



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114068043 A

(43) 申请公布日 2022. 02. 18

(21) 申请号 202111177187.9

G21C 3/07 (2006.01)

(22) 申请日 2021.10.09

G21C 3/26 (2006.01)

(71) 申请人 中广核研究院有限公司

地址 518031 广东省深圳市福田区上步中
路西深圳科技大厦15层(1502-1504、
1506)

申请人 中国广核集团有限公司
中国广核电力股份有限公司

(72) 发明人 张显生 王诗槐 卢志威 陈蒙腾
彭振驯 武海龙 任啟森 廖业宏

(74) 专利代理机构 深圳市瑞方达知识产权事务
所(普通合伙) 44314

代理人 王少虹

(51) Int. Cl.

G21C 3/20 (2006.01)

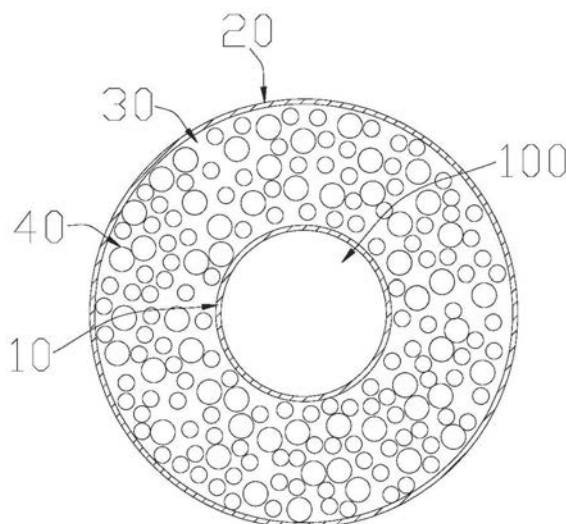
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

颗粒密实燃料元件

(57) 摘要

本发明公开了一种颗粒密实燃料元件,包括内外设置的内包壳和外包壳、形成在所述内包壳和外包壳之间的密闭的环形腔;所述内包壳的密闭的内腔形成所述颗粒密实燃料元件的中间区域;所述环形腔内装填有颗粒组合物,所述颗粒组合物包括燃料颗粒。本发明的颗粒密实燃料元件,相比单包壳颗粒密实燃料元件,将颗粒装载在内、外包壳之间的环形腔内,避免了燃料元件中间区域的烧结重构现象,使得燃料元件的设计更稳定,燃料元件的性能具有更好的可预测性;内包壳内腔提供封闭的中间区域,为事故或瞬态条件下含有燃料颗粒的颗粒组合物的膨胀、肿胀和裂变气体释放提供了额外的空间,提升了燃料元件的安全性。



1. 一种颗粒密实燃料元件,其特征在于,包括内外设置的内包壳和外包壳、形成在所述内包壳和外包壳之间的密闭的环形腔;所述内包壳的密闭的内腔形成所述颗粒密实燃料元件的中间区域;

所述环形腔内装填有颗粒组合物,所述颗粒组合物包括燃料颗粒。

2. 根据权利要求1所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述燃料颗粒为含有钚、铀、钷中至少一种的颗粒状燃料物质。

3. 根据权利要求2所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述燃料颗粒为二氧化铀颗粒燃料。

4. 根据权利要求1所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述燃料颗粒为TRISO包覆颗粒。

5. 根据权利要求1所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述颗粒组合物还包括功能性颗粒;

所述功能性颗粒包括嬗变颗粒、可燃毒物颗粒、慢化颗粒、热导增强颗粒、生产核技术用放射性核素的母体颗粒中的一种或多种。

6. 根据权利要求5所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述嬗变颗粒为含有乏燃料后处理产生的次锕系核素或长寿命裂变产物物质的颗粒;其中,次锕系核素包括Np、Pu、Am、Cm,长寿命裂变产物包括 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{135}Cs 、 ^{99}Tc 、 ^{129}I 。

7. 根据权利要求6所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述嬗变颗粒还含有U和/或Pu。

8. 根据权利要求5所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述可燃毒物颗粒包括氧化钐、氧化镱、氧化钆、碳化硼、硼化锆和硼硅玻璃中的一种或多种。

9. 根据权利要求5所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述慢化颗粒包括铍、氧化铍、石墨、石墨烯、氢化锆、氢化钪、氢化锂、氢化铌、氢化钽、氢化钒、氢化钙、氢化钛、氢化钨、氢化钼和氢化铈中的一种或多种。

