

(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
2020 年 7 月 30 日 (30.07.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/151484 A1

- (51) 国际专利分类号:
B22F 3/105 (2006.01) *B33Y 30/00* (2015.01)
B33Y 10/00 (2015.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/070384
- (22) 国际申请日: 2020 年 1 月 6 日 (06.01.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910067776.8 2019 年 1 月 24 日 (24.01.2019) CN
- (71) 申请人: 大连理工大学 (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国辽宁省大连市甘井子区凌工路 2 号, Liaoning 116024 (CN)。
- (72) 发明人: 马广义 (MA, Guangyi); 中国辽宁省大连市甘井子区凌工路 2 号, Liaoning 116024 (CN)。余超 (YU, Chao); 中国辽宁省大连市甘井子区凌工路

2 号, Liaoning 116024 (CN)。李杨 (LI, Yang); 中国辽宁省大连市甘井子区凌工路 2 号, Liaoning 116024 (CN)。何爱迪 (HE, Aidi); 中国辽宁省大连市甘井子区凌工路 2 号, Liaoning 116024 (CN)。牛方勇 (NIU, Fangyong); 中国辽宁省大连市甘井子区凌工路 2 号, Liaoning 116024 (CN)。吴东江 (WU, Dongjiang); 中国辽宁省大连市甘井子区凌工路 2 号, Liaoning 116024 (CN)。

(74) 代理人: 北京高沃律师事务所 (BEIJING GAOWO LAW FIRM); 中国北京市海淀区彩和坊路 11 号 6 层 602 室, Beijing 100080 (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, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) Title: ELECTROMAGNETIC INDUCTION HEATING ASSISTED TITANIUM MATRIX COMPOSITE LASER ADDITIVE MANUFACTURING DEVICE AND METHOD

(54) 发明名称: 一种电磁感应加热辅助激光增材制造钛基复合材料的装置及方法

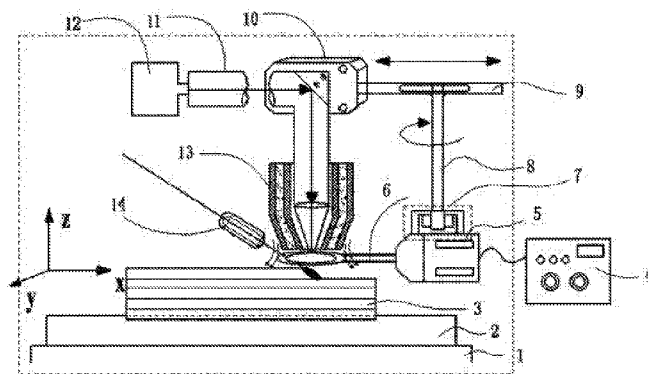


图 1

(57) Abstract: An electromagnetic induction heating assisted titanium matrix composite laser additive manufacturing device and method, comprising a coaxial powder feeding laser deposition system and an electromagnetic induction heating synchronous auxiliary system. The coaxial powder feeding laser deposition system comprises a substrate (2), a deposition sample (3), a laser head (13), and an infrared thermometer (14). The electromagnetic induction heating synchronous auxiliary system comprises an electromagnetic induction power supply master unit (4), a coil (6), a steering heightening mechanism (7), a driven shaft (8), and a transverse sliding groove (9). The coil is connected to an output end of an electromagnetic induction auxiliary unit (5). The coil and the laser head do synchronous movement to implement small-area real-time preheating and slow cooling on the deposition sample. By means of the device and method, real-time preheating and slow cooling can be implemented, residual stress and tearing tendency are reduced, and the mechanical performance of a titanium matrix composite is improved. The electromagnetic induction coil and the laser head do synchronous movement by means of the steering heightening mechanism to implement real-time small-area preheating and slow cooling on high-height big parts during laser additive manufacturing. An electromagnetic induction heating device doing synchronous movement

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,
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))。

with the laser head implements synchronous preheating and slow cooling on the substrate and a deposited layer, and thermal stress during laser additive manufacturing is reduced. Online annealing on a specific area can be realized by changing the position of the coil.

(57) 摘要: 一种电磁感应加热辅助激光增材制造钛基复合材料的装置及方法, 包括同轴送粉激光沉积系统、电磁感应加热同步辅助系统, 同轴送粉激光沉积系统包括基板 (2)、沉积样件 (3)、激光头 (13)、红外测温仪 (14), 电磁感应加热同步辅助系统包括电磁感应电源主机 (4)、线圈 (6)、转向调高机构 (7)、从动轴 (8)、横向滑槽 (9); 线圈接在电磁感应分机 (5) 输出端, 线圈与激光头同步运动, 实现沉积样件小面积实时预热缓冷。通过上述装置和方法能实时预热缓冷, 减少残余应力和开裂倾向, 提高钛基复合材料的力学性能; 通过转向调高机构实现电磁感应线圈与激光头同步运动, 实现高度较大零件激光增材制造时的实时小面积预热缓冷; 与激光头同步运动的电磁感应加热装置, 对基板和已沉积层同步预热缓冷, 减小激光增材制造过程中的热应力; 改变线圈的位置, 可以实现对特定区域的在线退火。

