

飞秒激光烧蚀面齿轮材料的齿面表层形态研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2023.02.005

徐海军¹ 李 湾²
米承继¹ 吴 陶¹
李楚莹¹ 明兴祖¹

1. 湖南工业大学
机械工程学院
湖南 株洲 412007
2. 湖南汽车工程职业学院
机电工程学院
湖南 株洲 412000

摘 要: 针对面齿轮材料 18Cr2Ni4WA, 研究飞秒激光辐照面齿轮材料的热力效应, 建立飞秒激光烧蚀面齿轮温度-应力耦合模型, 分析多脉冲时不同能量密度下电子温度、晶格温度以及热应力的变化过程。结果表明: 电子温度、晶格温度以及热应力随激光能量密度的增大而增大。实验和仿真的对比结果说明, 烧蚀齿面表层为残余压应力, 烧蚀深度和凹坑直径随激光能量密度的增加而增大, 较大的激光能量密度会产生较多的熔融物, 降低飞秒激光加工质量, 当能量密度为 1.78 J/cm^2 时, 齿面表层形态较好。本文为提高飞秒激光精微烧蚀面齿轮质量提供了研究基础。

关键词: 飞秒激光; 面齿轮; 表层形态; 残余应力; 能量密度

中图分类号: TG61⁺9

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2023)02-0034-08

引文格式: 徐海军, 李 湾, 米承继, 等. 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的齿面表层形态研究 [J]. 包装学报, 2023, 15(2): 34-41, 49.

1 研究背景

面齿轮作为点接触共轭曲面齿轮的一种, 可实现平行轴、相交轴和交错轴之间的传动, 广泛应用于工业加工等领域。随着制造业全面朝着高、精、尖方向发展, 人们对面齿轮精度提出了更高要求^[1]。目前, 普通机械加工面齿轮的精度已经到达瓶颈, 因而专家学者需探索新的加工方式。

飞秒激光加工采用超短脉冲宽度和超高峰值功率对材料进行精确去除, 具有热影响区域小、加工区域精确、可精密加工任何材料等突出特点, 因而得到快速发展和广泛应用^[2]。飞秒激光烧蚀齿面的表层形态一般包括齿面烧蚀凹坑直径、深度和残余应力状态

等^[3-4]。当飞秒激光烧蚀面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 齿面时, 激光能量的高度集中输入会在材料间形成温度梯度, 不可避免地会在材料中产生热应力, 且温度越高, 热应力越大^[5-6]。在激光与材料相互作用过程中有关力学效应的研究有: 钟发成^[7]对组合脉冲激光辐照单晶硅产生的热应力进行了数值计算, 分析了单脉冲和多脉冲作用下产生的温度场和热应力。研究结果表明, 两脉冲的延迟时间和能量分配会对激光毁伤效果产生影响。罗鸿玮^[8]研究了飞秒脉冲激光辐照 Al/PTFE (Al/polytetrafluoroethylene) 活性材料的温度场和应力场, 在不同激光参数下基于热传导模型和热弹性理论对温度场和热应力进行了理论计算和数值模拟。郑瑞伦等^[9]开展了强激光辐照金属材料

收稿日期: 2022-05-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975192); 湖南省教育厅科学研究基金资助优秀青年项目 (22B0994); 湖南省自然科学基金资助项目 (2021JJ30214、2021JJ50042); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队项目 (T201919)

作者简介: 徐海军 (1996-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为激光精微加工理论与技术,

E-mail: 595863037@qq.com

通信作者: 明兴祖 (1964-), 男, 湖南常德人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事激光精微加工理论与技术研究,

E-mail: mxz9036@126.com

的研究,通过激光作用于金属材料的热力效应物理模型计算得到温度分布和热应力,并分析了材料表面附近热应力和温度随激光作用时间和位置的变化。L. V. Zhigilei 等^[10]对分子动力学模拟研究工作进行了总结,得出超快激光烧蚀金属时,在热效应及烧蚀压力波的共同作用下靶材会发生蚀除。基于此,他们提出了机械破碎、裂散、液相爆炸等一系列靶材蚀除机制^[10-11]。残余应力的存在,对齿轮的形状、尺寸和性能都有极为重要的影响。残余应力超过齿轮材料的屈服强度会引起工件的变形,超过齿轮材料的强度极限就会使工件开裂。这是其有害的一面,应当减少和消除。然而,目前关于热应力对飞秒激光辐照面齿轮材料结构影响的相关研究较少。

本文以面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 为研究对象,通过建立的温度-应力耦合模型来描述飞秒激光烧蚀过程中的物理现象,进而对飞秒激光精微修正后的面齿轮齿面表层形态进行模拟。通过 COMSOL 软件的数值仿真,研究了激光参数对面齿轮精微修正后表层形态的影响,并进行了实验验证分析。

