(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
2018 年 11 月 8 日 (08.11.2018)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2018/201521 A1

(51) 国际专利分类号:
C21D 1/09 (2006.01) *B23P 9/02* (2006.01)
C21D 7/04 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2017/084796

(22) 国际申请日: 2017 年 5 月 18 日 (18.05.2017)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201710309505.X 2017年5月4日 (04.05.2017) 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: 姜银方 (JIANG, Yinfang); 中国江苏省镇江市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。 李鑫 (LI, Xin); 中国江苏省镇江市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。 姜文帆 (JIANG, Wenfan); 中国江苏省镇江市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。 黄建云 (HUANG, Jianyun); 中国四川省成都市大石东路182号, Sichuan 610000 (CN)。 甘学东 (GAN, Xuedong); 中国四川省成都市青羊区日月大道1610号, Sichuan 610000 (CN)。 李旭 (LI, Xu); 中国江苏省镇江市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。 戚洪飞 (QI, Hongfei); 中国江苏省镇江市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。 虞文军 (YU, Wenjun); 中国四川省成都市青羊区成飞大道001号, Sichuan 610000 (CN)。

(74) 代理人: 北京德崇智捷知识产权代理有限公司 (JW IP LAW FIRM); 中国北京市朝阳区酒仙桥路14号A5楼7层701, Beijing 100015 (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, 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,

(54) **Title:** LASER SHOCK AND SUPERSONIC VIBRATION EXTRUSION CO-STRENGTHENING DEVICE AND METHOD

(54) 发明名称: 一种激光冲击和超声振动挤压协同强化装置及方法

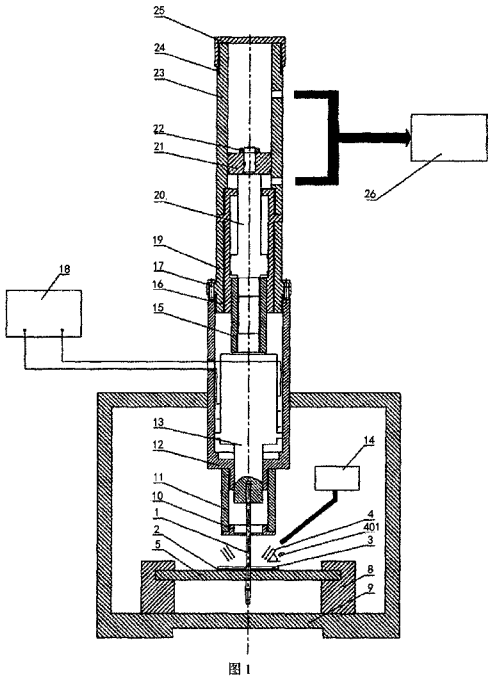


图 1

(57) **Abstract:** A laser shock and supersonic vibration extrusion co-strengthening device and method. The device comprises a laser assembly, a vibration assembly, a hydraulic assembly and a connecting assembly. The method strengthens a hole (7) formed in a metal sheet (5) simultaneously by laser shock strengthening and supersonic vibration extrusion strengthening; a mandrel (1) is in clearance fit with the hole to constrain the hole, so as to avoid distortion of the hole and a hole angle when the laser shock is performed on an outer surface of a workpiece and to improve the strengthening effect of a hole wall; when the laser shock is performed on the outer surface of the metal sheet, supersonic vibration is applied by the mandrel in the hole; and a three-dimensional pressure stress distribution nearby the hole wall at a certain depth is formed under an interaction produced by power ultrasound and laser shock waves having a certain frequency, amplitude and modality, so that an inner surface having higher anti-fatigue performance and being smoother is provided to the hole. Defects of a traditional strengthening process are overcome, and the problem in strengthening the hole separately through the laser shock or supersonic vibration extrusion is solved.

WO 2018/201521 A1

[见续页]

QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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：一种激光冲击和超声振动挤压协同强化装置及方法，所述装置包括激光组件、振动组件、液压组件和连接组件。所述方法采用激光冲击强化和超声振动挤压强化同时对金属板料（5）上已开的孔（7）进行强化，所述芯棒（1）与孔成间隙配合状态以对孔进行约束，以防止激光冲击工件外表面时孔和孔角的畸变，并增加孔壁的强化效果；在激光冲击金属板料外表面时，孔中的芯棒施加超声振动，利用一定频率、振幅和模态的功率超声与激光冲击波产生相互作用，在孔壁附近一定深度形成三维的压应力分布，使孔获得较高的抗疲劳性能和较光整的内表面。克服了传统强化工艺的缺陷，解决了单一激光冲击和单一超声振动挤压强化孔的不足。

一种激光冲击和超声振动挤压协同强化装置及方法

技术领域

本发明属于零件表面强化领域，提供一种激光冲击和超声振动挤压协同强化装置及方法，主要应用于航空、航天、列车及船舶等工业中应力集中严重的孔强化。

背景技术

在航空航天等领域，由于设计、制造和装配等原因，零件会难以避免的出现孔结构，如果不对孔进行强化处理，则未强化孔就会成为整个零件受力部位疲劳破坏的危险源之一，从而导致安全性能和使用寿命降低。目前广泛使用的强化方法是冷挤压强化和激光冲击强化等。

芯棒直接冷挤压技术，是使芯棒强行通过比芯棒直径略小的孔径，使孔壁发生弹塑性变形，从而在孔壁表面引入残余应力，进而提高孔的疲劳寿命。但该技术在挤压过程中，芯棒与孔壁直接接触，两者间摩擦力大，孔壁表层金属塑性流动严重，导致孔壁表面出现划痕，芯棒断裂等问题。因此普通芯棒冷挤压技术无法达到有效提高高强度金属小孔的挤压强化效果。

专利 CN102205488A 叙述了一种开缝衬套冷挤压加工孔的方法。通过在孔壁和芯棒之间要增加一个开缝的衬套，用芯棒挤压衬套，衬套再对孔壁进行挤压，使内孔周围产生残余压应力，达到强化效果。但挤压过程中芯棒极易断裂，工艺较为复杂且每次消耗一个衬套，导致加工成本大幅提高。并且大量直径小于 3.5mm 的无法采用冷挤压强化，对小孔孔径尺寸限制较大。

激光冲击强化是通过对材料表面的强化来调控小孔内壁的应力分布，达到对小孔的强化效果，但这种调控受很多因素的限制，特别是材料厚度等因素。激光冲击强化小孔有单面冲击和双面冲击两种。单面激光冲击强化后小孔孔壁中部存在拉应力，疲劳寿命呈负增益。对于孔壁的应力分布来说，如果双面冲参数适当，效果优于单面冲，双面冲的“应力波峰”分布更倾向于板料厚度方向的中部，但是单双面冲均在靠近板料表面的地方产生拉应力。因此对于厚度大的板料上的小孔，激光冲击强化存在缺陷，孔壁中部无法得到强化。并且在实际生产过程中，工件形状复杂多变，双面冲往往不容易实现，故应用受到一定的限制。

专利 CN101942546A 叙述了一种激光冲击强化小孔技术，该技术是在小孔内部适当位置放置能量吸收杆，激光脉冲作用在能量吸收杆头部斜面，诱导等离子体爆炸产生冲击

波作用于小孔内壁，从而对小孔进行强化。但该方法无法保证直径小于 3mm 的小孔得到有效的强化。

超声波拉丝是将超声波的能量通过固体或液体耦合到拉丝模具上，通过拉丝模具和金属丝的接触传递到金属丝上，超声振动对金属丝的塑性形变产生很大的影响。超声波拉丝在降低拉拔力，提高拉丝速度，降低摩擦力从而减少模具磨损，延长模具寿命，防止咬粘模壁，降低断线率，提高钢表面质量和改善材料力学性能等方面都能起到良好的作用。

