

## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光多道铣削温度场有限元模拟

许兆美<sup>1</sup>, 汪通悦<sup>1</sup>, 裴旭<sup>1</sup>, 蒋素琴<sup>1</sup>, 李伯奎<sup>1</sup>, 王庆安<sup>1</sup>, 洪宗海<sup>2</sup>

(1. 淮阴工学院 先进制造技术重点实验室, 江苏 淮安 223003;  
2. 淮阴工学院 外国语学院, 江苏 淮安 223003)

**摘要:** 激光铣削时能量是以局部热源的形式照射到基体表面上, 集中的能量会引起铣削过程中温度场分布不均匀和不稳定。以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷材料激光铣削为例, 建立了激光多道铣削的三维温度场有限元模型。利用 ANSYS 软件中的 APDL(ANSYS Parametric Design Language)语言模拟了多道铣削时热源的移动。模拟结果表明: 随着铣削过程的进行, 后面的铣削道光斑中心的温度比前面的铣削道的中心温度高, 且具有的热影响区也大; 温度梯度变化最大的地方是在扫描方向发生改变的铣削样件边缘区域。将模拟结果的最高温度和文献中的实验结果进行对比, 一致性较好。

**关键词:** 陶瓷; 激光铣削; 温度场; 有限元模拟

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0477-05

## Finite element simulation of thermal distribution in laser multi-track milling of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics

Xu Zhaomei<sup>1</sup>, Wang Tongyue<sup>1</sup>, Pei Xu<sup>1</sup>, Jiang Suqin<sup>1</sup>, Li Bokui<sup>1</sup>, Wang Qing'an<sup>1</sup>, Hong Zonghai<sup>2</sup>

(1. Advanced Manufacturing Technology Lab, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China;  
2. Faculty of Foreign Language, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China)

**Abstract:** The energy of the laser milling was input to the sample surface in the mode of local heat, which can cause the uneven and unstable of the temperature field during the laser milling. Take the laser milling on the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic materials for an example, the article set up the 3D finite element simulation model of the laser milling temperature field. The heat moving of the laser milling was simulated by the APDL language of the ANSYS software. The result of the simulation shows that the temperature of the center spot of the back track is higher than the front track with the process of the laser milling. The greatest temperature gradient located on the sample edge area in the scanning direction changes. The maximum temperature in the simulation results and literature experimental results for comparison are in good agreement.

**Key words:** ceramics; laser milling; temperature field; finite element simulation

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 江苏省教育厅省高校重大基础科研项目(13KJA460001); 江苏省高校自然科学基金项目(14KJB460003);  
江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201302);

江苏省先进制造技术重点实验室开放基金(HGAMTL-1408, HGDML-1101); 淮安市科技支撑计划(HAG2013034)

作者简介: 许兆美(1976-), 女, 副教授, 博士, 主要从事激光加工脆性材料方面的研究。Email: fuyun588@163.com

## 0 引言

$\text{Al}_2\text{O}_3$  等陶瓷材料具有耐磨损、耐腐蚀、耐高温及绝缘性能好等特点,在机械、电子、航空等很多领域得到了应用。但是陶瓷材料的脆性较大,难以采用传动的加工方法进行高效率、高精度的加工<sup>[1-2]</sup>。激光铣削是利用聚焦的高能激光束直接作用在材料表面,使作用区域的材料瞬间直接气化、或者熔化,同时利用辅助装置去除、或者剥离开基体,完成三维成形的加工方法<sup>[3]</sup>。与常规加工方法相比,激光铣削是一种无接触、无切削力、热影响小、清洁和可以对特殊面加工的优点,为陶瓷材料的加工提供了一个有效的方法。但激光光束的功率密度很高,在激光铣削过程中最为显著的特点就是加热速度快、作用范围小,故会引起铣削过程中温度分布不均衡、温度梯度大。从而导致铣削件表面产生热应力,容易使铣削件表面产生裂纹,其数值模拟难度较大。激光铣削数值模拟对揭示其铣削机理和铣削过程具有重要作用,掌握铣削过程温度场动态分布不同铣削道的影响规律对于选择合适的工艺参数、降低温度梯度及其产生的热应力具有重要的理论意义。先前的研究主要是集中在激光单道铣削方面,如参考文献[4]建立了一个单层单道铣削区域的温度场模型,而没有研究多道铣削温度场的分布。

文中利用 ANSYS 有限元软件中的参数化设计语言 (APDL, ANSYS Parametric Design Language) 建立了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷激光多道铣削的三维温度场有限元分析模型。激光热源采用高斯热源,并将利用 ANSYS 中生死单元技术用于激光铣削过程中,能够精确地计算热源对铣削过程的影响。为陶瓷材料激光大面积铣削提出了理论依据。

