

激光加工薄壁腔体微孔的背伤及防护

王斌^{1,2,3*}, 刘跃专⁴, 王玉峰^{1,2}, 张文武^{1,2**}

¹中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201;

²浙江省航空发动机极端制造技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315201;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴宁波工程学院机械工程学院, 浙江 宁波 315336

摘要 针对采用激光加工涡轮叶片等薄壁腔体微孔时存在背伤的问题, 采用填充材料阻隔法切断激光能量传输路径的方式进行背伤防护。研究了激光能量密度、激光束扫描速度以及离焦量等加工参数对背伤的影响规律。通过品质关键因素(CTQ)验证实验优选 6 种可行的背伤防护材料: 聚氨酯(PUR)、流动聚丙烯酰胺(PAM)、石蜡、石墨、二氧化硅(SiO₂)、碳化钨(WC)。选择 PUR、PAM 和石蜡三种防护材料填充 7075 铝合金薄壁腔体, 进行微孔激光加工背伤防护实验研究。研究表明, 填充防护材料的激光加工背伤坑深度相比未填充防护材料时有了大幅降低, 流动 PAM 的背伤防护效果比 PUR 和石蜡的更好。当 PAM 的流速达到 3.0 m/s 时, 所有 0.5~3 mm 间距的型腔在加工 50 s 以内都没有出现背伤。该研究成果可为后续进行激光打孔状态实时监测并及时关停激光的背伤防护方法提供依据, 为实现涡轮叶片等薄壁腔体微孔的无背伤加工提供基础。

关键词 激光技术; 激光微孔加工; 背伤防护; 薄壁腔体; 填充材料; 品质关键因素

中图分类号 V261.8; TG665

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1002201

1 引言

工业和航空航天领域中需要对很多薄壁腔体类零件加工数量众多的微孔, 例如航空发动机涡轮叶片需要加工大量的气膜冷却孔, 以利用气膜冷却技术来保证涡轮叶片在高温环境下可靠工作^[1]。激光加工作为一种非接触式的加工方式, 具有快速、灵活、能量精密可控及对难加工材料的广适性等特点, 在这类薄壁腔体多层复合结构的精密低损伤加工上具有独特的优势^[2]。但在激光微孔加工过程中, 激光束光斑在微孔中心处的重叠率高、热量累积较快, 使得中心部位的材料去除率远大于边缘处, 导致微孔首先从中心被打通, 微孔的锥度较大。为了减小或消除锥度, 还需延长激光加工时间以对微孔进行修整, 在微孔修整时间内, 激光束将穿过空腔直接照射到零件背壁的内表面上, 从而继续加工背壁且有

可能使其材料发生热损伤, 影响薄壁腔体类零件的工作性能。这种由于激光束穿过微孔出口而在薄壁腔体内壁上加工出的烧蚀坑或者引起的热损伤被称为背伤^[3], 如图 1 所示。

背伤一般是由在离焦状态下的激光加工形成的, 因此材料的去除方式将从升华变成多种方式共存或纯热烧蚀。在高速高能量密度的热冲击过程中, 背伤区域内的材料瞬间产生很大的温度梯度, 随着激光离焦加工的继续进行, 热积累效应会引起氧化、重熔、扩散、热应力和微裂纹等。背伤区域的材料在工作状态下会先被破坏, 之后产生连锁反应, 造成涡轮叶片等薄壁腔体类零件综合性能的下降^[4]; 重铸层、微裂纹和热应力^[5-6]会减少零件的疲劳寿命, 降低拉伸强度、延伸率、硬度, 降低抗应力腐蚀性和断裂韧性; 热影响区与基体界面易形成热应力集中, 使得背伤严重区域成为叶片等零件失效断裂的

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-10-28; 录用日期: 2020-12-08

基金项目: 中国科学院重点部署项目(ZDRW-CN-2019-01)、浙江省重点研发计划择优项目(2020C01036)、浙江省自然科学基金(LY18E050027)、宁波市科技创新 2025 重大专项(2019B10074)

*E-mail: wankoran@126.com; **E-mail: zhangwenwu@nimte.ac.cn

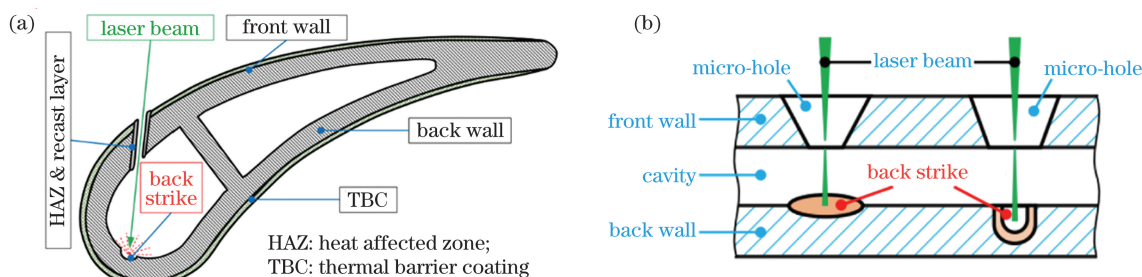


图 1 采用激光加工涡轮叶片等薄壁腔体类零件微孔造成背伤的示意图。(a) 涡轮叶片；(b) 平板薄壁腔体

Fig. 1 Schematic diagram of back strike caused by fabrication of micro-holes on thin-walled cavity parts such as turbine blades using laser machining. (a) Turbine blade; (b) flat thin-walled cavity

多发部位^[7]。所以,减小甚至彻底消除背伤对采用激光加工薄壁腔体类零件微孔的意义重大。

采用激光加工以涡轮叶片为代表的半封闭薄壁腔体时的背伤防护属于世界性难题,公开的文献报道非常少。到目前为止,国际上开展的关于采用激光加工涡轮叶片时的背伤防护研究主要采取先制孔后去除陶瓷型芯、填充保护材料和鼓入流体以降低激光能量等方法。例如, Gregory 等^[8]发明了先制孔后去除陶瓷型芯的背伤保护方法,该方法中陶瓷型芯可吸收部分激光能量并被加工了 70%,从而避免了叶片内腔的背伤。Corfe 等^[9-10]发明了填充保护材料的背伤保护方法,并申请了美国专利,其声称在气膜孔激光加工之前,往叶片内腔填充聚四氟乙烯 (PTFE) 和低熔点石蜡混合物或者添加具有 PTFE 骨架且所有氧烷基都被氟化的聚烯烃树脂,可以起到背伤保护作用,但专利没有明确指出保护作用的程度,也没有给出叶片内腔尺寸或具体实例。Turner^[11]申请的欧洲专利声称,往叶片内腔填充细微颗粒 NaCl 或 KCl 与水形成的糊状物,然后将其烘干,形成更精细的晶粒,这些晶粒在加工过程中可以有效地把激光束散射开,降低激光加工的强度,从而起到背伤保护的作用,加工结束后用温水或热水冲洗即可去除晶粒。Hu 等^[12]申请的欧洲专利声称,往叶片内腔填充聚烯烃可以起到背伤保护作用,但大量实验表明,在窄内腔叶片填充实验中并没有重复出专利声称的效果。Knowles 等^[13]针对喷嘴的背伤问题,将固体针棒放置于腔体以阻隔激光能量。Hu 等^[14]发明了流体降低激光能量法,在气膜孔的激光加工过程中,通过对准气膜孔出口鼓入 17 kPa 的饱和水蒸汽或稀有气体,可实现背伤保护作用。

在国内,采用激光加工薄壁腔体微孔的背伤防护研究起步较晚,相关报道较少。王恪典等^[15]提出填充冰-碳粉混合物对采用激光加工叶片微孔时的背伤防护具有一定的效果。陶俊^[16]采用平板腔体

研究了微孔激光加工的背伤及其防护方法,结果表明,当腔体厚度达到 3 mm 时,填充 PAM-SiO₂ 混合物可在利用环切法进行微孔激光加工情况下几乎可以实现无背伤。田东坡等^[17]提出往叶片腔体内填充刚玉的激光背伤防护方法,该方法在皮秒激光微孔加工过程中可避免背伤。