超声振动挤压强化技术是使零件表面被有压力（拉力）和高频纵向冲击力的工具头撞击，使工件表面的微观峰谷被压平，同时表层金属发生塑性变形强化，形成压应力，进而增强零件表面耐疲劳强度。但使用超声振动挤压强化小孔时，小孔的孔角无法得到有效的强化且极易发生变形。

专利 CN103710494A 叙述了一种基于超声波的小孔强化方法及装置，该方法是在小孔内部适当位置放置压电陶瓷柱，其中压电陶瓷柱为振动部件，进行极化后与超声波发生器相连接。通过压电陶瓷柱的旋转和径向运动撞击小孔内壁产生一定的塑性变形从而引入残余应力，对小孔内壁进行珩磨与强化。但是由于压电陶瓷柱在使用之前需要进行较为严格的极化处理，因此工艺极为复杂，且存在残余应力分布不均匀问题。

专利 CN105734233A 提供一种提高金属工件疲劳寿命的超声强化方法及其应用，通过将金属工件装夹在超声波加工机床上，利用超声波加工刀具对金属工件表面进行超声加工，通过调整超声波加工刀具对于加工工作面的不同压力来实现对金属表面预置压应力，最终达到消除残余应力，提高疲劳寿命的目的。同时该超声强化能使金属工件表面晶粒细化，表面显微硬度提高，耐磨性和耐腐蚀性提高。该强化方法只能使工件表面加工残余应力降低，不能实现明显的强化，且不适用于孔内壁强化。

专利 CN10162828 公开了一种切向伸缩式超声波扭转换能器，对称分布的两个驱动组件在换能器切向方向上产生的一对频率、振幅、振动方向相同的伸缩振动，此振动使前盖体上的两个连接臂产生一对频率振幅相同，振动方向相同的切向振动，使前盖体在切向方向产生纯扭转振动，经过变幅杆放大后输出大振幅扭转振动，以切向直接驱动的简单方式获得了超声波纯扭转振动。此换能器为纯扭转振动，无法改变振动模态，不能适应孔的强化的要求。

发明内容

本发明的目的是针对上述强化技术的缺陷，提出了一种激光冲击和超声振动挤压协同强化装置及方法。克服了传统强化工艺的缺陷，解决了单一激光冲击和单一超声振动挤压强化孔的不足，通过激光冲击和超声振动挤压协同强化，可以使小孔得到全面的强化。解决了超声振动挤压强化对于孔角强化的不足，解决了激光冲击强化时孔壁中部存在拉应力的问题和对孔径尺寸的限制，解决了激光冲击强化厚度大的材料强化效果不明显的问题。且该方法可提高孔壁表面质量，工艺过程简单。

本发明的技术方案是：为了实现上述目的，本发明的方法即对板料上已开好的孔同时进行激光冲击强化和超声振动挤压强化，最后施加轴向拉力和径向超声振动的芯棒连续均匀地通过孔，使孔获得较高的抗疲劳性能和较光整的内表面。

一种激光冲击和超声振动挤压协同强化装置，包括激光组件、振动组件、液压组件和连接组件；

所述激光组件包括吸收层、约束层、激光束和激光器；所述吸收层置于金属板料上表面，约束层置于吸收层上方，激光器位于金属板料上方发出的激光束对金属板料上表面的孔进行激光冲击强化；

所述振动组件包括芯棒、换能器和超声波发生器；所述芯棒包括依次连接的连接段、导向段、配合段、前锥段、工作环和后锥段；超声波发生器与换能器电连接；

所述液压组件包括缸筒、活塞杆、活塞、缸体和液压泵站；活塞杆安装在缸筒内部，活塞杆的一端和活塞连接，所述活塞杆的另一端与换能器后盖板通过连接套筒相连接，并安装在支架体内，所述缸体通过油管和液压泵站连接；

所述连接组件包括夹具、工作台、前端盖、套筒、换能器导向套筒、连接套筒、支架体和后端盖；所述夹具安装在工作台上，前端盖与套筒的一端连接，套筒的另一端与换能器导向套筒的一端螺纹连接，且换能器导向套筒安装在工作台上，支架体的一端与换能器导向套筒的另一端连接，支架体的另一端与缸体的下端连接，后端盖安装在缸体的上端；所述芯棒的连接段与换能器连接，并安装在换能器导向套筒内，换能器导向套筒安装在工作台的上方。

上述方案中，所述芯棒的前锥段和后锥段轴向长度不超 15mm，前锥段和后锥段的表面粗糙度 Ra≤0.2μm，前锥角和后锥角为 2.5～4°；所述工作环的表面粗糙度 Ra≤0.1μm。

上述方案中，所述换能器包括换能器前盖板、预紧力螺钉、压电陶瓷、电极片、换

能器后端盖、绝缘管和绝缘片；

所述芯棒的连接段与换能器前盖板螺纹连接，换能器前盖板上方依次安装绝缘片、电极片、压电陶瓷，每对压电陶瓷间都安装有电极片，最上方的压电陶瓷依次与电极片、绝缘片、换能器后端盖相连，换能器各个部分之间由预紧力螺钉相连接，预紧力螺钉外表面套有绝缘管。

一种根据所述的激光冲击和超声振动挤压协同强化装置的方法，采用激光冲击强化和超声振动挤压强化同时对金属板料上已开的孔进行强化，所述芯棒与孔成间隙配合状态以对孔进行约束，以防止激光冲击工件外表面时孔和孔角的畸变，并增加孔壁的强化效果；在激光冲击金属板料外表面时，孔中的芯棒施加超声振动，利用一定频率、振幅和模态的功率超声与激光冲击波产生相互作用，在孔壁附近一定深度形成三维的压应力分布，具体包括以下步骤：

S1.对已开孔的金属板料外表面进行预处理，在所述金属板料外表面先设置吸收层，再在吸收层上设置约束层；

S2.根据孔的尺寸选择芯棒型号尺寸，芯棒配合段与孔间隙配合；

S3.将所述芯棒的轴线与孔轴线对准后使芯棒穿过孔，芯棒的连接段与换能器连接，换能器后盖板与液压组件的活塞杆连接；

S4.超声波发生器与换能器电连接，设置超声波发生器的振动模态和参数，打开超声波发生器，使芯棒产生模态的超声振动；

S5.调节激光器的光斑形状、光斑大小及激光功率密度，在芯棒产生模态的超声振动的同时对孔四周的外表面进行激光冲击强化；

S6.完成激光冲击后，打开液压泵站，启动液压组件，将芯棒匀速缓慢挤压的通过孔，关闭超声波发生器，完成激光冲击和超声振动挤压协同强化。

上述方案中，所述步骤 S1 中的吸收层为铝箔，约束层为水。

上述方案中，所述步骤 S2 中配合段与孔的配合公差为 H6/h5、H7/h6、H8/h7 或 H9/h9。

上述方案中，所述步骤 S4 中超声波发生器采用呼吸式振动；超声振动频率为 15～60kHz，交替式径向振幅为 2～40μm；芯棒通过孔的速度为 10～50mm/min。

上述方案中，所述步骤 S5 中激光器的激光冲击位置为绕孔的孔周进行，周向光斑搭接率和径向光斑搭接率均大于 50%。

上述方案中，所述步骤 S5 中激光器的激光入射角大于 60°。

上述方案中，所述步骤 S6 中芯棒与孔之间超声挤压强化通过芯棒的工作环与孔相互

挤压完成，超声挤压余量保持在1%～6%。

本发明所述激光组件主要作用是进行激光冲击强化。所述振动组件的主要作用是提供径向超声振动。所述液压组件的主要作用是使振动组件受到轴向拉力，使芯棒能够通过孔完成强化。所述夹具主要作用是定位孔和夹紧金属板料。

