

引文格式: 赵念友, 程晗, 胡永祥. 激光喷丸工艺参数对水约束层动态响应的影响[J]. 航空制造技术, 2021, 64(12): 47-52, 69.

ZHAO Nianyou, CHENG Han, HU Yongxiang. Process effect on dynamic response behavior of water confining layer in laser peening[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(12): 47-52, 69.

激光喷丸工艺参数对水约束层 动态响应的影响*

赵念友, 程 晗, 胡永祥

(上海交通大学机械与动力工程学院, 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

[摘要] 研究激光冲击作用下水约束层的动态响应过程, 对于提高冲击效应的稳定性和可靠性具有重要意义。通过建立激光冲击作用下水约束层动态响应的试验观测系统, 分析不同脉冲能量和出水水压作用下水约束层动态响应时间和冲击效应的影响规律。研究表明, 一定压力下的喷嘴圆柱射流在工件表面会形成一层稳定的水膜, 能够满足激光冲击水约束层需求; 在高能激光诱导等离子体冲击波作用下, 水约束层爆炸飞溅并产生大量水雾, 但连续水射流作用能够使得水约束层快速恢复, 水雾也逐渐消散; 不同脉冲能量和出水水压对水约束层动态响应时间和冲击效应无显著影响, 水约束层恢复时间为 4~18ms, 水雾持续时间为 30~50ms, 允许激光器最大出光频率可达 20Hz 以上。

关键词: 激光喷丸; 水约束层; 动态响应时间; 水雾; 高速相机

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.12.047



赵念友

硕士研究生, 研究方向为激光喷丸强化。

激光喷丸是一种新型的表面强化工艺, 具有引入残余压应力幅值高、工艺可控性强、靶材表面质量好等突出工艺特点, 在航空航天、国防装备制造等领域有着广泛的应用前景^[1-2]。由于主要应用对象为航空发动机叶片、航空整体构件等高附加值零件, 且一般是零件制造最后一道关键工序, 激光喷丸对其工艺稳定性和可靠性要求较高。

在激光喷丸过程中, 通过高能激光诱导等离子体对靶材产生冲击效应进而强化零件, 在零件表面覆盖约束层是提升激光喷丸有效冲击效应的重要工艺方法。20 世纪 70 年代,

Anderholm 和 O'keefe 等^[3-4]发现在工件表面增加透明约束层, 可以大幅度提高冲击压力和冲击变形效果, 从而发展出了激光喷丸工艺方法。1997 年, 李志勇等^[5]研究发现当采用 K9 玻璃作为约束层时, 获得的冲击波峰压的大小可以提高到无约束层时的 8.74 倍。2002 年, 江苏大学周建忠等^[6]采用光学玻璃和有机硅凝胶作为约束层, 研究了约束层厚度对激光喷丸效果的影响, 发现靶材的激光喷丸效果随着约束层厚度的增加而提高。然而, 由于玻璃等介质的约束层容易因冲击爆炸而碎裂, 无法进行持续多次冲击并且不便于清理

* 基金项目: 国家自然科学基金(51922069); 国家“高档数控机床与基础制造装备”重大科技专项(2018ZX04005001)。

更换,难以满足实际工程应用。相比于玻璃等固态介质,液态介质水具有击穿阈值高、可自动恢复、可控性强以及成本低等优点,流动水膜已经发展成为一种常用约束层^[7]。1996年, Berthe 等^[8-9]研究了采用水约束层的激光冲击过程中等离子体行为和击穿现象。2011年,中国航空制造技术研究院曹子文等^[10]研究了测量和调控水膜厚度的方法。目前,国内外对激光喷丸水约束层动态响应过程的研究较少,激光喷丸工艺物理过程复杂,激光冲击作用下水约束层响应容易受到脉冲能量等工艺参数的影响,掌握激光冲击作用下约束层的动态响应特性对于提高激光喷丸工艺稳定性和改善工艺过程控制有着重要作用。

