



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112424875 B

(45) 授权公告日 2024.07.09

(21) 申请号 201980041691.0

(22) 申请日 2019.06.20

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112424875 A

(43) 申请公布日 2021.02.26

(30) 优先权数据
62/688255 2018.06.21 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2020.12.21

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/US2019/038253 2019.06.20

(87) PCT国际申请的公布数据
W02020/005712 EN 2020.01.02

(73) 专利权人 博沃艾特核能公司
地址 美国北卡罗来纳州

(72) 发明人 W·E·拉塞尔二世 J·J·伯格曼

J·W·奇尔泰恩
C·D·格拉姆利奇 J·B·茵曼
M·P·勒瓦索尔 J·K·米勒
R·Z·齐格勒

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
72001

专利代理师 邹龙辉 王玮

(51) Int.Cl.

G21C 13/02 (2006.01)

G21C 15/22 (2006.01)

G21C 15/02 (2006.01)

G21C 15/04 (2006.01)

G21C 3/40 (2006.01)

(56) 对比文件

CA 2673147 A1, 2008.11.13

CN 104094358 A, 2014.10.08

审查员 马梨

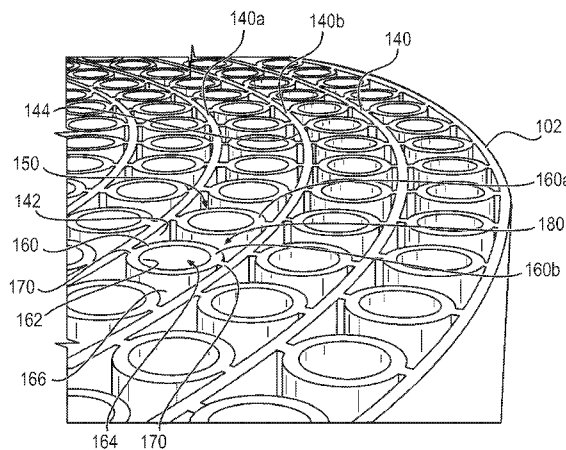
权利要求书3页 说明书13页 附图20页

(54) 发明名称

通用倒置反应堆和用于通用倒置反应堆的设计和制造的方法

(57) 摘要

裂变反应堆具有：包围反应堆空间的壳体，中央纵向通道在该反应堆空间内；多个轴向延伸的环，其中相邻环限定环状圆柱空间，第一多个主要轴向管周向位于该环状圆柱空间内。周向相邻的主要轴向管被所述多个辅助通道中的一个隔开并且多个梁腹将所述多个主要轴向管的至少一部分连接到相邻结构。可裂变核燃料成分位于所述多个辅助通道中的至少一些中并且主要冷却剂通过主要轴向管中的至少一些。增材和/或减材制造技术为燃料装载反应堆空间产生一体的和单体式结构。在制造和建成期间，能够通过使用计算平台分析反应堆设计，该平台集成和分析来自制造期间的现场监测数据。



1. 一种裂变反应堆,包括:

包围具有纵向轴线的反应堆空间的壳体;

轴向柱体,其包括限定具有轴线的中央纵向通道的内直径表面,所述轴线与所述反应堆空间的所述纵向轴线在同一位置;

位于所述反应堆空间内并且相对于所述轴向柱体同心定位的多个轴向延伸的环,其中所述多个轴向延伸的环径向隔开,从而针对任意两个相邻的轴向延伸的环而言,均形成径向向内的相邻环和径向向外的相邻环,并且其中所述径向向内的相邻环的外直径表面和所述径向向外的相邻环的内直径表面限定环状圆柱空间;

周向地位于所述环状圆柱空间内的多个主要轴向管,其中每个主要轴向管包括外直径表面以及形成主要通道的内直径表面;

多个梁腹,其中所述多个主要轴向管中的每个的所述外直径表面通过第一梁腹被连接到所述径向向内的相邻环并且通过第二梁腹被连接到所述径向向外的相邻环;

在所述环状圆柱空间内的多个辅助通道,其中所述多个主要轴向管中的周向相邻的主要轴向管被所述多个辅助通道中的一个隔开;以及

位于所述多个辅助通道中的至少一些辅助通道中的可裂变核燃料成分。

2. 根据权利要求1所述的裂变反应堆,其中位于所述多个辅助通道中的至少一些辅助通道中的所述可裂变核燃料成分形成一组可裂变核燃料元件,所述可裂变核燃料元件在整个所述裂变反应堆中体积相同。

3. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,其中在整个所述裂变反应堆中,所述主要通道的径向截面面积与所述辅助通道的径向截面面积的比是恒定的。

4. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,其中所述辅助通道的内表面包括所述周向相邻的主要轴向管的所述外直径表面的部分、与所述周向相邻的主要轴向管中的每个相关联的所述第一梁腹和所述第二梁腹的表面以及所述径向向内的相邻环的所述外直径表面的部分和所述径向向外的相邻环的所述内直径表面的部分。

5. 根据权利要求4所述的裂变反应堆,其中所述可裂变核燃料成分与所述辅助通道的所述内表面处于热传递接触。

6. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,其中主要冷却剂能够流动通过被所述多个辅助通道中的一个分开的所述周向相邻的主要轴向管中的每个的所述主要通道,所述辅助通道包含所述可裂变核燃料成分。

7. 根据权利要求1所述的裂变反应堆,其中所述周向相邻的主要轴向管非接触地分布在所述环状圆柱空间内。

8. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,所述多个主要轴向管包括第一多个主要轴向管,其周向地位于径向最内侧的轴向延伸的环的内直径表面与所述轴向柱体的外直径表面之间,其中所述第一多个主要轴向管中的每个的所述外直径表面通过第一梁腹连接到所述轴向柱体的所述外直径表面并且通过第二梁腹连接到所述径向最内侧的轴向延伸的环。

9. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,所述多个主要轴向管包括第二多个主要轴向管,其周向地位于所述壳体的内直径表面与径向最外侧的轴向延伸的环的外直径表面之间,其中所述第二多个主要轴向管中的每个的所述外直径表面通过第一梁腹连接到所述径向最外侧的轴向延伸的环的所述外直径表面并且通过第二梁腹连接到所述壳体的所述内

直径表面。

10. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,其中所述壳体、所述轴向柱体、所述多个轴向延伸的环、所述多个主要轴向管和所述多个梁腹是一体的、单体式结构。

11. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,其中所述壳体、所述轴向柱体、所述多个轴向延伸的环、所述多个主要轴向管和所述多个梁腹由金属合金形成。

12. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,包括围绕所述壳体的外直径表面的反射器。

13. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,包括慢化剂、控制棒和检测器中的至少一个,其位于一个或多个主要通道中。

14. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,其中所述环状圆柱空间中的每个中的多个主要轴向管相对于所述反应堆空间的所述纵向轴线具有六重旋转对称性。

15. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,其中能够从所述裂变反应堆的外表面通达所述轴向柱体的所述中央纵向通道和所述多个主要轴向管中的一个或多个的所述主要通道中的一个或多个。

16. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,其中所述多个主要轴向管具有与所述反应堆的所述纵向轴线平行的纵向轴线。

17. 根据权利要求16所述的裂变反应堆,其中所述多个主要轴向管的形成所述主要通道的所述内直径表面根据相对于所述多个主要轴向管的所述纵向轴线的轴向位置而变化。

18. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,其中所述多个主要轴向管是腔室化的。

19. 根据权利要求1或2所述的裂变反应堆,其中所述辅助通道的与所述纵向轴线垂直的截面具有单叶双曲面的截面形状。

20. 根据权利要求13所述的裂变反应堆,其中,所述检测器包括温度检测器和辐射检测器中的至少一者。

21. 一种制造根据权利要求1至20中任一项所述的裂变反应堆的方法,包括:

应用预测和因果分析来制备所述裂变反应堆的模型;

使用增材制造技术在逐层的基础上制造所述裂变反应堆;

在制造期间,使用机器视觉和加速处理对所述裂变反应堆的制造进行现场监测;

分析来自所述现场监测的数据;以及

基于所分析的数据调整所述裂变反应堆的所述制造。

22. 根据权利要求21所述的方法,还包括:

制备所制造的裂变反应堆的数字变型;以及

基于对所述所制造的裂变反应堆的所述数字变型的分析关联所述所制造的裂变反应堆的特性。

23. 一种制造根据权利要求1至20中任一项所述的裂变反应堆的方法,包括:

应用预测和因果分析来制备所述裂变反应堆的模型;

使用减材制造技术在逐层的基础上制造所述裂变反应堆;

在制造期间,使用机器视觉和加速处理对所述裂变反应堆的制造进行现场监测;

分析来自所述现场监测的数据;以及

基于所分析的数据调整所述裂变反应堆的所述制造。

24. 根据权利要求23所述的方法,还包括:

制备所制造的裂变反应堆的数字变型;以及
基于对所述所制造的裂变反应堆的所述数字变型的分析关联所述所制造的裂变反应堆的特性。

通用倒置反应堆和用于通用倒置反应堆的设计和制造的方法

[0001] 相关申请

[0002] 本申请在35 U.S.C. §119(e)下基于且要求于2018年6月21日提交的美国临时专利申请号62/688,255的优先权,所述美国临时专利申请的全部内容通过引用并入本文。

技术领域

[0003] 本公开总体上涉及裂变反应堆和与裂变反应堆中的活性反应堆空间有关的结构。具体地,公开的裂变反应堆和反应堆空间包括被装载到用于冷却剂流动的通道之间的空间中的可裂变核燃料,并且在尺寸上可扩展,同时不管反应堆尺寸如何,可裂变核燃料的每个位置在截面积和/或体积上均保持相同。诸如控制棒、控制棒驱动器和慢化剂的支持和辅助设备并且在尺寸上也可扩展。本公开也涉及制造这种反应堆和结构的方法,具体地通过增材制造技术从而为装载燃料的反应堆空间产生一体的且单体式结构,并且为这种反应堆和结构的制造提供了预测性质量保证。

背景技术

[0004] 在之后的讨论中,参考特定结构和/或方法。然而,下述参考不应该被解释为承认这些结构和/或方法构成现有技术。申请人明确保留证明这种结构和/或方法不构成对抗本发明的现有技术的权利。

[0005] 传统的裂变反应堆利用被置于燃料元件内部的可裂变核燃料,诸如铀基燃料,该燃料元件能够是圆管、板或六边形形状。这些燃料元件被收集且设置到燃料组件中,该燃料组件是核反应堆的芯的基础元件。常规的燃料组件10(见图1)是例如燃料元件12(其包含燃料14和可燃毒物)、燃料组件结构的机械支撑件、定位格架16(其确保部件间距以及燃料元件的引导)和例如用于控制棒18或芯内仪器20等的非燃料管的复杂布置结构。根据设计,反应堆容器可以具有几十个燃料组件10(也被称为燃料束),每个燃料组件可以包含200个或更多个燃料元件12。

[0006] 在芯内,主要冷却剂(诸如水)流动通过且/或围绕燃料组件10并且既为裂变反应提供慢化剂(在水冷式反应堆的情况下)又为燃料元件中的裂变反应所产生的热提供热提取介质。被加热的主要冷却剂在主要循环中循环(意味着那些系统经受主要冷却剂、与主要冷却剂接触或者以其他方式暴露于主要冷却剂)并且传统上将热能传递到辅助系统,在此热激发流体被产生并且流动到涡轮机,这进而能够被用于使得发电机旋转。

[0007] 结构的复杂性扩展到核反应堆中的其他系统,包括主要循环的各个部件,根据设计,所述部件诸如是管道系统、泵、仪器、热交换器和蒸汽发生器。因此,燃料元件、燃料组件、反应堆芯和反应堆系统的构造均经受严格的设计和制造标准以及大量的制造前、制造期间和制造后控制,诸如与采购、搬运、安装、检查和测试有关的控制。

[0008] 因此,将有利的是具有这些复杂结构、具体地燃料元件和燃料组件的设计,其改进这种复杂结构的设计和制造以及质量保证中的任一者。

发明内容

[0009] 总体来说,本公开涉及一种裂变反应堆,该反应堆将可裂变核燃料放置在反应堆芯内、在用于主要冷却剂、慢化剂、控制棒、急停棒和/或辅助设备的非燃料管之间和周围的位置中。可裂变核燃料管和非燃料管的这种放置与位于管内的可裂变燃料以及在燃料管之间和周围流动的主要冷却剂的常规布置结构相反(或颠倒(inverted from))。

[0010] 本文公开的实施例包括裂变反应堆,其包括:包围反应堆空间的壳体,该反应堆空间具有纵向轴线;和轴向柱体,其包括限定中央纵向通道的内直径表面,该中央纵向通道具有与反应堆空间的纵向轴线在同一位置(co-located)的轴线。多个轴向延伸的环位于反应堆空间内并且相对于轴向柱体同心定位。所述多个轴向延伸的环径向隔开,从而针对任意两个相邻的轴向延伸的环而言,均形成径向向内的相邻环和径向向外的相邻环。径向向内的相邻环的外直径表面和径向向外的相邻环的内直径表面限定环状圆柱空间。裂变反应堆包括第一多个主要轴向管,其周向地位于每个环状圆柱空间内。每个主要轴向管包括外直径表面以及形成主要通道的内直径表面。多个梁腹(webbing)将所述多个主要轴向管中的至少一部分(替代性地全部)连接到相邻结构,诸如所述多个主要轴向管中每个的外直径表面通过第一梁腹连接到径向向内的相邻环并且通过第二梁腹连接到径向向外的相邻环。裂变反应堆包括在每个环状圆柱空间内的多个辅助通道,其中周向相邻的主要轴向管被所述多个辅助通道中的一个隔开。可裂变核燃料成分位于所述多个辅助通道中的至少一些中。

[0011] 本文所公开的实施例也包括制造裂变反应堆的方法。方法的实施例应用预测和因果分析来制备裂变反应堆的模型,使用增材制造技术在逐层的基础上制造裂变反应堆,在制造期间,使用机器视觉和加速数据处理对裂变反应堆的制造进行现场监测,分析来自现场监测的数据,以及基于实时分析数据调整裂变反应堆的制造。在一些情况下,制造设备(特别是增材制造设备)具有有限的制造体积,这会影响任何单个单体式制造件的最大尺寸(尽管重新定位技术可能会适应这种单体式制造件尺寸的增加)。因而,本文所公开的例如用于裂变反应堆(或者其他结构)的制造方法能够适于整体地制造结构或者分段制造以用于后续的组装。

[0012] 方法的实施例也能够制备所制造的裂变反应堆的数字变型(digital version);并且基于对所制造的裂变反应堆的数字变型的分析关联所制造的裂变反应堆的特性。

[0013] 进一步,本文所公开的实施例能够被用于鉴定设计并且验证裂变反应堆以及裂变反应堆的各个部件的可接受的制造。例如,本文所公开的制造裂变反应堆的方法也能够被用于确定和确认所构建结构的性能和完整性。因此,方法能够用作一种新的手段,以便由第三方(例如,政府监管机构、政府机构和部门、诸如电力公司的商业实体等等)来鉴定反应堆,或者提供验收标准信息。

[0014] 尽管所公开的反应堆和芯具有复杂的机械几何构型,但是元素金属或金属合金或陶瓷(包括使用例如颗粒、线材或粉末形式的这些材料)的一体和迭代制造(诸如3D打印),使得倒置反应堆(inverted reactor)更容易制造。其他优点包括提高功率重量比、通过例如添加呈环或环间距形式的附加尺寸单元而可扩展。

