引文格式：肖强, 曾献城, 魏群. 航空发动机涡轮叶片气膜孔制备仿真与试验研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(14): 34–41.
XIAO Qiang, ZENG Xiancheng, WEI Qun. Simulation and experimental study on preparation of air film holes for aero-engine turbine blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(14): 34–41.

航空发动机涡轮叶片气膜孔制备仿真与试验研究*

肖　强，曾献城，魏　群
（西安工业大学，西安 710021）

[摘要] 传统的气膜孔加工方式，例如钻削、电火花等在加工过程中会产生裂纹、重铸层、锥度等问题，无法满足对气膜孔的高精度和高质量要求，从而对叶片的寿命产生不同程度的影响。不同于传统的气膜孔加工方式，激光加工气膜孔是一种高精度的加工方式。但是，当飞溅物无法从气膜孔完全排出时，会在孔壁形成重铸层，进而对气膜孔的质量产生影响。本文主要对飞秒激光加工气膜孔的过程进行了仿真研究，分析了气膜孔从开始烧蚀到结束的形貌变化、所产生的金属气体的温度及速度变化，然后通过改变不同的激光参数，得出重铸层厚度受到激光功率和脉冲宽度的影响，激光功率增大可以减小重铸层厚度，但是激光功率也不能无限增大，否则会造成过度烧蚀。而脉冲宽度与重铸层厚度并不呈现简单的线性关系。因此，为了减小重铸层厚度，提出了先加工出尺寸小于实际所需的气膜孔，然后再对其进行扩孔的加工方式。通过试验验证，扩孔加工可以显著提高气膜孔质量。

关键词：飞秒激光；气膜孔；仿真；重铸层；扩孔
中图分类号：V235.1；TH132.2　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2025.14.034

肖　强
教授，博士，研究方向为特种加工。

航空发动机制造水平代表着一个国家的高端制造水平，涡轮叶片是航空发动机的最关键部件之一。涡轮叶片被称为航空发动机的心脏，其制造水平对飞机的动力、寿命和可靠性都有着重要的影响[1–3]。随着对航空发动机性能要求的不断提升，对于涡轮叶片制造的工艺水平也提出了巨大的挑战，但其工作环境极为恶劣，承受着高温高压燃气的冲击。涡轮叶片主要采用气膜冷却技术来降低叶片工作时的表面温度，气膜冷却技术是保证叶片在极端高温环境下稳定高效运行的重要技术。在发动机叶片上加工出特定位置排布、孔径大约在 0.2~0.8 mm 的微孔，称为气膜孔。发动机在运行过程中，空气通过气膜孔在叶片表面形成一层气膜，将叶片表面与炽热的燃气隔开，隔绝高温燃气从而降低温度，达到冷却叶片的目的[4–7]。这种冷却孔在一个叶片上有数百个之多，并且具有复杂的空间角度，气膜孔位置分布与加工精度都会影响气膜的冷却效率，气膜孔的内壁质量（裂纹、沟槽、重铸层、氧化层等）会对整个叶片的寿命产生影响，若实际加工出的气膜孔存在内壁质量缺陷，则整个叶片的疲劳性能将会大大下降，导致整个发动机的可靠性降低。气膜孔的加工质量和精度是影响涡轮叶片和航空发动机性能的关键因素，直接影响飞机的安全性和可靠性，由此可见，加工出符合要求的高质量气膜孔至关重要[8–12]。

本文通过建立仿真模型来分析烧蚀过程中气膜孔的形貌变化，对比

* **基金项目：**教育部产学合作协同育人项目（230702436294044）；大学生创新训练计划（S202410702106）；西安科技局项目（24GXFW0032）；陕西省特种加工重点实验室开放基金（SXTZKFJJ201902）。

随激光参数变化熔融飞溅物等重铸层的不同变化。在传统加工方法的基础上，本文提出一种创新性方法，即先加工出尺寸小于实际需求的气膜孔，再通过扩孔的方法完成加工，最后将气膜孔沿直径切开，对比不同加工参数下的气膜孔加工精度，进而优化加工参数，实现高质量气膜孔的制备。

1 激光烧蚀材料的数学模型建立

在飞秒激光烧蚀材料进行去除时，工件吸收大量能量后先转变为液态，继续吸收能量后金属液体开始出现汽化现象，在这一时刻激光烧蚀区域同时存在固态、液态和气态 3 种不同状态的金属物质。金属蒸气喷出被加工区域时会产生相应的反冲压力，从而推动金属液体同时进行飞溅去除，最终形成凹坑。随着烧蚀时间的延长，凹坑的面积和体积增大，当材料表面低于激光焦点作用的位置时激光烧蚀结束，此时凹坑表面存在的少量未被喷溅出去熔融的金属形成重铸层，通过调整焦点的位置下降不断重复上述烧蚀过程，最终加工出气膜孔。激光烧蚀材料示意图如图 1 所示。

随着时间的改变而发生运动的界面被称之为水平集界面，是由 Osher 和 Sethian 提出的概念，是一种用于界面追踪和形状建模的数值技术。对于任意时刻 t，流体流动界面上的任意点均满足 $\varphi(x,y,z;t)=0$，关于 t 求解偏微分方程后可得

$$\begin{cases}\varphi_t+U(x,y,z;t)\cdot\nabla\varphi=0\\ \varphi_t+(U\cdot\boldsymbol{n})|\nabla\varphi|=0\end{cases} \tag{1}$$