## 1 模型描述

利用 APDL 语言建立了激光多道铣削的三维有限元模型,模型总体尺寸为  $7.5\text{ mm} \times 1.7\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ , 铣削区域为  $5\text{ mm} \times 0.8\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ , 利用 Solid70 中的四面体八节点热单元进行网格划分,为了节省计算时间,在激光束扫描区域内采用  $0.1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ , 其他区域的网格大小为  $0.2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 。激光能量是以高斯热源的形式输入,其热流

密度是以热传导的方式进入到材料内部。激光光束多道铣削的扫描路径采用光栅是扫描方式,如图 1 中的折线所示。

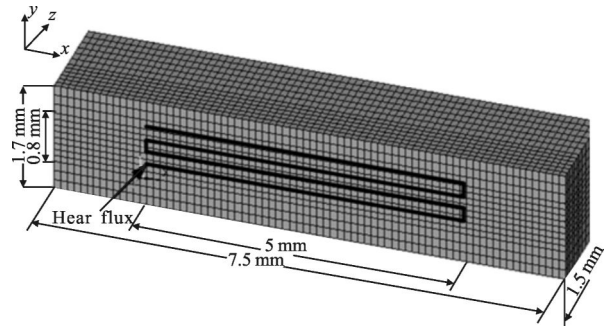


图 1 激光多道铣削温度场有限元分析模型

Fig.1 Temperature finite element model of laser milling

## 2 边界条件和初始条件的确定

激光铣削的热传导行为可以利用基于 Fourier 热传导定律和能量守恒的经典三维热传导方程来描述,直角坐标系下的三维热传导泛定方程如下<sup>[5]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中: $T$  为某瞬间材料基体上任一点  $(x, y, z)$  的温度; $\rho$  为材料密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $c$  为材料的比热容 ( $\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ ); $\lambda$  为材料的热传导系数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ); $t$  为传热时间。

初始条件为:

$$T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0 \quad (2)$$

边界条件为:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} |_{z=0} + h(T_S - T_E) = q_1 \quad (3)$$

式中: $T_S$  为模型表面温度; $T_E$  为空间环境温度; $h$  为对流换热系数; $q_1$  为材料表面对激光的吸收系数。

## 3 移动热源的加载及实现

在激光铣削过程中激光能量是按照热流密度的形式输入到材料表面上,且热源随着时间的推移按给定的速度移动。在激光铣削中一般认为激光的功率密度服从高斯分布<sup>[6]</sup>:

$$q(x, y) = \frac{2AP}{\pi\omega^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \quad (4)$$

式中: $q(x, y)$  为激光功率密度; $P$  为激光功率; $\omega$  为激光光斑半径; $A$  为材料对激光束的吸收率;在图 1 所建立的直角坐标系下,激光束从起始点  $(x_0, y_0, z_0)$  到

( $x_0, y_0, z$ ) 以速度  $y$  沿着  $z$  轴正方向移动时间  $t$ ,  $r$  为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷样件表面上一点到光斑中心的距离, 其中  $r^2=(x-x_0)^2+(z-z_0-vt)^2$ 。

激光铣削温度场属于瞬态非线性温度场, 利用 ANSYS 模拟软件中自带的 APDL(ANSYS Parametric Design Language)语言编写热源的移动过程程序。并借助生死单元技术模拟铣削过程中温度场的变化过程, 在计算开始时候, 设定高于熔点以上的单元被杀死, 熔点以下的单元继续被用于下一步的加载循环, 具体模拟过程如图 2 所示。

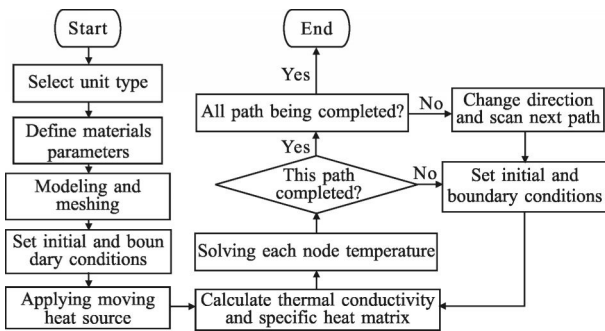


图 2 激光多道铣削的有限元算法

Fig.2 Finite element analysis algorithm of laser multi-path milling

### 4 模拟结果与分析

#### 4.1 材料的热物性参数

模拟中选用材料纯度为 95% 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷, 由于陶瓷材料的热物性参数随温度的变化非常小, 故可忽略热物性参数的变化对温度场的影响。陶瓷材料的热物性参数如表 1 所示<sup>[7]</sup>。

