

文章编号: 1001-4322(2002)03-0345-04

激光辐照下双层钢板接触界面对传热的影响*

赵剑衡, 王贵兵, 张世文, 桂元珍, 王春彦, 唐小松, 张大勇

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 首次提出激光辐照下双层金属板界面会由于变形而产生脱离, 从而对双层板之间的传热有明显的影响, 通过实验和数值模拟验证这一提法。该工作丰富了接触热阻概念, 有助于进一步加深对强激光破坏机理的研究, 同时提供了一条有效的抗强激光加固的途径。

关键词: 强激光; 接触热阻; 变形

中图分类号: TN 246 **文献标识码:** A

激光辐照下热在双层介质的交界面处传递的问题近年来得到较多的关注^[1,2], 这是因为热在双层介质的界面处流过时, 交界面处存在较大的温度降, 这对激光的加热和破坏效应有非常明显的影响, 具有很强的军用和民用背景。钟明^[1]等从接触热阻的层面对这一个问题开展了较为系统的实验和数值模拟研究。所谓接触热阻是热物理学概念, 它是造成接触界面处产生温度梯度的主要原因, 其本质是由于实际固体表面的凹凸不平造成实际接触面积小于名义接触面积, 从而使热流通过接触面时发生收缩, 在接触界面处产生明显的温度降。此时界面处传热是复合型的, 既有热传导、热对流, 也有热辐射。接触热阻问题的研究始于十九世纪四十年代末^[3], 国内这方面的研究始于八十年代末。影响接触热阻的因素有接触压力、表面形貌、界面温度、热流和加热持续时间等。在以往对接触热阻的研究工作多是从热物理学角度考虑的, 也有研究者考虑了接触界面上粗糙峰由于温度和压力变化发生细观弹塑性变形^[4], 但是关于结构整体受热变形造成界面处接触压力变化或界面脱开对接触热阻影响的研究工作未见报道。钟明在研究激光辐照下接触界面的上的接触热阻时, 其方法依旧使传统的, 即认为接触界面上的接触热阻是定常的^[1]。需要指出的是由于激光本身能量空间分布的不均性, 会给被辐照介质上带来一个不均匀的温度场分布, 从而导致变形的不均匀, 这有可能改变交界面处的接触压力的大小, 从而导致接触热阻的变化, 即接触热阻是非定常的, 变形甚至会导致交界面处脱离, 从而使这个问题的研究超出接触热阻的范围。另外研究激光辐照下结构的变形, 需要对材料高温、高应变率下材料本构关系的准确把握, 而目前没有公认的能够很好描述材料高温高应变率下材料本构关系^[5], 因此这一多学科交差的问题的涉及到学科的前沿, 具有很大的挑战性。

1 实验

图 1 给出了本文的实验简图, 实验中使用最大输出功率为 1kW 的连续 YAG 激光器作加热源, 辐照实验

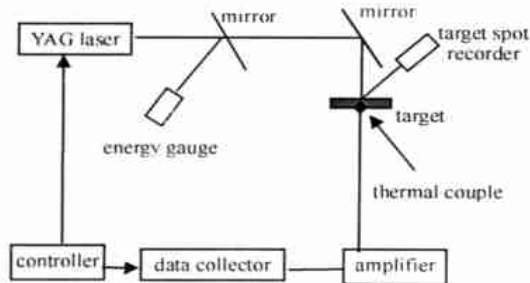


Fig 1 Experimental setup

图 1 实验装置简图

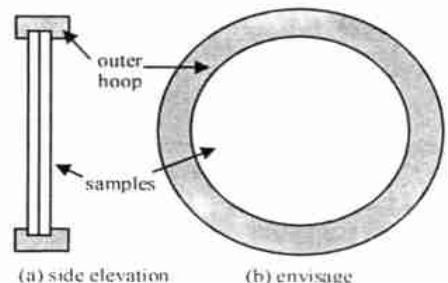


Fig 2 Experimental samples

图 2 实验样品

* 第六届全国激光科学技术青年学术交流会优秀论文。

收稿日期: 2002-01-20; 修订日期: 2002-03-04

基金项目: 国家 863 激光技术领域资助课题

作者简介: 赵剑衡(1969-), 男, 博士, 副研, 主要从事冲击动力学、强激光与物质相互作用等方面的研究; 绵阳 919-113 信箱; E-mail: jianh_zhao@yahoo.com.

