



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117729993 A

(43) 申请公布日 2024. 03. 19

(21) 申请号 202280048856.9

(22) 申请日 2022.07.11

(30) 优先权数据

2150940-1 2021.07.14 SE

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2024.01.10

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2022/069235 2022.07.11

(87) PCT国际申请的公布数据

W02023/285340 EN 2023.01.19

(71) 申请人 迈克尔·福金

地址 瑞典萨尔特舍-博

申请人 塔拉斯·奥里霍夫 刘春昕

(72) 发明人 迈克尔·福金 塔拉斯·奥里霍夫

刘春昕

(74) 专利代理机构 中国贸促会专利商标事务所  
有限公司 11038

专利代理师 王海宁

(51) Int.Cl.

B29C 64/245 (2006.01)

B23K 103/00 (2006.01)

B33Y 30/00 (2006.01)

B23K 26/342 (2006.01)

B23K 26/067 (2006.01)

C03B 19/02 (2006.01)

B29C 64/268 (2006.01)

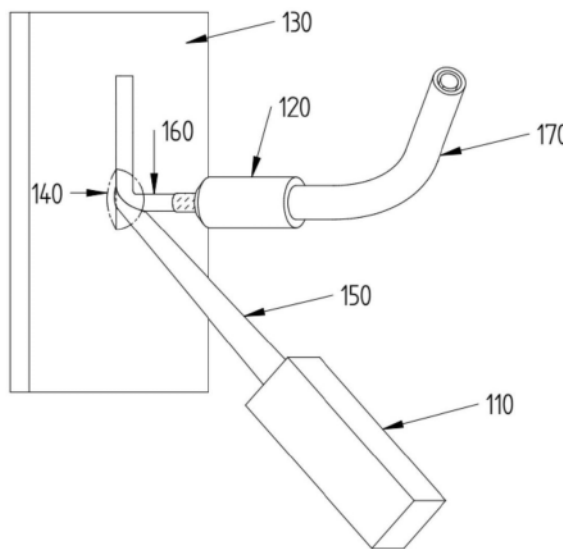
权利要求书2页 说明书10页 附图3页

## (54) 发明名称

用于玻璃物体的增材制造的方法和设备

## (57) 摘要

本发明涉及一种用于形成玻璃的三维部件/物体的增材制造方法和设备,包括以下步骤:在基本水平方向上向台板(130)供给玻璃纤丝(160)材料,加热所述玻璃纤丝(160)材料,使得玻璃纤维材料变为或保持熔化/软化;和将熔化/软化的玻璃材料沉积到所述台板或物体的表面上,其中所述熔化/软化的玻璃材料形成所述玻璃三维部件/物体;其中在沉积的至少一部分期间,所形成的玻璃的三维部件处在基本竖直的台板上,逐层沉积所述熔化/软化的玻璃材料并且一个或多个计算机控制所述熔化/软化的玻璃材料的每一层的沉积,通过控制一组驱动器,该组驱动器驱动所述玻璃纤丝(160)和/或所述台板(130)的移动。



1. 一种形成玻璃的三维部件/物体的增材制造方法,所述方法包括以下步骤:
  - a. 在基本水平方向上向台板(130)或物体供给玻璃纤维丝(160)材料;
  - b. 加热所述玻璃纤维丝(160)材料,使得玻璃纤维丝材料变为或保持熔化/软化;
  - c. 将熔融/软化的玻璃纤维丝(160)材料沉积到所述台板(130)或物体的表面上,其中熔化/软化的玻璃纤维丝材料形成所述玻璃的三维部件/物体;其中在沉积的至少一部分期间,所形成的玻璃的三维部件处在基本竖直的台板上,逐层沉积所述熔化/软化的玻璃纤维丝材料;和
  - d. 用一个或多个计算机和一组驱动器控制所述熔化/软化的玻璃纤维丝材料沉积,该组驱动器驱动玻璃纤维丝材料和台板(130)的相对运动。
2. 根据权利要求1所述的增材制造方法,其中基本上垂直于所述台板(130)或物体的所述表面供给所述玻璃纤维丝。
3. 根据权利要求1或2所述的增材制造方法,其中使用从至少一个激光源(110)发出的至少一个激光束(150)来加热所述玻璃纤维丝(160)。
4. 根据权利要求3所述的增材制造方法,其中通过波长大于 $2\mu\text{m}$ 的至少三个激光束(150)来加热所述玻璃纤维丝(160)。
5. 根据前述权利要求中任一项所述的增材制造方法,其中在纤维供给喷嘴(120)和所述玻璃纤维丝(160)与所述至少一个激光束(150)的交点之间的距离小于5毫米。
6. 根据前述权利要求中任一项所述的增材制造方法,其中在所述玻璃纤维丝上相交的多个激光束相对于其上要提供所述玻璃纤维丝的台板或物体的表面的角度在 $30^\circ$ - $60^\circ$ 的范围内。
7. 根据权利要求6所述的增材制造方法,其中多个激光束被配置为在所述玻璃纤维丝处相交,基本上对称地围绕所述玻璃纤维丝。
8. 根据前述权利要求中任一项所述的增材制造方法,其中所述玻璃纤维丝材料具有由聚酰亚胺制成的保护膜,所述保护膜具有 $1$ - $50\mu\text{m}$ 范围内的厚度。
9. 根据前述权利要求中任一项所述的增材制造方法,其中所述玻璃纤维丝是直径在 $100$ - $500\mu\text{m}$ 范围内的玻璃纤维。
10. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中所述玻璃纤维丝由至少两种不同的材料加上保护膜制成。
11. 根据前述权利要求中任一项所述的增材制造方法,其中所述玻璃纤维丝材料是中空的。
12. 根据前述权利要求中任一项所述的增材制造方法,其中所述台板是厚度为所述玻璃纤维丝直径的 $80\%$ - $300\%$ 的玻璃板。
13. 根据前述权利要求中任一项所述的增材制造方法,还包括在用所述至少一个激光束加热所述玻璃纤维丝之前预热所述玻璃纤维丝的步骤。
14. 一种用于玻璃部件/物体的增材制造的设备,包括:
  - a. 台板(130);
  - b. 一个或多个加热元件,用于加热玻璃纤维丝(160)材料,使得玻璃纤维丝材料变为或保持熔化/软化;
  - c. 纤维供给喷嘴(120),用于在基本水平方向上向台板(130)供给玻璃纤维丝(160)以便形成位于所述台板上的所述玻璃部件/物体;和

d. 一个或多个计算机,用于控制制造,使得熔化/软化的玻璃材料被逐层沉积,以及玻璃纤维丝(160)材料和台板(130)的相对运动,其中所述台板是基本上竖直的。

15. 根据权利要求14所述的设备,其中基本上垂直于所述台板供给所述玻璃纤维丝材料。

16. 根据权利要求14或15所述的设备,其中所述一个或多个加热元件是至少一个激光束。

17. 根据权利要求16所述的设备,其中从同一激光束源发出多个激光束。

18. 根据权利要求17所述的设备,还包括:用于将单个激光束分成多个激光束的衍射光学元件,被配置成使分裂的光束偏转的棱锥镜,和被配置为引导偏转光束与所述玻璃纤维丝相交的多个光束转向镜。

