(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 115605967 A
(43)申请公布日 2023.01.13

(21)申请号 202180034880.2

(22)申请日 2021.05.14

(30)优先权数据
2007245.0 2020.05.15 GB

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2022.11.11

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2021/062844 2021.05.14

(87)PCT国际申请的公布数据
WO2021/229062 EN 2021.11.18

(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 托尼·兰特里

(74)专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021
专利代理师 赵金强 张成新

(51)Int.Cl.
H01F 6/00(2006.01)

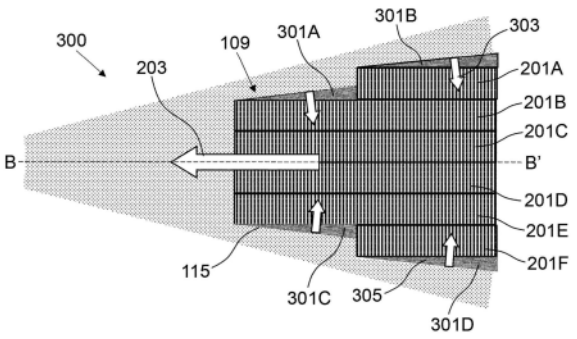
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

超导体电磁体

(57)摘要

一种电磁体包括一个或多个通道。每个通道均具有设置于其中的导体元件，该导体元件包括一层或多层超导体材料以用于沿着通道的轴线传导电流。导体元件被布置成通过相对于彼此倾斜的第一楔形表面和第二楔形表面接触通道的侧壁，使得在垂直于所述轴线的方向上偏压导体元件的力在楔形表面上产生相反的接触力，该相反的接触力起作用以用垂直于所述力的分量沿着一方向压缩导体元件。



CN 115605967 A

1.一种电磁体,包括一个或多个通道,每个通道均具有设置于其中的导体元件,所述导体元件包括一层或多层超导体材料以用于沿着所述通道的轴线传导电流,所述导体元件被布置成通过相对于彼此倾斜的第一楔形表面和第二楔形表面接触所述通道的侧壁,使得在垂直于所述轴线的方向上偏压所述导体元件的力在所述楔形表面上产生相反的接触力,所述相反的接触力起作用以用垂直于所述力的分量沿着一方向压缩所述导体元件。

2.根据权利要求1所述的电磁体,其中,每个导体元件均包括高温超导体(HTS)带的一个或多个叠层,每个高温超导体带均包括沿着所述通道的轴线延伸的高温超导体材料层。

3.根据权利要求2所述的电磁体,其中,所述高温超导体材料是ReBCO。

4.根据权利要求2或3所述的电磁体,其中,每个导体元件均包括楔形构件,所述楔形构件设置在所述高温超导体带的叠层和所述通道的侧壁中的一个侧壁之间,所述第一楔形表面设置在所述楔形构件上。

5.根据权利要求4所述的电磁体,其中,所述楔形构件固定到所述高温超导体带的叠层。

6.根据权利要求4或5所述的电磁体,其中,所述楔形构件包括与所述叠层接触的表面,所述表面基本上垂直于所述高温超导体材料层。

7.根据权利要求6所述的电磁体,其中,对于所述导体元件中的一个或多个导体元件,所述第一楔形表面和与所述叠层接触的所述表面之间的锐角大于1度,大于3度,或大于5度。

8.根据权利要求7所述的电磁体,其中,每个导体元件均包括另一个楔形构件,所述另一个楔形构件附接到所述高温超导体带的一个或多个叠层,所述第二楔形表面设置在所述另一个楔形构件上。

9.根据前述权利要求中任一项所述的电磁体,其中,所述导体元件的楔形表面中的每个楔形表面与所述通道的侧壁之间的静摩擦系数为0.1至0.3,或大于0.3,或大于0.4。

10.根据前述权利要求中任一项所述的电磁体,其中,所述导体元件中的每个导体元件均是封装的。

11.根据前述权利要求中任一项所述的电磁体,还包括支撑构件,所述通道设置于所述支撑构件中,所述支撑构件包括一个或多个通孔,所述通孔在具有平行于所述通道中的一个或多个通道的分量的方向上延伸。

12.根据权利要求11所述的电磁体,其中,所述一个或多个孔位于所述通道的侧壁中的一个或多个侧壁附近。

13.一种用于托卡马克等离子体室的环形场线圈的中心柱,所述中心柱包括多个根据前述权利要求中任一项所述的电磁体,所述通道围绕中心轴线间隔开,并且所述一层或多层超导体材料被布置成平行于所述中心轴线传导电流,其中,所述力是将所述导体元件朝所述中心轴线偏压的径向力。

14.根据权利要求13所述的中心柱,其中,所述通道设置于单个支撑构件中。

15.根据权利要求13或14所述的中心柱,包括一个或多个贯穿所述支撑构件或每个支撑构件的孔,每个孔均平行于所述中心轴线延伸。

16.根据权利要求15所述的中心柱,其中,所述一个或多个孔位于所述导体元件的径向内边缘的径向外侧。

17.根据权利要求13至16中任一项所述的中心柱,其中,所述支撑构件或每个支撑构件均包括一个或多个可移除的角段,每个角段均包括所述多个通道中的一个或多个通道。

18.一种用于托卡马克等离子体室的环形场线圈的中心柱,所述中心柱包括支撑构件,所述支撑构件具有围绕中心轴线间隔开的多个通道,每个通道均具有设置于其中的导体元件,所述导体元件包括一层或多层超导体材料以用于平行于所述中心轴线传导电流,所述导体元件被布置成通过相对于彼此倾斜的第一楔形表面和第二楔形表面接触所述通道的侧壁,使得将所述导体元件朝所述中心轴线偏压的径向力在所述楔形表面上产生相反的接触力,所述相反的接触力起作用以用垂直于所述径向力的分量沿着一方向压缩所述导体元件。