样品的前表面,通过热电偶测试样品后表面处即激光辐照区中心处的温度。考虑到热电偶测试的是一个点,因此要求调节激光能量的空间分布以保证实验的可重复性和光斑中心处的温度能够最高,激光能量的空间分布情况由图 1 中靶斑仪监测。实验样品材料是 45 号钢圆板,直径为 80mm。实验分三种工况进行,即用输出功率为 500W 左右,光斑直径为 15.2mm 的激光分别辐照厚度分别是 2, 4 mm 的实验样品和两块 2mm 厚叠在一起的实验样品,目的是比较钢板接触界面存在时对传热的影响。两块钢板通过箍环叠在一起,如图 2 所示,相当于给板的边缘处施加了一个固支边界,然后用激光辐照其中一块板的前表面,热电偶记录的是后板后表面的温度。表 1 给出了对应实验的条件。

表 1 实验条件(辐照时间 10s)

Table 1 Parameters of experiments(irradiation time: 10s)

No.	45 steel	laser power/W	thickness/mm	thermocouple/Ω
4501		517	2	10.9
4502		520	2	11.4
4503		510	4	14.6
4504		530	4	15
4505		487	2+ 2	8.8 11.7
4506		480	2+ 2	— 14.7
4507		510	2+ 2	— 14.8
4508		505	2+ 2	— 15.3
4509		500	2+ 2	15.8 14.6

2 数值模拟

由于实验中的样品、激光加载和约束均是轴对称的,因此问题可以简化为图 3 所示的二

维轴对称的计算模型。图 3 中的 x 轴为圆板的径向,y 轴为圆板厚度方向,圆板周边由箍环施加的约束被简化为图 3 模型左边的固支边界,右边为对称轴。对称轴和固支边界处为绝热边界,板的后表面为对流边界。两板交界面处接触间隙小于接触容限时,引入一个定常热阻值,当接触间隙大于接触容限时,两板的界面处的传热应采用热辐射和热对流的方式处理。本文计算中接触容限值为 5μm。在本文的计算中除了考虑激光能量的分布为 Gauss 形的以外,还考虑了激光能量空间分布是倒三角形的,即激光的能量边缘高,中心低。上述两种激光能量的分布情况分别用实箭头线和虚箭头线画在图 3 中,计算中考虑激光能量的空间分布主要是为了考核它们对接触界面处传热的影响。

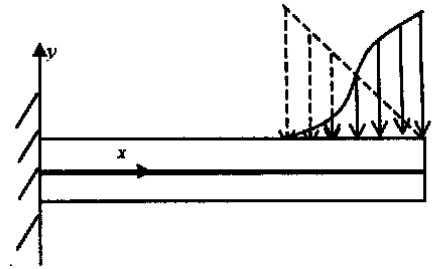


Fig 3 Simulation model

图 3 计算模型

在激光辐照下本文研究的问题是一个耦合热弹塑动力学问题,当激光辐照区的温度上升到材料熔点温度的 1/3 时,还需要进一步考虑粘性的影响。就热力耦合问题而言,在弹性范围内可由下面的动力学方程和热传导方程来描述

$$(\lambda + \mu)u_{j,ij} + \mu u_{i,jj} - \theta_i + F_i = \rho \dot{u}_i \quad (1)$$

$$\theta_{kk} - \frac{C}{K_1} \theta_+ - \frac{C}{K_1} Q - \frac{\beta}{K_1} T u_{k,k} = 0 \quad (2)$$

