(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
2021 年 3 月 18 日 (18.03.2021)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2021/047148 A1

(51) 国际专利分类号:
C30B 11/00 (2006.01) *C30B 29/52* (2006.01)
C30B 30/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/076971

(22) 国际申请日: 2020 年 2 月 27 日 (27.02.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201910853023.X 2019年9月10日 (10.09.2019) CN

(71) 申请人: 浙江大学 (ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(72) 发明人: 韦华 (WEI, Hua); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 谢亚丹 (XIE, Yadan); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 王江伟 (WANG, Jiangwei); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 林伟岸 (LIN, Weian); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 张泽 (ZHANG, Ze); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 陈云敏 (CHEN, Yunmin); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司 (HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区玉古

WO 2021/047148 A1

(54) **Title:** SUPERGRAVITY DIRECTIONAL SOLIDIFICATION MELTING FURNACE EQUIPMENT

(54) 发明名称: 超重力定向凝固熔铸炉装置

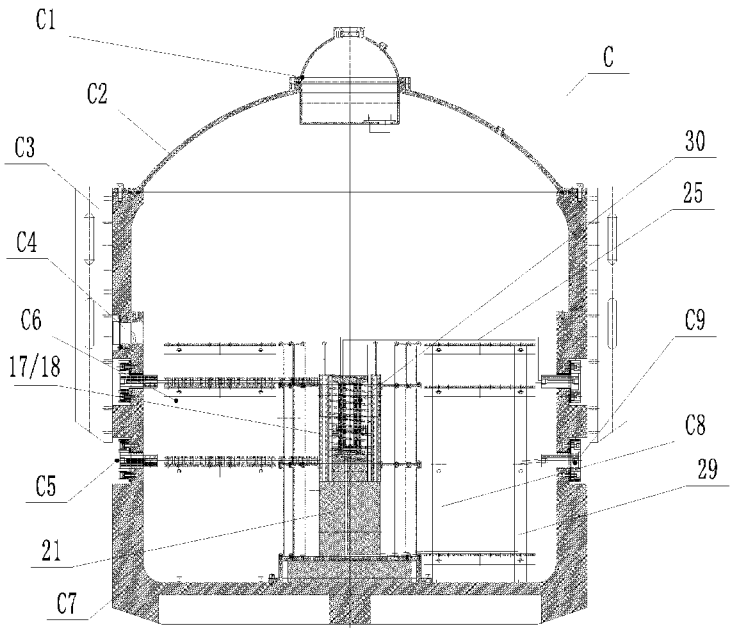


图 1

(57) **Abstract:** Supergravity directional solidification melting furnace equipment, comprising a supergravity test chamber (C) and, mounted in the supergravity test chamber (C), a high-temperature heating subsystem, a crucible, and a gas cooling system. The supergravity test chamber (C) is mounted with a wiring electrode (C5) and a cooling gas valve apparatus (C9). The high-temperature heating subsystem is fixed in the supergravity test chamber (C). The crucible and the gas cooling system are provided in the high-temperature heating subsystem. The high-temperature heating subsystem comprises upper, middle, and lower furnaces, a mullite insulating layer

[见续页]

路147号黄鸿年科技综合大楼215室林超, Zhejiang 310013 (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, 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))。

(16), upper and lower heating cavity outer bodies (17 and 18), upper and lower heating furnace pipes (19 and 20), and a crucible supporting base (21). A high-temperature heating cavity is divided into upper and lower parts, is provided therein with a spiral groove (22-1), and is fitted with a heater (22). The crucible supporting base (21) is provided therein with a ventilation pipe (21-1) into which a cooling gas is introduced. The crucible and the gas cooling system comprise intake and exhaust pipes (29 and 30), a cooling base (26), a cooling rate adjusting ring (27), the crucible (25), and an exhaust cover (28).

(57) 摘要：一种超重力定向凝固熔铸炉装置，包括超重力试验舱（C）和安装在超重力试验舱（C）中的高温加热子系统和坩埚及气冷系统，超重力试验舱（C）安装接线电极（C5）和冷却气体阀装置（C9），高温加热子系统固定于超重力试验舱（C），坩埚及气冷系统置于高温加热子系统；高温加热子系统包括上中下炉体、莫来石保温层（16）、上下加热腔外体（17,18）、上下加热炉管（19,20）、坩埚支撑座（21），高温加热腔体分为上下部分，内部有螺旋状凹槽（22-1）并装有发热体（22）；坩埚支撑座(21)内部有冷却气体通入的通气管道(21-1)；坩埚及气冷系统包括进排气管(29，30)、冷却底座(26)、冷速调节环(27)、坩埚(25)和排气盖(28)。

超重力定向凝固熔铸炉装置

技术领域

本发明涉及材料制备、定向凝固技术领域的一种超重力材料试验装置，尤其涉及一种超重力定向凝固熔铸炉装置。

背景技术

随着现代航空发动机推重比增加和涡轮级数减少，涡轮前燃气进口温度从上世纪 70 年代的 1400-1500K 发展到本世纪初的 1600-1750K，推重比 12-15 发动机涡轮前燃气进口温度将高达 2000-2200K，这对发动机核心热端部件提出了更高的性能要求。高压涡轮工作叶片作为热端部件关键组成部分之一，服役时长期工作在高温、高压、高转速、交变负载等耦合加载条件下。

高压涡轮工作叶片作为航空发动机和燃气轮机热端部件关键组成部分之一，服役时长期工作在高温、高压、高转速、交变负载等耦合加载条件下，是发动机中工作条件最恶劣的转动部件，其使用可靠性直接影响整机性能。在高温合金的发展过程中，工艺对高温合金的发展起着很大的推动作用。通常为了提高高温合金的综合力学性能，采用两种途径：其一是加入大量合金化元素，通过合理的热处理工艺使之产生固溶强化、沉淀强化及晶界强化等，从而保证高温合金具有从室温到高温的良好强度、表明稳定性和较好的塑性；其二是从凝固工艺入手，采用定向凝固工艺，制备晶界平行于主应力轴从而消除有害横向晶界的柱状晶高温合金或制备消除所有晶界的单晶高温合金。

定向及单晶叶片由于消除横向晶界或完全消除晶界，晶体沿[001]特定方向生长，提高初熔温度及固溶处理窗口温度，增加γ数量并细化，大幅度提高了性能，提高使用温度。目前，几乎所有先进航空发动机均采用单晶高温合金。工业上广泛应用的快速凝固法制备单晶合金，其温度梯度只能达到 100K/cm 左右，凝固速率很低，导致凝固组织粗大，偏析严重，致使材料的性能千里没有得到充分发挥。微重力下的晶体生长，由于重力加速度减小而有效的抑制了重力造成的无规则热质对流，从而获得溶质分布高度均匀的晶体，但由于成本太高，无法工业化。

单晶合金可以通过在超重力环境下进行制备，但现有技术缺少了了超重力环境下实现定向凝固的温度梯度控制系统，缺少了超重力环境下实现定向凝固熔铸系统。

发明内容

本发明需要解决的是针对上述超重力、高温试验条件下材料难以定向凝固熔铸的问题，高转速-高温耦合环境下材料定向凝固熔铸炉，提供一种装配简单、使用方便、安全系数高，且可用于超重力工况的定向温度梯度凝固，使得超重力下制备单晶合金具有了可能。

超重力下装置的试验过程必须满足抗高温条件、特殊气氛环境、高 G 值、冷却气体降温等要求，是确保该装置安全稳定运行的关键技术。

本发明未来实现上述要求和目的，采用的技术方案是：

本发明的定向凝固熔铸系统包括超重力试验舱和安装在超重力试验舱中的高温加热子系统和坩埚及气冷系统，高温加热子系统固定于超重力试验舱底部，坩埚及气冷系统置于高温加热子系统中。

超重力试验舱包括舱体接口件、上密封穹顶、舱体吊耳和舱体；舱体内部设有腔体，腔体上端开口，舱体的两侧侧壁向外连接有舱体吊耳，两侧的舱体吊耳铰接连接到超重力离心机的吊篮转臂上，上密封穹顶通过螺栓安装连接到舱体的腔体开口端面并密封连接；上密封穹顶的中央安装有舱体接口件，舱体接口件包括通讯上密封舱盖和通讯舱体，通讯上密封舱盖安装在通讯舱体

的上端开口，通讯上密封舱盖和通讯舱体均设有外凸缘，外凸缘台阶面上开设第一螺孔，螺栓穿过第一螺孔连接到上密封穹顶；舱体接口件上还设有上玻璃压装法兰、上法兰紧固螺钉、石英玻璃和真空插座，石英玻璃被上玻璃压装法兰固定安装在通讯上密封舱盖顶部中心的开口处，上玻璃压装法兰通过上法兰紧固螺钉固定于上密封舱盖顶部，通讯上密封舱盖，通讯舱体底部开孔，开孔处安装真空插座；舱体的腔体内底面固定安装有布线支架和供气支架，舱体一侧壁上开设有接线孔和第一安装孔，舱体另一侧壁对称开设有接线孔和第二安装孔，接线孔处安装接线电极，接线电极经过接线孔与舱体内部的布线支架相连，弱信号控制电线经过第一安装孔与布线支架相连；第二安装孔中安装冷却气体阀装置，冷却气体经管路连接到冷却气体阀装置，冷却气体阀装置经供气支架上的管路和舱体内的试验仪器进出气口连通。

所述的高温加热子系统包括安装底座和布置在安装底座上的从上到下依次布置连接的上炉体、中炉体、下炉体以及莫来石保温层、上加热腔外体、下加热腔外体、上加热炉管、下加热炉管、坩埚支撑座和发热体；坩埚支撑座置于下炉体的下腔体隔热层底部，并底部固定于安装底座，加热腔体置于坩埚支撑座上，加热腔体包括上加热腔外体、下加热腔外体、上加热炉管和下加热炉管，上加热腔外体和下加热腔外体均为套筒结构，上加热腔外体和下加热腔外体分别位于上下同轴固定对接，上加热炉管、下加热炉管分别套装于上加热腔外体、下加热腔外体中，上加热腔外体、下加热腔外体在上炉体的上腔体隔热层、中炉体的中腔体隔热层、下炉体的下腔体隔热层之间填充有莫来石保温层；上加热炉管和下加热炉管的外壁均加工有螺旋状凹槽，螺旋状凹槽装有螺旋状的发热体，发热体产生的热量均匀辐射到上加热炉管和下加热炉管组成的加热炉管，在加热炉管中央形成高温区。

所述的坩埚及气冷系统置于坩埚支撑座上的上加热炉管和下加热炉管内部，坩埚及气冷系统包括进气管、冷却底座、冷速调节环、坩埚、排气盖和排气管；坩埚支撑座顶面上安装冷却底座，冷却底座上安装坩埚，坩埚顶端安装排气盖，坩埚中部套装冷速调节环；在坩埚上设置有中心容腔、冷却孔、温度梯度调节块、热量辐射槽、定位凸缘块、散热槽和气体排放孔；坩埚主体为柱形结构，坩埚顶面中央开设有圆柱盲孔作为中心容腔，中心容腔灌充待超重力定向凝固的金属熔液/金属试样；中心容腔周围的坩埚顶面沿圆周开设多个垂直通孔作为冷却孔，多个冷却孔沿周向间隔均布，冷却孔下端通入冷却气体；每个冷却孔中均安装有用于实现和调节定向凝固温度梯度的温度梯度调节块，温度梯度调节块和冷却孔孔壁之间存在间隙，温度梯度调节块在冷却孔能沿轴向上下移动；坩埚下部周面固定有环形的凸块作为定位凸缘块，定位凸缘块下部的外周柱面开设多个散热槽，散热槽从坩埚主体内壁径向向外延伸定位凸缘块外壁；定位凸缘块上方的坩埚外周柱面开设多个热量辐射槽，多个热量辐射槽沿周向间隔均布，相邻两个冷却孔之间的坩埚外周柱面均有一个热量辐射槽；在定位凸缘块顶面处的坩埚侧壁两侧对称开设通孔作为气体排放孔，气体排放孔将冷却孔和坩埚外部连通；冷却底座上端开口，开口内设有下环形槽，坩埚下端安装到冷却底座上端开口中，且通过下环形槽将坩埚的各个冷却孔下端连通，冷却底座底端开有和下环形槽连通的进气通孔；冷速调节环固定安装于坩埚的定位凸缘块上，冷速调节环顶面开设有一个或者两个垂直的集气槽孔，集气槽孔底端穿过冷速调节环内圈壁面和坩埚的气体排放孔连通；排气盖下端开口，开口内设有上环形槽，坩埚下端安装到排气盖下端开口中，且通过上环形槽将坩埚的各个冷却孔上端连通，排气盖底端开有和上环形槽连通的出气通孔，排气盖的出气通孔和排气管的一端连通；排气管另一端与外界相连通，将冷却气体排出；排气盖下端开口内的中间设置形成凸台，凸台嵌装于坩埚的中心容腔顶端内；

所述的坩埚支撑座内部开设有一个通气管道，通气管道用于定向凝固的冷却气体通入，通气管道上端贯穿出坩埚支撑座顶面作为出口并连通到冷却底座的进气通孔，通气管道下端贯穿出坩埚支撑座底部外壁后作为入口，和进气管一端连接，进气管另一端与冷却气源相连；定向凝固试

验的冷却气体通过通气管道下端入口进入，经通气管道上端出口通入坩埚底部，通过对坩埚底部冷却，形成一个沿超重力方向的温度梯度而进行定向凝固，并且通过调控冷却气体的通入流量和发热体产生的温度，调控沿超重力方向的温度梯度分布。

工作过程中发热体产生热量，通过辐射加热上加热炉管和下加热炉管，在加热炉管中央形成高温区，通过改变不同高度位置的螺旋状凹槽螺距进而改变不同高度位置的发热体在加热炉管间距，配合坩埚支撑座通气管道通入的冷却气体温度和流量，从坩埚底部开始冷却，形成一个沿超重力方向的温度梯度。

所述的接线电极包括内六角螺钉、铜电极、电极绝缘套和电极固定绝缘套；铜电极为具有大小两端的结构，铜电极的大端端面中心开设有固定螺孔，固定螺孔周围的铜电极的大端端面开设有连接螺孔；电极绝缘套套装在铜电极的小端以及小端和大端之间的台阶上，内六角螺钉穿过连接螺孔连接到电极绝缘套，使得铜电极通过内六角螺钉固定安装在电极绝缘套中，内六角螺钉与铜电极之间设置有电极固定绝缘套；铜电极小端端部穿出电极绝缘套后连接到外部的强电源，铜电极在小端和大端之间的台阶上设有环形的尖锐凸起。