表 1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷热物性参数

Tab.1 Thermal parameters of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic

Parameter	Density /kg·m <sup>-3</sup>	Melting /°C	Specific heat /J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Thermal conductivity /W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Convection coefficient /W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>
Value	3 910	2 030	765	6.27	14

#### 4.2 结果及分析

在激光铣削工艺中, 影响铣削层质量的参数较多, 依据以往的激光铣削加工经验以及考虑到参数的可控性, 选择激光功率、扫描速度和光斑直径三个工艺参数进行多道激光模拟。具体为: 功率 90 W, 扫描速度 300 mm/min, 离焦量 4 mm, 搭接量 0.2 mm,

时间步长设为 0.002 s, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷对激光的吸收率设置为 0.85<sup>[8]</sup>, 扫描道数为四道。

#### (1) 温度场分析

模拟结束后, 提取定点定线温度曲线和关键时刻温度云图。图 3(a)~(d)分别给出了四道扫描结束时候的陶瓷样件表面上的温度分布云图。从图 3(a)~(d)的温度分布云图可以看出。

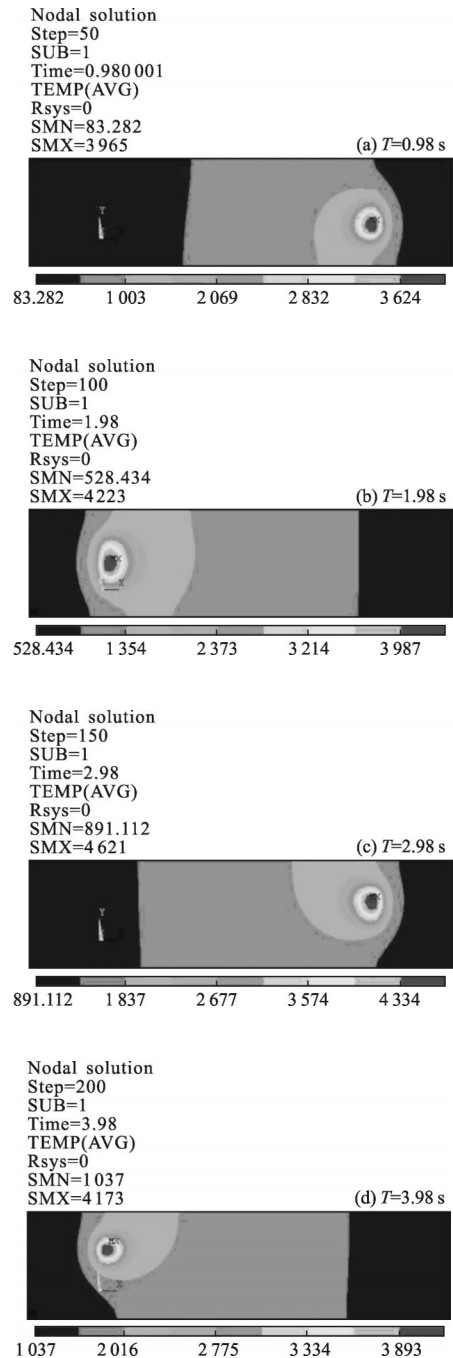


图 3 样件铣削结束后各道表面温度分布云图

Fig.3 Surface temperature distribution of each channel

1) 光斑中心的温度随着激光束扫描铣削道的增加而逐步升高, 时间为 0.98 s 时的光斑中心温度达到 3 965 °C, 1.98 s 时光斑中心温度为 4 223 °C, 2.98 s 时光斑中心温度是 4 621 °C, 到第四道铣削结束时刻 ( $T=3.98$  s) 时的光斑中心温度为 4 173 °C, 这主要是由于铣削加工时的热量累积效应引起的, 即已铣削部分的余热会对正在铣削部分具有加热的作用, 并且随着铣削道的增加, 基体的整体温度逐渐升高。

2) 光斑中心的热影响区随着铣削道的增加而逐渐增大, 这也是由于热积累效应造成的。在这里说明一点, 第四道铣削时温度有小幅下降, 这可能是由于模拟中考虑了基体与周围环境温度之间的热对流效应的缘故。