2 温度-应力耦合模型

飞秒激光烧蚀面齿轮的初期加热阶段,齿轮表面可以被加热到 10^5 K。极高的温度会导致烧蚀区域内部产生极大的压力。这种压力的释放有两种途径:向外以喷射物的形式去除材料,释放压力;向内则通过内部膨胀压缩材料,内部物质传递压力。因此,本文通过双温模型^[12]与弹性力学方程耦合来描述飞秒激光作用材料过程中温度与应力关系。温度-应力耦合模型如下:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) - g(T_e - T_l) + S(r, z, t), \quad (1)$$

$$C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = g(T_e - T_l), \quad (2)$$

$$\sigma_t = -\lambda E(T_l - T_0). \quad (3)$$

式中: T_e 、 T_l 分别为电子温度和晶格温度;

t 为时间;

C_e 、 C_l 分别为单位体积的电子热容和晶格热容;

k_e 为电子热传导率;

g 为电子与晶格的耦合系数;

$S(r, z, t)$ 为材料吸收的热量;

σ_t 为热应力;

λ 为体热膨胀系数;

E 为体弹性模量;

T_0 为材料初始温度。

$S(r, z, t)$ 的表达式为

$$S(r, z, t) = (1 - R) \frac{I(r, t)}{\tau_p} \alpha \times \exp(-\alpha z). \quad (4)$$

式中: r 为到光斑中心的距离;

R 为材料反射率;

α 为材料吸收系数;

z 为几何模型任意位置到材料顶面的穿透深度;

$I(r, t)$ 为在空间和时间均为高斯分布的激光光强^[13];

τ_p 为激光脉冲宽度。

$I(r, t)$ 的表达式为

$$I(r, t) = \frac{J_0}{2} \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{t}{\tau_p} - 1 \right)^2 \right] \exp \left[-2 \left(\frac{r}{\omega_0} \right)^2 \right], \quad (5)$$

式中: J_0 为激光能量密度;

ω_0 为激光光斑半径。

当飞秒激光烧蚀面齿轮时,电子被加热到很高的温度,进而引起热物性参数值发生较大变化。因此,热物性参数不能设置为常数。从 300 K 到费米温度,电子热导率 k_e ^[14] 的表达式为

$$k_e = k \frac{(\theta_e^2 + 0.16)^{1.25} (\theta_e^2 + 0.44) \theta_e}{(\theta_e^2 + 0.092)^{0.5} (\theta_e^2 + \beta \theta_s)}, \quad (6)$$

式中: k 为材料导热系数;

$\theta_e = T_e/T_f$, $\theta_l = T_l/T_f$, 其中 T_f 为费米温度;

β 为常数。

3 求解与仿真分析

采用 COMSOL 软件对飞秒激光烧蚀面齿轮进行仿真分析。面齿轮的热物性参数^[15-16]和激光参数设置分别见表 1、表 2。

仿真前,面齿轮需进行网格划分。仿真计算区域大小选为 $60 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,采用不均匀的三角形网格,最大单元大小为 $0.5 \mu\text{m}$,最小单元大小为 $0.001 \mu\text{m}$,最大单元的增长率为 1.3,曲率因子为 0.3。面齿轮网格划分如图 1 所示。

表 1 面齿轮的热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of face gear

参 数	数 值	参 数	数 值
$C_p/(J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3})$	706.4	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	7 910
$C_l/(J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3})$	3.5×10^6	T_f/K	1.28×10^5
T_0/K	293.15	熔点温度 T_m/K	1 724
R	0.6	蒸发温度 T_v/K	3 023
α/m^{-1}	7.1×10^7	λ/K^{-1}	12.5×10^{-6}
E/GPa	206		

表 2 激光参数

Table 2 Laser parameters

$J_0/(J \cdot cm^{-2})$	$\omega_0/\mu m$	脉冲数	脉宽/fs	重复频率/kHz
1.42, 1.78, 2.37, 3.56	20	30	300	200

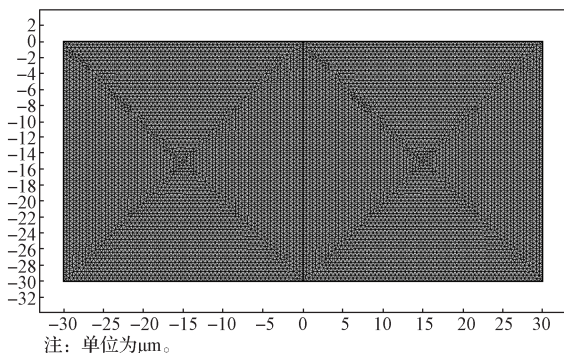


图 1 面齿轮网格划分

Fig. 1 Meshing of face gear

在 COMSOL 软件中，建立两个系数形式偏微分方程模块与一个固体力学模块，将式（1）和（2）输入到系数形式偏微分方程模块中，将式（3）输入到固体力学模块中，建立温度-应力耦合模型。通过向有限差分法求解耦合模型，即基于上一个时间步长的数值计算当前时间步长的电子温度、晶格温度和热应力，重复此步骤，直至得到具有良好收敛性的解为止。随着时间步长的更新，可以获得求解域内任意时刻的电子温度、晶格温度和热应力。