所述的冷却气体阀装置安装于超重力试验舱，包括内六角螺钉、通气阀座、密封套和密封件；通气阀座为具有大小两端的结构，通气阀座的大端端面中心开设有气管固定螺孔，气管固定螺孔和超重力试验舱外部的供气管或排气管密封连接，气管固定螺孔周围的通气阀座的大端端面开设有安装螺孔；密封套套装在通气阀座的小端以及小端和大端之间的台阶上，密封套开设有和安装螺孔对应的连接螺孔，内六角螺钉穿过安装螺孔和连接螺孔后连接到超重力试验舱侧壁的螺纹安装孔中，从而将通气阀座和密封套安装到超重力试验舱上，内六角螺钉与通气阀座的安装螺孔之间设置有密封件；通气阀座小端端部穿出密封套伸入到超重力试验舱内部；超重力试验舱内部的所述通气阀座小端端面中间开设气管连接螺孔，气管连接螺孔和气管固定螺孔之间通过通气阀座内部通道连通，气管连接螺孔和超重力试验舱内部的供气支架上的气管密封连接。

所述的通气阀座和铜电极一致，大端为圆形，小端为方形；所述的通气阀座和铜电极一致，在小端和大端之间的台阶上设有环形的尖锐凸起，尖锐凸起用于在通气阀座时起到定位作用，同时也可以限制离心机作用下通气阀座径向/轴向移动。

所述接线电极的铜电极的大端为圆形，小端为方形；所述的铜电极的小端端面设置有接线柱，接线柱和超重力装置的强电源的接线端连接。

所述的舱体吊耳径向伸出的凸耳部分的面开设多个间隔的固定孔，螺栓穿过固定孔连接到超重力离心机的转臂，使得舱体吊耳通过固定孔及螺栓与超重力离心机的转臂相连。

所述的舱体外侧壁上开设有真空接口，真空接口直接和舱体外部的真空管道连接。

所述的超重力试验舱内还安装有承力架、信号采集器和布线架，高温加热子系统的上加热炉管和下加热炉管内安装待定向凝固的材料试样，并设置有温度传感器，温度传感器连接信号采集器，信号采集器输出的导线通过布线架与弱信号导电滑环连接，再与地面测控中心连接；高温加热子系统设置有一路强电独立回路，一路强电独立回路控制加热内部不同高度位置的发热体进行高温加热，将地面一个强电独立回路通过离心离心机主轴导电滑环接入超重力试验舱的布线架；高温加热子系统设置有一路冷却气体回路，一路冷却气体独立回路控制通入的冷却气体流量，将地面一个冷却气体独立回路通过离心离心机主轴导电滑环接入超重力试验舱的冷却气体管路支架和排气管。

所述的超重力试验舱用于超重力定向凝固试验，设置两个第二安装孔，每个第二安装孔均安装有一个冷却气体阀装置，一个冷却气体阀装置作为供气装置，另一个冷却气体阀装置作为排气装置，冷却气体由超重力试验舱外部气源经供气滑环/供气管通入供气装置的气管固定螺孔，接着经供气装置的气管连接螺孔进入超重力试验舱内部的通气管道下端入口，为降温或冷却装置供气；

超重力试验舱内部由通气管道上端出口排出的冷却气体经由气管通入排气装置的气管连接螺孔，接着经排气装置的气管固定螺孔连通到超重力试验舱外部的排气滑环/排气管排出。

所述的定向凝固熔铸系统置于离心机的超重力环境中。

本发明实现了高强度轻质量，结构模块化设计，实验准备周期短，凝固过程安全可靠，为为超重力下的试验提供了保障。

本发明可用于实现超重力环境下实现定向凝固的温度梯度控制，使得在超重力下能进行晶体生长，通过增大重力加速度而加强浮力对流，当浮力对流增强到一定程度时，就转化为层流状态，即重新层流化，同样抑制了无规则的热质对流。在加速旋转过程中造成液相强迫对流，由于极大的改变热质传输过程而引起了界面形貌的显著变化，导致糊状区宽度显著减小。液相快速流动引起界面前沿液相中的温度梯度极大的提高，非常有利于液相溶质的均匀混合和材料的平界面生长，枝晶生长形态发生显著的变化，由原来具有明显主轴的枝晶变为无明显主轴的穗状晶，穗状晶具有细密的显微组织。

本发明的有益效果是：

本发明为超重力环境下的定向凝固装置提供一套定向温度梯度凝固炉，可在超重力环境下对需定向凝固熔铸的材料样品进行温度梯度控制处理过程，可实现在离心载荷-热载荷耦合条件下材料定向凝固熔铸，可有效解决超重力、高温试验条件下材料定向凝固熔铸温度梯度的问题，具有结构简单，操作方案且安全系数较高的优点。

本发明配合超重力环境，可加热高转速条件下材料定向凝固熔铸样品，例如高温合金的定向及单晶晶体生长，解决了高速旋转状态下材料定向凝固熔铸温度梯度的关键难题，填补了国内技术行业的空白，且装备简单、操作方便。本发明适合1g-2000g超重力环境下，加热温度从常温-1250℃。

附图说明

图 1 是本发明在机载超重离心模拟装置的多功能实验舱主视图。

图 2 是舱体接口件 1 的主视图；C12-1 上玻璃压装法兰；C 12-2 上法兰紧固螺钉；C 12-3 石英玻璃；C 12-4 通讯上密封舱盖；C 12-5 通讯舱体；C 12-6 真空插座；C 12-7 连接螺孔。

图 3 是舱体 7 的示意图；C7-1 接线孔；C 7-2 第一安装孔。

图 4 是定向凝固熔铸系统的主视图；

图 5 是高温加热子系统的主视图；

图 6 为坩埚支撑座的结构剖视图；

图 7 为加热炉管的结构局部放大图；

图 8 为发热体的结构示意图；

图 9 为定向凝固熔铸系统的电气连接结构示意图。

图 10 是坩埚及气冷系统的总图；

图 11 是坩埚正面剖视图；

图 12 是图 11 中标 A 部位的局部放大剖视图；

图 13 是坩埚俯视图；

图 14 是图 11 中 A-A 的剖视图；

图 15 是坩埚的立体图。

图 16 是冷却底座的剖视图；

图 17 是冷速调节环的剖视图；

图 18 是排气盖的剖视图；

图 19 是排气盖的剖视图；

图 20 是接线电极的主剖视图；

图 21 是接线电极的铜电极剖视图及其局部放大图；内六角螺钉 C51、铜电极 C52、电极绝缘套 C53、电极固定绝缘套 C54、固定螺孔 C52-1、连接螺孔 C52-2、接线柱 C52-3、安装螺孔 C54-1。

图 22 是冷却气体阀装置的主视图；

图 23 是冷却气体阀装置的通气阀座的剖视图；

图 24 是本发明实验舱在超重力定向凝固实验实施中的连接安装示意图。

图中：上隔热盖 1、上腔体外壳 2、上腔体中壳 3、上腔体隔热层 4、上腔体下固定盖 5、中隔热盖 6、中腔体外壳 7、中腔体中壳 8、中腔体隔热层 9、中腔体下固定盖 10、下隔热盖 11、下腔体外壳 12、下腔体中壳 13、下腔体隔热层 14、下腔体下固定盖 15、莫来石保温层 16、上加热腔外体 17、下加热腔外体 18、上加热炉管 21、下加热炉管 20、坩埚支撑座 21、发热体 22、螺旋状凹槽 21-1、通气管道 21-1、安装底座 23；坩埚 25、中心容腔 25-1、冷却孔 25-2、温度梯度调节块 25-3、热量辐射槽 25-4、定位凸缘块 25-5、散热槽 25-6、气体排放孔 25-7；进气管 29、坩埚支撑座 21、冷却底座 26、冷速调节环 27、坩埚 25、排气盖 28、排气管 30；通气管道 21-1、进气通孔 26-1、下环形槽 26-2、集气槽孔 27-1、出气通孔 28-1、上环形槽 28-2、凸台 28-3；

超重力试验舱 C、舱体接口件 C1、上密封穹顶 C2、舱体吊耳 C3、真空接口 C4、接线电极 C5、布线支架 C6、舱体 C7、供气支架 C8、冷却气体阀装置 C9、上玻璃压装法兰 C12-1、上法兰紧固螺钉 C12-2、石英玻璃 C12-3、通讯上密封舱盖 C12-4、通讯舱体 C12-5、真空插座 C12-6、第一螺孔 C12-7、接线孔 C7-1、第一安装孔 C7-2；内六角螺钉 C51、铜电极 C52、电极绝缘套 C53、电极固定绝缘套 C54、固定螺孔 C52-1、连接螺孔 C52-2、接线柱 C52-3、安装螺孔 C54-1、内六角螺钉 C91、通气阀座 C92、密封套 C93、密封件 C94、固定螺孔 C92-1、气管固定螺孔 C92-2、气管连接螺孔 C92-3。

具体实施方式

现结合附图对本发明作进一步详细的说明。这些附图均为简化的示意图，仅以示意方式说明本发明的基本结构，因此仅显示与本发明有关的构成。

如图 1 所示，定向凝固熔铸系统包括超重力试验舱 C 和安装在超重力试验舱 C 中的高温加热子系统和坩埚及气冷系统，高温加热子系统固定于超重力试验舱 C 底部，坩埚及气冷系统置于高温加热子系统中，形成如图 4 所示。

如图 1 所示，超重力试验舱 C 包括舱体接口件 C1、上密封穹顶 C2、舱体吊耳 C3 和舱体 C7；舱体 C7 内部设有腔体，腔体上端开口，舱体 C7 的两侧侧壁向外连接有舱体吊耳 C3，两侧的舱体吊耳 C3 铰接连接到超重力离心机的吊篮转臂上，上密封穹顶 C2 通过螺栓安装连接到舱体 C7 的腔体开口端面并密封连接。

如图 2 所示，上密封穹顶 C2 的中央安装有舱体接口件 C1，舱体接口件 C1 包括通讯上密封舱盖 C12-4 和通讯舱体 C12-5，通讯上密封舱盖 C12-4 安装在通讯舱体 C12-5 的上端开口，通讯上密封舱盖 C12-4 和通讯舱体 C12-5 均设有外凸缘，外凸缘台阶面上开设第一螺孔 C12-7，螺栓穿过第一螺孔 C12-7 连接到上密封穹顶 C2；舱体接口件 C1 上还设有上玻璃压装法兰 C12-1、上法兰紧固螺钉 C12-2、石英玻璃 C12-3 和真空插座 C12-6，石英玻璃 C12-3 被上玻璃压装法兰 C12-1 固定安装在通讯上密封舱盖 C12-4 顶部中心的开口处，上玻璃压装法兰 C12-1 通过上法兰紧固螺钉 C12-2 固定于上密封舱盖 C12-4 顶部，通讯上密封舱盖 C12-4，通讯舱体 C12-5 底部开孔，开孔处安装真空插座 C12-6。

如图 3 所示，舱体 C7 的腔体内底面固定安装有布线支架 C6 和供气支架 C8，舱体 C7 一侧壁上开设有接线孔 C7-1 和第一安装孔 C7-2，舱体 C7 另一侧壁对称开设有接线孔和第二安装孔 C7-3，接线孔 C7-1 处安装接线电极 C5，接线电极 C5 经过接线孔 C7-1 与舱体 C7 内部的布线支架 C6 相连，弱信号控制电线经过第一安装孔 C7-2 与布线支架 C6 相连；第二安装孔 C7-3 中安装冷却气体

阀装置 C9，冷却气体经管路连接到冷却气体阀装置 C9，冷却气体阀装置 C9 经供气支架 C8 上的管路和舱体 C7 内的试验仪器进出气口连通。

如图 5 所示，高温加热子系统包括安装底座 23 和布置在安装底座 23 上的从上到下依次布置连接的上炉体、中炉体、下炉体以及莫来石保温层 16、上加热腔外体 17、下加热腔外体 18、上加热炉管 19、下加热炉管 20、坩埚支撑座 21 和发热体 22；上隔热盖 1、上腔体外壳 2、上腔体中壳 3、上腔体隔热层 4、上腔体下固定盖 5、中隔热盖 6、中腔体外壳 7、中腔体中壳 8、中腔体隔热层 9、中腔体下固定盖 10、下隔热盖 11、下腔体外壳 12、下腔体中壳 13、下腔体隔热层 14、下腔体下固定盖 15 组成一个三个炉体构成的圆筒状高温加热子系统的外壳，主要用来在超重力环境下固定高温加热子系统，且在超重力环境下起到保护炉体的作用，总体形成了一个高温炉。

上炉体主要由上隔热盖 1、上腔体外壳 2、上腔体中壳 3、上腔体隔热层 4、上腔体下固定盖 5 组成，上腔体外壳 2、上腔体中壳 3、上腔体隔热层 4 分别从外到内安装形成上炉三层结构，上隔热盖 1 和上腔体下固定盖 5 分别安装于上炉三层结构的上端和下端使得上炉三层结构固定连接，上隔热盖 1 用来固定上炉体的上炉三层结构且起到隔热保温作用；上腔体外壳 2 和上腔体中壳 3 之间以及上腔体中壳 3 和上腔体隔热层 4 之间均有间隙作为空气隔热层，空气隔热层起到隔热保温的作用防止炉内热量散失。

中炉体主要由中隔热盖 6、中腔体外壳 7、中腔体中壳 8、中腔体隔热层 9、中腔体下固定盖 10 组成，中腔体外壳 7、中腔体中壳 8、中腔体隔热层 9 分别从外到内安装形成中炉三层结构，中隔热盖 6 和中腔体下固定盖 10 分别安装于中炉三层结构的上端和下端使得中炉三层结构固定连接，中隔热盖 6 用来固定中炉体的中炉三层结构且起到隔热保温作用，中隔热盖 6 具有隔热保温作用，防止热量在超重力作用下向下传导；中腔体外壳 7 和中腔体中壳 8 之间以及中腔体中壳 8 和中腔体隔热层 9 之间均有间隙作为空气隔热层，空气隔热层起到隔热保温的作用防止炉内热量散失；上炉体的上腔体下固定盖 5 和中炉体的中隔热盖 6 之间固定连接，上腔体下固定盖 5 和中隔热盖 6 连接用来连接上炉体和中炉体。

下炉体主要由下隔热盖 11、下腔体外壳 12、下腔体中壳 13、下腔体隔热层 14、下腔体下固定盖 15 组成，下腔体外壳 12、下腔体中壳 13、下腔体隔热层 14 分别从外到内安装形成下炉三层结构，下隔热盖 11 和下腔体下固定盖 15 分别安装于下炉三层结构的上端和下端使得下炉三层结构固定连接，下腔体下固定盖 15 底部通过螺栓螺钉固定于安装底座 23，安装底座 23 固定于超重力离心机的超重力试验舱底座上，下隔热盖 11 用来固定下炉体的下炉三层结构且起到隔热保温作用，下隔热盖 11 具有隔热保温作用，防止热量在超重力作用下向下传导，下腔体下固定盖 15 用来将高温加热子系统固定在超重力试验装置的底部。下腔体外壳 12 和下腔体中壳 13 之间以及下腔体中壳 13 和下腔体隔热层 14 之间均有间隙作为空气隔热层，空气隔热层起到隔热保温的作用防止炉内热量散失；中炉体的中腔体下固定盖 10 和下炉体的下隔热盖 11 之间固定连接，中腔体下固定盖 10 和下隔热盖 11 连接用来连接中炉体和下炉体。