附图说明

[0015] 当结合附图阅读时能够更好地理解上述发明内容以及实施例的以下具体实施方

式。应该理解的是所示实施例不限于示出的精确布置结构和手段。

[0016] 图1示出具有燃料元件的常规燃料组件,该燃料组件包括可裂变核燃料棒和非燃料管并且主要冷却剂流通过和/或围绕所述管。

[0017] 图2A示出示例裂变反应堆的透视性轴向截面图,并且图2B示出包围反应堆空间的示例壳体的放大的透视性径向截面图。

[0018] 图3A示出裂变反应堆的一部分的透视性径向截面图,并且图3B示出图3A的一部分的放大透视性径向截面图。

[0019] 图4示出裂变反应堆的一部分以及示例燃料元件的透视性径向截面和轴向剖切视图。

[0020] 图5A是示出位于多个主要通道中的支撑和辅助设备的示意性透视图。

[0021] 图5B和图5C示出了呈棒形式的中子慢化材料的示例。

[0022] 图5D是示出控制棒系统及其相对于裂变反应堆的部分剖切视图的位置的示意性透视图。

[0023] 图6以透视性截面图示出了裂变反应堆的示例性实施例中的控制棒和慢化剂的示例性数量和分布。

[0024] 图7是示出裂变反应堆的示例性实施例的径向截面的一部分的示意图,所述裂变反应堆结合了空间或间隙,用于减小由于可裂变核燃料的裂变而引起的元素嬗变产生的应力。

[0025] 图8示出了所公开的裂变反应堆的示例性实施例的六重对称性。

[0026] 图9总结了用于制造在本文公开的裂变反应堆和燃料装载反应堆空间的一体和单体式结构的增材制造方法的实施例。

[0027] 图10A和图10B示出了与用于研究裂变反应堆的实施例的各方面的通用倒置反应堆计算平台(“UIRCP”)的各方面相关联的截屏。

[0028] 图11A和图11B示出了示例2中所用的用于与几何有关的变量的几何结构和尺寸的细节。

[0029] 图12示出了在示例2中由通用倒置反应堆计算平台过程得出的实体CAD模型的示例。

[0030] 图13是在示例2中由通用倒置反应堆计算平台过程得出的温度等值线图的示例。

[0031] 图14A-C示出了与裂变反应堆的示例性实施例相关联的温度和中子物理学的分布。

具体实施方式

[0032] 图2A示出了示例性裂变反应堆的透视性轴向截面图。裂变反应堆100包括容纳可裂变核燃料成分(其示例被示为图2B中的可裂变核燃料成分104)的壳体102、可移动地穿透壳体102和反应堆空间108的控制棒和辅助设备106、围绕壳体102的外直径表面的反射器110、用于主要冷却剂流112流入和流出壳体102的管以及安全罩114。图2B示出了图2A的一些特征的放大透视性径向截面和轴向剖切视图。为了说明和清楚起见,图2A-B中没有示出裂变反应堆和裂变发电厂的其他特征,诸如普通技术人员已知的主要系统和辅助系统的其他特征。

[0033] 图3A示出了裂变反应堆100的一部分的透视性径向截面图。所示壳体102具有从反应堆空间108的第一端延伸到第二端的纵向轴线120。壳体102包绕反应堆空间108,在这种实施例中,该反应堆空间在径向和轴向二者上具有与蜂窝结构类似的内部特征。例如,在壳体102内,存在轴向柱体130,其包括限定具有轴线134的中央纵向通道的内直径表面132,该轴线134与反应堆空间108的纵向轴线120处于同一位置。

[0034] 多个轴向延伸的环140也位于反应堆空间108内,所述轴向延伸的环140相对于轴向柱体130被同心地定位。参考图3B,其示出了图3A的一部分的放大透视性径向截面图,所述多个轴向延伸的环140中的至少一些径向分开,并且当考虑任意两个轴向延伸的环140时,其形成径向向内的相邻环140a和径向向外的相邻环140b。径向向内的相邻环140a的外直径表面142和径向向外的相邻环140b的内直径表面144限定圆柱空间150。

[0035] 多个主要轴向管160周向地位于环状圆柱空间150内。每个主要轴向管160包括形成主要通道164(主要用于流动)的内直径表面162以及外直径表面166。多个梁腹170将所述多个主要轴向管160中的每个的外直径表面166在第一情况下连接到径向向内的相邻环140a且在第二情况下连接到径向向外的相邻环140b。在一些实施例中,轴向管160被梁腹170连接到径向向内的相邻环140a和径向向外的相邻环140b中的至少一个、替代性地两个;在另一些实施例中,仅一些轴向管160被梁腹170连接到径向向内的相邻环140a和径向向外的相邻环140b中的至少一个、替代性地两个。使用梁腹170的数量、位置和频率能够基于通过使用梁腹170产生连接而提供给整体设计的尺寸整体性而变化。

[0036] 主要轴向管(即,主要流动通道)的内直径表面能够根据轴向位置是一致的或者能够变化。例如,在一些实施例中,形成主要通道的主要轴向管的内直径表面能够根据相对于主要轴向管的纵向轴线的轴向位置而变化,例如,以便影响主要冷却剂的流动性质。同样地例如,在另一些实施例中,主要通道被腔室化(chambered)成沿着轴向长度形成不同面积或区域。这些区域能够被用于容纳器械和/或其他设备或材料以便监测或者影响反应堆性能。

[0037] 在一些实施例中,可从裂变反应堆的外表面通达轴向柱体130的中央纵向通道以及主要通道164中的一个或多个。当可通达时,中央纵向通道和/或主要通道能够被用于制备辐照样品,诸如辐照医疗设备、医用同位素、科学同位素等。

[0038] 多个辅助通道180也位于反应堆空间108内。参考图3B,所述多个辅助通道180位于环状圆柱空间150内并且隔开周向相邻的主要轴向管160a、160b。例如,辅助通道180的内表面包括周向相邻的主要轴向管160a、160b的外直径表面166的部分、与周向相邻的主要轴向管160a、160b中的每个相关联的第一梁腹170和第二梁腹170的表面以及径向向内的相邻环140a的外直径表面142的部分和径向向外的相邻环140b的内直径表面144的部分。通常,周向相邻的主要轴向管160a、160b非接触地分布在圆柱空间150内,从而形成辅助通道180。

[0039] 可裂变核燃料成分190也位于反应堆空间108内。例如且如图4中示意性示出的,可裂变核燃料成分190能够位于所述多个辅助通道180中的至少一些中。可裂变核燃料成分190与辅助通道180的内表面中的至少一些(如果不是全部的话)热传递地接触。在操作期间,主要冷却剂可流动通过被所述多个辅助通道180中的一个分开的周向相邻的主要轴向管160中的每个的主要通道164,所述辅助通道180包含可裂变核燃料成分190以实现热传递。在所示实施例中,辅助通道的与纵向轴线垂直的截面具有单叶双曲面(a hyperboloid of one sheet)的截面形状,但是也可以使用其他截面形状。适当的可裂变核燃料成分包括

浓缩程度低于20%的铀氧化物、含10 wt.%钼的铀(U-10Mo)、铀氮化物(UN)和其他稳定的可裂变燃料化合物,包括金属基可裂变燃料和陶瓷基可裂变燃料。

[0040] 如本领域已知的,在可裂变核燃料的裂变反应期间,铀的分解产生处于不同相(气体、液体或固体)的多种可替代元素。由于这里公开的包含可裂变核燃料成分190的辅助通道180的设计,由于元素的这种嬗变,辅助通道180的内部压力的增加会将辅助通道180(即燃料腔室)置于压缩力并提高了抗故障能力。当发生热膨胀时也会看到这种现象。相比之下,传统的核反应堆以铀作为燃料,所述铀位于通常由锆制成的管内部,元素的嬗变增加内部管压力,从而在管道系统上施加能够导致诸如开裂的结构故障的环向应力(一种环向拉应力的形式)。同样地,与承受压应力的材料相比,承受拉应力的材料易受不同类型的腐蚀机制的影响,诸如应力腐蚀开裂。进一步地,氢化物形成金属(诸如锆)易发生氢脆,并且会变脆和断裂,当相关零件处于拉应力(与压应力相比)下时,所述变脆和断裂会加剧。

[0041] 应该注意的是,在图3A中所示的实施例中,最内侧的多个主要轴向管不通过轴向延伸的环140与轴向柱体130隔开。因此,反应堆100包括周向地位于径向最内侧的轴向延伸的环140的内直径表面与轴向柱体130的外直径表面之间的多个主要轴向管160。类似于结合图3B所述,这些多个主要轴向管中的每个的外直径表面被第一梁腹170连接到轴向柱体130的外直径表面并且被第二梁腹170连接到径向最内侧的轴向延伸的环140。

[0042] 也应该注意的是,在图3A中所示的实施例中,最外侧的多个主要轴向管不通过轴向延伸的环140与壳体102隔开。因此,反应堆100包括周向地位于壳体102的内直径表面与径向最外侧的轴向延伸的环140的外直径表面之间的多个主要轴向管160。类似于结合图3B所述,这些多个主要轴向管中的每个的外直径表面被第一梁腹170连接到径向最外侧的轴向延伸的环140的外直径表面并且被第二梁腹170连接到壳体102的内直径表面。

[0043] 各种支撑和辅助设备能够位于一个或多个主要通道164中。例如,慢化剂、控制棒和科学器械(诸如温度传感器或者辐射检测器)中的至少一个能够位于一个或多个主要通道中。图5A是多个主要通道164的示意图,呈控制棒200(诸如铪控制棒)和慢化剂210(诸如氢化锆中子慢化剂)形式的支撑和辅助设备位于所述主要通道164中。控制棒200也能够包含中子毒物,其吸收中子并且能够用来调节核反应堆的临界状态。另外,毒物材料能够吸收足够的中子来关闭裂变反应堆100(例如,当控制棒200被完全插入到反应堆空间108中时),或者能够轴向定位成维持裂变反应堆100的临界状态(例如,当控制棒200从反应堆芯109抽出一段距离以允许连续裂变链式反应时)。在一些实施例中,慢化剂210被流动He冷却并采用三翼设计(tri-fin design)使其稳定。任意适当数量的控制棒200和慢化剂210能够被使用并适当地分布在整个反应堆空间108中以便获得所需通量分布、功率分布和操作分布中的一个或多个。在示例性实施例中,控制棒200带螺纹,这有助于节省轴向空间、最大化控制棒直径并且允许直接辊子螺母接触以便进行可靠的SCRAM操作。所有或部分控制棒200可由独立马达单独控制,以提供分立反应性控制和/或功率整形。

[0044] 在一些实施例中,具有一个或多个轴向凸起的呈棒形式的中子慢化材料的插入物能够位于主要通道164中。图5A和图5B示出了在主要通道164中的呈棒210的形式的这种中子慢化材料的示例。棒210包括一个或多个翼片212或其他凸起,其有助于维持在主要通道164的内直径表面与慢化剂棒210的外表面(或至少大多数外表面)之间的一致间隙214。翼片/凸起212能够沿着棒210的长度轴向延伸。这种设计与气体冷却的反应堆特别相关,在气

体冷却的反应堆中,间隙214允许气体充分流动以便例如既为空间反应堆产生推力或驱动闭环发电系统,又冷却慢化材料。慢化剂材料也用于热化中子,从而产生更具有中子效率的芯。

[0045] 各个慢化剂棒能够有利地被插入到芯中的任意数量的所需位置中、能够根据需要被独立地更换或维修,并且允许在制造芯期间形成较大直径的冷却剂孔。

[0046] 慢化剂棒210也可以采取环的形式以允许附加冷却或适应控制棒200或者其他材料的插入,诸如在图5C中所示的慢化剂棒210的替代性实施例中所示。包层材料也可以用于氢化材料,以限制或防止氢(中子慢化的关键组分)迁移离开金属。包层也能够被用作慢化剂材料和冷却剂气体之间的屏障。

[0047] 如讨论图2A时所述,裂变反应堆100包括可移动地穿透壳体102和反应堆空间108的控制棒。控制棒(诸如控制棒200)的定位和操作被控制棒系统220(见图5D)控制。控制棒系统220的实施例包括三个主要物品:被用于将控制棒200移入和移出反应堆空间108的控制棒驱动马达230;被连接到控制棒200的螺纹驱动轴240,其将控制棒200驱动进入和离开反应堆空间108;以及控制棒200,其通常是行进进入和离开主要通道164的圆柱中子吸收毒物。驱动控制棒200进入和离开反应堆空间108通常通过这样来执行:旋转位于控制棒驱动马达内部并连接到螺纹驱动轴的螺纹螺母,使得内部螺纹螺母的旋转导致控制棒200的平移运动,即在纵向方向上的平移运动。

[0048] 在一些应用中,诸如空间反应堆,裂变反应堆及其部件的大小和重量被限于当这样的系统被发射到空间中时导致的重量/成本代价。因此,控制棒系统的另一些实施例试图简化它们的设计,因为一旦发射或一旦它们已经操作则不能执行反应堆部件的维护或者更换。因此,有益的是减小控制棒系统中的物品的大小、重量和复杂性。虽然不一定限制大小和重量,但由于减少维护和减少部件更换,所以地面反应堆可以从类似的设计改进中获益。为了解决这样的设计问题,控制棒系统的实施例能够通过用中子吸收材料来制造螺纹驱动轴本身而结合螺纹驱动轴和控制棒毒物。当通过使用中子吸收材料来制造螺纹驱动轴时,能够减少或从裂变反应堆省去单独的控制棒毒物。

[0049] 在图5A中的控制棒200示出了这种螺纹控制棒的示例性实施例,其由中子吸收材料制造或者以其他方式将中子吸收材料结合到其结构中。能够被用于制造控制棒(或者以其他方式结合到其结构中)的适当的材料包括:铍、钆、不锈钢、钨、氧化铝基质中的碳化硼($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$)、钼和钽。虽然能够使用各种高温金属中子吸收材料中的任何一种或多种,但是当前想到的是铍将被用作中子吸收材料。

[0050] 图6以透视性截面图示出了裂变反应堆的示例性实施例中的控制棒200和慢化剂210的示例性数量和分布。

[0051] 如上文讨论的,元素的嬗变会增加与可裂变核燃料所占据的空间相关联的内部压力。为了减少这样的内部压力,裂变反应堆的实施例能够将柔性设计到裂变反应堆的部件中以减少产生的应力。例如,代替连续体积的燃料,公开的裂变反应堆的实施例能够包括在辅助通道180内的可裂变核燃料成分的各区段之间或者在可裂变核燃料成分190本身内的空间、间隙、孔或其他开口。这种空间或者间隙的一种示例被示于图7中,其中一个或多个间隙250被包括在可裂变核燃料成分190中。间隙250的示例性位置包括在可裂变核燃料成分190和梁腹170之间(见区域252)以及在可裂变核燃料成分190的主体中(见区域254)。包含

间隙的设计中的应力建模显示,相对于没有间隙的区域,在具有间隙的区域中,活性反应堆空间108中的应力较低。另外,减小了在壳体102中的整体环向应力。此外,可裂变核燃料成分190显示出与形成辅助通道180的表面和结构更好的界面连接,从而导致更好的热传递性能。例如,已经表明,将间隙250包括到设计中会改善与所述多个主要轴向管160中的每个的外直径表面166的接触(与没有这样的间隙250的设计相比),这有助于改进在可裂变核燃料成分190与流动通过由主要轴向管160的内直径表面162形成的主要通道164的主要冷却剂之间的热传递。

