(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107685149 B
(45)授权公告日 2019.12.03

(21)申请号 201710761416.9

(22)申请日 2017.08.28

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107685149 A

(43)申请公布日 2018.02.13

(73)专利权人 江苏大学
地址 212013 江苏省镇江市京口区学府路301号

(72)发明人 王松涛 周建忠 徐家乐 何文渊 黄舒 孟宪凯

(51)Int.Cl.
B22F 3/105(2006.01)
B33Y 10/00(2015.01)
B33Y 30/00(2015.01)

(56)对比文件
CN 106311876 A,2017.01.11,说明书第0004-0040段以及图1.
CN 101817121 A,2010.09.01,说明书第0007-0032段以及图1.
CN 106392074 A,2017.02.15,说明书第0002-0017段以及图1.
CN 106077647 A,2016.11.09,全文.
CN 104959604 A,2015.10.07,全文.
US 2017129009 A1,2017.05.11,全文.

审查员 徐美新

权利要求书1页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

一种提高激光增材制造薄壁件成形质量的方法及装置

(57)摘要

本发明提供了一种提高激光增材制造薄壁件成形质量的方法及装置,装置包括移动平台系统、激光金属沉积系统、辅助成形系统、主动冷却系统和中央控制系统。其成形方法是激光金属沉积系统熔覆成形薄壁件时,辅助成形系统实时控制薄壁厚度和成形方向,在沉积多层薄壁件时,可以克服层间堆积引起熔池流淌问题,解决薄壁成形由于层间堆积表面粗糙度过大的问题,实现可变厚度直面、曲面薄壁的加工。同时,主动冷却系统实时对沉积层冷却降温。本发明解决了激光熔覆成形表面质量低、连续多层沉积时由于温度升高带来沉积层热应力堆积开裂、微观组织粗大和缓冷导致成形效率低等问题,实现了复杂薄壁件的高质量、高效成形。

CN 107685149 B

1.一种提高激光增材制造薄壁件成形质量的装置实现薄壁件激光熔覆沉积的方法，其特征在于，所述提高激光增材制造薄壁件成形质量的装置，包括移动平台系统、激光金属沉积系统、辅助成形系统(5)、主动冷却系统和中央控制系统(13)，

所述移动平台系统包括固定工作台(1)、三轴移动平台(2)和高精度机械手臂(4)，三轴移动平台(2)和高精度机械手臂(4)安装在固定工作台(1)上，三轴移动平台(2)上安装有工件夹具(3)；

所述激光金属沉积系统包括激光器(12)、激光头(11)、送粉器(10)和粉末喷嘴(9)，粉末喷嘴(9)通过送粉铜管与送粉器(10)相连，粉末喷嘴(9)和激光头(11)都安装在高精度机械手臂(4)上；

所述辅助成形系统(5)包括两片陶瓷块，所述陶瓷块由纳米氧化铝材料制成，两片陶瓷块通过抓手夹具(15)固定在机械抓手上，且两片陶瓷块相对设置，机械抓手装在高精度机械手臂(4)上；

所述主动冷却系统包括液氮喷射嘴(6)、电磁控制阀(7)、液氮罐(8)，液氮喷射嘴(6)安装在激光头(11)的后方、且与液氮罐(8)连接，所述液氮喷射嘴(6)与液氮罐(8)之间设置有电磁控制阀(7)；

三轴移动平台(2)、高精度机械手臂(4)、送粉器(10)、激光器及电磁控制阀(7)均与中央控制系统(13)连接；中央控制系统(13)通过控制高精度机械手臂(4)和机械抓手的联动配合能够实现陶瓷块开合大小、角度的调整，通过调节电磁控制阀(7)的开合控制液氮的喷射，主动对激光熔覆沉积层快速冷却，同时还实时调整送粉量、激光功率、扫描速度的大小；

