

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 8 月 11 日 (11.08.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/165709 A1

- (51) 国际专利分类号:
C21D 10/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2021/075282
- (22) 国际申请日: 2021 年 2 月 4 日 (04.02.2021)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202110150074.3 2021 年 2 月 3 日 (03.02.2021) CN
- (71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。
- (72) 发明人: 孟宪凯 (MENG, Xiankai); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。赵曜民 (ZHAO, Yaomin); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。周建忠 (ZHOU, Jianzhong); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。鲁金忠

(LU, Jinzhong); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。黄舒 (HUANG, Shu); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。蔡杰 (CAI, Jie); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。张彦虎 (ZHANG, Yanhu); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 南京智造力知识产权代理有限公司 (NANJING DOYES INTELLECTUAL PROPERTY CO., LTD.); 中国江苏省南京市江宁区芝兰路 18 号 4 幢 1202 室, Jiangsu 211100 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: DEVICE AND METHOD FOR REAL-TIME COUPLING OF LASER SHOCK WAVE AND ULTRASONIC SHOCK WAVE

(54) 发明名称: 一种激光冲击波和超声冲击波实时耦合装置及方法

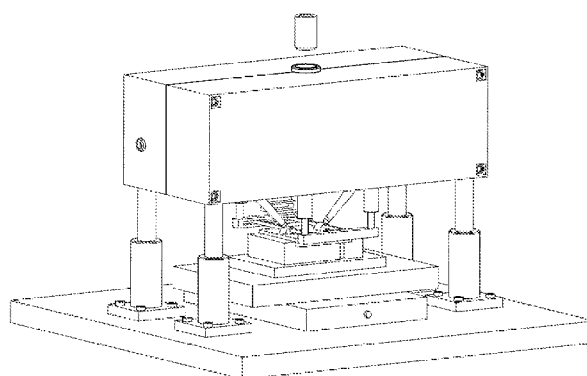


图 1

(57) Abstract: A device for real-time coupling strengthening of a laser shock wave and an ultrasonic shock wave, comprising: a synchronization device, a laser device, ultrasonic impact devices, a working platform, and a control system. An upper housing (6) is supported on a base (13) by means of a second hydraulic cylinder (12); a supporting beam (9) is mounted at the bottom of the upper housing (6) by means of the second hydraulic cylinder (12); a limiting slide rail (3) is mounted at the bottom of the upper housing (6) by means of a first hydraulic cylinder (5); two ultrasonic impact devices are connected by means of the synchronization device and used for synchronous movement and synchronous rotation of the ultrasonic shocking devices; the laser device is used for generating a laser beam to pass through the upper housing (6) and irradiate the surface of a workpiece (1); and the control system controls the laser device to delay and perform laser shocking on the ultrasonic impact devices. According to the invention, by adjusting the starting time and the rotation angle and speed of the ultrasonic shocking devices, dynamic control of an ultrasonic wave direction and a wavefront position is implemented, and real-time coupling of a laser shock wave and an ultrasonic shock wave is implemented.



WO 2022/165709 A1



ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置, 包括同步装置、激光装置、超声冲击装置、工作平台和控制系统; 上壳体(6)通过第二液压缸(12)支撑在底座(13)上; 支承梁(9)通过第二液压缸(12)安装在上壳体(6)底部, 限位滑轨(3)通过第一液压缸(5)安装在上壳体(6)底部; 2个超声冲击装置通过同步装置连接, 用于超声冲击装置同步移动和同步转动; 激光装置用于产生激光束穿过上壳体(6)所述照射在工件(1)表面; 控制系统控制所述激光装置延时于超声冲击装置进行激光冲击。该发明调节超声冲击装置的起始时间、旋转角度与速度, 实现超声波方向与波阵面位置的动态控制, 实现激光冲击波和超声冲击波实时耦合。

一种激光冲击波和超声冲击波实时耦合装置及方法

技术领域

本发明涉及激光加工技术领域，特别涉及一种实现激光冲击波和超声冲击波实时耦合的装置及方法。

背景技术

激光冲击技术，利用纳秒脉冲激光与材料相互作用产生的冲击波，实现金属材料表面强化与成形加工。但单一激光束诱导的冲击波压力幅值低、时间短，导致零件表面残余压应力幅值低、晶粒细化程度低，强化/成形效果及其可控性较差。

中国发明专利提出了一种振动辅助激光冲击处理金属构件的表面强化方法，该发明专利将激光冲击强化技术与振动时效处理相结合，使表层晶粒细化、内部残余应力均匀化。但存在以下缺点：（1）采用激振器对试样整体进行时效处理，无法实现局部区域强化处理；（2）激光冲击与振动时效分开，无法改善激光冲击波压力幅值低、时间短的技术缺陷，塑性变形与残余压应力低，强化效果较差。

中国发明专利提出了一种用于同轴超声辅助激光喷丸强化的超声振动装置，该发明专利实现了超声振动波和激光冲击波同轴传播，促进材料的动态再结晶行为，使材料表面获得超细晶粒。该发明虽然实现了超声冲击波和激光冲击波的同轴传播，但由于激光冲击波传播速度远高于超声冲击波的传播速度，因此该发明无法实现激光冲击波与超声冲击波的实时耦合，因此无法改善激光冲击波压力幅值低、时间短的技术缺陷，塑性变形与残余压应力较低。

中国发明专利提出了一种获取超细晶表层的超声辅助激光喷丸方法，该方法利用超声诱导高频振动波，在激光冲击波传播路径上形成周期性原子密集区域和疏松区域，促进材料晶粒细化，形成超细晶表层。该发明可以在激光冲击波传播路径上形成原子密集区域和疏松区域，促进晶粒细化，但存在以下缺点：（1）无法弥补激光冲击波与超声冲击波的传播速度差，不能实现激光冲击波与超声冲击波实时耦合，导致激光冲击波路径上存在周期性的原子疏松区；（2）原子疏松区会降低激光冲击波压力幅值，虽可以促进晶粒细化，但会降低塑性变形与残余压应力，进而削弱强化效果。

中国发明专利提出了一种中空激光冲击和超声协同强化抗疲劳装置及加工方法，该发明专利通过施加超声振动防止激光喷丸强化后冲击区域产生凹凸不平，超声振动与激光冲击波相互作用，可以在材料表面形成合理的残余压应力分布。但是该发明无法弥补激光冲击波与超声冲击波的传播速度差，不能实现激光冲击波与超声冲击波实时耦合，无法改善激光冲击

