



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105895178 B

(45)授权公告日 2018.03.27

(21)申请号 201610218056.3

(22)申请日 2011.05.11

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105895178 A

(43)申请公布日 2016.08.24

(30)优先权数据
61/333,467 2010.05.11 US
61/393,499 2010.10.15 US
61/444,990 2011.02.21 US

(62)分案原申请数据
201180023785.9 2011.05.11

(73)专利权人 钍能源股份有限公司
地址 美国弗吉尼亚州

(72)发明人 S·M·巴施基尔特塞夫
V·F·库兹内特索夫
V·V·克夫罗莱夫
A·G·莫罗佐夫
M·H·蒙特戈梅里

(74)专利代理机构 北京市金杜律师事务所
11256

代理人 吴亦华 吕小羽

(51)Int.Cl.
G21C 21/10(2006.01)
G21C 3/08(2006.01)
G21C 3/322(2006.01)
G21C 3/326(2006.01)
G21C 3/60(2006.01)
G21C 3/64(2006.01)
G21C 3/06(2006.01)

(56)对比文件
CN 1230280 A,1999.09.29,
CN 1192820 A,1998.09.09,
JP 2008170454 A,2008.07.24,
US 3275564 A,1966.09.27,
GB 904140 A,1962.08.22,
GB 876399 A,1961.08.30,
US 2009252278 A1,2009.10.08,

审查员 陈晓

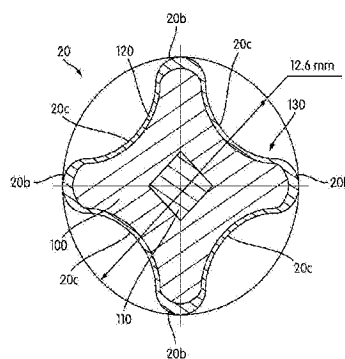
权利要求书1页 说明书23页 附图8页

(54)发明名称

燃料组件

(57)摘要

包括烧结或铸造成坯段并共挤出成螺旋状、多叶形的燃料元件的核燃料组件。燃料内核可以是金属燃料材料和金属非燃料材料的金属合金、或在金属非燃料基质中的陶瓷燃料。燃料元件可以使用更高富集度的裂变材料,同时维持安全的工作温度。根据一个或多个实施方式,这样的燃料元件可以比常规的氧化铀燃料棒在更安全的、较低的温度下提供更多的功率。燃料组件还可以包括多个常规的UO₂燃料棒,这可有助于燃料组件符合常规核反应堆的空间要求。



1. 制造用于核能反应堆的堆芯中的燃料组件的方法,所述方法包括:
通过下述制造多个细长的燃料元件中的每一个:
混合粉末状或单片的燃料材料与粉末状或单片的高熔点金属非燃料材料,其中所述粉末状或单片的燃料材料含有裂变材料,
铸造混合的粉末状或单片的燃料材料和粉末状或单片的高熔点金属非燃料材料,以创建燃料芯料,
将燃料芯料用包层材料围绕,和
共挤出燃料芯料和包层材料以创建燃料元件;和
将所述多个细长的燃料元件安装到燃料组件的框架上。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中:
所述多个细长的燃料元件包括多个细长的金属燃料元件;和
所述粉末状或单片的燃料材料包括金属燃料材料;和
所述燃料芯料包括含有金属燃料材料和粉末状或单片的高熔点金属非燃料材料的合金的金属燃料芯料。
3. 根据权利要求1所述的方法,其中所述粉末状或单片的燃料材料包括陶瓷燃料材料。
4. 根据权利要求1所述的方法,其中所述多个细长的燃料元件提供了燃料组件的所有燃料元件的总体积的至少60%。
5. 根据权利要求1所述的方法,其中所述包层经过共挤出后的平均厚度为至少0.6毫米。
6. 根据权利要求1所述的方法,其中铸造所述粉末状或单片的燃料材料和粉末状或单片的高熔点金属非燃料材料以创建所述燃料芯料包括在所述燃料芯料中创建置换器-坯件-形式的空隙,所述方法进一步包括:
在铸造所述燃料芯料后,将置换器定位在所述燃料芯料的空隙内。
7. 根据权利要求1所述的方法,其中:
所述框架包括被成形并设置以安装到陆基核能反应堆的堆芯上的下接管;和
所述燃料组件是热动力学设计和物理成形以用于陆基核能反应堆的操作中。
8. 根据权利要求7所述的方法,其还包括将燃料组件放置到陆基核能反应堆中。
9. 根据权利要求1所述的方法,其中:
减速剂:燃料比值是与所述多个燃料元件的纵轴垂直并且延伸通过所述多个燃料元件的横截面内的面积比值,所述比值是(1)可用于所述多个燃料元件的减速剂流的总面积比(2)所述多个燃料元件的燃料内核的总面积的比值;并且
所述减速剂:燃料比值是2.4或更小。

燃料组件

[0001] 本案是申请日为2011年5月11日、申请号为201180023785.9、发明名称为“燃料组件”的专利申请的分案申请。

[0002] 交叉引用

[0003] 本申请要求2010年5月11日提交的美国临时申请号61/333,467、2010年10月15日提交的美国临时申请号61/393,499和2011年2月21日提交的美国临时申请号61/444,990的优先权权益,所有这三个申请的题目都是“金属燃料组件(METAL FUAL ASSEMBLY)”,所有三个申请的全部内容在此通过参考引入。

[0004] 发明背景

1. 发明领域

[0005] 本发明总的涉及用于核反应堆的堆芯中的核燃料组件,并且更具体地涉及金属核燃料元件。

[0006] 2. 相关技术描述

[0007] 美国专利申请公开号为2009/0252278 A1公开了包括种子和再生区(blanket)子组件的核燃料组件,所述专利的全部内容作为参考引入本文。该再生区子组件包括钍基燃料元件。该种子子组件包括用于释放中子的铀和/或钚的金属燃料元件,其释放的中子被钍的再生区元件所捕获,从而产生裂变的U-233,其在原位燃烧并为核电厂释放出热量。

[0008] 传统的核电厂通常使用的燃料组件包括多个燃料棒,其每个都包含在圆筒形管中的氧化铀燃料。

[0009] 发明实施方式的概述

[0010] 常规燃料棒的圆筒形管的表面积限制了可以从所述棒传递给主冷却剂的热量。考虑到热流去除的有限表面积,为了避免过热燃料棒,通常大量制了这些氧化铀燃料棒中或混合氧化物(氧化钚和氧化铀)燃料棒中的裂变材料的量。

[0011] 通过将传统氧化铀燃料棒替换为全金属的、多叶形的、粉末冶金共挤出燃料棒(燃料元件),本发明的一个或多个实施方式克服了传统氧化铀燃料棒的各种缺点。金属燃料元件与其氧化铀燃料棒的对应元件相比具有显著更大的表面积,从而促进了在较低温度下从燃料元件到主冷却剂显著更多的热量传递。多叶形燃料元件的螺旋肋为燃料元件提供了结构支撑,其可能有助于减少或消除在其它情况下可能需要的定位格架的数量。这些定位格架的数量减少或消除有利地减小了冷却剂上的水力阻力,从而可以提高到冷却剂的热传递。由于金属燃料元件可以比它们的传统氧化铀燃料棒的对应元件相对更紧凑,燃料组件内提供了更多的空间用于冷却剂,而这又减少了水力阻力并提高了到冷却剂的传热。从金属燃料棒到冷却剂的更高的传热意味着其可能产生更多的热量(即,电能),而由于金属相对于氧化物的显著更高的热导率,其同时使燃料元件保持在较低的工作温度。虽然由于过热问题,传统的氧化铀或混合氧化物燃料棒通常把裂变材料的载荷限制在4-5%左右,但是根据本发明的各种实施方式,金属燃料元件的较高的传热性能使得可以使用显著更多的裂变材料载荷,同时仍维持安全的燃料性能。最终,对于相同的反应堆堆芯,根据本发明的一

个或多个实施方式使用金属燃料元件比传统的氧化铀或混合氧化物燃料棒可能提供的电能更多的电能。

[0012] 根据本发明的一个或多个实施方式,使用全金属燃料元件可以有利地降低燃料失效(failure)的危险,因为金属燃料元件降低了裂变气体释放到冷却剂的风险,而这在传统的氧化铀或混合氧化物燃料棒中是可能存在的。

[0013] 根据本发明的一个或多个实施方式,使用全金属燃料元件还比传统的氧化铀燃料棒更安全,因为全金属设计增加了燃料元件内的传热,从而降低了燃料元件内的温度差异,并降低了燃料元件的局部过热的危险。

[0014] 本发明的一个或多个实施方式提供了用于核能反应堆堆芯(例如,陆基的或海基核反应堆)中的燃料组件。该组件包括含有下接管(nozzle)的框架,该接管被成形和配置以安装到核反应堆内部的堆芯结构上,和由该框架支撑的多个细长的金属燃料元件。多个燃料元件中的每一个都包括含有金属燃料材料和金属非燃料材料的金属燃料合金内核(kernel)。该燃料材料包括裂变材料。每个燃料元件还包括围绕燃料内核的包层(cladding)。多个细长的金属燃料元件提供了以体积计至少70%的燃料组件的全部裂变材料。

[0015] 本发明的一个或多个实施方式提供了用于核能反应堆的堆芯的燃料组件。该组件包括含有下接管的框架,该接管被成形和配置以安装到核反应堆内部的堆芯结构上。该组件还包括多个由该框架支撑的细长的、挤出的金属燃料元件,所述多个燃料元件中的每一个都包括含有金属燃料材料和金属非燃料材料的金属燃料合金内核。该燃料材料包括裂变材料。燃料元件还包括围绕燃料内核的包层。金属燃料元件区域的减速剂(moderator):燃料的比值是2.5或更低。

[0016] 本发明的一个或多个实施方式提供了制造用于核能反应堆的堆芯中的燃料组件的方法。该方法包括通过下述制造多个细长的金属燃料元件中的每一个:将粉末金属燃料与粉末金属非燃料材料相混合,其中粉末金属燃料材料包括裂变材料,烧结混合的粉末金属燃料和金属非燃料材料以产生燃料芯料,用包层材料围绕燃料堆芯原料,并共挤出燃料芯料和包层材料来产生燃料元件。该方法还包括将多个细长的金属燃料元件安装在燃料组件的框架上。金属燃料元件区域内的减速剂:燃料的比值是2.5或更低。该方法可以包括在所述烧结前将置换器(displacer)放置在混合的粉末金属燃料材料和金属非燃料材料中,以使所述烧结产生包含置换器的燃料芯料。燃料组件可以被放入陆基核能反应堆中。

[0017] 根据这些实施方式中的一个或多个,所述多个细长的金属燃料元件提供了燃料组件中所有燃料元件的总体积的至少60%。

[0018] 根据这些实施方式中的一个或多个,包层的平均厚度是至少为0.6毫米。

[0019] 根据这些实施方式中的一个或多个,燃料组件是热动力学设计和物理成形的且用于在陆基核能反应堆中操作。

[0020] 根据一个或多个实施方式,燃料组件可与陆基核能反应堆组合使用,其中燃料组件被置于陆基核能反应堆中。

[0021] 根据这些实施方式中的一个或多个,对于多个所述多个燃料元件:所述燃料内核的燃料材料富含20%或更少的铀-235和/或铀-233并占20%到30%体积分数的燃料内核;以及非燃料金属占70%到80%体积分数的燃料内核。对于多个所述多个燃料元件,燃料材

料富集度可以为15%到20%之间。燃料内核的非燃料金属可包括锆。

[0022] 根据这些实施方式中的一个或多个,内核包括 δ -相的UZr₂。

[0023] 根据这些实施方式中的一个或多个,对于多个的所述多个燃料元件:燃料内核的燃料材料包括铀;燃料内核的非燃料金属包括锆;并且燃料内核的非燃料金属占70%到97%体积分数的燃料内核。

[0024] 根据这些实施方式中的一个或多个,燃料材料包括以下组合:铀和钍;铀和钍;或铀、铀和钍。

[0025] 根据这些实施方式中的一个或多个,所述多个燃料元件的多个包层被冶金结合到燃料内核上。

[0026] 根据这些实施方式中的一个或多个,所述多个燃料元件的多个的非燃料金属包括铝。

[0027] 根据这些实施方式中的一个或多个,所述多个燃料元件的多个的非燃料金属包括高熔点金属。

[0028] 根据这些实施方式中的一个或多个,所述多个燃料元件的多个的包层包括锆。

[0029] 根据这些实施方式中的一个或多个,所述多个燃料元件的多个通过共挤出燃料内核和包层来制造。

[0030] 根据这些实施方式中的一个或多个,燃料组件、一个或多个其燃料元件、和/或一个或多个其燃料内核包括可燃抑制剂(poison)。

[0031] 根据这些实施方式中的一个或多个,所述多个细长的金属燃料元件提供了燃料组件中全部裂变材料的以体积计的至少80%。

[0032] 根据这些实施方式中的一个或多个,陆基核能反应堆包括具有在2010年之前实际使用的反应堆设计的传统核电厂。框架可以被成形和配置以安装于陆基核能反应堆中以代替常规的用于反应堆的氧化铀燃料组件。

[0033] 根据这些实施方式中的一个或多个,一个或多个燃料元件具有限定多个螺旋肋的螺旋扭转的、多叶形轮廓(profile)。多个燃料元件的相邻元件的间隔肋可以在燃料元件的轴向长度上周期性地彼此接触,这样的接触有助于保持相对于彼此的燃料元件的间距。燃料组件可具有的减速剂对燃料的比值为至少2.5或2.5或更小。所述多叶形轮廓可能包括相邻叶片之间的凹形区域。