一种电磁感应加热辅助激光增材制造钛基复合材料的装置及方法

技术领域

本发明属于激光增材制造技术领域，主要针对同轴送粉式激光增材制造技术领域，具体

5 涉及一种电磁感应加热辅助激光增材制造钛基复合材料的装置及方法。

背景技术

目前，激光增材制造技术主要分为基于铺粉式的选区激光熔化和基于送粉式的直接激光
熔化沉积两种主流技术，但两种技术成形的样件中都存在较大的残余应力，造成样件的开裂
和翘曲变形；激光增材制造技术中，较高的冷却速率和不均匀的温度场分布，导致零件中存
10 在较大的残余应力。

专利 CN201711275078.4 报道了一种电磁感应加热 3D 打印成形系统，将各种形状的线圈
置于基板下面，对基板预热，提高了预热温度和预热效率，但只是针对于对激光选区熔化
成形技术的基板预热，随着成型平台的下降，由于平面与线圈的位置变远，加热效果较差，温
度梯度较大，温度场分布均匀性变差。

15 专利 CN201610284077.5 报道了一种激光选区熔化电磁感应立体加热系统，在感应线圈和
成型腔室间设有石墨块，感应线圈对石墨块加热，石墨块将高温传导给成型腔室，能实现表
面区域均匀加热，减小了加工层间温度梯度和冷却凝固速率，减小金属零件内残余应力；但
不能实现特定区域的感应加热，且热影响区较大。

专利 CN201611222037.4 报道了一种热、声、磁复合能场辅助激光熔覆金属基陶瓷涂层
20 的方法，基于电磁感应对样件表面加热，但较难实现同步预热缓冷、且跟随激光头变扫描路径
同步运动。

西安交通大学张安峰发表了《感应加热消除激光直接成形 DD4 零件裂纹》，添加感应加热
后，温度梯度和凝固速度显著减小，导致熔覆层热应力显著减小，同时，凝固速度的降低会
使熔覆层应力得到释放，熔池液体流动更充分，从而降低了凝固裂纹产生的可能性，在 1200℃
25 下基本消除了 DD4 零件熔覆裂纹；但所述装置不适用于感应加热辅助激光直接成形较大尺寸
零件。

发明内容

针对现有方法存在的问题，本发明提出一种电磁感应加热辅助激光增材制造钛基复合材
料的装置及方法，对基板和已沉积层同步预热，充分减小温度梯度，减小激光熔化成形过程

中的热应力；对熔池后方区域缓冷，在热塑性区充分释放残余应力，减少裂纹缺陷或者开裂倾向；另外，红外测温仪实时检测熔池温度，采用温度梯度式预热，减小微观组织粗大生长倾向；再适当提高扫描速度和送粉量，提高激光沉积效率，减小低熔点相烧损，也可以实现在线退火。

5 为了达到上述目的，本发明采取的技术方案为：

一种电磁感应加热辅助激光增材制造钛基复合材料的装置与方法，实现线圈与激光头同步运动所述的装置如下：

所述的基板 2 设于机床运动平台 1 上方，基板 2 表面置于激光头 13 正下方，沉积样件 3 置于基板 2 上表面，基板 2 上方设有激光头 13、红外测温仪 14，激光头 13 固定在 Y 轴座板 10 上，红外测温仪 14 与 Z 轴(垂直方向)呈 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 偏置。

所述的电磁感应加热同步辅助系统包括电磁感应电源主机 4、电磁感应分机 5、线圈 6、转向调高机构 7、从动轴 8、横向滑槽 9；所述的电磁感应电源主机 4 与电磁感应分机 5 用电缆连接，电磁感应分机 5 固定在转向调高机构 7 的外齿圈 16 下方，线圈 6 接在电磁感应分机 5 输出端，线圈 6 与激光头 13 同步运动，实现沉积样件 3 小面积实时预热缓冷；所述的横向滑槽 9 固定在 Y 轴座板 10 上，从动轴 8 上端可以在横向滑槽 9 中水平移动，实现对特定区域的在线加热。

所述的转向调高机构 7 包括轴承 15、外齿圈 16、螺母套 17、联轴器 18、伺服电机 19、小齿轮 20、主动轴 21；所述伺服电机 19 通过联轴器 18 与主动轴 21 连接，驱动主动轴 21 转动，主动轴 21 带动小齿轮 20 转动，与主动轴 21 配合的小齿轮 20 与外齿圈 16 啮合，外齿圈 16 带动电磁感应分机 5 转向，进而实现线圈 6 的定高度转向；所述外齿圈 16 与轴承 15 外圈过盈连接，轴承 15 与从动轴 8 过渡配合，外齿圈 16 置于螺母套 17 上方，螺母套 17 与从动轴 8 下端通过螺纹连接，旋转螺母套 17 实现外齿圈 16 上下移动。

所述的线圈 6 由导磁体 22 和小线圈 23 组成，且小线圈左右各一个，关于激光光斑中心 24 对称，一个小线圈对基板 2 或沉积样件 3 预热，另一个小线圈对沉积样件 3 熔池后方凝固区域缓冷。

