



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115055699 B

(45) 授权公告日 2024.03.29

(21) 申请号 202210726679.7

(22) 申请日 2022.06.24

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 115055699 A

(43) 申请公布日 2022.09.16

(73) 专利权人 西安交通大学  
地址 710049 陕西省西安市咸宁西路28号

(72) 发明人 魏正英 贺鹏飞 杜军 王勇超

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任  
公司 61200  
专利代理师 高博

(51) Int. Cl.  
B22F 12/00 (2021.01)  
B22F 10/22 (2021.01)  
B22F 10/25 (2021.01)  
B22F 10/20 (2021.01)  
B22F 12/50 (2021.01)  
B22F 12/55 (2021.01)  
B33Y 10/00 (2015.01)

B33Y 30/00 (2015.01)

G22C 1/04 (2023.01)

G22C 1/05 (2023.01)

B22F 12/20 (2021.01)

B22F 12/90 (2021.01)

B22F 12/53 (2021.01)

B22F 10/85 (2021.01)

B22F 10/31 (2021.01)

(56) 对比文件

CN 111515399 A, 2020.08.11

WO 2020078055 A1, 2020.04.23

CN 2705006 Y, 2005.06.22

CN 101014238 A, 2007.08.08

CN 102389979 A, 2012.03.28

CN 106583727 A, 2017.04.26

CN 108788406 A, 2018.11.13

CN 110560690 A, 2019.12.13

CN 113455344 A, 2021.10.01

(续)

审查员 司光东

权利要求书2页 说明书11页 附图4页

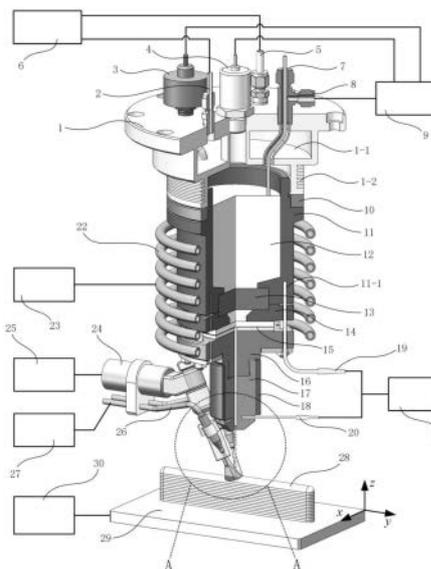
(54) 发明名称

颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材  
制造装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置及方法,包括熔滴发生系统、增强颗粒送粉装置和电弧热源,熔滴发生系统包含气压驱动单元、坩埚熔炼单元、迷宫流道组件和石墨喷头,用于产生可控熔滴流,基于迷宫流道的流量控制组件确保了射流状态和射流流量的稳定可控。增强颗粒送粉装置用于颗粒增强相的定向/定量输送,双喷嘴送粉方式有利于保证颗粒植入的均匀性。成形过程中,铝熔滴和颗粒增强相共同送入电弧熔池,随着电弧熔池的运动和凝固,颗粒增强相能够分散在铝基体内部,以逐道/逐层堆积的方式形成复合材料构件,最终实现铝合金/颗粒增强铝基复合材料构

件高质量、高效率 and 低成本增材制造。



CN 115055699 B

[接上页]

**(56) 对比文件**

CN 114352799 A, 2022.04.15

US 5031837 A, 1991.07.16

贺鹏飞等. 铝合金熔滴复合电弧沉积同步WC  
颗粒强化增材 制造工艺研究\*.《机械工程学  
报》. 2022, 第258-第267页.

1. 颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置,其特征在於,包括熔滴发生系统,熔滴发生系统用于产生铝熔体射流(31),包括熔炼坩埚(11),熔炼坩埚(11)的上部设置有水冷顶盖组件,熔炼坩埚(11)的下部经流量控制组件(15)与喷头(17)连接,流量控制组件(15)内部设置有具有周期性的迷宫式流道结构,喷头(17)的一侧设置有电弧热源和增强颗粒送粉装置,电弧热源用于产生电弧熔池(34),增强颗粒送粉装置用于将气体和增强颗粒混合形成粉末流(33),铝熔体射流(31)离散为熔滴(32)后与粉末流(33)一起进入电弧熔池(34)内,随电弧熔池的运动和凝固形成颗粒增强铝基复合材料沉积层,经逐道/逐层沉积形成目标颗粒增强铝基复合材料构件(28);

水冷顶盖组件包括水冷顶盖(1),水冷顶盖(1)上设置有冷却水入口(2)、冷却水出口(5)、材料添加入口(7)和进/出气口(8),水冷顶盖(1)内部设置有顶盖水冷腔(1-1),冷却水入口(2)和冷却水出口(5)之间设置有冷却系统(6),冷却水通过冷却水入口(2)进入顶盖水冷腔(1-1),并从冷却水出口(5)返回至冷却系统(6);

熔炼坩埚(11)的底部设置有过滤法兰(14),熔炼坩埚(11)和过滤法兰(14)之间设置有陶瓷过滤片(13);过滤法兰(14)的底部设置有转接法兰(16),流量控制组件(15)设置在过滤法兰(14)和转接法兰(16)之间,转接法兰(16)、流量控制组件(15)、过滤法兰(14)和熔炼坩埚(11)之间以叠层的方式布置;转接法兰(16)的底部与喷头(17)连接,喷头(17)外部设置有加热套(18),加热套(18)与温控仪(21)电连接;

流量控制组件(15)包括流道入口保护片(15-1)和流道出口保护片(15-3),流道入口保护片(15-1)和流道出口保护片(15-3)之间设置有迷宫式控流片(15-2);流道入口保护片(15-1)上设置有流道入口(15-1-1)和入口沉淀池(15-1-2),入口沉淀池(15-1-2)的底面低于流道入口(15-1-1)的上边缘;迷宫式控流片(15-2)上设置有控流片入口(15-2-1),控流片入口(15-2-1)经迷宫流道(15-2-2)与控流片出口(15-2-3)连接,迷宫流道(15-2-2)具有迷宫式的弯曲的周期性结构;流道出口保护片(15-3)上设置有流道出口(15-3-1)。

2. 根据权利要求1所述的颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置,其特征在於,水冷顶盖(1)上设置有压力传感器(3)和激光距离传感器(4),压力传感器(3)和激光距离传感器(4)分别与气压驱动系统(9)连接。

3. 根据权利要求1所述的颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置,其特征在於,水冷顶盖(1)的下侧与熔炼坩埚(11)之间设置有顶盖散热片(1-2),顶盖散热片(1-2)与熔炼坩埚(11)之间设置有高温密封圈(10),熔炼坩埚(11)的外部设置有感应加热线圈(22),感应加热线圈(22)与感应加热电源(23)电连接。

4. 根据权利要求1所述的颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置,其特征在於,熔炼坩埚(11)上设置有坩埚测温孔(11-1),坩埚测温孔(11-1)内设置有坩埚热电偶(19),喷头(17)上设置有喷头测温孔(17-1),喷头测温孔(17-1)内设置有喷头热电偶(20),坩埚热电偶(19)和喷头热电偶(20)分别与温控仪(21)电连接。

5. 根据权利要求1所述的颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置,其特征在於,增强颗粒送粉装置包括送粉器(27),送粉器(27)通过送粉管(26)与送粉嘴(38)连接,送粉嘴(38)经送粉嘴夹具(39)固定在电弧焊炬(24)上。

6. 根据权利要求1所述的颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置,其特征在於,喷头(17)的下方设置有基板(29),基板(29)连接有三维运动平台(30)。

7.一种颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造方法,其特征在于,利用权利要求1的颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置,包括以下步骤:

S1、根据目标零件形状和应用情况设计目标零件的三维模型;

S2、根据步骤S1得到的零件三维模型,结合目标零件的功能需求设计复合材料,包括复合材料的基体材料选型、增强颗粒选型和增强颗粒植入比例设定;

S3、根据步骤S1中得到的三维模型和步骤S2中确定的复合材料,以及沉积速率、层高、移动速度和电弧电流工艺参数,确定成形路径文件,成形路径文件中的沉积速率为 $100\sim 300\text{ mm}^3/\text{s}$ ,层高为 $1\sim 4\text{ mm}$ ,移动速度为 $3\sim 15\text{ mm/s}$ ,电弧电流为 $100\sim 500\text{ A}$ ;

S4、根据步骤S1中得到的三维模型、步骤S2中确定的复合材料、步骤S3中规划好的成形路径以及目标零件的数量,计算成形所需铝合金和颗粒增强相的量;

S5、对于易氧化铝合金材料,在惰性气氛中成形,且气氛中的水和氧气含量不超过 $100\text{ ppm}$ ,将步骤S4准备的铝合金材料装入熔炼坩埚内并组装好熔滴发生系统;

S6、开启冷却系统,并设定最终加热温度为 $650\sim 750\text{ }^\circ\text{C}$ ,升温速率为 $10\sim 100\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ,对步骤S5的熔滴发生系统进行加热;

S7、待步骤S6的熔滴发生系统加热至预定温度后,验证熔滴发生系统的压力检测功能、气压加载功能、激光液位测量功能是否运行正常,然后,对射流状态和射流流量进行验证,若在既定的压力范围内射流状态不稳定或流量误差超过 $10\%$ ,或流量波动大于 $5\%$ ,重复步骤S5~S7;

S8、根据步骤S3得到的成形路径文件执行目标构件打印;

S9、在步骤S8的打印过程中,进行实时形貌监测,若成形精度偏离零件的尺寸要求或出现搭接缺陷,暂停成形,修正步骤S3得到的成形路径文件中的相关数据,重复步骤S9直至完成零件制造;

S10、待步骤S9目标零件打印完成后,去除不属于零件的部分,得到目标零件。

## 颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于增材制造技术领域,具体涉及一种颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置及方法。

### 背景技术

[0002] 增材制造(也称3D打印)技术是一种非传统加工工艺,是90年代兴起的一项集光、电、机电、计算机、数控及新材料于一体的先进制造技术。其核心思想是将三维零件进行二维离散,形成片层数据,按照零件三维CAD模型的分层数据,将离散态的成形材料逐步结合在一起,形成一个个分层截面,继而逐层堆积形成实体零件,无需模具,直接制造零件,可以大大缩短研制周期。

[0003] 根据热源形式,主流金属增材制造方法主要分为激光选区熔化、电子束选区熔化,激光(熔化)沉积、电弧(熔化)沉积。按照原材料形式,主流金属增材制造方法可以分为铺粉成形、送粉成形、送丝成形以及熔滴成形。

[0004] 目前适合铝基构件快速成形的增材制造方式主要包括激光选区熔化、电子束选区熔化和电弧(熔化)沉积。考虑到铝合金熔池极易氧化的特性,激光(熔化)沉积技术难以保证铝基构件层和层之间的结合强度,固激光(熔化)沉积不适用于铝基构件成形。而电弧热源,尤其是变极性电弧热源,其特殊的阴极清理功能能够破碎并清理铝合金熔池表面的氧化膜,从而能够保证层与层之间的高质量冶金结合。与此同时电弧热源具有很高的熔化效率,有利于实现铝基构件的高效率增材制造。

[0005] 由于铝合金具有低密度、高比强度、高导热系数以及来源广泛等优势,其在工业领域以及人们日常生活领域扮演了极其重要的角色。然而铝合金表面硬度较低,抗摩擦磨损差使得其在对耐磨性有明确要求的场合中的应用受到很大限制。因此,陶瓷颗粒增强铝基复合材料技术成为了解决铝合金耐磨性不足的关键技术路线。陶瓷颗粒具有极高的硬度,因此具有极佳的抗摩擦磨损性能。

[0006] 现有的颗粒增强铝基复合材料增材制造方案主要有三种:基于纳米颗粒增强铝基复合粉末技术的高能束(激光、电子束)选区熔化增材制造技术、基于层间陶瓷颗粒涂布技术的电弧增材制造技术以及基于复合材料制丝技术的电弧熔丝增材制造技术。第一种技术(基于纳米颗粒增强铝基复合粉末技术的高能束选区熔化增材制造技术),由于纳米陶瓷颗粒的混合比例较低,且高硬度陶瓷颗粒的粒径较小(纳米级),因此对铝基体的耐磨性提升不够显著。与此同时,由于高能束选区熔化增材制造技术成形效率低,很难满足中大型铝基构件的成形需求。第二种技术(基于层间陶瓷颗粒涂布技术的电弧增材制造技术以及基于复合材料制丝技术的电弧熔丝增材制造技术)的局限性在于成形效率较低和强化层厚度较小。由于层间涂布过程要求每层冷却至接近室温,且下一层沉积须保证涂布于沉积层表面的混合物中的溶剂成分挥发彻底,因此很大程度上降低了电弧沉积的高效率优势。第三种技术(基于复合材料制丝技术的电弧熔丝增材制造技术)的主要局限在于特殊丝材的制备。与传统焊丝相比,经过陶瓷颗粒复合后的铝基材料,其塑性往往显著降低,因此制丝的技术

难度。

### 发明内容

[0007] 本发明所要解决的技术问题在于针对上述现有技术中的不足,提供一种颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置及方法,实现颗粒增强铝基复合材料构件高质量、高效率 and 低成本快速制造。

[0008] 本发明采用以下技术方案:

[0009] 颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置,包括熔滴发生系统,熔滴发生系统用于产生铝熔体射流,包括熔炼坩埚,熔炼坩埚的上部设置有水冷顶盖组件,熔炼坩埚的下部经流量控制组件与喷头连接,流量控制组件内部设置有具有周期性的迷宫式流道结构,喷头的一侧设置有电弧热源和增强颗粒送粉装置,电弧热源用于产生电弧熔池,增强颗粒送粉装置用于将气体和增强颗粒混合形成粉末流,铝熔体射流分散为熔滴后与粉末流一起进入电弧熔池内,随电弧熔池的运动和凝固形成颗粒增强铝基复合材料沉积层,经逐道/逐层沉积形成目标颗粒增强铝基复合材料构件。

[0010] 具体的,水冷顶盖组件包括水冷顶盖,水冷顶盖上设置有冷却水入口、冷却水出口、材料添加入口和进/出气口,水冷顶盖内部设置有顶盖水冷腔,冷却水进口和冷却水出口之间设置有冷却系统,冷却水通过冷却水进口进入顶盖水冷腔,并从冷却水出口返回至冷却系统。

[0011] 进一步的,水冷顶盖上设置有压力传感器和激光距离传感器,压力传感器和激光距离传感器分别与气压驱动系统连接。

[0012] 进一步的,水冷顶盖的下侧与熔炼坩埚之间设置有顶盖散热片,顶盖散热片与熔炼坩埚之间设置有高温密封圈,熔炼坩埚的外部设置有感应加热线圈,感应加热线圈与感应加热电源电连接。

[0013] 具体的,熔炼坩埚的底部设置有过滤法兰,熔炼坩埚和过滤法兰之间设置有陶瓷过滤片;过滤法兰的底部设置有转接法兰,流量控制组件设置在过滤法兰和转接法兰之间,转接法兰、流量控制组件、过滤法兰和熔炼坩埚之间以叠层的方式布置;转接法兰的底部与喷头连接,喷头外部设置有加热套,加热套与温控仪电连接。

