



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110998759 B

(45) 授权公告日 2022.05.03

(21) 申请号 201880053275.8

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

(22) 申请日 2018.07.17

72002

(65) 同一申请的已公布的文献号

代理人 孟杰雄

申请公布号 CN 110998759 A

(51) Int.CI.

(43) 申请公布日 2020.04.10

H01F 6/04 (2006.01)

(30) 优先权数据

(56) 对比文件

62/533,191 2017.07.17 US

EP 0015728 A1, 1980.09.17

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

EP 0015728 A1, 1980.09.17

2020.02.17

WO 2010/0032171 A1, 2010.03.25

(86) PCT国际申请的申请数据

EP 3016156 A1, 2016.05.04

PCT/EP2018/069343 2018.07.17

EP 0131652 A2, 1985.01.23

(87) PCT国际申请的公布数据

JP 昭60-32375 A, 1985.02.19

W02019/016180 EN 2019.01.24

JP 昭62-299005 A, 1987.12.26

(73) 专利权人 皇家飞利浦有限公司

CN 102149992 A, 2011.08.10

地址 荷兰艾恩德霍芬

CN 1057329 A, 1991.12.25

(72) 发明人 胡泓 J·K·希尔德布兰德

CN 1892931 A, 2007.01.10

G·G·皮尔莱德雷尔

CN 106663514 A, 2017.05.10

CN 102054554 A, 2011.05.11

审查员 王雪

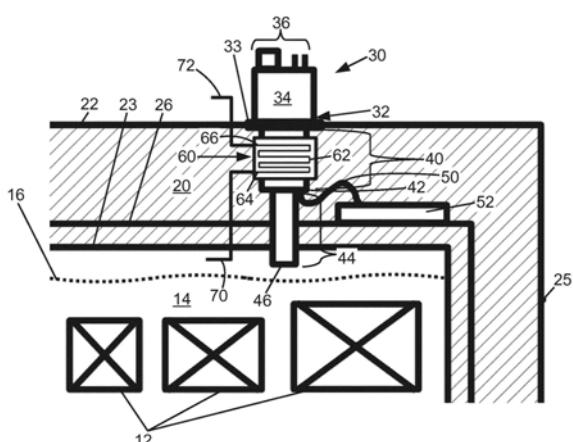
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

## (54) 发明名称

具有通过热交换器冷却的冷头热路径的超导磁体

## (57) 摘要

一种超导磁体包括：液氦储存器(14)；设置在液氦储存器中的超导磁体绕组(12)；以及围绕液氦储存器的真空套(20)。冷头(30)穿过真空套。冷头具有焊接到真空套的外壁(22)的暖端(32)和设置在液氦储存器中的冷站(46)。热交换器(60)设置在真空套内部并且固定到冷头或与冷头集成。热交换器包括流体通道(62)，所述流体通道具有与液氦储存器流体连通的入口(64)，并且具有与环境空气流体连通的出口(66)。在冷头关闭时，气体氦从液氦储存器经由热交换器流到环境空气，从而冷却不操作的冷头。



1. 一种超导磁体,包括:

液氦储存器(14) ;

超导磁体绕组(12),其被设置在所述液氦储存器中;

真空套(20),其围绕所述液氦储存器;

冷头(30),其穿过所述真空套,所述冷头具有被焊接到所述真空套的外壁(22)的暖端(32)和被设置在所述液氦储存器中的冷站(46);以及

热交换器(60),其被设置在所述真空套内部并且被固定到所述冷头或与所述冷头集成,所述热交换器包括流体通道(62),所述流体通道具有与所述液氦储存器流体连通的入口(64)并且具有与环境空气流体连通的出口(66)。

2. 根据权利要求1所述的超导磁体,其中,所述冷头(30)还包括电动驱动组件(34),所述电动驱动组件被设置在所述真空套(20)的外部并且与所述冷头的所述暖端(32)连接,所述驱动组件包括被暴露于环境空气的一个或多个连接器(36)。

3. 根据权利要求1-2中任一项所述的超导磁体,其中,所述冷头(30)包括:

第一级部分(40),其具有为所述冷头的所述暖端(32)的一个端部和定义中间冷站(42)的相对端部;以及

第二级部分(44),其与所述中间冷站连接并且穿透到所述液氦储存器(14)中,以定义被设置在所述液氦储存器中的所述冷站(46);

其中,所述热交换器(60)被固定到至少所述第一级部分或与至少所述第一级部分集成。

4. 根据权利要求3所述的超导磁体,其中,所述热交换器(60)被固定到所述第一级部分(40),而不被固定到所述第二级部分(44)。

5. 根据权利要求3所述的超导磁体,其中,所述热交换器包括:

第一热交换器部分(60<sub>1</sub>),其被固定到所述冷头(30)的所述第一级部分(40)或与所述冷头(30)的所述第一级部分(40)集成;以及

第二热交换器部分(60<sub>2</sub>),其被固定到所述冷头的所述第二级部分(44)或与所述冷头的所述第二级部分(44)集成。

6. 根据权利要求5所述的超导磁体,其中:

所述第二热交换器部分(60<sub>2</sub>)包括所述热交换器的与所述液氦储存器(14)流体连通的所述入口(64);

