

文章编号: 0258-0926(2023)S1-0069-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2023.S1.0069

螺旋十字型燃料棒中子物理及 热工水力性能分析

张涛¹, 韩文斌^{1,2}, 申鹏飞¹, 黄善仿¹, 王侃¹

1. 清华大学工程物理系, 北京, 100084; 2. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 为分析螺旋十字型燃料棒的中子物理及热工水力性能, 使用基于计算机辅助设计(CAD)几何的反应堆蒙特卡罗程序 RMC 和商用计算流体力学(CFD)软件 Fluent 对螺旋十字型燃料棒进行数值模拟, 并传统圆柱型和无扭转十字型燃料棒进行对比。结果表明, 螺旋十字型结构会略微降低反应性, 增大径向功率峰因子; 相较于圆柱型燃料棒, 螺旋十字型燃料棒由于存在横向流动, 能增强冷却剂交混, 提升换热能力, 在七棒束组件计算中, 螺旋十字型燃料棒的平均温度和峰值温度都降低了约 4 K。

关键词: 螺旋十字型燃料棒; 蒙特卡罗方法; 计算流体力学(CFD); 流动换热特性

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A

Neutronic and Thermal-Hydraulic Performance Analysis of Helical Cruciform Fuel Rods

Zhang Tao¹, Han Wenbin^{1,2}, Shen Pengfei¹, Huang Shanfang¹, Wang Kan¹

1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: To analyze the neutronic and thermal-hydraulic performance of helical cruciform fuel (HCF) rods, numerical simulations using the CAD (computer-aided design)-based Reactor Monte Carlo code RMC and the commercial computational fluid dynamics (CFD) software Fluent were conducted, and the results were compared with those of traditional cylindrical and untwisted cruciform fuel rods. The results show that the helical cruciform structure slightly reduces the reactivity and increases the radial power peaking factor. Compared with cylindrical fuel rods, the HCF rods can enhance coolant mixing and heat transfer due to their transverse flow characteristics. In the 7-rods assembly calculation, the mean and peak temperatures of HCF rods are reduced by about 4 K.

Key words: Helical cruciform fuel rods, Monte Carlo method, Computational Fluid Dynamics (CFD), Flow and heat transfer characteristics

0 引言

核能是安全、经济和高效的清洁能源, 发展核能是国家实现碳达峰、碳中和战略目标的重要途径^[1]。进一步发展核能的关键是提升堆芯的功率密度、安全裕度和经济性, 而改善核燃料几何形状和空间配置, 发展高性能燃料元件是目前一

个主要研究方向。现有的燃料元件按形状主要分为棒状、板状、环状、球状以及一些复杂形状。目前核电站广泛运用的是圆柱型棒状燃料, 因为其结构简单且方便加工, 但性能一般。而板状、环状和十字型等结构都是通过提升换热面积来获得更优的热工水力性能。其中螺旋十字型燃料棒

收稿日期: 2023-02-21; 修回日期: 2023-05-24

作者简介: 张涛(2000—), 男, 硕士研究生, 现主要从事核能科学与工程方面研究, E-mail: tao-zhan18@tsinghua.org.cn

因其以下几个优点受到人们重视：①增大相对表面积，提升换热性能；②强化冷却剂交混，展平温度分布；③自主支撑结构，增强结构稳定性。目前螺旋十字型燃料棒主要运用在俄罗斯的核动力破冰船和高通量束流实验堆^[2-3]，VVER-T型核电站的最新设计中，其燃料中心区域也采用了这种燃料^[4]。

对螺旋十字型燃料棒的实验研究方面，Bol'shakov等^[4]进行了VVER-T燃料组件模型的压降和临界热流密度的实验研究。Conboy等^[5]开展了大量工作，内容涉及燃料棒结构改良，开展压降、交混试验，拟合经验关联式等多个方面。张琦等^[6]用示踪法获得了螺旋十字型燃料棒的交混系数以及摩擦系数的经验公式。模拟研究方面，Diakov等^[2]研究了螺旋十字型燃料棒运用低富集铀的可能性。Shivan等^[7]使用Serpent程序比较了GE11圆柱型沸水堆燃料棒和螺旋十字型燃料棒的中子学性能。大部分模拟研究集中于螺旋十字型燃料棒的交混特性和热工性能^[8-11]。加工制造方面，美国光桥公司^[12]通过共挤工艺制造螺旋十字型燃料棒，燃料采用铀锆合金，并建造了相应的测量装置以进行辐照实验。