[0052] 在一些实施例中,裂变反应堆100是气体冷却的核反应堆的芯,其中经由流动通过在反应堆空间108中的孔来发生热传递,所述孔诸如是图3A-B、图4和图5A中所示的主要通道164,其大小被制成允许从实心反应堆芯进行高效热传递。在气体冷却的核反应堆的实施例中,主要冷却剂从反应堆芯去除热,这进而加热气体。被加热气体之后能够像在热核火箭中那样用于推力,或者用于驱动闭环发电系统。为了在可裂变核燃料中生成被传递到主要冷却剂的热,核反应堆依赖于中子慢化材料来使裂变过程中释放的中子热化或变慢。需要中子慢化以维持芯中的核链式反应且因此维持热的产生。水冷却的反应堆依赖水来既冷却又慢化中子种群;但是,气体冷却的反应堆需要附加材料来进行慢化。使用附加慢化材料来使中子热化能够允许减少燃料的量,且因此减少裂变反应堆的重量,因为热化中子更有效地分裂裂原子。

[0053] 在一些实施例中,至少包括壳体、轴向柱体、所述多个轴向延伸的环、所述多个主要轴向管和所述多个梁腹的裂变反应堆的特征是一体的单体式结构。换言之,裂变反应堆的这些特征例如通过增材制造过程被一体成形。合适增材制造过程的示例利用3D打印金属合金,诸如含钼金属合金、锆合金-4或哈氏合金X,以形成所提到的结构特征。在另一些实施例中,当采用了原材料中含有多种金属的适当的多材料增材制造过程时,可裂变核燃料成分能够被包括在一体的单体式结构中。当采用了原材料中含有多种金属的适当的多材料增材制造过程时能够被使用的其他合金包括:钢合金、锆合金和钼-钨合金(用于壳体);钨合金(用于反射器);和不锈钢(用于安全罩)。也能够利用粉末原材料。

[0054] 这里示出和描述的反应堆相对于反应堆空间的纵向轴线具有六重旋转对称性。例如且参考图8,能够看到,反应堆空间108内的类似特征相对于反应堆空间的纵向轴线120以六重旋转对称性设置。这种六重旋转对称性的示例被示于图8,其被重叠在裂变反应堆的示例性实施例的径向截面图上。例如,在针对这些特征的对应圆柱空间150中,第一个六重旋转对称性300被示于控制棒200之间;第二个六重旋转对称性310被示于慢化剂210之间,和第三个六重旋转对称性320被示于所述多个主要轴向管160之间。

[0055] 应该注意的是,反应堆空间108(以及扩展地,反应堆100)可以通过增加或减去一个或多个轴向延伸的环140和本文公开的相关特征(诸如主要轴向管160)来缩放,只要保持相对于反应堆空间的纵向轴线具有基本六重旋转对称性即可。例如,径向构造应该成以6为因子几何级数地递增,例如1、6、12、18、24、30、36个棒等等。这允许包含可裂变核燃料的每个辅助通道具有相同体积而不管在反应堆空间108中的位置如何,并且有助于在可裂变核燃料、反应堆空间的材料和主要冷却剂之间的一致且优化的热传递。因此,例如,位于所述多个辅助通道形中的至少一些中的可裂变核燃料成分形成一组可裂变核燃料元件,这些元件在整个裂变反应堆中体积相同。也例如,在整个裂变反应堆中,主要通道的径向截面面积

与辅助通道的径向截面面积的比是恒定的(在一个或多个主要通道和一个或多个辅助通道之间做考虑)。

[0056] 增材制造技术(诸如利用多种原材料的3D打印技术)能够被用于制造本文所公开的裂变反应堆和燃料装载反应堆空间的一体且单体式结构。例如,增材制造技术产生复杂几何构型,并且当与现场传感器、机器视觉图像和人工智能相结合时,允许调整制造质量,因为部件是在逐层累加的基础上构建的(通常,这些层是50微米的量级),并且为这种反应堆和结构的制造提供了预测性的质量保证。

[0057] 用于制造本文公开的裂变反应堆和燃料装载反应堆空间的一体且单体式结构的增材制造技术包括以下步骤:(a) 预测和因果分析,(b) 在结构的逐层制造期间,结合机器视觉和加速处理的现场监测;(c) 结合机器学习组件的自动分析;(d) 对所构建的结构的数据表示(本文也称为“数字孪生”)的虚拟检查。图9总结了用于制造本文公开的裂变反应堆和燃料装载反应堆空间的一体和单体式结构的增材制造方法400。

[0058] 方法400包括预测和因果分析410,其中现有和实验数据被用于确定初始关键质量特性(CTQ)因子并且提供对初始机器学习算法的训练。机器学习算法的初始输入数据能够是有机开发的、由第三方提供的、或基于历史数据集(诸如,开源和/或基于已获取了增材制造技术的先前经验的操作和实验,其记录为与当前增材制造过程相关的潜在特征和观察结果)中的一个或多个。在每种情况下,初始机器学习算法是制造过程中每个步骤的算法表示,也是理想最终结构的算法表示。附加的复杂性可以增加到初始机器学习算法,例如,通过包括输入、输出、诸如环境条件的制造条件、供应质量等的附加变量。虽然仅应用于提到的初始输入数据的算法有助于描述反应堆产品的最终关键质量特性(CTQ)因子,但预期这些算法不足以对已制造产品进行鉴定。

[0059] 适用于预测和因果分析410步骤的数据科学方法包括以下:(1) 定义缺陷;(2) 转换为测量输出(层融合、形状、位置等);(3) 使用“整洁数据”原则清理数据集(列中的变量、行中的观察值、链接的表、测试再现性);(4) 将数据分为训练集、测试集和验证集;(5) 表征数据集、探索性分析、对照物理理论进行询问;(6) 提取候选特征;(7) 从现有数据陈述要测试的关系的假设;(8) 使用用于随机化的重抽样技术构建多元回归算法;(9) 评估样本内和样本外误差;(10) 评估假设并建立用于物理测试的基本参数;(11) 创建已知的增材制造几何构型,验证预测模型,生成因果关系和输出参数;以及(12) 重新评估假设并更新机器学习基础的基本缺陷定义。成功的初始机器学习算法在物理测试之前利用已有的数据确定了关于对增材构建可能是关键因子的基本假设,并形成了机器学习的基础。最终的预测模型随后用于通知实际生产和初始机器学习条件的现场测量计划。

[0060] 预测和因果分析410的步骤通常发生在逐层沉积材料以制造被制造对象的结构之前。

[0061] 方法400包括在结构的逐层制造期间结合机器视觉和加速处理的现场监测420。在这个步骤中,适当的现场监测采集与结构的逐层制造相关的数据,并且加速处理将数据数字化以输入到机器学习中进行分析。能够借助于任意适当手段来进行现场监测。例如,工业机器视觉摄像机能够提供包括位置信息的视觉信息,热电偶能够提供被供应以及已被沉积的材料的温度信息,电流和电压传感器能够提供沉积条件的信息,能够监测沉积速度和速率,能够监测环境条件,x射线技术能够监测材料特性并提供材料特性、温度分布的红外热

成像,而焊接熔池特征(包括结构和应力状态)只是可以进行的现场监测的示例,并且结果之后被用于增材制造方法。能够被包括在现场监测中的其他参数包括冷却曲线、空隙的检测、多孔性测量、诸如针对裂纹的缺陷检测、分层和空间不规则性。应该注意的是,增材制造方法对传感器提出了挑战,例如,必须放置摄像机和其他传感器来收集膜层和沉积头之间的数据,以检测结构的放置和对准。并行处理(诸如GPU加速)可能是有利的(如果没有必要的话)以处理来自现场监测的大量的数据并且处理几十个期望的特征以返回实时校正。加速处理的输出被反馈回到回路中的机器控制中,以进行自校正或识别,以便利用所构建的模型进行离线分析。

[0062] 在制造本文所公开的裂变反应堆和燃料装载反应堆空间的一体和单体式结构时,在逐层基础上重复现场监测和自动分析步骤允许对制造过程进行连续反馈。该反馈之后是如下的基础:(i) 增材制造过程中的逐层调整,(ii) 将监测和分析的信息归档到数字孪生中,以允许进行后续分析和评估,以及(iii) 更新和调整制造协议和逐层指令,以用于本文所公开的裂变反应堆和燃料装载反应堆空间的一体和单体式结构的未来的增材制造。

[0063] 在逐层制造所制造对象的结构期间,方法400包括结合机器学习组件的自动分析430。机器学习从机器视觉和现场监测的输入中产生智能,将该输入应用于先前存在的的数据,并经由机器训练更新处理,以及在增材制造过程期间进行自调整并运行预测性鉴定分析。

[0064] 机器学习能够包括异常检测算法来监测过程功能。例如,异常检测算法能够检查沉积速度、意外延迟或体积消耗、温度、对准或化学的变化。这个过程数据的自动分析能够选择表示异常的一个或多个特征 X_1 ,拟合参数 U_1 来表征每个所选特征的分布,并针对每个特征 U 计算观测到的 X 在可接受的高斯误差范围内的概率。

[0065] 机器学习也能够包括图像分类器以用于过程内异常检测。例如,像素化图像能够作为输入数据,其中每个样本是图像的小像素区域。拼合成图像的区域的数量代表能够用于区分和分类异常或形状的尺寸的数量。上百个尺寸(部分图像)构成的矢量化图像允许机器经由对每个特征的优化函数来学习正确形状或异常是什么样子。一旦分类器被训练成检测异常,则其能够被进一步训练以识别导致异常的之前检测的沉积条件(在一定的统计置信水平内),并且然后在异常实际发生之前将该信息应用于现场条件,并主动干预增材制造过程以避免异常。这个迭代的校正能力对于在沉积大量具有缺陷的层之前进行过程中调整非常重要。

[0066] 神经网络能够被用于与机器学习相关的非线性假设。例如,神经网络使用特征阵列,其采用输入条件和拟合模型以在使用隐层来确定权重参数的情况下正确预测输出条件。前向传播算法提供预测能力,并且后向传播用于揭示系统学习的权重方案。隐层使得在特征数量大(如图像数据)或交互复杂或既特征数量大又交互复杂时,可以得出可行的方案。

[0067] 方法400还包括对所构建结构的数字表示(本文也称为“数字孪生”)的虚拟检查440。通常,数字孪生的虚拟检查的步骤440发生在完成材料的逐层沉积以制造被制造对象的结构之后。能够通过如下来分析数字孪生:使用各种计算机辅助结构分析和建模技术(诸如有限元分析),以研究结构分析、热传递、流体流动和质量传输特性。另外,所构建结构中的内部和难以访问的特征可以在数字孪生中被方便地访问、查看和分析。这提供了全面的

360度检查以及“由内而外(inside-out)”的验证能力。因为数字孪生重现了实际的所构建的结构,对数字孪生的这种分析的结果与实际的所构建结构高度关联。因此,能够基于数字孪生上的测试结果,统计评估所构建产品(针对期望的参数,诸如强度)的置信度。

[0068] 与传统制造的大量的制造前、制造期间和制造后质量保证方法(这些方法通常是基于破坏性的技术和/或检查受限的)不同,在本文公开的裂变反应堆和燃料装载反应堆空间的一体和单体式结构的制造期间建立质量评估不仅抵消了复杂产品的构建后验证的难度,而且也使得无需通过以高分辨率逐层(最低)分辨率进行检查的由内而外的评估提供更直接的保证,所述由内而外的评估针对沿着每个增材制造层的过程监测数据的连续输入而进行回归。

[0069] 此外,虚拟检查能够通过通过在制造期间收集的分析处理的所构建数据构成的模型来完成(例如,物理的所构建产品的“数字孪生”)。结合了解对质量产生影响的异常的机器的预测能力(使用存储和过程中数据)以及监测、解释和报告最终所构建产品的状态(与持续更新的基线相比)的能力,本文公开的增材制造方法在缺陷发生前避免了缺陷,并基于制造过程期间监测和记录的所制造的条件,在全局范围内对整个所构建产品在统计学上评估所构建产品可行性的置信度。

[0070] 示例1:建模具有16英寸直径和24英寸高度的尺寸的裂变反应堆。反应堆具有6个圆柱空间并且其轴向高度被分成20个等距的轴向水平,从而得到2520个单独的主要通道和2520个单独的辅助通道以用于潜在的燃料装载。图3A从顶部透视图示出了在轴向水平上的特征的布置结构。结构考虑的示例尺寸包括:(a)0.75英寸的壳体102的外部周长,(b)3毫米的主要通道的壁厚度,和(c)2毫米的轴向延伸的环和梁腹的厚度,但可以使用更小的尺寸,其将提供附加燃料装载的可能性,或者可以使用更大的尺寸,其提供了强度。以下是壳体金属、主要通道和辅助通道(铀金属)的体积:

[0071]	壳体金属体积	2258.9 in ³ (芯体积的46.8%)
	主要通道体积	1202.2 in ³ (芯体积的24.9%)
	辅助通道体积(燃料体积)	1364.3 in ³ (芯体积的28.3%)

[0072] 计算示例1的铀容量。在具有1364.3 in³的组合辅助通道体积(燃料体积)的上述16"x24"构造中,如果所有辅助通道填充有处于20%浓缩的U235,则将可能存在187磅的最大U235重量。然而,每个腔室中都有一个充气室,从而允许包含10%的废气体积。这得到处于20%浓缩的U235的最大重量为149.6磅。虽然这比临界状态所需的要多得多,但这种过剩的容量使得能够径向和轴向调节浓缩物,以获得最佳的燃料循环效率和循环长度。

[0073] 主要通道的大小被任意选择为直径为18mm,壁为3mm,以在强度和流动面积之间保持平衡。因此,形成127个孔,其中组合流动面积超过50in²。孔的数量和流动面积的大小允许大量可能的流动通道、慢化剂棒、控制棒位置、急停棒位置和仪器需求。所需的功率水平、流体选择、慢化剂材料、控制棒材料和浓缩物将驱动每个孔的特定用途。

[0074] 如图中所见,具有可裂变核燃料(例如铀)的每个辅助通道被连接到两个不同的主要通道的两半。因此,只要每个其他主要通道均专用于流体流动,则每个具有燃料的辅助通道会将热传递到相邻的主要通道以用于热传递目的。此外,60个主要通道位置能够专用于非流动需求(慢化剂、控制、急停和仪器)。堵头设计的考虑也可以通过不使用整个18mm主要通道大小来实现非流动位置的热传递。例如,具有翼片形状的控制棒设计可以在主要通道

中同时地提供反应性控制和足够的流动。

[0075] 示例反应堆具有径向和轴向浓缩物优点。因为每个具有可裂变核燃料的辅助通道独立于每个其他的具有可裂变核燃料的辅助通道,所以能够在径向和轴向方向二者上选择定制浓缩物。经验表明,这能够提高燃料循环效率高达20%,并且平衡壳体温度。也可以想到经由增材制造提供无限数量的铀浓缩物。例如通过只使用贫化铀线材和20%浓缩铀线材的组合,在这两个极端之间的任何浓缩物都是可能的(相比之下,在传统实践中,由于例如非增材制造的复杂性,核制造公司通常将自己限制在10种以下的不同浓缩物)。

[0076] 示例反应堆是可扩展且和可缩放的。虽然使用16"乘以24"尺寸的反应堆进行建模,不过可以使用大于12"乘以18"的任意反应堆大小。此外,如果腔室径向宽度被保持在该设计内的细节,并且遵循上面讨论的六重径向对称构思,则可以添加任何数量的附加轴向延伸的环140。结果将是持续的高度对称的构造,其中不管反应堆的大小如何,所有具有可裂变核燃料的辅助通道大小均相同。

