

陶瓷齿轮皮秒激光高精加工研究

季凌飞^{1,2,*}, 燕天阳^{1,2}, 姜锐^{1,2}, 张洪龙^{1,2}, 王文豪^{1,2}

¹北京工业大学激光工程研究院超快激光与高精制造研究所, 北京 100124;

²跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 从解决陶瓷齿轮加工困难的实际应用需求出发,系统研究 1064 nm 皮秒激光的输出功率、扫描速度、扫描次数、扫描线间距等工艺参数对陶瓷切削深度、宽度和表面粗糙度的影响;结合齿轮结构的几何特征,采用将柱状工件的曲面加工转换成平面加工的方法,完成了不同齿形(直齿、斜齿)陶瓷齿轮的激光直接高精制造,齿面平均粗糙度 $R_a \leq 2 \mu\text{m}$,加工效率高,可适用于不同材质齿轮类复杂构型零件的加工。

关键词 激光光学;陶瓷;齿轮;精密切削;回转夹具

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111429

Picosecond Laser Precision Processing of Ceramic Gear

Ji Lingfei^{1,2,*}, Yan Tianyang^{1,2}, Jiang Rui^{1,2}, Zhang Honglong^{1,2}, Wang Wenhao^{1,2}

¹Ultrafast Laser & Precision Manufacturing Research Center, Institute of Laser Engineering,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Key Laboratory of Trans-Scale Laser Manufacturing Technology, Ministry of Education, Beijing 100124, China

Abstract Aiming for solving the problem in the processing of ceramic gears, the influence of laser power, scanning speed, scanning times, and scanning interval on groove depth, width, and roughness by picosecond laser with 1064 nm wavelength is studied. Combining with geometric characteristics analysis of gears, a method for converting the curved surface processing of a cylindrical workpiece into plane processing is used to achieve a high-precision laser processing of ceramic gears with different tooth shapes (spur and helical gears). The average roughness of the tooth surface (R_a) is no more than $2 \mu\text{m}$. Moreover, the proposed process is time efficient and can be applied to the processing of complex gears composed of different materials.

Key words laser optics; ceramics; gear; precision processing; rotating fixture

OCIS codes 140.3390; 140.7090

1 引言

当今民用航空市场、航天领域探索、生物医疗领域以及军工武器装备发展都对设备的微小型化有着极高的要求,对微传动系统的改进需求迫切^[1-2]。其中,微齿轮(外径为 0.1~10 mm)^[3]作为微传动系统的关键构件,需要具有更高的尺寸精度、表面光洁度和齿面强度以及精确均匀的齿形,以保证高效传动,提高使用寿命。

激光加工因其应用范围广、加工精度高、非接触

加工等特点,在齿轮高精制造领域受到越来越多的关注;激光加工不受额外加工工具的限制,这使其成为制造微型构件的良好选择。1997 年, Miyazaki 等^[4]进行了调 Q-YAG 激光切割齿轮的实验研究,切割对象分别为 0.02~0.1 mm 厚的工具钢和 0.4 mm 厚的片状金刚石,将激光束垂直入射到原材料表面,沿齿轮状切割路径直接切除齿槽部分,获得片状齿轮。该工艺实为薄片状材料的激光切割,与一般激光切割工艺没有区别,且所获得的齿轮精度差,切面熔凝层明显,有锥度。2012 年, Gruescu

收稿日期: 2020-03-02; 修回日期: 2020-04-03; 录用日期: 2020-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(51975017, 51575013, 51275011)、国家重点研发计划(2018YFB1107500)