式中，φ 为距离函数；$\boldsymbol{n}$ 为界面法线向量，则 $U\cdot\boldsymbol{n}$ 为相界面的移动速度。

考虑到材料蒸发时界面的移动速率 F_v 及熔融液体引起的界面速率 F_l，则有

$$\varphi_t+(F_v+F_l)|\nabla\varphi|=0 \tag{2}$$

由于流体流动出现内部间断会导致微分方程失去意义，根据间断条件，材料蒸发去除后的质量减少部分可以表示为式（3）[13]，同时可以得到材料去除时气液接触界面的下降速度 F_v。

$$\dot{m}_v=\rho_{l/v}\left(\frac{R_vT_{l/v}}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}}-\left(\frac{R_vT_v}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}}\beta F_m\rho_vF_v \tag{3}$$

式中，$T_{l/v}$ 为气液接触界面处的温度；$\rho_{l/v}$ 为气液界面的材料密度；R_v、F_m 为常量；ρ_v 为 Knudsen 层内蒸气密度；T_v 为喷溅液温度。

喷射液质量 $m=u_v/\sqrt{2R_vT_v}$，均可通过间断条件由 $T_{l/v}$ 导出。

$$R_v=R/M_{mol,l} \tag{4}$$

式中，R 为气体状态常数；$M_{mol,l}$ 为金属摩尔质量。

$$\begin{cases}F_m=\sqrt{\pi}m(-1+\mathrm{erf}(m)+\exp(-m^2))\\ \mathrm{erf}(m)=\dfrac{2}{\sqrt{\pi}}\displaystyle\int_0^m\mathrm{e}^{-t^2}\mathrm{d}t\\ p_{l/v}=0.55p_{sat}=\\ \quad 0.55\cdot p_a\exp\left(\dfrac{L_v(T_{l/v}/T_b-1)}{R_vT_{l/v}}\right)\end{cases} \tag{5}$$

式中，p_a 为大气压强；p_{sat} 为喷射压强。

材料蒸发过程中气液界面压力的平均值可以用反冲压力来表示，即

$$p=\frac{1}{2}\overline{p_{l/v}} \tag{6}$$

则在反冲压力的作用下，可以得到金属液体的飞溅速度公式，即

$$V_l=\sqrt{\frac{2p}{\rho_l}} \tag{7}$$

材料被去除的部分分为两类：一类是液态材料的飞溅，另一类是气态材料的蒸发，根据能量守恒定律有

$$\frac{\mathrm{d}m_s}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}m_v}{\mathrm{d}t}+\frac{\mathrm{d}m_l}{\mathrm{d}t} \tag{8}$$

式中，m_s、m_v、m_l 分别为固态、气态和液态材料的质量。

假定孔的半径等于激光烧蚀时的有效半径 r，则式（8）近似地写为

$$A\rho_s(F_v+F_l)=A\rho_vF_v+2\pi r\delta_l\rho_lV_l \tag{9}$$

式中，A 为激光焦点的有效烧蚀面积，则熔化层厚度的平均值可以表示为

$$\delta_l\approx\alpha/F_p=\alpha/(F_v+F_l) \tag{10}$$

式中，α 为热扩散系数，$\alpha=K/\rho_lC_{pl}$，通过求解熔融液体界面的速度 $\boldsymbol{F}_l$，进而得到气液界面各点总的推进速度 F_p。

$$F_p\approx F_v+F_l \tag{11}$$

2 气膜孔形成的数值模拟仿真

选用 COMSOL Multi-physics 仿真分析软件，选用流体传热模块以及层流两相流、水平集方法模块来模拟飞秒激光烧蚀高温合金的过程。在激光热源烧蚀过程中材料会发生相变，因此将其视为密度无限大的流体来进行模拟，其中需要考虑反冲力、表面张力、重力及马兰戈尼效应的影响。建立有限元分析模型，对飞秒激光烧蚀时材料的形貌变化、飞溅现象、温度变化、流体的速度以及孔壁熔融液态的厚度进行模拟分析，研究相关参数的改变对气膜孔形貌的

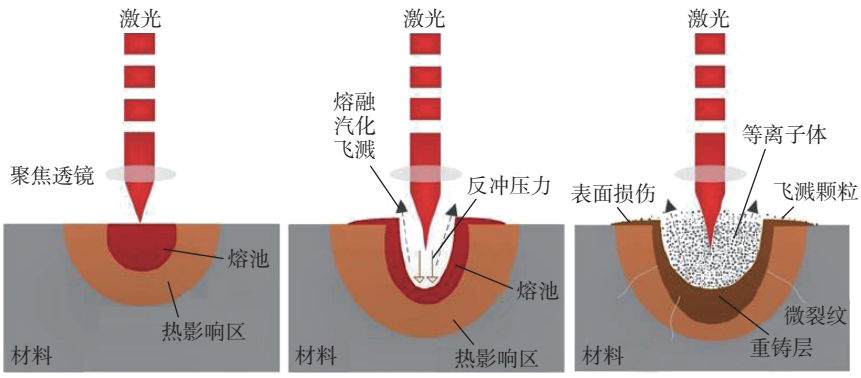


图 1 激光烧蚀材料示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser ablation materials

影响，图 2 所示为加工区域的相变转化示意图。为了提升计算结果的精确性，使其可以准确地反映出烧蚀过程的变化和飞溅效果，需要对与材料和空气接触的上表面进行更细网格的划分，并且对工件与空气接触界面的网格进行边界层化。整个区域分为 3 层，上层和下层为空气域，中间为工件，整体上设置为流体的传热来进行模拟仿真，将工件中间部分的黏度设置为无限大，当材料开始出现熔化汽化现象后降低材料的黏度。划分网格时首先对这 3 层区域进行整体的三角形网格划分，然后对中间固体区域的网格进行加密，加密完中间区域之后，对固体与空气接触界面的附近区域进行调整，使其衔接紧密完整。当激光的能量作用到材料的上表面时，能量传递和烧蚀现象就开始发生了，设置初始条件和边界条件如下。