为了研究激光冲击作用下水约束层的动态响应过程与冲击效应以及工艺参数对两者的影响,建立了约束层高速动态响应过程试验观测系统;试验研究了不同工艺参数下,水约束层动态响应过程的变化特性,分析了冲击作用下水约束层响应时间以及出水水压对冲击效应的影响。

激光喷丸工艺原理

图1为激光喷丸原理示意图。高能(GW/cm^2 量级)短脉冲(ns量级)激光束穿过透明水约束层而辐射靶材表面吸收层。吸收层吸收激光能量使得温度急剧升高而迅速气化,并电离形成高温高压等离子体,由于继

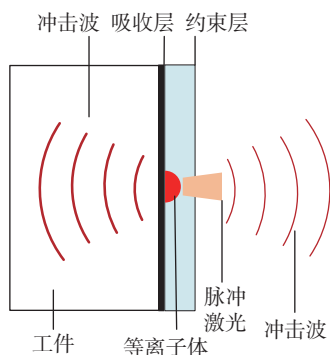


图1 激光喷丸工艺原理

Fig.1 Schematic of laser peening process

续吸收激光能量,等离子体温度将继续升高,并离开靶面运动向外膨胀。由于等离子体膨胀受到水约束层的限制,产生瞬时高幅值冲击压力,压力幅值可达到数个 GPa,持续时间约 100ns。高幅值等离子体冲击压力作用下,靶材表层短时间内发生局部高应变率塑性形变,产生有益的残余压应力,提高工件抗疲劳性能^[11]。

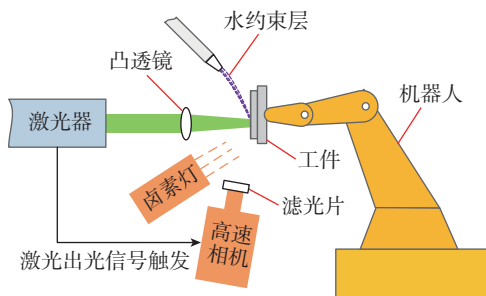
考虑激光冲击过程瞬态特性,水约束层由于受到等离子体冲击压力快速膨胀的作用,难以保持其稳定的流动特性,在激光冲击作用区域会发生飞溅效应。这一方面需要通过连续水流在激光冲击作用区域恢复完整的水膜以保障下一次冲击效果。另一方面,水约束层的飞溅会在激光传输光路中形成水雾,可能会影响下一个脉冲激光能量的传输。这两方面的因素,都可能对激光喷丸工艺过程的稳定性和可靠性产生影响。

试验方法

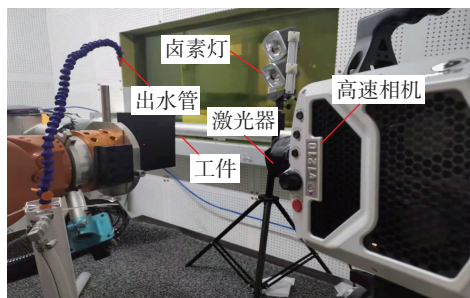
激光诱导等离子体冲击波压力幅值高、持续时间短,导致水约束层

的动态响应十分剧烈,水膜从飞溅到恢复的过程响应时间很短(ms量级)。因此,研究水约束层的动态响应过程需要建立一套高帧率的动态观测系统。试验采用的观测系统如图2所示。试验系统主要包括激光器、机器人、观测模块等。激光光源采用调Q型Nd:YAG固体激光器,激光波长1064nm,脉冲能量输出范围是1~13J,激光脉宽14.3ns,能量稳定度 $\leq 1\%$,重复频率1~5Hz分级可调,并且配有激光出光信号输出接口。平板试样装夹在机器人末端,通过直线移动实现多次在不同位置的激光冲击。激光冲击过程中,施加水约束层的水流出水水压由水阀阀门开口大小进行控制,经由圆孔出水管流出形成圆柱射流撞击到平板上,在脉冲激光作用位置形成约束层水膜。

观测模块包括高速相机、滤光片、卤素灯等。高速相机采用 Phantom V1210 型号高速相机,光敏传感器是SR-CMOS,像素 1280×800 ,最大拍摄速度为12700帧/s。考虑到激光喷丸试验中激光功率密度大,强光对