材料初始温度为 293.15 K。在飞秒激光脉宽 300 fs、激光光斑半径 20 μm 、激光脉冲数 30、重复频率 200 kHz 的激光参数下，激光能量密度分别为 1.42, 1.78, 2.37, 3.56 J/cm^2 时，齿面电子温度（ T_e ）和晶格温度（ T_l ）随时间的演变过程见图 2 和 3。由图 2 和 3 可知：1）当最后一个激光脉冲作用时，在不同能量密度 1.42, 1.78, 2.37, 3.56 J/cm^2 下的电子峰值温度分别约为 13 900, 17 100, 21 900, 32 500 K。2）当最后一个激光脉冲作用时，在不同能量密度 1.42, 1.78, 2.37, 3.56 J/cm^2 下的晶格峰值温度分别约为 12 100,

15 200, 19 800, 28 500 K。3）随着激光能量密度的增加，电子和晶格的峰值温度随之增大。当前一个脉冲作用结束后，材料还未冷却到初始温度，下一个脉冲随之而来，在上一个脉冲剩余能量的基础上对材料进行烧蚀，因而脉冲结束时的材料温度比上一个脉冲结束时的更高。这说明了多脉冲在烧蚀面齿轮时，存在明显的能量累积效应。

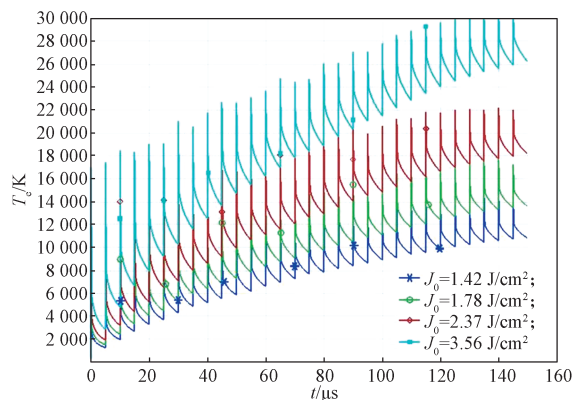


图 2 不同激光能量密度下电子温度随时间的变化

Fig. 2 Evolution of electron temperature with time in different laser energy density

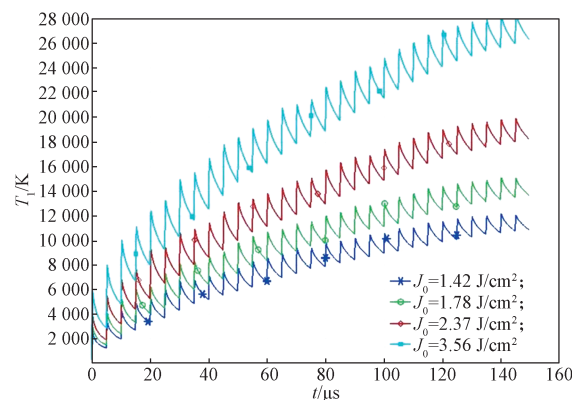


图 3 不同激光能量密度下晶格温度随时间的变化

Fig. 3 Evolution of lattice temperature with time in different laser energy densities

图 4 是面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 在激光能量密度分别为 1.42, 3.56 J/cm^2 时的轴向-径向晶格温度分布图。因为激光光斑能量呈高斯分布，所以照射材料的周围温度也随之呈高斯分布，呈现中心处温度高、边缘温度低的特点。从图 4 可以看出：1）当材料温度超过气化温度 3023 K 的区域，材料发生气化，形成烧蚀凹坑；在温度高于 1724 K 且小于 3023 K 的区域，材料熔化形成熔融区域；在温度高于材料初始温度且小于 1724 K 的区域，材料形态未发生变化，属

于热影响区域。2) 能量密度为 1.42 J/cm^2 时, 齿面烧蚀凹坑的直径和深度分别为 $35.782, 4.315 \mu\text{m}$; 能量密度为 3.56 J/cm^2 时, 齿面烧蚀凹坑的直径和深度分别为 $45.544, 6.988 \mu\text{m}$ 。随着能量密度增加, 烧蚀凹坑的直径和深度增大。

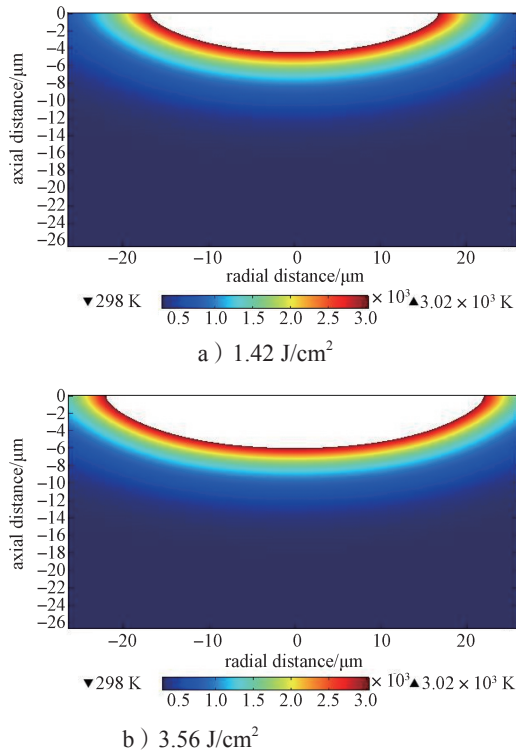


图4 不同能量密度下轴向-径向晶格温度分布图

Fig. 4 Temperature distribution of axial-radial lattice under different energy densities



