

Al₂O₃陶瓷激光铣削数值模拟与试验*

黄舒 周建忠 盛杰 朱银波

(江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 基于 ANSYS 有限元分析软件建立 Al₂O₃ 陶瓷激光铣削模型,利用 APDL 语言对激光铣削过程中的温度场动态分布进行模拟,分析激光功率和扫描速度对铣削宽度和铣削深度的影响,并进行激光铣削试验。结果表明:数值模拟所得的铣削宽度和深度与试验结果一致性较好,所建立的有限元模型可以较为准确地预测 Al₂O₃ 陶瓷激光铣削效果。激光铣削宽度和深度随激光功率的增大而增大,随扫描速度的增大而减小,且较扫描速度而言,激光功率对铣削效果的影响更为显著。

关键词: Al₂O₃陶瓷 激光铣削 数值模拟 试验

中图分类号: TG665 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0229-06

Numerical Simulation and Experiment on Laser Milling of Al₂O₃ Ceramic

Huang Shu Zhou Jianzhong Sheng Jie Zhu Yinbo

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

A model of laser milling on Al₂O₃ eramic was established based on ANSYS finite element software. Laser milling process was analyzed by APDL code, and the dynamic distribution of the temperature field during the milling process was studied. The influence of the laser power and scanning velocity on the milling width and depth were investigated. According to the numerical simulation, the relevant parameters were used in the laser milling experiment. It indicated that the numerical simulation results were consistent with the experiment, the effect of laser milling on Al₂O₃ ceramic could be accurately predicted by the established model. The width and depth of laser milling were increased by laser power and decreased by the scanning velocity. Compared with the scanning velocity, laser power had more important influence on laser milling.

Key words Al₂O₃ ceramic, Laser milling, Numerical simulation, Experiment

引言

Al₂O₃ 陶瓷材料具有优异的绝缘、耐高温、抗腐蚀、耐磨损性能。但是由于其脆性大,采用传统加工方法很难进行高精度、高效率加工。激光铣削是利用聚焦的高能激光束作用在材料表面,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基体,完成三维成形的加工方法,故其具有避免刀具磨损、成形效率高等优点。

目前国内外学者对 Al₂O₃ 陶瓷的激光铣削工艺已进行了一些研究^[1~3],上述研究多是根据对加工后工件铣削深度和表面粗糙度测量结果或根据试验经验来选择加工参数,由于各个工艺参数对铣削效果会产生交互影响,采用试验分析工艺参数对激光铣削效果的影响颇为费力且成本较高。本文基于 ANSYS 有限元分析软件对基础的单层单道铣削过程进行温度场模拟,分析激光功率和扫描速度对铣削效果的影响,并将模拟结果与试验结果进行对比。

收稿日期: 2010-08-19 修回日期: 2010-09-03

* 江苏省 2008“青蓝工程”项目和 2009 年江苏大学国家级试验教学研究示范中心实践教学研究资助项目(ZXJG2009002, ZXJG2009009)

作者简介: 黄舒,讲师,主要从事激光加工和材料改性研究,E-mail: huangshu5188@163.com

1 激光铣削有限元模型

1.1 模型描述

对于 Al₂O₃ 陶瓷激光铣削加工,单层单道铣削是面铣削加工的基础,将决定所选工艺参数下工件的铣削深度和铣削宽度,它的质量是整体成形质量的关键,也是优化工艺参数的基础。本文采用 ANSYS 有限元分析软件对 Al₂O₃ 陶瓷进行单层单道铣削模拟。模型总体尺寸为 10 mm × 1.7 mm × 1.5 mm,选用 Solid70 八面体六节点热单元划分网格,单元格尺寸为 0.1 mm × 0.1 mm × 0.1 mm,有限元模型如图 1 所示。

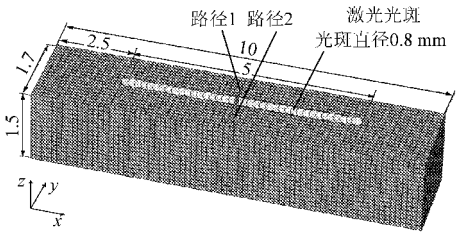


图 1 激光铣削有限元模型

Fig.1 Finite element model of laser milling

1.2 热物性参数

铣削材料选用纯度 99% 以上的 Al₂O₃ 陶瓷,由于脆性材料热力学参数随温度变化不大,模拟中不考虑温度对热物性参数及热辐射的影响。材料属性如表 1 所示^[4]。

