

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
C03B 37/07 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200780014249.6

[43] 公开日 2009 年 5 月 6 日

[11] 公开号 CN 101426743A

[22] 申请日 2007.2.20

[21] 申请号 200780014249.6

[30] 优先权

[32] 2006.3.1 [33] US [31] 11/366,654

[86] 国际申请 PCT/US2007/004532 2007.2.20

[87] 国际公布 WO2007/106305 英 2007.9.20

[85] 进入国家阶段日期 2008.10.20

[71] 申请人 康宁股份有限公司

地址 美国纽约州

[72] 发明人 M·T·加拉赫 D·W·霍托夫
J·E·姆卡蒂 N·文卡特拉马

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司
代理人 沙永生

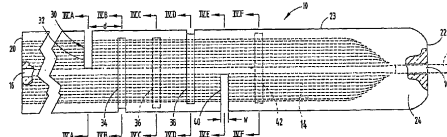
权利要求书 3 页 说明书 7 页 附图 3 页

[54] 发明名称

光纤制造期间进行光纤预制件内双重压力控制的方法

[57] 摘要

一种制造光子晶体光纤或光子带隙光纤的方法，该方法包括提供预制件，该预制件包含多个在外径上的孔，所述孔从预制件的第一端延伸至其第二端，以及在该预制件内形成至少一个向内径向延伸的细槽，使该细槽与至少一部分的孔相交，其中该细槽与至少一个孔不相交。该方法还包括通过向细槽引入第一压力，在与所述细槽相交的孔中形成第一压力，通过向不与细槽相交的至少一个孔的端部引入第二压力，在不与细槽相交的至少一个孔中形成第二压力。该方法还包括在独立控制第一压力和第二压力的同时将预制件拉制成纤维。



1.一种制造光子晶体光纤或光子带隙光纤(或具有中心线孔和在该中心线孔外部的多个孔)的方法,该方法包括:

提供包括多个孔和外径的预制件,所述孔从该预制件的第一端延伸至其第二端;

在该预制件内形成至少一个向内径向延伸的细槽,使至少一个细槽与至少一部分的孔相交,其中,至少一个细槽与至少一个孔不相交;

通过在至少一个细槽中引入第一压力,在与至少一个细槽相交的孔中形成第一压力;

通过向与至少一个细槽不相交的至少一个孔中引入第二压力,在与至少一个细槽不相交的至少一个孔中形成第二压力;和

在独立控制第一压力和第二压力的同时将预制件拉制成纤维。

2.如权利要求1所述的方法,其特征在于,将预制件拉制为纤维的步骤包括独立控制第一压力和第二压力,使在所述拉制步骤的至少一部分时间内第二压力不同于第一压力。

3.如权利要求1所述的方法,其特征在于,形成至少一个细槽的步骤包括形成至少两个细槽,各细槽与预制件的外径在约 $30-180^\circ$ 范围的弧相交。

4.如权利要求3所述的方法,其特征在于,形成至少两个细槽的步骤包括形成多个细槽,所述细槽与预制件的外径在约 $70-180^\circ$ 范围的弧相交。

5.如权利要求4所述的方法,其特征在于,形成至少两个细槽的步骤包括形成多个细槽,所述细槽与预制件的外径在约 $170-180^\circ$ 范围的弧相交。

6.如权利要求1所述的方法,其特征在于,形成至少一个细槽的步骤包括形成六个细槽,各细槽与预制件的外径在约 $170-180^\circ$ 范围的弧相交,各细槽限定一个起点,所述形成细槽的步骤包括形成细槽,使六个细槽中的第二细槽的起点距第一细槽的起点偏移约 120° ,使六个细槽中的第三细槽的起点距第二细槽的起点偏移约 120° ,使六个细槽中的第四细槽的起点距第三细槽的起点偏移约 180° ,使六个细槽中的第五细槽的起点距第四细槽的起点偏移约 120° ,使六个细槽中的第六细槽的起点距第五细槽的起点偏移约 120° 。

7.如权利要求1所述的方法,其特征在于,该方法还包括在所述形成至少一个径向延伸的细槽步骤之后但在所述形成第一压力步骤之前,对至少一个细

槽进行足以减少所述细槽中的微裂纹的热处理步骤。

8.如权利要求1所述的方法，其特征在于，形成至少一个细槽的步骤包括形成至少两个细槽，各细槽具有中心线，各对相邻细槽的中心线相互间隔的距离大于约1毫米。

9.如权利要求1所述的方法，其特征在于，该方法还包括：

在形成第二压力之前，通过对预制件的第一端加热和形变，将在预制件的第一端的至少一部分孔封闭。

10.如权利要求9所述的方法，其特征在于，该方法还包括：

在对预制件的第一端的至少一部分孔进行封闭的同时使气体从预制件中至少一个孔通过，因而防止预制件中至少一个接受所述气体的孔被封闭。

11.如权利要求1所述的方法，其特征在于，该方法还包括在对预制件的第一端的至少一部分孔进行封闭的同时将栓体插入该预制件的至少一个孔中，因而防止至少一个孔被封闭，然后除去该栓体。

