

激光辅助切削 SiCp/Al 复合材料刀具温度的数值分析

孙少毅¹ 孟繁昊² 张健维¹ 许贯全¹

1.苏州迈智诺智能装备科技有限公司; 2.长春工业大学 机电工程学院

DOI:10.12238/jpm.v4i7.6141

[摘要] 为了解决激光辅助切削 SiCp/Al 复合材料时刀具温度问题, 本文对激光辅助切削 SiCp/Al 复合材料进行数值和实验分析, 通过 Python 语言建立圆形颗粒随机分布的 SiCp/Al 复合材料模型, 并结合 VDFLUX 子程序建立脉冲激光热源子程序, 利用数值分析软件对激光辅助切削 SiCp/Al 复合材料过程中刀具温升情况进行分析。通过数值模拟分析的方法分析激光功率、切削深度和切削速度对刀具温度随时间变化的规律, 结果表明, 在切削实验进行前可以采取先仿真后试验的方法得到合适的加工参数, 从而达到在获得较高表面质量的同时减少刀具磨损。

[关键词] SiCp/Al 复合材料 激光辅助切削 数值模拟分析 刀具温度

Numerical analysis of the tool temperature of laser-assisted cutting SiCp / Al composite

Sun Shaoyi 1, Meng Fanhao 2, Zhang Jianwei 1, Xu guanquan 1

1. Suzhou Mazhuo Intelligent Equipment Technology Co., LTD. Jiangsu Kunshan 215316

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Jilin Changchun 130012

[Abstract] In order to solve the tool temperature problem of laser-assisted cutting SiCp / Al composite, this paper conducts numerical and experimental analysis of laser-assisted cutting SiCp / Al composite, establishes the SiCp / Al composite model with random distribution of circular particles through Python language, and establishes the pulse laser heat source subprogram combined with VDFLUX subroutine, and analyzes the tool temperature rise of laser-assisted cutting SiCp / Al composite by using numerical analysis software. Through the numerical simulation analysis, the rule of the cutting temperature over time, the appropriate processing parameters can be obtained before the cutting experiment, so as to achieve the higher surface quality while reducing the cutting wear.

[Key words] SiCp / Al composite laser-assisted cutting, numerical simulation and analysis of tool temperature

1 介绍

随着科技的不断进步, 人们对材料的要求也越来越高。新技术的出现往往伴随着对材料特性提出新的要求, 例如对材料的物理性能和化学性能等。其中由金属基体和强化材料组成的金属基复合材料因其具有高强度、高耐磨性、高耐久性等优点, 是目前各个领域众多学者们所关注的新材料。

SiCp/Al 复合材料由于其具有密度低、重量轻、比强度及比模量高、尺寸稳定性优异、热稳定性好等优点, 使其成为航空航天、光学元器件和汽车等领域的关键材料, 不可替代^[1]。

相较于传统的实验方法, 数值模拟分析的方法能够准确得到切削实验中难以获取的数据, 进而为实际加工提供理论指导。为了让 SiCp/Al 复合材料在切削仿真工程中的结果与实验结果相近, 必须选择正确的数值模拟分析模型。

王志达利用数值分析软件建立 45% 的 SiCp/Al 复合材料切削仿真模型实验结果表明, SiCp/Al 复合材料在激光辅助切削

过程中应力值有所减小, 能够有效改善表面粗糙度, 减少表面形貌缺陷, 同时降低刀具磨损^[1]。Pengfei Pan 等人对熔融石英材料进行激光辅助切削分析。运用数值分析软件进行建模, 并分析激光辅助切削熔融石英材料的最佳切削参数和刀具的温度分布^[3,4]。Yung C. Shin 等人对激光辅助切削 Ti6Al4V/TiC 复合材料进行等效均质模型和多尺度异质模型并分别进行数值仿真分析, 并与实验结果进行对比。实验结果表明, 激光辅助切削 Ti6Al4V/TiC 复合材料使用异质模型更加贴合实际^[5]。本文针对激光辅助切削 SiCp/Al 复合材料的切削温度特性, 基于“数值模拟分析-实验研究分析”相结合的方法, 利用数值分析软件, 建立二维激光辅助切削 SiCp/Al 复合材料仿真模型。结合实验对比分析激光功率、切削速度和切削深度对刀具温度随时间的变化规律。