19.一种用于托卡马克的环形场线圈,所述环形场线圈包括根据权利要求13至18中任一项所述的中心柱。

20.一种托卡马克,包括根据权利要求19所述的环形场线圈。

超导体电磁体

技术领域

[0001] 本发明涉及包括超导体材料的电磁体。特别地但不排他地，本发明涉及用于在等离子体室中使用的电磁体，例如用于托卡马克聚变反应堆的电磁体(例如用于托卡马克等离子体室的环形场线圈的中心柱中的电磁体)。

背景技术

[0002] 托卡马克的特点是结合了强环形磁场、高等离子体电流以及通常的大等离子体体积和显著的辅助加热，以提供热的、稳定的等离子体。这使得托卡马克能够产生条件，从而实现聚变。辅助加热(例如通过数十兆瓦的高能H、D或T中性束注入)对于将温度升高到发生核聚变所需的足够高的值和/或维持等离子体电流是必要的。

[0003] 一个问题是：由于通常需要大尺寸、大磁场和高等离子体电流，所以建造成本和运行成本都很高，并且工程必须稳健，以应对磁体系统和等离子体中存在的大量储存能量，该储存能量有“破坏”的风险——在剧烈的不稳定中，百万安培电流在千分之几秒内降至零。

[0004] 可以通过将传统托卡马克的圆环形环面收缩到其极限来改善这种情况，因为传统托卡马克有带核的苹果的外观——“球形”托卡马克(ST)。这一概念在英国库勒姆的START托卡马克中的首次实现证明了效率的巨大提高——容纳热等离子体所需的磁场可以减少10倍。此外，等离子体稳定性提高，并且建造成本降低。

[0005] 为了获得经济发电所需的聚变反应(即，输出功率比输入功率大得多)，传统的托卡马克必须是巨大的，以便能量限制时间(大致与等离子体体积成正比)可以足够长，使得等离子体可以足够热以发生热聚变。

[0006] WO 2013/030554描述了一种替代方法，涉及使用紧凑的球形托卡马克以用作为中子源或能量源。球形托卡马克中的低纵横比等离子体形状改善了粒子限制时间，并允许在更小的机器中产生净功率。然而，小直径中心柱是必要的，这对等离子体限制容器和相关磁体的设计提出了挑战。

[0007] 托卡马克上的磁铁线圈可以分为两组。极向场线圈是水平圆形线圈，它们被缠绕成使它们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)。环形场线圈垂直地缠绕穿过中心柱，并围绕等离子体室的外部(“返回分支”)，以产生环形场(即，围绕中心柱的环形场)。极向场和环形场的组合在等离子体室内产生螺旋场，该螺旋场使等离子体保持受限。

[0008] 环形磁场中所需的电流非常大。对于紧凑的球形托卡马克，中心柱的直径应该尽可能小。这提出了相互矛盾的要求，因为即使使用超导材料，可以实现的电流密度也是有限的。

[0009] 大电流与托卡马克中的大磁场相结合，产生大洛伦兹力，该大洛伦兹力可能使托卡马克的多个部分变形或损坏。

[0010] 超导材料通常分为“高温超导体”(HTS)和“低温超导体”(LTS)。LTS材料(诸如Nb和NbTi)是可以用BCS理论描述其超导性的金属或金属合金。所有低温超导体的临界温度(在

高于该温度的情况下,即使在零磁场中材料也不能超导)都低于约30K。BCS理论没有描述HTS材料的行为,此类材料可能具有高于约30K的临界温度(尽管应该注意,定义HTS和LTS材料的是超导操作和成分的物理差异,而不是临界温度)。最常用的HTS是“铜酸盐超导体”——基于铜酸盐(含氧化铜基团的化合物)的陶瓷,例如BSCCO或ReBCO(其中,Re是稀土元素,通常为Y或Gd)。其他HTS材料包括铁氮化物(例如FeAs和FeSe)和二硼化镁(MgB_2)。

[0011] ReBCO通常被制造为带,其通常约为100微米厚,并包括衬底(通常被电抛光的哈氏合金约为50微米厚),在其上通过IBAD、磁控溅射或另一种合适的技术沉积一系列缓冲层,该缓冲层已知为厚度约为0.2微米的缓冲叠层。外延ReBCO-HTS层(通过MOCVD或其他合适的技术沉积)覆盖该缓冲叠层,并且通常为1微米厚。通过溅射或其他合适的技术在HTS层上沉积1-2微米的银层,并且通过电镀或其他合适技术在带上沉积铜稳定剂层,这通常完全包封带。

[0012] 衬底提供了可以通过生产线馈送的机械主干,并允许后续层的生长。缓冲叠层需要提供在其上生长HTS层的双轴织构的晶体模板,并防止元素从衬底向HTS的化学扩散,该化学扩散破坏其超导特性。要求银层提供从ReBCO到稳定剂层的低电阻界面,并且稳定剂层105在ReBCO的任何部分停止超导(进入“正常”状态)的情况下提供替代电流路径。