式中: $\theta = T - T_0$, T_0 为基准温度; u_i, F_i 分别为位移和体力分量; Q 为内热源; ρ 为密度; K_1 为热传导系数; C 为定容比热容; $\beta = \alpha E / (1 - 2\nu)$, α 为线性热膨胀系数; λ, μ, E, ν 是材料弹性常数。求解结构上的热动力学问题无论是解析方法推导还是数值模拟都存在着数学上的困难。由于本文实验中激光辐照样品的时间是 10s,因此热的加载不是很快,计算中忽略掉公式(1)中惯性项的影响,把原来问题当成是热静力学的问题处理。这种处理在热传到交界面前是可以接受的,但当热开始在交界面处传递时,忽略惯性项的影响会带来较大的误差,但这样做可以节省较大的计算机资源。假定可以忽略体力,此时

$$u_{k,k} = \frac{\alpha(1 + \nu)}{1 - \nu} \theta_+ + g \quad (3)$$

其中 g 为与时间无关的调和函数,于是(2)式变为

$$\theta_{kk} - (C/K)(1 + \delta) \theta_+ + (C/K)Q = 0 \quad (4)$$

$\delta = \beta \alpha T (1 + \nu) / C (1 - \nu)$, 在热静力学中, 对钢而言公式(4)中的热力耦合系数 δ 远小于 1, 故忽略掉热力耦合项, 这样原来的问题变为分别求解热传导问题和热静力学问题。

计算中采用了双线性弹塑性本构关系和随动强化模型, 硬化模量取对应温度下弹性模量的十分之一, 材料的参数是随温度变化的^[5]。

3 结果分析

图 4 给出了三种工况下(实验号 4501, 4504 和 4505)样品后自由表面中心的温度时间变化关系, 由表 1 可以看到, 上述实验的激光参数基本相同, 但样品后自由表面的温度却相差很大。其中 4501 实验的样品厚度为 2mm, 在激光辐照下, 其后表面最高温度约为 420 , 而 4504 实验的最高温度只有 4501 实验的一半左右, 这主要是因为 4mm 厚的 4504 实验样品是 4501 实验样品厚度的两倍。4506 实验是两块 2mm 厚的铝板叠加在一起, 其整体厚度与 4504 实验相同, 但从图 4 中可以看到, 两者后表面处的温度相差却非常大, 4506 实验的后表面最高温度只有 4504 实验后表面处最高温度的一半, 即 100 。这个实验表明两块叠加在一起的钢板因接触界面的存在而对传热的阻断有明显的影 响。从图 4 中还可以看到, 4506 实验出现最高温度的时刻明显晚于 4504 实验, 这表明在两板的接触界面处确实存在较大的温度梯度, 在激光停止辐照后, 由于两板之间存在较大的温度梯度, 导致前板能够继续对后板进行加热。图 4 中 4506 实验的温度曲线的上升也与另外两发实验明显不同, 其温升率几乎不变, 即温度随时间的上升关系几乎是线性的, 这表明在加热过程中两板界面处的温差越