波压力幅值低、时间短的技术缺陷，塑性变形与残余压应力较低。

发明内容

针对现有技术无法弥补激光冲击波与超声冲击波的传播速度差、不能实现激光冲击波与超声冲击波实时耦合的技术缺陷，本发明提供了一种激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置及方法，通过调节超声冲击装置的起始时间、旋转角度与速度，实现超声波方向与波阵面位置的动态控制，进而弥补超声波与激光冲击波的传播速度差，最终实现激光冲击波和超声冲击波实时耦合，有效改善激光冲击波压力幅值低、时间短的技术缺陷，进而增加金属材料组织/应力强化或成形加工效果。

本发明是通过以下技术手段实现上述技术目的的。

一种激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置，包括同步装置、激光装置、超声冲击装置、工作平台和控制系统；

所述工作平台包括上壳体、第一液压缸、第二液压缸、限位滑轨和底座，所述底座上装夹可水平移动的工件，所述上壳体通过第二液压缸支撑在底座上；所述支承梁通过第二液压缸安装在上壳体底部，2个所述支承梁通过滑动副与限位滑轨连接，所述限位滑轨通过第一液压缸安装在上壳体底部；任一所述支承梁上设有传递桩；2个所述超声冲击装置安装在上壳体内，且2个所述超声冲击装置通过同步装置连接，用于所述超声冲击装置同步移动和同步转动；所述激光装置用于产生激光束穿过上壳体所述照射在工件表面；所述控制系统控制所述激光装置延时于超声冲击装置进行激光冲击，用于实现实时耦合。

进一步，所述同步装置包括驱动装置、齿条、第一滑动装置、第二滑动装置、摆动液压缸和液压系统；2个所述第一滑动装置分布在上壳体内，每个所述第一滑动装置上滑动安装摆动液压缸，所述摆动液压缸的输出轴直接或间接与超声冲击装置连接，所述液压系统用于同步控制2个所述摆动液压缸的转动；2个所述第二滑动装置安装在壳体内，每个所述第二滑动装置上滑动安装齿条，所述驱动装置输出端安装外齿轮，所述外齿轮分别与2个所述齿条啮合；每个所述齿条一端内安装轴承，所述摆动液压缸的输出轴穿过轴承，通过齿条的同步移动使所述摆动液压缸同步移动。

进一步，所述超声冲击装置包括冲击头、变幅杆和换能器；所述换能器直接或者间接与所述摆动液压缸的输出轴传动连接，所述换能器底部安装变幅杆，所述变幅杆末端安装冲击头，通过第一液压缸使冲击头与传递桩高副接触，通过同步装置使冲击头绕传递桩圆心转动。

进一步，设所述冲击头与工件表面之间初始夹角为 α_1 ，冲击头与工件表面之间终止夹角为 α_n ，冲击头在初始夹角与终止夹角之间冲击n次，在超声冲击装置工作 ΔT 时间后，所述控制系统控制所述激光装置进行激光冲击，其中 ΔT 表达式为：

$$\Delta T = \begin{cases} \text{MAX}(T_i) & \text{当 } \alpha_i < \alpha_n \text{ 时} \\ \text{MIN}(T_i) & \text{当 } \alpha_i > \alpha_n \text{ 时} \end{cases},$$

$$\Delta T_i = \frac{S}{2V_{U1}\cos\alpha_i} + \frac{R}{V_{U1}} + \frac{L}{V_{U2}} - \frac{Stan\alpha_i}{2V_L}$$

其中：S 为两个所述传递桩的中心距；

α_i 为第 i 次冲击时所述冲击头与工件表面之间夹角， $1 < i \leq n$ ；

R 为所述传递桩；

L 为超声冲击装置的总长度；

V_L 为激光冲击波在工件中的传播速度；

V_{U1} 为超声冲击波在工件内部和传递桩中的传播速度；

V_{U2} 为超声冲击波在变幅杆和振动头中的传播速度。

进一步，所设冲击头旋转角速度 ω 的表达式为：

$$\omega = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{|\Delta T_{i+1} - \Delta T_i|}。$$

进一步，所述传递桩的材质与工件相同或近似，用于避免超声冲击波在传播过程中发生折射。

进一步，所述齿条上安装电磁装置，用于锁定齿条在第二滑动装置上的位置。

一种的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置的强化方法，包括如下步骤：

激光装置发出激光对工件进行预热；

所述控制系统控制同步装置使 2 个所述超声冲击装置同步转动，用于使超声冲击装置与工件表面夹角为 α_1 ；

调节 2 个传递桩的中心距离，通过第一液压缸调节传递桩高度和通过同步装置使 2 个所述超声冲击装置同步相向移动，使超声冲击装置的冲击头与传递桩接触并且压紧；

通过控制第二液压缸压缩，使传递桩与工件接触并且压紧；

工件表面覆盖约束层；

控制所述超声冲击装置释放超声冲击波，摆动液压缸使所述超声冲击装置转动，所述超声冲击装置在转动范围内释放 n 次超声冲击波；

在超声冲击装置工作 ΔT 时间后，所述控制系统控制所述激光装置进行激光冲击，实现激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化。

本发明的有益效果在于：

1. 本发明所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置，通过调节超声冲击装置的

起始时间、旋转角度与速度，实现超声波方向与波阵面位置的动态控制，进而弥补超声波与激光冲击波的传播速度差，最终实现激光冲击波和超声冲击波实时耦合。

2. 本发明所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置，可在激光冲击波传播路径上形成连续原子密集区，显著增加材料内冲击波压力幅值与持续时间，增加材料塑性变形与残余压应力幅值，进而改善金属材料强化或成形加工效果。

3. 本发明通过激光和超声冲击波的实时耦合，增加了材料内冲击波压力幅值、空间与时间分布的调控范围，进而扩大了金属材料强化或成形加工效果的调控范围。

附图说明

图 1 为本发明所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置三维图。

图 2 为本发明所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置主视图

图 3 为本发明所述的同步装置的结构示意图。

图 4 为本发明所述的超声冲击装置安装示意图。

图 5 为图 3 的俯视图。

图 6 为图 3 的左视图。

图 7 为本发明所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化的过程示意图。

图 8 为本发明所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化的加工路径示意图。

图 9 为不同方式强化后 2024-T351 铝合金工件表面方向残余应力图。

图 10 为不同方式强化后 2024-T351 铝合金工件深度方向残余应力图。

图 11 为材料内部原子周期性变化示意图。

图中：

1-工件；2-计算机；3-限位滑轨；4-传递桩；5-第一液压缸；6-壳体；7-激光器；8-水枪；9-支承梁；10-夹具平台；11-移动平台；12-第二液压缸；13-底座；14-第一导轨；15-支架；16-连杆；17-上部第二滑轨；17'-下部第二滑轨；18-电机；19-外齿轮；20-电机轴；21-上齿条；21'-下齿条；22-电磁装置；23-限位器；24-轴承；25-摆动液压缸；26-滚珠滑块；27-上滑轮；27'-下滑轮；28-换能器；29-第一连接轴；30-光路管道；31-光学镜片；32-冲击头；33-变幅杆；38-液压泵；39-第二连接轴。