彩图

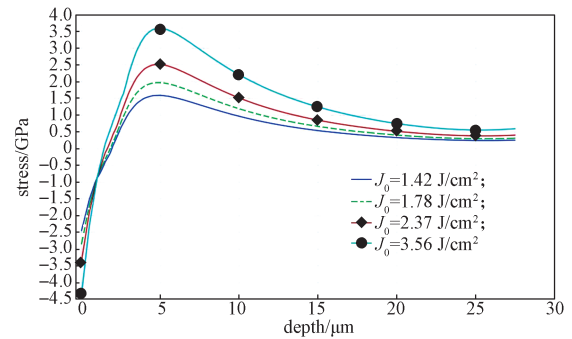
图5为在10, 20, 30个激光脉冲下不同激光能量密度的热应力空间分布图。图中, 负值代表压缩应力, 正值代表拉伸应力。当飞秒激光辐照面齿轮表面时, 材料被激光辐照区域产生的温度场分布不均匀。因热膨胀而产生的热弹力波首先在材料表面产生一个压应力, 随后热弹力波逐渐向材料内部传播, 压应力逐渐减小, 并在材料内部逐渐形成拉应力, 压应力的最大值出现在材料表面。

由图5a可知, 激光脉冲数为10时, 在不同能量密度 $1.42, 1.78, 2.37, 3.56 \text{ J/cm}^2$ 下最大压应力分别为 $2.42, 2.75, 3.43, 4.48 \text{ GPa}$; 最大拉应力出现在材料深度 $4.9 \mu\text{m}$ 处, 在不同能量密度 $1.42, 1.78, 2.37, 3.56 \text{ J/cm}^2$ 下最大拉应力分别为 $1.52, 1.95, 2.48, 3.71 \text{ GPa}$ 。

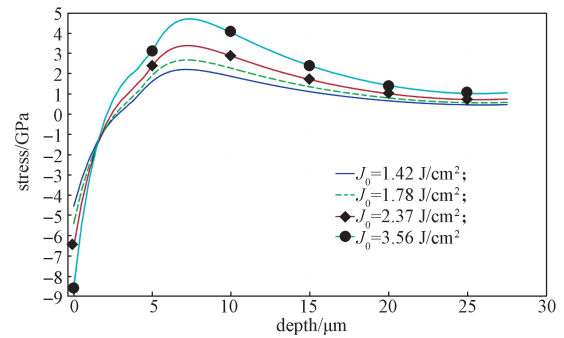
由图5b可知, 激光脉冲数为20时, 在不同能

量密度 $1.42, 1.78, 2.37, 3.56 \text{ J/cm}^2$ 下最大压应力分别为 $4.63, 5.41, 6.68, 8.72 \text{ GPa}$; 最大拉应力出现在材料深度 $7.5 \mu\text{m}$ 处, 在不同能量密度 $1.42, 1.78, 2.37, 3.56 \text{ J/cm}^2$ 下最大拉应力分别为 $2.18, 2.65, 3.36, 4.63 \text{ GPa}$ 。

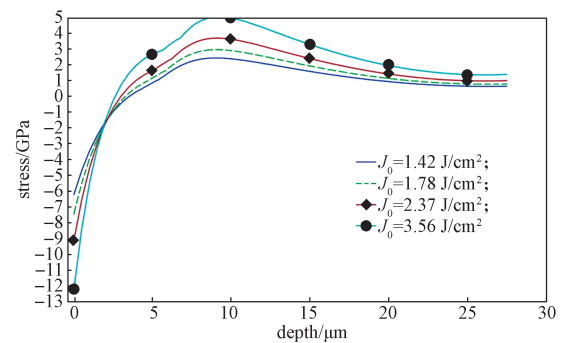
由图5c可知, 激光脉冲数为30时, 在不同能量密度 $1.42, 1.78, 2.37, 3.56 \text{ J/cm}^2$ 下最大压应力分别为 $6.17, 7.49, 9.11, 12.32 \text{ GPa}$; 最大拉应力出现在材料深度 $8.1 \mu\text{m}$ 处, 在不同能量密度 $1.42, 1.78, 2.37, 3.56 \text{ J/cm}^2$ 下最大拉应力分别为 $2.38, 2.97, 3.68, 4.98 \text{ GPa}$ 。



a) 10个脉冲



b) 20个脉冲



c) 30个脉冲

图5 飞秒激光烧蚀材料18Cr2Ni4WA的热应力空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of thermal stress in femtosecond laser ablation material 18Cr2Ni4WA

