



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103620436 B

(45)授权公告日 2016.08.24

(21)申请号 201280029820.2  
 (22)申请日 2012.03.08  
 (30)优先权数据  
 1106660.2 2011.04.20 GB  
 (85)PCT国际申请进入国家阶段日  
 2013.12.17  
 (86)PCT国际申请的申请数据  
 PCT/EP2012/053977 2012.03.08  
 (87)PCT国际申请的公布数据  
 W02012/143172 EN 2012.10.26  
 (73)专利权人 英国西门子公司  
 地址 英国坎伯利  
 (72)发明人 S. 卡尔维特 M. 克鲁伊普  
 R. 奥米诺 M. 辛普金斯  
 (74)专利代理机构 北京市柳沈律师事务所  
 11105  
 代理人 曲莹

(51)Int.Cl.  
*G01R 33/3815*(2006.01)  
*F17C 13/00*(2006.01)  
*H01F 6/04*(2006.01)  
 (56)对比文件  
 CN 101958173 A, 2011.01.26, 全文.  
 DE 3900725 A1, 1990.07.19, 全文.  
 US 5179338 A, 1993.01.12, 全文.  
 CN 101512687 A, 2009.08.19, 全文.  
 GB 2457524 A, 2009.08.19, 全文.  
 CN 101894652 A, 2010.11.24, 全文.  
 US 2006266053 A1, 2006.11.30, 全文.  
 杨志达 等. G-M制冷机冷却的超导磁体研制及性能试验.《哈尔滨工程大学学报》.2009, 第30卷(第10期),  
 刘立强. 低温技术在大型超导磁体中的应用.《低温工程》.2002, (第129期),  
 审查员 刘晓佩

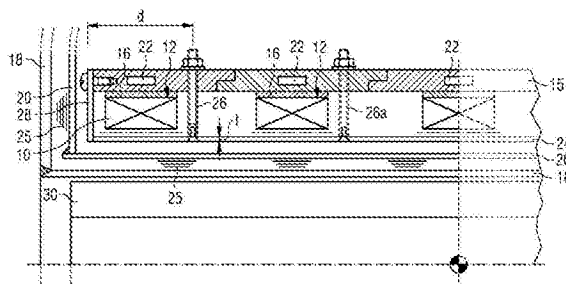
权利要求书2页 说明书8页 附图7页

## (54)发明名称

具有热辐射屏蔽件的超导磁体

## (57)摘要

一种柱形超导磁体,包括由超导线形成的多个沿轴向对齐的环形线圈(10),柱形超导磁体布置成通过经由与线圈机械接触的冷却表面(15)的热传导而冷却。线圈具有位于线圈径向内表面和线圈轴线之间的热辐射屏蔽件(24)。热辐射屏蔽件包括与冷却表面热接触的金属层。



1. 一种柱形超导磁体结构,包括由超导线形成的多个树脂浸渍的沿轴向对齐的环形线圈,所述环形线圈在环形线圈径向外表面处粘结到直径大于该线圈的管状支撑结构,所述柱形超导磁体结构还包括连接到管状支撑结构的用于冷却至极低温的装置,所述线圈具有位于线圈径向内表面和线圈轴线之间的热辐射屏蔽件,

其特征在于,所述热辐射屏蔽件包括金属柱形体,所述金属柱形体以轴向和周向间隔机械地连接到管状支撑结构,并通过热链路而热连接到管状支撑结构,使得金属柱形体与管状支撑结构之间的热阻小于每个线圈与管状支撑结构之间的各个相应热阻。

2. 如权利要求1所述的柱形超导磁体结构,其中,所述金属柱形体沿轴向分为多个柱形体,每个柱形体机械地和热地连接到管状支撑结构。

3. 如权利要求1或2所述的柱形超导磁体结构,其中,所述金属柱形体以0.3m或更小的轴向和周向间隔机械地和热地连接到管状支撑结构。

4. 如权利要求1或2所述的柱形超导磁体结构,其中,所述热辐射屏蔽件包括机械地和热地连接到管状支撑结构的具有第一导电性的第一金属柱形体,具有第二导电性的第二金属覆层被施加到所述柱形体的径向内表面,第二导电性大于第一导电性。

5. 如权利要求4所述的柱形超导磁体结构,其中,第二金属覆层包括具有至少99.999%纯度的铝。

6. 如权利要求1或2所述的柱形超导磁体结构,其中,所述热辐射屏蔽件包括机械地和热地连接到管状支撑结构的金属柱形体,超导线的图案被施加到所述柱形体的径向内表面。

7. 一种柱形超导磁体,包括由超导线形成的多个沿轴向对齐的环形线圈,所述柱形超导磁体布置成通过经由与线圈径向外表面机械接触的管状支撑结构的热传导而冷却,

所述线圈具有位于线圈径向内表面和线圈轴线之间的热辐射屏蔽件,

所述热辐射屏蔽件包括与管状支撑结构热接触的金属层,

其中,所述热辐射屏蔽件包括施加在每个线圈的径向内表面上的金属箔共形层,其中电和热绝缘层插入每个线圈与金属箔共形层之间,

其特征在于,所述金属箔共形层还施加在每个线圈的轴向引导表面上,所述电和热绝缘层还插入在每个线圈与位于轴向引导表面上的相应金属箔共形层之间,使得每个金属箔共形层与管状支撑结构之间的热阻小于每个相应线圈与管状支撑结构之间的热阻。

8. 如权利要求7所述的柱形超导磁体,其中,所述金属箔共形层具有导电性的中断区。

9. 如权利要求8所述的柱形超导磁体,其中,所述导电性的中断区在平行于轴线的方向上被引导,从而限制金属箔共形层的周向导电性。

10. 一种制造如权利要求7所述的柱形超导磁体的方法,包括以下步骤:

-为每个线圈提供模具,所述模具包括轴颈表面和两个环形保持板;

-对于每个线圈,将均具有有限方位角范围的导电的通道件定位在模具内,基本上覆盖模具的由轴颈表面和环形保持板形成的内表面,以形成金属箔共形层;

-对于每个线圈,在通道件的内表面上提供多孔电绝缘材料层;

-将各个线圈缠绕进通道件内的多孔电绝缘材料中;

-将模具的径向外部分定位在线圈上,以完成各个模腔;

-用随后固化的树脂浸渍所述线圈以及多孔电绝缘材料层;以及

-移除轴颈表面和环形保持板。

11. 如权利要求10所述的方法,其中,所述通道件由高纯度铝或超导箔构成。

12. 如权利要求10或11所述的方法,其中,沿轴向延伸的间隙留在相邻通道件之间。

13. 如权利要求10或11所述的方法,其中,邻近的通道件定位成重叠,电隔离层插入邻近的通道件之间,以防止一个通道件与下一个通道件之间的电传导。

14. 如权利要求10或11所述的方法,其中,玻璃布壳层在模腔内缠绕在线圈上,位于线圈的径向外表面与模具的径向外部的径向内表面之间,在浸渍步骤期间用树脂浸渍所述壳层。

15. 如权利要求10或11所述的方法,其中,玻璃珠壳层设置在模腔内,位于线圈的径向外表面与模具的径向外部的径向内表面之间,在浸渍步骤期间用树脂浸渍所述壳层。

16. 如权利要求10或11所述的方法,其中,所述模具的径向外部是支撑结构的一部分,处理模具的径向外部的径向内表面,以在支撑结构的所述部分与树脂之间提供良好的粘结。

17. 如权利要求10或11所述的方法,其中,用释放组合物处理模具的径向外部的径向内表面,以确保所述径向内表面不会粘接到线圈的树脂,在单独粘结步骤中将如此形成的树脂浸渍线圈粘接到另一支撑结构。

18. 如权利要求10或11所述的方法,其中,每个通道件的边缘从模具突出,并在浸渍步骤期间保留在树脂高度的上方。

19. 一种制造如权利要求7所述的柱形超导磁体的方法,包括以下步骤:

-缠绕、浸渍超导线圈,并将所述超导线圈粘接到导热管状支撑结构;

-将电隔离层施加在线圈的轴向和径向内表面上;

