



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115394458 B

(45) 授权公告日 2024.08.20

(21) 申请号 202211030459.7

(22) 申请日 2022.08.26

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 115394458 A

(43) 申请公布日 2022.11.25

(73) 专利权人 中国核动力研究设计院
地址 610000 四川省成都市双流区长顺大道一段328号

(72) 发明人 蔡云 王连杰 汪量子 夏榜样
余红星 张斌 张策 谢运利
肖鹏 胡钰莹

(74) 专利代理机构 成都行之专利代理有限公司
51220
专利代理师 唐邦英

(51) Int. Cl.

G21C 5/02 (2006.01)

G21C 5/12 (2006.01)

G21C 7/10 (2006.01)

G21C 11/06 (2006.01)

G21C 15/28 (2006.01)

G21C 3/07 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 106128517 A, 2016.11.16

CN 114121308 A, 2022.03.01

CN 114446496 A, 2022.05.06

审查员 马梨

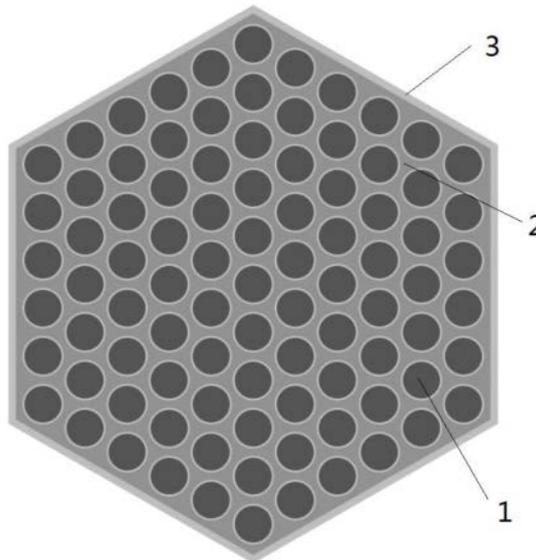
权利要求书1页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯

(57) 摘要

本发明公开了一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,包括棒束型燃料组件、控制棒组件和反射层组件;所述棒束型燃料组件和控制棒组件均为若干个,若干所述棒束型燃料组件和控制棒组件紧凑排列于堆芯活性区内,若干所述控制棒组件均分散位于所述堆芯活性区外围;所述反射层组件内由冷却剂填充而成,所述堆芯活性区位于所述反射层组件内部。采用本方案,在热功率不超过200MW,换料周期不低于90个满功率天,平均组件功率密度不超过1200MW/m³的条件下,堆芯内最大中子通量超过1×10¹⁶n/cm²/s,将极大提高材料辐照考验的发展和解决国内重要且稀缺的同位素生产问题。



1. 一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,其特征在于,包括棒束型燃料组件(7)、控制棒组件(8)和反射层组件(9);

所述棒束型燃料组件(7)和控制棒组件(8)均为若干个,若干所述棒束型燃料组件(7)和控制棒组件(8)紧凑排列于堆芯活性区(10)内,若干所述控制棒组件(8)均分散位于所述堆芯活性区(10)外围;

所述反射层组件(9)内由冷却剂填充而成,所述堆芯活性区(10)位于所述反射层组件(9)内部;

所述棒束型燃料组件包括横截面呈六边形的第一组件盒(3),所述第一组件盒(3)内设有若干紧凑排布的燃料棒(1),若干所述燃料棒(1)沿平行于第一组件盒(3)任意一侧边呈多列排布,相邻两列中,其中一列的任意一个燃料棒(1)与另一列中相邻的两个燃料棒(1)的横截面圆心连线构成正三角形;

任意一个所述燃料棒(1)外侧的圆周方向均留有冷却剂流道(2);

所述燃料棒(1)包括从外到内依次设置的包壳(4)、气隙(5)和燃料芯体(6);

所述燃料芯体(6)直径为5mm~7mm;

若干所述控制棒组件(8)分为若干补偿棒组和若干安全棒组;

若干所述棒束型燃料组件(7)和控制棒组件(8)紧凑排列成横截面为六边形的组合结构,若干所述补偿棒组和若干安全棒组均分别呈旋转对称设置。

2. 根据权利要求1所述的一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,其特征在于,所述燃料芯体(6)采用U-Zr、U-Mo或U-Pu-Zr。

3. 根据权利要求1所述的一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,其特征在于,所述控制棒组件(8)的外壳为第二组件盒(12),所述第二组件盒(12)的横截面尺寸和所述棒束型燃料组件(7)的第一组件盒(3)横截面尺寸相同。

4. 根据权利要求1所述的一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,其特征在于,所述堆芯活性区(10)高度为40cm~60cm,所述反射层组件(9)轴向两端均超出所述堆芯活性区50~100cm。