与现有技术相比，本发明的有益效果是：

1.本发明对金属板料上已开好的孔同时进行激光冲击强化和超声振动挤压强化，最后施加轴向拉力和径向超声振动的芯棒连续均匀地通过孔，使孔获得较高的抗疲劳性能和较光整的内表面，克服了小孔孔径尺寸的限制，也可以强化任意尺寸的孔。

2.本发明克服了单一激光冲击强化和单一超声振动挤压强化的缺陷，使金属构件从孔表面到内壁深处形成残余压应力，应力分布更合理，孔壁中部及孔角都能得到有效强化。

3.本发明解决了传统冷挤压强化的不足，减少了芯棒的挤压力，提高了挤压量，强化过程中不易出现芯棒断裂的现象，强化后孔壁表面光整，疲劳寿命大幅提高。

4.本发明还解决了工程结构件无法进行双面激光冲击强化，而单面激光冲击强化无增益的问题，使工程结构件应力集中孔结构得到了有效的强化。

5.本发明具有结构简单，且工艺过程简单，操作方便等特点。

附图说明

图1是本发明一实施方式的激光冲击和超声振动挤压协同强化装置结构示意图。

图2是本发明一实施方式的芯棒结构示意图；

图3是本发明一实施方式的强化过程示意图；

图4是本发明一实施方式的激光冲击强化光斑及孔位置分布示意图；

图5是本发明一实施方式的金属板料及孔的侧面剖视图；

图6是本发明一实施方式的金属板料及孔的俯视图；

图7是本发明一实施方式的换能器结构示意图；

图8是图7I处的放大示意图；

图9是本发明一实施方式的孔壁应力分布对比图；

图10是本发明一实施方式的孔壁中段应力分布对比图；

图11是本发明一实施方式的表面应力分布对比图。

图中，1、芯棒，101、连接段，102、导向段，103、配合段，104、前锥段，105、工作环，106、后锥段，2、吸收层，3、约束层，4、激光束，401、激光入射角，5、金

属板料，501、金属板料 A 面，502、金属板料 B 面，6、光斑，7、孔，8、夹具，9、工作台，10、前端盖，11、套筒，12、换能器导向套筒，13、换能器，14、激光器，15、连接套筒，16、缸筒，17、螺钉，18、超声波发生器，19、支架体，20、活塞杆，21、活塞，22、螺母，23、缸体，24、后端盖密封圈，25、后端盖，26、液压泵站，27、换能器前盖板，28、预紧力螺钉，29、压电陶瓷，30、电极片，31、换能器后盖板，32、绝缘管，33、绝缘；

图 9 中，曲线 701 为激光冲击强化孔壁应力；曲线 702 为激光冲击和超声振动挤压协同强化孔壁应力；曲线 703 为超声振动挤压强化孔壁应力；

图 10 中，曲线 704 为激光冲击强化孔壁中段应力；曲线 705 为超声振动挤压强化孔壁中段应力；曲线 706 为激光冲击和超声振动挤压协同强化孔壁中段应力；

图 11 中，曲线 707 为激光冲击强化表面应力；曲线 708 为超声振动挤压强化表面应力；曲线 709 为激光冲击和超声振动挤压协同强化表面应力。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细说明，但本发明的保护范围并不限于此。

本发明采用激光冲击强化和超声振动挤压强化同时对金属板料 5 上已开的孔 7 进行强化，所述芯棒 1 与孔 7 成间隙配合状态以对孔 7 进行约束，以防止激光冲击工件外表面时孔和孔角的畸变，并增加孔壁的强化效果；在激光冲击金属板料 5 外表面时，孔 7 中的芯棒 1 施加超声振动，利用一定频率、振幅和模态的功率超声与激光冲击波产生相互作用，在孔壁附近一定深度形成三维的压应力分布。

图 1 所示为本发明所述激光冲击和超声振动挤压协同强化装置的一种实施方式，所述激光冲击和超声振动挤压协同强化装置包括激光组件、振动组件、液压组件和连接组件。

本发明中采用的芯棒 1 如图 2 所示，所述芯棒 1 依次包括连接段 101、导向段 102、配合段 103、前锥段 104、工作环 105 和后锥段 106。前锥段 104 和后锥段 106 轴向长度不超过 15mm，前锥段 104 和后锥段 106 的表面粗糙度 Ra≤0.2μm，前锥角和后锥角为 2.5-4°，角度过大则芯棒 1 的导向性差，过小则易影响孔 7 的表面质量，工作环 105 直径大小根据需强化孔的大小来确定，直径公差小于 0.005mm，工作环 105 的表面粗糙度 Ra≤0.1μm。

本发明的激光冲击和超声振动挤压协同强化方法原理如图 3 所示，金属板料 5 上已开好孔 7，使芯棒 1 的轴线与孔 7 的轴线对准，将芯棒 1 自下而上缓慢穿过孔 7，其配合

段 103 与孔 7 形成间隙配合，配合公差可为 H6/h5、H7/h6、H8/h7 和 H9/h9，使芯棒 1 产生一定模态的超声振动，同时用激光冲击强化孔周。强化完成后使具有一定模态超声振动的芯棒 1 匀速通过金属板料 5 上孔 7。其中：芯棒 1 的呼吸式超声振动频率优选值为 15～60kHz，交替式径向振幅优选值为 2～40μm，芯棒 1 通过孔 7 的速度优选值为 10～50mm/min，可根据工程实际需求选取合适参数。激光冲击强化光斑及孔位置分布如图 4 所示，图 5 和图 6 分别为金属板料及孔的侧剖视图和俯视图。

经过上述强化处理后，一方面，在具有一定模态超声振动芯棒 1 的挤压作用下，孔 7 内壁附近形成残余压应力，加深了径向残余压应力层，在服役条件下可以抵消部分拉应力，改善孔 7 周围的应力环境，解决了激光冲击强化后孔内壁中部产生拉应力的问题；另一方面，通过激光冲击强化，使孔 7 孔角也能得到有效强化。以上两方面共同作用增强了孔 7 周边材料抗裂纹萌生与扩展的能力，使小孔能够得到全面的强化。此外，芯棒 1 处于一定模态的超声振动状态，能够降低挤压过程中的摩擦力等，有效解决挤压过程中的芯棒 1 的断裂问题，还能够提高孔 7 的表面质量，使其表面更加光整。

本发明的激光冲击和超声振动挤压协同强化装置的振动组件包括芯棒 1、换能器 13 和超声波发生器 18。如图 7 和 8 所示为换能器 13 的结构示意图，芯棒 1 与换能器前盖板 27 螺纹连接，换能器前盖板 27 上方依次安装绝缘片 33、电极片 30、压电陶瓷 29，每对压电陶瓷 29 间都安装有电极片 30，最上方的压电陶瓷 29 依次与电极 30、绝缘片 33、换能器后端盖 31 相连，换能器 13 各个部分之间由预紧力螺钉 28 相连接，其外表面套有绝缘管 32。

所述激光组件包括吸收层 2、约束层 3、激光束 4 和激光器 14。吸收层 2 置于金属板料 5 上表面，约束层 3 置于吸收层 2 上方，通过激光器 14 发出的激光束 4 进行激光冲击强化，其中吸收层 2 优选选铝箔，约束层 3 优选水。

所述液压组件包括缸筒 16、活塞杆 20、活塞 21、螺母 22、缸体 23 和液压泵站 26。活塞杆 20 安装在缸筒 16 内部，活塞杆 20 的一端和活塞 21 通过螺母 22 连接，缸体 23 通过油管和液压泵站 26 连接。

