



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 98808024.9

[45] 授权公告日 2004 年 6 月 16 日

[11] 授权公告号 CN 1154118C

[22] 申请日 1998.7.28 [21] 申请号 98808024.9
 [30] 优先权
 [32] 1997. 8. 5 [33] EP [31] 97202433.5
 [32] 1997. 9. 25 [33] US [31] 60/059,986
 [86] 国际申请 PCT/EP1998/004991 1998.7.28
 [87] 国际公布 WO1999/008289 英 1999.2.18
 [85] 进入国家阶段日期 2000.2.4
 [71] 专利权人 皮雷利·卡维系统有限公司
 地址 意大利米兰
 [72] 发明人 帕奥拉·卡拉西诺 劳拉·格拉尔蒂
 皮耶罗·迈特拉 马尔库·纳西
 审查员 李 涛

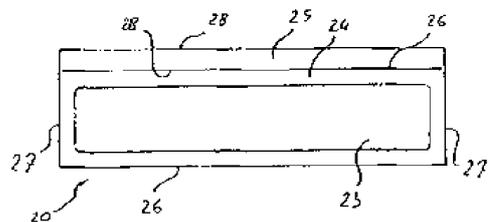
[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利
 商标事务所
 代理人 马 浩

权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 1 页

[54] 发明名称 高温超导电缆及其制造工艺

[57] 摘要

一种高温超导电缆，包括一管状支持物，和多个螺旋式缠绕在所述支持物上的超导条带，从而形成一或多个超导层，用于超导层的电绝缘手段，以及用于使超导层保持在一预定工作温度以下的冷却手段和热绝缘手段。根据本发明，该超导条带含有超导材料被封闭在一个金属外皮中，至少一个金属条与此金属外皮相连，超导条带在制造和安装过程中最大可承受的拉伸形变大于 3%。



1. 一种高温超导电缆(1)，它包括一管状支持物(6)，和多个有超导材料(23)被封闭在一金属外皮(24)中的超导条带(20)，该条带被螺旋式缠绕在支持物(6)上，从而形成至少一个电绝缘的、热绝缘的和被冷却的超导层，其特征在于该超导条带(20)包括至少一个与金属外皮(24)耦合的金属条(25)，并且该超导条带(20)在制造和安装过程中最大可承受的拉伸形变大于3%。

2. 根据权利要求1的电缆，其中该超导条带(20)包含两个与金属外皮(24)耦合的金属条(25)。

3. 根据权利要求1的电缆，其中该金属外皮(24)是由银或带有镁和/或铝和/或镍的银基合金制成。

4. 根据权利要求1的电缆，其中该金属条(25)由熔焊与金属外皮(24)耦合。

5. 根据权利要求1的电缆，其中该金属条(25)由钎焊与金属外皮(24)耦合。

6. 根据权利要求1的电缆，其中该金属条(25)由粘接与金属外皮(24)耦合。

7. 根据权利要求1的电缆，其中该金属条(25)是由低电导率的非磁化不锈钢制成。

8. 根据权利要求1的电缆，其中该金属条(25)是由青铜制成。

9. 根据权利要求1的电缆，其中该金属条(25)是由铝制成。

10. 根据权利要求1的电缆，其中该管状支持物(6)是由金属制成。

11. 根据权利要求10的电缆，其中该金属管状支持物(6)是由非磁化不锈钢制成。

12. 根据权利要求10的电缆，其中该金属管状支持物(6)是由铜制成。

13. 根据权利要求10的电缆，其中该金属管状支持物(6)具有

连续的结构，平滑或波纹状。

14. 根据权利要求10的电缆，其中该金属管状支持物(6)具有螺旋式缠绕金属条结构。

15. 根据权利要求10的电缆，其中该金属管状支持物(6)具有瓦式结构。

16. 根据权利要求10的电缆，其中该超导条带(20)在金属管状支持物(6)上的缠绕角小于 40° 。

17. 一种制造高温超导电缆的工艺流程，其包括下列步骤：

- 提供一个管状支持物(6)；
- 把超导材料(23)封闭在一金属外皮(24)中，从而形成超导条带(20)；
- 把多个超导条带(20)螺旋式缠绕在支持物(6)上，从而形成至少一个超导层；
- 使超导层电绝缘；
- 使超导层热绝缘；
- 提供当电缆在使用时能把超导层冷却到一预定的工作温度之下的可能性，

