



(10) 授权公告号 CN 112955975 B

(45) 授权公告日 2024. 07. 09

(21) 申请号 201980072163.1

(22) 申请日 2019.08.30

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112955975 A

(43) 申请公布日 2021.06.11

(30) 优先权数据
1814357.8 2018.09.04 GB(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2021.04.29(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/GB2019/052435 2019.08.30(87) PCT国际申请的公布数据
W02020/049281 EN 2020.03.12(73) 专利权人 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
格雷格·布里特斯
巴斯·范尼格特伦(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(51) Int. Cl.
G21B 1/21 (2006.01)
H01B 12/00 (2006.01)
H01F 6/06 (2006.01)(56) 对比文件
CN 101512829 A, 2009.08.19
CN 102177596 A, 2011.09.07
审查员 刘俊凯

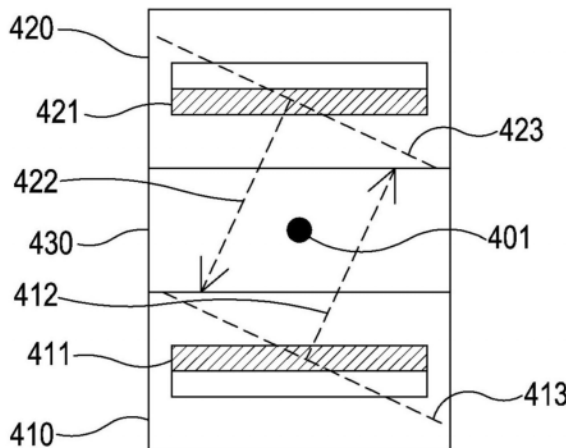
权利要求书2页 说明书4页 附图6页

(54) 发明名称

高温超导体带的对齐

(57) 摘要

一种用于在磁体的线圈中承载电流的线缆。线缆包括由多个带组件构成的堆叠体。每个带组件都具有长度和宽度,使得长度远大于宽度,并且每个带组件都包括各向异性高温超导体 (HTS) 材料的HTS层,其中,HTS层的c轴与垂直于HTS层的平面的矢量成非零角度。带组件被堆叠成一系列对,每一对都包括第一和第二HTS带组件以及它们之间的铜层。每一对中的带组件被布置成使得每一对中的第一HTS带组件的HTS层的c轴和每一对中的第二HTS带组件的HTS层的c轴关于一平面具有反射对称性,该平面平行于每个HTS层并与每个HTS层等距。



1. 一种用于在磁体的线圈中承载电流的线缆,包括:

由多个带组件构成的堆叠体,每个带组件都具有长度和宽度,使得所述长度远大于所述宽度,并且每个带组件都包括由各向异性高温超导材料构成的高温超导层,其中,所述高温超导层的c轴与垂直于所述高温超导层的平面的矢量成非零角度;

其中,所述带组件被堆叠成一系列对,每一对都包括第一高温超导带组件、第二高温超导带组件以及它们之间的铜层;

其中,每一对中的所述带组件被布置成使得每一对中的第一高温超导带组件的高温超导层的c轴和每一对中的第二高温超导带组件的高温超导层的c轴关于一平面具有反射对称性,所述平面平行于每个高温超导层并与每个高温超导层等距。

2. 根据权利要求1所述的线缆,其中,所述高温超导材料是ReBCO和BSCCO中的一个。

3. 根据权利要求1所述的线缆,其中,每个高温超导带组件都包括基底。

4. 根据权利要求3所述的线缆,其中,每一对都被布置成使得所述高温超导带组件的高温超导层被布置在所述高温超导带组件的基底之间。

5. 根据权利要求3所述的线缆,其中,每一对都被布置成使得所述带组件的基底被布置在所述高温超导带组件的高温超导层之间。

6. 根据权利要求3所述的线缆,其中,每一对都被布置成使得一个高温超导层被布置在所述高温超导带组件的基底之间,并且另一个高温超导层被布置在所述高温超导带组件的基底外侧。

7. 根据权利要求1所述的线缆,其中,每个高温超导带组件都包括剥离的高温超导带。

8. 根据权利要求1至7中任一项所述的线缆,其中,所述铜层的厚度在10微米和400微米之间。

9. 一种制造用于在磁体线圈中承载电流的线缆的方法,所述方法包括:

提供第一带组件和第二带组件,每个带组件都包括高强度金属基层和由各向异性高温超导材料构成的高温超导层,其中,所述高温超导层的c轴与垂直于所述高温超导层的平面的矢量成非零角度;

将所述第一带组件施加到铜层上;

将所述第二带组件施加到所述铜层上,使得第一带的高温超导层和第二带的高温超导层平行并被所述铜层分隔开,并且使得第二高温超导带组件的c轴和每一对中的第二高温超导带组件的高温超导层的c轴关于一平面具有反射对称性,所述平面平行于每个高温超导层并与每个高温超导层等距。