从前面的报道可看出,目前针对激光加工薄壁腔体微孔时的背伤防护方法大部分仅限于公开的专利,缺乏详细的过程参数和量化指标。国外激光加工背伤防护技术是各国的核心技术,对我国严密封锁。因此,迫切需要进行系统性实验研究,探索采用激光加工薄壁腔体微孔时的背伤形成机理及其防护方法,明确影响激光加工背伤程度的主要因素,从而有效减小甚至避免背伤,提高激光加工工件的使役可靠性。

激光加工背伤程度及其形貌特征与激光加工参数密切相关。影响激光加工背伤程度的因素众多,主要有内腔尺寸、加工角度、加工时间和激光束的脉宽、波长、脉冲频率、脉冲能量、束腰半径等^[18]。同一激光器在相同叶片壁厚、加工时间和加工角度下,在进行气膜孔的加工过程中,3 mm 宽内腔所形成的背伤坑的直径和深度分别约为 1 mm 宽内腔时的 1/5 和 1/11;在同一尺寸内腔位置,垂直加工造成的背伤坑深度是 30° 倾斜激光加工时的 2.6 倍^[7]。对于不同的激光器,在相同壁厚、内腔宽度和总激光辐照能量下,采用脉宽为 1 ms、功率密度为 10⁶ W/cm² 的 Nd:YAG 毫秒激光进行加工所产生的背伤坑深度至少是采用脉宽为 100 fs、功率密度为 10¹⁵ W/cm² 的 Ti:sapphire 飞秒激光加工时所产生的背伤坑深度的 8 倍^[19]。波长为 532 nm 的二次谐波激光比波长为 1064 nm 的一次谐波激光具有更高的峰值功率,采用前者进行打孔产生的背伤明显比后者小^[20]。在相同壁厚和内腔宽度下,束腰半径为 15 μm 的激光所造成的背伤坑深度几乎是 5 μm 束腰

半径激光所造成的背伤坑深度的 2 倍^[21]。因此,需研究激光加工参数对加工背伤程度及其形貌的影响规律,这为激光加工背伤防护技术研究提供了基础。

本文首先从激光能量密度、激光束扫描速度以及离焦量等激光加工参数入手,通过采用激光加工型腔模拟件的实验,研究不同参数对背伤几何形貌的影响规律。然后,采用品质关键因素(CTQ)验证方法选择多种流体、胶体、固体等背伤防护填充材料。最后,将选择出的多种防护材料填充到 7075 铝合金薄壁腔体中,进行激光加工背伤防护实验研究,定量分析激光加工背伤防护性能。本文研究成果可为后续采用光谱检测^[22-24]、声音探测等激光打孔状

态实时监测手段并及时关停激光的背伤防护方法提供依据,为实现涡轮叶片等薄壁腔体微孔的无背伤加工提供基础。

2 材料与实验

2.1 微孔加工材料

薄壁腔体类零件一般由铝合金、不锈钢、镍基高温合金等材料制成,而铝合金的激光损伤阈值比镍基高温合金和不锈钢都低,更能显现背伤程度的大小,因此本研究选取 7075 铝合金作为实验材料,其化学成分见表 1。实验前将铝合金浸泡在丙酮中,进行超声波清洗处理。

表 1 7075 铝合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 7075 aluminum alloy (mass fraction)

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Others	Al
2.00	0.40	0.50	0.30	2.80	6.10	0.40	0.06	≤0.15	Balance

2.2 背伤防护材料

一般的薄壁腔体,尤其是涡轮叶片腔体,其尺寸在 0~8 mm 范围内,无法被塞进较大的固体材料,所以易于填充的流体和胶体成为很好的选择。本研

究初步对聚丙烯酰胺(PAM)、热熔胶(PUR)、石蜡、石墨、二氧化硅(SiO₂)、碳化钨(WC)粉末进行品质关键因素(CTQ)验证实验,再优选几种填充材料进行背伤防护性能实验。以上材料的物理化学性质见表 2。

表 2 部分填充材料的物理化学性质

Table 2 Physical and chemical properties of partial filling materials

Material	Melting point / °C	Boiling point / °C	Properties
PUR	105-115	Unfixed	Transparent, easy to discharge bubbles, and high viscosity after softening
PAM	Unfixed	Unfixed	Softening temperature is larger than 10 °C; vitrification temperature is 188 °C
Paraffin	47-65	>371	Insoluble in water; soluble in gasoline, acetone, etc.
Graphite	3652	4827	Ignition point of graphite in air is 850-1000 °C
SiO ₂	1650±50	2230	Abundant in production and low in price
WC	2870	6000	High melting and boiling points

2.3 实验设备

本实验采用纳秒激光加工实验台进行微孔加工,该系统由绿光纳秒激光器、反射镜、扫描振镜、场镜、运动控制平台等组成。实验台见图 2。激光器

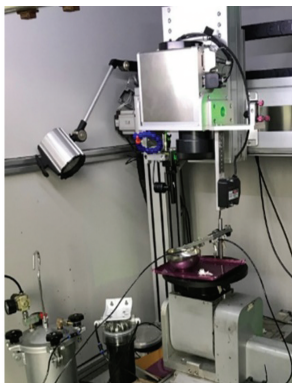


图 2 纳秒激光加工实验台

Fig. 2 Experimental stage of nanosecond laser machining

参数为:平均激光功率为 0~50 W,波长为 532 nm,激光重复频率为 0~200 kHz,脉冲宽度为 10 ns。

2.4 实验设计

2.4.1 不同激光参数下背伤大小分析

激光加工一般有脉冲叩击、环切打孔^[25-26]和扫描填充等几种加工方式,如图 3 所示。脉冲叩击打孔适用于激光光斑尺寸大小的微孔加工;环切打孔适用于较大直径的孔加工;扫描填充逐层去除的打孔方法则适用于中等直径的通孔、盲孔以及复杂异型孔的加工。同时纳秒激光的单脉冲能量偏小,采用脉冲叩击和环切打孔的方式在加工深小孔时面临着无法打穿的问题,这时一般需采用扫描填充的打孔方式。另外,扫描填充的打孔方式在打穿孔时需要更多的激光脉冲数来修整孔形以使孔完全打穿,因此该方法避免背伤的难度最大。本研究选用扫描

填充打孔方式。填充可采用平行线、交叉线、同心圆或螺旋线等形式。采取单因素控制变量法来研究激光加工参数对背伤的影响情况,包括激光能量密度、振镜扫描速度以及离焦量对背伤的影响规律。设计

实验装置示意图如图 4 所示,空腔厚度范围在 0.5~6 mm 内可调,激光加工的孔大小为 $\Phi 0.5$ mm。具体激光加工参数见表 3。通过 3D 共聚焦激光扫描显微镜(CLSM,Keyence VX-200)观察背伤的微观结构。

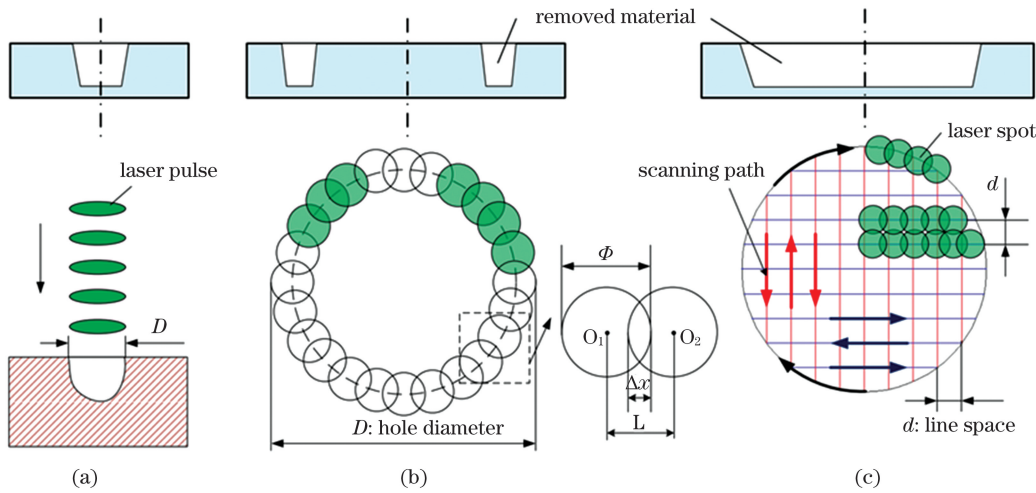


图 3 激光加工方式示意图。(a)脉冲叩击打孔;(b)环切打孔;(c)扫描填充打孔

Fig. 3 Schematic diagrams of laser processing methods. (a) Tap drilling; (b) trepan drilling; (c) scan filling drilling