[0014] 具体的,熔炼坩埚上设置有坩埚测温孔,坩埚测温孔内设置有坩埚热电偶,喷头上设置有喷头测温孔,喷头测温孔内设置有喷头热电偶,坩埚热电偶和喷头热电偶分别与温控仪电连接。

[0015] 具体的,流量控制组件包括流道入口保护片和流道出口保护片,流道入口保护片和流道出口保护片之间设置有迷宫式控流片;流道入口保护片上设置有流道入口和入口沉淀池,入口沉淀池的底面低于流道入口的上边缘;迷宫式控流片上设置有控流片入口,控流片入口经迷宫流道与控流片出口连接,迷宫流道具有迷宫式的弯曲的周期性结构;流道出口保护片上设置有流道出口。

[0016] 具体的,增强颗粒送粉装置包括送粉器,送粉器通过送粉管与送粉嘴连接,送粉嘴经送粉嘴夹具固定在电弧焊炬上。

[0017] 具体的,喷头的下方设置有基板,基板连接有三维运动平台。

[0018] 本发明的另一个技术方案,一种颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造方

法,利用权利要求1的颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置,包括以下步骤:

[0019] S1、根据目标零件形状和应用情况设计目标零件的三维模型;

[0020] S2、根据步骤S1得到的零件三维模型,结合目标零件的功能需求设计复合材料,包括复合材料的基体材料选型、增强颗粒选型和增强颗粒植入比例设定;

[0021] S3、根据步骤S1中得到的三维模型和步骤S2中确定的复合材料,以及沉积速率、层高、移动速度和电弧电流工艺参数,确定成形路径文件,成形路径文件中的沉积速率为 $100 \sim 300\text{mm}^3/\text{s}$ ,层高为 $1 \sim 4\text{mm}$ ,移动速度为 $3 \sim 15\text{mm}/\text{s}$ ,电弧电流为 $100 \sim 500\text{A}$ ;

[0022] S4、根据步骤S1中得到的三维模型、步骤S2中确定的复合材料、步骤S3中规划好的成形路径以及目标零件的数量,计算成形所需铝合金和颗粒增强相的量;

[0023] S5、对于易氧化铝合金材料,在惰性气氛中成形,且气氛中的水和氧气含量不超过 $100\text{ppm}$ ,将步骤S4准备的铝合金材料装入熔炼坩埚内并组装好熔滴发生系统;

[0024] S6、开启冷却系统,并设定最终加热温度为 $650 \sim 750^\circ\text{C}$ ,升温速率为 $10 \sim 100^\circ\text{C}/\text{min}$ ,对步骤S5的熔滴发生系统进行加热;

[0025] S7、待步骤S6的熔滴发生系统加热至预定温度后,验证熔滴发生系统的压力检测功能、气压加载功能、激光液位测量功能是否运行正常,然后,对射流状态和射流流量进行验证,若在既定的压力范围内射流状态不稳定或流量误差超过 $10\%$ ,或流量波动大于 $5\%$ ,重复步骤S5~S7;

[0026] S8、根据步骤S3得到的成形路径文件执行目标构件打印;

[0027] S9、在步骤S8的打印过程中,进行实时形貌监测,若成形精度偏离零件的尺寸要求或出现搭接缺陷,暂停成形,修正步骤S3得到的成形路径文件中的相关数据,重复步骤S9直至完成零件制造;

[0028] S10、待步骤S9目标零件打印完成后,去除不属于零件的部分,得到目标零件。

[0029] 与现有技术相比,本发明至少具有以下有益效果:

[0030] 本发明颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置,可实现铝合金、颗粒增强铝基复合材料高质量、高效率 and 低成本增材制造。熔滴复合电弧增材制造系统以独立的熔滴发生系统,替代了传统电弧熔丝增材制造系统中的送丝机构,使得电弧增材制造过程中的材料添加环节和热输入环节能够独立调控。熔滴发生系统的引入,能够有克服传统电弧熔丝增材制造技术固有的丝-弧强耦合弊端,对进一步提高电弧增材制造效率和质量具有重要意义。与此同时,本发明提供的颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置中引入了增强颗粒送粉装置,该装置能够以气载粉的方式向电弧熔池中植入增强颗粒,从而实现颗粒增强铝基复合材料电弧增材制造。该发明在一定程度上改善了电弧增材制造固有缺陷,是对电弧增材制造技术的一种补充;与此同时,该发明可实现颗粒增强铝基复合材料增材制造,为颗粒增强金属基复合材料电弧增材制造提供了一种新的方式。

[0031] 进一步的,熔滴发生系统设计有水冷顶盖,水冷顶盖上设计有冷却水进口和冷却水出口,顶盖内部设计有可通水的顶盖水冷腔。水冷却设计可以确保水冷顶盖上配置的传感器件处于安全的工作温度下;水冷顶盖上设计有进/出气口,可以向熔滴发生系统内部充气或排气,以达到加压或减压的目的;水冷顶盖上设计有材料添加入口,可以在成形过程中向熔滴发生系统内部添加金属材料,所添加材料包括但不限于小尺寸块料、小尺寸棒料、丝材和粉末状材料,以满足中大尺寸零件连续成形的需求或成形过程中对材料化学成分调整

的需求。

[0032] 进一步的,水冷顶盖设置有压力传感器和激光距离传感器,以实现对接锅内气压和对接内熔体液位实时测量,并将实时数据反馈至气压驱动系统。气压驱动系统接收气压信息和熔体液位信息后,会进一步计算得到对接底部熔体的压力,从而实现气压驱动系统对接底部压力的精确控制。

[0033] 进一步的,所述水冷顶盖的下部与熔炼对接之间设置有顶盖散热片,顶盖散热片和熔炼对接之间设置有高温密封圈。顶盖散热片的设置可以防止过多的热量通过水冷顶盖带走。当对接温度升高后,熔炼对接和散热片之间的螺纹连接处会因材料热膨胀系数差异而产生松动,高温密封圈的作用是在其温度升高后产生轴向膨胀,进而实现顶盖散热片和熔炼对接之间的可靠高温密封。所述熔炼对接外围设置有感应加热线圈,用于实现熔炼对接内金属材料感应加热。

[0034] 进一步的,熔炼对接底部设置有过滤法兰,熔炼对接和过滤法兰之间设置有陶瓷过滤片。陶瓷过滤片的作用是,过滤掉铝合金熔体表面氧化膜及内部的固体杂质。所述过滤法兰底部设置有转接法兰,过滤法兰和转接法兰之间设置有流量控制组件,所述转接法兰、流量控制组件、过滤法兰和熔炼对接之间以叠层的方式布置。叠层布置的优势在于确保零部件之间的密封面能够获得相似的预紧力,密封可靠、组装简便且有利于在高温状态下对密封面补充拧紧。所述转接法兰的底部与喷头连接,喷头外部设置有加热套,加热套与温控仪电连接。转接法兰的作用是实现连接方式的转换,其上部为螺栓连接(使得熔炼对接、过滤法兰、流量控制组件和转接法兰形成一个整体),下部为螺纹连接,便于喷头的安装与更换。加热套的目的是实现喷头的加热,温控仪用于加热过程控制。

[0035] 进一步的,熔炼对接设置有对接测温孔,对接测温孔内置有对接热电偶;熔炼对接底部的喷头设置有喷头测温孔,喷头测温孔内设置有喷头热电偶;对接热电偶和喷头热电偶均与温控仪电连接。测温孔的设计,用于熔炼对接和喷头温度测量,且温度测量过程不需要热电偶和熔炼对接内的铝合金熔体接触,从而避免了因测温导致的铝合金熔体污染和测温元件(热电偶)的腐蚀。温控仪实时采集来自对接热电偶和喷头热电偶的热电势差,并将其转换为温度信息,从而实现对接加热器和加热套加热过程控制。