* E-mail: ncltji@bjut.edu.cn

等^[5]采用波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光进行聚碳酸酯齿轮的切割研究,通过田口实验方法(Taguchi method)对工艺进行优化,验证了激光对有机材料齿轮加工的高效性,实现了同模数、不同齿数聚碳酸酯齿轮组的啮合。Liu 等^[6]使用脉冲宽度为 $8\ \text{ns}$ 的 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光,以激光冲击冲孔(laser shock)的方式在厚度为 $20\ \mu\text{m}$ 的铝箔上制备了外径为 $1.36\ \text{mm}$ 、齿数为 12、模数为 $0.1\ \text{mm}$ 的微齿轮。采用激光脉冲冲压方式使铝箔产生断裂,齿轮边界易留有因冲压拉伸而造成的边缘残留和不平整。

相对于金属和高分子有机材料,陶瓷类无机非金属材料为共价键、离子键或两者混合化学键物质,具有很高的硬度,但也会显示出脆性和绝缘性质^[7]。激光加工虽然具有非接触、易控制的特点,但长脉宽激光的热影响显著,极易导致陶瓷类材料碎裂,这对齿轮类复杂形状结构件的高精加工依然存在极大的挑战^[8-10]。随着激光在能量、时间和空间等方面可选择性和可调控性^[11-13]的不断提升,可实现脉宽 $\leq 10^{-11}\ \text{s}$ 的超快激光(如飞秒激光、皮秒激光)对材料加工的独特“冷”效应,超快激光的光子作用时间小于介电材料导带电子受热时间,导带电子来不及将能量传递给晶格,从而有效抑制了能量的传递^[14-17]。与纳秒激光^[18-19]相比,皮秒激光切割陶瓷时的热损伤更小,具有更加光滑且垂直性更好的切面。飞秒激光在材料纳米级表面、透明电材料体内微结构等加工方面具有优势,而针对齿轮这类体材料结构件,无论从加工维度还是加工效率来看,皮秒激光更具有面向工程实际的应用和发展优势。

本文根据皮秒激光临界点相分离(critical point phase separation)的基本机理,利用皮秒激光可抑制热效应“电子态”、去除陶瓷材料的优势,以 AlN 圆柱型陶瓷为原始材料,通过系统研究激光平均功率、扫描速度、扫描次数、扫描间隔等工艺参数对材料切削深度、宽度和粗糙度的影响,设计出一种将柱面加工转换成平面加工的激光切削方案,配合研发带有主动旋转轴的工装夹具和控制程序,经工艺优化,实现了皮秒激光对不同齿形(直齿、斜齿)陶瓷微齿轮的直接高精制造,所制得的齿面粗糙度低,齿轮可有效啮合,而且制造时间短、效率高。

2 实验装置和方案

实验材料为 AlN 圆柱陶瓷,其直径为 $3\ \text{mm}$, AlN 的质量分数为 99% 。所用激光器为中心波长 $1064\ \text{nm}$ (光谱宽度为 $0.1\sim 0.15\ \text{nm}$)的皮秒激光

器,激光脉宽约为 $10\ \text{ps}$,光束质量因子 M^2 约为 1.2,重复频率在 $0.2\sim 20\ \text{MHz}$ 范围内可调,最大输出功率可达 $100\ \text{W}$,聚焦光斑直径为 $20\ \mu\text{m}$ 。系统集成配备的是 X - Y - Z 三轴加工平台,针对所研究的圆柱状原材料,设计了一套带有主动旋转轴的工装夹具,利用中达电通公司生产的 ECMA 伺服电机及 ASDA 伺服驱动器实现驱动。如图 1 所示,陶瓷圆柱工件的旋转轴 R 轴固定,且 R 轴中心与陶瓷圆柱工件圆心重合,以保证陶瓷圆柱工件旋转时的准确度。 R 轴的轴向平行于 XY 工作面,激光束由上方沿 Z 轴通过振镜垂直入射,扫描方向与圆柱工件轴向方向平行。当柱状工件沿 R 轴旋转时,总有顶侧外切面与激光束垂直相交,此时可视微齿轮顶视形貌为周期性、等间距的盲槽[图 1 (b),其中 p_a 为齿顶圆开口, s 为齿厚度, h_a 为齿顶高, h_f 为齿根高],并且每个盲槽在某一时刻可关于基准轴的投影线对称,由此柱状工件的曲面加工转换成平面加工,采用等间距平行线填充的加工策略实现齿槽材料的激光切削。