所述第一热交换器部分(60<sub>1</sub>)包括所述热交换器的与环境空气流体连通的所述出口(66);并且

所述热交换器(60)还包括将所述第一热交换器部分与所述第二热交换器部分串联连接的流体导管(74)。

7. 根据权利要求3-6中任一项所述的超导磁体,还包括:

热屏蔽(26),其被设置在所述真空套(20)中并且围绕所述液氦储存器(14);

其中,所述中间冷站(42)与所述热屏蔽(26)热接触。

8. 根据权利要求1-7中任一项所述的超导磁体,其中,所述热交换器还包括:

入口流体导管(70),其穿过在所述真空套(20)与所述液氦储存器(14)之间共享的内壁(23),所述入口流体导管提供所述热交换器(60)的所述流体通道(62)的所述入口(64)与所

述液氦储存器之间的流体连通。

9. 根据权利要求1-8中任一项所述的超导磁体,其中,所述热交换器还包括:

出口流体导管(72),其穿过所述真空套(20)的所述外壁(22),并且提供所述热交换器(60)的所述流体通道(62)的所述出口(66)与环境空气之间的流体连通。

10. 一种磁共振成像(MRI)设备,包括:

根据权利要求1-9中任一项所述的超导磁体,其在形状上通常是圆柱形并且定义水平腔(18);以及

一组磁场梯度线圈(54),其被布置为将磁场梯度叠加在由所述超导磁体在所述水平腔中生成的静磁场上。

11. 一种结合超导磁体执行的方法,所述超导磁体包括:液氦储存器(14);超导磁体绕组(12),其被设置在所述液氦储存器中;真空套(20),其围绕所述液氦储存器;冷头(30),其从所述冷头的被焊接到所述真空套的外壁(22)的暖端(32)穿过所述真空套到被设置在所述液氦储存器中的冷站(46);以及热交换器(60),其被设置在所述真空套内部并且被固定到所述冷头或与所述冷头集成,所述热交换器具有与所述液氦储存器流体连通的入口(64)和与环境空气流体连通的出口(66),所述方法包括:

关闭所述冷头;并且

在所述冷头被关闭时使来自所述液氦储存器的气体氦经由所述热交换器流动到环境空气。

12. 根据权利要求11所述的方法,还包括:

在所述冷头(30)被关闭时运输所述超导磁体,从而来自所述液氦储存器(14)的气体氦经由所述热交换器(60)到环境空气的所述流动减少所述运输期间的氦蒸发。

13. 一种冷头(30),包括:

第一级部分(40),其具有暖端(32)和相对端,所述相对端定义中间冷站(42);

第二级部分(44),其具有与所述中间冷站连接的近端和定义冷站(46)的远端;以及

热交换器(60),其被固定到至少所述第一级部分或与至少所述第一级部分集成,所述热交换器包括具有入口(64)并且具有出口(66)的流体通道(62),所述入口被设置在所述热交换器的底端处以用于与液氦储存器流体连通,所述出口被设置在所述热交换器的上端处以用于与环境空气流体连通。

14. 根据权利要求13所述的冷头(30),其中,所述热交换器包括:

第一热交换器部分(60<sub>1</sub>),其被固定到所述冷头的所述第一级部分(40)或与所述冷头的所述第一级部分(40)集成;以及

第二热交换器部分(60<sub>2</sub>),其被固定到所述冷头的所述第二级部分(44)或与所述冷头的所述第二级部分(44)集成。

15. 根据权利要求14所述的冷头(30),其中:

所述第二热交换器部分(60<sub>2</sub>)包括所述热交换器的所述入口(64);

所述第一热交换器部分(60<sub>1</sub>)包括所述热交换器的所述出口(66);并且

所述热交换器还包括将所述第一热交换器部分与所述第二热交换器部分串联连接的流体导管(74)。

## 具有通过热交换器冷却的冷头热路径的超导磁体

### 技术领域

[0001] 以下总体上涉及超导磁体技术、磁共振成像 (MRI) 技术、热管理技术以及相关技术。

### 背景技术

[0002] 在用于磁共振成像 (MRI) 系统的典型超导磁体中,超导绕组浸入由真空套包围的 LHe 储存器中所包含的液氦 (LHe) 中。片状材料的高电导率热屏蔽被设置在真空套中,以围绕 LHe 储存器。制造后,抽真空,并在 LHe 储存器填充有 LHe。为了将 LHe 维持在低温 (即低于 4K), 使用冷头为 LHe 容器提供制冷。冷头的第一级穿透到真空空间中,并且第一级冷站通过高导热链路连接到隔热板,该高导热链路与附接到隔热板的热母线连接。冷头的第二级继续进入 LHe 空间,以设置在 LHe 储存器中 LHe 水平以上的气态 He 超压中。在运送期间,冷头关闭并且磁体在装载 LHe 填料的情况下运送。在关闭冷头的情况下,依赖于真空套提供足够的热隔离,以在运送期间将 LHe 填料保持在其液态下。

[0003] 以下公开了新的并且改进的系统和方法。

### 发明内容

[0004] 在一个公开的方面中,一种超导磁体,包括:液氦储存器;设置在液氦储存器中的超导磁体绕组;以及围绕液氦储存器的真空套。冷头穿过真空套。冷头具有焊接到真空套的外壁的暖端和设置在液氦储存器中的冷站。热交换器设置在真空套的内部并且固定到冷头或与冷头集成。热交换器包括流体通道,所述流体通道具有与液氦储存器流体连通的入口和与环境空气流体连通的出口。