所述振动组件包括芯棒 1、换能器 13 和超声波发生器 18。芯棒 1 与换能器 13 通过螺纹连接，超声波发生器 18 通过导线与换能器 13 连接。

所述连接组件包括夹具 8、工作台 9、前端盖 10、套筒 11、换能器导向套筒 12、连接套筒 15、支架体 19 和后端盖 25。夹具 8 安装在工作台 9 上，前端盖 10 与套筒 11 通过螺纹连接，套筒 11 与换能器导向套筒 12 通过螺纹连接，且换能器导向套筒 12 安装在

工作台 9 上，支架体 19 与换能器导向套筒 12 通过螺钉 17 连接，后端盖 25 安装在缸体 23 上方。

芯棒 1 的连接段 101 与换能器前盖板 27 通过螺纹连接，并安装在换能器导向套筒 12 内，换能器导向套筒 12 安装在工作台 9 的上方。所述液压组件的活塞杆 20 的一端与换能器后盖板 31 通过连接套筒 15 相连接，并安装在支架体 19 内。支架体 19 和换能器导向套筒 12 通过螺钉 17 相连接。液压组件的主要作用是使振动组件受到轴向拉力，使芯棒 1 能够通过孔 7 完成强化。夹具 8 安装在工作台 9 底板上，其主要作用是定位孔 7 和夹紧金属板料 5。

本发明提供一种激光冲击和超声振动挤压协同强化的方法具体实施过程如下：

S1、对已开孔 7 的金属板料 5 外表面进行预处理，设置吸收层 2 和约束层 3。在孔 7 周围贴上铝箔或黑漆等作为吸收层 2，其主要作用是保护零件不被激光灼伤并增强对激光能量的吸收。使用水作为约束层 3，使水约束层 3 匀速流过吸收层 2 表面。

S2、选择芯棒 1 型号尺寸，芯棒配合段 103 的尺寸根据需要强化孔的尺寸和孔轴配合原则来确定，配合段 103 与孔 7 形成间隙配合，配合公差可为 H6/h5、H7/h6、H8/h7 和 H9/h9，保证芯棒 1 在孔 7 内的约束效应。前锥段 104 和后锥段 106 轴向长度不超过 15mm，前锥段 104 和后锥段 106 的表面粗糙度 Ra≤0.2μm，前锥角和后锥角优选 2.5-4°，角度过大则芯棒 1 的导向性差，过小则易影响孔 7 的表面质量，工作环 105 直径大小根据需强化孔的大小来确定，直径公差应小于 0.005mm，工作环 105 的表面粗糙度 Ra≤0.1μm。

S3、使芯棒 1 的轴线与孔 7 的轴线对准，将芯棒 1 有螺纹一端自下而上缓慢穿过孔 7，保证芯棒 1 的连接段 101 与换能器 13 通过螺纹相连接，安装前端盖 10。

S4、设置振动模态和参数，在超声波发生器 18 上可调整振动频率和振幅等参数。打开超声波发生器 18，使芯棒 1 产生一定模态的超声振动。超声振动采用呼吸式振动，也可以根据需要改变振动模态，超声振动频率优选值为 15～60kHz，交替式径向振幅优选值为 2～40μm。

S5、调节激光器 14 的参数光斑形状和大小及激光功率密度等。由于金属板料 5 上方安装有振动组件和连接组件，使得激光束 4 无法垂直照射，因此激光入射角 401 应大于 60°，保证激光冲击强化的效果较好。控制其运行路线，对孔 7 四周的外表面进行激光冲击强化。激光功率密度根据工件的材料性能和工件在孔位置的厚度进行选择，激光冲击位置为绕孔周进行，周向光斑搭接率和径向光斑搭接率均大于 50%，完成周向和径向

冲击为一遍，可重复 2～3 遍；也可以采用大能量的环形激光束进行冲击，这时芯棒 1 穿过环形激光束中心，光斑整体辐照在孔 7 的周围，无需移动光斑。

S6、完成激光冲击后，启动挤压装置，将芯棒 1 匀速缓慢的通过孔 7，芯棒 1 与孔 7 之间超声挤压强化通过工作环 105 与孔 7 相互挤压完成，关闭超声波发生器 18，完成激光冲击和超声振动挤压协同强化。

本发明在实际工作过程中，应根据工艺要求，设定工艺参数，如挤压速度、挤压量等。

在超声振动挤压强化过程中，要求芯棒连续、均匀地通过孔，使孔壁得到充分变形，不允许在挤压过程中有停顿、间歇和冲击载荷，直至芯棒完全通过孔。速度不能过慢，容易出现卡棒、断棒现象。挤压速度过快时，会造成塑变不充分、晶格组织不稳定。因此，挤压速度可根据实际工程需要，在 10～50mm/min 内选取。

挤压量是本强化工艺中最重要的工艺参数之一，其直接影响此工艺带来的疲劳寿命增益。若挤压量过小，弹塑性变形区域小，由此产生的强化效果有限；若挤压量过大，容易在孔的周围产生裂纹及微观缺陷，从而降低疲劳寿命。因此，挤压量工艺参数范围的确定是本发明工艺实施的重要环节。挤压量的大小主要取决于被强化的孔的材料、热处理状态、所受外加载荷水平、初始孔直径、孔深以及孔边距等因素。在本发明方法中，可以根据实际工程需要，选取适合的挤压量，超声挤压余量的优选值为 1%～6%，保证孔得到充分强化。

实施例：

对 6mm 厚金属板料，孔径大小为 2.6mm 的孔进行强化。对金属板料外表面进行预处理，在孔周围贴上铝箔作为吸收层 2，使用水作为约束层 3，使水匀速流过铝箔表面。选择芯棒 1 的型号尺寸，芯棒配合段 103 的直径为 2.6mm，配合段 103 与孔 7 形成间隙配合，配合公差为 H7/h6，保证芯棒 1 在孔 7 内的约束效应。芯棒前锥段 104 和后锥段 105 轴向长度为 6mm，前锥段 104 和后锥段 105 的表面粗糙度 Ra 为 0.2μm，前锥角和后锥角为 3°，工作环直径大小根据需强化孔 7 的大小来确定，本实施例中挤压量为 3%,因此工作环 105 直径为 2.678mm，直径公差小于 0.005mm，工作环的表面粗糙度 Ra 为 0.1μm。使芯棒 1 的轴线与孔 7 的轴线对准，将芯棒 1 有螺纹一端自下而上缓慢穿过孔，保证芯棒 1 的连接段 101 与换能器 13 通过螺纹相连接，安装前端盖 10。调节超声波发生器 18，设置振动模态和参数，本实施例中超声振动采用呼吸式振动，超声振动频率为 40kHz，交替式径向振幅为 20μm。打开超声波发生器 18，使芯棒 1 产生超声振动。调节激光器的

参数，具体参数如下：光斑直径 1mm，能量为 2G，脉冲宽度 20.1ns，波长 1.054μm。控制激光器运行路线和激光入射角度为 70°，对孔四周的外表面进行激光冲击强化。周向光斑搭接率和径向光斑搭接率均为 60%，完成周向和径向冲击为一遍，重复冲击 2 遍。完成激光冲击后，打开液压泵站（26），启动液压组件，将芯棒 1 匀速缓慢的通过孔 7，挤压速度为 20mm/min，芯棒 1 与孔 7 之间超声挤压强化通过工作环 105 与孔 7 相互挤压完成。挤压强化结束后关闭超声波发生器 18，完成激光冲击和超声振动挤压协同强化。