12.如权利要求10所述的方法，其特征在于，该方法还包括：

将第一管固定到预制件的第一端，使第一管与预制件第一端未封闭的孔气动连通，其中，第二压力通过第一管与预制件第一端未封闭的孔连通。

13.如权利要求12所述的方法，其特征在于，该方法还包括：

提供第二管，第二管将预制件的至少一部分封装在其内；和

将第二管固定到预制件的外径，使第二管与至少一个细槽气动连通，其中第一压力通过第二管与预制件中的至少一个细槽连通。

14.如权利要求1所述的方法，其特征在于，该方法还包括：

提供管，该管将预制件的至少一部分封装在其内；和

将该管固定到预制件的外径，使该管与至少一个细槽气动连通，其中第一压力通过该管与预制件中的至少一个细槽连通。

15.一种制造光子晶体光纤或光子带隙光纤的方法，该方法包括：

提供多个长玻璃管，各玻璃管具有纵向轴、第一端和第二端，至少部分为毛细管的玻璃管各自具有平行于该玻璃管纵向轴的孔，所述孔从玻璃管的第一端至第二端；

将所述玻璃管形成堆叠体，玻璃管排列成各玻璃管的纵向轴基本上相互平行；

并对该堆叠体加热和再拉制，形成预制件，该预制件具有第一端和第二端；

通过加热和形变，对在预制件第一端的至少一部分孔进行封闭；

在预制件内形成多个向内径向延伸且纵向间隔的细槽，使各细槽与至少一部分的孔相交，其中所述细槽不与所有孔都相交；

将第一管固定于预制件的第一端，使第一管与预制件中不与细槽相交的至少一部分的孔气动连通；

将第二管固定于预制件的外径周围，使第二管与细槽气动连通；

通过第二管向细槽引入第一压力，在与细槽相交的孔中形成第一压力；

通过第一管引入第二压力，在不与细槽相交的玻璃管的孔中形成第二压力；和

在独立控制第一压力和第二压力的同时减小预制件的直径。

16.如权利要求 15 所述的方法，其特征在于，减小直径的步骤包括将预制件拉制为纤维。

17.如权利要求 15 所述的方法，其特征在于，将预制件拉制为纤维的步骤包括独立控制第一压力和第二压力，使在所述拉制步骤的至少一部分时间内第二压力不同于第一压力。

18.如权利要求 15 所述的方法，其特征在于，该方法还包括：

在对预制件的第一端的至少一部分孔进行封闭的同时使气体从预制件中至少一个孔通过，因而防止预制件的至少一部分玻璃管中的孔被封闭。

19.如权利要求 15 所述的方法，其特征在于，形成细槽的步骤包括形成多个细槽，所述细槽与预制件的外径在约 170-180° 范围的弧相交。

光纤制造期间进行光纤预制件内双重压力控制的方法

发明背景

发明领域

本发明涉及制造光子晶体光纤或光子带隙纤维的方法，具体地，涉及在将预制件拉制成光纤时独立控制预制件内多个纵向延伸孔内的压力的方法。

技术背景

光纤能用于各种领域，包括电讯，激光机加工和焊接，激光束和能量传递，光纤激光器等。通常，纤维是由固体透明材料如玻璃构造，沿其长度具有类似的截面构形。这类纤维的另一种设计包括具有沿纤维轴纵向分布的孔或空隙的微结构光纤。这些孔一般含有空气或惰性气体，但是也可含有其他材料。

可以设计微结构光纤来达到各种性质的最佳化，这种微结构光纤能用于各种应用。例如，微结构光纤可以包含固体玻璃芯体和以一定方式设置在芯体周围的覆层区域中的许多孔，所述方式为，将孔的位置和尺寸设计为能获得在大的负值和大的正值范围之间的色散值。这些特定纤维能用于要求色散补偿的应用。固体芯体的微结构光纤还可以设计成能在宽波长范围内提供单模波导。大多数固体芯体的微结构光纤通过全内反射机理来引导光，其中，相关孔的低折射率(index)作用是降低位于所述孔中的覆层区域的折射率。