[0005] 在利用前述超导磁体的公开方法方面中,在关闭冷头时,气体氦经由热交换器从液氦储存器流到环境空气,从而冷却非操作冷头。因此,例如,在关闭冷头时运输超导磁体期间,气体氦从液氦储存器经由热交换器流到环境空气减少在运输期间的氦蒸发。

[0006] 在另一个公开的方面中,冷头包括:第一级部分,其具有暖端和定义第一级冷站的相对端;第二级部分,其具有与第一级冷站连接的近端和定义第二级冷站的远端;以及热交换器,其固定到至少第一级部分或与其集成。热交换器包括具有入口和出口的流体通道。

[0007] 一个优点在于提供一种具有减少的液体氦 (LHe) 蒸发的超导磁体。

[0008] 另一个优点在于,提供一种在冷头关闭的延长的间隔期间降低失超可能性的超导磁体。

[0009] 另一个优点在于提供了一种可以在 LHe 填料的情况下在更长的距离上运输的超导磁体。

[0010] 另一个优点在于提供一种超导磁体,其可以使其冷头在更延长的时间间隔内关闭,以方便更长距离的运输、延长的维护等。

[0011] 另一个优点在于提供一种在冷头关闭或不操作的间隔期间具有减少的液氦蒸发的超导磁体。

[0012] 给定的实施例可以不提供任何前述优点,可以提供前述优点中的一个、两个、更多或所有前述优点,和/或可以提供其他优点,如对于本领域的普通技术人员而言在阅读和理解本公开后将变得显而易见的。

## 附图说明

[0013] 本发明可以采取各种部件和部件布置的形式,并且可以采取各种步骤和各步骤安排的形式。附图仅出于图示优选实施例的目的,而不应被解释为对本发明的限制。

[0014] 图1图解地图示了磁共振成像(MRI)系统的侧视截面视图,所述磁共振成像系统包括具有固定到冷头的第一级或与冷头的第一级集成的热交换器的冷头。

[0015] 图2图解地图示了描绘冷头和热交换器的图1的侧视截面视图的一部分的放大视图。

[0016] 图3图解地图示了具有变型实施例的图2的放大视图,其中,热交换器固定到冷头的第一级和第二级两者或与冷头的第一级和第二级两者集成。

[0017] 图4图解地图示了利用液氦(LHe)向图1的超导磁体填料并将其从工厂运输到目的地的过程。

## 具体实施方式

[0018] 如先前指出的,在填充LHe储存器后,关闭冷头,并在装载LHe填料并抽真空的情况下将MR磁体运送到目的地。如果通过空运,则在整个运送时间间隔期间冷头保持关闭。如果通过船运输,则MR磁体能够被冷藏;然而,甚至在这种情况下,在关闭冷头期间,在进出船厂的装卸和货车运输期间,存在延长的幅时间间隔。当没有主动冷藏时,LHe会慢慢蒸发,例如经由提供的排气路径,例如氦气排气波纹管。

[0019] 冷头通常包括不锈钢圆柱体,所述不锈钢圆柱体包含执行制冷循环(例如,使用气体氦作为工作低温流体)的电机操作的移位器以及内部铜屏蔽。安装在磁体上的冷头穿过真空套,并且具有焊接到真空套的外壁的暖端和设置在液氦储存器中的冷站。在通常采用的两级冷头中,存在中间冷站,所述中间冷站被定位于在暖端和设置在液氦储存器中的冷站之间的中间位置处,例如,在真空套内部。在该配置中,中间冷站通常被称为第一级冷站,而设置在液氦储存器中的冷站被称为第二级冷站。第一级冷头处于高于第二级冷站的温度处(尽管仍远低于环境温度)。在冷头操作期间,制冷循环进行操作以将不锈钢圆体冷却至低温,例如,在一些市售冷头中为~4K-10K,液氦储存器中的远端被冷却至最冷的温度(因此形成第二级冷站)。

[0020] 然而,当冷头停止操作时,不锈钢圆柱体,并且特别是第一级和第二级冷站加热。这创建热泄漏路径,其可以将热量从焊接到真空套的外壁的暖端传导到液氦储存器中的第二级冷站,从而加热LHe。这导致LHe的更快蒸发。因此,由停止的冷头形成的热泄漏路径能够限制运送距离或以其他方式约束运送选择。

[0021] 任何时间超导磁体的冷头在延长的时间段内关闭时,例如,在维护期间,在延长停电期间,在MRI系统重新定位期间等等,类似的问题能够出现。由于超导线圈连续承载超导电流,因此LHe损耗具有潜力导致转变出超导状态,称为MR磁体的“失超”。

[0022] 在本文公开的改进中,热交换器被固定到冷头(或者备选地,可以与冷头集成形

成,例如,被集成到不锈钢圆柱体中)。热交换器具有:入口,其经由管道或其他流体导管连接到LHe储存器中的气体氦超压,以及出口,其排放到环境中。因此,气体He(其在LHe储存器内处于接近LHe的沸点的低温,即~4K)在通向大气之前流过热交换器,从而冷却冷头并减少或消除了由冷头呈现的热泄漏路径。这具有利用冷气体He的显著冷却能力的优点,以在关闭冷头时的时间间隔内对冷头(并且更具体地是其不锈钢圆柱体壳体)提供持续的冷却。