10. 根据权利要求9所述的方法,其中,每个高温超导带组件都包括基层。

11. 根据权利要求10所述的方法,其中,将第一高温超导带组件和第二高温超导带组件施加到所述铜层,使得相应的高温超导层在相应的基层和所述铜层之间。

12. 根据权利要求10所述的方法,其中,将第一高温超导带组件和第二高温超导带组件施加到所述铜层,使得相应的基层在相应的高温超导层和所述铜层之间。

13. 根据权利要求10所述的方法,其中,将第一高温超导带组件和第二高温超导带组件施加到所述铜层,使得所述第一高温超导带组件的高温超导层在所述第一高温超导带组件的基层和所述铜层之间,并且所述第二高温超导带组件的基层在所述第

二高温超导带组件的高温超导层和所述基层之间。

14. 根据权利要求9所述的方法, 其中, 每个高温超导带组件都包括剥离的高温超导体带。

15. 根据权利要求9至14中任一项所述的方法, 包括将主高温超导带组件从第一卷轴部分地转移到第二卷轴, 将所述第一卷轴上的主高温超导带组件的部分与所述第二卷轴上的主高温超导带组件的部分分离, 以及从所述第一卷轴施加第一高温超导带组件并且从所述第二卷轴施加第二高温超导带组件。

16. 根据权利要求9至14中任一项所述的方法, 其中, 沿着所述铜层在与施加所述第二高温超导带组件的方向相反的方向上施加第一高温超导带组件。

17. 根据权利要求9至14中任一项所述的方法, 其中, 通过围绕一轴线折叠主高温超导带组件并且移除所述主高温超导带组件中包含折叠部的区域, 形成第一高温超导带组件和第二高温超导带组件, 其中, 所述轴线在所述高温超导层的平面中并且垂直于所述主高温超导带组件的长度。

高温超导体带的对齐

技术领域

[0001] 本发明涉及高温超导体 (HTS)。特别地,本发明涉及包括HTS带的线缆。

背景技术

[0002] 超导材料通常分为“高温超导体 (HTS)”和“低温超导体” (LTS)。LTS材料 (诸如铌和NbTi) 是金属或金属合金,其超导性可以用BCS理论来描述。全部低温超导体具有低于约30K的临界温度 (在其上即使在零磁场中材料也不具有超导性的温度)。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,定义HTS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材料包括铁的磷属元素化物 (例如,FeAs和FeSe) 和二硼化镁 (MgB_2)。

[0003] ReBCO通常被制造成带,其结构如图1所示。这种带500通常大约为100微米厚,并且包括基底501 (通常为约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 (称为缓冲物堆叠502)。外延ReBCO-HTS层503 (通过MOCVD积或其他合适的技术沉积) 覆盖15缓冲物堆叠,并且通常为1微米厚。1至2微米的银层504通过溅射或另一合适的技术沉积在HTS层上,并且铜稳定剂层505通过电镀或另一合适的技术沉积在带上,其通常完全封装带。

[0004] 基底501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。缓冲物堆叠502需要提供在其上生长HTS层的双轴纹理晶体模板,并防止元素从基底到HTS的化学扩散,这损害其超导特性。银层504需要提供从ReBCO到稳定剂层的低电阻界面,并且稳定剂层505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] 图2示出了ReBCO带200,示出了将在本文件中使用的x、y、z坐标系。y轴是沿带的长度 (即带在使用时的电流的方向上),x轴是沿带的宽度 (即,在带的平面内、垂直于y轴),z轴垂直于x轴和y轴 (即,垂直于带的平面)。

[0006] 图3示出了在x/z平面中的示例性ReBCO带的横截面。ReBCO层本身是晶体,并且ReBCO晶体的主轴针对带中的一个点示出。ReBCO带以简化形式示出、具有HTS层301、铜覆层302和基底303。ReBCO的晶体结构具有三个相互垂直的主轴,在本领域中称为a、b和c。出于本公开的目的,我们忽略临界电流对ab平面中的磁场分量的取向的任何依赖性,使得a轴和b轴可以被认为是可互换的,因此它们将仅被认为是a/b平面 (即,由a轴和b轴定义的平面)。在图3中,ReBCO层301的a/b平面被示出为垂直于c轴320的单个线310。

[0007] 带的临界电流取决于ReBCO晶体的厚度和质量。它还具有与环境温度和还有所施加的磁场的幅值的近似反比的依耐性。最后,ReBCO HTS层显示出各向异性的临界电流行为,即:临界电流取决于所施加的磁场相对于c轴的取向。当所施加的磁场矢量位于a/b平面310中时,临界电流比所施加的磁场矢量沿c轴320对齐时高得多。临界电流在“a/b平面外”的磁场取向的这两个极值之间平滑变化,如图6A中的实线曲线所示。(实际上,可能存在临

界电流在其处示出峰值的多于一个的角度。另外,峰值的幅值和宽度随外所施加的电场和温度而变化,但出于解释的目的,我们可以考虑具有单个主峰的带,该主峰定义了所施加的B场的给出最大临界电流的最佳取向)。