其特征在于：

- 使至少一个金属条(25)与超导条带(20)的金属外皮(24)耦合，
- 控制超导条带(20)在制造和安装过程中最大可承受的拉伸形变，使其大于3%。

18. 根据权利要求17的工艺流程，包含以下步骤：

使两个金属条(25)与超导条带(20)的金属外皮(24)耦合。

19. 根据权利要求17的工艺流程，其中该耦合步骤是由熔焊完成的。

20. 根据权利要求17的工艺流程，其中该耦合步骤是由钎焊完成的。

21. 根据权利要求17的工艺流程，其中该耦合步骤是由粘接完

成的。

22. 根据权利要求 17 的工艺流程, 其中该管状支持物 (6) 是由金属制成的, 而且该超导条带 (20) 在金属管状支持物 (6) 上的缠绕角小于 40° 。

高温超导电缆及其制造工艺

5

技术领域

本发明涉及所谓高温型超导电缆及其制造工艺。

背景技术

10 本说明书及所附权利要求中通篇采用的术语“超导材料”是指包含超导状态的任何材料，例如基于铜、钡和钇的混合氧化物或铋、铅、铌、钙、铜、铈和汞的混合氧化物构成的陶瓷材料，这里所说超导状态是指处在低于所谓临界温度 T_c 的温度具有几乎零电阻率的状态。

在超导体领域，因而在本说明书中，术语“高温”是指接近或高于液态氮温度（约 77°K ）的任何温度，它与通常称为低温的液态氮温度
15 （约 4°K ）相比而称为高温。

从例如 DE - A - 3811050 和 EP - A - 0747975 可知道高温超导电缆。

临界温度高于 77°K ，即在至少达到这一温度时才表现出超导特性的超导材料是已经知道的。这些材料通常被称作高温超导体。显然，这种材料与低温超导体相比在技术上更有意义，因为可以由 77°K 的液氮
20 致冷而不是由 4°K 的液氮致冷来保证它们的工作，从而大大降低其实现难度和能量消耗。

众所周知，在电能输送领域，最难解决的问题之一是如何从技术和经济的观点使所谓超导材料的利用能表现出越来越大的优越性。

25 事实上，即使那些低温材料已经知道很久了，它们的普及至今仍只限于某些明确规定的实际应用，例如制造为核磁共振设备所用磁体或高场强磁体，对于它们，成本不是一个鉴别因素。

实际上，由于被超导体消耗的功率较小而节省的费用，仍然超过被保持氮低于其临界温度所需液氮致冷造成的费用所抵消的部分。

为了解决前述问题，研究工作部分地指向试验新的高温超导材料，部分地试图不断地改进已有材料的特性和含有已能得到的材料的导体的性能。

5 关于几何特性，已经发现，厚度通常在 0.05 和 1mm 之间的薄带提供了一种有利的几何形状。

事实上，在这种情况下，含有很脆的超导陶瓷材料的导体一方面改善了对各种弯曲应力的抵抗能力，这些应力是在包含该导体的电缆每一制造、运输和安装操作过程中施加给它的；另一方面，它提供了临界电流密度方面的更好性能，因为该超导材料具有更有利的取向和致密程度。

由于多种理由，特别是为改善其机械抵抗性能，上述导体通常包含多个条带，每个条带由一超导材料核心封闭在一金属外皮中构成，该金属外皮一般为银或银合金，这些条带耦合在一起，得到一种多线条组合结构。

15 根据一种本领域技术人员称之为“管中颗粒 (powder-in-tube)”的广泛使用的方法，导体的这种多线条结构的获得是从小金属管开始的，在小金属管中填充适当的前身颗粒，这些金属管又被封闭在另一个外部金属管或坯中，从而得到致密的一扎管，它们首先提供给若干个其后的定型 (permanent deformation)、挤压和/或拉伸处理，然后被提

20 供给滚轧和/或锻压处理，直至得到希望的带形结构。例如参见 EP-A-0627773。

在滚轧处理和其后处理之间，所处理的条带被送去进行一或多次热处理，以便由其颗粒前身开始形成超导陶瓷材料，最重要的是它的融合 (synthesis)，即颗粒状超导体的颗粒相互“焊接”。

25 高温超导体条带相当脆，在 77°K 工作温度和室温中都是如此，而且不适于承受机械应力，特别是张应力。事实上，除了实际的机械断裂外，超过给定的张力变形阈值会不可逆转地危害材料的超导特性。所以，把这些材料用到电缆中是特别复杂和必须专心致力的。

