

基于生死单元的激光铣削温度场数值模拟与验证

许兆美^{1,2}, 刘永志³, 周建忠², 蒋素琴¹, 王庆安¹, 汪通悦¹, 洪宗海⁴

(1. 淮阴工学院 机械工程学院, 江苏 淮安 223003; 2. 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 221013;
3. 第二炮兵驻天津地区军事代表室, 天津 300308; 4. 淮阴工学院 外国语学院, 江苏 淮安 223003)

摘要: 利用 ANSYS 有限元模拟软件建立了激光铣削过程的三维瞬态有限元模型, 并以 Al_2O_3 陶瓷材料的激光铣削加工为例, 利用 ANSYS 中的“单元生死”技术对激光铣削过程中温度场的动态分布进行了模拟。选取其中的一组参数, 详细分析了铣削件表面某一点温度场的变化规律, 确定了沿样件不同的扫描路线上铣削层的宽度和深度, 并提出了温度场模拟结果的间接验证方法, 即将温度场模拟获得的铣削层宽度和深度与实验测得的数据进行对比, 对比结果较吻合, 说明建立的有限元模型能够进行激光铣削效果的预测。

关键词: 生死单元; 陶瓷; 激光铣削; 数值模拟

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1755-06

Numerical simulation and test of laser milling temperature field based on birth-death elements

Xu Zhaomei^{1,2}, Liu Yongzhi³, Zhou Jianzhong², Jiang Suqin¹, Wang Qing'an¹, Wang Tongyue¹, Hong Zonghai⁴

(1. Faculty of Mechanical Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China;
2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 221013, China;
3. Military Representative Office of Second Artillery Crops in Tianjin, Tianjin 300308, China;
4. Faculty of Foreign Language, Huaiyin Institute of Technology, Huaiyin 223003, China)

Abstract: A three-dimensional transient state finite element model of the temperature field of laser milling has been established based on ANSYS software. As an example, Al_2O_3 ceramic material has been milled by laser to simulate the temperature field. The dynamic distribution of the temperature field was simulated during the laser milling process. A group data were chosen to analyze the change orderliness of the temperature on the sample surface. The milling width and depth were determined along different scanning route. An indirect verification method was put forward to test the result of the simulation. The milling layer width and depth of the temperature simulation were compared with the experimental data. The result shows all the data can be coincided, which show the finite element model can predict the effect of laser milling.

Key words: birth-death elements; ceramics; laser milling; numerical simulation

收稿日期: 2013-10-15; 修订日期: 2013-11-24

基金项目: 科技部国家星火计划(2013GA690404); 江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201302)

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

0 引言

激光铣削是利用连续或者脉冲的聚焦高能激光束直接作用在被加工物体上,使加工件局部瞬间融化或气化来将材料去除^[1-2]。与传统的加工方法相比来说,激光铣削是一种无接触、无切削力、清洁和可以进行特殊面加工的先进制造方法。为硬脆性材料的加工提供了一个有效方法。但是激光铣削是靠材料熔化和气化来去除材料的,在其过程中伴随着材料从固态到液态并气化的过程,热量的输入和传播贯穿了整个铣削过程。热过程会引起温度场的变化,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。因此,研究如何控制铣削过程制温度场的分布规律对于激光铣削层质量的控制具有重要的意义。

目前,国内已有学者利用 ANSYS 对激光铣削过程的温度场和应力场做了较多的研究工作^[3-4]。激光铣削是先将材料熔化并气化的过程,气化后的材料被吹走,不再对余下的材料温度有影响。但是,目前激光铣削温度场模拟的研究中没有去除吹走的单元,因此,模拟的结果与实际加工有很大的误差。为了能够精确地模拟激光铣削过程中温度场的变化,文中利用 ANSYS 软件中的生死单元技术进行温度场的模拟,并提出了温度场模拟的验证方法。

1 激光铣削有限元模拟

1.1 模型的建立

激光铣削中单层单道是最基本的,决定了激光工艺参数下的铣削深度和宽度,是工艺参数优化的基本前提,为大面积铣削中搭接率的选择提供了依据,且铣削层的质量关系到整个铣削件的质量,故文中选择单层单道铣削模拟。模型尺寸选为 5 mm×1.2 mm×0.8 mm,铣削区域尺寸为 3 mm×0.8 mm×0.6 mm。网格划分单元格采用 ANSYS 软件 Solid70 中的四面体八节点,为了减少计算的工作量,对于铣削区域内的网格尺寸为 0.1 mm×0.1 mm×0.1 mm,非切削区域网格尺寸为 0.15 mm×0.15 mm×0.15 mm。图 1 为建立的有限元模型。