微结构光纤的另一种形式包括光子带隙纤维，这种纤维通过一种根本不同于全内反射的机理来引导光。光子带隙纤维具有在该纤维的覆层中形成的光子晶体结构，其中光子晶体结构包含呈周期性阵列的孔。纤维的芯体是由光子晶体结构覆层中的缺陷形成的。例如，所述缺陷包括的孔的尺寸和/或形状都明显不同于光子晶体结构的孔。通常，光子带隙纤维构建成具有被覆层结构包围的空心气体芯体，该覆层结构由玻璃内的周期性气孔阵列组成。

微结构光纤的光子晶体结构具有一定范围的频率，称作带隙，在该范围内，光不能在光子晶体结构中传播。在应用中，将频率在带隙内的光引入纤维的芯体，所述引入的光不在光子晶体覆层内传播，因此被限定在芯体内。光子带隙纤维的芯体可以由大于光子晶体结构的孔形成。空心芯体光子带隙技术的关键

方面是制造具有气体芯体的纤维，该芯体具有低的非线性和低的衰减。具体地，将光导入气态介质，因为吸收和与玻璃材料相关的瑞利色散而降低损失。光被导入气态介质中时，可以构造空心芯体的纤维，以提供极低的非线性。此外，空心芯体的微结构光纤特别适合用于引导宽波长范围的光。这类光纤的优点包括在 UV 至 IR 范围波长的高能传输，如焊接、光刻、切削工业等中的应用，以及用于要求无线电通讯信号的超低损失传输的应用。

微结构光纤可以采用与全玻璃光纤大致相似的方法制造。形成具有所需的孔排列的预制件，然后利用加热和张力的拉制成纤维。在拉制过程中，依据材料的粘度以及孔内的表面张力，孔的尺寸、形状和排列明显变形。这种变形尤其损害空心芯体的光子带隙纤维，因为带隙对光子晶体结构的特征尺寸（如孔尺寸、间距和对称性）的变化非常敏感。这种变形还影响到芯体/覆层边界的几何形状，而又会对导模的衰减行为有显著影响。

因此，用来制造空心芯体微结构光纤的制造方法很难再现，且相当昂贵和耗时。如技术人员会理解的，用于制造微结构光纤的预制件的孔可以很小(如，直径小于几百微米)，而将微结构光纤预制件的许多孔与不同压力系统相连并不是一个简单的事项。需要能够改进对纤维几何形状的控制的方法，并且该方法能够实施，稳健 **robust** 和可重复，从而减少与制造空心芯体微结构光纤相关的总体时间、成本和复杂性。

发明概述

本发明一个方面涉及制造光子晶体光纤的方法，该方法包括提供预制件，该预制件包含多个孔和外径，所述孔从预制件的第一端延伸至第二端，以及在该预制件内形成至少一个向内径向延伸的细槽，使至少一个细槽与至少一部分的孔相交，其中该细槽与至少一个孔不相交。该方法还包括通过向至少一个细槽引入第一压力，在与所述细槽相交的孔中形成第一压力，通过向与至少一个细槽不相交的至少一个孔的端部引入第二压力，在与至少一个细槽不相交的至少一个孔中形成第二压力。该方法还包括在独立控制第一压力和第二压力的同时将预制件拉制成纤维。

本发明的另一个方面涉及制造光子晶体光纤或光子带隙光纤的方法，该方法包括提供多个长玻璃管，各玻璃管具有纵向轴，第一端和第二端，至少部分为毛细管的玻璃管各自具有平行于该玻璃管纵向轴的孔，所述孔从玻璃管的第

一端至第二端，将所述玻璃管形成堆叠体，玻璃管排列成各玻璃管的纵向轴基本上相互平行，并对该堆叠体加热和减小直径(即，再拉制)，形成预制件，其中该预制件具有第一端和第二端。该方法还包括：通过对预制件的第一端加热和形变，将在预制件的第一端的至少一部分孔封闭，在该预制件内形成多个向内径向延伸并纵向隔开的细槽，使各细槽与一部分的孔相交，因而提供在预制件外径和孔之间的气动连通(**pneumatic communication**)，其中，所述细槽与所有玻璃孔都不相交。该方法还包括：将第一管固定于预制件的第一端，使第一管处于和预制件中不与细槽相交的至少部分孔气动连通，将第二管固定在预制件的外径周围，使第二管与细槽气动连通。该方法还包括：通过第二管向细槽引入第一压力，在与所述细槽相交的孔中形成第一压力，通过第一管引入第二压力，在玻璃管中不与细槽相交的孔中形成第二压力，在独立控制第一压力和第二压力的同时将所述预制件拉制成纤维。这种对第一压力和第二压力的独立控制促进了对孔尺寸、间距、芯体尺寸和芯体形状的密切控制。