事实上，制造和安装包含这种材料的电缆涉及若干阶段，这些阶段带来不可避免的机械应力。

30

第一个关键性阶段是根据一种螺旋形安排把若干个条带缠绕在一个柔性筒状支持物上，直至得到所希望的超导材料部分。缠绕和拉动都在条带中造成拉伸、弯曲和扭转变形。所造成的加到超导材料上的应力主要是张应力。此外，这样形成的导体（支持物加上超导材料）被热和电绝缘手段包围，在这些操作过程中导体被拉伸和弯曲，这在超导条带中引入了更多的应力。

第二个关键阶段涉及电缆安装。电缆的确是在室温下安装的，从而造成附加的张应力和弯曲应力。机械连接（电缆头锁住）、电连接和液路连接（用于液氮）是在室温下进行的。在完成安装后，通过加入液氮使电缆进入其工作温度，在这一冷却过程中，每个电缆部件受到源于热作用的机械应力，这些应力因其构成材料热膨胀系数的不同而不同，还受到其他部件的特性造成的应力。

特别是，支持物和超导条带间的膨胀系数不同会在超导条带中造成应力，从而在超导材料中造成应力。事实上，捆绑在不大能收缩的支持物上的超导材料如果不能自由收缩，则在超导材料中便产生张应变。这种张应变加到由于缠绕业已存在的那些应变上。

为减小张应变，已经建议所用支持物由膨胀系数高于超导材料的材料构成[超导材料膨胀系数通常为 $(10-20) \times 10^{-6}/K$]，即在至少 $75 \times 10^{-6}/K$ 的量级。这种材料将不是金属，因为没有任何金属能有此值，而只能是聚材料，如特氟隆（teflon[®]）、聚乙烯及其衍生物。

然而，已经发现，旨在通过适当减小支持物直径来减小对条带的热机械应力的上述解决办法表现出一些重要的缺点。

特别是，导体（支持物加超导材料）热收缩的不可避免的高值引起导体本身和周围绝缘手段（热的和/或电的绝缘）之间形成宽的径向中空空间。这一中空空间可能由于绝缘体的变形或断裂引起电的不便性，和/或机械不便性，即导体没有附着力、错位和滑动。

此外，所述聚合物材料差的机械特性不允许它在电缆制造和安装阶段适当地保护超导材料：由于这些材料的变形能力高，加到导体上的任何应变都的确也能在超导材料中造成显著的形变。

发明内容

所以，按照本发明的第一方面涉及一种高温超导电缆，它含有一管状支持物，和多个有超导材料被封闭在一金属外皮（例如银或具有镁和/或铝和/或镍的银基合金）中的超导条带，所述条带被螺旋式缠绕在支持物上，从而形成一个电绝缘的、热绝缘的和被冷却的超导层，其特征
5 在于该超导条带具有大于3%的最大拉伸形变（tensile deformation），并且这些超导条带包含至少一个与金属外皮连接的金属条（或带或薄层）。

上述值打算归因于上文描述的制造和安装工艺，即：在室温下的缠绕和安装，然后冷却到大约77°K的工作温度。这也适用于形变值，它
10 将在下文中给出。

这样，增大了承受张应力的能力。已经观察到，可被超导材料安全承受的拉伸形变可以是最大为3%左右；这一数值考虑了超导材料已经承受了约1-1.5%的压缩形变的事实，这是由于条带制造阶段超导材料相对于金属外皮的差值热收缩造成的。

多亏了本发明的金属条，不仅已观察到在同样外加应变下的较小形变，而且观察到特别改善的拉伸形变抵抗力；已经实际达到了拉长值约5.5%左右而不发生任何损坏。这一效果被认为是由于应变在超导材料中的更均匀分布，这允许更好地利用所述超导材料的机械特性。
15

根据每一具体情况，只能提供一个金属条与金属外皮耦合，或者两
20 金属条位于条带的相对两侧。

金属条与金属外皮的耦合最好是借助熔焊、钎焊或粘接。

该金属条最好由具有低电导率的非磁化不锈钢或青铜或铝制成。

电缆的管状支持物最好由金属制成。较大的承受张应力的能力的确允许使用由金属而不是由聚合物材料制成的支持物，如在下文中将更好地
25 予以解释的那样。

各种类型的金属可用于支持物；特别是对具有很高电流的应用，采用非磁化钢，最好是不锈钢。或者，也可使用铜或铝。

管状支持物的结构可以是连续的，或者是平滑的，或者是有波纹的。或者，该管状支持物可以有由螺旋缠绕的金属条带构成的结构，或者可
30 以有所谓瓦式结构，即螺旋形连接相邻扇面。

