

PB-FHR 的控制棒布局设计及物理效应

于世和 严睿 冀锐敏 周波 刘亚芬 邹杨

(中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

摘要 反应性控制系统的设计是反应堆物理设计的主要内容之一。氟盐冷却高温球床堆(Pebble Bed-Fluoride salt-cooled High temperature Reactor, PB-FHR)用 B_4C 吸收体的控制棒作为反应性控制的主要手段。所有控制棒分布于石墨反射层的孔道中,其空间布局、几何结构、中子吸收体的特性参数等是影响控制棒反应性控制的关键因素。本文基于 SCALE6 程序,以 10 MW 固态燃料钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor-Solid Fuel, TMSR-SF1)(属于 PB-FHR)设计模型为参考,系统研究了石墨反射层中控制棒径向位置、有效行程、棒体结构、吸收体长度、吸收体密度等因素对控制棒价值的影响。结果表明,控制棒的径向位置对控制棒价值影响较大;控制棒吸收体长度需综合考虑上下限位及极限下插限位对价值变化的影响; ^{10}B 的原子密度变化对控制棒价值影响较小。本研究为 PB-FHR 的反应性控制系统的设计及控制棒的制造加工提供理论参考。

关键词 氟盐冷却高温球床堆, 反应性控制, 控制棒布局, 控制棒价值

中图分类号 TL3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.010605

Layout design and physical effect analysis of control rod in PB-FHR

YU Shihe YAN Rui JI Ruimin ZHOU Bo LIU Yafen ZOU Yang

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

Abstract [Background] Reactivity control design is a key part of reactor neutronics design. The control-rods made of B_4C -absorber for reactivity control in pebble bed-fluoride-salt-cooled high-temperature reactor (PB-FHR) are located in the hole of side graphite. The space layout, geometric structure, absorber properties are the key influencing factors to the reactivity control. [Purpose] This study aims at the influence of different factors of the control rod in graphite reflection layer on control rod worth, including radial position, effective stroke, absorber length, absorber density, etc. [Methods] The 10-MW thorium molten salt reactor-solid fuel (TMSR-SF1) model was taken as the reference reactor, and the calculation was completed based on SCALE6. All above mentioned factors such as radial position, effective stroke, absorber length and absorber density, were taken into account for parameters design. [Results] Computational results reveal that radial position of the control rod has obvious impact on control rod worth. The absorber length, the upper limit, lower limit and overflow lower limit of the control rod that lead to the change in worth, should be considered comprehensively. The influence of ^{10}B atomic density on control rod worth was negligible. [Conclusion] This study provides basic theoretical reference for the design of PB-FHR reactivity control.

Key words PB-FHR, Reactivity control, Control rod layout, Control rod worth

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02010000)、钍铀燃料循环特性和若干关键问题研究项目(No.QYZDY-SSW-JSC016)资助

第一作者: 于世和, 男, 1984 年出生, 2012 年于哈尔滨工程大学获硕士学位, 研究方向为反应堆物理

通信作者: 严睿, E-mail: yanrui@sinap.ac.cn

收稿日期: 2017-04-21, 修回日期: 2017-08-09

Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02010000), Thorium Uranium Fuel Cycle Characteristics and Key Problem Research Project (No.QYZDY-SSW-JSC016)

First author: YU Shihe, male, born in 1984, graduated from Harbin Engineering University with a master's degree in 2012, focusing on reactor physics research

Corresponding author: YAN Rui, E-mail: yanrui@sinap.ac.cn

Received date: 2017-04-21, accepted date: 2017-08-09

控制棒是中子的强吸收体, 它移动速度快、操作可靠、使用灵活、控制反应性的准确度高, 是反应堆反应性控制的重要方式之一^[1-2]。尤其是对于氟盐冷却高温堆^[3-4], 熔盐的核级纯化成本很高, 不能采用类似轻水堆中注入硼水的方式补偿反应性, 反应性控制宜采用控制棒方案最为可靠。