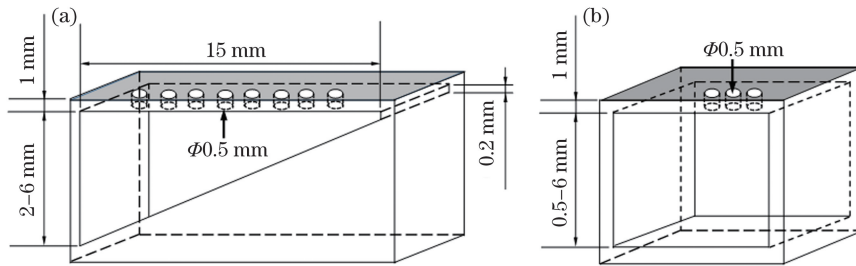


图 4 背伤防护实验的型腔模拟件示意图。(a)三棱柱型腔;(b)四棱柱型腔

Fig. 4 Schematic diagrams of cavity simulation of back strike protection experiment. (a) Triangular prism cavity; (b) quadrilateral prism cavity

表 3 实验参数

Table 3 Experimental parameters

Focal length of galvanometer / mm	Energy density / $(J \cdot cm^{-2})$	Processing time / s	Scanning speed / $(mm \cdot s^{-1})$	Focal shift / mm
160	31.067-64.596	10-60	100-2000	-2-2

2.4.2 背伤防护材料的 CTQ 验证

针对诸如涡轮叶片等复杂的腔体结构特点,填充材料的选取必须满足易填充、净取出和可自给等 CTQ。背伤防护材料的 CTQ 见表 4。背伤防护材料的 CTQ 验证装置示意图和实物分别如图 5 和图 6 所示。其中图 5 所示装置主要用来测试背伤防护材料对激光束的阻隔能力、透光性和自给性。图 6 所示装置主要用来测试背伤防护材料的腐蚀性、自给性、填充性和取出性。

表 4 背伤防护材料的 CTQ

Table 4 CTQ of for back strike protective materials

CTQ	Fluid	Colloid	Solid
Transparency	Yes/no	Yes/no	Yes/no
Fillability	Porosity	Porosity	Porosity
Removability	Residual ratio	Residual ratio	Residual ratio
Corrosivity	Yes/no	Yes/no	Yes/no
Self-sufficiency	Yes/no	Yes/no	Yes/no
Comprehensive	Unsuitable/to be determined/alternative/optional/preferred		

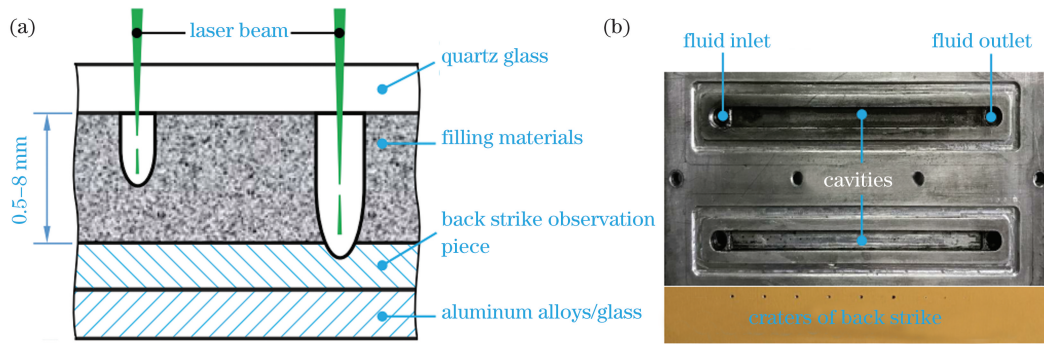


图 5 背伤保护材料 CTQ 验证装置。(a) 装置示意图; (b) 装置实物及背伤观测片照片

Fig. 5 CTQ verification device for back strike protective materials. (a) Schematic diagram of device; (b) photos of device and the back strike

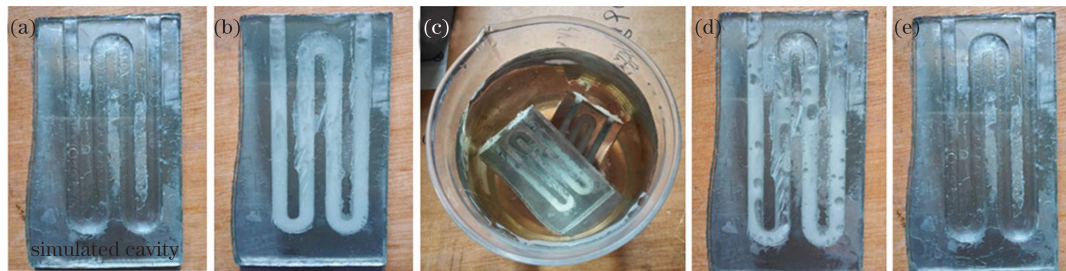


图 6 水溶性背伤保护材料的填充和取出实验。(a) 未填充; (b) 填充 PAM; (c) 水中浸泡; (d) 浸泡 8 h 后; (e) 材料取出后的薄壁腔体模拟件

Fig. 6 Filling and removing experiments of water-soluble back strike protective materials. (a) Without filling; (b) filling PAM; (c) immersion in water; (d) after soaking for 8 h; (e) thin-walled cavity simulated piece after material is removed

3 结果与讨论

3.1 能量密度对背伤的影响

在不同激光通量和不同空腔厚度下加工微孔产生的背伤程度会有所不同,典型的 1 mm 空腔和 3 mm 空腔在 31.067~64.596 J/cm² 激光通量下被加工 30 s 后产生的背伤情况分别如图 7(a) 和 7(b) 所示。从图中可看出,同一空腔厚度下加工

30 s,背伤坑深度随着能量密度的增大而增大;同一能量密度下加工 30 s,3 mm 空腔厚度的背伤坑深度小于 1 mm 空腔厚度的背伤坑深度。

背伤坑直径随不同能量密度和空腔厚度的变化关系如图 8 所示。对于 0.5 mm 空腔厚度的样品,随着能量密度从 31.067 J/cm² 增加到 64.596 J/cm²,背伤坑直径从约为 380 μm 增加到 480 μm;当能量密度为 31.067 J/cm² 时,背伤坑直径在 6 mm 空腔厚

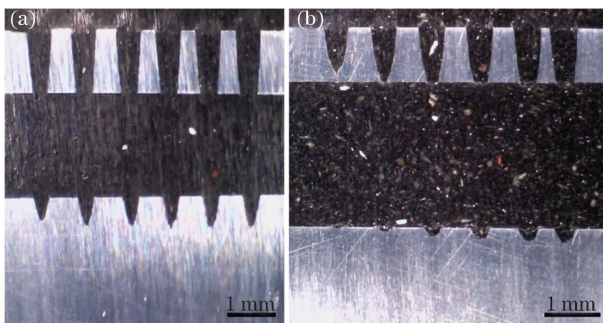


图 7 不同能量密度与空腔厚度下加工的微孔及其背伤情况。(a) 1 mm; (b) 3 mm

Fig. 7 Microholes and back strike processed under different energy densities and cavity thicknesses.