19. 根据权利要求14-18中任一项所述的设备,其中在所述玻璃纤维丝上相交的所述至少三个光束相对于其上要提供所述玻璃纤维丝(160)的台板或物体的表面的角度为30-60°。

20. 根据权利要求17-19中任一项所述的设备,其中所述光束被配置为在所述玻璃纤维丝处相交,基本对称地围绕所述玻璃纤维丝,距所述台板(130)基本相同的距离。

21. 根据权利要求14-20中任一项所述的设备,还包括至少一个预热器,所述预热器被配置为在所述加热元件加热所述玻璃纤维丝之前预热所述玻璃纤维丝。

22. 根据权利要求14-21中任一项所述的设备,还包括用于加热所述台板的至少一个加热装置。

23. 根据权利要求22所述的设备,其中至少一个激光束从后方加热所述台板。

24. 根据权利要求14-23中任一项所述的设备,其中在具有惰性气氛和/或露点低于-20℃的干燥气氛的构造室中提供所述台板。

## 用于玻璃物体的增材制造的方法和设备

### 技术领域

[0001] 本发明总体上涉及增材制造领域。特别地,本发明涉及由玻璃制成的原料形成三维部件/物体的方法和设备。

### 背景技术

[0002] 在玻璃3D打印或增材制造中,现有技术包括(1)从窑炉中热挤出,(2)玻璃棒沉积,(3)采用玻璃-聚合物混合溶液的立体光刻/喷墨,和(4)玻璃纤丝沉积。

[0003] (1)在US10464305B2和US10266442B2中,利用平移台以预定几何形状,使用大坩埚将熔融玻璃倒出到构造板上。这种方法的缺点是喷嘴被熔融玻璃损坏的风险,因此局限于具有较低熔化温度的多组分硅酸盐玻璃,诸如钠钙玻璃或硼硅酸盐玻璃。层厚度为约10mm,因此该技术仅适用于分辨率相对较差的大尺寸打印。在所有现有技术中,能量消耗是最高的。

[0004] (2)在US2020/0070415A1和W02020/167470A1中,连续纤丝进料用于玻璃3D打印。该打印使用直径大于1mm的玻璃棒作为原材料。通过打印头供给进料棒并沉积在基底上。无法在高于1700℃的温度下打印玻璃,这限制了材料选择。该系统的问题是喷嘴有被熔融玻璃损坏的风险,打印体积受到玻璃棒体积的限制,进料棒之间的间隙导致打印品质不均匀,并且设置被认为具有高的机械复杂性。

[0005] (3)在US2020/0039868A1、W02017/214179A1和W02020/1118157A1中,将玻璃粉与液体聚合物混合。在打印过程中,首先通过聚合物3D打印机产生3D生坯。然后对生坯进行脱脂(de-binding),得到具有纯玻璃的多孔体。将多孔体烧结,最终形成“致密”的玻璃打印体。混合物中的玻璃含量低。因此,由于大的体积收缩,该技术只能产生通常小于10mm的模型。整个过程耗时几天,并且需要高耗能的窑炉来进行脱脂和烧结。由于烧结期间的不均匀收缩,打印品质不佳。

[0006] (4)细玻璃纤丝或光纤的激光基熔化[J.M.Hostetler等人,FIBER-FED PRINTING OF FREE-FORM FREE-STANDING GLASS STRUCTURES,Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International,994-1002],[T.Grabe等人,Additive Manufacturing of fused silica using coaxial laser glass deposition, experiment, simulation and discussion, Proc.SPIE 11677, Laser 3D Manufacturing VIII, 116770Z (2021年3月8日)]也已被用于玻璃3D打印。使用激光,实现了非接触加热,因此熔体不会与坩埚壁持续接触,从而避免坩埚腐蚀和玻璃熔体的污染。这里,氧化硅玻璃纤维/纤丝在足以软化该玻璃的温度下被连续地供给到热区中。对于氧化硅玻璃(石英或熔融氧化硅),需要高达1800至2000℃的温度。

[0007] 然而,在[J.M.Hostetler等人,FIBER-FED PRINTING OF FREE-FORM FREE-STANDING GLASS STRUCTURES,Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International,994-1002]中,仅使用一个激光束来软化玻璃纤丝。这种非对称加热显著限制了定向打印能力。熔融玻璃纤丝中的不均匀温度梯度可导致打印体中的高

残余应力,从而有材料失效和打印过程中断的风险。该技术使用裸玻璃纤丝,这意味着在打印之前需要从玻璃纤丝上去除涂层。然而,这种方法导致在最后阶段期间纤维没有受到保护;将纤维机械供给到热区。剥离工艺还限制了可打印玻璃纤丝的总长度(即,最大机械剥离小于几米,最大化学剥离小于几十米),这严重损害了3D打印工艺的连续性和能力(体积)。

[0008] 在[T.Grabe等人,Additive Manufacturing of fused silica using coaxial laser glass deposition,experiment,simulation and discussion,Proc.SPIE 11677, Laser 3D Manufacturing VIII,116770Z(2021年3月8日)]中,一个激光束被分裂成4个分束。然而,分裂光束的质量差,因为它们不是均匀的高斯激光束。不均匀加热问题仍然存在。在这种方法中,使用涂覆玻璃纤丝。涂层在热区附近被烧掉,即热区本身可以用来去除涂层。采用常用纤维涂层时所述方法的问题在于,它可能导致不合意的燃烧副产物,更有可能留下残留物,从而影响打印体的纯度。另一个问题是,即使在关闭热源之后,涂层也能够点燃并且开始烧掉大长度的纤丝。因此,需要工艺气体来抑制涂层燃烧。为了烧掉涂层,需要过多的能量,这导致打印期间的大量玻璃蒸发。

[0009] 在基于激光的玻璃加工期间,玻璃蒸发是很常见并且难以消除的。蒸发产生不合意的烟尘氧化硅颗粒,这些颗粒会粘附在表面。烟尘氧化硅颗粒的存在增加了系统中光学器件污染和破坏的风险。蒸发速率和烟尘方向的控制是至关重要的。

[0010] 使用裸玻璃纤丝的增材制造具有差的力学性能,因此容易断裂。为了在储存和操纵期间对玻璃纤丝进行机械和化学保护,需要保护涂层。可在纤丝制造期间施加保护涂层。

