文章编号:1001-5078(2020)01-0013-04　　·激光应用技术·

连续激光辅助热加工氧化铝陶瓷热效应分析

李　隆[1,2],薛　彪[1],张春玲[1,2],耿鹰鸽[1],潘晓瑞[1],张秋娟[1]
(1. 西安建筑科技大学理学院物理系,陕西 西安 710055;2. 西安建筑科技大学应用物理研究所,陕西西安 710055)

摘　要:陶瓷材料的性能优越,其加工难度主要表现在加工硬度和加工脆性上,激光辅助热加工陶瓷材料能够有效避免加工时产生表面裂纹。本文采用半解析的方法对于激光加热氧化铝陶瓷材料时的温度变化进行了模拟,分析了不同方向上温度的变化情况,得出了温度场的分布;根据氧化铝陶瓷温度达到 1000 K 时即可达到软化效果的理论,探讨了不同参数时温度场的分布,以达到较好的软化效果。研究表明,通过对温度场的计算模拟,选取合适的激光参数对不同尺寸的材料进行软化加工,能够有效且高效的达到切割氧化铝硬性材料的工艺要求。

关键词:激光加工;温度场;半解析法;氧化铝陶瓷
中图分类号:O434.14;TN249　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.01.003

Thermal effect analysis of continuous laser assisted hot machining alumina ceramics

LI Long[1,2], XUE Biao[1], ZHANG Chun-ling[1,2], GENG Ying-ge[1], PAN Xiao-rui[1], ZHANG Qiu-juan[1]
(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;
2. Institute for Applied Physics, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The performance of ceramic materials is superior, and the difficulty of processing is mainly reflected in the hardness and brittleness of processing. Laser-assisted thermal machining of ceramic materials can effectively avoid surface cracks during processing. In the paper, the semi-analytical method is used to simulate the temperature of alumina ceramic material which heated by laser, the variation of temperature in different directions is analyzed, and the distribution of temperature fieldis obtained. According to the theory of softening effect of alumina ceramics when the temperature reaches 1000 K, the distribution of temperature field with different parameters is discussed, and then the better-softening effect is achieved. The results show that, through the calculation and simulation of the temperature field, selecting suitable laser parameters to soften materials of different sizes can effectively and efficiently meet the technical requirements for cutting rigid alumina materials.

Keywords: laser processing; temperature field; semi-analytical method; alumina ceramics

1　引　言

氧化铝陶瓷是世界上应用非常最广泛、产量相当大的陶瓷材料之一。其具有高强度、耐冲击、耐磨、热稳定性好、介电损耗小、生物相容性好等优异性能可被应用于刀具、磨轮轴承等机械加工领域以及电真器件的制作[1-3]。但是,由于氧化铝陶瓷材料共价键结合的特点,导致该材料硬度比较高、脆性相对较大。致使氧化铝陶瓷材料在传统的切削和研磨加工过程中刀具磨损严重、加工质量差,并且表面比较容易产生划痕、微裂纹、气孔以及残余应力等缺

作者简介:李　隆(1972-),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事激光技术及其应用方面的研究。E-mail:lilong7211@126.com
通讯作者:薛　彪(1994-),男,硕士研究生,主要从事激光技术及其应用方面的研究。E-mail:biao_xue@163.com
收稿日期:2019-06-18

陷[4-5]。激光加热辅助切削加工与传统的常规采用刀具进行切削加工相比,可以很大程度地解决硬度大、脆性大的难加工材料在加工过程中遇到的困难[6-7]。目前对于材料内部温度场的研究大多采用的是数值模拟及仿真的方法。本文采用半解析的方法,分析材料的温度场,并分析激光功率和光斑半径对温度场的影响,总结一般规律。

2 模型建立

2.1 材料介绍

普通氧化铝陶瓷根据 Al_2O_3 含量不同可分为 75 瓷、80 瓷、85 瓷、90 瓷、92 瓷、95 瓷、99 瓷等品种。本文采用 Al_2O_3 质量分数为 99 % 的陶瓷,即 99 瓷。这种陶瓷主要应用于高温坩埚、耐火炉管以及耐磨材料的制作,其主要性能参数为:比热容 $c_p = 0.85$ J/(kg · K),密度 $\rho = 3920$ kg/m^3,熔点 2300 K,沸点 3500 K。[8]

激光加热氧化铝陶瓷工件模型如图 1 所示,尺寸选取为 $a = 10$ mm,$b = 10$ mm,$c = 20$ mm。调节激光的最小束腰到工件端面的表面,此时激光能量在激光器出口与材料表面之间传输时有较少的损耗。根据文献[6],当氧化铝陶瓷材料的工件经过激光加热后其温度上升到 1000 K 以上,未达到材料的熔化阈值时,将会使得材料需要切削的区域出现均匀软化,是较为理想切削加工温度。