本文揭示的本发明方法是能够实施用于制造空心芯体微结构光纤的稳健、可重复方案。这些方法减少了通常与制造空心芯体微结构光纤的方法相关的时间、成本和复杂性，并且特别适合于所提出的用途。

附图简述

图 1 是用于形成空心芯体微结构光纤的预制件的侧视图。

图 2 是该预制件的端视图。

图 3 是该预制件的部分剖面的侧视图，其中，纵向延伸通过该预制件的孔在其一个端部封闭，并以虚线示出可选择的石墨棒。

图 4A 是预制件沿图 3 中 IVA-IVA 线的截面图。

图 4B 是预制件沿图 3 中 IVB-IVB 线的截面图。

图 4C 是预制件沿图 3 中 IVC-IVC 线的截面图。

图 4D 是预制件沿图 3 中 IVD-IVD 线的截面图。

图 4E 是预制件沿图 3 中 IVE-IVE 线的截面图。

图 4F 是预制件沿图 3 中 IVF-IVF 线的截面图。

图 5 是预制件与第一压力管和第二压力管相连时的部分剖面侧视图。

优选实施方式的详细描述

为便于描述的目的，术语“上”，“下”，“右”，“左”，“后”，“前”，“垂直”，“水平”和其衍生词都涉及本发明按附图 1, 3 和 5 中的取向。但是，应理解，本发明可以设想各种可选择的取向和步骤顺序，除非有相反表示。还应理解，在附图中示出并在以下说明书中描述的具体装置和方法是对权利要求书中定义的本发明的概念的示例实施方式。在此，不应认为与本文揭示的实施方式相关的具体尺寸和其他物理特性是限制性的，除非权利要求中有相反表示。

在本发明的一个方面，提供一种用于形成微结构光纤的方法。该方法中，提供具有多个孔和外径的预制件，其中，所述孔从该预制件的第一端延伸至其第二端。在预制件内形成多个向内径向延伸的细槽，使所述细槽与预制件中的许多孔相交，并使细槽不与预制件内的每一个孔相交。然后，通过向所述细槽引入第一压力，在与细槽相交的孔内形成第一压力，同时通过向不与细槽相交的孔的端部引入第二压力，在这些孔中形成第二压力。然后，在独立控制第一压力和第二压力的同时将该预制件拉制成纤维，在拉制纤维期间能够控制孔的尺寸、间距等，如下面详细描述的。

附图标记 10(图 1)一般性表示用于制造光子晶体光纤的光纤预制件。预制件 10 由一束毛细管 12 构成，各毛细管包含一个纵向延伸的孔 14(图 2)。在说明的实例中，各孔 14 是空心的，其中包含气态介质，但是，应注意至少一部分孔中可包含其他折射材料。在说明的实施方式中，毛细管 12 以一定方式排列，从而形成中心定位的、纵向延伸的空心芯体 16，其形状说明了将其与供气管气动连接时的困难。但是，可以采用其他设计，例如，其中的芯体不是中心定位的，或者可以使用多个芯体(可以在纤维中心的周围对称或不对称地排列)。毛细管 12 的多个孔 14 形成对该芯体 16 的有效折射率的覆层区域。在组件中，一束毛细管 12 位于一个大套管或玻璃夹套 18 内。具体地，通过以下方式形成最初的光纤预制件 10，排列玻璃管的堆叠体，其中，至少一部分的玻璃管是毛细管 12，所述毛细管 12 包含孔 14，将所述玻璃管定位于大套管 18 内，并对该组件加热和再拉制(减小其直径)，形成仍保留其中的孔 14 的整合预制件 10。形成预制件 10 后，该预制件限定第一端 22，第二端 20 和外径 23，并具有仍保留在该预制件 10 内的孔 14。应注意，套管 18 的相对尺寸是相对于毛细管 12 的束的放大尺寸，该说明性实例没有按比例示出。

如图3中所示,在预制件10的第二端20,将加压气体如氦气引入芯体16,同时对该预制件10的第一端22加热,使其变形。较好地,加压气体是惰性气体,如氦气、氩气或氮气,或者它们的混合物。对预制件10的第一端22加热,直到该预制件足够热,能够封闭在靠近第一端22的端部区域24内的孔14。在说明性实例中,孔14被封闭,如下面讨论的,使供给预制件10的第一端22的所有气压进入芯体16,但阻止其进入孔14。

或者,可以将例如石墨棒的栓体28插入空心芯体16中,然后对该预制件10的第一端22加热,因而在对端部区域24加热和形变以封闭孔14时,可防止空心芯体16闭合。在封闭孔14后,较好地,将加热的气体如氧气通过预制件10的第二端20引入空心芯体16,因而可以从芯体16内取出石墨棒28。或者,在端部区域24发生形变和冷却后,还可以从外部向该区域施加足够的热量,因而可以去除石墨棒28。