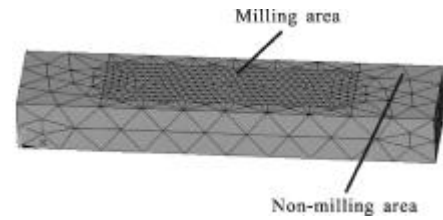


图 1 激光铣削温度场有限元模型

Fig.1 Temperature finite element model of laser milling

1.2 初始条件和边界条件的确定

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^[5]:

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

式中: T 为某瞬间材料基体上任一点 (x, y, z) 的温度; ρ 为材料密度 (g/cm^3); c 为材料的比热容 ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$); λ 为材料的热传导系数 (cm^2/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。

1.3 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^[6]:

$$q(x, y) = \frac{2AP}{\pi \omega^2} \exp(-8 \frac{l}{\omega^2}) \quad (4)$$

式中: $q(x, y)$ 为激光功率密度; P 为激光功率; d 为激光光斑直径; A 为材料对激光的吸收率; l 为材料表面上任一点到光斑中心的距离,其中 $l = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$ 。

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 (Parametric Design Language, APDL) 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。

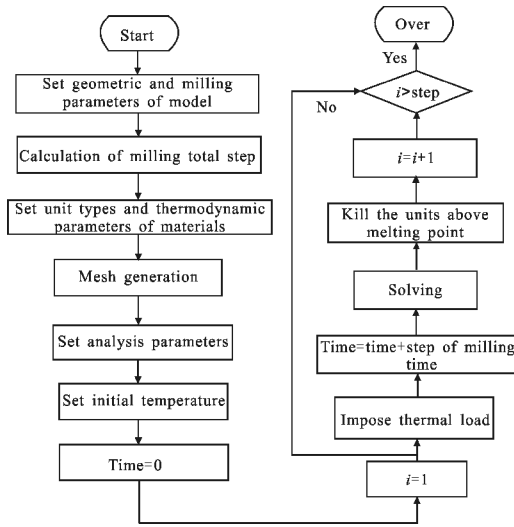


图 2 基于生死单元的温度场模拟流程

Fig.2 Flow chart of temperature field simulation under birth-death elements

2 模拟及结果分析

2.1 材料的热物性参数

模拟中选用材料纯度为 95% 的 Al_2O_3 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^[7]。

表 1 Al_2O_3 陶瓷热物性参数

Tab.1 Thermal parameters of Al_2O_3 ceramic

Parameter	Density/ (kg/m^3)	Melting/ $^{\circ}C$	Specific heat/ $Jkg^{-1}K^{-1}$	Thermal conduc- tivity/ $Wm^{-1}K^{-1}$	Convec- tion coeffi- cient/ $Wm^{-2}K^{-1}$
Value	3 970	2 050	765	6.27	14

2.2 模拟结果与分析

在激光铣削工艺中, 影响铣削层质量的参数较多, 但是从参数可控性方面考虑, 选择激光功率、扫描速度和光斑直径, 三个工艺参数进行单层单道铣削温度场的模拟。大量的实验证明: 随着激光功率的增加, 铣削量也会随着变大, 但激光功率过大时, 铣削量将不再增加, 这主要是因为激光功率太大的话, 照射到材料表面的能量会过高, 导致铣削层表面堆积大量熔渣^[8], 反而使铣削量变小。因此, 模拟的

时候功率选择的范围是 80~110 W。同时, 激光扫描速度的选择也较为重要, 速度过高的话激光停留在激光表面的时间短, 能量来不及吸收, 速度过低的话停留时间太长, 表面会产生重铸层, 两者都会使表面铣削层质量下降。综合考虑, 模拟中选择扫描速度为 200、250、300、350 mm/min 四种。此外光斑直径的大小也会影响铣削件的精度、铣削效率和铣削质量。光斑直径太小的话, 就会使铣削量太小, 导致铣削速率太低; 但直径若太大的话, 尽管每次的铣削量变大, 但是铣削件的质量变差, 在文中模拟中选择激光光斑直径为 0.4 mm 和 0.8 mm 两种。