(a) 示意图



(b) 实物图

图2 水约束层观测试验装置

Fig.2 Experimental device for water confining layer observation

高速相机中感光元件造成损伤,故在镜头上配置通光波段 400~950nm 的滤光片来过滤 1064nm 激光以达到保护相机的目的。另外,由于试验环境光照强度不足,需要采用辅助光源进行照明。卤素灯频闪很小,光线稳定性较好,选用卤素灯作为高速相机的辅助光源。考虑到激光冲击过程瞬态特性,人的反应速度难以准确控制高速相机及时拍摄激光冲击水约束层响应全过程,因此需要建立激光器出光与高速相机拍摄之间的同步控制机制。试验采用通过激光器输出的 TTL 出光信号触发高速相机拍摄的方法,完成采集单次激光冲击水约束层动态响应过程图像。

试验工件材料选用 2024-T3 铝合金平板,厚度 3mm,加工尺寸为 100mm × 100mm。在激光喷丸过程中,脉冲能量选择 7J、9J、11J、12J、13J 作为试验能量变量。考虑到施加水约束层的稳定性,选取水压 0.01MPa、0.02MPa、0.03MPa、0.04MPa、0.05MPa 作为试验水压变量。采用的试验参数总结如表 1 所示。每组试验重复 4 次,获取试验结果平均值分析水约束层响应时间和冲击效应。激光喷丸后会在平板上形成相互独立的冲击微坑阵列。微坑的几何形貌与冲击效应直接相关,采用 KS-1100 三维形貌仪对微坑进行扫描,扫描分辨率为 20 μ m,绝对精度 4 μ m,扫描结束后测量微坑的直径和深度^[12]。

结果与讨论

1 约束层动态响应过程

图 3 所示为在出水水压 0.05MPa 条件下高速相机拍摄的倾斜射流撞壁形成的水膜特征。激光喷丸过程中,圆孔喷嘴出水口形成的圆柱射流以一定倾斜角度撞击平板面后,形成以撞击点为中心向四周铺开的撞击射流。在水表面张力和黏性的作用下,在水膜边缘形成跃起区域。水流在流入边缘跃起区域后,继续向下流

动,然后逐渐汇集^[13-14]。如图 3 所示,射流撞壁形成的水膜按照其特征可分为薄膜区、射流撞壁区、以及边缘跃起区。水膜边缘跃起与板面之间的分界线可视为水膜的外边界,而薄膜区与射流撞壁区之间分界线可以视为水膜的内边界。整个薄膜区近似一个椭圆,薄膜区水膜厚度均匀稳定。激光喷丸过程中,一般选择薄膜

区作为激光喷丸激光冲击作用区域。水压大小会影响水膜特征,水压越大,射流速度越大,水膜整体铺展面积也越大。调节出水水压从 0.05MPa 变动到 0.01MPa,如图 4 所示,薄膜区椭圆离心率在变大,而覆盖面积先变大后变小,在水压 0.04MPa 时达到最大。这是由于当水压较大时,比如 0.05MPa,虽然整体水膜覆盖面积

表 1 激光喷丸试验参数

Table 1 Parameters of laser peening

试验参数	数值
激光波长 /nm	1064
激光脉宽 /ns	14.3
光斑直径 /mm	4
脉冲能量 /J	7、9、11、12、13
高速相机两帧时间间隔 /ms	0.25
出水水压 /MPa	0.01、0.02、0.03、0.04、0.05

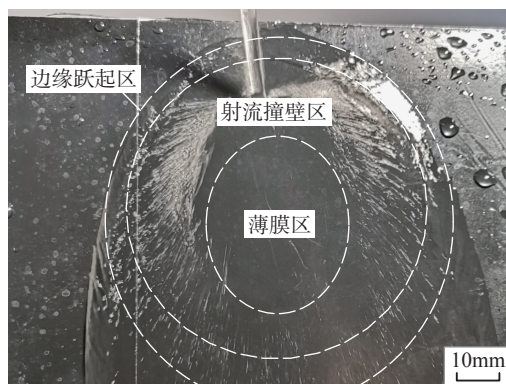


图 3 水膜特征(水压 0.05MPa)

