

# TC11 钛合金与 5CrMnMo 模具钢间接接触换热实验研究

朱 智, 张立文\*, 顾森东

(大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116024)

**摘要:** 基于稳态热流法, 利用自制的接触换热系数测量装置对 TC11 钛合金与 5CrMnMo 模具钢间的接触换热进行测试, 探讨了界面荷载、界面温度、接触面粗糙度和玻璃润滑剂对接触换热系数的影响. 实验结果表明: 接触换热系数随界面荷载的增加而增大, 且与界面荷载的幂指数函数近似成正比关系; 接触换热系数随界面温度的升高总体上呈增大趋势; 在相对较小的粗糙度范围内, 产生接触换热系数随接触面粗糙度增加而增大的反常现象; 玻璃润滑剂的存在使接触换热系数降低了 1~2 个数量级, 厚度的影响尤其明显.

**关键词:** 接触换热系数; TC11 钛合金; 5CrMnMo 模具钢; 实验研究

**中图分类号:** TG115.25 **文献标志码:** A

## 0 引言

现代工业和高新技术产业中, 经常会遇到固体界面间的接触换热问题, 如机械制造过程中结合面间的接触换热、金属材料热加工过程中模具与工件的换热、航天器内外各组件及仪器设备之间的换热等<sup>[1]</sup>, 而影响实际接触换热过程的本质因素就是固体界面间的接触换热系数. 目前, 国内外对接触换热的研究主要集中在空间站、电子器件和低温超导等领域<sup>[2-4]</sup>. 在金属材料热成型等加工过程中, 需要较高的温度和压力, 近年来, 国内外学者对这方面的接触换热进行了一定的研究, 并获得了一些有价值的实验数据<sup>[5-11]</sup>, 但基础数据仍比较缺乏, 因此, 在较高的温度和压力条件下开展固体界面间的接触换热实验研究有重要的现实意义.

TC11 钛合金具有良好的综合力学性能和热加工性能, 通常用于制造航空发动机的压气机盘、叶片和飞机结构件等, 该合金主要通过等温锻造工艺进行加工处理, 其中, 模具材料以 5CrMnMo 模具钢较为常见. 在坯料与模具的热接触过程中, 界面间的接触换热能够显著地影响材料的成型精

度和模具的使用寿命, 另外, 固态热加工过程涉及传热学、力学和相变等多学科的内容, 这使得接触换热系数成为影响材料内部温度场、组织场和应力应变场的重要因素.

本文利用自制的接触换热系数测量装置对 TC11 钛合金与 5CrMnMo 模具钢间的接触换热进行测试, 并探讨界面荷载、界面温度、接触面粗糙度和玻璃润滑剂中间介质对接触换热系数的影响.

## 1 实验

图 1 所示为自制的接触换热系数测量装置. 将 TC11 钛合金与 5CrMnMo 模具钢加工成直径 20 mm、长 50 mm 的圆柱, 分别作为高温试样和低温试样. 在试样的侧面沿轴线方向打 4 个直径 1 mm、深 10 mm 的热电偶插孔, 实验采用的热电偶为经校准的直径为 1 mm 的镍铬-镍硅裸端式热电偶, 试样和热电偶的位置如图 2(a) 所示. 试样表面用 400# 水砂纸打磨, 以得到近似相同的表面粗糙度. 试样外侧缠绕隔热石棉布, 并加保温层, 以减少试样的对流换热和辐射换热.

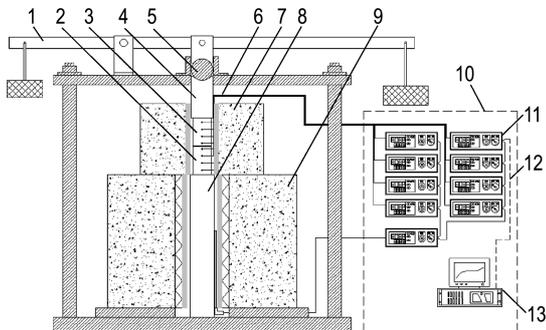
实验时, 采用电阻式加热炉对试样加热, 荷载

收稿日期: 2011-04-04; 修回日期: 2012-05-04.