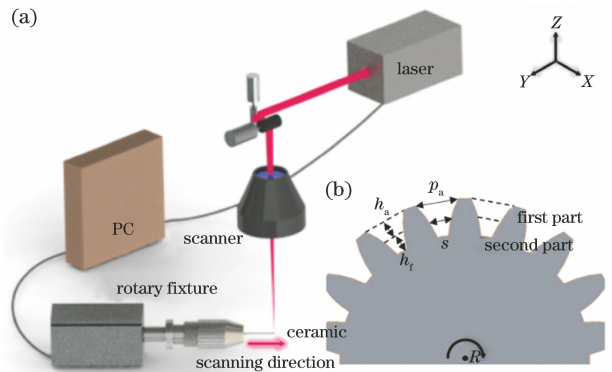


图 1 皮秒激光切削微陶瓷齿轮实验原理图。(a)装置示意图;(b)齿轮顶视图

Fig. 1 Schematic of picosecond laser processing ceramic micro-gear. (a) Schematic of experimental setup; (b) top view of gear

样品的切削尺寸(深度和宽度)和切削表面粗糙度由 Olympus OLS-3100 型激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)测量获得,其中粗糙度的测量选用面粗糙度测量方式,测量区域均匀分布在切削面内,每次测量范围为 $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$,多次(≥ 3 次)测量取平均值作为比较值。采用 Hitachi S-3400N 型扫描电子显微镜(SEM)对加工区域表面的微观形貌进行观察分析。

3 实验结果与讨论

基于本课题组之前对皮秒激光刻蚀陶瓷的研究

工作及陶瓷的本征介电特性和较差的导热特性,首先选择在低重复频率时的最大激光输出功率条件下研究激光对材料的刻蚀效果。本实验选用的激光源在 200 kHz 低重复频率下的最大激光功率为 27 W,

在此条件下设置激光扫描速度分别为 100, 200, 500, 1000, 2000 mm/s, 扫描次数分别为 1 次、10 次、20 次、50 次,测得的不同激光参数对 AlN 陶瓷切削深度及宽度的影响如图 2 (a) 所示。