(a) 1 mm; (b) 3 mm

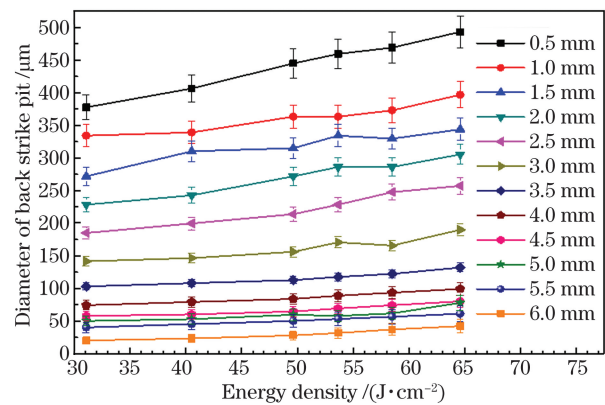


图 8 能量密度随背伤坑直径的变化关系

Fig. 8 Relationship between energy density and diameter of back strike pit

度的样品中从 380 μm 下降到了约 20 μm 。总体而言,在相同能量密度下,背伤坑的直径随着空腔厚度的增加而减小;同一空腔厚度情况下,背伤坑的直径随着能量密度的增大而增大。

背伤坑深度随不同能量密度和空腔厚度的变化关系如图 9 所示。对于 0.5 mm 空腔厚度的样品,随着能量密度从 31.067 J/cm^2 增加到 64.596 J/cm^2 ,背伤坑深度相应地从约 320 μm 增加到 440 μm ,约增加 120 μm ;当能量密度为 31.067 J/cm^2 时,背伤坑深度从 1 mm 空腔厚度的样品的约 320 μm 降到了 6 mm 空腔厚度的样品的约 5 μm 。背伤坑深度的变化趋势与背伤坑直径的变化趋势一致。

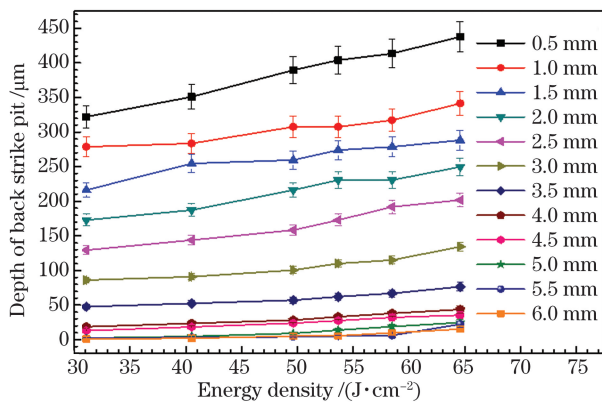


图 9 能量密度随背伤坑深度的变化关系

Fig. 9 Relationship between energy density and depth of back strike pit

3.2 扫描速度对背伤的影响

激光束通过场镜会聚成一个圆形光斑,在扫描振镜的转动下,光斑与光斑之间会有一定的重叠,重叠程度可由激光光斑重叠率 φ 表示。光斑重叠率的大小与激光扫描速度、重复频率以及光斑大小有关。

光斑重叠率计算公式^[27-28]为

$$\varphi = \frac{\Delta x}{\Phi} = \frac{1 - v/f}{\Phi}, \quad (1)$$

式中: Φ 为激光光斑直径; v 为激光的扫描速度; f 是激光的重复频率。

由(1)式可以得出扫描速度为

$$v = (1 - \varphi) \cdot f \cdot \Phi. \quad (2)$$

因此在激光光斑大小和重复频率一定的情况下,通过改变扫描速度即可改变激光光斑的重叠率。激光光斑重叠率越高,单位截面上的激光脉冲数越多,越不利于背伤的控制。

以扫描速度为单一变量进行微孔加工实验,实验结束后通过激光共聚焦显微镜测量背伤坑直径和深度。图 10(a)和图 10(b)显示的是扫描速度为 100 mm/s、能量密度为 53.646 J/cm^2 、空腔厚度为 2 mm 时加工 30 s 后的背伤坑入口形貌和尺寸,背伤坑入口直径约为 444 μm ,背伤坑深度约为 411 μm 。当扫描速度为 1000 mm/s 时,背伤坑的入口平面形貌和 3D 形貌及尺寸分别如图 10(c)和 10(d)所示。背伤坑入口直径和背伤坑深度分别约为 387 μm 和 115 μm 。

不同扫描速度下激光加工微孔对应的背伤坑尺寸如表 5 所示,由于扫描速度对于背伤坑入口直径的影响不大,表 5 中主要列出背伤坑深度。可以看出,在同一空腔厚度下,随着扫描速度的增加,背伤坑深度逐渐减小,但波动范围不大。当扫描速度增大,光斑重叠率会变小,此时激光的去除能力下降,因此随着激光扫描速度变大,背伤坑深度呈现变小趋势。在较小的激光扫描速度下虽然激光加工出的微孔锥度较小,但会引起严重的热损伤。

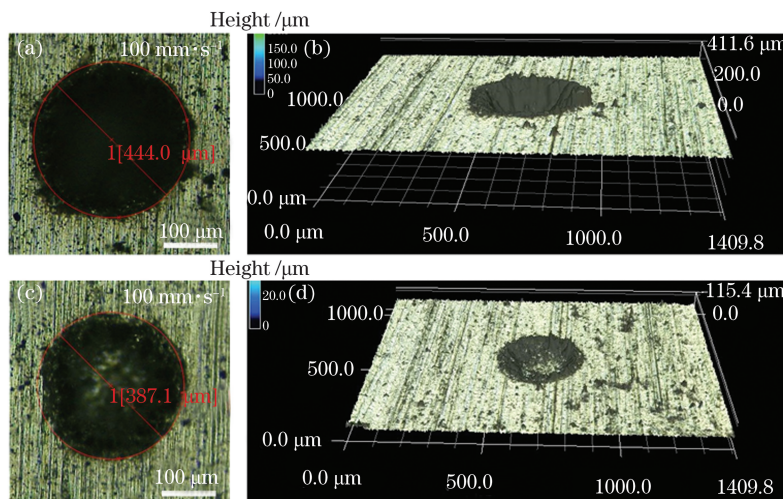


图 10 不同扫描速度时背伤坑的形貌及尺寸。(a)(b) 100 mm/s;(c)(d) 1000 mm/s

Fig. 10 Morphologies and sizes of back strike pit at different scanning speeds. (a)(b) 100 mm/s;(c)(d) 1000 mm/s

表 5 扫描速度与背伤坑深度
Table 5 Scanning speed and depth of back strike pit

Scanning speed / (mm · s ⁻¹)	Depth of back strike pit					
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
100	448.18	420.77	390.20	321.88	269.73	171.20
200	446.94	409.11	384.44	331.99	279.84	181.31
300	455.27	400.52	381.95	302.65	250.50	151.97
400	434.42	386.86	374.91	284.98	232.83	134.30
500	395.53	349.50	321.40	279.78	227.63	129.10
1000	379.09	339.36	316.01	273.82	221.67	123.14
1500	382.97	341.67	283.65	205.14	152.99	54.46
2000	375.33	321.82	288.72	183.86	131.71	33.18

3.3 离焦量对背伤的影响

激光微孔加工的一个重要激光参数就是离焦量。激光光束通过场镜后会聚成一个较小的光斑,此处即为焦点。待加工的工件与焦点之间的距离被称为离焦量。当焦距 $f > 0$ 时,即焦点位于工件上表面一定距离时,为正离焦;当焦距 $f < 0$ 时,即焦点处于工件表面以下时,为负离焦。当其他激光参数一定时,离焦量的改变相当于改变空腔尺寸。

图 11 和图 12 显示的是背伤坑直径和深度随着离焦量的变化曲线。从图 11 可以看出,在 0.5 ~ 1.5 mm 空腔中,当焦点位于工件表面附近时背伤坑的直径较小。当空腔厚度大于 1.5 mm 时,背伤坑直径随着离焦量从负离焦状态到正离焦状态先增大后减小。

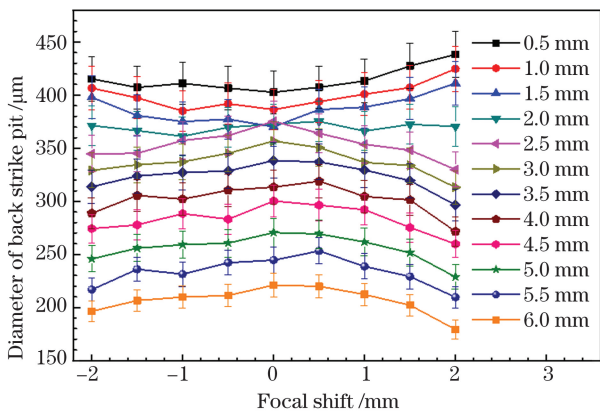


图 11 背伤坑直径与离焦量的关系

Fig. 11 Relationship between diameter of back strike pit and defocusing amount

由图 12 可知,在同一空腔厚度中,背伤坑深度随着离焦量从负值变为正值并逐渐变小。微孔的激光加工过程主要是将金属材料以熔化和气化状态去除,在离焦状态下,激光光斑变大,能量分布较宽,这导致了加工状态下微孔的直径随着离焦量的变大而