综上，现阶段有关螺旋十字型燃料棒的流动换热研究较多，中子物理研究较少，缺乏综合考虑二者效应的高保真异形几何研究。因此本文将使用基于计算机辅助设计（CAD）几何的反应堆蒙特卡罗程序（RMC）和商用计算流体力学（CFD）软件Fluent对螺旋十字型燃料棒进行中子物理和热工水力性能的数值研究。

1 中子物理性能

螺旋十字型燃料棒的中子物理研究较少的主要原因是难以开展异形几何的中子物理计算。确定论方法难以处理，而蒙特卡罗软件又大多基于构造实体几何（CSG），即采用方程曲面的布尔运算表示实体，虽然效率高，但难以描述异形几何。为解决这一问题，威斯康星大学^[13]开发了直接加速蒙特卡罗方法（DAGMC），实现了基于CAD模型的粒子定位和输运计算，目前已集成到MCNP^[14]、OpenMC^[15]和Serpent^[16]等多个蒙特卡罗软件。

反应堆蒙特卡罗分析程序（RMC）是由清华

大学工程物理系自主研发的、用于反应堆堆芯计算分析的三维输运蒙特卡罗程序^[17]。目前RMC也集成了DAGMC模块^[18]，本研究采用RMC进行螺旋十字型燃料棒的中子物理计算。

1.1 几何模型与计算条件

螺旋十字型燃料棒采用Conboy^[5]的模型，几何参数如图1所示。该模型与沸水堆GE11燃料的燃料截面积皆为 0.716 cm^2 ，当包层厚度为定值时，十字型截面的包层面积增加了33.6%。如果棒栅距一定，那么意味着螺旋十字型燃料棒的慢化剂体积会降低。

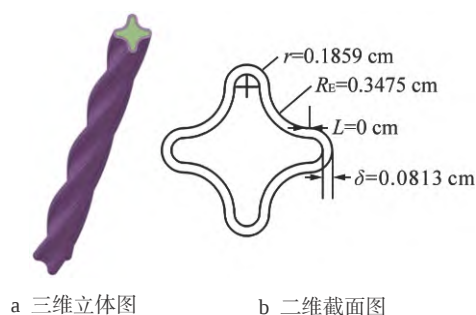


图1 螺旋十字型燃料棒模型

Fig. 1 Model of Helical Cruciform Fuel Rod

r —外凸圆半径； R_E —内凹圆半径； δ —包壳厚度； L —过渡长度

计算中燃料采用富集度4.5%的 UO_2 ，包壳材料为Zr-4合金，慢化剂用密度为 660 kg/m^3 的水，四周和上下分别设置全反射和真空边界条件。在燃料棒周围设置慢化剂，栅元边长为 1.4386 cm ，三维计算时栅元高度为 100 cm 。设置每代中子数为10000，非活跃代中子数为500，活跃代中子数为2000。

1.2 CAD模型计算验证

为了验证基于CAD几何的中子物理计算的有效性，选择十字型无扭转燃料单栅元模型，分别采用CSG模型与CAD模型进行计算，对结果的一致性进行验证。计算结果见表1，两者反应性仅相差3pcm（ $1\text{ pcm} = 10^{-5}$ ），在允许的误差范围内，证明了基于CAD几何的RMC临界计算结果的正确性。

