

文章编号: 1001-4322(2002)01-0011-05

测定双层组合介质接触热阻*

钟 明¹, 程曙霞¹, 王伟平², 王春彦², 何立群¹

(1. 中国科学技术大学 热科学与能源工程系, 安徽 合肥 230026;
2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 当激光辐照双层固体组合介质的外表面时, 在变物性及界面接触热阻不变的条件下, 数值计算了介质内部温度场时空分布。实验测定该双层介质背面对应点的温度曲线, 与数值计算的结果进行比较, 从而确定介质界面间的接触热阻。

关键词: 激光加热; 双层组合介质; 接触热阻

中图分类号: TN 246 **文献标识码:** A

接触热阻是确定多层固体组合介质温度分布的重要参数, 是研究固体间接触传热必须解决的关键问题之一。当两表面相互接触时, 不管其接触间隙中填充什么填料, 都是“不完全接触”。大部分热量只是通过有限数量的“实际接触点”传递的。正是由于实际接触面积只是“表观”面积的小部分, 从而对实际热流传递产生阻抗, 形成接触热阻。换言之, 当两块接触材料传递相同的热流密度时, 其接触热阻使两表面的接触面上产生温差。显然这个温差不仅依赖于接触材料的力学性质(如弹性模量、刚度、硬度等)、热学性质(如导热、导温、热膨胀系数等), 而且与接触表面的几何形态及其所处的环境(如压力、间隙间的气、液态特性)有关^[1,2]。因而, 接触热阻大多是在模拟实际的工作状态下, 用实验方法测定。例如文献[3]要求一维稳态、无内热源状态下测定, 不但费时, 而且实际上很难满足这种要求。

我们拟采用瞬态技术, 即在已知两层介质热物性随温度变化的条件下, 人为设定一组接触热阻, 用激光辐照第一层前表面某中心点, 数值计算第二层后表面对应点的升温曲线, 再与实测该点的升温曲线相比较, 由此获得界面间的接触热阻。

1 数值模拟

当激光加热双层金属组合板介质正面中心时, 可将求解双层组合介质的温度场问题模化为求解无限大金属平板组合介质的温度场。为此, 按图 1 所示, 建立二维非线性瞬态热传导方程及其定解条件如下。

假设: (1) 在界面法向方向上温度间断, 热流密度连续; (2) 接触热阻在实验过程中不变; (3) 介质表面自然对流换热忽略; (4) 不考虑金属板热膨胀引起的变形和热力耦合问题。

若板厚度分别为 δ_1 和 δ_2 , 以及双层板材料的温度及热物性以相应温度及物性符号加下标 $i(i=1, 2)$ 表示, 则控制方程及定解条件为

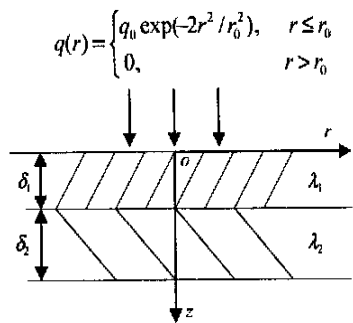


Fig 1 Computational model
图 1 计算模型

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial x_i}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha r \frac{\partial x_i}{\partial r} \right), \quad (i = 1, 2) \tag{1}$$

$$-\lambda_i \frac{\partial x_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(r) \tag{2}$$

* 收稿日期: 2001-05-16; 修订日期: 2001-07-20
基金项目: 国家 863 激光技术领域青年科技基金资助课题(863-410-9905)
作者简介: 钟 明(1972-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为传热; E-mail: merlin_z@263.net

$$-\lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=\delta_1} = -\lambda \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=\delta_1} = (T_1 - T_2) \Big|_{z=\delta_1} / R_{12} \tag{3}$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=\delta_1+\delta_2} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial T_i}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0 \tag{5}$$

式中: $\lambda, T_i (i= 1, 2)$ 分别是介质的导热系数和温度, R_{12} 是两层板界面的接触热阻。

两层板介质内的热方程, 采用分裂格式进行数值计算, 时间分裂格式具有一阶时间精度^[4], 每一时间步长内将方程(1)分成两步求解, 先考虑 z 方向导热, 再考虑 r 方向导热, 最终结果与原方程的解是相容的。利用已知的 $q_0, r_0, \delta, \alpha (i= 1, 2)$ 以及人为设定的 R_{12} , 则可数值求解该组合介质内部温度分布^[5]。