按照第二方面，本发明涉及制造高温超导电缆的工艺流程，其包括下列步骤：

- 提供一管状支持物；
 - 把超导材料封闭在一金属外皮中，从而形成超导条带；
 - 5 - 把多个超导条带螺旋式缠绕在支持物上，从而形成至少一个超导层；
 - 使超导层电绝缘；
 - 使超导层热绝缘；
 - 提供当电缆在使用时能把超导层冷却到一预定工作温度之下的可能性，其特征在于：
 - 10 - 使至少一个金属条与超导条带的金属外皮耦合，
 - 控制超导条带的最大拉伸形变，使其大于 3‰。
- 这一工艺流程允许根据本发明的第一方面制造电缆。

附图说明

15 根据本发明的电缆及其制造过程的其他特点和优点，从下文参照附图对最佳实施例的描述中将会更加清楚。在所述附图中：

图 1 是根据本发明的高温超导电缆示意图，其部件被部分地移走。

图 2 是图 1 电缆中所用高温超导条带的截面示意图。

具体实施方式

20 参见图 1，1 从总体上代表一个所谓同轴型单相（phase）超导电缆 1。该电缆 1 包含一全体由 2 表示的超导核心，其含有至少一个导体部件 3；所示实例涉及（根据同一申请人的欧洲专利申请 96203551.5 号）的电缆中提供了四个导体部件，由 3^I 、 3^{II} 、 3^{III} 、 3^{IV} 表示，装在一个管状外罩 9 中，最好是宽松地装入，管状外罩例如由金属构成，诸如钢、

25 铝等。

每个导体部件 3 包含一对同轴导体，分别为相 4 和中性线 5，每个包括至少一层超导材料。

在所述实例中，超导材料被包含在多个重叠的超导条带 20 中，它们以足够低的缠绕角 α 螺旋缠绕在各自的管状支持物 6 和（可能还有）7

30 上；如果该管状支持物是金属的，角 α 最好小于 40° ，这在下文中将予以

说明。

同轴的相 4 和中性线 5 的导体由夹在中间的绝缘材料层 8 使其彼此绝缘。

5 电缆 1 还包含适当的手段把超导核心 3 冷却到适当低于所选超导材料临界温度的温度，在图 1 电缆中的超导材料是所谓“高温型”超导材料。

前述手段包含适当的、公知的、因而没有表示出来的泵装置，它的目的是向每个导体部件 3 的内部以及这种部件和管状外罩 9 之间的空隙中馈送适当的冷却液体，例如温度在 65° 至 90°K 的液氮。

10 为尽可能地减少向环境的热扩散，超导核心 2 被封闭在一容器结构或低温恒温箱 10 中，10 中含有例如由多个重叠层和至少一个保护壳构成的热绝缘体。

在例如 IEEE 电力输送学报第 7 卷第 4 期（1992 年 10 月）第 1745 - 1753 页上的文章中描述了在本领域中公知的低温恒温箱。

15 更具体地说，在所述示例中，低温恒温箱 10 包含一绝缘材料层 11，例如由表面敷以金属的塑料材料（例如聚酯树脂）构成的若干条带（几十个）所组成，在本领域中称作“超级热绝缘体”，这些条带宽松地缠绕，可能要借助放在中间的隔离层 13。

20 这种条带被放在环状中空空间 12 中，被一管状部件 14 限定，其中由公知的装置保持大约 10^{-2}N/m^2 的真空。

金属管状部件 14 适于给这环状中空空间 12 以所希望的不可渗透性，并由一外壳 15 罩住，该外壳由例如聚乙烯构成。

金属管状部件 14 最好由钢、铜、铝等构成的条带缠绕成管状并纵向焊接而成、或者由挤压成形的管子等构成。

25 如果需要使电缆具有柔性，部件 14 可做成带波纹的。

除了所描述的部件外，还可以有电缆牵引部件，根据电缆的结构和使用要求轴线放置或在外围放置，以保证加到超导部件 3 上的机械应力限度；这种牵引部件（图中未画出）可以根据本领域公知的技术，使用放在外围的金属铠甲，例如用绳子捆起的钢丝，或者用一或多个轴向金属绳，或者用介电材料铠装纤维，例如芳族聚酰胺纤维。