所述的线圈 6 与激光头 13 同步运动，加热区域小，能有效减小相邻沉积层之间的温度梯度，加热均匀性不受沉积高度限制；所述的线圈 6 置于沉积样件 3 上表面，直接感应预热，相比于线圈 6 置于基板 2 下面预热，热传导作用于沉积层，预热效率更高，单位时间内，提高了激光的吸收效率；线圈 6 置于沉积样件 3 上表面，适当提高预热温度，能对沉积层上表面的一些凸峰充分加热甚至熔化，有利于沉积层表面平整；线圈 6 置于沉积样件 3 上表面，

一个线圈对熔池后方区域缓冷，使较大的热应力充分释放。

通过调节电磁感应电源主机 4 的输出功率大小和线圈 6 与沉积样件 3 上表面的距离，实现温度梯度式预热缓冷；且线圈 6 能在伺服电机 19 的驱动下，定高度灵活转向，在横向滑槽 9 和转向调高机构 7 作用下，跟随激光头 13 的扫描路径变化，实现复杂形状样件的电磁感应同步辅助激光增材成形；调节线圈 6 的位置，可以实现对沉积样件 3 的特定区域在线退火。

一种电磁感应加热辅助激光增材制造钛基复合材料的装置与方法，所述方法包括以下步骤：

第一步，将打磨、清洗和吹干好的基板 2 固定在机床运动平台 1 上，且距离激光头 13 下方 8~10mm，将干燥混合均匀的粉末倒入送粉器中。

第二步，移动从动轴 8，转动螺母套 17，使线圈 6 距离基板 2 上表面 1mm~5mm，且线圈 6 的中心与激光光斑中心 24 重合，即线圈 6 位于激光头 13 正下方，再打开电磁感应电源主机 4、红外测温仪 14，对基板 2 进行预热，电磁感应输出功率为 5kW~10kW，且较大的激光线能量密度 $E=P/V$ 对应较小的电磁感应输出功率，电磁感应频率为 100KHz~200KHz，线圈作用面积为 $10\text{ mm}^2 \sim 30\text{ mm}^2$ ，预热温度为 400℃~650℃。

第三步，设置激光增材制造工艺参数(激光功率、扫描速度、送粉量、单层提升量、道间搭接率等)，打开激光器 12，激光沿着光纤 11 传输，从激光头 13 输出，线圈 6 与激光头 13 沿 X 轴同步运动，开始电磁感应加热同步辅助激光增材制造第一层钛基复合材料，在基板 2 表面进行第一层沉积。

第四步，当第一层沉积结束后，激光头 13 换向沿 Y 轴运动，伺服电机 19 通过转向调高机构 7 驱动外齿圈 16 转动 90°，与线外齿圈 16 固定连接的电磁感应分机 5 也转向 90°，线圈 6 继续跟随激光头 13 同步运动，开始第二层熔化沉积，线圈 6 中位于激光头 13 前方的一个小线圈 23 对上一层预热，另一个小线圈对沉积样件 3 熔池后方凝固区域缓冷，且两个小线圈始终一前一后同步预热缓冷。

保持激光增材制造工艺参数不变，激光头 13 继续按照前面所述步骤运动，直到完成钛基复合材料样件的激光增材制造，激光头 13 变扫描路径时，线圈 6 仍按照上述步骤转向，实现与激光头 13 的同步运动。

所述的激光头 13 扫描路径换向时，线圈 6 在转向调高机构 7 带动下也转动相应的角度，且改变电磁感应电源主机 4 输出功率或者线圈 6 与沉积件 3 的距离，实现温度梯度式变化加热。

第五步，熔化沉积结束后，先关闭激光器 12，再关闭电磁感应电源主机 4，最后关闭红

外测温仪 14。

所述的激光增材制造工艺参数为：所述激光器 12 输出功率 P 为 400W~600W，激光头 13 扫描速度 V 为 350mm/min~500mm/min，机床运动平台 1 单层下降高度为 0.2mm~0.6mm，相邻道间搭接率为 35%~45%。

5 本发明与现有技术相比，有益效果如下：

本发明能实时预热缓冷，减少残余应力和开裂倾向，改善钛基复合材料的力学性能；通过转向调高机构实现电磁感应线圈与激光头同步运动，实现激光头做复杂扫描路径时的同步预热缓冷，实现高度较大零件激光增材制造时的实时小面积预热缓冷；与激光头同步运动的电磁感应加热装置，对导电钛基复合材料直接同步感应加热，对基板和已沉积层同步预热，
10 减小温度梯度，减小激光增材过程中的热应力；对熔池后方区域缓冷，使残余应力在热塑性区充分释放，减少开裂倾向；另外，可以采用温度梯度式预热，减小微观组织粗大生长倾向，减小低熔点相烧损，也可以实现任意区域在线退火。

附图说明

图 1 为本发明的机构示意图。

15 图 2 为线圈 6 转向调高机构 7 的示意图。

图 3 为线圈 6 的示意图。

图中：1 机床运动平台；2 基板；3 沉积样件；4 电磁感应电源主机；5 电磁感应分机；6 线圈；7 转向调高机构；8 从动轴；9 横向滑槽；10Y 轴座板；11 光纤；12 激光器；13 激光头；14 红外测温仪；15 轴承；16 外齿圈；17 螺母套；18 联轴器；19 伺服电机；20 小齿轮；
20 21 主动轴；22 导磁体；23 小线圈；24 激光光斑中心。