变大,但此时出口处材料主要是通过激光能量的热传导加热,在离焦情况下,能量密度变小,出口处孔形不规则,而且孔径变小或形成的外扩毛刺使孔径变大。因此,背伤坑的直径变化随着离焦量的增加先变小后变大。背伤坑的深度主要受空腔厚度控制,负离焦量相当于减小空腔厚度,所以背伤坑深度随着离焦量从负值变为正值并不断增大。

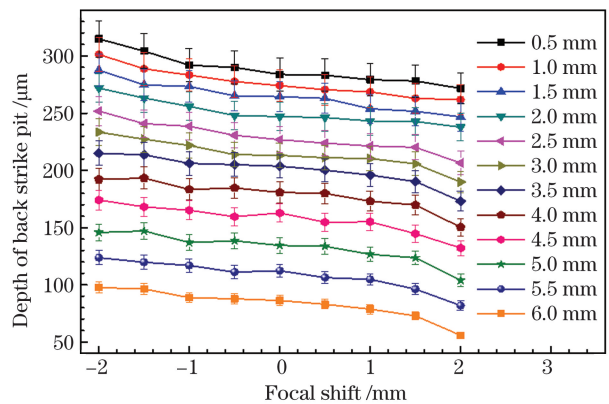


图 12 背伤坑深度与离焦量的关系图

Fig. 12 Relationship between depth of back strike pit and defocusing amount

3.4 背伤防护材料的初选结果

单组分湿固化反应型 PUR 经过 110 °C 加热熔化后,流动性较好,可以完全填满薄壁腔体,填充性较好。加工完成后,PUR 被加热到 200 °C 后可自然流出,即使有些 PUR 粘在薄壁上也会在延长加热时间的情况下挥发掉,取出性尚可。熔化状态下的 PUR 虽然看起来透明,但对激光具有散射作用,散射后的激光束不具备背伤能力。在激光加工过程中,PUR 处于熔化和蒸发状态,具有黏弹性,所以也具备自给性。PAM 为阴离子型水溶性高分子聚合物,其相对分子质量为 6×10^6 ,粉末状颗粒为 30 ~ 100 目,溶于水后很容易填充薄壁腔体,也非常好清

理,只要用水冲洗即可去除干净,而且由自身黏弹性可产生自给性。石蜡中的直链烷烃的质量分数在 90% 以上,经过加热熔化后流动性较好,很容易注入和去除。流动性 PAM 呈乳化状,不透光,在激光加工过程中受热积累效应作用而熔化,具有自给性。

石墨选用 8000 目的石墨粉,可以借助重力和外力压实填满腔体,填充性较好,虽然其熔沸点较高,但在激光加工过程中石墨容易被烧蚀且与薄壁腔体发生冶金结合,不容易去除干净。石墨是黑色固体,

不透光,而且其本身不具备黏弹性,所以缺乏自给性。 SiO_2 虽然选用 1000 目粉末,但还是不能完全填满腔体,填充性较差。由于自身重力原因,在去除 SiO_2 时,总有部分颗粒沉积在腔体的底部或角落里,取出性不好。 SiO_2 是白色固体,不透光。WC 选的是 1000 目粉末,具有不透光性,虽然其沸点比石墨和 SiO_2 的都高,但也具有和 SiO_2 一样差的填充性和取出性,同样也没有自给性。以上材料的 CTQ 验证结果见表 6。

表 6 背伤防护材料的 CTQ 初步验证结果

Table 6 Preliminary CTQ verification results of back strike protective materials

CTQ	Colloid		Colloid/solid		Solid	
	PUR	PAM	Paraffin	Graphite	SiO_2	WC
Transparency	No	No	No	No	No	No
Fillability	3% porosity	1% porosity	2% porosity	2% porosity	5% porosity	3% porosity
Removability	1% residual	No residual	1% residual	1% residual	2% residual	1% residual
Corrosivity	No	No	No	No	No	No
Self-sufficiency	Yes	Yes	Yes	No	No	No
Comprehensive	Alternative	Preferred	Alternative	Unsuitable	Unsuitable	Unsuitable

由表 6 可看出,6 种测试的背伤防护材料中,只有 PUR、PAM 和石蜡较适合。所以后面的背伤防护实验将以这三种材料展开。

3.5 填充材料的背伤防护效果

3.5.1 三棱柱型腔的微孔激光加工背伤防护

7075 铝合金三棱柱型腔未填充防护材料加工微孔的截面形貌和背伤坑深度随型腔厚度的变化如图 13 所示。由于 10 s 以内不能把 1 mm 厚 7075 铝合金打穿成无锥度微孔,所以只统计 20~60 s 加工的背伤情况。

从图 13(a) 可看出,在激光强度约为 2.0 GW/cm^2 的参数下加工直径为 0.5 mm 的微孔 60 s 后,背伤坑深度从左往右随型腔厚度的增大而减小。由图 13(b) 可知,在同一型腔厚度下,背伤坑深度随加工时间的延长而增加;在相同加工时间下,背伤坑深度随型腔厚度的增加而逐渐减小。其中腔型厚度为 0.5 mm 位置处的背伤坑深度变化最剧烈,加工 20 s 和 60 s 后的背伤坑深度相差约 $1000 \mu\text{m}$,而型腔厚度为 5 mm 时,加工 20 s 和 60 s 后背伤坑深度只相差约 $170 \mu\text{m}$ 。同样加工 20 s,型腔厚度为 0.5 mm 时的背伤坑深度比型腔厚度为 5 mm 时的背伤坑深度深约 $350 \mu\text{m}$,而加工 60 s 时,背伤坑深度之间相差约 $1200 \mu\text{m}$ 。

7075 铝合金三棱柱型腔填充石蜡、PUR 和 PAM(流动状态)三种不同防护材料后,背伤坑深度随加工时间的变化曲线如图 14 所示。从图中可看出,填充防护材料后,背伤坑深度随加工时间的变化规律和未填充防护材料时类似,都是同一型腔厚度下背伤坑深度随加工时间的延长而增加;在相同加工时间下,背伤坑深度随型腔厚度的增加而逐渐减小。与空腔加工相比,填充防护材料明显起到一定的背伤抑制作用,通过比较图 13(a)与图 13(b)可知,在 0.5 mm 型腔厚度下加工 60 s 后,填充石蜡的背伤坑深度比空腔的背伤坑深度小 $120 \mu\text{m}$,可见填充防护材料在一定程度上减小了背伤。通过比较三种不同的材料可知,填充流动 PAM 的防护效果优于 PUR,而填充 PUR 的防护效果又优于石蜡。PUR 和石蜡之间的背伤防护深度相差 $200 \mu\text{m}$ 左右,这主要归因于石蜡的熔点最低、熔化之后透光且具有黏弹性,即石蜡自给性比 PUR 差。流动 PAM 的背伤防护效果比 PUR 和石蜡的防护效果几乎高一个数量级,填充 0.5 m/s 流速的 PAM 的背伤坑深度只有石蜡的一半,是 PUR 的 $3/5$ 。流速增加到 1 m/s 后,背伤防护效果更加明显,背伤坑深度分别是填充石蜡和 PUR 样品的 $1/4$ 和 $1/3$ 。这主要是因为流动 PAM 的自给性得到了很大的提高。