固态燃料钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor-Solid Fuel, TMSR-SF1)^[5]是中国科学院钍基核能战略先导专项中的一个在氟盐冷却高温球床实验堆。其采用粗棒, 单根控制棒价值较大; 控制棒布置与活性区外的侧石墨反射层中, 其空间布局和几何结构的选择较灵活。控制棒的空间布局、几何结构、吸收体的密度等直接影响控制棒的价值。因此, 在进行反应堆反应性控制设计时, 需考虑石墨反射层中控制棒的径向位置、轴向位置、控制棒吸收体的长度、吸收体的内外径尺寸、密度等参数。为此, 本文基于 TMSR-SF1 的模型, 采用 SCALE6^[6]程序, 在上述不同条件下对控制棒的价值进行了计算分析, 研究了控制棒价值的变化规律。

1 计算模型与方法

1.1 计算模型

TMSR-SF1 的热功率为 10 MW, 其堆芯主要由燃料球堆积的活性区、石墨碳砖构建的反射层和堆芯围筒组成, 活性区由直筒段圆柱体和上下圆圆台组成, 圆柱体直径为 135 cm, 高度为 180 cm, 其上下部圆台最小直径为 30 cm, 圆台高 30 cm; 反射层外围形状为圆柱体, 直径 285 cm, 高 306 cm, 反射层外的堆芯围筒为 2 cm, 如图 1 所示。活性区腔体内由燃料球和熔盐填满, 燃料球随机排布, 其填充因子为 0.6。靠近活性区的石墨侧反射层中布置 16 个孔道, 其中间隔布置的 12 根控制棒作为第一套停堆系统, 排空熔盐作为第二套停堆系统。12 根控制棒中, 8 根燃耗补偿棒, 4 根安全停堆棒。控制棒的结构参考 10 MW 高温气冷实验堆(10-MW High Temperature Gas-cooled Reactor Test Module, HTR-10)^[7]的参数。

本文选取控制棒径向距离 80 cm, 吸收体长度 240 cm, 吸收体壁厚 2.25 cm, 吸收体外径 10.5 cm, 吸收体密度 $1.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, ^{10}B 富集度 18%, 吸收体不分段, 为基准设计参数。当分析某一个参数的影响时, 其他参数取基准设计参数, 并定义吸收体底端与顶部圆台的上表面齐平为控制棒全提状态, 吸收体底端与底部圆台的下表面齐平为控制棒全插状

态。控制棒总价值指所有控制棒从全提棒状态到全插棒状态。

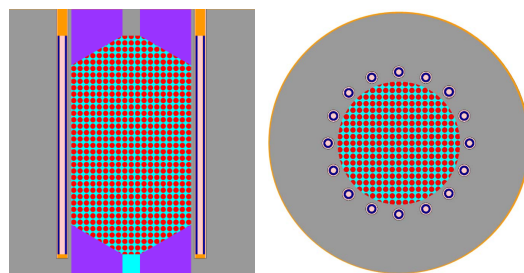


图 1 TMSR-SF1 结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of TMSR-SF1.

1.2 计算方法

由于反射层是中子吸收截面很小的石墨, 而控制棒主要由中子吸收截面很大的碳化硼构成, 使得这一区域的物质非均匀性非常强烈, 造成堆芯侧反射层径向上中子注量率畸变很大^[8]。因此本文采用 SCALE6 程序中的 CSAS6 控制模块进行计算。计算投入粒子数为 100 000, 有效迭代次数为 550 次。

本文选用 V7-238 截面数据库, 截面数据库来源于 ENDF/B-VI.8; 截面处理程序模块采用 CENTRM; 中子输运功能模块为 KENO-VI; 采用 ORIGEN-S 模块进行燃耗计算。

2 控制棒布局

2.1 径向位置

控制棒径向距离为控制棒的中心相对于活性区中心的距离。对于位于反射层中的控制棒来说, 距离堆芯活性区越近, 控制棒价值越高, 但同时需要考虑反射层石墨的加工难易和结构强度。

中子物理计算表明, 控制棒的径向位置对控制棒的价值影响较大。径向距离每增加 1 cm, 控制棒总价值即可减小 0.008。因此, 控制棒距离堆芯活性区越近, 价值越大。但在实际工程中, 控制棒越靠近活性区, 棒与棒的间距也越小, 会导致控制棒顶部驱动机构布置空间的不足, 同时也会造成活性区边缘距离控制棒孔道边缘的厚度变薄, 影响石墨的结构强度。在考虑这些工程实践方面的因素后, 控制棒径向距离选为 80 cm。

表 1 为不同径向位置下的控制棒总价值分析。

表 1 不同径向位置的控制棒价值
Table 1 Varying of control rod worth of different radial distances.