[0011] 在现有的玻璃增材制造中,需要从玻璃纤丝上除去涂层。在将纤丝供给到热增材制造区之前,可以使用机械或化学手段(例如,使用硫酸、二氯甲烷)来进行涂层的剥离。然而,这种方法导致纤维在最后阶段期间不受保护;纤维机械供给到热区。由于剥离涂层可能进一步削弱纤丝的力学强度,这不是理想的方案,因为打印期间的纤丝断裂将导致打印过程的严重中断。由于在使用强酸(硫酸)或二氯甲烷(致癌)时涉及的风险,使用化学手段法是不优选的。

[0012] 在玻璃3D打印中,玻璃纤丝被连续供给到1800至2200℃的热区。一种常见的方法是供给纯玻璃纤丝。然而,由于大多数玻璃纤丝是连同涂层一起生产的,因此在打印之前需要去除涂层以生产纯玻璃纤丝。剥离涂层可以使用机械或化学手段(例如,使用硫酸、二氯甲烷)进行。剥离工艺限制了可打印玻璃纤丝的总长度(即,最大机械剥离通常短于2m,最大化学剥离通常短于50m),这严重损害了3D打印过程的连续性和能力(体积)。由于在没有涂层的情况下纤丝可能会变脆并且剥离涂层可能进一步削弱纤丝的力学强度,这带来额外的风险,因为打印期间的纤丝断裂将导致打印过程的严重中断。

[0013] 替代方法是烧掉涂层。当热区被加热到极高温时,涂层将在热区附近开始燃烧,即热区本身可以用来去除涂层。所述方法的问题在于,它可能导致打印失败、燃烧副产物,更有可能留下残留物,从而影响打印物的纯度,并且它不是节能的。该方法的另一个问题是存在控制烧掉的涂层的量的问题:可能发生涂层在整个纤丝长度上开始燃烧。

[0014] W02018/1636006公开了玻璃3D打印的连续纤丝供给。该打印使用玻璃棒作为原材料。进料棒被加载在旋转盒中并且通过打印头进料并沉积在基底上。通过在该过程中对棒进行热粘合来实现连续进料。无法在较高的温度下打印玻璃,这限制了材料选择。该系统的

问题是喷嘴有被熔融玻璃损坏的风险,打印体积受到盒体积的限制,粘合区仍然会在进料中产生不一致性,从而导致不均匀的打印品质,并且该设置被认为具有高的机械复杂性。

[0015] 发明目的

[0016] 本发明旨在克服上述问题。本发明的主要目的是提供一种用于形成玻璃的三维部件的改良设备。

[0017] 本发明的另一个目的是提供一种用于形成玻璃的三维部件的增材制造方法。

## 发明内容

[0018] 根据本发明,通过具有独立权利要求中限定的特征的系统来实现至少所述主要目的。

[0019] 从属权利要求中进一步限定本发明的优选实施方案。

[0020] 根据本发明的第一方面,提供了一种形成玻璃三维部件/物体的增材制造方法,所述方法包括以下步骤:

[0021] a. 在基本水平方向上向台板或物体供给玻璃纤丝材料;

[0022] b. 加热所述玻璃纤丝材料,使得玻璃纤丝材料变为或保持熔化/软化;和

[0023] c. 将熔化/软化的玻璃纤丝材料沉积到所述台板或物体的表面上,其中熔化/软化的玻璃纤丝材料形成所述玻璃三维部件/物体;其中在沉积的至少一部分期间,所形成的玻璃三维部件处在基本竖直的台板上,逐层沉积熔化/软化的玻璃纤丝材料;

[0024] d. 用一个或多个计算机和一组驱动器控制熔化/软化的玻璃纤丝材料沉积,该组驱动器驱动玻璃纤丝材料和台板的相对运动。

[0025] 该实施方案的优点在于,在玻璃纤丝的增材制造热区处产生的任何烟尘都可以从所述增材制造热区逸出,从而在所述玻璃纤丝的熔化/软化期间不会污染激光光学器件或者不会干扰激光束。

[0026] 在本发明的各种示例性实施方案中,基本上垂直于台板或物体的所述表面供给所述玻璃纤丝。

[0027] 这些实施方案的优点在于,与不基本上垂直于所述基底提供所述玻璃纤丝相比,可以提高制造细节的精度。

[0028] 在本发明的各种示例性实施方案中,使用从至少一个源发出的至少一个激光束来加热所述玻璃纤丝。

[0029] 这些实施方案的优点在于,从一个或多个激光束源发出的一个或多个激光束可用于加热/熔化所述玻璃纤丝。

[0030] 在本发明的各种示例性实施方案中,玻璃纤丝材料是中空的。

[0031] 这些实施方案的优点在于,所述纤丝的所述中空结构可以建立在所述最终三维部件中,诸如例如微流体结构。

[0032] 在本发明的各种示例性实施方案中,所述玻璃纤丝材料具有由聚酰亚胺制成的保护膜,所述保护膜具有 $1\mu\text{m}$ 至 $50\mu\text{m}$ 范围内的厚度。

[0033] 这些实施方案的优点在于,所述纤丝在使用前受到保护,同时在增材制造中使用期间该保护膜被自动去除,并且对所制造的材料及其用于激光束的引导光学器件表现出很少(即便不能说没有)的污染。

[0034] 在本发明的各种示例性实施方案中,通过波长大于 $2\mu\text{m}$ 的至少三个激光束来加热所述玻璃纤丝。

[0035] 这些实施方案的优点在于,围绕玻璃纤丝对称提供的多个激光束可以加快熔化/软化时间。另一个优点是可以选择激光束的波长和/或数量以具有定制的加热效率。

[0036] 在本发明的各种示例性实施方案中,所述玻璃纤丝是直径在 $100\text{-}500\mu\text{m}$ 范围内的涂覆玻璃纤维。

[0037] 这些实施方案的优点在于,可使用各种直径的玻璃纤丝来最大限度地提高精度或制造速度。本发明的另一优点是可使用光纤作为原材料。

[0038] 在本发明的各种示例性实施方案中,所述台板是玻璃板,其厚度为所述玻璃纤丝直径的 $80\%\text{-}300\%$ 。该厚度可以在十分之几毫米到几厘米的范围内。

[0039] 这些实施方案的优点在于,该制造方法与极薄的基底相容。

[0040] 在本发明的各种示例性实施方案中,还包括在用所述至少一个激光束加热所述玻璃纤丝之前预热所述玻璃纤丝的步骤。

[0041] 这些实施方案的优点在于,可需要较小的激光功率以达到玻璃纤丝的期望熔化/软化温度。可以通过在纤丝供给喷嘴中进行电阻加热来进行预热。

[0042] 在本发明的各种示例性实施方案中,纤丝供给喷嘴和所述玻璃纤丝与所述激光束的交点之间的距离小于 $5\text{mm}$ 。激光束相对于所述玻璃纤丝要施加到的台板或物体的表面的角度可以在 $30\text{-}60^\circ$ 的范围内。多个激光束可被配置为在所述玻璃纤丝处基本上对称地围绕所述玻璃纤丝相交。