基金项目: “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724307).

作者简介: 朱 智(1985-), 男, 博士生; 张立文\*(1962-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhanglw@dlut.edu.cn.

由杠杆加载机构施加到试样接触面,用AI控温仪表控制炉温和实时显示测温点上的热电偶温度,在工控机中用自开发的数据采集和处理软件对温度数据进行记录和处理。



1 杠杆加载机构;2 高温试样;3 低温试样;4 冷端顶杆;5 定心圆球;6 测温热电偶;7 保温层;8 热端顶杆;9 加热炉;10 数据采集系统;11 AI控温仪表;12 数据通信线;13 工控机

图1 接触换热系数测量装置

Fig. 1 The measuring apparatus of thermal contact conductance

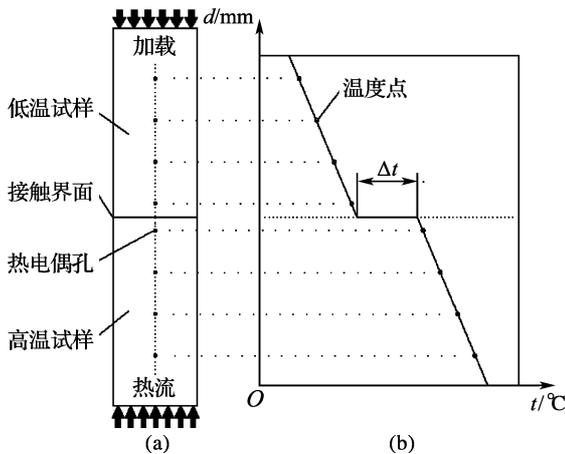


图2 测量与计算原理示意图

Fig. 2 Principle schematic diagram of measurement and calculation

由实验得到的温度数据,应用外推法可以计算出两试样接触表面的温度<sup>[12]</sup>,图2(b)所示为外推法计算原理图。由下式计算接触换热系数:

$$h_c = q/\Delta t \quad (1)$$

式中: $h_c$ 为接触换热系数( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ); $\Delta t$ 为试样间的接触界面温差( $^{\circ}\text{C}$ ); $q$ 为接触界面处的热流密度( $\text{W}/\text{m}^2$ )。  $q$ 可由傅里叶定律求得:

$$q = -\lambda dt/dx \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为试样的导热系数( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ ); $dt/dx$ 为热流方向上的温度梯度( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ),负号表示热流的方向与温度梯度的方向相反。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 界面荷载对接触换热系数的影响

界面荷载对接触换热系数的影响显著,通常认为接触换热系数与界面荷载的幂指数函数近似成正比关系,即  $h_c \propto p^x$ , 幂指数  $x$  表示接触换热系数对荷载的敏感程度<sup>[2]</sup>。图3所示为TC11与5CrMnMo在不同温度下接触时接触换热系数随界面荷载的变化,可以看出,在测量范围内,随着界面荷载的增加,接触换热系数呈增大的趋势,对数据进行幂指数函数拟合后发现,幂指数的范围为0.44~0.69,该指数受界面温度的影响显著,即温度的升高使接触换热系数随界面荷载变化的敏感性增加,但在高温高荷载区域,接触换热系数随荷载变化的敏感性有一定幅度的下降,这与文献中的实验结果相符<sup>[13]</sup>。