2 数值模型

激光辅助切削的数值模拟分析分两步进行: 激光热源的热

仿真和耦合热机械切削仿真。两个步骤依次偶联。首先进行热建模以获得由于移动激光热源而在工件中的温度分布。然后，将前面分析得到的温度场作为切削模拟的初始条件，完成激光辅助切削数值模拟。

激光辅助切削实验被投射到数值模拟分析中，如图1所示。图1(a)表示工作材料和工具设置的实体模型，图1(b)表示用于数值模拟分析对应正交模型。

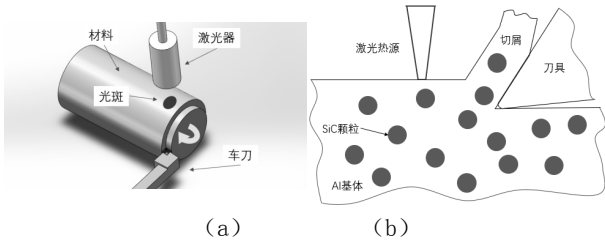


图1 实验与数值模拟方法关系示意图

2.1 激光热源建模

运用Fortran语言建立了一个可以用于二维平面脉冲移动高斯热源的VDFLUX子程序。程序首先定义了一些常量和变量，如激光功率，光斑半径，吸收率等。接着，程序通过循环遍历所有的积分点，计算并更新每个积分点的热流密度。在这个循环过程中，程序首先获取当前积分点的坐标，然后通过内层循环计算当前积分点处的热流密度。内层循环根据当前时间和指定的脉冲频率f来确定当前的热源位置，进而计算积分点处的热流密度，加载结果如图2所示。

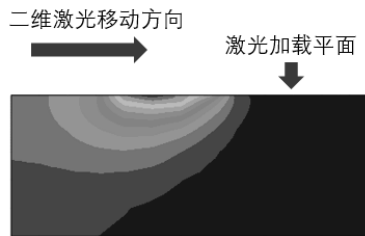


图2 移动高斯热源子程序

2.2 材料本构模型

金属基体的材料的构模型需要考虑多种复杂的材料行为，对Al基体选用J-C本构模型描述^[6]。Al基体的Johnson-Cook本构模型参数可以通过霍普金森压杆实验获得，本构模型参数和材料断裂准则失效参数具体值如表1和表2所示^[7]。

表1 Al基体的Johnson-Cook本构模型参数

材料	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	T _m
Al2024	352	440	0.42	0.083	1	520 °C

表2 Al基体材料断裂准则失效参数

d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
0.13	0.13	-1.5	0.011	0

3 数值分析过程

为了分析激光辅助切削SiCp/Al复合材料过程中，刀具的温度随时间的变化规律，在刀具上选取了节点单元为测量点进行结果输出，通过调整激光功率、切削深度和切削速度对刀具

的温度随时间的变化进行分析，得到节点在切削过程中的温度变化规律，刀具选取节点如图3所示。

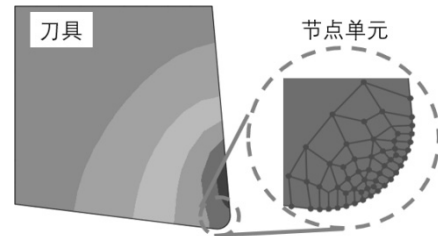


图3 刀具上选取的节点

保持切削深度0.04mm和切削速度250mm/s不变，选取激光功率分别为40W、50W和60W以分析不同激光功率下刀具的切削温度的变化规律，切削过程的温度云图如图4所示，通过后处理得到刀具温度数据如图5所示。从分析结果可以得知，在整个切削过程中，刀具的温度随着时间的变化呈现出总体缓慢上升的趋势，但由于复合材料中SiC颗粒的影响，导致切削过程中的温度有上下浮动。激光功率越高，刀具温升浮动变化减少，但总体温升增加。激光功率是影响刀具温度的最大因素。因为激光功率是激光辅助切削中产生高温的主要来源，功率越大，产生的热量就越多，切削材料温度也会随之升高。