2 实验测试

2.1 实验系统

如图 2 所示, YAG 激光器提供所需功率的连续激光, 经透镜聚焦后照射到靶材正面中心点, 在靶材背面中心点用热电偶记录温升数据。

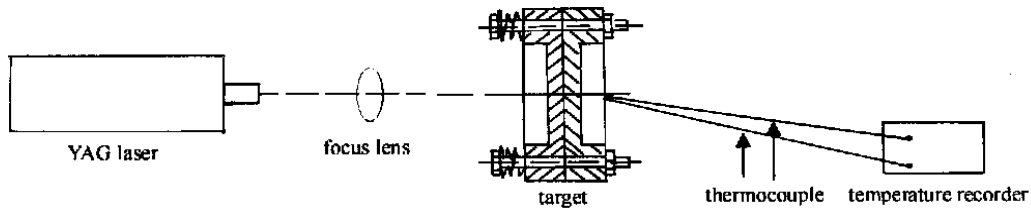


Fig 2 Experiment layout

图 2 实验系统简图

2.2 靶材

将具有足够刚度的四种材料加工成尺寸如图 3 所示的凹形圆盘各两个, 在半径 47mm 处平均分布 4 个直径 11mm 的通孔。弹簧及螺栓通过通孔连接两个凹形圆盘, 由于靶材刚度足够大可保证凹形圆盘底面平整接触。事先标定弹簧压缩量与弹簧压力的关系, 则螺栓和弹簧变成压力计, 可测得接触面的平均压力。

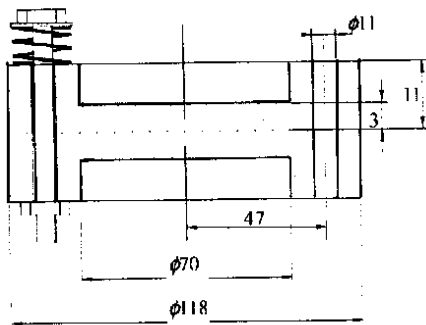


Fig 3 Target sketch

图 3 靶材示意图

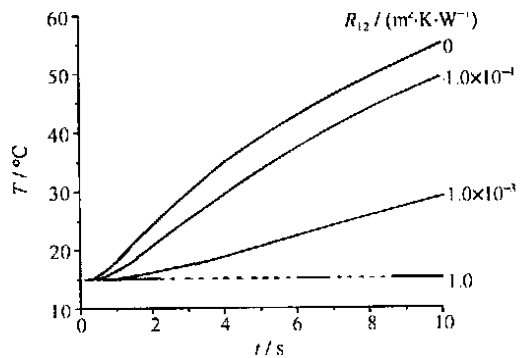


Fig 4 Temperature curve at back surface center

图 4 背面中心的温升曲线

2.3 接触热阻的确定

2.3.1 数值计算

激光波长为 $1.06\mu\text{m}$; 光斑 $r_0 = 6.15\text{mm}$; 激光器发射功率为 500W ; 由实测靶材对激光反射率而得到的吸收率如表 1。取靶材 $\delta_1 = \delta_2 = 3\text{mm}$, 热物性和粗糙度列于表 2。利用方程组(1)~(5), 在上述参数以及假定的接触热阻 R_{12} 条件下, 解出与照射点相对应的背面点上的温升曲线。例如对于两块 45 钢在设

定的一组接触热阻下背面中心点温升的一组计算曲线如图 4 所示。

2.3.2 实验测定

利用图 2 所示的装置, 实测后表面中心点的升温曲线。选取一组计算曲线中与实测试验曲线最接近那条, 则其所设定的热阻即所求的实际热阻。用此法确定的接触热阻连同相关的参考数据比较于表 3。除了特别标出的外, 样品所受弹簧压力都是 27kPa。

表 1 靶材对激光的吸收率

Table 1 Absorptivity of laser by target

target	absorptivity
# 45 steel	0.250
stainless steel	0.097
brass	0.100
aluminum	0.080

表 2 实验靶材的有关参数

Table 2 Parameters of target materials

	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$c_p / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	roughness/ μm
# 45 steel	7 810	48 070 (373K)	0.468 0 (293~ 373K)	3.35
		46 398 (473K)	0.481 0 (293~ 473K)	
		43 890 (573K)	0.523 0 (293~ 673K)	
		41 382 (673K)	0.573 0 (293~ 873K)	
		38 038 (737K)		
		35 112 (873K)		
stainless steel (1Gr18N 9Ti)	7 900	16 302 (373K)	0.501 6	2.68
		18 810 (573K)		
		22 154 (773K)		
		23 408 (873K)		
aluminum (LY12)	2 780	121 220 (300K)	0.919 6 (373K)	1.54
		192 280 (373K)	1.045 0 (473K)	
			1.128 6 (573K)	
brass(H62)	8 430	108 680	0.376 2	1.38