激光冲击和超声振动挤压协同强化后，孔 7 得到全面强化。如图 9 所示为孔壁应力分布对比图，横坐标为从 A 面到 B 面的厚向距离，纵坐标为应力大小，如图 5 所示金属板料 A 面 501 和金属板料 B 面 502，曲线 701 为激光冲击强化孔壁应力，曲线 702 为激光冲击和超声振动挤压协同强化孔壁应力，曲线 703 为超声振动挤压强化孔壁应力。单一激光冲击强化孔内壁中部会产生约 50MPa 的拉应力，单一超声振动挤压强化孔角残余压应力较小强化效果不明显，与采用激光冲击和超声振动挤压协同强化相比，孔角残余压应力减小约 150MPa，激光冲击和超声振动挤压协同强化后孔得到全面强化，且残余压应力分布均匀合理。

如图 10 所示为孔壁中段应力分布对比图，横坐标为离开孔壁中段位置 Y 方向上的距离，如图 10 所示为离开孔壁中段位置 Y 方向，纵坐标为应力大小。曲线 704 为激光冲击强化孔壁中段应力，孔壁中段位置仅存在约 50MPa 的拉应力。曲线 705 为超声振动挤压强化孔壁中段应力，曲线 706 为激光冲击和超声振动挤压协同强化孔壁中段应力，激光冲击和超声振动挤压协同强化后孔壁中段位置会产生残余压应力，残余压应力的大小约为单一超声振动挤压强化的 1.3 倍，强化效果更明显。

如图 11 所示为表面应力分布对比图，横坐标为离开孔边缘 Y 方向上的距离，如图 11 所示为离开孔边缘 Y 方向，纵坐标为应力大小。曲线 707 为激光冲击强化表面应力，曲线 708 为超声振动挤压强化表面应力，曲线 709 为激光冲击和超声振动挤压协同强化表面应力。由应力对比图可知，单一超声振动挤压强化残余压应力层较浅，激光冲击和超声振动挤压协同强化后孔的残余压应力层比单一激光冲击强化深约 0.5mm，且拉应力的波峰小约 50MPa。孔从表面到内壁深处得到了全面强化，克服了单一激光冲击强化和单一超声振动挤压强化的缺陷。

应当理解，虽然本说明书是按照各个实施例描述的，但并非每个实施例仅包含一个独立的技术方案，说明书的这种叙述方式仅仅是为清楚起见，本领域技术人员应当将说明书作为一个整体，各实施例中的技术方案也可以经适当组合，形成本领域技术人员可

以理解的其他实施方式。

上文所列出的一系列的详细说明仅仅是针对本发明的可行性实施例的具体说明，它们并非用以限制本发明的保护范围，凡未脱离本发明技艺精神所作的等效实施例或变更均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1.一种激光冲击和超声振动挤压协同强化装置，其特征在于，包括激光组件、振动组件、液压组件和连接组件；

所述激光组件包括吸收层(2)、约束层(3)、激光束(4)和激光器(14)；所述吸收层（2）置于金属板料（5）上表面，约束层（3）置于吸收层（2）上方，激光器（14）位于金属板料（5）上方发出的激光束（4）对金属板料（5）上表面的孔（7）进行激光冲击强化；

所述振动组件包括芯棒(1)、换能器(13)和超声波发生器(18)；所述芯棒（1）包括依次连接的连接段(101)、导向段(102)、配合段(103)、前锥段(104)、工作环(105)和后锥段(106)；超声波发生器（18）与换能器（13）电连接；

所述液压组件包括缸筒(16)、活塞杆(20)、活塞(21)、缸体(23)和液压泵站(26)；活塞杆（20）安装在缸筒（16）内部，活塞杆（20）的一端和活塞（21）连接，所述活塞杆（20）的另一端与换能器后盖板(31)通过连接套筒(15)相连接，并安装在支架体(19)内，所述缸体（23）通过油管和液压泵站（26）连接；

所述连接组件包括夹具(8)、工作台(9)、前端盖(10)、套筒(11)、换能器导向套筒(12)、连接套筒(15)、支架体(19)和后端盖(25)；所述夹具（8）安装在工作台（9）上，前端盖（10）与套筒（11）的一端连接，套筒（11）的另一端与换能器导向套筒（12）的一端螺纹连接，且换能器导向套筒（12）安装在工作台（9）上，支架体（19）的一端与换能器导向套筒（12）的另一端连接，支架体（19）的另一端与缸体（23）的下端连接，后端盖（25）安装在缸体（23）的上端；所述芯棒(1)的连接段(101)与换能器（13）连接，并安装在换能器导向套筒(12)内，换能器导向套筒(12)安装在工作台(9)的上方。

2.根据权利要求 1 所述所述激光冲击和超声振动挤压协同强化装置，其特征在于，所述芯棒(1)的前锥段(104)和后锥段(106)轴向长度不超 15mm，前锥段(104)和后锥段(106)的表面粗糙度 Ra≤0.2μm，前锥角和后锥角为 2.5～4°；所述工作环(105)的表面粗糙度 Ra≤0.1μm。

3.根据权利要求 1 所述所述激光冲击和超声振动挤压协同强化装置，其特征在于，所述换能器(18)包括换能器前盖板(27)、预紧力螺钉(28)、压电陶瓷(29)、电极片(30)、换能器后端盖(31)、绝缘管(32)和绝缘片(33)；

所述芯棒（1）的连接段(101)与换能器前盖板（27）螺纹连接，换能器前盖板（27）上方依次安装绝缘片（33）、电极片（30）、压电陶瓷（29），每对压电陶瓷（29）间都安

装有电极片（30），最上方的压电陶瓷（29）依次与电极片（30）、绝缘片（33）、换能器后端盖（31）相连，换能器（13）各个部分之间由预紧力螺钉（28）相连接，预紧力螺钉（28）外表面套有绝缘管（32）。

4.一种根据权利要求 1 所述的激光冲击和超声振动挤压协同强化装置的方法，其特征在于，采用激光冲击强化和超声振动挤压强化同时对金属板料(5)上已开的孔（7）进行强化，所述芯棒(1)与孔(7)成间隙配合状态以对孔（7）进行约束，在激光冲击金属板料(5)外表面时，孔(7)中的芯棒(1)施加超声振动，利用功率超声与激光冲击波产生相互作用，在孔（7）的孔壁附近形成三维的压应力分布，具体包括以下步骤：

S1.对已开孔（7）的金属板料(5)外表面进行预处理，在所述金属板料(5)外表面先设置吸收层(2)，再在吸收层（2）上设置约束层(3)；

S2.根据所述孔（7）的尺寸选择芯棒(1)型号尺寸，芯棒配合段（103）与孔（7）间隙配合；

S3.将所述芯棒(1)的轴线与孔(7)轴线对准后使芯棒(1)穿过孔（7），芯棒(1)的连接段(101)与换能器(13)连接，换能器后盖板（31）与液压组件的活塞杆连接；

S4.超声波发生器(18)与换能器（13）电连接，设置超声波发生器(18)的振动模态和参数，打开超声波发生器(18)，使芯棒(1)产生模态的超声振动；

S5.调节在金属板料(5)上方的激光器(14)的光斑形状、光斑大小及激光功率密度，在芯棒(1)产生模态的超声振动的同时对孔(7)四周的外表面进行激光冲击强化；

S6.完成激光冲击后，打开液压泵站（26），启动液压组件，将芯棒(1)匀速缓慢挤压的通过孔(7)，关闭超声波发生器(18)，完成激光冲击和超声振动挤压协同强化。

5.根据权利要求 4 所述所述激光冲击和超声振动挤压协同强化方法的装置，其特征在于，所述步骤 S1 中的吸收层为（2）铝箔，约束层（3）为水。

6.根据权利要求 4 所述的激光冲击和超声振动挤压协同强化方法，其特征在于，所述步骤 S2 中配合段(103)与孔(7)的配合公差为 H6/h5、H7/h6、H8/h7 或 H9/h9。

