(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 113646853 A
(43)申请公布日 2021.11.12

(21)申请号 202080026374.4

(22)申请日 2020.04.03

(30)优先权数据
1904665.5 2019.04.03 GB

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2021.09.29

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2020/059638 2020.04.03

(87)PCT国际申请的公布数据
WO2020/201540 EN 2020.10.08

(71)申请人 托卡马克能量有限公司
地址 英国牛津郡

(72)发明人 罗伯特·斯莱德

(74)专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021
代理人 郭雪茹

(51)Int.Cl.
H01F 6/06(2006.01)
G21B 1/05(2006.01)
H01B 12/06(2006.01)

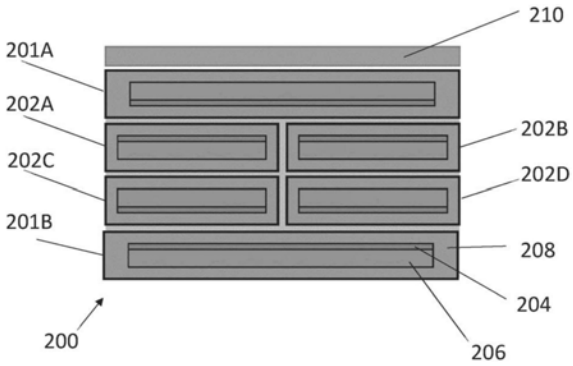
权利要求书2页 说明书9页 附图7页

(54)发明名称

高温超导体线缆

(57)摘要

一种用于载送磁体的线圈中的电流的线缆。磁体包括HTS传输带和分流组件，该分流组件包括跨传输带的表面并排布置的两个或更多个HTS分流带。传输带和分流带中的每一个都包括基底层和高温超导体(HTS)材料的HTS层，分流带的层平行于传输带的层延伸。



CN 113646853 A

1.一种用于载送磁体的线圈中的电流的线缆,包括:

HTS传输带;和

分流组件,所述分流组件包括两个或更多个HTS分流带,所述两个或更多个HTS分流带横跨所述传输带的表面并排布置;

其中所述传输带和所述分流带中的每一个都包括基底层和高温超导体HTS材料的HTS层,所述分流带的层平行于所述传输带的层延伸。

2.根据权利要求1所述的线缆,其中,所述分流带中的一个或更多个分流带的所述HTS层被多个间断部中断,所述多个间断部包括在所述HTS层中的断点和/或完全或部分断裂点。

3.根据权利要求2所述的线缆,其中,所述间断部在相邻的分流带之间交错。

4.根据权利要求2或3所述的线缆,其中,所述一个或更多个分流带中的每一个内的间断部具有规律的或半规律的间距。

5.根据权利要求4所述的线缆,其中,所述间断部的间距在所述分流带之间不同。

6.根据前述权利要求中任一项所述的线缆,其中,所述分流带包括不同于所述传输带中的HTS材料的HTS材料。

7.根据前述权利要求中任一项所述的线缆,其中,两个或更多个分流带包括彼此不同的HTS材料。

8.根据前述权利要求中任一项所述的线缆,其中,所述分流带中的一个或更多个分流带的HTS层和基底层具有与所述传输带的HTS层和基底层相比不同的取向。

9.根据权利要求8所述的线缆,其中,所述分流带的HTS层和基底层的取向在横向相邻的分流带之间交替。

10.根据前述权利要求中任一项所述的线缆,其中,所述分流组件包括第一分流层和第二分流层,所述第一分流层包括两个或更多个分流带,所述第二分流层包括横跨所述第一分流层并排布置的两个或更多个另外的分流带,所述另外的分流带的层平行于所述传输带的层延伸。

11.根据权利要求10所述的线缆,其中,所述第一分流层的每个分流带与所述第二分流层的相邻分流带一起形成类型-0对、或类型-1对或类型-2对。

12.根据前述权利要求中任一项所述的线缆,其中,所述叠层还包括另一传输带,所述另一传输带与所述分流组件相邻,以使得所述传输带形成堆叠对,且所述分流组件在所述两个传输带之间位于所述对内侧。

13.根据权利要求12所述的线缆,其中,所述传输带被布置成类型-0对,以使得所述对中的相应HTS层面向彼此,并且位于所述对的相应基底层之间。

14.根据前述权利要求中任一项所述的线缆,包括至少一个带,所述至少一个带包括不同于所述带中的另一个带的HTS材料的HTS材料。

15.一种用于载送磁体的线圈中的电流的线缆,包括:

HTS带的堆叠式带组件,每个HTS带都包括基底层、和高温超导体HTS材料的HTS层,所述带组件包括:

传输带,所述传输带包括连续的HTS层;

分流组件,所述分流组件包括一个或更多个分流带,所述一个或更多个分流带每一个

都包括在所述分流带的HTS层中的多个间断部;以及

位于所述传输带和所述分流组件之间的正常导电层,所述正常导电层用于允许电流在所述传输带和所述分流组件之间通过;

其中选择所述分流组件的一个或更多个带中的间断部的布置,以引导所述传输带的HTS层中的横向电流分布。

16.一种用于载送磁体的线圈中的电流的线缆,包括连续的传输导体层、和分流结构,所述连续的传输导体层包括高温超导材料,所述分流结构包括高温超导材料,所述分流结构具有非超导势垒以引导电流在所述分流结构中的分布。

17.根据权利要求16所述的线缆,其中,电流在所述分流结构中的分布控制电流在所述传输导体层中的分布。

18.一种利用前述权利要求中任一项所述的线缆缠绕而成的磁线圈。

19.一种核聚变反应器,包括托卡马克和磁等离子体约束系统,所述磁等离子体约束系统包括根据权利要求18所述的磁线圈。

高温超导体线缆

技术领域

[0001] 本发明涉及用于在磁体线圈中承载电流并包括高温超导体材料的线缆。特别地，但不排他地，本发明涉及一种核聚变反应器，该核聚变反应器包括磁性等离子体约束系统，该磁性等离子体约束系统包括缠绕有这种线缆的磁线圈。

背景技术

[0002] 超导材料通常被分为“高温超导体(HTS)”和“低温超导体”(LTS)。LTS材料(诸如铌和NbTi)是金属或金属合金，其超导性可以用BCS理论来描述。所有的低温超导体都具有低于约30K的临界温度(其中，在该临界温度以上，即使在零磁场中，材料电不能起到超导作用)。HTS材料的行为不通过BCS理论进行描述，并且这种材料可能具有高于约30K的临界温度(尽管应该注意的是，限定HTS和LTS材料的是超导操作和成分方面的物理差异，而不是临界温度)。最常用的HTS是“铜酸盐超导体”-基于铜酸盐(含有氧化铜基团的化合物)的陶瓷，诸如BSCCO或ReBCO(其中Re是稀土元素，通常为Y或Gd)。其他HTS材料包括铁基材料(例如，FeAs和FeSe)和二硼酸镁(MgB2)。

[0003] ReBCO通常被制造成带，其结构如图1所示。这种带100通常大约为100微米厚，并且包括基底101(通常为大约为50微米厚的电抛光的哈氏合金)，在该基底上，通过IBAD、磁控溅射或另一合适的技术沉积厚度大约为0.2微米的一系列缓冲层(称为缓冲叠层102)。外延ReBCO-HTS层103(通过MOCVD或其他合适的技术被沉积)覆盖缓冲叠层，并且通常为1微米厚。1-2微米的银层104通过溅射或另一合适的技术被沉积在HTS层上，并且铜稳定剂层105通过电镀或另一合适的技术被沉积在带上，这通常完全封装带。

[0004] 基底101提供了可以通过制造线进送并允许后续层的生长的机械骨架。需要缓冲叠层102来提供在其上生长HTS层的双轴纹理化晶体模板，并防止元素从基底到HTS的化学扩散，其中这种化学扩散会损害其超导特性。需要银层104来提供从ReBCO到稳定剂层的低电阻界面，并且稳定器层105在ReBCO的任何部分停止超导(进入“正常”状态)的情况下提供替代性的电流路径。