（1）初始条件。

$t=0$ 即为初始时间，也是飞秒激光作用在材料上表面的一瞬间，即

$$T(x, y, 0)=T_0, \boldsymbol{u}=0, P=0 \quad (12)$$

（2）边界条件。

在中间金属材料上、下边界为

$$k\nabla T=0, \boldsymbol{u}=0 \quad (13)$$

在气体区域上、下出口边界为

$$[\mu(\nabla u+(\nabla \mathrm{u})^{\mathrm{T}})]\boldsymbol{n}=0, P=P_0 \quad (14)$$

2.1 气膜孔几何形貌动态分析

图 3 所示为仿真模拟飞秒激光烧蚀气膜孔过程中的形貌变化。当激光作用时长 t 为 0.022 s 时材料被打穿，可以看到，气膜孔的入口和内壁处有较多的挂渣和碎屑，出口处的熔融飞溅物相对于入口处较少。图 3（a）所示为激光刚开始烧蚀出小熔池的阶段，在激光的照射下材料开始产生熔融金属液体并伴随着气态金属的蒸发，从图 3（b）可以明显地观察到液态金属在蒸气的反冲压力作用下发生了剧烈的飞溅现象。随着激光烧蚀过程的不断进行，汽化后的金属蒸气充满了整个上层空气域，飞溅物质也增多。在激光烧蚀的后续阶段，飞溅物质和金属蒸气不断增加和累积，部分会掉落到气膜孔的入口处形成挂渣，从图 3（c）可以看到，当激光作用 0.02 s 时，气膜孔即将被打穿，由于材料的被加工部分吸收了大量的热量发生熔化，在即将打穿的材料底部可以看见微小的凸起。在图 3（d）中，此时激光作用时间达到了 0.022 s，气膜孔被完全打穿，气膜孔的出口处掉落了少量的碎屑，对比气膜孔的入口处可以发现，入口处的飞溅物较多，这主要是在反冲力的作用下，部分飞溅物掉落到了孔的入口处，不断累积形成了重铸层，气膜孔内壁也存在少量的重铸层，这是由于气膜孔在烧蚀过程中存在一部分未排出的残渣，气膜孔被打穿后金属蒸气也从气膜孔的出口扩散到下层的空气域。

2.2 飞溅现象的机理分析

在飞秒激光开始烧蚀材料时立刻就发生固体材料的相变现象，金属液体被高速向外喷发的气流带走，一部分克服金属液体所受的表面张力，借助金属蒸气的反冲压力发生分离，然后飞溅出未打穿的气膜孔，另外一部分在金属蒸气的带动下离开熔池，然后熔池中的金属液体在温度导致的梯度力下进行流动，从而将热量传递给周围的固态金属。

形成气膜孔的过程中流体速度较大，这会发生惯性移除及马兰戈尼效应，这是造成液态金属飞溅物较多的原因。熔融的金属液体提高了对激光能量的吸收效率，随着熔池温度逐渐升高，使得部分材料发生汽化现象，此时大量的等离子体会聚集在烧蚀区域的上方，从而形成了高温高压

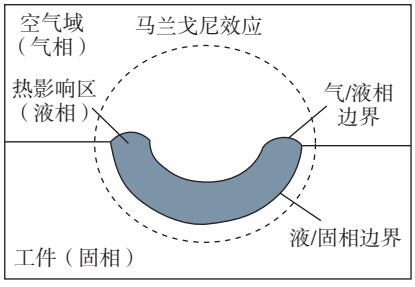
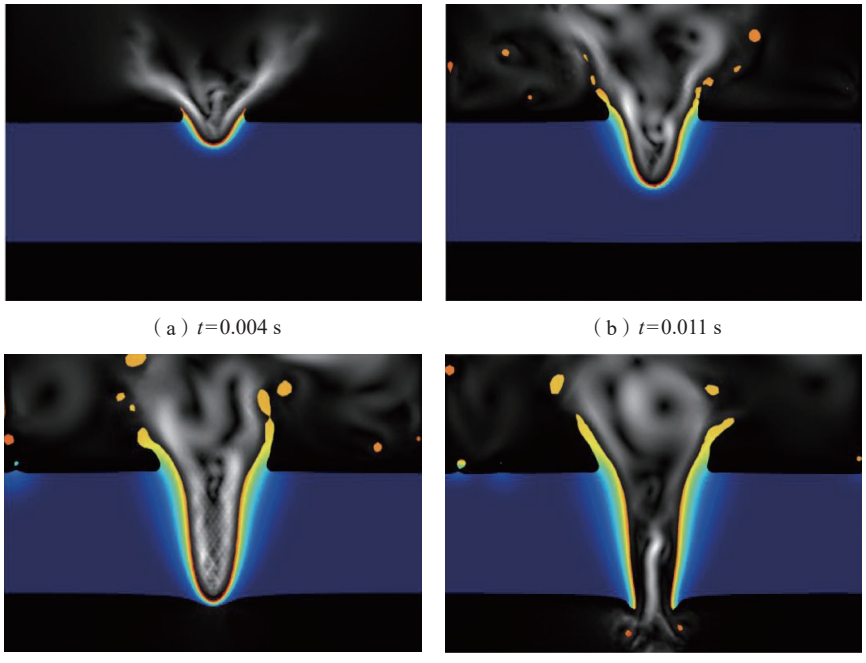


图 2 激光烧蚀区域相变转化示意图

Fig.2 Schematic diagram of phase transition transformation in laser ablation area



