



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 00810754.8

[45] 授权公告日 2007 年 3 月 28 日

[11] 授权公告号 CN 1307730C

[22] 申请日 2000.7.20 [21] 申请号 00810754.8

[30] 优先权

[32] 1999.7.23 [33] US [31] 09/360,318

[86] 国际申请 PCT/US2000/019750 2000.7.20

[87] 国际公布 WO2001/008234 英 2001.2.1

[85] 进入国家阶段日期 2002.1.23

[73] 专利权人 美国超导体公司

地址 美国马萨诸塞州

共同专利权人 皮雷利·卡维耶系统有限公司

[72] 发明人 约翰·D·斯库迪尔

戴维·M·布科泽克

史蒂文·弗莱施勒

德里克·帕特里克·戴利

里卡德·E·哈诺伊斯

斯蒂芬·R·诺曼 保拉·卡拉西诺

马尔科·纳西 塞尔焦·斯普雷菲科

[56] 参考文献

JP1 - 153507A 1989.6.15

JP6 - 162835A 1994.6.10

JP2 - 50403A 1990.2.20

US5196399A 1993.3.23

WO98/09004A1 1998.3.5

US5252550A 1993.10.12

US4970197A 1990.11.13

US5140004A 1992.8.18

审查员 杨小明

[74] 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限责任公司

代理人 王维玉 丁业平

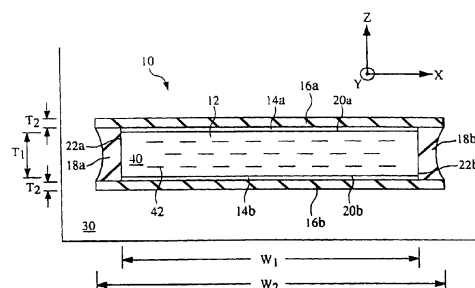
权利要求书 4 页 说明书 21 页 附图 9 页

[54] 发明名称

包封的陶瓷超导体

[57] 摘要

本发明以超导体为特征，该超导体用于预先选择的液态冷冻剂中，该超导体包含一根复合陶瓷超导线，该超导线在沿其长度方向具有一个外表面；和一个密封结构，其气密地包封所述外表面，从而防止冷冻剂渗入导线并且降低其超导特性，即使在加压条件下。该超导体能够应用在超导电缆和超导线圈中。该密封结构可以通过下列步骤形成：把金属带层压到导线上；在导线外表面的周围围绕至少一个金属片；把多个金属片相互焊接，以围绕在导线的外表面上，或形成一个完全覆盖导线的外表面的聚合物涂层。



1. 一种超导陶瓷导体，其包含：

一根复合陶瓷超导线，其沿其长度方向具有一个外表面，所述导线为具有顶面、底面和侧面的复合陶瓷带，其中所述外表面由顶面、底面和侧面围成；和

一个密封结构，其气密地包封所述外表面，以防止冷冻剂渗入所述导线而降低其超导特性；

其中所述密封结构包含：

一条第一金属带，其被层压到所述复合陶瓷带的所述顶面，

一条第二金属带，其被层压到所述复合陶瓷带的所述底面，所述第一和第二金属带伸出所述复合陶瓷带的所述侧面；和

无孔焊料嵌条，其邻近所述复合陶瓷带的所述侧面并且充满所述金属带之间的空间。

2. 根据权利要求1所述的导体，其中所述导线和包封的密封结构的长度都大于50米。

3. 根据权利要求1所述的导体，其中所述导线包含一个金属基质，所述金属基质支持多个超导陶瓷细丝。

4. 根据权利要求1所述的导体，其中所述导线包含至少一个超导陶瓷层和至少一个金属衬底，所述金属衬底支持至少一个所述超导陶瓷层。

5. 根据权利要求1所述的导体，其中所述密封结构防止冷冻剂在加压条件下通过所述外表面渗入所述导线。

6. 根据权利要求5所述的导体，其中所述加压条件超过10atm，并且液态冷冻剂为液氮。

7. 根据权利要求 1 所述的导体，其中所述第一和第二金属带包括不锈钢、Cu-Be 合金、铝、铜、镍或 Cu-Ni 合金。

8. 根据权利要求 1 所述的导体，其中所述第一和第二金属带至少比所述复合陶瓷带宽 5%。

9. 根据权利要求 1 所述的导体，其中所述复合陶瓷带和所述密封结构限定导体的宽厚比大于 5。

10. 一种超导陶瓷导体，其包含：

一根复合陶瓷超导线，其沿其长度方向具有一个外表面，所述导线为具有顶面、底面和侧面的复合陶瓷带，其中所述外表面由顶面、底面和侧面围成；和

一个密封结构，其气密地包封所述外表面，以防止冷冻剂渗入所述导线而降低其超导特性；

其中所述密封结构包含：

一条第一金属带，其被层压到所述复合陶瓷带的所述顶面，并且它的一部分伸出所述复合陶瓷带的所述侧面；和

一条第二金属带，其被层压到所述复合陶瓷带的所述底面，并且它的一部分伸出所述复合陶瓷带的所述侧面，其中靠近每一侧面，所述第一金属带的所述伸出的部分被焊接到所述第二金属带的所述伸出的部分上。

11. 一种超导线圈，其包含一种根据权利要求 1 所述的超导陶瓷导体。

12. 一种超导电缆，其包含一种根据权利要求 1 所述的超导陶瓷导体。

13. 根据权利要求 10 所述的导体，其中所述导线和包封的密封结构的长度都大于 50 米。

14. 根据权利要求 10 所述的导体，其中所述导线包含一个金属基质，所述金属基质支持多个超导陶瓷细丝。

15. 根据权利要求 10 所述的导体，其中所述导线包含至少一个超导陶瓷层和至少一个金属衬底，所述金属衬底支持至少一个所述超导陶瓷层。

16. 根据权利要求 10 所述的导体，其中所述密封结构防止冷冻剂在加压条件下通过所述外表面渗入所述导线。

17. 根据权利要求 16 所述的导体，其中所述加压条件超过 10atm，并且液态冷冻剂为液氮。

18. 一种超导线圈，其包含一种根据权利要求 10 所述的超导陶瓷导体。

19. 一种超导电缆，其包含一种根据权利要求 10 所述的超导陶瓷导体。

20. 一种超导陶瓷导体，其包含：

一根复合陶瓷超导线，其沿其长度方向具有一个外表面；和

一个密封结构，其气密地包封所述外表面，以防止冷冻剂渗入所述导线而降低其超导特性；

其中所述密封结构包含一围绕在所述导线的所述外表面上的可延展的金属片，其中所述金属片的相对侧面上的区域被相互焊接。

21. 根据权利要求 20 所述的导体，其进一步包含被层压到所述

导线上的金属带和所述可延展的金属片，该金属片围绕在所述导线和所述金属带上。

22. 根据权利要求 20 所述的导体，其中所述导线和包封的密封结构的长度都大于 50 米。

23. 根据权利要求 20 所述的导体，其中所述导线包含一个金属基质，所述金属基质支持多个超导陶瓷细丝。

24. 根据权利要求 20 所述的导体，其中所述导线包含至少一个超导陶瓷层和至少一个金属衬底，所述金属衬底支持至少一个所述超导陶瓷层。

25. 根据权利要求 20 所述的导体，其中所述密封结构防止冷冻剂在加压条件下通过所述外表面渗入所述导线。

26. 根据权利要求 25 所述的导体，其中所述加压条件超过 10atm，并且液态冷冻剂为液氮。

27. 一种超导线圈，其包含一种根据权利要求 20 所述的超导陶瓷导体。

28. 一种超导电缆，其包含一种根据权利要求 20 所述的超导陶瓷导体。

包封的陶瓷超导体

发明背景

本发明涉及复合陶瓷超导带和结构。这些带包括陶瓷，例如 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO 123)、 $(\text{Pb,Bi})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}$ (BSCCO 2223) 和 $(\text{Pb,Bi})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}$ (BSCCO 2212)，能在较高温度例如液氮温度下变成超导，对于长距离传送电流来说，它们是很理想的。复合超导带通常包含位于导电金属基质（例如贵金属基质内的 BSCCO 细丝）内的超导陶瓷材料部分，或者涂在导体（例如导电衬底上支持的一层或多层 YBCO 或 BSCCO）上的超导部分。支持结构如金属带能被层压到复合超导带上，以增强复合超导带的机械强度和弹性。在操作中，把超导件（例如超导带和支持结构）浸入液体冷冻剂（例如液氮、液氩或超临界氩）中延长的一段时间。该期间内，液体冷冻剂可能渗入超导陶瓷材料中。例如，当可为多孔的陶瓷材料的一部分直接与冷冻剂接触时，或者当复合材料内的一个或多个表面缺陷在冷冻剂和陶瓷材料之间提供了通道时，渗透就可能发生。

该渗透可能是一个严重的问题，因为一旦加热该超导件，冷冻剂就能迅速气化，从而造成该超导件内部压力增大。例如，液态氮在 77K 时的密度比在环境条件下氮气的密度大 700 倍。超导件内增加的压力能够在超导陶瓷内造成大的物理缺陷并且显著地降低其超导特性（例如传输特性），因而阻碍了超导件所期望的电性能。因为该缺陷使超导件的外部出现了凸出部分或气球，该问题称为“气球”问题。

发明概要

发明人发现即使在复合超导带的表面具有金属涂层，冷冻剂依然可以通过涂层中的多孔或多微孔缺陷渗入陶瓷材料并形成气球。在气球形成之前，这些缺陷的位置是很难确定的，因为它们在带的长度方

向上可能非常小且少。因而在低温热循环之前，对肉眼来说，易受到气球形成损伤的被涂覆的带看起来是非常完好的。而且，当液态冷冻剂处于加压条件下，例如达到约 1 至 33 巴，以及超导件长时间与液态冷冻剂接触，例如几周、几年或多年时，冷冻剂通过这些缺陷渗入的可能性增加。这些条件对超导电缆的应用来说是典型的。

发明人认识到在复合陶瓷超导带内的表面缺陷能够在所用的金属涂层内造成交叉缺陷。例如，表面缺陷可以阻止焊料润湿缺陷，从而导致在所用的焊料涂层内形成多微孔缺陷。交叉缺陷能够提供冷冻剂渗入陶瓷材料的通道。例如，在由贵金属基质中的 BSSCO 细丝形成的带内，这样的表面缺陷能够由氧化物产生，该氧化物是在复合陶瓷带的管内粉末制造期间从 BSSCO 粉末上释放而来的。