表 3 双层介质接触热阻

Table 3 Thermal contact resistance of two layered complex medium

sample	$R_{12} \times 10^4 / (\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	reference $R_{12} \times 10^4 / (\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$
# 45 steel / # 45 steel	6	5.5 ^[6]
# 45 steel / # 45 steel(18kPa)	7	6.2 ^[6]
brass / brass	5.5	1~ 10 ^[7]
stainless steel / stainless steel	3.5	4~ 6 ^[7]
# 45 steel / stainless steel	12	
# 45 steel / brass	20	
# 45 steel / aluminum	9	
stainless steel / # 45 steel	13	
brass / # 45 steel	11	

2.3.3 试验与计算的比较

图 5 为不同状况下双层样品背面中心点温升试验数据与计算曲线的比较, 散点为实验值, 光滑线为数值解。其中图 5(a)是 45 钢分别与 45 钢、不锈钢、黄铜和铝组合靶材的比较; 图 5(b)是不锈钢分别与不锈钢、45 钢组合靶材和黄铜分别与黄铜、45 钢组合靶材的比较; 图 5(c)是 45 钢与 45 钢组合靶材在两种不同压力(27kPa, 18kPa)下的比较。可见试验数据与数值计算曲线的重合程度较高。其中, 45 钢的激光吸收率较高, 使温度的上升幅度最大; 不锈钢的激光吸收率不高, 但其热扩散率最小, 温度上升幅度也较大; 黄铜的激光吸收率较小, 且热扩散率较大, 其温度上升幅度最小。由图 5(c)的曲线可知, 当接触压力变小时, 能明显增大接触热阻。

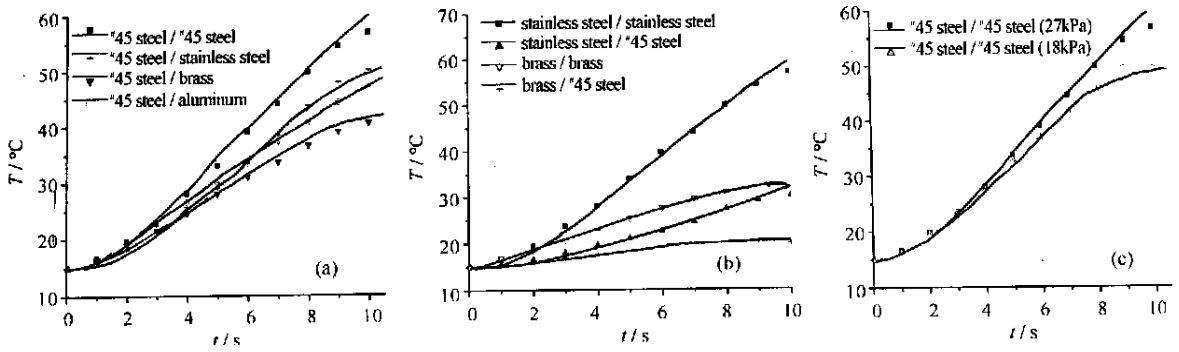


Fig 5 Comparison between experimental data and numerical curve on different conditions

图 5 不同状况下双层样品背面中心温升试验数据与计算曲线的比较

3 讨论

3.1 靶材的尺寸与结构

对做成凹形圆盘的靶材试样是否满足计算模型中无限大平板的要求进行检验,为此分别对图 1 所示无限大平板和图 3 所示凹形圆盘在相同材料、相同激光参数条件下进行计算,得到 45 钢前表面径向温度分布如图 6 所示。可以看出,在 10s 时两者温度分布完全一样,50s 时有微小的差别,80s 后才有明显的差别。因此可以认为在实验时间内(8~ 10s)凹形圆盘尺寸能满足无限大平板的要求。其它材料的情况基本一样。

