



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119968585 A

(43) 申请公布日 2025. 05. 09

(21) 申请号 202380062829.1

(22) 申请日 2023.09.12

(30) 优先权数据

2022-157789 2022.09.30 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2025.02.27

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2023/033160 2023.09.12

(87) PCT国际申请的公布数据

W02024/070658 JA 2024.04.04

(71) 申请人 住友电气工业株式会社

地址 日本大阪

(72) 发明人 石川真二 佐藤慎 横本正

(74) 专利代理机构 北京康信知识产权代理有限公司 11240

专利代理师 李丹

(51) Int.Cl.

G02B 6/032 (2006.01)

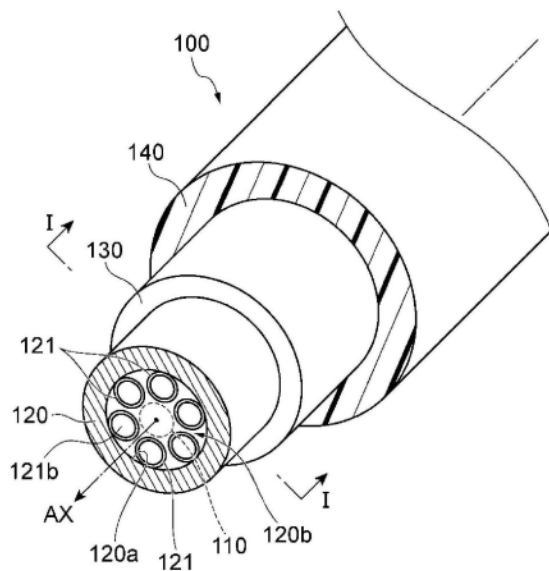
权利要求书1页 说明书10页 附图10页

(54) 发明名称

反谐振空芯光纤

(57) 摘要

本公开的反谐振空芯光纤(100)具备:外侧包层(120),具有沿着光纤中心轴(Ax)延伸的管形状;以及多个内侧包层元件(121),具有管形状,在被外侧包层(120)的内壁面(120a)包围的内部区域(120b),以包围成为芯区域(110)的空间的方式与内壁面(120a)接触配置。另外,在内部区域(120b)的截面中,在包含多个内侧包层元件(121)的内部空间的、除多个内侧包层元件(121)所占的部分区域之外的剩余的区域,填充有在 $1\mu\text{m}$ 以上且 $2\mu\text{m}$ 以下的波段中具有比 H_2 低的光吸收率且具有比Ne小的扩散系数的气体。



1. 一种反谐振空芯光纤,具备:
外侧包层,具有沿着光纤中心轴延伸的管形状;以及
多个内侧包层元件,具有管形状,在被所述外侧包层的内壁面包围的内部区域,以包围成为芯区域的空間的方式与所述内壁面接触配置,
在与所述光纤中心轴正交的所述内部区域的截面中,在包含所述多个内侧包层元件的内部空间的、除所述多个内侧包层元件所占的部分区域之外的剩余的区域,填充有在 $1\mu\text{m}$ 以上且 $2\mu\text{m}$ 以下的波段中具有比 H_2 低的光吸收率且具有比 Ne 小的扩散系数的气体。
2. 根据权利要求1所述的反谐振空芯光纤,其中,
所述反谐振空芯光纤具有 1km 以上的长度。
3. 根据权利要求1或2所述的反谐振空芯光纤,其中,
在所述截面上,所述多个内侧包层元件的总截面积相对于所述内部区域的截面积之比为 0.55 以上。
4. 根据权利要求3所述的反谐振空芯光纤,其中,
所述多个内侧包层元件的个数为 3 个以上且 6 个以下。
5. 根据权利要求3或4所述的反谐振空芯光纤,其中,
所述内部区域的直径为 $80\mu\text{m}$ 以上。
6. 根据权利要求1至5中任一项所述的反谐振空芯光纤,其中,
所述气体包含 Ar 、 Kr 、 Xe 、 N_2 、 O_2 、 CF_4 、 C_2F_6 、 CCl_2F_2 、 CClF_3 之中的至少一种。
7. 根据权利要求1至6中任一项所述的反谐振空芯光纤,其中,
所述气体的压力在摄氏 25 度的温度下大于 0.101MPa 且小于 70MPa 。

反谐振空芯光纤

技术领域

[0001] 本公开涉及反谐振空芯光纤。本申请要求基于2022年9月30日申请的日本申请第2022-157789号的优先权,沿用所述日本申请中记载的全部记载内容。

背景技术

[0002] 作为以往以来研究的空芯光纤,例如已知有光子晶体空芯光纤(Photonic Crystal Hollow-Core Fiber)和反谐振空芯光纤(Anti-Resonant Hollow-Core Fiber)。空芯光纤应用于基于分光计测的气体成分测定等。空芯光纤是通过在加热捆扎有多个管的母材的同时进行拉丝而制造的。在通过该制造方法得到的空芯光纤的空孔中,进入了拉丝时的压力控制用气体、大气等。

[0003] 光子晶体空芯光纤例如是如非专利文献1所公开那样利用光子带隙控制光限制的空芯光纤。在光子晶体空芯光纤的包层内,多个空孔以构成波长级的周期结构的方式配置。成为被多个空孔包围的芯区域的空间的截面积小至几十 μm^2 到 $100\mu\text{m}^2$ 。因此,抑制了向该空孔内注入高压气体。

[0004] 在反谐振空芯光纤中,例如像专利文献1和非专利文献2所公开的那样,外侧包层的内部区域具有沿着光纤中心轴连续的截面结构。其截面积为几千 μm^2 。因此,与上述的光子晶体空芯光纤相比,能大幅减少从光纤端面注入气体的时间。

[0005] 现有技术文献

[0006] 专利文献

[0007] 专利文献1:日本特表2017-52084号公报

[0008] 非专利文献

[0009] 非专利文献1:O.H.Heckl et al.,“Temporal pulse compression in axenon-filled Kagome-type hollow-core photonics crystal fiber at high average power,”OPTICSEXPRESSION,Vol.19,No.20,26September 2011,p.19142-19148。

[0010] 非专利文献2:GREGORY T.JASION et al.,“Fabrication of tubular anti-resonant hollow core fibers:modelling,draw dynamics and process optimization,”OPTICSEXPRESSION,Vol.27,No.15,22Jul.2019,p.20567-20581。

发明内容

[0011] 本公开的反谐振空芯光纤具备:外侧包层,具有管形状;以及多个内侧包层元件,分别具有管形状。外侧包层的管形状沿着光纤中心轴延伸。多个内侧包层元件分别在与其外侧包层的内壁面接触了的状态下以包围成为芯区域的空間的方式配置。另外,在与光纤中心轴正交的反谐振空芯光纤的截面中,在由外侧包层的内壁面包围的内部区域之中的、包含多个内侧包层元件的内部空间的、除多个内侧包层元件所占的部分区域之外的剩余的区域内,填充有在 $1\mu\text{m}$ 以上且 $2\mu\text{m}$ 以下的波段中具有比 H_2 低的光吸收率且具有比Ne小的扩散系数的气体。

附图说明

- [0012] 图1是示出本公开的反谐振空芯光纤的结构图。
- [0013] 图2是用于将本公开的反谐振空芯光纤的主要部分的截面结构与比较例的光子晶体空芯光纤的对应的主要部分的截面结构一起进行说明的图。
- [0014] 图3是用于说明本公开的反谐振空芯光纤的截面中的面积比的计算的图。
- [0015] 图4是用于说明本公开的反谐振空芯光纤的制造方法之中的拉丝工序的图。
- [0016] 图5是用于说明本公开的反谐振空芯光纤的制造方法之中的气体填充工序的图。
- [0017] 图6是示出作为填充气体的候选的各种气体的扩散系数的分子直径依赖性的表。
- [0018] 图7是示出对于图6所列举的气体之中的几种气体,从对管内径 D 相互不同且管长度 L 为25000m(=25km)的各种玻璃管填充气体的开始到完成为止的渗透时间的计算结果的表。
- [0019] 图8是示出对于图6所列举的气体之中的 CF_4 ,从对管内径 D 相互不同且管长度 L 为25000m的各种玻璃管填充气体的开始到完成为止的渗透时间的计算结果的表。
- [0020] 图9是示出用于得到图7和图8所示的计算结果的实验系统的结构的图和示出计算结果的坐标图。
- [0021] 图10是用于说明图7和图8所列举的气体之中的几种气体的渗透时间的温度依赖性的坐标图。