根据上面的理论分析选择不同的工艺参数进行模拟。模拟时工艺参数尽管不同, 但其过程是一致的。为了分析铣削过程中的温度场变化情况, 先选定其中的一组参数进行模拟和分析。其余的记录下模拟后的宽度和深度, 以备后面的实验验证时使用。

(1) 温度场分析

图 3 为不同时刻温度场的分布云图。图(a)为 0.03 s 时的温度分布图, 即激光光斑刚照射到材料表面上导致温度瞬间升高, 材料被熔化并气化; 图(b)和图(c)为 0.15 s 和 0.72 s 时的温度分布云图, 表明随着激光扫描的进行, 光斑直径前移, 激光光斑移出部分的材料温度逐渐下降, 而光斑到达处的温度升高, 温度场逐渐处于稳定趋势。

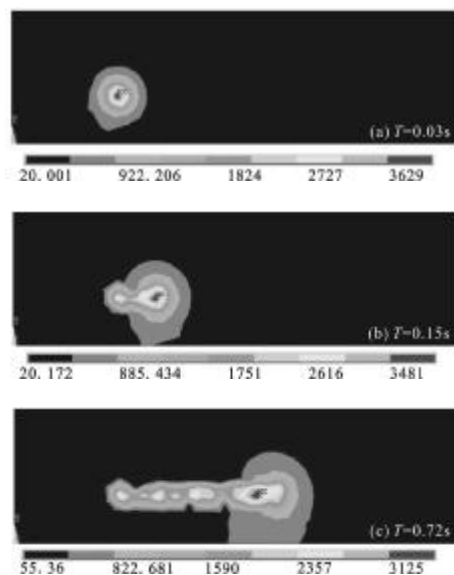


图 3 不同时刻温度场分布云图

Fig.3 Temperature field distribution chart in different time

(2) 温度场随时间的变化规律分析

图 4 为铣削件表面某点的温度变化曲线, 该图说明在激光光斑尚未达到前, 由于材料本身的热传导而导致尚未铣削部分产生预热, 该点的温度较之前有所升高; 当激光到达该点时, 温度在短时间内达到最大值, 而激光离开该点之后, 工件通过热传导方式散热冷却, 此外还通过工件的表面与空气对流和辐射进行散热冷却, 温度急剧地下降, 充分的体现了激光铣削急剧加热和冷却的特点。

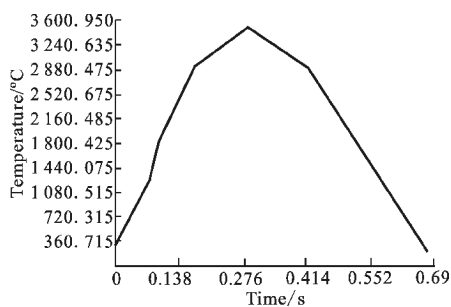


图 4 工件表面上一点温度变化图

Fig. 4 Temperature change of some point in work-piece surface

(3) 温度场对铣削层宽度和深度的影响

图 5 是 0.45 s 时刻铣削件上沿路径 1 和路径 2

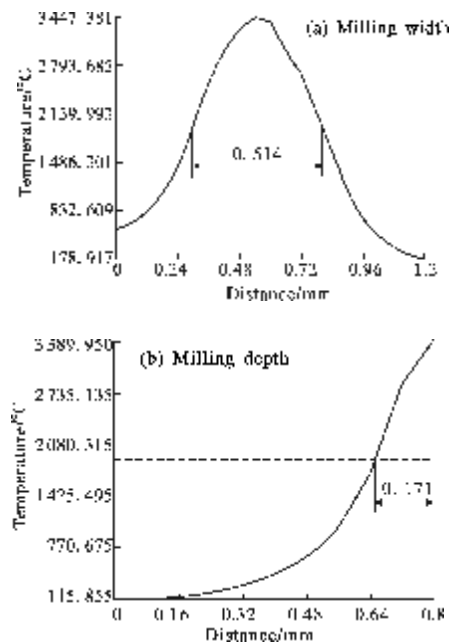


图 5 在某一时刻沿铣削宽度和深度方向的温度曲线图

Fig. 5 Temperature diagram along direction of milling width and depth in some time

