

引用格式: YAN Qing, PENG Bo, WANG Li, et al. Research on Laser Cold Machining Hole Penetration Spectroscopy Detection Technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(3):0352119

闫庆, 彭波, 汪丽, 等. 激光冷加工孔穿透光谱检测技术研究[J]. 光子学报, 2023, 52(3):0352119

激光冷加工孔穿透光谱检测技术研究

闫庆¹, 彭波¹, 汪丽¹, 王东¹, 赵华龙², 高飞¹, 华灯鑫¹

(1 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 光子制造系统与应用研究中心, 西安 710119)

摘要: 为了避免对存在空气内腔器件加工过程中对壁损伤问题, 需要实时判断孔穿透状态。针对该问题提出基于激光诱导击穿光谱检测技术的飞秒激光制孔的孔穿透检测方法, 选取 Cr(I)521.531 nm 为特征发射光谱, 利用特征谱线强度的变化实现孔穿透状态的判断。设计了光谱检测实验系统并在孔加工实验过程中实现了特征光谱的采集与孔穿透状态的判断, 验证了该方法在解决孔加工过程中避免产生对壁损伤问题的可行性。

关键词: 激光冷加工; 激光诱导击穿光谱; 对壁损伤; 特征谱线; 穿透检测

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235203.0352119

0 引言

飞秒激光(脉冲宽度 $\leq 10^{-15}$ s)属于超短脉冲激光, 具有峰值功率密度高和脉冲作用时间短等特性。超短脉冲激光加工过程中, 激光作用区域内温度迅速上升使得物质发生电离处于等离子体状态, 材料以等离子体形式喷发出去得到去除^[1-2]。由于飞秒激光加工过程能有效避免热效应对周围材料带来的影响, 工业中又将其称为冷加工技术, 可实现无热熔区、无重熔层、无细微裂纹的材料去除, 是实现航空发动机涡轮叶片气膜孔等超精细冷加工的理想手段^[3-5]。但对存在空心内腔且相互之间距离较近的加工材料, 孔加工过程中易出现对壁损伤, 这严重影响了加工材料的质量和寿命。因此, 在采用飞秒激光进行孔加工时检测孔穿透状态对于防止对壁损伤尤为重要。

德国汉诺威激光中心研究人员分别采用纳秒、皮秒和飞秒激光对薄钢片进行激光打孔研究, 对比验证了飞秒激光在孔加工过程中的优越性^[6]。DAS DK 等对采用飞秒激光加工带热障涂层的高温合金气膜冷却孔进行了详细实验, 对加工生成孔的重要特征进行检查, 结果表明飞秒激光可实现高质量的气膜冷却孔加工^[7]。JIA Haini 等研究了飞秒激光与金属相互作用的机理, 并设计了一套用于涡轮叶片气膜孔加工的装置^[8]。随着工程化的广泛应用, 在对某些特殊零件进行制孔时, 如存在空心内腔的航空发动机涡轮叶片, 加工时过度穿透带来的对壁损伤限制了飞秒激光的应用, 因此需要在激光孔加工过程中对孔穿透状态进行精确实时判断和控制以避免对壁损伤。美国通用电气公司在利用激光冷加工发动机涡轮叶片技术方面比较成熟, 其主要采用填充材料的方法防止对壁损伤, 并大多应用于航空领域。李杰等针对航空发动机涡轮叶片加工时产生的对壁损伤, 利用 CCD 光学成像的方法实现穿透的判断, 受限于图像采集和处理速度, 该方法判断时间长且存在人为误差^[9]。中国科学院大学陶俊针对采用填充材料阻隔激光能量来防止对壁损伤做了详细研究, 结果表明, 以石蜡-石墨作为填充材料, 可在一定程度上阻隔激光能量、减少对壁损伤^[10]。XIE Yunhui 等研究了运用神经网络对飞秒激光加工进行监测和控制, 此方法不需要了解激光加工的物理特性, 而是直接从实验数据进行训练, 但该方法需要大量标记的实验数据且影响因素较多^[11]。

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2021YFF0701103), 陕西省教育厅重点科研计划(No. 22JY049)

第一作者: 闫庆, yanqing@xaut.edu.cn

通讯作者: 汪丽, wlfuyun@xaut.edu.cn

收稿日期: 2022-07-06; 录用日期: 2022-09-21

<http://www.photon.ac.cn>

激光诱导击穿光谱技术(Laser-induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)是利用高能脉冲激光与材料相互作用产生瞬态等离子体羽流,通过研究激光产生等离子体冷却过程中的光谱发射,实现对被测目标的定性与定量分析的一种光谱技术^[12-13]。在LIBS检测系统中,当高功率密度激光作用于物质上时,物质会瞬间气化产生等离子体。等离子体冷却过程中会因为原子或离子发生跃迁而发出特征波长谱线,通过光纤采集等离子体并将光谱信号传输至光谱仪,分析光谱图中特征波长谱线数据就可以实现对待测样品的定性及定量分析。国内外学者应用此技术对不同物质元素进行了分析研究^[14-17]。同时,LIBS响应速度快,从激光脉冲发射到光谱仪进行信号收集的整个过程大约在微秒至毫秒量级,因此可实现连续在线检测分析。