[0005] HTS带可以被布置成HTS线缆。本文所指的HTS线缆包括一个或更多个HTS带，该一个或更多个HTS带通常通过导电材料(通常是铜)沿其长度连接。HTS带可以被堆叠(即被布置成使得HTS层是平行的)，或者HTS带可以具有一些其他的带布置，这些带可以沿着线缆的长度变化。值得注意的HTS线缆的特殊情况是单个HTS带和HTS对。HTS对包括一对HTS带，所述一对HTS带被布置成使得HTS层是平行的。在使用底层带的情况下，HTS对可以是类型-0(其中HTS层面向彼此)、类型-1(其中一个带的HTS层面向另一个带的基底)、或类型-2(其中基底面向彼此)。包括两个以上的带的线缆可以以HTS对的形式布置部分或全部带。堆叠的HTS带可以包括的HTS对的各种布置，最常见的是类型-1对的堆叠或者类型-0对和(或者等效地，类型-2对)的堆叠。

[0006] HTS带(以及一般而言超导体)的重要性质是“临界电流”(I_c)，该临界电流是在给定温度和外部磁场下HTS材料变得正常的电流。在超导体被认为已经“变得正常”的超导转

变的特征点在某种程度上是任意的，但通常认为是当带每米生成E_0＝10或100微伏时。临界电流可能取决于许多因素，包括超导体的温度和超导体处的磁场。在后一种情况下，场强和超导体晶体轴在场中的取向两者很重要。

[0007] 对于HTS线缆，假设线缆沿其整个长度处于均匀的温度下并在均匀的磁场中，则叠层中的所有带的临界电流将相对均匀。在这种情况下，当线缆附接到电源时，电流根据欧姆定律将以线缆的端部处的端接电阻的比率简单地分布在带之间。然而，在许多情况下，电流分布受多种因素影响，例如，局部磁场在幅度方面或在相对于ReBCO层的c轴线的磁场角度方面是否沿着线缆内的带的长度或横跨线缆内的带的宽度变化。当线缆缠绕成用于磁铁的线圈时，将发生这种变化。例如，在由扁平线圈的叠层形成的磁体中，在对叠件的端部处构成线圈的线缆在其组成带的宽度上可能具有I_c的变化。然后，传输电流将优先地在各个带的宽度中的其中I_c最高的那些部分中流动。在某些情况下，根据线圈中的线缆的局部磁场强度和取向，线缆中的一个或更多个带中的传输电流可以主要沿着一个边缘流动。因此，线缆中的带中的电流分布可能主要取决于线圈的形状。

[0008] 沿着线缆的温度变化也可能对电流如何在线缆内分布有影响，特别地这是因为可能难以向线缆的所有区段和/或层提供适当量的冷却。

[0009] 横跨带或带之间的I_c方面变化可能导致HTS线缆内的电流分布，这对于许多应用来说并不是最佳的。特别是，带的不同部分之间的I_c方面的差异可能导致在HTS材料内的闭环中流动的屏蔽电流。产生屏蔽电流以“耗尽”多余的临界电流，使得HTS内的所有点承载临界电流(即使在没有外部电压或传输电流的情况下)，如超导状态所要求的那样。然而，屏蔽电流可能会限制HTS磁体的性能，这是因为只有进入和离开每个带的电流(由外部施加的电压驱动)才会生成明显的磁场。

[0010] 尽管由屏蔽电流(或闭环“超电流”)生成的磁场很小，并且随着与带的距离而迅速下降，但所述屏蔽电流可能会对磁场质量(即：均匀性和时间稳定性)具有不利影响。这在以下所述的磁体中可能特别地是有问题的，在所述磁体中，从线圈到利用磁场的区域的距离与带宽度相比很小，例如：NMR插入线圈或MRI线圈(其中磁场的均匀性可能必须被控制为优于0.0001％(在NMR中)和0.001％(在MRI中)。

[0011] 因此，在需要高磁场质量的应用中，期望的是(a)电流被均匀地分布在叠层中的带之间，以及(b)电流横跨叠层中的每个带的宽度被均匀分布。

[0012] “Roebel”线缆提供了这个问题的部分解决方案，其中叠层中的各个带被切割成蜿蜒的形状，并且然后被编织在一起。然而，Roebel线缆有几个缺点：

[0013] • Roebel线缆浪费了带(在从较宽的带冲压出段以形成蜿蜒的形状的情况下，大约40％的带被损失)，

[0014] • 当被缠绕成线圈并通电时，洛伦兹力将在各个带交叉的地方引起应力集中。这些可能会损坏带，从而降低局部I_c。

[0015] • 带之间的电流共享仅限于带交叉的位置，而不是像简单的堆叠的带线缆中那样沿着整个长度。

[0016] 因此，需要一种解决这些问题中的一个或更多个的HTS线缆。

发明内容

[0017] 根据本发明的第一方面，提供了一种用于载送磁体的线圈中的电流的线缆。磁体包括HTS传输带和分流组件，该分流组件包括横跨传输带的表面并排布置的两个或更多个HTS分流带。传输带和分流带中的每一个都包括基底层和高温超导体(HTS)材料的HTS层，分流带的层平行于传输带的层延伸。

[0018] 分流带中的一个或更多个的HTS层可以被多个间断部中断，这些间断部包括HTS层中的断点和/或完全或部分断裂点。间断部可以在相邻分流带之间交错。一个或更多个分流带中的每一个分流带内的间断部可以具有规律的或半规律的间距。间断部的间距在分流带之间可以是不同的。

[0019] 分流带可以包括不同于传输带中的HTS材料的HTS材料。

[0020] 两个或更多个分流带可以包括彼此不同的HTS材料。

[0021] 分流带中的一个或更多个的HTS层和基底层与传输带的HTS层和基底层相比可以具有不同的取向。

[0022] 分流带的HTS层和基底层的取向可以在横向相邻的分流带之间交替。

[0023] 分流组件可以包括：第一分流层，该第一分流层包括两个或更多个分流带；以及第二分流层，该第二分流层包括横跨第一分流层并排布置的两个或更多个另外的分流带，所述另外的分流带的层平行于传输带的层延伸。

[0024] 第一分流层中的每个分流带可以与第二分流层中的相邻分流带一起形成类型-0对、或类型-1对、或类型-2对。

[0025] 叠层还可以包括另一传输带，所述另一传输带与分流组件相邻，以使得传输带形成堆叠对，且分流组件在两个传输带之间位于所述对内侧。

[0026] 传输带可以被布置成类型-0对，使得该类型-0对的各个HTS层面向彼此并位于该类型-0对的各个基底层之间。

[0027] 线缆可以包括至少一个带，该至少一个带包括不同于这些带中的另一个带的HTS材料的HTS材料。

[0028] 根据本发明的第二方面，提供了一种用于载送磁体的线圈中的电流的线缆。该线缆包括：HTS带的堆叠带组件，每个HTS带都包括基底层和高温超导体(HTS)材料的HTS层。该带组件包括：传输带，该传输带包括连续HTS层；分流组件，该分流组件包括一个或更多个分流带，每一个所述分流带都包括在该分流带的HTS层中的多个间断部；以及正常导电层，所述正常导电层位于传输带和分流组件之间，以允许电流在传输带和分流组件之间通过。选择分流组件的一个或更多个带中的间断部的布置，以引导传输带的HTS层中的横向电流分布。

[0029] 根据本发明的第三方面，提供了一种用于载送磁体的线圈中的电流的线缆。该线缆包括连续传输导体层和分流结构，所述连续传输导体层包括高温超导材料，所述分流结构包括高温超导材料，该分流结构具有非超导势垒以引导分流结构中的电流的分布。

[0030] 分流结构中的电流的分布可以控制传输导体层中的电流的分布。

[0031] 根据本发明的第四方面，提供了一种缠绕有以上提及的线缆中的任何一个的磁线圈。

[0032] 根据本发明的第五方面，提供了一种核聚变反应器，该核聚变反应器包括托卡马

克和包括磁线圈的磁等离子体约束系统。

附图说明

[0033] 图1是HTS带的示意剖面图示；

[0034] 图2是HTS带的示意性横截面图；

[0035] 图3是图2的HTS带的示意性局部分解立体图；

[0036] 图4是HTS带的示意性横截面图；

[0037] 图5是HTS带的示意性横截面图；

[0038] 图6是HTS带的示意性横截面图；

[0039] 图7是图6的HTS带的示意性局部分解立体图；

[0040] 图8是包括HTS带的环形场磁体的中心柱的示意性横截面俯视图；

[0041] 图9是图8的环形场磁体的双扁平线圈中的一个的示意性横截面；

[0042] 图10是为图9的扁平线圈中的一个的横截面所计算的磁场(B)的矢量图和磁场(B)的大小或强度的等高线图；

[0043] 图11是为图10的扁平线圈的横截面所计算的临界电流(I_c)的等高线图；

[0044] 图12是示出包括具有不同间隔的切口的分流带的HTS带的I-V曲线的曲线图；以及

[0045] 图13是HTS带的示意性横截面图。

具体实施方式

[0046] 本发明涉及一种包括堆叠的HTS带的HTS线缆，该HTS线缆允许跨线缆宽度和带之间的电流分布被调节以产生更均匀的电流密度。这允许产生一种HTS磁体，在该HTS磁体中，电流密度更均匀地分布在带之间，和/或所述HTS磁体跨每一匝更加均匀。这些性质大大有助于HTS磁体的设计，这是因为磁体的“真实”性能(诸如磁场的均匀性)将更接近类似于HTS磁体设计者的想法。