一般地说，复合陶瓷带和金属涂层内的缺陷可能在处理和应用制造期间产生。当金属涂层的相应尺寸太大（例如大于 0.080"）时，在金属涂层冷却期间缩孔也能够引起金属涂层内的多微孔缺陷。据统计，在复合陶瓷带内的一些缺陷可以与金属涂层内的缺陷重叠，从而形成一个或多个通道，通过该通道，冷冻剂能够渗入陶瓷材料。

通过沿超导带长度方向把超导带完全包封在一个密封结构内，本发明的实施方案基本上防止了这种冷冻剂渗透。密封结构把沿超导带长度方向上的整个表面（例如该带的顶面、底面和侧面）气密地密封而与冷冻剂浴隔开，从而防止了冷冻剂渗透。例如，在一个实施方案中，把第一不锈钢带层压到复合陶瓷带的顶面，把第二不锈钢带层压到复合陶瓷带的底面，从而把复合陶瓷带夹在中间。选择的不锈钢带比复合陶瓷条宽，从而不锈钢带伸出复合陶瓷带的侧面之外。然后，焊料嵌条能密封复合陶瓷带的侧面，因为焊料能湿润金属带的伸出部分并形成连续的覆盖复合陶瓷带侧面的表面。这样金属带与焊料嵌条结合形成了密封结构。

密封结构通常能对复合陶瓷带提供机械加固，例如利用包括一个或多个金属压层。作为选择，密封结构可以与这样的支持结构隔开，例如它能包封已经有一个或多个金属压层的陶瓷带，所述金属压层结合在陶瓷带上，用于提供机械加固。

概括地说，在一个方面，本发明以超导陶瓷导体为特征，该导体用于预先选择的液态冷冻剂中，其包含：复合陶瓷超导线，其沿长度方向有一外表面；密封结构，其气密地密封在该外表面的周围，以防止冷冻剂渗入该导线而降低该导线的超导特性。

超导体可以包括下述特征中的任一种。该导线和包围的密封结构的长度可以大于 50 米。导线可以包含支持多个超导陶瓷细丝的金属基质。作为选择，该导线可以包含至少一个超导陶瓷层和至少一个金属衬底，该衬底支持至少一个超导陶瓷层。密封结构可以是金属的。密封结构能够防止冷冻剂在加压条件下通过外表面渗入导线，例如加压条件可能超过约 10atm，且液态冷冻剂可以是液氮。

此外，该导线可以是复合陶瓷超导带，其具有一个顶面、一个底面和侧面，其中外表面为顶面、底面和侧面。例如，密封结构可以包含：一条第一金属带，其被层压到复合带的顶面；一条第二金属带，其被层压到复合带的底面，第一和第二金属带伸出复合带的侧面之外；邻近复合带侧面的无孔的焊料嵌条，其充满金属带之间的空间。金属带可以包括不锈钢、Cu-Be 合金、铝、铜、镍或 Cu-Ni 合金。第一和第二金属带可以比复合带至少宽 5%，从而能伸出复合带的侧面之外。对导体来说，复合带和密封结构能够限定一个大于约 5 的宽厚比。作为选择，密封结构可以包含：一条第一金属带，其被层压到复合带的顶面，并且有些部分伸出复合带的侧面；和一条第二金属带，其被层压到复合带的底面，并且有些部分伸出复合带的侧面，其中邻近每一个侧面，第一金属带的伸出部分焊接到第二金属带的伸出部分上。

在其它实施方案中，密封结构可以包含一个可延展的金属片，其包围在导线的外表面上，其中金属片的相对侧面上的区域相互焊接。作为选择，密封结构可以是固化的聚合物层，该聚合物层包围在导线的外表面上。在任一情况下，该导体可以进一步包含一条金属带，其被层压到导线上用于机械加固，同时可延展的金属片或固化的聚合物层包围在导线和金属带上。固化的聚合物层可以包括导电介质，例如分散在聚合物层中的金属元素。在导线基本上具有长方形横截面的位置，导电介质能够允许聚合物层在至少沿平行于导线厚度的方向上导电。

在另一方面，本发明以超导电缆为特征，该电缆包含上述的超导陶瓷导体。

在进一步的方面，本发明以超导线圈为特征，该线圈包含上述的超导陶瓷导体。

在进一步的方面，本发明以低温冷却装置为特征，该装置包含：一个容纳液态冷冻剂的容器；一种液态冷冻剂；和至少部分地浸入液态冷冻剂的超导件，该超导件包含上述的超导陶瓷导体，该导体与液态冷冻剂直接接触。在一些实施方案中，该装置可以进一步包含一个制冷设备和一个循环泵，所述制冷设备用于冷却液态冷冻剂，所述循环泵用于把冷冻剂传输通过制冷单元。在操作期间，循环泵能够导致容器内的冷冻剂液体的压力超过 1atm 或者甚至超过 10atm。

概括地说，在另一方面，本发明以超导体为特征，该超导体用于预先选择的液态冷冻剂中。该导体包含：复合超导线，其具有一个外表面，该外表面沿其长度方向包围该导线；和一个密封结构，该密封结构气密地包围在外表面上以允许超导陶瓷导体经受热循环而不会降低超导陶瓷带的电流传输能力 10%以上，在热循环中，液态冷冻剂处

于加压条件下。例如，加压条件可以超过约 2 巴（例如在约 10-33 巴的范围内），液态冷冻剂可以是液氮。

概括地说，在另一方面，本发明以制造超导体的方法为特征，所述超导体用于预先选择的液态冷冻剂中。该方法包括：提供沿陶瓷超导线长度方向具有一个外表面的复合陶瓷超导线；及用密封结构气密地包围在外表面上，以防止冷冻剂渗入导线并降低其超导特性。

该方法的实施方案包括下述特征的任一种。所提供的导线可以通过对容器进行至少一序列机械变形和后续的热处理而形成，所述容器包含超导陶瓷前体。气密地包围步骤可以包括把金属带层压到导线上，在导线的外表面的周围包围至少一个金属片，相互焊接多个金属片以便围绕在导线的外表面上，或者形成完全包覆导线外表面的一个聚合物涂层。在后一种实施方案中，该方法可以进一步包括在包覆导体的外表面之前把导电介质加入聚合物涂层。

在此使用的复合陶瓷超导线包含支持超导陶瓷部分的金属基质，或者一个或多个支持超导陶瓷部分的金属衬底。复合超导线可以具有任意横截面形状，例如圆形、椭圆形或基本为长方形。例如，复合陶瓷超导线可以为复合陶瓷超导带。

对本发明来说，超导线或带意在描述一种伸长的复合材料件，其能够在超导条件下传输电流，当其与冷冻液体在超导温度下接触预定时间段，并且随后加热到更高温度（例如室温）后，超导线或带能够显现出退化。这样的退化通常与一个或多个气球的存在或形成有关，和/或包括超导特性的降低，例如传输临界电流的降低。

举例来说，通过热-机械过程制造的带或导线可以包含位于其外表面上的一个金属层，而超导陶瓷部分在内部形成。热-机械过程能够导致或促进缺陷的形成，所述缺陷能导致冷冻剂渗透和带或导线的随

后的退化。

在另一例子中，带或导线包含涂覆到衬底上的一个超导陶瓷材料层和一个包围保护层，该保护层通常通过溅射或真空淀积技术而涂覆。即使能有效地保护超导陶瓷材料避免与外部大气进行化学接触，但保护层的厚度和强度并不足以防止冷冻液体渗透以及该渗透导致的随后的退化，特别是当长时间或者在高压下与冷冻液体接触时。

如上所述，复合陶瓷超导线可以包含支持多个超导陶瓷细丝的金属基质，所述超导陶瓷细丝沿超导线的长度方向伸展。这样的导线可以通过公知的管内粉末方法制造，该方法包括使容器（例如管）经受一次或多次重复的机械变形和热处理，所述容器充满超导陶瓷前体粉末。这些处理步骤能导致金属基质内产生缺陷，缺陷导致冷冻剂渗透。优选地是，在导线通过处理步骤制成超导后，在复合陶瓷超导线的周围形成密封结构，以避免把密封结构暴露到恶劣的处理条件之下。

优选地是，金属基质由贵金属形成。贵金属是在反应条件下其反应产物为热力学不稳定性的金属，所采用的上述反应条件与所需的超导陶瓷有关，或者在该复合材料的制造条件下，贵金属并不与超导陶瓷或其前体起反应。贵金属可以是不同于所需超导陶瓷的金属元素的金属，例如银、氧化物分散增强的（ODS）银、银合金或银/金合金，但是它也可以是按化学计量过量的其中一种所需超导陶瓷的金属元素，例如铜。

在另一例子中，复合陶瓷超导线为多层结构，该结构包含一层或多层超导陶瓷，一个或多个缓冲层或保护层，以及一个或多个支持其它层的金属衬底层。该多层结构可以通过公知的外延技术（例如溅射、真空淀积或分子束）而形成。尽管缓冲层的目的是防止超导陶瓷与外部环境之间的化学反应，但是这样的缓冲层通常并不足以防止冷冻剂渗透，特别是当它们长时间或在高压下与液态冷冻剂接触时。在多层

结构的周围形成密封结构以防止冷冻剂渗透。

在此使用的“热循环”包括三个阶段的一次或多次重复，其中超导体或件浸泡在冷却剂浴中并返回到室温。所述三阶段为：i)冷却阶段，在该阶段导体或件被冷却剂包围，以及，可选择地增大或减少压力；ii)恒压下的低温阶段；和iii)加热阶段，在该阶段除去冷却剂，如果必要，压力返回到环境条件。

在热循环后，陶瓷材料的冷冻剂渗透能够通过检测超导体或件的气球而确定。在此使用的气球是指复合陶瓷线或带体积的局部增加，这归因于热循环后内部结构膨胀。通常，体积增加对应于厚度的局部增加，例如，总的厚度增加几个百分比到大于 100%。举例来说，气球能够使厚度增加约 100%。气球的长度是冷冻剂渗透量和纵向气体扩散的函数。已经观察到的气球为约几毫米到几厘米长，甚至更长。