综上,压应力的最大值随着激光能量密度和脉冲数的增加而增大。拉应力随着深度的增加先增大后减小。随着激光脉冲数的增加,拉应力的最大值逐渐向材料深度方向移动。

实际上,在激光辐照面齿轮的过程中,材料内部沉积的激光能量随深度呈指数级降低。因此,材料不同深度的温度不同,热应力在材料内部沿深度方向的分布也不均匀。这种不均匀性导致了材料不同深度的热膨胀速度不同。当压应力挤压表面晶格向材料内部运动时,相邻原子之间的距离会进一步缩小,导致原子之间的斥力迅速增长。材料内部热膨胀速度的极不均匀性,阻碍了扩散机制的形成,原子之间的斥力最终会达到足以克服压应力的程度,从而将材料喷射出去。

4 实验过程及结果分析

4.1 实验条件

面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 是一种常用合金渗碳钢,具有强度大、韧性好、淬透性良好等特性。面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的主要化学成分如表 4 所示,实物如图 6 所示。

表 4 面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的主要化学成分

Table 4 Chemical composition of face gear material 18Cr2Ni4WA

成分	Ni	Cr	W	Mn	Si	C	Cu	P	S
质量分数/%	4.19	1.49	0.89	0.37	0.24	0.16	0.100	0.012	0.011



图 6 面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 实物图

Fig. 6 Picture of 18Cr2Ni4WA face gear material

实验采用 FemtoYL-100 工业飞秒激光器。飞秒激光加工系统主要由计算机系统、飞秒激光器、折射镜、激光扩束器、三维振镜系统、CCD 监测系统、测距仪、四轴移动平台、照明系统和吹气系统等组成,如图 7 所示。

衡量烧蚀效果最主要的指标是材料表面及层深分布的残余应力。残余应力的测量方法主要分为有损及无损两大类。本实验选用 X 射线无损测量方法对齿面烧蚀后的残余应力进行测量。X 射线应力测定仪为 Stresstech Oy 公司 X-350A 型。

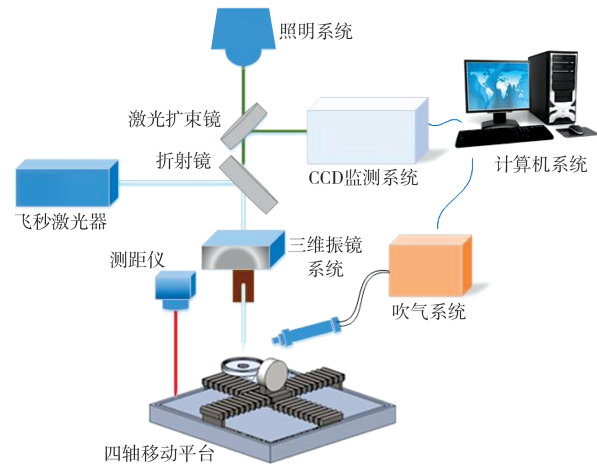


图 7 飞秒激光加工系统

Fig. 7 Femtosecond laser processing system

4.2 齿面残余应力分析

如图 5 所示,激光烧蚀面齿轮时,等离子体冲击波会对烧蚀区域施加 GPa 量级的动态压力,并以应力波的形式向材料内部传递。当动态压力作用于烧蚀区域时,其压力远大于材料的动态屈服极限,使材料表面发生塑性变形甚至喷射出去。随着应力波向材料内部传播距离的增大,应力波的峰值压力快速减小,且经过很短的距离后就小于材料的动态屈服极限,无法使材料发生塑性变形。激光烧蚀后造成的塑性变形使材料表层产生了残余压应力,为保持材料自身的应力平衡,在次表层会产生相应的残余拉应力。

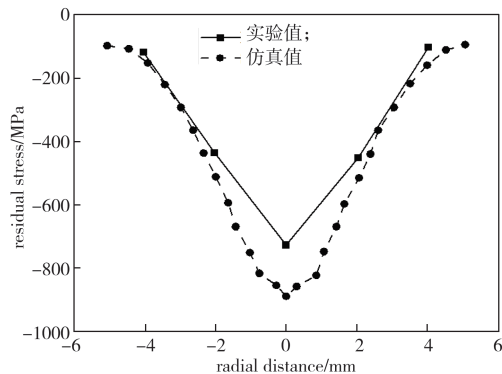
在脉冲能量 30 J、波长 1064 nm、光斑直径 4 mm 的激光参数下,用温度-应力耦合模型对 18Cr2Ni4WA 材料进行激光烧蚀仿真,得到残余应力在烧蚀表层径向与层深方向的分布情况。仿真结果和文献 [17] 的实验结果如图 8 所示。

由图 8a 可知,仿真中,在 -4, -2, 0, 2, 4 mm 处表层径向残余应力分别为 -154.6, -511.4, -857.3, -514.3, -159.4 MPa。相同激光参数下,文献 [17] 在相同点位测量的残余应力分别为 -121.9, -429.4, -726.5, -445.4, -106.2 MPa。可见,仿真结果与实验结果的两条曲线具有良好的一致性。最大残余应力位于烧蚀中心位置,实验烧蚀中心的残余压应力为 -726.5 MPa,仿真烧蚀