具体实施方式

下面结合附图以及具体实施例对本发明作进一步的说明，但本发明的保护范围并不限于此。

实施例一

如图 1、图 2 和图 3 所示，本发明所述的的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置，

包括同步装置、激光装置、超声冲击装置、工作平台和控制系统；所述工作平台包括上壳体 6、第一液压缸 5、第二液压缸 12、限位滑轨 3 和底座 13，工件 1 装夹于夹具平台 10 上，由上往下依次安装移动平台 11、底座 13，可实现工件 1 在 X 轴、Y 轴方向上的直线运动。

所述上壳体 6 通过第二液压缸 12 支撑在底座 13 上；所述支承梁 9 通过第二液压缸 12 安装在上壳体 6 底部，2 个所述支承梁 9 通过滑动副与限位滑轨 3 连接，所述限位滑轨 3 通过第一液压缸 5 安装在上壳体 6 底部；任一所述支承梁 9 上设有传递桩 4；2 个所述支承梁 9 分别单独或者共同通过执行机构在限位滑轨 3 内移动。其中传递桩 4 与冲击头 32 为点接触，且传递桩 4 选用与工件 1 相同的材料，避免超声冲击波在传播过程中发生折射导致耦合精度降低。

2 个所述超声冲击装置安装在上壳体 6 内，且 2 个所述超声冲击装置通过同步装置连接，用于所述超声冲击装置同步移动和同步转动；所述激光装置用于产生激光束穿过上壳体 6 所述照射在工件 1 表面；所述控制系统控制所述激光装置延时于超声冲击装置进行激光冲击，用于实现实时耦合。本实施例中 2 个所述超声冲击装置安装在上壳体 6 内左右 2 侧，下面有左超声冲击装置和右左超声冲击装置区别叙述。

如图 3、图 4、图 5 和图 6 所示，所述同步装置包括驱动装置、齿条、第一滑动装置、第二滑动装置、摆动液压缸 25 和液压系统；2 个所述第一滑动装置分布在上壳体 6 内，每个所述第一滑动装置上滑动安装摆动液压缸 25，所述摆动液压缸 25 的输出轴直接或间接与超声冲击装置连接，所述液压系统用于同步控制 2 个所述摆动液压缸 25 的转动；2 个所述第二滑动装置安装在壳体 6 内，每个所述第二滑动装置上滑动安装齿条，所述驱动装置输出端安装外齿轮 19，所述外齿轮 19 分别与 2 个所述齿条啮合；每个所述齿条一端内安装轴承 24，所述摆动液压缸 25 的输出轴穿过轴承 24，通过齿条的同步移动使所述摆动液压缸 25 同步移动。液压系统包括油箱和液压泵 38，用于提供液压能。

实施例具体结构如下：电机 18 安装于外壳 6 底部内侧并且电机 18 的电机轴 20 上安装外齿轮 19，所述外齿轮 19 上下对称安装上齿条 21 和下齿条 21'，上齿条 21 与上滑轮 27 连接固定，上滑轮 27 安装于上部第二滑轨 17 上，上部第二滑轨 17 与外壳 6 内侧顶部连接固定且上部第二滑轨 17 两侧安装限位器 23。下齿条 21' 与下滑轮 27' 连接固定，下滑轮 27' 安装于下部第二滑轨 17' 上，第二滑轨 17' 与外壳 6 内侧底部连接固定且第二滑轨 17' 两侧安装限位器 23。外齿轮 19 可以同步驱动上齿条 21 和下齿条 21' 直线运动。上齿条 21 和下齿条 21' 的末端设有安装孔，孔中均安装轴承 24，轴承 24 的内圈内装有第二连接轴 39，上齿条 21 与上滑轮 27 或者下齿条 21' 与下滑轮 27' 的连接处分别设有电磁装置 22，用于在上齿条 21 或下齿条 21' 位置调整完毕后，启动电磁装置 22 用于固定上齿条 21 或下齿条 21'，

防止因为震动或者误操作而移动。2 个摆动液压缸 25 位于上壳体 6 内左右 2 侧，每个摆动液压缸 25 底部通过螺纹连接滚珠滑块 26，滚珠滑块 26 安装于第一导轨 14 上，摆动液压缸 25 的输出端安装第二连接轴 39，第二连接轴 39 穿过轴承 24 的内圈与连杆 16 一端连接，连杆 16 另一端通过第一连接轴 29 与超声冲击装置连接。

左超声冲击装置和右左超声冲击装置结构相同，仅仅安装位置存在差异，下面以左超声冲击装置为例叙述，所述左超声冲击装置包括冲击头 32、变幅杆 33 和换能器，换能器 28 顶部通过第一连接轴 29 与连杆 16 连接，换能器 28 底部安装变幅杆 33，变幅杆 33 末端安装冲击头 32。

如图 4 所示，所述的激光器和光路系统，光路管道 30 安装于外壳 6 中，光路管道 30 底部安装有光学镜片 31 用于防水，且光路管道 30 与激光器 7 同轴。

设所述冲击头 32 与工件 1 表面之间初始夹角为 α_1 ，冲击头 32 与工件 1 表面之间终止夹角为 α_n ，冲击头 32 在初始夹角与终止夹角之间冲击 n 次，在超声冲击装置工作 ΔT 时间后，所述控制系统控制所述激光装置进行激光冲击，其中 ΔT 表达式为：

$$\Delta T = \begin{cases} MAX(T_i) & \text{当 } \alpha_1 < \alpha_n \text{ 时} \\ MIN(T_i) & \text{当 } \alpha_1 > \alpha_n \text{ 时} \end{cases},$$

$$\Delta T_i = \frac{S}{2V_{U1}\cos\alpha_i} + \frac{R}{V_{U1}} + \frac{L}{V_{U2}} - \frac{Stan\alpha_i}{2V_L}$$

所设冲击头旋转角速度 ω 的表达式为：

$$\omega = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{|\Delta T_{i+1} - \Delta T_i|}$$

其中：S 为两个所述传递桩 4 的中心距；

α_i 为第 i 次冲击时所述冲击头 32 与工件 1 表面之间夹角， $1 < i \leq n$ ；

α_{i+1} 为第 $i+1$ 次冲击时所述冲击头 32 与工件 1 表面之间夹角， $1 < i \leq n$ ；

R 为所述传递桩 4；

L 为超声冲击装置的总长度；

ΔT_i 为第 i 次冲击时超声冲击装置工作时间；

ΔT_{i+1} 为第 $i+1$ 次冲击时超声冲击装置工作时间；

V_L 为激光冲击波在工件 1 中的传播速度；

V_{U1} 为超声冲击波在工件内部和传递桩中的传播速度；

V_{U2} 为超声冲击波在变幅杆和振动头中的传播速度。

如图 7 和图 8 所示，本发明所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置的强化方

法,包括如下步骤:

S01: 对工件 1 进行预处理;

S02: 打开计算机 2, 开启激光器 7 进行预热, 将工件 1 装夹在夹具平台 10 上; 在 X 方向和 Y 方向调整移动平台 11, 使工件 1 处于加工起始位置;

S03: 使用计算机 2 控制摆动液压缸 25 带动连杆 16 旋转, 直至左右两侧冲击头 32 与水平平面成夹角 α_1 。

S04: 使用计算机 2 控制支承梁 9 平移, 使左右两传递桩 4 位移至合适位置, 第一液压缸 5 压缩, 带动传递桩 4 向上运动一定距离。控制电机 18, 使电机轴 20 带动齿轮 19 逆时针旋转, 使两直齿条相向移动, 直至冲击头 32 与传递桩 4 接触并且以合适压力压紧;

S05: 通过计算机控制第二液压缸 12 压缩, 使冲击头 32 与传递桩 4 整体下降, 直至传递桩 4 与工件 1 接触, 以合适压力压紧;

S06: 水枪 8 出水覆盖工件表面, 换能器 28 启动释放超声冲击波, 摆动液压缸 25 使连杆 16 旋转带动冲击头 32 在设定时间 Δt 内由初始角度 α_1 运动至最终角度 α_n , 超声冲击波加载 ΔT (单位 μs) 后激光器 7 释放激光, 结束后冲击头 32 回复原角度, 完成单点强化;

S07: 移动平台 11 沿 X 轴正方向匀速移动, 完成单条直线加工路径, 随即向 Y 轴移匀速平移至下一个加工路径, 直至完成预设区域的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化;

S08: 关闭激光器 7, 冲击头 32 和传递桩 4 抬升至初始位置, 取出工件 1, 结束强化工作。

如图 11 所示, 本发明所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置可以实现激光冲击波与超声冲击波的实时耦合, 在激光冲击波传播路径上形成连续原子密集区, 显著增加材料内冲击波压力幅值与持续时间, 进而增加材料表层塑性变形与残余压应力幅值。

实施例二

以厚度为 2mm 的 2024-T351 铝合金板材为例, 使用激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置, 具体过程如下:

ΔT 的计算如下:

设所述冲击头 32 与工件 1 表面之间初始夹角为 $\alpha_1=30^\circ$, 设所述冲击头 32 与工件 1 表面之间终止夹角为 $\alpha_3=22^\circ$, $n=3$, 即冲击头 32 在初始夹角与终止夹角之间冲击 3 次, 取中间值得出 $\alpha_2=26^\circ$ 。计算 ΔT_i :

对于超声冲击波在铝合金工件和传递桩中的传播速度 V_{U1} , 取近似值 6320m/s;

对于超声冲击波在不锈钢变幅杆和振动头中的传播速度 V_{U2} , 取近似值 5900m/s;

对于激光冲击波在铝合金工件中的传播速度 V_L , 取近似值 6380m/s;

对于尺寸 20mm×20mm×2mm 的块状工件, 取 $S=12mm$;

当 $\alpha_1=30^\circ$ 时, $\Delta T_1=18.135\mu s$;

当 $\alpha_2=26^\circ$ 时, $\Delta T_2=18.180\mu s$;

当 $\alpha_3=22^\circ$ 时, $\Delta T_3=18.226\mu s$;

因为 $\alpha_1 > \alpha_3$, 因此 $\Delta T = \min(\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3) = \Delta T_1$ 。

$\omega_1=0.247\text{rad/s}$

$\omega_2=0.242\text{rad/s}$

超声冲击波和激光冲击波的发射流程为:

在 α_1 位置发射第一次超声冲击波, 在 $\Delta t_1=\Delta T_2-\Delta T_1$ 时间内以 ω_1 转动至 α_2 并发射第二次超声冲击波, 在 $\Delta t_2=\Delta T_3-\Delta T_2$ 时间内以 ω_1 转动至 α_3 并发射第三次超声冲击波, 在 ΔT_1 后发射激光。

全过程的加工:

将 2024-T351 铝合金板材进行线切割处理, 加工成为尺寸 $20\text{mm}\times 20\text{mm}\times 2\text{mm}$ 的块状工件。切割后使用酒精对工件 1 进行清洗, 将待处理表面依次进行打磨、抛光、贴黑胶带。打开激光器 7 进行预热处理。将工件 1 牢固安装在夹具平台上 10, 调整移动平台 11, 使工件 1 待处理区域 $12\text{mm}\times 12\text{mm}$ 的起点位于激光器 7 中心正下方。使用计算机 2 控制双侧冲击头 32 转动角度, 使之到达初始角度。控制支承梁 9 移动, 使左右两传递桩 4 水平位移至合适位置, 第一液压缸 5 压缩, 使传递桩 4 向上抬升一定距离。使用计算机 2 控制电机 18, 使双侧冲击头 32 相向水平移动与传递桩 4 接触压紧。控制第二液压缸 12 压缩, 使冲击头 32 与传递桩 4 整体下降直至与工件 1 接触压紧。水枪 8 出水, 按照发射流程进行处理。完成后冲击头 32 还原至初始角度, 轴移动平台 11 以 1.5mm/s 速度往 X 轴正方向匀速直线移动, 当单条路径结束后, 向 Y 轴匀速直线移动 1.5mm , 开始下一路径加工, 加工路径如图 5 所示。如此循环直至完成预设的路径。关闭激光器, 将冲击头 32 和传递桩 4 抬升至初始位置, 取出工件 1, 结束强化工作。

非实时耦合的激光冲击波和超声冲击波协同强化后, 试样表面的主要强化区域的残余压应力平均值约为 200MPa , 如图 9 所示; 激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化后, 试样表面的主要强化区域的残余压应力平均值约为 140MPa , 如图 10 所示, 相较于前者有较大提升, 残余应力在表面方向上均可获得较大残余压应力。

图 10 是不同方式强化后 2024-T351 铝合金工件深度方向残余应力图。非实时耦合的激光冲击波和超声冲击波协同强化后, 试样表面产生的残余压应力最大值约为 220MPa , 在 $0.75\sim 1.5\text{mm}$ 深度处材料内部存在少量残余拉应力; 激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化后, 试样表面的残余压应力最大值约为 235MPa , 相对于前者有着较大提升, 残余应力在深度方向

上的变化较为稳定，相较于非实时耦合的激光冲击波和超声冲击波强化，其在各个深度上试样均可获得较大的残余压应力，并且有效的释放试样中因单独激光喷丸所产生的残余拉应力，使工件的疲劳寿命显著提升。