[0047] 还可以调节跨线缆的宽度的电流分布，使得该电流分布有意地不均匀，其目的是使与每个带中的ReBCO层的ab平面的磁场角度尽可能接近零。这最大化了线缆的临界电流。如下所述，HTS线缆两端产生的电压也提供了由于对ReBCO层的损坏(诸如开裂(所述开裂例如由于多个斜坡循环或热循环引起的疲劳导致)或中子辐射)引起的线缆的劣化的早期预警。

[0048] 在一个示例中，HTS线缆可以包括夹在“缠绕”的一对堆叠HTS带之间的两个或更多个“分流”HTS带。所述缠绕一对堆叠HTS带是连续的一对带(通常，尽管不是必须的，是类型-0对)，其没有故意的断裂点或I_C断点。相比之下，非常低但不可忽略的电阻以有规律的间隔被引入到分流HTS带中。超过缠绕对的临界电流的传输电流被迫在“内部”分流HTS带之间共享和分布。通过改变分流HTS带之间的分布的电阻连接的数量和电阻，以及每个分流带的“动态”(即电流相关)电阻，可以影响传输电流沿线缆和跨线缆的宽度在各个带之间的分布。

[0049] HTS带的动态电阻被定义为：

[0050] $$R(I) = E_0 \frac{h}{I}\left(\frac{I}{I_c(B,T,\theta)}\right)^n$$

[0051] 其中：

[0052] • E_0是用于限定临界电流的电场标准，通常为10或100μV/m，

[0053] • h是带的长度，

[0054] • I是该带中的传输电流，

[0055] • I_C是带的临界电流(本身是磁场强度、温度T和矢量B与ReBCO晶体的c轴之间的角度(θ)的函数)，以及

[0056] • n是超导体n值，其定义了超导到正常转变的锐度(对于ReBCO带来说，n通常为20到50，但也取决于B和T)。

[0057] 因此，可以通过沿着分流带以有规律的间隔添加I_C断点(例如，低临界电流的区域或在使用中非超导的区域)或完整切口、和/或通过在线缆的不同部分中使用具有不同临界电流的分流带，来调节线缆内的电流分布。例如，可以通过急剧弯曲或折叠带来产生断点，从而导致局部应变引起的开裂和ReBCO层中的I_C劣化。也可以选择分流对中使用的HTS带件，以有助于实现期望的电流分布。

[0058] 图2示出了穿过HTS线缆200的横截面，该HTS线缆200包括布置成类型-0对的一对相对较宽的“缠绕”的HTS带201A、201B。这些带也可以被认为是“传输”带。在缠绕对的带201A、201B之间是呈“2×2”矩阵排列(即具有两行和两列的排列)的四个较窄的“分流”HTS带202A-202D。HTS带中的每一个都包括在基底层206上的ReBCO层204，其中两个层都被铜覆层208包围。HTS带202A和202C被布置成类型-2对，HTS带202B和202D也是如此。

[0059] 由诸如不锈钢、黄铜或铜的金属制成的稳定器层210也被添加在堆叠式HTS带的外表面上。稳定器层可以被添加在线缆中的任何位置处，或者在某些情况下，根本不包括在内。

[0060] 图3示出了HTS线缆200的层中的一些的部分分解立体图(为了清楚起见，省略了带202C-202D)。最外侧的缠绕带201A-201B是连续的，而分流带202A-202B各自沿其长度具有规律的一系列断裂部302。断裂部布置在分流带202A-202B中，使得两个带中的断裂部在纵向上彼此不重合，并且在所示的示例中，具有不同的间距。相比之下，缠绕的HTS带202A、202B没有故意的断裂部或Ic断点，这是因此当被缠绕成线圈时，这些带呈现出具有零电阻的连续螺旋形超导路径。

[0061] 为了便于在下面的讨论中参考，带被分组为表示为S1(分流带202A-202B)、S2(分流带202C-202D)和W(带201A-202B)的横向对。因此，分流HTS带被视为每行内的对，而不是每列内的对，如针对类型-0对讨论布置时的情况一样。

[0062] 分流对S1和S2中的带具有彼此不同并且与W对中的带不同的临界电流$I_{C,S1}$和$I_{C,S2}$，其中W对的带各自具有临界电流$I_{C,W}$。

[0063] 当线缆被供应有增加的电流I_0时，W对将载送所有电流，直到I_0接近其临界电流2*$I_{C,W}$为止。然后，线缆将生成足够的电压，以将多余的电流(I_0-2*$I_{c,w}$)去除到分流带。根据通过带之间的正常金属(即非HTS材料)的局部电阻，该多余的电流将在分流带之间分开，这受带的动态电阻并受沿着带的间断部或中断点(断点)的间距影响。

[0064] 图4类似于图2，除了HTS线缆400包括额外的稳定器层401A和额外的稳定器层401B之外，其中所述额外的稳定器层401A位于HTS带201A与包括带202A-202B的S1分流对之间，所述额外的稳定器层401B位于HTS带202A与包括带202C-202D的S2分流对之间。在这个示例

中，额外的稳定器层由铜形成，尽管也可以使用其他金属(或合金)和其他导电材料。一个或更多个这样的额外的稳定器层可以被包括在HTS线缆400内的任何位置处，但是优选地位于由W、S1或S2 HTS带形成的类型-0对之间。

[0065] 本文描述的HTS线缆的另外的优点是不同的HTS带(即具有不同HTS材料或具有不同超导性质的带)可以结合到单个线缆中。这例如允许来自不同供应商的HTS带用于制造单个线缆，这对于大型磁线圈的构造特别重要，这是因为单个线缆供应商可能无法提供足够的HTS带。

[0066] 本文描述的HTS线缆还可以通过使用以下组合迫使电流在带之间均匀分布来允许增加临界电流：(a)选择每个“通道(lane)”中各个HTS带件的长度(例如，带件202A、202A’和202A”的长度)和(b)选择每个通道中的带制造商(基于临界电流)、和/或(c)选择分流HTS带202A-202D的宽度。

[0067] 内部分流带的许多布置和组合是可能的。

[0068] 图5类似于图4，除了HTS线缆500的HTS分流带202B和202D中的两个被布置成类型-0对之外。

[0069] 图6类似于图5，除了HTS线缆600包括两个另外的分流HTS带602A和602B之外，其中所述两个另外的分流HTS带602A和602被布置成类型-2对，使得分流HTS带的取向(即HTS层和基底层中的哪一个在最上面)跨HTS线缆600左右交替。在本示例中，分流HTS带被布置为2×3矩阵(即有两个行和3个列)。然而，一般而言，可以使用形成具有任意数量的行或列的矩阵的分流HTS带，即n×m矩阵布置。典型地，传输HTS带201A、201B的宽度是分流HTS带的宽度的整数倍，使得可以跨传输HTS带的表面提供整数数量的分流带。

[0070] 图7类似于图3，除了示出了图6的HTS线缆600之外。为了清楚起见，省略了稳定器层。三对(柱状)分流HTS被表示为702A、702B和702C。内部分流HTS带702B对具有小于外部分流HTS带702A、702B对的断点间距的断点间距。这迫使电流优先在外部对702A、702C中流动，这是因为由于对于外部对702A、702C中的传输电流的某些范围来说，动态电阻将更低，因此外部对与内部对702B相比具有更高的临界电流。这又导致与中间相比，更多的电流在传输带201、201B的边缘处流动。

[0071] 通过迫使电流优先分布在线缆的边缘处，可以增加线缆的电流容量，这是因为垂直于每个带的磁场的分量被减少。这通常是有益的，从而在热点(由于局部过载)导致热失控和磁体的最终失超之前，允许具有相同HTS量的线圈生成更高的磁场(以更高的传输电流)。