除非另外定义，此处所使用的所有技术和科学术语具有与本发明所属技术领域的普通技术人员所理解的意义相同的意思。此处所提及的所有的出版物、专利申请、专利和其它参考资料以其整体被引为参考。在出现矛盾的情况下，本说明书，包括定义将调整。另外，材料、方法和实施例仅仅是说明性的，并非出于限制。

本发明的实施方案能够包括多个优点。密封结构能够防止冷冻剂通过表面缺陷或暴露的陶瓷表面而渗透，在超导线的正常工作所需的热循环期间，所述表面缺陷或暴露的陶瓷表面能够形成“气球”并降低超导线的临界电流传输能力。防止冷冻剂通过超导复合陶瓷线内的缺陷而渗透对超导体或件的寿命来说是至关重要的。举例来说，甚至一个气球的形成都会终止超导体或件的使用，因为该气球能导致更大缺陷的产生，通过该更大的缺陷冷冻剂能够渗透并且在进一步热循环时产生另外的气球。反过来，这样将进一步减少超导线的临界电流。由于该密封结构，导体能够经受热循环，甚至在液态冷冻剂处于加压

的条件下时，也不会减低超导陶瓷带的电流传输能力 10%以上或者更低。防止这些气球的生成也能够保持导体的尺寸公差。

当超导件在加压环境（例如大于 1 巴至约 33 巴，如约 10-15 巴）中长时间（例如几小时、几周、几年或多年）浸入液态冷冻剂中时，密封结构也能够防止冷冻剂渗透。这样的条件对电缆应用来说是典型的。此外，密封结构提供的复合陶瓷超导带的包封可以足够坚固，以便允许导体弯折或弯曲成线圈或螺旋。此外，超导体的多个实施方案通过连续的过程而形成，所述实施方案允许长导体的形成（例如长度超过 50m，以及通常长度超过几百米）。

根据下面详细描述和权利要求，本发明的其它特征和优点将显而易见。

附图简述

图 1a 和 1b 是层压超导陶瓷导体的横截面图（图 1a）和图 1a 中的导体内的陶瓷复合带的备选实施方案的横截面图（图 1b）；

图 2 是根据本发明的层压设备的示意性外观图；

图 3 是图 2 的层压设备的惰性气体（例如氮气）包体的顶部截面图；

图 4 是超导陶瓷导体的另一实施方案的横截面图；

图 5a、5b 和 5c 是超导陶瓷导体实施方案的横截面图，在该导体中可延展的片回绕在陶瓷带上，以防止冷冻剂渗透；

图 6 是超导陶瓷导体的一个实施方案的横截面图，在该导体中导电聚合物层密封陶瓷带，以防止冷冻剂渗透；

图 7 是用于形成图 6 的超导陶瓷导体中的聚合物层的装置的示意图；

图 8a 和 8b 是超导陶瓷导体实施方案的示意横截面图，在该导体中金属带压层被相互焊接以密封复合陶瓷带。

图 9 是液态冷冻剂冷却设备的示意横截面图，该设备包含根据本

发明一个实施方案的超导件。

详细描述

本发明的一个实施方案示于图 1a，该图为浸入液态冷冻剂浴 30 内的超导体 10 的横截面图，浴 30 可以被加压延长的一段时间。导体 10 包含一复合陶瓷超导带 12、焊料层 14a 和 14b、金属带 16a 和 16b 以及焊料嵌条 18a 和 18b。焊料层 14a 和 14b 把金属带 16a 和 16b 分别结合到复合陶瓷带 12 的顶面 20a 和底面 20b，从而把顶面和底面 20a 和 20b 密封，使其与液态冷冻剂 30 隔开。如图所示，金属带 16a 和 16b 比复合陶瓷带 12 宽，从而伸出其侧面 22a 和 22b 之外。焊料嵌条 18a 和 18b 充满金属带 16a 和 16b 的伸出部分之间的空间，以密封复合陶瓷带 12 的侧面 22a 和 22b，使其与液态冷冻剂 30 隔开。金属带 16a 和 16b 为复合陶瓷带 12 提供机械支持，金属带 16a 和 16b 以及焊料嵌条 18a 和 18b 相结合形成密封结构，该密封结构沿其长度方向完全包封复合陶瓷带 12，以基本上防止冷冻剂 30 的渗透。

复合陶瓷带 12 能够包含任何超导陶瓷，所述超导陶瓷包括铋、稀土、铌、铅或水银族的超导性的铜氧化物。通常的超导陶瓷材料包括，例如 $(\text{Pb,Bi})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}$ (BSCCO 2223)、 $(\text{Pb,Bi})_2\text{Sr}_1\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}$ (BSCCO 2212)、 $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ (YBCO 123)，以及在 YBCO 中的铋用稀土金属替代的氧化物。复合陶瓷带 12 可以通过公知的方法例如管内粉末和被涂敷的导体来制造。对该方法的描述，例如请参见 1998 年 9 月 1 日颁发的美国专利 US5,801,124，发明人为 Bruce R. Gamble、Gilbert N. Riley、Jr.、John D. Scudiere、Michael D. Manlief、David M. Buzcek 和 Gregory L. Snitchler，发明名称为“Laminated Superconducting Ceramic Composite Conductors（层压超导陶瓷复合导体）”，该专利的内容引入本文作参考。

参考图 1a，复合陶瓷带 12 包含贵金属基质 40，其包围并支持多个超导陶瓷细丝 42，所述细丝 42 基本上沿导体 10 的长度方向伸展。

“贵金属”是在反应条件下其反应产物为热力学不稳定性的金属，所述反应条件为用来制备陶瓷带 12 的制备期间，贵金属基质 40 并不与陶瓷细丝 42 或其前体反应。合适的贵金属包括，例如银、氧化物分散增强的（ODS）银、银合金或银/金合金。示例性的包含 ODS 银的复合陶瓷带可以根据 Lawrence J. Masur 等人于 1996 年 10 月 15 申请的发明名称为“Improved Performance of Oxide Dispersion Strengthened Superconducting Composites（氧化物分散增强的超导复合材料的改进性能）”的美国专利申请 U.S.S.N08/731,302 和 1998 年 4 月 22 日公开的相应的欧洲专利申请 EP0837512 来制造。两个申请的全部内容引入本文作为参考。金属带 16a 和 16b 可以是例如不锈钢、铜、铜合金和超合金。焊料 14a、14b、18a 和 18b 通常为金属，但是作为选择也可以包括金属纤维或者微粒的在环氧树脂中的润湿的分散体。

导体 10 的一个实施方案的合适尺寸包括：复合陶瓷带 12，其厚度 T_1 为约 0.008"；金属带 16a 和 16b，其厚度 T_2 为约 0.0015"；复合陶瓷带 12，其宽度 W_1 为约 0.160"；和金属带 16a 和 16b，其宽度 W_2 为约 0.190"。利用这套尺寸，金属带 16a 和 16b 能伸出复合陶瓷带 12 的每个面 22a 和 22b 约 0.015"。

一般地说，在其它实施方案中， W_2 可以比 W_1 至少宽 5%并最多至约 30%；优选地， W_2 比 W_1 宽约 15%至 25%。另外，复合陶瓷带 12 的宽度可以为约 0.02-1.0"或者更大，厚度约为 0.001-0.040"或者更大。金属带 16a 和 16b 的厚度通常为约 0.001-0.003"或更大，尽管也可以使用更薄的金属带。大于约 0.004-0.02"的厚压层，优选为约 0.006"，可以有利地用在强磁场磁铁应用中。正如上述尺寸所表明的，导体 10 倾向于宽度大于厚度，同时宽厚比通常大于 5，例如宽厚比约为 10。焊料厚度通常在约 0.0001"至约 0.001"的范围内，优选为 0.0002"和 0.0006"。导体 10 通常好几百米长。带 12 的端部（未示出）也可以被包封，例如通过焊料或者硅酮。例如，合适的硅酮密封剂为 Dow Corning

732 多用途密封剂，可以从 Dow Corning 公司（Midland,MI）购买。

优先选择提供导热性和导电性的金属带 16a 和 16b，以使超导件能够冷却，以及允许该件内的超导体之间的电流传输。金属带也能基于其热稳定性而进行选择。压层优选为不锈钢带（其它金属带，例如铜、铜合金或超合金带也是合适的）。也优先选择热膨胀系数大于超导陶瓷带的金属带，以在金属带 16a 和 16b 与复合陶瓷带 12 之间传递压缩应变，这增强了复合材料的机械性能，所述压缩应变在压层之后通过冷却而产生。优选地，应选择屈服强度至少为 700Mpa 的金属带。

冷冻剂 30 可以是任何一种冷冻剂，其能够维持超导体 10 处于或低于其转变温度。根据本发明，液氮是特别优选的适于使用的冷冻剂，但这不应视为限制。根据应用，冷冻剂 30 也能够被加压。在能达到的最大压力下，由液态冷却剂实施的制冷受到液体临界点的限制。例如，对于液态氮来说，通常的压力值处于约 1-33 巴范围内。此外，在一些实施方案中，制冷作用可以在大气压以下发生，以影响液态冷冻剂的沸腾温度。

在复合带形成以后，即把复合带制成超导后，金属带被层压到复合带上。因此，由金属带和焊料嵌条形成的密封结构没有经受恶劣的机械和热处理，所述机械和热处理用来形成复合带 12。这样的处理能够降低密封结构的密封性能。

参考图 2 和 3，层压机 100 通过把复合陶瓷带 12 和金属带 16a 和 16b 传送通过焊料波浪浴（solder wave bath）118 并且把它们一起压缩成型板（die）而形成导体 10。因为金属带 16a 和 16b 伸出复合陶瓷带 12 的侧面 22a 和 22b，毛细作用把焊料附着到复合陶瓷带 12 的侧面 22a 和 22b，形成焊料嵌条 18a 和 18b。

层压设备 100 包含例如清洗装置 174, 176 和 178、层压机 118, 例如焊料波或焊料浴以及一序列供给导向装置 120, 120a, 122, 124 和 126, 所述供给导向装置用于把复合陶瓷带 12 和金属带 16a 和 16b 导入层压机 118。清洗装置 174、176 和 178 可以是例如超声清洗站、助焊剂 (flux) 站、化学还原设备或机械擦洗器。当导体带 10 通过供给导向装置 120, 120a, 122, 124 和 126、清洗装置 174, 176 和 178 以及层压机 118 被供给时, 导体带 10 优选沿基本上直的层压工序路径 (箭头 119) 运行, 以防止超导带 10 的退化。层压设备 100 也包含仪表盘 127, 用于输入用户指令以及显示系统状况。