的温度曲线图。路径 1 为铣削完成后样件上表面过铣削中心垂直于扫描方向上一水平线段, 用来查看铣削宽度; 路径 2 是铣削完成时刻模型纵切面上过熔池中心的一条竖直线段, 用来查看铣削深度。从图(a)可以看出陶瓷材料熔点以上的区间大小为 0.514 mm, 即铣削层宽度为 0.514 mm。同理, 由图(b)的节点温度可知, 铣削深度为 0.171mm。

3 实验与结果分析

3.1 实验验证方法的提出

有限元模拟结果正确与否, 需要有一定的实验去验证和支撑。对于温度场模拟的直接验证是通过测出铣削过程中温度场某些点的温度曲线, 然后与模拟结果来进行比对, 此种方法对设备的要求较高, 一般情况下实现起来较为繁琐。而激光铣削温度场模拟的最终目的是为了控制铣削层质量, 因此, 文中利用铣削层深度和铣削层宽度来间接验证温度场模拟的准确性, 此种方法不但简单, 并且操作方便。

3.2 激光铣削实验与结果分析

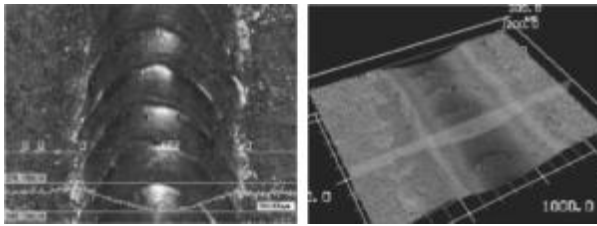
利用前面模拟中所使用的激光工艺参数进行激光铣削实验, 采用 Nd:YAG 多模激光器对纯度是 99% 以上的 Al_2O_3 陶瓷材料进行单层单道铣削加工。样件尺寸 50mm×50mm×5mm。铣削结束后采用 VHX-600 型超景深 3D 显微系统测量铣削件的深度与宽度。

图 6 为激光功率 100W、扫描速度为 200mm/min、光斑直径为 0.8 mm 时铣削单道单层形貌, 为了更加准确地测得样件铣削层的宽度和深度, 利用超景深显微镜对铣削后的样件进行测量。图 7 为测量的铣削宽度和深度。以同样的激光铣削方式, 变化不同的工艺参数进行测试, 并把获得的实验数据记录下来。



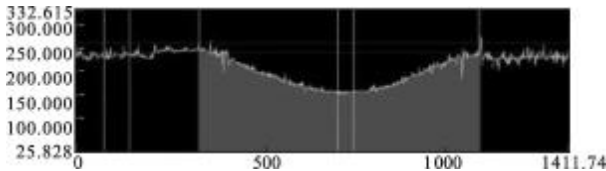
图 6 单层单道激光铣削形貌

Fig. 6 Laser milling morphology of single layer and passage



(a) 实际工件测量区域

(a) Measurement area of actual sample



(b) VHX-600 型显微系统扫描工件成像图

(b) Sample figure scanning by the VHX-600 microscopic system

Profile	Horz. Dist	Hight diff.	Host ave.	Angle	C.S. length	C.S. area	R	Comment
All	1411.740um	7.162um	211.489um	0.291	4.831.665um	260.947.932		
Seq.1		-79.390um						
Seq.2	798.521um	20.645um	193.269um	1.481	2.354.686um	132.989.426		
Seq.3								
Seq.4								
Seq.5								
Seq.6								
Seq.7								
Seq.8								
Seq.9								
Seq.10								
Total	798.521um	-58.745um	193.269um	1.481*	2.354.686um	132.989.426		
Max.	798.521um	20.645um	193.269um	1.481*	2.354.686um	132.989.426		
Min.	798.521um	-79.390um	193.269um	1.481*	2.354.686um	132.989.426		
Ave.	798.521um	-29.372um	193.269um	1.481*	2.354.686um	132.989.426		
Std.DV	0.000um	50.017um	0.000um	0.000*	0.000um	0.000um ²		
3sigma	0.000um	150.052um	0.000um	0.000*	0.000um	0.000um ²		