[0013] 商用HTS带在大于约400MPa的内应力下开始降解。

发明内容

[0014] 本发明的目的是提供一种用于环形场线圈的中心柱,其解决或至少缓解上述问题。

[0015] 根据本发明的第一方面,提供一种包括一个或多个通道的电磁体。每个通道均具有设置于其中的导体元件,该导体元件包括一层或多层超导体材料以用于沿着通道的轴线传导电流。导体元件被布置成通过相对于彼此倾斜的第一楔形表面和第二楔形表面接触通道的侧壁,使得在垂直于轴线(例如,进入通道)的方向上偏压导体元件的力在楔形表面上产生相反的接触力,该相反的接触力起作用以用垂直于所述力的分量沿着一方向压缩导体元件。

[0016] 电磁体可以被配置为使得在电磁体操作期间产生的应力不超过与超导体材料相关联的阈值应力。可以例如基于HTS材料的退化和/或HTS材料作为超导体起作用的能力的退化来确定阈值应力。

[0017] 所述通道或每个通道可以是“开放”通道,使得导体元件不被通道的壁所包围。或者,通道可以是“封闭的”,使得通道的壁围绕导体元件,例如通道可以是支撑构件中的通孔。

[0018] 在一些情况下,电磁体可以具有中心轴线,其中,一个或多个通道的轴线平行于中心轴线布置。在这种情况下,一层或多层超导体材料被布置成平行于中心轴线传导电流。在垂直于轴线的方向上偏压导体元件的力可以被定向成朝向中心轴线。

[0019] 每个导体元件均可以包括高温超导体(HTS)带的一个或多个叠层,每个HTS带均包括沿着通道延伸的HTS材料层。HTS材料可以是ReBCO。

[0020] 每个导体元件均可以包括设置在HTS带的叠层和通道的侧壁中的一个侧壁之间的楔形构件,第一楔形表面设置在楔形构件上。楔形构件可以固定到HTS带的叠层。

[0021] 楔形构件包括与叠层接触的表面,该表面基本上垂直于HTS材料层。

[0022] 对于导体元件中的一个或多个导体元件,第一楔形表面和与叠层接触的表面之间的锐角可以大于1度,大于3度,或大于5度。

[0023] 每个导体元件均可以包括附接到HTS带的一个或多个叠层的另一个楔形构件,第二楔形表面设置在该另一个楔形构件上。

[0024] 导体元件的楔形表面中的每个楔形表面与通道的侧壁之间的静摩擦系数可以为0.1至0.3,或大于0.3,或大于0.4。

[0025] 每个导体元件均可以是封装的。

[0026] 电磁体还可以包括支撑构件,通道设置在支撑构件中。支撑构件可以包括一个或多个通孔,该通孔在具有平行于通道中的一个或多个的分量的方向上延伸。一个或多个通孔可以位于通道的侧壁中的一个或多个侧壁附近。一个或多个通孔可以用于冷却电磁体。

[0027] 根据本发明的第二方面,提供一种用于托卡马克等离子体室的环形场线圈的中心柱。中心柱包括多个根据本发明的第一方面所述的电磁体。通道围绕中心轴线间隔开,并且一层或多层超导体材料被布置成平行于中心轴线传导电流。该力是将导体元件朝向中心轴线偏压的径向力。

[0028] 通道可以设置于单个支撑构件中。

[0029] 中心柱可以包括一个或多个贯穿所述支撑构件或每个支撑构件的孔,每个孔均平行于中心轴线延伸。一个或多个孔可以位于导体元件的径向内边缘的径向外侧。孔可以用于冷却中心柱,例如通过使冷却流体流过孔。尽管有一个或多个孔,但与中心柱的已知设计相比,由于中心柱中的内应力较低,(一个或多个)环形场线圈可以在不引起中心柱变形的情况下操作。

[0030] 所述支撑构件或每个支撑构件可以包括一个或多个可移除的角段,每个角段均包括多个通道中的一个或多个通道。

[0031] 根据本发明的第三方面,提供一种用于托卡马克等离子体室的环形场线圈的中心柱。中心柱包括支撑构件,该支撑构件具有围绕中心轴线间隔开的多个通道。每个通道均具有设置于其中的导体元件,该导体元件包括一层或多层超导体材料以用于平行于中心轴线传导电流。导体元件被布置成通过相对于彼此倾斜的第一楔形表面和第二楔形表面接触通道的侧壁,使得朝向中心轴线偏压导体元件的径向力在楔形表面上产生相反的接触力,该相反的接触力起作用以用垂直于径向力的分量沿着一方向压缩导体元件。

[0032] 每个导体元件均可以包括高温超导体(HTS)带的一个或多个叠层,每个HTS带均包括平行于中心轴线延伸的HTS材料层。

[0033] HTS材料可以是ReBCO。

[0034] 每个叠层中的HTS材料层可以基本上垂直于径向线,该径向线在横向于中心轴线的平面中从中心轴线延伸并穿过相应的导体元件。

[0035] 对于导体元件中的一个或多个导体元件,第一楔形表面和径向线之间的锐角可以大于1度,大于3度,或大于5度。

[0036] 每个导体元件均可以包括附接到HTS带的叠层的楔形构件,第一楔形表面设置在楔形构件上。每个导体元件均可以包括附接到HTS带的一个或多个叠层的另一个楔形构件,第二楔形表面设置在另一个楔形构件上。

