1 各个测点的位置坐标

 Table 1
 Coordinates of temperature points

编	号	1	2	3	4	5	6	7	8
坐标	/mm	40	20	28	36	44	52	60	70

由于试件周围不可避免地存在热量损失,因 此根据相邻两点温度得到的热流是各不相同的, 采用界面两侧热流值的算术平均值作为轴向热流 的测量值,即

$$q = \frac{1}{2}(q_{34} + q_{56}) \tag{3}$$

由于热电偶不可能直接测得界面上下表面的 温度,因此采用反推法推出界面温度,将 4-1 段的 热流密度用 3-4 段的来近似,即

$$q_{41} = q_{34} = k_{34} \ \frac{T_3 - T_4}{x_4 - x_3} = k_{44} \ \frac{T_4 - T_1^+}{x_1 - x_4}$$
(4)

由此可得界面左侧的温度

$$T_{1}^{+} = T_{4} - \frac{k_{34}}{k_{44}} \frac{x_{1} - x_{4}}{x_{4} - x_{3}} (T_{3} - T_{4})$$
 (5)

同理可得界面右侧的温度

$$T_{1}^{-} = T_{5} + \frac{k_{56}}{k_{55}} \frac{x_{5} - x_{1}}{x_{6} - x_{5}} (T_{5} - T_{6}) \qquad (6)$$

则由式(1)可得出接触热阻为

$$R = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_{1}^{+} - T_{1}^{-}}{q}$$
(7)

必须指出的是,这里假设轴向热流是恒定的, lishing House. All rights reserved. http://www.cnl 实际上由于沿试件侧向不可避免地存在热量损

2191

失,轴向热流不可能是完全恒定的,同时由于材料 热导率的温度相关性,轴向温度的分布更不可能 是线性的,此时可以分别根据温度测点 2~4 及 5~8分别得到两个试件中温度场的多项式分布, 进一步根据 Fourier 热传导定律得到界面处的热 流密度和温度跳变。

# 1.2 试验装置

整个试验装置由试件、加热装置、保温装置、冷 却装置、加载装置和测温装置等组成。高温接触热 阻试验的难点:一是既要保证试件处于高温环境中 又要保证沿轴向有一定的温度梯度,二是试件中同 时要有热量和载荷的传递。基于 INSTRON 8874 型高温材料试验机搭建了一套可用于高温接触热 阻试验研究的测试平台,如图 2 所示。



图 2 基于 INSTRON 8874 型高温材料试验机的高温 接触热阻试验装置

Fig 2 High-temperature thermal contact resistance test equipment based on INSTRON 8874 high-temperature material testing machine

试件位于上夹头和置于加热炉内的耐高温 支撑棒之间,外面被保温装置环绕,热电偶一端 通过保温套筒及试件上预留的小孔插入试件内 部进行测温,另一端连在测温仪上,如图 3 所 示。支撑棒置于加热炉内(如图 4 所示),一方 面用做试件的高温端,可向上传递热量,另一方 面起到传递载荷的作用,将上夹头的压力通过 试件传递到下夹头,克服了采用普通平板式加 热器时直接将试件放置于加热板上不能传递载 荷的困难。上下夹头通过冷却水循环系统进行 冷却,一方面上夹头可用做试件的低温端,保证 试件中有稳定的热量流动,另一方面也可避免



图 3 保温及测温装置

Fig. 3 Heat preservation and temperature measurement equipment



图 4 传热传力装置 Fig. 4 Thermal and mechanical load transfer equipment

C/C 试件和 GH600 试件的直径和高度均为 30 mm 和 40 mm,如图 5 所示。3 对不同粗糙度的 C/C 试件和 GH600 试件的表面粗糙度分别为 26.03 μm 和 49.67 μm、25.93 μm 和 36.20 μm、



(a) C/C试件

(b) GH600试件

试件中有稳定的热量流动,另一方面也可避免 © 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. Allriggts spectrued http://www.cnki. 高温烧坏夹头。

第 31 卷

26. 45  $\mu$ m 和 0. 532  $\mu$ m。由于 3 件 C/C 试件表面 粗糙度变化较小,因此在试验和后处理时都统一 取为 26. 14  $\mu$ m。其中表面粗糙度的测量采用了 清华大学摩擦学国家重点实验室的 Talysurf 5P-120 型表面形貌仪。

为了减小试件侧面的热量损失,同时保证在 试件轴向有稳定的热量流动,一方面需要在试件 高温端采用加热炉进行加热,另一方面需要在试 件侧面安装保温装置,同时还要在试件低温端采 用冷却装置进行冷却。