[0034] 根据这些实施方式中的一个或多个,所述多个金属燃料元件的各自的金属燃料合金内核通过烧结燃料材料和金属非燃料材料而形成。

[0035] 根据这些实施方式中的一个或多个,所述多叶形轮廓包括叶片的凸结构(tip)和相邻叶片之间的交点,其中在凸结构处的包层比在交点处的包层厚。

[0036] 本发明的一个或多个实施方式提供了制造用于陆基核能反应堆的堆芯的燃料组件的方法。该方法包括通过混合粉末金属燃料与粉末金属非燃料材料来制造多个细长的金属燃料元件中的每一个的方法,其中粉末金属燃料材料包括裂变材料。每个细长的金属燃料元件的制造还包括烧结混合的粉末金属燃料和金属非燃料材料以创建燃料芯料,用包层材料围绕燃料堆芯原料,并共挤出燃料芯料和包层材料来创建燃料元件。该方法还包括将多个细长的金属燃料元件安装在燃料组件的框架上,所述燃料组件包括下接管,该接管被成形和配置以安装到陆基核能反应堆内部的堆芯上。多个细长的金属燃料元件提供了以体

积计至少70%的燃料组件的全部裂变材料。所述燃料组件是热动力学设计和物理成形的且用于在陆基核能反应堆中的操作。

[0037] 根据这些实施方式中的一个或多个,该方法还包括将置换器在所述烧结前放置在混合的粉末金属燃料材料和金属非燃料材料中,以使所述烧结产生包含该置换器的燃料芯料。

[0038] 根据这些实施方式中的一个或多个,该方法还包括将燃料组件放入陆基核能反应堆中。

[0039] 本发明的一个或多个实施方式提供了核反应堆,其包括加压重水反应堆和设置在加压重水堆中的燃料组件。燃料组件包括多个彼此附着的细长的金属燃料元件。多个燃料元件的每一个包括粉末冶金金属燃料合金内核,该内核包含金属燃料材料和金属非燃料金属,燃料材料包含裂变材料。每个燃料元件还包括围绕燃料内核的包层。多个细长的金属燃料元件提供了燃料组件的全部裂变材料的以体积计至少70%。燃料元件中的每一个可以具有有限多个螺旋间隔肋的螺旋扭转的、多叶形轮廓。

[0040] 本发明的一个或多个实施方式提供了核反应堆,其包括加压重水堆反应堆;和设置在加压重水反应堆的燃料组件。燃料组件包括多个细长的互相附着的金属燃料元件,所述多个燃料元件的每一个包括:包含金属燃料材料和金属非燃料材料的金属燃料合金内核,燃料材料包括裂变材料,和围绕燃料内核的包层。金属燃料元件区域中减速剂:燃料的比值可以为2.5或更低。

[0041] 根据这些实施方式中的一个或多个,燃料组件还包括由框架支撑的多个 UO_2 燃料元件,所述多个 UO_2 燃料元件中的每一个都含有 UO_2 燃料。多个细长的 UO_2 燃料元件中的至少一些可以从所述多个细长的金属燃料元件横向向外放置。 UO_2 燃料可能具有低于15%的铀-235富集度以。

[0042] 根据这些实施方式中的一个或多个,围板(shroud)将流过多个细长的 UO_2 燃料元件的冷却剂流与流过多个细长的金属燃料元件的冷却剂流分隔开。

[0043] 本发明的一个或多个实施方式提供了用于核能反应堆的堆芯的燃料组件。该组件包括含有下部接管的框架,该接管被成形和配置以安装到核反应堆内部的堆芯结构上。该组件包括多个由所述框架支撑的细长的、挤出的金属燃料元件。所述多个燃料元件的每一个包括含有金属燃料材料和金属非燃料材料的金属燃料合金内核和围绕燃料内核的包层,其中所述燃料材料包括裂变材料。该组件包括多个由该框架支撑的附加的细长的燃料元件。如燃料组件的横截面中观察到的,所述多个附加的细长燃料元件可设置在单个-燃料-元件-宽的环内,该环围绕着多个细长的、挤出的金属燃料元件。多个细长的金属燃料元件可提供燃料组件中的所有燃料元件的总体积的至少60%。

[0044] 根据这些实施方式中的一个或多个,所述多个附加的细长的燃料元件中的每一个包括空心棒,该棒内配置有粒状 UO_2 燃料。

[0045] 根据这些实施方式中的一个或多个,支撑多个附加的细长的燃料元件的部分燃料组件与支撑多个细长的、挤出的金属燃料元件的部分燃料组件是分不开的。

[0046] 根据这些实施方式中的一个或多个,所述多个附加的细长的燃料元件作为一个单元与所述多个细长的、挤出的金属燃料元件是不可分离的。

[0047] 根据这些实施方式中的一个或多个,燃料组件定义了17x17的位置图案;多个细长

的、挤出的金属燃料元件中的每一个被布置在其中一个图案位置上；多个细长的、挤出的金属燃料元件中没有元件被布置在17x17图案的任何周边位置上；并且多个附加的细长的燃料元件中的每一个被布置在17x17图案的周边位置的不同位置。

[0048] 根据上述实施方式中的一个或多个，内核可包括陶瓷燃料材料代替金属燃料材料。在一个或多个这样的实施方式中，燃料材料包含设置在金属非燃料材料的基质中的陶瓷燃料材料。相反，在一个或多个金属燃料的实施方式中，所述多个细长的、挤出的燃料元件包括多个细长的、挤出的金属燃料元件；燃料材料包括金属燃料材料；且燃料内核包括含有金属燃料材料的合金和金属非燃料材料的基质的金属燃料合金内核。

[0049] 本发明的这些和其它方面的各种实施方式，以及操作方法和相关的结构元件功能和制造的零件和经济的组合，将在考虑下面的参照附图的描述和所附权利要求后变得更加显而易见，所有的附图形成了本说明书的一部分，其中在各图中相同的附图标记指定相应的部件。在本发明的一个实施方式中，在此示出的结构部件被按比例绘制。但是，应当清楚地理解，附图仅为图示说明和描述目的，并不意欲作为本发明的限制的定义。此外，应该理解的是，在本文中的任何一个实施方式中示出或描述的结构特征也可以用于其它实施方式中。如在说明书和权利要求中使用的，单数形式的“一个”和“该(the)”包括复数对象，除非上下文清楚地相反指示。

[0050] 本发明还包含以下项目。

[0051] 1. 用于核能反应堆的堆芯中的燃料组件，所述组件包括：

[0052] 包括下接管的框架，所述下接管被成形和设置以安装到核反应堆内部堆芯结构上；和

[0053] 多个细长的、挤出的由所述框架支撑的燃料元件，所述多个燃料元件的每一个包括

[0054] 包含被置于金属非燃料材料基质中的燃料材料的燃料内核，所述燃料材料包括裂变材料，和

[0055] 围绕燃料内核的包层，

[0056] 其中燃料元件区域中的减速剂：燃料的比值是2.5或更低。

[0057] 2. 如项目1的燃料组件，其中：

[0058] 所述多个细长的、挤出的燃料元件包括多个细长的、挤出的金属燃料元件；

[0059] 所述燃料材料包括金属燃料材料；和

[0060] 所述燃料内核包括含有金属燃料材料的合金和金属非燃料材料的基质的金属燃料合金内核。

[0061] 3. 如项目2的燃料组件，其中所述内核包括 δ -相UZr₂。

[0062] 4. 如项目1的燃料组件，其中所述燃料材料包括设置在金属非燃料材料的基质中的陶瓷燃料材料。

[0063] 5. 如项目1的燃料组件，其中所述多个细长的燃料元件提供了燃料组件的所有燃料元件的总体积的至少60%。

[0064] 6. 如项目1的燃料组件，其中所述包层的平均厚度是至少为0.6毫米。

[0065] 7. 如项目1的燃料组件，其中所述燃料组件是热动力学设计和物理成形用于陆基核能反应堆操作的。

- [0066] 8.如项目7的燃料组件,与陆基核能反应堆相组合,其中所述燃料组件设置在陆基核能反应堆内。
- [0067] 9.如项目7的燃料组件,其中:
- [0068] 所述陆基核能反应堆包括具有在2010年以前实际应用的反应堆设计的常规核电厂;和
- [0069] 所述框架被成形和配置以安装到陆基核能反应堆中代替所述反应堆的常规氧化铀燃料组件。
- [0070] 10.如项目1的燃料组件,其中所述多个燃料元件的各自的燃料内核通过烧结燃料材料和金属非燃料材料而形成。
- [0071] 11.如项目1的燃料组件,其中,关于所述多个燃料元件的多个:
- [0072] 燃料内核中的燃料材料富集了20%或更少的铀-235和/或铀-233并占燃料内核的20%至30%的体积分数;和
- [0073] 非燃料金属占燃料内核的70%至80%的体积分数。
- [0074] 12.如项目11的燃料组件,其中,关于所述多个燃料元件的多个,燃料材料富集度在15%至20%之间。
- [0075] 13.如项目11的燃料组件,其中,关于所述多个燃料元件的多个,燃料内核的非燃料金属包括锆。
- [0076] 14.如项目1的燃料组件,其中,关于所述多个燃料元件的多个:
- [0077] 燃料内核的燃料材料包括铀;
- [0078] 燃料内核的非燃料金属包括锆;和
- [0079] 燃料内核的非燃料金属占燃料内核的70%至97%的体积分数。
- [0080] 15.如项目1的燃料组件,其中所述燃料材料包括下列的组合:铀和钍;铀和钍;或铀、铀和钍。
- [0081] 16.如项目1的燃料组件,其中所述多个燃料元件的多个的包层冶金结合到燃料内核。
- [0082] 17.如项目1的燃料组件,其中所述多个燃料元件的多个的非燃料金属包括铝。
- [0083] 18.如项目1的燃料组件,其中所述多个燃料元件的多个的非燃料金属包括高熔点金属。
- [0084] 19.如项目1的燃料组件,其中所述多个燃料元件的多个的包层包括锆。
- [0085] 20.如项目1的燃料组件,其中所述多个燃料元件的多个的每一个具有限定了多个螺旋肋的螺旋扭转的多叶形轮廓。
- [0086] 21.如项目20的燃料组件,其中所述多个燃料元件的相邻元件的螺旋肋在燃料元件的轴向长度上周期性地彼此接触,这样的接触有助于保持燃料元件相对于彼此的间距。
- [0087] 22.如项目20的燃料组件,其中所述多叶形轮廓包括在相邻叶片之间的凹形区域。
- [0088] 23.如项目20的燃料组件,其中:
- [0089] 所述多叶形轮廓包括相邻叶片之间的叶片凸结构和交点,和
- [0090] 关于所述多个燃料元件的所述多个,在所述凸结构处的包层比交点处的厚。
- [0091] 24.如项目1的燃料组件,其中所述燃料组件包含可燃性抑制剂。
- [0092] 25.如项目24的燃料组件,其中所述多个细长的燃料元件中的至少一个包含可燃

性抑制剂。

[0093] 26. 如项目1的燃料组件,其还包括多个由所述框架支撑的 UO_2 燃料元件,所述多个 UO_2 燃料元件的每一个都包含 UO_2 燃料。

[0094] 27. 如项目26的燃料组件,其中所述多个细长的 UO_2 燃料元件中的至少一些是从所述多个细长的燃料元件的横向向外的方向定位的。

[0095] 28. 如项目27的燃料组件,该组件还包括围板,所述围板将流经多个细长的 UO_2 燃料元件的冷却剂流与流经多个细长的燃料元件的冷却剂流分隔开。

[0096] 29. 如项目26的燃料组件,其中所述 UO_2 燃料具有小于15%的铀-235富集度。

[0097] 30. 制造用于核能反应堆的堆芯中的燃料组件的方法,所述方法包括:

[0098] 通过下述制造多个细长的燃料元件中的每一个:

[0099] 混合粉末状燃料材料与粉末状金属非燃料材料,其中所述粉末状燃料材料含有裂变材料,

[0100] 烧结混合的粉末状燃料材料和金属非燃料材料,以创建燃料芯料,

[0101] 将燃料芯料用包层材料围绕,和

[0102] 共挤出燃料芯料和包层材料以创建燃料元件;和

[0103] 将多个细长的燃料元件安装到燃料组件的框架上,

[0104] 其中燃料元件区域中的减速剂:燃料的比值是2.5或更低。

[0105] 31. 如项目30的方法,其中:

[0106] 所述多个细长的燃料元件包括多个细长的金属燃料元件;和

[0107] 所述粉末状燃料材料包括粉末状金属燃料材料;和

[0108] 所述燃料芯料包括含有金属燃料材料和金属非燃料材料的合金的金属燃料芯料。

[0109] 32. 如项目30的方法,其中所述粉末状燃料材料包括粉末状陶瓷燃料材料。

[0110] 33. 如项目30的方法,其中所述多个细长的燃料元件提供了燃料组件的所有燃料元件的总体积的至少60%。

[0111] 34. 如项目30的方法,其中所述包层经过共挤出后的平均厚度为至少0.6毫米。

[0112] 35. 如项目30的方法,其还包括在所述烧结之前,将置换器定位在混合的粉末状燃料材料和金属非燃料材料之内,以使所述烧结产生含有所述置换器的燃料芯料。

[0113] 36. 如项目30的方法,其中:

[0114] 所述框架包括被成形并设置以安装到陆基核能反应堆的堆芯上的下接管;和

[0115] 所述燃料组件是热动力学设计和物理成形以用于陆基核能反应堆的操作中。

[0116] 37. 如项目36的方法,其还包括将燃料组件放置到陆基核能反应堆中。

[0117] 38. 核反应堆,其包括:

[0118] 加压重水反应堆;和

[0119] 设置在加压重水反应堆中的燃料组件,所述燃料组件包括:

[0120] 多个细长的彼此连接的燃料元件,所述多个燃料元件的每一个包括

[0121] 含有配置在金属非燃料材料的基质中的燃料材料的燃料内核,所述燃料材料包括裂变材料,和

[0122] 围绕燃料内核的包层,

[0123] 其中燃料元件区域中的减速剂:燃料的比值是2.5或更低。

[0124] 39.如项目38的核反应堆,其中每个所述燃料元件具有限定了多个螺旋间隔肋的螺旋扭转的多叶形轮廓。

[0125] 40.用于核能反应堆的堆芯的燃料组件,所述组件包括:

[0126] 包括下接管的框架,所述下接管被成形并设置以安装到核反应堆内部堆芯结构上;

[0127] 多个细长的、挤出的由所述框架支撑的燃料元件,所述多个燃料元件的每一个包括

[0128] 含有设置在金属非燃料材料的基质中的燃料材料的燃料内核,所述燃料材料包括裂变材料,和

[0129] 围绕燃料内核的包层;和

[0130] 所述框架支撑的多个附加的细长的燃料元件,

[0131] 其中,如燃料组件的横截面中所看到的,所述多个附加的细长的燃料元件被定位在单个燃料元件宽度的环内,所述环围绕着多个细长的、挤出的燃料元件,

[0132] 其中所述多个细长的燃料元件提供了燃料组件的所有燃料元件的总体积的至少60%。

[0133] 41.如项目40的燃料组件,其中所述多个附加的细长的燃料元件的每一个都包括空心棒,在所述棒内配置有颗粒状UO₂燃料。

[0134] 42.如项目40的燃料组件,其中支撑多个附加的细长的燃料元件的部分燃料组件与支撑多个细长的、挤出的燃料元件的部分燃料组件是分不开的。

[0135] 43.如项目40的燃料组件,其中所述多个附加的细长的燃料元件作为单元不能与所述多个细长的、挤出的燃料元件分开。

[0136] 44.如项目40的燃料组件,其中:

[0137] 所述燃料组件定义了17×17图案的位置;

[0138] 所述多个细长的、挤出的燃料元件中的每一个被布置在一个图案位置中;

[0139] 所述多个细长的、挤出的燃料元件没有元件被布置在17×17图案的外周位置上;和

[0140] 所述多个附加的细长的燃料元件中的每一个被布置在17×17图案的外周位置的不同位置上。

附图说明

[0141] 为了更好的理解本发明的实施方式以及其中的其他目标和其进一步的特征,可以参考下述描述,其与附图结合使用,其中:

[0142] 图1是根据本发明的一个实施方式的燃料组件的横截面视图,所述横截面采取自定间隔(self-spacing)的平面;

[0143] 图2是图1的燃料组件的横截面视图,所述横截面采取从图1的视图的燃料元件扭转偏移1/8的平面;

[0144] 图3是图1的燃料组件的横截面视图,其采取平行于燃料组件的轴向方向的平面;

[0145] 图4是图1的燃料组件中的燃料元件的透视图;

[0146] 图5是图3中的燃料元件的横截面视图;

- [0147] 图6是图3中的燃料元件的横截面视图,被限定在常规的多边形中;
- [0148] 图7A是根据可选实施方式的用于在加压重水反应堆中的燃料组件的端视图;
- [0149] 图7B是图7A的燃料组件的部分侧视图;
- [0150] 图8是使用图7A和7B中示意的燃料组件的加压重水反应堆的示意图;
- [0151] 图9是图3中的燃料元件的横截面视图;和
- [0152] 图10是根据本发明的一个实施方式的燃料组件的横截面视图。
- [0153] 本发明实施方式的详述
- [0154] 图1-3示出了根据本发明的一个实施方式的燃料组件10。如图3中所示,燃料组件10包括多个由框架25支撑的燃料元件20。
- [0155] 如图3所示,框架25包括围板30,导向管40,上接管50,下接管60,下固定板70,上固定板80,和/或其他结构,这些结构使得组件10在核反应堆中作为燃料组件进行操作。在不脱离本发明范围的情况下,根据本发明的多个实施方式,可以省略框架25的这些部件的一个或多个。
- [0156] 如图3所示,围板25装入上接管50和下接管60。下接管60(或组件10的其他合适的结构)被构造和成形以在组件10和在其中放置有组件10的反应堆90之间提供流体联界面,以促进冷却剂通过下接管60从组件10流进反应堆的堆芯中。上接管50促进了热的冷却剂从组件10流向发电厂的蒸汽发生器(用于PWR)和汽轮机(用于BWR)等。接管50、60具有专门设计的正确匹配反应堆堆芯内部结构的形状。
- [0157] 如图3所示,下固定板70和上固定板80优选牢固安装(例如,通过焊接,合适的紧固件(例如,螺栓,螺钉),等)到围板30或下接管60(和/或组件10的其他合适的结构部件)上。
- [0158] 元件20的下部轴向端形成定位销(pin)20a,其安装在下固定板70中的孔70a中以支撑元件20并有助于保持元件20的适当的间距。定位销20a以防止元件20沿它们的轴旋转或相对于下固定板70的轴向移动的方式安装到孔70a中。这种对于旋转的限制有助于保证在相邻元件20间的接触点都发生在沿元件20的相同轴向位置(即下面讨论的自定间隔平面)。定位销20a和孔70a之间的连接,可以通过焊接、过盈配合、啮合防止旋转的非圆筒形特征(例如,键槽和花键)、和/或任何其它合适的装置创建,以限制元件20相对于下固定板70的轴向和/或旋转移动。下固定板70包括轴向延伸的通道(例如,网格的开口),通过该通道冷却剂流向元件20。
- [0159] 元件20的上部轴向端部形成可自由插入到上固定板80中的孔80a的定位销20a,以允许上部定位销20a可自由轴向向上移动到上固定板80,同时帮助维持元件20之间的间距。其结果是,当元件20在裂变期间沿轴向生长时,细长元件20可以自由地进一步延伸到上固定板80。
- [0160] 如图4所示,定位销70a经过元件20的中央部分。
- [0161] 图4和5示出了组件10中的单独的燃料元件/棒20。如图5所示,燃料元件20的细长的中央部分具有四叶形横截面。元件20的横截面在元件20的中央部分的长度上基本上保持均匀。每个燃料元件20具有燃料内核100,其包括高熔点金属和包含裂变材料的燃料材料。
- [0162] 包括高熔点金属的置换器110沿纵轴被放置在燃料内核100的中心。置换器110通过替代否则还将占据该空间的裂变材料,有助于限制燃料元件20的最厚部分的中心中的温度,并且最小化了沿着燃料元件的表面的热通量变化。根据各种实施方式,置换器110可被

完全消除。

[0163] 如图5所示,燃料内核100被高熔点金属包层120所包围。包层120优选是足够厚、足够强、和足够的柔韧性以忍受辐射导致的核100的膨胀且不发生失效(例如,使内核100不露于包层120以外的环境)。根据一个或多个实施方式,整个包层120的厚度是至少为0.3毫米、0.4毫米、0.5毫米、和/或0.7毫米。根据一个或多个实施方式,包层120的厚度至少为0.4毫米,以减小包层120的基于膨胀的失效、基于氧化的失效、和/或任何其他机制之失效的几率。

[0164] 在环形方向(即,如在图5的横截面视图所示的包层120的周边部位)以及内核100的轴向/纵向长度上(如图4所示),包层120可以具有基本均匀的厚度。或者,如图5所示,根据一个或多个实施方式,包层120在叶片20b的凸结构处比在叶片20b之间的凹形相交处/区域20c的要厚。例如,根据一个或多个实施方式,叶片20b凸结构处的包层120要比凹形相交处/区域20c的包层120厚至少10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%、125%、和/或150%。在叶片20b的凸结构处的较厚的包层120提供了叶片20b在凸结构处的改进的耐磨性能,在此处相邻的燃料元件20在自定间隔平面(下面讨论)处彼此接触。

[0165] 根据本发明的一个或多个实施方式,置换器110、燃料内核100和包层120中使用的高熔点金属包括锆。如本文所使用的,术语锆意味着纯锆或锆与其他合金材料的组合。然而,可以在不脱离本发明的范围内使用其它高熔点金属代替锆(例如,铌、钼、钽、钨、铪、钛、钒、铬、锆、钎、钨、铀、和/或其它金属)。如本文所用,术语“高熔点金属”是指任何具有熔点高于1800摄氏度(2073K)的金属/合金。

[0166] 此外,在某些实施方式中,高熔点金属可能被另一个非燃料金属,例如铝替换。然而,非难熔的非燃料金属是最适合用于在较低的温度下(例如,具有高度约1米和电力功率为100兆瓦或更少的小堆芯)操作的反应堆堆芯。高熔点金属优选用于在较高操作温度下的堆芯。

[0167] 如图5所示,燃料内核100的中央部分和包层120具有四叶形轮廓形成的螺旋间隔肋130。该置换器110也可以被成形以在肋130处向外突出(例如,方形置换器110的拐角与肋130对齐)。根据本发明的可选实施方式,在不脱离本发明的范围的情况下,燃料元件20可以具有更多或更少数量肋130。例如,如通常在美国专利申请公开号2009/0252278A1的图5中示出的,燃料元件可具有三个肋/叶片,其优选彼此沿周边以相等的距离间隔开。肋/叶片130的数量可能至少部分地取决于燃料组件10的形状。例如,四叶形元件20可能较好地适用于具有方形横截面的燃料组件10(例如,在AP-1000中使用的)。相反,三叶形燃料元件可能较好地适用于六边形的燃料组件(例如,在VVER中使用的)。

[0168] 根据一个或多个实施方式,图9示出了燃料元件20的各种尺寸。根据一个或多个实施方式,下表中指定的任何这些尺寸、参数和/或范围,在不脱离本发明的范围的情况下,可以增加或减少直至5%、10%、15%、20%、25%、30%、40%、50%、或更多。

[0169]

燃料元件 20 的参数	符号	实施例值	单位
外接直径	D	9-14 (例如 12.3, 12.4, 12.5, 12.6)	mm
叶片厚度	Δ	2.5-3.8 (例如 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8), 变量	mm
最小包层厚度	δ	0.4-1.2 (例如 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2)	mm
叶片处的包层厚度	δ^{\max}	0.4-2.2 (例如 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2), 1.5δ , 2δ , 2.5δ	mm
平均包层厚度		0.4-1.8 (例如 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8), 至少 0.4, 0.5 或 0.6	mm
在叶片边缘处的包层的曲率半径	r	$\Delta/2$, $\Delta/1.9$, 变量	mm
在叶片边缘处的内核的曲率半径	r_f	0.5-2.0 (例如 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0), $(\Delta-2\delta)/2$, 变量	mm

[0170]

相邻叶片间的曲率半径	R	2-5 (例如 2, 3, 4, 5), 变量	mm
中央置换器的边长	a	1.5-3.5 (例如 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5)	mm
燃料元件周长		25-60 (例如 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60)	mm
燃料元件面积		50-100 (例如 50, 60, 70, 80, 90, 100)	mm ²
燃料内核面积, mm ²		30-70 (例如 30, 40, 50, 60, 70)	mm ²
富集度		≤ 19.7	w/o
U 分数		≤ 25	v/o

[0171] 如图4所示,置换器110具有方形的正四边形的横截面形状,其中方形的正四边形的拐角与肋130对齐。置换器110形成了沿肋130的螺旋方向的螺旋,使得置换器110的拐角与肋130沿着燃料内核100的轴向长度上保持对齐。在具有更多或更少的肋130的可选实施方式中,置换器110优选具有正多边形的横截面形状,所述正多边形具有与元件20具有的肋相同多的边。

[0172] 如图6所示,元件20的中央部分的横截面面积优选基本上小于正方形200的面积,其中每个肋130的凸结构与正方形200的一个边相切。在更通用的术语中,具有n个肋的元件20的横截面面积优选小于具有n个边的正多边形的面积,其中每个肋130的凸结构与多边形的一个边相切。根据各种实施方式,元件20的面积与正方形面积(或具有多于或少于4个肋130的元件20的相关正多边形)的比值小于0.7、0.6、0.5、0.4、0.35、0.3。如图1所示,此面积比接近于在围板30内由燃料元件20所占用的可用空间有多少,因此较低的比率意味着更多的空间可有利地用于冷却剂,该比值还起着中子减速剂的作用并且其增加了减速剂对燃料的比值(对中子重要的)、降低了液压阻力、并增加了从元件20到冷却剂的热传递。根据各种实施方式,所得到的减速剂对燃料比值是至少为2.0、2.25、2.5、2.75、和/或3.0(相对于使用传统的圆筒状的氧化铀棒时的1.96)。同样地,根据各种实施方式,与使用一种或多种传统的使用圆筒状的氧化铀棒的燃料组件相比,燃料组件10的流动面积增加了16%以上。增加的流动面积可能会降低冷却剂通过组件10的压降(相对于传统的氧化铀组件),其相对于将冷却剂泵送通过组件10可能具有优势。

[0173] 如图4所示,元件20是轴向细长的。在所示的实施方式中,每个元件20是完整长度的元件并且从位于或靠近组件10的底部的下固定板70整个延伸整个路径到位于或靠近组件10的顶部的上固定板80。根据各种实施方式和反应堆设计,这可能会导致在任何地方的元件20的长度从1米长(紧凑型反应堆)到超过4米长。因此,对于典型的反应堆,元件20的长度可以是在1和5米之间。然而,在不脱离本发明的范围的情况下,元件20可被拉长或缩短以适应任何其他尺寸的反应堆。