所述实施例为本发明的优选的实施方式，但本发明并不限于上述实施方式，在不背离本发明的实质内容的前提下，本领域技术人员能够做出的任何显而易见的改进、替换或变型均属于本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1. 一种激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置，其特征在于，包括同步装置、激光装置、超声冲击装置、工作平台和控制系統；

所述工作平台包括上壳体（6）、第一液压缸（5）、第二液压缸（12）、限位滑轨（3）和底座（13），所述底座（13）上装夹可水平移动的工件（1），所述上壳体（6）通过第二液压缸（12）支撑在底座（13）上；所述支承梁（9）通过第二液压缸（12）安装在上壳体（6）底部，2个所述支承梁（9）通过滑动副与限位滑轨（3）连接，所述限位滑轨（3）通过第一液压缸（5）安装在上壳体（6）底部；任一所述支承梁（9）上设有传递桩（4）；2个所述超声冲击装置安装在上壳体（6）内，且2个所述超声冲击装置通过同步装置连接，用于所述超声冲击装置同步移动和同步转动；所述激光装置用于产生激光束穿过上壳体（6）所述照射在工件（1）表面；所述控制系统控制所述激光装置延时于超声冲击装置进行激光冲击，用于实现实时耦合。

2. 根据权利要求1所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置，其特征在于，所述同步装置包括驱动装置、齿条、第一滑动装置、第二滑动装置、摆动液压缸（25）和液压系統；2个所述第一滑动装置分布在上壳体（6）内，每个所述第一滑动装置上滑动安装摆动液压缸（25），所述摆动液压缸（25）的输出轴直接或间接与超声冲击装置连接，所述液压系統用于同步控制2个所述摆动液压缸（25）的转动；2个所述第二滑动装置安装在壳体（6）内，每个所述第二滑动装置上滑动安装齿条，所述驱动装置输出端安装外齿轮（19），所述外齿轮（19）分别与2个所述齿条啮合；每个所述齿条一端内安装轴承（24），所述摆动液压缸（25）的输出轴穿过轴承（24），通过齿条的同步移动使所述摆动液压缸（25）同步移动。

3. 根据权利要求2所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置，其特征在于，所述超声冲击装置包括冲击头（32）、变幅杆（33）和换能器；所述换能器直接或者间接与所述摆动液压缸（25）的输出轴传动连接，所述换能器底部安装变幅杆（33），所述变幅杆（33）末端安装冲击头（32），通过第一液压缸（5）使冲击头（32）与传递桩（4）高副接触，通过同步装置使冲击头（32）绕传递桩（4）圆心转动。

4. 根据权利要求3所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置，其特征在于，设所述冲击头（32）与工件（1）表面之间初始夹角为 α_1 ，冲击头（32）与工件（1）表面之间终止夹角为 α_n ，冲击头（32）在初始夹角与终止夹角之间冲击n次，在超声冲击装置工作 ΔT 时间后，所述控制系统控制所述激光装置进行激光冲击，其中 ΔT 表达式为：

$$\Delta T = \begin{cases} \text{MAX}(T_i) & \text{当 } \alpha_1 < \alpha_n \text{ 时} \\ \text{MIN}(T_i) & \text{当 } \alpha_1 > \alpha_n \text{ 时} \end{cases},$$

$$\Delta T_i = \frac{S}{2V_{U1}\cos\alpha_i} + \frac{R}{V_{U1}} + \frac{L}{V_{U2}} - \frac{Stan\alpha_i}{2V_L}$$

其中：S 为两个所述传递桩（4）的中心距；

α_i 为第 i 次冲击时所述冲击头（32）与工件（1）表面之间夹角， $1 < i \leq n$ ；

R 为所述传递桩（4）；

L 为超声冲击装置的总长度；

V_L 为激光冲击波在工件（1）中的传播速度；

V_{U1} 为超声冲击波在工件内部和传递桩中的传播速度；

V_{U2} 为超声冲击波在变幅杆和振动头中的传播速度。

5. 根据权利要求 4 所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置，其特征在于，所述冲击头旋转角速度 ω 的表达式为：

$$\omega = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{|\Delta T_{i+1} - \Delta T_i|}。$$

6. 根据权利要求 1 所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置，其特征在于，所述传递桩（4）的材质与工件（1）相同或近似，用于避免超声冲击波在传播过程中发生折射。

7. 根据权利要求 2 所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置，其特征在于，所述齿条上安装电磁装置（22），用于锁定齿条在第二滑动装置上的位置。

8. 一种根据权利要求 2 所述的激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化装置的强化方法，其特征在于，包括如下步骤：包括如下步骤：

激光装置发出激光对工件（1）进行预热；

所述控制系统控制同步装置使 2 个所述超声冲击装置同步转动，用于使超声冲击装置与工件（1）表面夹角为 α_1 ；

调节 2 个传递桩（4）的中心距离，通过第一液压缸（5）调节传递桩（4）高度和通过同步装置使 2 个所述超声冲击装置同步相向移动，使超声冲击装置的冲击头（32）与传递桩（4）接触并且压紧；