[0008] ReBCO带通常被制造成使得c轴尽可能接近垂直于带的平面。然而,由于制造过程中的变化,可能存在c轴和z轴取向之间的角度偏移方面的一些可变性。这个偏移可能包括固定偏移加上随着沿着带的位置变化的可变偏移。对于固定的磁场取向,c轴和z轴之间的这个角度偏移导致临界电流沿着带的变化。当带对输送接近单个带的组合临界电流的承载电流时,这是不期望的,因为由这种可变性引起的临界电流方面的减小可能迫使足够的输送电流在足够长的距离上分担到铜层中,从而产生导致热失控和局部失超的热点。

发明内容

[0009] 根据第一方面,提供了一种用于在磁体的线圈中承载电流的线缆。线缆包括由多个带组件构成的堆叠体。每个带组件都具有长度和宽度,使得长度远大于宽度,并且每个带组件都包括各向异性高温超导体(HTS)材料的HTS层,其中,HTS层的c轴与垂直于HTS层的平面的矢量成非零角度。带组件被堆叠成一系列对,每一对都包括第一和第二HTS带组件以及其间的铜层。每一对中的带组件被布置成使得每一对中的第一HTS带组件的HTS层的c轴相对于每一对中的第二HTS带组件的HTS层的c轴关于平行于每个HTS层并与每个HTS层等距的平面具有反射对称性。

[0010] 根据第二方面,提供了一种制造用于在磁体的线圈中承载电流的线缆的方法。提供第一带组件和第二带组件,每个带组件都包括高强度金属基层和各向异性高温超导体(HTS)材料的HTS层,其中,HTS层的c轴与垂直于HTS层的平面的矢量成非零角度。第一带组件被施加到铜层。第二带组件被施加到铜层,使得第一带的HTS层和第二带的HTS层平行并被铜层分离,并且使得第二HTS带组件的c轴相对于每个对的第二HTS带组件的HTS层的c轴关于平行于每个HTS层并与每个HTS层等距的平面具有反射对称性。

附图说明

[0011] 图1是ReBCO带的结构的图示;

[0012] 图2是示出用于描述热ReBCO带的坐标系的图;

[0013] 图3是ReBCO带的横截面对,示出了ReBCO晶体的主轴;

[0014] 图4是0型对的横截面;

[0015] 图5是示例性0型对的横截面;

[0016] 图6A、图6B、图6C和图6D示出了对于不同的ReBCO带的图4和图5的构造的随外部磁场的临界电流变化;

[0017] 图7A示出了使用图4中的构造构建的场线圈内的ReBCO的电流比;

[0018] 图7B示出了使用图5中的构造构建的场线圈内的ReBCO的电流比。

具体实施方式

[0019] 本发明描述了一种方法,该方法组合成HTS带的对,使得峰值临界电流沿带出现的角度方面的任何变化在该对被平均化,从而产生更一致的行为。

[0020] 图4以垂直于带的轴线的横截面示出了ReBCO带的0型示例性对。0型对包括两个带410、420,该两个带被取向为使得ReBCO层411、421彼此面对,并且在它们之间具有铜叠层430。在具有一个带中的临界电流方面的瑕疵或“丢失”(诸如裂纹)的情况下,这允许电流通过具有低电阻率的铜叠层在ReBCO层411、421之间转移。在这种取向,ReBCO对之间的电阻低于简单堆叠的带的更常见布置(其中HTS层面向相同的方向(1型对))。

[0021] 每个带具有与ReBCO层的平面的垂线(即z轴)成角度 α 的c轴412、422,以及垂直于c轴的峰值 I_c 角(即临界电流最大的所施加的磁场的角度)。

[0022] 常规地,0型对将通过首先从一个端部到另一端部将带410从ReBCO带卷施加到铜叠层430,并且然后在铜叠层的相对侧上在相同的方向上从相同的HTS带卷施加带420来构造。这导致ReBCO 412、422的c轴和a/b平面413、423(即, I_c 被最大化的所施加的磁场的角度)如图4所示的取向,关于0型对的y轴401具有旋转对称性。

[0023] 作为替代性方案,0型对可以如图5所示构建,该图5是示例性0型对构造的等效于图4的横截面。带510、ReBCO层511和铜叠层530等同于图4的带410、ReBCO层411和铜叠层430。带520已经被施加成使得ReBCO层421面对带510的ReBCO层511,并且使得每个带510、520的c轴511、521和a/b平面512、522关于平行于0型对的每个带并与其等距的平面501具有反射对称性。

[0024] 可以通过首先在一个方向上从ReBCO带卷施加带510并且然后在沿着y轴的相反方向上从相同的ReBCO带卷施加带520,进行带的施加以形成图5中的构造(即“翻转对”)。替代性地,ReBCO带可以在施加带510和施加带520之间从卷上退绕,并在相反的方向上再缠绕,然后在与施加带510相同的方向上施加带520。作为另外的替代性方案,带510和带520可以从不同的卷(这些卷以相反的方向缠绕)在相同的方向上施加,以产生c轴的正确对齐。

[0025] 如果带不需要直接从卷上进行施加,则“翻转对”取向最容易通过以下方式实现:

[0026] 1.从卷上卷绕两条相等长度的带。

[0027] 2.围绕y轴翻转一条带,使得涂覆HTS的侧部相互面对。

[0028] 3.将一条带围绕z轴纵向旋转180度。

[0029] 替代性地,这可以通过以下实现:卷绕大于所需长度两倍的一条带,将其在中间围绕x轴(即,端对端)折叠,并切断或以其他方式移除包含折叠部的区段以留下两条带,这两条带然后以“翻转”取向以0型对(或者如果带被折叠成使得基底彼此面对则以2型对)布置。

[0030] 图6A至图6D示出了对于c轴与带的垂线之间的角度约为1度(图6A)、5度(图6B)、10度(图6C)和35度(图6D)的带,根据图4(实线)或图5(虚线)构建的0型线对的临界电流与磁场角度的曲线图。

[0031] 从图中可以看出那样,使用图5中的构造导致较低的峰值临界电流,但是导致在较宽的角度范围内的相对较高的临界电流的范围。对于c轴与带的垂线(z轴)精确对齐的带,这两种构造是等效的。

[0032] 对于c轴和z轴之间具有小角度(<5 度)偏移的带,翻转对布置具有以下有益效果:平均化峰值临界电流沿着带出现在任何位置处的角度方面的任何变化的影响。这是因为对中的各个带的峰值合并成一个较低的更宽的峰值,如图6A(虚线曲线)所示。沿着带的角度偏移方面的微小变化将导致峰变宽或变尖。

[0033] 另外,在翻转对是由单个带卷轴制成的情况下,如果卷轴的开始处的临界电流低

于或高于卷轴的结束处(如所供应的那样),则这也将通过翻转的0型取向进行平均化。

[0034] 翻转对取向的净效果是平均化沿HTS带的峰值临界电流方面的产生变化。将采用沿带的均匀临界电流的磁体设计转化为真正的工作磁体的优势显而易见。

[0035] 然而,应该注意的是,在一些可商购带中,c轴320从带的平面的垂线偏转多达30至35度。翻转对取向在这些带的情况下不太有用,因为峰值 I_c 被分成两个峰值,两个峰值低于带对的未翻转布置中的峰值。这在图6D中被示出。

[0036] 此外,“翻转带”构型的使用导致了在使用0型对缠绕的磁线圈内分担并被推到接近临界电流的电流的对称分布。图7A示出了根据图4中的构造由多个0型对构建的盘形螺线管磁体线圈的横截面的电流和临界电流之间的比率的图表,图7B示出了根据图5中的构造由多个0型对构建的磁体线圈(即“翻转”取向)的横截面的电流 I 和临界电流 I_c 之间的比率的图表。每个线圈由彼此上下堆叠的具有0型对的两个螺旋“盘形”绕组(即,一个从 $z=0$ 到 $z=12$,并且一个从 $z=0$ 到 $z=-12$)构建,其中全部带的 x 轴平行于磁线圈的轴线,并且带的 z 轴沿着磁线圈的半径取向。所使用的ReBCO带具有 c 轴和带的平面的垂线(z 轴)之间的为35度的角度。如从图中可以看出的那样,图7B的布置是对称的。这导致了由于电流分担而产生的对称加热,从理解线圈性能的角度来看,这是更期望的。

[0037] 虽然以上描述集中在0型对HTS带的布置上,但是类似的布置可以用于被布置成使得HTS带的 c 轴关于平行于HTS层的平面具有反射对称性的1型对(即,其中一个带的HTS层面对另一个带的基底层,使得一个HTS层在基底之间,并且一个HTS不在基底之间)或2型对(即,其中基底层彼此面对,使得它们在HTS层之间)。另外,上述公开内容也可以应用于对中的一个或两个带是“剥离的”HTS带(即,没有基底的HTS带)的情况。