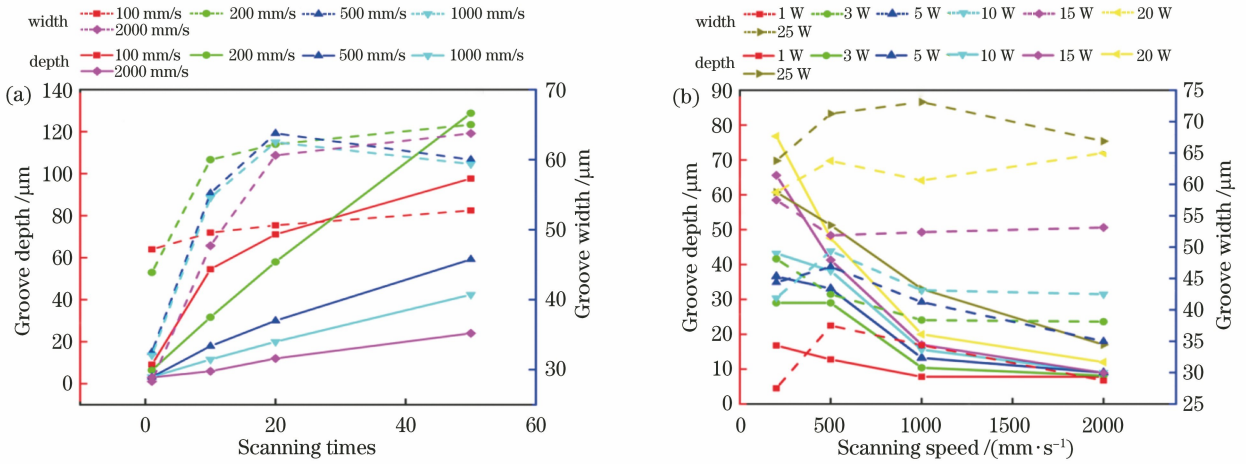


图 2 激光工艺参数对陶瓷切削深度及宽度的影响。(a)扫描速度、扫描次数对切削深度及宽度的影响;
(b)激光功率、扫描速度对切削深度及宽度的影响

Fig. 2 Influence of laser processing parameters on groove depth and width. (a) Influence of scanning speed and scanning times on groove depth and width; (b) influence of laser power and scanning speed on groove depth and width

由图 2(a)可知,在激光功率一定的情况下,不同扫描速度的切削深度均随扫描次数的增加而增大。当激光扫描速度大于 500 mm/s 时,随着扫描次数的增加,扫描速度越快,切削深度增长则越慢,说明扫描速度过快时,激光光斑重叠率 R_{oi} [$R_{oi} = (2\omega_0 - v/f)/2\omega_0$, 其中 v 为扫描速度, ω_0 为聚焦激光半径, f 为激光频率] 减小,即材料单位面积内吸收的激光能量随光斑能量重叠率减小而减少,从而导致切削深度值变小。当扫描速度为 500 mm/s 和 1000 mm/s 时,切削宽度随着激光扫描次数的增加而增大,但当扫描次数为 50 次时,切削宽度变窄,说明此时切削宽度接近极限。这是因为脉冲能量在空间上呈高斯分布而非均匀分布,能量较高的光斑中心直接去除辐照区域的材料。随着扫描次数的增加,光斑中心对应区域的温度不断升高,使得材料熔融甚至气化,而能量较低的光斑边缘区域对应的材料辐照区域温度较低,熔融或气化物质会在温度梯度引起的表面张力梯度或气化反冲压力的共同作用下被去除。最后,熔化物质在切削边缘区域凝固形成重铸层,使得切削宽度变窄。当扫描速度小于 500 mm/s,光斑能量重叠率高,材料单位面积内吸收的激光总能量高,并随着扫描次数的增加而增大,材料较易熔融乃至气化,并在较大的表面张力梯度或气化

反冲压力的作用下远离切削区域,故不会造成切削宽度减小。当扫描速度大于 500 mm/s 时,光斑能量重叠率降低,材料单位面积内吸收的激光总能量相对于低扫描速度 (< 500 mm/s) 时较低,即使增加扫描次数,材料的熔融或气化效应也会明显低于低扫描速度时的熔融或气化效应,且由温度梯度引起的表面张力梯度效应为材料去除的主要形式,较易导致熔融物质在切削边缘区域再次微熔凝,这种微熔凝会随扫描次数的增加而出现累积,导致切削宽度变窄。综合考虑切削效果和效率,发现当扫描次数为 50 次时,切削宽度接近极限且获得最大的切削深度。

在激光脉冲重复频率为 200 kHz 和扫描次数为 50 次的条件下,进一步研究优化激光输出功率和扫描速度对切削宽度和切削深度的影响,结果如图 2(b) 所示,所设定的激光功率分别为 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25 W, 激光扫描速度分别为 200, 500, 1000, 2000 mm/s。总体而言,激光切削宽度随扫描速度变化不大,但发现 1000 mm/s 扫描速度是影响激光切削深度的关键值,当激光扫描速度大于此值时,切削深度随扫描次数增加的变化幅度明显减小。激光切削宽度的极限值主要与激光光斑能量所致的温度场分布有关,扫描速度决定了光斑能量重叠率的大小,在多次扫描的情况下,相

