

铅冷快堆环形燃料元件热工性能的关键影响因素的研究

王宇轩 麻龙辉 赵鹏程 刘紫静 朱恩平 于 涛

(南华大学 核科学技术学院 衡阳 421001)

摘要 研究影响铅冷快堆环形燃料元件热工性能的关键因素,对提高铅冷快堆堆芯的功率密度具有重要意义。本文首先对典型铅冷快堆环形燃料元件建立热工模型并进行热阻分析,评估影响其热工性能的关键因素;然后,以内外流道冷却剂的出口温差、环形燃料元件芯块最高温度、绝热面位置以及内外包壳温差四项指标作为评判标准,分析各因素对环形燃料元件热工性能的影响特性。热阻分析结果显示:影响铅冷快堆环形燃料元件热工性能的关键因素为气隙宽度、包壳厚度和流量分配比。评判分析结果表明:增大流量分配比可以显著降低内外流道冷却剂的温差和环形燃料元件芯块最高温度;适当增加外气隙宽度,减小内气隙宽度,可以降低内外流道冷却剂的出口温差和内外包壳的平均温差;改变包壳厚度对环形燃料元件热工性能不造成显著影响。

关键词 铅冷快堆, 环形燃料, 热工性能, 关键影响因素

中图分类号 TL334

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.100607

Key factors affecting the thermal performance of annular fuel elements in LFR

WANG Yuxuan MA Longhui ZHAO Pengcheng LIU Zijing ZHU Enping YU Tao

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract [Background] The key factors affecting the thermal performance of the lead-cooled fast reactor (LFR) annular fuel are very important to improve the core power density of LFR. [Purpose] This study aims to analyze those key factors and provide guidance for improving reactor core power density. [Methods] Firstly, one quarter thermal analysis model of typical annular fuel element of lead cooled fast reactor was established, followed by the thermal resistance analysis of typical LFR annular fuel element to evaluate the key factors affecting its thermal performance. Secondly, four indicators, i.e., the temperature difference between the coolant outlet inside and outside the channel, the maximum temperature of annular fuel pellet, the position of adiabatic surface and the temperature difference between the inner and outer cladding, were used as evaluation criteria to analyze the influence of various factors on the thermal performance of the annular fuel element. [Results] The thermal resistance analysis results show that the key factors affecting the thermal performance of LFR annular fuel element are gas gap width, cladding thickness and flow distribution ratio. Evaluation and analysis results indicate that temperature difference of coolant and the maximum temperature of annular fuel pellet can be significantly reduced by increasing the flow distribution ratio whilst slightly increasing the width of the outer gas gap and reducing the width of the inner gas gap can reduce

装备预研重点实验室基金(No.6142A07190106)、国家自然科学基金(No.12005097)、湖南省自然科学基金(No.2020JJ5465)资助

第一作者: 王宇轩, 男, 2000年出生, 现为硕士研究生, 研究领域为核能科学与工程专业

通信作者: 刘紫静, E-mail: liuzijing1123@163.com

收稿日期: 2021-08-23, 修回日期: 2021-09-10

Supported by Key Laboratory Fund Project of Equipment Pre-research (No.6142A07190106), National Natural Science Foundation of China (No.12005097), Natural Science Foundation of Hunan Province (No.2020JJ5465)

First author: WANG Yuxuan, male, born in 2000, master student, focusing on nuclear science and engineering

Corresponding author: LIU Zijing, E-mail: liuzijing1123@163.com

Received date: 2021-08-23, revised date: 2021-09-10

the coolant outlet temperature difference and the average temperature difference between the inner and outer cladding. Changing the cladding thickness has no significant effect on the thermal performance of annular fuel element. [Conclusions] Studying the key factors that affect the thermal performance of the LFR annular fuel has importance value for optimal design of the LFR core.

Key words LFR, Annular fuel, Thermal performance, Key influencing factors

铅冷快堆(Lead-cooled Fast Reactor, LFR)具有增殖核燃料和嬗变核废料的潜力,是第四代核能系统中最具发展前景的堆型之一^[1]。环形燃料元件作为一种新型燃料结构,实现了燃料芯块的双面冷却,增加了传热面积-体积比,降低了燃料芯块的最高温度,可以在安全限度内进一步提升堆芯功率密度^[2]。如果在铅冷快堆中采用环形燃料元件,反应堆的经济性和安全性将得到大幅度提高。因此,研究影响铅冷快堆环形燃料元件热工性能的关键因素对优化铅冷快堆堆芯设计具有重要意义。