（a）t=0.004 s　（b）t=0.011 s

（c）t=0.020 s　（d）t=0.022 s

图 3 激光烧蚀过程中不同时刻的形貌变化

Fig.3 Morphological changes at different time during laser ablation process

的蒸气团，蒸气团具有极高的能量，所产生的反冲压力也极大，其作用在熔融材料的表面并使其飞溅排出。从不同时刻的流体速度仿真图像可以看出，靠近气膜孔内壁的气体流速大于气膜孔中间的流速，这也是在加工气膜孔时飞溅物从孔的外周边缘喷发出的原因，然而这也导致气膜孔的出口处会残留较多的飞溅物，飞溅物不断累积就会形成毛刺、碎屑等，降低气膜孔的质量，如图 4 所示。由于仿真模型设置的是二维剖视的视角，因此无法观察到气膜孔入口和出口的圆度，需要配合相应的试验才能得出结论。

熔融液体飞溅量是由很多种因素共同影响的，例如激光功率的大小、离焦量的大小，这些因素主要影响的是材料对能量的吸收，对能量吸收率的大小会影响孔内壁熔融金属的厚度，飞溅出去的物质越多内壁黏附的就越少。因此，在此激光烧蚀气膜孔的模型中导出了镍基高温合金的温度场，不同时间的温度场变化如图 5 所示。

在激光开始烧蚀时，图 5（a）中的红色高温部分面积较小，此时还处于初始加工的阶段，发生了少量的熔化现象，产生轻微的凹坑，此时激光作用时间为 0.004 s，最高温度达到了 3.79×10^3 K，随着烧蚀时间的增长，工件热烧蚀区域进一步加大，小孔深度也持续增加，在总烧蚀时间的一半时，最高温度为 3.82×10^3 K，在烧蚀时长为 t=0.02 s 时，气膜孔即将被打穿，可以发现，此时孔内的最高温度已经开始下降了，在 t=0.022 s 时，气膜孔被完全打穿，最高温度已经下降到 3.18×10^3 K。

不同时刻气膜孔内壁最高温度的变化如图 6 所示。通过以上分析可知，气膜孔在加工过程中，很快就会被加热到最高温度，此时会产生飞溅现象，从而进行材料去除。随着激光辐照时间的增加，激光烧蚀区域逐渐变大。在气膜孔即将被打穿时，由于激光离焦量增大等具体因素（比如设备参数变化等）的影响，温度开始下降。当气膜孔被打穿后，离焦量进一步增大，气膜孔的加工过程结束。整个烧蚀过程中可以观察到，从