[0036] 进一步的,流量控制组件包括流道入口保护片和流道出口保护片,流道入口保护片和流道出口保护片之间设置有迷宫式控流片。流道入口保护片、流道出口保护片和迷宫式控流片采用叠层式布置,三者围成的流道即为迷宫流道。所述迷宫流道具有周期性弯曲的流道结构,能够显著增加黏性流体(铝合金熔体)内摩擦耗能,进而在相同的驱动压力下获得更小的射流流量,或在相同的射流流量下显著增大驱动压力。与此同时,迷宫式流道具有维持流量稳定的效果。熔体射流过程中,喷头末端的小孔往往容易阻塞,当杂质阻塞导致流量减小时,迷宫流道内的熔体流速便会降低,此时损失的流场动能就会转化为静压能,从而迫使喷头末端小孔内的熔体加速流动。加速运动的熔体,有利于带走孔壁粘附的阻塞物,从而有利于射流流量恢复正常值。

[0037] 进一步的,流道入口保护片上设置有入口沉淀池,入口沉淀池的底面明显低于流道入口的上边缘。入口沉淀池的作用是容纳密度大于铝合金熔体的难溶颗粒物杂质,防止过多的颗粒物杂质经流道入口进入迷宫流道。

[0038] 进一步的,增强颗粒送粉装置包括送粉器,送粉器通过送粉管与送粉嘴连接,送粉

嘴经送粉嘴夹具固定在电弧焊炬的陶瓷保护嘴上。增强颗粒送粉装置的主要作用是以气载粉的方式将增强颗粒打入电弧熔池,形成颗粒增强铝基复合材料沉积层,进而以逐层沉积的方式完成目标零件增材制造。

[0039] 进一步的,熔滴发生系统的下方设置有三维运动平台,三维运动平台的可移动滑台上安装有基板。三维运动平台的作用是实现既定的运动路径以完成目标零件成形;基板表面用于目标零件成形,并将多余的热量以热传导和对流的方式传导出去。

[0040] 本发明提供了一种颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造方法,包含了零件/材料/路径设计规划阶段,材料/设备准备阶段,成形与过程监控阶段,以及后处理和质量检测阶段。在模型设计和成形路径规划之间增加了复合材料设计步骤,用于在设计规划阶段确定复合材料中基体材料和增强颗粒的选型以及增强颗粒植入比例。在成形准备步骤中,包含了成形环境要求,对于易氧化材料熔滴复合电弧增材制造,需保证成形过程处于低水和低氧的惰性气氛环境中。同时在成形准备步骤中,规范了原材料装填、熔滴发生系统组装完成后的密封性检测。在加热和熔滴发生系统功能验证两个步骤中,规范了加热参数和加热至预定温度后对熔滴发生系统各项功能验证流程,包含压力检测、气压加载、激光液位测量等基本功能检验以及射流状态和射流流量的功能验证,用于确保之后的成形阶段关键系统熔滴发生系统能够正常运行。在成形过程监测步骤中规范了过程监测的主要对象:宏观形状和搭接缺陷,前者用于保证成形精度,后者则用于保证宏观上的搭接质量。当成形和后处理步骤完成后,后续增加了质量检测步骤,检测环节包含了尺寸精度、致密度、内部缺陷、微观组织和力学性能,用于保证交付零件满足制造精度和质量要求。

[0041] 综上所述,本发明以变极性气体保护钨极电弧为热源,以实现高质量层间冶金结合;以独立的熔滴发生系统代替传统电弧熔丝增材制造系统中的送丝机构,使得基体材料添加过程几乎不受电弧状态的影响,以显著提高工艺适应性;颗粒增强相通过独立的送粉系统以气载粉的方式同步植入到电弧熔池,从而实现颗粒增强铝基复合材料增材制造。

[0042] 下面通过附图和实施例,对本发明的技术方案做进一步的详细描述。

## 附图说明

[0043] 图1为本发明颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置示意图;

[0044] 图2为本发明基于迷宫流道的铝合金熔体流量控制组件示意图,其中,(a)为迷宫流道流量控制组件,(b)为迷宫式控流片;

[0045] 图3为本发明颗粒增强铝基复合材料微观组织示范样件SEM图像;

[0046] 图4为本发明颗粒增强铝基复合材料构件熔滴复合电弧增材制造流程图;

[0047] 图5为图1中A部分的放大图。

[0048] 其中:1.水冷顶盖;1-1.顶盖水冷腔;1-2.顶盖散热片;2.冷却水入口;3.压力传感器;4.激光距离传感器;5.冷却水出口;6.冷却系统;7.材料添加入口;8.进/出气口;9.气压驱动系统;10.高温密封圈;11.熔炼坩埚;11-1.坩埚测温孔;12.铝合金熔体;13.陶瓷过滤片;14.过滤法兰;15.流量控制组件;15-1.流道入口保护片;15-1-1.流道入口;15-1-2.入口沉淀池;15-2.迷宫式控流片;15-2-1.控流片入口;15-2-2.迷宫流道;15-2-3.控流片出口;15-3.流道出口保护片;15-3-1.流道出口;16.转接法兰;17.喷头;17-1.喷头测温孔;17-2.射流喷嘴;17-3.喷头端面;18.加热套;19.坩埚热电偶;20.喷头热电偶;21.温控仪;

22. 感应加热线圈; 23. 感应加热电源; 24. 电弧焊炬; 25. 焊接电源; 26. 送粉管; 27. 送粉器; 28. 颗粒增强铝基复合材料构件; 29. 基板; 30. 三维运动平台; 31. 铝熔体射流; 32. 熔滴; 33. 粉末流; 34. 电弧熔池; 35. 电弧; 36. 钨极; 37. 钨极保护嘴; 38. 送粉嘴; 39. 送粉嘴夹具; 40. 铝基体; 41. 颗粒增强相。

### 具体实施方式

[0049] 下面将结合本发明实施例中的附图, 对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述, 显然, 所描述的实施例是本发明一部分实施例, 而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例, 本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例, 都属于本发明保护的范围。

[0050] 在本发明的描述中, 需要理解的是, 术语“中心”、“纵向”、“横向”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”、“内”、“外”、“一侧”、“一端”、“一边”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系, 仅是为了便于描述本发明和简化描述, 而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作, 因此不能理解为对本发明的限制。此外, 在本发明的描述中, 除非另有说明, “多个”的含义是两个或两个以上。

[0051] 在本发明的描述中, 需要说明的是, 除非另有明确的规定和限定, 术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解, 例如, 可以是固定连接, 也可以是可拆卸连接, 或一体地连接; 可以是机械连接, 也可以是电连接; 可以是直接相连, 也可以通过中间媒介间接相连, 可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言, 可以具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0052] 应当理解, 当在本说明书和所附权利要求书中使用时, 术语“包括”和“包含”指示所描述特征、整体、步骤、操作、元素和/或组件的存在, 但并不排除一个或多个其它特征、整体、步骤、操作、元素、组件和/或其集合的存在或添加。

[0053] 还应当理解, 在本发明说明书中所使用的术语仅仅是出于描述特定实施例的目的而并不意在限制本发明。如在本发明说明书和所附权利要求书中所使用的那样, 除非上下文清楚地指明其它情况, 否则单数形式的“一”、“一个”及“该”意在包括复数形式。

[0054] 还应当进一步理解, 在本发明说明书和所附权利要求书中使用的术语“和/或”是指相关联列出的项中的一个或多个的任何组合以及所有可能组合, 并且包括这些组合。