本文提出基于激光诱导击穿光谱技术的飞秒激光制孔的孔穿透检测方案,通过光谱采集系统实时采集制孔过程中等离子体激发光谱的变化情况来实现孔穿透判断,依托飞秒激光微加工设备,通过实验验证了运用LIBS法对飞秒激光制孔进行孔穿透判断的可行性。

1 激光冷加工光谱检测原理及实验

在激光冷加工过程中,飞秒激光脉冲聚焦于待加工样品表面,当激光的峰值功率密度大于材料烧蚀阈值时,待加工样品作用区域内材料迅速升温导致瞬间蒸发或气化,气化后的物质继续吸收激光脉冲能量时,材料就会发生电离现象形成等离子体向外喷发从而得到去除。在激光脉冲作用结束后,伴随等离子体的向外膨胀和喷发,等离子体温度逐渐冷却,气化物质中处于激发态的原子和离子受到激发从高能级跃迁到低能级或基态,形成相应的原子和离子特征发射谱线。

因此,可以利用等离子体温度和粒子数密度的演算值反演出发射谱线强度。激光冷加工孔穿透光谱检测系统根据分析特征的光谱强度监测制孔过程,利用孔穿透前后特征谱线强度变化判断孔是否穿透。当孔完全穿透时,无发射光谱产生时,特征发射谱线的谱线强度为零。

激光冷加工光谱检测系统通过对飞秒激光打孔过程中的特征发射光谱进行检测分析,实时判断孔穿透状态。检测系统主要由激光器、光谱仪、上位机处理系统及准直聚焦透镜组组成。系统结构框图如图1,激光器为中心波长1 030 nm的PHAROS飞秒激光器,超短脉冲持续时间小于190~20 000 fs,重复频率为1 kHz~1 MHz,激光器发出的激光束经扩束、准直、聚焦等透镜后作用于待加工工件表面进行孔加工,飞秒激光器参数如表1。光谱仪采用中阶梯光栅光谱仪,其光谱覆盖范围为200~1 100 nm,光谱的分辨率为0.1 nm,光谱仪具体参数如表2。光谱仪与计算机连接,上位机程序执行谱线识别及谱线强度测量功能。激光束经过扩束准直光路之后经反射镜垂直向下发射经过部分反射镜,然后通过聚焦镜组聚焦于待加工工件表面的焦点进行制孔加工。飞秒激光加工产生的发射光谱经镀膜反射镜将反射至左侧聚焦镜组,然后聚焦进入光纤,经光纤耦合进入到光谱仪中。光谱仪进行分光处理之后把光信号转换成电信号,最后由计算机对数据进行分析处理,完成孔穿透检测。

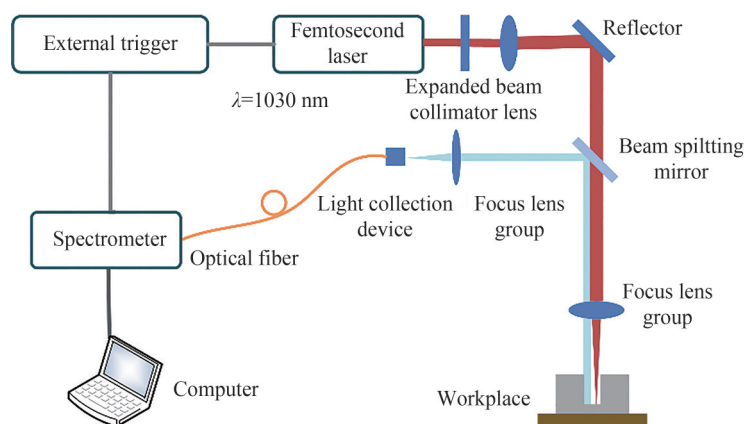


图1 基于激光诱导击穿光谱法的孔穿透检测系统

Fig.1 Pore penetration detection based on laser-induced breakdown spectroscopy

表1 飞秒激光器参数
Table 1 Femtosecond laser parameters

Parameter	Numerical value
Laser wavelength	1 030 nm
Average power	20 W
Laser frequency	1 kHz~1 MHz
Pulse width	190~20 000 fs
Focal spot diameter	20~30 μm

表2 光谱仪参数
Table 2 Spectrometer parameters

Parameter	Numerical value
Spectral range	200~1 100 nm
Integration time	100 ms
Signal to noise ratio	300:1
Optical resolution	0.1 nm
Optical fiber connector	SMA905,0.22 numerical aperture