Fig.3 Water film characteristic (water pressure 0.05MPa)

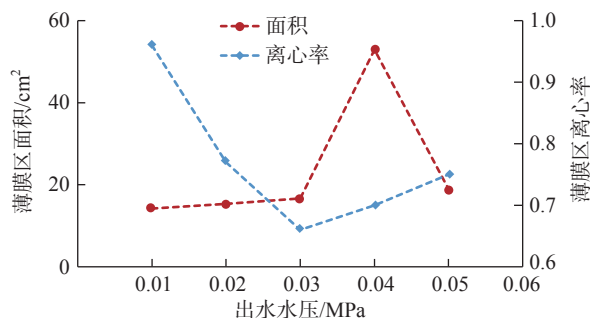


图 4 水压对薄膜区的影响

Fig.4 Effect of water pressure on film region

变大,但是射流与平板之间的撞击剧烈,导致射流撞壁区变大,薄膜区面积反而减小。当水压较小时比如0.01MPa,射流速度较小,在平板上铺展开的整体水膜面积都较小;当出水水压0.04MPa形成的水膜薄膜区面积达到最大值。

图5所示为单个激光冲击周期内高速相机拍摄的水约束层动态响应过程典型照片,工艺条件为出水水压0.03MPa,激光能量13J。图5(a)为激光冲击作用后0.25ms的照片,可以看到在激光冲击作用位置高温高压等离子体迅速膨胀,形成直径10mm左右的圆强光。在等离子体膨胀作用下约束层膨胀飞溅并产生大量水雾,整个水雾覆盖区域近似一个圆锥体。在激光冲击作用后0.5ms时刻,等离子体冲击波均匀将水约束层排开,在激光冲击作用位置形成一个无水膜的圆区域,如图5(b)所示,此圆直径大小主要取决于冲击波传播距离大小。由于此刻相当于无水约束层工艺条件,如果继续激光冲击会极大削弱冲击效应。随着水膜飞溅效应的快速衰减,连续水流迅速向下覆盖无水膜区域,在7ms时刻恢复水约束层,水膜重新覆盖激光冲击位置,如图5(c)所示。同时,在冲击波不断膨胀压缩空气的作用下,使得水雾渐渐朝着远离工件的方向消散开。水雾弥散在激光传输光路中会吸收下个脉冲激光能量,削弱冲击效应,因此需要等待水雾最终完全消失才能进行下个激光冲击。水雾消散时间可借助激光指示光在穿过水雾时产生的色散物理现象持续时间来判断,在47ms时色散现象已经完全消失,图5(d)所示时刻可认为水雾完全消散时刻。

2 约束层恢复时间

图6展示了脉冲能量和出水水压对水约束层恢复时间的影响。如图6(a)中所示,在试验脉冲能量范围内,水约束层恢复时间均分布在

4~7ms之间,且总体上随着激光脉冲能量的增加,约束层恢复需要的时间逐渐增加。这是由于激光冲击后等离子体冲击波传播速度和衰减速度很快,只持续很短的时间,当等离子体冲击波压强衰减到水流向下的压强,水流会向下迅速恢复约束层,因此水约束层恢复时间总体较短。并且,随着脉冲能量增加,使得等离子体冲击波压强变大,衰减时间更长,

冲击产生的无水圆形区域面积更大,因此水约束层恢复时间也有所延长。如图6(b)所示,在试验出水水压范围内,水约束层恢复时间均分布在4~18ms之间,且随着出水水压的增加,水流流速变大,等离子体冲击波压强提前衰减到水流向下的压强,继而迅速恢复约束层,因此随着出水水压的增加,水约束层恢复需要的时间逐渐缩短。综合以上分析,水约束