在层压之前, 复合陶瓷带 12 储存在展卷辊 128 上, 金属带 16a 和 16b 分别储存在展卷辊 130 和 132 上。卷带辊 134 由电动机 135 驱动, 在卷带辊 134 上, 得到的层压超导带 10 被卷起, 卷带辊 134 拉动复合陶瓷带 12 和金属带 16a 和 16b 并使它们通过供给导向装置 120, 120a, 122, 124 和 126 以及层压机 118。展卷辊 128、130 和 132 分别优选包含制动器 129、131 和 133, 它们用于独立地控制复合陶瓷带 12 和金属带 16a 和 16b 内的张力。当复合陶瓷带 12 从展卷辊 128 供给时, 它的曲率半径保持大于约 8"-10", 以防止超导带 10 的机械退化及由此产生的电性能的退化。在例如, 发明人为 John D. Scudiere、David M. Buczek、Gregory L. Snitchler 和 Paul J. Di Pietro, 1996 年 8 月 30 日提交的发明名称为“Laminated Superconducting Ceramic Tape(层压的超导陶瓷带)”的美国专利申请 U.S.08/705811 以及相应的 PCT 国际申请 WO98/09295 所教导的层压方法中, 金属带 16a 和 16b 能够被拉紧, 这两篇专利的全部内容引入本文作参考。

层压设备 100 包含, 例如罩住层压机 118 的氮气包体 140, 位于层压机 118 上游的熔融器 (fluxer) 142 以及干燥器/加热器 144, 所述干燥器/加热器 144 位于熔融器 142 和层压机 118 之间, 用来膨胀复合陶瓷带 12 和金属带 16a 和 16b。优选地, 层压机 118 包含焊料波和相关的工艺设置 (例如预热温度, 压力和冷却速率), 所述设置用来最

小化焊料内的空隙率。在焊接过程中，通过毛细作用，工艺参数和设备设置能使全部嵌条 18a 和 18b 在复合陶瓷带 12 的侧面 22a 和 22b 上形成。例如，装置 130a 控制加在擦拭设备上的压力。

连续的嵌条可以通过下列步骤获得：控制助焊剂的施用和比重（例如小于 1）和预热温度（例如大于 100°C）；在波中维持带的对齐；当导体退出波时，在导体上施加约 2-5 磅的正压力；快速均匀地冷却焊料（例如小于约 0.5 秒）。通常线速度最高可达约 10 米/分钟(m/min)。因此，超导体以连续的方式制造，通过该方式能够制造出长度至少为约 50m，通常更长的导体。

焊料嵌条 18a 和 18b 分别气密地密封复合陶瓷带 12 的侧面 22a 和 22b，因为即使焊料嵌条 18a 和 18b 不完全润湿侧面 22a 和 22b，它们也能润湿金属带 16a 和 16b 的邻近的伸出边缘。因此，每一焊料嵌条在金属带 16a 和 16b 之间形成连续的表面，因而气密地密封复合陶瓷带 12 的侧面。此外，因为在沿导体横截面方向焊料嵌条尺寸较小（例如小于约 0.080"），所以缩孔通常不会发生。请参见，例如 Principles of Soldering and Brazing（锡焊和铜焊原理），Humpston 和 Jacobson 著，第 127 页，第 4 章，第 4.4.1.2 节，（ASM International 1996）。因而，焊料嵌条是无孔的并且能够防止冷冻剂渗入复合陶瓷材料的各个侧面。

导向挡板 154 用来控制金属带 16a 和 16b 与复合陶瓷带 12 之间的焊料层 14a 和 14b 的厚度。冷却器 156 吹出例如低于 100°C 的空气，以从层压的导体带 10 去掉多余的焊料并冷却该层压的导体带 10，从而冻结焊料层 14a 和 14b 以及焊料嵌条 18a 和 18b。另一供给导向装置 157 位于冷却器 156 的下游。

位于冷却器 156 和供给导向装置 157 的下游的是一个清洗站 190，其向导体 10 上喷射清洁液体，例如，约 70°C 的蒸馏水，干燥器 192

位于清洗站 190 的下游，其包括约 100°C 的空气喷射。导向辊 194 和 198 位于干燥器 192 的下游。

复合陶瓷带 12 的表面 20a,20b,22a 和 22b 为脆弱的表面，该表面上可能会有造成冷冻剂渗透的多孔缺陷。优选金属带 16a 和 16b 通过相同的方法进行清洗并且清洗到相同的程度。接着，把带 12 和金属带 16a 和 16b 加热到焊接温度。通过助焊剂浸泡、喷洒或浸蘸、助焊剂擦拭、起泡器，可以施用焊料助焊剂，从而确保脆弱的表面被连续地覆盖上助焊剂。优选的助焊剂为不与超导陶瓷或基质发生不利的化学反应，能够在水中被清除以及对带和压层提供最大的可润湿度。例如，可以使用来自 Alpha Metals(Jersey City,N.J.)的助焊剂 856、857 和 260HF。优选的焊料包括 Pb-Sn-Ag、Pb-Sn、Sn-Ag 和 In-Pb。优选焊料应该与压层结构的焊料具有相容的热和机械性能（例如抗张强度、热膨胀系数（CTE）、在室温和冷冻操作温度下的伸长率）性能。

在压层期间，复合陶瓷带 12 上的张力优选维持在较低的水平，优选对应于约 0.01%或更低的应变，从而防止带退化。在压层过程中，如果需要，独立受控的制动器 129、131 和 133 允许金属带 16a 和 16b 在张力比复合陶瓷带 12 高的情况下被拉紧。当冷却层压的导体带 10 时，复合陶瓷带 12 和金属带 16a 和 16b 在开始冷却时发生收缩，焊料层 14a 和 14b 及嵌条 18a 和 18b 中的焊料冻结，从而把复合陶瓷带 12 密封到金属带 16a 和 16b 上。

在另一实施方案中，导体 10 中的复合陶瓷带 12 可以被有涂层的导体结构中的复合陶瓷带所替代，如图 1b 中所示的复合陶瓷带 12'，所述导体 10 包含金属基质 40 中的超导陶瓷细丝 42。带 12'包含一对超导层 45a 和 45b（例如 YBCO（YBCO 123），在 YBCO 中钇由稀土金属替代的物质、BSSCO 或铋基超导体），其中层 45a 和 45b 每一个分别包含盖层 43a 和 43b。如参考数字 44 所示，盖层 43a 和 43b 被焊接、胶合或以其它方式相互结合（例如通过扩散结合）。带 12'还包

含缓冲层 47a 和 47b 以及衬底层 49a 和 49b, 所述缓冲层 47a 和 47b 把超导层 45a 和 45b 夹在中间, 所述衬底层 49a 和 49b 支持有缓冲的超导层。合适的盖层由例如导电金属如银、铜、铝或者它们的结合物或合金制备。合适的缓冲层包括例如 CeO_2 、YSZ (氧化钇稳定的氧化锆)、 SrTiO_3 和 Y_2O_3 。合适的衬底层可以包括例如非铁磁性层如镍/铜合金。衬底层在例如 1997 年 10 月 1 日提交的, Cornelis Leo Hans Thieme, Elliot D. Thompson, Leslie G. Fritzemeier, Robert D. Cameron 和 Edward J. Siegal 发明的名为: “Substrate with Improved Oxidation Resistance(具有提高的抗氧化能力的基质)” 的美国专利申请 U.S.S.N08/943,047 以及 1999 年 4 月 8 日公开的相应的 PCT 国际申请 WO99/17307 中有记载, 两篇专利的全部内容引入本文作参考。如上所述, 带 12' 能够取代图 1a 中的带 12, 并且所述结构气密地密封复合陶瓷带 12' (即金属带和焊料嵌条)。它的形成与参考图 1a 进行的描述相同。

作为选择, 带 12' 可以被改进以有效地防止冷冻剂渗透。例如, 衬底 49a 和 49b 类似地应用到了如图 1a 所示的层压金属带 16a 和 16b 上, 并且如在此描述的, 侧面 22a 和 22b 被密封, 而与环境隔开 (例如通过锡焊 (solder) 或熔焊 (welding))。

参考图 4, 多压层超导复合陶瓷带 (例如带 12 的叠层, 或者带 12' 的叠层) 可以通过焊料 14 在金属带 16a 和 16b 之间被层压, 以形成结构 200。如在图 1 的实施方案中, 焊料嵌条 18a 和 18b 密封带 12 的侧面, 并因为金属带 16a 和 16b 的边缘伸出了带 12 的侧面之处而形成, 否则带 12 的侧面将被暴露到冷冻剂渗透。

在其它实施方案中, 如图 8a 和 8b 所示的例子, 金属带 16a 和 16b 可以被熔焊, 而不是锡焊到复合陶瓷带 12 的顶面和底面 20a 和 20b, 并且在焊接点 99 相互焊接到一起。被焊接的金属带 16a 和 16b 完全覆盖进而气密地密封复合陶瓷带 12 的顶面、底面和侧面, 使其与液

态冷冻剂 30 隔开。

在进一步的实施方案中，密封结构可以包含一片或多片无孔的可延展的材料，例如铜片，所述材料回绕复合陶瓷带并被相互焊接到一起，以便气密地密封复合陶瓷带 12 的顶面、底面和侧面，而使其与液态冷冻剂隔开。例如，参考图 5a，示出了导体 60 的横截面。导体 60 包含一超导复合陶瓷带 62，其具有通过焊料层 64 层压到超导复合陶瓷带 62 的顶面 70a 的金属带 66。复合陶瓷带 62 和层压的金属带 66 类似于上述的复合陶瓷带和金属带。金属带 66 把机械强度赋予到复合陶瓷带 62。可延展的材料片 75 形成了密封结构，其包围带 62 和金属带 66 的顶面、底面和侧面并且沿它们的长度方向伸展。片 75 的相对表面上的部分 77 和 79 被焊接到一起，以便气密地密封复合陶瓷带使其与冷冻剂浴 80 隔开。