-将通道件固定在电隔离层上,以形成金属箔共形层并覆盖线圈的轴向和径向内表面。

20. 如权利要求19所述的方法,其中,通过环氧树脂粘合剂层固定所述通道件。

21. 如权利要求19或20所述的方法,其中,在缠绕、浸渍和粘结步骤期间,通过用电隔离填充层堵塞模具、将线圈缠绕在填充层内以及在浸渍线圈步骤期间用树脂浸渍填充层而施加所述电隔离层。

22. 如权利要求20所述的方法,其中,施加所述电隔离层和固定所述通道件的步骤包括用未固化的树脂浸渍电隔离层覆盖通道件的内表面;将通道件施加到线圈;以及固化树脂浸渍电隔离层,以将通道件粘接到线圈上。

23. 如权利要求19或20所述的方法,还包括将通道件焊接到支撑结构的步骤。

24. 如权利要求19或20所述的方法,还包括将通道件粘合地粘接到支撑结构的步骤。

## 具有热辐射屏蔽件的超导磁体

### 技术领域

[0001] 本发明为柱形超导磁体提供辐射屏蔽件(shield),柱形超导磁体包括由超导线构成的多个沿轴向对齐的线圈。具体地说,本发明涉及超导磁体,所述超导磁体不是通过浸没在液体致冷剂中冷却的,而是布置成通过经由与线圈机械接触的冷却表面的热传导冷却的。

### 背景技术

[0002] 柱形超导磁体通常用在核磁共振成像(MRI)系统中。强大均匀的背景磁场由超导磁体提供,梯度线圈组件通常设置在超导磁体的孔内,并在三个正交方向上产生快速变化的磁场梯度。

[0003] 超导磁体被冷却至极低温,磁体通常容纳在中空柱形外真空室(OVC)内,一个或多个中空柱形热辐射屏蔽件通常定位在超导磁体和OVC之间。通常,热辐射屏蔽件或外部热辐射屏蔽件(当多于一个时)被冷却至约50K的温度。因此,该组件包括位于磁体的孔内的至少两个紧密堆叠的柱形管。

[0004] 在MRI成像期间施加到梯度线圈的随时间变化的电流相继与均匀背景磁场相互作用,产生作用在梯度线圈上的洛伦兹力,从而导致梯度线圈组件振动。

[0005] 由梯度线圈产生的随时间变化的磁场在附近传导表面(比如OVC的孔管和热辐射屏蔽件)的材料中引起涡流。流过孔管的电阻材料的这些涡流导致加热,这可因线圈温度的升高而产生磁体失超(quench)的风险。由于实心材料在柱形超导磁体操作的典型温度4K下的热容量十分小,所以需要很少的热能便会导致失超。

[0006] 此外,在传导孔管中引起的涡流会与均匀背景磁场相互作用,产生作用在孔管上的洛伦兹力,从而导致孔管振动。这些振动与均匀背景磁场相互作用,并导致在孔管内产生另一(第二)涡流,继而导致加热,并经由第二磁场的产生而在相邻传导表面中引起另一(第三)涡流。第三涡流又会产生第三磁场。除了已描述的不想要的加热,所述振动会导致对于放置在用于成像的磁体孔内的病人来说不舒适的噪声。

[0007] 在OVC孔管的材料中产生的涡流有助于保护热辐射屏蔽件的孔管免受来自梯度线圈的杂散磁场的影响。

[0008] 在液体致冷剂浴冷却的磁体中,比如氦的液体致冷剂适当地冷却线圈,以防止由于涡流而发生失超。然而,近来超导磁体的设计不具有通过浸没在液体致冷剂中冷却的线圈。更确切地,线圈布置成通过经由与线圈机械接触的冷却表面的热传导而冷却。所述冷却通过致冷剂填充的热虹吸管来提供,或者通过热链接到冷却表面的低温致冷器来提供。在这种低致冷剂存储的磁体中,不必要的由梯度线圈引起的加热(GCIH)的问题是紧急的,因为线圈和冷却表面之间的热阻明显高于前者液体致冷剂冷却的磁体中的热阻。

### 发明内容

[0009] 本发明相应地解决了提供对杂散磁场的屏蔽以及对来自热辐射屏蔽孔管的黑体

辐射的屏蔽的有关问题。本发明通过提供权利要求中限定的柱形超导磁体及其制造方法解决了这些问题。

[0010] 下列专利出版物总体上涉及梯度线圈相互作用以及噪声和振动的减少：DE 102006000923 B4、US7535225B2、JP2005279187A和US2006/0266053A1。

[0011] 本发明可应用于任何干燥或最低致冷剂磁体，例如所谓的“A2-粘结磁体”，其中，树脂浸渍线圈借助它们的径向外表面而附接到支撑结构。从本发明中还可得到磁体的其它布置，比如各种自支撑的树脂浸渍结构。

## 附图说明

[0012] 连同附图，从下面对本发明的某些实施例的描述，本发明的上述和其它目的、特性和优点会变得明显，附图中：

[0013] 图1A至1G(ii)示出本发明的一个系列的实施例的若干视图；

[0014] 图2A至2C(ii)示出本发明的另一系列的实施例的若干视图；以及

[0015] 图3示出各种长度的铝管的共振频率的变动。

## 具体实施方式

[0016] 本发明通过提供导电屏蔽件而解决了为超导磁体提供对杂散磁场的屏蔽以及对来自热辐射屏蔽孔管的黑体辐射的屏蔽的问题，超导磁体具有干燥或最低致冷剂存储冷却布置，所述导电屏蔽件被冷却至极低温，并置于磁体的线圈和常规热辐射屏蔽件的孔管之间。如此，保护了线圈免受GCIH效应，即由梯度线圈引起的加热效应的影响。氦冷却超导磁体系统中的常规辐射屏蔽件通常被冷却至约50K的温度，而本发明的屏蔽件被冷却至大约致冷剂温度，例如约4K。为此，为了清楚简洁地描述，本发明的屏蔽件在下面描述中称为“4K屏蔽件”，而常规热屏蔽件简单地称为“热屏蔽件”。

[0017] 浸渍线圈和它们的支撑结构的组合被冷却至极低温，比如约4K，以进行超导操作。因此，磁体线圈及其支撑结构的组件在下面描述中称为“冷质量体”。

[0018] 图1A至1G(ii)示出第一系列的实施例，其示出被冷却的管状4K屏蔽件的示例，被冷却的管状4K屏蔽件机械地安装到冷质量体，以保护磁体免受非期望的GCI效应的影响。

[0019] 图1A示出包括A2-粘结磁体的MRI系统的部分轴向横截面。树脂浸渍超导线圈10的径向外表面12粘结到直径比线圈大的管状支撑结构15。电隔离填充层16可插入线圈10与支撑结构15之间。在所示布置中，支撑结构由许多环15a构成，所述环沿轴向对齐，并通过保持装置(图中未示出)保持就位。然而，可以提供其它支撑结构，比如单个连续管。

[0020] 在所示布置中，支撑结构15包括例如由铝制成的具有冷却通道22的实心的、导热机械支撑件，冷却通道22绕支撑件沿周向延伸。这些通道可携带液态和/或气态的致冷剂，以通过冷却回路布置提供冷却。在替代实施例中，可以提供实心的热导体(比如铜或铝条或带)，将支撑结构15连接到低温致冷器(未示出)。

[0021] 如在许多类型的超导磁体结构中是常规的，线圈装入外真空室(OVC)18内，热辐射屏蔽件20插入磁体结构和OVC之间。还示出梯度线圈组件30。实心的绝热件，比如镀铝聚酯层25可设置在热屏蔽20与OVC18之间。

[0022] 根据本发明的实施例，通过将导热管24安装在冷质量体上而提供4K屏蔽件。在所

示实施例中,这使用导热螺母、螺栓和间隔件而实现。这些在管24和支撑结构15之间提供了机械刚性安装点26和一定程度的导热性。4K屏蔽件由环形端件28完成,环形端件可由导热材料(比如铝)的弧形件构成,焊接、栓接或其它热地和机械地附接至管24和支撑结构15。安装点26可绕所述管周向间隔开地设置,位于与线圈支撑件15的每个末端相距单个轴向距离d处。或者,另一安装点26a可设置成与线圈支撑件15的每个末端相距除轴向距离d以外的其它距离。以各种轴向定位的安装点可在特定周向位置处对齐,或者可因下面所说明的原因而未对齐。