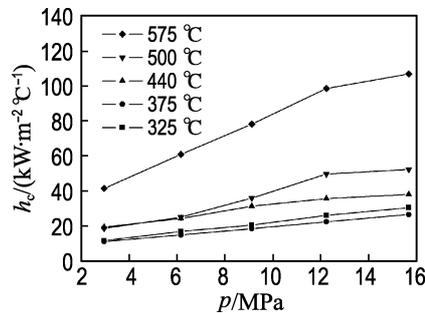


图3 界面荷载对接触换热系数的影响

Fig. 3 The effect of interfacial pressure on thermal contact conductance

从粗糙表面的不完全接触来看,随着界面荷载的增加,试样微观表面上的微凸体发生弹性或塑性变形,实际接触面积增大,增强了界面处的换热能力;同时,由于接触过程的复杂性,形变会引起接触表面的加工硬化,使表面硬度增加,微凸体变形的可能性和数量减小,阻碍了热流通道的增加,导致高温高荷载区域接触换热系数随荷载变化的敏感性下降。

## 2.2 界面温度对接触换热系数的影响

界面温度是影响接触换热系数的另一重要因素,图4所示为TC11与5CrMnMo在不同界面荷载下接触时接触换热系数随界面温度的变化,可以看出,随着界面温度的升高,接触换热系数总体上呈增大趋势.从温度影响的角度来看,温度升高,一方面使材料的导热系数增加,界面处热流增大;另一方面,降低了材料的屈服强度和接触表面硬度<sup>[14,15]</sup>,使微凸体的变容易发生,增加了实际接触面积.此外,在350~400℃和475~525℃两个温度区间内,界面荷载较小时接触换热系数随温度升高有先减小再增大的趋势,这是由于在高温下,试样接触表面发生氧化,氧化层的导热系数小于试样本身的,对热流起阻碍作用,但温度的继续升高及荷载的施加削弱了氧化层的作用,甚至使氧化层破裂,发生金属的直接接触,又有利于热流的传递.

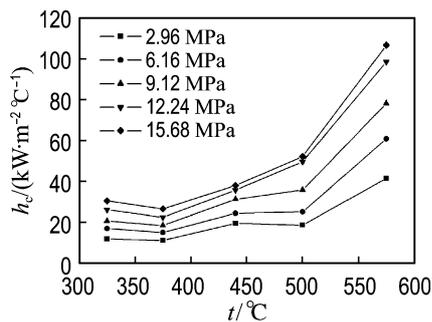


图4 界面温度对接触换热系数的影响  
Fig. 4 The effect of interfacial temperature on thermal contact conductance

## 2.3 接触面粗糙度对接触换热系数的影响

接触面粗糙程度影响了界面单个接触点的数量、面积及热流的收缩程度,从理论上讲,接触面粗糙度的增加将降低接触界面的换热能力,使接触换热系数减小<sup>[14]</sup>.图5所示为不同界面温度下接触换热系数随接触面粗糙度的变化,界面荷载为2.96 MPa,可以看到,接触换热系数并不是随着接触面粗糙度的增加单调减小,而是在相对较小的粗糙度范围内,出现接触换热系数随粗糙度增加而增大的反常现象.与前人的实验数据比较发现,这种反常现象是接触面粗糙度较小造成

的<sup>[14]</sup>.在同样的名义面积下,根据粗糙表面的自仿射原理,随着粗糙度的不断减小,接触面精细结构增多,单个接触点数量迅速增加,一方面使实际接触面积相对增大,利于热流传递;另一方面使单个接触点的面积减小,热流传递过程中收缩程度增大,不利于换热的进行,两者的综合作用能够合理解释接触换热系数随粗糙度变化出现极大值的反常现象.

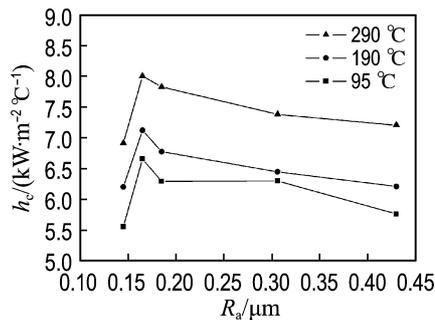


图5 接触面粗糙度对接触换热系数的影响  
Fig. 5 The effect of surface roughness on thermal contact conductance