[0037] 导体元件的楔形表面中的每个楔形表面与通道的侧壁之间的静摩擦系数可以为0.1至0.3,或大于0.3,或小于0.4。

[0038] 中心柱可以包括一个或多个穿过支撑构件的孔,该孔平行于中心轴线延伸。一个或多个孔可以位于导体元件的径向内边缘的径向外侧。

[0039] 支撑构件可以包括一个或多个可移除的角段,每个角段均包括多个通道中的一个或多个通道。

[0040] 导体元件可以是封装的。

[0041] 根据本发明的第四方面,提供一种用于托卡马克的环形场线圈,该环形场线圈包括根据第一方面、第二方面或第三方面所述的中心柱。

[0042] 根据本发明的第三方面,提供一种托卡马克,该托卡马克包括根据第四方面所述的环形场线圈。

附图说明

[0043] 图1A是托卡马克的示意性截面图;

[0044] 图1B是图1的托卡马克的中心柱的示意性轴向截面图;

[0045] 图2是环形场线圈的中心柱的角段的示意性轴向截面图;

[0046] 图3是根据本发明的环形场线圈的中心柱的角段的一部分的示意性轴向截面图;

[0047] 图4是不同楔角和摩擦系数的径向应力(法向应力)的有限元法(FEM)计算的结果的图表;

[0048] 图5是示出从FEM计算获得的应力的等值线图;并且

[0049] 图6是从FEM计算计算出的冯·米塞斯应力的等值线图。

具体实施方式

[0050] 图1A示出了通过球形托卡马克100的竖直截面,该托卡马克包括环形场线圈101、极向场线圈103和位于环形场线圈102内的环形等离子体室105。托卡马克100还包括中心柱107,该中心柱延伸穿过等离子体室105、和环形场线圈101以及极向场线圈103的中心。环形场线圈101中的每个均包括沿着中心柱107的轴线A-A'延伸的直线区段109和与直线区段109的任一端电连接以形成闭环的弯曲段111。

[0051] 图1B示出了沿轴线A-A'观察的中心柱107的轴向截面。在该示例中,托卡马克100包括12个环形场线圈101,每个环形场线圈101各自的直线区段109围绕中心柱107的轴线A-A'以等角布置成角度地间隔开。中心柱包括由铜制成的支撑构件113(尽管可以使用其他金属和/或合金),该支撑构件沿着轴线A-A'延伸并且具有多个通道115,环形场线圈111的直线区段109容纳在该多个通道中。直线区段109各自包括沿着中心柱107延伸的HTS带的长度的叠层布置,并且布置成通过它们各自的面彼此接触。HTS带的层平行于轴线A-A'延伸。

[0052] 图2是中心柱107的角段的轴向截面,示出了环形场线圈101中的一个环形场线圈的一个直线区段109。在该示例中,直线区段109包括HTS带的六个叠层201A-F,其中,设置在两个外侧叠层201A、201F之间的四个内侧叠层201B-E的厚度彼此相同(即,在沿着中心柱107的径向线B-B'的方向上的长度相同,径向线B-B'穿过直线区段109的中心并横向于带),两个外侧叠层201A、201F各自具有比内侧叠层201B-F更小的厚度。叠层201A-F彼此结合,其

径向最外边缘对齐。每个通道115的横截面轮廓对应于环形场线圈101的相应直线区段109的轮廓(即,通道115的垂直于线A-A'的横截面中的周边的形状)。

[0053] 在使用中,HTS带的叠层201A-F在方位磁场中携带轴向电流,并因此经受朝向柱107的中心(即,沿着虚线B-B'所示的径向方向)作用的洛伦兹力203。这些洛伦兹力径向作用在HTS带201A-F上,以将它们压靠在中心柱107的支撑构件113上,从而在HTS带的叠层201A-F的径向最内边缘和通道115的壁之间产生接触力205。因此,洛伦兹力203和接触力205的组合在HTS带201A-F内产生压缩应力,该压缩应力可能损坏HTS带201A-F或以其他方式降低其承载大电流的能力。

[0054] 除了示出中心柱300之外,图3与图2相似,其中,楔形构件301A-D固定到叠层201A、B、201E、201F的最外面,以形成环形场线圈101的直线区段109的圆周外部。穿过支撑构件113的通道115被扩大以适应直线区段109的增大的尺寸。在该示例中,楔形构件301A-D是平行于轴线A-A'平移对称延伸的三棱柱。形成楔形构件的横截面的三角形可以基本上是直角三角形,并且楔形构件可以被布置成使得每个棱柱的最大外表面(即,三角形横截面的斜边)被定向成远离HTS带201A-F,棱柱的较窄(尖)端位于棱柱的较宽端的径向内侧(即,三角形的最远离三角形的最锐角的一侧)。也就是说,楔形构件301A-D沿着方向B-B'径向地向内逐渐变细。通道115中的每个通道也径向地向内渐缩,使得通道115的侧壁平行于楔形构件301A-D的相应外表面。实际上,通道115的侧壁抵靠楔形构件301A-D的相应外表面。在该示例中,楔角305(楔形构件301A-D的两个最大面之间的内角,在棱柱的较窄端处)为5度。