整个炉体通过上隔热盖 1、上腔体下固定盖 5、中隔热盖 6、中腔体下固定盖 10、下隔热盖 11 和下腔体下固定盖 15 四个地方对炉体进行加强，提高整个炉体在超重力环境下的刚度和强度，防止炉体运行过程中变形和破坏。上腔体下固定盖 5 和中隔热盖 6、中腔体下固定盖 10 和下隔热盖 11 之间通过高强螺栓联接，方便安装及维护。

如图 5 和图 6 所示，坩埚支撑座 21 置于下炉体的下腔体隔热层 14 底部，并底部固定于安装底座 23，加热腔体置于坩埚支撑座 21 上，坩埚支撑座 21 置于超重力试验舱底面上，坩埚支撑座 21 用来支撑整个炉体重量，以及超重力作用下产生的压应力，同时隔热，防止热量在超重力下通过热传导到超重力试验装置的底部。加热腔体包括上加热腔外体 17、下加热腔外体 18、上加热炉管 19 和下加热炉管 20，上加热腔外体 17 和下加热腔外体 18 均为套筒结构，上加热腔外体 17 和

下加热腔外体 18 分别位于上下同轴固定对接，下加热腔外体 18 底端固定于坩埚支撑座 21 的边缘，上加热炉管 19、下加热炉管 20 分别套装于上加热腔外体 17、下加热腔外体 18 中，上加热腔外体 17、下加热腔外体 18 在上炉体的上腔体隔热层 4、中炉体的中腔体隔热层 9、下炉体的下腔体隔热层 14 之间填充有莫来石保温层 16；如图 7 所示，上加热炉管 19 和下加热炉管 20 的外壁均加工有螺旋状凹槽 22-1，螺旋状凹槽 22-1 装有螺旋状的发热体 22，如图 8 所示，螺旋状凹槽 22-1 能有效地固定发热体防止在超重力下下滑，发热体 22 产生的热量均匀辐射到上加热炉管 19 和下加热炉管 20 组成的加热炉管，在由上加热炉管 19 和下加热炉管 20 组成的加热炉管中央形成高温区。

上加热腔外体 17 用来安装上加热炉管 19，上加热腔外体 17 和上加热炉管 19 用来给装置上部分加热。下加热腔外体 18 用来安装下加热炉管 20，下加热腔外体 18 和下加热炉管 20 用来给装置下部分加热。

上加热腔外体 17 和下加热腔外体 18 的上下环形端面沿圆周开设有多个用于连接上隔热盖 1 的贯穿通孔，轴连接件/杆连接件穿过上隔热盖 1 套装于上加热腔外体 17 和下加热腔外体 18 同一轴向的贯穿通孔中。

本发明的加热炉管和发热体 22 的结构设计，这样能发热体 22 防止发热体在超重力环境下脱落，并且还能通过调整螺旋状凹槽不同位置处的螺距调整加热效果。

工作过程中发热体 22 产生热量，通过辐射加热上加热炉管 19 和下加热炉管 20，在加热炉管中央形成高温区，通过改变不同高度位置的螺旋状凹槽 22-1 螺距进而改变不同高度位置的发热体 22 在加热炉管间距，配合坩埚支撑座 21 通气管道 21-1 通入的冷却气体温度和流量，从坩埚底部开始冷却，形成一个沿超重力方向的温度梯度。

上加热炉管 19 和下加热炉管 20 采用高强度、低导热系数的陶瓷制作。

本发明具体实施中还要求包括发热体 22 的选型、高强度炉管 17 加工的螺旋状凹槽螺距、高强度炉管 17 的材料类型。

发热体 22 的选型：不同的发热体 22 允许使用的最高温度和对使用环境的要求不一样，需结合此装置的具体使用条件最高工作温度、真空环境和超重力环境)确定发热体 22 类型。如铁铬铝电热合金丝和铂金丝等。

上加热炉管 19、下加热炉管 20 加工的螺旋状凹槽螺距：发热体 22 在超重力条件下容易拉升变形，甚至断裂。需考虑发热体 22 布局设计外还得考虑发热体 22 所带来的一系列变化影响，如防止在超重力条件下发热体 22 变形移动严重时断裂，从而影响设备的整体运行。

上加热炉管 19、下加热炉管 20 的材料类型：根据发热体 22 类型和使用温度要求，确定上加热炉管 19 和下加热炉管 20 的材料类型。为防止超重力下上加热炉管 19、下加热炉管 20 自重造成的变形，高温加热装置炉体设计为三层分体式，每层单独加固保温层。

如图 9 所示，超重力试验舱内还安装有承力架、信号采集器和布线架，高温加热子系统的上加热炉管 19 和下加热炉管 20 内安装待定向凝固的材料试样，并设置有温度传感器，温度传感器连接信号采集器，信号采集器输出的导线通过布线架与弱信号导电滑环连接，再与地面测控中心连接；

高温加热子系统设置有一路强电独立回路，一路强电独立回路控制加热内部不同高度位置的发热体 22 进行高温加热，将地面一个强电独立回路通过离心离心机主轴导电滑环接入超重力试验舱的布线架；

高温加热子系统设置有一路冷却气体回路，一路冷却气体独立回路控制通入的冷却气体流量，将地面一个冷却气体独立回路通过离心离心机主轴导电滑环接入超重力试验舱的冷却气体管路支架和排气管。

具体实施中，具体实施中，将控制高温加热装置的一个独立控温温度延长导线接入信号采集

器，信号采集器将接受的温度信号，从模拟信号转变为数字信号；数字信号通过布线架与信号滑环连接，再与地面测控中心连接。

炉温由固定或焊接在待测试样上的温度传感器通过控温仪和测控系统控制。

本发明装置安装使用时，先将下腔体下固定盖 15 通过螺栓固定于超重力试验装置底部，坩埚支撑座 21 安装于下腔体下固定盖 15 上，下腔体外壳 12、下腔体中壳 13、下腔体隔热层 14 通过螺栓与下腔体下固定盖 15 连接，下隔热盖 11 通过螺栓与中腔体下固定盖 10 连接，中腔体中壳 8、中腔体隔热层 9、中腔体下固定盖 10 通过螺栓与中腔体下固定盖 10 连接，再通过螺栓与上腔体下固定盖 5、中隔热盖 6 连接。

将莫来石保温层 16 直接放置在陶瓷的加热炉管 19、20 和下腔体隔热层 14、中腔体隔热层 9、上腔体隔热层 4 之间。莫来石保温层 16 既可以起到缓冲作用又可以隔绝热量。

高温加热子系统可重复使用，仅需要通过更换合适的发热体 2 和加热炉管 19、20 以满足不同的实验要求，具有结构简单且安全系数较高的优点。

如图 10 所示，坩埚及气冷系统置于坩埚支撑座 21 上的上加热炉管 19 和下加热炉管 20 内部，上加热炉管 19 和下加热炉管 20 内壁和坩埚及气冷系统之间存在间隙，坩埚及气冷系统包括进气管 29、冷却底座 26、冷速调节环 27、坩埚 25、排气盖 28 和排气管 30；坩埚支撑座 21 顶面上安装冷却底座 26，冷却底座 26 上安装坩埚 25，坩埚 25 顶端安装排气盖 28，坩埚 25 中部套装冷速调节环 27；由进气管、冷却底座、冷速调节环、坩埚、排气盖和排气管为定向凝固装置提供一个定向凝固所需的温度梯度控制系统。

如图 11 所示，在坩埚 25 上设置有中心容腔 25-1、冷却孔 25-2、温度梯度调节块 25-3、热量辐射槽 25-4、定位凸缘块 25-5、散热槽 25-6 和气体排放孔 25-7；坩埚 25 主体为柱形结构，坩埚 25 顶面中央开设有圆柱盲孔作为中心容腔 25-1，中心容腔 25-1 灌充待超重力定向凝固的金属熔液/金属试样；中心容腔 25-1 周围的坩埚 25 顶面沿圆周开设多个垂直通孔作为冷却孔 25-2，多个冷却孔 25-2 沿周向间隔均布，冷却孔 25-2 下端通入冷却气体；每个冷却孔 25-2 中均安装有用于实现和调节定向凝固温度梯度的温度梯度调节块 4，温度梯度调节块 4 和冷却孔 25-2 孔壁之间存在间隙，温度梯度调节块 4 在冷却孔 25-2 能沿轴向上下移动；具体实施中，冷却孔 25-2 和坩埚支撑座 21 的通气管道 21-1 上端出口相连，经通气管道 21-1 向冷却孔 25-2 中通入冷却气体。冷却孔 25-2 为冷却气体在坩埚壁扩散的通道，主要是利用冷却气体带走热量，实现冷却坩埚的目的。

如图 11 和图 15 所示，坩埚 25 下部周面固定有环形的凸块作为定位凸缘块 25-5，定位凸缘块 25-5 和坩埚 25 主体一体成型，定位凸缘块 25-5 下部的外周柱面开设多个散热槽 25-6，具体实施中散热槽 25-6 的数量为冷却孔 25-2 的两倍，散热槽 25-6 从坩埚 25 主体内壁径向向外延伸定位凸缘块 25-5 外壁，并贯穿出定位凸缘块 25-5 外壁，散热槽 25-6 底部贯穿出定位凸缘块 25-5 底面；散热槽 25-6 在坩埚 25 的定位凸缘块 25-5 下端形成一个空腔，增强坩埚 25 下部的散热效果，有利于坩埚凝固过程中温度梯度的形成。同时，通过定位凸缘块 25-5 及其上的散热槽 25-6 在坩埚 33 下端形成一个空腔，增强坩埚 25 下部的散热效果，有利于坩埚 25 凝固过程中温度梯度的形成。定位凸缘块 25-5 除了开设散热槽 25-6 下部的上部部分在高温加热子系统中安装坩埚 25 时辅助确定位置，防止超重力下坩埚 25 安装晃动。

如图 11 和图 13 所示，定位凸缘块 25-5 上方的坩埚 25 外周柱面开设多个热量辐射槽 25-4，多个热量辐射槽 25-4 沿周向间隔均布，具体实施中热量辐射槽 25-4 的数量和冷却孔 25-2 的数量相同，相邻两个冷却孔 25-2 之间的坩埚 25 外周柱面均有一个热量辐射槽 25-4，热量辐射槽 25-4 轴向贯穿出坩埚 25 顶面，散热槽 25-6 径向外侧部贯穿出坩埚 25 外周面；具体实施中，热量辐射槽 25-4 与超重力定向凝固熔铸炉的高温加热子系统中的上加热炉管 19、下加热炉管 20 和发热体 22 配合，用来加热坩埚。

如图 11 和图 12 和图 14 所示，在定位凸缘块 25-5 顶面处的坩埚 25 侧壁两侧对称开设通孔作为气体排放孔 25-7，气体排放孔 25-7 将冷却孔 25-3 和坩埚 25 外部连通，气体排放孔 25-7 与冷却孔 25-3 形成一个冷却气体通路，用于排放冷却气体，同时防止高温下冷却气体膨胀对坩埚 25 产生的破坏；

如图 16 所示，冷却底座 26 用来连接坩埚和坩埚支撑座，冷却底座 26 上端开口，开口内设有下环形槽 26-2，下环形槽 26-2 的圆周尺寸和坩埚 25 的冷却孔 25-2 圆周相一致，坩埚 25 下端安装到冷却底座 26 上端开口中，且通过下环形槽 26-2 将坩埚 25 的各个冷却孔 25-2 下端连通，冷却底座 26 底端开有和下环形槽 26-2 连通的进气通孔 26-1；具体实施中，冷却底座 26 上端开口内设有内外两道下环形槽 26-2，两道下环形槽 26-2 连接相通，外圈的一道下环形槽 26-2 和坩埚 25 的冷却孔 25-2 圆周对应连通，内圈的一道下环形槽 26-2 开设进气通孔 26-1。

如图 17 所示，冷速调节环 27 固定安装于坩埚 25 的定位凸缘块 25-5 上，冷速调节环 27 底面和定位凸缘块 25-5 顶面紧贴，被定位凸缘块 25-5 顶面承托，冷速调节环 27 顶面开设有一个或者两个垂直的集气槽孔 27-1，集气槽孔 27-1 的数量和坩埚 25 的气体排放孔 25-7 数量相同，集气槽孔 27-1 顶端穿出冷速调节环 27 和坩埚 25 外部连通，集气槽孔 27-1 底端穿过冷速调节环 27 内圈壁面和坩埚 25 的气体排放孔 25-7 连通，用来收集冷却坩埚后的气体。

如图 18 所示，排气盖 28 处于上加热炉管 19 和下加热炉管 20 内部的最上方部分，排气盖 28 下端开口，开口内设有上环形槽 28-2，上环形槽 28-2 的圆周尺寸和坩埚 25 的冷却孔 25-2 圆周也相一致，坩埚 25 下端安装到排气盖 28 下端开口中，且通过上环形槽 28-2 将坩埚 25 的各个冷却孔 25-2 上端连通，为冷却气体提供气路，排气盖 28 底端开有和上环形槽 28-2 连通的出气通孔 28-1，排气盖 28 的出气通孔 28-1 和排气管 30 的一端连通，用于排出冷却气体；排气管 30 另一端通过超重力试验舱内部的通气支架、超重力离心机滑环与外界相连通，将冷却气体排出；具体实施中，排气盖 28 下端开口内的中间设置形成凸台 28-3，凸台 28-3 嵌装于坩埚 25 的中心容腔 25-1 顶端内，能固定坩埚防止超重力作用下坩埚晃动；

如图 6 和图 10 所示，坩埚支撑座 21 的作用是支撑坩埚和高温加热子系统在超重力下产生的压力，坩埚支撑座 21 内部开设有一个通气管道 21-1，通气管道 21-1 用于定向凝固的冷却气体通入，通气管道 21-1 上端贯穿出坩埚支撑座 21 顶面作为出口并连通到冷却底座 26 的进气通孔 26-1，通气管道 21-1 下端贯穿出坩埚支撑座 21 底部外壁后作为入口，和进气管 29 一端连接，进气管 29 另一端通过超重力试验舱内部的通气支架与超重力试验舱外的冷却气源相连，为冷却系统提供冷却气体；

如图 10 所示，定向凝固试验的冷却气体通过通气管道 21-1 下端入口进入，经通气管道 21-1 上端出口通入坩埚 25 底部，通过对坩埚 25 底部冷却，形成一个沿超重力方向的温度梯度而进行定向凝固，并且通过调控冷却气体的通入流量和发热体 22 产生的温度，调控沿超重力方向的温度梯度分布。