表 1 Al₂O₃ 陶瓷热物性参数

Tab.1 Thermal parameters of Al₂O₃ ceramic

参数	密度 /kg·m ⁻³	熔点/℃	汽化温度 /℃	比热容 /J·(kg·K) ⁻¹	热传导率 /W·(m·K) ⁻¹	对流换热系数 /W·(m ² ·K) ⁻¹
数值	3 970	2 050	2 950	765	6. 27	14

1.3 热边界条件

激光铣削温度场分析属于典型的瞬态热传导问题,其热传导行为可以使用基于 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控制方程为^[5]

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

式中 c ——材料比热容 ρ ——材料密度
 k_e ——有效热传导率 t ——传热时间
 $T(x,y,z,t)$ ——温度场分布函数
初始条件为

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

边界条件为

$$-k_e \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} + h(T_s - T_E) = q_1 \tag{3}$$

式中 T_s ——模型表面温度
 T_E ——空间环境温度
 h ——对流换热系数
 q_1 ——材料表面对激光吸收能

1.4 移动热源的选择及实现

激光热源是实现激光铣削的前提条件。在铣削过程中激光能量以热流形式输送至基体,且热源在不同时刻按一定的速率移动。在激光铣削中一般认为激光的功率密度服从高斯分布^[6],即

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

其中 $d = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$
式中 $q(x,y)$ ——激光功率密度

P ——激光功率 ω ——激光光斑半径
 A ——材料对激光的吸收率
 d ——基体上任一点到光斑中心的距离

铣削温度场属于瞬态温度场,热源的运动模拟是利用 ANSYS/APDL 语言建立载荷的矩阵表格将空间域离散到时间域上,在不同时刻不同位置提供相应的热源载荷输入,并设定一定的时间步长,通过循环加载来处理。对于单道铣削,扫描方式为一直线,扫描长度为 5 mm。

2 模拟结果及分析

在激光铣削工艺中对成形质量影响较大的是激光功率和扫描速度,目前普遍认为随着激光功率的提高,铣削量随之增大,但激光功率过大时,铣削量增加呈饱和趋势,这是由于激光能量太高,在铣削面会产生大量不易清除的熔渣^[7],故模拟中选择功率范围为 60 ~ 110 W;同时,由于过高或过低的激光扫描速度会导致较小的陶瓷激光铣削量,综合考虑,模拟中选择 200、300、400、500 mm/min 4 种扫描速度。

(1) 激光功率对温度场的影响

图 2 为选择扫描速度 300 mm/min,离焦距4 mm 时,0.5 s 时刻不同功率下的温度分布云图,从图中可看出随着功率的增大,熔融区峰值温度上升,功率为 110 W 的峰值温度比 60 W 的增加了 82.4%,说明功率变化对峰值温度的影响较大。图 3 为 0.5 s 时刻不同功率下沿路径 1 和路径 2 的温度曲线图,图中 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 表示不同功率下熔融区宽度,即铣

削宽度; Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 表示不同功率下熔融深度。由图 3a 可以看出随着激光功率的增大,温度峰值上

升,单道铣削宽度随之增大,图 3b 显示随着功率的增大,铣削深度随之增加。

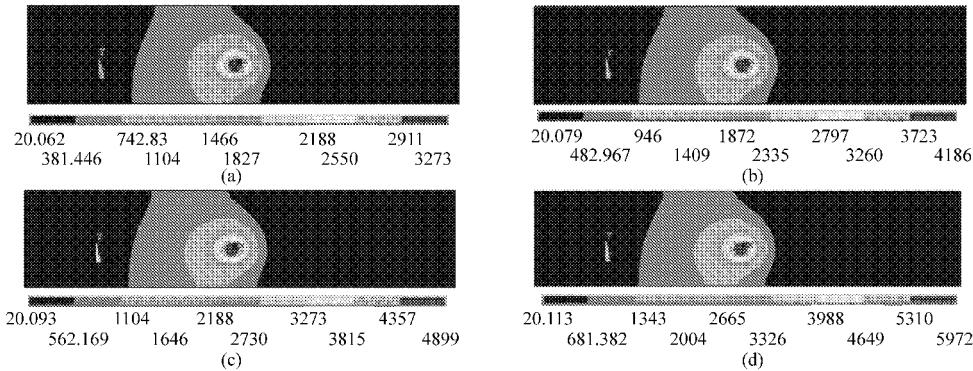


图 2 不同功率下的温度场分布

Fig. 2 Image of temperature field under different powers
(a) $P=60\text{ W}$ (b) $P=75\text{ W}$ (c) $P=90\text{ W}$ (d) $P=110\text{ W}$