[0055] 在使用中,径向作用在HTS带201A-F的直线区段109上的洛伦兹力203在楔形构件301A-D的外表面和通道115的侧壁之间产生接触力303。接触力303被定向成正交于楔形构件301A-D的外表面,即,接触力303具有径向分量(沿径向轴线B-B'定向)和周向分量(朝向径向轴线B-B'定向)。因此,楔形构件301A-D提供一种机构,由此中心柱101内的径向应力被交换为环向应力,即,中心柱内的径向应力减小,而环向应力增大。这种交换允许HTS带的叠层201A-F传导更高的电流,而不会对HTS带造成机械损坏。

[0056] 图4示出了当以通过中心柱101的28MA的电流操作托卡马克时,HTS带的叠层201A-F内产生的径向应力的有限元法(FEM)计算结果的图表。该电流在HTS带201A-F的径向最外边缘处产生26.9T的峰值磁场。磁场在远离中心柱101处单调衰减,在距中心柱101为1.4米处的幅度为4T。绘制的结果示出:线圈中的径向应力(单位为MPa)(竖直Y轴)是楔形构件301A-B的外表面与通道115的相应侧壁之间的摩擦系数(水平X轴)的函数。

[0057] 最上面的两组数据点401、403(示出为实心圆圈)分别表示针对1度和5度的楔角(对于每个楔形构件301A-D使用相同的楔角)计算出的外侧叠层201A、F中的径向应力。这些结果示出,楔角以及这两个角度越大,径向应力越低,增大摩擦系数使径向应力单调递减,递减量逐渐减小。对于1度至5度范围内的其他角度,也可以获得类似的结果(未示出),其中,计算出的径向应力的值介于这两组数据点401、403的径向应力之间。也可以使用大于5度的角度,例如高达10度、30度、45度或60度中的任何一个的角度。根据期望的径向应力,摩擦系数可以从0.1到0.3,或者从0.2到0.4,或者大于0.4,例如高达1.0。

[0058] 最下面的两组数据点405、407(显示为实心三角形)分别表示针对1度和3度的楔角(对于每个楔形构件301A-D使用相同的楔角)计算出的在内侧叠层201B-E中的径向应力。对于1度的楔角(数据点405),计算出的径向应力随着摩擦系数的增加而单调减小,但对于3度

的楔角，在摩擦系数为0.2时达到最小值。2度、4度和5度的楔角的径向应力计算提供的值通常介于针对1度和3度的楔角获得的值之间。

[0059] 使用0.3的摩擦系数和大于1度的楔角可以实现HTS带的外侧叠层201A、F中的350MPa的目标最大径向应力。

[0060] 图5和图6示出了在中心柱300的轴向截面内计算出的径向应力和计算出的冯·米塞斯应力的等值线图，其中，计算时楔角为3度，摩擦系数为0.3。为了计算效率，对图3所示的角段的一半进行计算，并施加边界条件以确保FEM解关于中心柱300的对称性的对称性。

[0061] HTS带107的叠层内的径向应力被计算为小于400MPa。HTS带的每个叠层201A-C的径向应力的最大值位于叠层的径向最内表面处，叠层201A的计算出的值为272.4MPa，叠层201B的计算出的值为313.43MPa，叠层201C的计算出的值为327.51MPa。

[0062] 计算出的支撑构件113中的冯·米塞斯应力在楔形构件301A、301B附近大部分低于约240MPa。这是足够低的，以便可以可选地在中心柱300的这一部分中设置冷却孔，即，在通道115之间并且平行于轴线A-A'延伸，而不会过度削弱中心柱。

[0063] 尽管以上描述已经集中在包括HTS带的中心柱上，但是也可以使用其他形式的HTS材料(例如导线)，或者可以使用LTS材料来代替HTS材料或与HTS材料一起使用。可以例如通过将HTS带的叠层包裹在用焊料中来“封装”HTS带。

[0064] 尽管本公开以用于环形场线圈(例如用于托卡马克等离子体室)的中心柱为例，但许多其他不涉及环形场线圈的应用也是可能的。例如，电磁体可用于航空航天应用，包括飞机、无人机、卫星、航天器、火箭推进车辆和自主探测车辆。事实上，将明白的是，上述楔形表面/楔形构件的使用通常可以用于减少(或至少重新分布)压在支撑构件上的电导体上的应力。楔形表面/楔形构件的这种使用对于超导体(LTS和/或HTS)材料特别有益，该材料在高于阈值的应力下降解或工作效率较低。