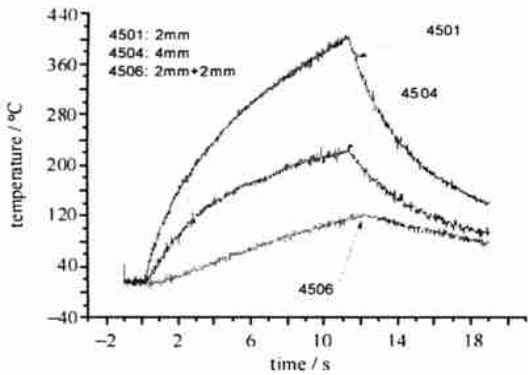


Fig 4 Temperature history of the rear surface center of sample

图 4 实验样品后表面中心的温度时程曲线

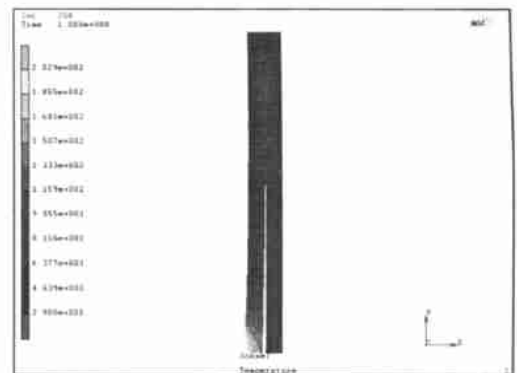


Fig 5 Temperature distribution and deformation on the sample after 1.0s laser irradiation

图 5 激光辐照 1s 时板的变形和温度场分布

来越大或界面间隙或接触热阻越来越小。从表 1 中可以看到, 每种工况下还进行了多发的重复实验, 所得到的样品后表面的温度时程曲线基本上与图 4 中对应工况下的温度曲线重合, 这种可重复性一方面表明图 4 中反映的物理现象的客观存在, 即在相同激光参数的激光辐照下, 同一批加工的样品的内界面的存在对激光加热的阻断效应基本是相同的。另外一方面表明实验的精度是有保证的。除了接触界面处表面粗糙度是造成接触界面处有较大的接触热阻存在外, 这里需要澄清的是在本文实验状况下还有哪些因素能够影响两板之间界面处的传热。图 5 给出了能量空间分布为高斯形激光辐照双层钢板 1.0s 的情况下, 数值模拟得到实验样品时温度场的分布和结构变形情况(图中的数字为温度值)。从图 5 中可以看到, 由于被辐照金属板的结构变形导致两板接触界面发生脱离, 且温度在两板界面处存在较大的温度梯度。这表明激光辐照下接触界面处确实存在因变形造成的脱离, 这种脱离对激光辐照下热在界面处的传递的影响是显见的。

图 6 给出了能量空间分布分别为高斯形和三角形的激光辐照下两板中心(即对称轴位置)接触界面处前后两点的位移。从中可以看到, 对于激光能量空间分布为高斯形的情况, 前板后表面处产生较大的轴向位移, 位移量在激光辐照约为 0.1s 时最大, 而后板前表面产生的沿对称轴方向的位移很小, 两者位移量的差值即是界面脱开的间隙值。可以看到在激光辐照 0.1s 时这种脱开的间隙达到最大, 随后开始回落。从图 6 中可以看到在能量空间分布为倒三角的激光辐照下, 其界面脱离位移也是在激光辐照 0.1s 时达到最大, 但在其后的过程中, 其脱开的位移回落明显晚于 Gauss 形的情况。这表明在激光总能量相同的情况下, 激光能量的空间分布对界面脱离的影响是不同的, 也对界面处传热产生不同的影响, 或者说界面处非定常的接触热阻与激光的能量的空间分布等参数明显相关。