具体实施方式

- [0022] [本公开要解决的技术问题]
- [0023] 发明人对上述的现有技术进行了研究,结果发现了以下这样的技术问题。即,在上述的现有技术中,无法避免气体从外部向空芯光纤内侵入、填充于空芯光纤的空孔的气体由于扩散导致的消失、或者填充于空芯光纤的空孔的气体向玻璃的侵入。因此,在上述的现有技术中,存在由于填充有气体的空孔中的折射率、进入的气体与玻璃表面的反应所以传输损耗随时间变化这样的技术问题。另外,在上述的现有技术中,由于以利用非线性光学效应或光吸收为前提以及需要庞大的制造时间,所以并未向长条光纤内进行了积极的气体填充。
- [0024] 本公开是为了解决上述这样的技术问题而提出的,其目的在于提供一种与现有技术相比具有用于能够实现长条化和传输损耗的稳定化的结构的反谐振空芯光纤。
- [0025] [本公开的效果]
- [0026] 根据本公开的反谐振空芯光纤,与现有技术相比,能够实现长条化和传输损耗的稳定化。
- [0027] [本公开的实施方式的说明]
- [0028] 首先,分别单独列举本公开的实施方式的内容进行说明。
- [0029] (1) 反谐振空芯光纤具备:外侧包层,具有管形状;以及多个内侧包层元件,分别具有管形状。外侧包层的管形状沿着光纤中心轴延伸。多个内侧包层元件分别在与外侧包层的内壁面接触了的状态下以包围成为芯区域的内部的方式配置在外侧包层内。另外,在与光纤中心轴正交的反谐振空芯光纤的截面中,在由外侧包层的内壁面包围的内部区域之中的、包含多个内侧包层元件的内部空间的、除多个内侧包层元件所占的部分区域之外的剩

余的区域中,填充有在 $1\mu\text{m}$ 以上且 $2\mu\text{m}$ 以下的波段中具有比 H_2 (氢)低的光吸收率且具有比Ne(氖)小的扩散系数的气体。

[0030] 根据本公开的反谐振空芯光纤,在成为芯区域的中空光波导区域填充有在 $1\mu\text{m}$ 以上且 $2\mu\text{m}$ 以下的波段中具有比 H_2 低的光吸收率且具有比Ne小的扩散系数的气体。通过该构成,与现有技术相比,能够抑制传输损耗随时间的变化。而且,在利用非线性光学效应或光吸收的现有的空芯光纤中,未向长条光纤内进行积极的气体填充。相对于此,根据本公开的反谐振空芯光纤,成为上述中空光波导区域的气体填充空间的确保变得容易,并且具有比 H_2 低的光吸收率且比Ne小的扩散系数的气体被选择性地填充到光纤内,因此,能够得到抑制了传输损耗随时间的变化的稳定的光纤空间。其结果是,光纤空间的 1km 以上的长条化也成为可能。特别是,也能够期待通过对外侧包层的内部区域施加1个气压以上的压力并填充气体来抑制由弯曲或侧压引起的光纤的变形的效果。

[0031] (2)也可以是,在上述(1)中,具有 1km 以上的长度。气体被填充后的结果是,能够实现反谐振空芯光纤的长条化。

[0032] (3)也可以是,在上述(1)或(2)中,作为反谐振空芯光纤的截面的面积比,多个内侧包层元件的总截面积相对于内部区域的截面积之比为 0.55 以上。在这种情况下,能够充分地确保气体填充空间。其结果是,能够实现气体填充时间的缩短和反谐振空芯光纤的长条化。

[0033] (4)在上述(3)中,多个内侧包层元件的个数只要是3个以上6个以下即可。若在外侧包层内配置包围芯区域的3个以上的内侧包层元件,则能够发挥光限制效应。另外,通过将内侧包层元件的个数限制在6个以下,能够提高用于在满足了上述面积比的状态下确保充分的气体填充空间的光纤设计的自由度。

[0034] (5)也可以是,在上述(3)或(4)中,内部区域的直径为 $80\mu\text{m}$ 以上。若内部区域的直径为 $80\mu\text{m}$ 以上,则气体的填充时间变短,能够高效地制造。

[0035] (6)也可以是,在上述(1)至上述(5)中任一项中,填充于反谐振空芯光纤内的气体包含Ar(氩)、Kr(氪)、Xe(氙)、 N_2 (氮)、 O_2 (氧)、 CF_4 (四氟甲烷)、 C_2F_6 (六氟乙烷)、 CCl_2F_2 (二氯二氟甲烷)、 CClF_3 (氯三氟甲烷)之中的至少一种。即,在相当于反谐振空芯光纤的内部区域的外侧包层的内部区域中,可以填充在此列举的Ar等一种气体,另外,也可以在内部区域中共存有多种气体。无论通过哪种气体,与以往相比都能够实现传输损耗的稳定化。特别是,在使多种气体共存于外侧包层的内部区域的构成中,能够沿着反谐振空芯光纤的长度方向形成不同的气体的组成分布,能够期待利用沿着长度方向的折射率变化的传输特性的改善等。

[0036] (7)也可以是,在上述(1)至上述(6)中任一项中,填充于反谐振空芯光纤内的气体的压力在摄氏 25 度的温度下大于 0.101MPa 、且小于 70MPa 。能够维持传输损耗随时间的变化得到了抑制的稳定的传输特性。

[0037] [本公开的实施方式的详细情况]

[0038] 以下,参照附图详细地说明本公开的反谐振空芯光纤的具体例。需要说明的是,本公开不限于这些例示,旨在包含由权利要求书示出以及与权利要求书同等的含义和范围内的全部变更。另外,在附图的说明中,对相同的元件标注相同附图标记,省略重复的说明。

[0039] 图1是示出本公开的反谐振空芯光纤的结构图。另外,图2是用于将本公开的反

谐振空芯光纤的主要部分的截面结构与比较例的光子晶体空芯光纤的对应的主要部分的截面结构一起进行说明的图(图2中记为“截面结构”)。在图2的上段(图2中记为“反谐振型”),示出了沿着图1中所示的I-I线的、反谐振空芯光纤的主要部分的截面图。在图2的下段(图2中记为“光子晶体型”),作为比较例,示出了相当于沿着图1中所示的I-I线的截面的、光子晶体空芯光纤的主要部分的截面图。

[0040] 如图1所示,本公开的反谐振空芯光纤100具备外侧包层120、多个内侧包层元件121、护套层130以及树脂包覆140。外侧包层120作为光学包层发挥功能,并具有沿着光纤中心轴AX延伸的管形状。由外侧包层120的内壁面120a包围的内部区域120b相当于反谐振空芯光纤100的内部区域,在内部区域120b设置有作为沟槽层发挥功能的多个内侧包层元件121。这些多个内侧包层元件121配置成,任何内侧包层元件121都在与外侧包层120的内壁面120a接触的状态下将作为中空光波导区域发挥功能的成为芯区域110的空间包围。成为芯区域110的空间沿着光纤中心轴AX延伸。在外侧包层120的外周设置有成为物理包层的护套层130。进而,在护套层130的外周设置有树脂包覆140。

[0041] 如图2的上段所示那样,在与光纤中心轴AX正交的外侧包层120的截面上、即在与光纤中心轴AX正交的内部区域120b的截面中,在由外侧包层120的内壁面120a包围的内部区域120b之中的、包含多个内侧包层元件的内部空间121b的、除多个内侧包层元件121所占的部分区域之外的剩余的区域中,填充有特定的气体。以下,将气体所填充的该区域称为气体填充区域,将所填充的气体称为填充气体。该填充气体在 $1\mu\text{m}$ 以上且 $2\mu\text{m}$ 以下的波段中具有比 H_2 低的光吸收率且具有比Ne小的扩散系数。该填充气体例如从稀有气体、一般气体、卤化碳等中选择。对于稀有气体而言,只要是Ar、Kr以及Xe中的任意一种即可。对于一般气体而言,只要是 N_2 和 O_2 中的任意一种即可。另外,对于卤代碳而言,只要是 CF_4 、 C_2F_6 、 CCl_2F_2 、 CClF_3 中的任意一种即可。

[0042] 需要说明的是,作为比较例,图2的下段所示的光子晶体空芯光纤具备公共包层220,在该公共包层220内配置有以包围成为芯区域210的中空光波导区域的方式配置的多个空孔221。在与光纤中心轴AX正交的公共包层220的截面上、即在光子晶体空芯光纤的截面上,多个空孔221以波长级构成周期结构的方式配置。通过利用该周期结构产生的光子带隙将光限制在芯区域210内。

[0043] 图2的上段所示的反谐振空芯光纤100的气体可填充的空间是上述的气体填充区域。另一方面,图2的下段所示的光子晶体空芯光纤的气体可填充空间仅为由配置在公共包层220的内部的多个空孔221包围的芯区域210。这样,在本公开的反谐振空芯光纤100和比较例的光子晶体空芯光纤中,气体可填充的空间的截面积之差显著变大。这样的截面积之差作为后述的从气体填充的开始到完成为止的渗透时间之差而显现化。

[0044] 图3是用于说明本公开的反谐振空芯光纤100的截面中的面积比的计算的图(图3中记为“面积比计算”)。在图3的上段(图3中记为“截面模型”),示出了与图2的上段所示的反谐振空芯光纤100的截面相当的截面模型。在图3的下段(图3中记为“放大图”)示意性地示出外侧包层120与内侧包层元件121之一的实际的接触状态的放大图。