1.3 二维单栅元中子物理性能分析

为分析圆型和十字型截面中子物理性能差异，及螺旋结构导致的截面旋转的影响，选择圆型、十字型和将十字型旋转 45° 的3个截面进行二维

表 1 CSG、CAD 建模的计算结果对比

Tab. 1 Comparison of Results between CSG and CAD Model

建模方式	有效增殖系数(k_{eff})
CSG	1.308667±0.000148
CAD	1.308611±0.000144

临界计算，并与 Shivan^[7] 的结果进行验证对比。模型如图 2 所示，3 者具有相同的燃料面积和包层厚度。

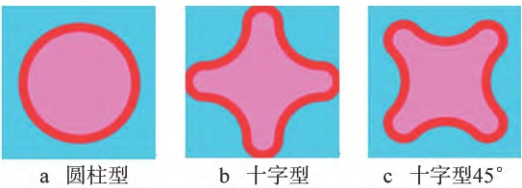


图 2 二维单栅元模型

Fig. 2 Two-dimensional Single Cell Model

3 个截面的二维临界计算结果见表 2，表 2 对比了文献和计算得到的 k_{eff} 的差异以及十字型相对于圆型的 k_{eff} 差异。因为文献对于具体计算设置如包层温度、材料组分交代不明或者截面库存在差异，所以 k_{eff} 存在偏差，但规律是一致：十字型截面的 k_{eff} 相较于圆型截面略微下降，而将其旋转 45°后又会有略微提升。由于采用全反射边界条件，故只需利用 4 因子公式 $k_{\infty} = \varepsilon f p \eta$ 对十字型和圆型截面开展分析：

(1) 快中子增殖因子 (ε)：十字型截面形状更狭长，快中子更容易飞出燃料，所以 ε 减小。

(2) 热中子利用系数 (f)：十字型截面包层面积增加将增加包层对中子的吸收，使得 f 减小；但同时慢化剂的减少也减少了对中子的吸收，使得 f 增大。两者的共同效应不确定。

(3) 逃脱共振吸收概率 (p)：十字型截面

表 2 二维临界计算结果

Tab. 2 Two-dimensional Critical Calculation Results

截面类型	文献 ^[9]		计算	
	k_{eff}	dk/k	k_{eff}	dk/k
圆型	1.3513	—	1.3874±0.0001	—
十字型	1.3456	-0.0043	1.3843±0.0001	-0.0022
十字型45°	1.3486	-0.0020	1.3856±0.0001	-0.0013

dk/k —其他截面相对于圆型截面 k_{eff} 的相对误差

慢化剂减少，慢化减弱，使得 p 减小；但同时十字型截面狭长的形状使得快中子更容易飞出燃料，减少共振吸收，使得 p 增大。两者的共同效应不确定。

(4) 有效裂变中子数 (η)：由于采用同种材料，所以忽略 η 的影响。

通过以上分析可见， ε 的减小是确定的负效应，而 f 及 p 的变化具有一定的不确定性。根据 4 因子公式可知， k_{eff} 将减小，符合计算结果。而将十字型截面旋转 45°后，燃料棒周围的慢化剂分布更加均匀，热中子更容易回到燃料区域发生裂变，增大了 f ，所以 k_{eff} 略微增大。

图 3 为中子能谱。从图 3 可知，十字型截面的能谱更软。在全反射边界条件下，影响能谱的关键在于逃脱共振吸收的中子数而不是慢化能力，这也说明十字型截面逃脱共振吸收的中子更多。同时可以发现，螺旋结构导致的截面旋转对能谱几乎没有影响。

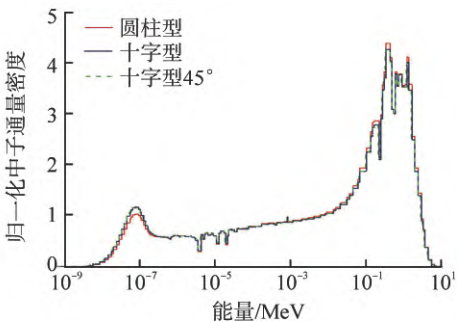


图 3 中子能谱

Fig. 3 Neutron Energy Spectrum

1.4 三维单栅元中子物理性能分析对比

1.4.1 k_{eff} 三维圆柱型、十字型和螺旋十字型单栅元的临界计算结果见表 3，与二维情形相同，十字型的 k_{eff} 比圆柱型小。但由于在上下边界设置了真空边界条件，所以三维的 k_{eff} 计算值都比二维小。再考虑十字型燃料棒在空间的扭转，结果表明扭转结构会导致 k_{eff} 值略微上升，但相比于二维的结果，三维的连续扭转减弱了其对反应性的影响，100 cm 螺距与无扭转的十字型燃料棒反应性差异仅为 18pcm，基本上在误差范围内。而螺距为 50、100 cm 的螺旋十字型燃料棒反应性差异仅为 2pcm，证明螺距对 k_{eff} 的影响很小。这意味着在进行中子物理计算时，特别是全堆情