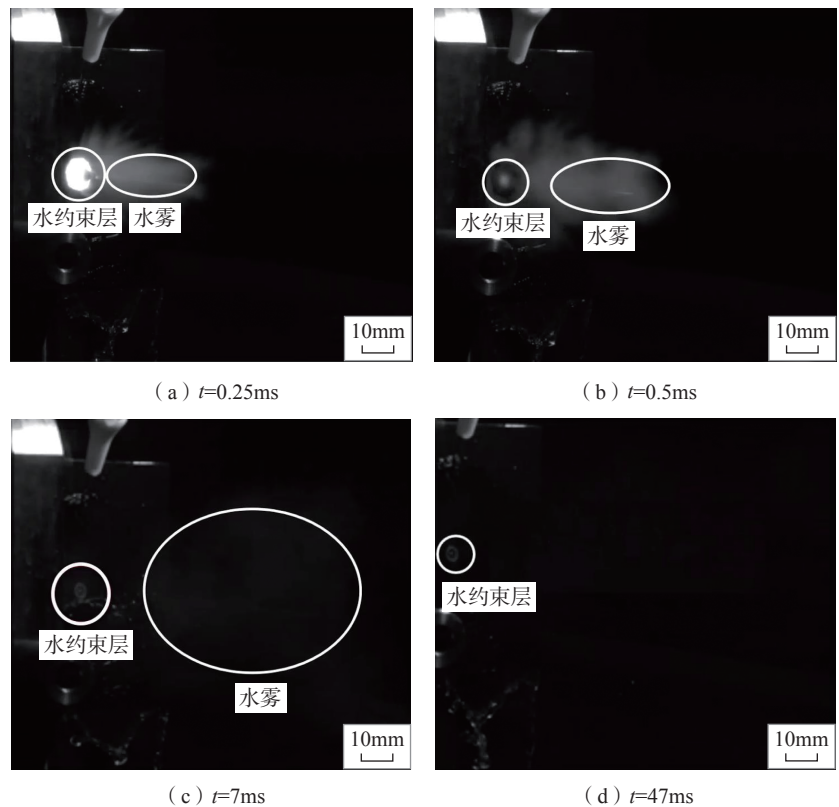


图5 水约束层动态响应过程(水压0.03MPa,能量13J)

Fig.5 Dynamic response process of water confining layer (water pressure 0.03MPa, energy 13J)

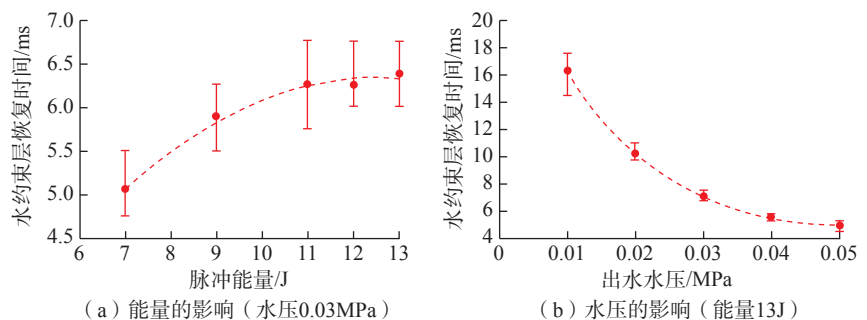


图6 水约束层恢复时间

Fig.6 Recovery time of water confining layer

层恢复时间均在 4~18ms 范围之内,如果不考虑水雾对激光冲击效果的影响,允许激光器最大出光频率为 55Hz。

3 水雾消散时间

图 7 展示了脉冲能量和出水水压对水雾消散时间的影响。如图 7 (a) 所示,在试验脉冲能量范围内,激光诱导等离子体瞬间将冲击作用位置的水约束层全部爆炸开,脉冲能量的提高并未明显增加水雾量,反而由于能量的增强,冲击波膨胀压缩空气的作用力变大,使得水雾朝着远离工件方向的消散速度变快。能量为 7~13J,水雾消散时间变化范围在 30~50ms 之间,平均消散时间从 45.7ms 缩短到 39.3ms,允许激光器最大出光频率为 20Hz。从图 7 (b) 可见,在相同大小的冲击波作用下,在试验出水水压范围内,随着出水水压的增加,水膜厚度变大,激光冲击作用后产生的水雾量稍许增多,消散时间有所延长。出水水压从 0.01MPa 变动到 0.05MPa,水雾消散时间变化范围同样在 30~50ms 之间,平均消散时间从 38.3 延长到 45.8ms。