环形燃料元件突出的热工性能受到了国内外诸多学者的关注,针对环形燃料元件的热工性能开展了大量研究。胡立强等^[3]研究了压水堆环形燃料元件流量分配比对传热性能的影响,获得了最佳流量分配比;何晓军等^[4]以压水堆为参考,针对环形UO₂燃料元件内外热流密度分配不均的现象采用AFPAC1.0程序进行分析,发现气隙宽度和包壳粗糙度对环形燃料元件的热工性能具有重要影响;Choi等^[5]以小型压水堆为例,分析了不同燃料和包壳对环形燃料元件热工性能的影响;邓阳斌等^[6]以压水堆环形燃料元件为研究对象,开发了环形燃料元件热工水力计算程序,分析了燃料几何尺寸对热工性能的影响;Marcin等^[7]基于欧洲铅冷反应堆开发了环形燃料元件热工水力计算程序,研究了环形燃料元件排布方式和几何尺寸对铅冷快堆热工性能的影响。通过调研发现,目前对于环形燃料元件热工性能的研究大多以压水堆为主,且主要分析了单一因素对环形燃料元件热工性能的影响规律。为实现环形燃料元件在铅冷快堆中的应用,急需综合分析影

响铅冷快堆环形燃料元件热工性能的各类因素。

本文基于铅冷快堆典型环形燃料元件四分之一热工分析模型,首先开展环形燃料元件的热阻分析,研究影响燃料元件热工性能的关键因素;然后建立评判环形燃料元件的热工性能的4大标准,基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析各因素对铅冷快堆环形燃料元件热工性能的影响特性。

1 关键影响因素的选取分析

1.1 模型建立

Marcin等^[7]对欧洲铅冷反应堆(European Lead-cooled System, ELSY)使用环形燃料元件的可行性进行了研究,图1为典型铅冷快堆环形燃料元件的四边形和六边形组件,其中 p 表示栅距。

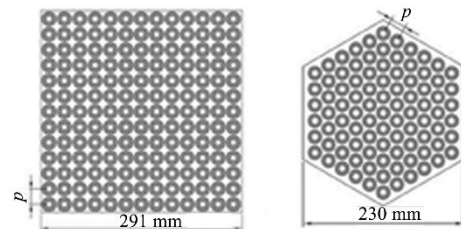


图1 典型铅冷快堆环形燃料元件的四边形和六边形组件
Fig.1 Square and hexagonal assemblies for typical LFR using annular fuel

由于在相同堆芯功率密度下,使用四边形组件具有更低的堆芯最高温度^[7],本文采用四边形组件并选用四分之一栅元构建热工水力分析模型(图2)。表1为环形燃料元件设计参数及边界条件。

表1 环形燃料设计参数和边界条件
Table 1 Design parameters of annular fuel and boundary conditions

设计参数 Design parameter	数值 Values	边界条件 Boundary conditions	参数 Parameter
栅距 Grid pitch / mm	13.9	燃料材料 Fuel materials	MOX
内包壳内径 Inner diameter of inner cladding / mm	3.643	包壳材料 Cladding materials	T91
内包壳外径 Outer diameter of inner cladding / mm	4.243	冷却剂类型 Type of coolant	Lead
燃料芯块内径 Inner diameter of fuel pellet / mm	4.393	冷却剂进口温度 Coolant inlet temperature / K	673
燃料芯块外径 Outer diameter of fuel pellet / mm	6.427	冷却剂出口温度 Coolant outlet temperature / K	753
外包壳内径 Inner diameter of outer cladding / mm	6.577	冷却剂进口压强 Coolant inlet pressure / MPa	0.6
外包壳外径 Outer diameter of outer cladding / mm	7.177	质量流量 Mass flowrate / kg·s ⁻¹	355

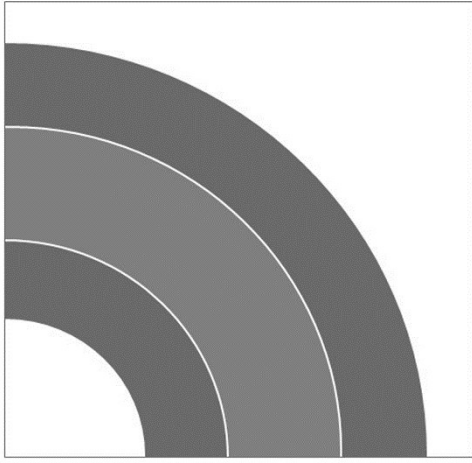


图2 热工水力分析模型
Fig.2 Thermal-hydraulic analysis model

1.2 热阻分析

环形燃料元件总热阻 R_T 为：

$$R_T = \frac{\Delta T}{q} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (1)$$

式中： ΔT 表示研究对象两侧的温差，K； q 表示热流密度， $W \cdot m^{-2}$ ； R_1 和 R_6 分别为内、外流道的对流换热热阻， $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ； R_2 和 R_5 分别为内、外包壳的热传导热阻， $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ； R_3 和 R_4 为内、外气隙导热热阻， $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ 。