邻光斑接近重合,沿激光扫描方向上的能量分布较为均匀,故激光切削宽度随扫描速度变化起伏不大。由图 2(a)可知,当扫描速度 ≥ 1000 mm/s时,切削深度随着扫描次数增加的变化曲线斜率明显减小,说明存在 1000 mm/s 扫描速度阈值,当扫描速度大于该阈值时,在激光功率一定的条件下,随着激光扫描速度的增大,光斑能量重叠率明显下降,单位面积内材料吸收的能量减少,这严重影响了切削效率,即使增加扫描次数,切削深度的增加幅度也会明显减小。切削深度和宽度随激光功率的增加整体呈增大趋势,但当扫描速度为 1000 mm/s 时,5 W 激光功率的切削宽度会小于 3 W 的切削宽度,且从切削面表面质量检测结果来看,当功率大于 10 W 时,切削面会存在较大的热影响区,从而严重影响切削质量,不利于齿轮制造过程中的连续扫描切削。

基于上述激光参数的初步优化,设置激光脉冲重复频率为 200 kHz,输出功率为 5 W,扫描速度为 1000 mm/s,扫描次数为 50 次,以等间距平行线填充方式在 AlN 陶瓷圆柱工件上进行齿槽切削实验,研究切削平行线间距对切削深度和切削表面粗糙度的影响。设置平行线间距分别为 4, 6, 8, 10, 12 μm ,测试结果如图 3 所示。可以看出,不同线间距对切削深度的影响不明显,但对切削表面粗糙度影响较大,当线间距为 12 μm 时,获得最低切削表面粗糙度 $R_a = 1.59 \mu\text{m}$ 。

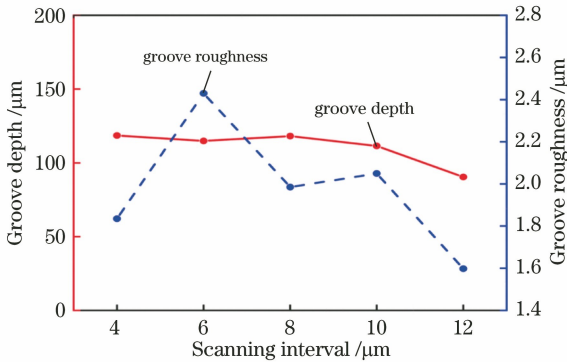


图 3 扫描 50 次时切削平行线间距对切削深度和切削表面粗糙度的影响

Fig. 3 Influence of scanning interval on groove depth and roughness under 50 scanning times

圆柱齿轮的主要参数公式为

$$m = \frac{p}{\pi} = \frac{d_a}{z}, \quad (1)$$

$$p_a = \frac{\pi \cdot d_a}{z} - 0.4 \cdot m, \quad (2)$$

$$b = 10 \cdot m, \quad (3)$$

$$s = \frac{\pi \cdot d_a}{2z}, \quad (4)$$

$$h = 2.25 \cdot m, \quad (5)$$

$$h_a = 1 \cdot m, \quad (6)$$

$$h_f = 1.25 \cdot m, \quad (7)$$

式中: m 为齿轮模数; b 为齿轮厚度; h 为齿高度; d_a 为外径; z 为齿数。根据图 1 (b)和圆柱齿轮的主要参数公式,以外径 d_a 为 3 mm、齿数 z 为 18 的拟加工齿轮为例,将齿槽近似分为两个立体等腰梯形盲槽进行加工,此时齿槽厚度(1.67 mm)等于两个立体等腰梯形的长度,亦为激光切削长度。其中,第一个立体等腰梯形的宽度(切削宽度)为齿顶圆开口 0.457 mm,切削深度为齿顶高 0.167 mm;第二个立体等腰梯形宽度(切削宽度)为齿厚度 0.262 mm,切削深度为齿根高 0.209 mm。