5. 根据权利要求1所述的一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,其特征在于,所述超高通量反应堆堆芯应用在热功率不超过200MW,换料周期不低于90个满功率天,平均组件功率密度不超过1200MW/m³的条件下。

一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯

技术领域

[0001] 本发明涉及核反应堆设计技术领域,具体涉及一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯。

背景技术

[0002] 核动力工程的发展离不开核反应堆,而核反应堆的发展离不开试验堆。试验堆对各种反应堆堆型的开发有非常重要的作用。高中子通量工程试验堆是国家科技实力的重要标志之一,是国家独立自主开发核能所必不可少的基础设施和重要工具。这些都依赖试验堆中子通量水平,且中子通量越高,其辐照和同位素生产等越好。

[0003] 目前国际已建成的先进试验堆中子通量在 $1.0 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 量级,通量超过 $2.0 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 的试验堆很少。典型的先进试验堆有中国先进研究堆(CARR堆)和法国的 JHR堆。CARR堆采用U3Si2-Al弥散型平板燃料,方盒燃料组件构成方形栅格,U-235富集度为20%,芯体铀密度为 4.0 gU/cm^3 。堆芯容器与燃料组件间用Be填充,堆芯容器外为重水反射层环形水箱。JHR堆采用U3Si2-Al圆柱形燃料和雏菊型栅格排列方式,U-235富集度为27%,芯体铀密度为 4.8 gU/cm^3 。堆芯外围选用Be作为反射层。

[0004] 新一代先进试验堆设计越来越采用第四代堆型,比如俄罗斯预计建设的高通量堆MBIR属于钠冷快堆概念,热功率为150MW,其最大快中子通量水平为 $5.3 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 。目前阿贡国家实验室正致力于开发一种名为多功能试验堆(VTR)的辐照试验堆的概念设计。VTR属于钠冷快堆概念,反应堆热功率为300MW,其最大快中子通量水平为 $4.0 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 。这些新型试验堆的反射层设计通常采用贫铀或者不锈钢材料。

[0005] 然而通量越高,堆芯功率密度越大,燃料芯体的温度和包壳温度就会增加,这就需要冷却剂有足够的能量带走热量,同时保证燃料芯体最大温度和包壳温度离相应融化限值具有足够的安全距离。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,采用本方案,在热功率不超过200MW,换料周期不低于90个满功率天,平均组件功率密度不超过 1200 MW/m^3 的条件下,堆芯内最大中子通量超过 $1 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2/\text{s}$,将极大提高材料辐照考验的发展和解决国内重要且稀缺的同位素生产问题。

[0007] 本发明通过下述技术方案实现:

[0008] 一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,包括棒束型燃料组件、控制棒组件和反射层组件;

[0009] 所述棒束型燃料组件和控制棒组件均为若干个,若干所述棒束型燃料组件和控制棒组件紧凑排列于堆芯活性区内,若干所述控制棒组件均分散位于所述堆芯活性区外围;

[0010] 所述反射层组件内由冷却剂填充而成,所述堆芯活性区位于所述反射层组件内部。

[0011] 相对于现有技术中,核设施中子通量较低的问题,本方案提供了一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,具体方案中,堆芯包括若干棒束型燃料组件、若干控制棒组件和位于外层的反射层组件,其中若干棒束型燃料组件和若干控制棒组件相互紧密排布于堆芯活性区,若干控制棒组件分为两组,补偿棒组和安全棒组,补偿棒组主要补偿燃烧引起的反应性损失,而安全棒组主要用于紧急停堆,补偿棒组和安全棒组分别构成一套控制系统,均可用于独立停堆。其中,控制棒组件主要设置于堆芯活性区外围,能控制外围组件的功率分布,提高中心区燃料组件的功率密度,有利于提高堆芯最大中子通量密度;另外,在活性区外设置有反射层,反射层由冷却剂填充而成,并将堆芯活性区容纳在内,在降温的同时,还能减少中子泄漏;

[0012] 以上设置,旨在实现:在热功率不超过200MW,换料周期不低于90个满功率天,平均组件功率密度不超过 $1200\text{MW}/\text{m}^3$ 的条件下,堆芯内最大中子通量超过 $1 \times 10^{16}\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}$,从而极大提高材料辐照考验的发展和解决国内重要且稀缺的同位素生产问题。本发明的指标已远超出目前国际试验堆的水平以及国际上在研的先进试验概念堆的水平。

[0013] 进一步优化,所述棒束型燃料组件包括横截面呈六边形的第一组件盒,所述第一组件盒内设有若干紧凑排布的燃料棒,若干所述燃料棒沿平行于第一组件盒任意一侧边呈多列排布,相邻两列中,其中一列的任意一个燃料棒与另一列中相邻的两个燃料棒的横截面圆心连线构成正三角形;