[0023] 参考图1,示出了采用超导磁体的磁共振成像(MRI)设备10的侧视截面视图。磁体包括设置在液氦(LHe)储存器14中的超导磁体绕组12,LHe储存器14大部分填充有LHe;然而,在LHe水平16之上存在气态氦(气体He)超压。说明性MRI设备10采用水平膛磁体,其中,超导磁体在形状上通常为圆柱形,并且围绕(即定义)水平膛18;然而,也预期其他磁体几何结构。为了提供LHe储存器14的热隔离,真空套20围绕LHe储存器14。真空套20包括外壁22和内壁23。说明性的内壁23在LHe储存器14和真空套20之间共享(即形成LHe储存器14和真空套20之间的边界)。在备选实施例中,LHe储存器和真空套可在该边界处具有分开的壁,该壁被焊接在一起或以其他方式重合。真空套20还包括足以提供其端部的真空密封的侧壁24、25等。在图1中用阴影线图解地指示了由真空套20包含的真空体积。由坚固的导热材料(例如铝合金薄板金属(或铜合金薄板或其他高导热性薄板))制成的热屏蔽26优选设置在真空腔内(即在真空套20内部),并且围绕LHe储存器14。热屏蔽26与内壁23间隔开,以避免从热屏蔽26到LHe储存器14中的热传导。在一些实施例中,热屏蔽26可以包括彼此间隔开的两个或更多个热屏蔽层(未示出的变型),并且最里面的屏蔽层与内壁23间隔开。

[0024] 继续参考图1并且还参考图2,冷头30使用诸如氦的工作流体执行制冷循环以提供对LHe储存器14的主动冷却,并且在说明性实施例中,还提供了热屏蔽26的主动冷却。冷头30穿过真空套20。冷头30的暖端32通过一个或多个焊接部33焊接到真空套的外壁22。(注意,冷头30的一些特征仅在图2所示的放大图中用附图标记来标记)。电动驱动组件34连接到冷头30的暖端32(并且可以示为暖端的一部分),并且包括驱动移位器(未示出内部部件)以引起符合制冷循环的工作流体的循环压缩和膨胀的电机。电动驱动组件34的至少远端在真空套20的外部,并且因此暴露于环境空气,并且该暴露端包括用于附接一条或多条电力线缆和用于注入工作流体的一条或多条软管的连接器36(线缆和软管未示出)。尽管预期其他几何结构,但说明性冷头30优选地是圆柱形冷头。

[0025] 说明性的冷头30是两级设计,其包括:第一级部分40,其具有为暖端32的一端,以及定义中间(或第一级)冷站42的相对端;以及第二级部分44,其与中间(或第一级)冷站42连接并穿透到液氦储存器14中以定义设置在液氦储存器14中的第二级冷站46。第一级部分40和第二级部分44均包括移位器穿过的不锈钢圆柱体壳体,第二级部分44通常具有小于第一级部分40的直径。(也就是说,第一级部分40是具有第一直径的圆柱形,并且第二级部分44是圆柱形,其具有小于第一直径的第二直径。第二级部分44通过内壁23的穿透适当地使用环形焊接部或其他真空密封来密封。

[0026] 第一级冷站42通过高导热链路50与热屏蔽26连接,高导热链接50与焊接、钎焊或其他方式固定到热屏蔽26的热总线52连接。第二级冷站46设置为高于LHe储存器14中LHe水平16的气态He超压。冷头30被设计和操作为将第二级冷站46冷却到低于氦气的液化温度,并将第一级冷站42冷却到更高的温度(尽管足够冷以使热屏蔽26提供对LHe储存器14的有效热屏蔽)。为了提供真空密封,通常将冷头30焊接到外壁22和内壁23。

[0027] 为了操作超导磁体,经由合适的填充线路(未示出)将LHe填料加载到LHe储存器14中。填充线路或另一进入路径还提供插入导电引线或类似物(未示出)以与超导磁体 绕组12连接并对其通电。流过这些绕组12的静态电流生成静态 $B_0$ 磁场,在水平腔磁体的说明性情况下,该磁场为水平的,如图1所指示的。在使超导磁体 绕组12中的电流逐渐增加到被选择为提供期望的 $|B_0|$ 磁场强度的水平之后,接触可以撤出,并且然后超导磁体绕组12的零电阻确保电流以持久的方式继续流动。从这一点开始,应该保持在LHe储存器14中的LHe填料;否则,超导磁体 绕组12能够加热到高于超导磁体 绕组12 的超导临界温度的温度,从而导致磁体失超。(为了在必须移除LHe填料的情况下提供受控的关闭,优选在移除LHe填料之前重新插入导线,并将磁电流逐渐降低至零)。

[0028] MRI设备任选地包括本领域中已知的各种其他部件,例如,一组磁场梯度线圈54,以用于将选定的磁场梯度在x方向、y方向和/或z方向上叠加到 $B_0$ 磁场上;整体式射频(RF)线圈(未示出),以用于激发和/或检测磁共振信号;患者卧榻(未示出),以用于将医学患者或其他成像对象加载到MRI设备10的腔18中以进行成像,等等。