2 特征谱线选择

304不锈钢是一种应用广泛的铬镍合金,此合金具有良好的耐腐蚀性、耐热性,硬度高且加工性能好。因此,实验选择304不锈钢钢片作为待加工样品,样品规格为30 mm×20 mm×2 mm。由于304不锈钢是一种多元素成分的合金钢,不同元素自由电子跃迁产生的特征谱线十分密集,相邻谱线之间存在重叠干扰,因此特征谱线的选择尤为重要。根据304不锈钢元素成分和原子光谱数据库初步选定Cr元素作为特征谱线,通过实验确定在波长520~560 nm波段内可获得较好的谱线信息。在波长520~560 nm波段对待加工样品进行元素分析得到的LIBS光谱分布如图2。结合图2和Cr元素在该波段谱线信息可以看出Cr(I)521.531 nm跃迁几率大、谱线发射强度高、无相邻谱线干扰,因此选择Cr(I)521.531 nm谱线为孔穿透检测的特征谱线。

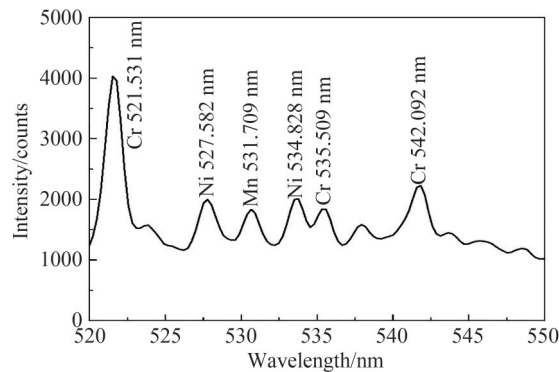


图2 待加工样品 LIBS 光谱
Fig.2 LIBS spectrum of the sample

3 激光冷加工光谱采集及孔穿透检测

3.1 实验参数优化设计与分析

在飞秒激光制孔过程中,激光自身参数和工艺参数对光谱能量强度具有显著影响,先通过实验研究了制孔常用参数对LIBS检测性能的影响。针对Cr(I) 521.531 nm、Cr(I) 542.092 nm、Ni(I) 527.582 nm三条谱线,运用控制变量法分别实验得到了激光器功率变化、待加工件离透镜的距离、旋转速度与光谱能量强度变化之间的关系,分析结果分别如图3(a)、(b)、(c)。从图3(a)中可以看出,三条谱线强度随激光功率的增

大而增大,当激光功率为32 W时,谱线强度最大。激光功率继续增大,光谱强度下降,主要是因为激光能量过大导致等离子体的自吸收效应增加。因此选择32 W作为激光输入功率。图3(b)为三条谱线强度随样品和透镜距离的变化曲线,当距离为150 mm时,光谱强度最大。图3(c)为三条谱线强度与三种光束旋转转速的关系曲线,可以看出,光束转速为3 400 r/min时的峰值能量最小,1 400 r/min时的峰值能量最大。当转速较大时,单位时间、单位面积内不锈钢金属接触的激光能量较小,光束重叠率较低,会出现材料去除不均匀的情况。当光束旋转速度减小时,单位时间、单位面积内不锈钢金属接触的激光能量较大,光斑重叠率过高,结果导致孔尺寸稍微偏大,加工效果不佳,具体表现为热影响范围变大和重铸层明显变厚。根据上述因素的不同特点,当旋切转速为2 400 r/min时,激光加工效果最好,虽然峰值能量不是最高,但是受热影响较轻和重铸层控制的比较好,加工孔尺寸也十分吻合。所以选择2 400 r/min为加工的光束旋转转速。根据上述实验结果确定激光功率为32 W、样品离透镜的距离为150 mm、旋切速度为2 400 r/min作为后续实验参数。