在预制件10内形成多个向内径向延伸的细槽30。在说明性实例中,总共形成6个细槽32,34,36,38,40,42。但是,需要时可以形成更多或更少的细槽。细槽32,34,36,38,40,42各自与许多孔14相交,因而能够与孔14气动连通,如下面所述。应注意,可以形成单一的细槽,以与预制件10的外径23成360°相交,并与预制件10的每个孔14相交。较好地,在预制件10内形成至少两个细槽,使每个细槽与预制件10的外径23在约30-180°范围之内的弧相交。更好地,在预制件10内形成多个细槽30,每个细槽与外径23在约70-180°范围之内的弧相交。例如,在预制件10内可以形成总共6个细槽30,每个细槽各自与外径23的约170°-180°的弧相交,但是,可以使用其他数量的细槽30。

在说明性实例(图4A-4F)中,形成细槽32,34,36,38,40,42,各细槽与外径23在170°-180°之间的弧 α 相交。具体地,形成第一细槽32后,旋转预制件10,从距第一细槽32的起点120°处开始第二细槽。重复这种模式,使第三细槽36的起点距第二细槽34的起点旋转120°,使第四细槽38的起点距第三细槽36的起点旋转180°,第五细槽40的起点距第四细槽38的起点旋转120°,第六细槽42的起点距第五细槽40的起点旋转120°。该实例的细槽30是通过金刚石外壳的切削轮形成的,但是,可以使用适合这种应用的其他方法和装置,包括金刚石外壳的切削线(cutting wire),磨料水射流(abrasive water jet),激光切削,钻孔,火焰加工(flame-working)等。较好地,为了确保适当的

张力和预制件 10 的剪切强度,细槽 32, 34, 36, 38, 40, 42 沿该预制件 10 的长度相互间隔一定的距离,定义为在各对相邻细槽 30 的中心线之间的距离。较好地,该距离 d 在约 1-5 毫米范围。此外,由于类似的原因,各细槽 32, 34, 36, 38, 40, 42 的宽度 w 在约 1-4 毫米范围。预制件 10 中的细槽 32, 34, 36, 38, 40 和 42 可以在形成这些细槽后进行火琢,以消除或减少在预制件 10 中形成细槽期间在所述细槽中产生的微裂纹。

在预制件 10 内形成细槽 30 后,将第一玻璃管 44(图 5)固定到该预制件 10 的第一端 22。具体地,所述第一管 44 包括经火焰加工至预制件 10 的第一端 22 的近端 46,使它们之间有气密性密封。将第一管 44 固定到预制件 10 上,使第一管 44 与空心芯体 16 处于气动连通。第一管 44 的远端 48 与第一压力控制系统(未示出)气动连通。第二玻璃管 52 的近端 50 经火焰加工至预制件 10 的外径 23,使第二管封装至少一部分的预制件。按这种方式,第二管 52 的内部与细槽 30 处于气动连通。较好地,将第二管 52 的一个端部 50 火焰加工至预制件 10 的外径 23。将供应管 55 火焰加工至第二管 52 的外径 57,使供应管 55 通过第二管 52 内的缝隙 59 与该第二管 52 气动连通。供应管 55 与第二压力控制系统(未示出)为气动连通。在说明的实例中,第二管 52 的结构为能在其中容纳预制件 10 的一部分和第一管 44。例如,第一管 44 以可滑动的方式保留在第二管 52 的远端 54 内。或者,可以对第一管 44 进行火焰加工,使该管以固定的方式保留在第二管 52 的远端 54 内。虽然第一管 44 和第二管 52 可以通过火焰加工连接至预制件,但是也可以采用适合于这类应用的其他方法和工艺,如玻璃料,激光焊接,○形环密封,环氧树脂等。

在本领域已知的一种方式中,将预制件 10 从其第二端 20 进行拉制,以减小其直径,优选形成光纤。如果以施加在孔 14 和空心芯体 16 的单一压力对预制件 10(图 3)进行拉制,则微结构可能产生明显的变形。特别是,空心芯体 16 尺寸的变形相对于光子晶体覆层的孔 14 的变形大得多。在本发明的一些实施方式中,即,芯体 16 的直径大于孔 14 的直径的实施方式,可以在芯体 16 内采用小于在孔 14 内所施加压力的压力,以保持芯体 16 相对于孔 14 的相对尺寸。但是,如果芯体直径小于孔 14 的直径,则很可能希望在芯体 16 施加大于孔 14 内的压力。