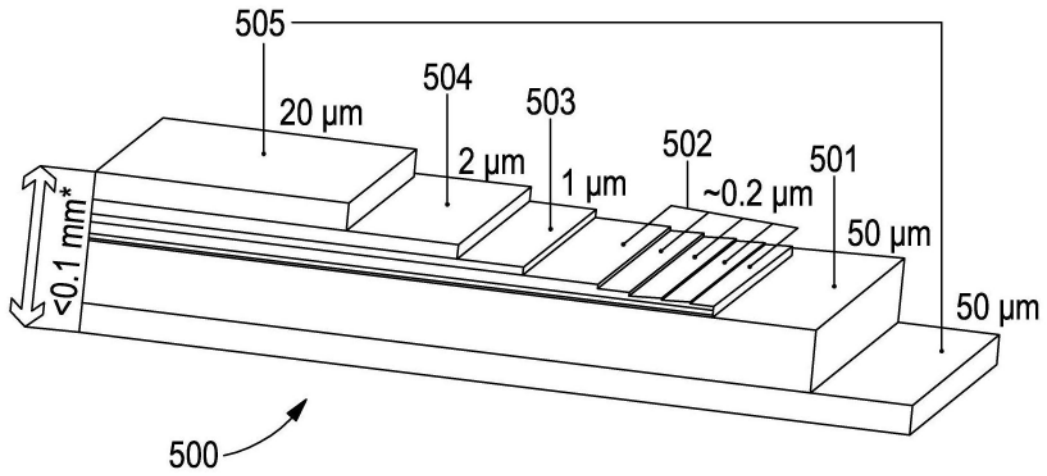


图1

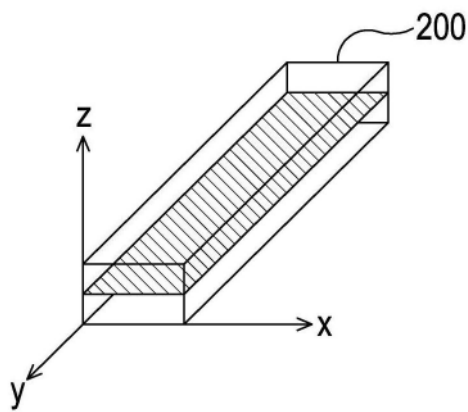


图2

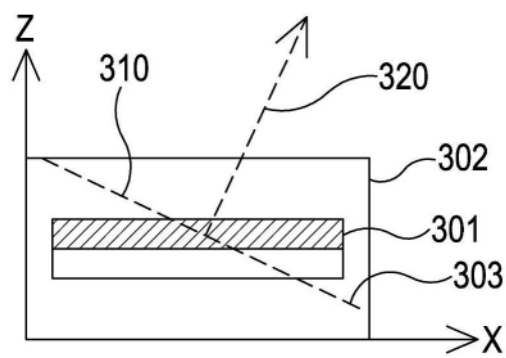