[0072] 在上述所有示例中，HTS线缆可以使用完全绝缘、部分(例如“泄漏”)绝缘、或在绕组之间不使用绝缘的情况下被缠绕成线圈。在托卡马克(如下所述)中，环形场(TF)线圈将在部分绝缘的情况下进行缠绕(以提供具有可接受的斜坡时间的最佳失超保护)，而极向场(PF)线圈将在完全绝缘的情况下进行缠绕(从而以需要更快的失超检测方法为代价提供最小的斜坡时间和可预测的交流(AC)行为)。

[0073] HTS线缆(诸如以上描述的那些)的一个重要应用是在一种称为托卡马克的聚变反应器中。托卡马克的特点在于结合了强环向磁场、高等离子体电流以及通常较大的等离子体体积和显著的辅助加热，以提供热的稳定等离子体。这允许托卡马克生成条件，以使得聚变能够发生。辅助加热(例如，通过数十兆瓦的高能氢、氘或氚的中性束注入)对于将温度升

高到核聚变发生所需的足够高的值和/或维持等离子体电流是必要的。

[0074] 托卡马克上的磁线圈可以被分成两组。极向场线圈是水平圆形线圈，这些水平圆形线圈被缠绕，且该线圈的中心位于托卡马克的中心柱上，并产生极向场(即，基本平行于中心柱的极向场)。环形场线圈竖直缠绕穿过中心柱，并围绕等离子体室的外部(“返回分支”)，以产生环向场(即，围绕中心柱呈圆形的环向场)。极向场和环向场的结合在等离子体室内产生螺旋场，这保持等离子体被限制。

[0075] 生成环向场所需的安培匝数非常大。因此，用于托卡马克的设计越来越多地涉及在场线圈中使用超导材料。对于紧凑型球形托卡马克，中心柱的直径应尽可能小。这就提出了矛盾的要求，因为即使利用超导材料，能够实现的电流密度也是有限的。

[0076] 本文描述的HTS线缆特别适于在托卡马克(特别是球形托卡马克)中使用，例如以产生极向场或环向场中的一个(或两者)。

[0077] 图8至图11示出了环形场(TF)磁体的问题，诸如在托卡马克中使用的那些磁体，其包括围绕中心柱的双扁平线圈的布置。

[0078] 图8示出了穿过TF磁体的横截面，其中双扁平线圈801A-801R围绕中心柱802均匀布置。每个双扁平线圈801A-801R都被布置成使得该线圈的轴线位于图的平面中，从而当电流依次流过双扁平线圈801A-801R中的每一个线圈时，产生环形磁场。

[0079] 图9示出了双扁平线圈801A-801R中的一个双扁平线圈的径向截面的特写视图。每个双扁平线圈801A-801R都由围绕公共轴线(未示出)在相反的方向上被缠绕并且以面对面的方式被堆叠的两个扁平线圈902A、902B形成。每个线圈902A、902B都由HTS线缆(该HTS线缆包括呈类型-0布置的堆叠式HTS带)形成，即由如上文背景技术部分所述的“常规”HTS线缆形成。HTS线缆的相邻绕组905、906通过部分绝缘层907彼此分离。

[0080] 图10示出了(单个)扁平线圈902A、902B中的一个扁平线圈内的磁场的计算的结果。图中的X轴和Y轴分别示出了线圈内的径向距离和轴向距离。等高线显示了线圈内的磁场强度|B|。线1001标记线圈902A、902B的示例性绕组的位置。图中示出的箭头的方向指示磁场($\underline{B}$)矢量和与线1001平行的偏差。

[0081] 图11类似于图10，除了示出了临界电流的计算结果之外。为了计算由带生成的场，每个带都被分成12个条带，其中用于单个条带的临界电流被依次加到所有分流带上)。临界电流的计算假设电流横跨带是均匀的。然而，这种假设可能并不总是有效的，因为实际上，电流横跨带被重新分布(即沿着X轴)，以实现电流与临界电流的均匀比率，即

[0082] $$\frac{I(x)}{I_c(B(x),T,\theta(x))} \approx \text{常数}$$

[0083] 因此，临界电流分布的计算可以使用迭代程序进行改进，在该迭代程序中，使用图11中示出的近似临界电流分布$I_c(x)$重新计算电流分布I(x)。这个过程可以以迭代的方式被重复，直到两个电流分布不再变化为止。因此，图11中示出的结果仅代表第一次迭代。

[0084] 参考图10中示出的所计算的磁场可以理解图11。临界电流在内半径处最高(其中磁场接近于零)，但在较大半径处(X位置)迅速下降，并且B增加。主要由于从大约平行于扁平线缆的下边缘(y＝0)处的HTS线缆中的带(并且因此平行于ReBCO层的ab平面)到上边缘(y＝20mm)处偏离几度的场角度方面的变化，临界电流也横跨线圈宽度(Y位置)变化。在使

用中，传输电流将与I_c分布的成比例地在带中流动。因此，线圈802A、802B内的磁场强度和方向的不均匀性引起电流“拱”扁平线圈的内边缘的趋势。

[0085] 这个问题可以通过利用类似于上面结合图2至图7所述的那些HTS线缆替换“常规”HTS线缆来解决。选择分流HTS带中的间断点(即，损失、切口或I_c方面的变化)，以使更大比例的传输电流在线缆的一侧上的分流HTS带中流动。这允许双扁平线圈801A-801R在失超之前载送更多的电流。

[0086] 本文描述的HTS线缆的另外的优点包括监控HTS带的I_c劣化，诸如可能由聚变反应器中的中子损伤或由热场循环或磁场循环引起的疲劳导致的HTS带的I_c劣化。特别地，可以提供I_c劣化的早期预警，这在例如大型托卡马克线圈(PF和TF两者)中具有很大益处。

[0087] 图12示出了用于图2中示出的HTS线缆200的I-V(电流-电压)曲线。每条曲线针对分流HTS带中的完整切口之间的不同间距。越近的间距意味着更大的电阻以及因此更大的梯度(dV/dI)。

[0088] 在低于$2*I_{C,W}$，1201的电流(缠绕的W对的组合临界电流)的情况下，线缆200生成可忽略的电压，这是因为线缆200具有可忽略的电阻。对于在$2*I_{C,W}$(1201)＜I＜$2*I_{C,W}+4*I_{C,S}$(1202)的范围内的传输电流(I)来说，其中$4*I_{C,S}$是两个S对(S1和S2)的组合临界电流，线缆显示恒定的电阻，并因此产生与I成比例的电压。对于I＞$2*I_{C,W}+4*I_{C,S}$(1202)，线缆将多余的电流分流到正常(即非超导)金属稳定器210中，这将最终导致失超(热失控)，这是因为焦耳加热降低了线缆中的HTS带的临界电流。

[0089] 参考图12，出于监控目的，线缆被设计成以1201和1202之间(即缠绕带的组合Ic和分流带的组合I_c之间)某处的恒定传输电流操作或运行。在这种传输电流下，线缆具有微小电阻。因此，该线缆以热量的形式耗散一些功率。如果线缆(W对或S对)的临界电流劣化，这种耗散将略微增加，从而导致温度方面的升高，直到达到新的热平衡(其中增加的热量生成等于在升高的温度下可用的增加的冷却功率)为止。这种温度升高可以通过跨线圈分布的许多点处监控线缆的温度来检测。因此，温度方面的缓慢升高提供了临界电流方面的下降的指示，并且因此可以用作未来某个(不确定的)时间出现的可能失超(热失控)的非常早期的预警。

[0090] 图13示出了类似于HTS线缆600(参见图6)的HTS线缆1300的横截面，除了现在有四个“传输”HTS带1301A、1301B和1304A、1304B(而不是如HTS线缆600中那样的两个)之外。传输HTS带被布置在两个层中，这些层被如针对HTS线缆600那样(即2×3矩阵)布置的六个较窄的“分流”HTS带1302A-1302C、1303A-1303C彼此分离。每个层中的传输HTS带1301A、1301B和1304A、1304B并排布置，其中每个传输HTS带的HTS层朝向分流HTS带，从而产生两个类型-0对传输带1301A、1304A和1301B、1304B。中间分流HTS带1302B、1303B分别跨越HTS传输带中的两个。

[0091] HTS线缆1300具有两倍于传输HTS带1301A、1301B、1304A、1304B的宽度。更宽的HTS线缆可以通过添加更多的类型-0对传输HTS带并相应地增加分流HTS带的数量(即添加分流HTS带的额外的列或增加分流HTS带1302A-1302C、1303A-1303C中的一个或更多个的宽度以跨越传输HTS带)而被构造而成。