包括以下步骤：

步骤一：根据预期薄壁件的三维形状和尺寸建立构件CAD几何模型，提取薄壁件的STL模型，然后根据构件的形状和尺寸选择分层厚度，利用分层切片软件对STL模型进行分层处理；

步骤二：根据步骤一的分层确定本层激光沉积层的激光功率、送粉量、扫描速度和沉积高度h_n，通过高精度机械手臂(4)调整两块陶瓷块之间的间距大小与薄壁件宽度一致、并根据薄壁件弯曲形状实时调整两块陶瓷块的旋转角度，保证激光沉积熔池始终在两块陶瓷块之间凝固；

步骤三：根据步骤二沉积高度h_n以及薄壁件预期下层沉积层高度、弯曲角度的要求，通过中央控制系统(13)预定程序重新调整激光功率、送粉量、扫描速度、沉积高度h_{n+1}以及两块陶瓷块之间的间距大小、旋转角度，进行下层熔覆成形，逐层激光熔覆沉积，直到整个薄壁件成形符合要求为止；在每一层激光熔覆沉积过程中，中央控制系统(13)通过控制电磁阀的开合，来控制液氮的喷射量，对每层激光熔覆沉积层进行实时主动冷却，避免下次沉积时温度升高带来沉积层热应力堆积开裂、微观组织粗大问题。

2.根据权利要求1所述激光熔覆沉积的方法，其特征在于，下层沉积无需缓冷过程，可以无间断重复激光熔覆沉积过程。

3.根据权利要求1所述激光熔覆沉积的方法，其特征在于，所述薄壁件为直面薄壁件。

4.根据权利要求1所述激光熔覆沉积的方法，其特征在于，所述薄壁件为变厚度薄壁件或曲面薄壁件。

一种提高激光增材制造薄壁件成形质量的方法及装置

技术领域

[0001] 本发明属于激光增材制造技术领域，具体涉及一种提高激光增材制造薄壁件成形质量的方法及装置。

背景技术

[0002] 目前，金属增材制造技术主要包括电子束丝材熔化技术、电子束选区熔化技术、激光选区熔化技术和激光熔覆成形技术。电子束丝材熔化技术和电子束选区熔化技术对环境真空度要求高、成形空间小，从而限制成形零件的尺寸，且对于复杂精细、薄壁形状的零件，由于其弧柱较粗，成形精度较差，成形的精细度、精度和薄壁程度不及激光熔覆成形法，难以获得比激光熔覆成形更精细和壁薄的零件。激光选区熔化技术是以铺粉方式进行熔覆，粉末利用率不高，而且对成形零件的尺寸要求不能过大。而激光熔覆成形技术采用送粉的方式进行熔覆成形，粉末利用率高，而且成形空间不受限制可应用于大尺寸、复杂零件的熔覆成形，因此，激光熔覆成形技术已经成为当前研究的热点。(参见文献:Huang C,Lin X,Liu F,et al.Effects of cooling condition on microstructure and mechanical properties in laser rapid forming of34CrNiMo6thin-wall component[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,82(5):1269-1279)。在航空发动机、汽轮机、压缩机上使用的大型薄壁叶片，由于其曲面形状复杂、精度要求高，现阶段通常采用传统的铣削加工制造，不仅造价十分昂贵，而且制造效率低、材料浪费严重(参见文献:Gasser A,Backes G,Kelbassa I,et al.Laser Additive Manufacturing:Laser Metal Deposition(LMD)and Selective Laser Melting(SLM)in Turbo-Engine Applications[J].Laser Technik Journal,2010,7(2):58-63)。而激光熔覆成形技术依据成形构件的三维数字模型，通过激光熔覆金属粉末逐层沉积成形出构件，大大缩短了设计、制造的周期，且无需模具、材料利用率高，在制造复杂薄壁件方面具有广阔的应用前景(参见文献:Qiu C,Ravi G A,Dance C,et al.Fabrication of large Ti-6Al-4V structures by direct laser deposition[J].Journal of Alloys&Compounds,2015,629:351-361)。