结果,希望能够独立控制空心芯体 16 和孔 14 中的压力。在拉制纤维时,设定第一压力控制系统的压力不同于第二压力控制系统的压力。例如,技术人

员可以将第一压力控制系统的压力设定为大于第二压力控制系统的压力，以保持空心芯体 16 和孔 14 相互间的相对尺寸，因而避免发生上述变形。在采用两个独立的压力控制系统的情况中，可以设定第一压力控制系统的压力明显不同于第二压力控制系统。通过控制由压力控制系统提供的压力，技术人员可以控制在拉制纤维的预制件 10 的第二端 20 的孔 14 和空心芯体 16 内的各压力。技术人员可以控制芯体 16 和孔 14 内的压力，以扩大、保持或减小拉制期间孔的相对直径。此外，虽然已知在拉制步骤中可使用如氦气、氩气、氮气等的气体，本发明的方法能够使进入芯体 16 和孔 14 的气体相互不同。例如，在纤维拉制操作期间，第一压力(即，与孔 14 接触的压力)可以为约 10-300 托，第二压力(即，与空心芯体 16 接触的压力)可以为约 5-75 托。还应注意，第一压力和第二压力也可以以真空施加。

可以采用反馈控制来控制至少一个压力控制系统的压力。例如，可以监测孔的尺寸，并将这些尺寸和资料用作反馈系统的一部分来控制相对压力。或者，可以将压力监测器与空心系统 16 和/或孔 14 相连，将来自该监测器的压力信息用作该反馈系统的一部分来控制相对压力。

本文揭示的本发明方法是能够实施用于制造空心芯体微结构光纤的稳健、可重复方案。这些方法减少了通常与制造空心芯体微结构光纤的方法相关的时间、成本和复杂性，并且特别适合于所提出的目标。

对本领域的技术人员而言，很清楚可以在不偏离按权利要求书定义的本发明的精神或范围下可以对按本文所述的优选实施方式进行各种修改。因此，本发明意图覆盖本发明的修改和变动，只要这些修改和变动在权利要求书和其等同项的范围之内。

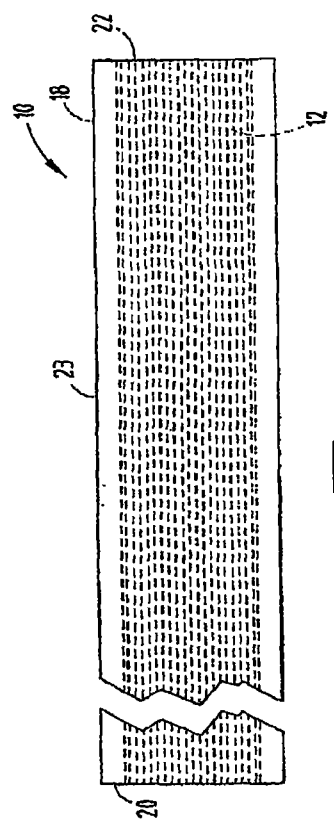
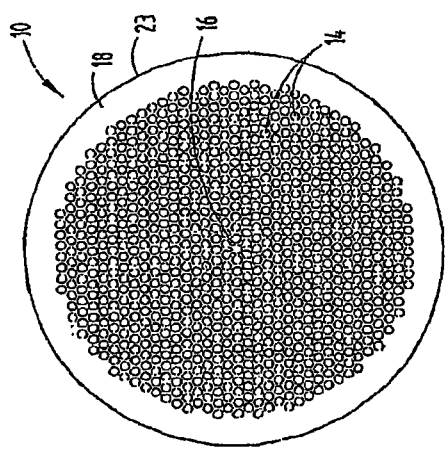