[0014] 任意一个所述燃料棒外侧的圆周方向均留有冷却剂流道。

[0015] 相对于现有技术中,通量越高,堆芯功率密度越大,燃料芯体的温度和包壳温度就会增加,这就需要冷却剂有足够的带走热量,同时保证燃料芯体最大温度和包壳温度离相应融化限值具有足够的安全距离的问题,本方案提供了一种棒束型燃料组件,棒束型燃料组件由若干燃料元件按照一定规则排布而成,具体方案中,包括第一组件盒,第一组件盒的横截面呈正六边形,便于在堆芯活性区内进行紧凑排布,在第一组件盒内设有若干燃料棒,本方案的燃料组件由127根燃料棒组成,整个燃料组件内没有组件盒,从而可降低结构材料对中子的有害吸收;若干燃料棒在第一组件盒内紧凑排列,其具体排列方式呈三角形栅格布置,即沿平行于第一组件盒的任意一侧边呈多列布置,每列中任意一个燃料棒,和相邻一列中,相邻的两个燃料棒的横截面圆心连接呈正三角形,且每个燃料棒的圆周方向均留有冷却剂流道,通过此种紧凑排布方式,在降低板形燃料元件和包壳温度,从而提高了堆芯安全性的同时,还能减少堆芯泄漏;燃料组件对边距在56mm-60mm之间。

[0016] 进一步优化,所述燃料棒包括从外到内依次设置的包壳、气隙和燃料芯体;其中包壳选用不锈钢,其与铅铋或铅基冷却剂的相容性好。

[0017] 进一步优化,所述燃料芯体直径为5mm~7mm;用于提高堆芯的安全性。

[0018] 进一步优化,所述燃料芯体采用U-Zr、U-Mo或U-Pu-Zr;用于提高最大中子通量密度。

[0019] 进一步优化,所述控制棒组件的外壳为第二组件盒,所述第二组件盒的横截面尺寸和所述棒束型燃料组件的第一组件盒横截面尺寸相同;便于紧凑拼接,以减少堆芯泄漏。

[0020] 进一步优化,若干所述控制棒组件分为若干补偿棒组和若干安全棒组;补偿棒组主要补偿燃烧引起的反应性损失,而安全棒组主要用于紧急停堆,补偿棒组和安全棒组分别构成一套控制系统,均可用于独立停堆。

[0021] 进一步优化,若干所述棒束型燃料组件和控制棒组件紧凑排列成横截面为六边形的组合结构,若干所述补偿棒组和若干安全棒组均分别呈旋转对称设置;通过紧凑排列的方式,从而减少堆芯泄漏。

[0022] 进一步优化,所述堆芯活性区高度为40cm~60cm,所述反射层组件轴向两端均超出所述堆芯活性区50~100cm;更利于减少中子泄漏。

[0023] 进一步优化,所述冷却剂采用液态铅或液态铅铋;此时反射层相当于一个液态池,可以吸收堆芯热量,提高堆芯安全性。同时反射层内可灵活布置孔道、回路等。

[0024] 进一步优化,所述堆芯应用在热功率不超过200MW,换料周期不低于90个满功率天,平均组件功率密度不超过1200MW/m³的条件下。

[0025] 本发明与现有技术相比,具有如下的优点和有益效果:

[0026] 1.本发明所述的堆芯在热功率不超过200MW,换料周期不低于90个满功率天,平均组件功率密度不超过1200MW/m³的条件下,堆芯内最大中子通量超过 1×10^{16} n/cm²/s,本发明提出的堆芯最大中子通量均远高于目前在建或规划的反应堆。

[0027] 2.棒束型燃料组件的直径较小,有利于热量导出,从而降低燃料芯体和包壳的温度,提高了堆芯的安全性。

[0028] 3.较大的反射层区域有利于开展各种研究,如布置各种用途的孔道和回路,同时由于反射层材料同冷却剂,因此反射层中大量的冷却剂也有利于保证堆芯安全。

附图说明

[0029] 为了更清楚地说明本发明示例性实施方式的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,应当理解,以下附图仅示出了本发明的某些实施例,因此不应被看作是对范围的限定,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他相关的附图。在附图中:

[0030] 图1为本发明提供的一种实施例的棒束型燃料组件的横截面图;

[0031] 图2为本发明提供的一种实施例的燃料棒的横截面图;

[0032] 图3为本发明提供的一种实施例的堆芯装载设计横截面图;

[0033] 图4为本发明提供的一种实施例的堆芯轴向截面示意图;

[0034] 图5为本发明提供的一种实施例的控制棒组件的横截面图。

[0035] 附图中标记及对应的零部件名称:

[0036] 1-燃料棒,2-冷却剂流道,3-第一组件盒,4-包壳,5-气隙,6-燃料芯体,7-棒束型燃料组件,8-控制棒组件,9-反射层组件,10-堆芯活性区,11-吸收体,12-第二组件盒。

具体实施方式

[0037] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,下面结合实施例和附图,对本发明作进一步的详细说明,本发明的示意性实施方式及其说明仅用于解释本发明,并不作为对本发明的限定。

[0038] 实施例

[0039] 本实施例提供了一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,如图3至图5所示,包括棒束型燃料组件7、控制棒组件8和反射层组件9;

[0040] 棒束型燃料组件7和控制棒组件8均为若干个,若干棒束型燃料组件7和控制棒组件8 紧凑排列于堆芯活性区10内,若干控制棒组件8均分散位于堆芯活性区10外围;

[0041] 反射层组件9内由冷却剂填充而成,堆芯活性区10位于反射层组件9内部。

[0042] 相对于现有技术中,核设施中子通量较低的问题,本方案提供了一种基于棒束型燃料组件的超高通量反应堆堆芯,具体方案中,堆芯包括若干棒束型燃料组件7、若干控制棒组件8 和位于外层的反射层组件9,其中若干棒束型燃料组件7和若干控制棒组件8相互紧密排布于堆芯活性区10,若干控制棒组件8分为两组,补偿棒组和安全棒组,补偿棒组主要补偿燃耗引起的反应性损失,而安全棒组主要用于紧急停堆,补偿棒组和安全棒组分别构成一套控制系统,均可用于独立停堆。其中,控制棒组件8主要设置于堆芯活性区10外围,能控制外围组件的功率分布,提高中心区燃料组件的功率密度,有利于提高堆芯最大中子通量密度;另外,在活性区外设置有反射层,反射层由冷却剂填充而成,并将堆芯活性区10容纳在内,在降温的同时,还能减少中子泄漏;

[0043] 如图3所示,堆芯活性区10由49盒棒束型燃料组件7和12盒控制棒组件8组成,堆芯活性区10高度50cm,整个堆芯外径为300cm,堆芯高度为150cm,对于49盒棒束型燃料组件7构成的堆芯,热功率为200MW,其换料周期90满功率天,换料周期内最大中子通量为 $1.01 \times 10^{16} \text{n/cm}^2/\text{s}$,平均组件功率密度为1180MW/m³。

[0044] 以上设置,旨在实现:在热功率不超过200MW,换料周期不低于90个满功率天,平均组件功率密度不超过1200MW/m³的条件下,堆芯内最大中子通量超过 $1 \times 10^{16} \text{n/cm}^2/\text{s}$,从而极大提高材料辐照考验的发展和解决国内重要且稀缺的同位素生产问题。本发明的指标已远超出目前国际试验堆的水平以及国际上在研的先进试验概念堆的水平。

[0045] 本实施例中,提供了一种棒束型燃料组件7,如图1和图2所示,包括横截面呈六边形的第一组件盒3,第一组件盒3内设有若干紧凑排布的燃料棒1,若干燃料棒1沿平行于第一组件盒3任意一侧边呈多列排布,相邻两列中,其中一列的任意一个燃料棒1与另一列中相邻的两个燃料棒1的横截面圆心连线构成正三角形;

[0046] 任意一个燃料棒1外侧的圆周方向均留有冷却剂流道2。

[0047] 相对于现有技术中,通量越高,堆芯功率密度越大,燃料芯体6的温度和包壳4温度就会增加,这就需要冷却剂有足够的带走热量,同时保证燃料芯体6最大温度和包壳4温度离相应融化限值具有足够的安全距离的问题,本方案提供了一种棒束型燃料组件7,棒束型燃料组件7由若干燃料元件按照一定规则排布而成,具体方案中,包括第一组件盒3,第一组件盒3的横截面呈正六边形,便于在堆芯活性区10内进行紧凑排布,在第一组件盒3内设有若干燃料棒1,本方案的燃料组件由127根燃料棒1组成,整个燃料组件内没有组件盒,从而可降低结构材料对中子的有害吸收;若干燃料棒1在第一组件盒3内紧凑排列,其具体排列方式呈三角形栅格布置,即沿平行于第一组件盒3的任意一侧面呈多列布置,每列中任意一个燃料棒1,和相邻一列中,相邻的两个燃料棒1的横截面圆心连接呈正三角形,且每个燃料棒1的圆周方向均留有冷却剂流道2,通过此种紧凑排布方式,在降低板形燃料元件和包壳4温度,从而提高了堆芯安全性的同时,还能减少堆芯泄漏;燃料组件对边距在 56mm-60mm之间。