[0023] 因为安装点需要抵抗管24(受到高频周期力)的运动,所以安装点必须构造成它们不会因这些力以及产生的管振动而变得松动。例如,安装点26、管24和支撑结构15之间的接头可以所示方式栓接和胶合。或者,这种接头可通过焊接或类似工艺(比如硬钎焊或软钎焊)而形成。这种接头被认为是耐高频低振幅振动的,高频低振幅振动极易出现在本发明的实施例中。包含的各种部件(比如螺栓、安装点和管24)应当是热匹配的,使得接头不会因各种部件的不同热收缩而松动。

[0024] 这样,基本上保护线圈10免受来自热屏蔽件20的黑体辐射的影响。4K屏蔽件的材料的导电性意味着其还保护线圈免受由梯度线圈30产生的磁场的影响。

[0025] 在操作时,在该示例中,4K屏蔽件24、28保持在小于5K的标称温度下。4K屏蔽件与支撑结构22热接触,支撑结构例如通过使冷却的致冷剂循环通过通道22的冷却回路而被冷却至约4K。在替代的布置中,导体(比如铜或铝条或带)可连接在支撑结构15以及低温致冷器或例如被液氮冷却至约4K的其它表面之间。

[0026] 图1B示出图1A布置的变型例的详细的部分轴向横截面视图。在该变型例中,热链路32(例如实心铝或铜条,或者铝或铜带或层)热连接在管24和冷质量体的支撑结构15之间。热链路的两端在接头35处以导热方式例如通过所示螺钉、螺母和螺栓连接到其各自部件。可使用其它导热连接方式,比如焊接、硬钎焊、软钎焊、夹紧或夹压。尽管受到高频周期力的管24的运动,这种接头35仍需保持不动,所述接头必须构造成它们不会因这些力以及产生的管振动而变得松动。例如,接头35可以所示方式栓接和胶合。或者,这种接头可通过焊接或类似工艺(比如硬钎焊或软钎焊)而形成。这种接头被认为是耐高频低振幅振动的,高频低振幅振动极易出现在本发明的实施例中。包含的各种部件(比如螺栓、支撑结构15和管24)应当是热匹配的,使得接头不会因各种部件的不同热收缩而松动。

[0027] 在这种布置中,4K屏蔽件的环形端件28不必与管28直接热接触或机械接触。实心绝缘件34层(镀铝聚酯片)可定位在线圈10和管14之间。这用于减少来自管24的到达线圈10的任何黑体辐射。

[0028] 图1C示出根据1A或1B的结构中的热传导的简单模式。由于黑体辐射和/或GCIH,热负荷Q入射到4K屏蔽件的管24上。热负荷穿过导热路径28、26、32(可以是热链路32、环形端件28和安装点26中的一个或多个)到达支撑结构15。支撑结构被冷却通道22或等同冷却方法(比如到低温致冷器(未示出)的实心导体)冷却。通过冷却方法相应地从所述结构去除热负荷Q。

[0029] 为了充当合适的辐射屏蔽件,除了具有足够的导热性来带走到达4K屏蔽件的热量之外,管24还应当具有辐射率低的径向外表面(即,面向线圈10的表面)。可通过合适地选择和制备热屏蔽件的材料而满足低辐射率要求,或者可通过将高反射率箔(例如图1B所示镀

铝聚酯片34,或者胶铝带)附接到所述表面而满足低辐射要求。

[0030] 为了屏蔽杂散磁场,管24应当具有良好的导电性和径向厚度 $t$ ,径向厚度 $t$ 明显大于磁场在管材料中的趋肤深度。优选地,管的厚度 $t$ 为趋肤深度的至少两倍。

[0031] 为了提供有效的磁屏蔽和热屏蔽,要求管是“坚硬的”。管的共振频率需高于MRI扫描器的梯度线圈的操作频率。使用管24结构的4K屏蔽件的期望特征是其是高度“可调谐的”,使这成为可能的一些特征显示在附图中,并在下面进行描述。这些特征会减少管在背景磁场内的振荡,所以会减少第二和第三涡流以及相关的加热和噪声的产生。

[0032] 通常,梯度线圈30在临床应用中以50至约300Hz范围内的频率操作。期望的是,管的振动模式处于高于3000Hz的频率下。本发明的某些方面用于确保满足该条件。

[0033] 具有长度 $L$ 、平均半径 $a$ 、径向厚度 $t$ 、密度 $\rho$ 、杨氏模量 $E$ 和泊松比 $\mu$ 的、在末端沿径向夹紧的管的共振频率由下式给出(“Vibration of Shells and Plates”, Werner Soedel, eq. 6.12.3):

$$[0034] \quad f = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{1 + \frac{t/a}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{m\pi a}{L}\right)^4}$$

[0035] 其中, $m$ 为模数。

[0036] 在本发明的示例实施例中,管24可以是具有450mm半径和3mm厚度 $t$ 的铝管。对于不同长度的这种管,在径向方向上通过周向膨胀和收缩而产生的振荡的共振频率在图3中示出。图3示出对于1400mm的长管,在高次轴向共振模式下通过周向膨胀和收缩而产生的振荡保持在基本频率下,而对于较短管(在该情况下,明显是200mm轴向长度的最短管的情况),在高次轴向模式下的振荡以快速增加的频率进行。

[0037] 磁体的典型长度为1400mm。图3示出共振频率不会在共振模式之间明显变化。对于较短的管长度,比如小于300mm的管长度,高次模式的共振频率有明显的向上偏移。

[0038] 那么,在本发明的情况下,应明白,可通过用若干单独安装的短管(例如每根的长度为200-300mm)形成管24而不是用一根1400mm长度的长管形成管24来增加管24的共振频率。

[0039] 图1D(i)示意性地示出单管24的振荡。为了清楚起见,放大了这种振动的振幅,可以看出,管表面在波腹60处振荡。当这在背景磁场中发生时,正如本发明的磁体系统,会在管材料中引起涡流和加热。

[0040] 图1D(ii)示意性地示出改进的情形,其中,4K屏蔽件的管24沿轴向分为多个部分24a。如上所述,这些较短管均具有较高的共振频率,安装点的合适布置可易于确保不会在成像系统的梯度线圈的操作频率下共振。

[0041] 振荡的振幅在管沿轴向分割的布置中得以减小。特别重要的是,安装点通过使用胶合螺栓、焊接或类似方式抵抗因振动产生的松动,并确保任何固定部件(比如螺栓)热匹配到相邻固定部件。

[0042] 除了提供许多单独、分立安装的短管24a之外,通过以类似间隔(例如200-300mm轴向间隔)提供对管的径向限制也能获得增加共振频率的相同效果。更简单地,参见图1A,这可通过提供以200-300mm轴向间隔绕管24的周向隔开的一组安装点26来获得。因为管被限制成相隔200-300mm,所以位于每组安装点之间的这些管部分如200-300mm长度的限制管那样振荡,因此与沿磁体长度延伸的单管的情况相比,管具有一组相当高的共振频率。相同结

论适用于与确保安装点抵抗因振动和/或部件的不同热收缩产生的松动相关的前述段落。

[0043] 增加管的共振频率的另一方法会增加管厚度 $t$ ,如从上面等式中可看出,但是这会以材料和导线成本为代价,因为在不会减小有用的孔直径的情况下,线圈10的直径必须相应地增加,以适应管24的增加的厚度。

[0044] 已发现3mm厚的铝管适于提供所需的屏蔽。如果所述管由商业上的“纯”级铝制成,比如已知的A11200,则1000Hz下的趋肤深度为0.6mm。这是相对便宜的选择,并具有明显的制造优点。对于具有1000RRR(剩余电阻率比)的极纯级铝,1000Hz下的趋肤深度为0.1mm。这种材料可以是99.999%纯度,通俗地称为“五个九”或5N纯度。尽管涡流的大小以及由它们产生的磁场会相对较大,但是高纯度铝中的耗散明显较少,意味着管中的涡流会产生更少的热量。