如图 1 所示，超重力试验舱 C 用于超重力定向凝固试验，设置两个第二安装孔 C7-3，每个第二安装孔 C7-3 均安装有一个冷却气体阀装置，一个冷却气体阀装置作为供气装置，另一个冷却气体阀装置作为排气装置，冷却气体由超重力试验舱外部气源经供气滑环/供气管通入供气装置的气管固定螺孔 C92-2，接着经供气装置的气管连接螺孔 C92-3 进入超重力试验舱 C 内部的通气管道 21-1 下端入口，为降温或冷却装置供气；超重力试验舱 C 内部由通气管道 21-1 上端出口排出的冷却气体经由气管通入排气装置的气管连接螺孔 C92-3，接着经排气装置的气管固定螺孔 C92-2 连通到超重力试验舱 C 外部的排气滑环/排气管排出。

坩埚 25 用于超重力环境下定向凝固过程的金属熔液/金属试样盛装。

坩埚 25 采用高强陶瓷材料，使坩埚具有足够的强度和刚度，确保安装到定向熔铸炉后在超重

力下能正常工作。

坩埚材料具有极低的孔隙率，确保定向凝固过程中，高温熔体在超重力下不能够从坩埚中渗出，以方便灵活地适用于各种类型的超重力定向凝固熔铸炉。

冷却气体为液氮、压缩空气等，冷却气体温度不高于 5℃，压力不高于 5Mpa，压力可控可调。根据温度梯度要求，冷却气体类型可以改变。

本发明能适合 1g-2500g 超重力环境，温度从常温-1700℃。

如图 20 和图 21 所示，接线电极 C5 包括内六角螺钉 C51、铜电极 C52、电极绝缘套 C53 和电极固定绝缘套 C54；铜电极 C52 为具有大小两端的结构，铜电极 C52 的大端端面中心开设有固定螺孔 C52-1，固定螺孔 C52-1 周围的铜电极 C52 的大端端面开设有连接螺孔 C52-2；电极绝缘套 C53 套装在铜电极 C52 的小端以及小端和大端之间的台阶上，内六角螺钉 C51 穿过连接螺孔 C52-2 连接到电极绝缘套 C53，使得铜电极 C52 通过内六角螺钉 C51 固定安装在电极绝缘套 C53 中，内六角螺钉 C51 与铜电极 C52 之间设置有电极固定绝缘套 C54；铜电极 C52 小端端部穿出电极绝缘套 C53 后连接到外部的强电源，铜电极 C52 在小端和大端之间的台阶上设有环形的尖锐凸起。

如图 22 和图 23 所示，冷却气体阀装置 C9 安装于超重力试验舱，包括内六角螺钉 C91、通气阀座 C92、密封套 C93 和密封件 C94；通气阀座 C92 为具有大小两端的结构，通气阀座 C92 安装于超重力试验舱侧壁的螺纹安装孔中，通气阀座 C92 大端朝外安装，通气阀座 C92 主要用来通气，最高气压不高于 C5Mpa；由紫铜制备。通气阀座 C92 的大端端面中心开设有气管固定螺孔 C92-2，气管固定螺孔 C92-2 和超重力试验舱外部的供气管或排气管密封连接，气管固定螺孔 C92-2 周围的通气阀座 C92 的大端端面开设有安装螺孔 C92-1；密封套 C93 套装在通气阀座 C92 的小端以及小端和大端之间的台阶上，密封套 C93 开设有和安装螺孔 C92-1 对应的连接螺孔，内六角螺钉 C91 穿过安装螺孔 C92-1 和连接螺孔后连接到超重力试验舱侧壁的螺纹安装孔中，从而将通气阀座 C92 和密封套 C93 安装到超重力试验舱上，内六角螺钉 C91 与通气阀座 C92 的安装螺孔 C92-1 之间设置有密封件 C94，密封件 C94 用来将内六角螺钉 C91 与通气阀座 C92 隔离；通气阀座 C92 小端端部穿出密封套 C93 伸入到超重力试验舱内部；超重力试验舱内部的通气阀座 C92 小端端面中间开设气管连接螺孔 C92-3，气管连接螺孔 C92-3 和气管固定螺孔 C92-2 之间通过通气阀座 C92 内部通道连通，气管连接螺孔 C92-3 和超重力试验舱内部的供气支架上的气管密封连接。

安装螺孔 C92-1 开设有四个，四个安装螺孔 C92-1 沿周向间隔均布，密封套 C93 对应也开设有四个安装螺孔。

通气阀座 C92 和铜电极 C52 一致，大端为圆形，小端为方形，小端为方形和超重力试验舱侧壁的方通孔配合，使得通气阀座 C92 限制转动；通气阀座 C92 和铜电极 C52 一致，在小端和大端之间的台阶上设有环形的尖锐凸起，尖锐凸起相比安装螺孔 C92-1 更靠近中间位置，尖锐凸起用于在通气阀座 C92 时起到定位作用，同时也可以限制离心机作用下通气阀座 C92 径向/轴向移动。

本发明的通气阀座 C92 选用紫铜合金，具有良好的塑形，在确保通气情况下，具有良好的塑形，防止通气阀座在超重力和冷却交互作用下的疲劳失效。

密封套 C93 将通气阀座 C92 和超重力试验舱隔离密封，防止通气阀座 C92 和超重力试验舱固定时的缝隙漏气，降低实验舱内的真空度。密封套 C93 利用聚四氟乙烯制备，具有隔热保温效果，防止冷却气体温度降低。

密封件 C94 将通气阀座 C92 和内六角螺钉 C91 隔离密封，用来密封内六角螺钉 C91 与通气阀座 C92 连接的缝隙，防止漏气，降低实验舱内的真空度。密封件 C94 也可利用聚四氟乙烯制备，具有隔热保温效果，防止冷却气体温度通过内六角螺钉 C91 散掉。

冷却气体阀装置置于超重力环境下，尤其是用于超重力定向凝固试验。超重力方向沿超重力试验舱的轴向，通气阀座安装于超重力试验舱的侧壁，因此超重力方向沿通气阀座 C92 的径向方

向。

接线电极 C5 的连接螺孔 C52-2 开设有四个，四个连接螺孔 C52-2 沿周向间隔均布，电极固定绝缘套 C54 对应也开设有四个安装螺孔。

接线电极 C5 的铜电极 C52 的大端为圆形，小端为方形；铜电极 C52 的小端端面设置有接线柱 C52-3，接线柱 C52-3 和超重力装置的强电源的接线端连接。

舱体吊耳 C3 径向伸出的凸耳部分的面开设多个间隔的固定孔，螺栓穿过固定孔连接到超重力离心机的转臂，使得舱体吊耳 C3 通过固定孔及螺栓与超重力离心机的转臂相连。

如图 1 所示，舱体 C7 外侧壁上开设有真空接口 C4，真空接口 C4 直接和舱体 C7 外部的真空管道连接。

本发明的冷却子系统在超重力环境下，能满足最大供气压力不低于 C5MPa 的要求，有利于通过调节冷却气体流量或压力给加热或降温装置控制冷却速率的范围，能非常灵活地满足各种类型超重力机载装置的降温要求，适应性强，应用范围宽。

定向凝固熔铸系统置于离心机的超重力环境中。超重力试验舱为超重力环境下材料定向凝固的试验舱，置于离心机的吊篮中。

本发明熔铸炉的使用和运行过程如下：

如图 24 所示，具体实施在定向凝固过程中，是将坩埚 25 安装于超重力环境中在超重力下工作，施加超重力方向沿坩埚 25 轴向向下方向。具体是安装于超重力定向凝固熔铸炉的高温加热子系统中。

实验前，根据熔铸合金类型，确定温度梯度、合金熔化温度、离心主机转速和温度梯度调节块 25 的质量。下面详细说明该发明的使用和运行过程：

第一步：超重力离心装置的定向熔铸系统安装在实验舱内，将超重力试验舱置于离心机的吊篮中，在超重力试验舱内放置高温加热装置，并通过安装在加热装置内的坩埚熔化试样；通过主机轴上的电滑环连接、气体密封滑环分别与地面上测试上位机系统和冷却气源连接。

将布置在坩埚周围的测温热电偶的导线和信号采集器连接，信号采集器将接收温度模拟信号，并将模拟信号转变为数字信号。

第二步：启动真空系统，使实验舱内的真空度达到 10^{-2}Pa。

第三步：当实验舱内的真空度达到 10^{-2}Pa 后，启动加热系统。一个强电独立回路分别连接到上加热炉管 19 和下加热炉管 20，在加热区形成高温区。

开始超重力定向凝固试验的加热阶段，在没有冷却气体通入情况下，发热体 22 产生的热量，通过热量辐射槽 25-4 辐射和热传导到坩埚 25 外壁，进而加热坩埚 25 对中心容腔 25-1 中的金属试样进行加热，熔化坩埚中的试样。

第四步：当加热炉管 19、20 内的温度达到合金熔点的 0.8 倍时，启动离心主机，一边加热，一边启动离心主机。

第五步：当离心主机转速达到实验设定的转速后，持续加热直到合金完全熔化，并在设计的离心主机转速下保持 10 分钟。

第六步：启动冷却系统，开始定向凝固。

在超重力定向凝固试验的凝固阶段，冷却气体经进气管 29 进入坩埚支撑座 21 内部的通气管道 21-1，再经进气通孔 26-1 进入下环形槽 26-2，进而通入到坩埚 25 的各个冷却孔 25-2，进而从冷却孔 25-2 下端进入坩埚 25 内部，对坩埚 25 开始进行冷却。初始温度梯度调节块 25-3 位于冷却孔 25-2 的底部，冷却气体的压力推动温度梯度调节块 25-3，并从温度梯度调节块 25-3 和冷却孔 25-2 孔壁之间的间隙中流经到冷却孔 25-2 顶部，使得由下到上通过冷却孔 25-2 孔壁热传导对中心容腔 25-1 进行冷却。

对于凝固阶段的控制，温度梯度调节块 25-3 在冷却孔 25-2 的移动过程中分别受超重力的重量、与冷却孔 25-2 孔壁之间的摩擦力以及冷却气体的压力影响，温度梯度调节块 25-3 两端受力存在压差，通过设置超重力作用下温度梯度调节块 25-3 的超重量、温度梯度调节块 25-3 移动过程中与坩埚 25 的冷却孔 25-2 孔壁之间的摩擦力以及冷却气体的压力，根据需要可结合使温度梯度调节块 25-3 在压差作用下上下调节移动，来实现超重力定向凝固过程中的温度梯度。这样能够实现由下到上的中心容腔 25-1 逐渐温度降低冷却，使得在中心容腔 25-1 已经熔化的金属试样由下到上按照需要逐渐凝固，实现了定向凝固。

实施中，在精确计算超重力作用下温度梯度调节块 27 的重量、温度梯度调节块 27 移动过程中与坩埚壁的摩擦力基础上，根据设定的温度梯度，通过精确控制冷却气体的压力，在定向凝固过程中，使温度梯度调节块 27 在压差作用下以恒定的速度向上移动，来控制凝固界面的位置，从而在凝固前沿的液-固界面形成所需的温度梯度。

试验过程中，通过改变超重力大小、冷却气体流量、时间、温度梯度调节块的重量等措施，与超重力定向熔铸炉高温加热子系统配合，实现不同的温度梯度要求。通过冷却底座对坩埚底部冷却，并将分散气体的收集到坩埚冷却孔；冷速调整环收集坩埚下部的冷却气体，并根据温区要求调整位置，实现不同温区要求。

冷却实施定向凝固后，坩埚 25 的冷却孔 25-2 内已经实施流经过的冷却气体从冷却孔 25-2 顶端进入上环形槽 28-2，收集在上环形槽 28-2 中，进而经出气通孔 28-1 后由排气管 30 排出。

但是当温度梯度调节块 25-3 在冷却孔 25-2 中堵塞时，冷却气体的压力从气体排放孔 25-7 的小径孔再经过冷速调节环 27 的集气槽孔 27-1 流通到坩埚 25 外部，避免了冷却气体的压力不断增大，避免了内部压力无限增大导致的安全问题。

根据通入冷却气体的流量、压力和超重力大小，通过调整冷速调节环 27 沿坩埚 25 的定位凸缘块 25-5 的高度来改变坩埚沿超重力方向的温度分布，实现能够根据实验要求精确控制定向凝固时的温度梯度，并能外排压力过高的坩埚 25 内部冷却气体。

实验过程中，温度信号实时传给信号采集器，信号采集器将获得模拟信号转变为数字信号，再通过布线架与信号滑环连接，最后与地面测控中心连接，从而获得实验过程中温度-时间曲线。

第七步：当试样完全凝固后，关闭加热系统。

第八步：当温度降低到合金固相线温度以下时，关闭离心主机。

第九步：当温度降低到 200℃以下时，关闭冷却系统和真空系统。

由此，本发明能通过热电偶独立控制高温加热装置的加热温度，与通气管道 21-1 通入坩埚底部的冷却气量，对坩埚底部冷却，形成一个沿超重力方向的温度梯度。通过调控通入流量和温度，调控温度梯度。

权利要求书

1、一种超重力定向凝固熔铸炉装置，其特征在于：所述的定向凝固熔铸系统包括超重力试验舱（C）和安装在超重力试验舱（C）中的高温加热子系统和坩埚及气冷系统，高温加热子系统固定于超重力试验舱（C）底部，坩埚及气冷系统置于高温加热子系统中；

超重力试验舱（C）包括舱体接口件（C1）、上密封穹顶（C2）、舱体吊耳（C3）和舱体（C7）；舱体（C7）内部设有腔体，腔体上端开口，舱体（C7）的两侧侧壁向外连接有舱体吊耳（C3），两侧的舱体吊耳（C3）铰接连接到超重力离心机的吊篮转臂上，上密封穹顶（C2）通过螺栓安装连接到舱体（C7）的腔体开口端面并密封连接；上密封穹顶（C2）的中央安装有舱体接口件（C1），舱体接口件（C1）包括通讯上密封舱盖（C12-4）和通讯舱体（C12-5），通讯上密封舱盖（C12-4）安装在通讯舱体（C12-5）的上端开口，通讯上密封舱盖（C12-4）和通讯舱体（C12-5）均设有外凸缘，外凸缘台阶面上开设第一螺孔（C12-7），螺栓穿过第一螺孔（C12-7）连接到上密封穹顶（C2）；舱体接口件（C1）上还设有上玻璃压装法兰（C12-1）、上法兰紧固螺钉（C12-2）、石英玻璃（C12-3）和真空插座（C12-6），石英玻璃（C12-3）被上玻璃压装法兰（C12-1）固定安装在通讯上密封舱盖（C12-4）顶部中心的开口处，上玻璃压装法兰（C12-1）通过上法兰紧固螺钉（C12-2）固定于上密封舱盖（C12-4）顶部，通讯上密封舱盖（C12-4），通讯舱体（C12-5）底部开孔，开孔处安装真空插座（C12-6）；舱体（C7）的腔体内底面固定安装有布线支架（C6）和供气支架（C8），舱体（C7）一侧壁上开设有接线孔（C7-1）和第一安装孔（C7-2），舱体（C7）另一侧壁对称开设有接线孔和第二安装孔（C7-3），接线孔（C7-1）处安装接线电极（C5），接线电极（C5）经过接线孔（C7-1）与舱体（C7）内部的布线支架（C6）相连，弱信号控制电线经过第一安装孔（C7-2）与布线支架（C6）相连；第二安装孔（C7-3）中安装冷却气体阀装置（C9），冷却气体经管路连接到冷却气体阀装置（C9），冷却气体阀装置（C9）经供气支架（C8）上的管路和舱体（C7）内的试验仪器进出气口连通；