[0029] 当冷头操作时,冷头30有利地冷却LHe储存器14。然而,冷头偶尔会关闭。这可以有意进行以准备维护,运送磁体等,或者由于一些故障而可能无意中发生。无论何时在任何长时间内关闭冷头,它都会开始预热并产生热泄漏路径,通过该路径,来自与暖端32和电动驱动组件 34接触的环境空气中的热量可以传导到LHe储存器14中。因此,冷头30在关闭时变成热负荷。

[0030] 现在特别参考图2,通过提供热交换器60来缓解由非操作冷头30引起的热泄漏路径,该热交换器设置在真空套20内部并且固定到冷头30或与冷头30集成。热交换器60包括流体通道62,流体通道62具有与LHe储存器14流体连通的入口64,并且具有与环境空气流体连通的出口66。为此,在说明性实施例中,入口流体导管70穿过在真空套20和LHe储存器 14之间共享的内壁 23。入口流体导管70在热交换器60的流体通道62 的入口64和LHe储存器 14之间提供流体连通。类似地,出口流体导管72 穿过真空套20的外壁22,并在热交换器60的流体通道62的出口66和环境空气之间提供流体连通。在操作中,来自LHe储存器14的气体氦被气体氦超压注入到入口流体导管70中,并流过流体通道62,并且然后流入出口流体导管72中,以排放到环境空气中。当气体氦流过流体通道62时,其从冷头30吸收热量。

[0031] 为了促进这种热传递,热交换器60的流体通道62优选地为围绕圆柱形冷头30的蛇形或螺旋形以提供大的接触面积。额外地或备选地,流体通道62可以是多通路流体通道,即,流体通道62可以提供多个路径,以使气体氦从入口64流到出口66。热交换器60可以采用用于增强该热传递的任何常规热交换器设计。在一个说明性实施例中,热交换器包括包裹在冷头30周围的金属壳,并且流体通道62被钻,磨或其他方式形成到该金属壳中。在这种方法中,金属壳提供了从流体通道62到圆柱形冷头30的导热路径。为了获得最大的热接触,热交换器60优选地包裹在(说明性的圆柱形)冷头30的整个圆周上。为了制造方便,金属壳可以分成离散的分段,例如,六个弧形分段,每个延伸超过60°弧,相邻分段的入口和出口之间有管连接。代替金属壳,热交换器60可以采用更柔性的另一种导热材料的壳或分段,例如硅类或丙烯酸类导热片,流体通道62是嵌入该片中的管。这些仅仅是合适的热交换器设计的说明性示例。

[0032] 在另一个实施例中,热交换器60与冷头30是集成的。例如,冷头30 可以采用由不

锈钢圆柱体制成的壳体,例如,较大直径的圆柱体形成第一级部分40的壳体,并且较小直径的圆柱体形成第二级部分44的壳体。在这种集成设计中,冷头30的圆柱形不锈钢外壳适当地具有嵌入管,其形成热交换器的流体通道62,并且冷头30的圆柱形不锈钢壳体也形成热交换器60的主体。

[0033] 作为另一个预期的实施例,热交换器60可以包括不锈钢管,其包裹在冷头30周围并且被焊接、钎焊或以其他方式固定到冷头30的圆柱形不锈钢壳体40、44的外表面。该方法直接制造或甚至对现有冷头进行改造,但与其他说明性设计相比具有较小热传递表面积。

[0034] 在图1和图2的实施例中,热交换器60被固定到冷头30的第一级部分40,但是没有被固定到冷头30的第二级部分44。因为热量从环境空气流动进入冷头30的暖端32,仅经由第一级部分40的热交换器60提供冷却(也没有冷却第二级部分44)提供了实质性益处。

[0035] 然而,现在参考图3,变型实施例还经由第二级部分44的热交换器提供冷却。图3的实施例包括与图1相同的超导磁体以及与图1和2相同的冷头30。图3的实施例与图2的实施例不同之处在于,在图3的实施例中,热交换器60<sub>1</sub>、60<sub>2</sub>包括:第一热交换器部分60<sub>1</sub>(具有第一流体通道62<sub>1</sub>),其固定到冷头30的第一级部分40或与之集成;以及附加的第二热交换器部分60<sub>2</sub>(具有第二流体通道62<sub>2</sub>),其固定到冷头30的第二级部分44或与之集成。第二热交换器部分60<sub>2</sub>包括热交换器60<sub>1</sub>、60<sub>2</sub>的入口64,其经由入口流体导管70与LHe储存器流体连通。第一热交换器部分60<sub>1</sub>包括热交换器的出口66,其经由出口流体导管72与环境空气流体连通。热交换器60<sub>1</sub>、60<sub>2</sub>还包括串联连接第一热交换器部分60<sub>1</sub>和第二热交换器部分60<sub>2</sub>的流体导管74。也就是说,气体氦通过第二热交换器部分60<sub>2</sub>流入入口64中,然后通过流体导管74并流入第一热交换器部分60<sub>1</sub>,并且最后从第一热交换器部分60<sub>1</sub>的出口66离开,并且排放到环境空气中。

[0036] 所公开的热交换器60具有提供气体氦超压排放路径和利用LHe箱14中的冷气体He的显著冷却能力以在冷头30关闭时在时间间隔内对冷头30提供冷却的双重益处(或更一般而言,不操作于提供低温冷却)。