[0174] 虽然图示的元件20本身是全部长度,但元件20可被选择性地分段,以至于多个分段一起成为全部长度的元件。例如,4个单个1米的元件分段20可以端到端的对齐,以有效地创建全部长度的元件。附加固定板70,80可以设置在分段之间的交叉点以维持轴向间距和分段的排列。

[0175] 根据一个或多个实施方式,燃料内核100包括高熔点金属/合金和燃料材料的组合。该高熔点金属/合金可以包括锆合金。燃料材料可包括低富集的铀(例如,U235,U233)、钷、或与如下所定义的低富集铀和/或钷相结合的钷。如本文所用,“低富集铀”是指整个燃料材料包含少于20重量%的裂变材料(例如,铀-235或铀-233)。根据各种实施方式,铀燃料材料富集了以重量计1%到20%、5%到20%、10%到20%,和/或15%到20%之间的铀-235。根据一个或多个实施方式,燃料材料包含19.7%的富集的铀-235。

[0176] 根据各种实施方式,燃料材料可以占燃料内核100的体积分数为3-10%、10-40%、15-35%、和/或20%至30%。根据各种实施方式,高熔点金属可以占燃料内核100的体积分数为60-99%、60-97%、70-97%、60-90%、65-85%、和/或70%至80%。根据一个或多个实施方式,一个或多个这些范围中的体积分数提供了具有有益性质的合金,所述体积分数由指定的合金组合物的材料相图所定义。燃料内核100可以包括高合金燃料的(即,相对于铀

组份的相对高浓度的合金组份) Zr-U合金, 其由 δ 相的 UZr_2 , 或 δ 相的 UZr_2 与 α 相Zr的组合所组成。根据一个或多个实施方式, 该 δ 相的U-Zr二元合金体系可以是锆组合物范围为燃料内核100的约65-81体积百分比(约63至80原子百分比)。这些实施方式中的一个或多个已发现会导致燃料元件20的低体积的、辐射诱导的膨胀。根据一个或多个这样的实施方式, 裂变气体被夹带在金属内核100本身中, 使得燃料元件20的一个或多个实施方式可以从燃料元件20省略传统的气隙(gas gap)。根据一个或多个实施方式, 这种膨胀可能显著低于如果使用低合金(只有 α 相)组合物将发生的膨胀(例如, 比如果使用低合金的 α 相的U-10Zr燃料至少降低10%、20%、30%、50%、75%、100%、200%、300%、500%、1000%、1200%、1500%、或更多的体积百分比的膨胀, 以每原子百分比燃耗计)。根据本发明的一个或多个实施方式, 辐射诱导的燃料元件20或其内核100的膨胀可以是小于每原子百分比燃耗的20、15、10、5、4、3、和/或2体积百分比。根据一个或多个实施方式, 预计膨胀是每原子百分比燃耗约1体积百分比。

[0177] 根据本发明的一个或多个可选实施方式, 所述燃料内核可被替换为具有与上面讨论的U-Zr燃料内核100的相同或相似体积百分比的铀-锆二元合金, 或替换为具有与上面讨论的U-Zr燃料内核100不同的体积百分比的铀-锆二元合金。例如, 内核100中的铀分数可能基本上小于相应的铀基内核100中的相应的铀分数, 这是因为铀通常具有约60%至70%重量分数的裂变同位素, 而LEU铀具有20%或更少重量分数的裂变铀-235同位素。根据各种实施方式, 内核100中的铀的体积分数可以是小于15%、小于10%、和/或小于5%, 同时相应地调整其中高熔点金属的体积分数。

[0178] 根据本发明的一个或多个实施方式, 使用高合金内核100也可能导致在辐射期间裂变气体的有利的保留。氧化物燃料和低合金金属燃料通常表现出显著的裂变气体释放, 其典型地通过燃料设计来调节, 通常在燃料棒内具有集气室(plenum)以包含释放的裂变气体。相比之下, 根据本发明的一个或多个实施方式的燃料内核100不释放裂变气体。这部分地由于燃料内核100的低的操作温度以及裂变气体原子(具体地为氙和氪)的行为类似固体裂变产物的事实。根据一个或多个实施方式, 不会发生裂变气泡沿粒子边界向燃料内核100外部的形成和迁移。根据一个或多个实施方式, 在足够高的温度下, 小(直径为几微米)裂变气泡可能形成。然而, 根据本发明的一个或多个实施方式, 这些气泡在燃料内核100内保持孤立并且没有形成促进裂变气体释放的相互连接的网络。在燃料核100和包层120之间的冶金结合可能提供裂变气体释放的额外障碍。

[0179] 根据各种实施方式, 一个或多个燃料元件20的燃料内核100(或包层120或燃料元件20的其它合适部分)可与可燃性抑制剂如钆、硼、铪或其它合适的中子吸收材料形成合金以形成整体的、可燃抑制剂燃料元件。燃料组件10中的不同的燃料元件20可以利用不同的可燃抑制剂和/或不同量的可燃抑制剂。例如, 燃料组件10中的一些燃料元件20(例如, 小于75%、小于50%、小于20%、1-15%、1-12%、2-12%等)可包括25、20、和/或15重量百分比或更少的Gd(如1-25重量百分比、1-15重量百分比、5-15重量百分比等)的内核100。燃料组件10的其他燃料元件20(含有比用钆的燃料元件20更大数量的燃料元件20, 例如10-95%、10-50%、20-50%)可包括具有10或5重量百分比或更少的铪(例如, 0.1-10.0重量百分比, 0.1-5.0重量百分比等)的内核100。

[0180] 根据各种实施方式, 可燃性抑制剂替换了相关的燃料元件20的燃料材料(而不是

高熔点金属),所述燃料元件20在它们的内核100中不包括可燃性抑制剂。例如,根据其中内核100在没有抑制剂的情况下还含有65体积百分比的锆和35体积百分比的铀的燃料元件20的一个实施方式中,该燃料元件20包括具有16.5体积百分比的Gd、65体积百分比的锆和18.5体积百分比的铀的内核100。根据一个或多个其它的实施方式,可燃性抑制剂相反替换高熔点金属,而不是燃料材料。根据一个或多个其它的实施方式,内核100中的可燃性抑制剂按比例替换了高熔点金属和燃料材料。因此,根据各种这样的实施方式,燃料内核100中的可燃性抑制剂可被放置在 δ -相UZr₂或 α -相的Zr中,以使可燃性抑制剂的存在不改变其中放置了可燃性抑制剂的UZr₂合金或Zr合金的相。

[0181] 内核100中含有可燃性抑制剂的燃料元件20可组成用于反应堆堆芯的一个或多个燃料组件10中的燃料元件20的一部分(例如,0-100%、1-99%、1-50%、等)。例如,含有可燃性抑制剂的燃料元件20可被定位在组件10的燃料组件格子中的重要位置(该组件10还包括没有可燃性抑制剂的燃料元件20),以便在操作周期的早期提供配电控制和减少可溶硼的浓度。同样,选择包括具有可燃性抑制剂的燃料元件20的燃料组件10定位在反应堆堆芯内相对于组件10(该组件10不包括含有可燃性抑制剂的燃料元件20)的重要位置上,以便在操作周期的早期提供配电控制和减少可溶硼的浓度。使用这种整体的可燃吸收体可以方便扩展操作周期的设计。

[0182] 可选地和/或另外地,燃料组件10中可包括单独的非燃料的含有可燃抑制剂棒(例如,与燃料元件20相邻的,代替一个或多个燃料元件20的,插入到不接收控制棒的燃料组件10中的导向管中等)。在一个或多个实施方式中,这种非燃料的可燃性的抑制剂棒可以被设计成类似于Babcock和Wilcox或Westinghouse设计的反应堆中使用的(称作可燃性抑制剂棒组件(BPRA))蛛状组件。这些然后可以插入到控制棒导向管中并被锁定到选择的燃料组件10,其中没有对于反应性控制的初始操作循环的控制组。当使用可燃性抑制剂簇时,该簇在燃料组件移往下一个燃料循环时可能被去除。根据一个可选实施方式,其中单独的非燃料的含有可燃抑制剂的棒被定位以取代一个或多个燃料元件20,非燃料的可燃抑制剂棒保持在燃料组件10中并且在燃料组件10达到其使用寿命时,与其他的燃料元件20一起被排出。

[0183] 所述燃料元件20通过粉末冶金共挤出制造。通常,用于燃料内核100的粉末状高熔点金属和粉末状金属燃料材料(以及粉末状的可燃性抑制剂,如果包含于内核100中)被混合,置换器110的坯件(blank)被定位在粉末混合物中,然后将该粉末和置换器110的组合压制和烧结成燃料芯料/坯段(billet)(例如,在模具中在不同的时间周期内被加热到不同程度以烧结该混合物)。置换器110的坯件可具有与最终形成的置换器110相同或相似的横截面形状。另外,置换器110的坯件可具有被设计成在挤出时可变形为置换器110的预定的横截面形状的形状。燃料芯料(包括置换器110和烧结的燃料内核100的材料)被插入到具有中空包层120的管中,该管具有密封的管座和在另一端的开口。然后,另一端的开口通过用与包层相同的材料制成的端塞密封住,以形成坯段。坯段可以是圆筒形的,或者可以具有更接近类似于元件20的最终横截面形状,如图5和9所示的形状。然后坯段在温度和压力下通过模具共挤出,以创建包括最终形状的内核100、包层110、和置换器120的元件20。根据各种使用非圆筒形置换器110的实施方式,坯段可以相对于挤压模具被正确定位,使得置换器110的拐角与燃料元件20的叶片20b对齐。挤出过程可通过直接挤出(即,移动坯段通过固定模

具)或间接挤出(即,朝固定坯段移动模具)。此方法导致了包层120冶金结合到燃料内核100上,从而降低了包层120从燃料内核100脱层的危险。包层120的管和端塞彼此冶金结合,以密封包层120内的燃料内核100。燃料元件10中使用的高熔点金属的高熔点往往使人们选择粉末冶金的方法用于制造这些金属组件。

[0184] 根据一个或多个可选实施方式,所述燃料元件20的燃料芯料可通过铸造而不是烧结制造。粉末状或单片的高熔点金属和粉末状或单片的燃料材料(以及粉末状可燃抑制剂(如果包括在内核100中))可以混合、熔化并铸入模具。模具可以在铸造的内核100中创建置换器-坯件-形式的空隙,使得置换器110坯件可以在内核100铸造后与包层120被加入并形成待挤出的坯段相同的方式被插入到该空隙中。制造燃料元件20的其余步骤可能与利用烧结而不是铸造的上述讨论的实施方式保持相同或类似。随后的挤出导致置换器110和内核100之间以及内核100和包层120之间的冶金结合。

[0185] 根据一个或多个可选实施方式,燃料元件20是使用粉末状陶瓷燃料材料代替粉末状金属燃料材料制造的。其余步骤可能与上面所讨论的关于使用粉末状金属燃料材料的实施方式相同。在各种金属燃料实施方式和陶瓷燃料实施方式中,该制造方法可能产生包含设置在金属非燃料材料基质中的燃料材料的燃料内核100。在一个或多个金属燃料实施方式中,所得燃料内核100包括含有金属燃料材料的合金和金属非燃料材料基质(例如,铀-锆合金)的金属燃料合金内核。在一个或多个陶瓷燃料实施方式中,内核100包含在金属非燃料材料基质中设置(例如,散布在整个中)的陶瓷燃料材料。根据各种实施方式,在制造过程中使用的陶瓷燃料材料可以包括粉末状的铀或钚氧化物、粉末状的铀或钚的氮化物、粉末状的铀或钚的碳化物、粉末状铀或钚的氢化物、或其组合。与传统的二氧化铀(UO_2)燃料元件相比,其中 UO_2 颗粒被放置在管中,根据本发明的一个或多个实施方式的制造方法会产生放置非燃料材料的固体基质(例如,锆基质)中的陶瓷燃料。

[0186] 如图4所示,螺旋肋130的轴向螺旋节距根据将相邻燃料元件10的轴以与燃料元件的横截面中的对角宽度相等的间隔进行放置的条件选择并且可以是燃料元件20的长度的5%至20%。根据一个实施方式,节距(即,叶片/肋完成完整旋转的轴向长度)约为21.5厘米,而元件20的整个有效长度为约420厘米。如图3所示,提供了燃料元件10的垂直排列的稳定性:在底部-由下固定板70;在顶部-由上固定板80;和对于堆芯的高度-由围板30。如图1所示,燃料元件10具有沿圆周方向的定向排列,使得任意两个相邻的燃料元件10的叶形轮廓具有共同的对称平面,其中该平面在燃料元件束(bundle)的至少一个横截面上通过两个相邻的燃料元件10的轴。

[0187] 如图1所示,燃料元件20的螺旋形扭转与它们的方向相结合,确保存在一个或多个自定间隔平面。如图1所示,在这种自定间隔平面中,相邻元件20的肋彼此接触以确保这些元件20之间的适当的间距。因此,元件20的中心到中心的间距与每个元件20的拐角到拐角的宽度大约相同(在图5中示出的元件为12.6毫米)。取决于每个燃料元件20中的叶片20b的数目和燃料元件20的相对几何排列,所有相邻的燃料元件20或仅部分的相邻燃料元件20将彼此接触。例如,在图示的四叶形的实施方式中,每个燃料元件20都与所有四个相邻的燃料元件20在每个自定间隔平面内相接触。然而,在三叶片燃料元件的实施方式中,其中的燃料元件被布置成六边形图案,在给定的自定间隔平面内每个燃料元件将只接触六个相邻燃料元件中的三个。三叶片燃料元件将在下一个轴向隔开的自定间隔平面内接触其他三个相邻