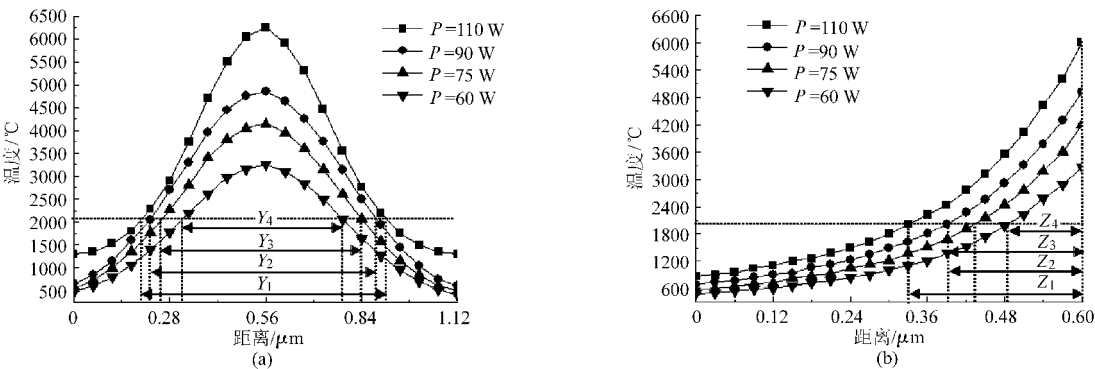


图 3 不同功率下沿路径 1 和路径 2 的温度曲线图

Fig. 3 Temperature curves along path 1 and path 2 under different powers
(a) 铣削宽度 (b) 铣削深度

(2)扫描速度对温度场的影响
同样,选择激光功率 90 W,离焦量 4 mm,分析 0.5 s 时刻不同扫描速度对温度场、铣削深度和铣削宽度的影响,图 4 为 0.5 s 时刻不同扫描速度下的温度场分布云图,从图中可看出随着扫描速度的增大,熔融区峰值温度降低,扫描速度为 500 mm/min 时的峰值温度仅为扫描速度 200 mm/min 的 83.6%。图 5 为 0.5 s 时刻不同扫描速度下沿路径 1 和路径 2

的温度曲线图,图中 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 表示不同扫描速度下熔融区宽度, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 表示不同扫描速度下熔融深度。从图 5a 中可以看出随着扫描速度的增大,峰值温度降低,高于熔点的区间减小,铣削宽度减小;由图 5b 可知随着扫描速度的增大铣削深度随之下降。同时相比不同功率下的温度曲线图,不同扫描速度下的温度曲线变化较平缓,说明功率对铣削效果的影响比扫描速度更加显著。

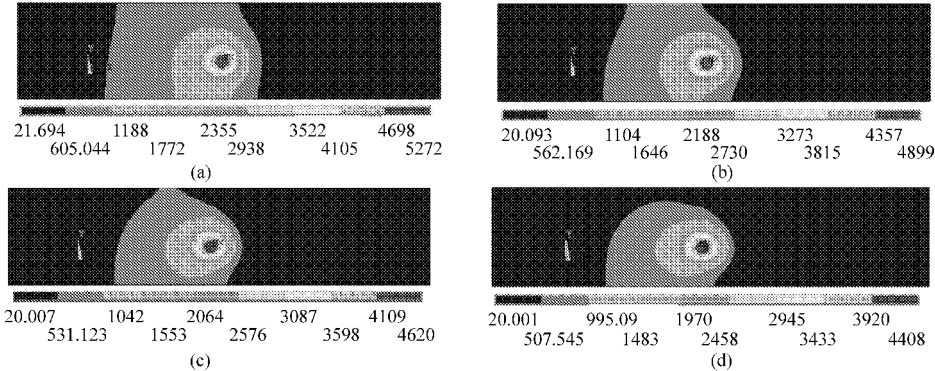


图 4 不同扫描速度下的温度场分布

Fig. 4 Image of temperature field under different scanning speeds
(a) $v=200\text{ mm/min}$ (b) $v=300\text{ mm/min}$ (c) $v=400\text{ mm/min}$ (d) $v=500\text{ mm/min}$