图 1

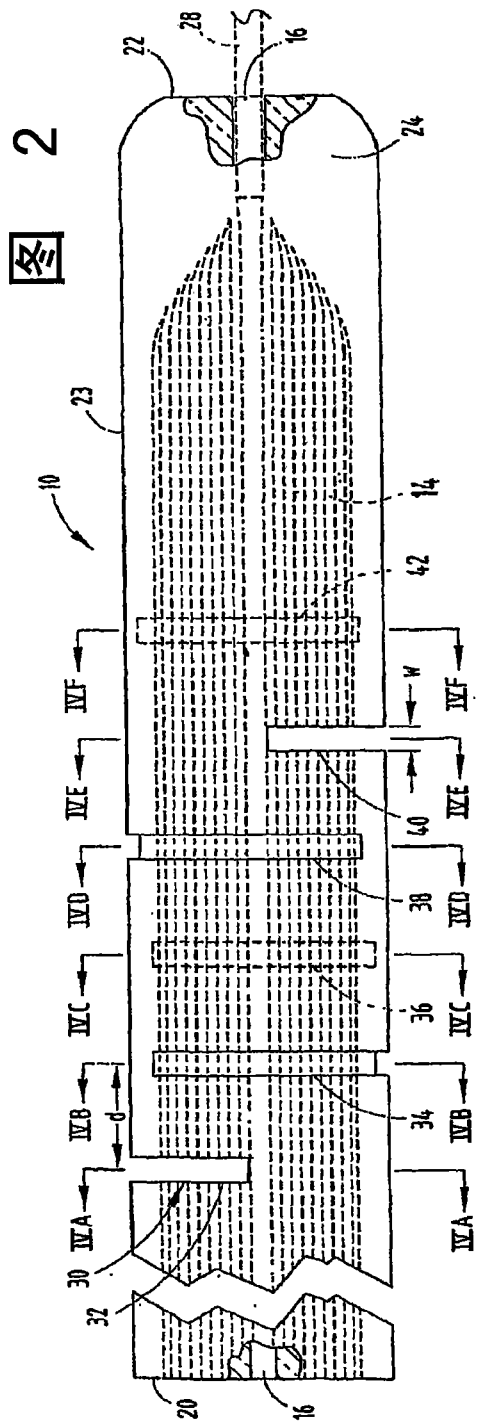
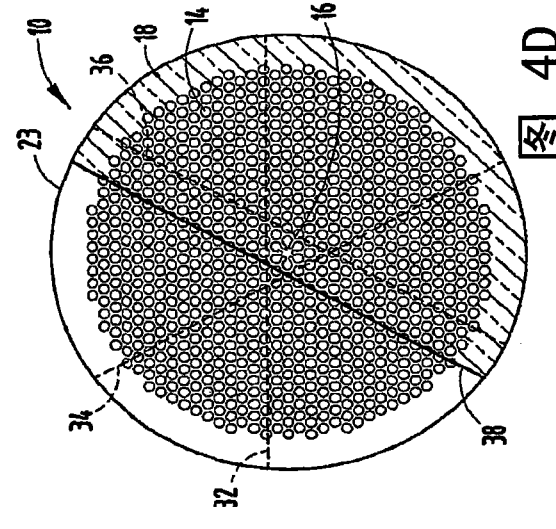
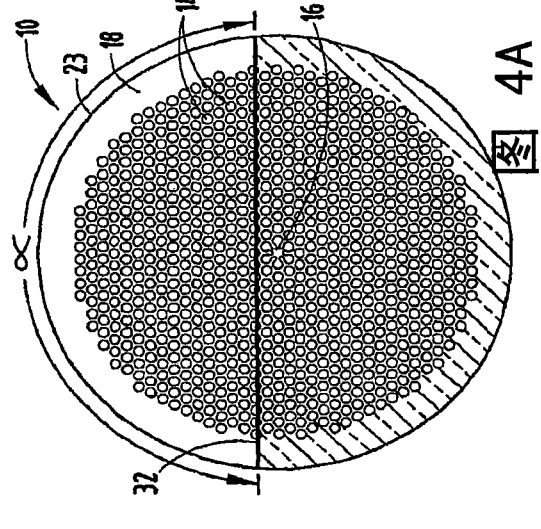
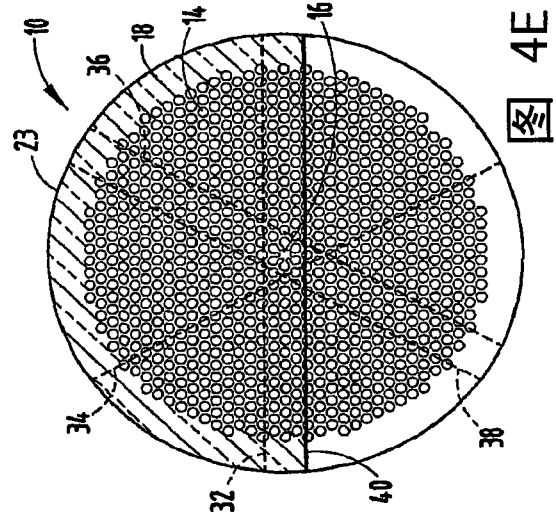
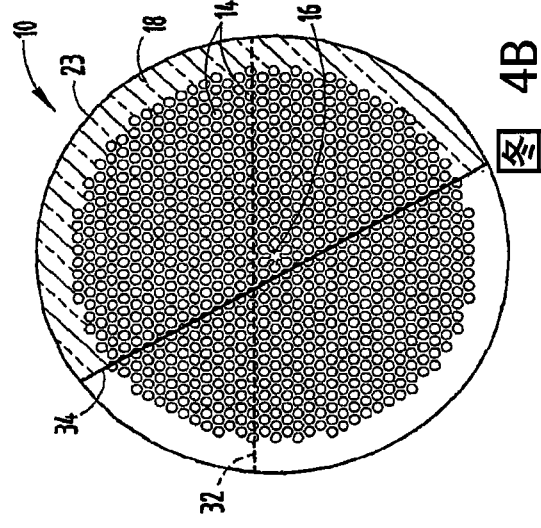
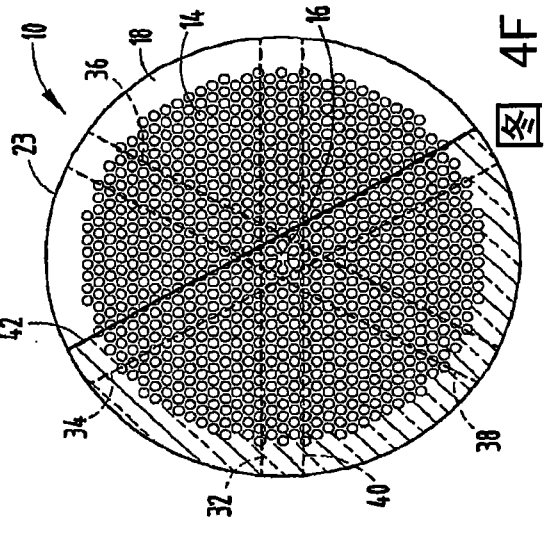
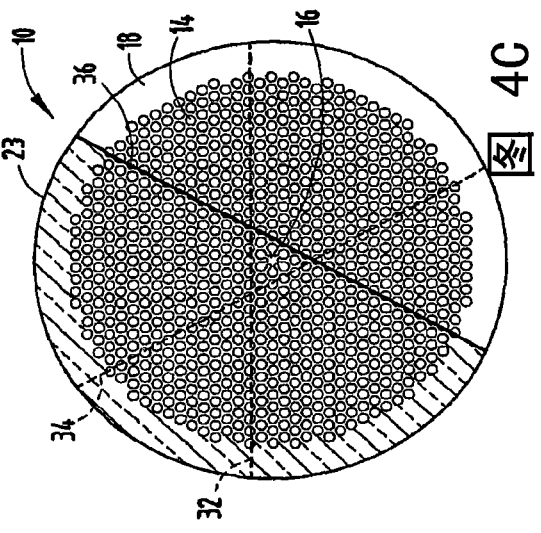