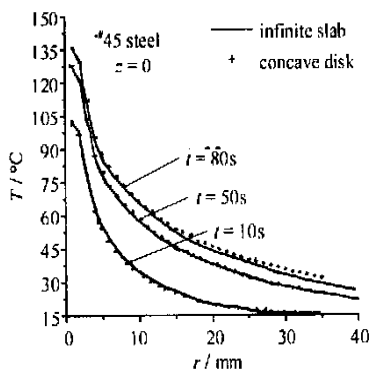


Fig 6 Comparison of radial temperature between infinite slab and concave disk

图 6 无限大平板与凹形圆盘径向温度比较

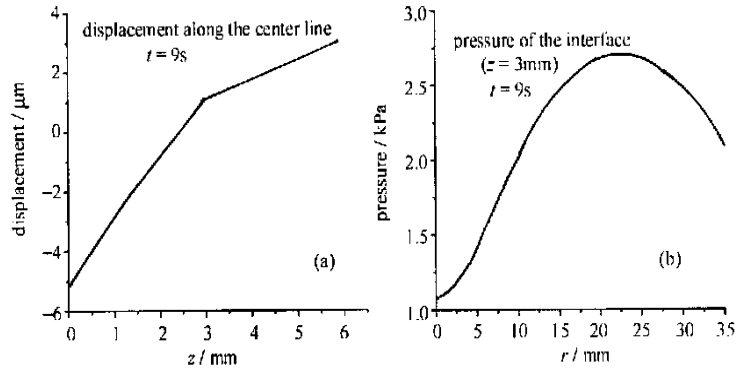


Fig 7 Displacement along the centre line and additional pressure on the interface of # 45 steel / # 45 steel

图 7 沿 # 45 钢/ # 45 钢中心轴线上的位移和接触界面上的附加压力

3.2 靶材热胀的影响

考虑到金属实验样品在激光加热过程中的热胀可能使两层介质的接触产生变化,甚至接触界面分离违背了测试过程中接触热阻不变的基本假设;因此,我们利用计算软件 Marc,进行热-力耦合方程有限元计算,考查了测试过程中热胀的影响。以 45 钢为例,在计算中用弹簧所施加的外力作为约束条件,获得沿 45 钢/45 钢中心轴线上的位移和接触界面上的附加压力如图 7 所示。可以看出,在界面处($z=3\text{mm}$)位移是连续的,说明在界面两边点的位移相同,即没有发生分离现象。接触界面上沿 r 方向由于材料热胀引起的附加压力的数量级是 1kPa ,而界面平均压力是 27kPa ,可见附加压力的影响是很小的。

4 结 论

本文提出了一种将实验与计算相结合以测试接触热阻的新方法。此方法更方便快捷,所需测试条件比较简单。同已有参考数据比较,测定的接触热阻具有较好的精度。通过数值方法,发现实验所用凹形圆盘符合计算模型所要求的无限大平板的要求,并且金属热胀对界面接触热阻的影响较小。

参考文献:

- [1] Madhusudana C V, Fletcher L S. Contact heat transfer- the last decade[J]. *A I A Journal*, 1986, **24**(3): 510—523.
- [2] Fletcher L S. Recent developments in contact conductance heat transfer[J]. *A S M E Journal of Heat Transfer*, 1988, **110**: 1059—1070.
- [3] 应 济, 贾 昱, 陈子辰, 等. 粗糙表面接触热阻的理论和实验研究[J]. 浙江大学学报, 1997, **31**(1): 104—109. (Ying J, Jia Y, Cheng Z C, et al. Theoretical and experimental research on the contact thermal resistance between real surface. *Journal of Zhejiang University*, 1997, **31**(1): 104—109)
- [4] 郭宽良. 数值计算传热学[M]. 合肥: 安徽科技出版社, 1987. (Guo K L. Numerical simulation of heat transfer. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1987)
- [5] 钟 明, 罗大为, 朱柞金, 等. 激光辐照金属/炸药介质温度场的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(2): 137—140. (Zhong M, Luo D W, Zhu Z J, et al. Numerical simulation of temperature field of metal/explosive materials irradiated by laser. *High power laser and particle beams*, 2000, **12**(2): 137—140)
- [6] 皇甫哲. 金属接触面传热热阻研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1989. (Huang-Fu Z. Study on the heat transfer resistance of metal interface (Ph. D. Thesis). Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1989)
- [7] 葛新石, 英克鲁佩勒 F P, 戴威特 D P. 传热的基本原理[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1985. (Ge X S, Incropera F P, Dewitt D P. Fundamental of heat transfer. Hefei: Anhui Education Press, 1985)

Measurement of the thermal contact resistance between two-layer complex mediums

ZHONG Ming¹, CHENG Shu-xia¹, WANG Wei-ping², WANG Chun-yan², HE Li-qun¹

(1. Department of Thermal Science and Energy Engineering, USTC, Hefei 230026, China;

2. Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-113, Mianyang 621900, China)

Abstract Under the conditions of known thermophysical properties of mediums and supposed some thermal contact resistances of interface between two layered infinite complex mediums, the inside temperature distribution of medium and the temperature raise curve at the two-concave-disk target's back surface center is computed numerically when the front surface is irradiated by laser. And the temperature raise curve is also measured experimentally. The thermal contact resistance of the interface is determined by comparing the experimental data with the computed results. Through numerical computation, it is found that the concave disks accord with the supposition of infinite slab and the effect of thermal expansion on the interface thermal contact resistance is very small.

Key words laser heating; two-layer complex medium; thermal contact resistance