[0045] 在图3中, r_1 是外侧包层120的内部区域120b的半径。即,从中心轴AX到外侧包层120的内壁面120a为止的距离是 r_1 。 r_2 是从中心121a到外周面为止的、内侧包层元件121的半径。其中,如图3的下段所示那样,内侧包层元件121嵌入到外侧包层120的内壁面120a。因

此,在面积比的计算中,使用 r_3 作为其校正值。另外, d 是相邻的内侧包层元件121之间的距离。 θ 是设定在光纤截面上的基准线与将光纤中心轴AX和内侧包层元件121的中心121a连接的线段所成的角度。需要说明的是,内侧包层元件121的半径 r_2 的校正值 r_3 用数学式“ $r_1/(1+1/\sin(\pi/n))-d/2$ ”计算。 n 是内侧包层元件121的个数。因此,内侧包层元件121的总截面积相对于外侧包层120的内部区域120b的截面积之比(以下记为“面积比”)由 $n \times (r_3/r_1)^2$ 表示。

[0046] 具体而言,作为公共参数,将外侧包层120的内部区域120b的半径 r_1 固定为 $40\mu\text{m}$,将内侧包层元件121间的距离 d 固定为 $2\mu\text{m}$ 。在这种情况下,随着与外侧包层120的内壁面120a接触的内侧包层元件121的个数增加,由校正值 r_3 表示的各内侧包层元件121的半径定性地变小。同样地,随着个数的增加,面积比也变小。

[0047] 例如,在内侧包层元件121的个数的条件为 $n=3$ 的情况下,半径 r_2 的校正值 r_3 和半径比: r_3/r_1 分别为 $17.6\mu\text{m}$ 和 0.44 ,面积比: $n \times (r_3/r_1)^2$ 为 0.58 。需要说明的是,在 $n<3$ 的情况下,由于内侧包层元件121不作为沟槽层发挥功能,所以需要3个以上内侧包层元件121。另外,在 $n=4$ 的情况下,是 $r_3=15.6\mu\text{m}$ 和 $r_3/r_1=0.39$, $n \times (r_3/r_1)^2$ 为 0.61 。在 $n=5$ 的情况下,是 $r_3=13.8\mu\text{m}$ 和 $r_3/r_1=0.35$, $n \times (r_3/r_1)^2$ 为 0.60 。在 $n=6$ 的情况下,是 $r_3=12.3\mu\text{m}$ 和 $r_3/r_1=0.31$, $n \times (r_3/r_1)^2$ 为 0.57 。在 $n=7$ 的情况下,是 $r_3=11.1\mu\text{m}$ 和 $r_3/r_1=0.28$, $n \times (r_3/r_1)^2$ 为 0.54 。而且,在 $n=8$ 的情况下,是 $r_3=10.1\mu\text{m}$ 和 $r_3/r_1=0.25$, $n \times (r_3/r_1)^2$ 为 0.51 。需要说明的是,在 $n=8$ 的情况下和 $n=7$ 的情况下,与 $n=6$ 的情况相比,面积比: $n \times (r_3/r_1)^2$ 变小,由相邻的2个内侧包层元件121和外侧包层120的内壁面120a包围的区域的截面积变得过小。在这些情况下,高压注入到外侧包层120的内部区域120b内的气体与残留气体的更换变得困难。换言之,在内侧包层元件121的个数为7个以上的情况下,难以向反谐振空芯光纤内进行均匀的气体填充。其结果是,无法实现沿着该反谐振空芯光纤的光纤中心轴的传输损耗等光学特性的稳定化。因此,为了确保用于气体填充的充分的空间并且沿着长度方向实现稳定的传输损耗等光学特性,内侧包层元件121的个数只要是6个以下即可,上述面积比: $n \times (r_3/r_1)^2$ 只要是 0.55 以上即可。为了计算面积比所需要的上述的各半径能够通过端面的显微观察来测定。另外,内侧包层元件121的个数可以为3个以上且6个以下,因此上述面积比也可以为 0.57 以上且 0.61 以下。在外侧包层120的内部区域120b的半径 r_1 大于 $40\mu\text{m}$ 的情况下,上述面积比有时也可能成为 0.61 以上。

[0048] 接着,对本公开的反谐振空芯光纤100的制造方法分为前半工序和后半工序进行说明。图4是用于说明本公开的反谐振空芯光纤100的制造方法之中的相当于前半工序的拉丝工序的图。另外,图5是用于说明本公开的反谐振空芯光纤100的制造方法之中的相当于后半工序的气体填充工序的图。

[0049] 为了实施前半工序,图4所示的拉丝装置具备:加压装置300,对拉丝对象的光纤母材10的内部进行加压;加热器400,加热光纤母材10的一端;树脂涂布装置500,对从光纤母材10拉出的中空的光纤的表面涂布树脂;卷绕装置600,用于卷绕纤维中间构件150;以及辊610,用于调整纤维中间构件150的行进方向。

[0050] 光纤母材10由如下构成:外侧包层部12,具有管形状且在拉丝后成为外侧包层120;多个内侧包层部12b,具有管形状且在拉丝后成为内侧包层元件121;以及护套部13,在拉丝后成为护套层130。在被外侧包层部12的内壁面12a包围的内部区域,多个内侧包层部

12b中的每个内侧包层部12b在与内壁面12a接触了的状态下以包围外侧包层部12的中心的配置。另外,在外侧包层120的外周上设置有护套部13。

[0051] 被加热器400加热而软化的光纤母材10的一端通过卷绕装置600的鼓轮向用箭头S所示的方向旋转,而从光纤母材10的一端拉出中空的玻璃纤维。此时,通过加压装置300向外侧包层部12的内部区域和多个内侧包层部12b各自的内部区域供给压力控制用气体、空气,这些内部区域以使得管形状不变形的方式成为加压状态。对被拉出的玻璃纤维的表面通过树脂涂布装置500涂布树脂,得到纤维中间构件150。在该纤维中间构件150中,相当于外侧包层120的拉丝后的部分的内部区域以及相当于多个内侧包层元件121中的每个内侧包层元件121的拉丝后的部分的内部区域成为中空状态。所得到的纤维中间构件150最终经由辊610卷绕于卷绕装置600的鼓轮。

[0052] 而且,通过具备上述这样的结构的拉丝装置得到的纤维中间构件150被设置在图5所示的实施气体填充工序的装置,实施后半工序。即,图5所示的装置具备高压气体供给系统710、真空泵720以及气体分析仪730。纤维中间构件150的一个端面经由开闭阀741连接到高压气体供给系统710。当填充气体经由开闭阀741从高压气体供给系统710被供给到纤维中间构件150的一个端面时,该填充气体被供给到气体填充区域。需要说明的是,由于相当于多个内侧包层元件121的部分的内部空间121b处于真空或被减压了的状态,所以填充气体不进入相当于这些多个内侧包层元件121的部分。另外,由于相当于多个内侧包层元件121的部分的内部空间121b的截面积小,所以即使在相当于多个内侧包层元件121的部分的内部空间121b填充气体,在向气体填充区域填充气体所花费的时间内,气体的填充也不会完成。

[0053] 在纤维中间构件150的另一个端面,经由开闭阀742连接有真空泵720,通过该真空泵720,排出纤维中间构件150的内部区域、即相当于外侧包层120的内部区域120b的区域内的残留气体。由真空泵720排出的气体的种类由气体分析仪730分析。在由气体分析仪730检测出填充气体的时间点,能够确认气体的填充完成,在相当于外侧包层120的内部区域120b的纤维中间构件150的内部区域,残留气体被置换为填充气体。在填充气体后,若对反谐振空芯光纤100的两端部进行机密密封,则气体的压力维持密封时的压力。填充在密封时的反谐振空芯光纤100之中的气体的压力在摄氏25度的温度下大于0.101MPa且小于70MPa。填充过程中的气体的压力能够由高压气体供应系统710所具备的压力计测定。在填充后的反谐振空芯光纤100之中填充的气体的种类和气体的压力能够通过将反谐振空芯光纤100再次连接到气体分析仪730和高压气体供应系统710来测定。另外,填充后的反谐振空芯光纤100之中填充的气体的种类和气体的压力也能够根据拉曼光谱法或受激拉曼散射等分光测定得到的光谱的面积强度或峰强度来推定。

[0054] 需要说明的是,在气体填充工序中,也可以在内部被管理为一定温度的恒温槽800收纳有纤维中间构件150的状态下实施气体的填充。恒温槽800具备收纳纤维中间构件150的框体810、冷却源820、加热源830、温度传感器840以及温度控制部850。为了将框体810的内部温度维持在所希望的设定温度,温度控制部850在通过温度传感器840监视框体810的内部温度的同时控制冷却源820或加热源830。

[0055] 图6是示出成为能够应用于本公开的反谐振空芯光纤100的填充气体的候选的各种气体的扩散系数的分子直径依赖性的表。在图6的表中,示出了各种气体的分子直径