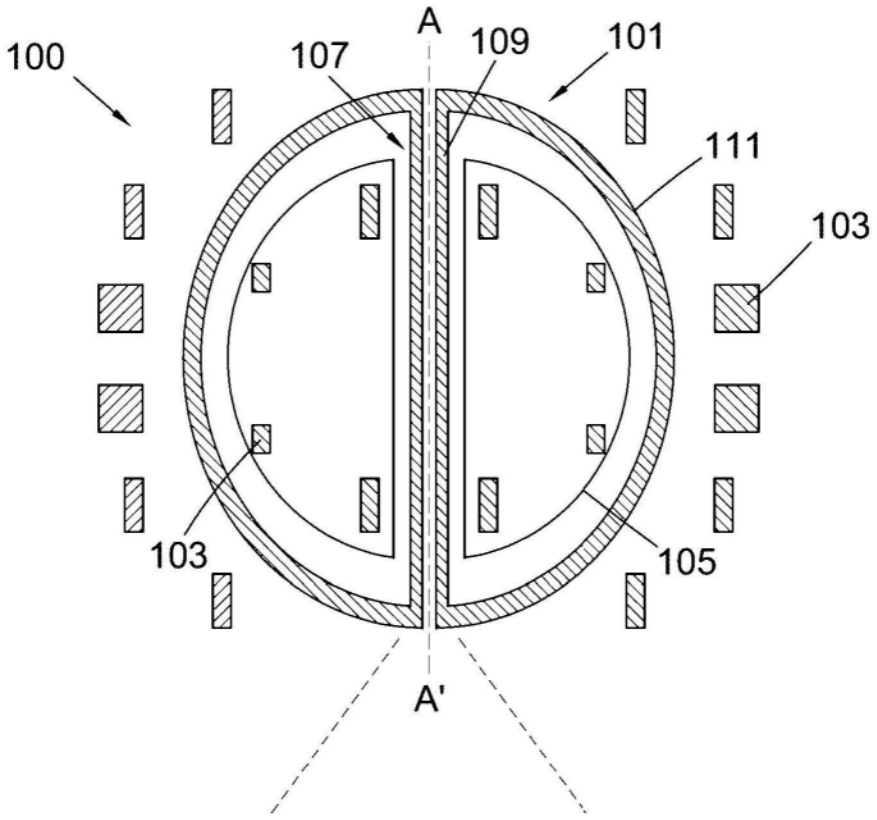


图1A

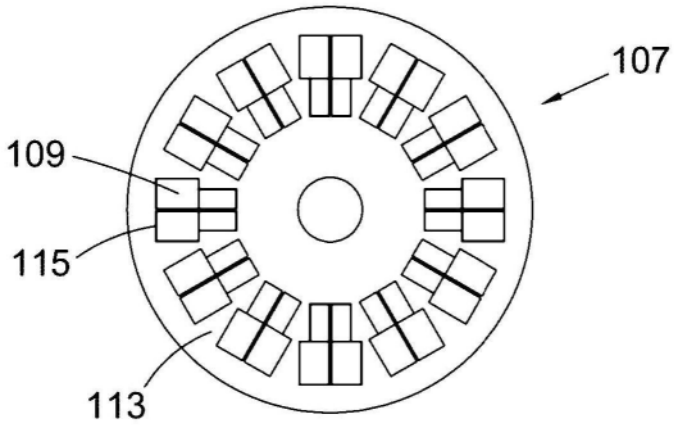


图1B

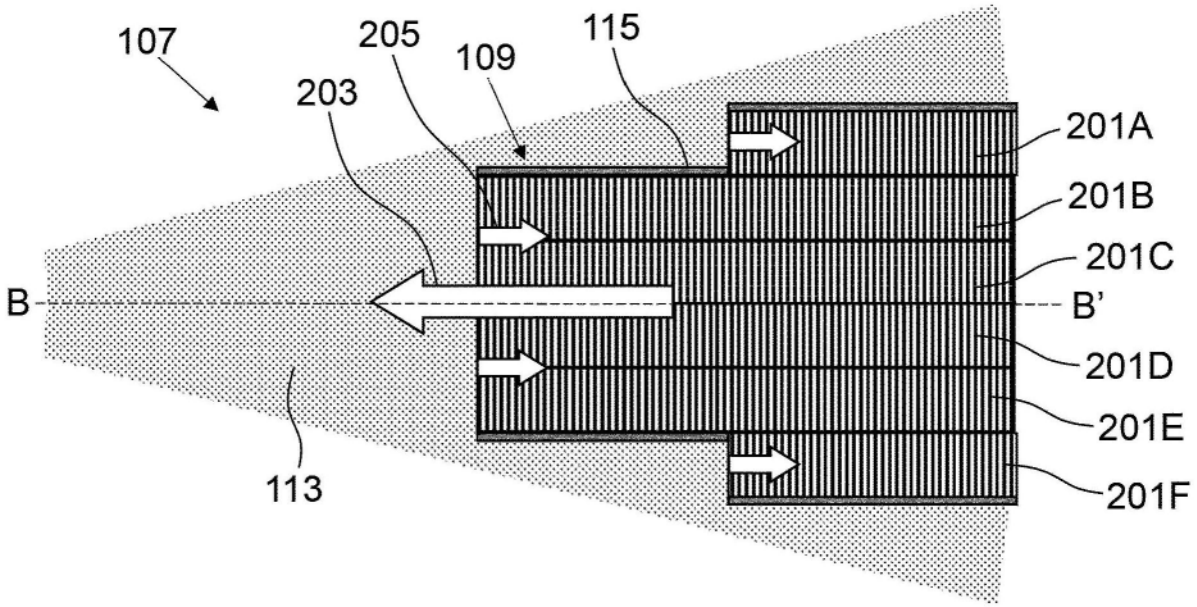

107
205
109
115
203
201A
201B
201C
B
B'
201D
201E
113
201F

图2

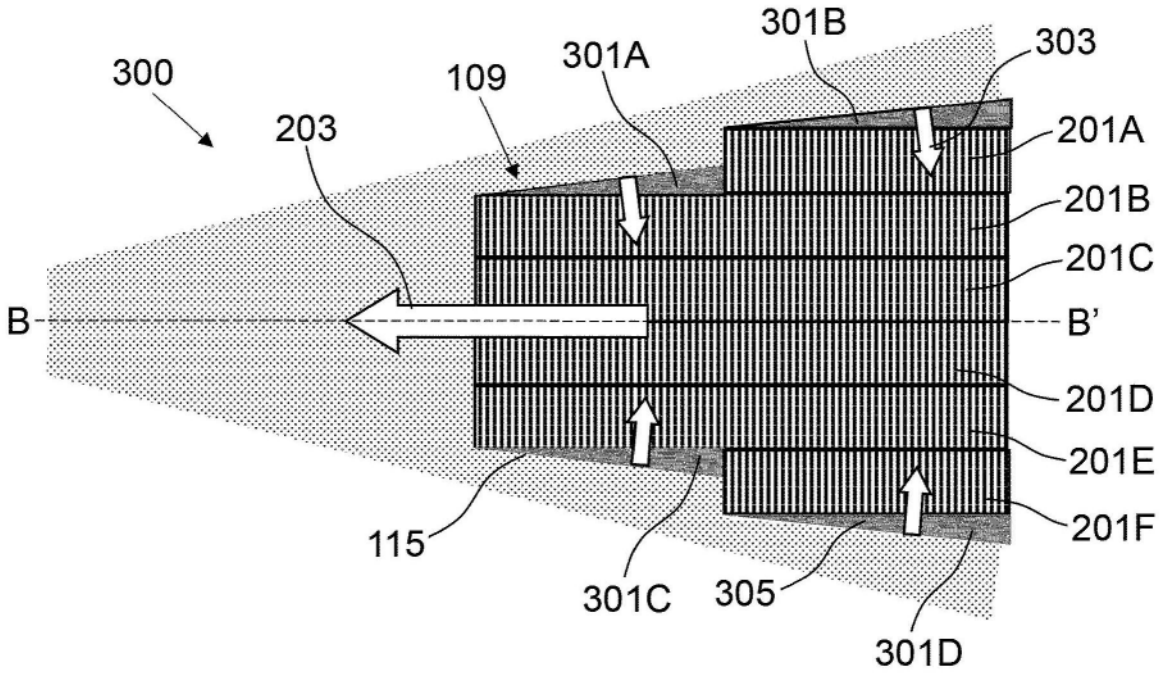