通过控制第二液压缸（12）压缩，使传递桩（4）与工件（1）接触并且压紧；

工件（1）表面覆盖约束层；

控制所述超声冲击装置释放超声冲击波，摆动液压缸（25）使所述超声冲击装置转动，所述超声冲击装置在转动范围内释放 n 次超声冲击波；

在超声冲击装置工作 ΔT 时间后，所述控制系统控制所述激光装置进行激光冲击，实现激光冲击波和超声冲击波实时耦合强化。

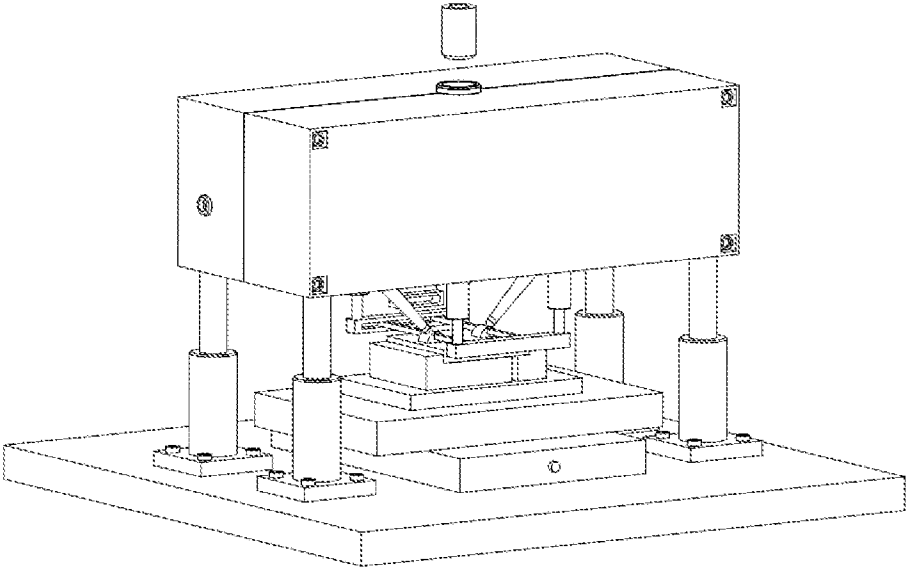


图 1

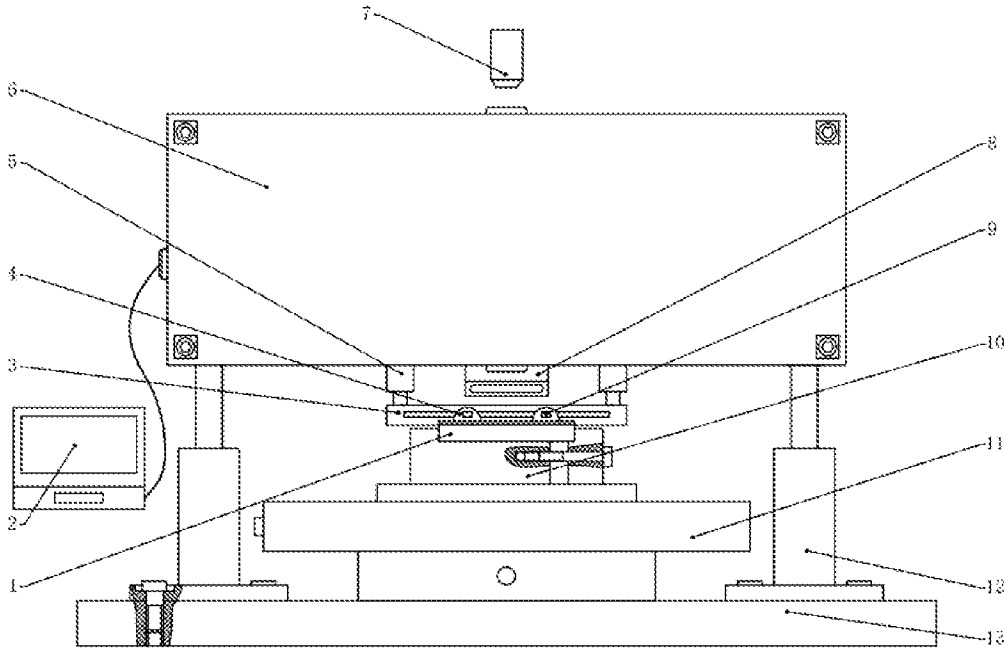


图 2

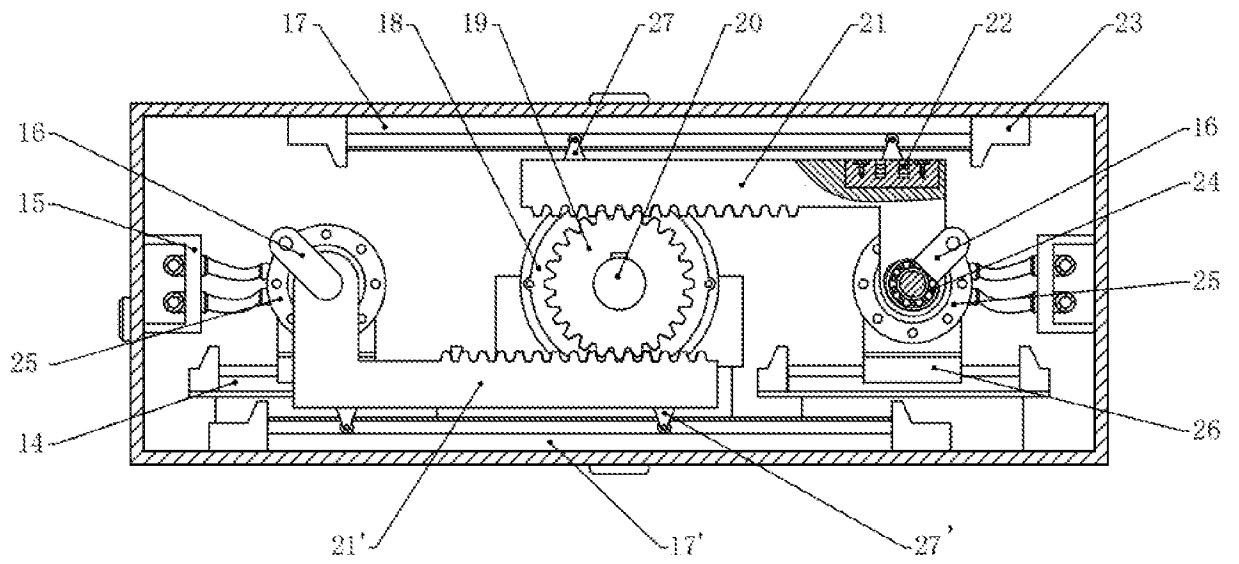


图 3

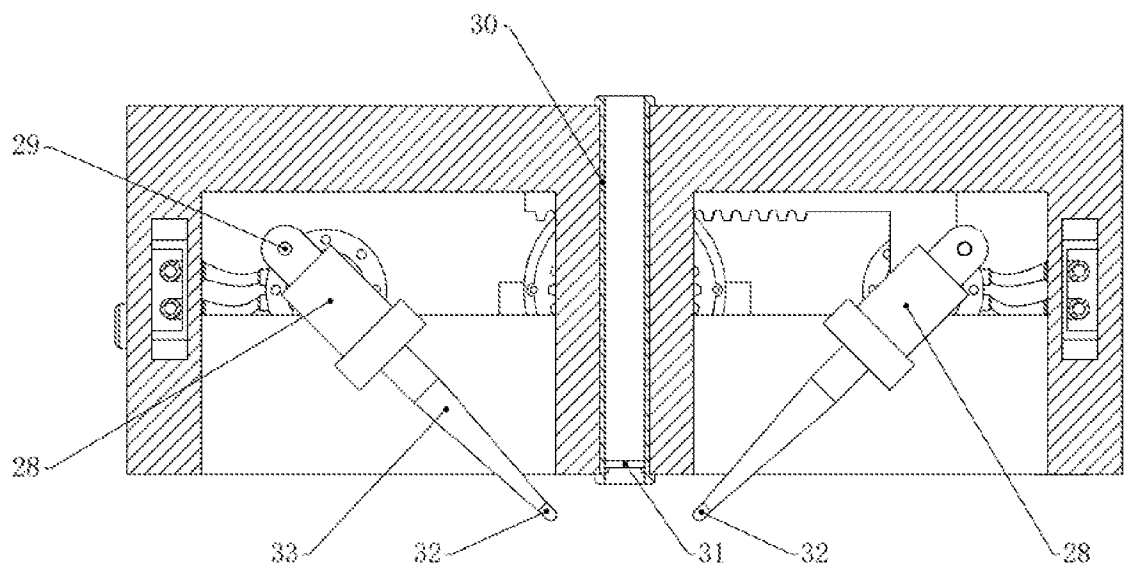


图 4

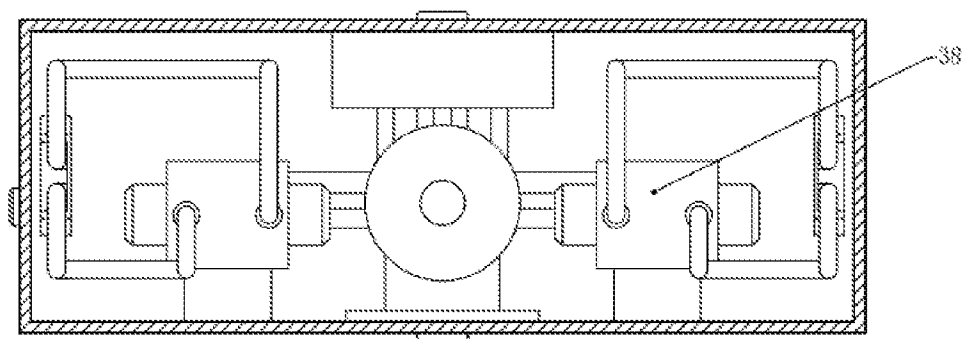


图 5

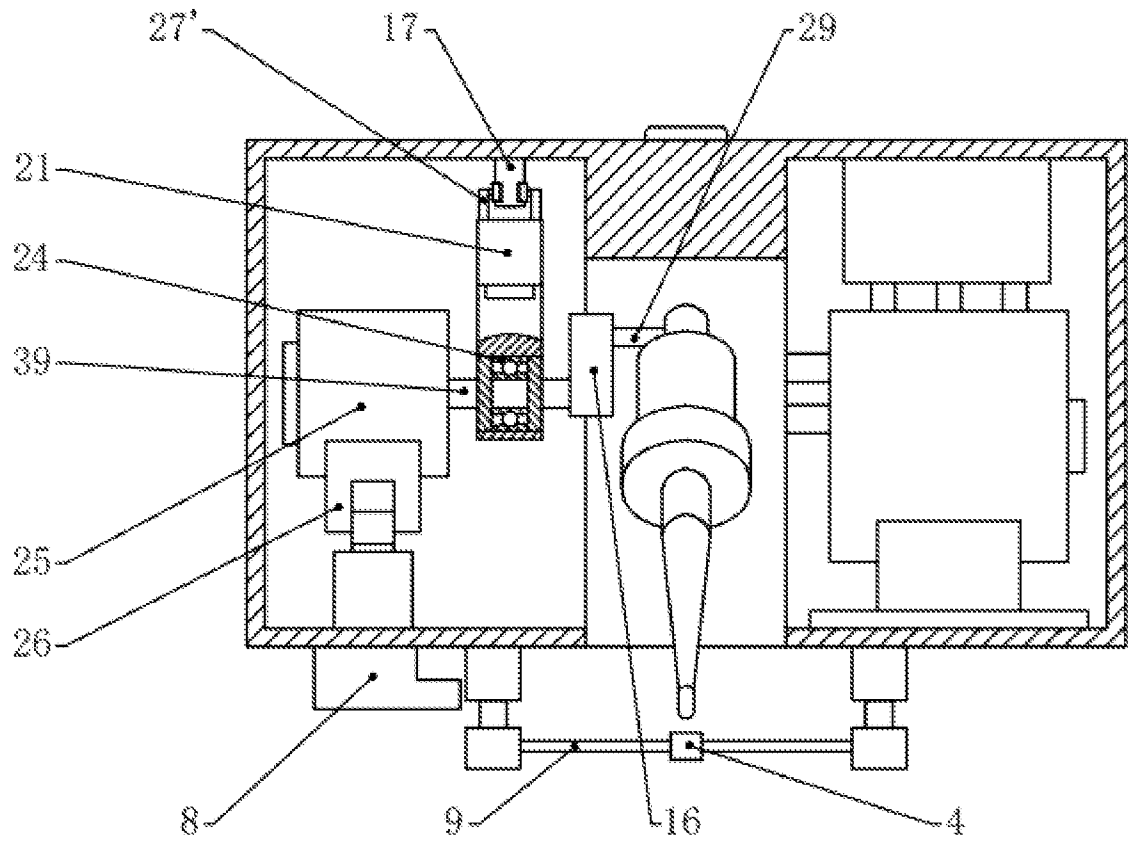


图 6

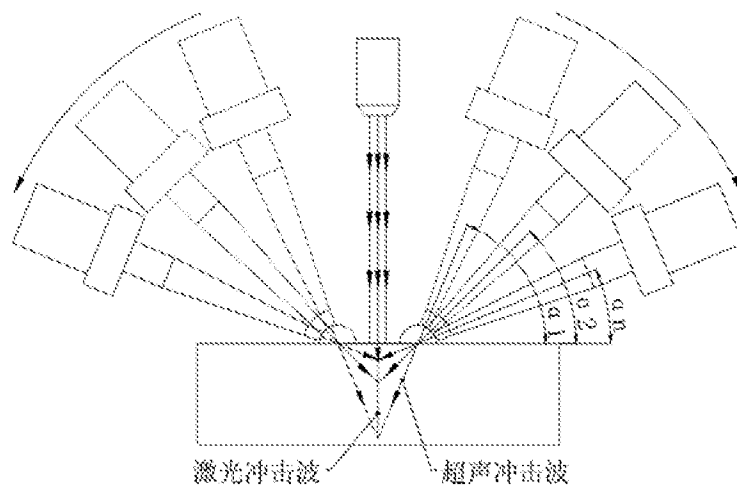


图 7

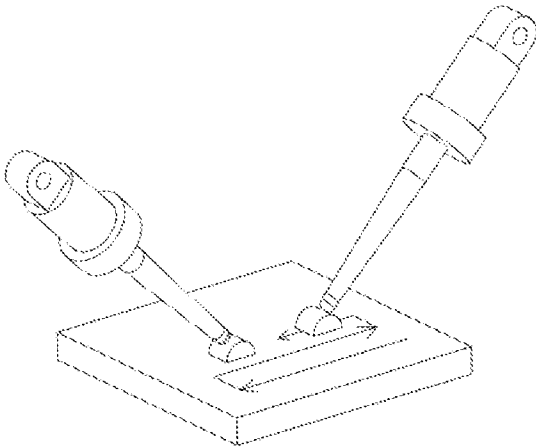


图 8

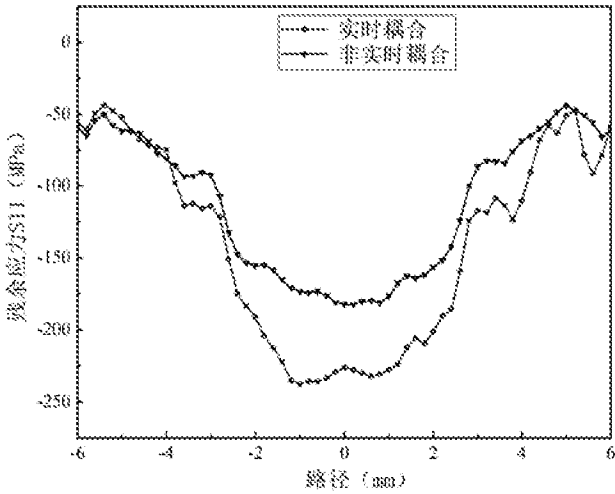


图 9

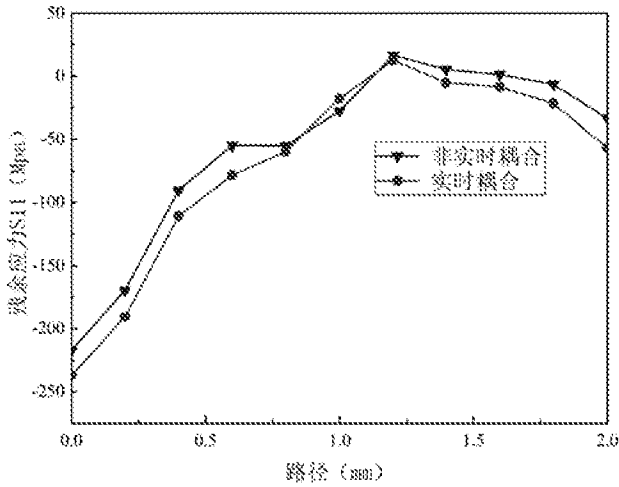


图 10

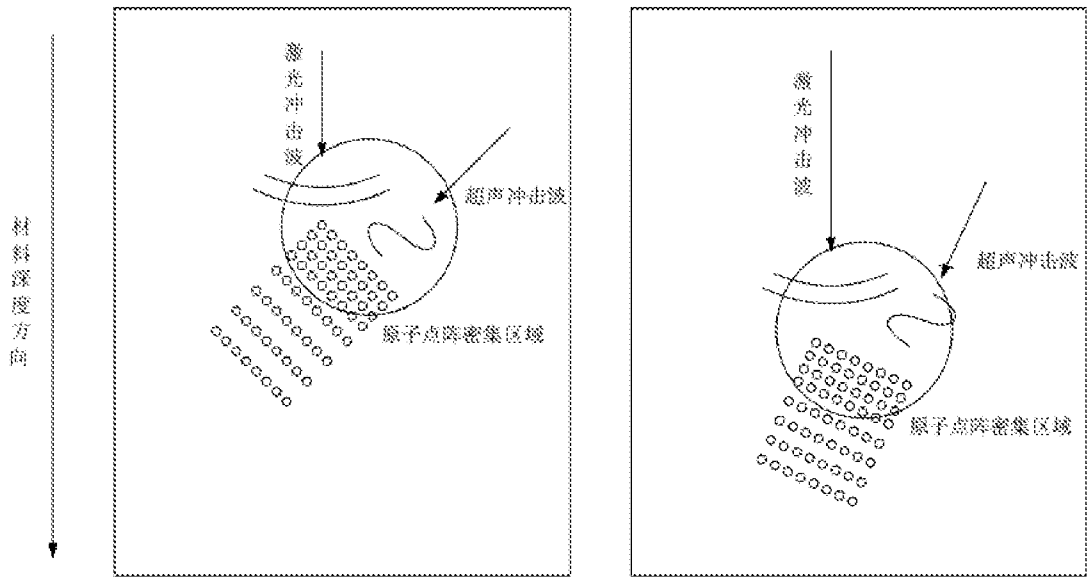


图 11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/075282

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C21D 10/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C21D 10

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, JPABS, CNABS, CNKI: 激光, 超声波, 强化, laser, ultrasonic, strength+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 108796206 A (JIANGSU UNIVERSITY) 13 November 2018 (2018-11-13) claims 1 and 6	1-8