所述的高温加热子系统包括安装底座（23）和布置在安装底座（23）上的从上到下依次布置连接的上炉体、中炉体、下炉体以及莫来石保温层（16）、上加热腔外体（17）、下加热腔外体（18）、上加热炉管（19）、下加热炉管（20）、坩埚支撑座（21）和发热体（22）；坩埚支撑座（21）置于下炉体的下腔体隔热层（14）底部，并底部固定于安装底座（23），加热腔体置于坩埚支撑座（21）上，加热腔体包括上加热腔外体（17）、下加热腔外体（18）、上加热炉管（19）和下加热炉管（20），上加热腔外体（17）和下加热腔外体（18）均为套筒结构，上加热腔外体（17）和下加热腔外体（18）分别位于上下同轴固定对接，上加热炉管（19）、下加热炉管（20）分别套装于上加热腔外体（17）、下加热腔外体（18）中，上加热腔外体（17）、下加热腔外体（18）在上炉体的上腔体隔热层（4）、中炉体的中腔体隔

热层（9）、下炉体的下腔体隔热层（14）之间填充有莫来石保温层（16）；上加热炉管（19）和下加热炉管（20）的外壁均加工有螺旋状凹槽（22-1），螺旋状凹槽（22-1）装有螺旋状的发热体（22），发热体（22）产生的热量均匀辐射到上加热炉管（19）和下加热炉管（20）组成的加热炉管，在加热炉管中央形成高温区；

所述的坩埚及气冷系统置于坩埚支撑座（21）上的上加热炉管（19）和下加热炉管（20）内部，坩埚及气冷系统包括进气管（29）、冷却底座（26）、冷速调节环（27）、坩埚（25）、排气盖（28）和排气管（30）；坩埚支撑座（21）顶面上安装冷却底座（26），冷却底座（26）上安装坩埚（25），坩埚（25）顶端安装排气盖（28），坩埚（25）中部套装冷速调节环（27）；在坩埚（25）上设置有中心容腔（25-1）、冷却孔（25-2）、温度梯度调节块（25-3）、热量辐射槽（25-4）、定位凸缘块（25-5）、散热槽（25-6）和气体排放孔（25-7）；坩埚（25）主体为柱形结构，坩埚（25）顶面中央开设有圆柱盲孔作为中心容腔（25-1），中心容腔（25-1）灌充待超重力定向凝固的金属熔液/金属试样；中心容腔（25-1）周围的坩埚（25）顶面沿圆周开设多个垂直通孔作为冷却孔（25-2），多个冷却孔（25-2）沿周向间隔均布，冷却孔（25-2）下端通入冷却气体；每个冷却孔（25-2）中均安装有用于实现和调节定向凝固温度梯度的温度梯度调节块（4），温度梯度调节块（4）和冷却孔（25-2）孔壁之间存在间隙，温度梯度调节块（4）在冷却孔（25-2）能沿轴向上下移动；坩埚（25）下部周面固定有环形的凸块作为定位凸缘块（25-5），定位凸缘块（25-5）下部的外周柱面开设多个散热槽（25-6），散热槽（25-6）从坩埚（25）主体内壁径向向外延伸定位凸缘块（25-5）外壁；定位凸缘块（25-5）上方的坩埚（25）外周柱面开设多个热量辐射槽（25-4），多个热量辐射槽（25-4）沿周向间隔均布，相邻两个冷却孔（25-2）之间的坩埚（25）外周柱面均有一个热量辐射槽（25-4）；在定位凸缘块（25-5）顶面处的坩埚（25）侧壁两侧对称开设通孔作为气体排放孔（25-7），气体排放孔（25-7）将冷却孔（25-3）和坩埚（25）外部连通；冷却底座（26）上端开口，开口内设有下环形槽（26-2），坩埚（25）下端安装到冷却底座（26）上端开口中，且通过下环形槽（26-2）将坩埚（25）的各个冷却孔（25-2）下端连通，冷却底座（26）底端开有和下环形槽（26-2）连通的进气通孔（26-1）；冷速调节环（27）固定安装于坩埚（25）的定位凸缘块（25-5）上，冷速调节环（27）顶面开设有一个或者两个垂直的集气槽孔（27-1），集气槽孔（27-1）底端穿过冷速调节环（27）内圈壁面和坩埚（25）的气体排放孔（25-7）连通；排气盖（28）下端开口，开口内设有上环形槽（28-2），坩埚（25）下端安装到排气盖（28）下端开口中，且通过上环形槽（28-2）将坩埚（25）的各个冷却孔（25-2）上端连通，排气盖（28）底端开有和上环形槽（28-2）连通的出气通孔（28-1），排气盖（28）的出气通孔（28-1）和排气管（30）的一端连通；排气管（30）另一端与外界相连通，将冷却气体排出；排气盖（28）下端开口内的中间设置形成凸台（28-3），凸台（28-3）嵌装于坩埚（25）的中心容腔（25-1）顶端内；

所述的坩埚支撑座（21）内部开设有一个通气管道（21-1），通气管道（21-1）用于定向凝固的冷却气体通入，通气管道（21-1）上端贯穿出坩埚支撑座（21）顶面作为出口并连通到冷却底座（26）的进气通孔（26-1），通气管道（21-1）下端贯穿出坩埚支撑座（21）底部外壁后作为入口，和进气管（29）一端连接，进气管（29）另一端与冷却气源相连；定向凝固试验的冷却气体通过通气管道（21-1）下端入口进入，经通气管道（21-1）上端出口通入坩埚（25）底部，通过对坩埚（25）底部冷却，形成一个沿超重力方向的温度梯度而进行定向凝固，并且通过调控冷却气体的通入流量和发热体（22）产生的温度，调控沿超重力方向的温度梯度分布。

2、根据权利要求 1 所述的一种超重力定向凝固熔铸炉装置，其特征在于：工作过程中发热体（22）产生热量，通过辐射加热上加热炉管（19）和下加热炉管（20），在加热炉管中央形成高温区，通过改变不同高度位置的螺旋状凹槽（22-1）螺距进而改变不同高度位置的发热体（22）在加热炉管间距，配合坩埚支撑座（21）通气管道（21-1）通入的冷却气体温度和流量，从坩埚底部开始冷却，形成一个沿超重力方向的温度梯度。

3、根据权利要求 1 所述的一种超重力定向凝固熔铸炉装置，其特征在于：所述的接线电极（C5）包括内六角螺钉（C51）、铜电极（C52）、电极绝缘套（C53）和电极固定绝缘套（C54）；铜电极（C52）为具有大小两端的结构，铜电极（C52）的大端端面中心开设有固定螺孔(C52-1)，固定螺孔(C52-1)周围的铜电极(C52)的大端端面开设有连接螺孔(C52-2)；电极绝缘套（C53）套装在铜电极（C52）的小端以及小端和大端之间的台阶上，内六角螺钉（C51）穿过连接螺孔（C52-2）连接到电极绝缘套（C53），使得铜电极（C52）通过内六角螺钉（C51）固定安装在电极绝缘套（C53）中，内六角螺钉（C51）与铜电极（C52）之间设置有电极固定绝缘套（C54）；铜电极（C52）小端端部穿出电极绝缘套（C53）后连接到外部的强电源，铜电极（C52）在小端和大端之间的台阶上设有环形的尖锐凸起。

4、根据权利要求 3 所述的一种超重力定向凝固熔铸炉装置，其特征在于：所述的冷却气体阀装置（C9）安装于超重力试验舱，包括内六角螺钉（C91）、通气阀座（C92）、密封套（C93）和密封件（C94）；通气阀座（C92）为具有大小两端的结构，通气阀座（C92）的大端端面中心开设有气管固定螺孔（C92-2），气管固定螺孔（C92-2）和超重力试验舱外部的供气管或排气管密封连接，气管固定螺孔（C92-2）周围的通气阀座（C92）的大端端面开设有安装螺孔（C92-1）；密封套（C93）套装在通气阀座（C92）的小端以及小端和大端之间的台阶上，密封套(C93)开设有和安装螺孔(C92-1)对应的连接螺孔，内六角螺钉(C91)穿过安装螺孔（C92-1）和连接螺孔后连接到超重力试验舱侧壁的螺纹安装孔中，从而将通气阀座（C92）和密封套（C93）安装到超重力试验舱上，内六角螺钉（C91）与通气阀座（C92）的安装螺孔(C92-1)之间设置有密封件(C94)；通气阀座(C92)小端端部穿出密封套(C93)伸入到超重力试验舱内部；超重力试验舱内部的所述通气阀座（C92）小端端面中间开设气

管连接螺孔（C92-3），气管连接螺孔（C92-3）和气管固定螺孔（C92-2）之间通过通气阀座（C92）内部通道连通，气管连接螺孔（C92-3）和超重力试验舱内部的供气支架上的气管密封连接。

5、根据权利要求 4 所述的一种超重力定向凝固熔铸炉装置，其特征在于：所述的通气阀座（C92）和铜电极（C52）一致，大端为圆形，小端为方形；所述的通气阀座（C92）和铜电极（C52）一致，在小端和大端之间的台阶上设有环形的尖锐凸起，尖锐凸起用于在通气阀座（C92）时起到定位作用，同时也可以限制离心机作用下通气阀座（C92）径向/轴向移动。

6、根据权利要求 1 所述的一种超重力定向凝固熔铸炉装置，其特征在于：所述接线电极（C5）的铜电极（C52）的大端为圆形，小端为方形；所述的铜电极（C52）的小端端面设置有接线柱（C52-3），接线柱（C52-3）和超重力装置的强电源的接线端连接。

7、根据权利要求 1 所述的一种超重力定向凝固熔铸炉装置，其特征在于：所述的舱体吊耳（C3）径向伸出的凸耳部分的面开设多个间隔的固定孔，螺栓穿过固定孔连接到超重力离心机的转臂，使得舱体吊耳（C3）通过固定孔及螺栓与超重力离心机的转臂相连。

8、根据权利要求 1 所述的一种超重力定向凝固熔铸炉装置，其特征在于：所述的舱体（C7）外侧壁上开设有真空接口（C4），真空接口（C4）直接和舱体（C7）外部的真空管道连接。

9、根据权利要求 1 所述的一种超重力定向凝固熔铸炉装置，其特征在于：所述的超重力试验舱内还安装有承力架、信号采集器和布线架，高温加热子系统的上加热炉管（19）和下加热炉管（20）内安装待定向凝固的材料试样，并设置有温度传感器，温度传感器连接信号采集器，信号采集器输出的导线通过布线架与弱信号导电滑环连接，再与地面测控中心连接；高温加热子系统设置有一路强电独立回路，一路强电独立回路控制加热内部不同高度位置的发热体（22）进行高温加热，将地面一个强电独立回路通过离心离心机主轴导电滑环接入超重力试验舱的布线架；高温加热子系统设置有一路冷却气体回路，一路冷却气体独立回路控制通入的冷却气体流量，将地面一个冷却气体独立回路通过离心离心机主轴导电滑环接入超重力试验舱的冷却气体管路支架和排气管。

10、根据权利要求 6 所述的一种超重力定向凝固熔铸炉装置，其特征在于：所述的超重力试验舱（C）用于超重力定向凝固试验，设置两个第二安装孔（C7-3），每个第二安装孔（C7-3）均安装有一个冷却气体阀装置，一个冷却气体阀装置作为供气装置，另一个冷却气体阀装置作为排气装置，冷却气体由超重力试验舱外部气源经供气滑环/供气管通入供气装置的气管固定螺孔（C92-2），接着经供气装置的气管连接螺孔（C92-3）进入超重力试验舱（C）内部的通气管道（21-1）下端入口，为降温或冷却装置供气；超重力试验舱（C）内部由通气管道（21-1）上端出口排出的冷却气体经由气管通入排气装置的气管连接螺孔（C92-3），接着经排气装置的气管固定螺孔（C92-2）连通到超重力试验舱（C）外部的排气滑环/排气管排出。