10. 根据权利要求5所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述热导增强颗粒的热导率 $\geq 10\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

11. 根据权利要求5所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述生产核技术用放射性核素的母体颗粒包括 ^{12}C 、 ^{67}Zn 、 ^{46}Ca 、 ^{47}Ca 、 ^{47}Ti 、 ^{89}Y 、 ^{59}Co 、 ^{104}Ru 、 ^{108}Pd 、 ^{112}Sn 、 ^{130}Te 、 ^{176}Lu 、 ^{164}Dy 和 ^{191}Ir 中的一种或多种。

12. 根据权利要求1所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述环形腔内还设有填充在所述颗粒组合物的颗粒间隙中的热导增强型气体。

13. 根据权利要求12所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述热导增强型气体为氦气。

14. 根据权利要求1所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述环形腔的体积占所述颗粒密实燃料元件总体积的40%-90%。

15. 根据权利要求1所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述内包壳的壁厚为0.3mm~10mm;所述外包壳的壁厚为0.3mm~10mm。

16. 根据权利要求1所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述内包壳的壁面上分布有微孔和/或微裂纹。

17. 根据权利要求1所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述内包壳和外包壳之间设有至少一个挡板,所述挡板将所述环形腔分隔为至少两个腔室;每一所述腔室内均装填有所述颗粒组合物。

18. 根据权利要求1所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述内包壳的横截面形状为圆形、椭圆形、多边形或不规则形状;

所述外包壳的横截面形状为圆形、椭圆形、多边形或不规则形状。

19. 根据权利要求1-18任一项所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述内包壳由无机非金属材料或金属材料制成。

20. 根据权利要求19所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述无机非金属材料包括MAX相陶瓷、碳化硅、碳化硅纤维编织的碳化硅陶瓷复合材料、碳化锆、高熵碳化物、石墨、碳-碳复合材料、氧化铝、氧化锆、氧化铍中的一种或多种;

所述金属材料包括锆合金、不锈钢、难熔金属及其合金中的一种或多种。

21. 根据权利要求19所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述外包壳由无机非金属材料或金属材料制成。

22. 根据权利要求21所述的颗粒密实燃料元件,其特征在于,所述无机非金属材料包括MAX相陶瓷、碳化硅、碳化硅纤维编织的碳化硅陶瓷复合材料、碳化锆、高熵碳化物、石墨、碳-碳复合材料、氧化铝、氧化锆、氧化铍中的一种或多种;

所述金属材料包括锆合金、不锈钢、难熔金属及其合金中的一种或多种。

颗粒密实燃料元件

技术领域

[0001] 本发明涉及核燃料技术领域,尤其涉及一种颗粒密实燃料元件。

背景技术

[0002] 现有轻水堆中使用的燃料,普遍采用氧化铀陶瓷芯块密封在锆合金包壳管中形成的燃料棒作为基本燃料元件构造。氧化铀陶瓷芯块是由粉末冶金工艺制备而成,将氧化铀粉末压制成芯块生坯后在一定的气氛条件下烧结成圆柱形芯块,工艺过程中容易产生粉尘污染,并造成核燃料材料的损失。相比于传统的芯块-包壳燃料棒,球堆积振动密实颗粒燃料棒的制造工艺流程更为简洁,没有芯块-包壳燃料棒中所需的制粉和芯块成型等步骤,因此避免了工艺过程中容易产生粉尘污染的问题,减少燃料厂的硬件投资,降低了生产线的建设成本。

[0003] 在新燃料厂建设,快堆等新堆型燃料的开发,尤其是未来嬗变燃料的开发方面,球堆积振动密实颗粒燃料概念以其更适合遥控操作、生产工艺可以与后处理更好的连接、在放射性防护和减少粉尘污染等方面具有显著优势,仍是非常具有吸引力的潜在候选设计。

[0004] 现有的球堆积振动密实颗粒燃料棒大都是单包壳设计,燃料颗粒直接振动密实装载在包壳管中。已有研究表明,单包壳设计下包壳管内中间区域的燃料颗粒容易发生严重的燃料烧结重构,这种现象使得燃料棒的性能预测比较困难。而内外包壳均接触冷却剂的双包壳设计,加工制造定位困难,内外包壳的冷却剂流量控制,内外包壳导热量控制比较困难,容易导致传热失稳。