图3

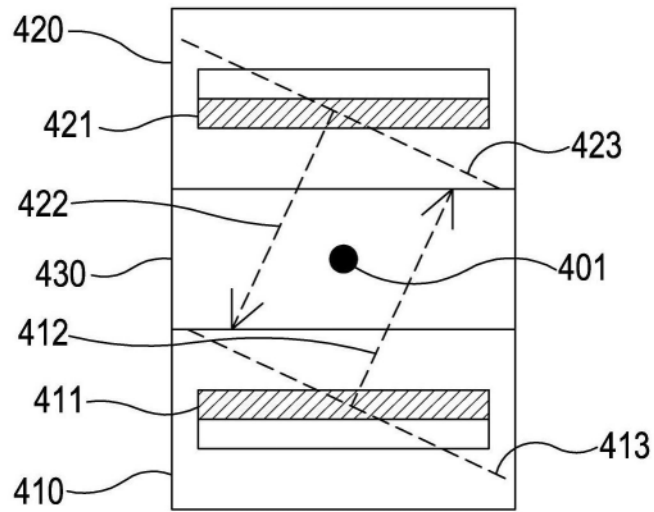


图4

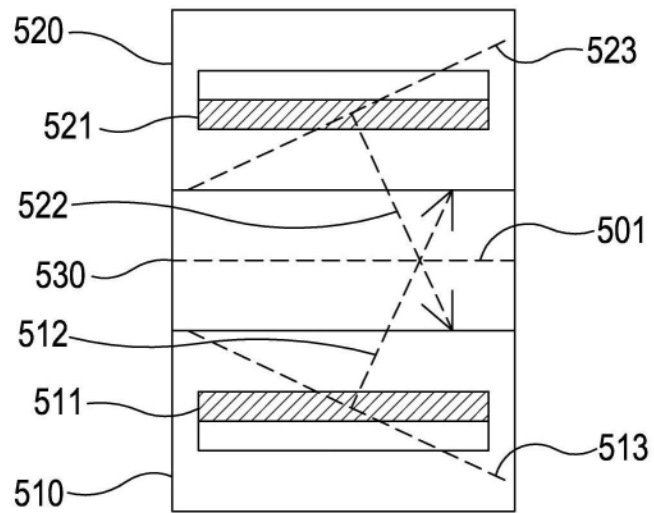


图5

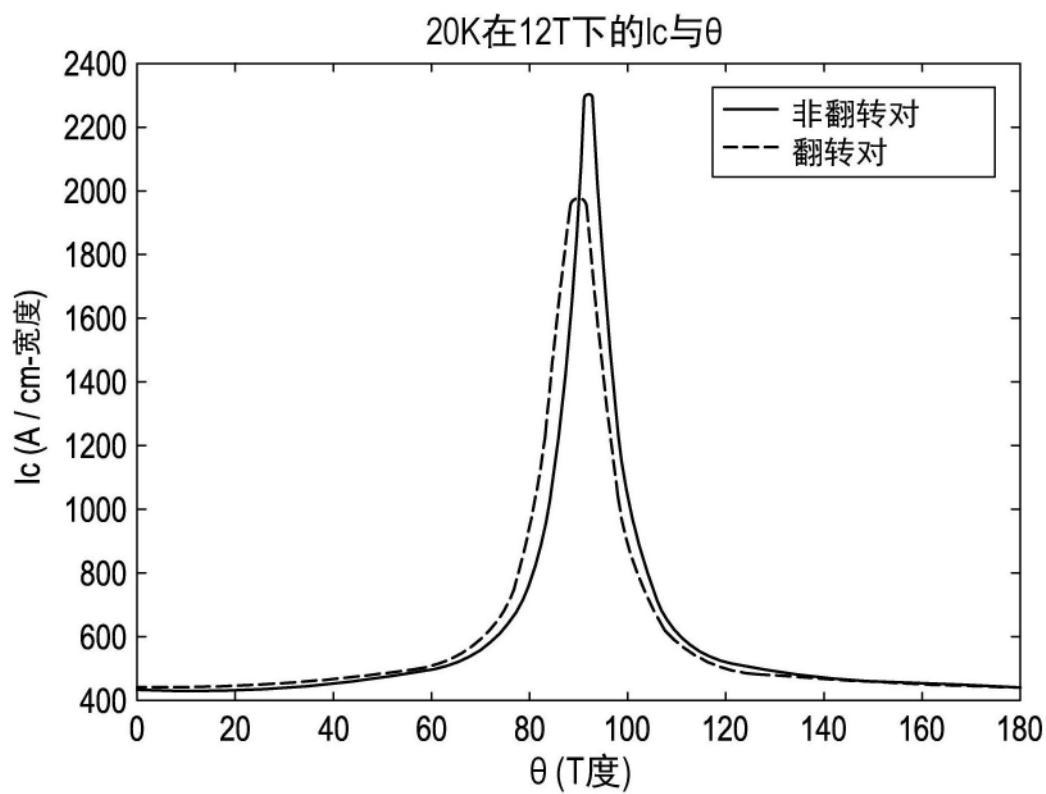