[0045] 图1E示出图1A的实施例的另一变型例。在该布置中,通过例如焊接、软钎焊或硬钎焊将传导的欧米茄节管36热和机械地附接到管24和支撑结构15而提供致冷剂填充的冷却回路。这用于冷却支撑结构15和管24两者,减少在管24和支撑结构15之间热传导的必要。单独的冷却回路可设置用于支撑结构15和管24,或者可提供单个冷却回路,其包括图1E所示的欧米茄节管36。

[0046] 图1F示出可用在上述实施例中任一的变型例。在该变型例中,环形端件28焊接38到支撑结构15和管24两者。在该变型例中,经由焊接38和环形端件28提供良好的热传导。

[0047] 图1G(i)示出本发明的另一实施例,其中,由如上的商业级铝(比如A11200)形成的管24覆盖有十分高(例如5N)纯度等级的铝层40。由于高纯度材料的高成本,所以管厚度因商业级铝管24提供的机械支撑可被限制为约0.5mm。由于5N覆层的高导电性以及商业级管的结构强度,这种构造具有限制在失超期间产生的洛伦兹力和应力的优点。

[0048] 图1G(ii)示出本发明的另一实施例,其中,由如上的商业级铝(比如A11200)形成的管24覆盖有处于方平组织布置的超导线42段。由于管24被冷却至超导线的转变温度以下,则线42形成电阻十分低的层,以排除来自线圈附近的杂散梯度线圈产生的磁通量,但是仍抵抗大涡流的产生,因为所述结构在闭合电气路径中具有很大的电阻。

[0049] 图2A-2C(ii)示出本发明的另一系列的实施例,其包括粘结或以其它方式直接固定到磁体线圈的传导覆层形式的4K屏蔽件。

[0050] 如图2A所示,该实施例与图1A的实施例类似之处至少在于,其包括线圈10,线圈10在它们的径向外表面12处粘结到包含冷却通道22的支撑结构15。如所示,可选的电隔离层16设置在线圈的径向外表面与机械支撑结构15之间。OVC 18、热屏蔽件20和梯度线圈组件30如上所述。

[0051] 根据本发明的实施例,紧密耦合的4K屏蔽件100设置成与每个线圈10机械接触。紧密耦合的4K屏蔽件可由高纯度铝箔或者超导箔制成。其优选地通过电和热绝缘层102(例如树脂浸渍的玻璃纤维布)与相关线圈10电和热隔离。

[0052] 该实施例的优点是使用更薄的4K屏蔽件100,该4K屏蔽件所占的空间比图1A-1G(ii)的4K屏蔽件更少,并且该4K屏蔽件借助直接连接到机械刚性冷质量体10、15而具有较高的共振频率。

[0053] 由于在图2A的实施例中,屏蔽件100和线圈10之间的热阻必然会低于图1A的实施例中的热阻,所以必须将屏蔽件中的耗散减少至十分低的水平,以防止不可接受地加热邻

近的线圈。可通过确保紧密耦合的4K屏蔽件具有低电阻率而获得所需的低耗散。这可通过由高纯度铝覆层(例如在零场下具有 $RRR > 1500$ )或者超导材料(比如NbTi箔)形成紧密耦合的4K屏蔽件而实现。

[0054] 图2A更确切地示出紧密耦合的4K屏蔽件100焊接104到支撑结构15(与4K屏蔽件类似)的实施例,紧密耦合的4K屏蔽件100形成为每个线圈上的覆层,所述支撑结构15优选地由铝制成。会发现难以将超导材料焊接到支撑结构。如所示,可发现在支撑结构材料中形成唇106来帮助焊接步骤是有益的。

[0055] 如图2A所示,紧密耦合的4K屏蔽件的一个边缘可焊接104到支撑结构,而另一边缘107可通过粘合剂而附接。例如,会发现由Emerson and Cuming销售的STYCAST牌的各种树脂粘合剂是合适的。从4K屏蔽件100到支撑结构15的主要热路径会经过焊接104,焊接104具有比位于另一端107的粘合接头低的热阻。然而,在107处的粘合接头的较大表面区域和可容许热阻意味着在一定程度上有用的热传导还经由粘合接头发生。电隔离层16、102应当禁得起5kV或更高的电压,以确保在失超的情况下电隔离不会被击穿。

[0056] 图2B示出图2A结构的简单的热模式。电隔离层16、102表示为热阻。如所示,热负荷Q由从热屏蔽件20朝向线圈10的黑体辐射提供。该热负荷被紧密耦合的4K屏蔽件100拦截。在所示模式中,假设紧密耦合的4K屏蔽件的两个边缘均附接到具有相等导热性的支撑结构15,所述边缘以与具有相等温度的冷却通道22相距相等的距离而连接到支撑结构。在这些情形下,热负荷Q会在紧密耦合的4K屏蔽件100的两个径向引导部分之间平分,Q/2的热负荷会沿每个径向引导部分流动,如图2B所示。

[0057] 图2C(i)示出制造如图2A所示结构的方法的中间阶段。如形成树脂浸渍线圈中是常规的,模具由轴颈表面108和两个环形保持板10形成。高纯度铝或超导线圈的压制的通道件112定位在模具内,至少基本上覆盖由轴颈表面108和环形保持板110形成的模具的内表面。沿轴向延伸的间隙114可留在相邻通道件112之间,或者留在相邻通道件中的至少一些之间。这种间隙会减少在升温和失超期间的涡流,但是仍会允许一些热负荷到达线圈。在替代布置中,邻近的通道件112可定位成重叠,电隔离层放置在邻近的通道件之间,以防止一个通道件与下一个通道件之间的电传导。多孔电绝缘材料(比如玻璃纤维布)层116设置在通道件112的内表面上。

[0058] 在如此制备模具的情况下,以常规方式将线圈缠绕进模具中。当完成线圈的缠绕时,将模具的径向外表面(在120处由虚线示出)定位在线圈之上,以完成模腔。如常规的,可将玻璃布壳层缠绕在线圈上,位于模腔内,或者玻璃珠壳层可设置在模腔内,位于线圈的径向外表面与模具的径向外表面120的径向内表面之间。然后,用随后固化的树脂浸渍线圈、电绝缘层116和壳层16,如常规那样的。电绝缘层116变为如图2A所示的电隔离层102。在比如图2A所示的布置中,模具120的径向外表面可以是支撑结构的一部分。在该情况下,可以处理模具的径向外表面120的径向内表面,以在支撑结构的该部分与线圈的树脂之间提供良好的粘结。在其它布置中,可以用释放组合物处理模具的径向外表面120的径向内表面,以确保其不会粘结到线圈的树脂,如此形成的树脂浸渍线圈可随后在单独粘结步骤中粘结到另一支撑结构。

[0059] 优选地,如图2C(i)所示,每个通道件112的一个边缘118从模具突出,并在浸渍步骤期间保留在树脂高度的上方。这确保了那些边缘保持干净,使得它们可易于焊接,如图2A

的104所示。

[0060] 参考图2C(i)所述的方法可称为“单步”工艺,因为线圈的形成、浸渍以及设置有紧密耦合的4K屏蔽件100均在同一工艺步骤中进行。

[0061] 与此相比,图2C(ii)示出制造如图2A所示结构的“两步”方法的中间阶段。在该方法中,通过任何方便的常规方法缠绕、浸渍线圈10以及将线圈粘结到支撑结构15。例如,可以与图2C(i)所示类似地将线圈缠绕进模具中,并在浸渍步骤期间将线圈粘结到支撑结构15,或者可以单独地浸渍线圈并在单独步骤中将线圈粘结到支撑结构。电隔离层(如图2C(i)的116)可在缠绕和浸渍步骤期间被施加到线圈。或者,在该阶段可以不施加任何这种层。

[0062] 在该方法的第二步中,将通道件112固定成覆盖线圈10的轴向和径向内表面。这可通过施加环氧树脂粘合剂层而实现,例如,可发现由Emerson and Cuming销售的STYCAST牌的各种树脂粘合剂是合适的。或者,如果在缠绕和浸渍步骤期间没有将电隔离层设置在线圈上,则通道件112的内表面可用未固化的树脂浸渍电隔离层116(比如玻璃纤维布)覆盖。然后将通道件112施加到线圈,树脂浸渍电隔离层116固化,以将通道件112粘结在线圈上。