径向距离 Radial position / cm	控制价值 Control rod worth / 10^{-5}	差值 Difference / 10^{-5}
78.0	16 206	1 856
79.0	15 254	904
79.5	14 833	483
80.0	14 350	0
80.5	13 913	-437
81.0	13 515	-835
82.0	12 733	-1 617

2.2 有效行程

控制棒在反射层中的有效行程由控制棒上下限位来确定。在发生正反应引入事故, 反应堆需要紧急停堆时, 较短的控制棒行程, 减小了落棒时间, 从而有利于反应堆快速停堆。因此, 在保证控制棒能有效控制堆芯反应性的情况下, 应尽可能的减少控制棒在堆芯中的有效行程。

2.2.1 控制棒上限位

为便于控制棒的插入, 控制棒上限位应当位于石墨反射层中, 其具体位置的确定, 主要考虑两点: 1) 上限位尽可能的下探, 这样有利于缩短控制棒行程; 2) 但上限位较低, 反应堆运行前, 留在反射层中的控制棒长度就已经过长, 会引起不必要的剩余反应性损失。因此需要综合考虑这两点, 得到合理的控制棒上限位。以控制棒插入深度为 5 cm 为起点, 计算分析不同插入深度对堆芯反应性的影响, 结果见表 2。

表 2 不同控制棒上限位置对 k_{eff} 的影响
Table 2 k_{eff} under different control rod upper positions.

插入深度 Insert depth / cm	k_{eff}	差值 Difference / 10^{-5}
5	1.110 96	0
15	1.110 85	11
25	1.109 95	101
35	1.109 08	188
45	1.106 39	457
55	1.102 96	800
65	1.099 78	1 118

从表 2 可知, 当控制棒插入上反射层深度不大于 35 cm 时, 控制棒对堆芯剩余反应性的影响不显著, 主要原因为控制棒距离活性区裂变中子相对较远。控制棒插入深度 35 cm 时, 控制棒吸收体底端

刚好在活性区顶部圆台上表面附近。控制棒继续下插, 大于 35 cm 后, 中子吸收增强, 堆芯的剩余反应性减少明显, 中子经济性降低。因此, 在反应性控制设计中, 可以考虑采用控制棒吸收体底端与顶部圆台的上表面齐平, 下插 35 cm 处作为控制棒的上限位。

2.2.2 控制棒下限位

控制棒的上下限位之差为控制的有效行程, 在确定了控制棒上限位之后, 为了减少落棒时间, 在能有效控制堆芯反应性的前提下, 可以适当的减小控制棒全插时的插入深度, 来减少控制棒的有效行程。控制棒下限位与吸收体的长度有关, 这里假设控制棒吸收体足够长, 可以使得控制棒可以到达不同的插入深度。计算分析主要考虑与堆芯活性区下圆台对应的控制棒段, 在不同插入深度下对堆芯反应性的影响。计算的起点为下圆台的上表面处 (0 cm)。

由表 3 可以看出, 当控制棒吸收体下端与下圆台上端平齐时, 已经吸收了堆芯绝大部分剩余反应性, 达到足够的停堆深度。30 cm 高的下圆台, 所对应的反射层中的控制棒只有 0.001 的价值。因此在确定控制棒的上限位之后, 有必要在保证足够停堆深度的情况下, 尽可能的提高下限位, 以减少控制棒的有效行程, 从而减少落棒时间已经控制棒的直线加工难度和制造成本。表 3 结果表明, 可以采用控制棒吸收体底端与下圆台上表面平齐, 作为控制棒下限位。但考虑到堆芯没有满装载, 排空熔盐导致燃料球的下降等设计欲量时, 可将控制棒下限位定为与底部圆台下表面平齐。由此, 计算控制棒上下限位之差, 得到控制棒的有效行程为 240 cm。

表 3 不同控制棒下限位位置对 k_{eff} 的影响
Table 3 k_{eff} under different control rod lower positions.