[0043] 这些实施方案的优点是短距离增加三维部件的制造精度。由于所述玻璃纤丝上的保护膜的可自熄性质,可以使用短距离。选择所述激光束的击射角,使得所述热区被施加在所述玻璃纤丝和所述台板中,以有效地熔融所述台板和所述玻璃纤丝。还可以通过独立的加热源从后面加热该台板,例如从所述玻璃纤丝施加在所述台板上的相反侧击射的至少一个另一激光束。

[0044] 在本发明的各种示例性实施方案中,所述玻璃纤丝由至少两种不同的材料加上保护膜制成。

[0045] 这些实施方案的优点是可以制造功能性光波导,例如用于电信、传感或生物医学应用的光学电路。

[0046] 在本发明的另一方面,提供了一种用于玻璃部件/物体的增材制造的设备,包括:

[0047] a. 台板;

[0048] b. 一个或多个加热元件,用于加热玻璃纤丝材料,使得玻璃纤丝材料变成或保持熔化/软化;

[0049] c. 纤丝供给喷嘴,用于在基本水平方向上向台板供给玻璃纤丝以形成位于台板上的所述玻璃部件/物体;

[0050] d. 一个或多个计算机,用于控制制造,使得熔化/软化的玻璃材料逐层沉积,以及玻璃纤丝材料和台板的相对运动,其中所述台板是基本上竖直的。

[0051] 从优选实施方案的以下详细描述将清楚本发明的另外优点和特征。

[0052] 附图简述

[0053] 从结合附图对优选实施方案的以下详细描述,将更全面地理解本发明的上述和其

它特征和优点,其中:

[0054] 图1a描绘了根据本发明的用于制造玻璃三维部件的设备的第二示例性实施方案的示意性侧视图。

[0055] 图1b描绘了根据本发明的用于制造玻璃三维部件的设备的第二示例性实施方案的示意性侧视图。

[0056] 图2描绘了玻璃纤丝和纤丝供给喷嘴的示意性侧视图。

[0057] 图3a-3c描绘了玻璃纤丝的各种示例性实施方案。

[0058] 本发明优选实施方案的详述

[0059] 本发明涉及一种新的增材制造 (AM) 方法,其中使用数字模型,通过熔融纤丝/纤维来构造部件几何形状,使用能量源 (诸如激光束) 通过选择性熔化或在熔融过程之后简单扫描所打印的轮廓,逐层或层批熔化所述纤丝/纤维。

[0060] 本发明涉及一种通过将纤丝的保护膜去除与打印过程整合的直接制造方法。这意味着,该新方法将能够使用玻璃纤丝制造完全或接近完全致密的玻璃部件,并将克服现有技术玻璃制造方法的所有缺点。

[0061] 该新方法将能够直接制造玻璃部件,而没有与使用现有技术玻璃纤丝相关的任何安全预防措施和/或健康风险。

[0062] 图1a描绘了根据本发明的增材制造设备100的第一示例性实施方案的示意性侧视图,该设备被配置为制造玻璃的三维部件/物体。所述设备100包括台板130、激光源110和纤丝供给喷嘴120。纤丝供给喷嘴120可以被配置成在基本上平行于所述台板130的平面中移动并且相对于所述台板130移动,使得所述纤丝供给喷嘴120覆盖所述台板130的预定区域。所述台板被布置在竖直方向。相对移动可以是:所述台板130固定,而所述纤丝供给喷嘴120在所述平面内移动。在一个替代实施方案中,台板移动,而所述纤丝供给喷嘴120固定以覆盖整个台板130。在另一个替代实施方案中,台板130和所述纤丝供给喷嘴120都在所述平面中,以允许所述纤丝供给喷嘴120覆盖所述台板的整个区域。通过在竖直方向上提供台板130,它确保来自例如涂层材料的燃烧产物或蒸发/熔融玻璃 (由于过热) 的任何烟尘向上移动而不是朝向打印头。这是有益的,因为否则烟尘可能会损坏打印头光学器件和纤丝进料器喷嘴,从而需要频繁清洁或更换零件。此外,通过所述台板130的所述竖直设置,可以进行纤丝供给喷嘴120和所述台板130的相对移动,使得从所述热区离开的任何烟尘和气态材料被配置为离开激光束的光学路径,从而改善增材制造设备的性能。所述纤丝供给喷嘴120和/或所述台板130中的一个或两个可以在垂直于所述台板表面的方向上移动,以便允许增材制造三维部件/物体并将纤丝供给喷嘴120与将要附着新层的台板或部件/物体的顶表面之间的距离保持在恒定距离,即,对每一个新施加的层,台板130可以向后移动 (远离打印喷嘴) 对应于新施加层厚度的距离,或者纤丝供给喷嘴120可以按对应于新施加层厚度的距离移动远离台板,或者所述台板向后移动和所述纤丝供给喷嘴120向前移动的组合,以便将纤丝供给喷嘴120和将要附着新层的台板或部件/物体的顶表面之间的距离保持在恒定距离。纤丝160可以经由柔性管170被供给到纤丝供给喷嘴120。激光源110可以是CO<sub>2</sub>激光器、CO激光器、Nd:YAG激光器、光纤激光器、准分子激光器、氮激光器等。激光束150可以是连续的或者脉冲的。激光束使其上要附着所述软化或熔化的玻璃的台板附近的热区140中的纤丝软化或熔化。

[0063] 纤维供给喷嘴120和/或台板130可以布置在至少一个机动支撑件上。控制单元可以控制所述纤维供给喷嘴120相对于所述台板130的相对移动。所述控制单元还可以控制打印头光学器件和激光器。

[0064] 在图1a中,纤维供给喷嘴120将原材料160提供到台板130上用以形成由玻璃制成的三维部件/物体的层。可以在要在其上形成所述三维部件的台板130上提供构造板。构造板可以由任何材料制成,例如,与最终三维部件相同的材料、陶瓷材料或与所述三维部件中的材料不同的任何其它金属材料。

[0065] 第一步是将原材料熔融并沉积到台板130上。纤维供给喷嘴120沿着预定路径局部沉积原材料。纤维供给喷嘴120可以在原材料朝向台板130的途中在其离开喷嘴120之前加热原材料。纤维供给喷嘴120可适配于原材料的尺寸和形状。三轴运动学(kinematic)可以将纤维供给喷嘴120定位在机器的工作行程中,从而逐层生成由玻璃制成的三维部件。原材料160是玻璃纤维。在图1a中,只有一根玻璃纤维160被供给到台板。在各种示例性实施方案中,可以通过单个纤维供给喷嘴120串联供给各种形状和材料组成的多个玻璃纤维160,以便进行多种材料沉积。在图1a中,使用仅一个纤维供给喷嘴120。在各种示例性实施方案中,可以串联或并联使用多个纤维供给喷嘴。在各种示例性实施方案中,可以在台板130上同时提供多股供给原材料160,以便提供不同材料的三维部件。三维部件的不同层可以包括不同材料和/或单层内的不同位置可以包含不同的材料,即,可以在层内和/或在不同层中进行双材料沉积。