[0003] 激光熔覆成形技术已经应用到制造一些重要的大型零件，但在微型和薄壁金属构件的制造上仍然存在诸多问题。比如，由于激光熔覆沉积工艺的熔池尺寸一般为2-3mm，即使目前较成熟的激光近净成形(LENS)工艺，其最小的熔池也为1mm，其成形零件的最小特征尺寸为0.63mm，对成形薄壁件的精确度存在限制(参见文献:姚波，马旭龙，葛文君，等.激光微熔覆沉积成形TC4薄壁件组织和性能分析[C]，全国特种加工学术会议.2013)。其次，激光沉积层存在层间搭接引起的凹凸峰，导致成形零件表面质量较低，所以，一般激光熔覆成形工艺制造的薄壁件都需要重洗打磨后才能达到使用要求。此外，中国专利申请号:201610408053.6名为“倾斜薄壁结构件电弧填丝增材制造方法”指出在堆积单道倾斜薄壁件时，沉积层间可能会由于偏移量过大引起熔池流淌问题，降低成形精度。本装置的辅助成形系统，能通过高精度机械手臂调整双片陶瓷块开合大小和角度，保证激光沉积熔池始终

在双片陶瓷块内凝固成形，不仅能突破熔池极限尺寸对成形薄壁件尺寸的精确度限制，提高薄壁件的表面质量，而且还能通过实时控制薄壁厚度和成形方向，克服层间堆积引起熔池流淌问题。

[0004] 在激光熔覆成形薄壁件时，由于零件长期经历高能激光束的周期性、剧烈、非稳态、循环加热，沉积层温度累计升高，导致零件内应力水平很高、演化及交互作用过程极其复杂的热应力、相变组织应力和约束应力耦合作用及其应力集中，容易引起薄壁件翘曲和开裂(参见文献：王华明.高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J].航空学报,2014,35(10):2690-2698)，所以，及时对沉积层降温处理，对提高熔覆层质量十分必要。本装置中的主动冷却系统通过定位喷射液氮对激光熔覆沉积层进行实时主动冷却，不仅能有效解决沉积层温度升高带来的热应力堆积开裂等问题，而且液氮冷却能极大提高熔池冷却速率和凝固速度，进而达到减小熔覆层微观组织尺寸和细化晶粒的作用。研究表明(参见文献:Farshidianfar M H,Khajepour A,Gerlich A P.Effect of Real-time Cooling Rate on Microstructure in Laser Additive Manufacturing[J].Journal of Materials Processing Technology,2016,231:468-478)：熔覆层的许多力学性能都取决于晶粒和微观组织的尺寸和形状，细化晶粒有利于激光熔覆层沉积过程中的断裂敏感性，提高熔覆层的断裂伸长率(参见文献:Brandl E,Schoberth A,Leyens C.Morphology, microstructure,and hardness of titanium(Ti-6Al-4V)blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing(ALM)[J].Materials Science&Engineering A, 2012,532(3):295-307)。另外，沉积过程无需缓冷过程，可以无间断激光熔覆沉积过程，提高成形效率。

[0005] 经现有技术的文献检索发现，中国专利申请号:201610408053.6名为“倾斜薄壁结构件电弧填丝增材制造方法”提供了一种倾斜薄壁结构件电弧填丝增材制造方法，该方法采用实时调整偏移量和与基板角度实现多层单道倾斜薄壁件结构件的堆积成形。但是，此方法并不适用大角度倾斜薄壁件的制造，对横向偏移量具有一定的限制，也对制造变厚度倾斜薄壁件不适用。中国专利申请号:20161030234名为“零件与模具的熔积成形加工制造方法”，该方法采用电弧或电子束和激光束复合工艺成形带有薄壁或者精细部分的零件和模具，但是，此方法成形的零件仍然需要采用铣削、研磨或和抛光方式对待成形工件进行精整加工，达到待成形工件的尺寸精度要求和表面精度要求。中国专利申请号:201510118939.2名为“控制激光熔覆单晶合金过程中组织生长的方法及装置”，采用低温气流对激光熔覆修复镍基单晶涡轮叶片过程进行主动冷却，通过提高熔池沿垂直叶尖方向的温度梯度，增强单晶组织的外延生长能力。但是，此方法局限于单晶叶片的修复领域，而且低温气流的降温速度有限。因此，提出一种提高激光增材制造薄壁件成形质量的方法及装置具有十分重要的意义。