加热装置由 INSTRON 8874 自带的加热炉 和温控仪组成。加热炉的加热温度可高达 1 200 ℃以上,加热速度快,可在 10 min 内达到最 高温度。温控仪与置于加热炉内侧的两个高灵敏 度热电偶相连。

保温装置由耐高温的氧化锆材料制成,同时 为了装配及安装热电偶的方便,将其设计成两个 半圆形的套筒,在其侧面对应着试件表面热电偶 孔的位置预留热电偶通道,如图 3 所示。

冷却装置由 INSTRON 8874 试验机自带,通 过冷却水循环系统产生冷却水作为工质,由 IN-STRON 3520 型控制系统对上下夹头采用水冷式 强制冷却,冷却效果很好。

采用 INSTRON 8874 进行加载,其加载范围 为±20 kN,可采用位移加载或者力加载。从安 全角度考虑,本文采用了位移加载的方式,由于在 试件的加热或者冷却过程中试件的变形量不断变 化,因此需要实时对加载的位移量进行控制,以保 证界面载荷的恒定。上夹头的载荷经由试件通过 置于加热炉内的支撑棒传递到下夹头上,支撑棒 同时起到了传热和传力的作用。

测温装置由镍铬-镍硅铠装热电偶、测温仪、 微机和软件系统组成。热电偶采用 WRNK-191 型铠装热电偶,其测温范围为 0~1 000 ℃,测量 精度为 0.1 ℃。测温仪由 DH3816 型静态应变仪 改装而成,热电偶输出的电信号经过测温仪和微 机及软件处理后即可得到各个测点的温度,并自 动记录下来。

热电偶是整个试验过程中的基本测量仪器, 因此其准确性对试验结果有较大的影响,试验之 前需要首先对热电偶进行标定。这里以 IN-STRON 8874 自带的温控装置为基准,设定加热 炉的炉温,将热电偶置于炉内,比较热电偶测得的 温度值与设定值之间的差值,利用此差值对试验

# 2 试验结果及分析

采用上述高温接触热阻试验平台,对 C/C 复 合材料与不同粗糙度 GH600 材料间的接触热阻 进行了试验研究。试验采用 3 对不同粗糙度的试 件,每一对都在不同的界面应力下(0,& 5, 17.0 MPa)测得各个测点的温度-时间历程,试验 结果分别如图 6~图 9 所示。

对于 C/C 试件和表面粗糙度为 49.7  $\mu$ m 的 GH600 试件组合,不同界面应力条件下各个测点 的温度 -时间历程如图 6 所示,进而基于 1.1 节的



# 图 6 GH600 试件表面粗糙度为 49.7 μm 时各测点温 度-时间历程

计算方法,即可得到不同界面应力条件下接触热 阻随界面平均温度的变化曲线,如图 7(a)所示。

对于 GH600 试件在表面粗糙度分别为 36.2 μm和0.532 μm条件下与 C/C 试件之间的接 触热阻试验,这里仅给出最终的接触热阻结果,如 图 7(b)和图 7(c)所示,不再给出各个测点的温度-时间历程。



图 7 不同界面应力下接触热阻随界面平均温度的变化

Fig 7 Variation of thermal contact resistance with average interface temperature under different interface stresses

为考察表面粗糙度对界面接触热阻的影响, 根据以上试验结果,给出在界面应力为 17.0 MPa 时,不同 GH600 试件表面粗糙度条件下接触热 0 1994-2011 China Academic Journal Electronic 阻随界面平均温度的变化趋势,如图 8 所示。



# 图 8 不同 GH600 试件表面粗糙度下接触热阻随界 面平均温度的变化

Fig. 8 Variation of thermal contact resistance with average interface temperature under different GH600 surface roughnesses

根据以上试验结果,可以得到如下结论:①随 着界面平均温度的升高,界面接触热阻逐渐下降, 这是由于界面温度的升高不仅会导致界面间隙辐 射效应的增强,同时也导致试件材料热导率升高 及界面硬度降低等,这些因素都使得热量传递的 阻力变小,从而降低了界面接触热阻;②在同样的 界面温度下,界面应力越大则接触热阻越小,这是 由于界面应力的增加使得界面上的微接触对增 加,相当于增加了等效接触面积,加快了热量的传 递;③在相同的界面压力和界面温度下,界面越粗 糙则接触热阻越大,这是由于界面越粗糙,界面等 效接触面积就越小,阻碍了热量的传递。以上这 些结论与理论研究所得到的结果<sup>[11]</sup>都是一致的, 这在一定程度上说明了本文建立的高温接触热阻 试验装置的可行性和试验结果的可靠性。