插入深度 Insert depth / cm	k_{eff}	差值 Difference / 10^{-5}
0	0.958 12	0
10	0.956 74	138
30	0.956 59	153
40	0.955 48	264

2.2.3 控制棒下插极限位置

控制棒在紧急下落或者事故下落时, 控制棒并非停留在控制棒正常下限位位置。在紧急下落时, 受金属弹簧缓冲器的影响, 下插到极限位置后可能会归位到控制棒正常下限位位置。而在事故下落时, 由于对事故缓冲器破坏性毁坏, 下落到极限位置就不会反弹。因此, 需要分析控制棒下落超出下限位,

到达极限位置时, 控制棒总价值的变化, 研究该状况是否对停堆深度有显著影响。计算分析输入为下限位之下 10–20 cm 的极限位置。在确定控制棒上下限位之后, 对控制棒总价值的影响因素还有: 控

制棒吸收体的长度和极限下插的距离。表 4 为不同长度吸收体的控制棒下插至正常下限位和不同极限位置时的控制棒价值变化。

表 4 不同长度吸收体的控制棒下插至极限位置控制棒价值的变化
Table 4 Control rod worth under different control rod insertion limit positions.

吸收体长度 Absorber length / cm	正常位置控制棒价值 Control rod worth of normal position / 10^{-5}	极限下插 10 cm 价值变化值 Worth change of limit interpolation 10 cm / 10^{-5}	极限下插 20 cm 价值变化值 Worth change of limit interpolation 20 cm / 10^{-5}
180	12 394	-686	-1 518
200	13 630	-537	-1 164
220	14 167	-190	-573
230	14 330	-144	-300
240	14 350	-37	-188
250	14 400	-34	-108

注: 正常位置定为控制棒下限位, 极限下插以下限位为零点往下继续插入进行计算

Note: The normal position is the control rod lower position, take the control rod lower position as zero.

可以看出: 1) 控制棒下插至正常位置(下限位)时, 吸收体长度越长, 总价值逐步变大, 但当吸收体增至 220 cm 以后, 价值变化就不再显著, 原因为控制棒在活性区区段对中子的有效吸收长度已经足够; 2) 控制棒越过下限位, 其极限下插越深, 控制棒总价值减小量越大。但吸收体越长, 极限下插带来的价值变化量越小。原因为当控制棒吸收体长度较短时, 极限下插导致其位于堆芯活性区区段的吸收体有效长度减小, 中子吸收能力降低, 而处于下限位和极限位置的这段吸收体已经移出活性区, 这一段吸收体的中子吸收能力很弱, 从而导致控制棒的总体价值降低。如吸收体长度为 200 cm 时, 极限下插 20 cm 后的控制棒总价值, 相当于吸收体长度为 180 cm 时, 控制棒在正常下限位时的总价值; 3) 但当控制棒吸收体长度增长, 如大于 240 cm, 极限下插小于 20 cm 时, 控制棒的价值变化就较小, 并逐步趋于稳定。原因为较长的吸收体, 导致无论控制棒是否插入到极限位置, 其位于活性区区段的有效吸收长度变化较小, 因而总价值较为稳定。

3 控制棒吸收体

3.1 吸收体长度

控制棒吸收体的长度需综合考虑多个因素, 主要包括: 1) 足够的有效吸收长度。如前所述, 控制棒在一定范围内, 吸收体越长, 越有利于增加控制棒的价值, 但当控制棒大于 220 cm 之后, 价值增加不再明显; 2) 同时考虑到经济性和机械加工方

面, 在控制棒能有效控制堆芯反应性的前提下, 一般尽可能减少吸收体的长度; 3) 控制棒的极限下插对价值的影响。如前所述, 在考虑控制棒的极限下插情况下, 相对于正常下限位, 价值有一定程度的下降。为补偿这部分反应性, 控制棒的吸收体长度应当适当延长至 240 cm。综上所述, 控制棒吸收体长度可以取为 240 cm, 即涵盖整个活性区的高度。

3.2 吸收体有无分段的影响

在控制棒的设计中, 其结构可为刚性整体式或柔性分段式, 如图 2 所示。由于柔性棒吸收体连接处存在 8 cm 长无吸收体段(连接处为镍基合金材料)。因此, 需要分析其对控制棒价值的影响。根据棒体的工程设计与加工建议, 分段式控制棒棒体均匀分成 4 段。

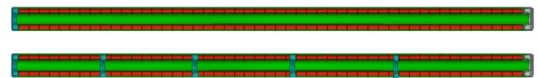


图 2 TMSR-SF1 控制棒分段与不分段示意图
Fig.2 Schematic diagram of TMSR-SF1 control rod segment and non-segmentation.