(nm)、扩散系数(cm^2/s)以及表示扩散系数的温度依赖性的活化能(kJ/mol)。需要说明的是,温度 25°C 下的扩散系数是根据温度 1000°C 的扩散系数和活化能的已知的数值算出的。

[0056] 如根据图6的表可知的,分子直径越大则扩散系数越小。特别是,当着眼于温度 25°C 下的扩散系数时,在稀有气体中,Ar、Kr、Xe的扩散系数小于 $1 \times 10^{-20} \text{cm}^2/\text{s}$,均小于Ne的扩散系数,在 $1\mu\text{m}$ 以上且 $2\mu\text{m}$ 以下的波段中光吸收率也比 H_2 低。因此,在稀有气体的组之中的Ar、Kr、Xe适合用于本公开的反谐振空芯光纤100的填充气体。需要说明的是,小于 $1 \times 10^{-20} \text{cm}^2/\text{s}$ 的扩散系数的值是15年扩散距离为 $0.1\mu\text{m}$ 以下的数值。He、Ne的扩散系数大,因此不适用于填充气体。另外,在一般气体中, N_2 、 O_2 的扩散系数小于 $1 \times 10^{-20} \text{cm}^2/\text{s}$,均比Ne的扩散系数小,光吸收率也比 H_2 低。因此,一般气体之中的 N_2 、 O_2 适用于填充气体。 H_2 、 O_2 的扩散系数比Ne的扩散系数小,但由于在 $1\mu\text{m}$ 以上且 $2\mu\text{m}$ 以下的波段中发生光吸收,因此不适用于填充气体。在卤化碳中, CF_4 、 CCl_2F_2 、 CClF_3 的扩散系数小于 $1 \times 10^{-20} \text{cm}^2/\text{s}$,均小于Ne的扩散系数,光吸收率也低于 H_2 。因而,图6的表中列举的所有气体均适用于填充气体。作为其他气体的例子, CH_4 、 CO_2 、 CO 、 C_2H_4 的扩散系数也小于 $1 \times 10^{-20} \text{cm}^2/\text{s}$ 。但是,由于这些气体均在 $1\mu\text{m}$ 以上且 $2\mu\text{m}$ 以下的波段中具有比 H_2 高的光吸收率,因此不适用于填充气体。

[0057] 需要说明的是,虽然在图6的表中未示出,但作为卤化碳, C_2F_6 也具有小于 $1 \times 10^{-20} \text{cm}^2/\text{s}$ 的扩散系数,且具有比 H_2 低的光吸收率,因此适用于填充气体。另外, H_2 、He、Ne等由于分子直径小且在玻璃中扩散,因此有可能在空芯光纤的半径方向上脱离。因此,这些气体不适合用于本公开的反谐振空芯光纤100的填充气体。而且, CH_4 、 C_2H_6 、 CO_2 等由于C-H键或C-O键的振动而产生光吸收。因此,由于使传输损耗增大,因此不适用于填充气体。

[0058] 接着,对于图6所列举的各种气体之中的几种气体,使用图7~图9对关于光纤模型的管内径与渗透时间的关系的计算结果进行以下说明。图7是示出对于图6所列举的各种气体之中的几种气体,对管内径D相互不同且管长度L为25000m的各种玻璃管从气体填充的开始到完成为止的渗透时间的计算结果的表。在此,图7所示的表的上段是对管内径D为 $8.0 \times 10^{-5} \text{m}$ 且管长度L为25000m的玻璃管开始填充气体到完成气体填充为止的渗透时间的计算结果。图7所示的表的下段是对管内径D为 $1.0 \times 10^{-5} \text{m}$ 且管长度为25000m的玻璃管从气体填充的开始到完成为止的渗透时间的计算结果。图8是示出对于图6所列举的各种气体之中的 CF_4 ,对管内径D相互不同且管长度L为25000m的各种玻璃管从气体填充的开始到完成为止的渗透时间的计算结果的表。图9是示出用于得到图7和图8所示的计算结果的实验系统的结构的图和示出计算结果的坐标图(在图9中记为“实验系统和计算结果”)。在图9的上段(图9中记为“实验系统”)示出作为实验用光纤模型而准备的玻璃管的概略结构。在图9的中段(图9中记为“粘度-压力特性”)示出了图7所示的表的上段所列举的气体的流体粘度 μ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)与压力 ΔP (MPa)的关系。在图9的下段(图9中记为“管内径-时间特性”)示出了基于图8所示的表的、关于 CF_4 的管内径D(m)与渗透时间(h)的关系。而且,图10是用于说明图7和图8所列举的气体之中的Ar、 N_2 以及 CF_4 的渗透时间的温度依赖性的坐标图。

[0059] 需要说明的是,作为用于渗透时间(h)的计算的、实验用光纤模型,假设为如图9的上段所示那样的具有单一的细孔的玻璃管。该玻璃管具有圆形截面,具有管内径D和管长度L。另外,在该玻璃管中流动例如气体等流体时的压力损失用以下的式(1)表示。而且,在流体为层流的情况下,以下的式(2)的条件成立。

[0060] [数学式1]

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \quad \dots (1)$$

$$[0061] \quad \left. \begin{aligned} Re &= \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \\ \lambda &= \frac{64}{Re} \end{aligned} \right\} \quad \dots (2)$$

[0062] 其中, λ 是玻璃管相对于气体的摩擦系数。 L 是管长度(m)。 D 是管内径(m)。 ρ 是流体密度(kg/m^3)。 u 是平均流速(m/s)。 μ 是流体粘度。 Re 是雷诺数。

[0063] 例如,在对管内径 D 为 $8.0 \times 10^{-5}\text{m}$ 且管长度 L 为25000m的玻璃管的一个端面施加了填充气体为50MPa左右的压力的情况下,填充气体到达该玻璃管的另一个端面为止大约350h完成。该计算结果示出于图7的表的上段。需要说明的是,在图7的表的上段和下段双方中,上下段成为计算对象的气体均为He、 H_2 、 N_2 、Ar、Kr、Xe、air(空气)、 O_2 以及 CF_4 。对于这些气体,示出了温度 T (K)、分子量(g/mol)、流体粘度 μ (Pa·s)、流体密度 ρ (kg/m^3)、平均流速(m/s)、雷诺数 Re 、压力 ΔP (Pa)、压力 ΔP (MPa)以及渗透时间(h)的值。另外,从图9的中段所示的坐标图也可知,图7的表的上段所列举的气体在流体粘度 μ (Pa·s)与压力 ΔP (MPa)之间示出了相关关系。

[0064] 另一方面,在对管内径 D 为 $1.0 \times 10^{-5}\text{m}$ 且管长度 L 为25000m的玻璃管的一个端面施加了填充气体为50MPa的压力的情况下,为了填充气体到达该玻璃管的另一个端面,需要20000h以上。该计算结果示出于图7的表的下段。

[0065] 而且,在图8所示的表中,对于作为对象气体的 CF_4 ,示出了管内径 D (m)、温度 T (K)、分子量(g/mol)、流体粘度 μ (Pa·s)、流体密度 ρ (kg/m^3)、平均流速(m/s)、雷诺数 Re 、压力 ΔP (Pa)、压力 ΔP (MPa)以及渗透时间(h)的值。从图9的下段所示的坐标图可知,在管内径 D (m)与渗透时间(h)之间也存在相关关系。该趋势对于其他气体也是能够推断的。另外,由上述式(1)和上述式(2)也可知,流体粘度 μ 影响气体填充速度。流体粘度 μ 根据气体的种类和气体的温度而变化。特别是温度的影响大,处于越是低温则流体粘度 μ 变得越低的趋势,因此在图5中用恒温槽800等冷却纤维中间构件150对渗透时间的削减有效果。这样的渗透时间的温度依赖性如图10所示,与气体的种类无关,通过低温状态下的气体填充而削减了渗透时间。被填充的气体可以是图6等所列举的气体之中的一种气体单独填充到纤维中间构件150的内部区域,另外,也可以在纤维中间构件150的内部区域共存有多种气体。特别是,在使多种气体共存于纤维中间构件150的内部区域的构成中,能够沿着所得到的反谐振空芯光纤100的长度方向形成不同的气体的组成分布,在实质上成为芯区域110的气体填充区域中,能够期待利用沿着该长度方向的折射率变化的传输特性的改善等。

[0066] 需要说明的是,在图10中,线段G1010示出Ar被选择为填充气体时的渗透温度的温度依赖性,线段G1020示出 N_2 被选择为填充气体时的渗透温度的温度依赖性,线段G1030示出 CF_4 被选择为填充气体时的渗透温度的温度依赖性。为了测定而准备的管样品具有与图9的上段所示的玻璃管同样的结构,管内径 D 为 $8.0 \times 10^{-5}\text{m}$,管长度 L 为25000m。另外,为了易于比较,线段G1010至线段G1030分别调整了温度 T 为298K即25°C时的渗透时间。具体而言,示出Ar的温度特性的线段G1010以温度 T 为25°C时的渗透时间成为385h的方式调整了流体粘