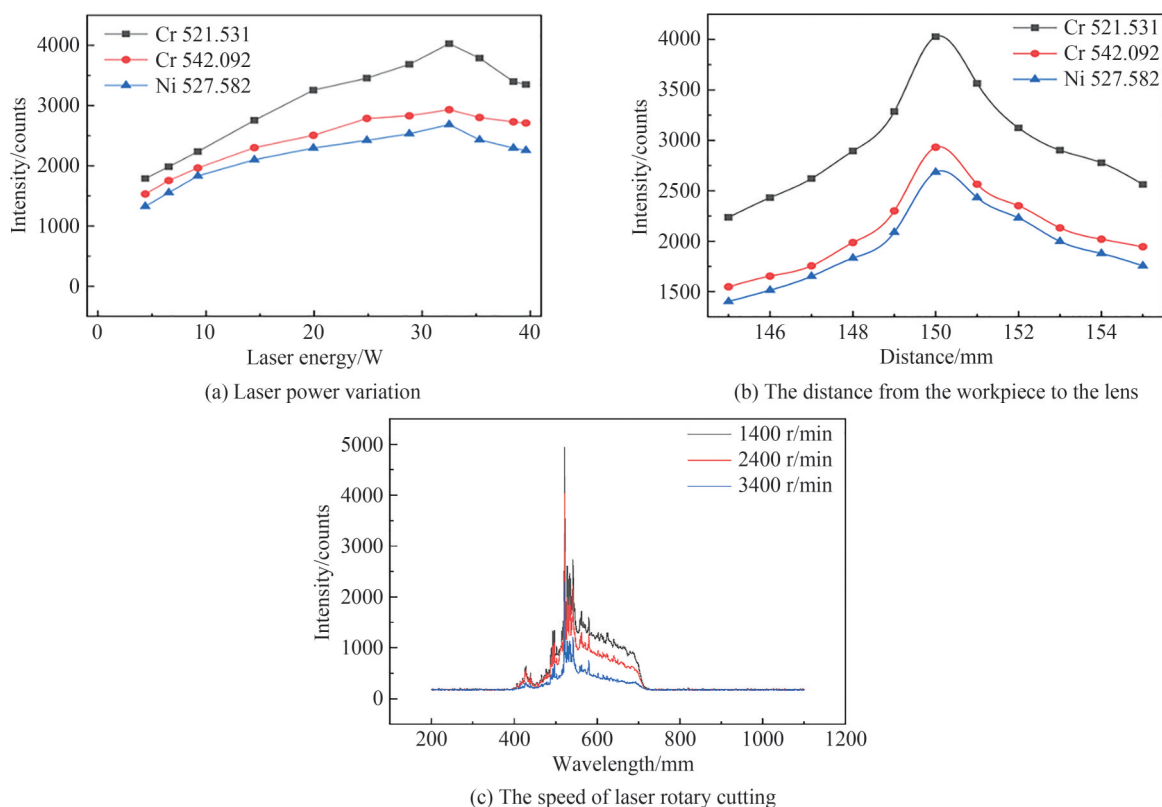


图3 参数变化与光谱强度的关系

Fig.3 Relationship between parameter change and spectral intensity

3.2 孔穿透光谱检测实验

根据3.1节所确定的实验参数进行孔穿透光谱检测实验,实验时在不锈钢钢片背部贴一层保护材料,起到延缓对壁损伤的作用,同时可通过观察其状态变化实现保证孔加工质量的同时不造成对壁损伤。对同一块不锈钢钢片进行相同孔径的孔加工5次,以减少随机误差,光谱仪积分时间设置为100 ms,利用外触发装置控制光谱仪在激光器出光的同时开始采集数据,每100 ms记录一组光谱数据。

图4为制孔过程中100 ms时初次检测到的第1组特征光谱数据,飞秒激光开始对材料进行孔加工,从图中可以看到在500~550 nm波段内总体波峰较少,但存在明显尖峰,其最高峰对应波长为Cr(I)521.531 nm,对应峰值为610 counts。光谱峰值最大值出现在第1.7 s时的第17组光谱图像中,如图5,最大峰值为4 028 counts,波长为Cr(I)521.531 nm,且在400~700 nm波段内有很多波峰,此时光谱仪采集到的加工过程中激发的发射谱线强度最强。

制孔过程持续23.9 s,得到了239组数据,提取其中20组数据,如图6所示,反应了孔穿透过程中光谱强度变化。将239组数据中特征原子Cr(I) 521.531 nm的光谱数据提取出来得到图7。从图中可以看出,峰值