[0037] 热交换器60应该是氦防泄漏的,因为从热交换器60泄漏出的任何气体氦会进入由真空套20所包含的真空。过多的气体泄漏到该真空空间中会损害LHe储存器14的热隔离,在极端情况下,这会导致液氦快速沸腾和潜在磁体失超或损坏。

[0038] 参考图4,描述了用于加载LHe填料并传输图1的MRI设备10的超导磁体的过程。从制造的磁体开始,在操作80中,使用外壁22上的合适的真空联接器(图1中未示出)将真空套20排空。在操作81中,将液氦储存器14排空。在操作82中,打开冷头30,并且在操作84中,经由穿过外壁22的填充线路(图1中未示出)加载液氦(LHe)填料。将意识到,操作82、84可以以不同的顺序执行,和/或可以执行本领域已知的额外操作。通常,操作84需要在将LHe流入LHe储存器14中之前从LHe储存器14中排空空气。在用LHe对超导磁体进行装填之后,在操作86中,冷头30被关闭以准备进行(一个或多个)运输操作90,其中,运输超导磁体(填充有LHe填料)。在(一个或多个)操作90期间,热交换器60操作以提供冷头30的冷却,以及提供用于LHe储存器14中的气体氦的超压的排气路径。因为LHe储存器14中的气体氦是高于LHe水平16的超压,气体氦处于高于但相对接近LHe沸腾温度的温度,即在(接近)大气压下约为4K。因此,即使没有冷头30的操作,热交换器60也操作以提供用于冷却非操作冷头30的被动机构,这继而降低了LHe储存器14中的LHe的蒸发速率。这种LHe蒸发速率降低允许较长运输

时间，并且因此较长可实现运输距离。在到达目的地之后，在操作92中，将冷头30重新打开，此后，对LHe储存器14提供主动冷却。

[0039] 尽管所公开的热交换器60与冷头30热耦合的优点在磁体运输期间产生，如参考图4所描述的，但是将意识到，对于冷头30关闭或在其他情况下在延长的时间内不操作的任何流程或情况获得类似的益处，例如在冷头 30在维护期间，在延长停电期间或在损坏或阻止经由冷头30进行主动冷却的冷头30的故障期间等等关闭的情况下。在这种情况下，减少的LHe蒸发降低LHe填料将过度耗尽的可能性，并降低LHe耗尽可能导致磁体失超的可能性。

[0040] 已经参考优选实施例描述了本发明。在阅读和理解了前面的详细描述之后，其他人可能想到修改和变化。本发明旨在被解释为包括所有这样的修改和变化，只要它们落入所附权利要求或其等价方案的范围内。