发明内容

[0006] 针对现有技术中存在不足，本发明提供了一种提高激光增材制造薄壁件成形质量的装置及方法，解决现有激光增材制造薄壁件时存在的熔池极限尺寸对成形薄壁件尺寸的精确度限制、熔覆成形表面质量差、效率低、连续多层熔覆沉积层热应力堆积开裂、微观组织粗大等问题，以便高效、高质量地制造薄壁构件。

[0007] 为达到上述目的，本发明提供的技术方案为：

[0008] 一种提高激光增材制造薄壁件成形质量的装置，包括移动平台系统、激光金属沉积系统、辅助成形系统、主动冷却系统和中央控制系统，

[0009] 所述移动平台系统包括固定工作台、三轴移动平台和高精度机械手臂，三轴移动平台和高精度机械手臂安装在固定工作台上，三轴移动平台上安装有工件夹具；

[0010] 所述激光金属沉积系统包括激光器、激光头、送粉器和粉末喷嘴，粉末喷嘴通过送粉铜管与送粉器相连，粉末喷嘴和激光头安装在高精度机械手臂上；

[0011] 所述辅助成形系统包括两片陶瓷块，两片陶瓷块通过抓手夹具固定在械抓手上，且两片陶瓷块相对设置，械抓手装在高精度机械手臂上；

[0012] 所述主动冷却系统包括液氮喷射嘴、电磁控制阀、液氮罐，液氮喷射嘴安装在激光头的后方、且与液氮罐连接，所述液氮喷射嘴与液氮罐之间设置有电磁控制阀；

[0013] 三轴移动平台、高精度机械手臂、送粉器、激光器及电磁控制阀均与中央控制系统连接；中央控制系统通过控制高精度机械手臂和机械抓手的联动配合能够实现陶瓷块开合大小、角度的调整，通过调节电磁阀的开合控制液氮的喷射，主动对激光熔覆沉积层快速冷却，同时还实时调整送粉量、激光功率、扫描速度的大小。

[0014] 进一步地，两片陶瓷块分别通过紧固螺栓固定在抓手夹具上，抓手夹具装在所述机械抓手上。

[0015] 进一步地，所述陶瓷块由纳米氧化铝材料制成，能在1600℃的高温下稳定工作。

[0016] 进一步地，所述激光器为光纤激光器。

[0017] 所述提高激光增材制造薄壁件成形质量的装置实现薄壁件激光熔覆沉积的方法，其特征在于，包括以下步骤：

[0018] 步骤一：根据预期薄壁件的三维形状和尺寸建立构件CAD几何模型，提取薄壁件的STL模型，然后根据构件的形状和尺寸选择分层厚度，利用分层切片软件对STL模型进行分层处理；

[0019] 步骤二：根据步骤一的分层确定本层激光沉积层的激光功率、送粉量、扫描速度和沉积高度h_n，通过高精度机械手臂调整两块陶瓷块之间的间距大小与薄壁件宽度一致、并根据薄壁件弯曲形状实时调整两块陶瓷块的旋转角度，保证激光沉积熔池始终在两块陶瓷块之间凝固；