[0077] 示例2:由ANSYS工程仿真和3D设计软件、SolidWorks实体建模计算机辅助设计和计算机辅助工程计算机程序以及蒙特卡罗N粒子输运程序(MCNP)核过程模拟程序构成的计算平台(本文被称为通用倒置反应堆计算平台或者“UIRCP”)被利用和应用以求解通用倒置反应堆设计的理想热构造。因为在本文公开的通用倒置反应堆设计中燃料和包层彼此邻接(例如见图4和本文的相关描述),所以由于共享所述界面的两种材料的热膨胀率不同,热应力增加的可能性很大。UIRCP被应用于解决这个问题,并且燃料浓缩物和反应堆几何构型迭代以均匀化径向热梯度。应该注意的是,轴向热梯度和总峰值温度因为线性热交换的性质是不可避免的并且不是UIRCP过程的一部分。

[0078] MCNP在UIRCP过程中被应用到建模的通用倒置反应堆设计以计算每个邻接的燃料元件的MeV/g并进行临界性校核。首先,必须基于用户的几何构型和材料输入来制作输入组(input deck)。其他的用户输入能够包括冷却剂、燃料、包层和反射器的材料。这通过读取用户输入、输出呈MCNP格式的几何构型(二元几何构型)、标记每个单元的所需材料以及设立中子物理学来实现。输入组之后被运行,并且用户可以选择使用MCNP的可视化软件功能在此时查看几何构型。MCNP输出被检索以找到与每个燃料元件相关联的MeV/g,将其转换成 W/m^3 ,并存储在单独的文件中。所有这些步骤均通过一管理批处理文件来控制,该文件调用必要的命令和子程序。图10A示出初始用户界面的截屏500,并且图10B示出MCNPX几何构型回顾的截屏510。

[0079] SolidWorks在UIRCP过程中被应用以基于用户输入更新参考反应堆几何构型的计算机辅助设计(CAD)实体模型。用户输入是基础几何构型选择。由用户更新的变量是几何构型变量:环间距、环的数量、包层厚度、通路ID和OD、轴向节段的数量以及总高度。图11A和图11B示出了图表600、610,其具有在这个示例中所用的与几何有关的变量的几何结构和尺寸。注意图11A-B中的几何结构和图3A-B中的反应堆空间108的设计之间的类似性。

[0080] 通过使用通用倒置反应堆设计作为基础设计(诸如关于图11A-B所示和所述的设计),燃料、包层和通路的实体模型是先验性的。UIRCP过程调用批处理文件,其打开SolidWorks、运行更新几何全局变量的子程序、运行VBA(应用的视觉基础)程序以抑制不希望的几何构型、使用新的几何参数来重建设计以及保存六分之一芯参数化实体(core parasolid)。参数化实体700(见图12)是由该过程得到的芯参数化实体的示例。注意在图12

的该芯参数化实体700和图3A-B中的反应堆空间108的设计之间的类似性,包括壳体、轴向柱体、多个轴向延伸的环、多个主要轴向管、主要通道、多个梁腹和多个辅助通道。UIRCP过程和Solidworks建模可以改变和更新环的数量、通路大小、燃料大小、反应堆总大小和间隙包层,以优化通用倒置反应堆设计。

[0081] ANSYS在UIRCP过程中被应用于解决热工水力问题,其中燃料产生加热流动通过通路的冷却剂的热。能够使用计算流体动力学(CFD)工具(诸如ANSYS FLUENT)和结构分析工具(诸如基于有限元分析(FEA)的ANSYS Mechanical)。使用ANSYS FLUENT和ANSYS Mechanical,调用一个j_脚本日志来插入芯参数化实体,诸如芯参数化实体700,这来自于应用SolidWorks的UIRCP过程。ANSYS Mechanical之后被打开以对参数化实体进行网格划分,从而区分固体和流体。脚本被生成以控制FLUENT;调用脚本是从打开FLUENT开始的。该脚本包括用于燃料、包壳和冷却剂的材料参考用户输入,然后基于这些输入进行更新。燃料和包层之间的任何网格界面都被分开(这可以防止否则将产生的错误结果,因为实心网格会将界面视为一个统一的部分)。冷却剂入口和出口被设定为用户输入速度和环境温度。基于MCNP输出,给予燃料元件适当的内部产热。FLUENT之后运行热工水力模拟并产生温度等值线图。图13是如上文步骤所概述的那样运行FLUENT所得到的温度等值线图800的示例。

[0082] UIRCP过程将ANSYS、SolidWorks、MCNP程序界面连接到单一的软件自动化系统中,其中单个软件基于用户识别的优化技术朝向最终结果迭代。界面连接操作是通过从一个软件的输出中保存必要的信息来执行的,该输出将等待直到另一软件正在被自动化时被调用。例如,SolidWorks和ANSYS程序通过实体建模来通信。在SolidWorks执行几何构型更新并保存参数化实体之后,ANSYS调用该参数化实体作为基础几何构型以执行热工水力分析。在另一示例中,MCNP和ANSYS程序经由在燃料浓缩物和径向热梯度之间的关系通信。在第一迭代期间,MCNP使用所有燃料元件的初始燃料浓缩水平进行初始中子模拟,这相当于每个燃料元件的内部产热(W/m^3)。保存内部产热值,从而等待ANSYS对其进行调用。当ANSYS运行热工水力模拟时,其保存径向热分布。热分布通知MCNP下一次迭代浓缩将试图使径向热梯度趋于零斜率(如果这是识别的优化技术)。这个过程被重复直到达到可接受的热梯度水平。这用作UIRCP过程的主要迭代循环。

[0083] 示例3:研究裂变反应堆100的示例实施例的中子物理学。被研究的裂变反应堆100利用带19.75 wt.%U-235的低浓缩铀(LEU)。裂变反应堆具有位于壳体内部的反应堆空间内的10个燃料环。芯直径是434.7毫米并且芯高度是800毫米。15 cm厚的铍反射器围绕芯。利用蒙特卡罗N粒子输运程序6(“MCNP6”)核过程模拟程序对中子物理学进行了建模。确定了稳态操作(k -有效值=1.0)将要求在芯的整个操作寿命期间的一系列控制棒操控。图14A和图14B示出当控制棒从芯被移除时从MCNP6核过程模拟程序得到的芯功率峰值分布。图14A中的分布900示出了作为芯高度(米,从顶部到底部)的函数的功率(归一化到平均值)并且具有1.49的峰值因子(所有控制棒完全撤出),在0.39m处的轴向峰值位置,和 1.06375 ± 0.00036 的 k -有效值(k -effective)(控制棒完全撤出)。图14B中的分布910示出了作为径向距离(米)的函数的功率(归一化到平均值)并且具有1.12的峰值因子(所有控制棒完全撤出),在0.0186m处的轴向峰值位置,和 1.06375 ± 0.00036 的 k -有效值(控制棒完全撤出)。图14C示出了作为中子能量(MeV)的函数的中子通量(归一化到总通量)的分布920并且具有 1.06375 ± 0.00036 的 k -有效值(所有控制棒完全撤出)。为了停机目的,控制棒被完全插入

的被建模反应堆的 k -有效值是 0.94211 ± 0.00034 。

[0084] UIRCP和上文描述的过程使得工程师能够灵活地改变反应堆类型、材料和基础几何构型。最终结果是这样的反应堆设计,其能够通过使用增材制造技术来制造并且为工程师提供了用于各种功率应用的工具。另外,所公开的裂变反应堆的具体特征可以通过UIRCP过程中的专用例程进行优化。例如,除上述浓缩优化外,UIRCP过程还可用于优化:(a) 通路大小,基于冷却剂物质传热效率、径向热梯度和轴向热梯度中的一个或多个;(b) 环宽度,例如基于径向热梯度;以及(c) 包层厚度,例如,基于径向热应力。

[0085] 另外,UIRCP和本文所描述的过程能够有效地应用到新的反应堆设计。工程师的任务是审查临界性、热工水力和材料规格。这个初始工程设计和评估能够进行数月(最多一年)并花费数百万来获得关于新反应堆设计可行性的初步答案。然而,UIRCP和本文所描述的过程在几天内提供了新反应堆的热工水力、中子学和几何构型知识。因此,可以初步确定反应堆设计的可用性,并优化该设计,与当前实践相比,这可以缩短时间并降低成本。

[0086] 图2A中的裂变反应堆100具有基线特性,包括1 MWth(+250kWe)的功率输出、ZrH慢化、氦冷却、布莱顿热力循环以及具有旋转对称性的单体。然而,裂变反应堆100能够更大或更小,即可缩放,并且能够具有如本文所公开和描述的替代性特性。

[0087] 本文所公开的裂变反应堆100能够被用于适当应用,包括但不限于,地面电源、远程电力或离网应用、空间电力、空间推进、同位素生产、定向能源应用、商业电力应用和海水淡化。

[0088] 尽管本文中通常结合加压水反应堆(PWR反应堆)并将水作为主要冷却剂进行描述,但是本文中所公开的结构和方法也可适用于其他反应堆系统,包括沸水反应堆(BWR反应堆)、氧化氘(重水)慢化剂反应堆(诸如CANDU反应堆)、轻水反应堆(LWR反应堆)、球床反应堆(PBR反应堆)、核热推进反应堆(NTP反应堆)、商业和研究反应堆,并利用其他主要冷却剂,诸如氦、氢、甲烷、熔盐和液态金属。

[0089] 尽管本文使用增材制造技术来进行描述,但是减材制造技术以及增材和减材制造技术的组合可以用于制造裂变反应堆和相关结构。因此,现场技术和预测质量保证方法可适于在这种减材制造/组合制造环境中使用。减材制造技术的示例包括机加工,诸如将一个物体铣削和镗孔成粗糙的半成品形状,然后进行精加工,诸如电火花加工(EDM)。能够使用其他的减材制造方法,诸如电子束加工(EBM)。

[0090] 尽管结合制造本文所示和描述的通用倒置反应堆进行描述,但本文所公开的增材制造方法和预测性质量保证方法能够应用于其他技术的制造,包括在石油化工行业(例如,用于化学反应容器)、在航空航天行业中(例如,用于包括涡轮机叶片和外壳的涡轮机的零件,以及用于包括燃烧室、喷嘴、阀和冷却液管道系统的导弹和火箭的零件)。

[0091] 虽然已经参考了具体实施例,但是显而易见的是,在不脱离其精神和范围的情况下,本领域技术人员能够设计出其他实施例和变体。所附权利要求旨在被解释为包括所有这种实施例和等效变体。