综合以上分析,在激光冲击水约束层完整动态响应过程中,可以发现水雾消散时间 30~50ms 远大于水约束层恢复时间 4~18ms,因而允许激光器出光最大频率主要取决于水雾消散时间。考虑水雾消散对激光冲击效果的影响,如果不采取及时消除水雾措施,允许激光器最大出光频率为 20Hz。

4 冲击效应

微坑的几何形貌与激光冲击效应直接相关。出水水压 0.03MPa,脉冲能量 13J 下的微坑几何形貌如图 8 所示。可见,微坑几何形貌近似呈碗状,这是由于激光光斑中心区域能量呈现平顶分布,边缘能量较低,使得微坑底部几近平直,侧壁倾斜。另外,由于材料塑性流动导致微坑边缘呈现近似火山口的凸起特征。微坑直

径和深度测量方式如图 8 (c) 所示,此条件下的微坑深度是 19.33 μm ,直径是 3.76mm。

出水水压对微坑直径和深度的影响如图 9 所示。可见,在试验出水水压范围内,单脉冲能量 13J 的

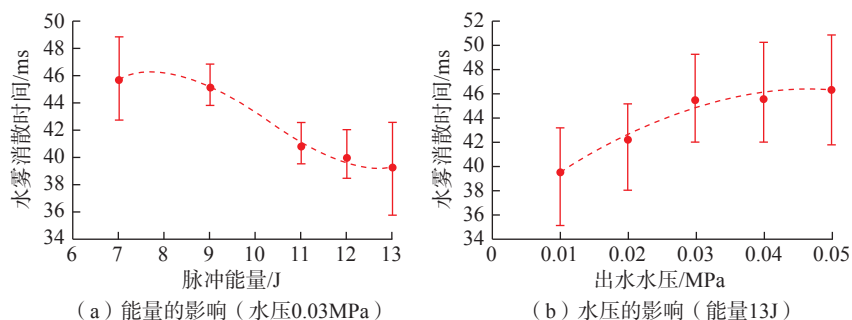
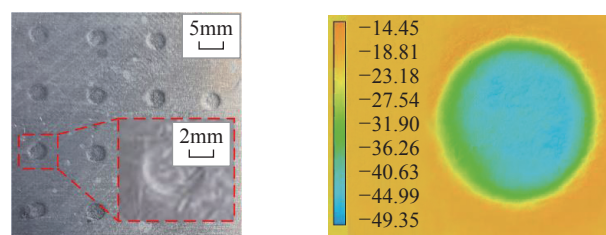


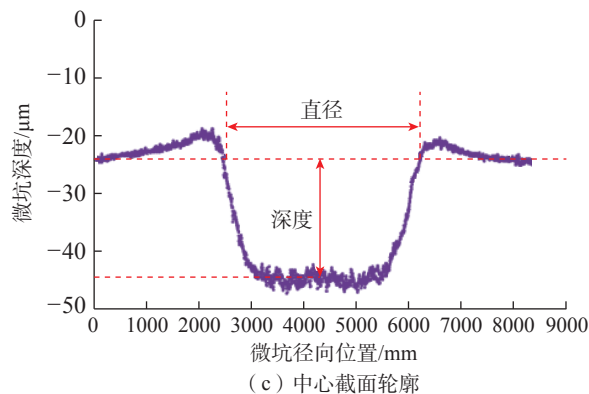
图 7 水雾消散时间

Fig.7 Dissipation time of water mist



(a) 实物图

(b) 3D显示



(c) 中心截面轮廓

图 8 微坑几何形貌(水压 0.03MPa, 能量 13J)

Fig.8 Geometry of micro dimple (water pressure 0.03MPa, energy 13J)