依据拟加工齿轮几何参数和齿槽平面式切削工艺方案,结合前述优化确定的激光工艺参数:激光功率为 5 W,重复频率为 200 kHz,激光扫描速度为 1000 mm/s,平行线间距为 12 μm ,第一个立体等腰梯形齿槽切削采用 70 次激光重复扫描,第二个立体等腰梯形齿槽切削采用 90 次激光重复扫描。每当完成一个齿槽的切削加工,由工装内部寄存器控制位置模式(Pr)控制旋转 R 轴,带动柱状工件旋转 1/18 个圆周,重复 18 次后,得到完整的 18 齿微齿轮结构件(图 4)。整个齿轮加工时间为 374 s,轮齿表面无残渣、无裂纹,平均粗糙度 R_a 为 1.74 μm 。

由于去除材料的工艺参数与本研究所使用的加工方法之间具有相对独立性,配合适当的激光加工工艺参数和不同构件的几何结构尺寸,可以将此加工方法拓展到不同齿形(图 5)、不同材质的构件加工。图 5 所示为按所提方法加工得到的不同齿厚、不同夹角的斜齿轮构件,虽然斜齿轮的每一个轮齿排列都呈螺旋状,与齿轮轴有一个夹角,传统机械加工中需要使用特殊的加工刀具和夹持方法,加工难度远远大于直齿轮,加工精度也会相应降低;但本研究提出的激光平面式切削齿槽工艺对直齿轮和斜齿轮的加工并无区别,说明所提工艺具有很好的普适性。

图 6 所示为采用同样工艺加工的模数相同($m = 0.143$)但直径和齿数不同的微齿轮组,可以看出,该齿轮组实现了齿轮啮合。图 6 中左侧齿轮的齿顶圆直径 d_a 为 5 mm,齿数 z 为 35;右侧齿轮的齿顶圆直径 d_a 为 4 mm,齿数 z 为 28。

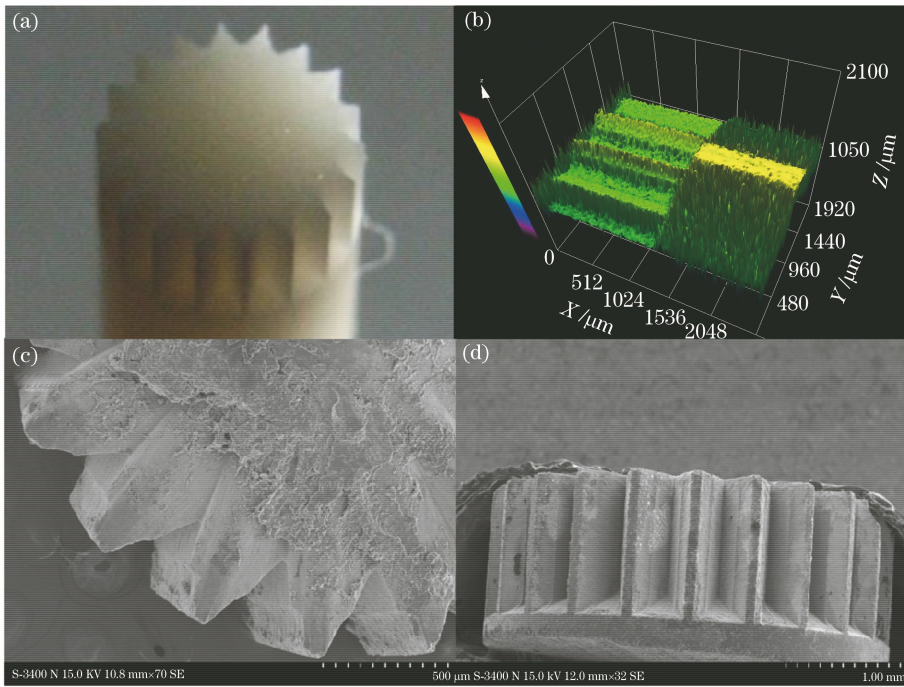


图 4 皮秒激光高精加工陶瓷直齿轮构件及其显微 SEM 图。(a)实物图;(b)共聚焦表面质量检测图;
(c)实物 SEM 侧视图;(d)实物 SEM 顶视图

Fig. 4 Picosecond laser processed gear with high precision and SEM of morphologies. (a) Gear sample; (b) laser scanning confocal micrograph of surface quality; (c) SEM side view of gear sample; (d) SEM top view of gear sample