## 2.4 中间介质对接触换热系数的影响

本文所使用的中间介质为水基的玻璃润滑剂,主要起隔热作用<sup>[16]</sup>,实验前,用刷子按互相垂直的方向将润滑剂在试样的待接触面轻涂固定次数.图6为在TC11与5CrMnMo的接触面填充不同厚度润滑剂时接触换热系数随界面荷载的变化,其中,第1次实验涂玻璃润滑剂4次,第2次实验涂2次,界面温度为420℃.玻璃润滑剂在接触界面的填充减小了试样的实际接触面积,使得界面处的热通道数大量减少,导致接触换热系

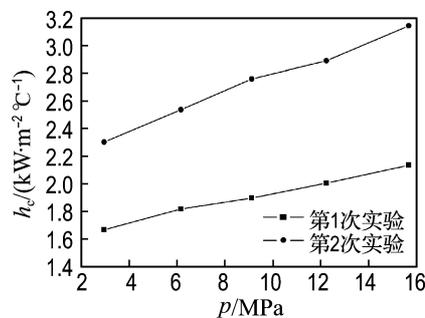


图6 玻璃润滑剂对接触换热系数的影响  
Fig. 6 The effect of glass lubricant on thermal contact conductance

数明显减小,与无润滑剂时相比,减小了1~2个数量级.另外,在界面温度相同的情况下,玻璃润滑剂厚度的不同使两次测量的接触换热系数值差别很大,第2次实验值是第1次的1.4倍左右,说明了玻璃润滑剂的厚度对接触换热系数的影响显著.

### 3 结 论

(1)接触换热系数随界面荷载的增加而增大,并且与界面荷载的幂指数函数近似成正比关系,幂指数的大小影响接触换热系数随界面荷载变化的敏感程度,通过数据拟合得到了幂指数的范围.

(2)随着界面温度的升高,接触换热系数总体上呈增大趋势,由于氧化层的作用,局部温度区间出现接触换热系数随温度升高先减小再增大的现象.

(3)接触面粗糙度的增加使接触换热系数减小,但在相对较小的粗糙度范围内,出现接触换热系数随粗糙度增加而增大的反常现象.

(4)实验所用的玻璃润滑剂使接触换热系数明显减小,减小1~2个数量级,润滑剂涂层厚度的影响也很显著.

### 参 考 文 献:

- [1] 徐 烈,张 涛,赵兰萍,等. 双热流法测定低温真空下固体界面的接触热阻[J]. 低温工程, 1999(4): 185-189.  
XU Lie, ZHANG Tao, ZHAO Lan-ping, *et al.* Using double heat-flux meter method to measure the thermal contact resistance of solid material at low temperature and vacuum [J]. **Cryogenics**, 1999(4): 185-189. (in Chinese)
- [2] 赵兰萍,徐 烈,李兆慈,等. 固体界面间接触导热的机理和应用研究[J]. 低温工程, 2000(4):29-34.  
ZHAO Lan-ping, XU Lie, LI Zhao-ci, *et al.* Mechanism and application research on thermal contact heat transfer between solid interfaces [J]. **Cryogenics**, 2000(4):29-34. (in Chinese)
- [3] ZHANG X, CONG P Z, Fujji M. A study on thermal contact resistance at the interface of two solids [J]. **International Journal of Thermophysics**, 2006, **27**(3):880-895.
- [4] Sunil Kumar S, Ramamurthi K. Thermal contact conductance of pressed contacts at low temperatures [J]. **Cryogenics**, 2004, **44**(10):727-734.
- [5] Rosochowska M, Balendra R, Chodnikiewicz K. Measurements of thermal contact conductance [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2003, **135**(2-3):204-210.
- [6] 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.
- [7] Lambert M A, Mirmira S R, Fletcher L S. Design graphs for thermal contact conductance of similar and dissimilar light alloys [J]. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, 2006, **20**(4):809-816.
- [8] 朱德才,张立文,裴继斌,等. 固态塑性成形过程中界面接触换热的实验研究[J]. 塑性工程学报, 2008, **15**(1):92-96.  
ZHU De-cai, ZHANG Li-wen, PEI Ji-bin, *et al.* Experiment research on the thermal contact conductance during the solid plastic forming [J]. **Journal of Plasticity Engineering**, 2008, **15**(1):92-96. (in Chinese)
- [9] 邢 磊,张立文,张兴致. 温度与载荷对GH4169/5CrMnMo界面接触换热的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, **40**(6):1568-1572.  
XING Lei, ZHANG Li-wen, ZHANG Xing-zhi. Effect of temperature and load on contact heat transfer between GH4169 and 5CrMnMo [J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2009, **40**(6):1568-1572. (in Chinese)
- [10] ZHANG Xing-zhi, ZHANG Li-wen, XING Lei. Study of thermal interfacial resistance between TC11/glass lubrication/K403 joint [J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2010, **34**(1):48-52.
- [11] XING Lei, ZHANG Li-wen, ZHANG Xing-zhi, *et al.* Experimental investigation of contact heat transfer at high temperature based on steady-state heat flux method [J]. **Experimental Heat Transfer**,