[0092] 较宽的HTS线缆(诸如HTS线缆1300)对于用于在托卡马克中使用的TF磁体特别有益，因为较宽的HTS线缆使得特定高度(沿着线圈的轴线的尺寸)的双扁平线圈801A-801R能

够由相对较窄的HTS带构造而成，也就是说，较少的线圈需要被轴向堆叠以获得给定高度的双扁平线圈。因此，在线圈之间需要更少的接头(即电气连接件)，因此制造更加简化，并且存在更少的故障的“弱点”。附加地，由许多较窄扁平线圈的堆叠构造而成的TF线圈的总电阻与具有更少(例如2个)较宽的扁平线圈的TF线圈相比，在由许多较窄扁平线圈的堆叠构造而成的TF线圈中更均匀地分布。

[0093] 在一些情况下，较宽的HTS线缆可以允许仅由两个线圈构成单个TF分支，这是特别有利的，因为每个分支801A中的两个扁平线圈都可以被布置成使得电流通过扁平线圈之间的接头(所述接头由于位于扁平线圈的外径上而很容易接近)从一个扁平线圈的内径以螺旋的方式流向其外径，并且然后从另一扁平线圈的外径以螺旋的方式返回到另一扁平线圈的内径，并且然后通过双扁平线圈801A、801B之间的“分支-分支”接头进入下一分支801B中。分支-分支接头位于扁平线圈的内径上并且远离TF中心柱802，这有助于制造、修复或测试接头。

[0094] 具有更少(例如2个)堆叠线圈的另一个优点是该堆叠线圈降低了扁平线圈801A-801R的电感(相对于具有更多线圈的叠层的电感)。较低电感L的线圈具有潜在优势：(a)斜升期间的降低的电压(V＝L.dI/dt)，(b)根据失超保护的要求，快速断电期间生成降低的电压。

[0095] 虽然上面已经描述了本发明的各种实施例，但是应当理解的是，所述是作为示例而非限制进行呈现。对于相关领域的技术人员来说显而易见的是，在不背离本发明的精神和范围的情况下，可以在形式和细节上进行各种改变。