经计算, 无分段的控制棒总价值为 $14\,350 \times 10^{-5}$, 有分段的控制棒总价值为 $14\,089 \times 10^{-5}$ 。控制棒吸收体采用分段式设计, 减小了吸收体的长度, 造成控制棒总价值的有所下降, 相对于无分段的设计, 分段设计控制棒价值下降约 1.8%。

3.3 吸收体的厚度

吸收体的厚度考虑主要基于内外径的相对调整，获得最大的价值。TMSR-SF1 参考 HTR-10 控

制棒吸收体内外径为 6 cm/10.5 cm 的粗棒设计。

保持吸收体外径 10.5 cm 不变，调节吸收体内径的大小，计算在不同吸收体内径下控制棒价值，计算结果见表 5。

表 5 吸收体内径变化对控制棒价值的影响
Table 5 Control rod worth of under different control rod absorber internal diameter.

吸收体内径 Absorption diameter / cm	吸收体厚度 Absorber thickness / cm	控制棒价值 Control rod worth / 10^{-5}	差值 Difference / 10^{-5}
6.0	2.25	14 350	0
7.0	1.75	14 308	-42
7.5	1.50	14 285	-65
8.0	1.25	14 246	-104
8.5	1.00	14 160	-190
9.0	0.75	14 104	-246
9.5	0.50	13 958	-392
10.0	0.25	13 708	-642

从表 5 可以看出，固定控制棒外径，随着吸收体内径增大，控制棒价值最初无明显变化，当吸收体内径增大至 8.0 cm 以后，控制棒价值才开始出现明显变化。因为控制棒吸收体材料 B_4C 的中子吸收截面大，中子扩散长度小，故控制棒价值实际由吸收体表层原子密度决定，在确保足够价值的情况下可以适当减小控制棒吸收体的厚度，从而降低材料成本。因此，如果工程加工允许并考虑到可接受的力学性能，控制棒内径可由 6 cm 提高至 8 cm。

对于固定吸收体内径，增加吸收体外径，来改变控制棒吸收体厚度的方式，则相当于改变了控制棒布局径向位置，在此不做具体分析。

3.4 吸收体的燃耗效应

由于控制棒的吸收体材料是碳化硼 B_4C ， ^{10}B 具有很大的热中子吸收截面，并且吸收中子后产生的子核不具吸收中子的能力。因此，控制棒吸收中子的能力会受自身燃耗的影响。计算表明 TMSR-SF1 等效满功率运行 1 500 d 后，8 根燃耗补偿棒价值约下降 1%。

3.5 吸收体密度和 ^{10}B 富集度

实际上吸收体的燃耗，导致了 ^{10}B 原子密度的减少，减少了 ^{10}B 与中子核反应的宏观截面。因此，人为改变 ^{10}B 的原子密度也可能影响控制棒的价值。表 6 研究分析了不同 ^{10}B 原子密度的情况下的控制棒价值的变化。调节 ^{10}B 原子密度的方法有：调节 B_4C 的密度或改变 ^{10}B 的富集度。

表 6 B_4C 密度对控制棒价值的影响
Table 6 Control rod worth under different B_4C density.

B_4C 密度 B_4C density / $g \cdot cm^{-3}$	控制棒价值 Control rod worth / 10^{-5}	差值 Difference / 10^{-5}
1.7	14 350	0
1.8	14 408	58
2.0	14 450	100
2.2	14 475	125
2.4	14 487	137
2.6	14 512	161

经计算分析， $1.7 g \cdot cm^{-3}$ 的 B_4C 密度已经较高， B_4C 密度变化 $0.1 g \cdot cm^{-3}$ ，控制棒价值约变化 60×10^{-5} ，吸收体密度越大，密度变化引起控制棒价值变化越小。这是由于在有控制棒的区域，中子通量已经较低，继续增加 B_4C 的密度，对控制棒价值的提升并不显著。在未考虑机械及力学性能等需求因素情况下，提高 B_4C 的密度可能需要更高成本。

表 7 为 B_4C 密度在 $1.7 g \cdot cm^{-3}$ 的情况下，不同 ^{10}B 富集度的控制棒价值计算。可以发现，在低富集度区域，如天然硼的 B_4C 富集度 18% 附近，改变 ^{10}B 富集度对控制棒价值影响较小， ^{10}B 富集度变化 1%，控制棒价值变化几十 10^{-5} 。原因同样为在有控制棒的区域， ^{10}B 的原子密度已经较大，中子通量已经很低，再小幅改变 ^{10}B 富集度，控制棒价值变化也会很小。

高富集度 ^{10}B 会增加一定的控制棒价值，但并不显著，是否采用高富集度 ^{10}B 的控制棒需要根据其成本决定。

表 7 ^{10}B 富集度对控制棒价值的影响
Table 7 Control rod worth under different ^{10}B enrichment.