[0066] 图1b描绘了根据本发明的增材制造设备100的第二示例性实施方案的示意性侧视图,该设备被配置为制造玻璃的三维部件。所述设备100还包括竖直台板130、激光源110和纤维供给喷嘴120。此外,所述实施方案可以包括第一光束转向镜115、波片125、透镜135、衍射光学元件(DOE)145、棱锥镜155、至少三个次级光束转向镜165。可以使用至少三个激光束来加热玻璃纤维160。激光发射可以在玻璃纤维具有高光学吸收的波长区域中工作,当被所述激光束150照射时,这导致纤维160的加热。氧化硅和氧化硅基玻璃纤维在超过 $2.2\mu\text{m}$ 的波长下具有强吸收。使用 $\text{CO}_2$ 激光器(典型在 $9.2\text{--}10.6\mu\text{m}$ 波长区域内工作)或 $\text{CO}$ 激光器(在 $5.5\mu\text{m}$ 波长区域内工作)照射玻璃纤维160导致强烈的辐射吸收,从而导致玻璃纤维160的后续加热。

[0067] 可以使用在 $10.6\mu\text{m}$ 波长下工作的 $\text{CO}_2$ 激光器。在该波长下,氧化硅玻璃是不透明的,从而导致有效的加热。吸收深度为约 $2\mu\text{m}$ 至 $40\mu\text{m}$ ,并且有效加热直径为 $100\mu\text{m}$ 量级的玻璃纤维。对于较大的玻璃纤维, $10.6\mu\text{m}$ 的浅穿透深度使其难以快速加热。使用在 $5.5\mu\text{m}$ 下工作的 $\text{CO}$ 激光器更适合大于约 $0.5\text{mm}$ 的玻璃纤维。 $5.5\mu\text{m}$ 下的穿透深度要大得多(数百 $\mu\text{m}$ ),从而使能量更有效地沉积到玻璃纤维160中。

[0068] DOE 145可用于将初始激光束150分成至少三个均匀的激光束150'。可使用几个次级光束转向镜165将分裂的激光束150'引导到热区140中。第一可选光束转向镜115可用于使激光束路径更紧凑并且便于光束对准。至少三个第二光束转向镜165将至少三个激光束偏转到热区140,在此处至少三个激光束击射到所述玻璃纤维160上。四分之一波片125可以用于控制激光束的偏振。使用圆偏振光束确保分裂的激光束150'相同,因为DOE 145可能具有一些偏振依赖性。还可以使用反射相位延迟器作为(第一或第二)光束转向镜115来实现圆偏振光束。聚焦透镜135可用于改变热区140处的焦点尺寸,使得能够改变加热动力学。聚

焦透镜135可以安装在计算机控制的电动平移台上。所描绘的DOE是 $2 \times 2$ DOE,即,将单个激光束150分成4个激光束150'。棱锥镜155可用于使光束150'从DOE 145偏转。与没有所述棱锥镜的设置相比,使用如图1b所描绘的棱锥镜155可以实现激光束150、150'的光路的更紧凑的设计。所述棱锥镜155还可以增加由激光源110的波长变化引起的热区140处的激光束的稳定性。来自DOE 145的衍射角是波长相关的。如果激光的波长变化,衍射角也将变化。衍射角越大,这种效应就越大。因此,使用具有小衍射角的DOE使得打印头对波长变化不那么敏感。衍射角的大偏移将改变热区的位置,使打印不稳定。为了实现紧凑的设计,使用棱锥镜155来增加激光束150'的偏转角。在棱锥镜155之后,使用所述第二光束转向镜165,将4个激光束150'引导在纤丝160上的相同位置相交,标记为热区140,为每个激光束150'使用一个镜165。光束转向镜被配置成使激光束150'向任何方向偏转。这里,第二光束转向镜165被配置为将4个激光束150'偏转到所述玻璃纤维丝160上的同一热区140。激光束150'从不同的方向击射到所述玻璃纤维丝160上,但基本上在从纤丝供给喷嘴120出口的相同距离处或者在设置于所述台板130上的基底的顶表面。由于使用4个光束150'的开放式结构,纤丝供给系统170和喷嘴120易于添加在棱锥镜155下方并且在激光束150'之间。热区140和纤丝供给喷嘴120出口之间的距离L可以大于10mm,在各种示例性实施方案中,所述距离L可以小于5mm。基底130的厚度可以从几十毫米到几厘米。击射到所述玻璃纤维丝160和所述基底130上的激光束相对于所述基底表面的角度可以为 $45^\circ$ 。在各种示例性实施方案中,相对于所述基底表面的所述角度可以在 $30-60^\circ$ 的范围内。

[0069] 激光和光束转向可以包括分束器 (beam tap), 其分出使用参考功率计监测的激光束功率的百分之几。来自参考功率计的输入被用作反馈信号, 以便使用例如闭环反馈系统来稳定激光功率。可使用快门来打开/关闭打印头的激光束。当断开 (关闭) 时, 光束被引导到束流收集器 (beam dump), 该束流收集器也可以是一个额外的功率计。当开启时, 光束然后进入打印头。在图1a和1b中进行打印, 其中纤丝沿水平方向击射台板130。这是为了确保来自例如涂层材料的燃烧产物或蒸发/熔化玻璃 (由于过热) 的任何烟尘向上移动而不是朝向打印头。这是有益的, 因为否则烟尘可能损坏打印头光学器件和纤丝进料器喷嘴, 从而需要频繁清洁或更换零件。然而, 使用合适的气体吹扫, 可以沿任何方向 (向上、向下或侧向) 放置打印头。

[0070] 可使用一个或多个纤丝进料器在打印期间添加原材料。打印台可以是保持基底或打印轮廓的3- (x-y-z)、4-或5-轴平移系统。当使用硅酸盐玻璃纤维丝 (例如, 硼硅酸盐或钠钙玻璃) 时, 成形空间体积 (build volume) 还可包括加热腔室。对于熔凝氧化硅或熔凝石英玻璃纤维丝, 这可能不是问题 (由于极低的热膨胀系数), 并且可以在没有额外加热的情况下进行打印。为了改善与基底的结合, 可以使用单独的激光束在软化的玻璃纤维丝将被沉积的点下方进行照射。使用以可见波长工作的激光器用于光束对准, 因为 $\text{CO}_2$ 激光器和CO激光器都工作在红外波长光谱中。对准精度对于实现纤丝的均匀加热可能是至关重要的。对准技术是基于使用纤丝作为小型干涉器。