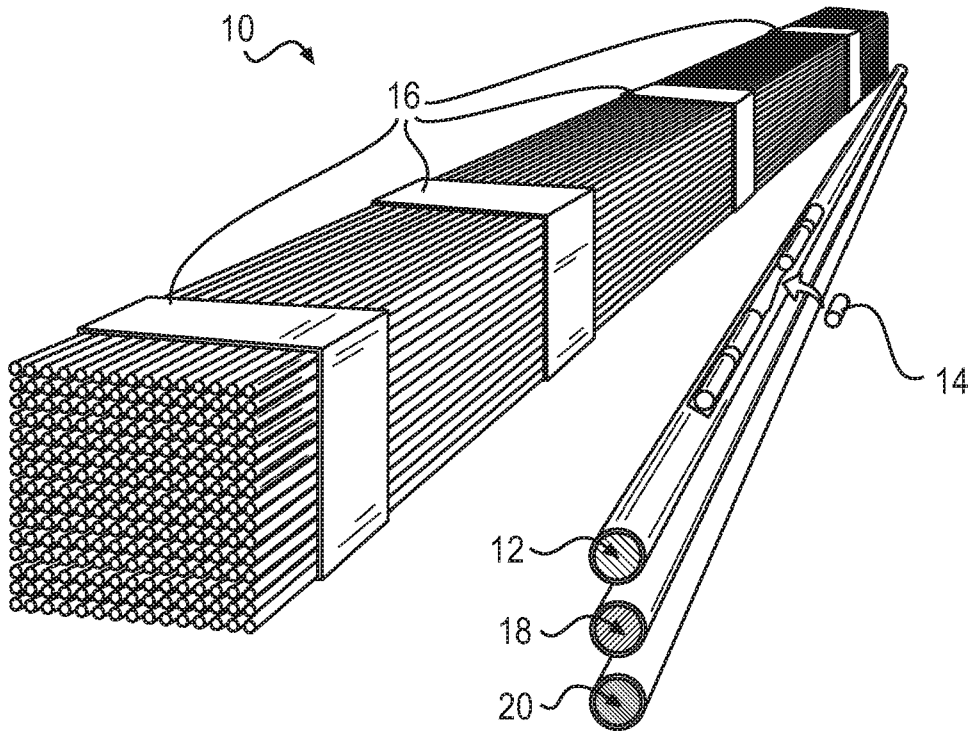


图 1

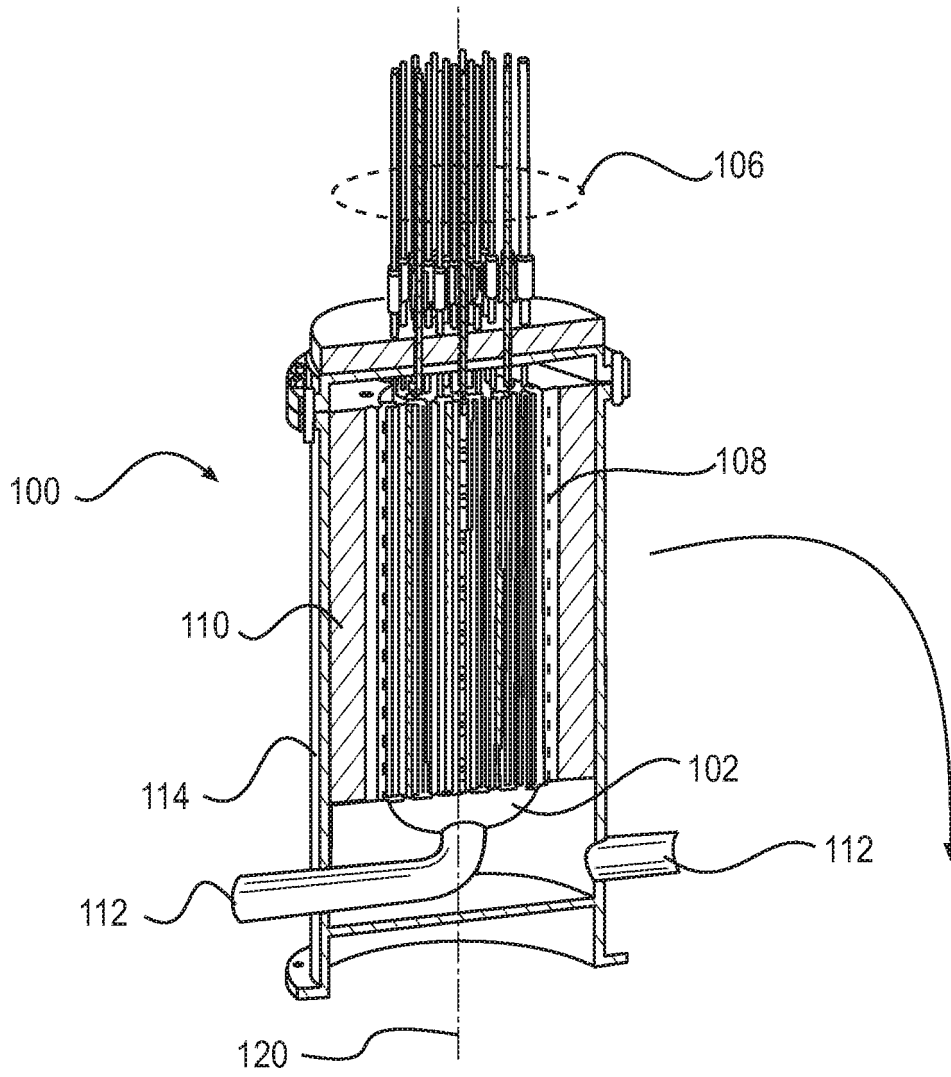


图 2A

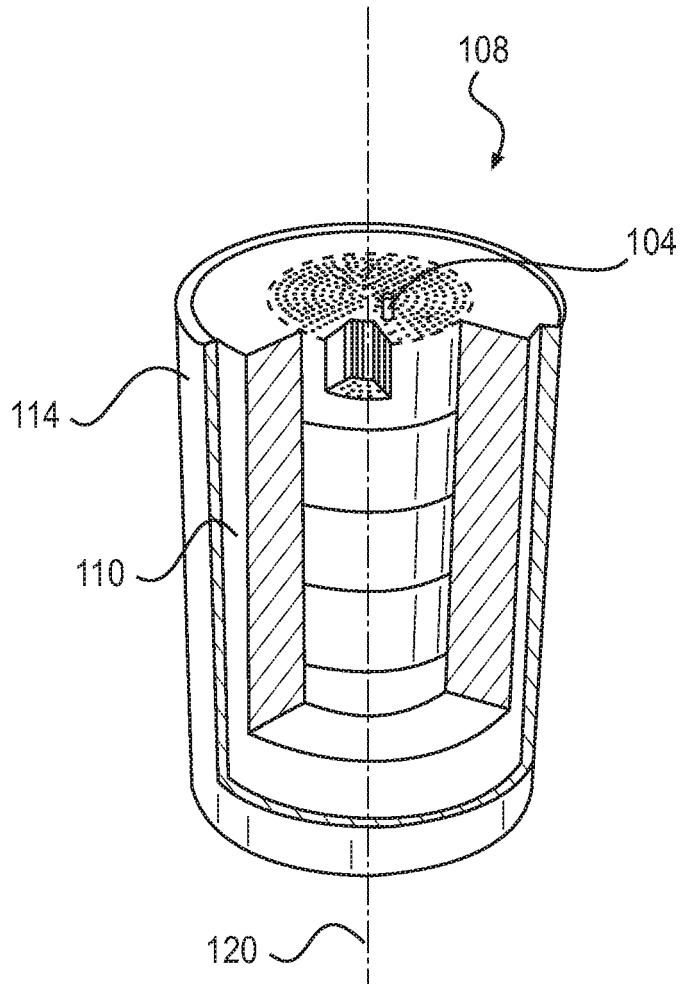


图 2B

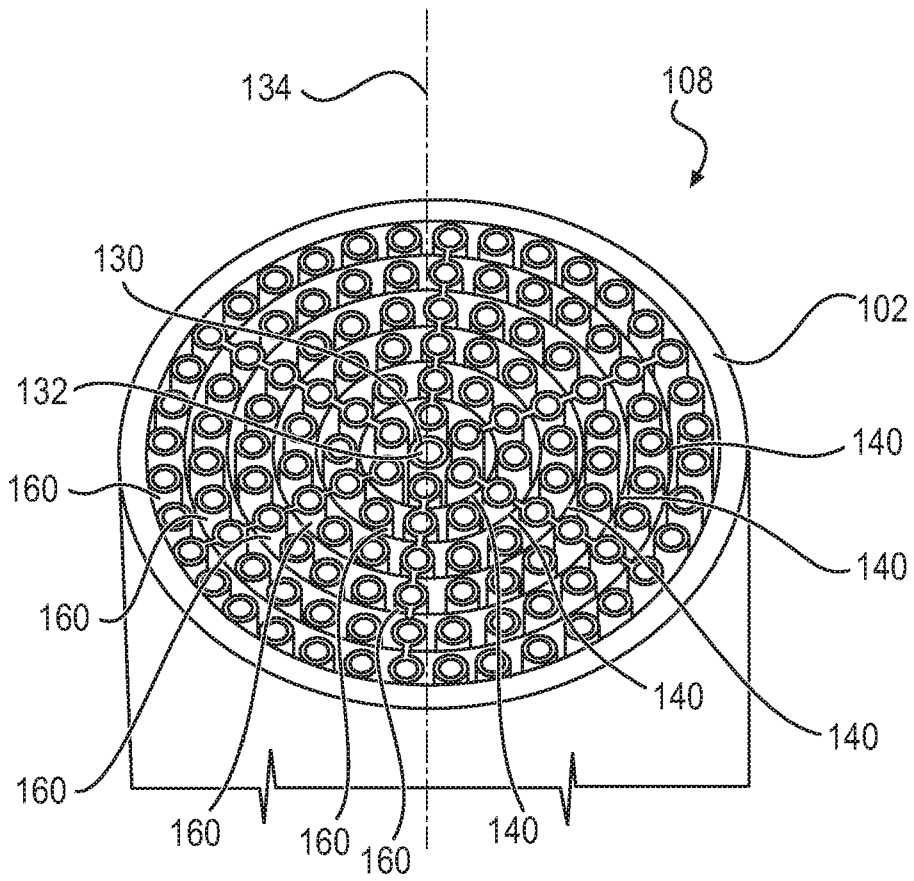


图 3A

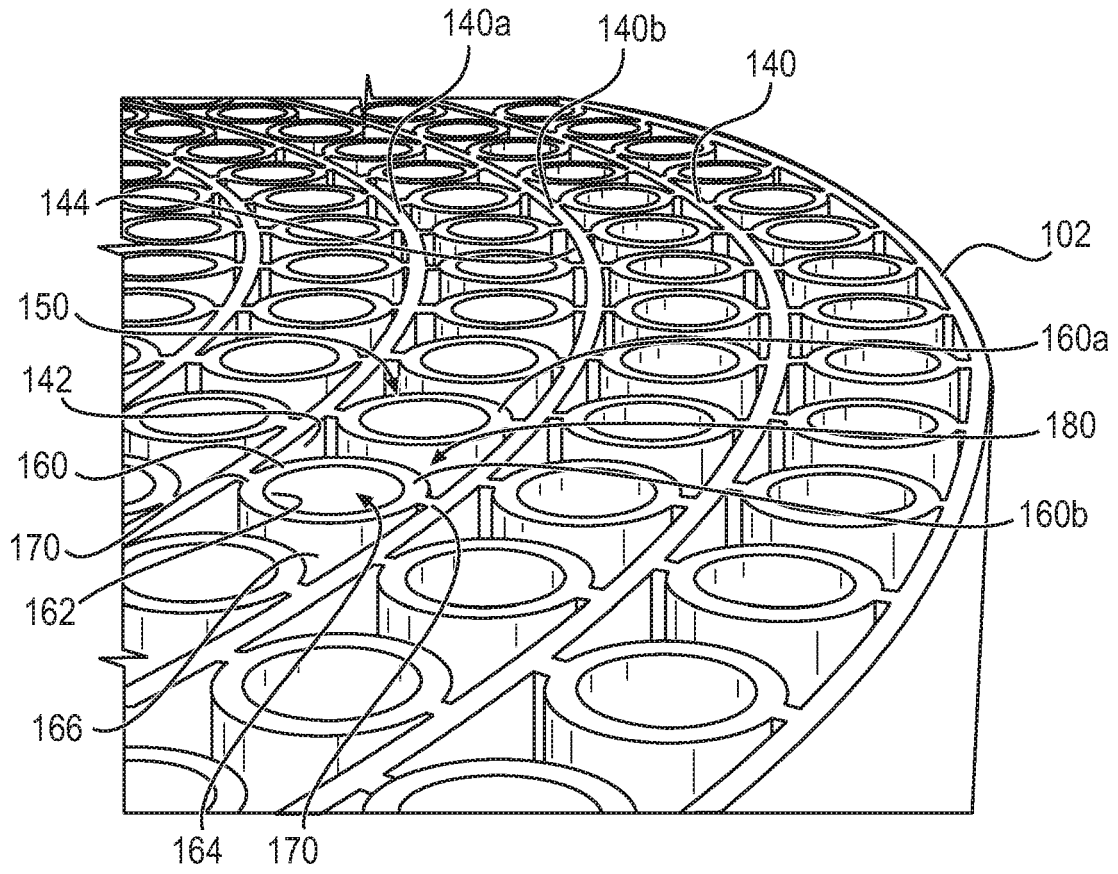


图 3B

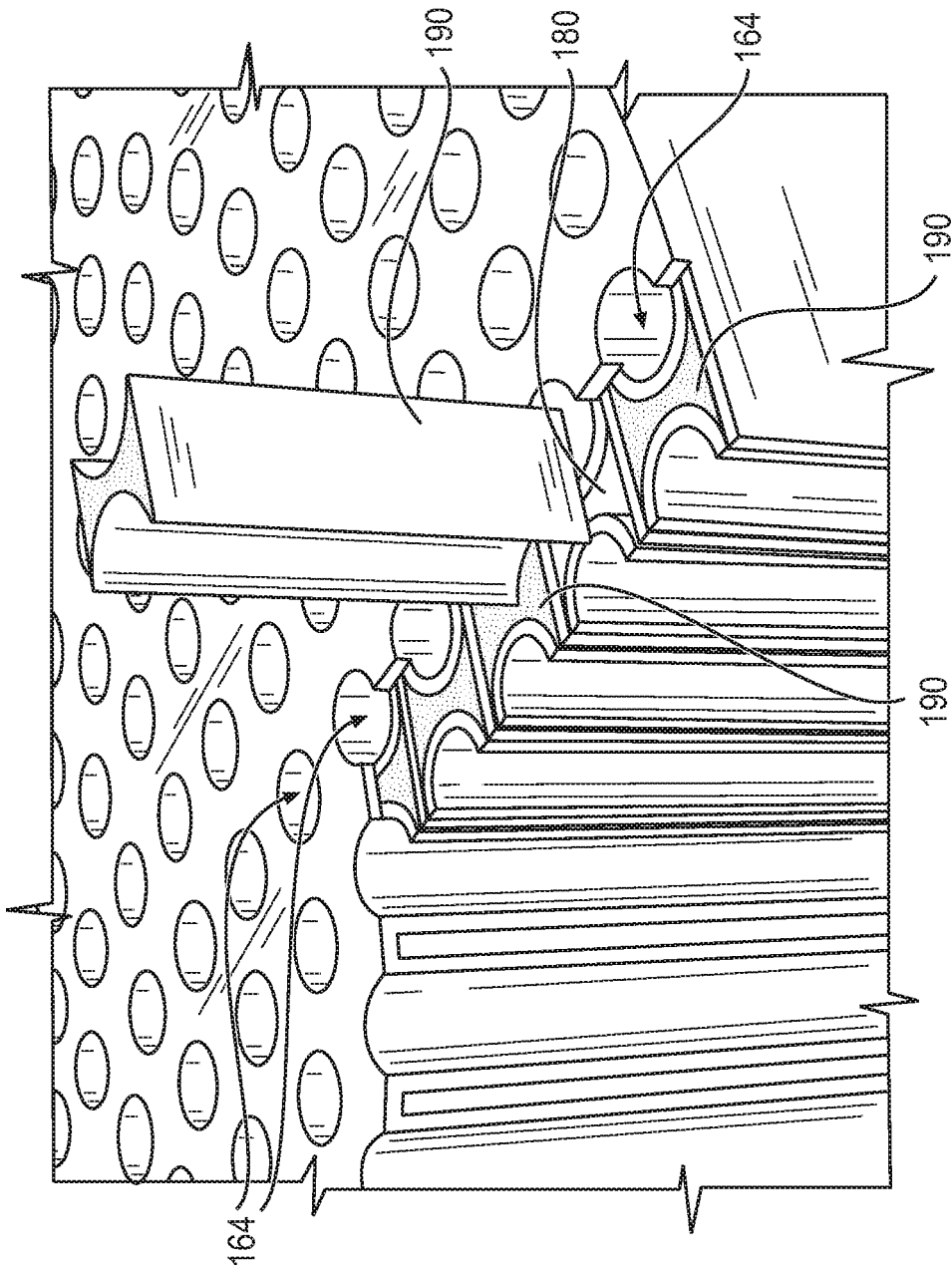