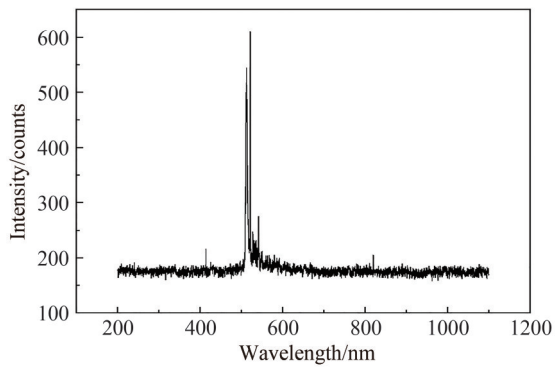


图4 100 ms时第一组谱分布
Fig.4 Spectral distribution at 100 ms

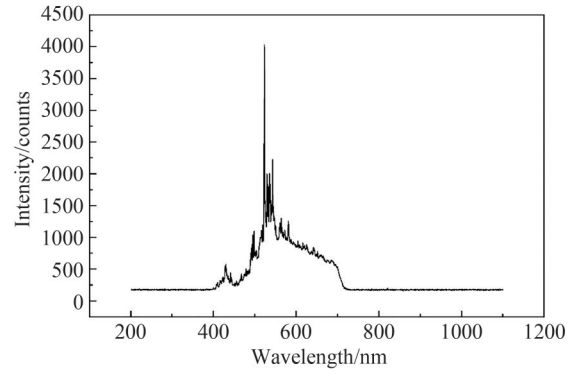


图5 第1.7 s时第17组光谱分布
Fig.5 Spectral distribution at 1.7 s

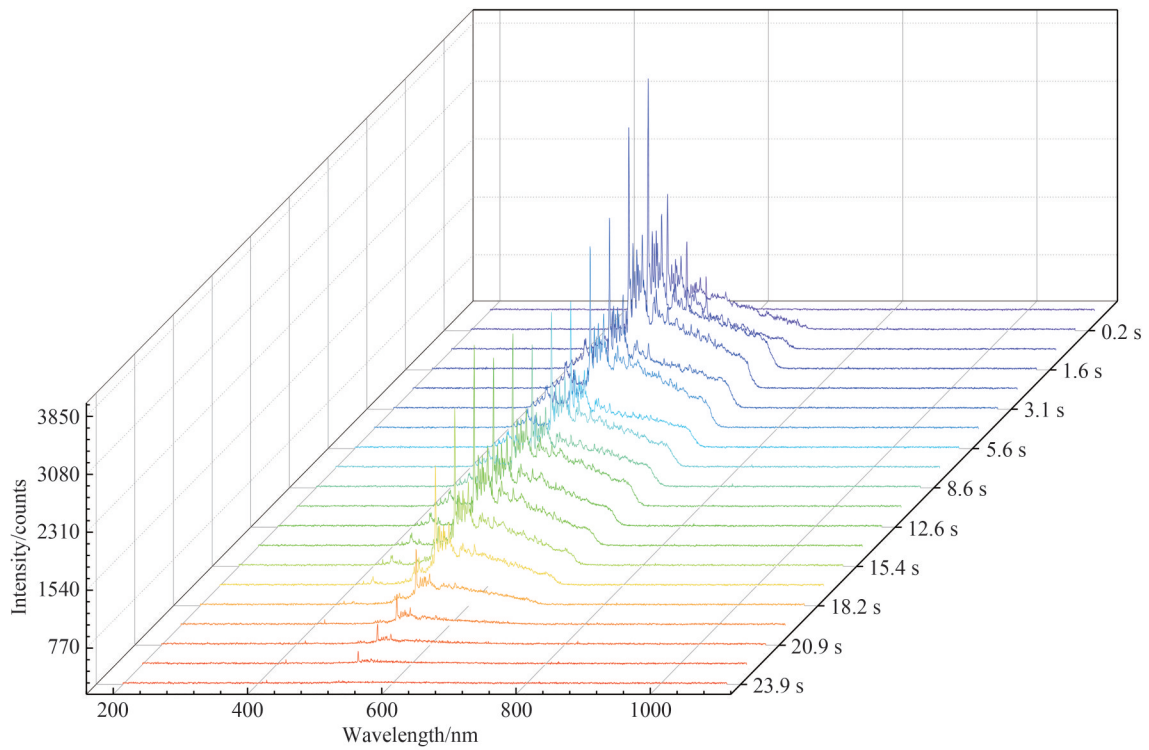


图6 发射谱线强度随时间变化
Fig.6 Variation of emission line intensity with time

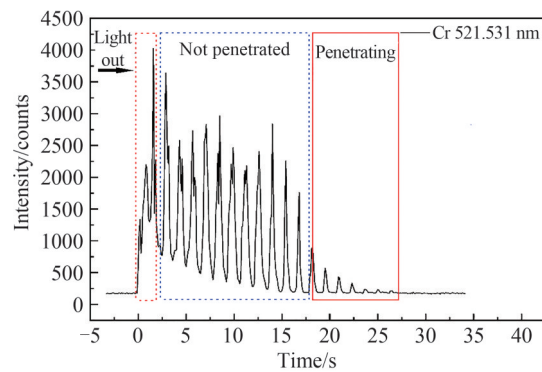


图7 特征谱线光谱强度随时间变化
Fig.7 Variation of spectral intensity of characteristic spectral lines with time

强度在打孔初期达到顶峰,在0~2 s激光器出光作用于工件表面,原子发射谱线强度达到最大随后整体呈下降趋势,在2~17 s下降趋势较缓慢且峰值强度均大于1 700 counts,此时属于制孔过程中未穿透阶段。未穿透阶段的光谱强度会出现下降后又回升的U型现象,这是由于孔深的增加以及旋切打孔的特征导致发射光谱进入聚焦光路的量不同,因而光谱仪测到的特征原子等离子体谱线强度不同。17 s后峰值开始大幅下降,孔逐渐穿透导致发射光谱发生透射现象,反射回来的特征光谱强度下降。27 s后无反射回来的特征谱,只存在谱线强度小于230 counts的背景噪声,判断孔完全穿透。

图8为相同实验参数条件下对同一不锈钢板不同位置制孔的光谱强度图,5个孔所处的加工阶段分别为未穿透、完全穿透、过度穿透。在5个孔加工过程中均对特征原子Cr(I)521.531 nm的谱线进行追踪,分析特征原子发射谱线光谱强度变化趋势与制孔过程中各阶段之间的规律。孔1在孔部分穿透时发射谱线强度开始下降,此时激光器停止出光,显微镜观察加工孔及保护材料的微观形貌,如图9。由图9(a)可以看出孔加工过程明显尚未完成,孔背面边缘部分存在未加工的余料且孔边缘十分粗糙,图9(b)则显示保护材料上只存在轻微的灼烧痕迹。因此谱强度出现下降并未实现孔完全穿透。孔2、孔3、孔4为完全穿透,加工时间有所不同,特征谱线光谱强度震荡规律一致,幅值逐渐减小为零,激光器停止出光。完全穿透时孔形貌情况如图10,图10(a)显示孔完全穿透且边缘光滑,加工质量好,图10(b)显示保护材料存在灼烧坑但未穿透,不会