301B
303
300
301A
109
203
201A
201B
201C
B
B'
201D
201E
201F
115
301C
305
301D

图3

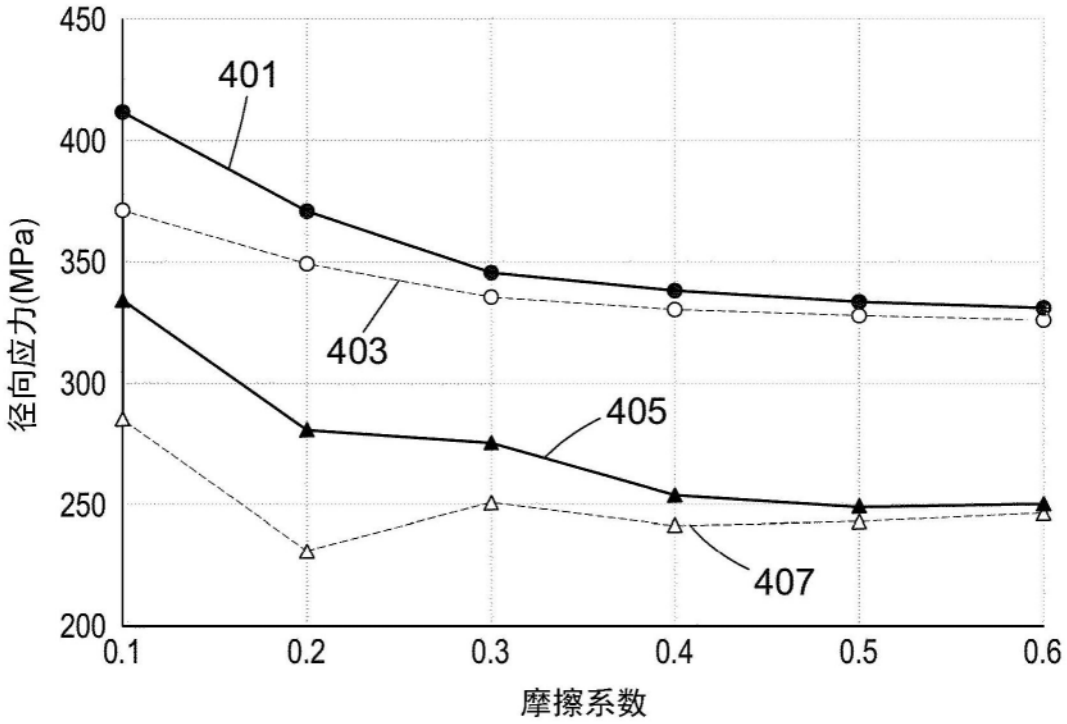

450
400
350
300
250
200
径向应力(MPa)
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
摩擦系数
401
403
405
407