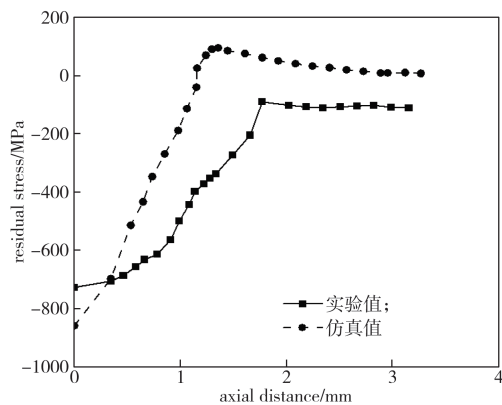
中心的残余应力为 -857.3 MPa 。

由图 8b 可知, 实验与仿真的烧蚀中心处层深方向的残余应力分布曲线整体走势相似, 残余压应力均逐渐减小; 仿真结果的残余压应力层深(应力降到 0 的深度)为 1.22 mm , 实验结果的残余应力层深(应力几乎不再变时的深度)为 1.72 mm 。

由以上可知, 温度-应力模型能对激光烧蚀面齿轮残余应力进行较好的预测, 预测误差在 20% 之内。造成实验与仿真残余应力误差的主要原因有: 1) 仿真中残余应力层厚度小于实验所得到的压力层厚度; 2) 实验所用面齿轮材料内部初始应力并不为 0。经过前面工序加工后, 材料内部存在一定应力, 这种应力的存在会对激光烧蚀所产生的残余应力分布造成影响。



a) 残余应力径向分布图



b) 残余应力层深方向分布图

图 8 齿面烧蚀表层残余应力仿真与实验结果图

Fig. 8 Residual stresses between simulation and experiment of tooth surface ablation surface

4.3 烧蚀齿面形貌分析

飞秒激光加工结束后, 采用光学显微镜观察齿面烧蚀形貌特征。不同激光能量密度下面齿轮的烧蚀显微形貌如图 9 所示。

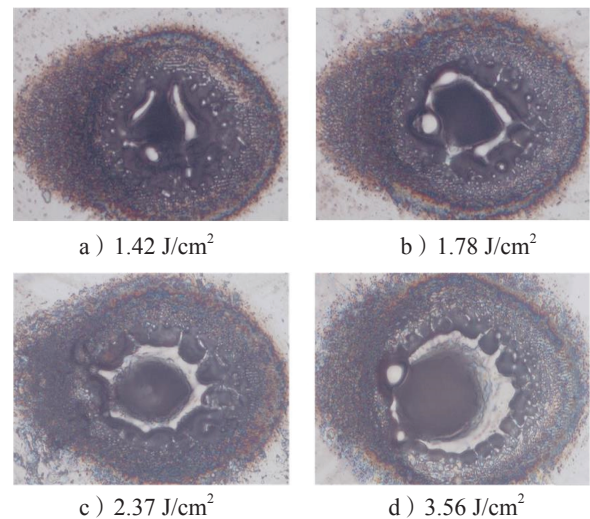


图 9 不同能量密度下面齿轮凹坑显微图

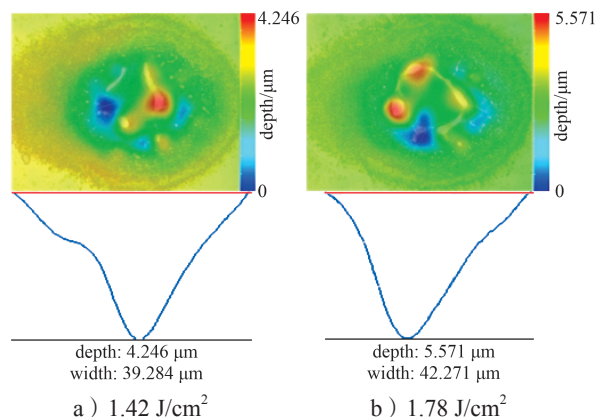
Fig. 9 Microscopic images of face gear pits under different energy densities



彩图

由图 9 可知, 当激光能量密度为 1.42 J/cm^2 时, 熔融区域集中残留在凹坑底部位置, 而残留在烧蚀凹坑四周的熔融物较少; 当激光能量密度增加到 1.78 J/cm^2 时, 残留在凹坑中心的熔融物较多, 且凹坑四周熔融物也逐渐增加; 当激光能量密度增加到 $2.37, 3.56 \text{ J/cm}^2$ 时, 残留在凹坑四周的熔融物非常多, 但烧蚀凹坑中间的熔融物几乎没有。这是因为随着激光能量密度的增加, 烧蚀区域的动态压力随之增大, 在动态压力的作用下, 熔融物开始从烧蚀中心区域向四周喷射。熔融的液态材料在喷射过程中重新冷却结晶并附着在面齿轮表面, 使齿面出现了由液滴和液流凝固形成的凸起结构。