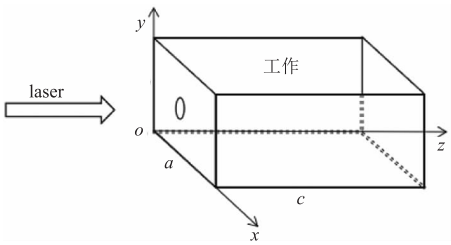

图 1 激光加工氧化铝陶瓷工件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of alumina ceramic work piece processed by laser

2.2 基本假设

本文通过半解析法建立氧化铝陶瓷温度场分布的数学公式模型,由于实际的影响因素较多且较为复杂,建立模型的难度很大,需要进行合理简化,则简化时需要提出的基本假设为:

a. 氧化铝陶瓷材料是均匀的并且为各向同性材料。

b. 将材料吸收的激光辐射能假设为其表层内部的热源[9]。

c. 在激光加热过程中,假设材料的光学和热力学参数(包括:密度、比热容、导热系数、熔点、沸点等)稳定不会变化[10]。

2.3 热源

激光能量较高同时较为集中,且穿透能力强。其分布呈现为高斯型,称为基模。其功率密度分布可表示为:

$$I(x,y,z) = I_0 e^{-2\left[\frac{(x-a/2)^2+(y-b/2)^2}{\omega^2}\right]} e^{-\beta z} \tag{1}$$

其中,β 表示为材料对光的吸收系数;99 瓷对光的吸收系数是 0.95[6]。其中 $I_0 = \dfrac{2P}{\pi\omega^2}$;$P$ 为激光光功率;ω 为光斑束腰半径。

认为热源是稳定的,不随时间变化,则热源可以表示为:

$$\begin{aligned} q(x,y,z) &= \eta\beta I(x,y,z) \\ &= \eta\beta I_0 e^{-2\left[\frac{(x-a/2)^2+(y-b/2)^2}{\omega^2}\right]^k} e^{-\beta z} \end{aligned} \tag{2}$$

式中,η 为吸收率,当入射角为 0°时,Al_2O_3 陶瓷对二氧化碳激光器输出的激光的吸收率为 75 % 左右。

2.4 热传导

根据热传导相关理论知识,内部含有热源的热传导方程为:

$$K\left(\frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (x,y,z,t)}{\partial z^2}\right) + q(x,y,z) = \rho C_p \frac{\partial u(x,y,z,t)}{\partial t} \tag{3}$$

其中,K 为导热系数,取 25 W · m^{-1} · K^{-1}。

在 $t = 0$ 时,工件各处温度均为 $u_0 = 300$ K,则初始条件为:

$$u(x,y,z,t)\big|_{t=0} = u_0 \tag{4}$$

边界条件为:

$$\begin{cases} u(x,y,z)\big|_{x=0} = u_0 & u(x,y,z)\big|_{x=a} = u_0 \\ u(x,y,z)\big|_{y=0} = u_0 & u(x,y,z)\big|_{y=b} = u_0 \\ \left.\dfrac{\partial u(x,y,z)}{\partial z}\right|_{z=0} = 0 & \left.\dfrac{\partial u(x,y,z)}{\partial z}\right|_{z=c} = 0 \end{cases} \tag{5}$$

2.5 温度场的解析表达式

根据初始条件和边界条件,采用半解析的方法,可设得陶瓷内部温度分布的为三角函数形式的叠加,其基本形式可以表示为:

$$u(x,y,z,t) = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{l=0}^{\infty} A_{nml}\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\cos\left(\frac{l\pi}{c}z\right) + u_0 \tag{6}$$

其中,A_{nml} 为待定系数。

将含有待定系数的温度分布表达式带入内部含有热源的热传导方程式(3)中,可得:

$$\frac{dA_{mnl}(t)}{dt} = -C_1 A_{mnl}(t) + C_2 \tag{7}$$

其中,

$$C_1 = \frac{K}{\rho C_P}\left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{c}\right)^2\right] \tag{8}$$

$$C_2 = \frac{8\beta^2\eta I_0 c\left[1 - e^{-c\beta}\cos(l\pi)\right]}{ab\rho C_P(l^2\pi^2 + c^2\beta^2)} \cdot$$

$$\int_0^a\int_0^b e^{-2\left[\frac{(x-a/2)^2+(y-b/2)^2}{\omega^2}\right]^k} \cdot \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)dxdy \tag{9}$$