[0048] 请参阅图2,本实施例中,燃料棒1包括从外到内依次设置的包壳4、气隙5和燃料芯体 6;其中包壳4选用不锈钢,其与铅铋或铅基冷却剂的相容性好。

[0049] 作为一种提高堆芯的安全性的具体实施方式,设置为:燃料芯体6直径为5mm~7mm;本实施例中,燃料芯体6的直径优选为6mm,选择这样细的直径有利于燃料棒1中的热量导出,从而降低燃料芯体6和包壳4的温度,提高了堆芯的安全性。

[0050] 作为一种提高最大中子通量密度的具体实施方式,设置为:燃料芯体6采用U-Zr、U-Mo 或U-Pu-Zr;本实施例中,燃料芯体6可采用U-Zr、U-Mo或U-Pu-Zr等金属燃料,而采用含Pu燃料有利于提高最大中子通量密度,本实施例燃料芯体6选择U-Mo合金。

[0051] 请参阅图5,本实施例中,控制棒组件8的外壳为第二组件盒12,第二组件盒12的横截面尺寸和棒束型燃料组件7的第一组件盒3横截面尺寸相同;将横截面均设置为尺寸相同的六边形结构,便于紧凑拼接,以减少堆芯泄漏;而在第二组件盒12内设有若干控制棒吸收体11,本实施例优选为七个控制棒吸收体11,吸收体11材料为碳化硼,并放在导向管内,能吸收大量中子,以阻止裂变链式反应的进行。

[0052] 本实施例中,若干控制棒组件8分为若干补偿棒组和若干安全棒组;补偿棒组主要补偿燃料引起的反应性损失,而安全棒组主要用于紧急停堆,补偿棒组和安全棒组分别构成一套控制系统,均可用于独立停堆。

[0053] 请参阅图3,本实施例中,若干棒束型燃料组件7和控制棒组件8紧凑排列成横截面为六边形的组合结构,若干补偿棒组和若干安全棒组均分别呈旋转对称设置;其中,堆芯活性区10由横截面均呈正六边形的若干棒束型燃料组件7和若干控制棒组件8构成,本实施例设有49盒棒束型燃料组件7和12盒控制棒组件8,其组成的外形近似为一个横截面为六角形的结构,通过紧凑排列的方式,从而减少堆芯泄漏;如图3所示,堆芯活性区10截面呈六角形,在六角形边上布置了12个控制棒,这12根控制棒分成两组独立停堆系统:安全棒组和补偿棒组,分别用于紧急停堆和补偿燃料引起的反应性损失。安全棒组和补偿棒组的数量均为6,补偿棒组布置在六角形结构的六个角上,而安全棒组布置在六角形结构的六个边的中心位置,此时若干补偿棒组和若干安全棒组均分别呈60°旋转对称设置,上述的具体设置位置是根据实际的拼接位置而定。

[0054] 请参阅图4,作为一种更利于减少中子泄漏的具体实施方式,设置为:堆芯活性区10高度为40cm~60cm,反射层组件9轴向两端均分别超出堆芯活性区10两端50~100cm;本实施例中,堆芯反射层组件9在径向上外形呈圆形,内部紧挨着堆芯活性区10,超高通量堆芯活性区10高度为50cm,而轴向反射层两端均分别超出堆芯活性区10两端50cm,反射层在径向方向上的外径不小于200cm,通过较低的活性区高度有利于降低最大包壳4和芯体温度,而较厚的反射层有利于减少中子泄漏;另外,较大较厚的反射层,并由冷却剂填充,利于在反射层布置不同用途的孔道和回路,反射层厚度在50cm-100cm之间,较厚的反射层不仅可以屏蔽放射性射线,而且还可以增加回路布置的空间。

[0055] 本实施例中,冷却剂采用液态铅或液态铅铋;此时反射层相当于一个液态池,可以吸收堆芯热量,提高堆芯安全性。同时反射层内可灵活布置孔道、回路等。

[0056] 本实施例中,堆芯应用在热功率不超过200MW,换料周期不低于90个满功率天,平均组件功率密度不超过1200MW/m³的条件下。

[0057] 以上所述的具体实施方式,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施方式而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含