[0005] 为确保可持续发展和落实绿色低碳的要求,核能的发展中加强了对铀钍资源利用和核废物处理与处置方面的开发。随着工业和健康产业的发展,对放射性核素的需求正快速增长。反应堆是放射性核素生产的重要工具之一,传统的球堆积振动密实颗粒燃料仅作为燃料使用,功能单一,难以满足资源综合利用、放射性核素生产等多场景应用的需要。

发明内容

[0006] 本发明要解决的技术问题在于,提供一种避免燃料元件中间区域出现烧结重构现象、加工制造和传热控制更简单的颗粒密实燃料元件。

[0007] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:提供一种颗粒密实燃料元件,包括内外设置的内包壳和外包壳、形成在所述内包壳和外包壳之间的密闭的环形腔;所述内包壳的密闭的内腔形成所述颗粒密实燃料元件的中间区域;

[0008] 所述环形腔内装填有颗粒组合物,所述颗粒组合物包括燃料颗粒。

[0009] 优选地,所述燃料颗粒为含有钍、铀、钚中至少一种的颗粒状燃料物质。

[0010] 优选地,所述燃料颗粒为二氧化铀颗粒燃料。

[0011] 优选地,所述燃料颗粒为TRISO包覆颗粒。

[0012] 优选地,所述颗粒组合物还包括功能性颗粒;

[0013] 所述功能性颗粒包括嬗变颗粒、可燃毒物颗粒、慢化颗粒、热导增强颗粒、生产核

技术用放射性核素的母体颗粒中的一种或多种。

[0014] 优选地,所述嬗变颗粒为含有乏燃料后处理产生的次锕系核素或长寿命裂变产物物质的颗粒;其中,次锕系核素包括Np、Pu、Am、Cm,长寿命裂变产物包括 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{135}Cs 、 ^{99}Tc 、 ^{129}I 。

[0015] 优选地,所述嬗变颗粒还含有U和/或Pu。

[0016] 优选地,所述可燃毒物颗粒包括氧化钷、氧化镱、氧化铒、碳化硼、硼化锆和硼硅玻璃中的一种或多种。

[0017] 优选地,所述慢化颗粒包括铍、氧化铍、石墨、石墨烯、氢化锆、氢化钪、氢化锂、氢化铌、氢化钽、氢化钒、氢化钙、氢化钛、氢化铈、氢化钆和氢化铈中的一种或多种。

[0018] 优选地,所述热导增强颗粒的热导率 $\geq 10\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

[0019] 优选地,所述生产核技术用放射性核素的母体颗粒包括 ^{12}C 、 ^{67}Zn 、 ^{46}Ca 、 ^{47}Ca 、 ^{47}Ti 、 ^{89}Y 、 ^{59}Co 、 ^{104}Ru 、 ^{108}Pd 、 ^{112}Sn 、 ^{130}Te 、 ^{176}Lu 、 ^{164}Dy 和 ^{191}Ir 中的一种或多种。

[0020] 优选地,所述环形腔内还设有填充在所述颗粒组合物的颗粒间隙中的热导增强型气体。

[0021] 优选地,所述热导增强型气体为氦气。

[0022] 优选地,所述环形腔的体积占所述颗粒密实燃料元件总体积的40%-90%。

[0023] 优选地,所述内包壳的壁厚为0.3mm~10mm;所述外包壳的壁厚为0.3mm~10mm。

[0024] 优选地,所述内包壳的壁面上分布有微孔和/或微裂纹。

[0025] 优选地,所述内包壳和外包壳之间设有至少一个挡板,所述挡板将所述环形腔分隔为至少两个腔室;每一所述腔室内均装填有所述颗粒组合物。

[0026] 优选地,所述内包壳的横截面形状为圆形、椭圆形、多边形或不规则形状;

[0027] 所述外包壳的横截面形状为圆形、椭圆形、多边形或不规则形状。

[0028] 优选地,所述内包壳由无机非金属材料或金属材料制成。

[0029] 优选地,所述无机非金属材料包括MAX相陶瓷、碳化硅、碳化硅纤维编织的碳化硅陶瓷复合材料、碳化锆、高熵碳化物、石墨、碳-碳复合材料、氧化铝、氧化锆、氧化铍中的一种或多种;