具体实施方式

下面结合附图对本发明做进一步说明。以电磁感应辅助直接激光沉积成形钛合金 Ti-6Al-4V(TC4) 和碳化钛 TiC 钛基复合材料(TMC)为例，给出具体的实施方式：

一种电磁感应加热辅助激光增材制造钛基复合材料的装置与方法，实现线圈与激光头同步运动所述的装置如下：
25

所述的电磁感应加热同步辅助系统包括电磁感应电源主机 4、电磁感应分机 5、线圈 6、转向调高机构 7、从动轴 8、横向滑槽 9，电磁感应电源主机 4 与电磁感应分机 5 用电缆连接，电磁感应分机 5 固定在转向调高机构 7 的外齿圈 16 下方，线圈 6 接在电磁感应分机 5 输出端，线圈 6 与激光头 13 同步运动，实现沉积样件 3 小面积实时预热缓冷；所述的横向滑槽 9 固定在 Y 轴座板 10 上，从动轴 8 上端可以在横向滑槽 9 中水平移动，实现对特定区域的在线加热。
30

所述的转向调高机构 7 包括轴承 15、外齿圈 16、螺母套 17、联轴器 18、伺服电机 19、小齿轮 20、主动轴 21；所述伺服电机 19 通过联轴器 18 与主动轴 21 连接，驱动主动轴 21 转动，主动轴 21 带动小齿轮 20 转动，与主动轴 21 配合的小齿轮 20 与外齿圈 16 啮合，外齿圈 16 带动电磁感应分机 5 转向，进而实现线圈 6 的定高度转向；所述的外齿圈 16 与轴承 15 外圈过盈连接，轴承 15 与从动轴 8 过渡配合，外齿圈 16 置于螺母套 17 上方，螺母套 17 与从动轴 8 下端通过螺纹连接，旋转螺母套 17 实现外齿圈 16 上下移动。

所述的线圈 6 由导磁体 22 和小线圈 23 组成，且小线圈左右各一个，关于激光光斑中心 24 对称，一个小线圈对基板 2 或沉积样件 3 预热，另一个小线圈对沉积样件 3 熔池后方凝固区域缓冷，且两个小线圈始终一前一后同步预热缓冷。

一种电磁感应加热辅助激光增材制造钛基复合材料的装置与方法，所述方法包括以下步骤：

将 45~90 μm 的颗粒状 TiC 粉末与 45~90 μm 的球形 TC4 粉末按照质量分数 1:9 机械混合均匀，混合粉末置于 120℃ 烘干箱中干燥 4h，烘干后，装入送粉筒。

将基板 2 用 400 目 SiC 砂纸打磨，用丙酮和酒精清洗并吹干后，固定在机床运动平台 1 上，且距激光头 13 下表面 9mm。

调节线圈 6 的位置，使线圈 6 的中心和激光光斑中心 24 重合，线圈 6 与基板 2 的垂直距离为 2mm，红外测温仪 14 与激光头 13 的夹角为 50°。

设置激光增材制造工艺参数，激光功率 P 为 450W，扫描速度 V 为 300mm/min，单层提升量 0.35mm，送粉量 2.0g/min，相邻道之间搭接率 45%；电磁感应电源输出功率 6kW，振荡频率为 150KHz。

打开电磁感应电源主机 4，红外测温仪 14，达到预热温度 600℃ 时，开启激光器 12、送粉器、保护气，开始多道多层钛基复合材料块体件成形。

第一层激光头 13 的运动方向沿 X 向，沉积完第一层后，激光头 13 的运动方向变为 Y 向，伺服电机 19 驱动小齿轮 20 转动，小齿轮 20 与外齿圈 16 啮合，外齿圈转动 90°，带动线圈 6 转向 90°，且机床运动平台 1 下降 0.35mm，线圈 6 跟随激光头 12 做 Y 向运动，开始第二层的电磁感应同步辅助激光沉积成形。

第三层，激光头 13 扫描方向沿 X 向，机床运动平台 1 下降 0.35mm，线圈 6 在继续按照上一步的转向原理，转向 90°，线圈 6 跟随激光头 13 做 X 向运动，开始第三层的电磁感应同步辅助激光沉积成形，激光头 12 的扫描路径为双向交叉扫描，即奇数层沿 X 向，偶数层沿 Y 向，线圈 6 跟随激光头 13 扫描方向的变化而转向。

沉积完第 20 层后，由于热量的不断积累，调节电磁感应电源主机 4 的输出功率为 6kW 或者调节线圈 6 与沉积样件 3 的距离为 3mm，使预热温度为 500℃，继续按照双向交叉路径扫描沉积成形。

沉积完第 40 层后，由于热量的不断积累，调节电磁感应电源主机 4 的输出功率为 5kW 或者调节线圈 6 与沉积样件 3 的距离为 4mm，使预热温度为 400℃，继续按照双向交叉路径扫描沉积成形。