度 μ 、流体密度 ρ 、平均流速 u 、雷诺数 Re 以及压力 ΔP 的各种参数。同样地,示出 N_2 的温度特性的线段G1020以温度 T 为 $25^\circ C$ 时的渗透时间成为305h的方式调整了流体粘度 μ 等各种参数。而且,示出 CF_4 的温度特性的线段G1030也以温度 T 为 $25^\circ C$ 时的渗透时间成为225h的方式调整了流体粘度等各种参数。如从该图10可知的那样,可知示出温度依赖性的程度的线段的斜率是线段G1010大于剩余的线段G1020和线段G1030。换言之,可知与 N_2 和 CF_4 的温度依赖性相比, Ar 的温度依赖性更大。

[0067] 在本公开的反谐振空芯光纤100中,作为面积比,多个内侧包层元件121的总截面积相对于外侧包层120的内部区域120b的截面积之比设定为0.55以上。这样,在反谐振空芯光纤100的情况下,能够充分地确保成为中空光波导区域的气体填充空间,作为实际上能够制造的光纤长度,能够实现1km以上的长条化。

[0068] 而且,在本公开的反谐振空芯光纤100中,外侧包层120的内部区域120b的直径也可以为 $80\mu m$ 以上。若内部区域120b的直径为 $80\mu m$ 以上,则即使光纤长度为1km以上,也能够高效地制造。

[0069] 如从上述的实施方式的记载可掌握的,在本说明书中包含以下所示的方案公开。

[0070] (附记1)

[0071] 一种反谐振空芯光纤,具备:

[0072] 外侧包层,具有沿着光纤中心轴延伸的管形状;以及

[0073] 多个内侧包层元件,分别具有管形状,分别在与所述外侧包层的内壁面接触了的状态下以包围成为芯区域的空間的方式配置,

[0074] 所述反谐振空芯光纤具有1km以上的长度,

[0075] 在与所述光纤中心轴正交的所述外侧包层的截面上,在由所述外侧包层的所述内壁面包围的内部区域之中的、除所述多个内侧包层元件所占的部分区域之外的剩余的区域中,填充有在 $1\mu m$ 以上且 $2\mu m$ 以下的波段中具有比 H_2 低的光吸收率且具有比 Ne 小的扩散系数的气体。

[0076] 附图标记说明

[0077] 10 光纤母材

[0078] 12 外侧包层部

[0079] 12a 内壁面

[0080] 12b 内侧包层部

[0081] 13 护套部

[0082] 100 反谐振空芯光纤

[0083] 110 芯区域

[0084] 120 外侧包层

[0085] 120a 内壁面

[0086] 120b 内部区域

[0087] 121 内侧包层元件 (部分区域)

[0088] 121a 中心

[0089] 121b 内部空间 (部分区域)

- [0090] 130 护套层
- [0091] 140 树脂包覆
- [0092] 150 纤维中间构件
- [0093] 210 芯区域
- [0094] 220 公共包层
- [0095] 221 空孔
- [0096] 300 加压装置
- [0097] 400 加热器
- [0098] 500 树脂涂布装置
- [0099] 600 卷绕装置
- [0100] 610 辊
- [0101] 710 高压气体供给系统
- [0102] 720 真空泵
- [0103] 730 气体分析仪
- [0104] 741、742 开闭阀
- [0105] 800 恒温槽
- [0106] 810 箱体
- [0107] 820 冷却源
- [0108] 830 加热源
- [0109] 840 温度传感器
- [0110] 850 温度控制部
- [0111] AX 光纤中心轴
- [0112] S 箭头。