^{10}B 富集度 ^{10}B enrichment / %	控制棒价值 Control rod worth / 10^{-5}	差值 Difference / 10^{-5}
15	14 330	-20
17	14 338	-12
18	14 350	0
20	14 427	77
40	14 656	306
60	14 816	465

4 结语

本文基于 TMSR-SF1 的模型, 采用 SCALE6 程序, 在不同空间布局、几何结构、吸收体密度、富集度等条件下, 对位于石墨反射层中的控制棒价值进行计算, 分析控制棒价值的变化规律, 得到以下结论:

1) 控制棒的径向位置对控制棒价值影响较大, 径向距离增加 1 cm, 控制棒价值下降超过 8×10^{-3} 。在考虑工程实践方面的因素后, 控制棒径向距离选为 80 cm。

2) 控制棒有效行程的选取由控制棒的上下限位差确定。上限位可以选取顶部圆台的上表面, 吸收体插入到此处不对堆芯剩余反应性不构成明显影响, 同时也有利于缩短行程。下限位可以选取底部圆台的上表面, 但考虑到排出熔盐导致的燃料球可能下降, 为此留下设计裕量, 可将控制棒下限位定义在底部圆台的下表面。由此, 控制棒的有效行程为 240 cm。

3) 控制棒吸收体长度与上下限位及极限下插限位有关。在正常的上下限位间运动, 控制棒使用 220 cm 的吸收体长度可以满足反应性控制的需求。但考虑极限下插所引入的反应性, 将吸收体长度扩展至 240 cm, 即涵盖整个活性区的高度, 反应性控制更为稳定。

4) 在外径不变的情况下, 控制棒价值由吸收体表层决定, 吸收体的厚度超过 1.25 cm 时, 厚度变化对控制棒价值影响较小。

5) ^{10}B 原子密度变化对控制棒价值影响较小, B_4C 密度变化 $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 或者 ^{10}B 富集度变化 1%, 控制棒价值变化几十 10^{-5} 。

参考文献

- 1 谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 210–211.
XIE Zhongsheng. Nuclear reactor physics analysis[M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 2004: 210–211.
- 2 郑福裕. 压水堆核电厂运行物理导论[M]. 北京: 原子能出版社, 2009: 133–143.
ZHENG Fuyu. Introduction to physics of PWR nuclear power plant[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2009: 133–143.
- 3 Ingersoll D T, Forsberg C W, Ott L J, *et al.* Status of preconceptual design of the advanced high-temperature reactor (AHTR)[R]. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 2004.
- 4 Greene S R, Gehin J C, Holcomb D E, *et al.* Pre-conceptual design of a fluoride-salt-cooled small modular advanced high temperature reactor (SmAHTR)[R]. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 2010.
- 5 Ji R M, Li M H, Zou Y, *et al.* Impact of photoneutrons on reactivity measurements for TMSR-SF1[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**(6): 76. DOI: 10.1007/s41365-017-0234-7.
- 6 Oak Ridge National Laboratory. Scale: a comprehensive modeling and simulation suite for nuclear safety analysis and design[M]. USA, 2011.
- 7 许云林, 经荣清, 王德安. 10 MW 高温气冷堆控制棒反应性当量计算[J]. 核动力工程, 1997, **18**(6): 500–504.
XU Yunlin, JING Xingqing, WANG De'an, *et al.* Reactivity worth calculation for control rods of high temperature gas-cooled reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 1997, **18**(6): 500–504.
- 8 周旭华, 李富, 王登营, 等. 高温气冷堆控制棒区不连续因子的计算与应用[J]. 核动力工程, 2008, **29**(6): 1–5+9.
ZHOU Xuhua, LI Fu, WANG Dengying, *et al.* Calculation and application of discontinuous factors in control rod region of high temperature gas cooled reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, **29**(6): 1–5+9.