- 2010, **23**(2):107-116.
- [12] 晋芳伟, 黄晓因. 深冷处理对 Al-Si 合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2005, **30**(8):55-57.
- JIN Fang-wei, HUANG Xiao-yin. Effect of cryogenic treatment on the microstructure and mechanical properties of Al-Si alloy [J]. **Heat Treatment of Metals**, 2005, **30**(8): 55-57. (in Chinese)
- [13] 赵兰萍, 徐 烈. 低温真空下固体界面间接接触导热的实验研究[J]. 中国空间科学技术, 2003, **23**(1): 51-55.
- ZHAO Lan-ping, XU Lie. Experimental research on the heat transfer between the solid interfaces at low temperature and vacuum [J]. **Chinese Space Science and Technology**, 2003, **23**(1):51-55. (in Chinese)
- [14] 湛利华, 李晓谦, 胡仕成. 界面接触热阻影响因素的实验研究[J]. 轻合金加工技术, 2002, **30**(9):40-43.
- ZHAN Li-hua, LI Xiao-qian, HU Shi-cheng. Experiment research for the interfacial thermal contact resistance [J]. **Light Alloy Fabrication Technology**, 2002, **30**(9):40-43. (in Chinese)
- [15] 顾慰兰, 杨燕生. 温度对接触热阻的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 1994, **26**(3):342-350.
- GU Wei-lan, YANG Yan-sheng. The influence of temperature on contact resistance of metallic surfaces temperature [J]. **Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics**, 1994, **26**(3):342-350. (in Chinese)
- [16] 任红艳, 胡金刚. 接触热阻与接触导热填料[J]. 宇航材料工艺, 1999, **29**(6):11-15.
- REN Hong-yan, HU Jin-gang. Thermal contact resistance and thermal conductive filler [J]. **Aerospace Materials & Technology**, 1999, **29**(6):11-15. (in Chinese)

## Experimental investigation of contact heat transfer between TC11 titanium alloy and 5CrMnMo die steel

ZHU Zhi, ZHANG Li-wen\*, GU Sen-dong

( School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Based on the steady-state heat flow method, the contact heat transfer between TC11 titanium alloy and 5CrMnMo die steel is measured using the self-developed thermal contact conductance experimental apparatus. The effect of interfacial pressure, interfacial temperature, surface roughness and glass lubricant on thermal contact conductance is discussed. The results indicate that thermal contact conductance increases with the increasing of interfacial pressure, and it is nearly proportional to the exponent function of interfacial pressure. When interfacial temperature is increased, thermal contact conductance is increased generally. It yields abnormal phenomena that thermal contact conductance increases with the increasing of surface roughness in the range of small roughness relatively. In addition, glass lubricant decreases thermal contact conductance by 1-2 orders of magnitudes, especially thickness of lubricant coating influences it clearly.

**Key words:** thermal contact conductance; TC11 titanium alloy; 5CrMnMo die steel; experimental investigation