[0071] 例如, 将He-Ne激光器 (632.8nm波长) 聚焦在纤丝上, 在4个激光束相交的指定位置处 (对应于热区)。来自红色激光器的光可以在玻璃纤维的两个界面处被反射。圆形玻璃纤维可以形成同心腔干涉器 (CCI)。CCI的两次反射可能相互干涉, 从而形成干涉条纹。当聚焦He-Ne激光器位置处的温度升高时, 条纹向外移动, 而当温度降低时, 条纹向内移动。然后,

使CO<sub>2</sub>或CO激光束对准的过程变得简便(straight forward)。仅仅通过最大化条纹移动(增加温度),使每个光束精确对准。

[0072] 一个进料喷嘴120可以在三维部件的第一预定层区域处提供原材料160,并且可以将两个或更多个喷嘴用于三维部件的第二预定层区域,即,层形成可以在一个、两个、三个或更多喷嘴之间改变,这取决于要形成的层的形状和/或要添加的材料类型。在各种示例性实施方案中,用于向基底上提供原料的多个喷嘴可以具有相同的直径或不同的直径。多个纤维供给喷嘴可以提供不同玻璃材料的原材料。

[0073] 与纤维挤出同步,功能点(热区)根据预定路径定位。该路径是通过将工件的几何形状切片成层并计算用于挤出纤维160的时效性轨迹而导出的。可以通过三轴定位单元来进行该定位。它旨在采用五轴运动学来扩展制造灵活性,以便参照地球重力场来进一步重新对准工件。

[0074] 在第一选项中,用行进的激光束同时处理,烧结/熔化沉积的玻璃纤维160,紧随在纤维沉积之后。

[0075] 作为替代,通过对最新打印层的选择性激光扫描,用高功率激光束烧结/熔化玻璃纤维的薄层。该过程可能需要受控的热量输入和时序。为了确保几何精度,可以进行原位测量,这使得能够直接补偿过程方差。材料中的缺陷可能需要对烧结/熔化的玻璃层进行品质检查。原位品质控制确保了几何精度,适当的温度,以及打印环境中的气体含量和压力。

[0076] 可以同时使用一个或多个激光束来熔化/软化玻璃纤维。

[0077] 裸玻璃纤维具有差的力学性能,因此容易断裂。为了在储存和操纵期间对玻璃纤维进行机械和化学保护,需要保护涂层。可以在纤维制造期间施加保护涂层,使用例如用于生产光纤的纤维拉丝塔。窑炉加热预制件(形状和组成都是大尺寸的纤维)。然后使用织轮并组合以直径规将软化的玻璃拉伸以获得正确的纤维尺寸。当拉伸纤维时,将预制件进一步送入窑炉中。典型地,可将涂覆树脂引入到涂层杯中,纤维穿过该涂层杯。然后,可将涂层随后固化(要么热固化,要么使用例如紫外灯),此后将纤维缠绕到储存和运输卷轴上。光纤上的聚酰亚胺涂层的固化温度典型可在约100-400℃的温度范围内。

[0078] 聚酰亚胺涂覆的光纤可以经受约300℃的工作温度,并且通常用于更高温度(感测)的应用。这里典型使用10至15μm的涂层厚度。可以通过重复涂覆程序,添加多个涂覆层,来施加更厚的涂层。

[0079] 对于玻璃纤维,涂层厚度应尽可能薄,同时确保纤维有足够的机械和化学保护。我们已评估的具有良好结果的纤维具有约5μm的单层聚酰亚胺涂层厚度。

[0080] 玻璃纤维的合适外径在100μm至500μm的范围内。直径对纤维的力学性能具有大的影响,增加的直径会导致刚度更大的纤维。在打印期间,喷嘴和纤维相对于打印结构的平移会在纤维上产生侧向力。纤维位置的偏离取决于热区中的液态玻璃的粘度和表面张力以及打印速度。下图中示出打印喷嘴和挤出纤维的示意图。对于刚性较大的纤维,可以增加纤维供给喷嘴和热区之间的距离。因此,纤维直径、喷嘴设计和到热区的距离对打印精度/品质有大的影响。大的纤维直径和短的挤出纤维长度将减小打印期间的纤维偏离。增加纤维直径会降低打印机的分辨率。如果挤出中的纤维长度过短,则热区可能损坏纤维供给喷嘴。

[0081] 总偏转/偏离 $\delta$ 由下式给出:

$$[0082] \quad \delta = \frac{4FL^3}{4E\pi r^4},$$

[0083] 其中,F是打印过程期间的相对运动施加的保持力,L是挤出中的纤丝长度,E是纤丝材料的杨氏模量,r是纤丝的半径。理论上,在相同的加工条件下,直径为200 $\mu\text{m}$ 的纤丝的偏转是直径为125 $\mu\text{m}$ 的纤丝的偏转的四分之一。使用200 $\mu\text{m}$ 的纤丝直径和小于5mm的挤出纤丝长度,偏转为亚微米,可忽略不计。

[0084] 在玻璃3D打印中,玻璃纤维连续供给至1800至2200 $^{\circ}\text{C}$ 的热区。一种常见的方法是供给纯玻璃纤维。然而,由于大多数玻璃纤维是连同涂层一起生产的,因此在打印之前需要去除涂层以产生纯玻璃纤维。剥离涂层可以使用机械或化学手段(例如,使用硫酸、二氯甲烷)进行。剥离工艺限制了可打印玻璃纤维的总长度,即最大机械剥离小于几米,最大化学剥离小于十分之几米,这严重损害了3D打印过程的连续性和能力(体积)。由于在没有涂层的情况下纤丝可能会变脆,剥离所述涂层可能进一步削弱纤丝的力学强度,这带来额外的风险,因为打印期间的纤丝断裂将导致打印过程的严重中断。由于使用强酸(硫酸)或二氯甲烷(致癌)时涉及风险,因此使用化学方法是不优选的。

[0085] 另一种方法是直接供给涂覆的纤丝。带有保护层,可打印的纤丝长度被扩展到数千米范围。然而,由于纤丝通常被易燃聚合物涂覆,如丙烯酸类,这种方法可能由于高的打印温度而在纤丝上引起明火,从而导致打印失败,并可能损坏3D打印机。此外,标准涂层的厚度为约50 $\mu\text{m}$ ,对于玻璃3D打印来说太“厚”。直接燃烧“厚”涂层不是理想的方案,因为它可能会产生较多的燃烧副产物,更有可能留下影响打印体纯度的残留物,而且它不节能。