A	CN 203393190 U (NANJING ZHONGKE RAYCHAM TECHNOLOGY CO., LTD.) 15 January 2014 (2014-01-15) entire document	1-8
A	CN 109852785 A (TIANJIN UNIVERSITY) 07 June 2019 (2019-06-07) entire document	1-8
A	DE 102016203649 A1 (MTU AERO ENGINES AG) 07 September 2017 (2017-09-07) entire document	1-8

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

15 October 2021

Date of mailing of the international search report

03 November 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

**China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)**
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/075282

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	108796206	A	13 November 2018	CN	108796206	B	03 December 2019
CN	203393190	U	15 January 2014	None			
CN	109852785	A	07 June 2019	None			
DE	102016203649	A1	07 September 2017	US	2017252860	A1	07 September 2017
				US	10456867	B2	29 October 2019
				EP	3216546	A1	13 September 2017

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/075282

A. 主题的分类

C21D 10/00 (2006.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

C21D 10

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

EP0DOC, JPABS, CNABS, CNKI: 激光, 超声波, 强化, laser, ultrasonic, strength+

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
X	CN 108796206 A (江苏大学) 2018年 11月 13日 (2018 - 11 - 13) 权利要求1和6	1-8
A	CN 203393190 U (南京中科煜宸激光技术有限公司) 2014年 1月 15日 (2014 - 01 - 15) 全文	1-8
A	CN 109852785 A (天津大学) 2019年 6月 7日 (2019 - 06 - 07) 全文	1-8
A	DE 102016203649 A1 (MTU AERO ENGINES AG) 2017年 9月 7日 (2017 - 09 - 07) 全文	1-8

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2021年 10月 15日

国际检索报告邮寄日期

2021年 11月 3日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

彭敏

电话号码 86-010-62084744

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/075282

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	108796206	A	2018年 11月 13日	CN 108796206 B	2019年 12月 3日
CN	203393190	U	2014年 1月 15日	无	
CN	109852785	A	2019年 6月 7日	无	
DE	102016203649	A1	2017年 9月 7日	US 2017252860 A1	2017年 9月 7日
				US 10456867 B2	2019年 10月 29日
				EP 3216546 A1	2017年 9月 13日