其中，内外流道的对流换热热阻 R_1 和 R_6 可表示为：

$$\begin{cases} R_1 = 1/h_{1,cs} \\ R_6 = 1/h_{6,cs} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $h_{1,cs}$ 为内流道冷却剂的对流换热系数， $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ ； $h_{6,cs}$ 为外流道冷却剂的对流换热系数， $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ 。

铅冷快堆冷却剂不存在沸腾现象，针对雷诺数大于 10^4 的单相流动，换热系数 $h_{n,cs}$ 由Dittus-Boelter公式确定^[8]：

$$h_{n,cs} = (0.023 \lambda_{cs} / D_c) Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3)$$

式中： λ_{cs} 为冷却剂的导热系数， $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ； D_c 为流道的当量直径，m； Re 和 Pr 分别为雷诺数和普朗特数， Re 随外流道与内外流道流量分配比而变化。

内外包壳的热传导热阻 R_2 和 R_5 可表示为：

$$\begin{cases} R_2 = (\frac{q_1(z)}{2\pi k_c} \ln \frac{r_{ic,o}}{r_{ic,i}}) / q \\ R_5 = (\frac{q_1(z)}{2\pi k_c} \ln \frac{r_{oc,o}}{r_{oc,i}}) / q \end{cases} \quad (4)$$

式中： k_c 为包壳的导热率， $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ； $q_1(z)$ 为 z 处的线功率密度， $W \cdot m^{-1}$ ； $r_{ic,o}$ 为内包壳外径，m； $r_{ic,i}$ 为内包

壳内径，m； $r_{oc,o}$ 为外包壳外径，m； $r_{oc,i}$ 为外包壳内径，m。

间隙导热包括气隙导热和接触导热两种方式。本研究为堆芯寿期初，故选用气隙导热模型。将气隙看作薄同心圆环，忽略对流和辐射传热作用，可得气隙导热热阻 R_3 和 R_4 为：

$$\begin{cases} R_3 = (\frac{q_1(z)}{2\pi \kappa} \ln \frac{r_{ic,i}}{r_{fi}}) / q \\ R_4 = (\frac{q_1(z)}{2\pi \kappa} \ln \frac{r_{oc,i}}{r_{fo}}) / q \end{cases} \quad (5)$$

式中： κ 为间隙所充惰性气体的热导率， $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ； r_{fi} 为燃料芯块内径，m； r_{fo} 为燃料芯块外径，m。

根据式(1)可得各热阻所占份额(图3)。图4为流量分配比取0.58时温度的径向分布。

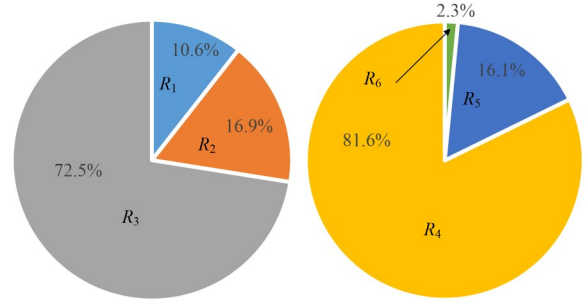


图3 各部分热阻在对应传热路径上所占份额
Fig.3 Percentage of thermal resistance of each part in corresponding heat transfer path

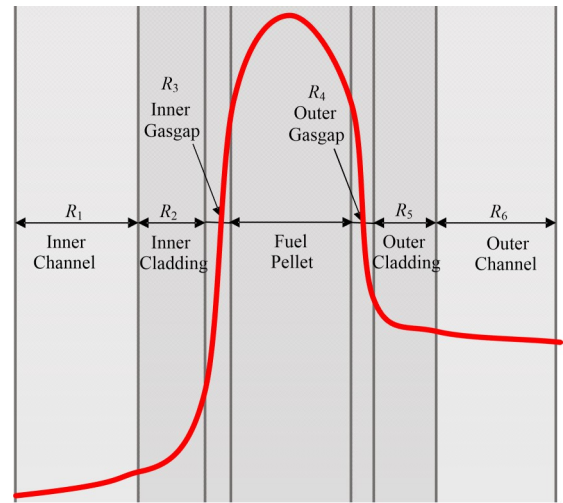


图4 热阻和温度的径向分布
Fig.4 Radial distribution of temperature and thermal resistance

气隙导热热阻占总热阻的77.1%，包壳热传导热阻占总热阻的16.5%，而内外流道热阻仅占总热阻的6.4%。由式(2)、(4)、(5)可知，气隙宽度、包壳厚度和内外流道的流量分配比分别对气隙导热热