[0086] 我们的方法是生产具有薄的阻燃和自熄涂层的玻璃纤维。当使用 $\text{CO}_2$ 激光束将热区加热到非常高的温度时,涂层将在热区附近开始燃烧,即热区本身可用于去除涂层。当涂层是阻燃的,消除了明火的风险。一旦激光器和纤丝供给关闭,涂层的燃烧将停止。薄涂层将易于被烧掉。除了提高效率和减少环境影响之外,它还将减少燃烧副产物的产生。理想的涂层可以具有无毒的化学组成以进一步减少燃烧期间产生的有毒烟尘,例如不应含有卤素。

[0087] 用于增材制造的本发明纤丝提供了将薄涂层施加到玻璃纤维上的可能性,同时在(临时)储存和操纵期间仍然提供纤丝的机械和化学保护。可以通过热手段(加热/等离子体/激光照射)容易地去除涂层。涂层可以不含有毒成分或在燃烧时不产生有毒燃烧产物。涂层可以是阻燃和自熄的。

[0088] 根据本发明的增材制造方法可以用于生产玻璃的三维部件。所述方法包括将其上具有保护膜的玻璃纤维供给到加热源以去除所述保护膜并软化所述玻璃纤维,以及将所述软化的玻璃纤维施加到基底表面的步骤,其中所述保护膜由聚酰亚胺制成,其厚度为1 $\mu\text{m}$ 至50 $\mu\text{m}$ 。玻璃纤维的供给可以是连续的或不连续的。

[0089] 图2描绘了纤丝供给喷嘴120的侧视图。具有保护膜或保护层169的玻璃纤维160从所述纤丝供给喷嘴120延伸。从所述纤丝供给喷嘴120的出口到热区140的所述纤丝的长度由L表示,在热区处至少一个激光束击射在所述玻璃纤维160上。在各种示例性实施方案中,L可以大于10mm或小于5mm。在各种示例性实施方案中,长度L小于5mm。较大的L可能增加纤丝偏离,该纤丝偏离是所述纤丝160的尖端180的未偏离的中心部分到相同尖端180的偏

离的中心部分之间的距离。任何这样的偏离可导致所述纤丝相对于其在所述基底或打印体/物体的所述表面上的预期位置的不对准(misalignment),这进而可能导致有缺陷的三维制品和/或降低增材制造的精度。由于保护涂层是阻燃的和/或自熄的,在增材制造期间保护涂层169的小部分将停留在所述纤丝供给喷嘴出口120外部的纤丝上。在制造期间,所述剩余保护涂层的所述小部分的长度可以是至少十分之几毫米。

[0090] 图3a-c描绘了三种不同类型的具有保护涂层169的玻璃纤丝160,其可用于增材制造工艺。图3a描绘了单一组成(棒/纤维纤丝),其中该组成(玻璃类型)可以是高纯度氧化硅玻璃,例如熔凝氧化硅、熔凝石英(用于打印高纯度透明玻璃)。这些材料具有低的热膨胀系数,即不需要加热的打印板并且后期热退火并不总是必需的。氧化硅玻璃纤丝共掺杂有 $\text{GeO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 或F或这些的组合。复丝打印(与氧化硅玻璃纤丝一起)可用于产生具有设计的形状和折射率结构的3D打印体。示例可以是光纤预制件或不同光学部件的制造。氧化硅玻璃掺杂有诸如Er、Yb、Er/Yb的稀土氧化物,结合有另外的掺杂剂(例如 $\text{GeO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{B}_3\text{O}_3$ 、F)。这些纤丝可用于产生活性激光材料的3D打印体。硅酸盐、硼硅酸盐、铝硼硅酸盐和钠钙玻璃是标准类型的(较)低成本材料。由于较高的热膨胀系数,这些可能需要加热的打印板和后期热退火以减轻应力。

[0091] 图3b描绘了具有中心气孔162的玻璃纤丝160,即毛细管结构。这些毛细管纤丝可用于打印不同类型的玻璃/空气结构。如果向毛细管纤丝的内部施加压力控制,则在打印期间纤丝可以主动收缩/膨胀。所述气孔162的体积可以是所述玻璃纤丝160中的所述玻璃内容物的体积的10-70%。在所述玻璃纤丝160中,气孔162可以居中或不居中。在各种示例性实施方案中,所述玻璃纤丝160可以设置有多个气孔。

[0092] 图3c描绘了由氧化硅基组合物组成的玻璃纤丝160,其包含折射率调整掺杂剂(例如 $\text{GeO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{B}_3\text{O}_3$ 、F)的中央芯结构160'。这些芯/包层纤丝充当光波导,其可用于在不同类型的玻璃基底上打印光电路(optical circuit),用于电信、传感或生物医学应用。除玻璃基之外,其它芯材料包括半导体和合金,例如硅、锗等。

[0093] 可以向基底连续地供给纤丝,同时由单个或多个激光束产生的热区将它们结合在一起。基底和纤丝之间的相对运动处在计算机控制下,以便限定打印形状。

[0094] 通过单一沉积打印简单结构,诸如微球、柱状物、线条、圆和纳米锥等。还展示了打印自支撑模型/阵列。实现了复杂几何形状的多层打印。使用玻璃纤丝打印了中空模型(花瓶模式)和密集模型(100%填充)。总之,该玻璃纤丝适用于上述所有玻璃3d打印测试,并且性能类似于FDM系统中的塑料纤丝。

[0095] 阻燃和/或自熄保护膜169被施加到玻璃丝160的表面。

[0096] 本发明的可行改变

[0097] 本发明并不限于上文所述和附图中所示的实施方案,其主要具有说明和示例的目的。本专利申请旨在涵盖本文所述的优选实施方案的所有调整和变型,因此由所附权利要求书及其等同物的措辞来限定本发明。因此,可以在所附权利要求书的范围内以各种方式对设备进行改变。

[0098] 在本说明书和随后的权利要求书中,除非上下文另有要求,否则措辞“包含”以及诸如“包括”或“含有”的变体将被理解为暗示包括所述整数或步骤或者整数或步骤的组,但不排除任何其它整数或步骤或者整数或步骤的组。