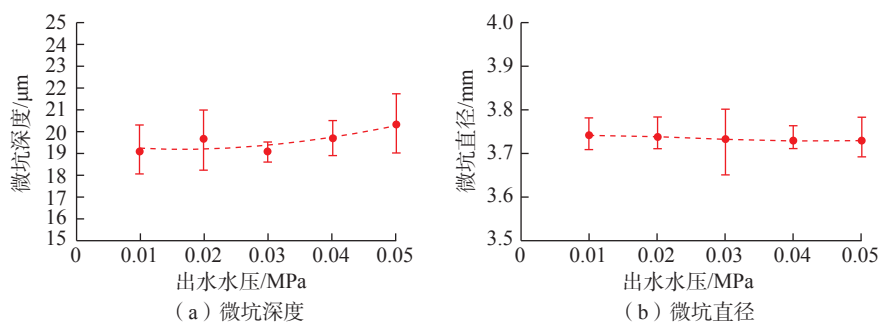


图 9 冲击效果(能量 13J)

Fig.9 Shock effect (energy 13J)

冲击作用下,微坑直径和深度均在 3.65~3.8mm 和 18~22 μ m 范围之间,每个水压变量试验结果波动范围也基本重合,平均微坑直径和深度均在 3.74mm 和 20 μ m 左右。试验结果表明出水水压对微坑直径和深度的影响并不显著。

结论

(1) 一定压力下的喷嘴圆柱射流在工件表面可以形成稳定的薄膜区,薄膜区形状近似一个椭圆,厚度均匀稳定,能够满足激光冲击水约束层需求。随着出水水压的增大,薄膜区覆盖面积先变大后变小,水压为 0.04MPa 时达到最大。

(2) 采用高速相机拍摄方法能清楚观察到激光冲击作用下水约束层动态响应全过程。在激光冲击诱导等离子体冲击波作用下,水约束层爆炸飞溅形成无水圆形区域,并产生大量水雾,但在连续水射流作用下水约束层快速恢复,水雾也逐渐消散。

(3) 脉冲能量和出水水压对水约束层动态响应时间无显著影响。水雾消散时间 30~50ms 远大于水约束层恢复时间 4~18ms,因而为了保证激光喷丸工艺稳定和有效冲击效应,水约束层动态响应时间主要取决于水雾消散时间,允许激光器最大出光频率可达 20Hz 以上。

(4) 在试验工艺条件下,出水水压的变化对微坑直径和深度影响不显著。因而,在实际激光喷丸中,出水水压的选择只需要保证能形成足够面积的水薄膜区即可。

为了保证激光喷丸工艺稳定和有效冲击效应,通过合理调整工艺条件,允许激光器最大出光频率可达 20Hz。但是由于试验激光器最高频率只有 5Hz,以后试验条件具备的情况下,可对 20Hz 等高激光出光频率下水约束层动态响应和冲击效应进行研究验证。