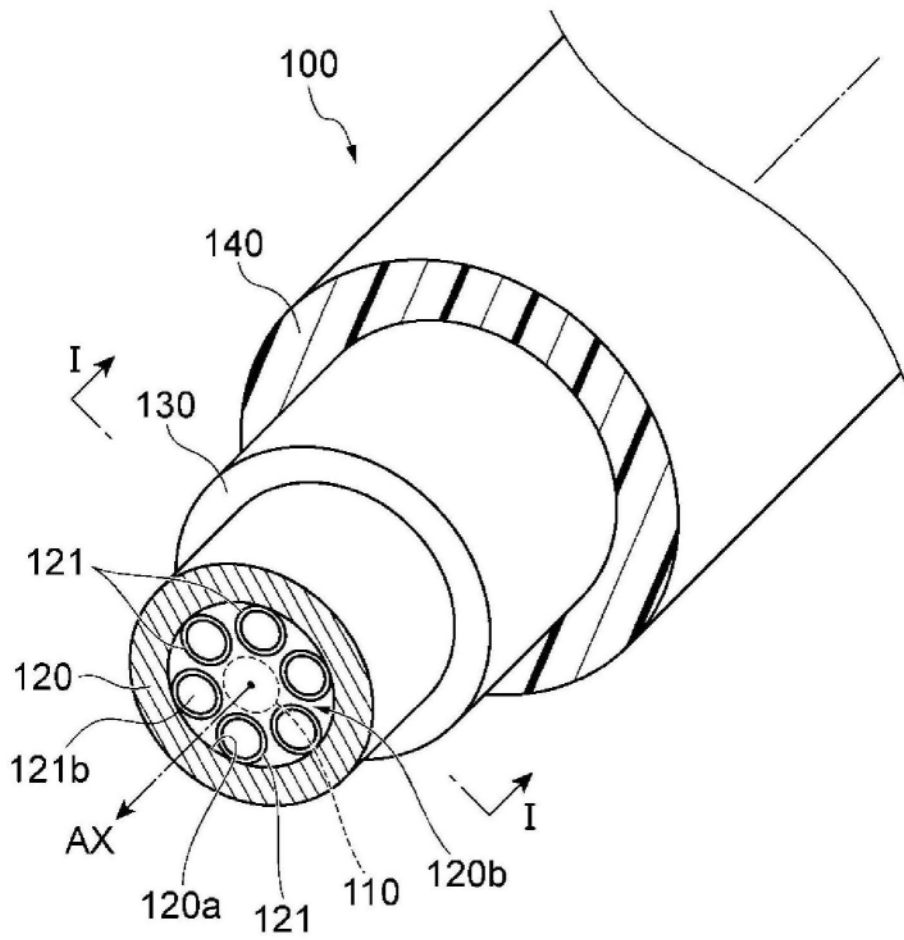


图1

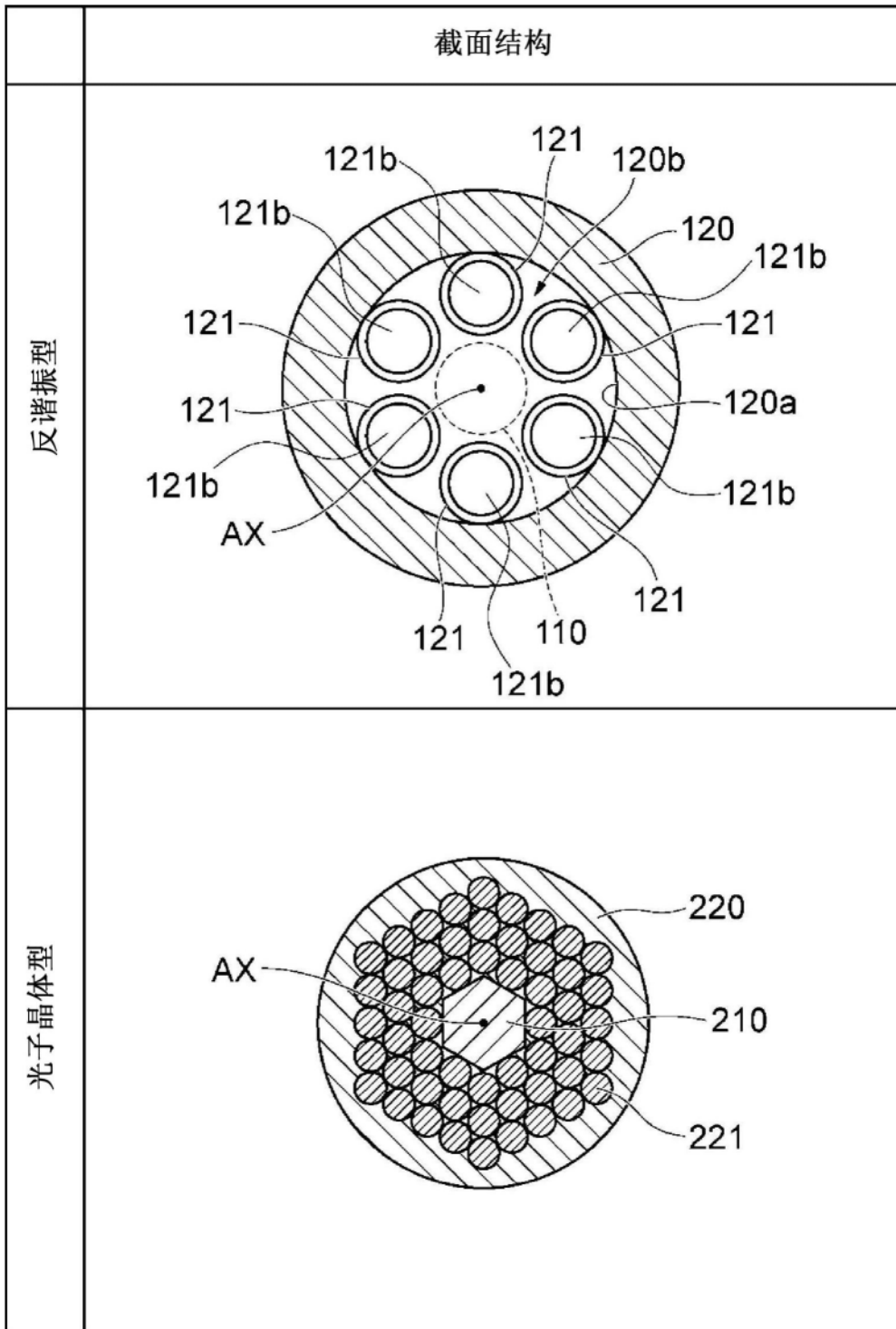


图2

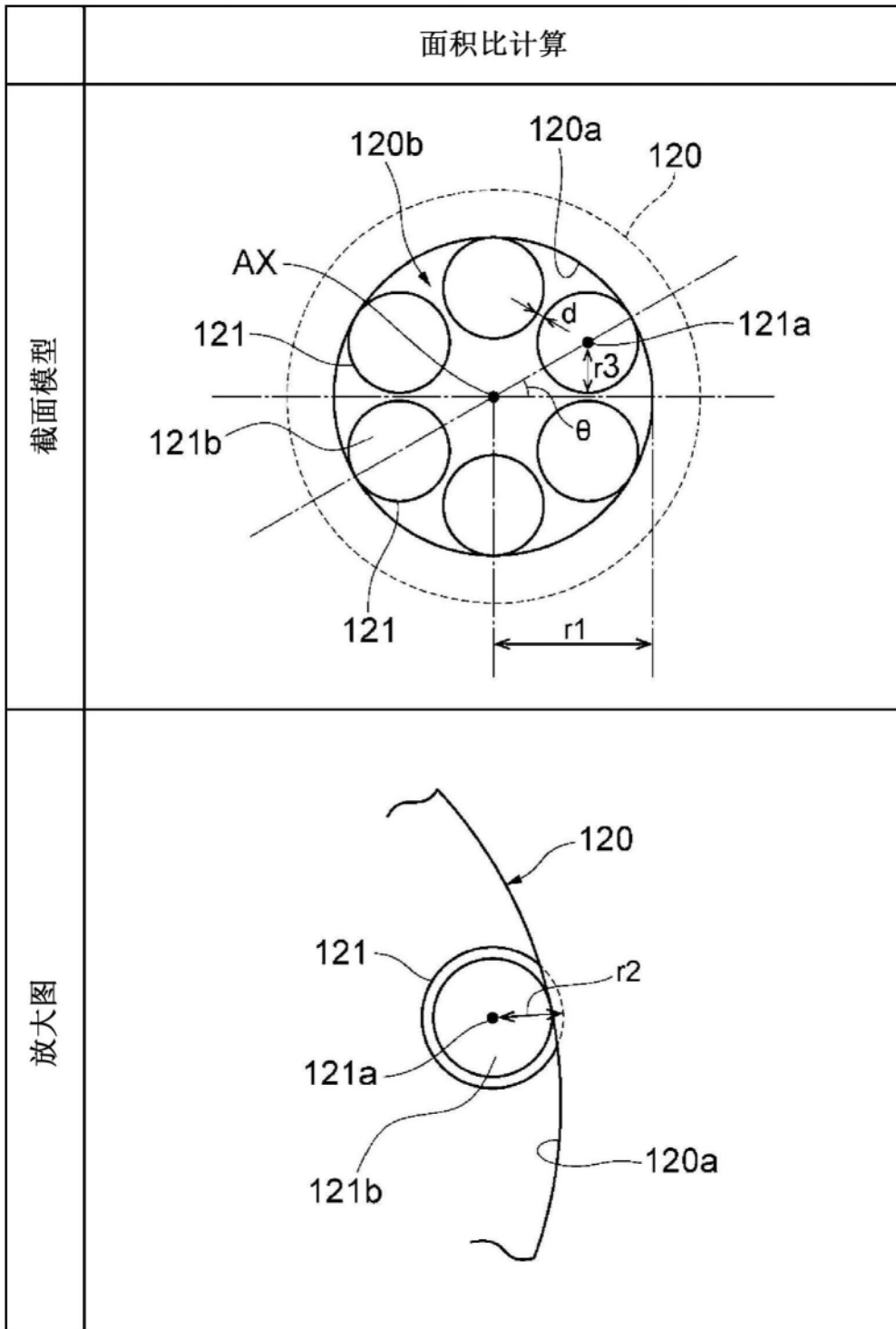


图3

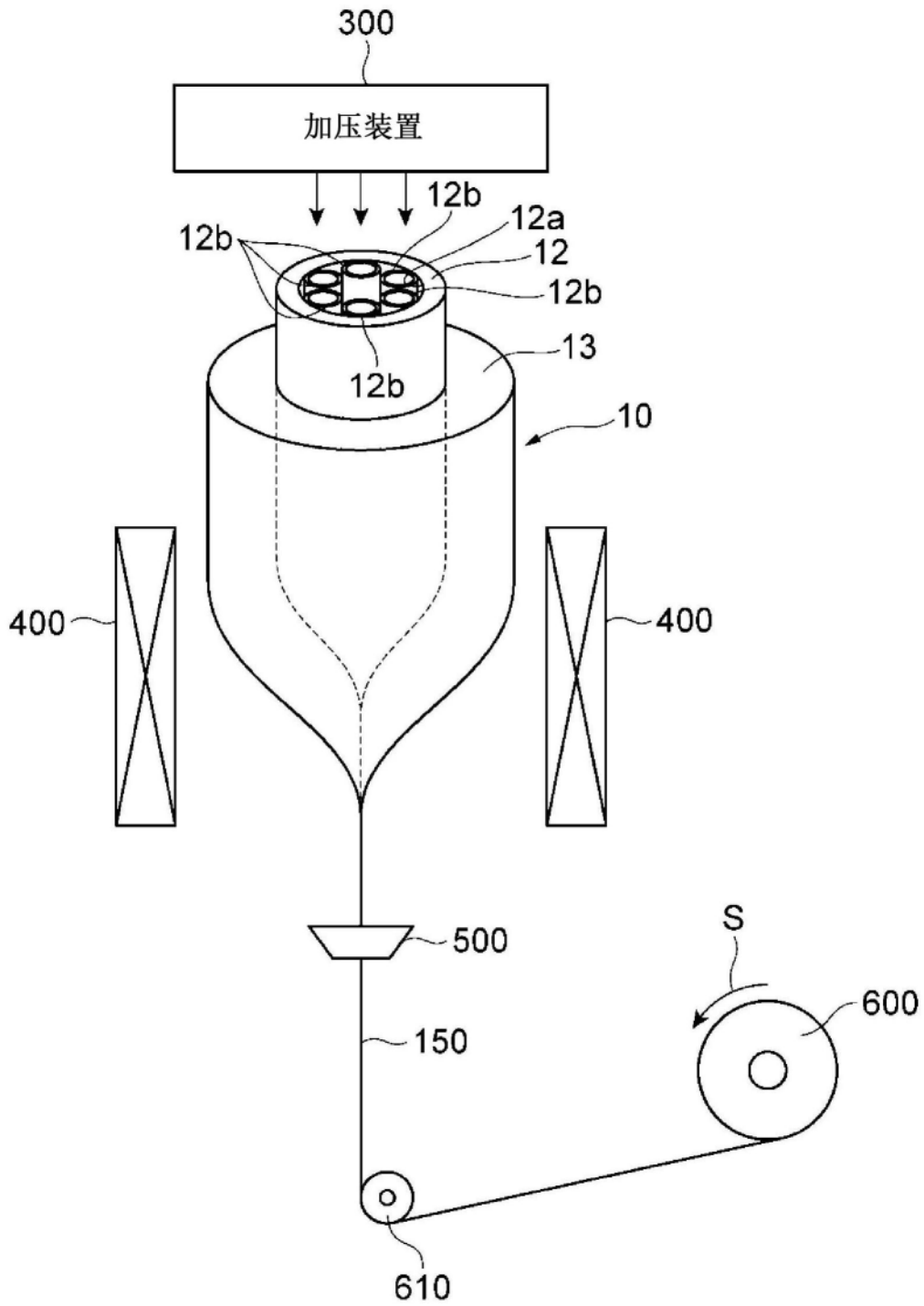


图4

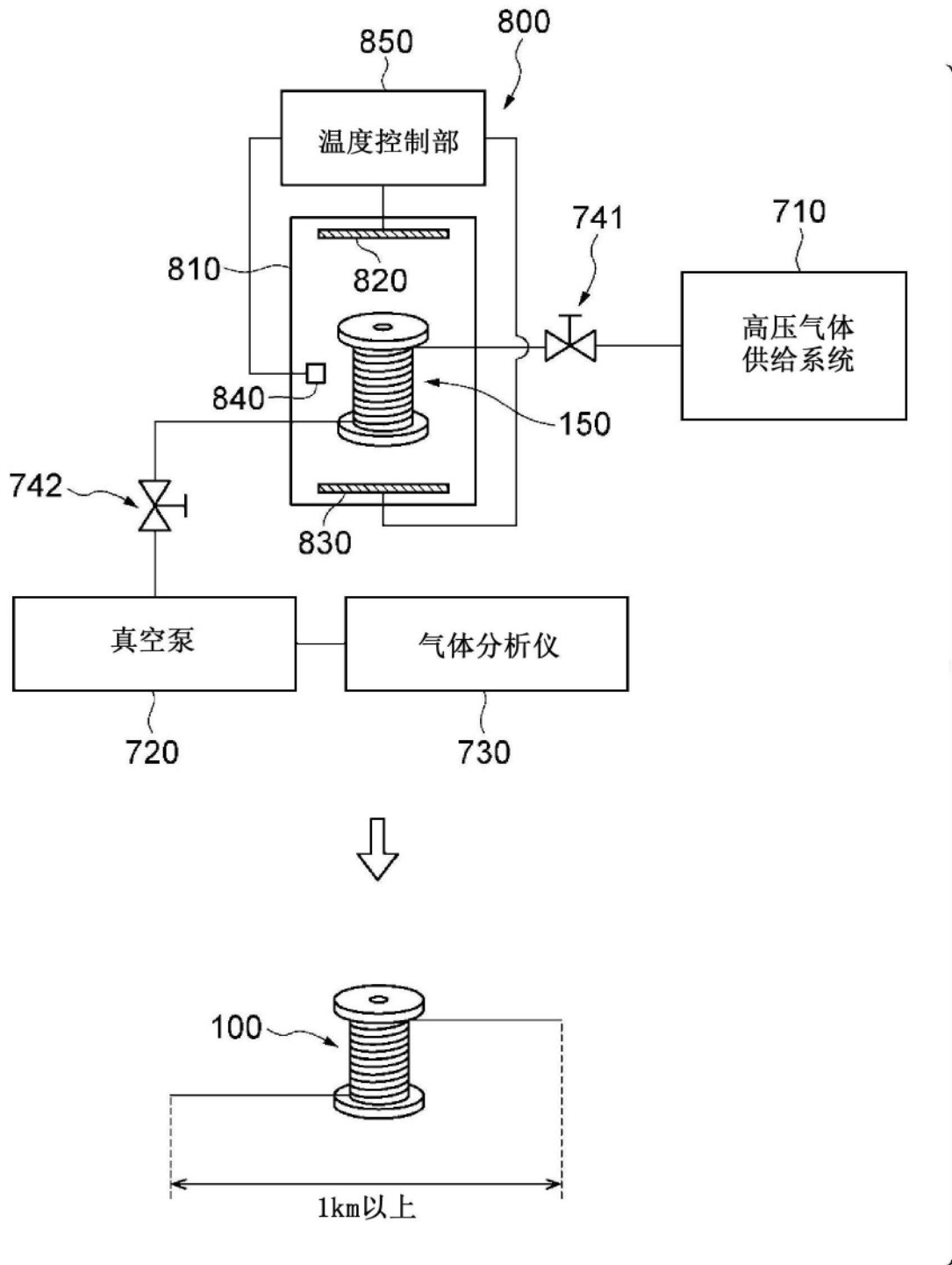


图5

气体种类		分子直径 (nm)	扩散系数 (cm ² /s)		活化量 (KJ/mol)
			温度 25°C	温度 1000°C	
稀有气体	He	0.23	2.4×10 ⁻⁷	3.2×10 ⁻⁵	16
	Ne	0.25	7.4×10 ⁻¹¹	5.9×10 ⁻⁶	37
	Ar	0.32	< 1×10 ⁻²⁰	1.6×10 ⁻⁸	109
	Kr	0.42	< 1×10 ⁻²⁰	3.2×10 ⁻¹²	212
	Xe	0.49	< 1×10 ⁻²⁰	8.4×10 ⁻¹⁵	285
一般气体	H ₂ ,D ₂	0.26	1.3×10 ⁻¹²	2.5×10 ⁻⁶	47
	N ₂	0.36	< 1×10 ⁻²⁰	5.2×10 ⁻¹⁰	150
	O ₂	0.35	< 1×10 ⁻²⁰	1.2×10 ⁻⁹	140
卤化碳	CF ₄	0.46	< 1×10 ⁻²⁰	1.1×10 ⁻¹³	254
	CCl ₂ F ₂	0.48	< 1×10 ⁻²⁰	2.0×10 ⁻¹⁴	274
	CClF ₃	0.47	< 1×10 ⁻²⁰	4.6×10 ⁻¹⁴	264
其他 (有光吸收)	CH ₄	0.38	< 1×10 ⁻²⁰	9.6×10 ⁻¹¹	171
	CO ₂	0.33	< 1×10 ⁻²⁰	6.7×10 ⁻⁹	119
	CO	0.38	< 1×10 ⁻²⁰	9.6×10 ⁻¹¹	171
	C ₂ H ₄	0.4	< 1×10 ⁻²⁰	1.8×10 ⁻¹¹	192

图6

气体种类	温度T (K)	分子量 (g/mol)	流体粘度 μ (Pa·s)	流体密度 ρ (kg/m ³)	平均流速 u (m/s)	雷诺数Re	压力 ΔP (Pa)	压力 ΔP (Mpa)	渗透时间 (h)	
氢气 孔径 $D=1.0 \times 10^{-3}$ m 长度 $L=25.000$ m	He	4.0026	1.97×10^{-5}	0.1637	0.02	1.33×10^{-2}	4.94×10^7	49.352	347.22	
	H ₂	2.0159	8.88×10^{-6}	0.09	0.02	1.62×10^{-2}	2.22×10^7	22.198	347.22	
	N ₂	28.013	1.77×10^{-5}	1.2506	0.02	1.13×10^{-1}	4.43×10^7	44.294	347.22	