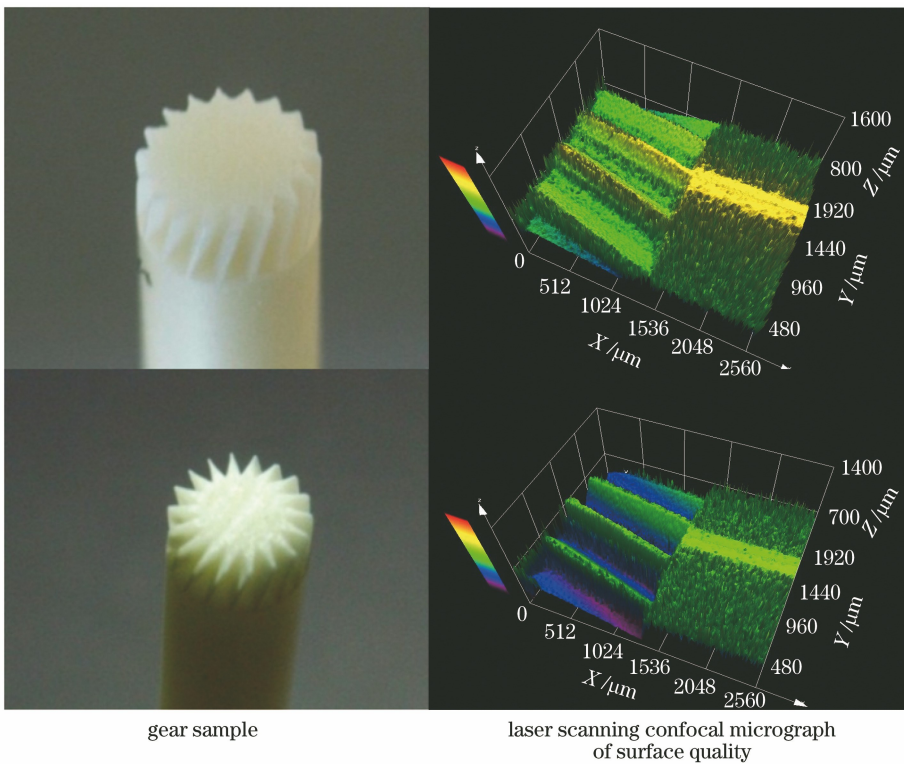


图 5 不同齿厚、夹角的陶瓷斜齿轮皮秒加工实物图和共聚焦表面质量检测图

Fig. 5 Gear samples and laser scanning confocal micrograph of surface quality for ceramic helical gears with different tooth thickness and included angle processed by picosecond laser

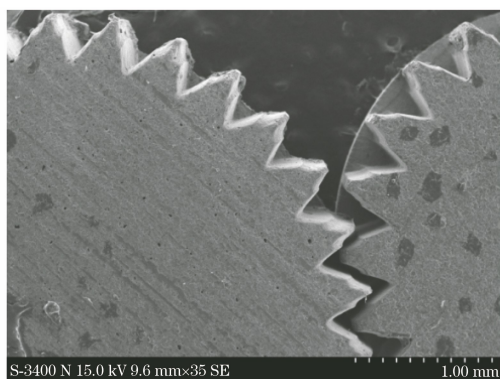


图6 相同模数、不同直径和齿数的微齿轮啮合的 SEM 图

Fig. 6 SEM of gear meshing with the same modulus, different diameter, and different teeth number

4 结 论

利用皮秒激光加工热效应可抑制热效应“电子态”、去除陶瓷材料的优势,通过系统研究波长为 1064 nm 的皮秒激光输出功率、扫描速度、扫描次数、扫描线间距等工艺参数对切削深度、宽度和表面粗糙度的影响,结合齿轮构件的几何特征,设计将圆柱面加工转换成平面加工的切削方案,配合回转夹具控制及激光切削参数优化,实现了 AlN 陶瓷微齿轮的激光高精制造,加工效率高,所提工艺可以被拓展到不同材质、不同齿形构件的加工上,为陶瓷类硬质材料复杂构件的激光加工提供了一条值得探索的新途径。

参 考 文 献

[1] Klocke F, Soo S L, Karpuschewski B, et al. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64(2): 581-604.