阻、包壳热传导热阻和内外流道对流换热热阻起关键作用。

根据上述热阻分析可得,影响铅冷快堆环形燃料元件热工性能的关键因素按影响程度从大到小依次为:气隙宽度、包壳厚度和内外流道的流量分配比。

2 网格敏感性分析

2.1 湍流模型及网格划分

目前针对湍流的模拟分为直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS)、大涡流模拟和Reynolds时均方程模拟^[9]。其中Reynolds时均方程可分为标准 $k-\varepsilon$ 模型、压力修正 $k-\varepsilon$ 模型和剪应力传输(Shear Stress Transfer, SST) $k-\varepsilon$ 模型。本模型中内外流道雷诺数随流量分配比而变化,且均为高雷诺数流动。魏君翰等^[10]研究发现,SST $k-\varepsilon$ 模型能较为准确地模拟环形燃料元件内外通道冷却剂的高雷诺数流动换热现象。故本文选用该湍流模型开展模拟。

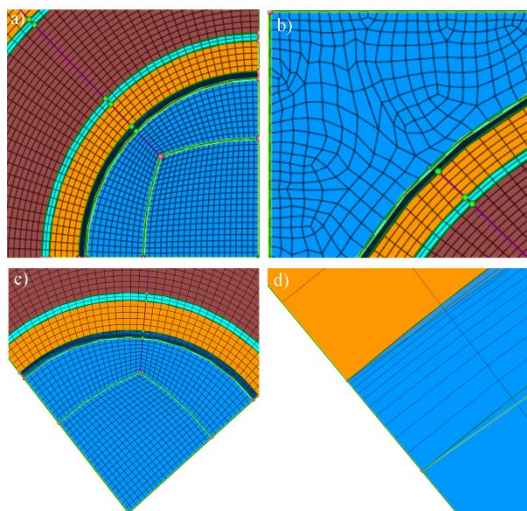


图5 网格划分 (a) 四边形网格, (b) 四边形为主导网格, (c) “O切”画法, (d) 近壁面网格加密
Fig.5 Grid mesh (a) Square mesh, (b) Mainly square mesh, (c) O-shaped mesh, (d) Wall mesh encryption

网格划分如图5所示。外包壳以内区域的形状规则,使用space claim的四边形网格进行划分(图5(a))。对于外流道的划分选用四边形为主导划分(图5(b))。由于内流道成圆柱状,为了实现圆柱边界加密处理,使用“O切”画法(图5(c))。近壁面处的流速变化梯度大,为了提高计算的精准性的同时不增加太多网格,利用美国航空航天局提供的Y+计算器结合铅铋物性算得第一层网格高度为0.13 mm,对第一层网格加密处理,根据选用的SST

湍流模型,选择Y+为20满足模型的计算要求(图5)。

2.2 网格敏感性检验

按照上述网格划分方式,分别建立网格数量为10万、30万、50万、70万、100万和200万6个网格模型。设置流量分配比为0.58,其他边界条件参考表1。图6为环形燃料元件芯块最高温度和冷却剂出口温差随网格数量的变化图。

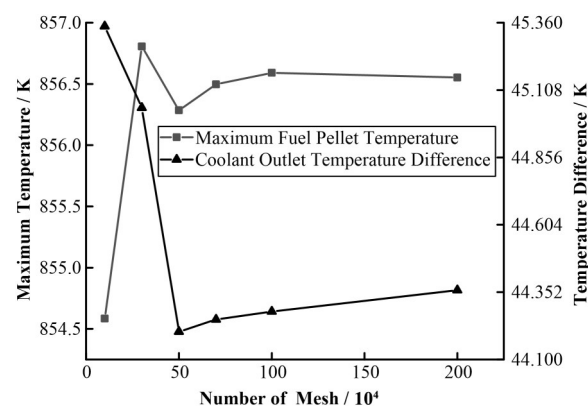


图6 燃料元件最高温度和冷却剂出口温差随网格数量的变化

Fig.6 Variation of maximum fuel pellet temperature and coolant outlet temperature difference with the number of meshes

由图6可知,当网格数量达到100万后,随着网格数量的继续增加,芯块最高温度和内外冷却剂温差不再显著上升。综合考虑计算成本和时间成本,选用网格数量为100万的网格进行后续CFD分析。

3 影响评估

3.1 评判标准的构建

为了分析关键因素对铅冷快堆环形燃料元件热工性能的影响特性,根据胡立强等^[3]针对压水堆环形燃料元件热工性能的研究,本文建立4个评判标准:

1) 环形燃料元件芯块最高温度: 环形燃料元件芯块最高温度是限制反应堆功率密度的重要因素之一。最高温度越低,反应堆安全性越高。

2) 内外流道冷却剂出口温差: 内外冷却剂出口温差反映内外冷却剂带走热量的份额。冷却剂温差越小,内外流道冷却剂带走的热量份额越相近,冷却剂的利用率越高。

3) 绝热面位置: 绝热面位置直接反映了环形燃料元件的温度场分布。绝热面位置偏离燃料芯块几何中心越小,说明内外侧传热份额越均匀,对环形燃料元件的机械损伤越小。

4) 内外包壳温差: 内外包壳温差是环形燃料元

件性能的重要指标之一。内外包壳温差越小,则包壳的热膨胀形变量相差越小,越有利于燃料元件整体的机械性能。

3.2 流量分配比对环形燃料元件热工性能的影响

为了满足先导组件的阻力特性要求,目前铅冷快堆环形燃料元件的流量分配比有0.58、0.72、0.86、1.00和1.38。首先针对这5种不同的流量分配比进行模拟,得到环形燃料元件芯块最高温度随流量分配比的变化如图7所示。外流道的传热面积比内流道大,在相同流量的条件下,外流道可以带出更多的热量。随着流量分配比的增大,外流道带走的热量逐渐增大,冷却剂的利用率大幅度提升。燃料芯块的最高温度也随之下降,在流量分配比为1.38时,燃料芯块温度达到最低。由图7可知,增大流量分配可以降低铅冷快堆环形燃料元件芯块的最高温度。

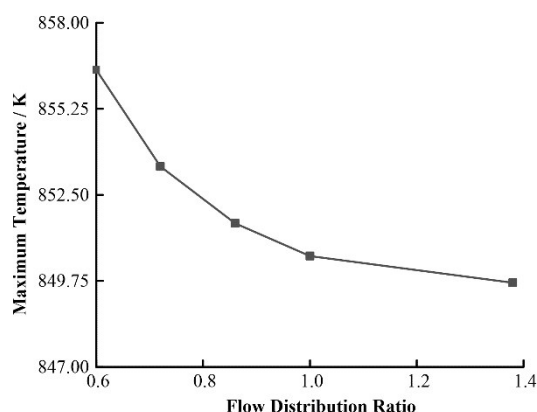


图7 流量分配比对环形燃料元件芯块最高温度的影响
Fig.7 Effect of flow distribution ratio on maximum temperature of fuel pellet

流量分配比对冷却剂出口温度的影响如图8所示。随着流量分配比的增大,出口温差明显降低,在流量分配比为1.38时,温差达到最小值。内外冷却剂出口温差总体变化约为90%。由图8可知,流量分配比对内外流道冷却剂温差有很大影响,增大流量分配比可以显著降低内外流道冷却剂温差。

流量分配比对绝热面位置的影响如图9所示。当流量分配比增大时,绝热面位置向内移动,逐渐逼近燃料芯块的几何中心,当分流比为1.38时,绝热面位置几乎与几何中心重合。流量分配比变化150%,最高温位置变化仅不到2%。由图9,流量分配比对铅冷快堆环形燃料元件绝热面位置的影响不大。

综上所述,增大流量分配比可以显著降低内外流道冷却剂的温差,并在一定程度上降低环形燃料元件芯块最高温度;而流量分配比对绝热面位置基本不造成影响。

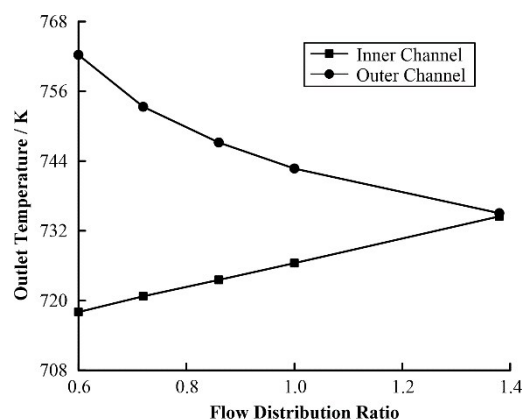


图8 流量分配比对冷却剂出口温度的影响
Fig.8 Effect of flow distribution ratio on coolant outlet temperature