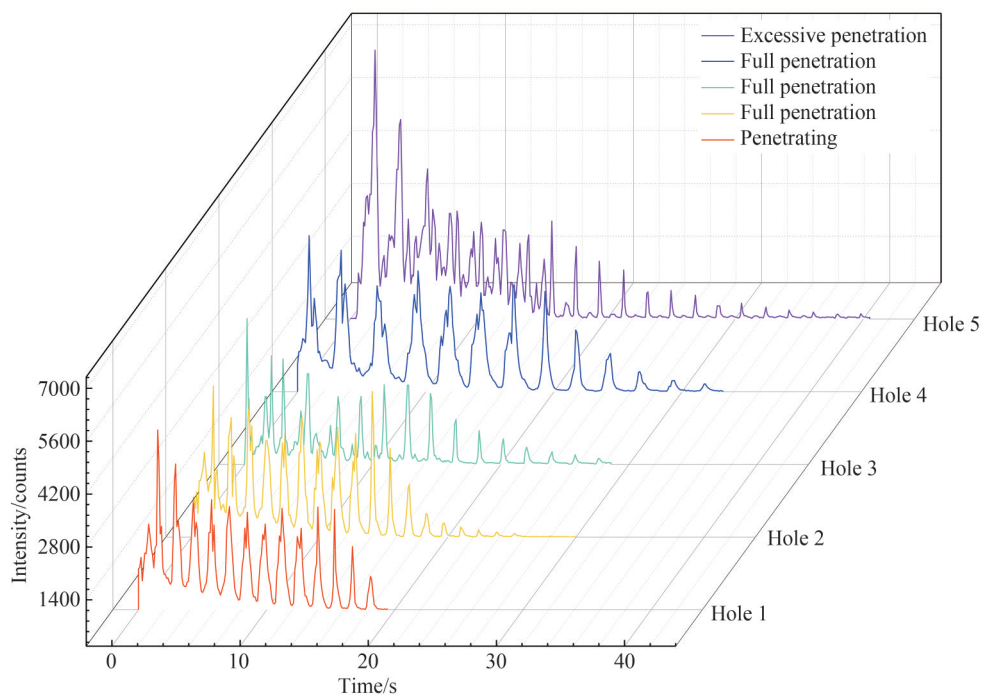
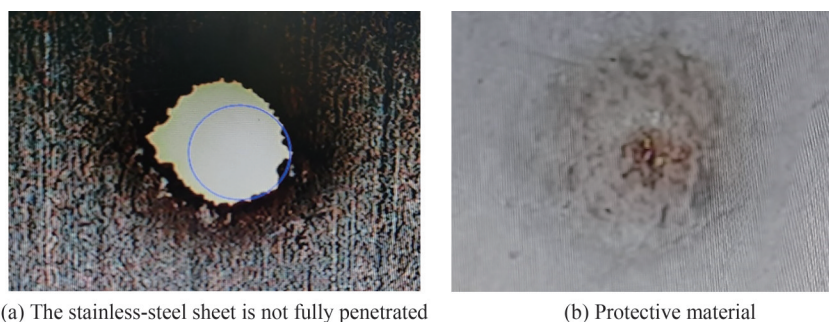


图8 制孔过程中各阶段光谱强度

Fig. 8 Spectral intensity map of each stage in the process of hole making



(a) The stainless-steel sheet is not fully penetrated

(b) Protective material

图9 孔未完全穿透情况下孔及保护材料形貌

Fig. 9 Morphology of hole and protective material in case of incomplete hole penetration

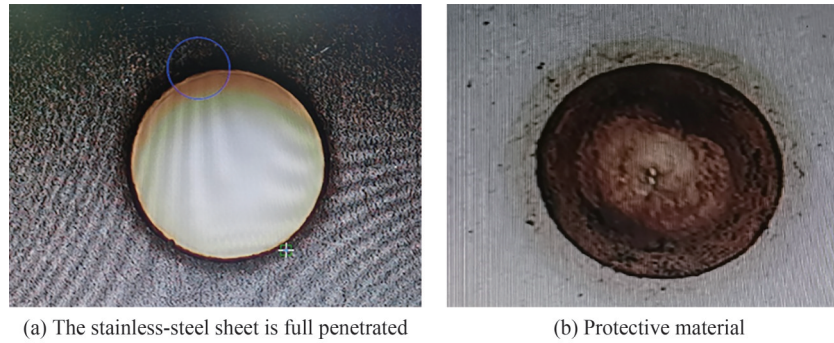


图 10 孔完全穿透情况下孔及保护材料形貌

Fig. 10 Morphology of the hole and protective material in the case of full hole penetration