根据待定系数所在的方程(7)为非齐次一阶常系数微分方程。带入初始条件,求得待定系数的通解为:

$$A_{nml} = \frac{C_2}{C_1}(1 - e^{-C_1 t}) \tag{10}$$

稳定时温度场的分布为:

$$u(x,y,z,t) = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{l=0}^{\infty}\frac{C_2}{C_1}(1 - e^{-C_1 t}) \cdot$$

$$\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\cos\left(\frac{l\pi}{c}z\right) + u_0 \tag{11}$$

3　温度场

选用频率范围为0～100 kHz,波长为355 nm的紫外激光器对材料进行辅助热加工[8]。基于mathematics软件,仿真模拟出温度分布。

激光照射材料端面上与激光的中心轴与x轴形成的纵截面上的温度分布情况如图2所示。激光直接作用端面上,中心区域温度在短时间内迅速升高,与周围的材料形成温度差,中心区域的能量流向周围。由图2可知材料内部的温度分布呈现出在激光中心轴线上表面处温度最高,距离中心和材料表面越远,温度开始降低较快,之后逐渐平稳。最终边界处温度接近于环境温度。

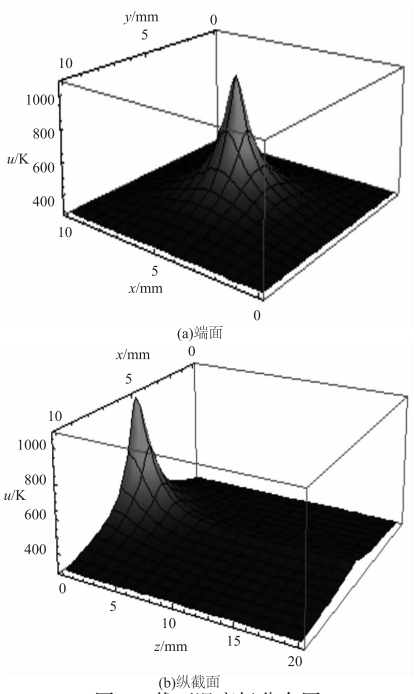

图2　截面温度场分布图

Fig. 2 Temperature distribution map of section

选取不同参数(如:激光功率、束腰半径)的激光对材料进行热加工时,对材料的温度分布均有影响。因此分析其对材料温度场的影响是有必要的。

固定束腰半径为0.5 mm,采用功率分别为80 W、100 W、120 W、140 W的激光,经过仿真得到的表面材料受激光照射的表面端面x轴和其沿着z轴(中心轴线上)的温度分布如图3所示,其最高温度分别为917.1 K、1071.4 K、1225.7 K、1379.9 K。激光功率增大时,最高温度升高,软化范围增大。

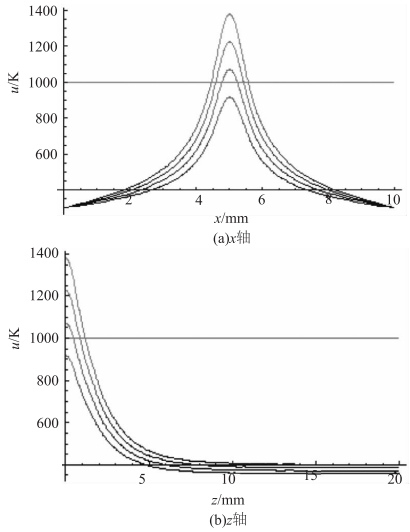

图3　不同功率时温度分布

Fig. 3 Temperature distribution at different power

固定功率为100 W,采用束腰半径为0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.6 mm的激光,的温度分布如图4所示,其最高温度分别为1238.5 K、1149.6 K、1071.4 K、1005.6 K。束腰半径增大时,最高温度升高,软化范围增大。

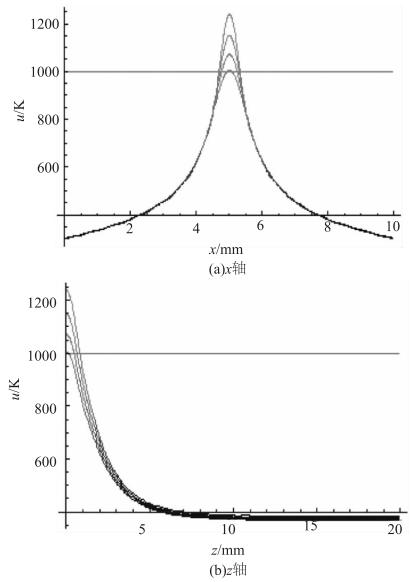

图4　不同束腰半径时温度分布

Fig. 4 Temperature Distribution with different waist Radius

综上,为了使得氧化铝材料软化且软化区域足够达到需求,当采用功率为 100 W,束腰半径为 0.4 mm的激光进行加工时,可得其最高温度为 1149.6 K,达到软化温度且保证了软化区域。此时参数选取较为合理。与文献[7]所述的使得激光辅助热切削氧化铝陶瓷材料时温度要求相符,并且保证了切削区域。