在本发明的保护范围之内。

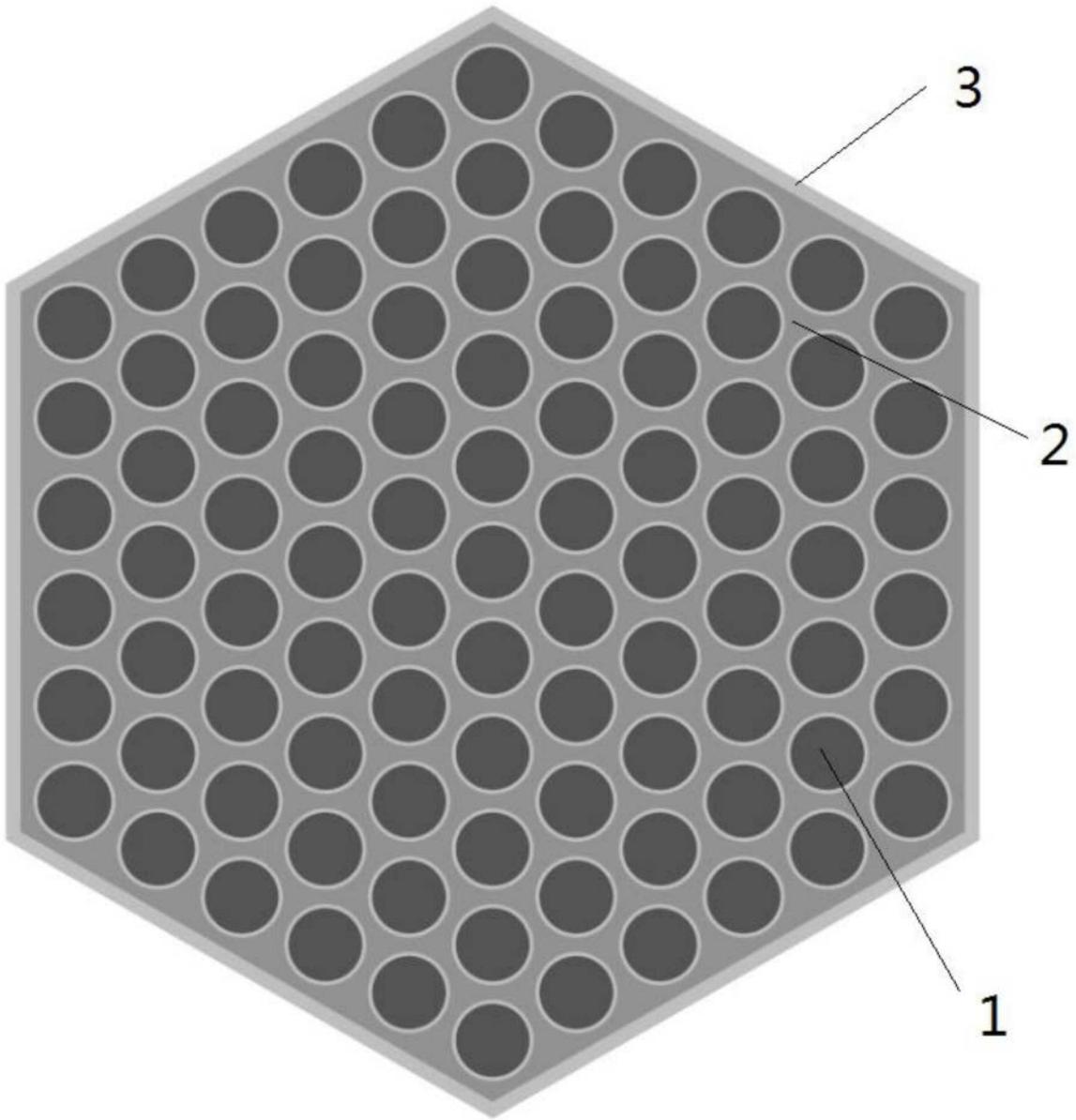


图1

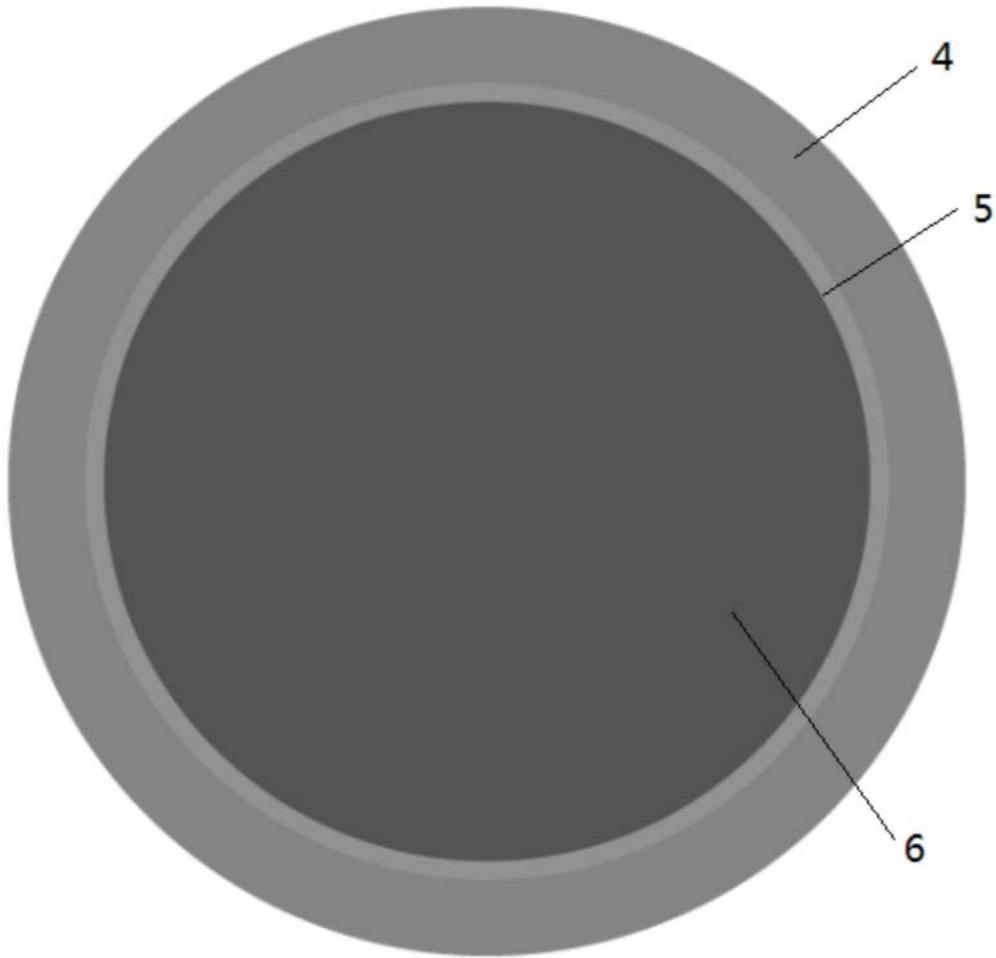