产生对壁损伤。孔 5 为过度穿透,在孔完全穿透后让激光器保持工作一段时间,从图 8 中可以看出在孔完全穿透后只存在光谱强度较小的噪声信号而无特征原子发射谱线。过度穿透会导致穿透保护材料,造成对壁损伤,保护材料损伤情况如图 11。

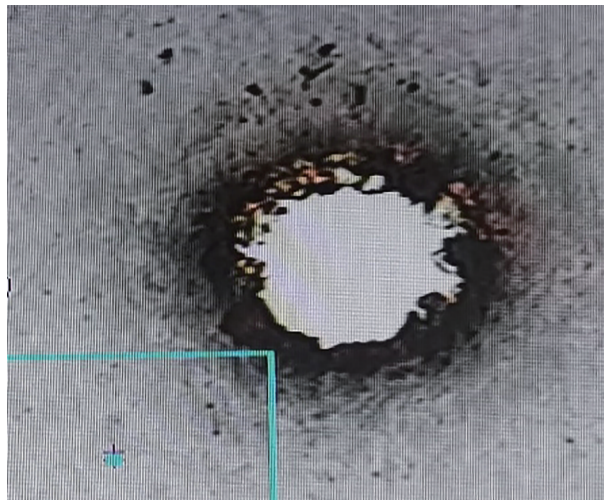


图 11 过穿透情况下保护材料形貌

Fig. 11 Morphology of protective material under excessive penetration

在孔加工过程中,当孔完全穿透后如果不能立即让激光器停止工作,后续激光脉冲信号就会穿透保护材料造成对壁损伤。上述实验结果证明了根据特征谱线强度变化可准确判断孔穿透过程,当检测到特征原子谱线强度降到零时判断孔完全穿透,立即停止激光器,此时孔加工质量高,同时避免过度穿透造成对壁损伤的发生。

4 结论

本文提出了一种基于激光诱导击穿光谱的飞秒激光制孔的孔穿透检测方法。根据所设计的系统及对 304 不锈钢加工材料的分析,选择 Cr(I)521.531 nm 作为特征原子发射谱线进行分析。在通过实验获得激光功率 32 W、样品距透镜距离 150 mm、旋切速度为 2 400 r/min 的最优实验参数的基础上,得到了孔穿透状态与谱线强度之间的对应关系。在未穿透时,谱线强度峰值大于 1 700 counts,在孔穿透过程中,光谱中波峰逐渐降低直至消失,此时特征原子的等离子体的谱线强度为零,判断孔完全穿透,验证了利用该方法进行孔穿透判断的可行性。因此可以通过实时监测等离子体的谱线强度判断孔穿透状态,反馈信号给激光控制单元,避免对壁损伤的发生。

参考文献

- [1] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A, 1996, 63(2): 109-115.
- [2] LI X, GUAN Y. Theoretical fundamentals of short pulse laser-metal interaction: a review [J]. Nanotechnology and

- Precision Engineering, 2020, 3(3): 105-125.
- [3] CALABRESE L, AZZOLONI M, BASSI F, et al. Micro-milling process of metals: a comparison between femtosecond laser and EDM techniques[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2021, 5(4): 125.
- [4] LEITZ K H, REDLINGSHOFER B, REG Y, et al. Metal ablation with short and ultrashort laser pulses[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 230-238.
- [5] LEI S, ZHAO X, YU X, et al. Ultrafast laser applications in manufacturing processes: a state-of-the-art review [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020, 142(3): 031005.
- [6] MOMMA C, NOLTE S, CHICHKOV B N, et al. Precise laser ablation with ultrashort pulses [J]. Applied Surface Science, 1997, 109(110): 15-19.
- [7] DAS D K, POLLOCK T M. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(15-16): 5661-5668.
- [8] JIA Haini, YANG Xiaojun, ZHAO Wei, et al. Femtosecond laser pulses for drilling the shaped micro-hole of turbine blades [J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(4): 44202-44202.
- [9] LI Jie, ZI Jinfeng, YANG Xiaojun, et al. Application of femtosecond laser micro-machining technology in turbine blades of domestic aeroengine [J]. Electromachining and Mould, 2018, (A01): 54-58.
李杰, 瞿进锋, 杨小君, 等. 飞秒激光微加工技术在航空发动机高压单晶涡轮叶片的应用 [J]. 电加工与模具, 2018, (A01): 54-58.
- [10] TAO Jun. The experimental studies on laser drilling and back strike protection [D]. Ningbo: Chinese Academy of Sciences, 2019.
陶俊. 激光打孔工艺及背伤保护实验研究 [D]. 宁波: 中国科学院大学, 2019.
- [11] XIE Y, PRAEGER M, GRANTJACOB J A, et al. Motion control for laser machining via reinforcement learning [J]. Optics Express, 2022, 30(12): 20963-20979.
- [12] ANABITARTE F, COBO A, LOPEZHIGUERA J M. Laser-induced breakdown spectroscopy: fundamentals, applications, and challenges [J]. ISRN Spectroscopy, 2014, 2012: 1-12.
- [13] CAO Z, JIANG L, WANG S, et al. Influence of electron dynamics on the enhancement of double-pulse femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy of fused silica [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2018, 141: 63-69.
- [14] STURM V, PETER L, NOLL R. Steel analysis with laser-induced breakdown spectrometry in the vacuum ultraviolet [J]. Applied Spectroscopy, 2000, 54(9): 1275-1278.
- [15] YU Jianli, LI Cheng, YAO Guanxin, et al. Spatial evolution characteristics of laser-induced plasma in liquid matrix [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0802001.
余建立, 李乘, 姚关心, 等. 激光诱导液相基质等离子体的空间演化特性 [J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0802001.
- [16] LIN Zhenyuan, HONG Minhui. Femtosecond laser precision engineering: from micron, submicron, to nanoscale [J]. Ultrafast Science, 2021, 2021: 9783514.
- [17] ZHONG Qixiu, ZHAO Tianzhuo, LI Xin, et al. Standardized cross-validation and its optimization for multi-element LIBS analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(2): 622-627.
钟奇秀, 赵天卓, 李欣, 等. 多元素 LIBS 分析的标准化交叉验证及其优化 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 622-627.