4 结 论

(1)采用半解析法求解出了激光加热长方体氧化铝陶瓷材料的温度场一般表达式,且仿真得到了不同激光参数时的温度场。对于该工件当采用束腰半径为 0.4 mm,激光功率为 100 W 的激光照射对工件辅助热加工后再采用传统刀具进行切削较为理想。

(2)针对于不同尺寸的材料,给出了采用半解析法求解出温度一般表达式和模拟仿真得到温度场的方法。根据不同的加工需求,可以获得合理调节激光器的参数以达到高效加工的目的。

参考文献:

[1] YU Feng, CHEN Jing, ZHAO Peijun, et al. Study on the development trend of Chinese alumina ceramics based on patent analysis[J]. China Ceramics, 2018, 54(7): 62 – 67. (in Chinese)
余峰,陈婧,赵培钧. 基于专利分析的中国氧化铝陶瓷材料技术发展趋势研究[J]. 中国陶瓷,2018,54(7):62 – 67.

[2] LU Zhihua, LI Chengshun, MA Yudong, et al. Research progress of preparation techniques of porous alumina ceramics [J]. China Ceramics, 2018, 54(2): 1 – 7. (in Chinese)
卢志华,李呈顺,马育栋. 多孔氧化铝陶瓷制备技术研究进展[J]. 中国陶瓷,2018,54(2):1 – 7.

[3] ZHONG Wei, ZOU Guijuan. Modeling and simulation of temperature field in Al_2O_3 ceramic metallization[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36 (6): 718 – 722. (in Chinese)
钟伟,邹桂娟. 氧化铝陶瓷金属化层温度分析研究[J]. 真空科学与技术学报,2016,36(6):718 – 722.

[4] Ding H, Shin Y C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis(Article)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(1): 106 – 114.

[5] ZHANG Zheng, CHEN Xiaoxiao, LI Dexin, et al. Study on laser preparation of groove surface micro texture of engineering ceramics[J]. Applied Laser, 2018, 38(1): 64 – 69. (in Chinese)
张正,陈晓晓,李德鑫,等. 工程陶瓷凹槽型表面微织构激光制备工艺研究[J]. 应用激光,2018,38(1):64 – 69.

[6] LIU Weiqiao, YAN Cuo, XIE Linchun, et al. Research on parameter selection of pulsed laser assisted machining of alumina ceramics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41 (7): 78 – 83. (in Chinese)
刘为桥,鄢锉,谢林春,等. 脉冲激光辅助切削氧化铝陶瓷工艺参数选取的研究[J]. 中国激光,2014,41(7):78 – 83.

[7] ZHANG Yingxin, AN Libao. Research progress on laser assisted machining[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(2): 77 – 85. (in Chinese)
张迎信,安立宝. 激光加热辅助切削加工技术研究进展[J]. 航空材料学报,2018,38(2):77 – 85.

[8] HUA Xiangan, WEI Xin, ZHOU Min, et al. Simulation analysis of 355 nm UV laser polishing alumina ceramic temperature field and stress field[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014, 12(12): 159 – 162, 165. (in Chinese)
华显刚,魏昕,周敏,等. 355 nm 紫外激光加工 Al_2O_3 陶瓷的温度场和应力场仿真分析[J]. 机械设计与制造,2014,12(12):159 – 162,165.

[9] YAN Cuo, LI Lijun, JIN Xiangzhong, et al. Temperature field distribution and cutting depth during laser-assisted machining of hot-sintered Al_2O_3 ceramics[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(2): 66 – 71. (in Chinese)
鄢锉,李力钧,金湘中,等. Al_2O_3 热压陶瓷激光辅助切削温度场分布与切削深度[J]. 中国有色金属学报,2008,18(2):66 – 71.

[10] LI Long, LIU Xiaojian, NIE Jianping, et al. Thermal effect of intra-cavity frequency doubling KTP crystal in all-solid-state multi-mode green laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 830 – 834. (in Chinese)
李隆,刘小建,聂建萍,等. 全固态多模绿光激光器腔内倍频 KTP 晶体热效应[J]. 红外与激光工程,2011,40(5):830 – 834.