[2] Guo D M, Sun Y W, Jia Z Y. Methods and research progress of high performance manufacturing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 119-134.

郭东明, 孙玉文, 贾振元. 高性能精密制造方法及其研究进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11): 119-134.

[3] Chaubey S K, Jain N K. State-of-art review of past research on manufacturing of meso and micro cylindrical gears [J]. Precision Engineering, 2018, 51: 702-728.

[4] Miyazaki T, Tanaka Y, Tokunaga T, et al. Gear cutting with YAG laser beam [J]. Journal of Laser Applications, 1997, A99: 99-105.

[5] Gruescu C M, Ionescu C L, Nicoara I, et al. Experimental optimization of process parameters in laser cutting of polycarbonate gears [J]. Mechanika, 2012, 18(2): 233-238.

[6] Liu H X, Li J W, Shen Z B, et al. Experimental and numerical simulation research on micro-gears fabrication by laser shock punching process [J]. Micromachines, 2015, 6(8): 969-983.

[7] Wang C, Zeng X Y. Experimental study about 3-D laser carving of Al₂O₃ ceramic [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 18-21.

王成, 曾晓雁. Al₂O₃陶瓷的激光三维雕刻实验研究 [J]. 激光技术, 2007, 31(1): 18-21.

[8] Wu Y R, Hsu W H. A general mathematical model for continuous generating machining of screw rotors with worm-shaped tools [J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(1): 28-37.

[9] Stosic N. A geometric approach to calculating tool wear in screw rotor machining [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(15): 1961-1965.

[10] Abdo B M A, El-Tamimi A M, Anwar S, et al. Experimental investigation and multi-objective optimization of Nd: YAG laser micro-channeling process of zirconia dental ceramic [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(5/6/7/8): 2213-2230.

[11] Sugioka K. Progress in ultrafast laser processing and future prospects [J]. Nanophotonics, 2017, 6(2): 393-413.

[12] Yang L L, Wei J T, Ma Z, et al. The fabrication of micro/nano structures by laser machining [J]. Nanomaterials, 2019, 9(12): 1789.

[13] Padmanabham G, Bathe R. Laser materials processing for industrial applications [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences, 2018, 88(3): 359-374.

[14] Gärtner E, Polise V, Tagliaferri F, et al. Laser micro machining of alumina by a picosecond laser [J]. Journal of Laser Micro Nanoengineering, 2018, 13(2): 76-84.

[15] Ackerl N, Warhanek M, Gysel J, et al. Ultrashort-pulsed laser machining of dental ceramic implants [J]. Journal of The European Ceramic Society, 2019, 39(4): 1635-1641.

[16] Robert S S, James B, Rajesh P. Laser processing of ceramics for microelectronics manufacturing [C]. Laser Applications in Microelectronic and

- Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXII: International Society for Optics and Photonics, 2017, 10091: 100910X.
- [17] Ji L F, Ling C, Li Q R, et al. Research progress and development of industrial application of picosecond laser processing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 115-126.
季凌飞, 凌晨, 李秋瑞, 等. 皮秒激光工程应用研究现状与发展分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 115-126.
- [18] Soltani B, Azarhoushang B, Zahedi A. Laser ablation mechanism of silicon nitride with nanosecond and picosecond lasers[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 119: 105644.
- [19] Yang Q, Chen Y, Lü Z, et al. Nanosecond laser surface processing of AlN ceramics [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(22): 13874-13882.