[0020] 步骤三：根据步骤二沉积高度h_n以及薄壁件预期下层沉积层高度、弯曲角度的要求，通过中央控制系统预定程序重新调整激光功率、送粉量、扫描速度、沉积高度h_{n+1}以及两块陶瓷块之间的间距大小、旋转角度，进行下层熔覆成形，逐层激光熔覆沉积，直到整个薄壁件成形符合要求为止；在每一层激光熔覆沉积过程中，中央控制系统通过控制电磁阀的开合，来控制液氮的喷射量，对每层激光熔覆沉积层进行实时主动冷却，避免下次沉积时温度升高带来沉积层热应力堆积开裂、微观组织粗大问题。

[0021] 进一步地，下层沉积无需缓冷过程，可以无间断重复激光熔覆沉积过程。

[0022] 进一步地，所述薄壁件为直面薄壁件、变厚度薄壁件或曲面薄壁件。

[0023] 本发明的有益效果：

[0024] ①本装置的辅助成形系统，能通过高精度机械手臂和机械抓手联动配合调整双片陶瓷块开合大小和角度，保证激光沉积熔池始终在双片陶瓷块内凝固成形，不仅能突破熔

池极限尺寸对成形薄壁件尺寸的精确度限制，提高薄壁件的表面质量，而且还能通过实时控制薄壁厚度和成形方向，克服层间堆积引起熔池流淌问题。

[0025] ②本装置中的主动冷却系统通过喷射液氮对激光熔覆沉积层进行实时主动冷却，不仅能有效解决沉积层温度累计升高带来的热应力堆积开裂等问题，而且液氮冷却能极大提高熔池冷却速率和凝固速度，进而达到减小熔覆层微观组织尺寸和细化晶粒的作用。另外，沉积过程无需缓冷过程，可以达到无间断激光熔覆成形，从而提高成形效率。

[0026] ③本发明充分利用激光熔覆成形进行增材制造的特点，结合本装置中的辅助成形系统、主动冷却系统，实现了可变厚度直面和曲面薄壁的高质量、高效成形，具有节约昂贵粉末材料、缩短复杂薄壁件的开发和制造周期的优势。

附图说明

[0027] 图1为本发明所述提高激光增材制造薄壁件成形质量的装置的结构示意图。

[0028] 图2为激光熔覆成形制造不同结构薄壁件时的双片开合式陶瓷块装置的状态示意图。

[0029] 图3为抓手夹具的结构示意图。

[0030] 图中：

[0031] 1.固定工作台；2.三轴移动平台；3.工件夹具；4.高精度机械手臂；5.辅助成形系统；6.液氮喷嘴；7.电磁控制阀；8.液氮罐；9.粉末喷嘴；10.送粉器；11.激光头；12.激光器；13.中央控制系统；15.抓手夹具；15-2.紧固螺栓；15-1.夹具块；16.直面薄壁件；17.变厚度薄壁件；18.曲面薄壁件。

具体实施方式

[0032] 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。

[0033] 如图1所示，本发明的一种提高激光增材制造薄壁件成形质量的装置，包括移动平台系统、激光金属沉积系统、辅助成形系统、主动冷却系统和中央控制系统。

[0034] 移动平台系统包括固定工作台1、三轴移动平台2、高精度机械手臂4和机械抓手，机械抓手安装在高精度机械手臂4上，三轴移动平台2和高精度机械手臂4安装在固定工作台1上，三轴移动平台2安装有工件夹具3，工件夹具3通过紧固螺栓对基板进行夹紧固定。激光金属沉积系统包括光纤激光器12、激光头11、送粉器10和粉末喷嘴9，粉末喷嘴9通过送粉铜管与送粉器10相连，粉末喷嘴9和激光头11都安装在高精度机械手臂4上，通过三轴移动平台2和高精度机械手臂4联动配合实现三维空间上不同点、不同角度的激光熔覆沉积成形。同时，可根据零件的具体特征，实时调整光纤激光器12的参数和送粉器10的送粉量的大小，实现不同壁厚激光熔覆成形沉积。