[0063] 如在图2C(i)的实施例中,边缘118应当保持没有树脂,以不会干扰焊接步骤104。如另一实施例中,传导通道件112可焊接或粘合地粘结到支撑结构15。

[0064] 通道件优选地具有高纯度铝,比如如上所述的5N纯度铝,或者超导箔(比如NbTi箔)。可使用其它材料,但是目前发现高纯度铝易于获得、相对便宜且高度导电。

[0065] 在所有情况下,必要的是,强大的电绝缘及明显的热绝缘102放置在线圈10与形成4K屏蔽件的通道件112之间,以防止在失超期间电击穿,并经由隔离层102的热阻限制传输到线圈10的热量。还期望在通道件112之间包括中断区114,以防止在磁体升温期间对4K屏蔽件100的过量涡流加热。

[0066] 本发明相应地提供了4K屏蔽件,用于减少因引起的加热或杂散磁场而产生的梯度线圈相互作用的风险,梯度线圈相互作用可导致干燥或最低致冷剂磁体系统的超导线圈的失超。该屏蔽件还用于减少在这种磁体系统中在4K下由梯度线圈引起的加热GCIH。

[0067] 在一组实施例中,4K屏蔽件包括与线圈间隔开而安装到冷质量体的冷却管,从而与经由线圈本身的路线相比,具有对从4K屏蔽件流向冷却装置的热量较少的阻抗。屏蔽支撑件可布置成4K屏蔽件的主共振频率比那些在成像期间激励的高。在一个实施例中,4K屏蔽件面对高传导材料,以使到达冷却系统的热负荷最小。该实施例的特定优点是易于制造、易于获得所需电绝缘完整性、线圈与屏蔽件之间良好的热分隔以及动态调谐屏蔽系统的十分好的范围。

[0068] 在另一组实施例中,线圈具有紧密地机械联接到线圈的冷却的高导电性覆层。这些实施例占据较少的径向空间,并易于借助固定到坚硬冷质量体而达到高共振频率(>3000Hz)的要求。这种布置的主要挑战是使从紧密联接的屏蔽件传导到线圈的热量最小。这可通过使用高导电性材料并精心地选择线圈与覆层之间的绝缘层来实现。

[0069] 使用冷却管的第一组实施例的优点是易于制造,并且相对易于获得所需的5kV电压隔离。

[0070] 本发明提供的4K屏蔽件提供了用于线圈的黑体辐射屏蔽,并提供了用于线圈的磁屏蔽,从而因GCIH产生的线圈温度增加保持低于产生磁体失超的阈值。根据本发明,这些目