的燃料元件(即从前面所述的自定间隔平面偏移 $1/6$)。

[0188] 在 n -叶片元件20中,其中 n 燃料元件与特定的燃料元件20相邻,在每 $1/n$ 的螺旋圈内将存在自定间隔平面(即,对于四叶形元件20,每 $1/4$ 螺旋圈布置在正方形图案中,使得四个其他燃料元件20与该燃料元件20相邻;对于三叶形元件20,每 $1/3$ 螺旋圈使得三个燃料元件与该燃料元件相邻(即,沿燃料元件周长的每 120 度))。可修改螺旋的节距以在燃料元件20的轴向长度上创建更多或更少的自定间隔平面。根据一个实施方式,每个四叶形的燃料元件20包括多个扭转,以使在燃料元件20的束的轴向长度上具有多个自定间隔平面。

[0189] 在所示的实施方式中,所有的元件20沿相同的方向扭转。然而,根据可选实施方式,在不脱离本发明的范围的情况下,相邻的元件20可能会沿相反的方向扭转。

[0190] 沿着燃料棒长度的自定间隔平面的数目的公式如下:

[0191] $N=n*L/h$,其中:

[0192] L -燃料棒长度

[0193] n -叶片(肋)的数目和与燃料元件相邻的燃料元件的数目

[0194] h -螺旋扭转节距

[0195] 如果叶片的数目和与燃料元件相邻的燃料元件得数目不同时,该公式略有不同。

[0196] 作为这样的自定间隔的结果,燃料组件10可以省略间隔格架,否则其可能需要以确保沿组件10的长度上适当的元件间距。通过消除间隔格架,冷却剂可更自由地流过组件10,这有利地增加了从元件20到冷却剂的热传递。然而,根据本发明的可选实施方式,在不脱离本发明的范围的情况下,组件10可以包括间隔格架。

[0197] 如图3所示,围板30形成了沿着燃料元件20的整个长度并围绕元件20的管状外壳。然而,根据本发明的可选实施方式,围板30可包括轴向间隔开的条带(band),其每个都围绕燃料着元件20。一个或多个这样的带可与自定间隔平面轴向对齐。轴向延伸的拐角支撑可以在这些轴向间隔的条带之间延伸,以支撑条带,保持条带的排列并加强组件。可选地和/或另外地,在围板30不需要或不期望被支撑的地方,孔可以被切割成其它的管状/多边形的围板30。使用完整的围板30可有利于更好的控制流经每个单个燃料组件10的单独的冷却剂。相反,使用条带或带孔的围板可促进相邻的燃料组件10之间的更好的冷却剂混合,这可以有利地降低相邻燃料组件10之间的冷却剂温度梯度。

[0198] 如图1所示,围板30的横截面周边具有容纳其中使用组件10的反应堆的形状。在使用方形燃料组件的反应堆例如AP-1000中,围板具有正方形横截面。然而,围板30可能可选地采取其他任何合适的形状,这取决于使用它的反应堆(例如,用于VVER反应堆的六边形形状(例如,如美国专利申请公开号2009/0252278A1的图1所示))。

[0199] 导向管40提供了基于碳化硼(B_4C)、银铟镉(Ag, In, Cd), 钛酸镨($Dy_2O_3 \cdot TiO_2$)或其他用于反应性控制的合适的合金或材料的控制性吸收体元件(未示出)和基于碳化硼、氧化钆(Gd_2O_3)或其他合适的材料的可燃性吸收体元件(未示出)的插入,并且被放置在具有弹性轴向位移能力的上接管50中。导向管40可以包括锆合金。例如,图1中显示的导向管40的排布就是用于AP-1000反应堆的排布(例如,在 17×17 网格中所示的位置处24根导管排布成两个环形排)。

[0200] 框架25的形状、尺寸和特征取决于组件10要使用的特定反应堆堆芯。因此,本领域的普通技术人员将能理解如何制作用于组件10的适当形状和尺寸的框架。例如,框架25可

以被成形并配置为装入常规核电厂的反应堆的堆芯中以代替用于该核电厂的反应堆堆芯的常规的氧化铀或混合氧化物燃料组件。核电厂可以包括在2010年之前处于实际使用中的(例如,2、3或4-回路PWR;BWR-4)反应堆堆芯设计。另外,核电厂可以是专门为使用燃料组件10所定制的全新设计。

[0201] 如以上所解释,示出的燃料组件10是被设计用于AP-1000或EPR反应堆。该组件包括17x17阵列的燃料元件20,如上所解释的对于EPR中总共265个燃料元件20或AP-1000中264个燃料元件20,其中24个被导向管40所取代(在AP-1000中,除了24个燃料元件被导向管替换外,中央的燃料元件也被测试管所替换)。

[0202] 优选地,元件20提供了燃料组件10的100%的全部裂变材料。可选地,组件10的某些裂变材料可以由除燃料元件20之外的燃料元件提供(例如,非叶片燃料元件、氧化铀元件、具有不同于元件20的燃料比值和/或富集度的元件)。根据各种这样可选的实施方式,燃料元件20提供了燃料组件10中总体裂变材料的以体积计的至少50%、60%、70%、75%、80%、85%、90%、和/或95%。

[0203] 根据本发明的一个或多个实施方式,使用金属燃料元件20促进了超过常规用于轻水核反应堆(LWR)(包括沸水反应堆和加压水反应堆),如Westinghouse设计的AP-1000,AREVA设计的EPR反应堆,或GE设计的ABWR的氧化铀或混合氧化物燃料的各种优点。例如,根据一个或多个实施方式,通过用全金属的燃料元件20和/或燃料组件10代替目前在现有类型的LWR或已提出的新型LWR中使用的标准氧化铀燃料和燃料组件,基于标准的氧化铀或混合氧化物燃料操作的LWR的额定功率可以增加最高约30%。

[0204] 用于提高以标准的氧化铀燃料操作的LWR的额定功率的主要限制之一是这种燃料所使用的圆筒形燃料元件的小的表面积。对于任何类型的燃料元件的横截面轮廓,圆筒状的燃料元件具有最低的表面积与体积的比值。对于标准的氧化铀燃料的另一个主要限制是在满足可接受的燃料性能标准的同时,这样的燃料元件可能会达到的相对低的燃耗。其结果是,与标准氧化铀或混合氧化物燃料相关的这些因素显著限制了现有的反应堆的额定功率可以增加的程度。

[0205] 全金属燃料元件20的一个或多个实施方式克服了上述局限性。例如,如上面所解释的,间隔格架的缺乏可能会降低水力阻力,并因此增加了冷却剂流动和从元件20到主冷却剂的热通量。燃料元件20的螺旋扭转可能会增加冷却剂的掺混和湍流,这也会增加从元件20到主冷却剂的热通量。

[0206] 根据本发明的一个或多个实施方式,初步的中子和热水力分析已经示出了以下几点:

[0207] • LWR反应堆的热额定功率可提高高达30.7%或以上(例如,EPR反应堆的热额定功率可从4.59GWth提高至6.0GWth)。

[0208] • 使用铀体积分数为25%的铀-锆混合物和19.7%的铀-235富集度,具有四叶形金属燃料元件20配置的EPR反应堆堆芯可以在提高的热额定功率为6.0GWth下运行约500-520有效满功率天(EFPD)(如果每批次替换了72个燃料组件(每18个月一次)),或者是540-560EFPD(如果每批次替换了80个燃料组件(每18个月一次))。

[0209] • 由于在多叶片燃料元件中表面积增加,即使在增加的额定功率为6.0GWth下,多叶片燃料元件的平均表面热通量显示比在热额定功率为4.59GWth下操作的圆筒状氧化铀

燃料元件低4-5%。对于临界热通量,这可以提供增加的安全裕量(margin)(例如,增加PWR的偏离泡核沸腾裕量或BWR的最高分数限制的临界功率比值)。此外,这将允许每个组件可能使用12个具有可燃抑制剂的燃料元件。使用可燃抑制剂可以除去在循环开始时过量的反应性或增加堆芯加热期间的多普勒效应(Doppler Effect)。

[0210] • 因此,与传统氧化铀或混合氧化物燃料组件相比,燃料组件10可在较低的燃料操作温度下提供更大的热功率输出。

[0211] 为了利用组件10的增加的输出功率,常规电厂可以升级(例如,更大和/或额外的冷却剂泵、蒸汽发生器、热交换器、加压器、汽轮机)。事实上,根据一个或多个实施方式,所述升级可从现有的反应堆中提供30%至40%的更多的电力。这种可能性可避免需要建立完整的第二个反应堆。通过增加的电力输出可能会很快偿还改造所付出的费用。可选地,可以建造包括充分特征的新发电厂,以处理和利用组件10的更高的热输出。

[0212] 此外,本发明的一个或多个实施方式可以允许LWR在与使用标准的氧化铀或混合氧化物燃料一样的额定功率下,使用没有任何主要反应堆改造的现有反应堆系统进行操作。例如,根据一个实施方式:

[0213] • EPR将具有如果使用常规的氧化铀燃料的相同的功率输出,4.59GWt;

[0214] • 使用铀体积分数为25%的铀-钍混合物且铀-235的富集度约为15%,具有四叶形金属燃料元件20配置的EPR反应堆堆芯可以运行约500-520个有效满功率天(EFPD)(如果每批次替换72个燃料组件),或者是540-560EFPD(如果每批次替换80个燃料组件)。

[0215] • 与具有传统氧化铀燃料的圆筒状棒相比(例如,39.94对57.34W/cm²),元件20的平均表面热通量减少了约30%。由于相对于传统的燃料组件,通过组件10的冷却剂的温度上升(例如,在入口和出口温度之间的差异)和通过组件10的冷却剂流动速率大致保持相同,减少的平均表面热通量导致了燃料棒表面温度的相应降低,这有助于增加临界热通量的安全裕量(例如,增加PWR中的偏离泡核沸腾裕量或BWR的最高分数限制的临界功率比)。

[0216] 另外地和/或可选地,根据本发明的一个或多个实施方式,燃料组件10可以分阶段/阶梯地加入到反应堆堆芯中以替换常规燃料组件。在过渡期内,具有与传统燃料组件相当的裂变/中子/热输出的燃料组件10可以经过连续的燃料变化逐步取代这样的传统燃料组件,而不改变电厂的运行参数。因此,燃料组件10可加装到现有的堆芯中,这在过渡期间可能是很重要的(即从开始的使用燃料组件10的部分堆芯和逐步过渡到燃料组件10的完整堆芯)。

[0217] 此外,组件10的裂变载荷可以调整到工厂操作员所期望的特定的过渡。例如,相对于使用组件10所替换的常规的燃料组件,裂变载荷可以适当增加,以增加反应堆的热输出为0%到30%或更高的任何地方。因此,电厂操作员可以基于在升级过程中不同时间的电厂的现有工厂设施或能力,选择所需的特定提高功率。

[0218] 在不脱离本发明的范围的情况下,一个或多个实施方式中的燃料组件10和燃料元件20可以用于快堆(相对于轻水反应堆)中。在快堆中,燃料内核100的非燃料金属优选是高熔点金属,例如钼合金(例如,纯钼或钼和其它金属的组合),并且包层120优选是不锈钢(其包括其任何合金变体)或适合在这样有冷却剂的反应堆中使用的其他材料(例如,钠)。这样的燃料元件20可以通过上面讨论的共挤出方法制造或通过任何其他适当的方法(例如,真空熔制)制造。

[0219] 如图7A,7B和8所示,根据本发明的一个或多个实施方式,燃料组件510可用于加压重水反应堆500(见图8),例如CANDU反应堆中。

[0220] 如图7A和7B所示,燃料组件510包括多个安装到框架520的燃料元件20。框架520包括安装到燃料元件20的相对轴向端的两个端板520a,520b(例如,通过焊接、过盈配合、和上述的将元件20连接到下固定板70的各种不同连接方法中的任何一种)。燃料组件510中所用的元件20通常比组件10中使用的元件20要短得多。根据各种实施方式和反应堆500,反应堆500中使用的元件20和组件510是大约18英寸长。

[0221] 元件20可相对于彼此定位在组件510中,以使自定间隔平面按照上面描述的关于组件10的方式保持元件20之间的间距。可选地,组件510中的元件20可以这样彼此间隔以使相邻的元件20从不相互接触,而不是完全依赖框架520来保持元件20的间距。此外,在沿元件20的轴向长度上的不同位置中,可以在元件20或其肋上连接上隔片(spacer)以接触相邻的元件20并有助于保持元件20的间距(例如,以隔片如何使用在加压重水反应堆中的传统燃料组件中的传统燃料棒上以帮助保持棒间距的类似的方式)。

[0222] 如图8所示,组件510被装进反应堆500的排管500a中(在本领域中有时称为排管500)。反应堆500使用重水500b作为减速剂和主冷却剂。主冷却剂500b水平地循环通过所述管500a,然后通过热交换器,其中热量被传递到通常用于通过汽轮机发电的二级冷却剂回路。使用燃料组件加载装置(未示出)将燃料组件510加载到排管500a的一侧并将用过的组件510推出排管500a的相反侧,通常同时反应堆500在运行。

[0223] 对于现有的、常规的加压重水反应堆(例如,CANDU反应堆),燃料组件510可以被设计成常规燃料组件(在本领域中也称为燃料束)的直接替代品。在这样的实施方式中,组件510被装进到反应堆500中以替代常规的组件/束。这种燃料组件510可以被设计为具有与被替换的传统组件类似的中子/热性能。或者,燃料组件510可被设计为能提供热功率提升。在这样的提升实施方式中,可以设计新的或升级的反应堆500以适应更高的热输出。