[0035] 辅助成形系统5包括两片陶瓷块，所述陶瓷块由纳米氧化铝材料制成，能在1600℃的高温下稳定工作。两片陶瓷块通过抓手夹具15装在所述机械抓手上。抓手夹具15包括紧固螺栓15-2、夹具块15-1，两片陶瓷块分别通过紧固螺栓15-2固定在夹具块15-1上。机械抓手安装在高精度机械手臂4上。通过高精度机械手臂4和机械抓手联动配合实现调整两片陶瓷块开合大小与薄壁件宽度一致，并根据薄壁件弯曲形状实时调整陶瓷块旋转的角度，保

证激光沉积熔池始终在两片陶瓷块内凝固，完成对激光熔覆沉积过程的辅助成形。图2所示为本发所述装置对直面薄壁件16、变厚度薄壁件17、曲面薄壁件18三种不同薄壁件激光熔覆成形时两片陶瓷块的状态。

[0036] 主动冷却系统包括液氮喷射嘴6、电磁控制阀7、液氮罐8，液氮喷射嘴6安装在激光头11的后方，通过电磁阀的开合控制液氮的喷射量，主动对金属沉积层快速冷却。

[0037] 三轴移动平台2、高精度机械手臂4、机械抓手、送粉器10、激光器12及电磁控制阀7都与中央控制系统13连接，从而实现中央控制系统13通过可编程程序控制移动平台系统、激光金属沉积系统、辅助成形系统、主动冷却系统的功能，达到各个系统间的协调工作，灵活运转。

[0038] 具体的，上述装置对薄壁件激光熔覆成形的具体过程如下：

[0039] 针对复杂薄壁件的三维形状和尺寸建立构件CAD几何模型，提取薄壁件的STL模型，然后根据构件的形状和尺寸选择分层厚度，利用分层切片软件对STL模型进行分层处理，最后把可编程程序输入中央控制系统13，生成扫描路径。将基板通过工件夹具3，固定在三轴移动平台2上。根据化层的沉积层高度h_n和宽度，中央控制系统13通过控制光纤激光器12和送粉器10，实时控制激光沉积层的激光功率、送粉量，此外，通过控制三轴移动平台2、高精度机械手臂4和机械抓手联动配合实现三维空间上不同点、不同角度的激光熔覆沉积。同时，根据复杂薄壁件的不同特征部位，如直面薄壁件16、变截面薄壁件15、曲面薄壁件15。中央控制系统13控制高精度机械手臂4和机械抓手联动配合实现调整两片陶瓷块之间间距的大小与薄壁件宽度一致，根据薄壁件弯曲形状实时调整两片陶瓷块的旋转角度，保证激光熔覆沉积熔池始终在双片陶瓷块装置内凝固，如图2所示。

[0040] 根据步骤二沉积高度h_n以及薄壁件预期下层沉积层高度、弯曲角度的要求，通过中央控制系统13预定程序重新调整激光功率、送粉量、扫描速度、沉积高度h_{n+1}以及两块陶瓷块之间的间距大小、旋转角度，进行下层熔覆成形，逐层激光熔覆沉积，直到整个薄壁件成形符合要求为止；在每一层激光熔覆沉积过程中，中央控制系统13通过控制电磁阀的开合，来控制液氮的喷射量，对每层激光熔覆沉积层进行实时主动冷却，避免下次沉积时温度升高带来沉积层热应力堆积开裂、微观组织粗大问题。下层沉积无需缓冷过程，可以无间断重复激光熔覆沉积过程。

[0041] 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情况下，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。