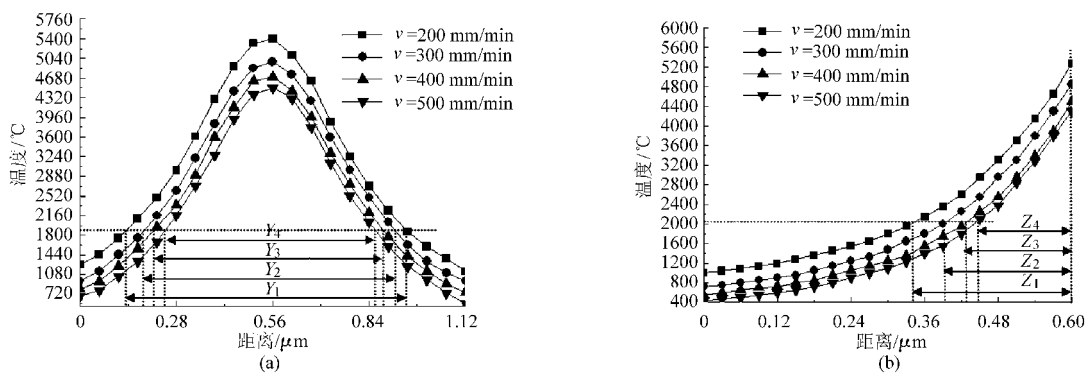


图 5 不同扫描速度下沿路径 1 和路径 2 的温度曲线

Fig. 5 Temperature curves along path 1 and path 2 under different scanning speeds
(a) 铣削宽度 (b) 铣削深度

3 试验及结果分析

3.1 试验方法与设备

采用德国 Rofin 公司出品的 StarWeld250 型 Nd:YAG 激光器对纯度为 99% 以上的 Al_2O_3 陶瓷进行激光单道铣削,试样尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,研究激光功率对铣削效果的影响时,固定扫描速度为 300 mm/min ,离焦量为 4 mm ;研究扫描速度对铣削效果的影响时,固定激光功率为 90 W ,离焦量为 4 mm 。材料经常压烧结后进行表面打磨处理,铣削后采用 VHX-600 型超景深 3D 显微系统测量铣削宽度和铣削深度。

3.2 试验结果分析

图 6、7 为不同铣削参数下的铣削线形貌。表 2 为加工工件铣削线尺寸及粗糙度测量结果。从图 6 上可以看出在激光铣削区域有黑色物质,能量越大,黑色区域越大。这是由于选用激光束能量服从高斯分布,在光斑中心处能量最大,即最大能量主要集中于铣削线中心区域,激光能量过大陶瓷材料易受热发生变质,因此底部的黑色物质有一部分是熔融材料重凝形成的重铸层,另一部分是铣削面的变质层。从图 7 和表 2 中可看出当扫描速度为 200 mm/min 时,光斑搭接较致密,表面粗糙度较好,但试样底部已完全变黑。这是由于扫描速度较低时,单个脉冲

上累积的激光能量较大,虽然单个脉冲孔形成的凹坑深度较深,但铣削深度增加的同时也出现了熔渣无法及时清除的问题;当扫描速度为 500 mm/min 时,铣削效果不理想,表面较粗糙,粗糙度明显增加,单道光斑搭接连续性不好,而且铣削宽度和铣削深度都比较小。因此只有扫描速度适中才能得到较好的成形效果。为精确测量工件铣削宽度与深度,采用 VHX-600 型超景深 3D 显微系统对工件进行测量。以激光功率为 75 W ,扫描速度为 300 mm/min 参数下工件测量为例,图 8a 显示实际工件测量区域,图 8b 为显微系统下扫描成形区域成像图以及测量截面显示。由图 8 结果可知,实测工件的铣削深度为 0.19 mm ,铣削宽度为 0.8 mm ,而模拟所得铣削深度和铣削宽度分别为 0.17 mm 和 0.65 mm ,两者一致性尚好。