[0055] 在附图中示出了根据本发明公开实施例的各种结构示意图。这些图并非是按比例绘制的, 其中为了清楚表达的目的, 放大了某些细节, 并且可能省略了某些细节。图中所示出的各种区域、层的形状及它们之间的相对大小、位置关系仅是示例性的, 实际中可能由于制造公差或技术限制而有所偏差, 并且本领域技术人员根据实际所需可以另外设计具有不同形状、大小、相对位置的区域/层。

[0056] 请参阅图1, 本发明提供了一种颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置, 包括熔滴发生系统、电弧热源、增强颗粒送粉装置和三维运动平台。熔滴发生系统分别与电弧热源和增强颗粒送粉装置配合, 在三维运动平台上形成颗粒增强铝基复合材料构件28。

[0057] 熔滴发生系统包括水冷顶盖组件、气压驱动系统9、坩埚熔炼单元、流量控制组件

15和喷头17;水冷顶盖组件设置在坩埚熔炼单元中熔炼坩埚11的上方,气压驱动系统9经水冷顶盖组件与坩埚熔炼单元连接,流量控制组件15设置在坩埚熔炼单元的下部,喷头17位于坩埚熔炼单元的底部。

[0058] 水冷顶盖组件包括水冷顶盖1,水冷顶盖1上分别安装有冷却水入口2、冷却水出口5、压力传感器3、激光距离传感器4、材料添加入口7和进/出气口8,水冷顶盖1内部设置有顶盖水冷腔1-1,水冷顶盖1的下侧与熔炼坩埚11之间设置有顶盖散热片1-2。

[0059] 其中,在冷却水进口2和冷却水出口5之间设置有冷却系统6,冷却水通过冷却水进口2进入顶盖水冷腔1-1,并从冷却水出口5返回至冷却系统6,以循环的方式流经顶盖水冷腔1-1,从而确保压力传感器3和激光距离传感器4的工作在合适的温度范围内。

[0060] 气压驱动系统9分别与压力传感器3和激光距离传感器4连接,气压驱动系统9分别接收来自压力传感器3测得的坩埚内实时气压信号以及激光距离传感器4测得熔炼坩埚11内铝合金熔体12的液位信号,并通过进/出气口8向熔炼坩埚11内的铝合金熔体12施加合适的气体压力,确保熔滴发生系统的流量(即铝熔体射流31的流量)满足颗粒增强铝基复合材料增材制造的需求。

[0061] 水冷顶盖1的下方设置有熔炼坩埚11,水冷顶盖1和熔炼坩埚11通过螺纹连接,水冷顶盖1底部的螺纹端设计有顶盖散热片1-2,顶盖散热片1-2能够减少底部熔炼坩埚11向水冷顶盖1传递的热量。

[0062] 其中,水冷顶盖1和熔炼坩埚11之间设置有高温密封圈10,高温密封圈10具有热膨胀特性,能够弥补水冷顶盖1和熔炼坩埚11之间的配合螺纹在加热过程中因热膨胀系数差异带来的密封间隙。

[0063] 熔炼坩埚11的底部设置有过滤法兰14,熔炼坩埚11和过滤法兰14之间设置有陶瓷过滤片13;其中,陶瓷过滤片13为泡沫陶瓷或蜂窝陶瓷,或其他具有多孔结构的耐高温且耐金属熔体腐蚀的材料。

[0064] 过滤法兰14的底部设置有转接法兰16,流量控制组件15设置在过滤法兰14和转接法兰16之间;转接法兰16、流量控制组件15、过滤法兰14和熔炼坩埚11之间以叠层的方式布置,接触表面采用平面密封,并通过螺钉或螺柱锁紧。

[0065] 其中,紧固螺钉或螺柱采用低热膨胀系数的金属或陶瓷材料制作,从而实现高温下螺钉或螺柱有效预紧,进而实现可靠平面密封。

[0066] 请参阅图2,流量控制组件15包括流道入口保护片15-1、迷宫式控流片15-2和流道出口保护片15-3,迷宫式控流片15-2设置在流道入口保护片15-1和流道出口保护片15-3之间。

[0067] 请参阅图2(a),流道入口保护片15-1设计有流道入口15-1-1和入口沉淀池15-1-2,入口沉淀池15-1-2的底面低于流道入口15-1-1的上边缘,入口沉淀池15-1-2的功能在于储存密度高于铝合金熔体12的难溶杂质,有效降低流量控制组件15被难溶杂质堵塞的风险。

[0068] 请参阅图2(b),迷宫式控流片15-2上设计有控流片入口15-2-1、迷宫流道15-2-2和控流片出口15-2-3,控流片入口15-2-1经迷宫流道15-2-2与控流片出口15-2-3连接;迷宫流道15-2-2具有迷宫式的弯曲的周期性结构,任何具有明显流体耗能效果的周期性流道结构,均属于本发明所述的迷宫流道。

[0069] 流道出口保护片15-3设计有流道出口15-3-1。

[0070] 转接法兰16的底部连接有喷头17,喷头17设计有喷头测温孔17-1、射流喷嘴17-2和喷头端面17-3,射流喷嘴17-2以及喷头端面17-3,采用石墨、氧化铝或氮化铝等材料制作,以确保射流喷嘴17-2喷头端面17-3不被铝合金熔体12浸润且不发生明显溶蚀现象。

[0071] 熔炼坩埚11、铝合金熔体12、陶瓷过滤片13、过滤法兰14、流量控制组件15和转接法兰16外围设置有感应加热线圈22,感应加热线圈22和感应加热电源23电连接。

[0072] 喷头17外部设置有加热套18,以对喷头17进行加热,加热套18采用电阻加热或者感应加热。

[0073] 熔炼坩埚11上设置有坩埚测温孔11-1,坩埚测温孔11-1内设置有坩埚热电偶19,喷头17上设置有喷头测温孔17-1,喷头测温孔17-1内设置有喷头热电偶20,坩埚热电偶19和喷头热电偶20分别与温控仪21电连接,温控仪21分别与感应加热电源23和加热套18电连接;温控仪21采集来自坩埚热电偶19和喷头热电偶20的温度信号,并对感应加热电源23和加热套18的加热过程进行调控。

[0074] 其中,坩埚热电偶19和喷头热电偶20均为热电偶或其他具有测温功能的器件。

[0075] 电弧热源包括电弧焊炬24和焊接电源25,电弧焊炬24设置有钨极36,钨极36与焊接电源25电连接,焊接电源25工作时,钨极36末端将产生电弧35,电弧35将会作用于基板29或已经成型的沉积层,产生电弧熔池34,钨极36外部设置有钨极保护嘴37。

[0076] 增强颗粒送粉装置包括送粉嘴38、送粉嘴夹具39、送粉管26和送粉器27。送粉器27与送粉管26的一端连接,送粉管26的另一端与送粉嘴38连接,送粉嘴38固定在送粉嘴夹具39上,送粉嘴夹具39上还固定有钨极保护嘴37,送粉器27将以气载粉的形式,将气体和增强颗粒的混合物通过送粉管26和送粉嘴38以粉末流33的形式送出。

[0077] 请参阅图5,喷头17的射流喷嘴17-2延伸至喷头端面17-3,以满足连续成形的需求;由熔滴发生系统产生的铝熔体射流31经射流喷嘴17-2流出后,离散为熔滴32,与送粉喷嘴38喷出的粉末流33一起进入由钨极36产生的电弧35形成的电弧熔池34内。