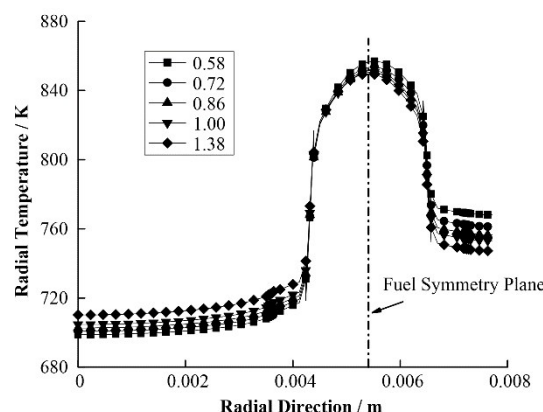


图9 径向温度分布
Fig.9 Radial temperature distribution

3.3 气隙宽度对环形燃料元件热工性能的影响

根据上述分析,在最佳流量分配比1.38的情况下,外冷却剂温度仍高于内冷却剂温度。为了进一步降低温差,提升环形燃料元件的热工性能,以初始气隙厚度($d=0.15\text{ mm}$)为基础,将内气隙宽度增加,外气隙宽度减小,得到气隙改变 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时的温度变化曲线如图10所示。由图10可以看出,气隙的微小变化会引起冷却剂温度较大的变化。这主要是由于环形燃料在燃烧过程中会出现形变,且向外的形变量大于向内的形变量,通过增加外气隙宽度并减小内气隙宽度的方法可以显著抵消其形变量,从而使内外热流密度分配更加平均。但当达到最佳热流分配后,继续改变气隙宽度会导致外气隙过大而无法将热量导出,从而使传热性能恶化。由此可得,在内外气隙宽度差不超过 $6\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内,适当增加外气隙宽度,减小内气隙宽度,可以降低内外流道冷却剂的出口温差。

气隙宽度对燃料最高温度的影响如图11所示。由图11可以看出,气隙宽度的变化对燃料最高温度的影响不大,且没有明显的变化趋势。这可能是由

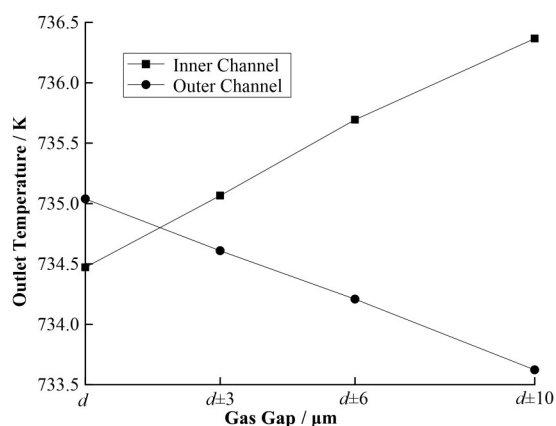


图10 气隙宽度对冷却剂出口温度的影响
Fig.10 Effect of gas gap width on coolant outlet temperature

于包壳材料的导热性能较好,铅的热导率较高,削弱了气隙宽度的微小变化造成的影响。由此可得,改变气隙宽度对燃料最高温度几乎不造成影响。

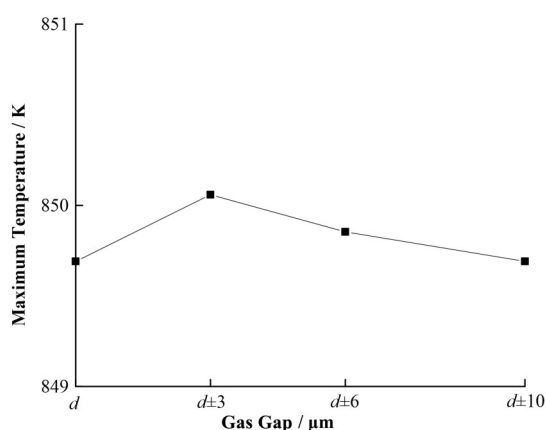


图11 气隙宽度对环形燃料元件芯块最高温度影响
Fig.11 Effect of gas gap width on maximum temperature of fuel pellet

气隙宽度对内外包壳平均温差的影响如图12所示。由图12可以看出,减小内气隙宽度将使内包壳温度增加;增加外气隙宽度将使外包壳温度下降。但包壳温度的变化幅度不大,总体而言会使内外包壳平均温差呈下降趋势。这与气隙宽度对内外冷却剂出口温度的影响大致相同。

由上述分析可知,在内外气隙宽度差不超过 $6\mu\text{m}$ 的范围内,适当增加外气隙宽度,减小内气隙宽度,可以降低内外流道冷却剂的出口温差和内外包壳的平均温差;而气隙宽度对环形燃料元件芯块最高温度不造成显著影响。

3.4 包壳厚度对环形燃料元件热工性能的影响

以初始包壳厚度($\lambda=0.6\text{ mm}$)为基础,适当增加内包壳厚度,减小外包壳厚度。分别在包壳厚度改

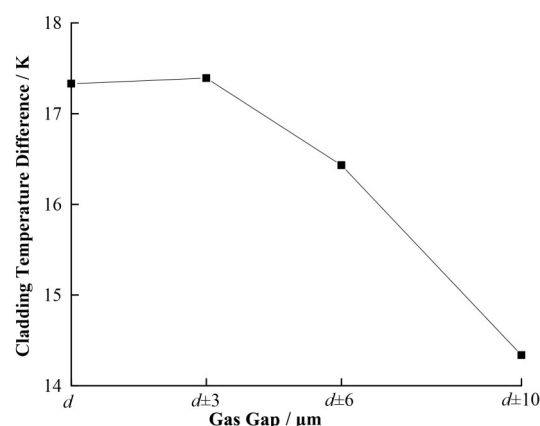


图12 气隙宽度对包壳平均温差的影响
Fig.12 Effect of gas gap width on average temperature difference of cladding