图2

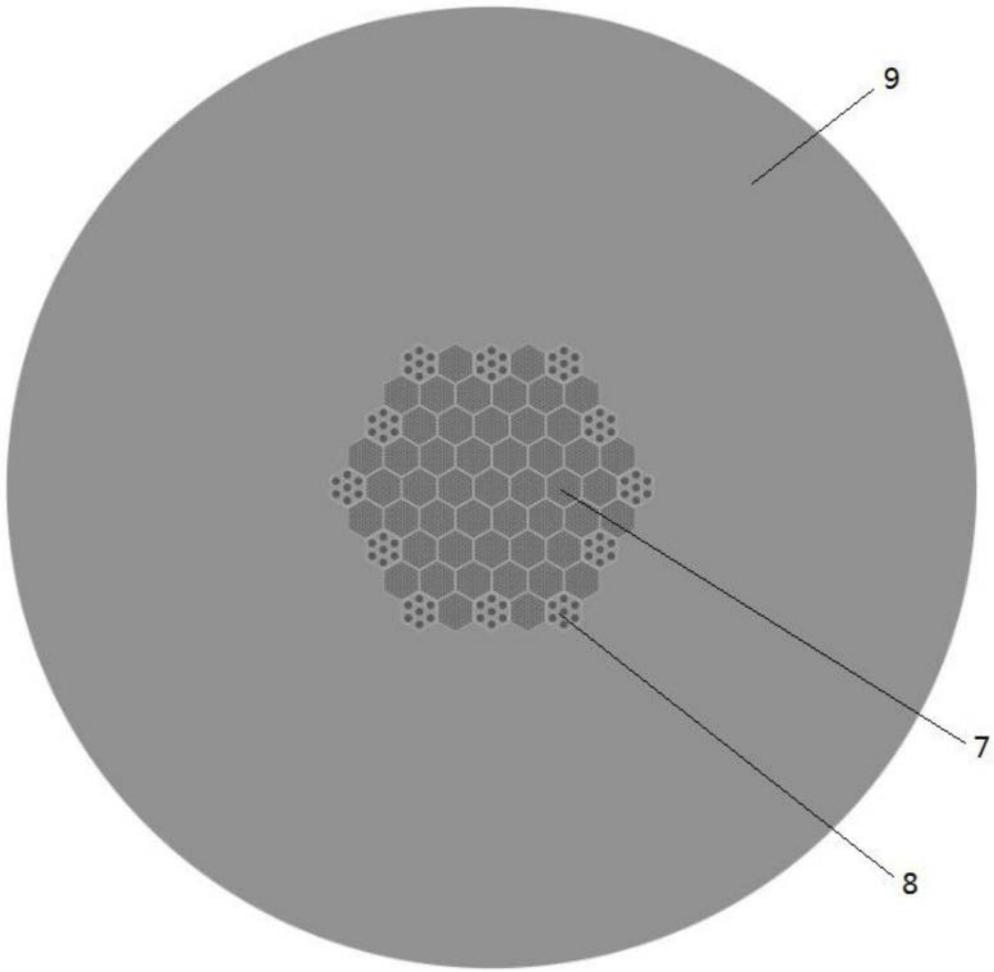


图3