[0030] 所述金属材料包括锆合金、不锈钢、难熔金属及其合金中的一种或多种。

[0031] 优选地,所述外包壳由无机非金属材料或金属材料制成。

[0032] 优选地,所述无机非金属材料包括MAX相陶瓷、碳化硅、碳化硅纤维编织的碳化硅陶瓷复合材料、碳化锆、高熵碳化物、石墨、碳-碳复合材料、氧化铝、氧化锆、氧化铍中的一种或多种;

[0033] 所述金属材料包括锆合金、不锈钢、难熔金属及其合金中的一种或多种。

[0034] 本发明的颗粒密实燃料元件,相比单包壳颗粒密实燃料元件,将颗粒装载在内、外包壳之间的环形腔内,避免了颗粒密实燃料元件中间区域的烧结重构现象,使得燃料元件的设计更稳定,燃料元件的性能具有更好的可预测性;内包壳内腔的密闭设置,使得内包壳不接触冷却剂,使得燃料的加工制造定位更加方便、传热设计更加简单,避免了内外包壳均接触冷却剂时的内外包壳导热量控制难题;内包壳内腔提供的密闭的中间区域,为事故或瞬态条件下含有燃料颗粒的颗粒组合物的膨胀、肿胀和裂变气体释放提供了额外的空间,提升了燃料元件的安全性。

[0035] 本发明的颗粒密实燃料元件适用于高温气冷堆、轻水堆、熔盐堆、铅冷堆、钠冷堆等多种堆型。

附图说明

[0036] 下面将结合附图及实施例对本发明作进一步说明,附图中:

[0037] 图1是本发明第一实施例的颗粒密实燃料元件的横向剖面结构示意图;

[0038] 图2是本发明第二实施例的颗粒密实燃料元件的横向剖面结构示意图;

[0039] 图3是本发明第三实施例的颗粒密实燃料元件的横向剖面结构示意图;

[0040] 图4是本发明第四实施例的颗粒密实燃料元件的纵向剖面结构示意图;

[0041] 图5是本发明第五实施例的颗粒密实燃料元件的横向剖面结构示意图;

[0042] 图6是本发明第六实施例的颗粒密实燃料元件的内包壳的结构示意图。

具体实施方式

[0043] 为了对本发明的技术特征、目的和效果有更加清楚的理解,现对照附图详细说明本发明的具体实施方式。

[0044] 参考图1,本发明的颗粒密实燃料元件,包括内外设置的内包壳10和外包壳20、形成在内包壳10和外包壳20之间的密闭的环形腔30;环形腔30内装填有颗粒组合物40。

[0045] 内包壳10和外包壳20均为管状结构,外包壳20套设在内包壳10外形成双包壳结构,并且该双包壳结构的两个端部均封闭设置(如通过端塞封闭等形式),使环形腔30和内包壳10的内腔100均形成封闭腔;环形腔30与内包壳10的内腔100之间相隔绝(不连通);内包壳10的内腔100也作为颗粒密实燃料元件的中间区域。

[0046] 环形腔的体积占颗粒密实燃料元件总体积的40%-90%,从而使得填充在环形腔30内的颗粒组合物40具有一定的体积。颗粒组合物40装入环形腔30内的同时或之后进行振动密实。

[0047] 在环形腔30内,颗粒组合物40包括燃料颗粒。燃料颗粒可以为含有钍、铀、钚中至少一种的颗粒状燃料物质。例如,燃料颗粒包括 UO_2 、 PuO_2 、 PuN 、 MOX 、 ThN 、 ThO_2 、 UN 、 UC 、 UB_2 、 U_3Si_2 、 U-Mo 合金、 U-Zr 合金、 U-Pu-Zr 合金、TRISO包覆颗粒中的一种或多种。优选地,燃料颗粒选自高温气冷堆中研发的三重各向同性包覆颗粒燃料,即TRISO包覆颗粒。TRISO包覆颗粒作为技术成熟已工业化生产的颗粒燃料,可以实现更大规模的工业化批量生产,从而通过扩大规模后的成本共摊进一步降低TRISO颗粒的制造成本。