况下, 可以用无扭转十字型燃料棒替代螺旋十字型燃料棒, 虽然略微牺牲了计算精度, 但能大幅提高计算效率。

表3 三维临界计算结果

Tab. 3 Three-dimensional Critical Calculation Results

单栅元模型		k_{eff}
圆柱型		1.313672±0.000144
十字型		1.308667±0.000148
螺旋十字型	螺距50 cm	1.308946±0.000153
	螺距100 cm	1.308981±0.000149

1.4.2 功率分布 圆柱型、十字型和螺距为 100 cm 的螺旋十字型燃料棒单栅元模型的轴向功率分布基本一致, 都近似为余弦分布。而由于十字型存在狭长的 4 个角, 燃料空间分布不均匀, 所以会增加其径向功率分布的不均匀度。从表 4 可知十字型截面的功率峰因子比圆柱型大。

表4 功率峰因子对比

Tab. 4 Power Peaking Factor Comparison

截面类型	轴向功率峰因子	整体功率峰因子
圆柱型	1.50	1.81
十字型	1.49	2.00
螺旋十字型	1.49	2.08

2 热工水力性能

2.1 计算模型

2.1.1 几何结构与网格划分 热工水力计算采用的模型是七燃料棒叉排组件, 计算中忽略了燃料棒的包层, 将其等效为燃料。刘畅^[10]根据 Conboy 的论文改良了螺旋十字型燃料棒的设计准则, 并得到了流动换热性能最佳的结构参数和燃料布置方式, 其结构参数 R_E 为 3 mm, r 为 2.157 mm, L 为 0.044 mm, 螺距为 100 cm, 长度为 50 cm, 组件直径为 46.082 mm, 棒间距为 15.2 mm。本文在其基础上进行圆柱型、十字型和螺旋十字型燃料棒束热工水力性能的对比。在保证三者具有相同的燃料体积情况下, 此时十字型和螺旋十字型燃料棒束的换热表面积相对于圆柱型都增大了 25.64%。

本文采用网格类型为六面体结构网格和三棱柱网格, 通过二维网格拉升的方式实现。如图 4

所示, 将包含螺旋十字型燃料棒在内的一个圆柱体内采用二维结构化网格螺旋拉升生成六面体结构网格, 在其他区域通过沿法向拉伸三角形网格形成三棱柱网格, 并在流固网格交界面设置耦合壁面。这样的网格质量较高, 还能有效地降低网格数。通过调节二维网格数量和轴向拉伸层数划分出 5 套不同的网格完成网格无关性验证。如图 5 所示, 当网格数到达 484 万时, 进出口压降趋于一个稳定值, 故选择该网格数进行计算。而圆柱型与十字型燃料组件则使用类似的方式生成网格。