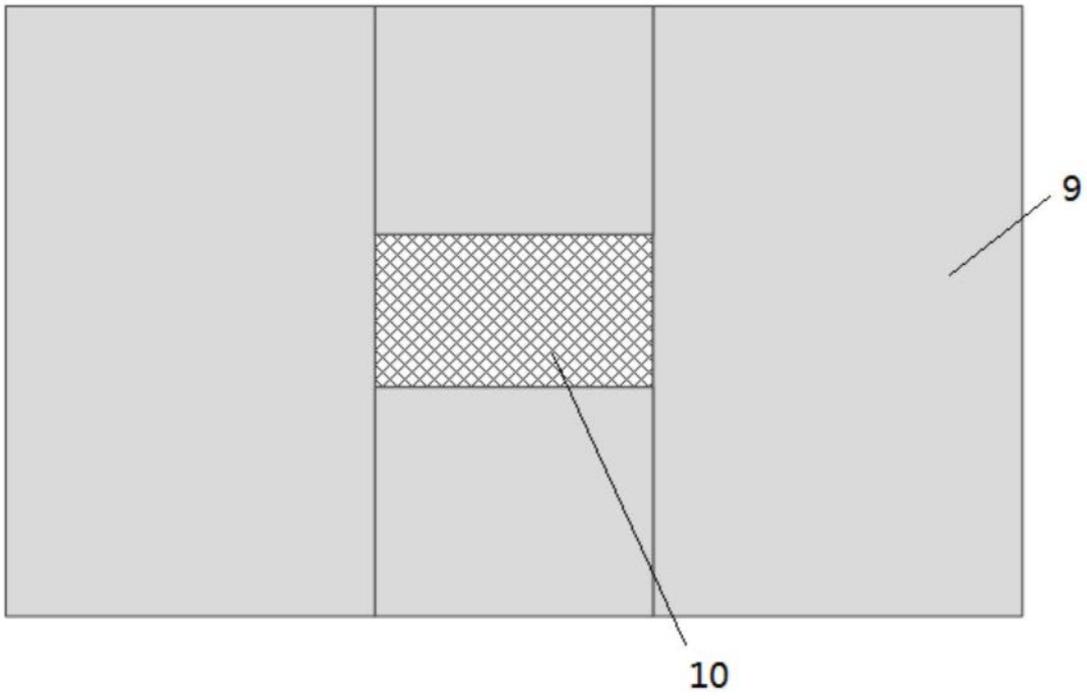


图4

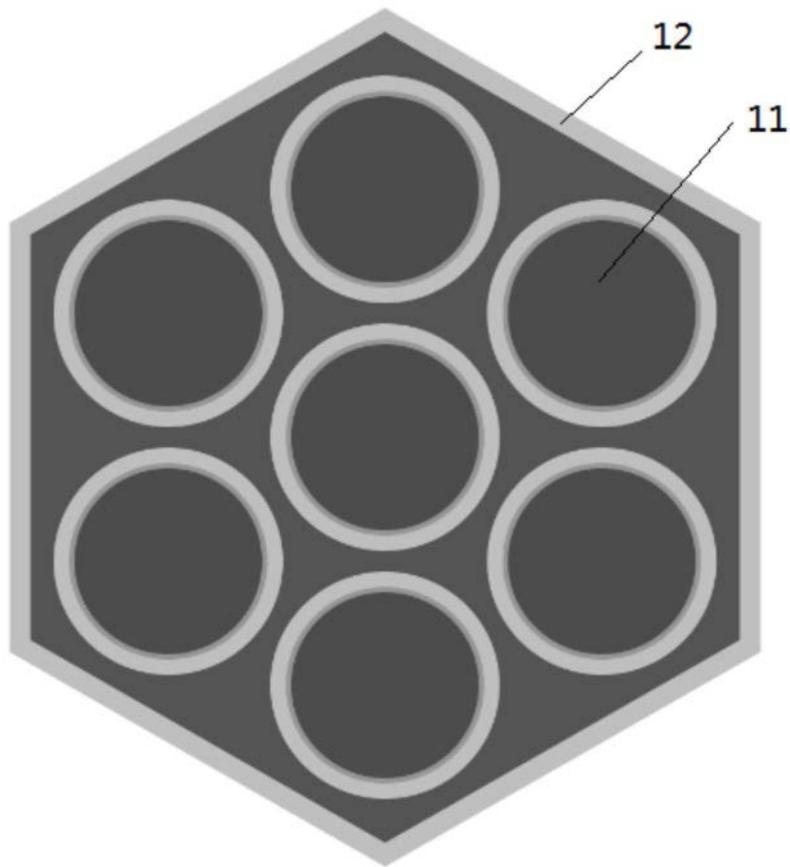


图5