图6A

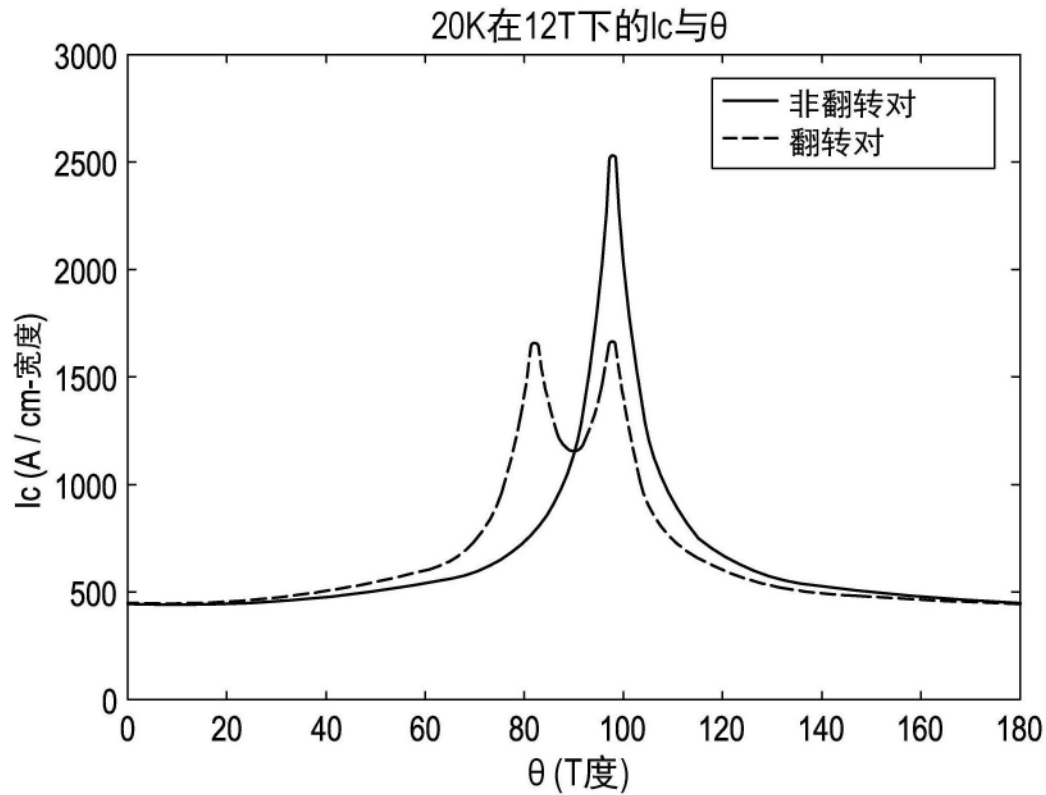


图6B

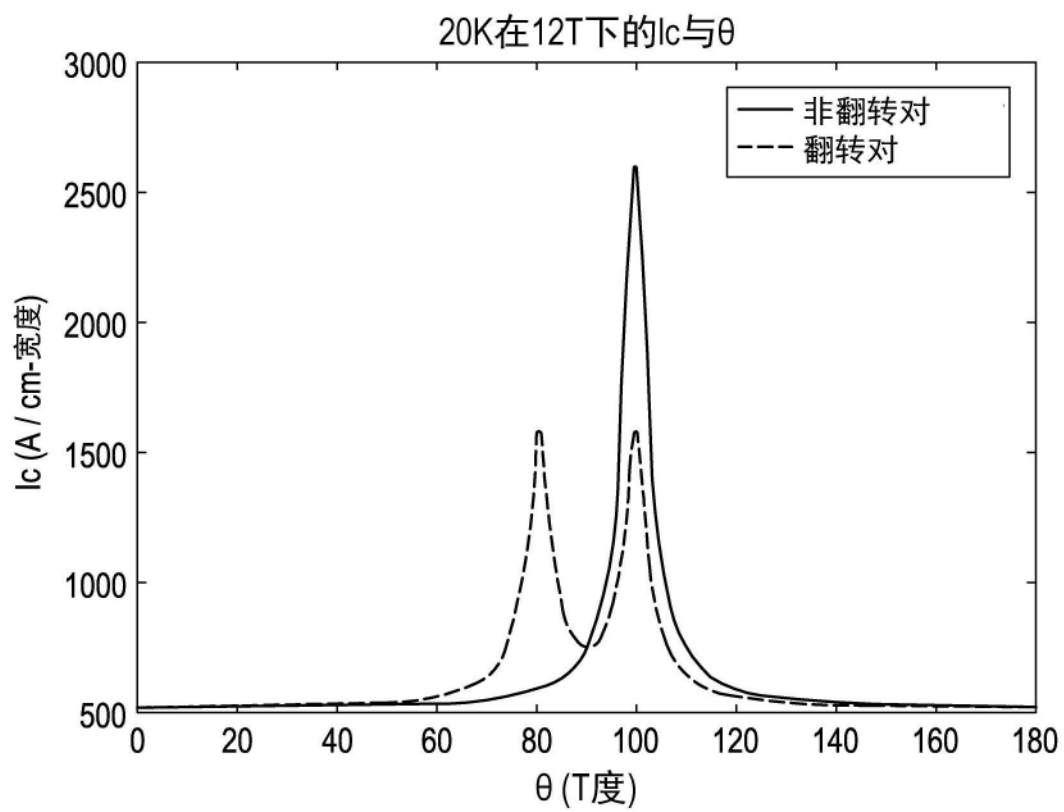


图6C