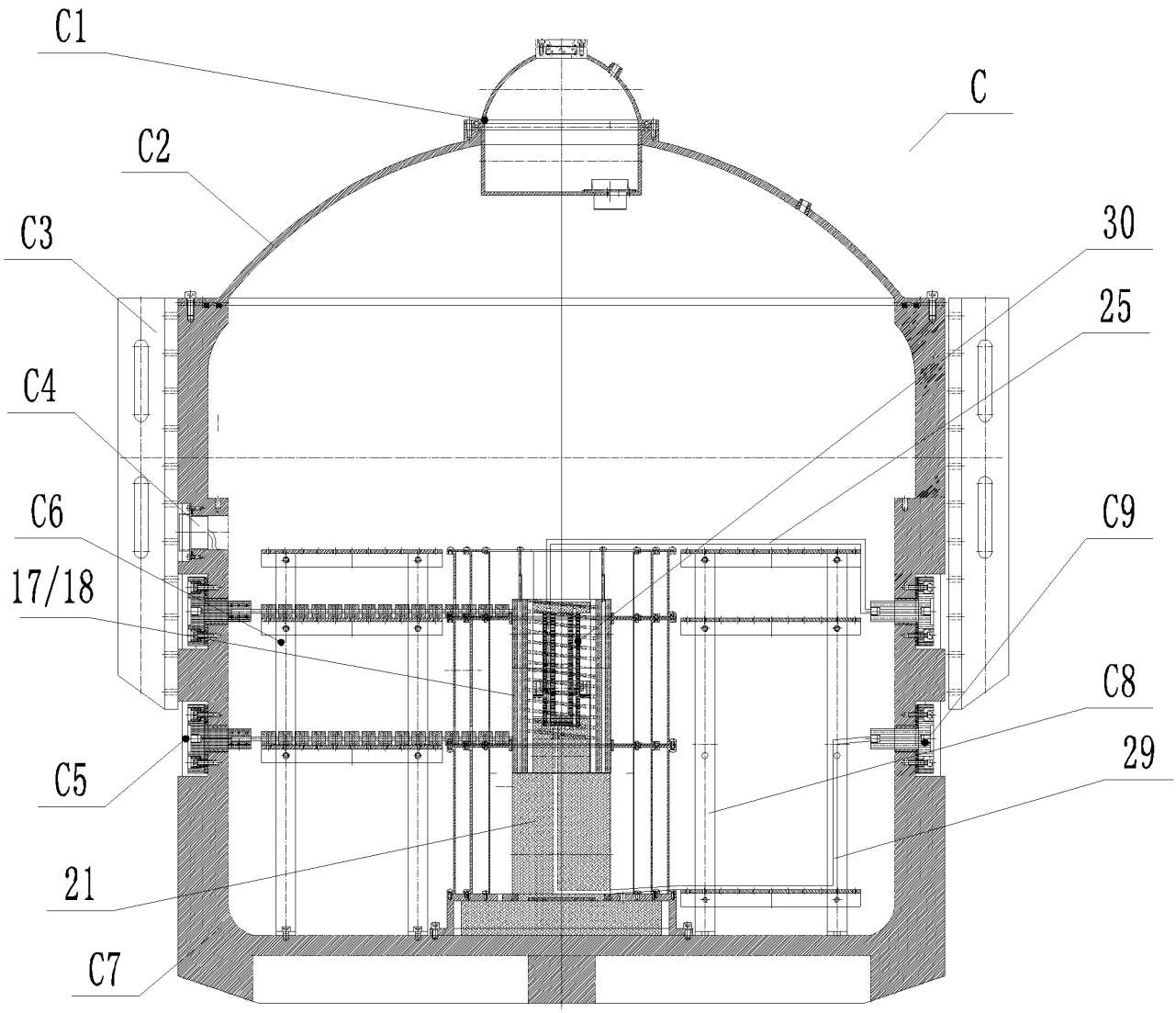


图 1

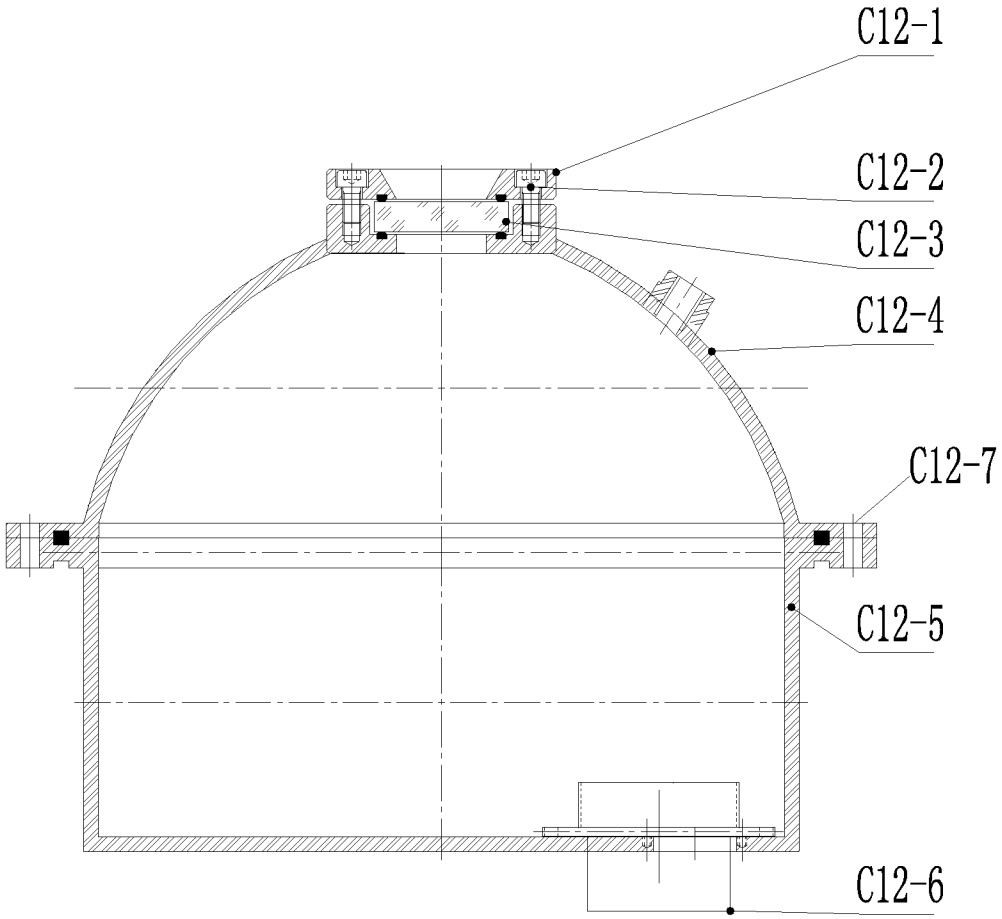


图 2

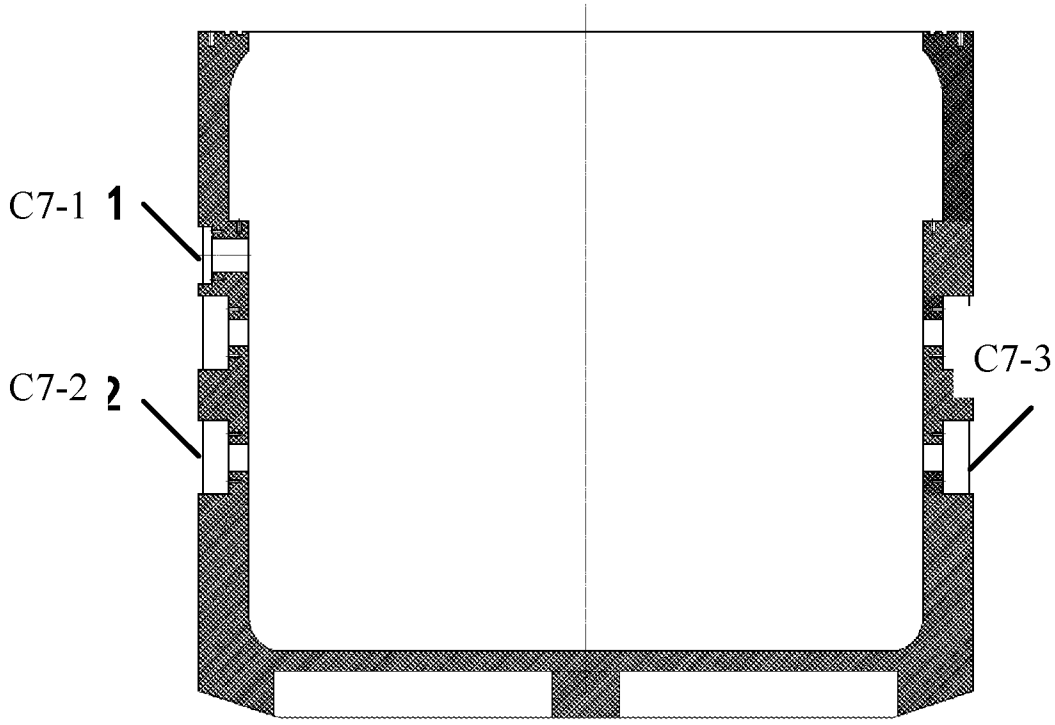


图 3

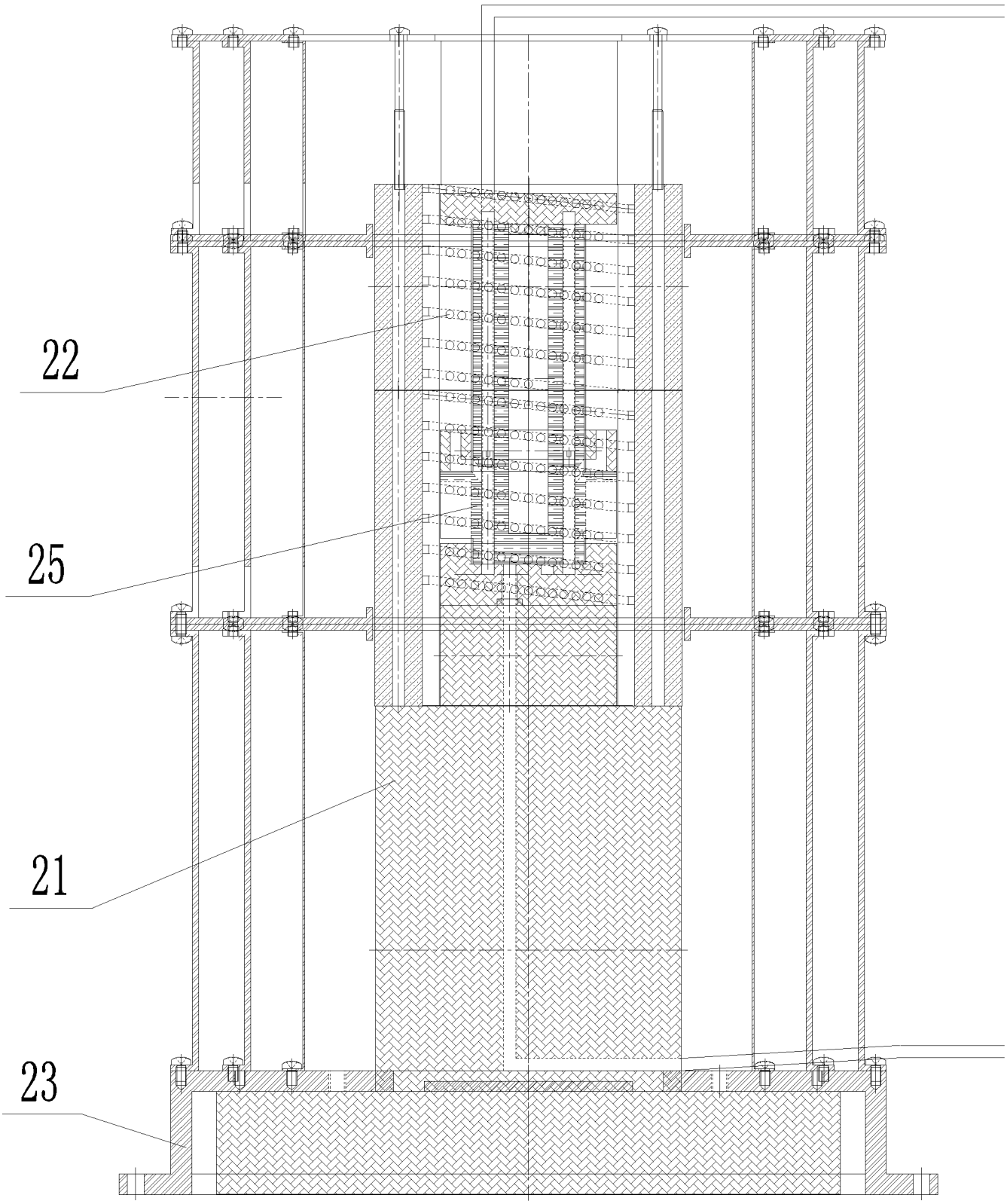


图 4

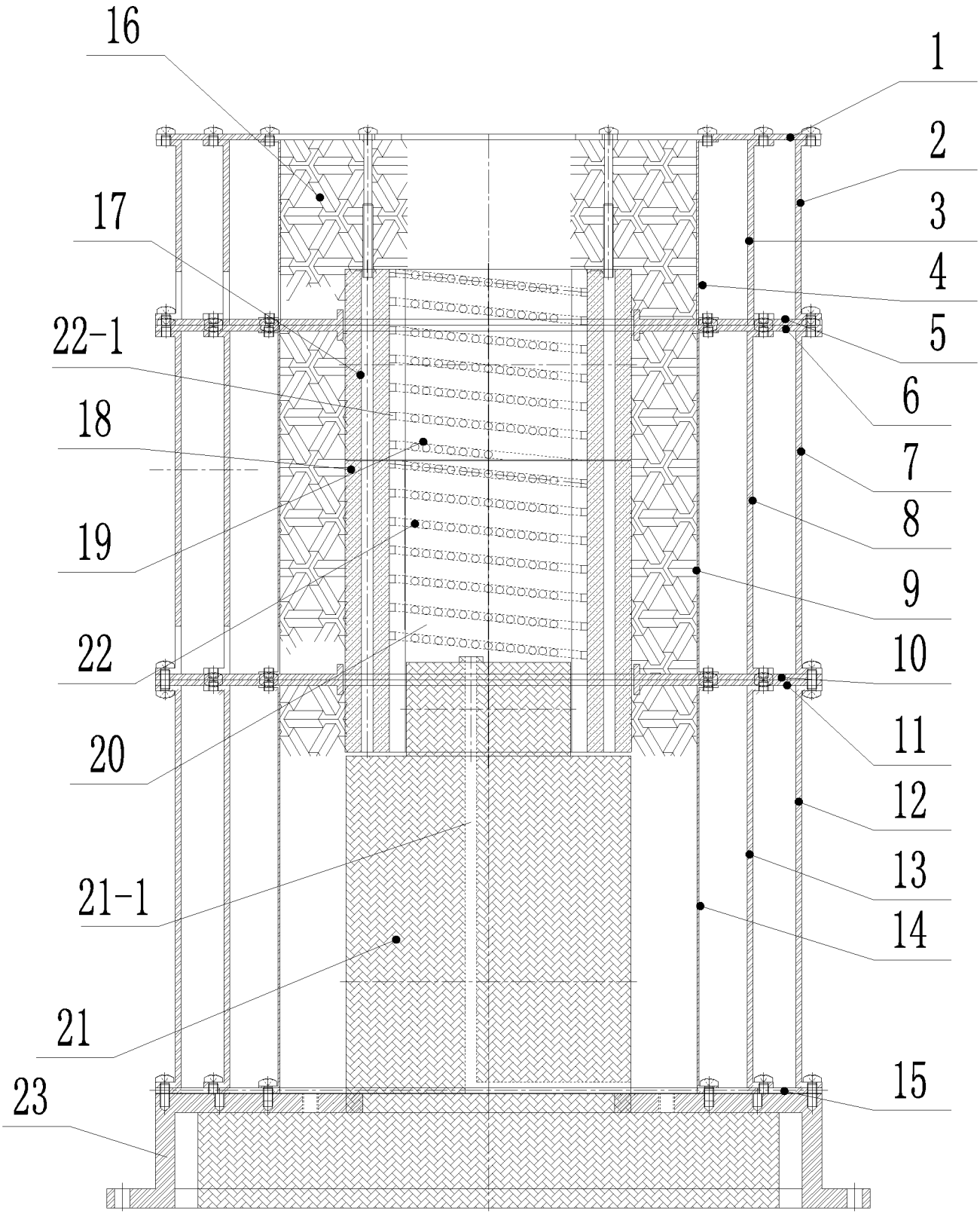


图 5

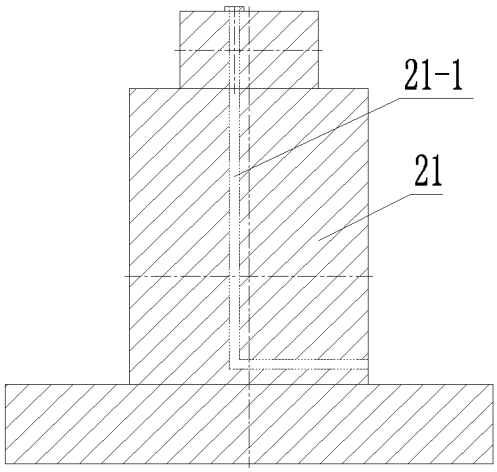

21-1
21

图 6

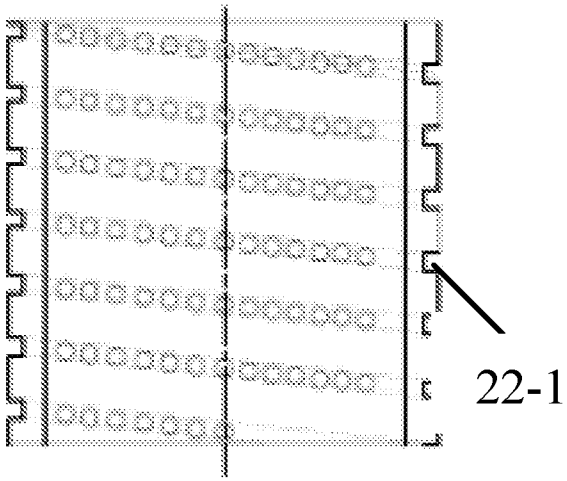

22-1

图 7

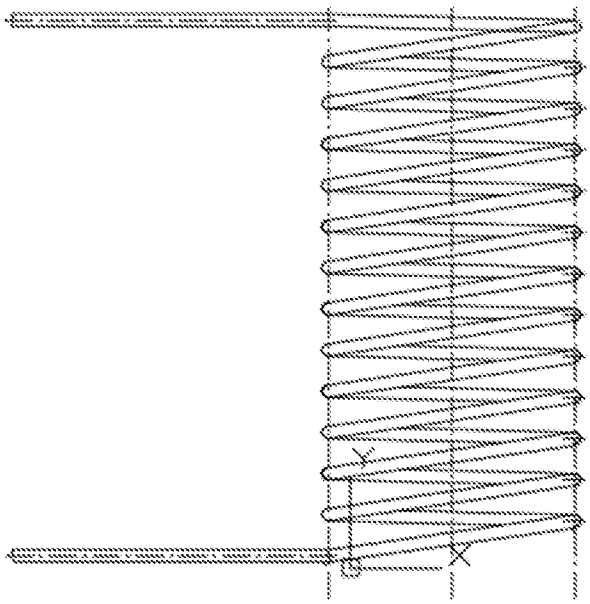


图 8

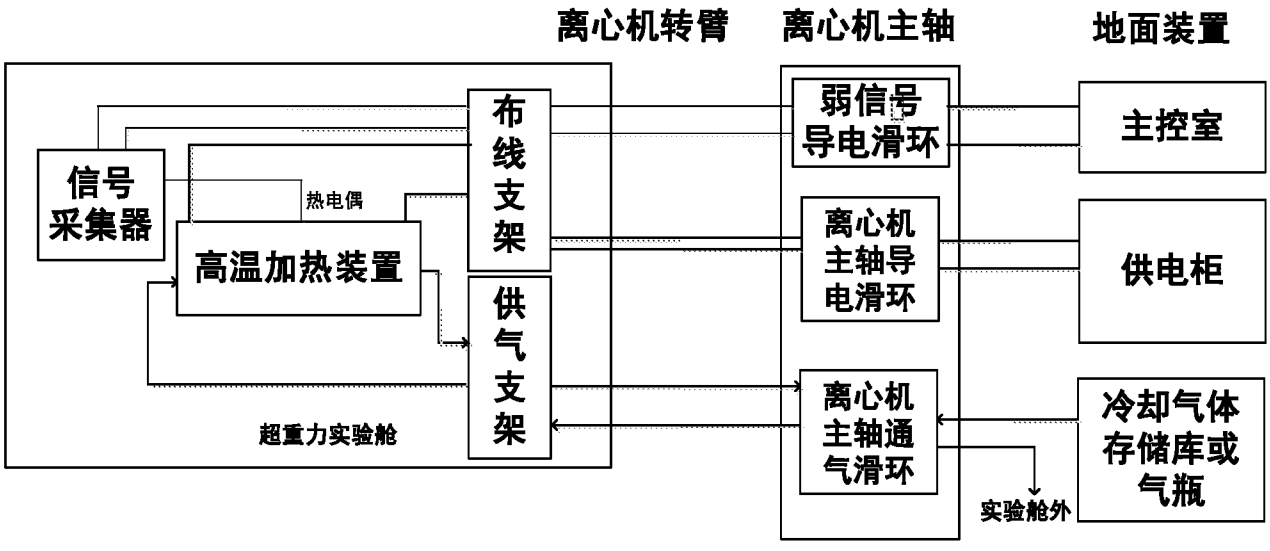

离心机转臂
离心机主轴
地面装置
信号采集器
热电偶
高温加热装置
布线支架
供气支架
超重力实验舱
弱信号导电滑环
离心机主轴导电滑环
离心机主轴通气滑环
主控室
供电柜
冷却气体存储库或气瓶
实验舱外