在其它实施方案中，多片可延展的材料能够相互焊接，从而包围层压的陶瓷和金属带的顶面、底面和侧面。此外，在其它实施方案中，第二金属带能够被层压到复合陶瓷带 62 的底侧面 70b，以赋予额外的机械强度。作为选择，在其它实施方案中，通过片 75 形成的密封结构赋予足够的机械强度以消除对任何层压的金属带的需要，如图所示，例如通过图 5b 中的导体 60' 的横截面。此外，不是把片 75 的部分 77 和 79 相互焊接到复合陶瓷带 62 的侧面上，如图 5a 和 5b 所示，而是把部分 77 和 79 相互焊接到复合陶瓷带 62 的顶面上，如图 5c 中对导体 60' 所示。

在优选实施方案中，可延展的片是可导电的，因而当多个导体 60 的顶面相互层压时，在相邻导体之间产生电流通路。可延展片的合适材料是铜、铜合金、不锈钢和超合金。可延展片的合适厚度与上述金属带的厚度具有可比性。通过滚压成型，该片能够回绕复合陶瓷带或层压结构。例如，请参见 Handbook of Metal Forming Processes (金属成型工艺手册)，Betzalet 和 Avitzur 编 (Wiley publishing, 1983)，第 459

页，第 9.2.1 节。

在进一步的实施方案中，密封结构可以是可固化的聚合物材料，例如丙烯酸酯聚合物，它可施用到复合陶瓷带或层压的陶瓷和金属带的顶面、底面和侧面，并且固化后气密地密封导体使其与液态冷冻剂隔开。例如，参考图 6，导体 310 包含超导复合陶瓷带 312，其具有通过焊料层 314 层压到顶面 320a 的金属带 316。复合陶瓷带 312 和层压的金属带 316 类似于上述的复合陶瓷带和金属带，并且金属带 316 把机械强度赋予到复合陶瓷带 312。固化的聚合物层 375 包围层压的带 312 和 316 的顶面、底面和侧面并且沿它们的长度方向伸展，以气密地密封导体使其与液态冷冻剂 330 隔开。通过涂敷或者浸蘸，聚合物层能够施用到层压的陶瓷和金属带，聚合物层接着能够被热固化或者通过暴露到紫外线而固化。合适的可固化聚合物包括来自 Desotech(Elgin,IL)的 Desolite 2002-17，其为紫外可固性丙烯酸酯聚合物。该聚合物族在低温下具有优良的机械性能。例如，在 77K 时，极限抗张强度 (UTS) 约为 100-160Mpa，并且伸长率为约 0.3%-0.5%。

优选地，紧接层压过程，通过同线方式，聚合物层将被施用到层压的带 312 和 316 上。例如，参考图 7，在氮气清洗 408 的情况下，层压的带 400 被拉过型板 402 进入浴 404，所述浴 404 包含有未固化的聚合物 406。聚合物 406 涂敷带 400，然后该带被拉过第二型板 412。被涂敷的带接着暴露到 UV 光源 414 发出的紫外光中，从而固化聚合物并形成聚合物层 416。

再次参考图 6，在优选实施方案中，导电介质 380 如铜、银、金或者铝微粒（例如具有约为 10-20 微米的直径）分散到聚合物层 375 内，从而由固化的聚合物密封的导体沿至少其厚度方向（即沿 Z 轴方向）也是导电的。沿厚度方向的导电性在例如电源电缆的应用中提供了另一电流通路，在所述电源电缆中，多个超导陶瓷导体顶面相互层压，并且电流在层之间的传输可能是很重要的。在该应用中，在涂敷

层压的带之前，导电介质被加到并分散到聚合物中。在聚合物中导电介质的量足够赋予所需的沿 Z 轴方向的导电率。导电介质也可以包含金属杆或栅网。例如，聚合物涂层可以包封导线的网眼。

图 9 表示系统 250，其包含超导件 260，例如采用了根据本发明制造的导体 10 的电缆。图 9 所示的实施方案使冷冻剂 251 可以作为系统 250 内的热传导介质。特别地，冷冻剂 251 包含在容器 252 内，该容器 252 还包含有由导体 10 组成的超导件 260，例如，所述导体 10 可以是以横截面观察的超导电缆或者超导励磁线圈。超导件 260 至少部分地浸入液态冷冻剂 251 中，同时导体 10 直接与液态冷冻剂 251 接触。通过使冷冻剂 251 循环流经管线 256 上的制冷单元 254 和循环泵 258，维持冷冻剂 251 的温度在所需范围内，例如液氮的温度。例如，液态冷冻剂 251 可以是液氮、液氦、液氢或者超临界氢，但这不应视为限制。在管线 256 上的液态冷冻剂 251 的温度通过制冷单元 254 维持。超导件 260 内的材料量确定单元 254 的负载以及由此产生的设备 250 的运行成本。

为了防止冷冻剂 251 渗入复合陶瓷带 12，通过使用上述的密封结构，在复合陶瓷带 12 内的基质材料 40 的厚度通常实质上能够被减少或者超导带的填充系数能够被增加。正如本发明提出的，如果去掉密封结构，填充系数增加，减少复合材料的外部厚度，从而增加产生气球的表面缺陷的可能性。此外，获得较大的填充系数通常需要更加严格的制造条件，这些条件也会增加表面缺陷的可能性，在没有密封结构时，这些缺陷会导致气球的产生。因而密封结构允许填充系数的增加以及临界电流密度的相应增加，而不会增加气球形成的可能性。对长距离电缆来说，这是特别重要的优点，因为它减少了电缆所需的带数目，同时也能减少运行成本。这也是一种针对下述任何应用的重要考虑：把超导件放置到大容量沸腾（pool-boiling）的液态冷冻剂的环境中，在所述环境下，液态冷冻剂直接冷却该超导件。

对于超导件 260，通常的操作条件包括温度为 66-80K，以及对于加压环境，压力约为 1-33atm，例如约 10-15atm。循环泵 258 能够用来产生这些压力。在一些应用中，超导件 260 能够暴露到这些条件许多年。然而，超导件 260 也必须经受热循环，在热循环中，超导件返回到环境条件以进行例如正常保养。尽管有这些操作条件和热循环，但是上述的密封结构使得由于冷冻剂渗透造成的超导件退化最小化。

通过下面非限制性的实施例，可以进一步理解本发明。

实施例 1

如上所述，利用伸出的不锈钢金属带对 BSSCO 复丝复合陶瓷带进行层压。金属带为 0.154"宽，复合陶瓷带为 0.124"宽。在复合陶瓷带每一个侧面上的焊料嵌条大约为 0.015"（沿宽度方向或者 X 轴方向）。用来确保边续嵌条的层压方法包括焊接之前超过 100°C 的预热温度、当层压的带离开焊料罐时加在层压的带上的正压力（5-10MPa）及用空气刮浆刀快速固化。导体的端部使用硅单独密封，特别是使用 Dow Corning 732 多用途密封剂进行密封，其可以从 Dow Corning 公司（Midland,MI）购买。在环境压力下把试样导体浸泡在液氮中达到 6 周。在返回到环境条件以后，没有出现明显的气球。在另一试验顺序中，试样导体在 125°C 下老化达 72 小时，接着在 10atm 下把它浸入液氮达 36 小时。在返回环境条件后，没有出现明显的气球。两次试验的导线长度约为约 5-15 米。

实施例 2

把不锈钢金属带层压到 BSSCO 复丝复合陶瓷带的顶面和底面。复合陶瓷带约为 0.160"宽，金属带约为 0.154"宽，从而金属带不能伸出复合带之外。层压的带接着用丙烯酸酯涂料进行涂敷并且紫外固化。试样导体接着进行热循环十次，从 77K 一直到室温，时间达 8 小时以上，接着在环境压力下把试样导体浸入液氮两周。在返回到环境条件以后，没有出现明显的气球。在第二次试验中，试样导体从 77K

到室温热循环 10 次，接着在 10atm 下把试样导体浸入液氮 36 小时。在返回到环境条件以后，没有出现明显的气球。

实施例 3

通过焊接层压方法把不锈钢金属带层压到第一套 BSSCO 复丝复合陶瓷带的顶面和底面，并且金属带不伸出来。不锈钢金属条约为 0.153"宽，并且覆盖了复合陶瓷带顶面和底面约 95%，所述复合陶瓷带约 0.161"宽。

使用上述的和实施例 1 中的焊接层压方法把伸出的不锈钢金属带层压到第二套 BSSCO 复丝复合陶瓷带的顶面和底面。在第二套中，不锈钢金属条约为 0.197"宽，复合陶瓷带约 0.153"宽，不锈钢金属条比复合陶瓷带宽。

当试样的端部用单独的焊料盖层密封后，在 30atm 下把两套试样浸入液氮 16 小时，一旦把试样从液氮浴取出，第一套的所有试样都形成了气球，而第二套的所有试样都未形成气球。

实施例 4

按照实施例 3 的方式制造两套 BSSCO 复丝导体。通过对导体表面施加不定向的压力以模拟电源传输电缆的应用中出现的制冷器效果，来机械老化试样。当机械老化后，在 5atm 下把试样浸入液氮 8 小时。一旦把试样从液氮浴取出，第一套的所有试样都形成了气球，而第二套的所有试样都未形成气球。

实施例 5

按照实施例 3 的方式制造两套 BSSCO 复丝导体。通过弯曲、拉伸和扭曲变形以模拟在电源传输应用（例如电缆变压器）的制造阶段施加的形变，从而机械老化试样。当机械老化后，没有观察到导体临界电流密度降低。机械老化后，在 30atm 下把试样浸入液氮 16 小时，

一旦把试样从液氮浴取出，第一套的所有试样都形成了气球，而第二套的所有试样都未形成气球。

实施例 6

按照实施例 3 的方式制造两套 BSSCO 复丝导体，并且按照实施例 5 的方式对它们进行机械老化。接着，通过把它们绕在铝制圆柱形心轴上，两套试样被进一步机械老化，所述铝制圆柱形心轴的热膨胀系数大于导体，接下来，把试样加热到 100°C 以上，持续约 100 小时。接着，缠绕的导体在 1atm 的液氮浴和室温之间快速循环十次（即直到该池达到平衡）。接着在 30atm 下把导体放入液氮浴 16 小时。一旦把试样从液氮浴取出，第一套的所有试样都形成了气球，而第二套的所有试样都未形成气球。当机械和热老化过程的次序颠倒时，也获得了类似的结果。