[0048] 颗粒组合物40还可包括功能性颗粒。功能性颗粒包括嬗变颗粒、可燃毒物颗粒、慢化颗粒、热导增强颗粒、生产核技术用放射性核素的母体颗粒中的一种或多种;通过不同功能颗粒的组合可以实现燃料元件的多功能化,使得颗粒密实燃料元件可以满足发电、嬗变处理核废物、放射性同位素生产、铀钍资源综合利用等多场景应用的需要,具备多动能性。其中:

[0049] 嬗变颗粒在颗粒组合物40中的添加,使得颗粒密实燃料元件能够用于嬗变处理高放废物。嬗变颗粒为含有乏燃料后处理产生的次锕系核素(超铀核素)或长寿命裂变产物物质的颗粒;次锕系核素包括 Np 、 Pu 、 Am 、 Cm ,长寿命裂变产物包括 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{135}Cs 、 ^{99}Tc 、 ^{129}I 。嬗变颗粒还可以含有 U 和/或 Pu 等燃料物质。例如,嬗变颗粒可以是含有 Np 、 Pu 、 Am 、 Cm 等元素

的氧化物颗粒。

[0050] 可燃毒物颗粒用于改善服役运行过程中颗粒组合物40的中子学平衡性能。可燃毒物颗粒可包括氧化钐、氧化铈、氧化铪、碳化硼、硼化锆和硼硅玻璃中的一种或多种。

[0051] 慢化颗粒用于提高颗粒组合物40的中子经济性。慢化颗粒可包括铍、氧化铍、石墨、石墨烯、氢化锆、氢化钪、氢化锂、氢化铈、氢化铪、氢化钽、氢化钒、氢化钙、氢化钛、氢化铀、氢化钍和氢化钷中的一种或多种。

[0052] 热导增强颗粒用于改善颗粒组合物40的传热性能,选用热导率 $\geq 10\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的材料制成,例如,选自碳化硅、石墨烯或氧化铍,使得热导增强颗粒的热导率 $\geq 10\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

[0053] 生产核技术用放射性核素的母体颗粒选用能够在反应堆辐照下形成放射性核素的颗粒,该形成的放射性核素可用于工业放射源、核电池或医用放射性药物等用途。母体颗粒选自 ^{12}C 、 ^{67}Zn 、 ^{46}Ca 、 ^{47}Ca 、 ^{47}Ti 、 ^{89}Y 、 ^{59}Co 、 ^{104}Ru 、 ^{108}Pd 、 ^{112}Sn 、 ^{130}Te 、 ^{176}Lu 、 ^{164}Dy 和 ^{191}Ir 中的一种或多种。比如, ^{59}Co 经反应堆辐照后可制备工业放射源用放射性核素的 ^{60}Co , ^{60}Co 可应用于辐射育种、无损探伤、辐照加工或辐照杀菌等场景。

[0054] 颗粒组合物40中,通过不同种类的颗粒的不同数量的设置,可以满足不同场景的放射性活度需要,颗粒状避免了辐照后加工组装操作中的切割需要,可以减少放射性污染,减少危险性的放射性操作需要。

[0055] 颗粒组合物40中,各颗粒(燃料颗粒、功能性颗粒)分别可为椭球状颗粒、球状颗粒、短纤维状颗粒或不规则形状颗粒,或者包括以上形状中的一种或多种。优选地,颗粒组合物40中的颗粒为球状颗粒,粒径为 $80\mu\text{m}\sim 800\mu\text{m}$ 。对于椭球状颗粒,其长轴可以包括 $30\mu\text{m}\sim 120\mu\text{m}$ 和 $300\mu\text{m}\sim 900\mu\text{m}$ 中至少一种尺寸范围。对于短纤维状颗粒,其中纤维长轴的长度可以但不限于 $30\mu\text{m}\sim 120\mu\text{m}$ 。

[0056] 在颗粒组合物40的功能性颗粒中,燃料颗粒、嬗变颗粒优选为椭球状颗粒或球状颗粒;母体颗粒优选为短纤维状颗粒。

[0057] 在尺寸方面,颗粒组合物40中的颗粒可以统一为一种尺寸,也可以包括多种不同尺寸。作为优选,颗粒组合物40中的颗粒包括至少两种尺寸,从而尺寸较小的颗粒可以填充在尺寸较大颗粒堆叠形成的空隙内,增加颗粒的堆积密度;例如包括但不限于 $10\mu\text{m}\sim 120\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}\sim 490\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}\sim 1200\mu\text{m}$ 。