7.根据权利要求 4 所述的激光冲击和超声振动挤压协同强化方法，其特征在于，所述步骤 S4 中超声波发生器(18)采用呼吸式振动；超声振动频率为 15～60kHz，交替式径向振幅为 2～40μm；芯棒（1）通过孔（7）的速度为 10～50mm/min。

8.根据权利要求 4 所述的激光冲击和超声振动挤压协同强化方法，其特征在于，所述步骤 S5 中激光器(14)的激光冲击位置为绕孔（7）的孔周进行，周向光斑搭接率和径向光斑搭接率均大于 50%。

9.根据权利要求 4 所述所述激光冲击和超声振动挤压协同强化方法，其特征在于，所

述步骤 S5 中激光器（14）的激光入射角（401）大于 60° 。

10. 根据权利要求 4 所述的激光冲击和超声振动挤压协同强化方法，其特征在于，所述步骤 S6 中芯棒(1)与孔(7)之间超声挤压强化通过芯棒(1)的工作环(105)与孔(7)相互挤压完成，超声挤压余量保持在 1%～6%。

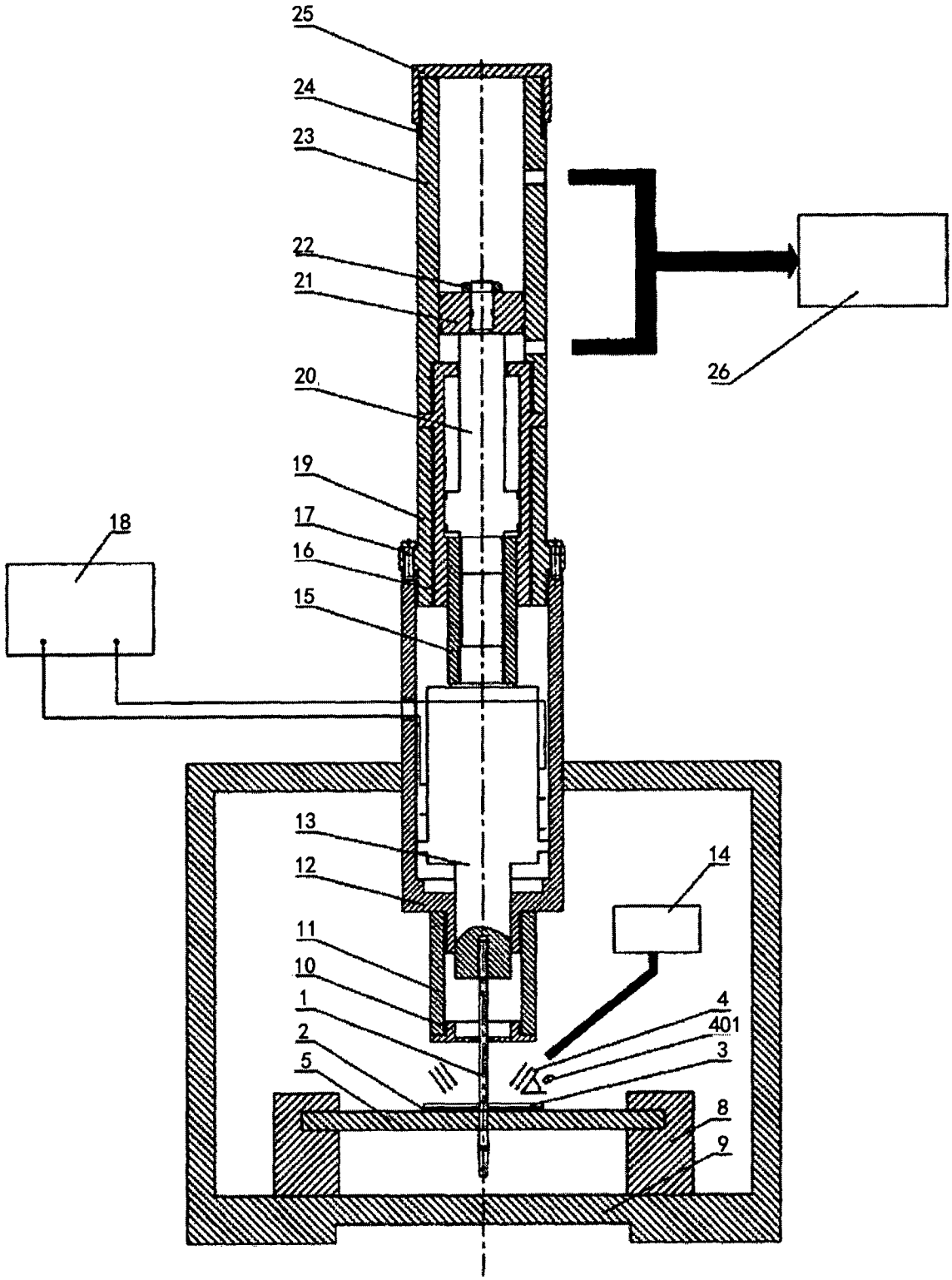


图 1

替换页（细则第26条）

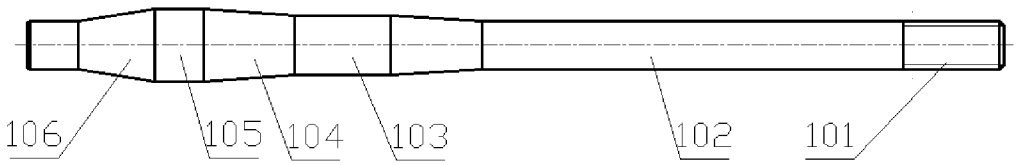


图 2

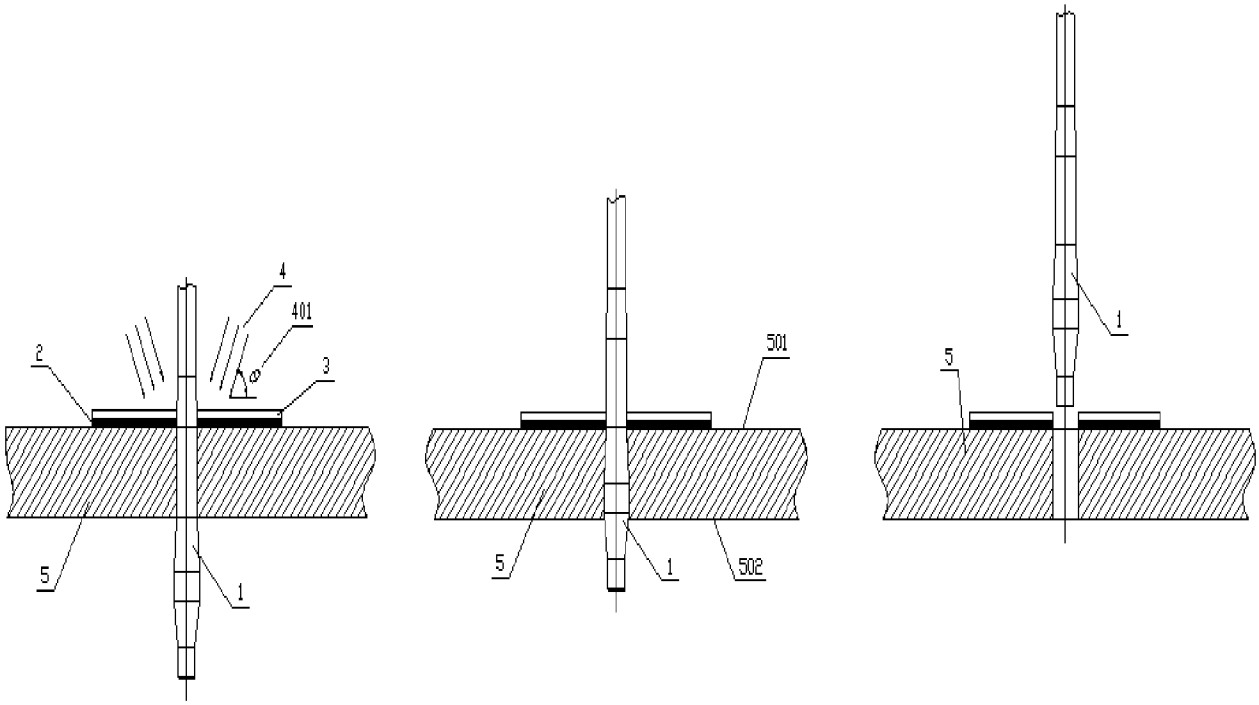


图 3

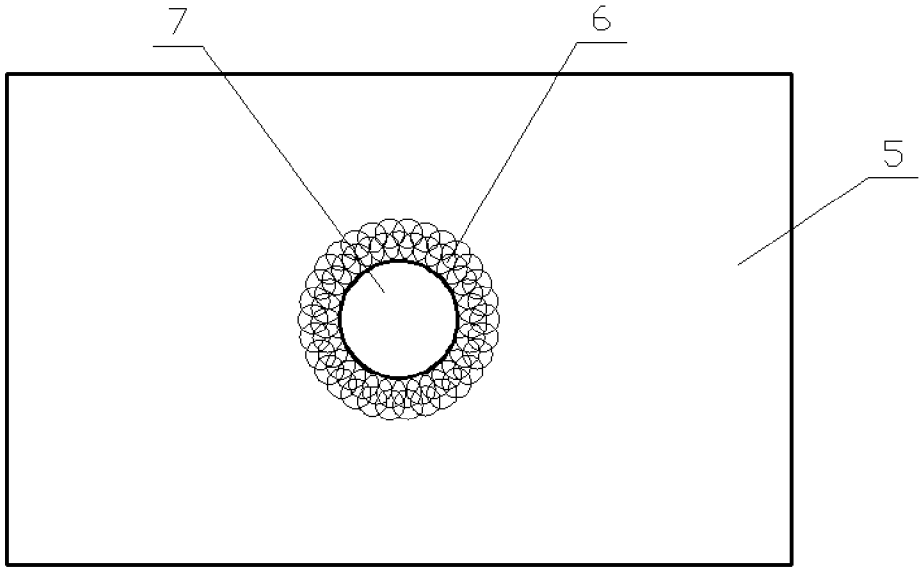


图 4

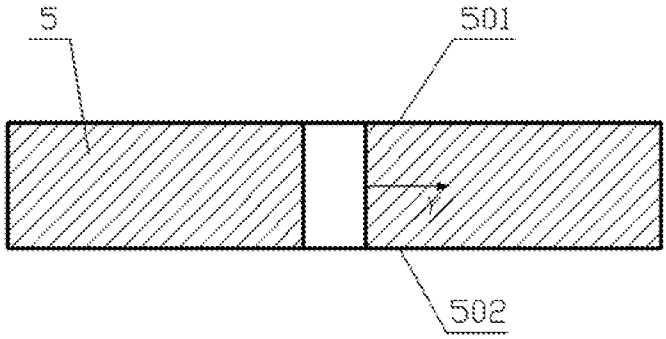


图 5

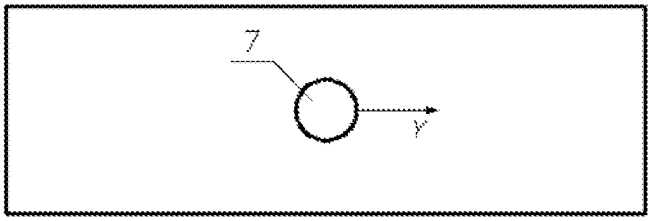


图 6

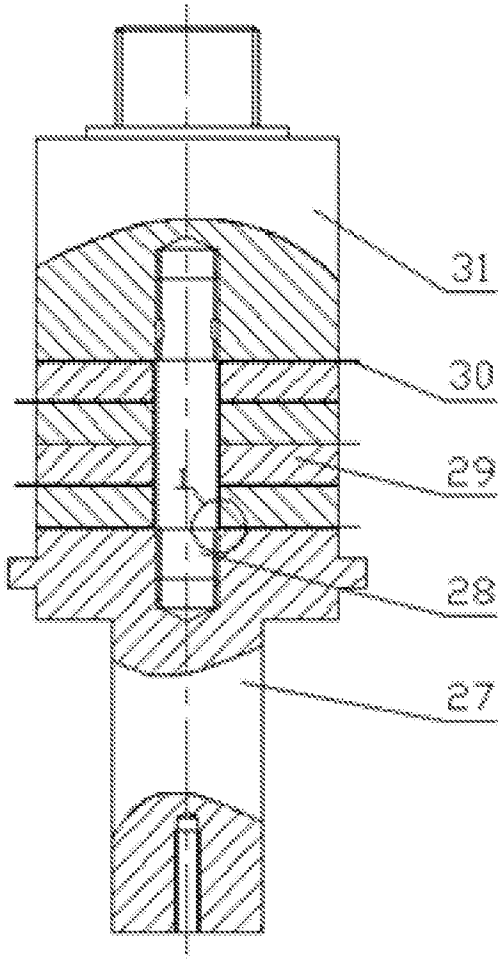


图 7

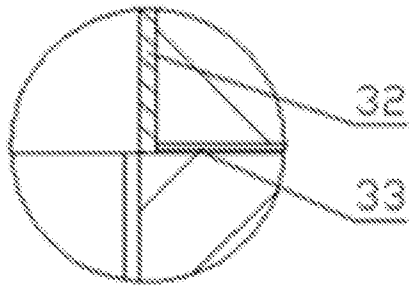

32
33

图 8

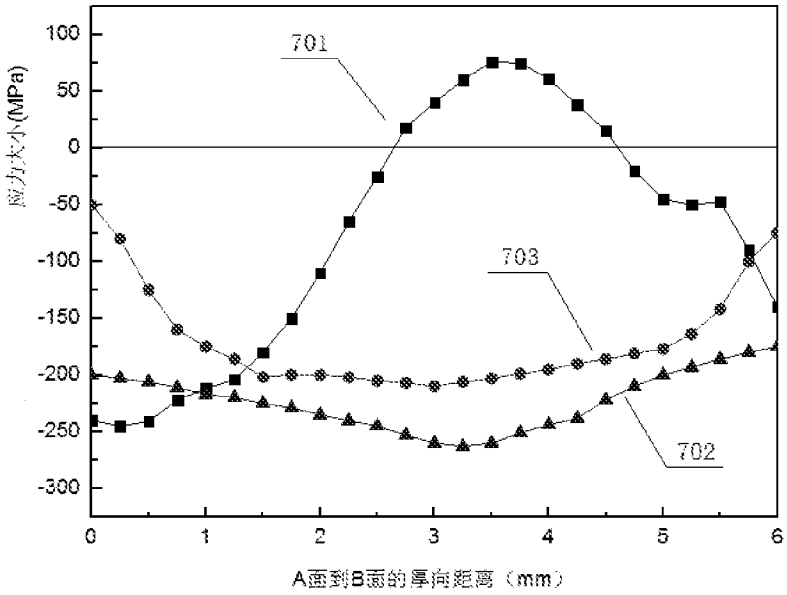

701
703
702
应力大小(MPa)
A面到B面的厚向距离（mm）

图 9

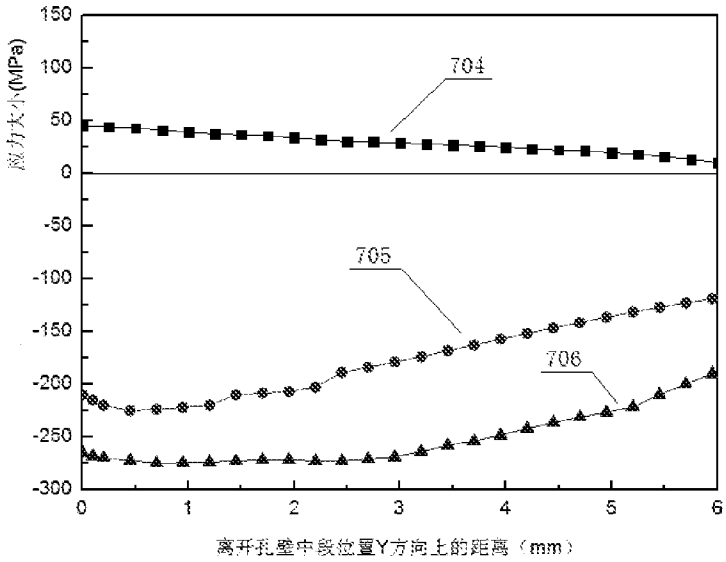

704
705
706
应力大小(MPa)
离开孔壁中段位置Y方向上的距离（mm）

图 10

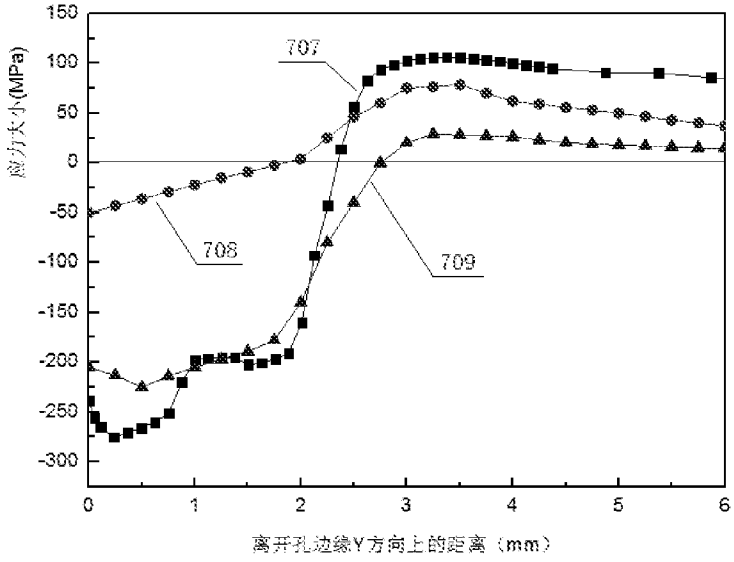

150
100
50
0
-50
-100
-150
-200
-250
-300
应力大小(MPa)
707
708
709
0
1
2
3
4
5
6
离开孔边缘Y方向上的距离（mm）

图 11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/084796

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C21D 1/09(2006.01)i; C21D 7/04(2006.01)i; B23P 9/02(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;B23P

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)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI: 激光, 超声, 冲击, 震, 振, 强化, 加强, 表面, 孔, laser, ultrasonic, impact+, shock+, reinfor+, strength+, hard+, surface, hole

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 106191422 A (GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 07 December 2016 (2016-12-07) description, paragraphs [0032]-[0042], and figures 1-7	1-10