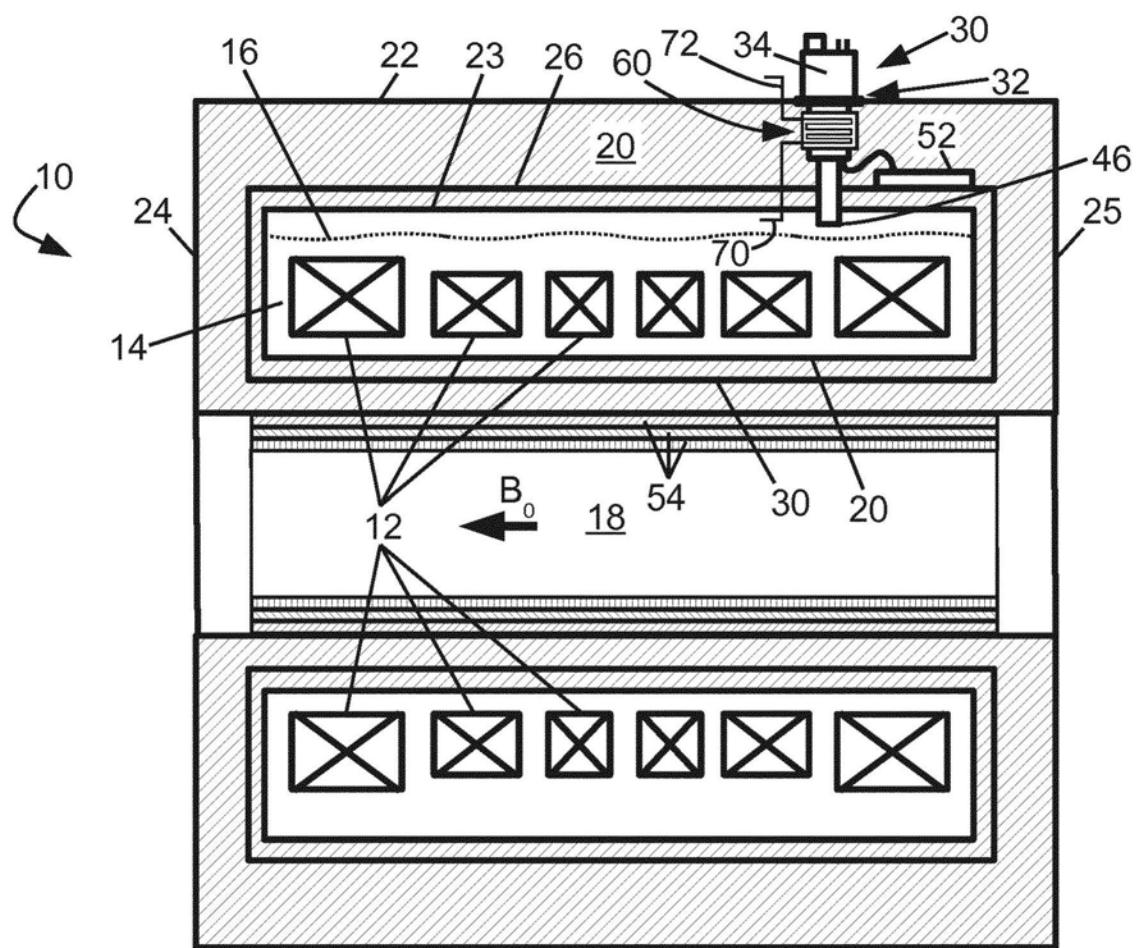


图1

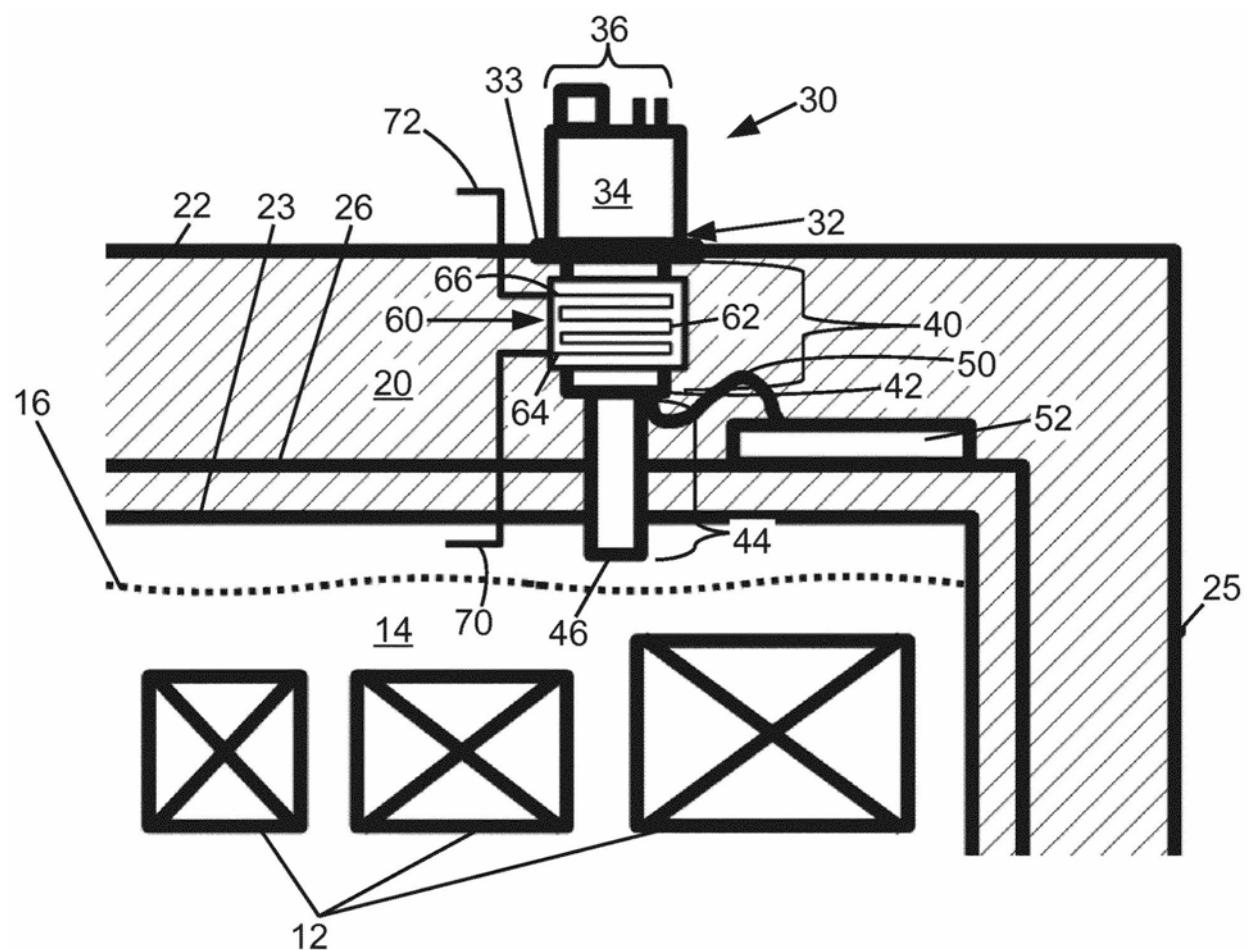


图2