图4

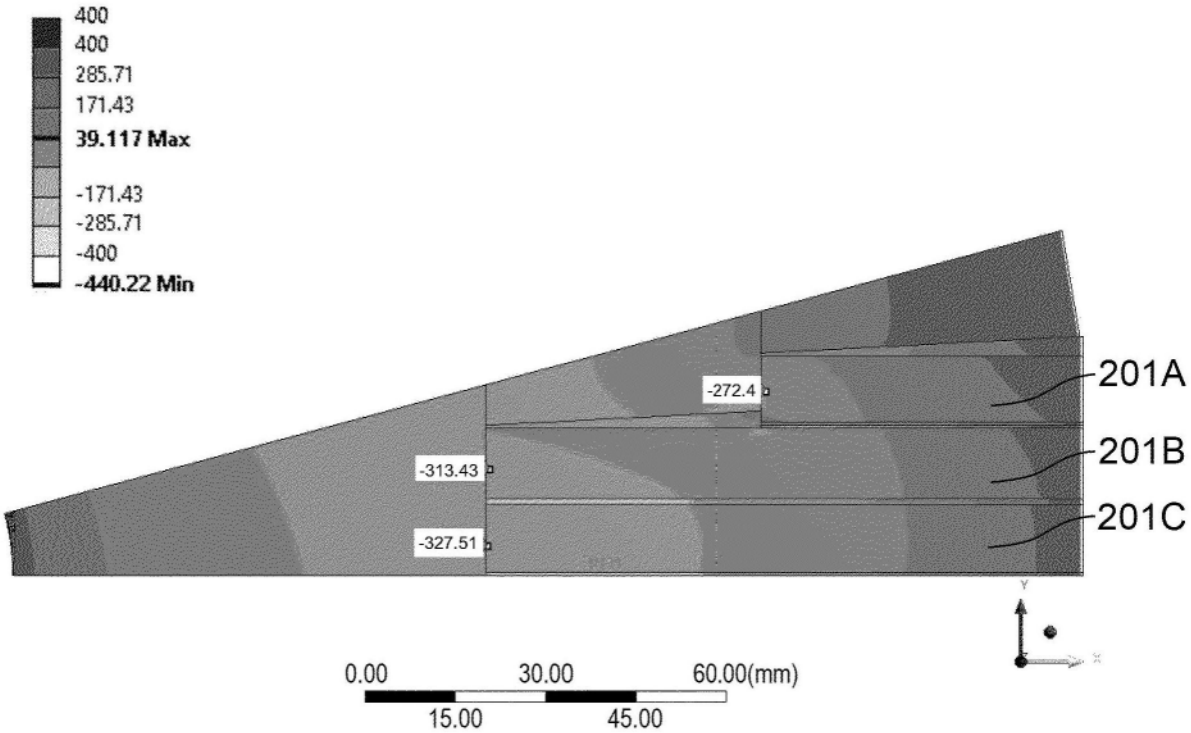

400
400
285.71
171.43
39.117 Max
-171.43
-285.71
-400
-440.22 Min
-272.4
-313.43
-327.51
201A
201B
201C
0.00
30.00
60.00(mm)
15.00
45.00

图5

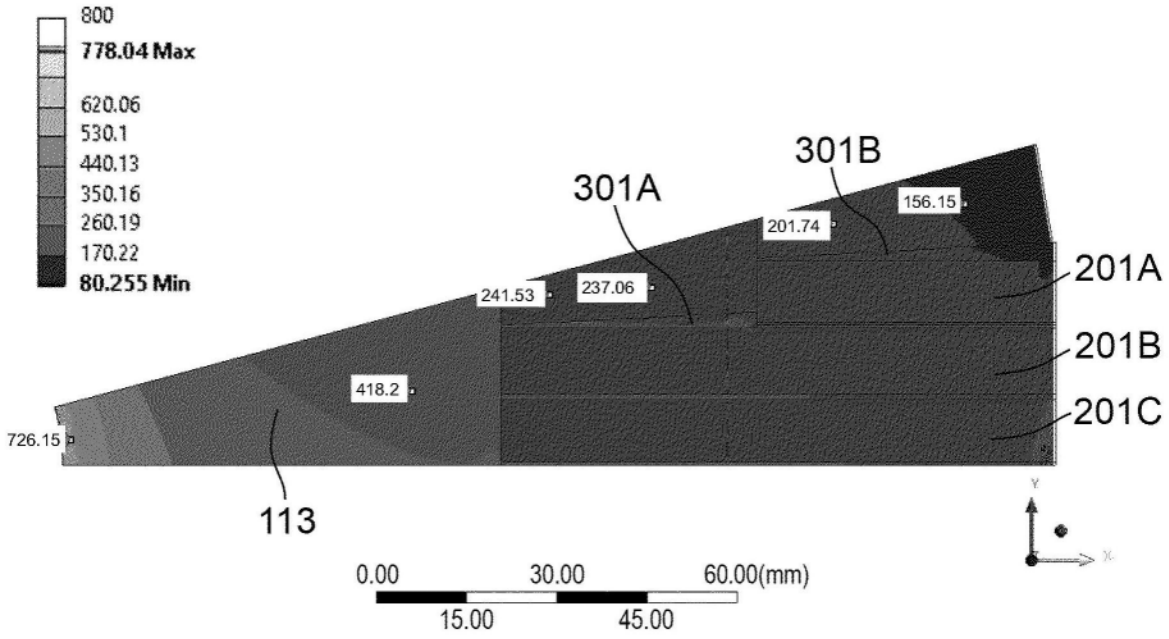

800
778.04 Max
620.06
530.1
440.13
350.16
260.19
170.22
80.255 Min
301B
301A
156.15
201.74
241.53
237.06
201A
201B
201C
418.2
726.15
113
0.00
30.00
60.00(mm)
15.00
45.00

图6