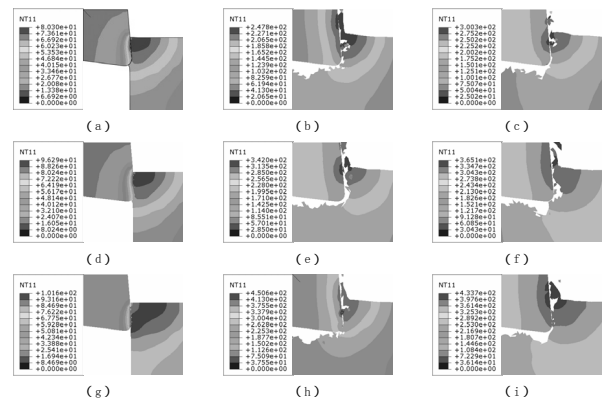


图4 不同激光功率下的切削仿真云图

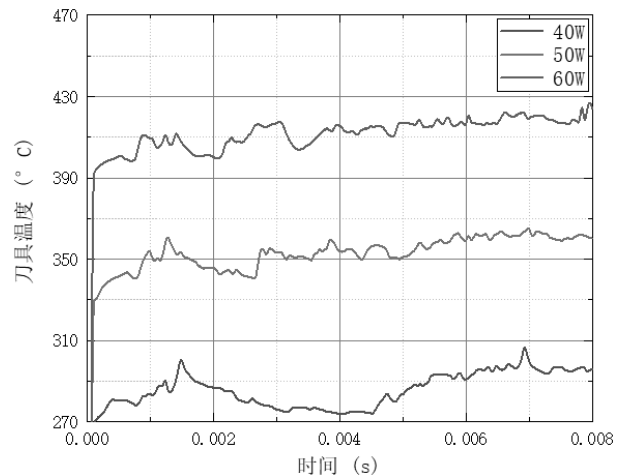


图5 刀具上节点随激光功率变化规律的切削温度

4 总结

本文利用数值模拟分析软件建立了二维激光辅助切削SiCp/Al复合材料数值模拟分析模型。结合实验对比分析激光

功率、切削速度和切削深度对刀具温度随时间的变化规律,得出的结论如下:

(1) 采用 Python 软件对 SiCp/Al 复合材料进行建模,使用数值模拟分析软件进行温度-位移耦合分析。综合考虑金属基体、增强颗粒不同材料属性,Al 基体选择传统 J-C 本构模型、SiC 颗粒脆性材料选择 JH2 本构模型,并在材料表面添加移动脉冲高斯热源以构建切削模型。

(2) 分析了激光辅助切削 SiCp/Al 复合材料过程中,刀具的温度随时间的变化规律,在刀具上选取了节点为测量点进行结果输出,得到了激光功率、切削深度和切削速度对刀具温度影响的基本情况。激光功率的提高会导致刀具在切削过程中的温升浮动变化减少,但刀具总体温升增加;切削速度的提高会导致切削区域的热量积累,刀具在切削过程中的温升浮动变化增加;切削深度的增加也会使刀具在切削过程中的温升浮动变化增加,但刀具温升增加较低。

[参考文献]

[1]李震,侯守明.碳化硅增强铝基复合材料切削加工研究进展[J].工具技术,2017,51(01):9-13.

[2]王志达,翟昌大,于朋等.铝基碳化硅激光辅助微切削仿

真及实验研究[J].组合机床与自动化加工技术,2020,No.560(10):59-63.

[3]Pengfei Pan, Huawei Song, Zuohui Yang, et al. Thermal Field Modeling and Experimental Analysis in Laser-Assisted Machining of Fused Silica[J]. Silicon, 2020, 1-14.

[4]Guoqi Ren, Huawei Song, Jinqi Dan, et al. Thermal analysis and machinability for laser-assisted machining of fused silica[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148: 119078.

[5]Elkhateeb Mohamed G, Shin Yung C. Investigation of the Machining Behavior of Ti6Al4V/TiC Composites During Conventional and Laser-Assisted Machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2019, 141(5): 051001.

[6]Lin J, Wang C, Lu M, Zhou J, Zhao S, Liu Y. Modeling and investigation of cutting force for SiCp/Al composites during ultrasonic vibration-assisted turning. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2022;236(3):1013-1022.