A	CN 101942546 A (JIANGSU UNIVERSITY) 12 January 2011 (2011-01-12) entire document	1-10
A	CN 105886728 A (PLA ARMORED FORCE ENGINEERING INSTITUTE) 24 August 2016 (2016-08-24) entire document	1-10
A	CN 105729041 A (UNIVERSITY OF JINAN) 06 July 2016 (2016-07-06) entire document	1-10
A	CN 103014276 A (JIANGSU UNIVERSITY) 03 April 2013 (2013-04-03) entire document	1-10
A	CN 105861798 A (PLA ARMORED FORCE ENGINEERING INSTITUTE) 17 August 2016 (2016-08-17) entire document	1-10

☑ 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	Date of mailing of the international search report
27 January 2018	**07 February 2018**
Name and mailing address of the ISA/CN **State Intellectual Property Office of the P. R. China** **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088** **China** Facsimile No. **(86-10)62019451**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/084796

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4437908 A (INOUE JAPAX RESEARCH INCORPORATED) 20 March 1984 (1984-03-20) entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/084796

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	106191422	A	07 December 2016	CN	106191422	B	01 December 2017
CN	101942546	A	12 January 2011	CN	101942546	B	15 August 2012
CN	105886728	A	24 August 2016		None		
CN	105729041	A	06 July 2016		None		
CN	103014276	A	03 April 2013	CN	103014276	B	03 December 2014
CN	105861798	A	17 August 2016		None		
US	4437908	A	20 March 1984	EP	0151759	B1	03 January 1990
				EP	0027362	A2	22 April 1981
				DE	3072148	D1	27 April 1989
				DE	3072170	D1	08 February 1990
				JP	S5656605	A	18 May 1981
				JP	S5656604	A	18 May 1981