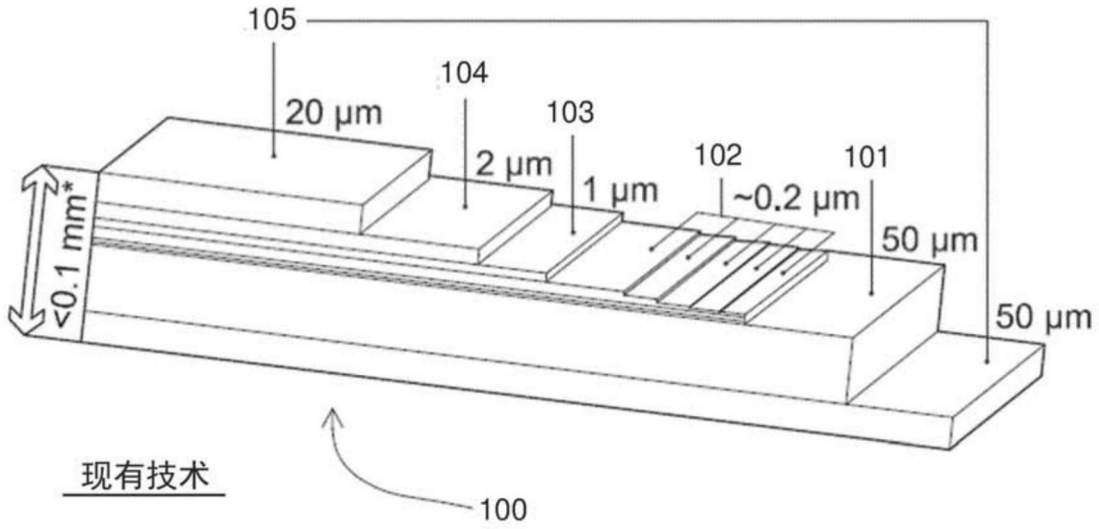

105
104
103
102
101
20 μm
2 μm
1 μm
~0.2 μm
50 μm
50 μm
<0.1 mm*
现有技术
100

图1

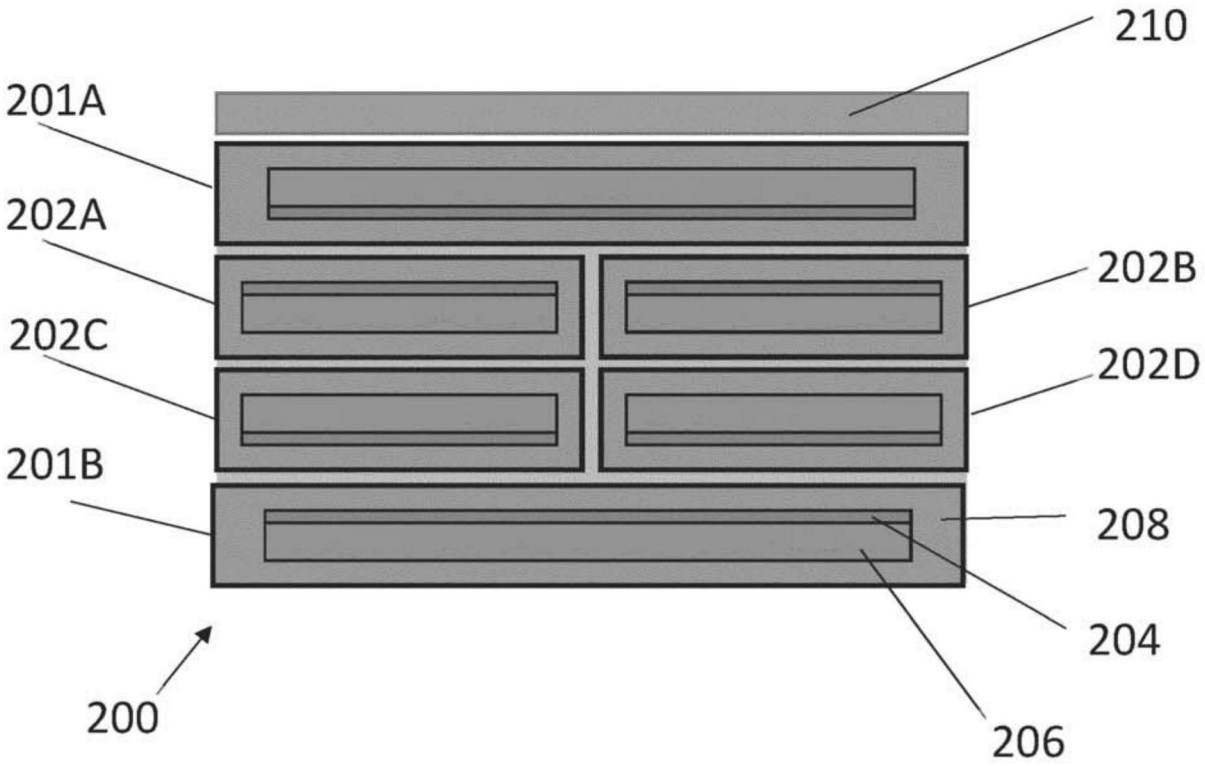

210
201A
202A
202B
202C
202D
201B
208
204
206
200

图2

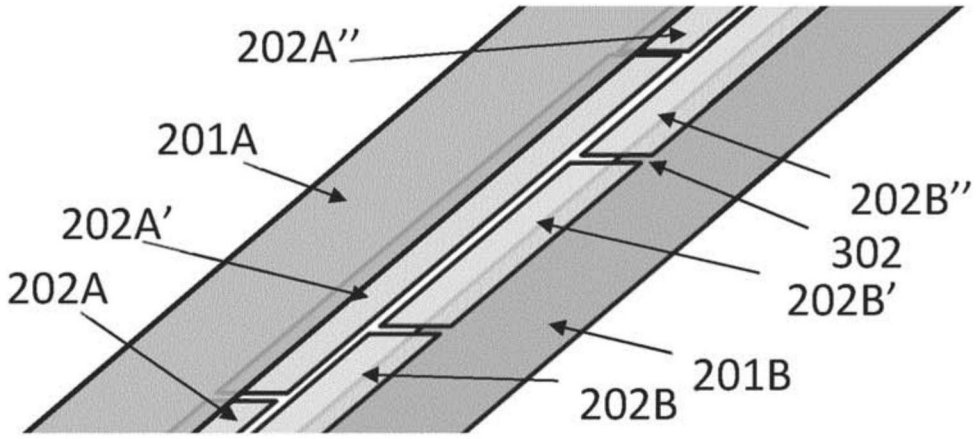

202A''
201A
202A'
202A
202B''
302
202B'
201B
202B

图3

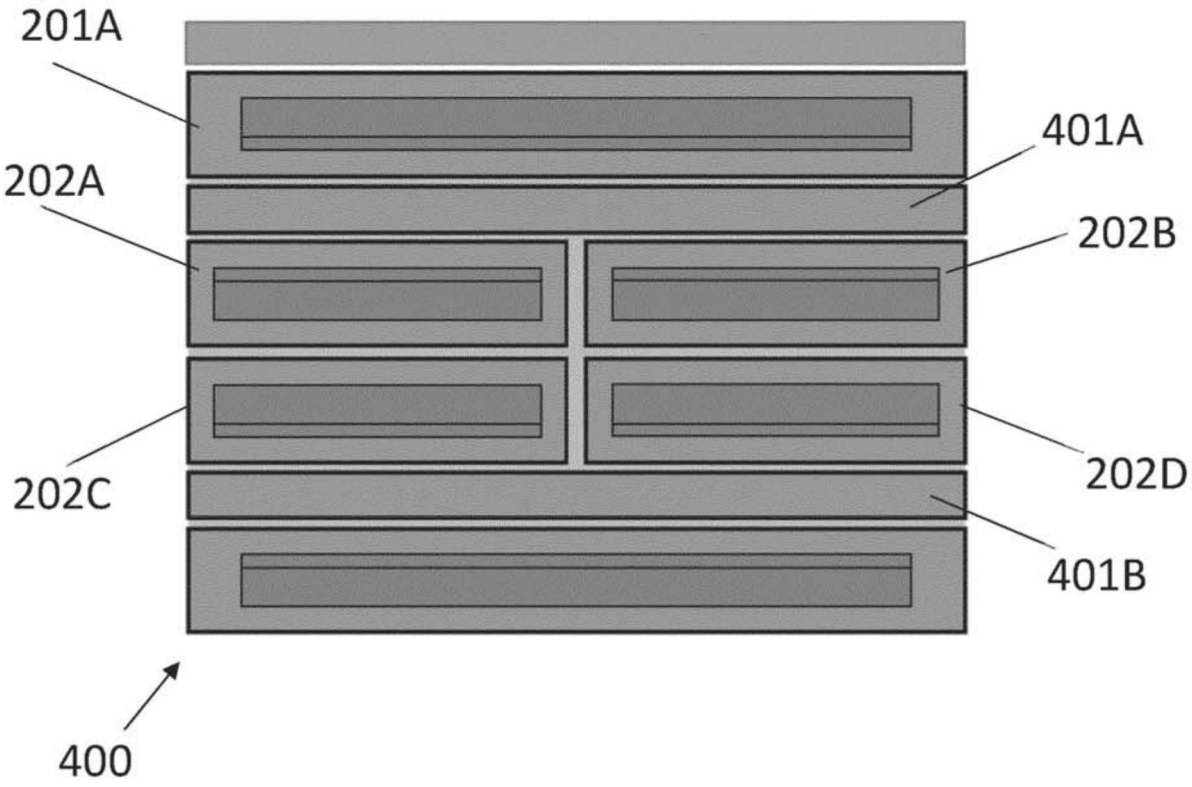

201A
401A
202A
202B
202C
202D
401B
400

图4

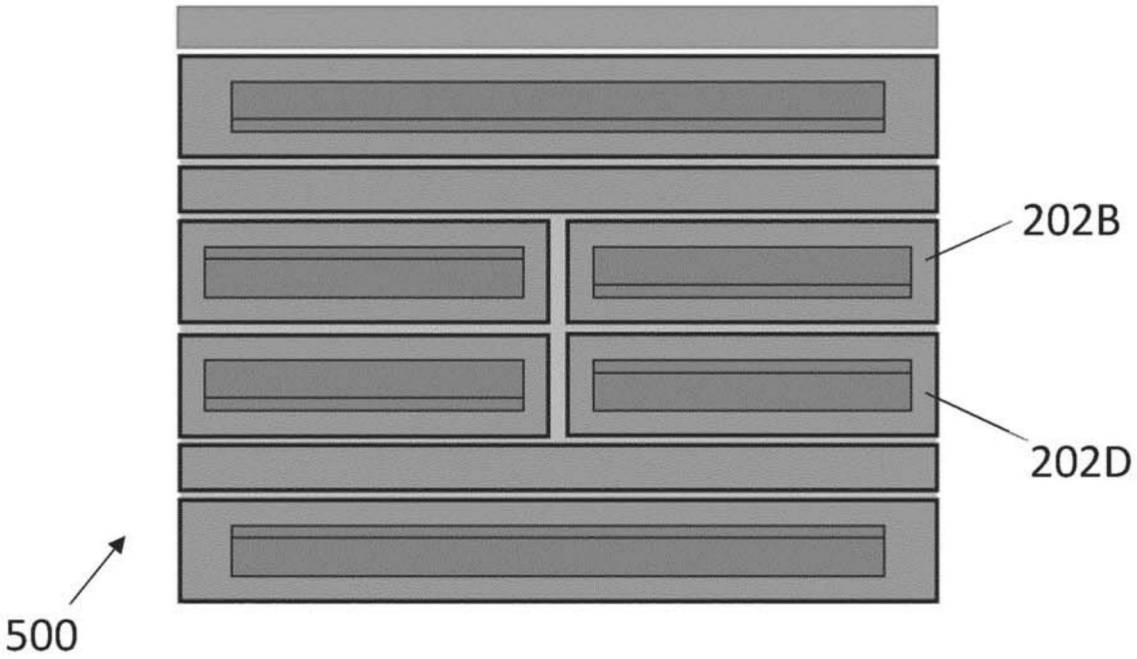


图5

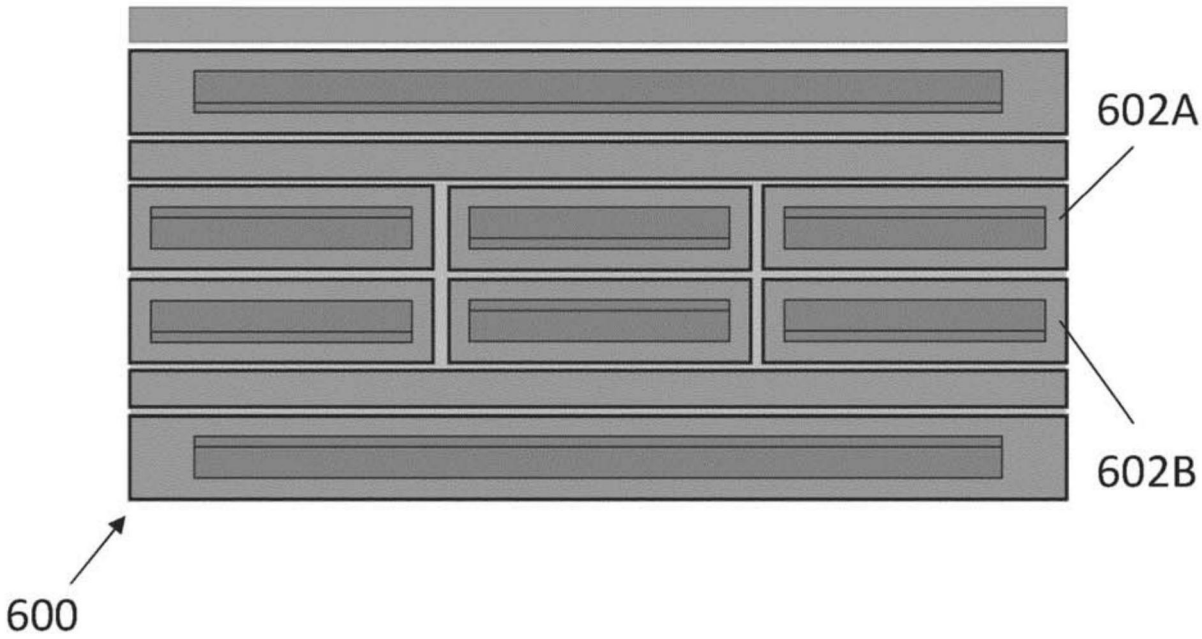


图6