[0224] 根据本发明的各种实施方式,燃料组件10被设计成代替传统核反应堆的常规燃料组件。例如,图1中示出的燃料组件10是专门设计成取代利用 17×17 阵列的二氧化铀燃料棒的传统燃料组件。如果组件10的导向管40保留在传统的燃料组件可能使用的完全相同的位置上,并且如果所有的燃料元件20具有相同的尺寸,那么传统的二氧化铀燃料组件和一个或多个实施方式中的燃料组件10之间的燃料元件/棒之间的节距保持不变(例如,12.6毫米的节距)。换句话说,燃料元件20的纵轴可以设置在与可比的常规燃料组件中的常规 UO_2 燃料棒中纵轴可能的相同位置。根据各种实施方式,燃料元件20可以具有比可比的 UO_2 燃料棒更大的外接直径(circumscribed diameter)(例如,12.6毫米相比于外径为9.5毫米的典型的二氧化铀燃料棒)。作为结果,在图1所示的自对齐平面中,燃料元件20所占据的空间的横截面长度和宽度可以比常规燃料组件中的 UO_2 燃料棒所占据的空间稍大(例如,燃料组件10为214.2毫米(即,17个燃料元件 20×12.6 毫米(每个燃料元件的外接圆直径)),相对的是211.1毫米的常规 UO_2 燃料组件,其包括彼此由12.6mm节距分开的9.5毫米的二氧化铀燃料棒的 17×17 阵列)。在常规的 UO_2 燃料组件中,定位格架围绕燃料棒,并将常规燃料组件的整体的横截面包封(envelope)增加至214毫米 \times 214毫米。在燃料组件10中,围板30同样也增加了燃料组件10的横截面包封。围板30可以是任何合适的厚度(例如,0.5毫米或1.0毫米厚)。在采用了1.0毫米厚的围板30的一个实施方式中,燃料组件10的实施方式的整个横截

面包封可以是216.2毫米×216.2毫米(例如,由17个直径为12.6毫米的燃料元件20所占用的214毫米,加上两倍的围板30的1.0毫米的厚度)。其结果是,根据本发明的一个或多个实施方式,燃料组件10可以是稍微大于(例如,216.2毫米×216.2毫米)典型的UO₂燃料组件(214毫米×214毫米)。较大的尺寸可能会损害组件10正确地装入一个或多个常规反应堆的燃料组件的位置的能力,该反应堆被设计用于常规的UO₂燃料组件。为了适应这种尺寸的变化,根据本发明的一个或多个实施方式,可以设计并建造新的反应堆以适应燃料组件10的更大的尺寸。

[0225] 根据本发明的可选实施方式,所有燃料元件20的外接圆直径可以稍微降低,以便降低燃料组件10中整体的横截面尺寸。例如,每个燃料元件20的外接圆直径可以减少0.13mm到12.47毫米,以使燃料组件10所占用的空间的整体的横截面与常规的214毫米×214毫米的燃料组件保持相当(例如,17个直径为12.47毫米的燃料元件20加2个1.0毫米厚的围板厚度,共约214毫米)。相对于常规燃料组件中的导向管位置,这样的17×17阵列的尺寸减小将会略微改变燃料组件10中导向管40的位置。为了适应所述管40位置的这种轻微的位置变化,反应堆中相应的控制棒阵列和控制棒驱动装置的位置也可以类似的移动,以适应重新定位的导向管40。可选地,如果给常规的反应堆中的控制棒提供了足够的间隙和公差,常规定位的控制棒可以充分适合燃料组件10的略微移动的管40。

[0226] 可选地,燃料元件20的外围直径可以略有降低,以使整体组件10装入为常规燃料组件设计的常规反应堆中。例如,燃料元件20的外排的外接圆直径可以减少1.1毫米,以使燃料组件的总尺寸为214毫米×214毫米(例如,15个12.6毫米的燃料元件20加2个11.5毫米的燃料元件20加2个厚度为1.0毫米的围板30)。可选地,燃料元件20的外两排的外接圆直径可以每个减小0.55毫米,以使燃料组件的总尺寸保持为214毫米×214毫米(例如,13个12.6毫米的燃料元件20加4个12.05毫米的燃料元件20加2个厚度为1.0毫米的围板30)。在每个实施方式中,燃料元件20和导向管40的中央13×13阵列的间距和位置保持不变,以使常规反应堆中导向管40与控制棒阵列和控制棒驱动装置对齐。

[0227] 根据本发明的替代实施方式,图10示出了燃料组件610。根据各种实施方式,燃料组件610被设计成代替常规反应堆中的常规UO₂燃料组件,同时保持设计用于各种常规UO₂燃料组件的反应堆中的控制棒的位置。通常,燃料组件610类似于燃料组件10(这在上面描述过并示于图1中),但包括几个差异,这些差异帮助组件610更好地安装到一个或多个现有的反应堆类型(例如,使用利用17×17UO₂阵列的Westinghouse燃料组件设计的反应堆)中,而不改变控制棒位置或控制棒驱动装置。

[0228] 如图10所示,燃料组件包括17×17阵列的空间。如上描述的图1中示出的类似的燃料组件10,中央的15×15的阵列由200个燃料元件20和25个导向管40占用。取决于特定的反应堆设计,如果在反应堆设计没有利用中央管40(即,201个燃料元件20和24个导向管40),中央导向管40可以由额外的燃料元件20取代。导向管40的位置对应于使用传统的UO₂燃料组件设计的反应堆中的导向管位置。

[0229] 燃料组件610的17×17阵列/图案的周边位置(即,从燃料元件20横向向外设置的位置)由64个UO₂燃料元件/棒650所占据。正如本领域中已知的,燃料棒650可以包含配置在空心棒中的标准UO₂颗粒状燃料。UO₂颗粒状燃料中富集的U-235可以小于20%,小于15%,小于10%,和/或小于5%。棒650可具有比燃料元件20的外接圆直径稍微更小外接圆直径的直

径(例如,9.50毫米),这稍微降低了燃料组件610的整体的横截面尺寸,从而使组件610能更好的装入常规UO₂燃料组件所分配的空间中。

[0230] 在示出的实施方式中,燃料棒/元件650包括UO₂颗粒状燃料。然而,燃料棒/元素650可以可选择地利用任何其他合适的一种或多种裂变和/或能产生裂变物质的材料(如钍,铀,铀-235,铀-233,它们的任意组合)的组合。这种燃料棒/元件650可包括金属和/或氧化物燃料。

[0231] 根据一个或多个可选实施方式,燃料棒650可以占据少于所有64个外周位置。例如,燃料棒650可以占据外周的顶行和左列,而外周底行和右列可以由燃料元件20占据。可选地,燃料棒650可以占据燃料组件外周的任何其他两边。围板630可以被修改,以便包围燃料组件外周中的额外的燃料元件20。这种修改的燃料组件可以彼此相邻定位,使得在一个组件中的外周燃料元件650的行/列始终与相邻的燃料组件的燃料元件20的行/列相邻。其结果是,相邻组件之间的界面稍微朝向包括外围界面侧的燃料元件650的组件移动,这一事实给燃料组件提供了额外的空间。这样的改造提供了比燃料组件610所提供的更大数量的更高热输出的燃料元件20的使用。

[0232] 围板630包围燃料元件20的阵列并将元件650与元件20分开。接管50、60、围板630、在其间形成的冷却剂通道、通过元件20和元件650的相对压降,和/或通过围绕元件650的定位格架660(下面讨论)的增加的压降可能相对于围板630外的流速及通过相对较低的热输出燃料棒650,产生围板630内更高的冷却剂流速和通过更高的热输出燃料元件20。基于各自的热输出和设计的操作温度,可以设计其中的通路和/或孔以优化流经元件20,650的相对冷却剂流速。

[0233] 根据各种实施方式,燃料组件610中的燃料元件20的减速剂:燃料的比值是小于或等于2.7、2.6、2.5、2.4、2.3、2.2、2.1、2.0、1.9、和/或1.8。在示出的实施方式中,减速剂:燃料比值等于(1)围板630内可用于冷却剂/减速剂的总面积(例如,近似于围板630内总的横截面面积减去由燃料元件20所占据的横截面积(假设导向管40填充了冷却剂))比(2)围板630内燃料元件20的内核100的总横截面面积的比值。

[0234] 根据本发明的可选实施方式,如上所述,围板630可以被一个或多个环形带所替换或在围板630内可以设置孔。在围板630中带和孔的使用可以促进冷却剂在燃料元件20和燃料元件650之间交叉混合。

[0235] 如图10所示,燃料元件650被设置在环状的定位格架660中,该格架660一般类似于常规UO₂燃料组件中使用的定位格架的外部。定位格架660可紧密地连接到围板630上(例如,通过焊接,螺栓,螺钉或其他紧固件)。定位格架660的尺寸是优选的,以便在燃料元件650和燃料元件20之间提供与中央的燃料元件20之间提供的相同的间距(例如,所有燃料元件20,650的轴之间的间距为12.6毫米)。为了提供这样的间距,燃料元件650被布置在靠近定位格架660的外侧,而不是在围板630和定位格架660的内侧。燃料组件610和定位格架660的尺寸和位置也是优选的,以使相邻燃料组件中的燃料元件650间具有相同的间距(例如,间距为12.6毫米)。然而,在不脱离本发明的范围的情况下,任何的燃料元件20,650之间的间距可以相对其他燃料元件20,650之间的间距的不同而有所不同。

[0236] 根据各种实施方式,燃料元件20提供了燃料组件610中所有含裂变材料的燃料元件20、650的总体积分数的至少60%、65%、70%、75%、和/或80%。例如,根据一个或多个实

施方式,其中燃料组件610包括201个燃料元件20,每一个具有约70平方毫米的横截面面积,和64个燃料元件650,每一个具有9.5毫米的直径,燃料元件20提供了所有燃料元件20、650的总体积的约75.6% (201个燃料元件20×70平方毫米等于14070平方毫米;64个燃料元件650× $\pi \times (9.5/2)^2 = 4534$ 平方毫米;燃料元件20,650的面积基本上正比于燃料元件的体积(14070平方毫米/(14070平方毫米+4534平方毫米)=75.6%))。

[0237] 燃料组件610的高度与可比的组件610可以替换的传统燃料组件的高度相匹配(例如,Westinghouse或AREVA反应堆设计的标准燃料组件的高度)。

[0238] 示出的燃料组件610可以用于如Westinghouse 4回路设计的17x17PWR、AP 1000或AREVA EPR中。然而,燃料组件610的设计也可以被修改,以适应各种其他反应堆设计(例如,使用六边形的燃料组件的反应堆设计,在这种情况下,六边形的外周由UO₂棒所占用,而内部位置由燃料元件20,或沸水反应堆,或小型模块化反应堆所占据)。虽然对于特定的实施方式描述了特定尺寸,然而在不脱离本发明的范围的情况下,可以使用具有各种可选尺寸的燃料元件20,650和燃料组件10以连接各种反应堆或反应堆的类型。

[0239] 取决于具体的反应堆设计,燃料组件中的附加棒的位置可替换为UO₂棒。例如,当燃料组件610仅在外周行中包括UO₂棒时,在不脱离本发明的范围的情况下,组件610在外侧两行中能够可选地包括UO₂棒。

[0240] 根据各种实施方式,支撑燃料元件650的燃料组件610的部分与支撑燃料元件20的燃料组件610的部分是不可分开的。根据各种实施方式,燃料元件20作为一个单元不能与燃料组件610的燃料元件650分离(即使可从组件610中除去单独的燃料元件20和650,例如,基于单独的燃料元件的故障)。同样,没有选择性地将燃料组件的燃料元件650部分锁定到燃料组件610的燃料元件20的部分的锁定装置。根据各种实施方式,燃料组件610中的燃料元件20和燃料元件650具有相同的设计的生命周期,使得整个燃料组件610被用于反应堆内,然后作为单个的失效单元除去。

[0241] 根据各种实施方式,相对于组件610所取代的常规的全UO₂燃料棒组件,燃料组件610内的燃料元件20的增加的热输出可以提供功率提升。根据各种实施方式,功率提升是至少5%、10%、和/或15%。根据各种实施方式,提升可能是在1到30%、5到25%、和/或10到20%之间。根据各种实施方式,燃料组件610提供至少18个月的燃料循环,但也可以促进该循环使燃料循环移动到24个月以上或36个月以上。根据燃料组件610的实施方式,其使用具有上面讨论的、图10中显示的元件20的示例参数的燃料元件20,在下表中确定的操作参数下,组件17提供了相对于传统的UO₂燃料组件17%的提升。

[0242]

AREVA EPR反应堆的操作参数	值	单位
反应堆功率	5.37	GWt
燃料周期长度	18	月
再装载的批量大小	1/3	堆芯
燃料元件20的富集度	≤19.7	w/o
棒650的UO ₂ 富集度	≤5	w/o
冷却剂流速	117%	rv

[0243] rv=参考值

[0244]

燃料组件参数	值	单位
燃料组件设计	17 × 17	
燃料组件间距	215	mm
燃料组件包封	214	mm
活性燃料高度	4200	mm
燃料棒数目	265	
燃料元件 20 的间距 (即轴到轴的间隔)	12.6	mm
外部燃料元件 20 的平均直径 (外接圆直径)	12.6	mm
燃料元件 20 的平均最小直径	10.44	mm
种子区域减速剂对燃料的比值 (燃料元件 20 的周围)	2.36	
再生区减速剂对燃料的比值 (燃料棒 650 的周围)	1.9	