图 4

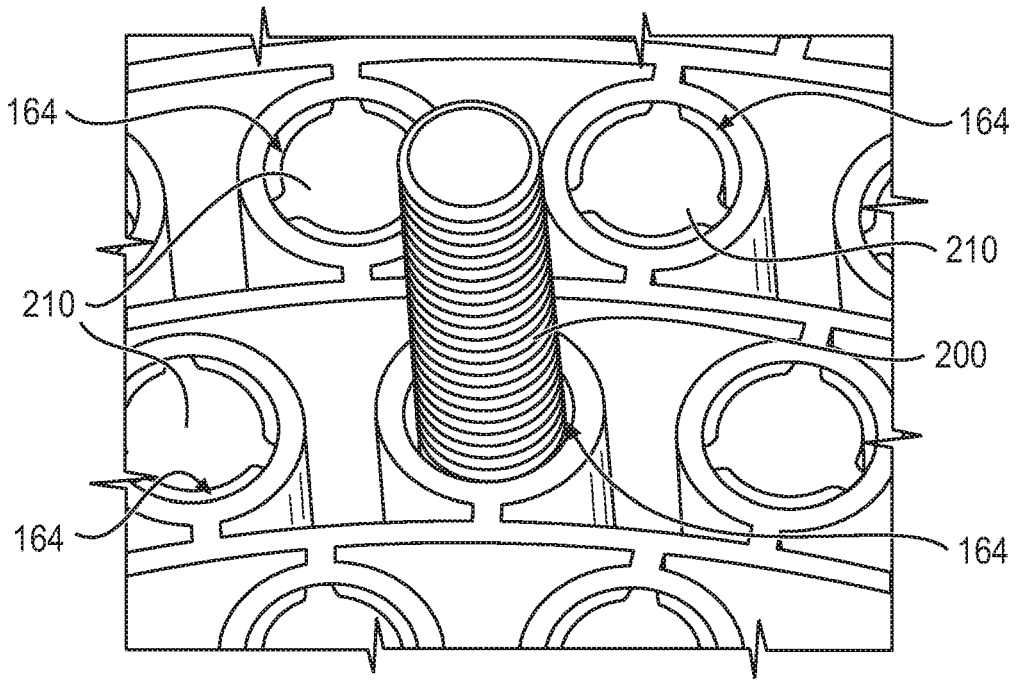


图 5A

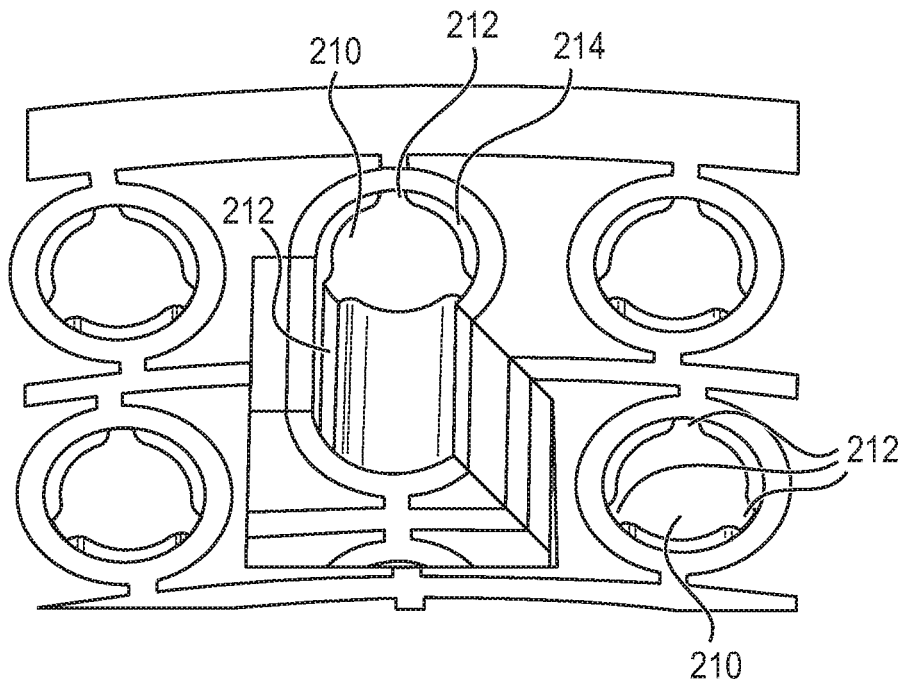


图 5B

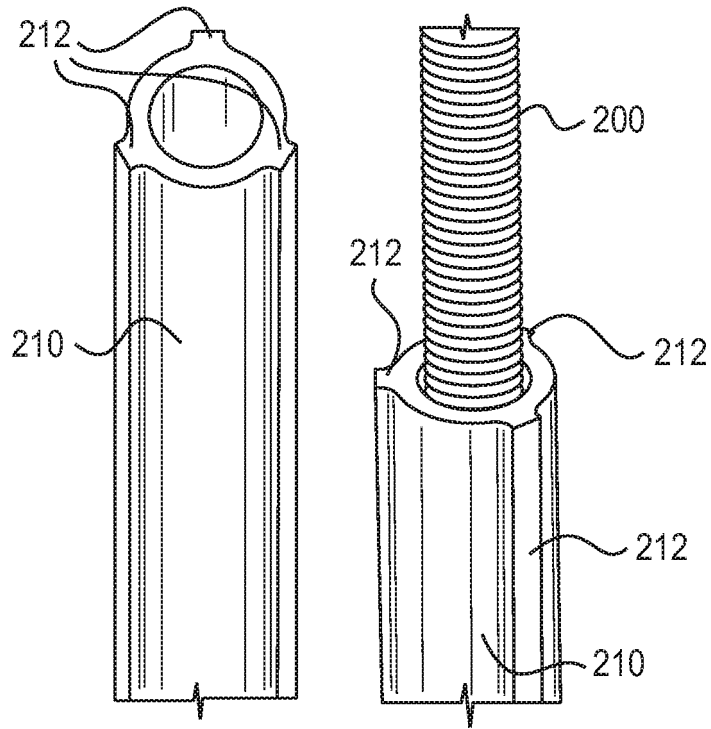


图 5C

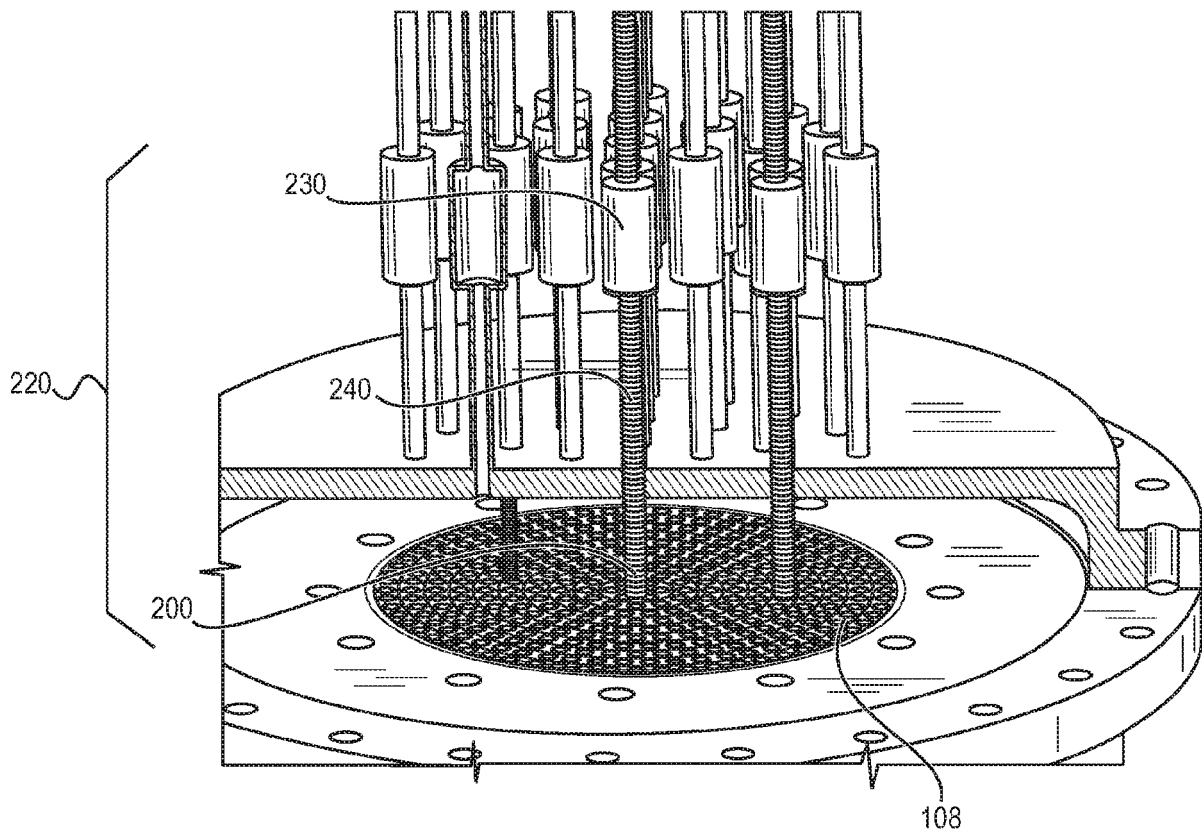


图 5D

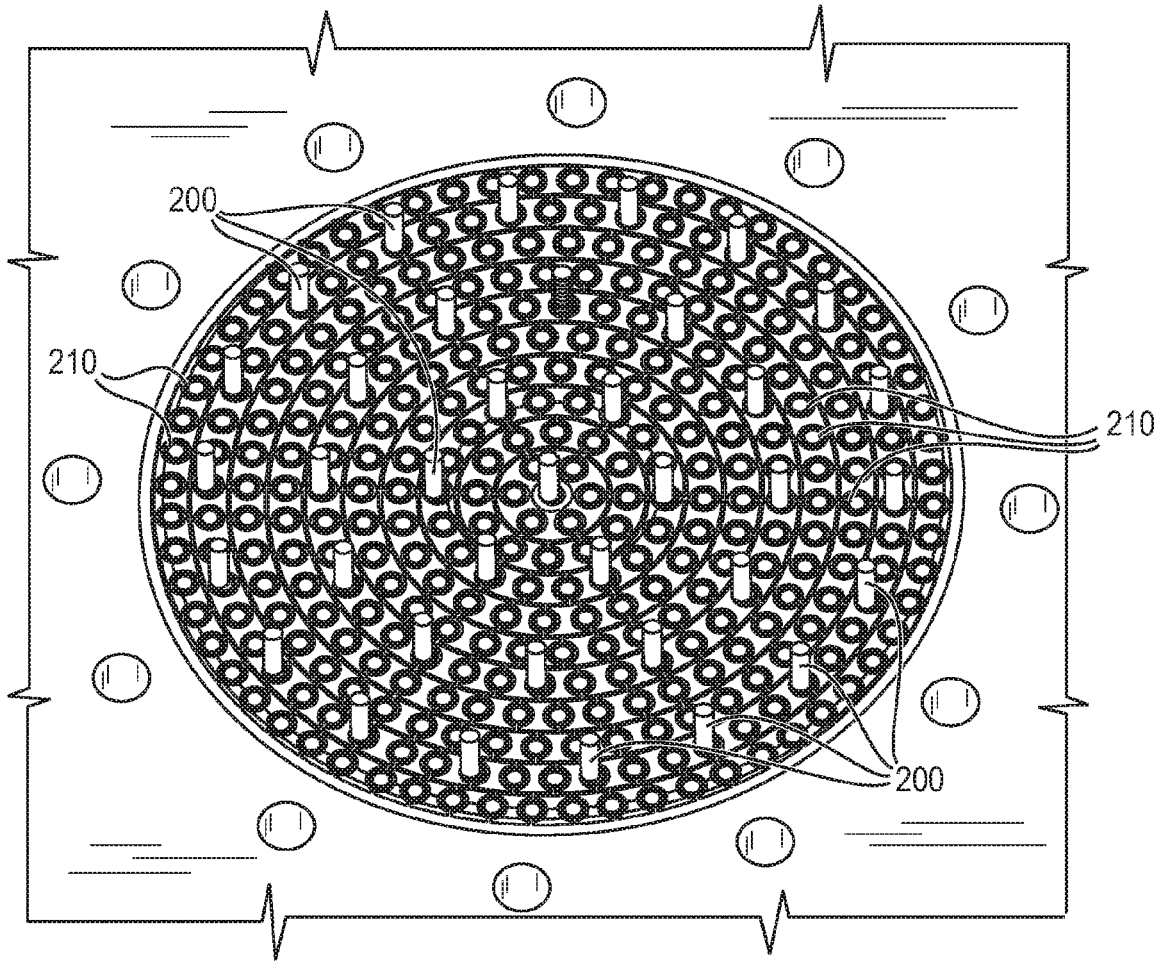


图 6