[0058] 另外,环形腔30内还可充入有热导增强型气体,热导增强型气体填充在颗粒组合物40的颗粒间隙中,提高传热性能;所充入热导增强型气体压力小于 3MPa 。热导增强型气体优选为氦气。

[0059] 对于内包壳10,其由无机非金属材料或金属材料制成。其中,无机非金属材料包括MAX相陶瓷(Ti_3SiC_2 、 Ti_2AlC 等)、碳化硅、碳化硅纤维编织的碳化硅陶瓷复合材料(如 SiC_f/SiC)、碳化锆、高熵碳化物、石墨、碳-碳复合材料(如 C/C)、氧化铝、氧化锆、氧化铍中的一种或多种。金属材料包括锆合金、不锈钢、难熔金属及其合金(包括高熵难熔合金)中的一种或多种。

[0060] 在本发明中,内包壳10的壁厚为 $0.3\text{mm}\sim 10\text{mm}$;外包壳20的壁厚为 $0.3\text{mm}\sim 10\text{mm}$ 。在优选实施方式中,内包壳10和外包壳20的壁厚大于常规的锆合金包壳的壁厚。

[0061] 对于外包壳20,其由无机非金属材料或金属材料制成。其中,无机非金属材料包括MAX相陶瓷(Ti_3SiC_2 、 Ti_2AlC 等)、碳化硅、碳化硅纤维编织的碳化硅陶瓷复合材料(如 SiC_f/SiC)、碳化锆、高熵碳化物、石墨、碳-碳复合材料(如 C/C)、氧化铝、氧化锆、氧化铍中的一种或多种。金属材料包括锆合金、不锈钢、难熔金属及其合金(包括高熵难熔合金)中的一种或多种。

SiC)、碳化锆、高熵碳化物、石墨、碳-碳复合材料(如C/C)、氧化铝、氧化锆、氧化铍中的一种或多种;碳化硅包括含碳化硅纤维编织的碳化硅陶瓷复合材料(如 SiC_f/SiC)。金属材料包括锆合金、不锈钢、难熔金属及其合金(包括高熵难熔合金)中的一种或多种。

[0062] 外包壳20和内包壳10可由相同的材料制成,也可以由不同材料制成。

[0063] 当外包壳20和内包壳10均由锆合金制成时,由于内包壳10的服役温度要大于外包壳20,含有燃料颗粒的颗粒组合物40施加给内包壳10的应变大于外包壳20,减小了与冷却剂接触的外包壳20因与燃料相互作用而失效的风险。

[0064] 当外包壳20由锆合金制成时,内包壳10还可优选力学性能更优异、耐高温性能更好的碳化硅纤维编织的碳化硅陶瓷复合材料(SiC_f/SiC)制成。

[0065] 在形状方面,内包壳10的横截面形状可为圆形、椭圆形、多边形或不规则形状等等;外包壳20的横截面形状为圆形、椭圆形、多边形或不规则形状等等。

[0066] 在本发明的第一实施例中,如图1所示,内包壳10和外包壳20均为圆柱管体结构,两者的横截面形状均为圆形。内包壳10的直径可为2.0mm~5.0mm,外包壳20的直径可为7.0mm~15.5mm。

[0067] 在本发明的第二实施例中,如图2所示,内包壳10的横截面形状为圆形或椭圆形,外包壳20的横截面形状为由直形边和弧形边构成的多边形。

[0068] 在本发明的第三实施例中,如图3所示,内包壳10和外包壳20的横截面形状均为不规则形状。

[0069] 在本发明的第四实施例中,如图4所示,外包壳20为等径的管状结构,内包壳10为非等径的管状结构,这样内包壳10在其轴向长度(高度方向)上具有多个不同的内径,从而环形腔30在高度方向也具有多个不同的宽度,不同宽度位置的颗粒组合物装载量不同,实现性能更优的堆芯设计,展平堆芯的轴向功率分布。本实施例的内包壳10及环形腔20的设置,使得还可以通过相同富集度的燃料颗粒,但轴向不同的装载量实现堆芯轴向功率分布的调节,避免成本昂贵的铀浓缩需要。