[0245] 燃料组件10,510和610优选是热动力学设计的和物理成型的,用于陆基核能反应堆90、500 (例如陆基LWRS (包括BWR和PWR)、陆基快堆,陆基重水反应堆),其被设计用来发电和/或用于电以外目的的热 (例如,脱盐,化学处理,产生蒸汽等)。这样的陆基核能反应堆90另外包括VVER、AP-1000、EPR、APR-1400、ABWR、BWR-6、CANDU、BN-600、BN-800、Toshiba 4S、Monju等。但是,根据本发明的可选实施方式,燃料组件10,510和610可以设计用于和已用于海基核反应堆 (例如,船舶或潜艇的发电厂;设计用来产生能量 (例如,电力) 供陆上使用的水上发电厂)或其他核反应堆的应用。

[0246] 所提供的上述示出的实施方式用来说明本发明的结构和功能原理,而不是为了进行限制。与此相反,在下面的权利要求的精神和范围之内,本发明的原理旨在包含任何及所有的变化,改动和/或替换。

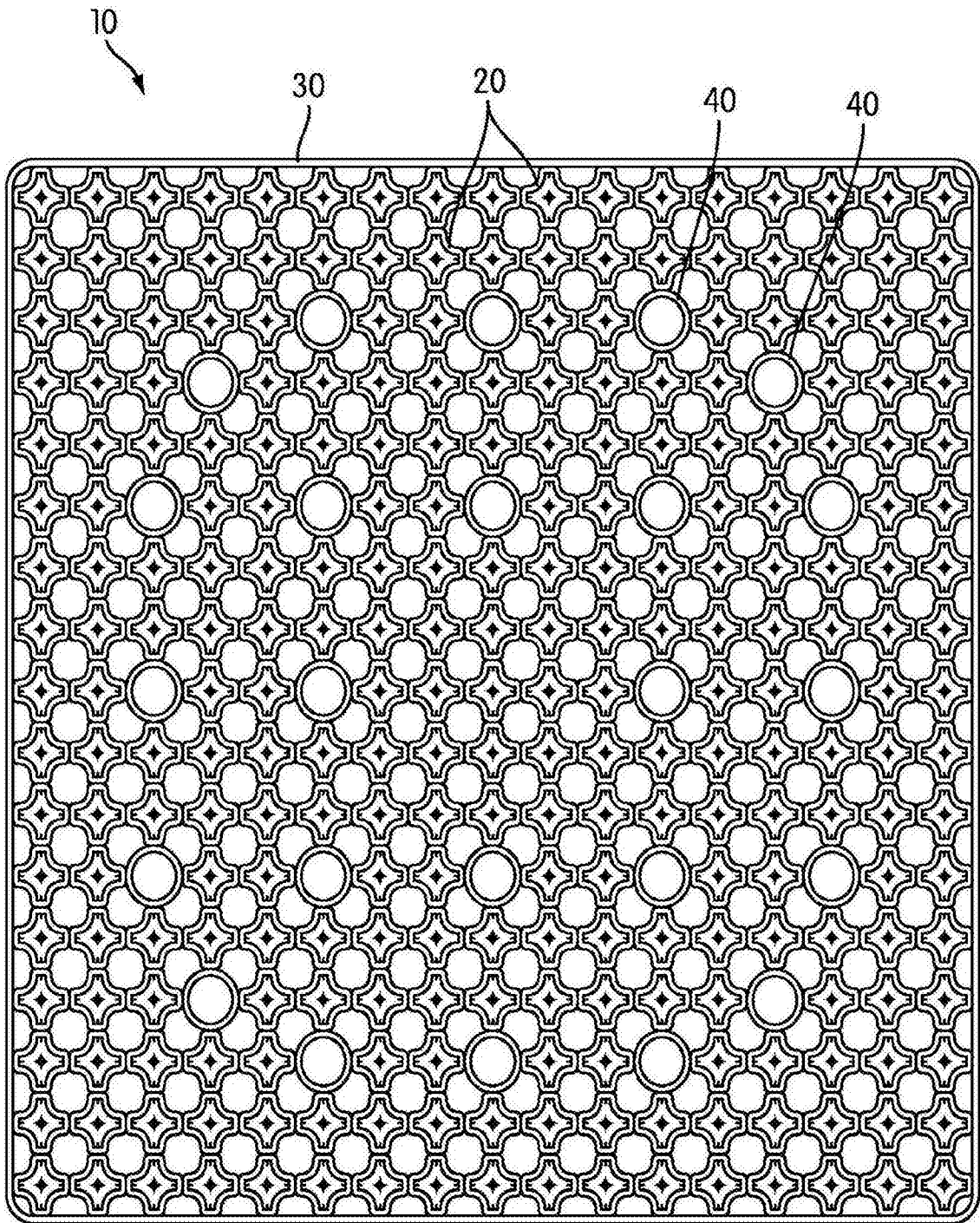


图1