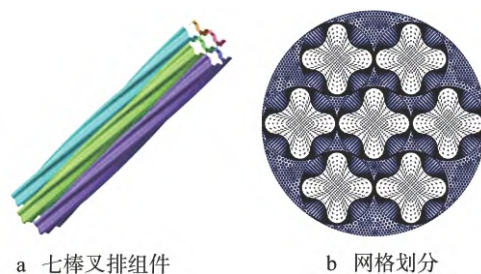


图4 几何结构与网格划分

Fig. 4 Geometry and Grid

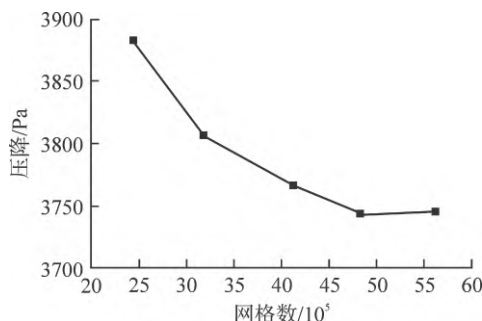


图5 网格无关性验证

Fig. 5 Grid Independence Validation

2.1.2 湍流模型 大量文献^[9-11]进行螺旋十字型燃料棒束流动换热数值研究采用的都是剪切应力传输 (SST) $k-\omega$ 模型, 其结合了标准 $k-\omega$ 、 $k-\epsilon$ 模型的优势, 在近壁面处使用 $k-\omega$ 模型, 而在边界层外使用 $k-\epsilon$ 模型, 更适用于这种旋转和各向异性流动的情形, 模拟结果也表明其更符合实验数据, 因而湍流模型选择 SST $k-\omega$ 模型。

2.1.3 计算条件 计算域包括流体域和固体域, 流体区域冷却剂为 15 MPa 下的水, 物性随温度而变化; 固体区域燃料棒材质为 U_3Si_2-Al ; 设置入口质量流量为 1.036 kg/s, 出口相对压力为 0

Pa，无滑移绝热外壁面。热源为非定值，设堆芯平均功率密度为 100 MW/m^3 ，功率沿径向均匀分布，轴向余弦分布，则最终燃料热源表达式为：

$$q_v = 1.610^8 \cos[\pi(z - z_0)/H]$$

式中， q_v 为体积释热率； z 为网格中心轴向坐标； z_0 为燃料棒中心截面轴向坐标； H 为燃料棒长度。

SST $k-\omega$ 模型要求近壁面网格尺度 (y^+) 为 1 左右，设置边界层首层网格高度为 0.0025 mm ，平均 y^+ 值约为 0.51，满足模型要求。

2.2 流动特性分析

螺旋十字型结构的一个重要特性是螺旋结构导致的冷却剂横向流动。流动参数的对比见表 5，其中螺旋十字型燃料棒束的径向速度平均值 ($\bar{V}_R$) 比圆柱型和十字型大一个数量级。如图 6 所示，径向速度在十字型内凹圆处较大，在离燃料棒较远处和外凸圆处较小，这是因为内凹圆面的扭曲带来了横向强迫流动。此外螺旋结构不可避免带来压降的增大，螺旋十字型燃料棒束出入口压降 (ΔP) 比圆柱型增加了 11.6%。

表 5 流动参数对比

Tab. 5 Comparison of Flow Parameters			
物理量	圆柱型	十字型	螺旋十字型
$\bar{V}_R / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.00148	0.00151	0.02492
$\Delta P / \text{Pa}$	974.38	993.43	1087.02