30

最好是管状支持物 6 和 7 由非磁化的不锈钢制成，可以有连续的或者平滑或者波纹状的结构；或者，管状支持物 6 和 7 可以由螺旋缠绕的钢带或由瓦式结构来实现。不同于钢的材料也可以使用，例如铜或铝。

如图 2 所示，每个超导条带 20 含有超导材料 23、在其中封闭超导材料 23 的金属外皮 24（最好由银或带有镁、铝或镍的银合金制成）、以及至少一个与外皮 24 耦合的金属条（或带或薄层）25。特别是，外皮 24 有一基本上为矩形的扁平截面，有两个长边 26 和两个短边 27；金属条 25 也有一基本上为矩形的扁平截面，其两个长边 28 的长度几乎等于外皮 24 的长边 26 的长度。带 25 通过熔焊、钎焊或粘接与外皮 24 连在一起。应该指出，可能有两个金属条 25，或者相等或者不等，固定在外皮 24 的相对部分。

实例

为实践本发明，已实现了一些电缆，它们具有如下特性：

支持物：

15 金属或聚合物

缠绕直径（支持物的外直径）：

40mm

角 α ：

10 - 45°

20 超导条带厚度：

0.2mm

超导条带宽度：

4mm

缠绕过程中在单个条带上的拉力：

25 10N

工作温度：

77°K

以闭锁头冷却（温度跳跃等于 220°K）

超导条带的热胀系数：

30 $18.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$

聚合物支持物的热胀系数:

$$80 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$$

金属支持物的热胀系数:

$$15 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5 超导材料上的形变效应已予以考虑,有由于缠绕几何形状(这取决于加到条带上的弯曲,所以随角 α 的增大而增大)造成的,有由于缠绕操作过程中的拉伸(恒定的)造成的,还有由于热变化效应由闭锁电缆头造成的(它们随角 α 的增大而减小,直至角 α 足够大时它们可能会变为负值)。在表中,正数用于指示拉伸形变,负数指示压缩形变。

10 表中显示出最大可承受拉伸形变等于 3‰的传统超导条带的可行性以及根据本发明最大可承受拉伸形变等于 5.5‰的超导条件的可行性(假定两个条 25 沿截面两个长边放置,厚度为 0.045mm、长度为 3.8mm,由不锈钢制成,由锡钎焊固定在条的外皮 24 上),所以有 2.5‰的改善。在后一种情况下,假定(如前文指出并经实践证实的那样)未加筋的超
15 导条带能承受 3‰的拉伸形变。加双下划线的值指出 3‰限已被超出。

表 1 概括了使用聚合物支持物的情况,表 2 是关于金属支持物的情况。

该实例表明,在一个具体情况下,通常本发明允许更大的设计自由
20 度,诸如关于缠绕角、支持物直径、缠绕拉力值、以及在一定程度上对支持物所用材料的选择。

使用金属作为支持物的可能性是特别有利的,因为这种支持物除了使电缆有更大的坚固性从而更好地保护超导材料外,最重要的是允许防止现有技术中上述聚合物支持物的那些缺点;这意味着在工作温度下在导体和周围层之间没有由于热胀系数不同造成的危险的中空空间。如已
25 看到的那样,因为在电缆中导体外部各层主要是金属,使用的金属支持物使膨胀系数减至最小,所以显著地减小了由于中空空间造成的不便。

此外,金属支持物赋予导体以更大的机械抵抗力,这里把导体理解为支持物和缠绕在其上面的超导材料的总体。因此,在导体上的可能的机械应力在很大程度上不会传播到超导条带(在聚合物支持物的情况
30 中会发生,因为聚合物支持物有高度变形能力),而是几乎完全由支持物

本身承受。

还有，增大超导材料缠绕拉力的可能性也是很重要的好处。事实上，导体缠绕的致密程度以及因此造成的它的稳定性，都取决于所述拉力。

概括地说，本发明允许实现不那么专用的而更有抵抗性的超导电
5 缆。

表 1. 聚合物支持物

缠绕角	几何缠绕形变 ‰	拉伸形变 ‰	热形变 ‰	总形变 ‰	传统超导条 带的可行性	最少必须改善 ‰	改进的超导 条带的可行 性
10	0.3	0.25	3.5	4.05	否	1.05	是
25	1.4	0.25	0.93	2.58	是	-	是
28.7	1.75	0.25	0	2	是	-	是
45	3.4	0.25	-4	(-0.35) ¹	否	0.4	是