变 $3\mu\text{m}$ 、 $6\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 的情况下,研究包壳厚度对环形燃料元件热工性能的影响。包壳厚度对内外流道冷却剂出口温差的影响如图13所示。可以发现,包壳厚度对内外流道冷却剂出口温差的影响不大。这主要是因为铅的热导率较高,且包壳材料的导热能力较好,削弱了包壳厚度变化带来的影响。由此可见,改变环形燃料元件包壳厚度,对内外冷却剂出口温差几乎不造成影响。

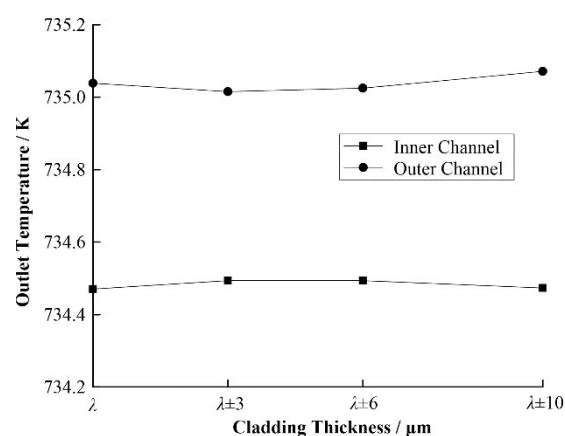


图13 包壳厚度对冷却剂出口温度的影响
Fig.13 Effect of cladding thickness on outlet temperature

包壳厚度对燃料最高温度的影响如图14所示。由图14可知,随着外包壳厚度增加,内包壳厚度减小,燃料的最高温度开始降低。这是由于调整后内包壳的热阻降低,可以带出更多的热量,而外包壳厚度虽然增加,但仍有足够的能力导出热量。但是随后进一步增加外包壳厚度将导致热阻过高,热量无法导出,从而使得燃料最高温度上升。由图14可见,该4种实验工况所得的环形燃料元件芯块最高温度均位于 850 K 左右,说明包壳厚度对环形燃料元件的最高温度不造成明显影响。

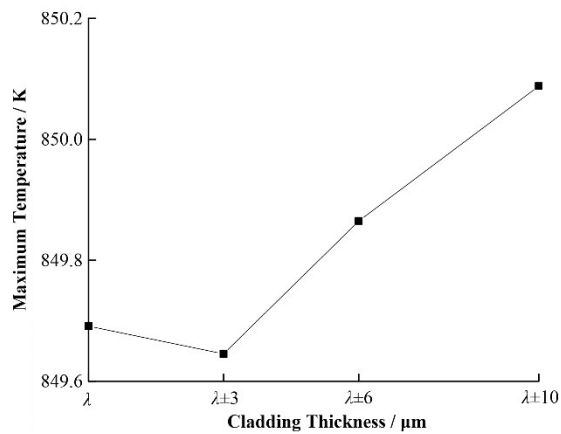


图14 包壳厚度对环形燃料元件芯块最高温度影响

Fig.14 Effect of cladding thickness on maximum temperature of fuel pellet

四边组件包壳厚度对包壳平均温度的影响如图15所示。由图15可知,随着内包壳厚度减小,外包壳厚度增加,内外包壳温差变大,这会导致内外包壳产生不同的形变量,对包壳的机械性能产生不利影响。

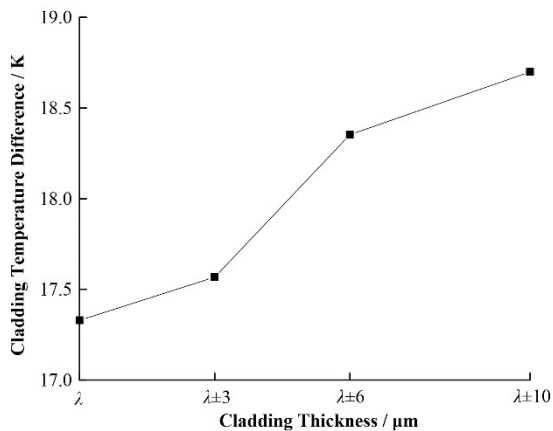


图15 包壳厚度对内外包壳温差的影响

Fig.15 Effect of cladding thickness on cladding temperature difference

由上述分析可知,当包壳厚度在 (0.6 ± 0.01) mm内变化时,改变包壳厚度对铅冷快堆环形燃料元件热工性能基本不造成影响。

4 结语

本文建立了铅冷快堆典型环形燃料元件四分之一热工分析模型,开展了环形燃料元件的热阻分析,研究了关键因素对燃料元件热工性能的影响规律,得到以下结论:

1)影响铅冷快堆环形燃料元件热工性能的三个关键因素按影响程度大小依次为:气隙宽度、包壳厚度和流量分配比;

2)增大流量分配比可以显著降低内外流道冷却剂的温差,并在一定程度上降低环形燃料元件芯块最高温度;而流量分配比对绝热面位置基本不造成影响;

3)在内外气隙宽度为 (0.15 ± 0.006) mm的范围内,适当增加外气隙宽度,减小内气隙宽度,可以降低内外流道冷却剂的出口温差和内外包壳的平均温差;而气隙宽度对环形燃料元件芯块最高温度不造成显著影响;

4)在 (0.6 ± 0.01) mm的范围内改变包壳厚度对铅冷快堆环形燃料元件热工性能基本不造成影响。

参考文献

- 赵鹏程. 小型自然循环铅冷快堆 SNCLFR-100 一回路主冷却系统热工安全分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
ZHAO Pengcheng. Thermal safety analysis of primary cooling system of SNCLFR-100 natural cycle lead cooled fast reactor[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- 赵传奇, 曹良志, 吴宏春, 等. 采用环形燃料的超临界水冷堆核热耦合分析[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(S2): 568 - 572.
ZHAO Chuanqi, CAO Liangzhi, WU Hongchun, *et al.* Coupled analysis of SCWR with annular fuel assembly [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47 (S2): 568 - 572.
- 胡立强, 季松涛, 杨立新, 等. 流量分配比对环形燃料芯块传热特性影响数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(4): 647 - 653.
HU Liqiang, JI Songtao, YANG Lixin, *et al.* CFD evaluation of heat transfer characteristic with change of flow distribution ratio for annular fuel pellet[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(4): 647 - 653.
- 何晓军, 季松涛, 张应超. 环形燃料元件内、外热流分配不均问题研究[C]. 中国核学会2013年学术年会论文集, 哈尔滨, 2013: 235 - 239.
HE Xiaojun, JI Songtao, ZHANG Yingchao. Research on uneven distribution of internal and external heat flow in annular fuel element[C]. Proceedings of 2013 Annual Conference of Chinese Nuclear Society, Harbin, 2013: 235-239.
- Choi J Y, Hong S G, Kwon H. Conceptual design of a long cycle small modular reactor core with annular UO_2 and FCM (TRU) fuels[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(8): 11957 - 11975. DOI: 10.1002/

- er.5957.
- 6 邓阳斌, 巫英伟, 张伟旭, 等. 双面冷却环形燃料元件的几何尺寸优化[J]. 原子能科学技术, 2015, **49**(7): 1208 - 1214. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.07.1208.
DENG Yangbin, WU Yingwei, ZHANG Weixu, *et al.* Geometric size optimization of dual-cooled annular fuel element[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, **49**(7): 1208 - 1214. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.07.1208.
 - 7 Rowinski M K, White T J, Zhao J Y. Innovative model of annular fuel design for lead-cooled fast reactors[J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, **83**: 270 - 282. DOI: 10.1016/j.pnucene.2015.04.002.
 - 8 Cau F, Forte R, Portone A. Modeling of ITER TF cooling system through 2D thermal analyses and enthalpy balance [J]. Fusion Engineering and Design, 2017, **124**: 18 - 23. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.06.036.
 - 9 谢春晖, 王东方, 邓小刚. SST湍流模型在高精度算法中的应用[C]. 第十届全国流体力学学术会议论文集, 杭州, 2018: 52.
XIE Chunhui, WANG Dongfang, DENG Xiaogang. Application of SST turbulence model in high precision algorithm[C]. Proceedings of the 10th National Fluid Mechanics Conference, Hangzhou, 2018: 52.
 - 10 魏君翰, 赵民富. 环形燃料棒束冷却剂流动的数值模拟研究[C]. 第十六届全国反应堆热工流体学术会议暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室2019年学术年会论文集, 2019: 11.
WEI Junhan, ZHAO Minfu. Numerical simulation study on the flow of annular fuel rod bundle coolant[C]. 16th National Conference on Thermal Fluids for Nuclear Reactors and Papers of Key Laboratory of Thermal Hydraulic Technology for Nuclear Reactors in 2019, 2019: 11.