图 9

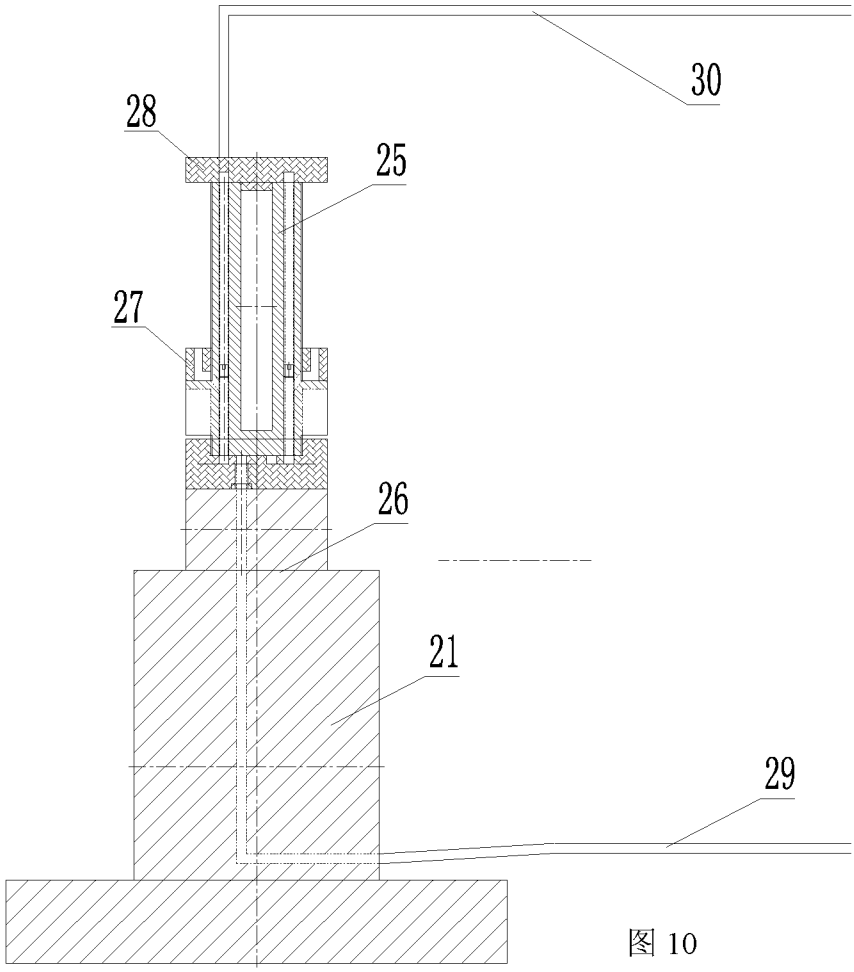


图 10

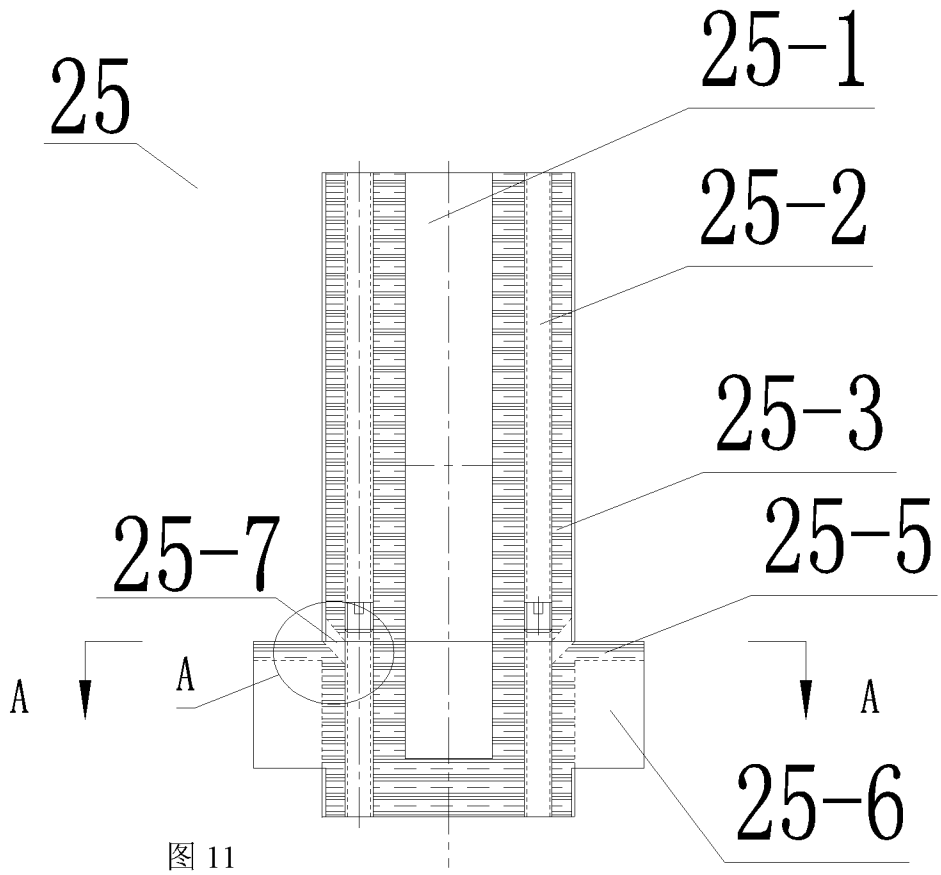


图 11

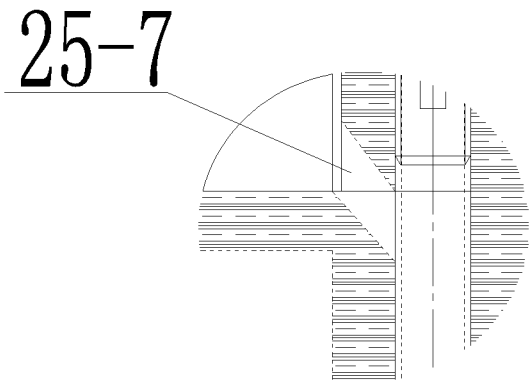


图 12

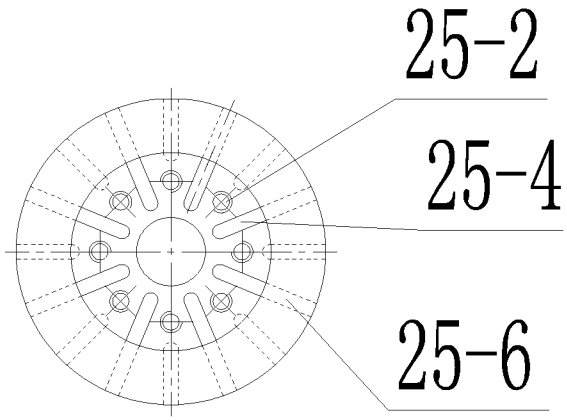


图 13

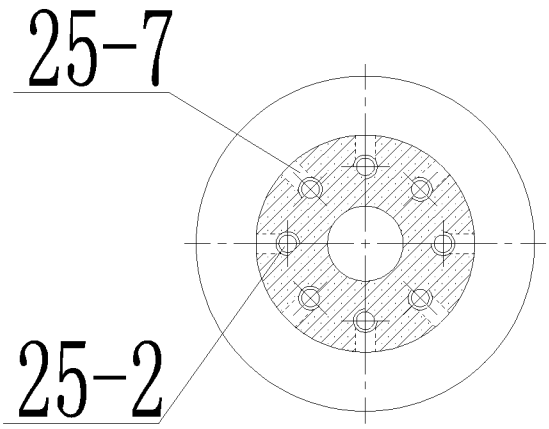


图 14

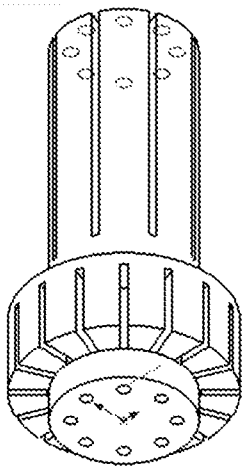


图 15

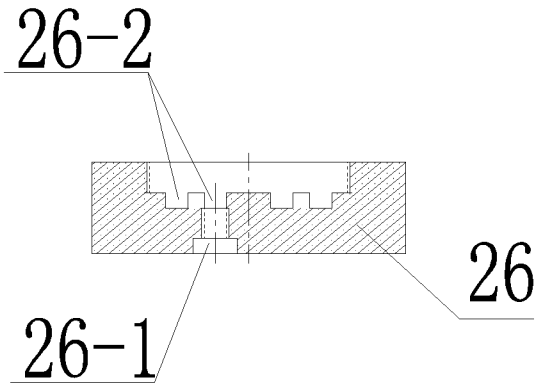


图 16

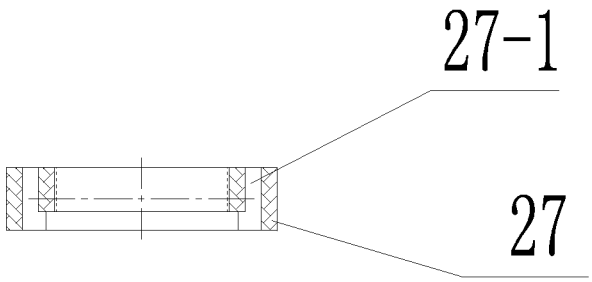


图 17

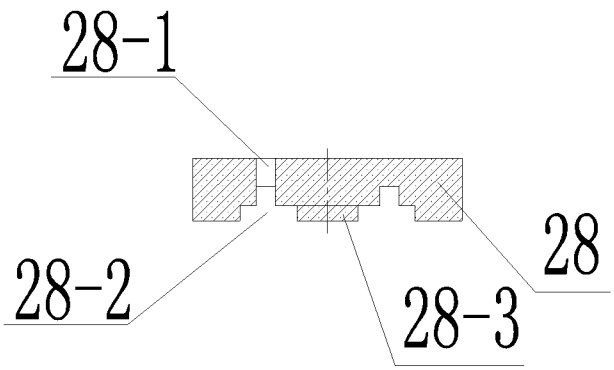


图 18

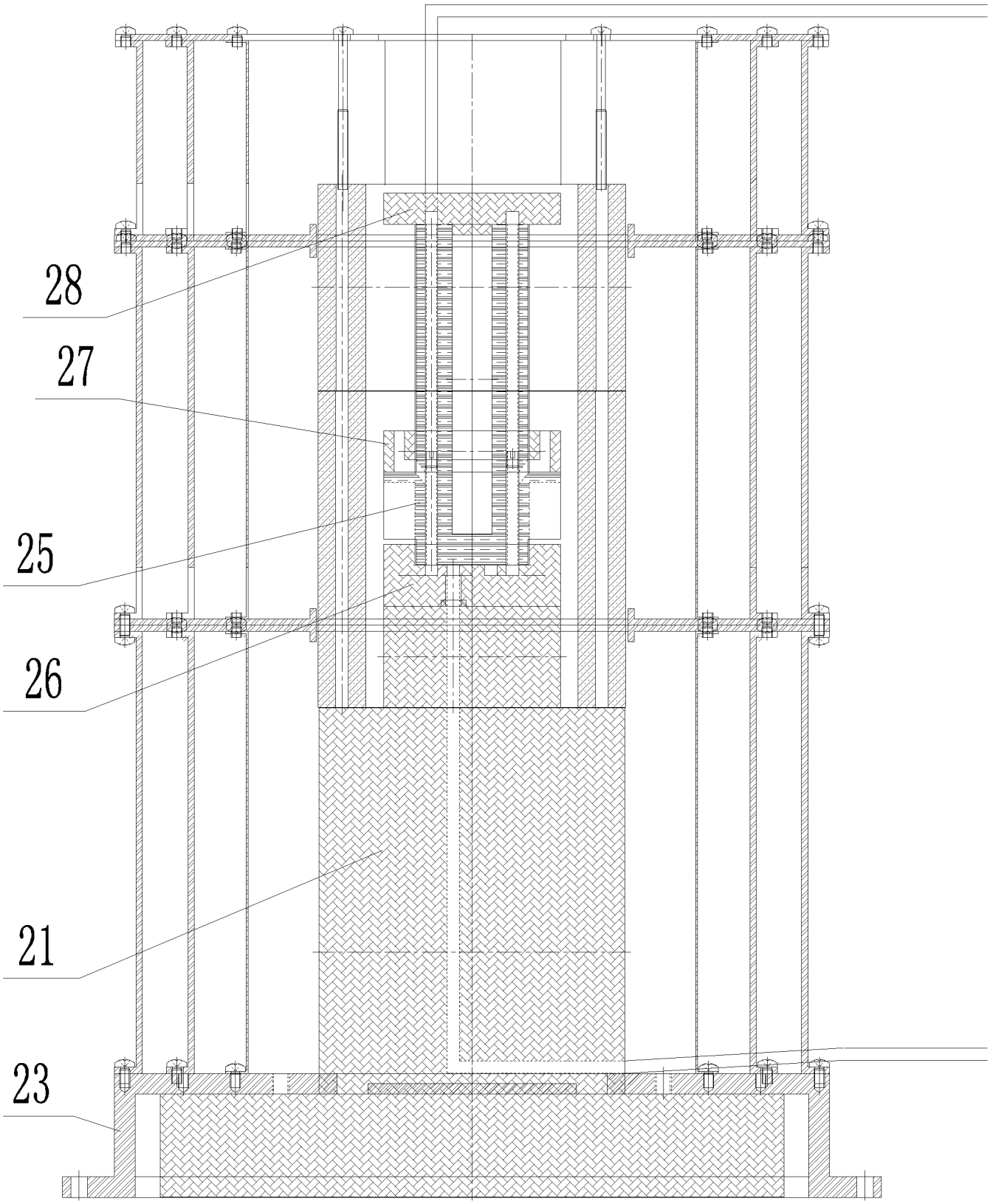


图 19

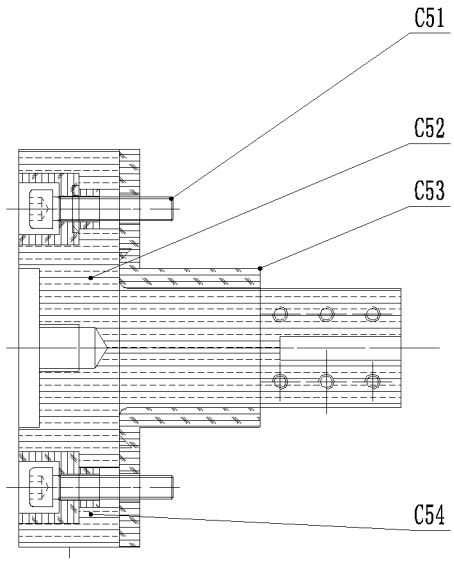


图 20

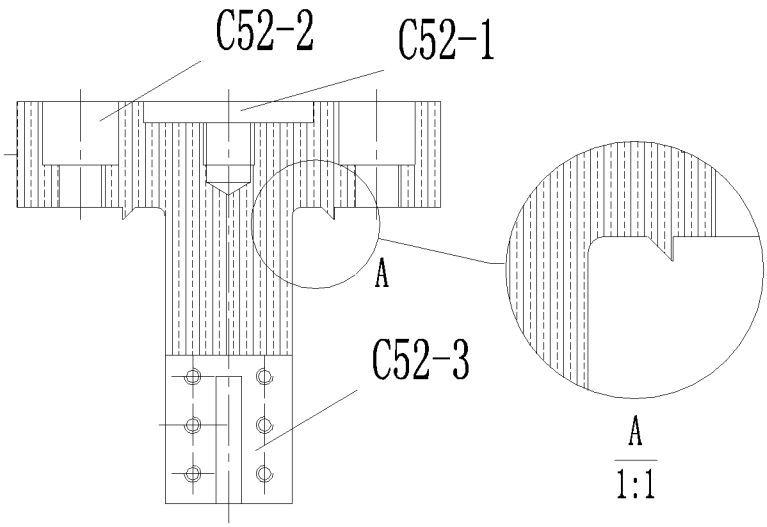


图 21

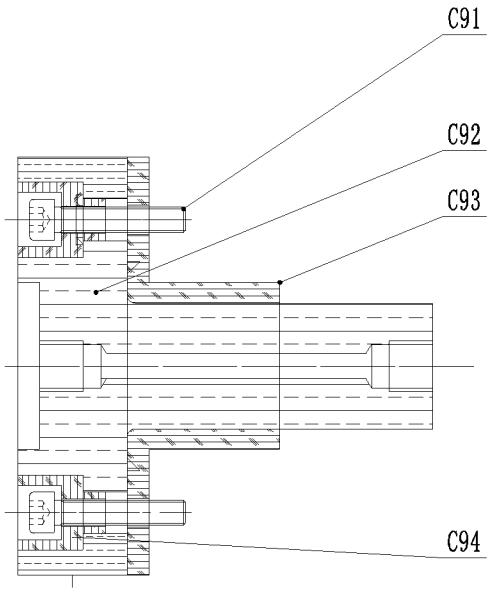


图 22

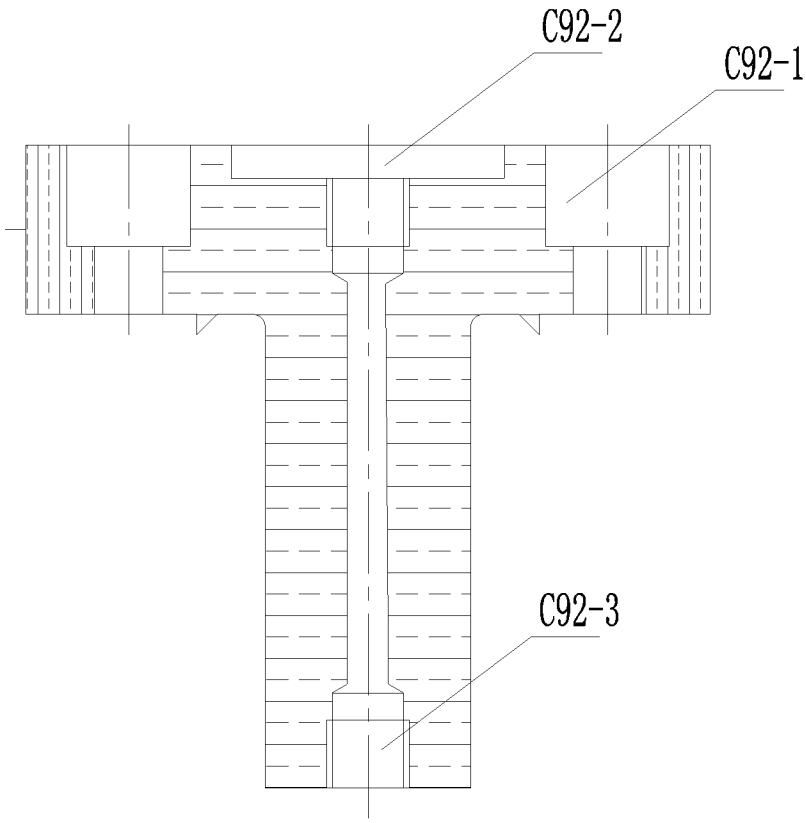

C92-2
C92-1
C92-3

图 23

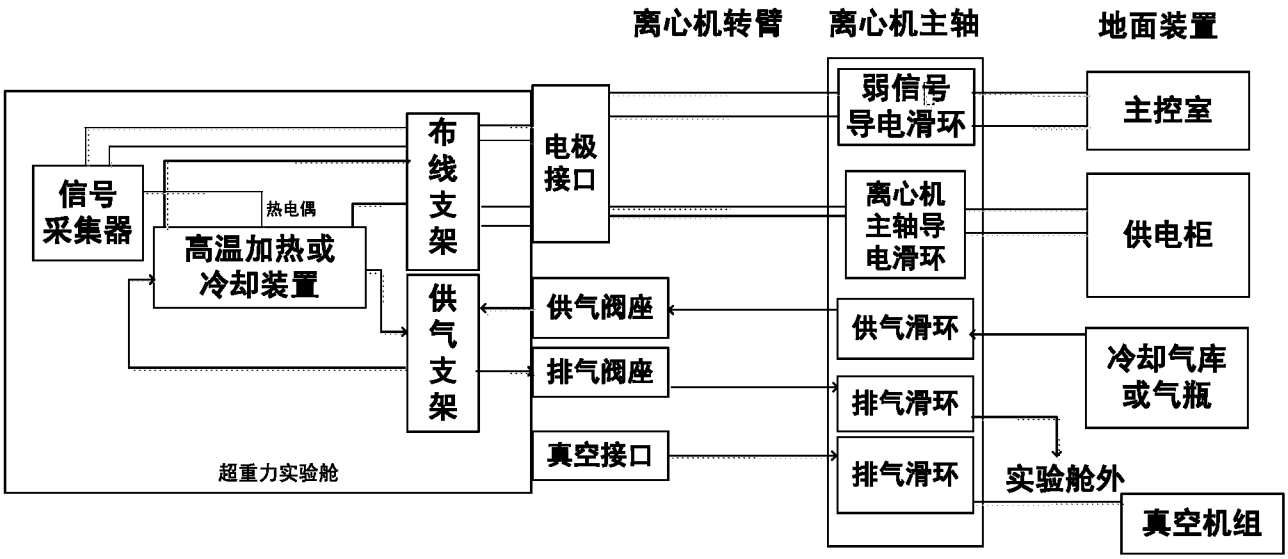

离心机转臂
离心机主轴
地面装置
信号采集器
热电偶
高温加热或冷却装置
布线支架
供气支架
电极接口
供气阀座
排气阀座
真空接口
超重力实验舱
弱信号导电滑环
离心机主轴导电滑环
供气滑环
排气滑环
排气滑环
主控室
供电柜
冷却气库或气瓶
实验舱外
真空机组

图 24

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2020/076971

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C30B 11/00(2006.01)i; C30B 30/00(2006.01)i; C30B 29/52(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)

C30B

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, DWPI, CNKI, PATENTICS, CNABS, CNTXT, ISI web of science; 浙江大学, 韦华, 谢亚丹, 王江伟, 林伟岸, 超重力, 定向凝固, 熔铸, 涡轮, 叶片, 单晶, 炉, 装置, 舱, 冷却, 冷速, 气冷, 加热, 温度梯度, (UYZH) UNIV ZHEJIANG, gravity, hypergravity, directional, solidification, investment, cast+, turbine, blade, crystal, heat+, cool+, gradient, test, chamber, cabin

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PY	CN 110605146 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 24 December 2019 (2019-12-24) claims 1-10	1-10
PY	CN 110614355 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 27 December 2019 (2019-12-27) Claims 1-6	1-10
PY	CN 110788302 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 14 February 2020 (2020-02-14) claims 1-7	1-10
A	CN 109358087 A (SHANGHAI INSTITUTE OF CERAMICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 19 February 2019 (2019-02-19) entire document	1-10