其它方面、优点和修改都在所附的权利要求的范围内。例如，尽管上文详细地描述了具有基本上为长方形横截面的复合陶瓷超导带，但是，一般来说，密封结构能够气密地密封具有任何横截面形状，例如圆形、椭圆形或长方形横截面的复合陶瓷超导线（例如带或杆）。

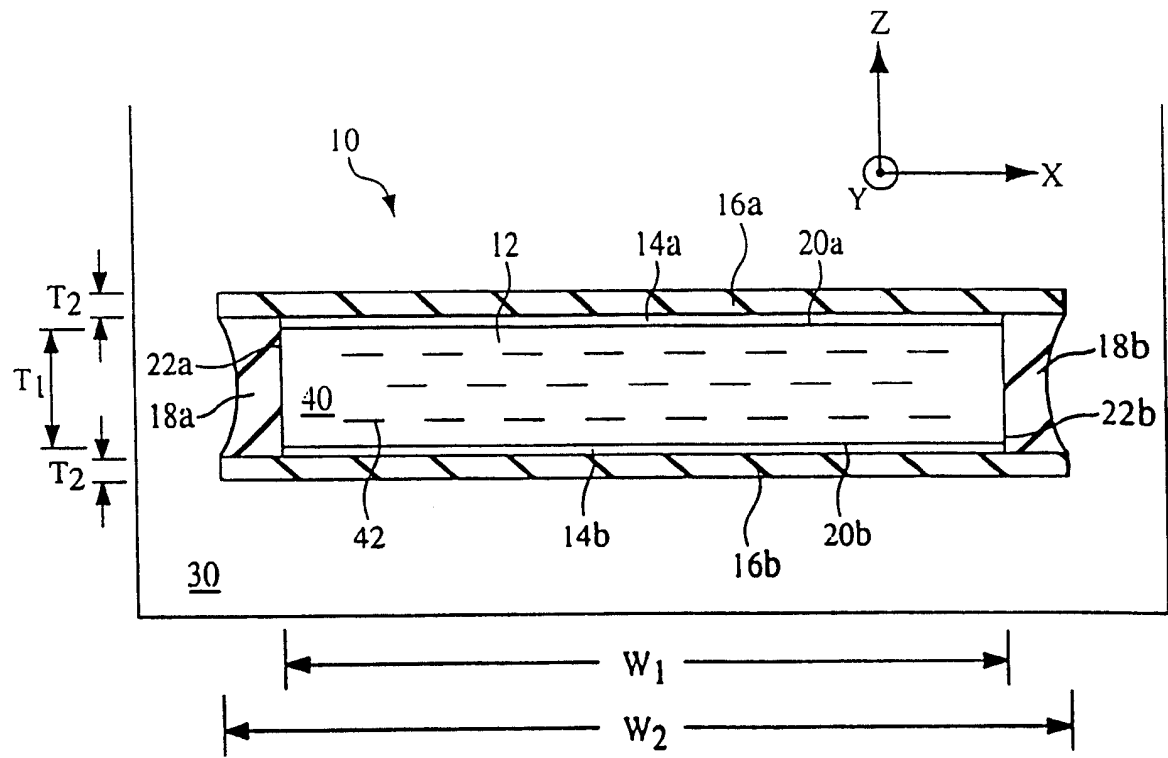


图1a

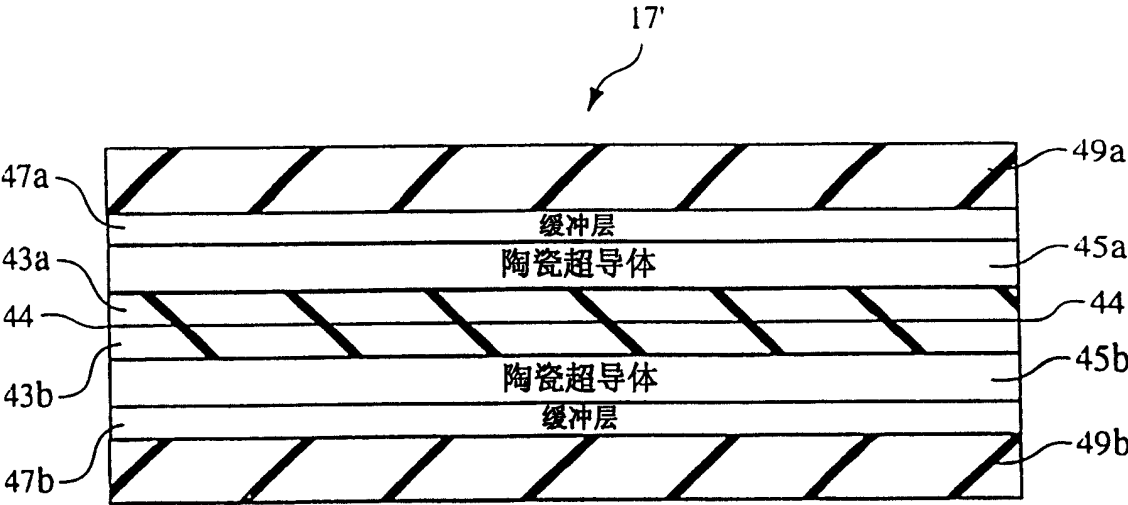


图1b

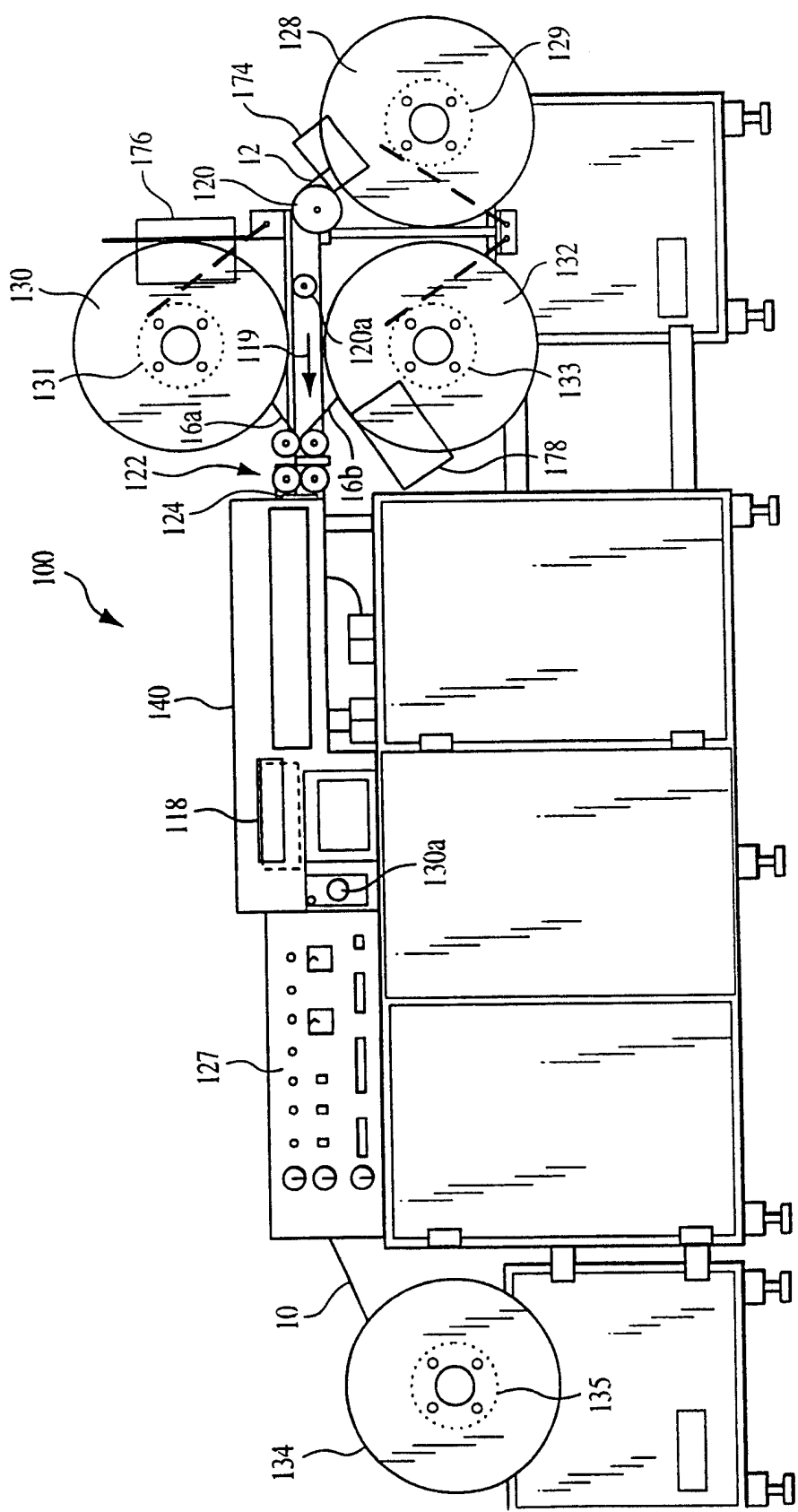