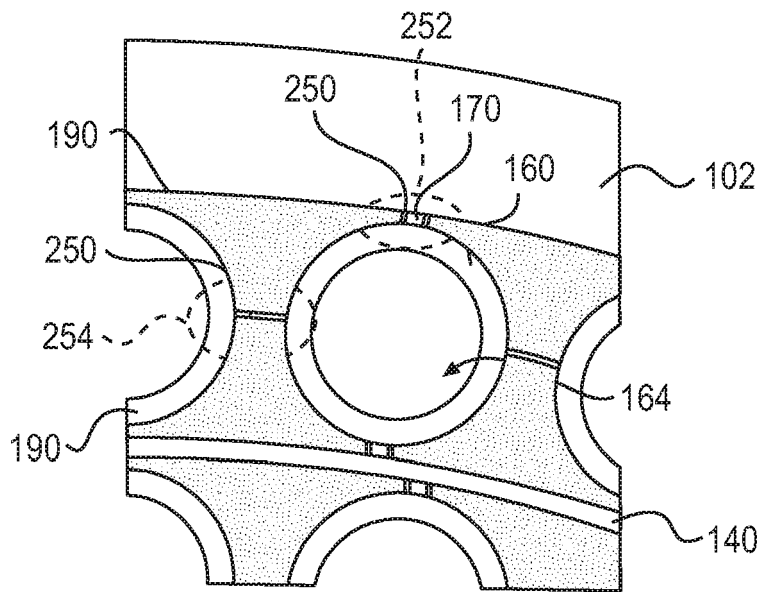


图 7

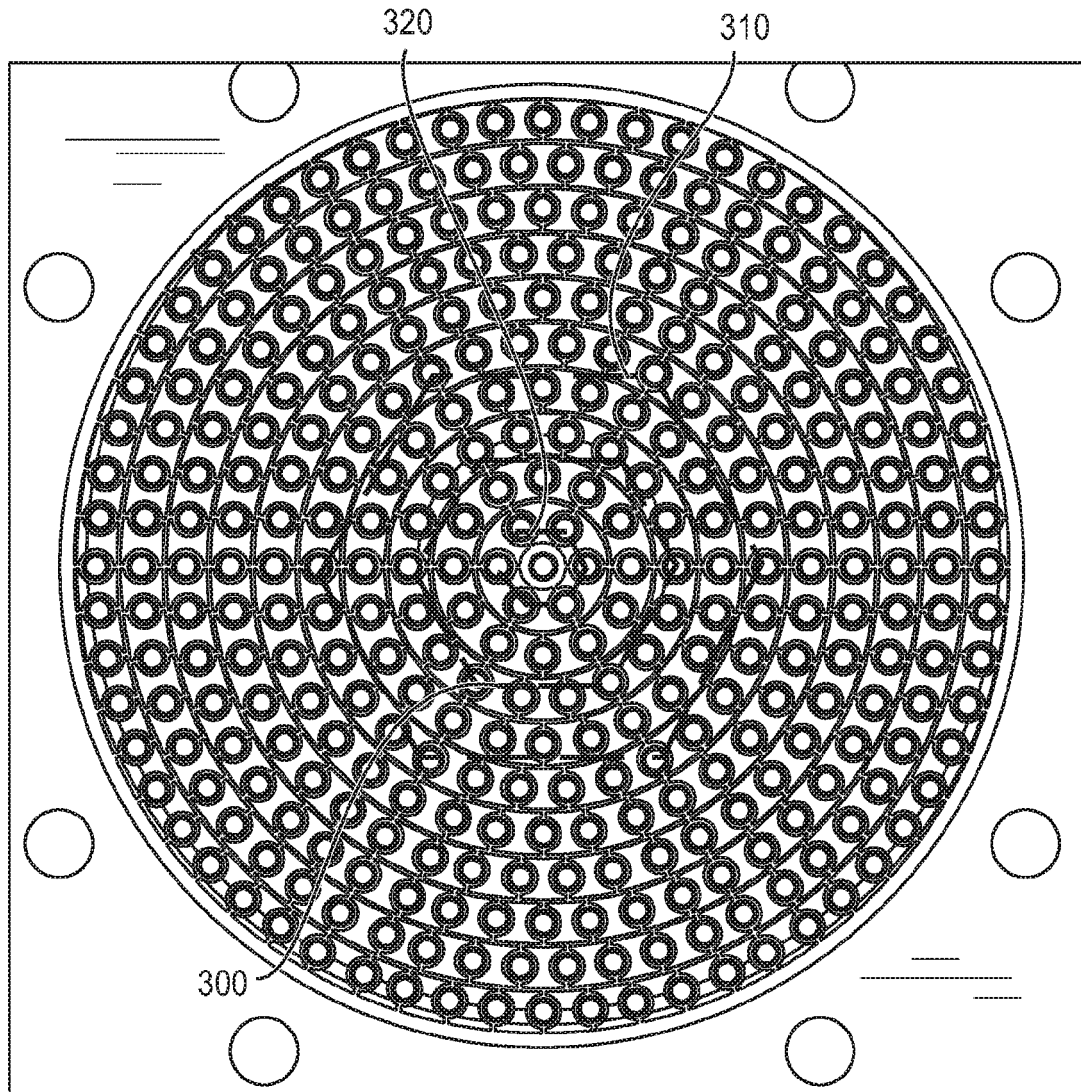


图 8

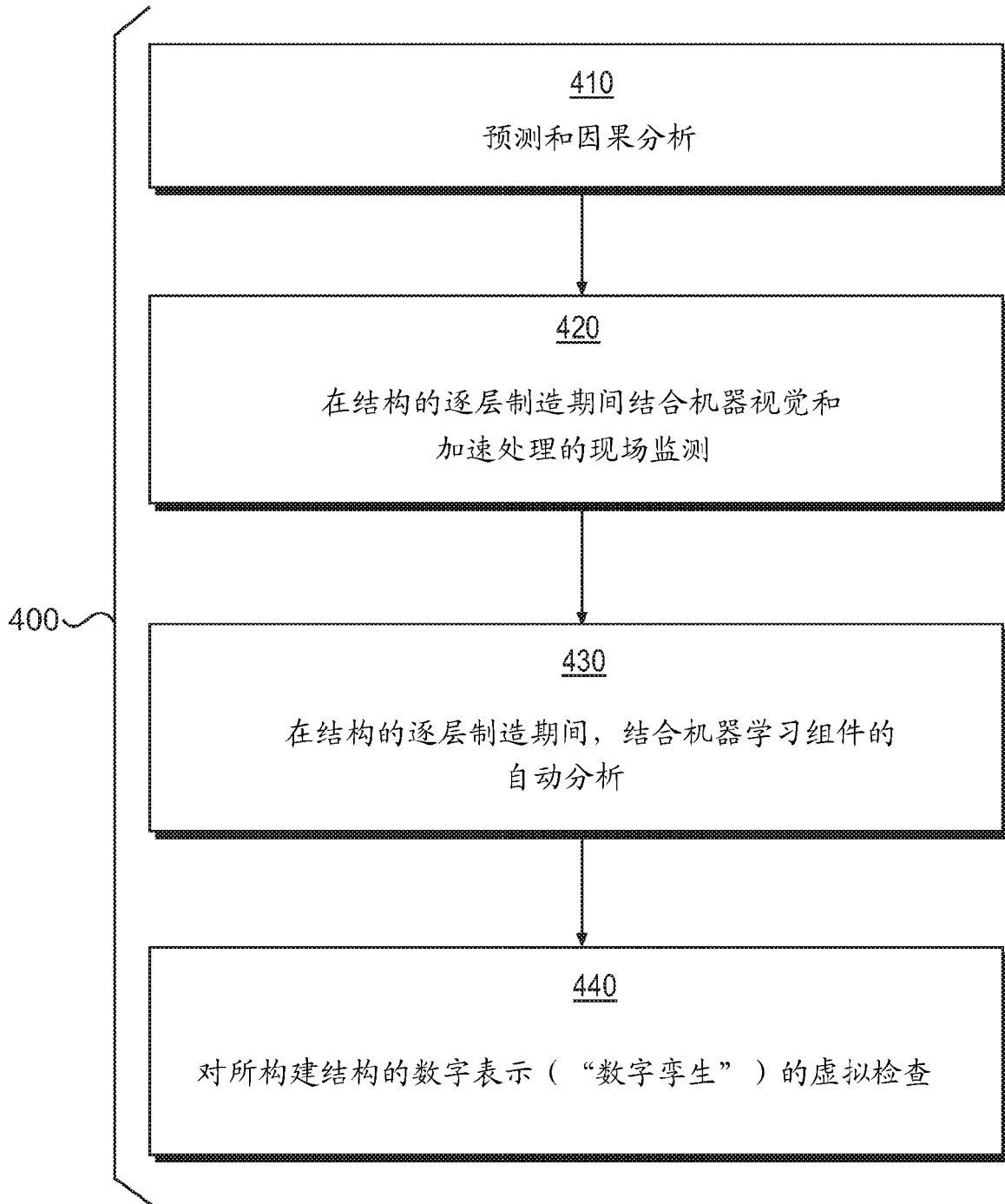


图 9

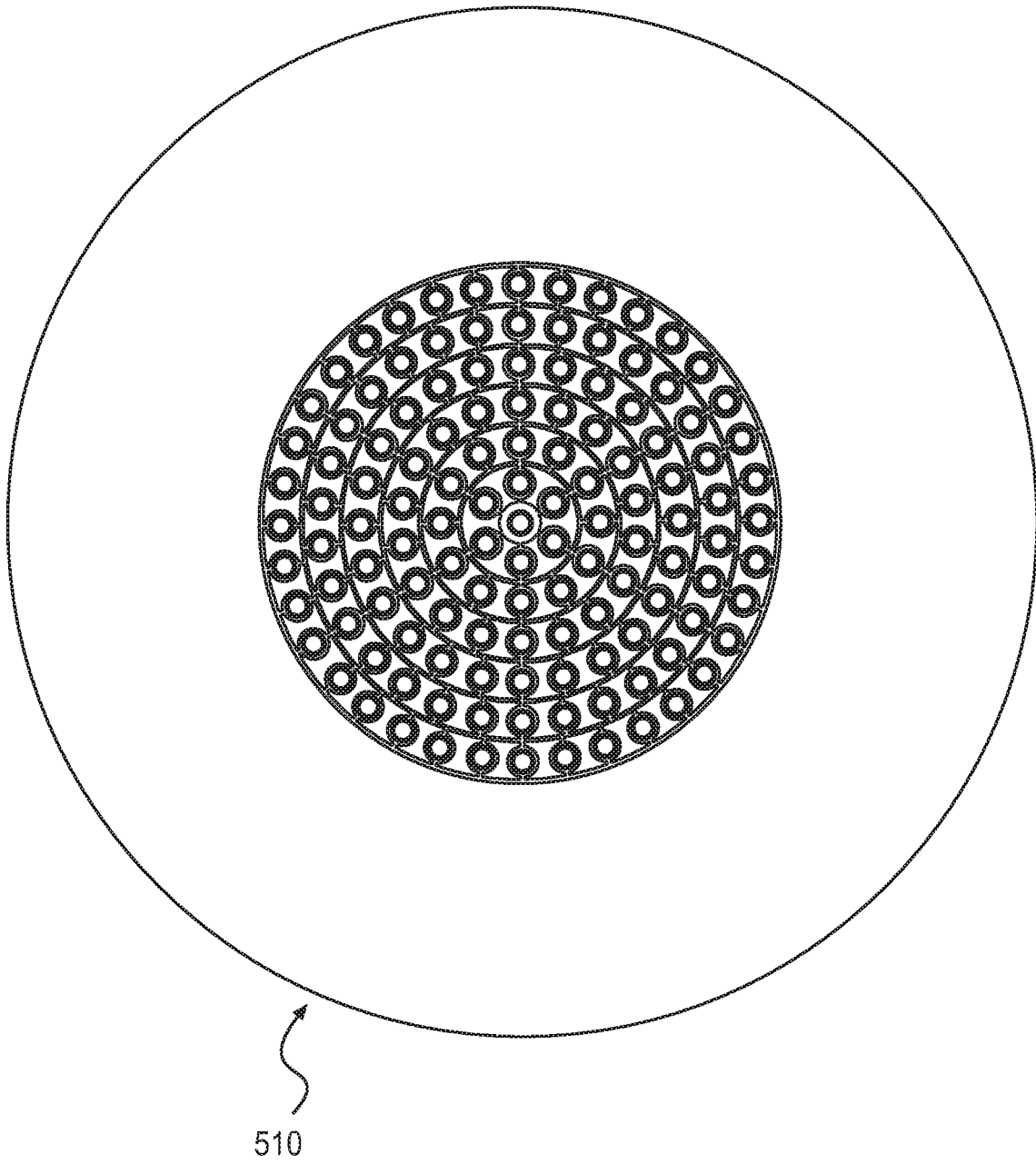


图 10B

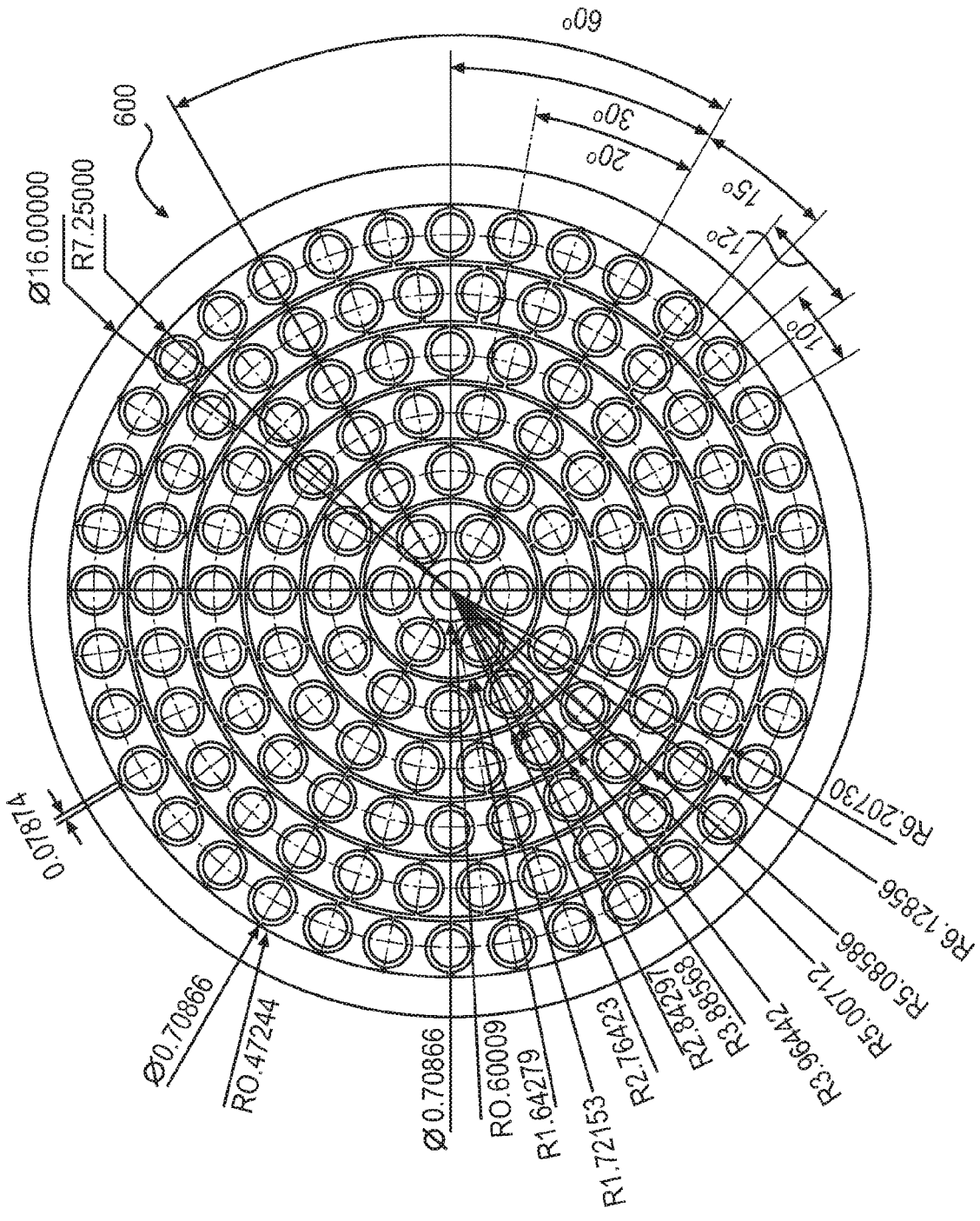


图 11A

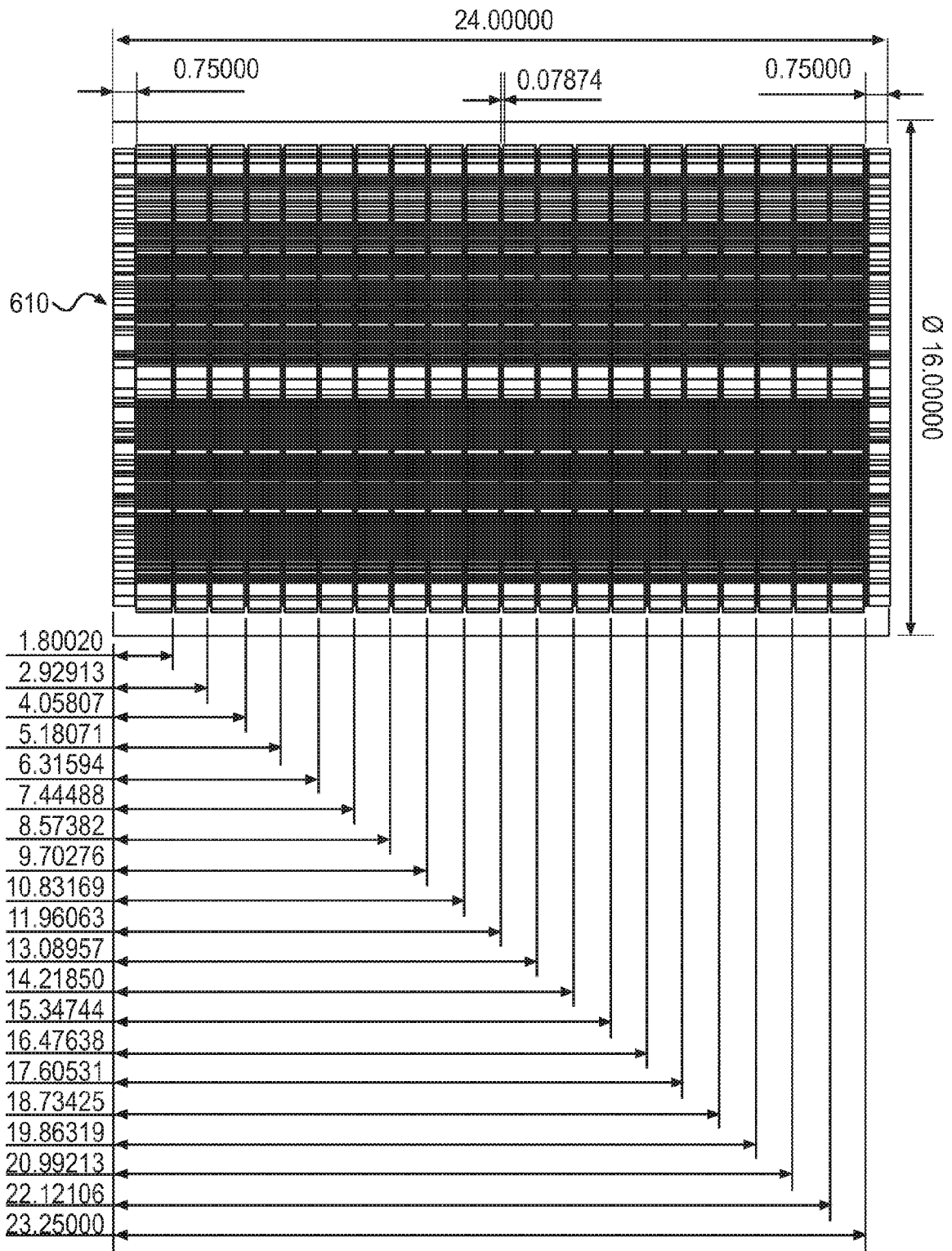