的可通过热量在冷却部件中的最小耗散而实现,使得易于制造,且可以最小的可能径向空间实施,并获得磁体线圈与接地电势之间所需的电压隔离。

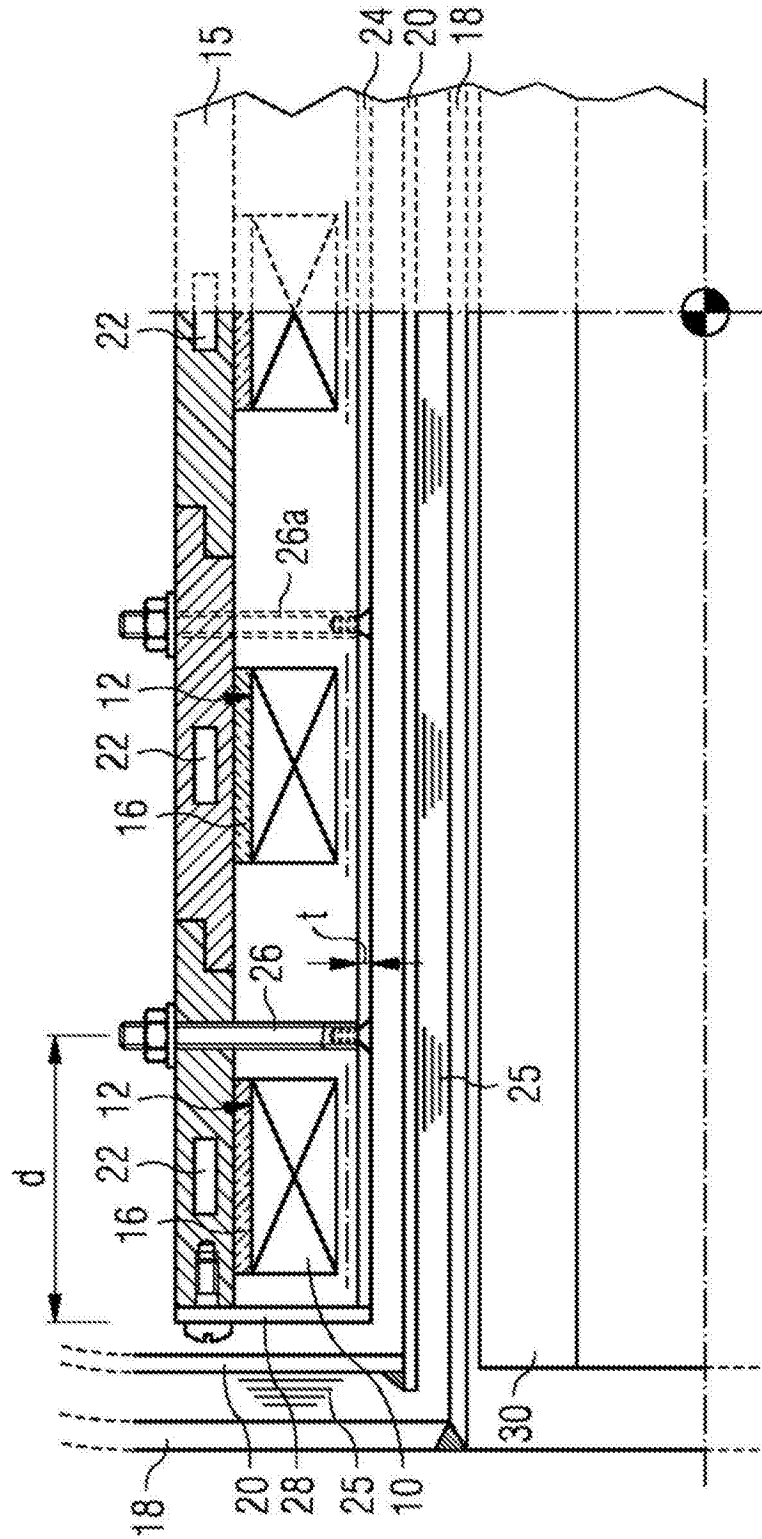


图1A

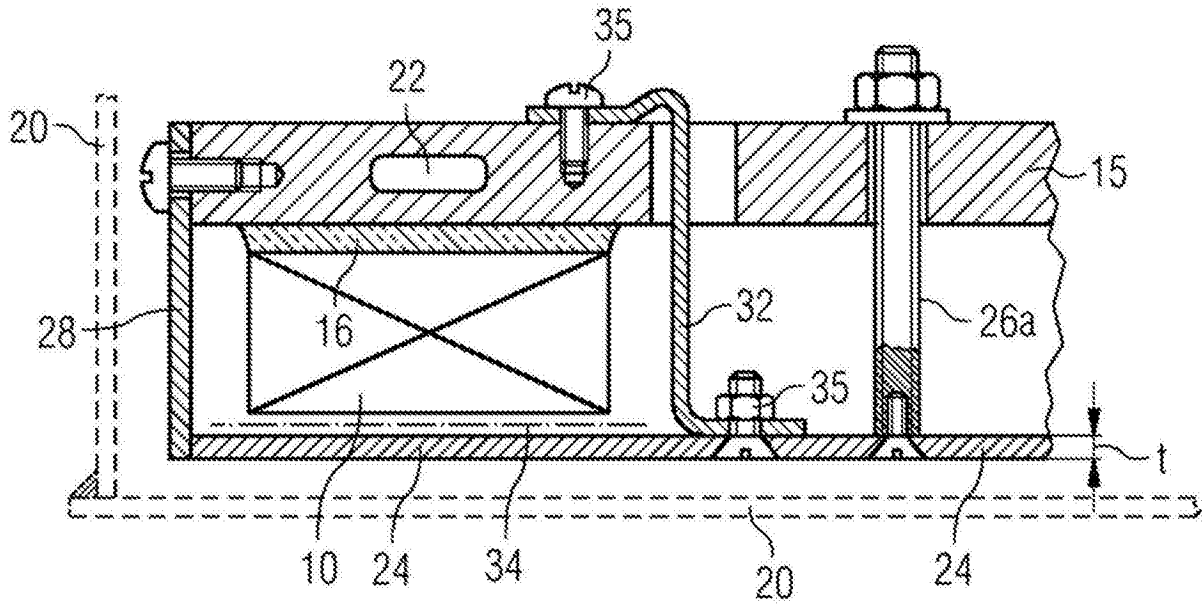


图1B

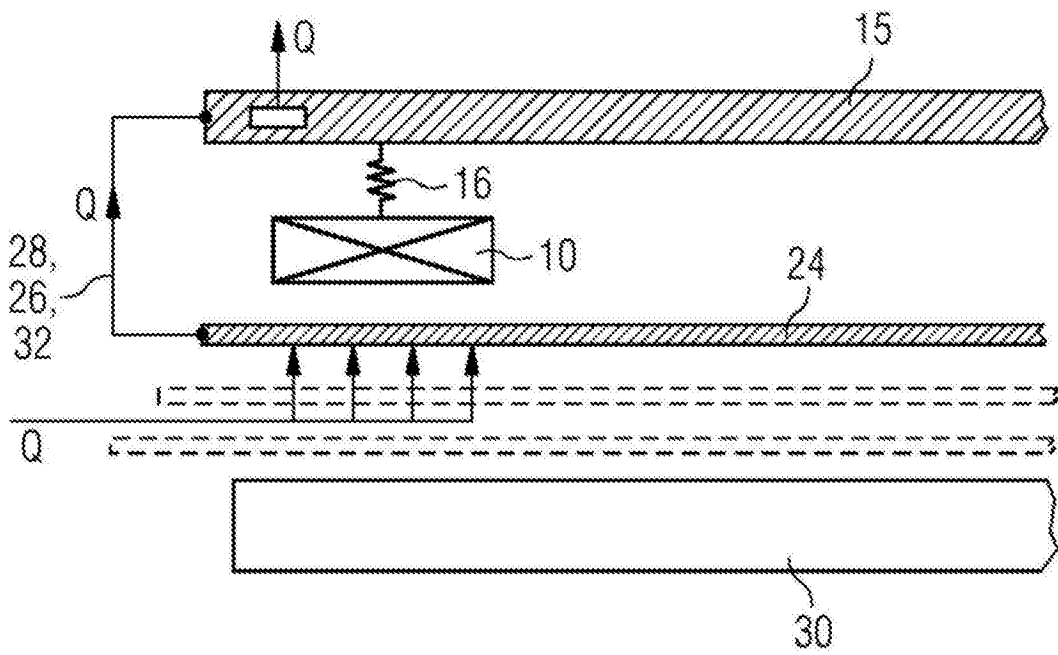


图1C

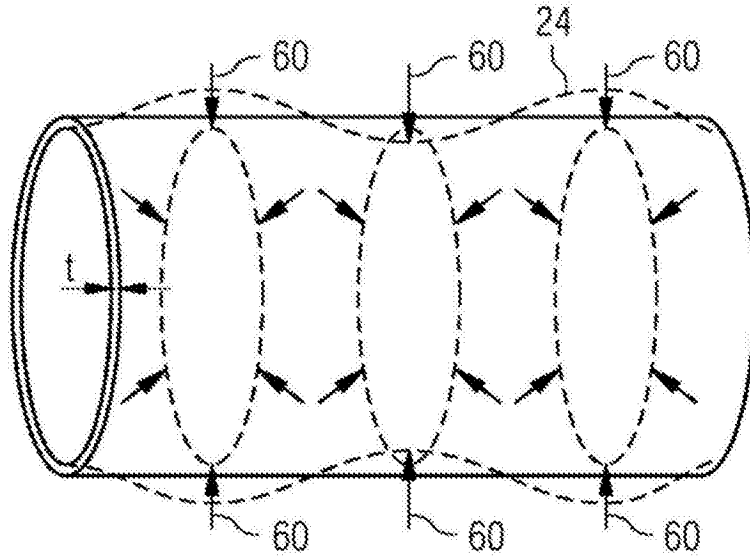


图1D(i)

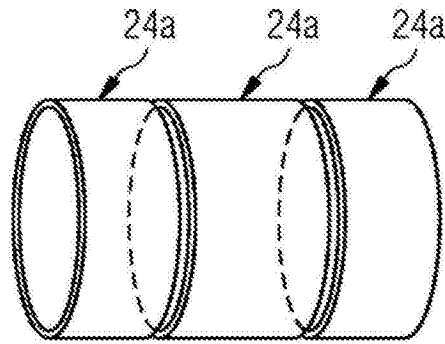


图1D(ii)