必须指出的是,在整个试验过程中,各热电偶 测点温度的测量是基础,因此温度测量的准确度 对试验结果的准确度影响最大,必须尽可能减小 温度测量的不确定度。在本文的试验研究中,采 用了直径为3 mm 的铠装热电偶,采用直径更小 的热电偶能进一步减小由于在试件上开热电偶插 孔带来的试验误差,从而进一步提高试验的精度。

3 结 论

(1)自主搭建了可用于高温接触热阻试验的 试验装置,试验结果表明本试验装置是可行的。

(2) 针对近空间高超声速飞行器热防护结构 可能采用的三维编织 C/C 复合材料与高温合金 GH600 之间的高温接触热阻进行了试验研究,得 到了其接触热阻随界面应力、界面粗糙度和界面 UShing House, All rights reserved. http://www.cm 温度的变化规律。 (3)利用本试验装置也可以开展间隙填料减 阻效果评价等方面的研究工作,有关结果可以为 中国新型内置高温热管热防护结构的设计及安全 评估提供参考。

# 致 谢

感谢清华大学航天航空学院胡德贵高级工程 师和华心工程师对本试验研究的大力支持,感谢 中国运载火箭技术研究院研发中心王飞高级工程 师和杨勇研究员在试件制备和拟定试验方案方面 给予的帮助,感谢审稿专家为提高试验精度所提 出的宝贵建议。

#### 参考文献

- [1] 杨亚政,李松年,杨嘉陵. 高超音速飞行器及其关键技术 简论[J]. 力学进展, 2007, 37(4): 537-550.
   Yang Yazheng, Li Songnian, Yang Jialing. A review on hypersonic vehicles and key technologies[J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(4): 537-550. (in Chinese)
- [2] 刘冬欢,郑小平,王飞,等.内置高温热管热防护结构传 热防热机理研究[J].清华大学学报:自然科学版,2010, 50(7):1094-1098.

Liu Donghuan, Zheng Xiaoping, Wang Fei, et al. Heat conduction and heat proof mechanism of the heat pipe cooled thermal protection system[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(7): 1094-1098. (in Chineses)

- [3] Glass D E, Camarda C J, Merrigan M A, et al. Fabrication and testing of a leading-edge-shaped heat pipe[R]. AIAA-1999-4866, 1999.
- [4] 刘冬欢,郑小平,王飞,等.内置高温热管 C/C 复合材料 热防护结构热力耦合机制[J].复合材料学报,2010,27 (3):43-49.

Liu Donghuan, Zheng Xiaoping, Wang Fei, et al. Mechanism of thermomechanical coupling of high temperature heat pipe cooled C/C composite material thermal protection structure [J]. Acta Materiea Compositae Sinica, 2010, 27(3): 43-49. (in Chinese)

- [5] Greenwood J A, Williamson B P. Contact of nominally flat surfaces [J]. Proceedings of the Royal Society: A, 1966, 295(1442): 300-319.
- [6] 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.
- [7] Zhao Y, Maietta D M, Chang L. An asperity model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow[J]. ASME Journal of Tribology, 2000, 122 (1): 86-93.

[8] 张涛,徐烈,熊炜,等. 接触热阻研究中理论模型的比较与

分析[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] 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)
- [10] Tirovic M, Voller G P. Interface pressure distributions and thermal contact resistance of a bolted joint[J]. Proceedings of the Royal Society: A, 2005, 461(2060): 2339-2354.
- [11] Bahrami M, Culham J R, Yananovich M M, et al. Review of thermal joint resistance models for nonconforming rough surfaces[J]. Applied Mechanics Reviews, 2006, 59 (1): 1-12.
- [12] 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)

- [13] 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)
- [14] 钟明,程曙霞,王伟平,等. 测定双层组合介质接触热阻
  [J]. 强激光与离子束,2002,14(1):11-15.
  Zhong Ming, Cheng Shuxia, Wang Weiping, et al. Measurement of thermal contact resistance between two-layer complex mediums [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(1):11-15. (in Chinese)
- [15] Grujicic M, Zhao C L, Dusel E C. The effect of thermal contact resisitance on heat management in the electronic packaging[J]. Applied Surface Science, 2005, 246(1-3): 290-302.

#### 作者简介:

# 刘冬欢(1982一) 男,博士。主要研究方向:飞行器结构热防护。

Tel: 010-62796187

E-mail: liudh06@mails.tsinghua.edu.cn

**郑小平(1958-)** 男,博士,副教授。主要研究方向:计算力学。 Tel: 010-62796187

E-mail: zhengxp@mail.tsinghua.edu.cn

# (编辑:徐晓)