	Ar	39.948	2.25×10^{-5}	1.7834	0.02	1.27×10^{-1}	5.62×10^7	56.242	347.22	
	Kr	83.8	2.53×10^{-5}	3.7411	0.02	2.37×10^{-1}	6.32×10^7	63.225	347.22	
	Xe	131.3	2.31×10^{-5}	5.8616	0.02	4.06×10^{-1}	5.78×10^7	57.779	347.22	
	air	28.85	1.83×10^{-5}	1.288	0.02	1.13×10^{-1}	4.57×10^7	45.742	347.22	
	O ₂	31.999	2.05×10^{-5}	1.4285	0.02	1.12×10^{-1}	5.12×10^7	51.189	347.22	
	CF ₄	88.004	1.29×10^{-5}	3.9288	0.02	4.87×10^{-1}	3.22×10^7	32.247	347.22	
	氢气 孔径 $D=1.0 \times 10^{-3}$ m 长度 $L=25.000$ m	He	4.0026	1.97×10^{-5}	0.1637	0.00031	2.59×10^{-5}	4.94×10^7	49.352	22,222
		H ₂	2.0159	8.88×10^{-6}	0.09	0.00031	3.17×10^{-5}	2.22×10^7	22.198	22,222
		N ₂	28.013	1.77×10^{-5}	1.2506	0.00031	2.21×10^{-4}	4.43×10^7	44.294	22,222
Ar		39.948	2.25×10^{-5}	1.7834	0.00031	2.48×10^{-4}	5.62×10^7	56.242	22,222	
Kr		83.8	2.53×10^{-5}	3.7411	0.00031	4.62×10^{-4}	6.32×10^7	63.225	22,222	
Xe		131.3	2.31×10^{-5}	5.8616	0.00031	7.93×10^{-4}	5.78×10^7	57.779	22,222	
air		28.85	1.83×10^{-5}	1.288	0.00031	2.20×10^{-4}	4.57×10^7	45.742	22,222	
O ₂		31.999	2.05×10^{-5}	1.4285	0.00031	2.18×10^{-4}	5.12×10^7	51.189	22,222	
CF ₄		88.004	1.29×10^{-5}	3.9288	0.00031	9.52×10^{-4}	3.22×10^7	32.247	22,222	