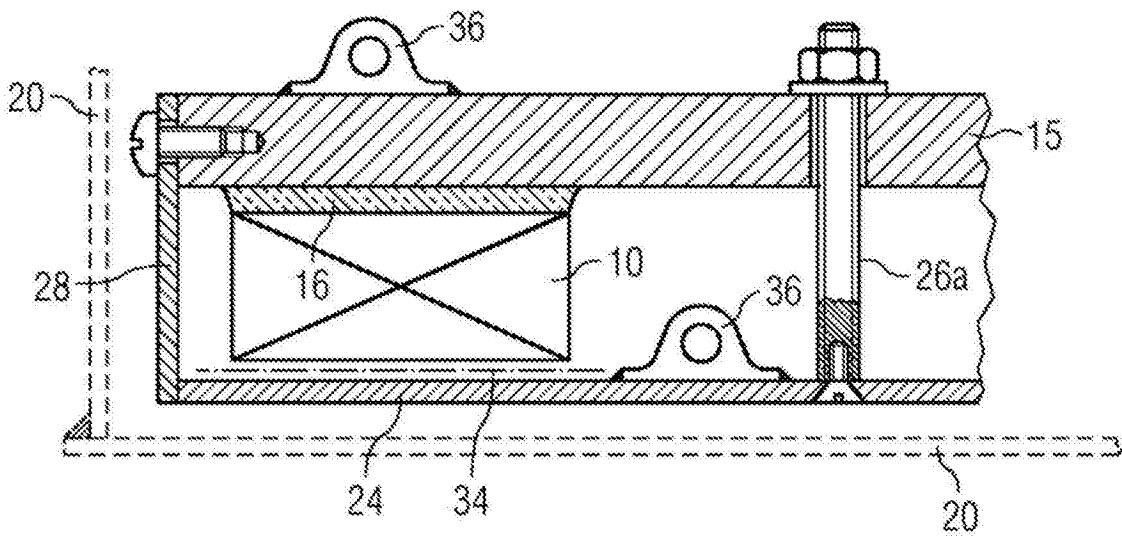


图1E

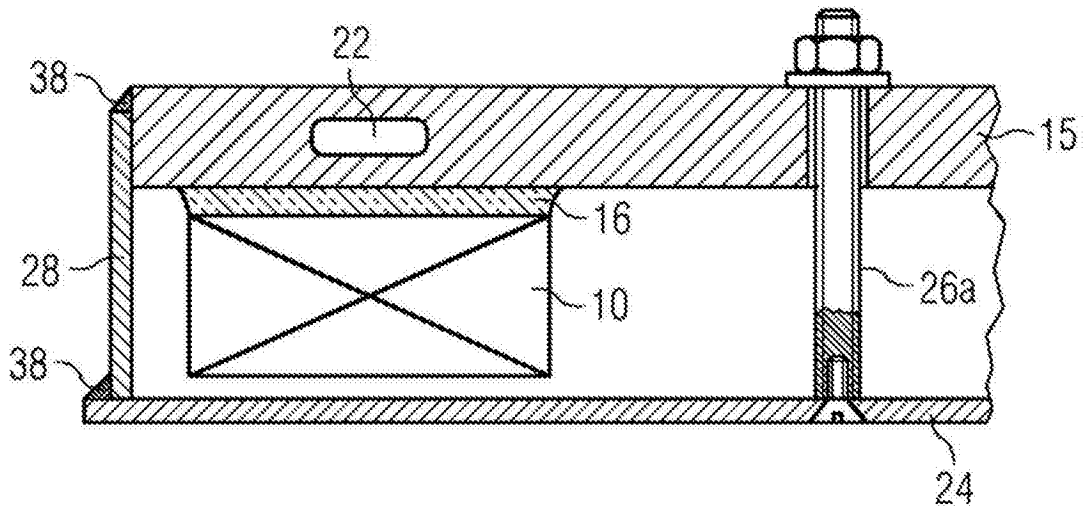


图1F

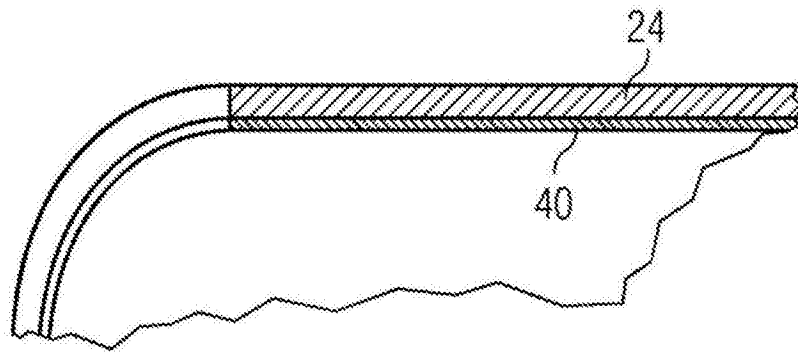


图1G(i)

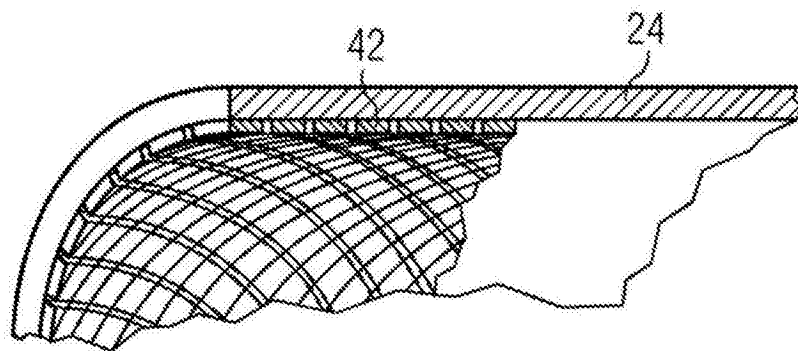


图1G(ii)