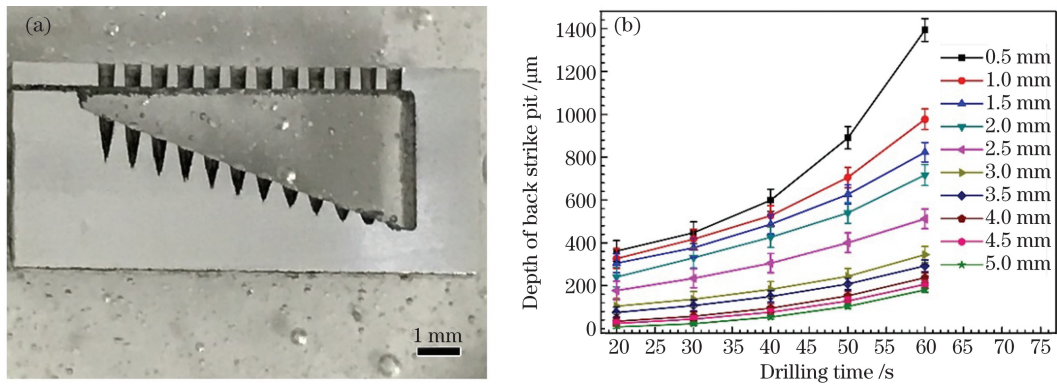


图 13 7075 铝合金三棱柱型腔未填充防护材料微孔的剖面图和背伤坑深度随加工时间的变化曲线。(a) 微孔截面图；(b) 背伤坑深度随加工时间的变化曲线

Fig. 13 Cross section of micro-holes in 7075 aluminum alloy tri-prism cavity unfilled with protective material and depth of back strike pit varying with drilling time. (a) Cross section of micro-holes; (b) depth of back strike pit varying with drilling time

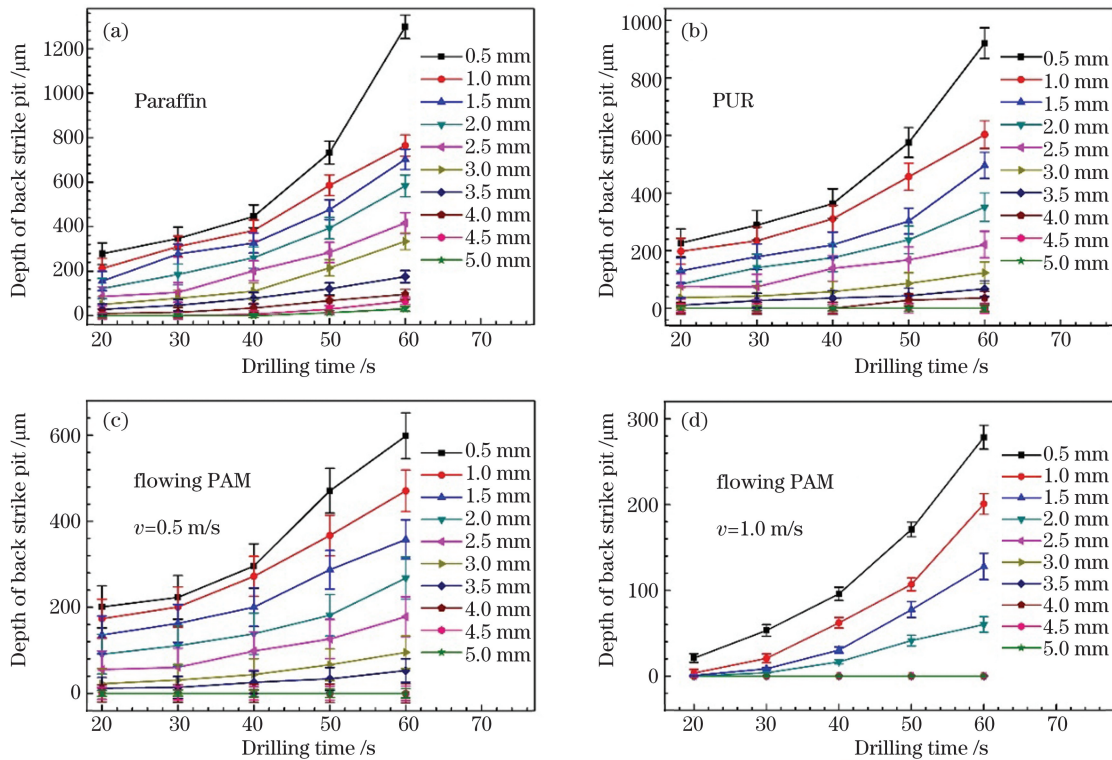


图 14 7075 铝合金三棱柱型腔填充不同防护材料后,背伤坑深度随加工时间的变化曲线。(a)石蜡;(b) PUR;(c)(d) PAM
Fig. 14 Depth of back strike pit varying with drilling time after 7075 aluminum alloy triangular prism cavity is filled with different protective materials. (a) Paraffin; (b) PUR; (c)(d) PAM

3.5.2 四棱柱型腔的微孔激光加工背伤防护

加工参数为:激光强度为 $2.0 \text{ GW}/\text{cm}^2$,微孔直径为 0.5 mm ,加工时间为 $20\sim 60 \text{ s}$ 。材料为 7075 铝合金四棱柱型腔,背伤观测材料为 7075 铝合金。未填充防护材料加工的微孔和背伤坑截面形貌如图 15 所示,其中图 15(a)是不加背伤观测片的 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 型腔,从图中可看出:当空腔厚度达到 6 mm 时,加工 $10\sim 60 \text{ s}$ 都没有出现背伤。由于 10 s 以内

激光加工不能完全把 1 mm 厚的 7075 铝合金打穿为无锥度的微孔,所以只统计 $20\sim 60 \text{ s}$ 加工的背伤情况。图 15(a)、(b)分别是 $6, 2.5, 1 \text{ mm}$ 空腔厚度时背伤坑深度随微孔锥度的减小而增大的情况。

由三棱柱型腔的实验结果可知,流动 PAM 的背伤防护效果最好,所以对于 7075 铝合金四棱柱型腔,将只填充流动的 PAM。为了进一步探索 PAM 的流动速度与背伤防护效果之间的关系,需提高

PAM 的流动速度,并继续对型腔厚度更加容易设定和测量的 7075 铝合金四棱柱型腔进行背伤防护实验。填充流速为 1.5~3.0 m/s 的 PAM 的 7075 铝合金四棱柱型腔背伤坑深度随加工时间的变化曲线如图 16 所示。从图 16 可以看出,填充流速增大的 PAM 后,背伤坑深度随加工时间的变化规律和填充 0.5~1.0 m/s 流速的 PAM 时类似,都是同一型腔厚度下,背伤坑深度随加工时间的延长而增加;在相同加工时间下,背伤坑深度随型腔厚度的增加而逐渐减小。通过比较可知,背伤坑深度随着

PAM 流速的增大而减小。例如,当型腔厚度为 0.5 mm、加工时间为 60 s 时,背伤坑深度由 1.5 m/s 时的 110 μm 降低到 3.0 m/s 时的 9 μm 。对于 2.0 mm 型腔厚度,当 PAM 的流速达到 2 m/s 时,连加工 60 s 后也没有了背伤。当 PAM 的流速增加到 3.0 m/s 时,对于 0.5~3 mm 厚的型腔,在加工 50 s 以内都没有出现背伤。由此可见,流动 PAM 是比较理想的激光微孔加工背伤防护材料,当流速达到 3 m/s 后,填充 PAM 可有效避免薄壁腔体微孔激光加工的背伤。

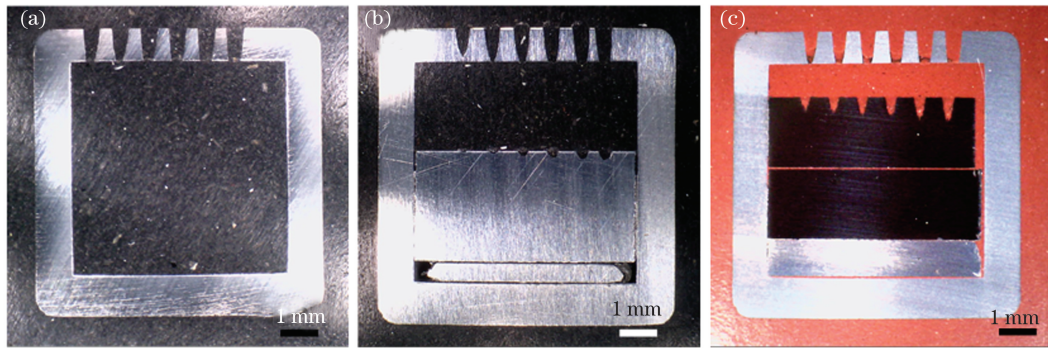


图 15 7075 铝合金四棱柱型腔及其微孔和背伤截面形貌。(a) 6 mm 空腔;(b) 2.5 mm 空腔;(c) 1 mm 空腔

Fig. 15 Cross-section of 7075 aluminum alloy quadrangular cavity and its micro-holes and back strike. (a) 6 mm cavity; (b) 2.5 mm cavity;(c) 1 mm cavity