[0078] 其中,熔滴32的离散过程是自然发生的,也可以通过引入一定频率的扰动进行控制。

[0079] 喷头17的下方设置有基板29,基板29安装在三维运动平台30的可活动滑台上,并随滑台一起运动,在计算机的控制下按照规划路径运动。

[0080] 其中,基板29为目标构件的一部分,或者不包含在目标构件内。

[0081] 在熔滴复合电弧增材制造过程中,熔滴32和粉末流33同步送入电弧熔池34中,随着电弧35和基板29的相对运动,粉末流中包含的颗粒相将随电弧熔池34的运动和凝固分散在铝基体中,形成颗粒增强铝基复合材料沉积层,在计算机的控制下逐道/逐层沉积形成目标颗粒增强铝基复合材料构件28,直至完成规定的制造任务。

[0082] 熔滴复合电弧增材制造系统可以置于惰性气氛环境中运行,以提高制造过程的稳定性、提高构件28制造质量和力学性能。

[0083] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。通常在此处附图中的描述和所示的本发明实施例的组件可以通过各种不同的配置来布置和设计。因此,以下对在附图中提供的本发明

的实施例的详细描述并非旨在限制要求保护的本发明的范围,而是仅仅表示本发明的选定实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0084] 请参阅图3,为颗粒增强铝基复合材料微观组织示范样件SEM图像,其中黑色背景为铝基体40,灰白色球状相为颗粒增强相41。

[0085] 铝基体40为纯铝或者其他具有可焊性的铝合金,包括但不限于A356、2219、4043、4047、5356、6061等牌号。

[0086] 颗粒增强相41为金属颗粒、陶瓷颗粒或金属-陶瓷复合颗粒,包括但不限于纯金属颗粒、合金颗粒、碳化物陶瓷颗粒、氮化物陶瓷颗粒等。

[0087] 请参阅图4,本发明一种颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造方法,包括以下步骤:

[0088] S1、模型设计

[0089] 根据目标零件形状和应用情况,采用CAD软件设计目标零件三维模型。

[0090] S2、复合材料设计

[0091] 根据S1得到的三维模型,结合目标零件的功能需求设计复合材料;设计内容包括但不限于基体材料选型、增强颗粒选型和增强颗粒植入比例设定。

[0092] S3、成形路径规划

[0093] 根据S1中得到的三维模型和S2中确定的复合材料,以及沉积速率、层高、移动速度和电弧电流等工艺参数,确定成形路径文件(成形路径文件中包含每层坐标信息、坐标点与坐标点之间的插补运动方式信息、运动速度信息、层高信息、层数信息、沉积速率信息和电弧热源的电流值信息)。沉积速率为 $100 \sim 300 \text{mm}^3/\text{s}$ ,层高为 $1 \sim 4 \text{mm}$ ,移动速度为 $3 \sim 15 \text{mm}/\text{s}$ ,电弧电流为 $100 \sim 500 \text{A}$ 。

[0094] S4、原材料准备

[0095] 根据S1中得到的三维模型、S2中确定的复合材料、S3中规划好的成形路径以及目标零件的数量,计算出成形所需铝合金和颗粒增强相的量,并备好所需的原材料。之后包括但不限于去除原材料表面污垢和较厚的氧化膜、用无水乙醇将原材料清洗干净,最后采用加热烘干或(和)抽真空的方式去除原材料表面残留的水分。

[0096] S5、成形准备

[0097] 对于易氧化铝合金材料,应确保成形环境为氩气(或其他惰性气氛)环境,且气氛中的水和氧气含量不超过 $100 \text{ppm}$ 。待原材料准备和成形环境准备完毕后,检查颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置中涉及的冷却系统、电弧热源、三维运动单元和气压驱动系统的功能,确保各子系统能够正常工作。在此之后将S4中准备的铝合金材料(全部或部分)装入熔炼坩埚内并组装好熔滴发生系统。待熔滴发生系统组装完成后,需要检测其密封性,确保气压能够正常加载;

[0098] S6、加热

[0099] 待成形准备完成后,开启冷却系统,并设定好温控仪加热参数,加热参数包括最终加热温度( $650 \sim 750 \text{°C}$ )和升温速率( $10 \sim 100 \text{°C}/\text{min}$ ),然后启动感应加热电源23和喷头加热套18;

[0100] S7、熔滴发生系统功能验证

[0101] 待熔滴发生系统加热至预定温度后,需首先验证熔滴发生系统各功能是否正常,包括压力检测功能、气压加载功能、激光液位测量功能等。然后,对射流状态和射流流量进行验证,若在既定的压力范围内射流状态不稳定或流量误差超过10%(或流量波动大于5%),重复步骤S5~S7。

[0102] S8、成形

[0103] 将用于零件成形的数据文件(由S3所得的成形路径文件)导入工艺控制计算机,开启焊接电源25和送粉器27,之后开始执行目标构件打印程序。

[0104] S9、成形过程监测

[0105] 在目标零件成形过程中,应进行实时形貌监测,以确定成形件是否满足设计要求。可对工艺参数实时调整以满足成形要求(包括成形尺寸精度和搭接质量),若成形精度明显偏离零件的尺寸要求或出现严重的搭接缺陷,则须暂停成形,对当前零件报废处理,并检查和修正成形路径文件中的相关数据。待相关参数修正后,重复步骤S8和S9,直至完成零件制造。

[0106] S10、后处理

[0107] 待目标零件打印结束,并冷却到可手工操作的温度后,取出基板和打印好的零件,去除不属于零件的部分,包括去除基板、去除辅助支持、去除表面黏着的粉末,或通过机加工的方式去除零件加工余量,若有需求,可增加零件热处理或表面处理。

[0108] S11、质量检测

[0109] 质量检测环节包括但不限于尺寸测量、致密度测试、CT扫描等手段;可根据要求,对模拟样件进行破坏性测试,包括金相表征、力学性能测试以及摩擦磨损性能测试等。若零件满足使用要求,则交付或继续剩余零件的制造。若零件不能通过质量检测则进行报废处理。

[0110] 本发明方法提供了一种适用于铝合金/颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造的一般流程。主要包含了零件/材料/路径设计规划阶段,材料/设备准备阶段,成形与过程监控阶段,以及后处理和质量检测阶段。在步骤S1模型设计和步骤S3成形路径规划之间增加了步骤S2复合材料设计,用于在设计规划阶段确定复合材料中基体材料和增强颗粒的选型以及增强颗粒植入比例。在步骤S5成形准备中,包含了成形环境要求,对于易氧化材料熔滴复合电弧增材制造,需保证成形过程处于低水和低氧的惰性气氛环境中。同时在步骤S5成形准备中,规范了原材料装填、熔滴发生系统组装完成后的密封性检测,气压加载功能用于熔滴发生系统密封性的检测。在步骤S6加热和步骤S7熔滴发生系统功能验证两个步骤中,规范了加热参数和加热至预定温度后对熔滴发生系统各项功能验证流程,包含压力检测、气压加载、激光液位测量等基本功能检验以及射流状态和射流流量的功能验证,用于确保之后的成形(S8)阶段关键系统熔滴发生系统能够正常运行。在步骤S9成形过程监测中规范了过程监测的主要对象:宏观形状和搭接缺陷,前者用于保证成形精度,后者则用于保证宏观上的搭接质量。当步骤S8~S10规定的成形和后处理步骤完成后,后续增加了步骤S11质量检测,检测环节包含了尺寸精度、致密度、内部缺陷、微观组织和力学性能,用于保证交付零件满足制造精度和质量要求。

[0111] 综上所述,本发明一种颗粒增强铝基复合材料熔滴复合电弧增材制造装置及方法,以变极性气体保护钨极电弧为热源,以实现高质量层间冶金结合;以独立的熔滴发生系

统代替传统电弧熔丝增材制造系统中的送丝机构,使得基体材料添加过程几乎不受电弧状态的影响,以显著提高工艺适应性;颗粒增强相通过独立的送粉系统以气载粉的方式同步植入到电弧熔池,从而实现颗粒增强铝基复合材料增材制造。