#### (2) 温度场随时间的变化规律分析

图 4 为同一水平位置不同宽度处的温度分布曲线图,  $r^2=(x-x_0)^2+(z-z_0-vt)^2$  曲线是第一道扫描铣削线一般位置处的节点温度在整个铣削过程的变化情况,  $y=0.4$  mm 曲线是第二道扫描铣削线一般位置处的节点温度在整个铣削过程的变化情况,  $y=0.6$  mm 曲线是第三道扫描铣削线一般位置处的节点温度在整个铣削过程的变化情况,  $y=0.8$  mm 曲线是第四道扫描铣削线一般位置处的节点温度在整个铣削过程的变化情况。

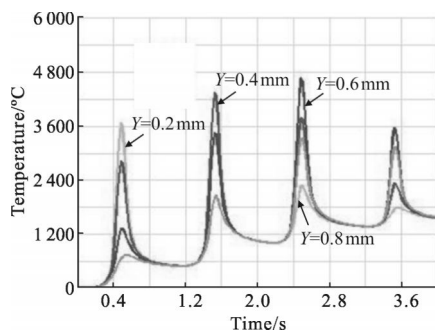


图 4 不同路径的温度分布曲线

Fig.4 Temperature distribution curve in different track path

从图 4 可看出第一道铣削时, 基体温度为室温, 而当第二道铣削开始扫描方向改变, 起始温度要比基体初始温度高, 这是由于热量的积累造成的。第三道与第四道的温度演变趋势与前两者相同, 只是在第四道时整体温度由于热对流的影响有了小幅下降。还可以看出: 激光光斑中心的温度最高, 随着与光斑距离的增加, 由于热传导的作用温度逐渐降低。

参考文献[8]开展了  $Al_2O_3$  陶瓷材料的激光铣削实验, 实验所用的工艺参数与本实验一直, 其实验结果表明, 在上述工艺参数下, 最高铣削温度已到达  $Al_2O_3$  陶瓷的熔点以上, 材料已经融化并被气化, 和该实验的模拟结果一致。

## 5 结论

利用 ANSYS 中的 APDL 语言建立了  $Al_2O_3$  陶瓷材料的激光多道铣削温度场分布进行了数值模拟, 并得出如下结论:

(1) 建立的激光铣削过程的三维瞬态温度场模型, 对材料的热物性参数做了适当加入, 通过实验可知该假设是合理的; (2) 多道激光铣削时, 后面形成的铣削道比之前形成的铣削道具有更大的热影响区域, 且后面形成的铣削道在  $x$  方向具有更加不均匀的热影响区域, 这由于已铣削部分与未铣削部分热量的相互作用造成的; (3) 多道铣削时, 在激光束的扫描方向发生改变时, 即刚刚转入下一铣削道时, 光斑中心存在极高的温度, 光斑附近的铣削件边沿具有极大的温度梯度。

## 参考文献:

- [1] Pham D T, Dimov S S, Petkov P V. Laser milling of ceramic components [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(3-4): 618-626.
- [2] Xu Zhaomei, Zhou Jianzhong, Huang Shu, et al. Application for  $Al_2O_3$  ceramics laser milling using artificial neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2957-2961. (in Chinese)  
许兆美, 周建忠, 黄舒, 等. 神经网络在  $Al_2O_3$  陶瓷激光铣削中的应用研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 2957-2961.
- [3] Xu Zhaomei, Liu Yongzhi, Yang Gang, et al. Laser milling quality prediction model of BP neural network by PSO [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2370-2374. (in Chinese)  
许兆美, 刘永志, 杨刚, 等. 粒子群优化 BP 神经网络的激光铣削质量预测模型 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2370-2374.
- [4] Huang Shu, Zhou Jianzhong, Sheng Jie, et al. Numerical simulation and experiment on laser milling of  $Al_2O_3$  ceramic [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural*

- Machinery*, 2011, 42(7): 259–265. (in Chinese)
- 黄舒, 周建忠, 盛杰, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷激光铣削数值模拟与实验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 259–265.
- [5] Li Junchang. Diffraction and thermal effect calculation of laser [M]. Beijing: Science Press, 2008: 306–311. (in Chinese)
- 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 306–311.
- [6] Shen Yifu, Gu Dongdong, Yu Chenye, et al. Simulation of temperature field in direct metal laser sintering processes[J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2005, 16(1): 67–73.
- [7] Zhou Yu, Lei Tingquan. Ceramic Materials Science [M]. Beijing: Science Press, 2004: 319–335. (in Chinese)
- 周玉, 雷廷权. 陶瓷材料学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 319–335.
- [8] Zhu Yinbo. Experimental and simulation study of pulsed laser milling on ceramic materials[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- 朱银波. 陶瓷材料脉冲激光铣削成形实验及模拟研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2010.