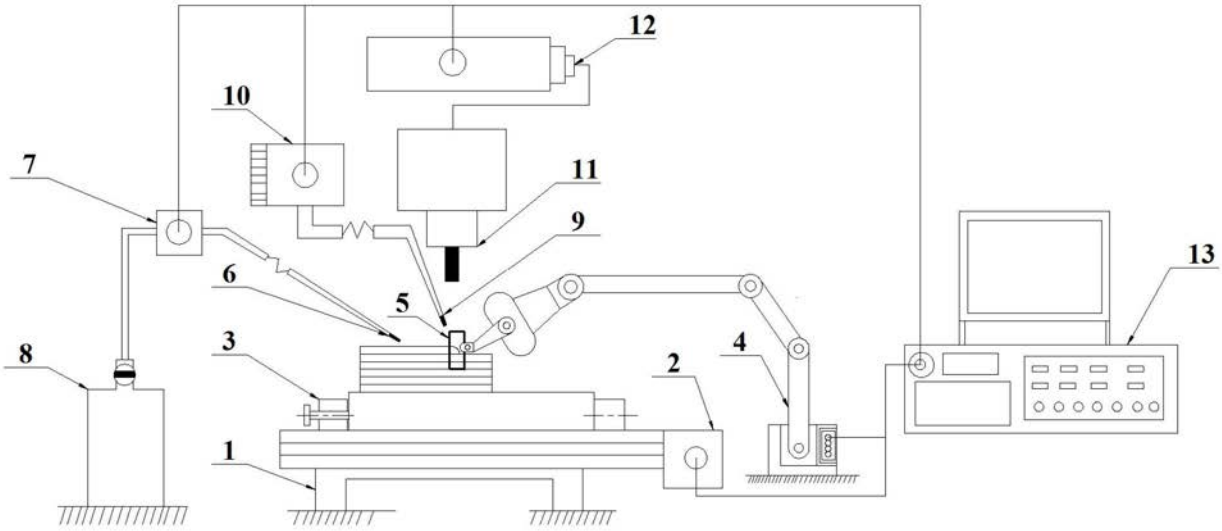


图1

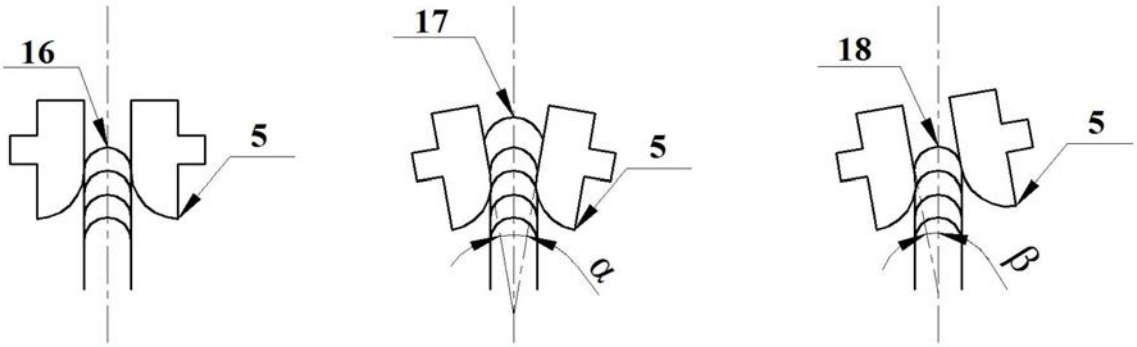


图2

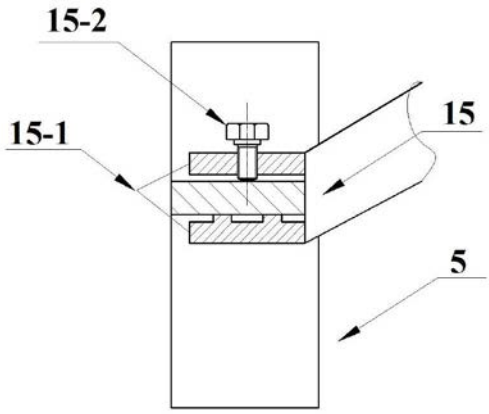


图3