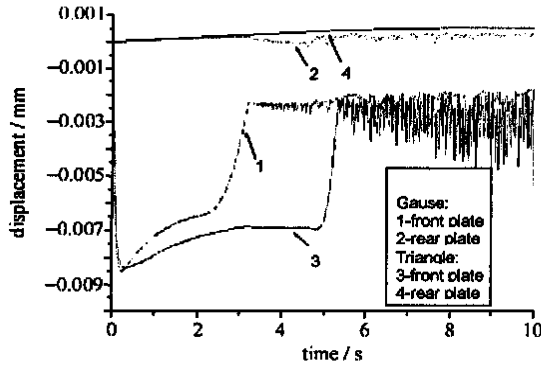


Fig. 6 Displacement vs time of two center point of the two contacting surfaces

图6 板对称轴上接触界面处前后两点的位移时间关系

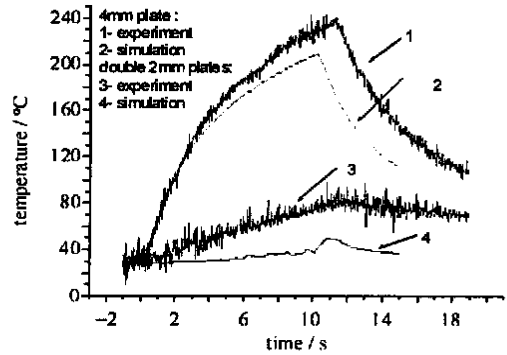


Fig. 7 Comparison of the temperature histories between experiments and simulations

图7 温度时程的实验与计算结果对比

图7给出了4mm厚金属板和两块2mm厚金属板叠在一起的情况下样品的后表面处的温度时程的计算与实验结果的对比。从图7中可以看到,对于单层金属板的数值模拟,实验测试得到的温度时程与计算结果基本吻合,但是对于有接触界面的情况,实验得到的结果明显高于计算值。这表明本文的计算尚存在不足,例如本构关系中没有考虑应变率对温度场的贡献,计算是热力解耦的,同时,计算中忽略了惯性项的影响,在小于接触容限以下引入了接触热阻,但所取的接触热阻值是定常的。上述工作受到了计算机资源和程序本身的限制。

4 结论

激光辐照下接触界面处由于变形导致界面脱离,使得这里的接触热阻不是定常的,当接触界面处界面脱离达到一定的距离时,界面处的传热主要依赖热辐射和热对流。激光的参数如激光能量空间分布等对界面的脱离有明显影响。

致谢 本文工作完成过程中得到孙承纬、刘仓理研究员和中科院力学所段祝平教授的指导,同时李建明、李晓兰、陶颜辉等参加了本文的实验工作,特在此一并致谢。

参考文献

- [1] 钟敏,程曙霞,王伟平等. 测定双层组合介质接触热阻[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(1): 11—15 (Zhong M, Cheng S X, Wang W P, et al. Measurement of the thermal contact resistance between two-layer complex mediums. *High power laser and particle beams*, 2002, 14(1): 11—15)
- [2] 王伟平,王翔. 激光辐照下金属/炸药温度场研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(2): 205—209 (Wang W P, Wang X. Calculation of temperature field of metal/explosive materials irradiation by laser. *High power laser and particle beams*, 1999, 11(2): 205—209)
- [3] Skipper R G S, Wootton K J. Thermal resistance between Uranium and Can[A]. Proceedings of 2nd Inter. Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy[C]. Geneva, 1958: 87.
- [4] 黄埔哲. 金属接触面传热热阻研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1989. (Huang P Z. Study on the heat transfer resistance of metal interface (Ph.D. Thesis). Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1989)
- [5] 赵剑衡,章冠人,刘绪发. 激光辐照下充压柱壳结构变形的数值模拟[J]. 高压物理学报, 1996, 10(4): 262—268 (Zhao J H, Zhang G R, Liu X F. A numerical simulation to the deformation of an internally pressured cylinder tank under intensive laser irradiation. *Chinese J of high pressure physics*, 1996, 10(4): 262—268)

Effect of two steel plate's interface on heat transfer under laser beam irradiation

ZHAO Jian-heng, WANG Gui-bing, ZHANG Shi-wen, GU I Yuan-zhen,
WANG Chun-yan, TANG Xiao-song, ZHANG Da-yong
(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-113, Mianyang 621900, China)

Abstract In this paper, it is supposed that there is a gap in the interface of two contacting steel plates due to thermal deformation under laser beam irradiation, and this gap will affect heat transfer in this interface obviously. This supposition is testified by experiments and simulation. This work is helpful to the study of the destruction mechanism under high power laser loading, and provides an effective way for anti-laser research.

Key words high power; laser; thermal contact resistance; deformation