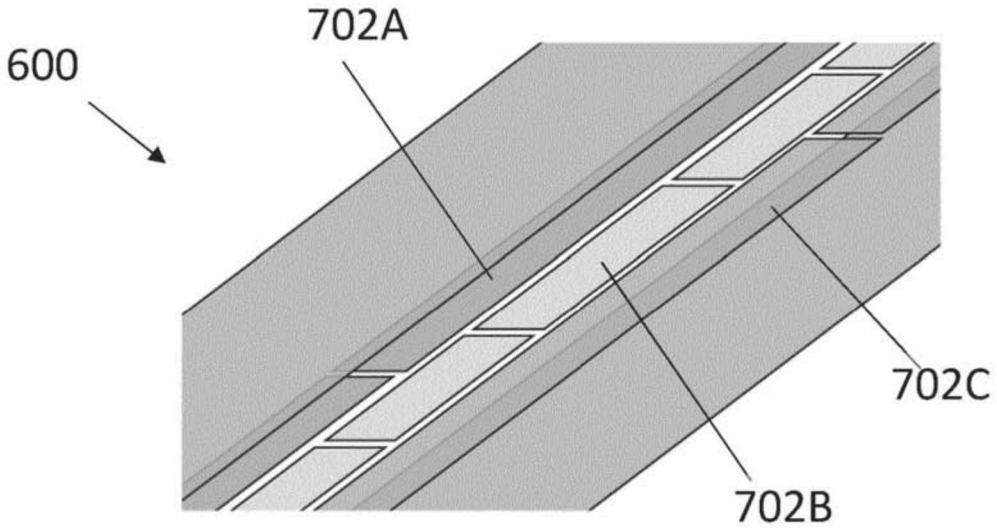

600
702A
702C
702B

图7

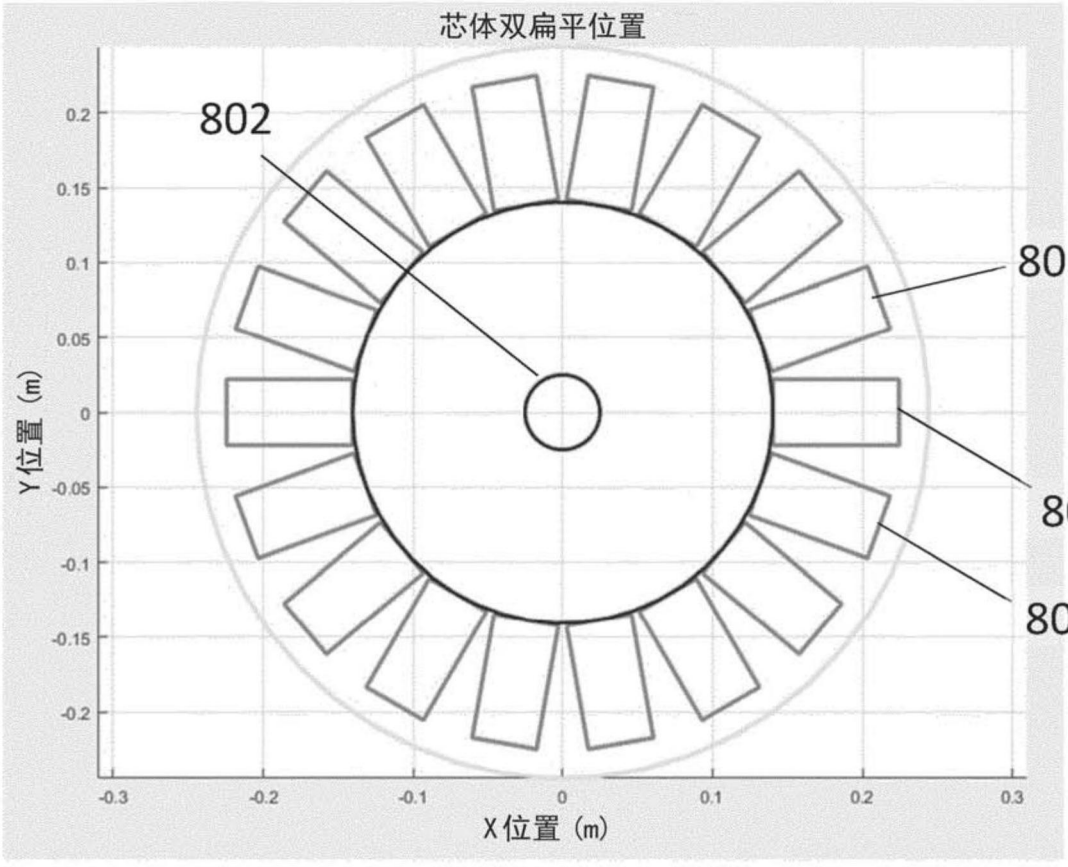

芯体双扁平位置
802
801R
801A
801B
Y位置 (m)
X位置 (m)
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-0.05
-0.1
-0.15
-0.2
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3

图8

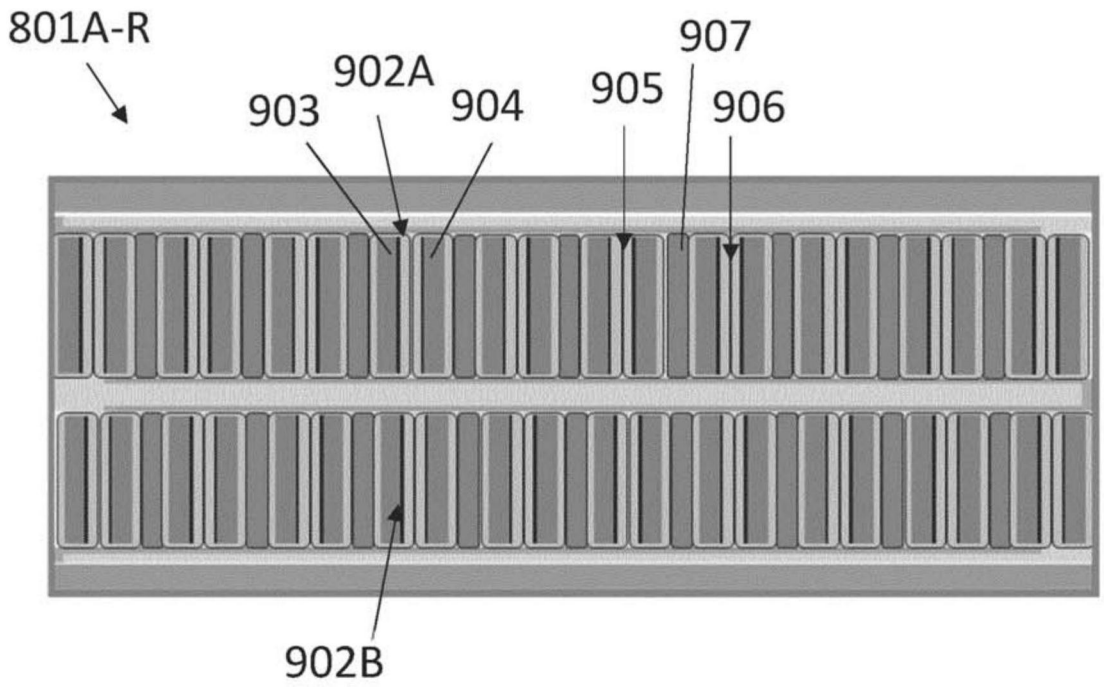

801A-R
903
902A
904
905
907
906
902B

图9

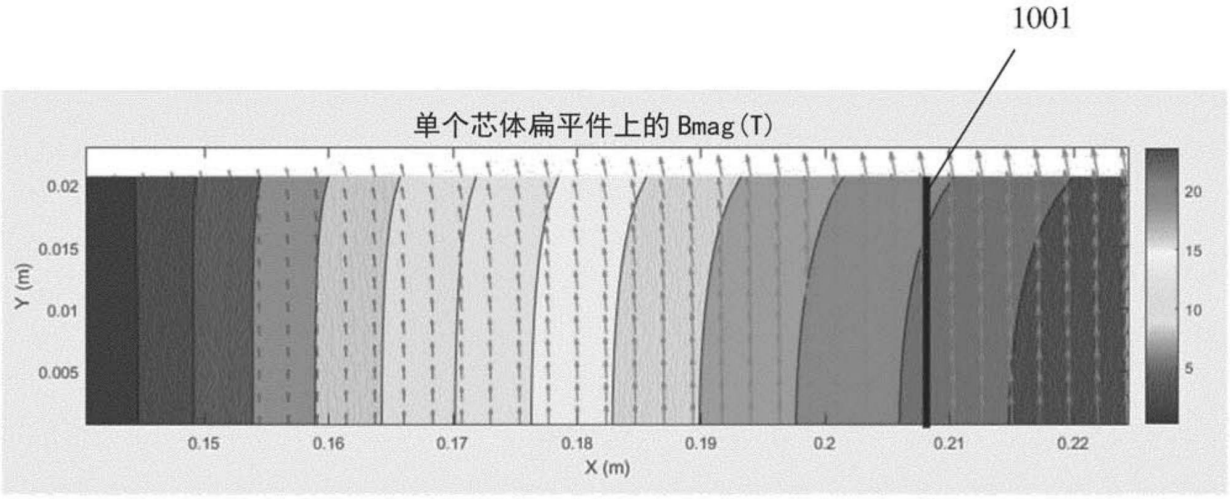

1001
单个芯体扁平件上的 Bmag(T)
Y (m)
0.02
0.015
0.01
0.005
0.15
0.16
0.17
0.18
0.19
0.2
0.21
0.22
X (m)
20
15
10
5