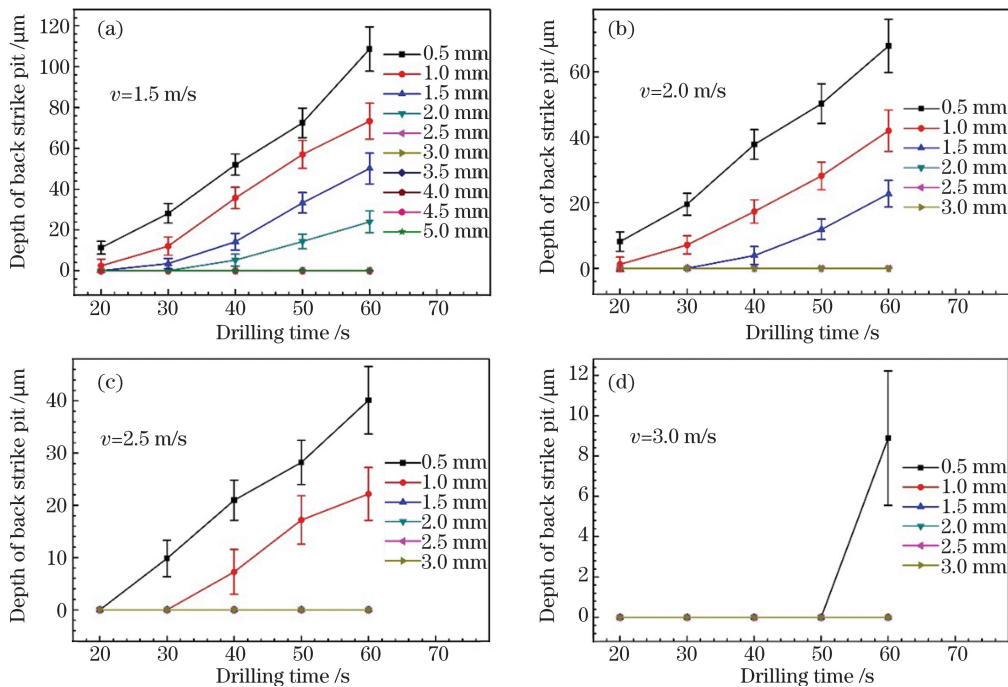


图 16 不同流速下,7075 铝合金四棱柱型腔填充 PAM 后背伤坑深度随加工时间的变化曲线。(a) 1.5 m/s;(b) 2.0 m/s; (c) 2.5 m/s;(d) 3.0 m/s

Fig. 16 Depth of back strike pit varying with processing time after 7075 aluminum alloy quadrangular cavity is filled with PAM for different flow velocity. (a) 1.5 m/s; (b) 2.0 m/s; (c) 2.5 m/s; (d) 3.0 m/s

4 结 论

研究了激光加工参数对背伤的影响规律,通过背伤防护效果 CTQ 验证实验优选三种填充防护材料,最后在 7075 铝合金三棱柱和四棱柱空腔中填充石蜡、PUR 和流动 PAM 防护材料进行背伤防护性能实验。主要结论如下:

1) 在相同能量密度下,背伤坑的直径和深度随着空腔厚度的增加而减小,同一空腔厚度情况下,背伤坑的直径和深度随着能量密度的增大而增大。扫描速度对于背伤坑入口直径的影响不大,同一空腔厚度下,随着扫描速度的增加,背伤坑深度逐渐减小,但波动范围不大。离焦量对背伤坑的直径变化影响很大,焦点位于工件表面附近时,背伤较严重,在正离焦状态下进行适当加工可以减小背伤。

2) 对于 7075 铝合金,在激光强度为 2.0 GW/cm^2 、三棱柱和四棱柱型腔厚度为 $0.5 \sim 6 \text{ mm}$ 时,填充石蜡、PUR 和流动 PAM 后,背伤坑的深度随着加工时间的延长而增大。PUR 的背伤防护效果比石蜡的好,流动 PAM 的背伤防护效果比 PUR 和石蜡的都好。

3) 在同一型腔厚度下,或者在相同加工时间下,背伤坑深度随着填充 PAM 的流速的增大而减小。当 PAM 的流速达到 3.0 m/s 时,所有 $0.5 \sim 3 \text{ mm}$ 厚的型腔在加工 50 s 以内都没有了背伤。

参 考 文 献

- [1] Yao Y, Zhang J Z, Tan X M. Numerical study of film cooling from converging slot-hole on a gas turbine blade suction side [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, 52: 61-72.
- [2] Zhang W W, Zhang T R, Guo C H, et al. Some new advances in laser drilling in the field of aircraft engines [J]. *OE Products & News*, 2014, 5(11): 23-27.
张文武, 张天润, 郭春海, 等. 激光打孔在飞机发动机领域的一些新进展 [J]. *光电产品与资讯*, 2014, 5(11): 23-27.
- [3] Rhoades L J, Randall G J. Laser back wall protection by particulate shading: US1976659[P]. 2007-08-02.
- [4] Weber R, Graf T, Freitag C, et al. Processing constraints resulting from heat accumulation during pulsed and repetitive laser materials processing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3966-3979.
- [5] Zhu S J, Zhang Z Y, Chu S L, et al. Research and application of massive micropores water-assisted picosecond laser processing technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0302002.
朱帅杰, 张朝阳, 储松林, 等. 海量微孔水辅助皮秒激光加工技术的研究及应用 [J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0302002.
- [6] Zhang X Q, Xing S L, Liu L, et al. Trepanning of super-alloy with thermal barrier coating using femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102013.
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): 0102013.
- [7] Yilbas B S. *Laser drilling, practical applications* [M]. Heidelberg: Springer, 2013: 1-81.
- [8] Gregory O, Griffith A J, Stroud D. *Drilling turbine blades*: US5222617[P]. 1993-06-29.
- [9] Corfe A G, Stroud D. *Laser barrier material and method of laser drilling*: US5049722[P]. 1991-09-17.
- [10] Stroud D, Corfe A G. *Laser barrier material*: US5140127[P]. 1992-08-18.
- [11] Turner S C. *Laser barrier material and method*: US5767482[P]. 1998-06-16.
- [12] Hu Z L, Darling A D, McDowell S E, et al. *Method for drilling a hole in an airfoil*: US9662743[P]. 2017-05-30.
- [13] Knowles M R H, Kearsley A J, Andrews A J, et al. *Laser-drilling*: US6365871[P]. 2002-04-02.
- [14] Hu Z L, Darling A D, McDowell S E, et al. *Method for drilling a hole in an airfoil*: US9662743[P]. 2017-05-30.
- [15] Wang K D, Yuan X, Dong X, et al. Using the mixture of ice and carbon powder as the back wall protection method for laser machining of turbine blades: CN104801857A[P]. 2015-07-29.
王恪典, 袁新, 董霞, 等. 用冰-碳粉混合物作为涡轮叶片激光加工的后壁防护方法: CN104801857A[P]. 2015-07-29.
- [16] Tao J. *The experimental studies on laser drilling and back strike protection* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 47-56.
陶俊. 激光打孔工艺及背伤保护实验研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 47-56.
- [17] Tian D P, He B, Li P, et al. Investigation of gas film holes machining with no damage on inner surface of cavity by femtosecond laser [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2018, 54(2): 6-9.
田东坡, 贺斌, 李朋, 等. 飞秒激光气膜孔对面壁无损制孔工艺研究 [J]. *航空精密制造技术*, 2018, 54(2): 6-9.
- [18] Horn A, Weichenhain R, Albrecht S, et al. Microholes in zirconia-coated Ni-superalloys for transpiration cooling of turbine blades [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4065: 218-226.
- [19] Dahotre B N, Harimkar P S. *Laser fabrication and*