[0070] 对于非等径的内包壳10,其在纵向截面上的形状还可以是波浪状。

[0071] 在本发明的第五实施例中,如图5所示,内包壳10和外包壳20之间设有至少一个挡板50,挡板50将环形腔30分隔为至少两个腔室31;至少两个腔室31沿着环形腔30的周向分布。每一腔室31内均装填有颗粒组合物。分隔形成多个单独腔室31的设置,使得在燃料元件意外破损时,泄露的放射性气体只是单个腔室31内的放射性物质,降低泄露的放射性物质总量,提升燃料元件的安全性。

[0072] 在本发明的第六实施例中,参考图6,在上述第一至第五实施例的基础上,内包壳10的壁面上还可以分布有微孔和/或微裂纹11。微孔或微裂纹11可以只形成在内包壳10的内壁面或外壁面上,也可以贯穿内包壳10的相对两壁面。微孔的孔径及微裂纹11的宽度和长度以小于颗粒组合物40中各颗粒尺寸为准,防止颗粒通过。微孔和微裂纹11可以通过加工形成,也可以通过内包壳10所选材料形成,如碳化硅纤维编织的碳化硅陶瓷复合材料。

[0073] 结合图1、图6,微孔和/或微裂纹11的设置在包壳10上所在区域形成薄弱区,在事故条件下发生一定程度的破损,连通环形腔30和内包壳10的内腔100,从而让事故下释放的放射性气体进入内包壳10的内腔100之中,为事故条件下的裂变气体释放提供更多的包容空间,内包壳10内腔相当于一个泄压舱,减轻了燃料元件内的气体压力,提高了燃料元件

的安全性。

[0074] 结合图1-6,本发明的颗粒密实燃料元件应用于堆芯后,在工作过程中,冷却剂流过外包壳20的外表面带走燃料元件中核反应产生的热量,内包壳10不与冷却剂接触。

[0075] 以上所述仅为本发明的实施例,并非因此限制本发明的专利范围,凡是利用本发明说明书及附图内容所作的等效结构或等效流程变换,或直接或间接运用在其他相关的技术领域,均同理包括在本发明的专利保护范围内。