图10

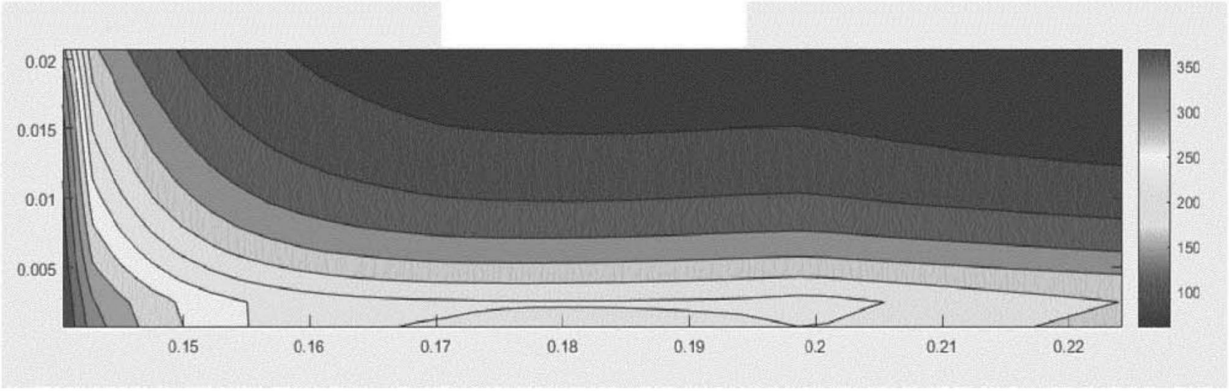

0.02
0.015
0.01
0.005
0.15
0.16
0.17
0.18
0.19
0.2
0.21
0.22
350
300
250
200
150
100

图11

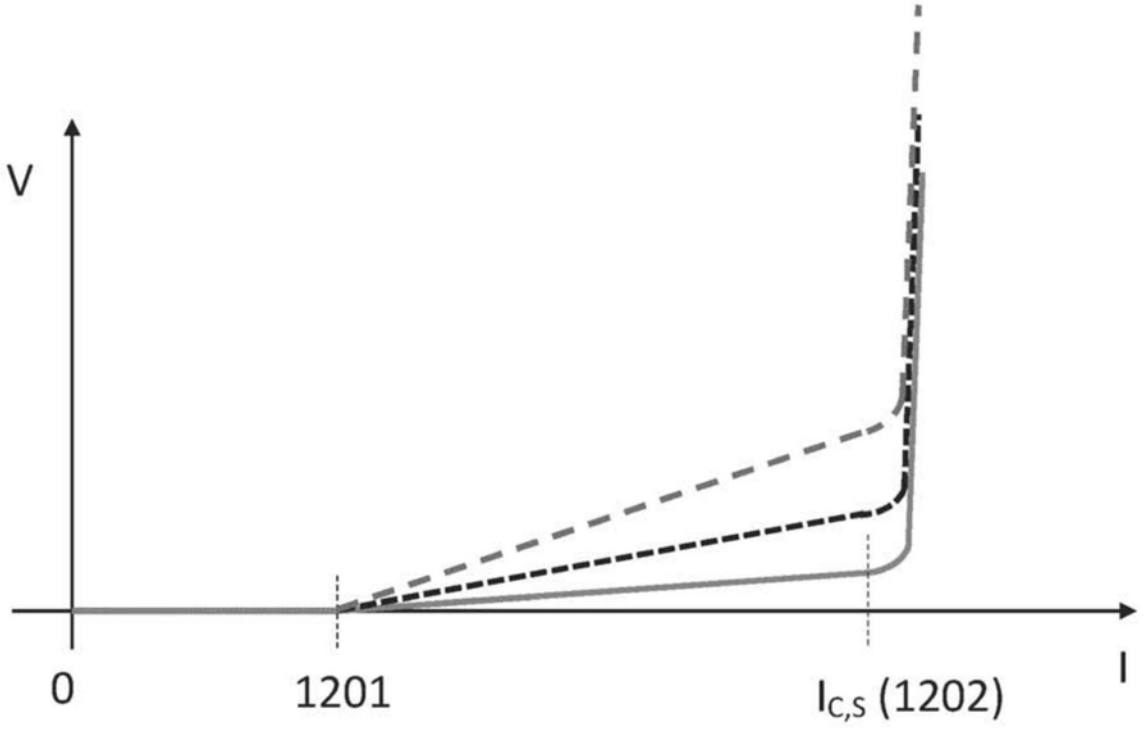

V
0
1201
$I_{C,S}$ (1202)
I

图12

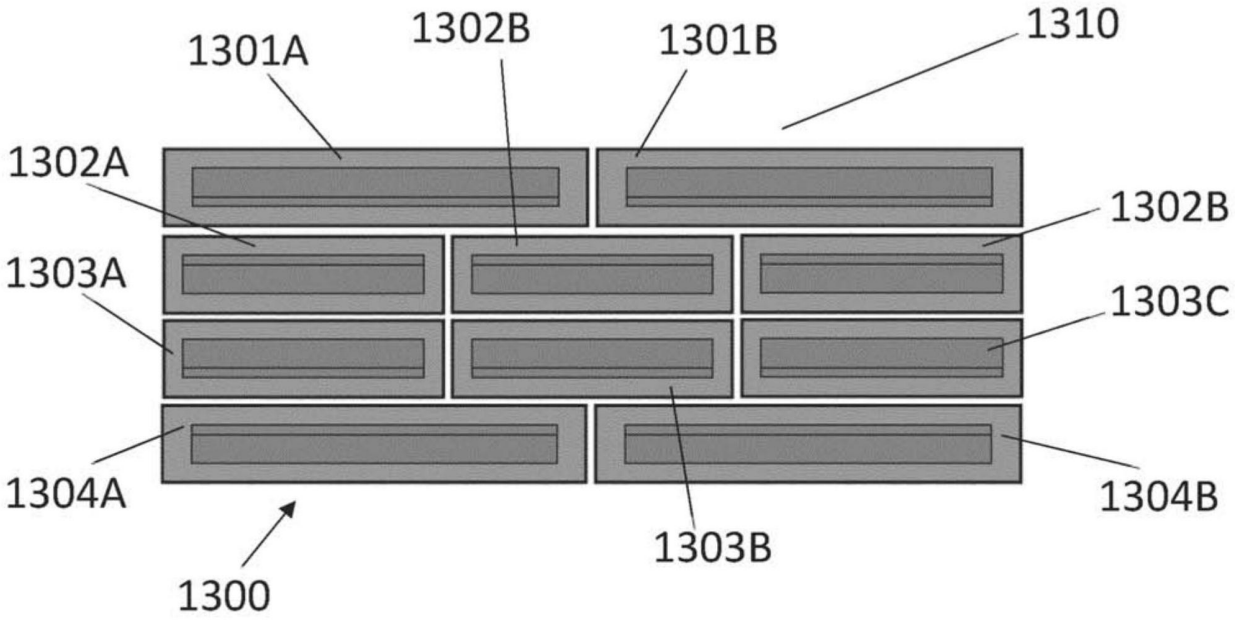

1301A
1302B
1301B
1310
1302A
1302B
1303A
1303C
1304A
1304B
1303B
1300

图13