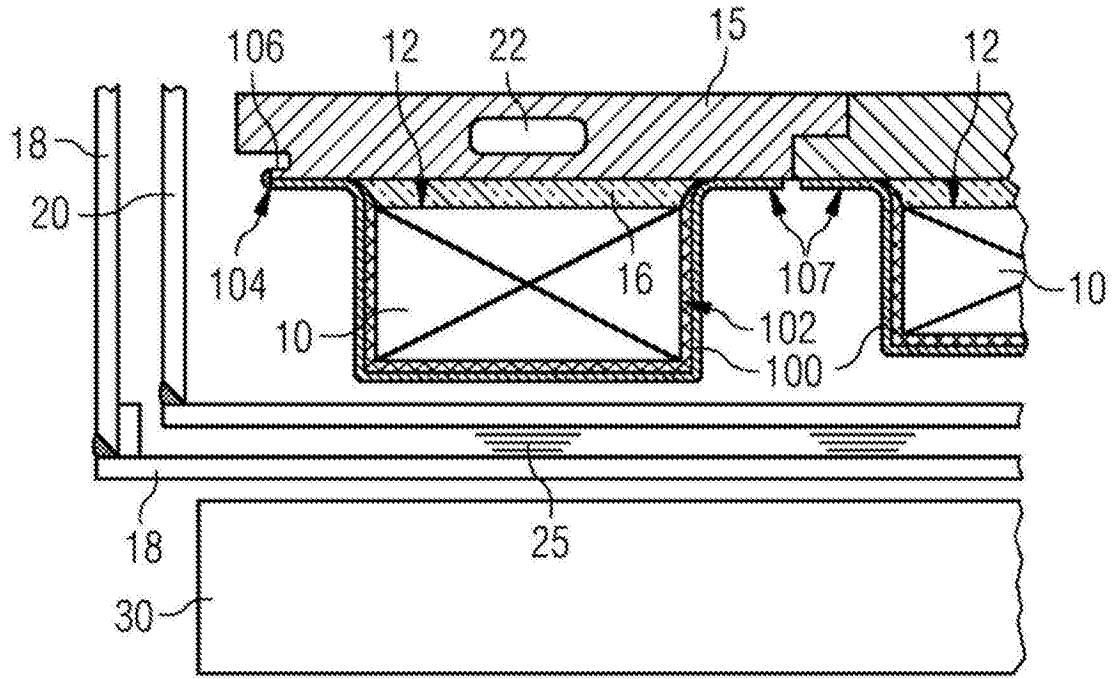


图2A

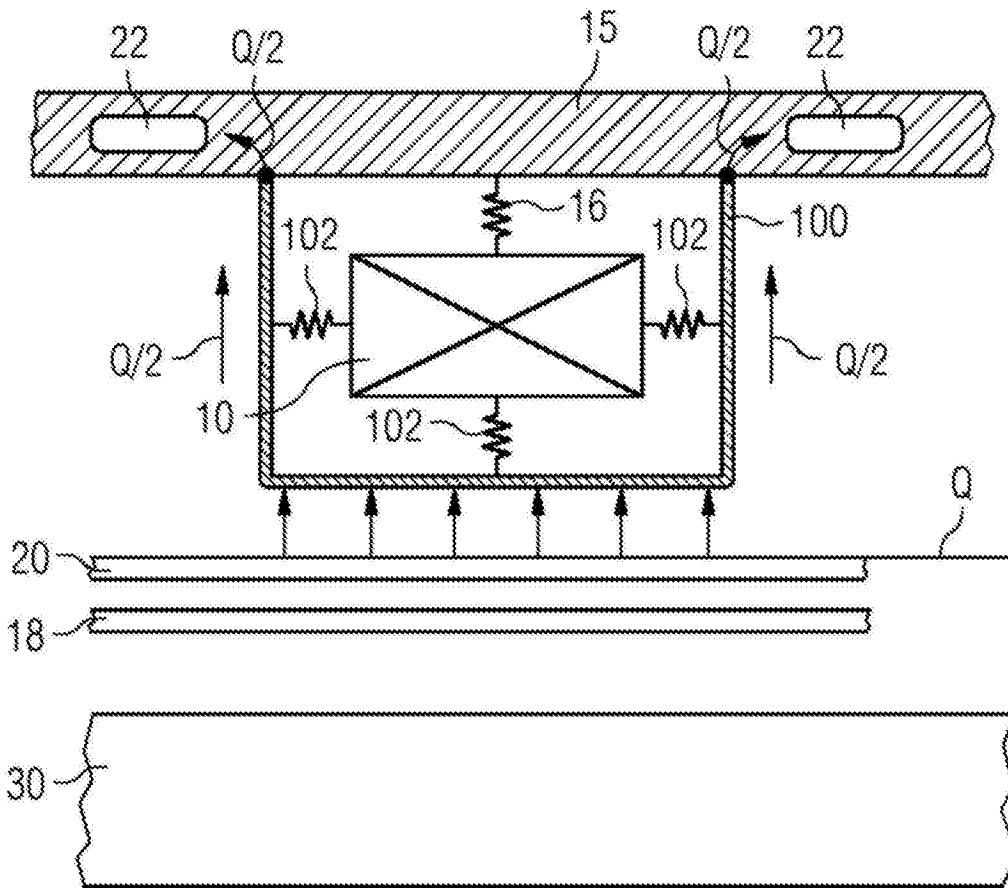


图2B

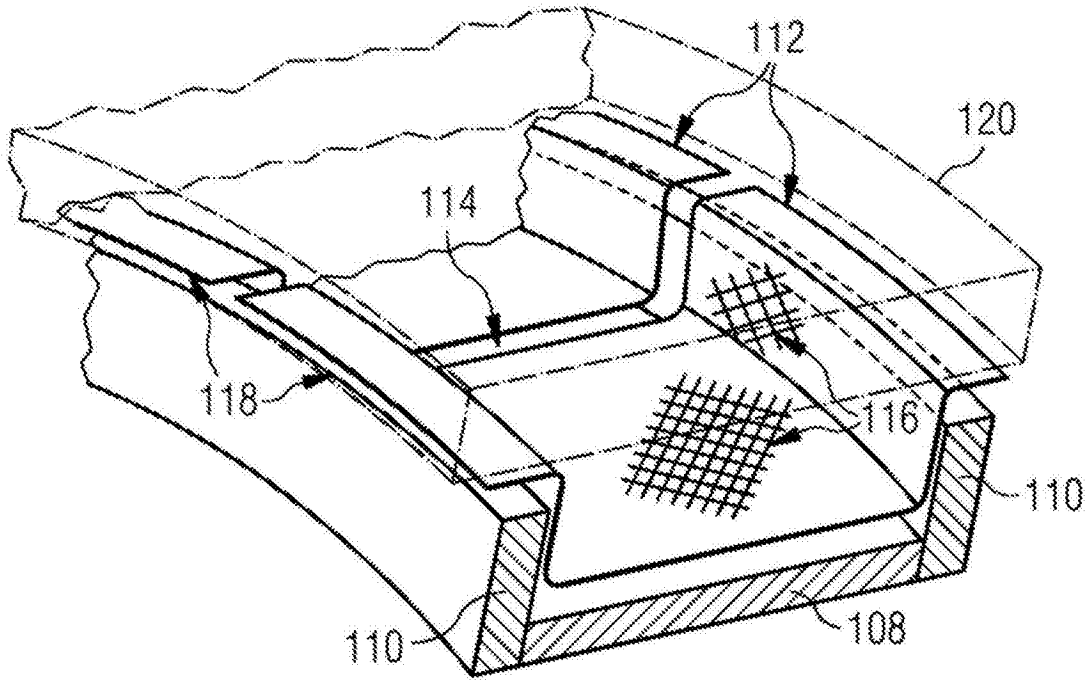


图2C(i)

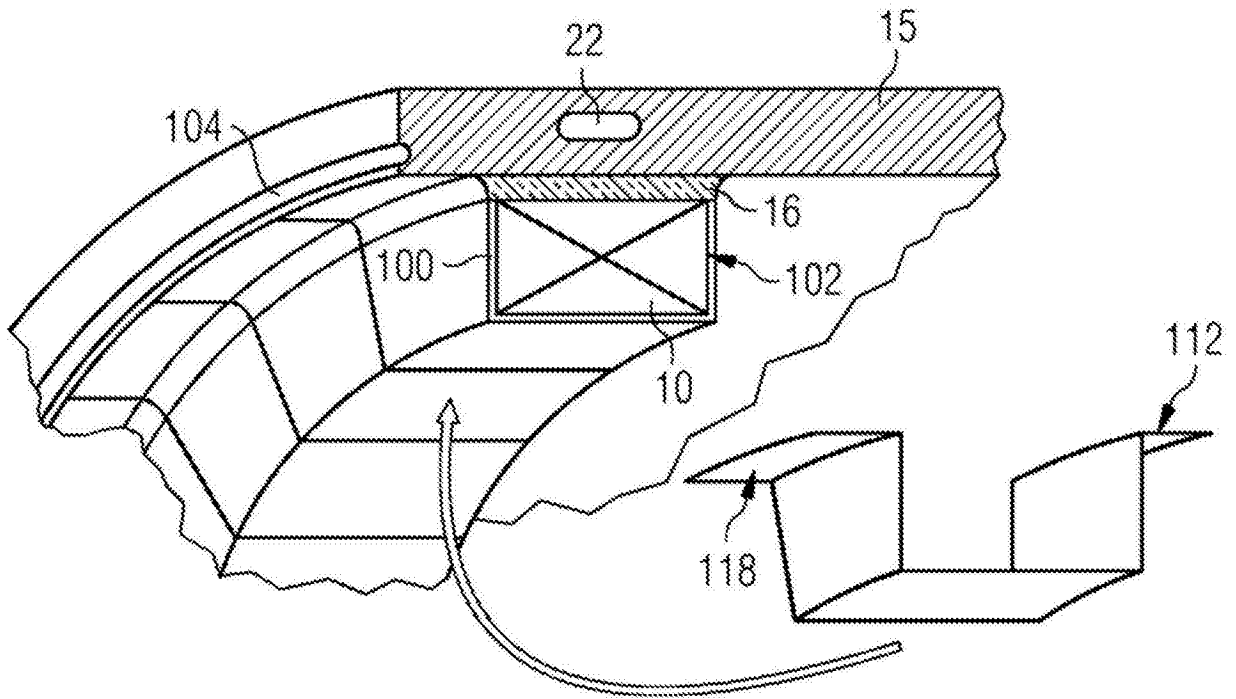


图2C(ii)

900 mm 直径, 3mm 厚度

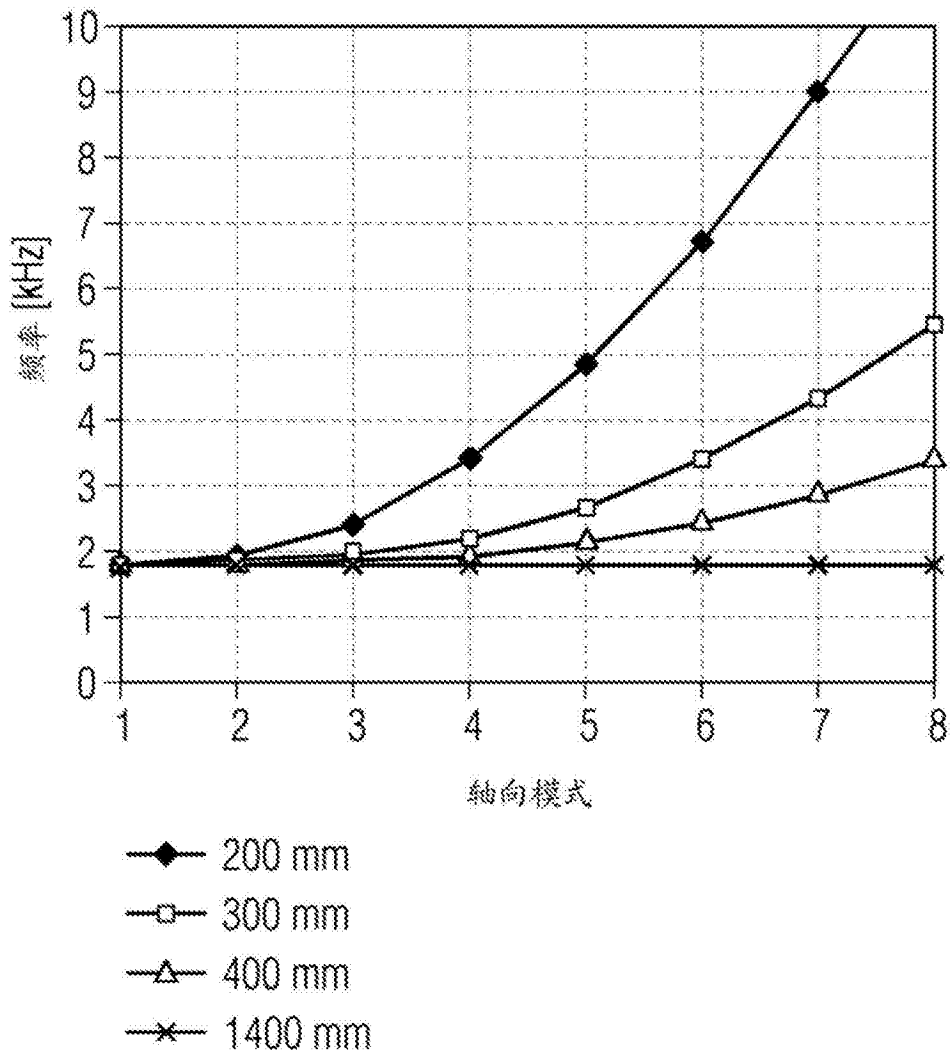


图3