图 10 展示了不同能量密度下烧蚀凹坑的三维超景深显微形貌(三维超景深显微镜为上海浩视仪器科技有限公司 HIROX KH-7700 型)。



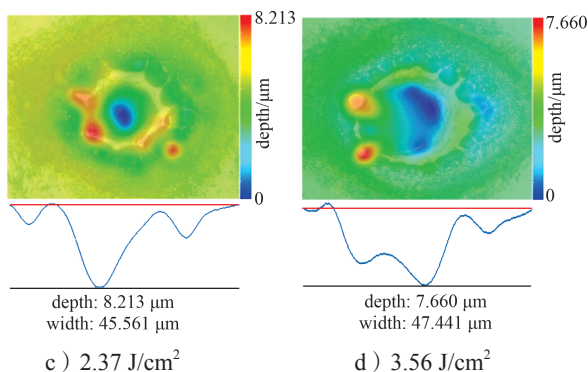


图 10 不同能量密度下烧蚀凹坑三维超景深显微图像

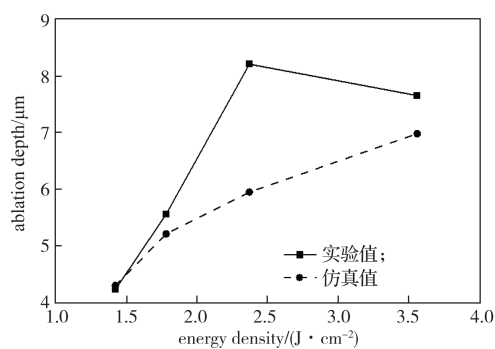
Fig. 10 3D super-depth microscopic images of ablation pits under different energy densities



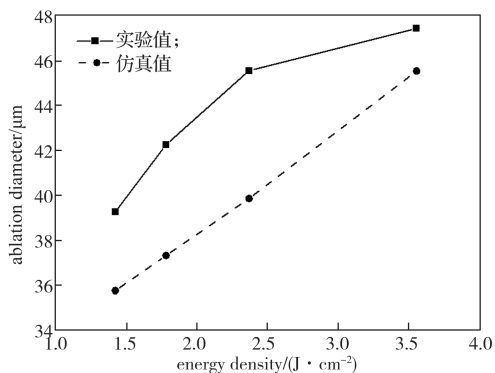
彩图

由图 10 可知, 能量密度为 1.42 J/cm^2 时, 烧蚀凹坑的直径和深度分别为 $39.284, 4.246 \mu\text{m}$; 能量密度为 1.78 J/cm^2 时, 烧蚀凹坑的直径和深度分别为 $42.270, 5.571 \mu\text{m}$; 能量密度为 2.37 J/cm^2 时, 烧蚀凹坑的直径和深度分别为 $45.561, 8.213 \mu\text{m}$; 能量密度为 3.56 J/cm^2 时, 烧蚀凹坑的直径和深度分别为 $47.441, 7.660 \mu\text{m}$ 。可见, 随着激光能量密度的增加, 烧蚀凹坑的直径和深度逐渐增大, 但是过大的激光能量密度会造成熔融物的堆积, 反而造成烧蚀深度减小。如图 10a 和 b 所示, 在较低的激光能量密度下, 烧蚀凹坑的底部和两侧轮廓比较光滑平整。如图 10c 和 d 所示, 在较高的激光能量密度下, 烧蚀凹坑的底部变得十分不规整, 存在许多凸起的点。这些凸起会增加齿面的粗糙度, 对面齿轮的加工精度造成影响。

在激光脉宽 300 fs 、激光光斑半径 $20 \mu\text{m}$ 、激光脉冲数 30、重复频率 200 kHz 的激光参数下, 烧蚀深度和烧蚀直径的实验值与仿真值随激光能量密度的变化如图 11 所示。由图 11 可知, 烧蚀深度和烧蚀直径的实验值均比仿真值大, 相对误差分别达到 31.5% 和 13.1% 。造成误差的主要原因有: 1) 使用三维超景深显微镜测量时, 存在人为误差与设备自身误差; 2) 仿真时, 齿面烧蚀做了条件假设和简化处理, 故仿真模型与实际情况存在一定差别; 3) 当飞秒激光烧蚀齿面时, 烧蚀区域处于高温高压状态, 达到熔化温度的材料在压应力作用下会离开初始位置, 飞溅并附着到其它位置, 温度冷却后重新冷凝成固态, 故烧蚀凹坑表面出现凹凸不平。



a) 烧蚀深度随能量密度的变化



b) 烧蚀直径随能量密度的变化

图 11 烧蚀深度及烧蚀直径的仿真值与实测值对比曲线

Fig. 11 Comparison curves between simulated and measured values of maximum ablation depth and ablation diameter