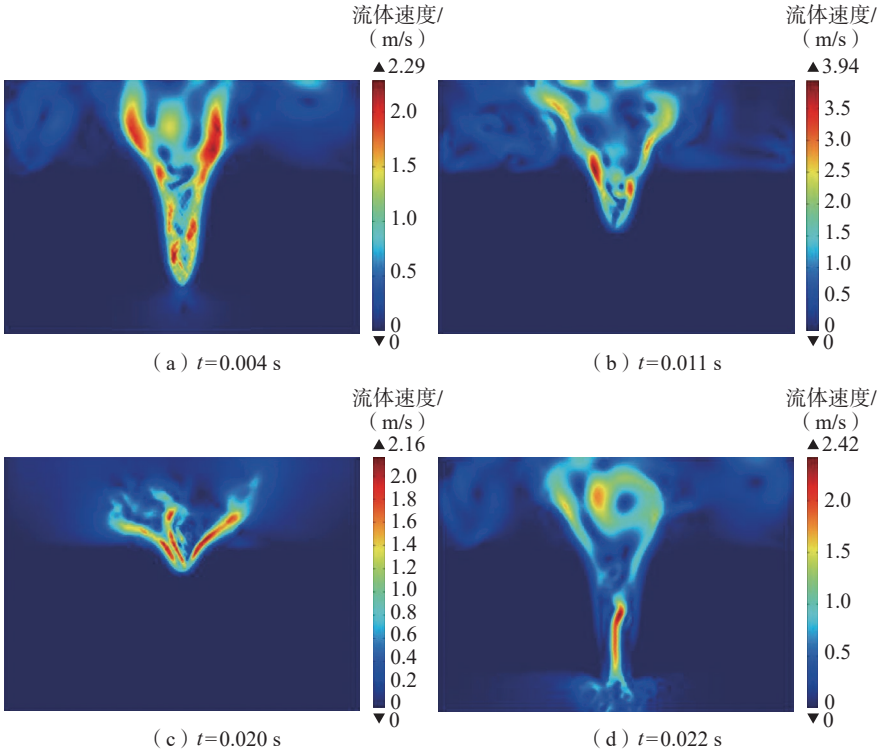


图 4　激光烧蚀过程中不同时刻的速度场

Fig.4　Velocity field at different time during laser ablation process

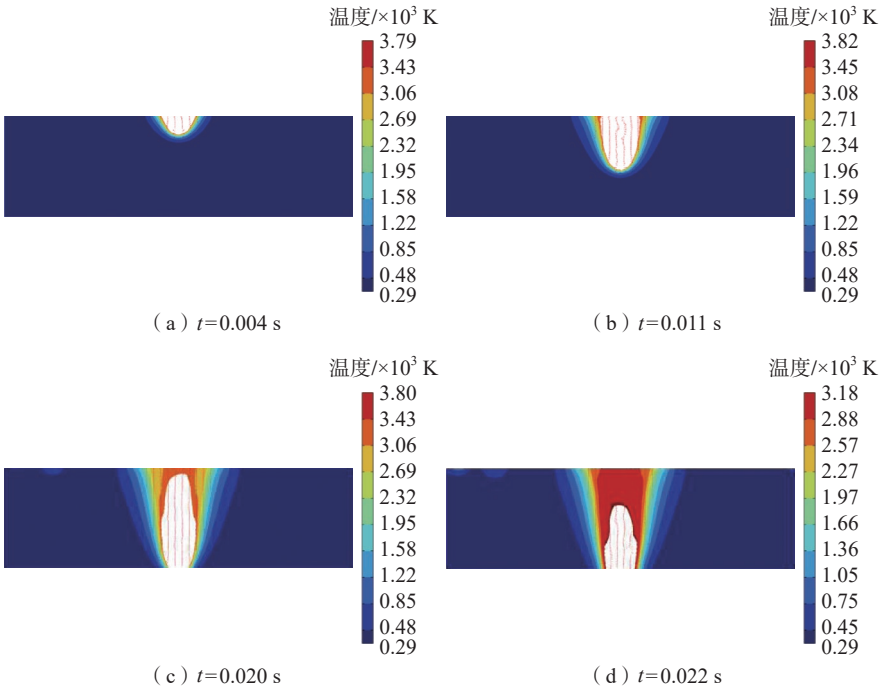


图 5　激光烧蚀过程中不同时刻的温度场

Fig.5　Temperature field at different time during laser ablation process

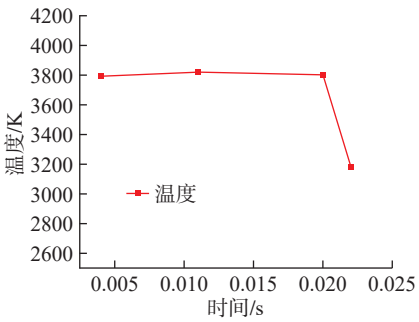


图 6　不同时刻气膜孔内壁最高温度

Fig.6　The highest temperature of the inner wall of the gas film hole at different time

径向角度来看，气膜孔中心的温度最高，孔壁的温度逐渐递减降低；从轴向角度来看，分析图 5（c）和（d）可以分析得出，熔融物排出时带走了大量的热，由于孔底部需要不停地吸收热量发生熔融飞溅，气膜孔底部的温度最高。

2.3　气膜孔的重铸层与脉冲宽度的作用关系

图 7 所示为脉冲宽度分别为 1040 fs、1050 fs、1060 fs、1068 fs 时，激光烧蚀镍基高温合金结束时（烧蚀时长为 0.022 s）的重铸层。通过观察气膜孔内壁残余熔融液体的形貌可以看出，随着脉冲宽度的逐渐增大，气膜孔入口处的碎屑及毛刺会逐渐增多，飞溅区域的外围倾斜与工件的角度逐渐减小，孔壁上熔融液体稍有增多。孔内壁无法排出的熔融金属物质会形成重铸层，所以孔内壁熔融液体的厚度即为重铸层的厚度。从图 7 的仿真图像可以看出，烧蚀结束后，脉冲宽度越小，形成的重铸层越薄；脉冲宽度越大，形成的重铸层越厚。

2.4　重铸层形成机制的分析

激光烧蚀材料时，受辐照区域材料在达到烧蚀阈值后熔融液体会随之出现。材料被去除的部分主要分为两种：第一种是材料吸收能量后开始汽化从而被去除；第二种是材料在汽化过程中需要克服金属液体的表面张力，在这个过程中产生了相应的反冲压力，反冲压力将大部分金属液体从烧蚀区域推出而产生飞溅现象。小部分没有被排出的液态物质会黏附在孔的内壁形成一部分重铸层，由于其温度极高会继续对孔内壁的材料进行微弱的热腐蚀作用，从而使得重铸层的厚度随着热腐蚀时间的延长而增加。因此得出激光烧蚀产生的重铸层大致厚度随时间变化的关系式为

$$L = 2\sqrt{Dt}\,(t \leqslant \tau) \qquad (15)$$

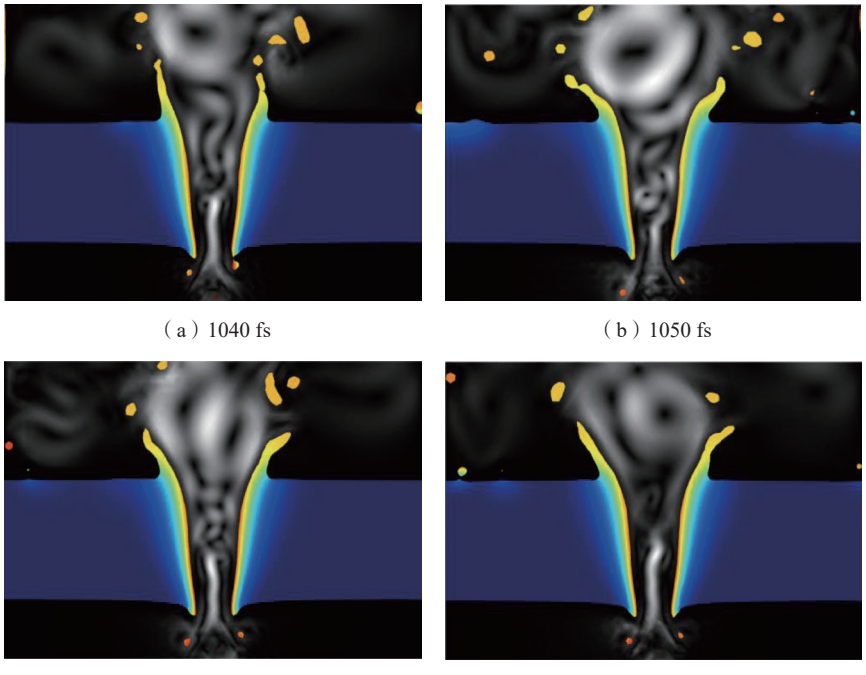
式中，L 为重铸层厚度；D 为材料热扩散系数，用来描述物体中一个点的温度变化传递到另一个点速率的量度；t 为激光持续的时间；τ 为脉冲宽度。