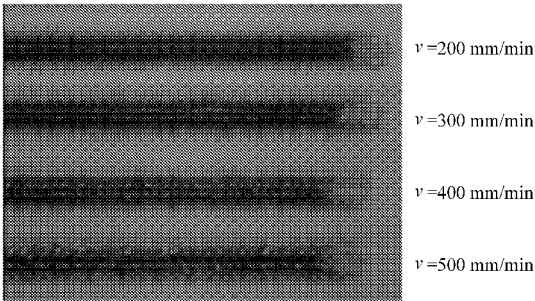


图 7 不同扫描速度下的铣削形貌

Fig. 7 Milling appearance with different scanning speeds

3.3 试验结果与模拟结果对比

图 9 和图 10 分别为不同激光功率和扫描速度下铣削宽度与铣削深度试验结果与模拟值对比图。图中可以看出,试验值总体上大于模拟结果,主要原因是试验中产生了一定的垂直度,因此在测量铣削宽度时将造成一定的误差,同时在模拟中为了简化模型,对铣削工艺的温度场分析进行了一些假设,导致模拟热影响区小于实际值。但总体上试验结果和模拟结果吻合良好,且增长趋势基本一致,验证了所建立有限元模型的有效性。

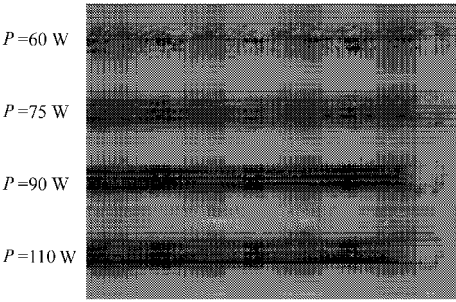


图 6 不同功率下的铣削形貌

Fig. 6 Milling appearance with different powers

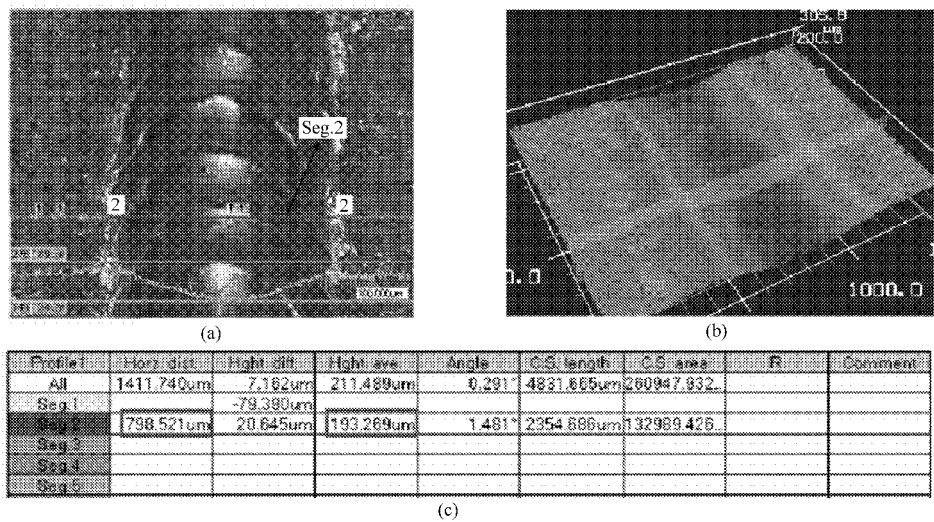


图 8 显微系统测量的铣削深度和铣削宽度

Fig. 8 Milling depth and width measuring result under micro-system

(a) 实际工件测量区域 (b) VHX-600 型显微系统扫描工件成像图 (c) 测量结果

表 2 铣削件测试结果

参数	激光功率/W ($v=300\text{ mm/min}$)				扫描速度/ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($P=90\text{ W}$)			
	60	75	90	110	200	300	400	500
铣削宽度/mm	0.58	0.80	0.81	0.83	0.82	0.79	0.78	0.75
铣削深度/mm	0.12	0.19	0.23	0.28	0.27	0.22	0.19	0.17
粗糙度/ μm	5.4	4.2	6.6	8.6	4.8	6.6	8.4	9.2