参考文献

- [1] 杨启,付雪松,周文龙. 激光喷丸表面强化技术的研究综述[J]. 航空制造技术, 2020, 63(12): 14-22.
- [2] 张兴权,周建忠,王广龙,等. 激光喷丸技术及其应用[J]. 制造业自动化, 2005, 27(10): 26-28.
- [3] ANDERHOLM N C. Laser-generated stress waves[J]. Applied Physics Letters, 1970, 16(3): 113-115.
- [4] O'KEEFE J D, SKEEN C H. Laser-induced stress-wave and impulse augmentation[J]. Applied Physics Letters, 1972, 21(10): 464-466.
- [5] 李志勇,朱文辉,周光泉,等. 实验研究有机玻璃约束层对激光冲击波的影响[J]. 中国激光, 1997, 24(2): 23-27.
- [6] 周建忠,周明,肖爱民,等. 约束层的厚度和柔性对激光冲击强化效果的影响[J]. 应用激光, 2002, 22(1): 7-9, 6.
- [7] COLVIN J D, AULT E R, KING W E, et al. Computational model for a low-temperature laser-plasma driver for shock-processing of metals and comparison to experimental data[J]. Physics of Plasmas, 2003, 10(7): 2940-2947.
- [8] BERTHE L, FABBRO R, PEYRE P, et al. Laser shock processing of materials: Study of laser-induced breakdown in water confinement regime[J]. High-Power Lasers: Applications and Emerging Applications, 1996, 2789: 246-253.
- [9] BERTHE L, FABBRO R, PEYRE P, et al. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(6): 2826-2832.
- [10] 曹子文,邹世坤,车志刚,等. 航空发动机叶片激光冲击处理过程控制研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(1): 60-62, 59.
- [11] 杜建钧,周建忠,张兴权,等. 金属板料的机械喷丸成形与激光喷丸成形技术[J]. 电加工与模具, 2006(1): 4-8.
- [12] 李康妹,胡永祥,姚振强. 高应变率激光冲击微坑几何形貌研究[J]. 新型工业化, 2012, 2(9): 53-62.
- [13] 唐亮,李平,周立新,等. 倾斜射流撞壁形成的液膜外形的理论建模[J]. 推进技术, 2021, 42(2): 327-334.
- [14] WANG R X, HUANG Y, FENG X, et al. Semi-empirical model for the engine liquid fuel sheet formed by the oblique jet impinging onto a plate[J]. Fuel, 2018, 233: 84-93.

通讯作者: 胡永祥,教授,博士,研究方向为激光喷丸、激光驱动微滴增材制造。

(下转第 69 页)

Application of Instability Numerical Model in Preparation of Grid Structure by Laser Welding

ZHANG Jingqi^{1,2}, LIN Jian¹, LEI Yongping¹, XIAO Rongshi¹, LI Long³, SONG Zheng³

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Taiyuan Aero-Instruments Co., Ltd., Taiyuan 030006, China;

3. Capital Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] Based on the numerical analysis theory of laser welding instability of thin plate, the simulation model of external instability deformation of rectangular grid structure was established by extracting the inherent strain distribution of ultra-thin plate cross structure after laser spot welding. The first positive eigenvalue buckling mode of the cross joint was calculated, which was shown as deflection deformation. With the increase of heat input, the out-of-plane deformation of the joint increases obviously, and the deflection direction changes. Based on the eigenvalue buckling deformation analysis of the grid structure under two kinds of welding sequence, it was found that there is an obvious downward deviation at the joint of the first thin plate under the condition of welding sequence 1, and the deformation deflection was 27 μm . Under the welding sequence 2, the buckling eigenvalue of the thin plate was smaller, and the overall deflection of the thin plate increased. With the increase of the number of solder joints, the instability deformation is more likely to occur, which is shown by the continuous decrease of the buckling characteristic value of the thin plate. The coupling of buckling deformation near the solder joint will significantly increase the out-of-plane deformation of the grid structure in the middle layer compared with the top and bottom areas.

Keywords: Laser welding; Ultra-thin plate; Grid structure; Instability deformation; Welding sequence

(责编 阳光)

(上接第 52 页)

Process Effect on Dynamic Response Behavior of Water Confining Layer in Laser Peening

ZHAO Nianyou, CHENG Han, HU Yongxiang

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] It is important to research the dynamic response process of water confining layer under laser shock to improve the stability and reliability of shock effect. By establishing the experimental system for observing the dynamic response process of water confining layer under laser shock, the influence of pulse energy and water pressure on dynamic response time and shock effect are analyzed. The results show that a stable water film is formed on the workpiece surface by the cylindrical jet. Under the action of high energy laser-induced plasma shock wave, water confining layer bursts and produces a lot of water mist. And then under the action of continuous jet, water confining layer quickly recovers and water mist gradually dissipates. Pulse energy and water pressure have minor effect on the dynamic response time of water confining layer and shock effect. The recovery time of water confining layer range from 4 milliseconds to 18 milliseconds and water mist lasts for 30–50 milliseconds. By adjusting the process conditions reasonably, the maximum output frequency of the laser can reach 20Hz.

Keywords: Laser peening; Water confining layer; Dynamic response time; Water mist; High speed camera

(责编 阳光)