达到预定的扫描层数后，机床运动平台 1 停止运动，先关闭激光器 12，再关闭电磁感应电源主机 4，最后关闭红外测温仪 14。

若要后期对沉积样件 3 上表面在线退火或者特定区域的退火处理，移开激光头 13，调节从动轴 8 在横向滑槽 9 的水平位置，通过转向调高机构 7 调节线圈 6 的位置和高度；打开电磁感应电源主机 4，设置输出功率，打开红外测温仪 14，监测加热温度，对沉积样件 3 上表面在线退火或者特定区域的退火处理。

以上所述实施例仅表达本发明的实施方式，但并不能因此而理解为对本发明专利的范围的限制，应当指出，对于本领域的技术人员来说，在不脱离本发明构思的前提下，还可以做出若干变形和改进，这些均属于本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1. 一种电磁感应加热辅助激光增材制造钛基复合材料的装置，其特征在于，所述的装置能够实现线圈与激光头同步运动，所述的装置如下：

所述的电磁感应加热同步辅助系统包括电磁感应电源主机(4)、电磁感应分机(5)、线圈(6)、转向调高机构(7)、从动轴(8)、横向滑槽(9)；所述的电磁感应电源主机(4)与电磁感应分机(5)连接，电磁感应分机(5)固定在转向调高机构(7)的外齿圈(16)下方，线圈(6)接在电磁感应分机(5)输出端，通过转向调高机构(7)实现线圈(6)与激光头(13)同步运动，对沉积样件(3)小面积实时预热缓冷；所述的横向滑槽(9)固定在Y轴座板(10)上，从动轴(8)上端可以在横向滑槽(9)中水平移动，实现对特定区域的在线加热；

所述的转向调高机构(7)包括轴承(15)、外齿圈(16)、螺母套(17)、联轴器(18)、伺服电机(19)、小齿轮(20)、主动轴(21)；所述伺服电机(19)通过联轴器(18)与主动轴(21)连接，驱动主动轴(21)转动，主动轴(21)带动小齿轮(20)转动，与主动轴(21)配合的小齿轮(20)与外齿圈(16)啮合，外齿圈(16)带动电磁感应分机(5)转向，即线圈(6)能够在伺服电机(19)的驱动下能够定高度灵活转向，在横向滑槽(9)和转向调高机构(7)作用下，跟随激光头(13)的扫描路径变化，实现复杂形状样件的电磁感应同步辅助激光增材制造，调节线圈(6)的位置，可以实现对沉积样件(3)的特定区域在线退火；

所述的外齿圈(16)与轴承(15)外圈过盈连接，轴承(15)与从动轴(8)过渡配合，外齿圈(16)置于螺母套(17)上方，螺母套(17)与从动轴(8)下端通过螺纹连接，旋转螺母套(17)实现外齿圈(16)上下移动；

所述的线圈(6)由导磁体(22)和小线圈(23)组成，且小线圈左右各一个，关于激光光斑中心(24)对称，一个小线圈对基板(2)或沉积样件(3)预热，另一个小线圈对沉积样件(3)熔池后方凝固区域缓冷，两个小线圈始终一前一后，实现同步预热缓冷；通过调节电磁感应电源主机(4)的输出功率大小和线圈(6)与沉积样件(3)上表面的距离，实现对基板和已沉积层温度梯度式预热、对熔池后方区域温度梯度式缓冷。

2. 采用权利要求1所述的装置进行电磁感应加热辅助激光增材制造钛基复合材料的方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

第一步，将打磨、清洗和吹干好的基板(2)固定在机床运动平台(1)上，且距离激光头(13)正下方8~10mm，将干燥混合均匀的粉末倒入送粉器中；

第二步，移动从动轴(8)，转动螺母套(17)，使线圈(6)距离基板(2)上表面1mm~5mm，且线圈(6)的中心与激光光斑中心(24)重合；再打开电磁感应电源主机(4)、红外测温仪(14)，

对基板(2)进行预热；电磁感应输出功率为 5kW~10kW，电磁感应频率为 100kHz~200kHz，线圈作用面积为 $10\text{ mm}^2 \sim 30\text{ mm}^2$ ，预热温度为 $400^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$ ；

第三步，设置激光增材制造工艺参数，打开激光器(12)，线圈(6)与激光头(13)沿 X 轴同步运动，开始电磁感应加热同步辅助激光增材制造第一层钛基复合材料，进行第一层沉积；

5 第四步，当第一层沉积结束后，激光头(13)换向沿 Y 轴运动，伺服电机(19)通过转向调高机构(7)驱动外齿圈(16)转动 90° ，与外齿圈(16)固定连接的电磁感应分机(5)也转向 90° ，线圈(6)继续跟随激光头(13)同步运动，开始第二层熔化沉积，线圈(6)中位于激光头(13)前方的一个小线圈(23)对上一层预热，另一个小线圈对沉积样件(3)熔池后方凝固区域缓冷；

保持激光增材制造工艺参数不变，激光头(13)继续按照权利要求 2 中的第三步和第四步的第一段所述步骤运动，直到完成钛基复合材料样件的激光增材制造，激光头(13)变扫描路径时，线圈(6)仍按照权利要求 2 中的第四步的第一段所述步骤转向，实现与激光头(13)的同步运动；