5 结论

本文构建了温度 - 应力耦合模型, 进行飞秒激光烧蚀面齿轮材料 $18\text{Cr}2\text{Ni}4\text{W}$ 的凹坑形貌研究, 采用 COMSOL 软件仿真分析飞秒激光烧蚀面齿轮在激光能量密度在 $1.42\sim 3.56 \text{ J/cm}^2$ 范围内温度与应力的演变规律, 并将飞秒激光烧蚀面齿轮的实验结果与仿真结果进行对比。结果表明: 残余应力的实验值与仿真值在层深方向上的分布走势基本一致, 相对误差在 20% 之内; 烧蚀凹坑直径和深度随激光能量密度的增加而增大; 当激光能量密度为 1.78 J/cm^2 时, 凹坑烧蚀形貌较好, 但随着激光能量密度的继续增加, 烧蚀形貌逐渐变差。本文的研究结果可为提高面齿轮飞秒激光精微加工质量提供参考。

参考文献:

- [1] MING X Z, GAO Q, YAN H Z, et al. Mathematical Modeling and Machining Parameter Optimization

- for the Surface Roughness of Face Gear Grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(9): 2453–2460.
- [2] HASHIDA M, MISHIMA H, TOKITA S, et al. Non-Thermal Ablation of Expanded Polytetrafluoroethylene with an Intense Femtosecond-Pulse Laser[J]. Optics Express, 2009, 17(15): 13116–13121.
- [3] 林嘉剑, 明 瑞, 李学坤, 等. 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的形貌特征研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(14): 175–185.
- LIN Jiajian, MING Rui, LI Xuekun, et al. Study on Morphology Characteristics of Femtosecond Laser-Ablated Face Gear Materials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 175–185.
- [4] 明 瑞, 申警卫, 赖名涛, 等. 面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的飞秒激光精微烧蚀特性研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 253–263.
- MING Rui, SHEN Jingwei, LAI Mingtao, et al. Characteristics of Femtosecond Laser Microprecision Ablation of 18Cr2Ni4WA Steel Used in Face Gears[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 253–263.
- [5] WANG X W, XU X F. Thermoelastic Wave in Metal Induced by Ultrafast Laser Pulses[J]. Journal of Thermal Stresses, 2002, 25(5): 457–473.
- [6] CHEN J, BERAUN J, THAM C. Comparison of One-Dimensional and Two-Dimensional Axisymmetric Approaches to the Thermomechanical Response Caused by Ultrashort Laser Heating[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2002, 4(6): 650.
- [7] 钟发成. 组合脉冲激光致单晶硅热力作用的数值计算 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- ZHONG Facheng. Numerical Calculation of Thermal Action of Single Crystal Silicon Caused by Combined Pulse Laser[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [8] 罗鸿玮. 飞秒脉冲激光辐照 Al/PTFE 活性材料的热力效应研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021.
- LUO Hongwei. Thermal and Mechanical Effects of Al/PTFE Reactive Materials Irradiated by Femtosecond Pulsed Laser[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2021.
- [9] 郑瑞伦, 刘 俊. 强激光辐照下金属材料表面热力学效应 [J]. 光子学报, 2002, 31(4): 480–484.
- ZHENG Ruilun, LIU Jun. Thermodynamic Effect of the Metal Material Face Irradiated by Strong Laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(4): 480–484.
- [10] ZHIGILEI L V, GARRISON B J. Microscopic Mechanisms of Laser Ablation of Organic Solids in the Thermal and Stress Confinement Irradiation Regimes[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88(3): 1281–1298.
- [11] MOSHE E, ELIEZER S, DEKEL E, et al. Measurements of Laser Driven Spallation in Tin and Zinc Using an Optical Recording Velocity Interferometer System[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 86(8): 4242–4248.
- [12] IHLEMANN J, WOLFF B, SIMON P. Nanosecond and Femtosecond Excimer Laser Ablation of Fused Silica[J]. Applied Physics A, 1992, 54(4): 363–368.
- [13] SAVCHUK A I, PERRONE A, LORUSSO A, et al. ZnMnO Diluted Magnetic Semiconductor Nanoparticles: Synthesis by Laser Ablation in Liquids, Optical and Magneto-Optical Properties[J]. Applied Surface Science, 2014, 302: 205–208.
- [14] HUANG J, ZHANG Y W, CHEN J K. Ultrafast Solid-Liquid-Vapor Phase Change in a Thin Gold Film Irradiated by Multiple Femtosecond Laser Pulses[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(13/14): 3091–3100.
- [15] 张 凯. 铁基金属材料的超短脉冲激光烧蚀机理及实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- ZHANG Kai. Ultrashort Pulse Laser Ablation Mechanism and Experimental Study of Iron-Based Metal Materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [16] 王 震, 付文静, 张蓉竹. 飞秒激光多脉冲烧蚀金属铁的数值模拟 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 74–78.
- WANG Zhen, FU Wenjing, ZHANG Rongzhu. Numerical Simulation of Femtosecond Laser Multi-Pulse Ablation of Metal Iron[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 74–78.
- [17] 程冠华. 齿轮齿根激光冲击强化及其抗疲劳性能试验和仿真研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- CHENG Guanhua. The Experimental and Simulation Study on Laser Shock Processing and Fatigue Life of Gear Tooth Root[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.

(责任编辑: 邓 彬)

(下转第 49 页)