[0112] 以上内容仅为说明本发明的技术思想,不能以此限定本发明的保护范围,凡是按照本发明提出的技术思想,在技术方案基础上所做的任何改动,均落入本发明权利要求书的保护范围之内。

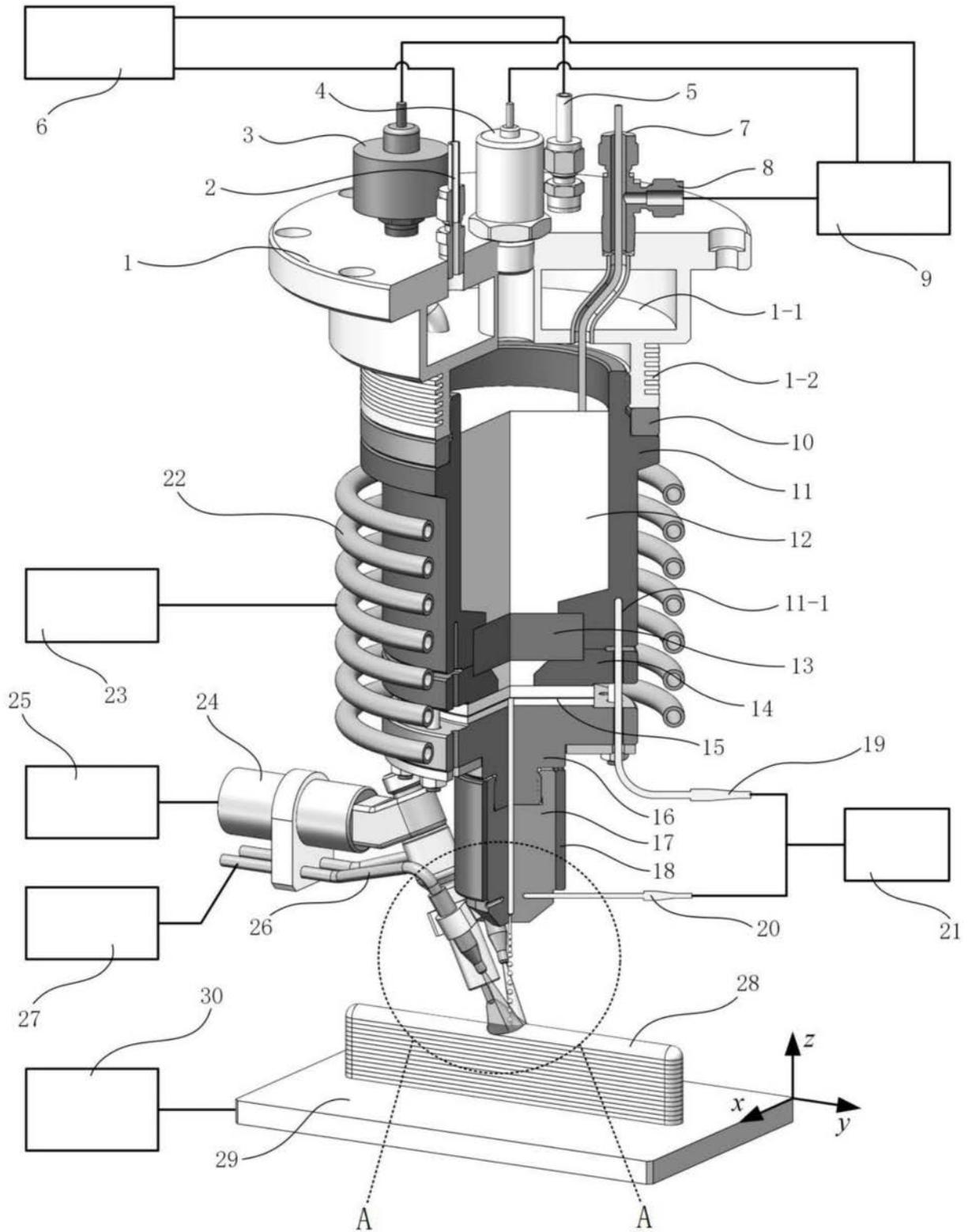


图1

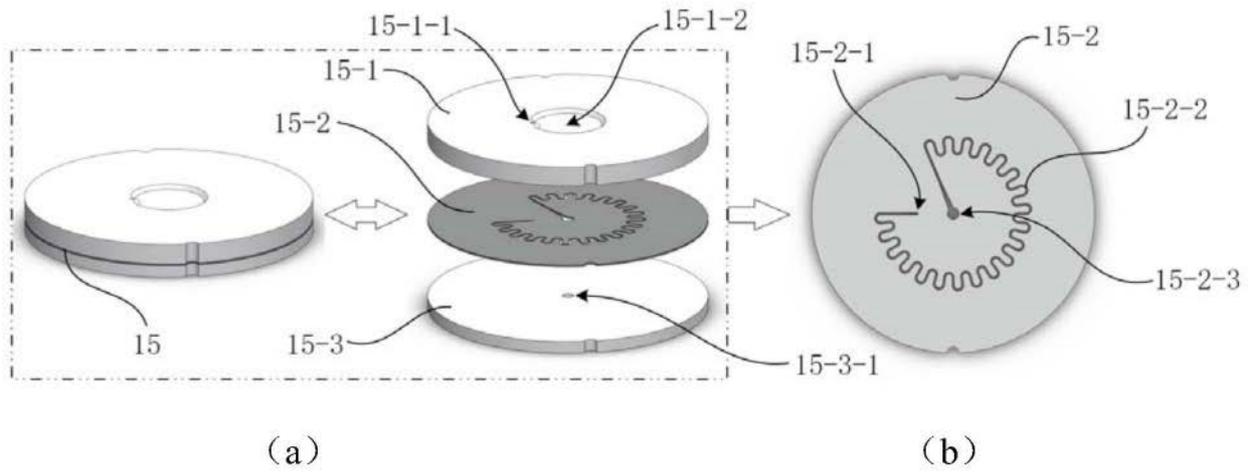