图7

气体种类	管内径D (m)	温度T (K)	分子量 (g/mol)	流体粘度 μ (Pa·s)	流体密度 ρ (kg/m ³)	平均流速 u (m/s)	雷诺数Re	压力 ΔP (Pa)	压力 ΔP (Mpa)	渗透时间 (h)
CF ₄	5.0×10 ⁻⁶	298	88.00	1.29×10 ⁻⁵	3.5992	1.21×10 ⁻⁴	1.69×10 ⁻⁴	5.00×10 ⁷	50	57328
	7.1×10 ⁻⁶	298	88.00	1.29×10 ⁻⁵	3.5992	2.42×10 ⁻⁴	4.78×10 ⁻⁴	5.00×10 ⁷	50	28664
	1.0×10 ⁻⁵	298	88.00	1.29×10 ⁻⁵	3.5992	4.85×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻³	5.00×10 ⁷	50	14332
	1.4×10 ⁻⁵	298	88.00	1.29×10 ⁻⁵	3.5992	9.69×10 ⁻⁴	3.82×10 ⁻³	5.00×10 ⁷	50	7166
	2.0×10 ⁻⁵	298	88.00	1.29×10 ⁻⁵	3.5992	1.94×10 ⁻³	1.08×10 ⁻²	5.00×10 ⁷	50	3583
	2.8×10 ⁻⁵	298	88.00	1.29×10 ⁻⁵	3.5992	3.88×10 ⁻³	3.06×10 ⁻²	5.00×10 ⁷	50	1791.5
	4.0×10 ⁻⁵	298	88.00	1.29×10 ⁻⁵	3.5992	7.75×10 ⁻³	8.65×10 ⁻²	5.00×10 ⁷	50	895.75
	5.7×10 ⁻⁵	298	88.00	1.29×10 ⁻⁵	3.5992	1.55×10 ⁻²	2.45×10 ⁻¹	5.00×10 ⁷	50	447.87
	8.0×10 ⁻⁵	298	88.00	1.29×10 ⁻⁵	3.5992	3.10×10 ⁻²	6.92×10 ⁻¹	5.00×10 ⁷	50	223.94
	1.1×10 ⁻⁴	298	88.00	1.29×10 ⁻⁵	3.5992	6.20×10 ⁻²	1.96×10 ⁺⁰	5.00×10 ⁷	50	111.97

管长度 L=25,000m

图8

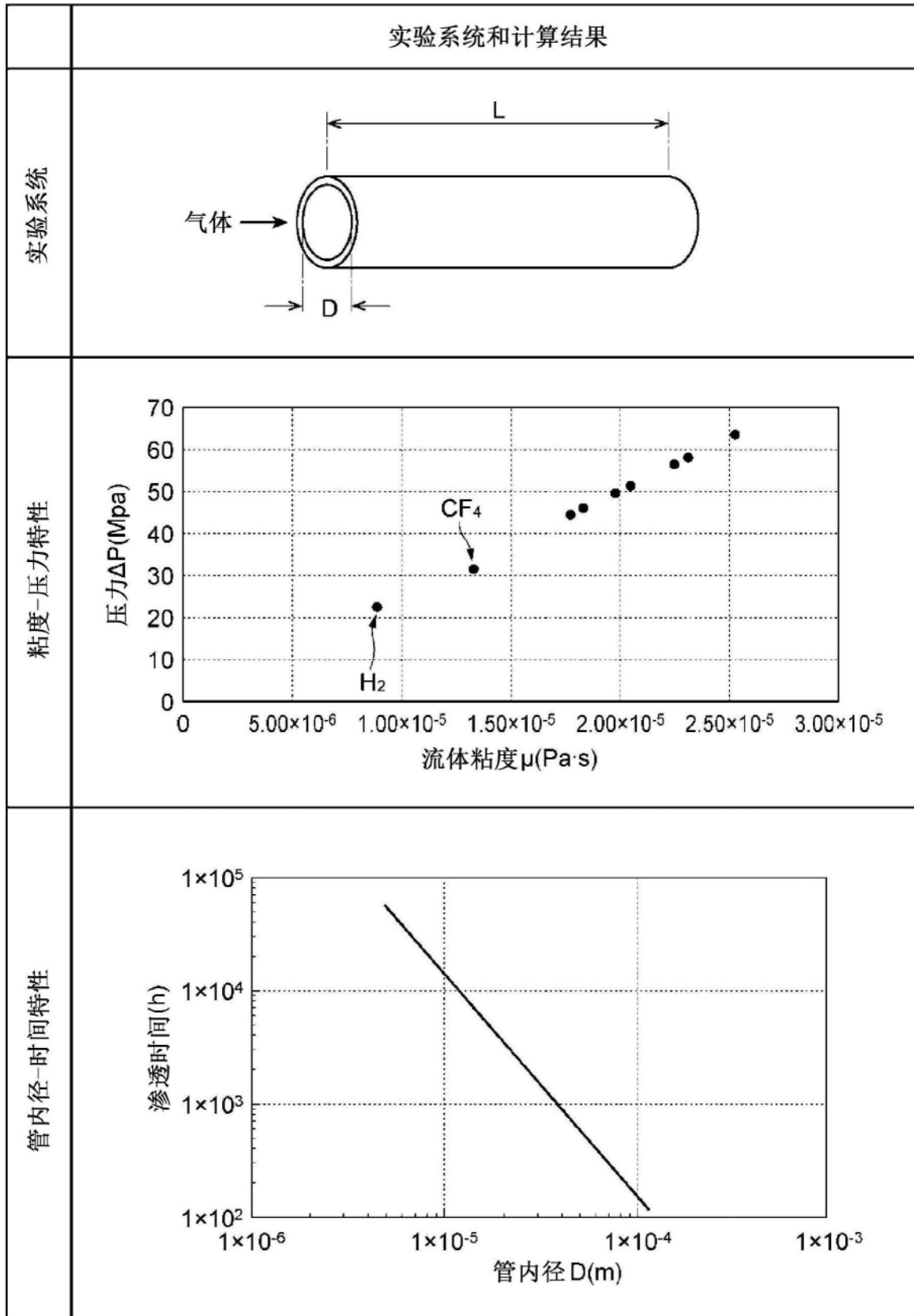


图9

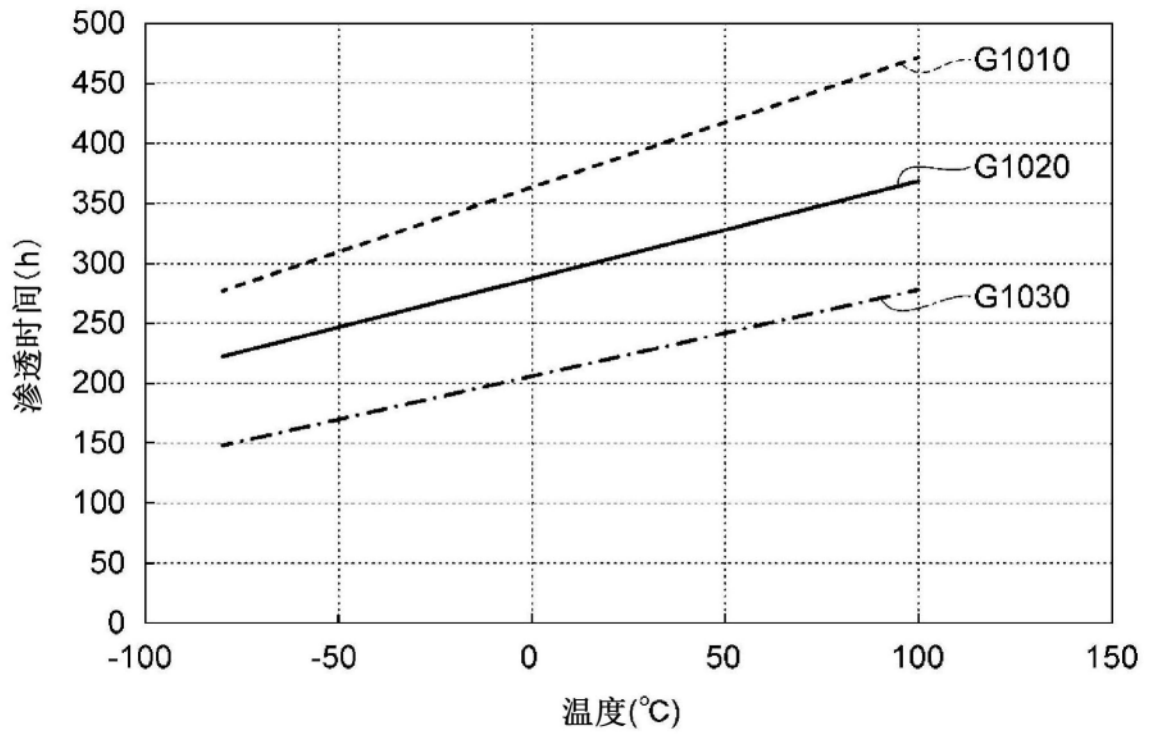


图10