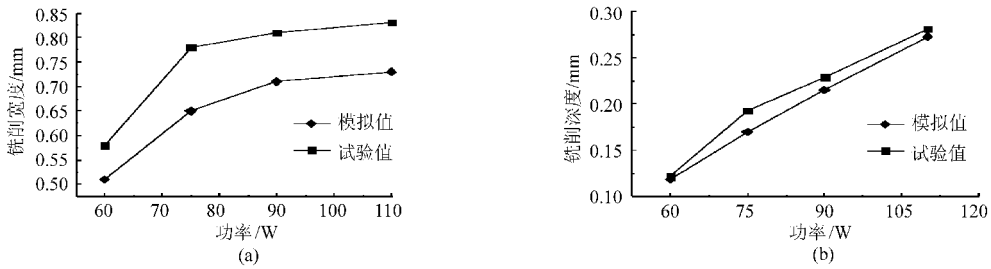


图 9 不同激光功率下模拟结果和试验结果对比

Fig. 9 Comparison of simulation and experiment with different powers

(a) 铣削宽度 (b) 铣削深度

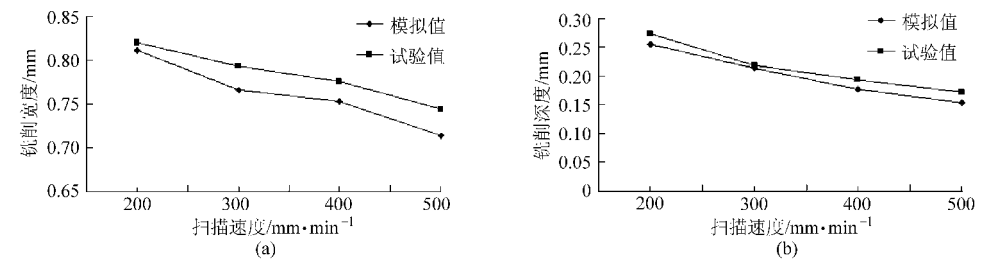


图 10 不同扫描速度下模拟结果和试验结果对比

Fig. 10 Comparison of simulation and experiment with different scanning speeds

(a) 铣削宽度 (b) 铣削深度

4 结论

(1) 利用 ANSYS 软件模拟获得 Al₂O₃ 陶瓷激光铣削宽度和铣削深度,与试验测得值对比,两者结果基本吻合,表明所建立的有限元模型可以较为准确地预测激光铣削效果。

(2) 模拟分析了激光铣削工艺的两个主要影响因素,即激光功率和扫描速度对温度场的影响规律。

随着激光功率的增大,熔融区温度峰值上升,铣削宽度和深度随之增大;随着扫描速度的增加,熔融区温度峰值下降,铣削宽度和深度减小。不同扫描速度

下的温度曲线变化较不同激光功率下温度曲线变化更为平缓,说明激光功率对铣削效果的影响比扫描速度更为显著。

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 袁根福. 硬脆性材料激光铣削机理与动力学过程研究[D]. 武汉:华中科技大学,2003.
Yuan Genfu. Dynamics and mechanisms of laser milling hard and brittle materials [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)

3 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.

4 周玉,雷廷权. 陶瓷材料学[M]. 北京:科学出版社,2004:319~335.

5 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 Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Experimental study of laser milling on Al₂O₃ ceramics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(5):467~470.

(上接第 228 页)

7 吴昭同,杨将新. 计算机辅助公差优化设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,1999.

8 Litvin F L, Chen J. Computerized simulation of transmission errors and shift of bearing contact for face-milled hyoid gear drive [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1995, 117(6):262~268.

9 Desrochers A, Chie W, Laperriere L. Application of a unified Jacobian-Torsor model for tolerance analysis [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2003, 3(3):2~14.

10 Litvin F L. Gear geometry and applied theory [M]. Englewood Cliffs, NJ Prentice Hall, 1994:160~257.

11 方宗德,曹雪梅,张金良. 航空弧齿锥齿轮实际工况下的当量错位反求及齿面再设计[J]. 中国机械工程,2007,18(24):3 001~3 005.
Fang Zongde, Cao Xuemei, Zhang Jinliang. Inverse evaluation of equivalent misalignment under real operating mode and redesign of aviation spiral bevel gears [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(24):3 001~3 005. (in Chinese)

12 苏进展,方宗德,谷建功. 螺旋锥齿轮齿面误差修正[J]. 农业机械学报,2010,41(3):200~203,138.
Su Jinzhan, Fang Zongde, Gu Jiangong. Tooth surface correction for spiral bevel gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(3):200~203,138. (in Chinese)

13 谷建功,方宗德,苏进展,等. 混合弹流润滑下弧齿锥齿轮传动啮合效率计算方法[J]. 农业机械学报,2010,41(5):188~192.
Gu Jiangong, Fang Zongde, Su Jinzhan, et al. Calculation of meshing efficiency for spiral bevel gears under the condition of mixed elastohydrodynamic lubrication[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(5):188~192. (in Chinese)