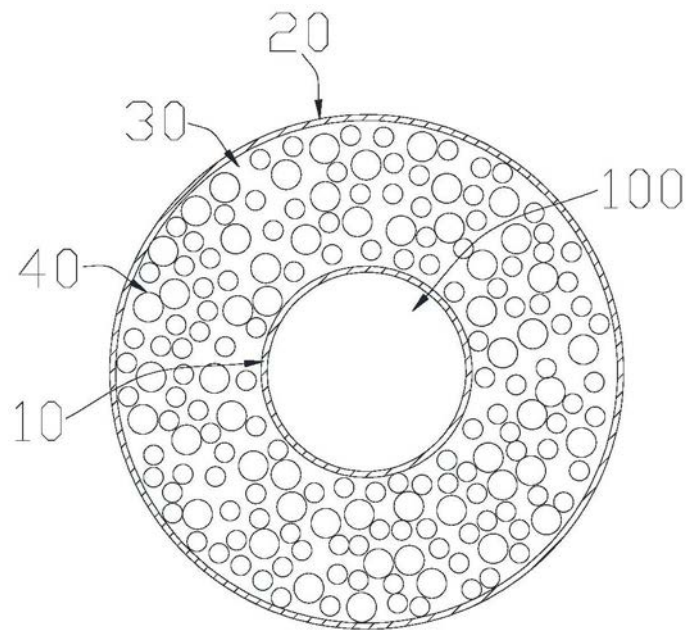


图1

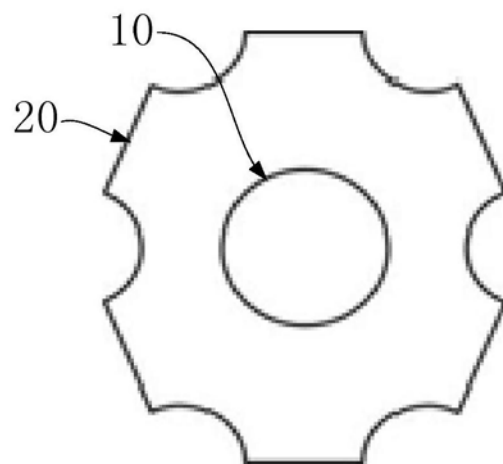


图2

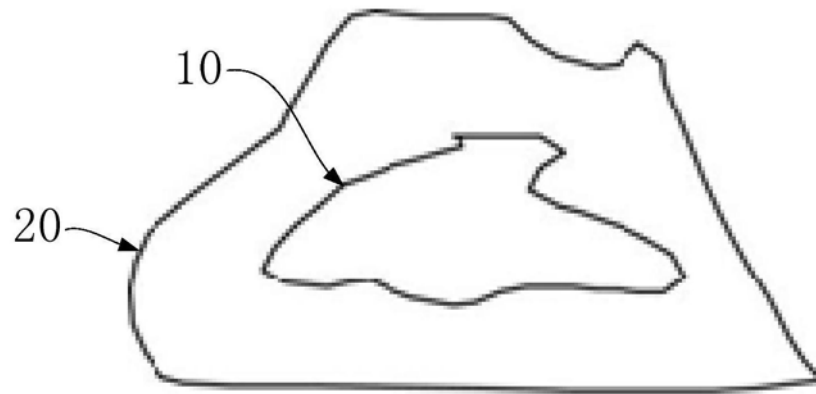


图3

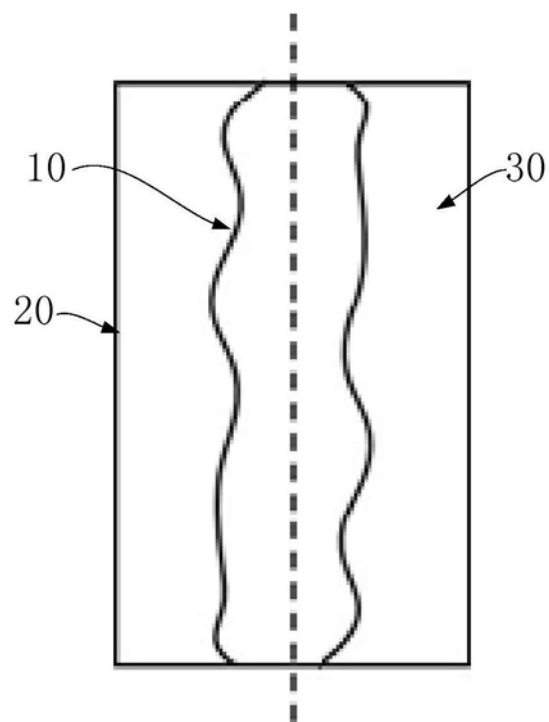


图4

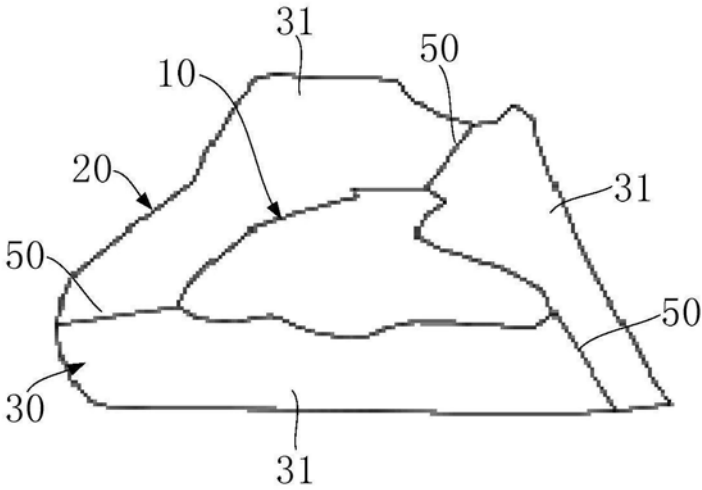


图5

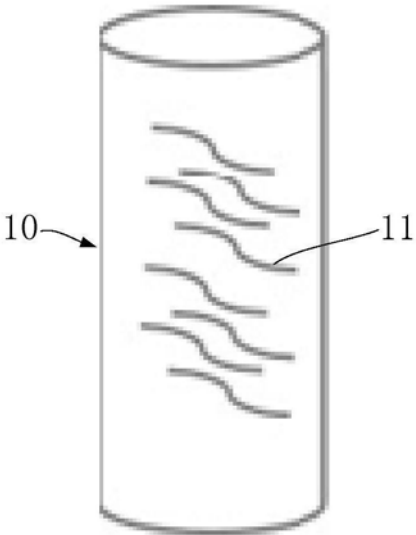


图6