图 11B

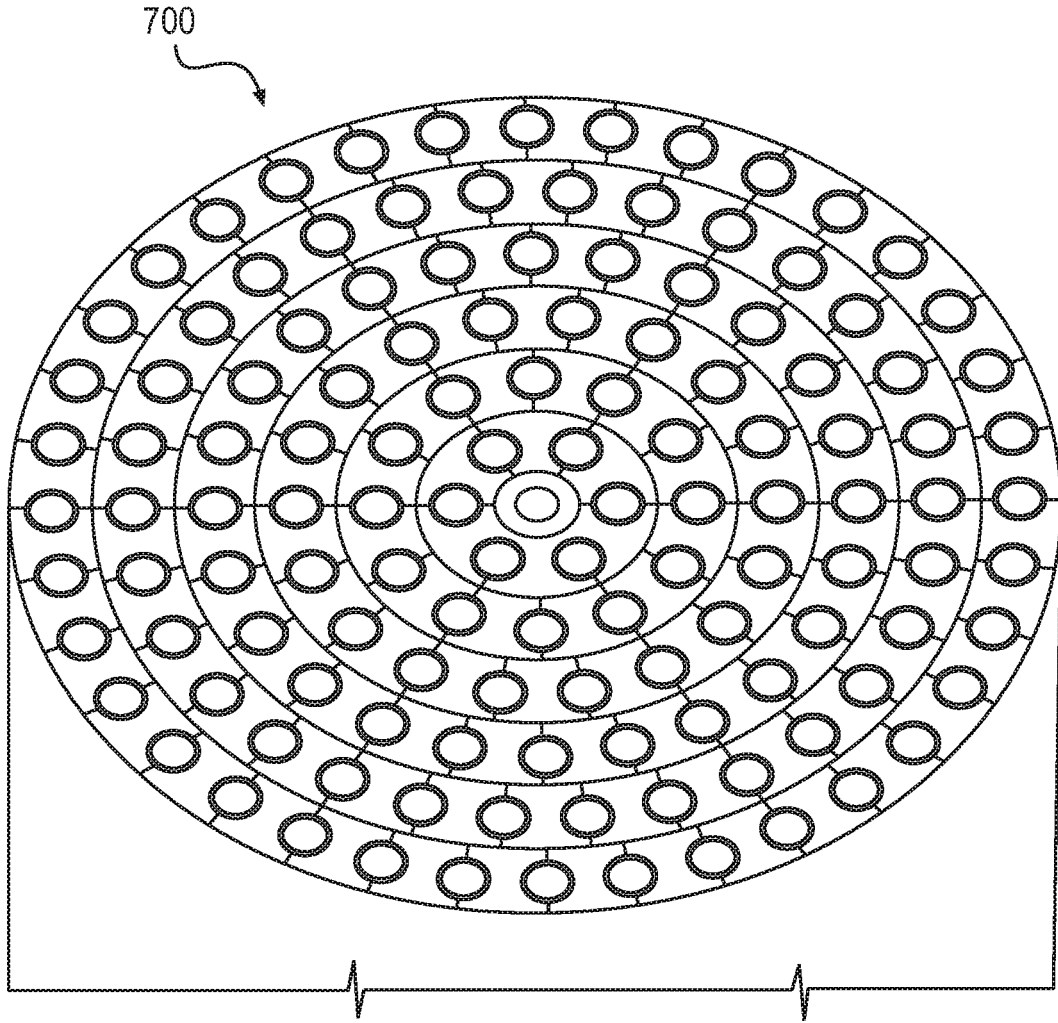


图 12

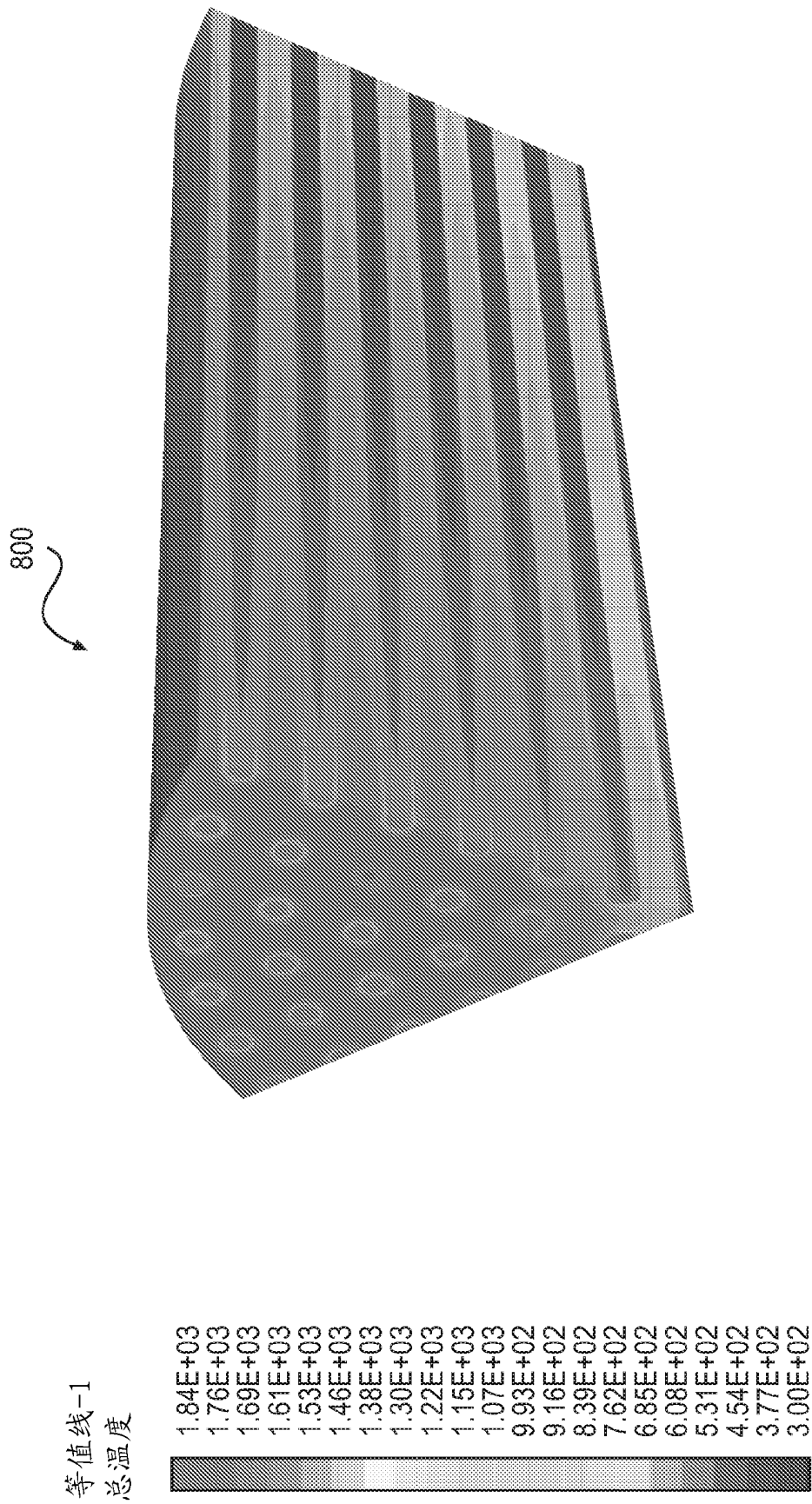


图 13

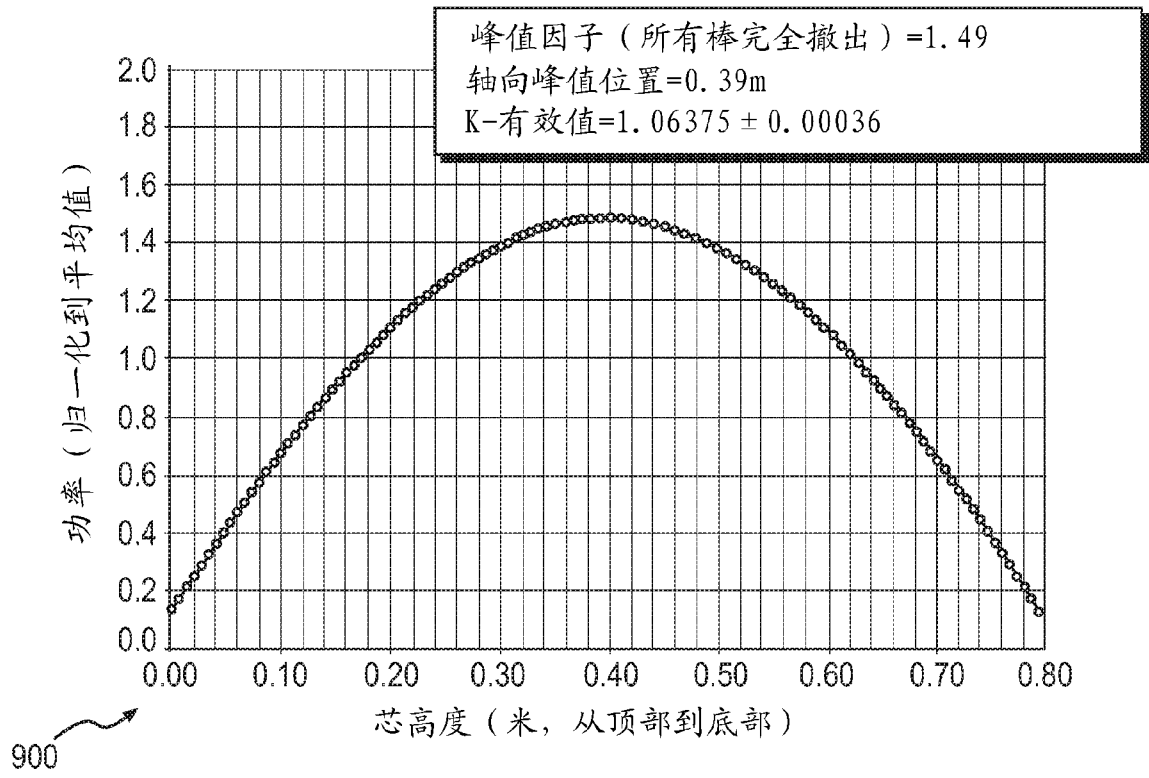


图 14A

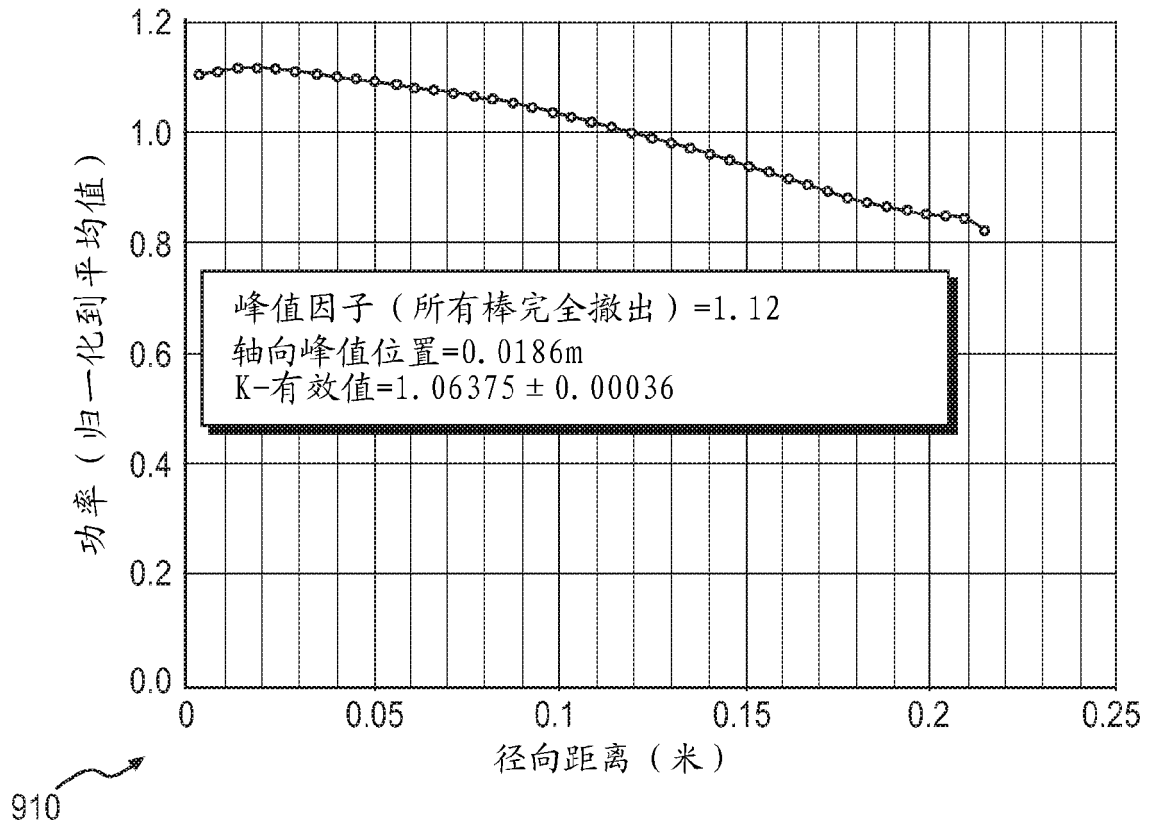


图 14B

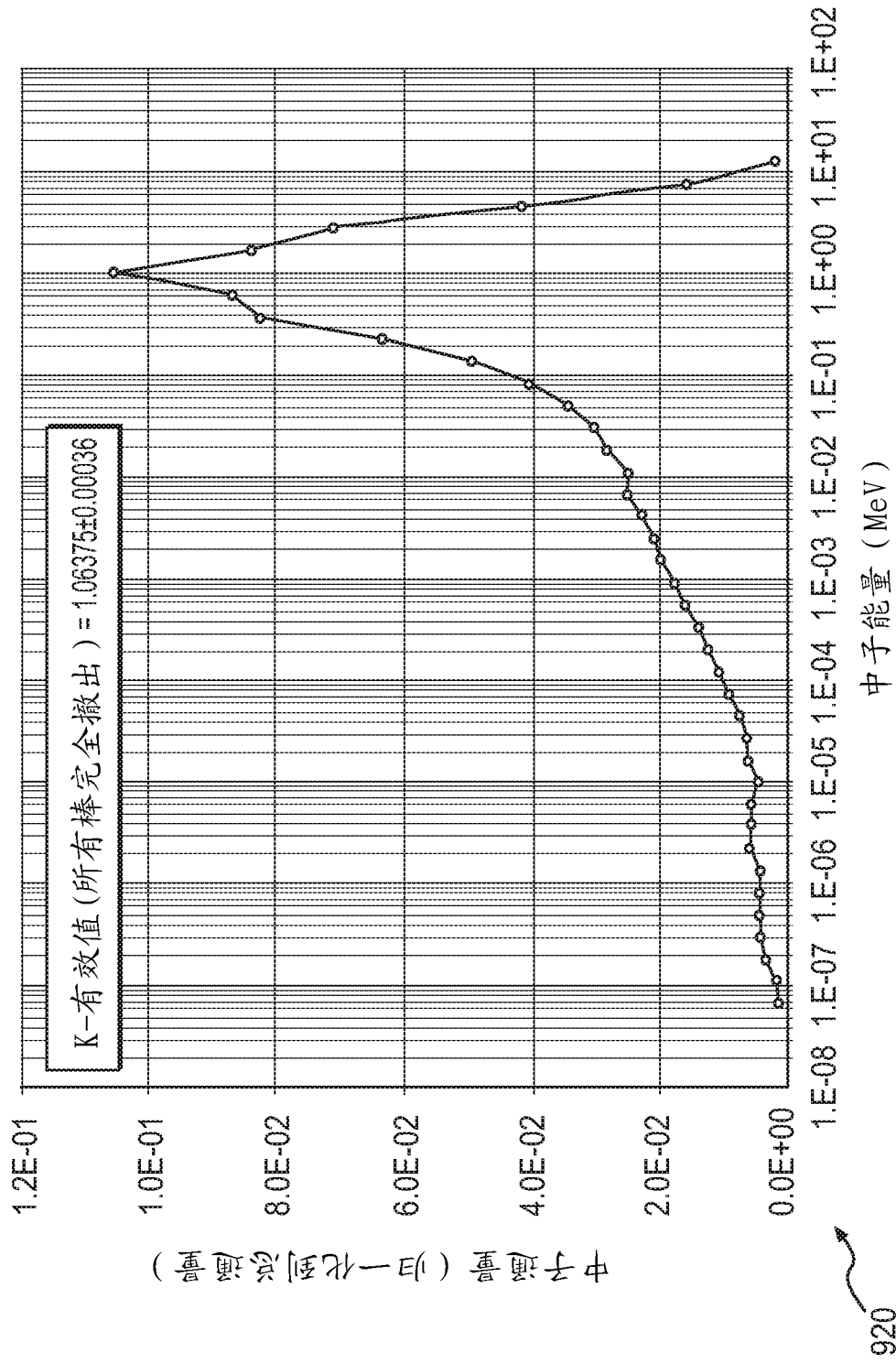


图 14C