注 1: 对于传统的超导条带, 室温下的微小几何形变足以不可逆地损坏条带本身。所以, -0.35 值只对于改进的超导条带才有意义。

表 2. 金属支持物

缠绕角	几何缠绕形变 ‰	拉伸形变 ‰	热形变 ‰	总形变 ‰	传统超导条 带的可行性	最少必须改善 ‰	改进的超导条 带的可行性
10	0.3	0.25	4	4.55	否	1.55	是
25	1.4	0.25	3.5	5.15	否	2.15	是
28.7	1.75	0.25	3.3	5.3	否	2.3	是
45	3.4	0.25	2.42	6.07	否	3.07	否

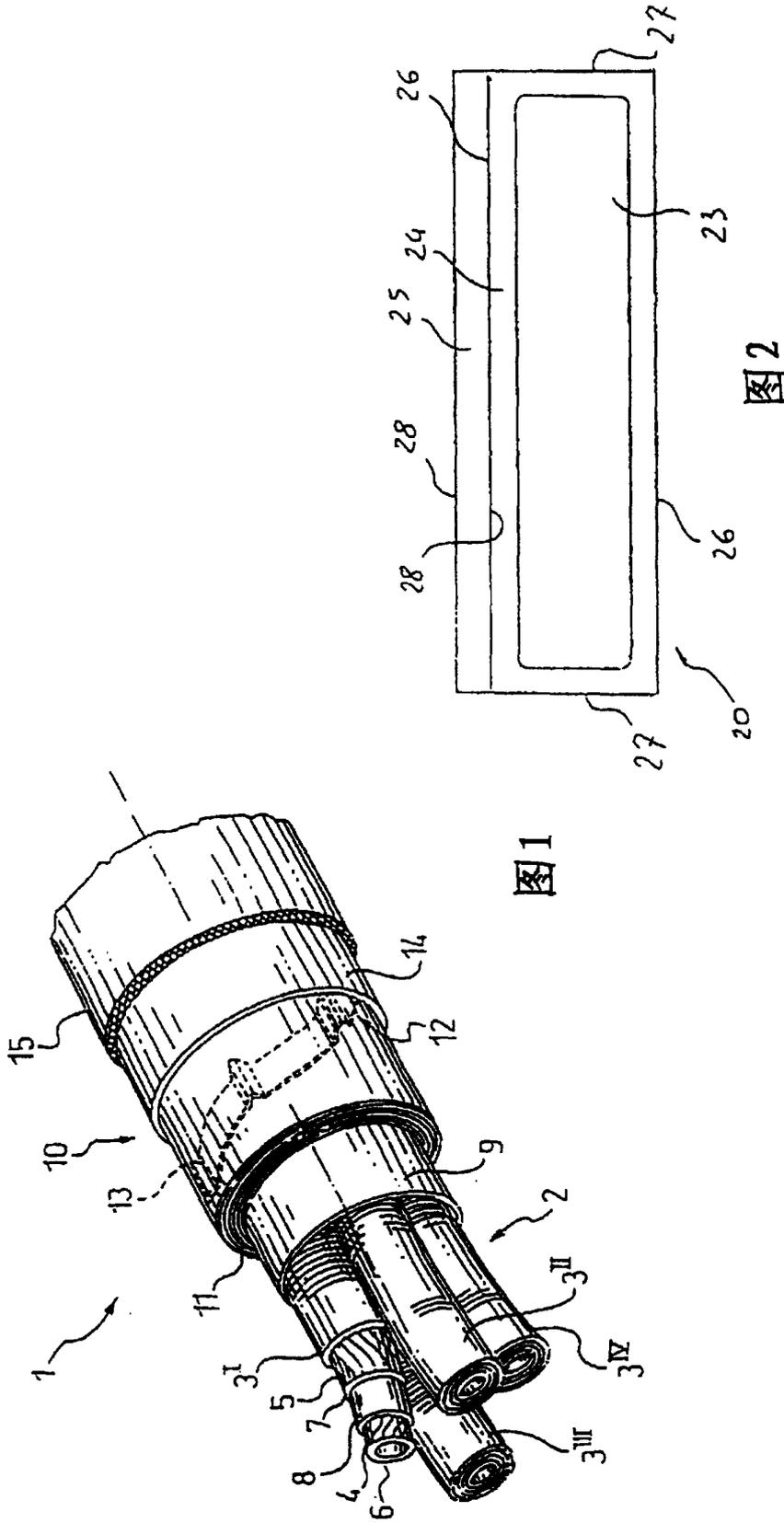


图1

图2