图2

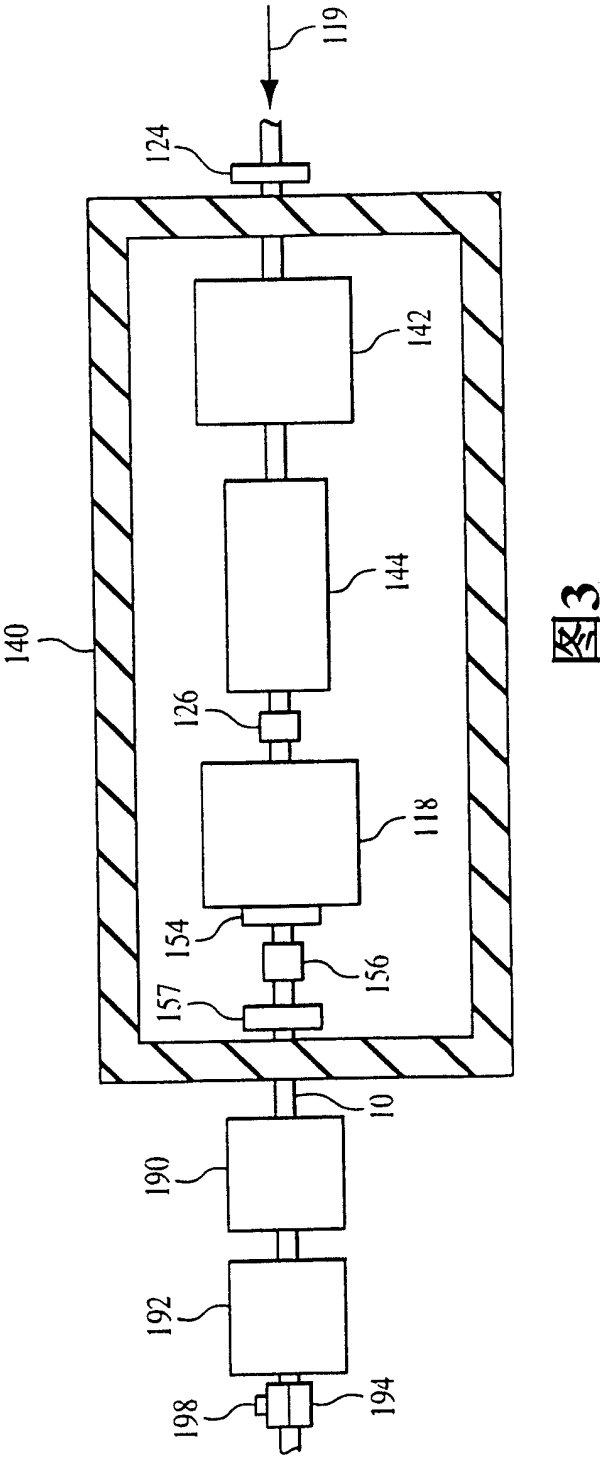


图3

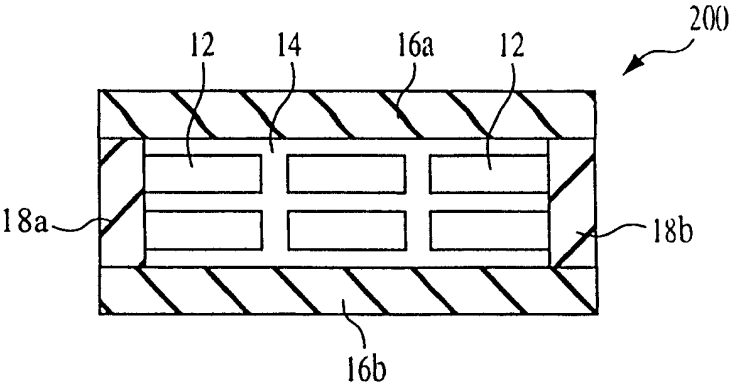


图4

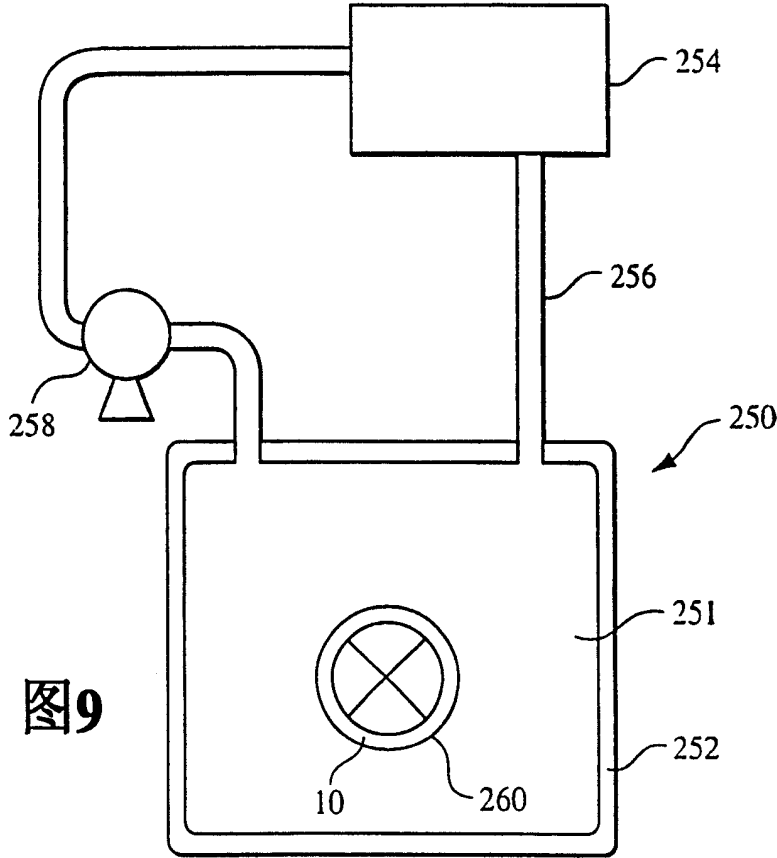


图9

图5a

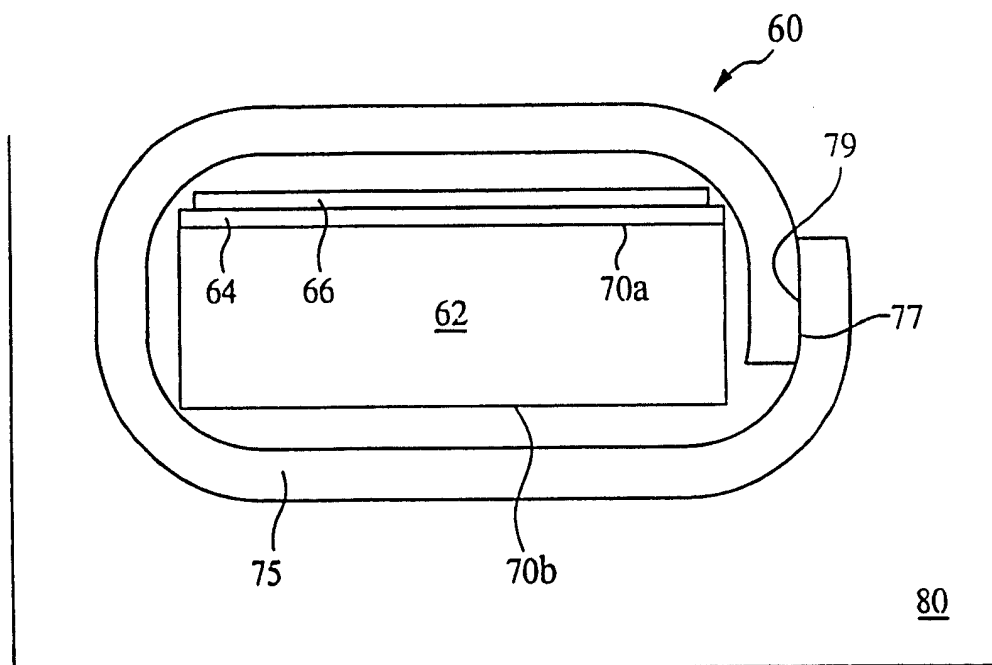
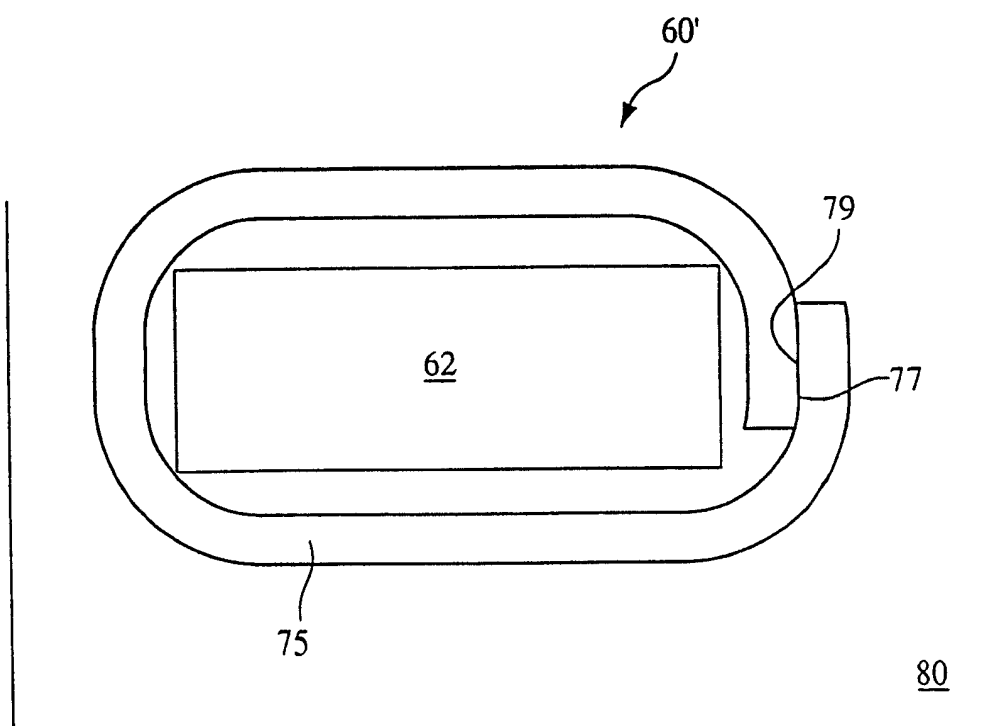