图2

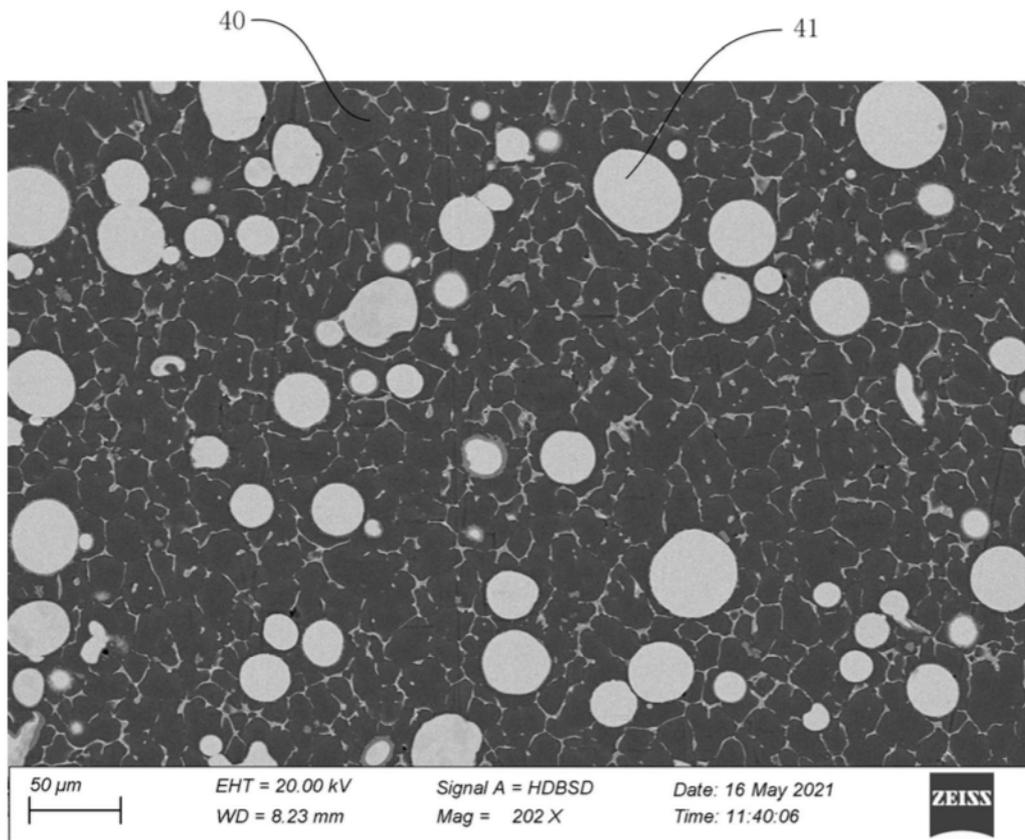


图3

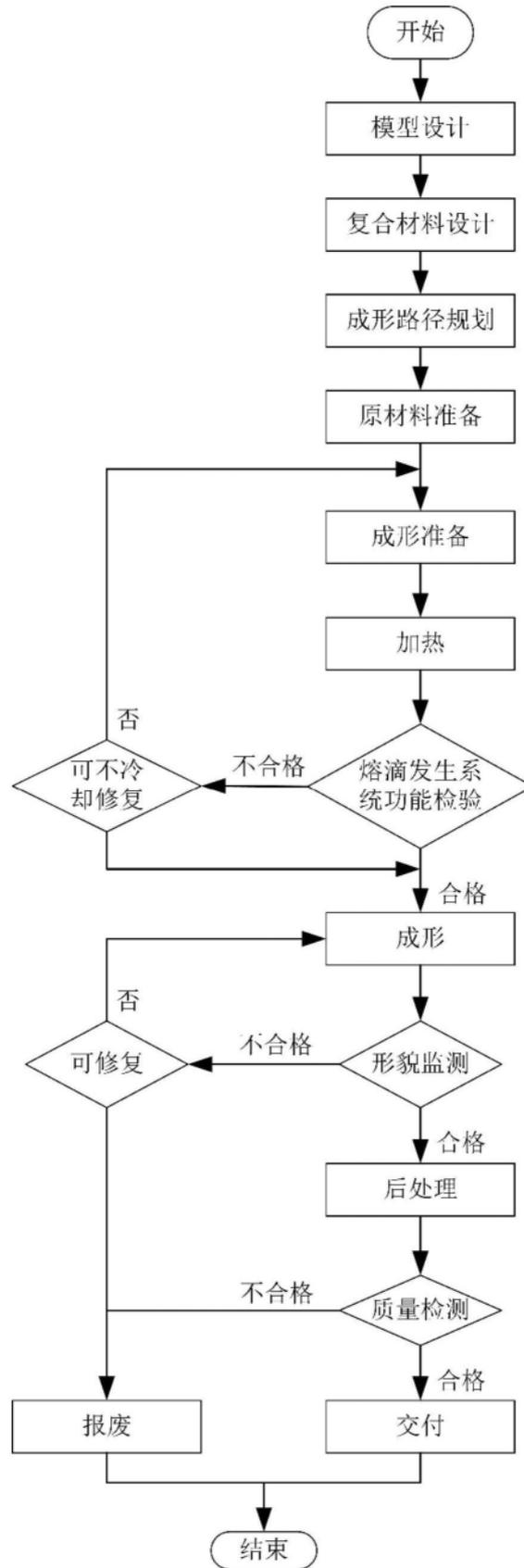


图4

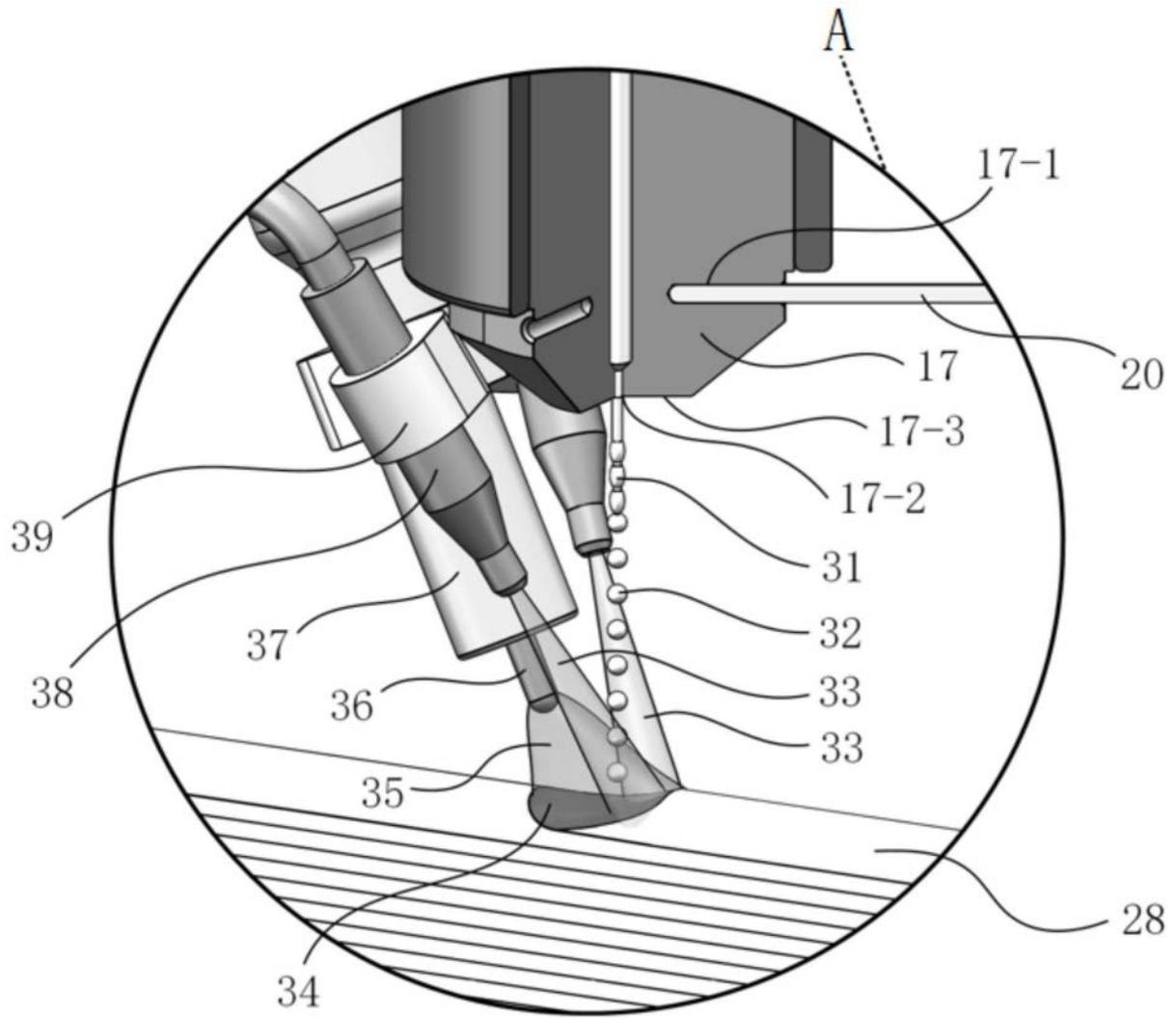


图5