分析式（15）可以得出，在材料的热扩散系数 D 不变的情况下，随着脉冲宽度 τ 增大，单脉冲对材料的烧蚀时间 t 变大，导致熔融金属对周围区域的热腐蚀时间增加，因此重铸层的厚度 L 逐渐增大。分析上文的仿真模拟结果可知，孔壁重铸层的厚度从入口到出口逐渐变薄，主要原因是激光持续的烧蚀过程会不断地向孔底部传递热量，导致入口处不断吸收能量对周围材料进行热腐蚀，而出口处加工完成后激光停止，所以重铸层较少。

2.5　影响气膜孔质量的主要因素

通过前面的仿真分析可以发现，飞溅物的多少是影响气膜孔的主要因素，而飞溅物又是影响重铸层的重要原因，无法排出的飞溅物在余热的作用下形成熔融液体，会黏附在气膜孔的内壁，极大地降低气膜孔内壁的质量。重铸层的厚度会受脉冲宽度的影响，脉冲宽度越小，重铸层的厚度越薄，孔口的堆积物也会减少，所以在条件允许的情况下，尽可能地降低飞秒激光的脉冲宽度可以提高气膜孔的质量。

气膜孔的深度主要受激光功率的影响，当功率较低时，产生的反冲压力较小，无法将熔融的金属液体排出孔口，引起后续激光能量的吸收和反射，极大地影响激光加工的效率，导致气膜孔的深度降低，因此只能通过延长激光的烧蚀时间来提高气膜孔的加工深度。当加工功率足够大



（a）1040 fs　（b）1050 fs

（c）1060 fs　（d）1068 fs

图 7　不同脉宽打孔结束后重铸层的形貌

Fig.7　Morphology of the recast layer after drilling with different pulse widths

时，由于反冲压力的增加，碎片和颗粒可以很容易地飞溅出气膜孔，大大降低了气膜孔的加工时间。但较大的激光功率会造成孔边缘过度烧蚀，影响气膜孔质量，因此加工过程中应选择合适的功率。

3 飞秒激光加工镍基高温合金气膜孔试验

在仿真过程中可以发现，气膜孔在烧蚀过程中，由于残留在孔内壁和底部的熔融金属液体无法及时排出，最终会残留在气膜孔的内壁上形成重铸层，降低气膜孔的质量，导致气膜孔的锥度增大。因此在本试验中使用飞秒激光对材料进行加工时，先加工出小于实际需要的通孔，然后采用螺旋的加工方式进行扩孔，以达到提高气膜孔加工质量的目的，并与直接加工出的气膜孔形貌变化进行对比。

采用螺旋的加工方式加工出直径 0.4 mm 的通孔，然后扩大到直径 0.6 mm。后续的不同加工方式都基于直径 0.4 mm 的气膜孔进行扩孔。为了验证不同的激光加工参数对孔特性的影响，以及评估所得结果的可重复性，每种参数组合都要钻出 3 个孔。钻孔后，用乙醇超声冲洗试样，稀释激光进出侧的熔融残留物。使用金相显微镜测量气膜孔的入口和出口直径。每个直径测量 3 次，然后取算术平均值，通过入口直径和出口直径计算锥度，即

$$C=\frac{D-d}{L}\times 100 \tag{16}$$

式中，D 为入口直径，μm；d 为出口直径，μm；L 为工件的厚度，μm。

激光功率是气膜孔加工过程中最重要的参数之一，功率过大会导致过烧蚀现象，影响气膜孔的入口形貌，功率太小会导致材料无法打穿，达不到想要的效果。因此设定扫描次数为 2 次，重复频率为 30 kHz，扫描速度为 10 mm/s 的加工工艺参数，设定 4 个水平的功率分别为 3.5 W、4.0 W、4.5 W、5.0 W，依次进行试验。图 8（a）和（b）为直接打孔得出的图像，图 8（c）和（d）为扩孔加工出的气膜孔形貌，气膜孔的入口、出口孔径变化如图 9 所示，锥度与激光功率的关系如图 10 所示。

根据图 9 可以看出，在 4 种不同激光功率下，气膜孔的入口直径基本不受功率大小的影响，在 0.60 mm 上下进行轻微的浮动，但是对气膜孔出口的影响很大，造成了对锥度的影响。随着功率的增大，孔的出口直径也逐渐增大，导致锥度减小。分析原因，首先是激光功率较小时材料所获得能量较小，在相同的扫描时间下功率较小的加工方式传递给材料的能量也较小，因此材料的去除率会降低，从而导致锥度较大；其次是孔内壁所产生的重铸层使孔的锥度增大。因此，适当地增加激光功率可以提高孔出口处的激光能量密度，使加工更加充分。

激光加工结束后，沿着气膜孔直径对其进行线切割，使用白光干涉仪对孔的内壁进行观测，采用锥度最小的第 4 组对比气膜孔，图 11 为直接打孔得出的图像，图 12 为扩孔得出的图像。可以看出，扩孔得出的气膜孔内壁更加光滑，质量明显比直接加工出的气膜孔要好，扩孔得到气膜孔锥度也较小，导致这种现象出现的主要原因是直接加工孔时，上层材料的去除会伴随飞溅物与熔融物的产生，部分无法排出的熔融物黏附在孔的内壁上形成重铸层，使气膜孔的出口直径减小、质量降低，从而增大锥度。而先打出通孔后再扩孔会减少重铸层的产生，加工过程中产生的部分无法排出的飞溅物和熔融物可以从出口排出，因此可以使得气膜孔的锥度相较于直接打出的孔更小一些，气膜孔的内壁也会更加光滑。对比烧蚀仿真得到的气膜孔，扩孔加工后得到的气膜孔内壁形貌与仿真得到的气膜孔形貌吻合较好。