A	EP 2556907 A2 (UNIVERZA V LJUBLJANI) 13 February 2013 (2013-02-13) 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
08 June 2020	**16 June 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
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2020/076971

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 110605146 A	24 December 2019	None	
CN 110614355 A	27 December 2019	None	
CN 110788302 A	14 February 2020	None	
CN 109358087 A	19 February 2019	CN 209264604 U	16 August 2019
EP 2556907 A2	13 February 2013	SI 23365 A	30 November 2011
		EP 2556907 A3	10 June 2015

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2020/076971

A. 主题的分类

C30B 11/00(2006.01)i; C30B 30/00(2006.01)i; C30B 29/52(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)

C30B

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））

EPODOC,DWPI,CNKI,PATENTICS,CNABS,CNTXT,ISI web of science; 浙江大学，韦华，谢亚丹，王江伟，林伟岸，超重力，定向凝固，熔铸，涡轮，叶片，单晶，炉，装置，舱，冷却，冷速，气冷，加热，温度梯度，(UYZH) UNIV ZHEJIANG, gravity, hypergravity, directional, solidification, investment, cast+, turbine, blade, crystal, heat+, cool+,gradient, test, chamber, cabin

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
PY	CN 110605146 A (浙江大学) 2019年 12月 24日 (2019-12-24) 权利要求1-10	1-10
PY	CN 110614355 A (浙江大学) 2019年 12月 27日 (2019-12-27) 权利要求1-6	1-10
PY	CN 110788302 A (浙江大学) 2020年 2月 14日 (2020-02-14) 权利要求1-7	1-10
A	CN 109358087 A (中国科学院上海硅酸盐研究所) 2019年 2月 19日 (2019-02-19) 全文	1-10
A	EP 2556907 A2 (UNIVERZA V LJUBLJANI) 2013年 2月 13日 (2013-02-13) 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
2020年 6月 8日	2020年 6月 16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 沈琏 电话号码 （86-10）62084548

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2020/076971

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 110605146 A	2019年 12月 24日	无	
CN 110614355 A	2019年 12月 27日	无	
CN 110788302 A	2020年 2月 14日	无	
CN 109358087 A	2019年 2月 19日	CN 209264604 U	2019年 8月 16日
EP 2556907 A2	2013年 2月 13日	SI 23365 A	2011年 11月 30日
		EP 2556907 A3	2015年 6月 10日