图 2

图 3



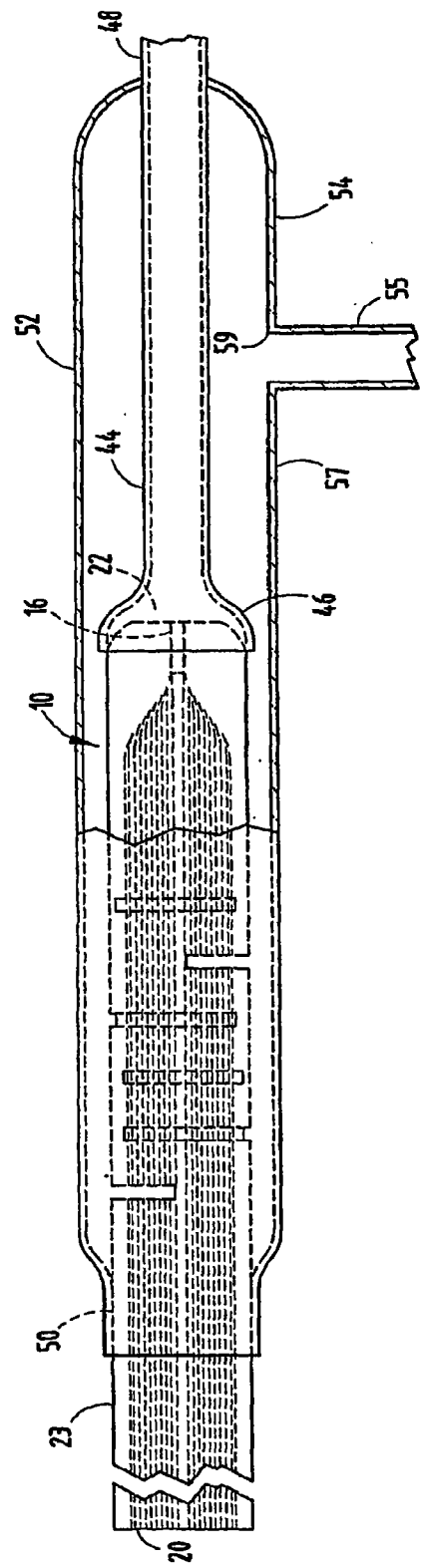


图 5