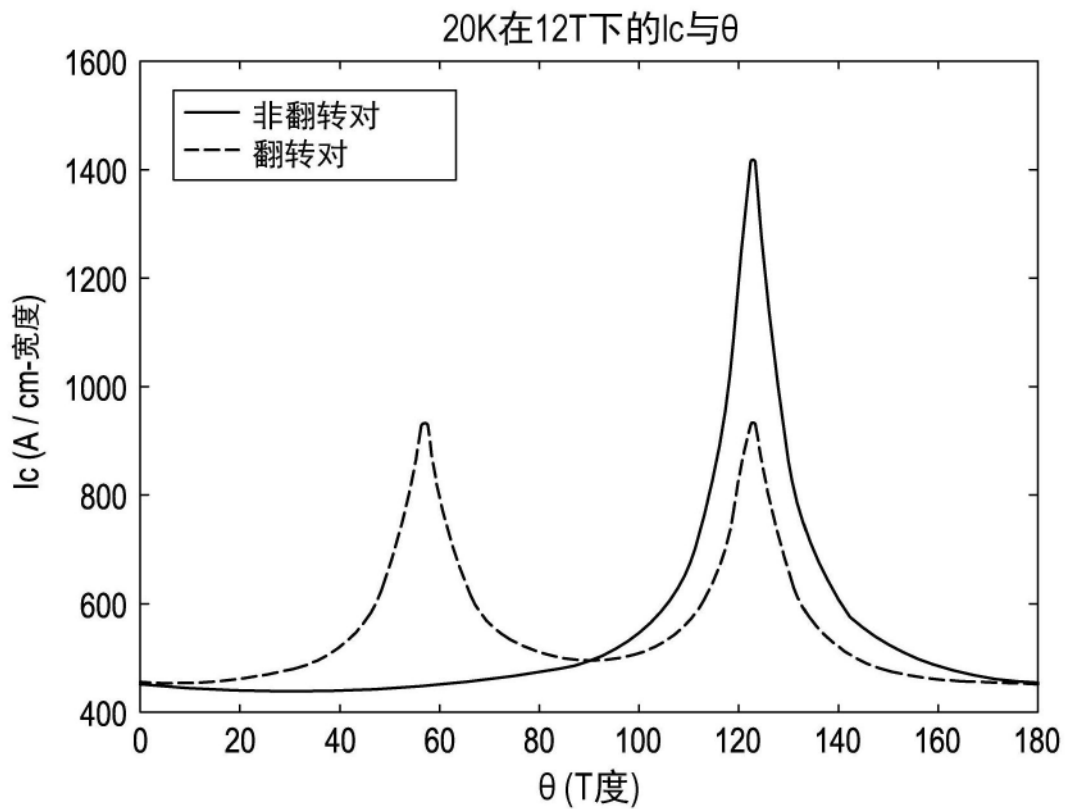


图6D

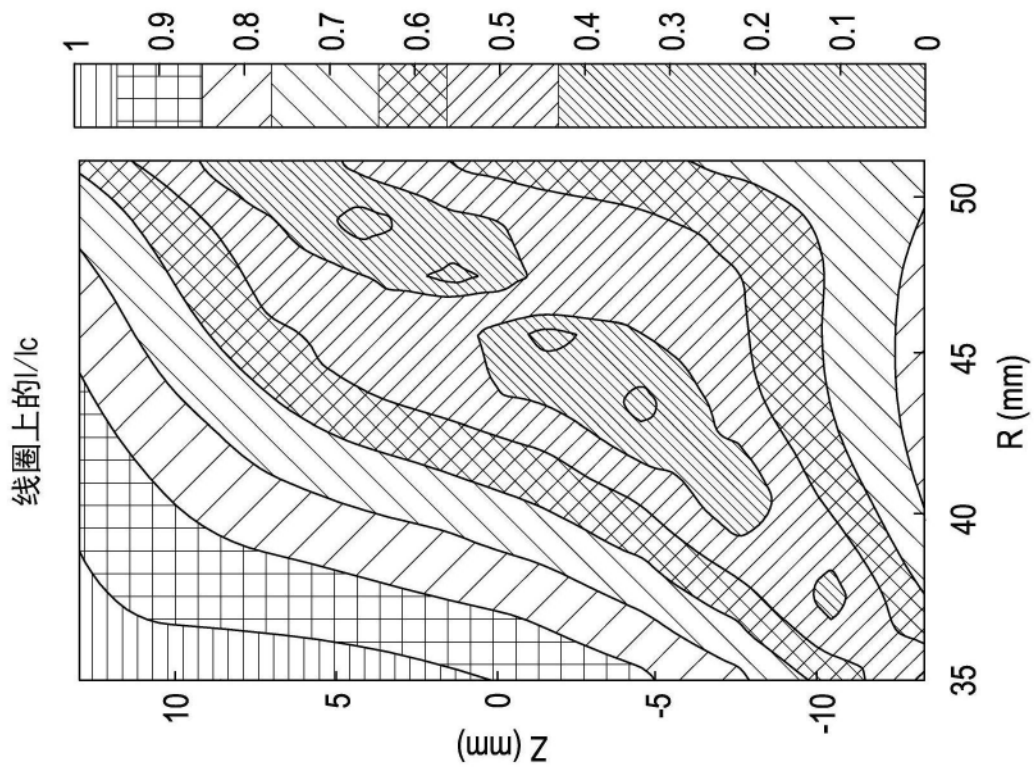


图7A

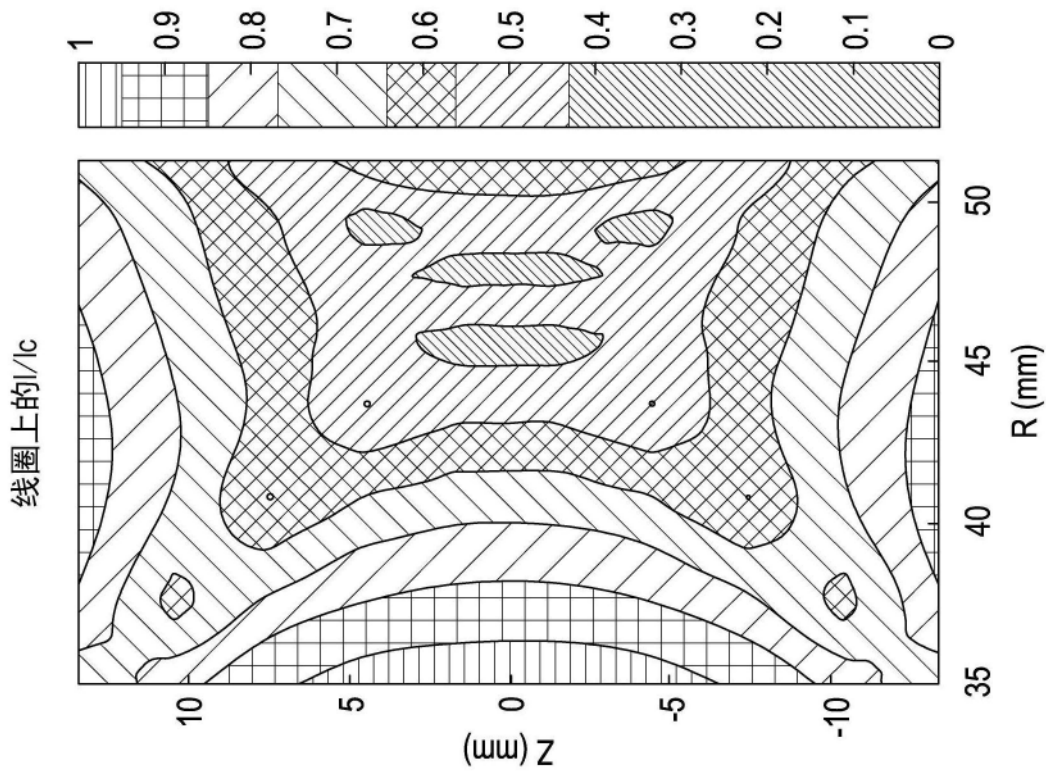


图7B