图5b



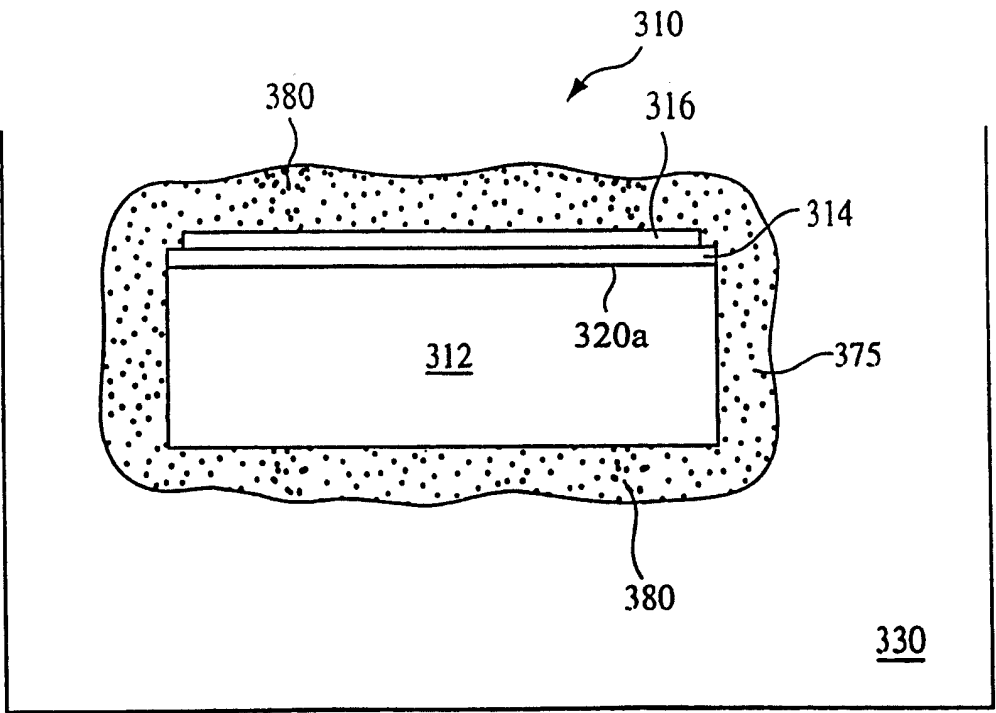


图6

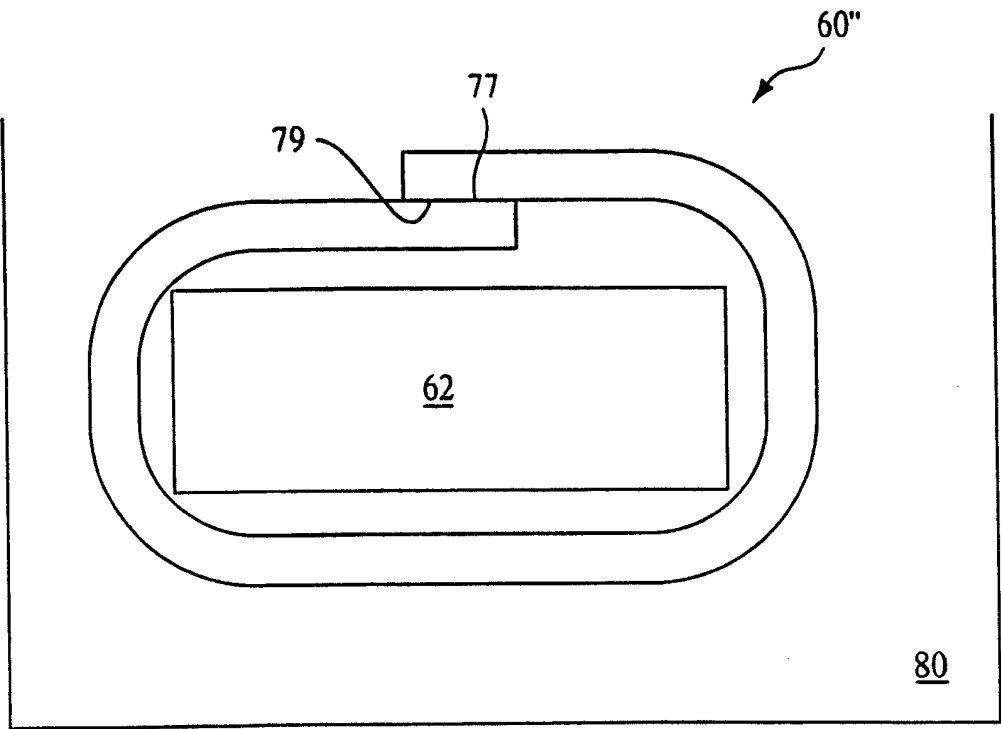


图5c

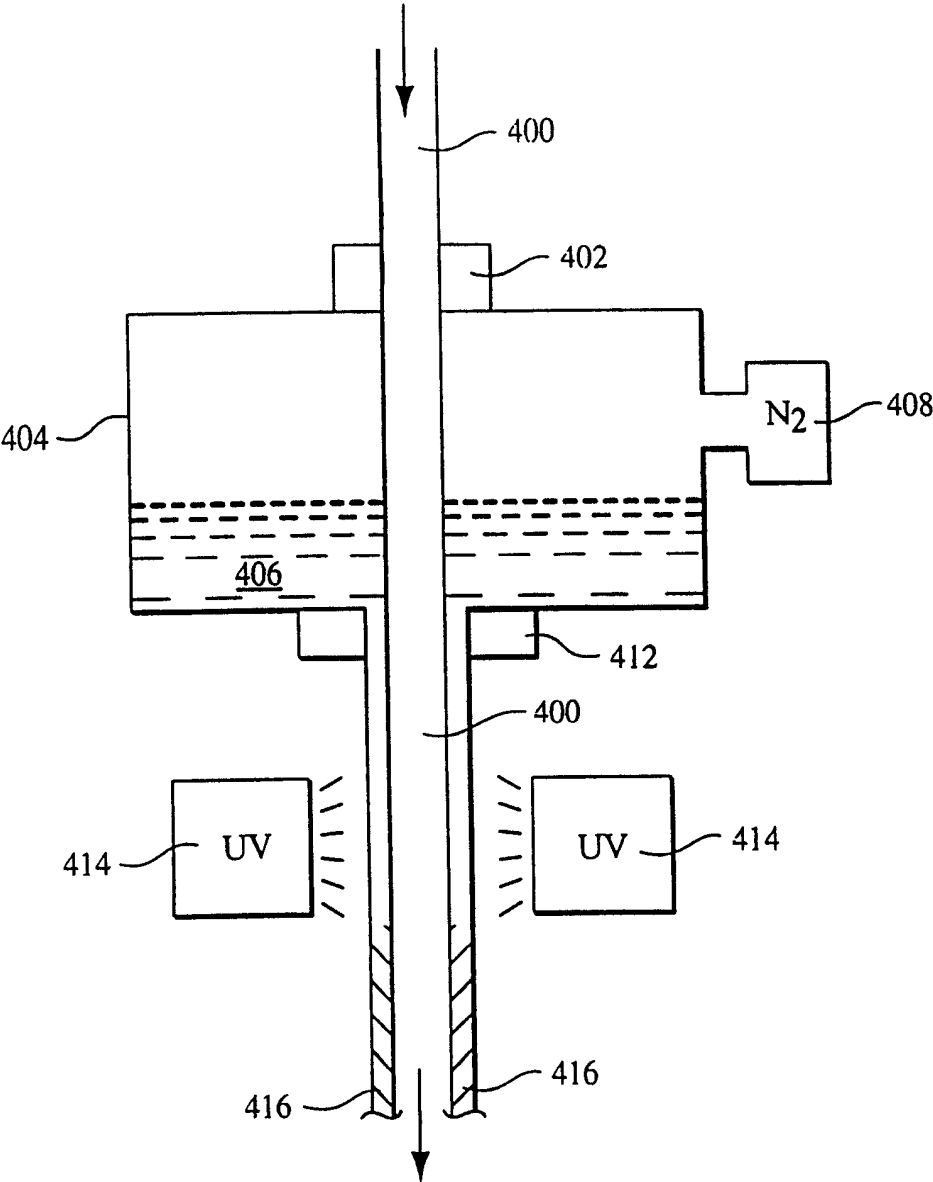


图7

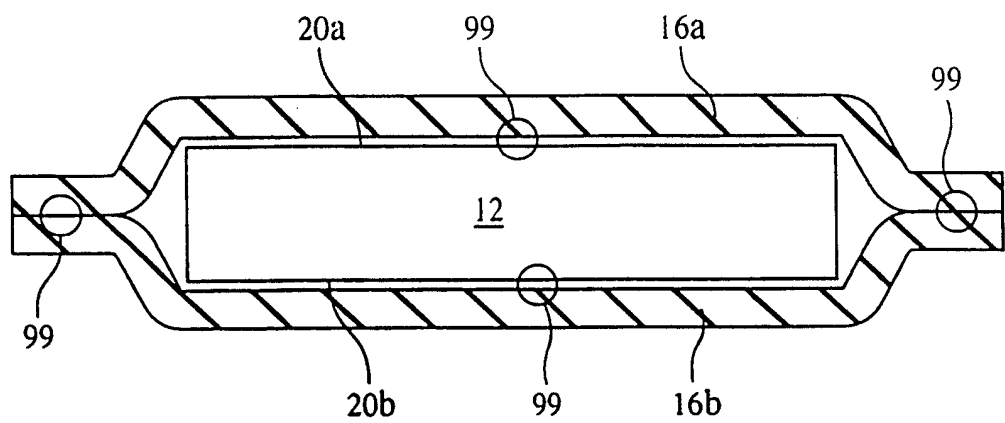


图8a

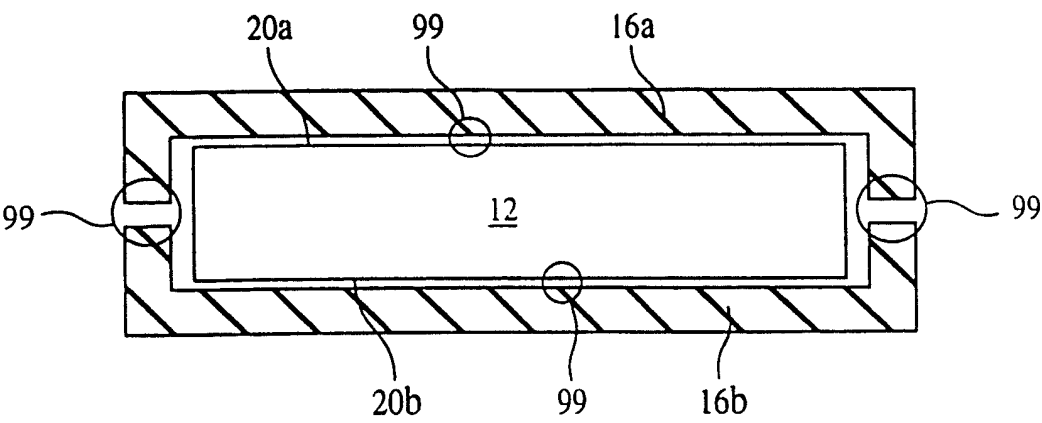


图8b