Research on Laser Cold Machining Hole Penetration Spectroscopy Detection Technology

YAN Qing¹, PENG Bo¹, WANG Li¹, WANG Dong¹, ZHAO Hualong²,
GAO Fei¹, HUA Dengxin¹

(1 School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2 Research Center for Photonic Manufacturing System and Application, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: The ultra-high peak power and ultra-short pulse time characteristics of the femtosecond laser allow it to act quickly on a specific area during machining, and the material in the area of the laser beam is removed in the form of a plasma eruption to achieve cold machining with almost no thermal impact on the surrounding material. Laser cold machining technology is widely used because of its high processing

accuracy, small heat-affected zone and high machining efficiency. One of the important applications is the machining of air film holes in aero-engine turbine blades. Due to the existence of hollow cavities and the close distance between the opposite walls of the aero-engine turbine blades, the hole making process is prone to contramural damage. Therefore, in order to avoid contramural damage and improve the quality of air film hole machining, a real-time detecting system needs to be developed to judge the hole penetration status during the hole machining in real time. Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) is a kind of atomic emission spectroscopy technology, which has a fast response time and can achieve real-time detection and analysis of the target under test. In the LIBS detection system, a spectrometer is used to collect the emission spectra excited during the plasma cooling process of femtosecond laser machining, and the elements corresponding to each spectral line can be identified according to the characteristic wavelength of atomic or ion emission spectra in a specific wavelength band, and quantitative analysis can be achieved by measuring the intensity of emission spectra captured at a specific wavelength. Aiming at the problem of contramural damage in the machining of aero-engine turbine blade with femtosecond laser, a hole penetration detection scheme based on laser-induced breakdown spectroscopy detection technology of femtosecond laser hole making is proposed. Based on the elemental analysis of the material and the information of the LIBS spectrogram obtained in the wavelength 520~560 nm during processing, the emission spectrum of Cr(I) 521.531 nm is selected as the characteristic spectral line, and the change in intensity of the characteristic spectral line is used to realize the judgment of the hole machining process. In this paper, we design a laser cold machining hole penetration spectroscopy detection system consisting of an ultrashort pulse laser, a grating spectrometer, a focusing optical path and an upper computer for data processing and analysis. The effect of important machining parameters on the detection performance of LIBS is studied experimentally, and the effect of machining parameters on the spectral intensity is analyzed, and the optimized machining parameters are selected as laser energy of 32 W, the distance of the part to be processed from the focus of 150 mm, and the laser spin speed of 2 400 r/min. The designed hole penetration detection system is used to continuously collect and analyze the plasma spectra during the actual hole machining, and the correspondence between the specific spectral intensity and the penetration state of the sample to be processed in the hole machining is obtained. The intensity of the spectrum peaks at the beginning of the hole punching because of the high percentage of upward reflection of the atomic emission spectra during the laser exit stage; the overall intensity of the atomic emission spectra gradually decreases as the hole depth increases; the detected intensity of the atomic emission spectra starts to decrease significantly when the hole starts to penetrate gradually; when the hole is completely penetrated, there are no reflected back characteristic spectral lines and only background noise with spectral line intensity less than 230. The experimental results verify the feasibility of the method in solving the problem of preventing damage to the opposite wall during femtosecond laser hole machining, and can provide real-time feedback on the completion of hole processing to help the development of the feedback system, which is conducive to the further optimization of laser cold machining technology in terms of accuracy and efficiency.

Key words: Laser cold machining; Laser-induced breakdown spectroscopy; Contramural damage; Characteristic spectral lines; Penetration detection

OCIS Codes: 140.3440; 300.6365; 300.6360