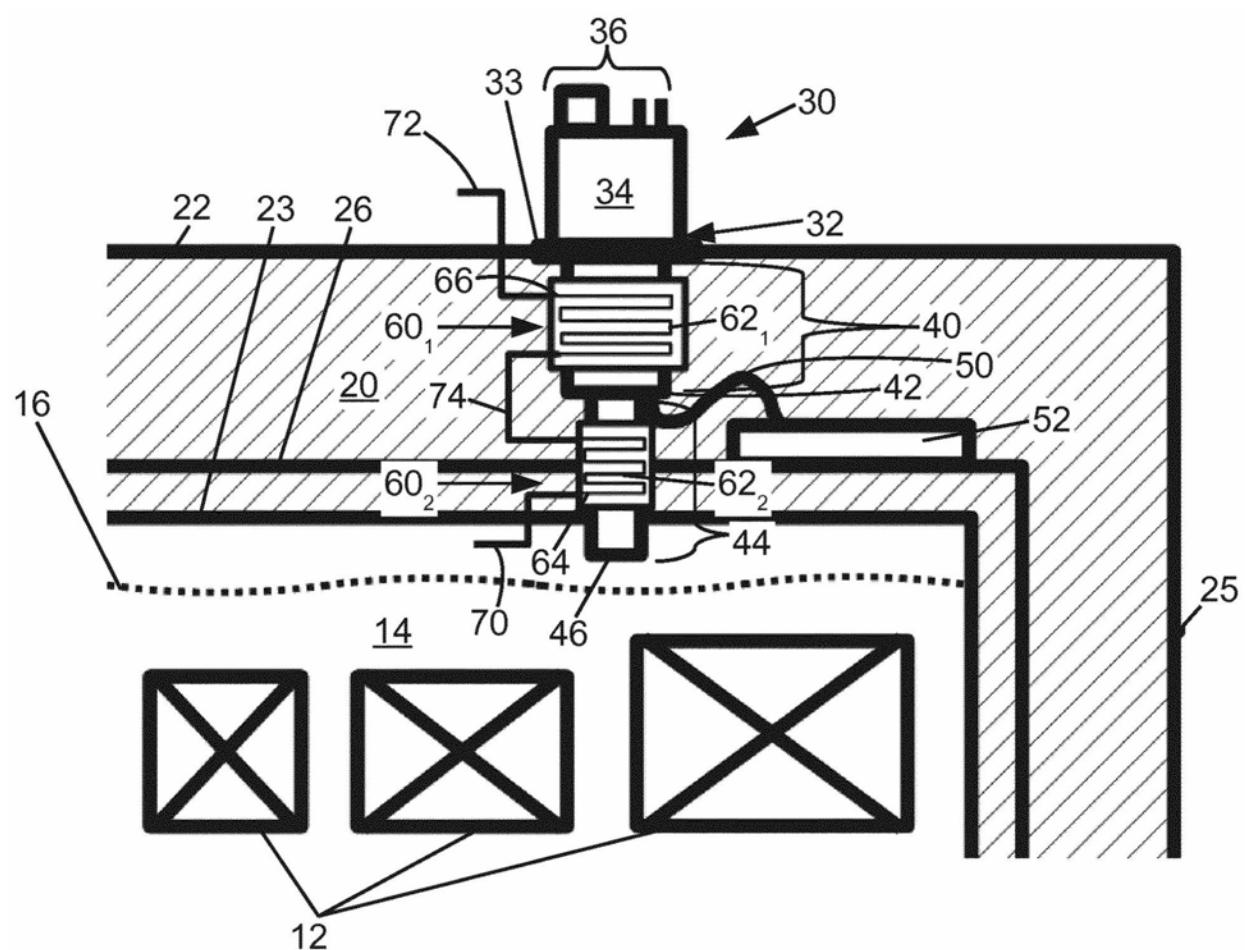


图3

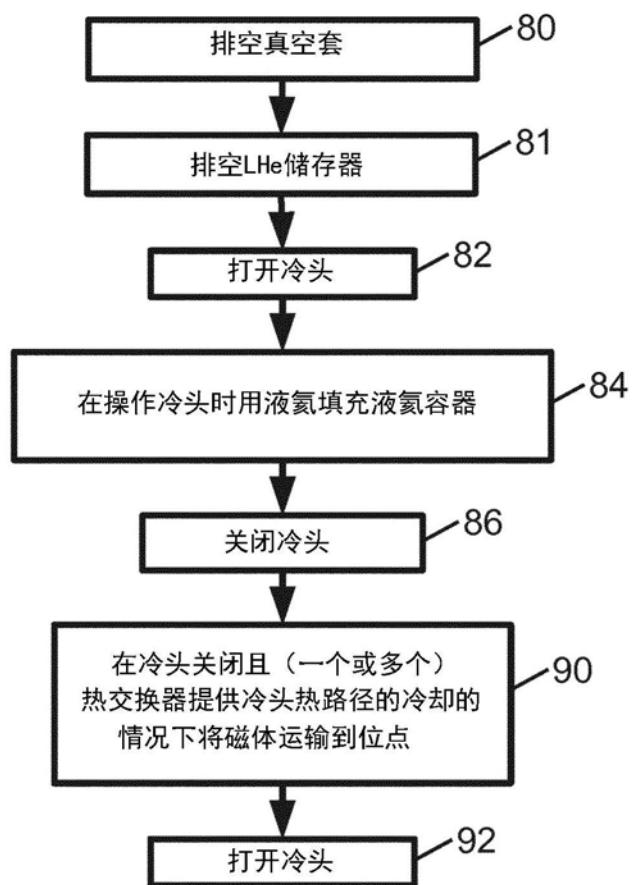


图4