所述的激光头(13)扫描路径换向时，线圈(6)在转向调高机构(7)带动下也转动相应的角度，且改变电磁感应电源主机(4)输出功率或者线圈(6)与沉积样件(3)的距离，实现温度梯度式变化加热；

15 第五步，熔化沉积结束后，先关闭激光器(12)，再关闭电磁感应电源主机(4)，最后关闭红外测温仪(14)。

3. 根据权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述的激光增材制造工艺参数包括激光功率、扫描速度、送粉量、单层提升量、道间搭接率，具体为：激光器(12)输出功率 P 为 $400\text{ W} \sim 600\text{ W}$ ，激光头(13)扫描速度 V 为 $350\text{ mm/min} \sim 500\text{ mm/min}$ ，送粉量为 $1.5\text{ g/min} \sim 4\text{ g/min}$ ，机床运动平台(1)单层下降高度为 $0.2\text{ mm} \sim 0.6\text{ mm}$ ，相邻道间搭接率为 $35\% \sim 45\%$ 。

20 4. 根据权利要求 1 和 2 所述的装置或方法，其特征在于，红外测温仪(14)与激光头(13)呈 $30^\circ \sim 60^\circ$ 偏置。

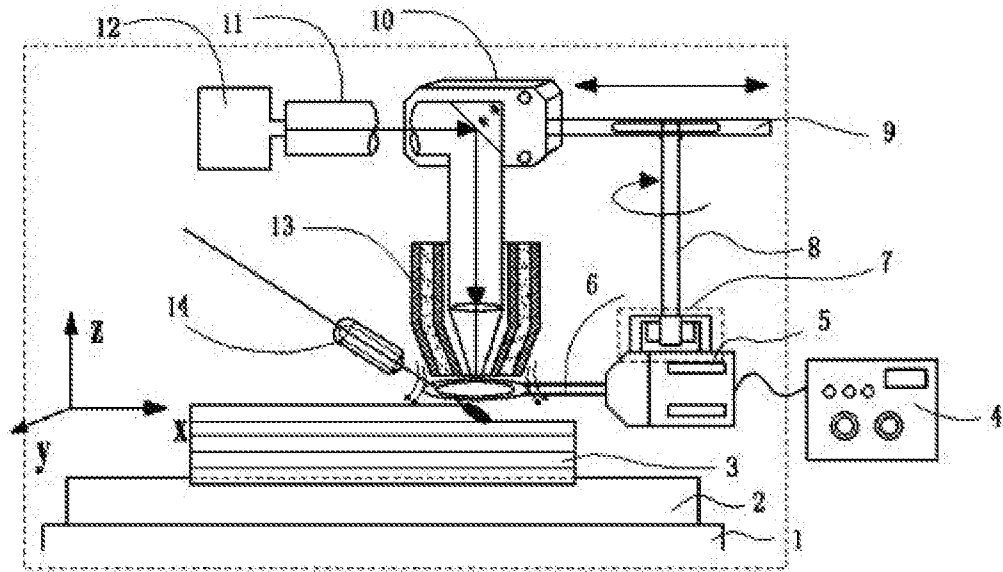


图 1

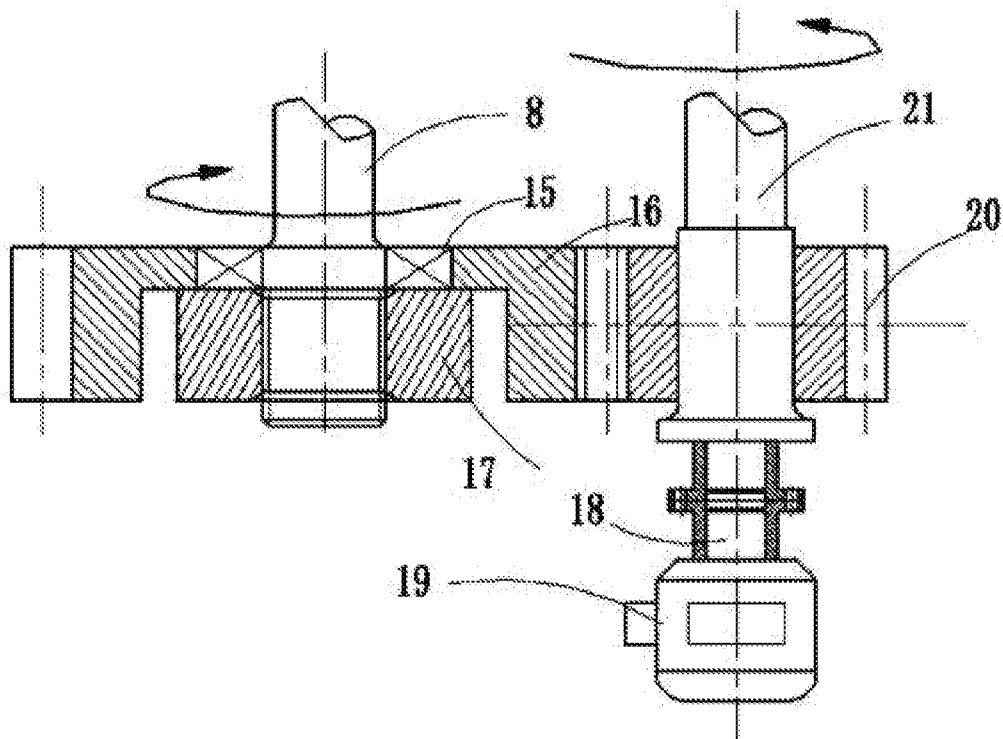


图 2

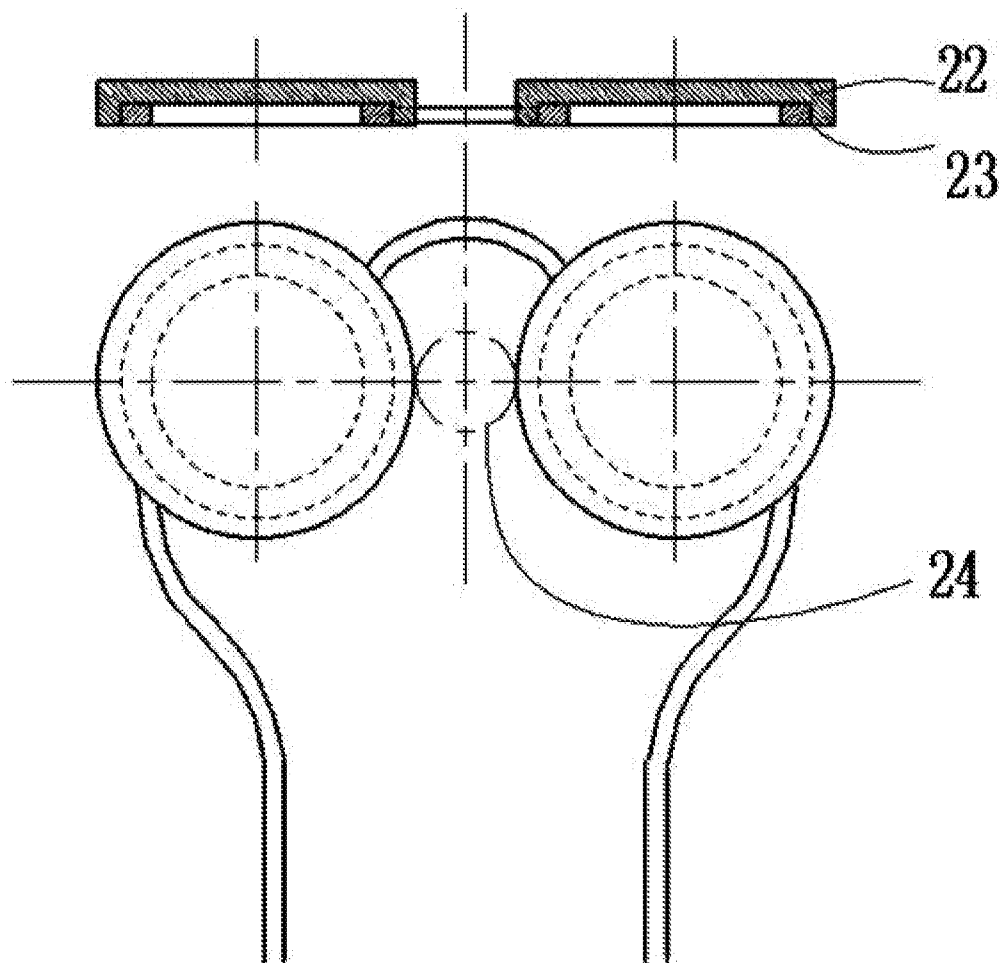


图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/070384

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B22F 3/105(2006.01)i; B33Y 10/00(2015.01)i; B33Y 30/00(2015.01)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)

B22F B33Y H05B C23C B23K H01S 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)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI: 电磁, 激光, 打印, 增材, 钛, 线圈, 齿轮, 同步, electromagnet+, laser, print+, additiona+ 2d material, titanium, coil+, gear+, synchroni+.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109663917 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 23 April 2019 (2019-04-23) claims 1-4, description, paragraphs 32-47, figures 1-3	1-4
A	CN 106637200 A (JIANGSU UNIVERSITY) 10 May 2017 (2017-05-10) description, paragraphs 28-52, figures 1-2	1-4
A	CN 105798299 A (SHANGHAI UNIVERSITY) 27 July 2016 (2016-07-27) entire document	1-4
A	CN 107287588 A (GENERAL ELECTRIC CO.) 24 October 2017 (2017-10-24) entire document	1-4
A	CN 105855544 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY et al.) 17 August 2016 (2016-08-17) entire document	1-4
A	CN 108012358 A (BEIJING XINGHANG MECHANICAL-ELECTRICAL EQUIPMENT CO., LTD.) 08 May 2018 (2018-05-08) entire document	1-4
A	CN 201053029 Y (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 30 April 2008 (2008-04-30) entire document	1-4



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

11 March 2020

Date of mailing of the international search report

30 March 2020

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

International application No.