- machining of materials [M]. Heidelberg: Springer, 2008: 67-137.
- [20] Guo W Y, Wang M C, Zhang X B. Recast layer formed by laser drilling of Ni-based superalloys and progress on its control[J]. Laser Journal, 2003, 24(4): 1-3.
郭文渊, 王茂才, 张晓兵. 镍基超合金激光打孔再铸层及其控制研究进展[J]. 激光杂志, 2003, 24(4): 1-3.
- [21] Weber R, Graf T, Freitag C, et al. Processing constraints resulting from heat accumulation during pulsed and repetitive laser materials processing [J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3966-3979.
- [22] Qi H X, Zhao L, Jin C L, et al. Influence of sample temperature on spectral intensity of nanosecond laser-induced aluminum plasma [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0211002.
齐洪霞, 赵亮, 金川琳, 等. 样品温度对纳秒激光诱导铝等离子体光谱强度的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0211002.
- [23] Cai Z L, Yang Q S, Wang Y. Femtosecond laser-induced breakdown spectral analysis of Cu-Al alloy sputtered thin films [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0615001.
蔡志龙, 杨秋松, 王阳. 铜铝合金溅射薄膜的飞秒激光诱导击穿光谱分析[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0615001.
- [24] Zhou S S, Wang X B, Zuo D L. Characteristics of carbon plasma induced by pulsed laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0111001.
周素素, 王新兵, 左都罗. 脉冲激光诱导碳等离子体的特性[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0111001.
- [25] Hu X D, Li Y L, Bai S Z, et al. Research progress of laser application in material removal [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500008.
胡晓冬, 李元龙, 白少状, 等. 激光在材料去除加工中应用的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500008.
- [26] Li X J, Dong Y W, Yin C P, et al. Geometric parameters evolution experiment of hole during femtosecond laser helical drilling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0502008.
李效基, 董一巍, 殷春平, 等. 飞秒激光螺旋加工小孔几何参数演化实验研究[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0502008.
- [27] Tseng S F, Chen M F, Hsiao W T, et al. Laser micromilling of convex microfluidic channels onto glassy carbon for glass molding dies [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 57: 58-63.
- [28] Liu X D, Chen L, Wang X Z, et al. Study of micro-milling blind holes in Al_2O_3 ceramics with UV laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0514005.
刘晓东, 陈亮, 王曦照, 等. 紫外激光微铣削 Al_2O_3 陶瓷盲孔的工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0514005.

Back Strike and Its Protection of Laser Machining of Microholes on Thin-Walled Cavity

Wang Bin^{1,2,3*}, Liu Yuezhuan⁴, Wang Yufeng^{1,2}, Zhang Wenwu^{1,2**}

¹Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, CAS, Ningbo, Zhejiang 315201, China;

²Key Laboratory of Aero Engine Extreme Manufacturing Technology of Zhejiang Province, Ningbo, Zhejiang 315201, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴College of Mechanical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315336, China

Abstract

Objective Many thin-walled cavity parts in the industrial and aerospace fields need to be processed with many microholes. As a non-contact processing method, laser processing has unique advantages in precision and low-damage processing of such thin-walled cavity structure; however, it causes a back strike problem. First, the materials near the back strike area will be damaged in the working state, leading to a chain reaction and reducing the comprehensive performance of thin-walled cavity parts, such as the turbine blades. It makes the severe back strike area become the key reason for the failure and fracture of multiple parts. Thus, reducing or even eliminating the back strike is of great significance to laser machining of thin-walled cavity parts. The back strike protection of laser machining of the semiclosed thin-walled cavity microhole, represented by a turbine blade, is a worldwide problem, and most current ones are limited to public patents, lacking in detailed process parameters and quantitative indicators. Laser

processing back strike protection technology is the core technology of all countries. Thus, systematic experimental researches are urgently needed to investigate the formation mechanism and protection methods of the back strike in thin-walled cavity microhole laser machining, to identify the main factors affecting the degree of the back strike in laser machining and effectively reduce or even avoid back strike and improve the reliability of laser machining.

Methods Nanosecond laser drilling with the scanning filling method was used to process microholes in 7075 aluminum alloy. The microscopic morphology of the back strike pits was observed by a three-dimensional (3D) confocal laser scanning microscope. First, the effects of the machining parameters, such as the laser energy density, scanning speed of the galvanometer, and defocusing amount on the back strike, were investigated using a single factor control variable method. Afterward, several feasible back strike protection materials were selected through the CTQ verification tests, including polyurethane (PUR), polyacrylamide (PAM), paraffin wax, graphite, silicon dioxide (SiO_2), and tungsten carbide (WC). Then, PUR, PAM, and paraffin were filled into the thin-walled cavity of 7075 aluminum alloy for the back strike protection test of the laser processing of the microholes.

Results and Discussions At the same energy density, the diameter of the back strike pit decreases with the increase in the cavity thickness. With the same cavity thickness, the pit's diameter increases with increasing energy density (Fig. 8). The change trend of the pit depth was consistent with that of the diameter (Fig. 9). The scanning speed has little effect on the entrance diameter of the pit. Under the same cavity thickness, the back strike depth decreases with the increasing scanning speed; however, the fluctuation range was not large. When the scanning speed increases, the spot overlap rate and laser removal ability will decrease, so as the depth of the pit caused by the back strike. Although the taper of the microholes is small, the low laser scanning speed may cause severe thermal damage (Table 6). The diameter of the back strike pit increases with the defocusing distance, which first decreases and then increases (Fig. 11). The pit depth is mainly affected by the cavity thickness, and the negative defocusing distance is equivalent to reducing the cavity thickness. The pit depth increases as the defocusing distance changes from negative to positive (Fig. 12). Through CTQ verification tests, PUR, PAM, and paraffin can be used as protective materials of the back strike of microhole laser processing (Table 7). Based on the back strike protection test of three protective materials of 7075 aluminum alloy triangular prism cavity filled with paraffin, PUR, and PAM, it is found that the protective materials play a significant role in the back strike inhibition compared with cavity processing without protective materials. The protective effect of flowing PAM was better than that of PUR, which in turn was better than that of paraffin. The protective effect of flowing PAM on the back strike is almost one order of magnitude higher than that of PUR and paraffin (Fig. 14). Further back strike protection tests on 7075 aluminum alloy PAM with quadrilateral prism cavities showed that when the flow rate of PAM increased to 3.0 m/s, all cavities of 0.5–3 mm thickness had no back strike for laser processing within 50 s (Fig. 16).

Conclusions At the same energy density, the diameter and depth of the back strike pit decrease with an increase in the cavity thickness. With the same empty cavity thickness, the diameter and depth of the back strike pit increase with an increase in the energy density. The scanning speed has little influence on the entrance diameter of the back strike pit. With the same cavity thickness, the back strike depth gradually decreases with an increase in the scanning speed; however, the fluctuation range is not large. The defocusing distance has a significant influence on the diameter of the back strike pit. When the focus is near the workpiece surface, the back strike is more severe. Proper processing under the state of forward defocusing can reduce the back strike. For 7075 aluminum alloy cavities, the depth of the back strike pit increases with the extension of processing time after filling paraffin, PUR, and flow PAM with 2.0 GW/cm^2 laser intensity and 0.5–6 mm thickness triangular or quadrangular prism cavity. The back strike protection effect of PUR is better than that of paraffin. Besides, the back strike protection effect of the flowing PAM is better than that of PUR and paraffin. At the same cavity thickness or processing time, the pit's depth decreases with the increase in the flow rate of PAM. When the flow rate of PAM reached 3.0 m/s, all cavities with a range of 0.5–3 mm had no back strike for 50 s. These studies are expected to provide a basis for the follow-up back strike protection methods by real-time monitoring of laser drilling status and turning off the laser on time. Besides, it will lay a foundation for the complete processing of microholes on the thin-walled cavity, such as the turbine blades without back strike.

Key words laser technique; laser processing of micro-hole; back strike protection; thin-walled cavity; filling material; critical-to-quality

OCIS codes 350.3390; 350.1820; 160.3900