(c) 测量结果

(c) Measurement results

图 7 激光铣削层宽度和深度的显微测量

Fig.7 Microscopic measurement of laser milling width and depth

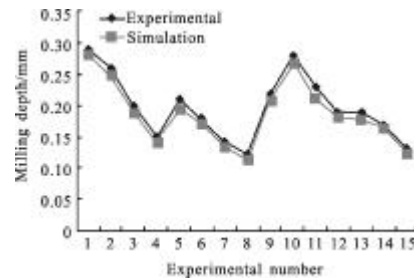
3.3 实验结果与模拟结果对比分析

表 2 是分别利用温度场模拟方法和激光铣削实验测量结果与温度场模拟结果的比较

Tab.2 Contrast of experimental results with simulation results

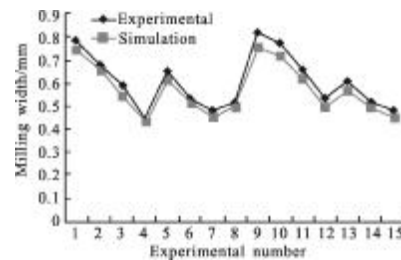
No.	X_1	X_2	X_3	D_1	D_2	W_1	W_2
1	110	300	0.8	0.29	0.283	0.79	0.754
2	100	300	0.8	0.26	0.148	0.68	0.659
3	90	300	0.8	0.2	0.187	0.59	0.549
4	80	300	0.8	0.15	0.141	0.45	0.436
5	110	200	0.4	0.21	0.196	0.65	0.619
6	100	200	0.4	0.18	0.171	0.54	0.514
7	90	200	0.4	0.14	0.135	0.48	0.453
8	80	200	0.4	0.12	0.115	0.52	0.497
9	110	250	0.8	0.22	0.209	0.82	0.757
10	100	250	0.8	0.28	0.269	0.78	0.723
11	90	250	0.8	0.23	0.211	0.66	0.623
12	80	250	0.8	0.19	0.181	0.54	0.501
13	110	350	0.4	0.19	0.179	0.61	0.573
14	100	350	0.4	0.17	0.165	0.52	0.501
15	90	350	0.4	0.13	0.124	0.48	0.455

验方法获得的铣削层宽度和深度值,其中, X_1 为激光功率(单位:W); X_2 为激光扫描速度(单位:mm/min); X_3 为光斑直径(单位:mm); D_1 和 D_2 分别代表实验测得的和模拟获得的铣削层深度(单位:mm); W_1 和 W_2 分别代表实验测得的和模拟获得的铣削层宽度(单位:mm)。图 8 是模拟值和实验值的关系,从图中可以看出,温度场模拟后获得的铣削层宽度和深度与实验测得的铣削层宽度和深度很接近,误差较小,说明所建立的温度场模型是正确和可靠的。



(a) 深度关系

(a) Depth relation



(b) 宽度关系

(b) Width relation

图 8 实验值与模拟值关系

Fig.8 Relation between sample value and simulation value

4 结论

通过上述分析,可以得出以下结论:

(1) 利用 ANSYS 软件建立了单层单道铣削的三维有限元模型,借助 APDL 语言实现了载荷的动态加载,并利用生死单元实现了激光铣削温度场的动态变化过程,模拟结果表明,材料表面某一点的温度场变化是一个急剧加热和急剧冷却的过程,与实际的铣削过程相吻合。

(2) 利用间接方法验证了激光铣削温度场模拟结果的合理性,通过将激光铣削后获得的铣削层宽度和深度与同一参数下实验获得的铣削宽度和深度值进行比较,结果发现二者误差较小,说明所建立的有

限元温度场三维模型可以获得较好的铣削层质量。

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, 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)
- [3] 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)
- [4] Zhu Yinbo. Experimental and simulation study of pulsed laser milling on ceramic materials [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- [5] Zhou Yu, Lei Tingquan. *Ceramic Materials Science*[M]. Beijing: Science Press, 2004: 319-335. (in Chinese)
- [6] Li Junchang. *Diffraction and Thermal Effect Calculation of Laser* [M]. Beijing: Science Press, 2008: 306-311. (in Chinese)
- [7] Chwan-Huei Tsai, Hong-Wen Chen. Laser milling of cavity in ceramic substrate by fracture-machining element technique [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 136 (1-3): 158-165.
- [8] Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Experimental study of laser milling Al_2O_3 ceramics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30 (5): 467-470. (in Chinese)