PCT/CN2020/070384**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2008219305 A1 (COMMISSARIAT A L'ENERGIE) 11 September 2008 (2008-09-11) entire document	1-4
A	US 2011247188 A1 (ESKOM et al.) 13 October 2011 (2011-10-13) entire document	1-4
A	US 2017059529 A1 (SIEMENS ENERGY, INC.) 02 March 2017 (2017-03-02) entire document	1-4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/070384

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109663917	A	23 April 2019	None			
CN	106637200	A	10 May 2017	None			
CN	105798299	A	27 July 2016	None			
CN	107287588	A	24 October 2017	None			
CN	105855544	A	17 August 2016	None			
CN	108012358	A	08 May 2018	None			
CN	201053029	Y	30 April 2008	None			
US	2008219305	A1	11 September 2008	EP	1931496	A1	18 June 2008
				WO	2007039619	A1	12 April 2007
				DK	1931496	T3	23 July 2012
				ES	2387406	T3	21 September 2012
				PL	1931496	T3	31 October 2012
				AT	555869	T	15 May 2012
				JP	2009511273	A	19 March 2009
				FR	2891483	A1	06 April 2007
US	2011247188	A1	13 October 2011	ES	2403123	T3	14 May 2013
				EP	2373456	A1	12 October 2011
				AU	2009329094	A1	07 July 2011
				ZA	201104272	B	25 April 2012
				JP	2012512752	A	07 June 2012
				WO	2010070548	A1	24 June 2010
				US	8322008	B2	04 December 2012
US	2017059529	A1	02 March 2017	KR	20170023729	A	06 March 2017
				CN	106475558	A	08 March 2017
				DE	102016115241	A1	02 March 2017

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/070384

A. 主题的分类

B22F 3/105 (2006.01) i; B33Y 10/00 (2015.01) i; B33Y 30/00 (2015.01) 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)

B22F B33Y H05B C23C B23K H01S 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))

WPI, EP0DOC, CNPAT, CNKI: 电磁, 激光, 打印, 增材, 钛, 线圈, 齿轮, 同步, electromagnet+, laser, print+, additiona+ 2d material, titanium, coil+, gear+, synchroni+.

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
PX	CN 109663917 A (大连理工大学) 2019年 4月 23日 (2019 - 04 - 23) 权利要求1-4, 说明书第32-47段, 图1-3	1-4
A	CN 106637200 A (江苏大学) 2017年 5月 10日 (2017 - 05 - 10) 说明书第28-52段、图1-2	1-4
A	CN 105798299 A (上海大学) 2016年 7月 27日 (2016 - 07 - 27) 全文	1-4
A	CN 107287588 A (通用电气公司) 2017年 10月 24日 (2017 - 10 - 24) 全文	1-4
A	CN 105855544 A (西安交通大学 等) 2016年 8月 17日 (2016 - 08 - 17) 全文	1-4
A	CN 108012358 A (北京星航机电装备有限公司) 2018年 5月 8日 (2018 - 05 - 08) 全文	1-4
A	CN 201053029 Y (华中科技大学) 2008年 4月 30日 (2008 - 04 - 30) 全文	1-4
A	US 2008219305 A1 (COMMISSARIAT A L'ENERGIE) 2008年 9月 11日 (2008 - 09 - 11) 全文	1-4

☒ 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

2020年 3月 11日

国际检索报告邮寄日期

2020年 3月 30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

冯连东

电话号码 86-10-53960887

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	US 2011247188 A1 (ESKOM等) 2011年 10月 13日 (2011 - 10 - 13) 全文	1-4
A	US 2017059529 A1 (SIEMENS ENERGY, INC.) 2017年 3月 2日 (2017 - 03 - 02) 全文	1-4

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/070384

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	109663917	A	2019年 4月 23日	无			
CN	106637200	A	2017年 5月 10日	无			
CN	105798299	A	2016年 7月 27日	无			
CN	107287588	A	2017年 10月 24日	无			
CN	105855544	A	2016年 8月 17日	无			
CN	108012358	A	2018年 5月 8日	无			
CN	201053029	Y	2008年 4月 30日	无			
US	2008219305	A1	2008年 9月 11日	EP	1931496	A1	2008年 6月 18日
				WO	2007039619	A1	2007年 4月 12日
				DK	1931496	T3	2012年 7月 23日
				ES	2387406	T3	2012年 9月 21日
				PL	1931496	T3	2012年 10月 31日
				AT	555869	T	2012年 5月 15日
				JP	2009511273	A	2009年 3月 19日
				FR	2891483	A1	2007年 4月 6日
US	2011247188	A1	2011年 10月 13日	ES	2403123	T3	2013年 5月 14日
				EP	2373456	A1	2011年 10月 12日
				AU	2009329094	A1	2011年 7月 7日
				ZA	201104272	B	2012年 4月 25日
				JP	2012512752	A	2012年 6月 7日
				WO	2010070548	A1	2010年 6月 24日
				US	8322008	B2	2012年 12月 4日
US	2017059529	A1	2017年 3月 2日	KR	20170023729	A	2017年 3月 6日
				CN	106475558	A	2017年 3月 8日
				DE	102016115241	A1	2017年 3月 2日