国际检索报告

国际申请号 PCT/CN2017/084796

A. 主题的分类

C21D 1/09(2006.01)i; C21D 7/04(2006.01)i; B23P 9/02(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;B23P

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）)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI: 激光，超声，冲击，震，振，强化，加强，表面，孔，laser, ultrasonic, impact+, shock+, reinfor+, strength+, hard+, surface, hole.

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
A	CN 106191422 A (广东工业大学) 2016年 12月 7日 (2016-12-07) 说明书第[0032]-[0042]段，附图1-7	1-10
A	CN 101942546 A (江苏大学) 2011年 1月 12日 (2011-01-12) 全文	1-10
A	CN 105886728 A (中国人民解放军装甲兵工程学院) 2016年 8月 24日 (2016-08-24) 全文	1-10
A	CN 105729041 A (济南大学) 2016年 7月 6日 (2016-07-06) 全文	1-10
A	CN 103014276 A (江苏大学) 2013年 4月 3日 (2013-04-03) 全文	1-10
A	CN 105861798 A (中国人民解放军装甲兵工程学院) 2016年 8月 17日 (2016-08-17) 全文	1-10
A	US 4437908 A (INOUE JAPAX RESEARCH INCORPORATED) 1984年 3月 20日 (1984-03-20) 全文	1-10

☐ 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	国际检索报告邮寄日期
2018年 1月 27日	2018年 2月 7日

ISA/CN的名称和邮寄地址	受权官员
中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	冯连东
传真号 (86-10)62019451	电话号码 (86-10)53960887

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2017/084796

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	106191422	A	2016年 12月 7日	CN	106191422	B	2017年 12月 1日
CN	101942546	A	2011年 1月 12日	CN	101942546	B	2012年 8月 15日
CN	105886728	A	2016年 8月 24日		无		
CN	105729041	A	2016年 7月 6日		无		
CN	103014276	A	2013年 4月 3日	CN	103014276	B	2014年 12月 3日
CN	105861798	A	2016年 8月 17日		无		
US	4437908	A	1984年 3月 20日	EP	0151759	B1	1990年 1月 3日
				EP	0027362	A2	1981年 4月 22日
				DE	3072148	D1	1989年 4月 27日
				DE	3072170	D1	1990年 2月 8日
				JP	S5656605	A	1981年 5月 18日
				JP	S5656604	A	1981年 5月 18日