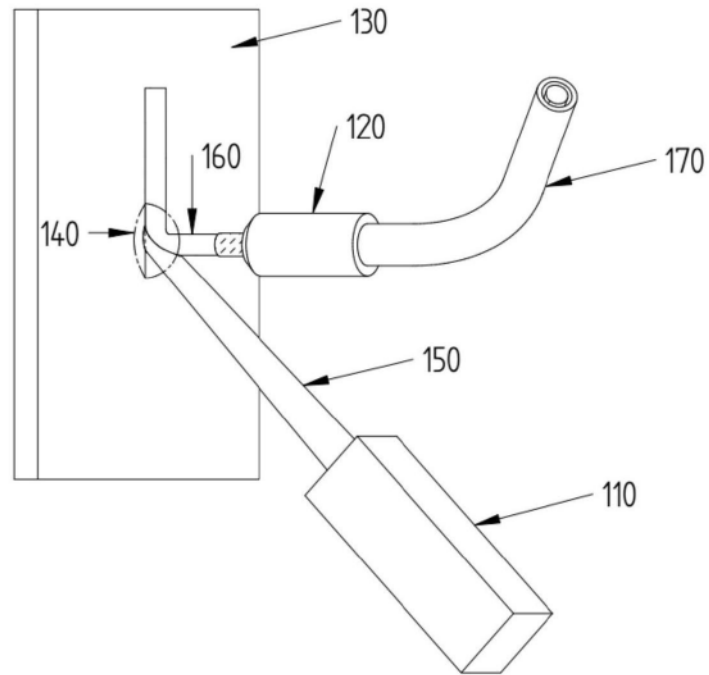


图1a

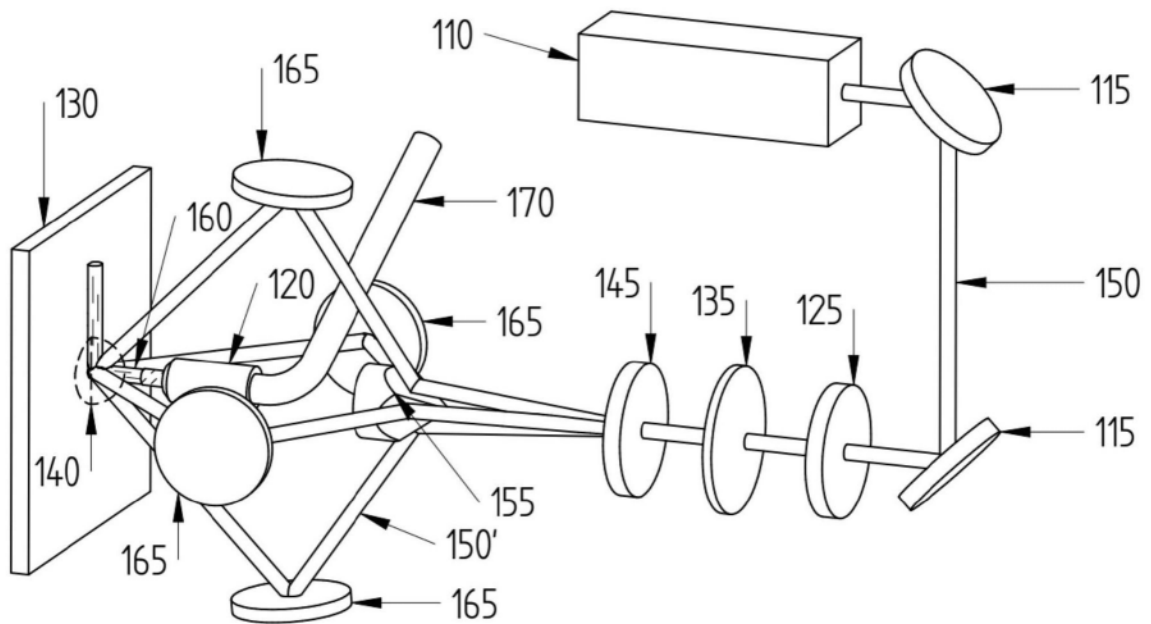
100

图1b

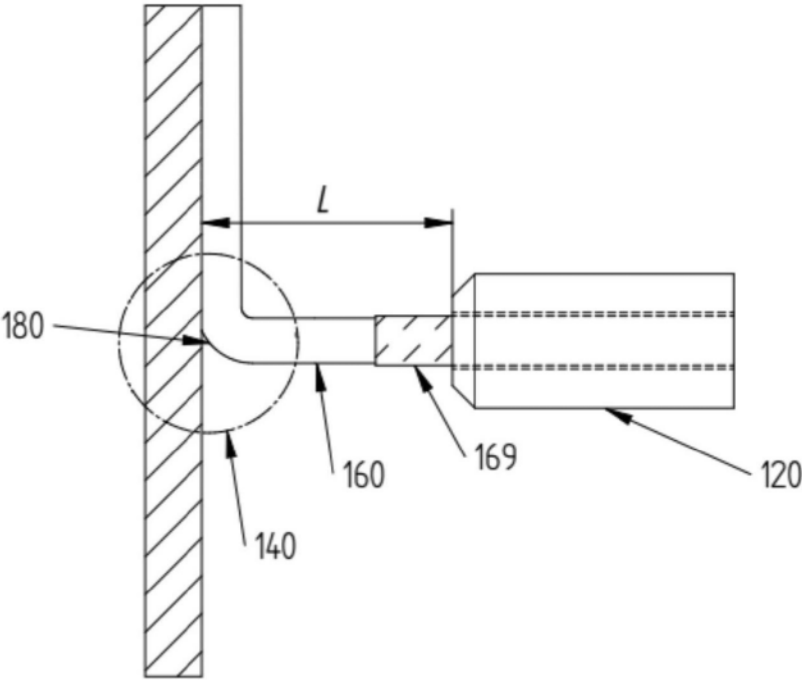


图2

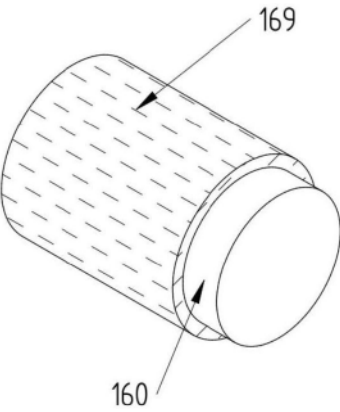


图3a

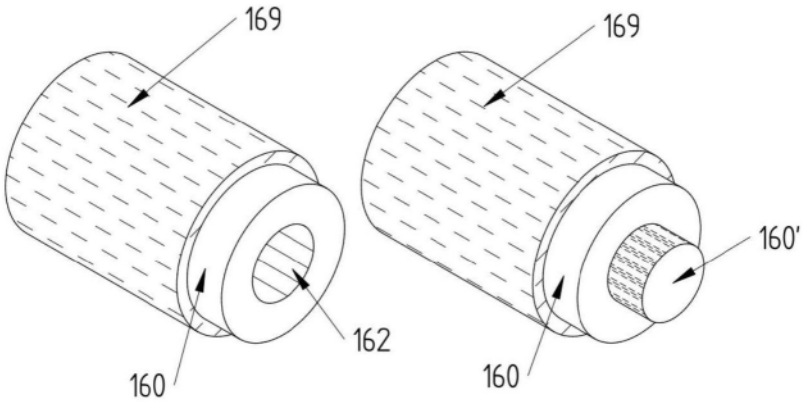


图 3b

图 3c