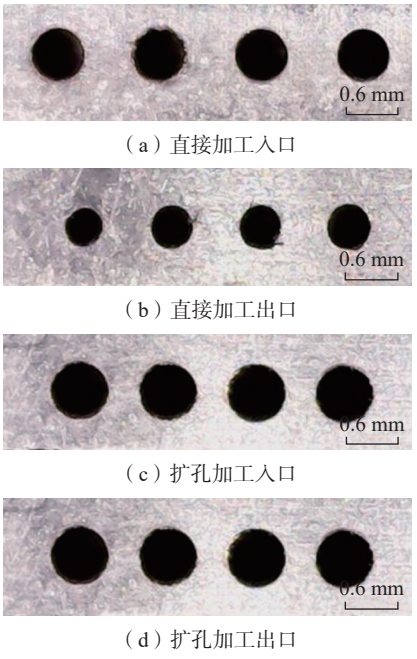


图 8 气膜孔加工金相显微图

Fig.8 Metallographic micrograph of gas film hole processing

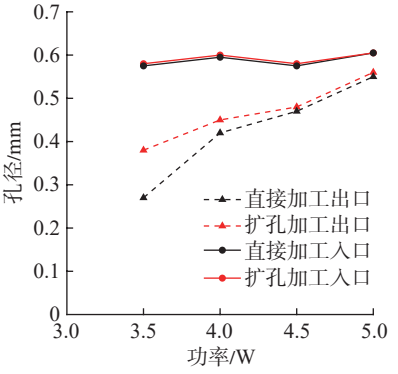


图 9 入口和出口孔径变化

Fig.9 Changes in inlet and outlet aperture

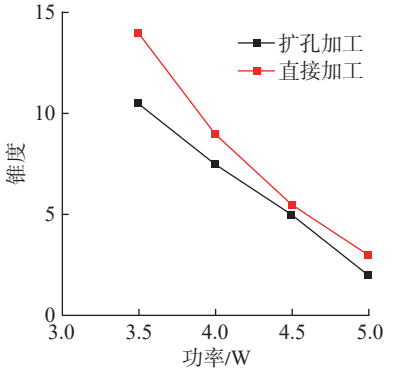


图 10 锥度变化图

Fig.10 Taper variation

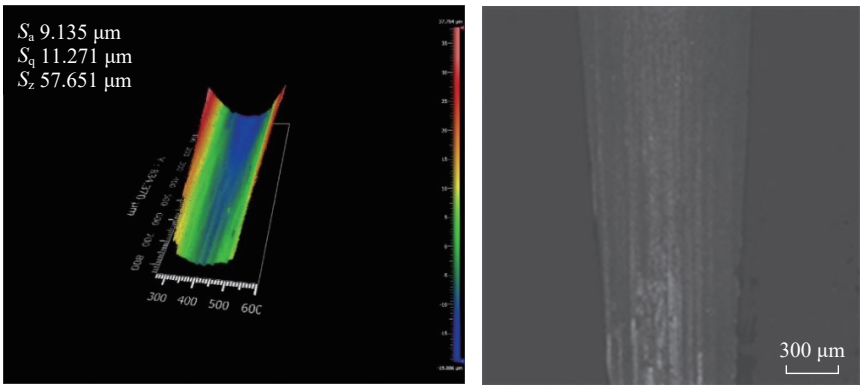


图 11　不同功率下直接加工的孔内壁形貌

Fig.11　Internal wall morphology of holes directly processed at different powers

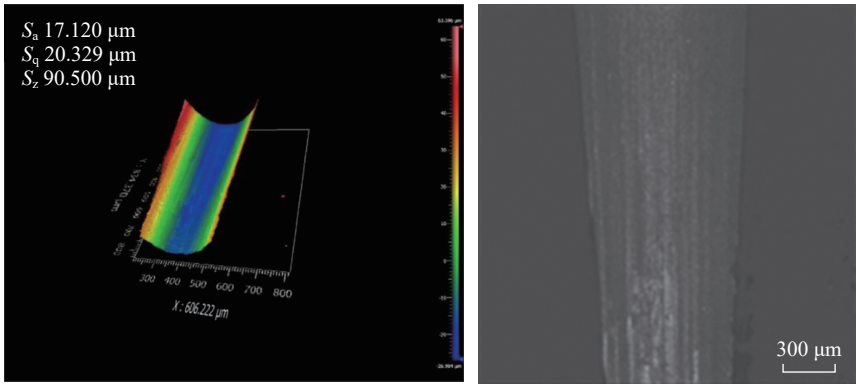


图 12　不同功率下扩孔加工的孔内壁形貌

Fig.12　Inner wall morphology of the hole during reaming at different powers

4　结论

本研究从材料的去除方式和原理入手，建立了飞秒激光烧蚀材料的数学模型，对气膜孔烧蚀过程中的飞溅现象进行了动态仿真，并对比分析直接加工气膜孔与扩孔所得的气膜孔质量。

（1）建立了激光烧蚀的热传导模型和流体流动模型，在蒸气压力的作用下，熔融金属被喷溅出形成凹坑，依据水平集原理得出了气液界面各点的推进速度。

（2）对气膜孔形成过程中飞溅现象的机理以及动态过程进行了研究，烧蚀过后的熔融液体的流体速度较大会发生惯性移除，马兰戈尼效应是造成液态金属飞溅物较多的原因。分析了孔内壁重铸层的形成和影响因素，部分没有得到足够反冲力的残余熔融液体会冷却凝固在孔壁形成重铸层，脉冲宽度是影响重铸层的重要因素，脉冲宽度越小，重铸层厚度越薄。激光功率主要对孔的深度造成影响，激光功率越大，孔的深度也随之增大。