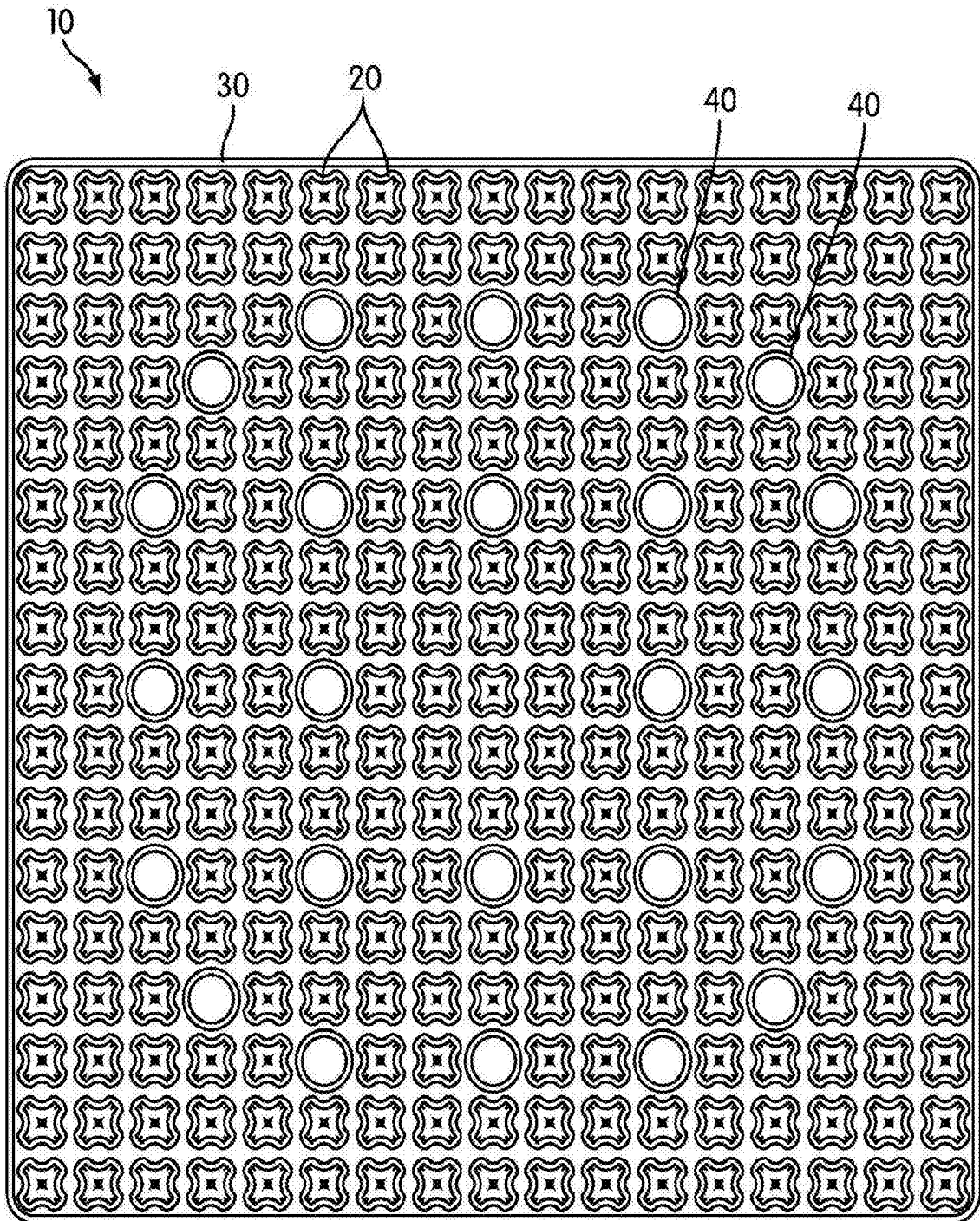


图2

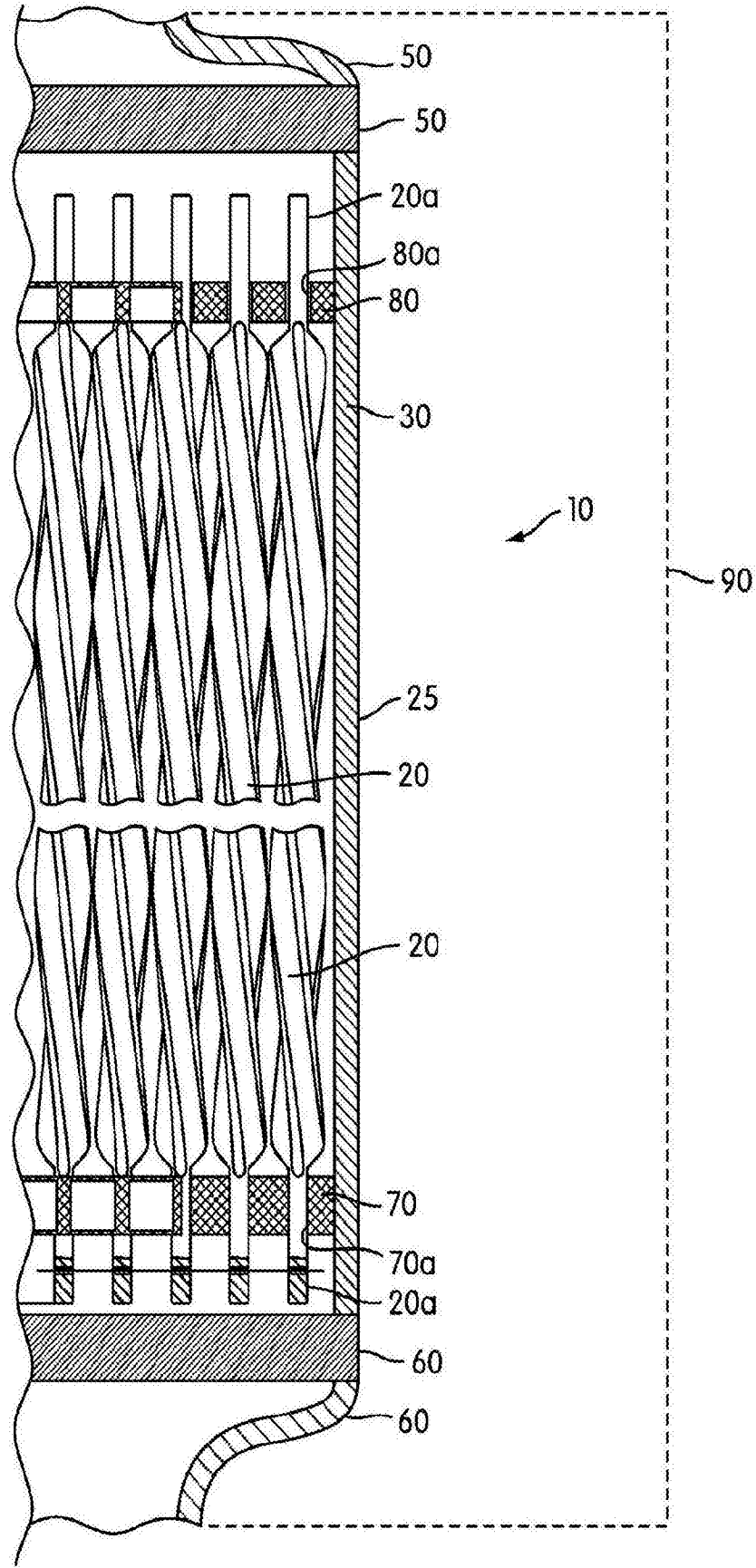


图3

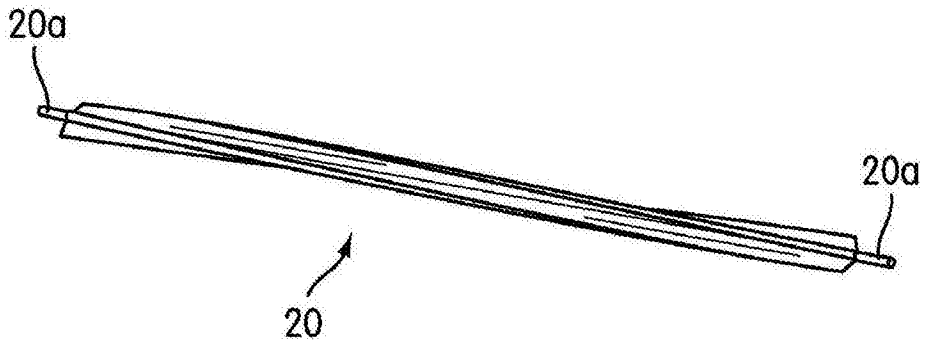


图4

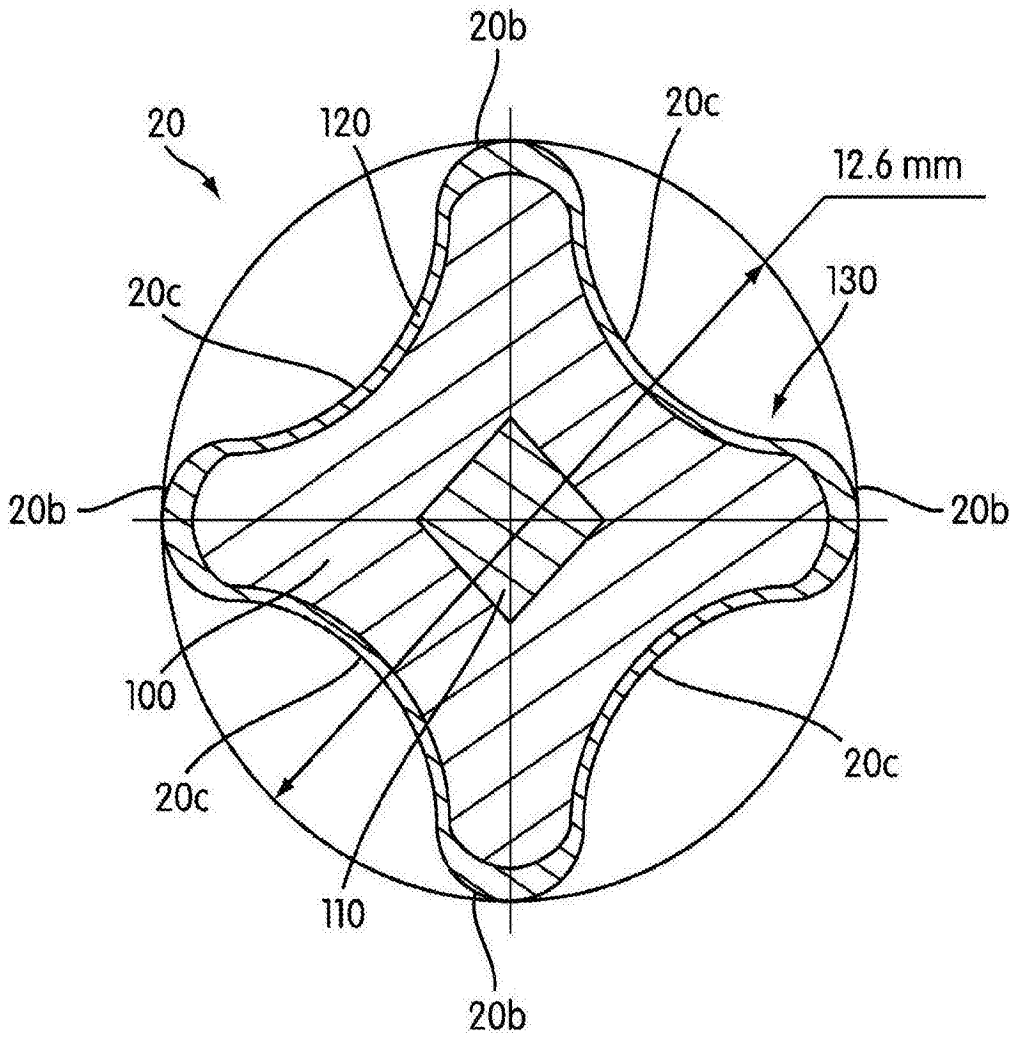


图5

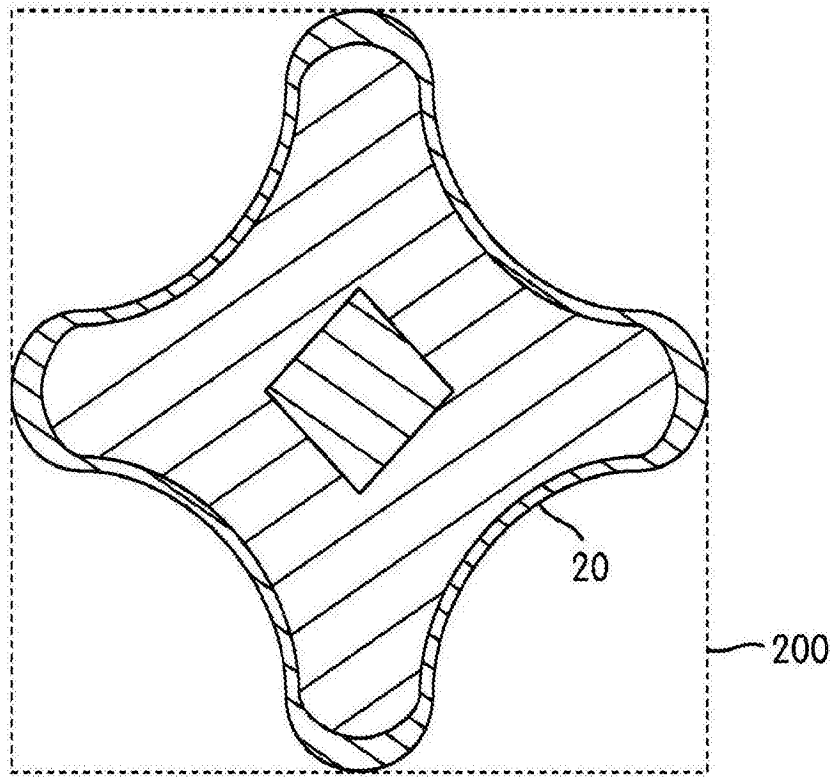


图6

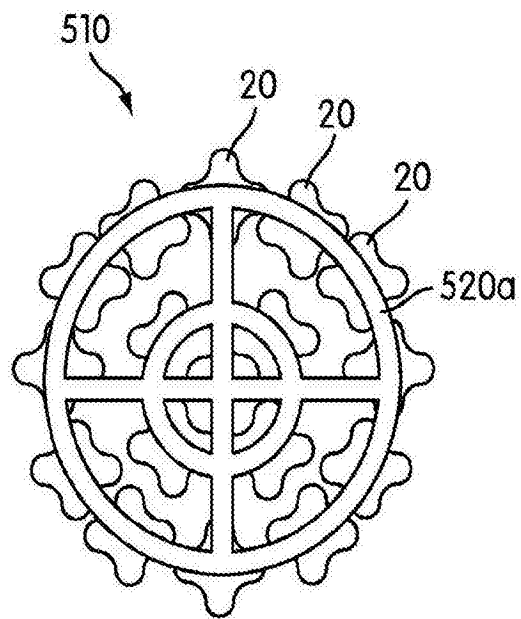


图7A

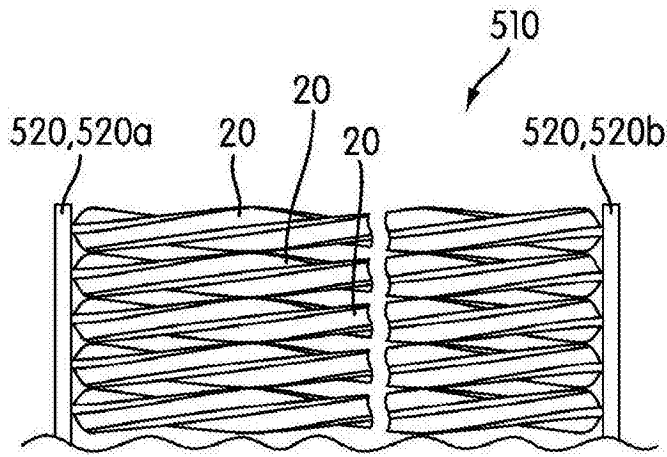


图7B

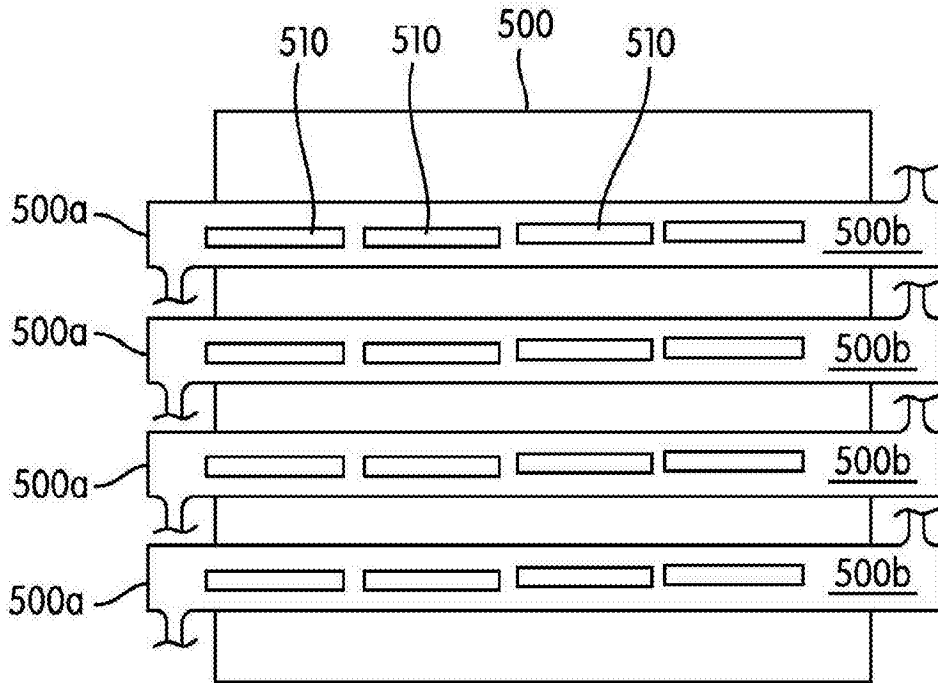


图8

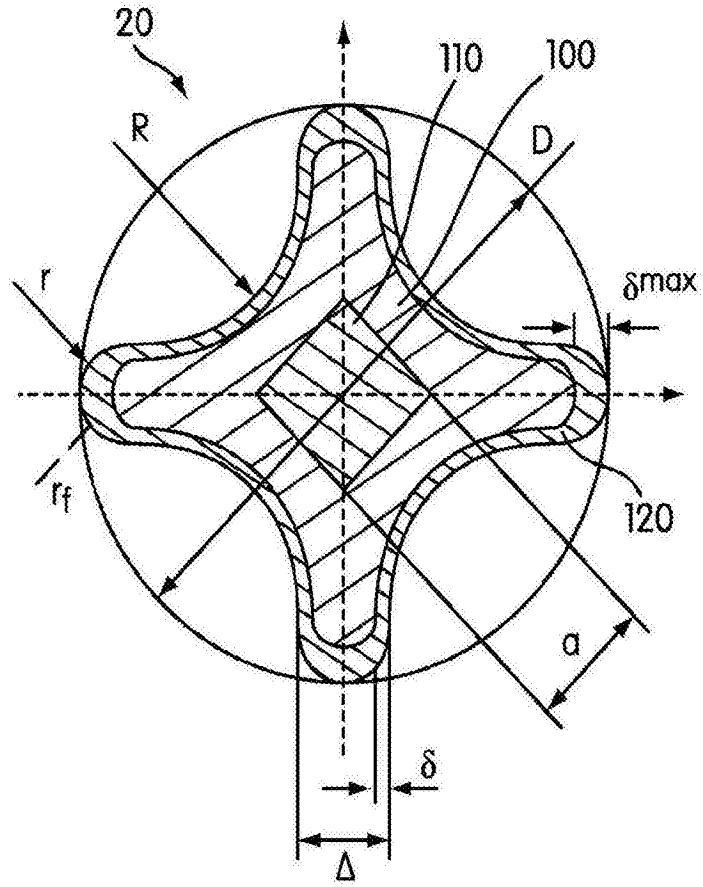


图9

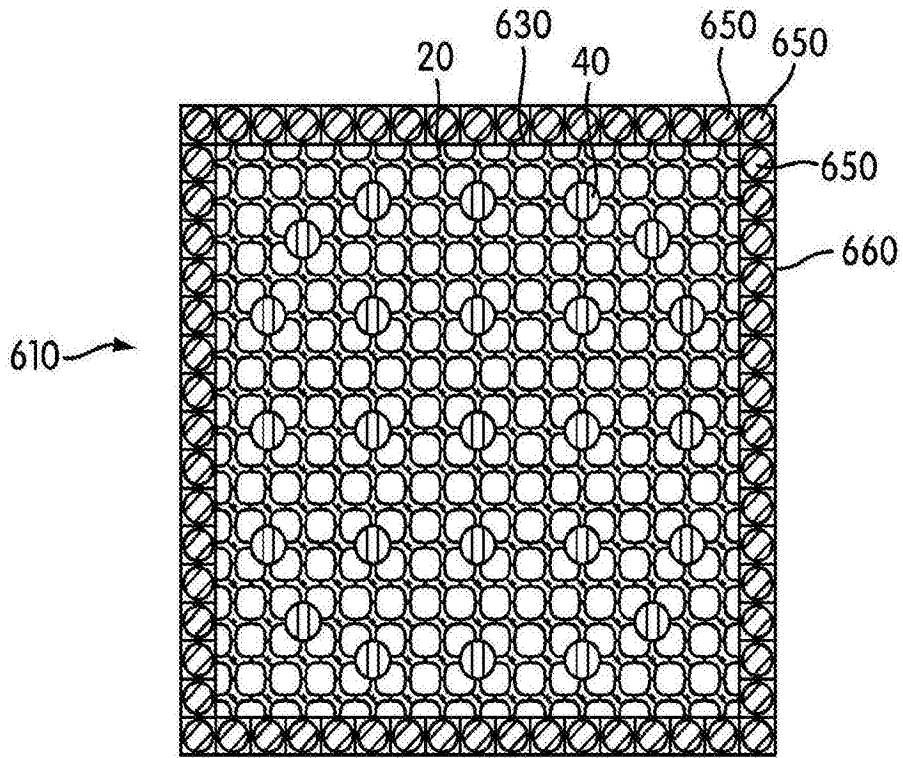


图10