（3）通过试验分析激光参数对气膜孔质量的影响，扩孔加工出的气膜孔整体质量高于直接加工出的气膜孔质量，具有更小的锥度及较为光滑的内壁。在本试验条件下，当激光功率 5 W、扫描次数 4 次、扫描速度 5 mm/s、重复频率 60 kHz 时加工出的气膜孔内壁质量最高、锥度最小。

研究表明，使用扩孔加工的方法可以在减少孔内壁重铸层的基础上提高微孔的质量，但是实际加工过程中还需要进行重新对焦等步骤，一定程度上会降低加工效率，所以在提高微孔质量的同时还需要提高加工效率。

参 考 文 献

[1]　张晓兵, 纪亮, 蔡敏, 等. 超快激光加工涡轮叶片气膜冷却孔技术研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(21): 14–22.

ZHANG Xiaobing, JI Liang, CAI Min, et al. Research on ultrafast laser machining of film cooling hole in turbine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(21): 14–22.

[2]　梅雪松, 杨子轩, 赵万芹. 电子陶瓷基板表面激光孔加工综述[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500011.

MEI Xuesong, YANG Zixuan, ZHAO Wanqin. Laser hole drilling on surface of electronic ceramic substrates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500011.

[3]　孔祥灿, 张子卿, 朱俊强, 等. 航空发动机气冷涡轮叶片冷却结构研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(5): 6–28.

KONG Xiangcan, ZHANG Ziqing, ZHU Junqiang, et al. Research progress on cooling structure of aeroengine air-cooled turbine blade[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(5): 6–28.

[4]　张强, 贺斌, 田东坡, 等. 飞秒激光带热障涂层叶片气膜孔加工技术研究进展[J]. 航空科学技术, 2018, 29(2): 9–14.

ZHANG Qiang, HE Bin, TIAN Dongpo, et al. Development of gas film holes machining on turbine blades with thermal barrier coating by femtosecond laser[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(2): 9–14.

[5]　MARIMUTHU S, SMITH B. Water-jet guided laser drilling of thermal barrier coated aerospace alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(1): 177–191.

[6]　李晓琳. 涡轮叶片气膜孔超快激光加工精确控形方法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.

LI Xiaolin. Research on the precise shape-controlling method of the turbine blade film-cooling hole based on ultrafast laser[D]. Xiamen: Xiamen University, 2017.

[7]　张学谦, 邢松龄, 刘磊, 等. 带热障涂层的高温合金飞秒激光旋切打孔[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 102013.

ZHANG Xueqian, XING Songling, LIU Lei, et al. Trepanning of supper-alloy with thermal barrier coating using femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 102013.

[8]　张丽丽, 孙树峰, 王茜, 等. 激光微纳连接技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展,

2022, 59(3): 0300003.

ZHANG Lili, SUN Shufeng, WANG Xi, et al. Research progress of laser micro-nano connection technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0300003.

[9] 温嵘, 朱文宇, 麻丁龙, 等. 带热障涂层高温合金材料飞秒激光制孔工艺试验研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(9): 1155–1159.

WEN Rong, ZHU Wenyu, MA Dinglong, et al. Experimental research on femtosecond laser hole making process of superalloy material with thermal barrier[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(9): 1155–1159.

[10] TAO N R, CHEN G Y, CAI S, et al. Improving hole quality of thick CFRP laminates through a laser-mechanical compound drilling process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 3243–3258.

[11] LU X Z, JIANG K Y. Research and application development of compound energy field processing—laser microjet[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2020, 50(3): 034203.

[12] BEKTAS E, SUBASI L, GUNAYDIN A, et al. Water jet guided laser vs. conventional laser: Experimental comparison of surface integrity for different aerospace alloys[J]. Journal of Laser Micro Nanoengineering. 2021, 16(1): 19–23.

[13] 葛志福, 虞钢, 何秀丽, 等. 激光打孔过程三维瞬态数值模拟[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42(8): 869–876.

GE Zhifu, YU Gang, HE Xiuli, et al. Three-dimensional transient numerical simulation of laser drilling process[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2012, 42(8): 869–876.

Simulation and Experimental Study on Preparation of Air Film Holes for Aero-Engine Turbine Blades

XIAO Qiang, ZENG Xiancheng, WEI Qun

(Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

[ABSTRACT] The life of the blades is affected in varying degrees by traditional micro pore machining techniques like drilling and EDM, which cannot match the requirements of high precision and high quality of the holes due to issues like significant taper, recast layer, and cracks during the machining process. Different from traditional mechanical processing, laser processing micro-holes is a high-precision processing method. However, since the spatter cannot completely expel the pores, a recast layer is formed on the hole wall, which affects the quality of the vias. In this paper, the simulation study of the femtosecond laser processing process of micro-holes is carried out and the morphology changes of the micro-holes from the beginning of ablation to the end of the micro-holes are analyzed, and then by changing different laser parameters, it is concluded that the thickness of the recast layer is affected by the laser power and pulse width, and the thickness of the recast layer can be reduced by increasing the power, but the power cannot be increased indefinitely, which will cause excessive ablation, and the pulse width does not show a simple linear relationship with the thickness of the recast layer. In order to reduce the thickness of the recasting layer, a processing method of reaming is proposed, which is to process micro-pores that are smaller than the actual requirements, and then expand the holes. It is verified by experiments that reaming can significantly improve the quality of micro-pores.

Keywords: Femtosecond laser; Air film holes; Simulation; Recast layer; Reaming

（责编　阳光）