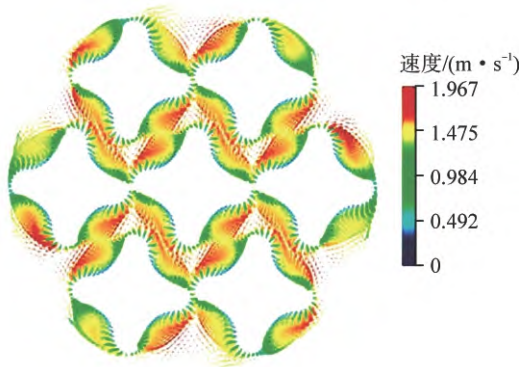


图 6 出口截面速度切线投影矢量图
Fig. 6 Velocity Tangent Projection Vector Diagram for Outlet

2.3 换热特性分析

图 7 为中心燃料棒中心截面壁面温度沿周向的分布，其中圆柱截面的壁面温度分布最均匀，但是其平均温度最高；十字型截面的壁面温度会

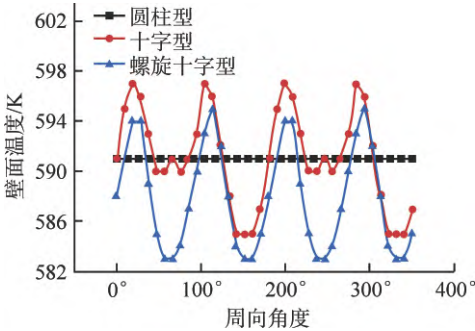


图 7 壁面温度沿周向分布
Fig. 7 Circumferential Distribution of Wall Temperature

呈现周期性的变化；而螺旋状的结构则能很好降低壁面温度。

图 8 为中心燃料棒中心温度沿轴向分布，螺旋十字型燃料棒在轴向的温度整体都低于圆柱型和十字型。此外螺旋十字型燃料棒壁面平均温度相对于圆柱型降低了约 2.6 K，燃料区域的温度的平均值和峰值都降低了约 4 K。由于计算的燃料棒数目太少，差别并不太明显，在计算燃料棒增多和功率分布更符合实际情况后差异会更大。

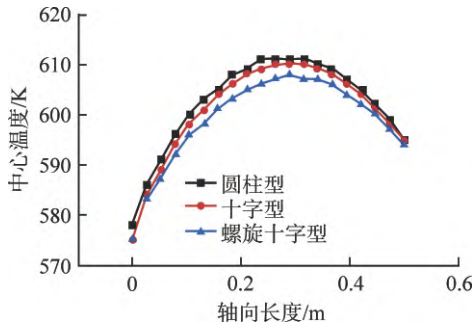


图 8 中心温度沿轴向分布
Fig. 8 Axial Distribution of Central Temperature

3 结 论

本研究使用 RMC 和 Fluent 程序分别进行了螺旋十字型燃料棒的中子物理和热工水力性能的数值研究，主要结论如下：

(1) 二维分析中，十字型栅元的 k_{eff} 比圆柱型栅元低，其能谱更软；螺旋结构导致的截面旋转对能谱几乎没有影响。三维分析中，螺旋十字型燃料棒的螺距对反应性影响很小；圆柱型、十字型、螺旋十字型燃料棒轴向功率分布几乎一致；螺旋和十字型结构都会增大径向功率峰因子。

(2) 螺旋结构会带来冷却剂的横向流动，比

非螺旋结构大了一个数量级,同时也会带来压降的提升,比圆柱型组件增加了 11.6%。

(3) 螺旋十字型结构能降低燃料棒的整体温度,平均温度比圆柱型低了约 4 K,其燃料壁面温度沿轴向存在周期性变化且平均值比圆柱型低 2.6 K,相比传统圆柱型棒状燃料具有更优异的热工性能。

参考文献:

- [1] 邢继,高力,霍小东,等.“碳达峰、碳中和”背景下核能利用浅析[J]. *核科学与工程*, 2022, 42(1): 10-17.
- [2] DIAKOV A C, DMITRIEV A M, KANG J, et al. Feasibility of converting Russian icebreaker reactors from HEU to LEU fuel[J]. *Science & Global Security*, 2006, 14(1): 33-48.
- [3] AGEENKOV V I, VOLKOV V S, SOLONIN M I, et al. Parameters and technology for fabricating PIK reactor fuel elements[J]. *Atomic Energy*, 2002, 92(6): 468-474.
- [4] BOL'SHAKOV V V, BASHKIRTSEV S M, KOBZAR' L L, et al. Experimental study of burnout in channels with twisted fuel rods[J]. *Thermal Engineering*, 2007, 54(5): 386-389.
- [5] CONBOY T M. Assessment of helical-cruciform fuel rods for high power density LWRs[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [6] ZHANG Q, LIU L, XIAO Y, et al. Experimental study on the transverse mixing of 5×5 helical cruciform fuel assembly by wire mesh sensor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 164: 108582.
- [7] SHIRVAN K, KAZIMI M S. Nuclear design of helical cruciform fuel rods[C]//PHYSOR 2012 –Advances in Reactor Physics –Linking Research, Industry, and Education. Knoxville: American Nuclear Society, 2012.
- [8] SHIRVAN K, KAZIMI M S. Three dimensional considerations in thermal-hydraulics of helical cruciform fuel rods for LWR power uprates[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 270: 259-272.
- [9] 蔡伟华,韦微圣,李石磊,等. 5×5 花瓣形燃料棒束组件内单相流动与换热特性数值模拟研究[J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(11): 1939-1949.
- [10] 刘畅. 螺旋型燃料棒束内流动与换热特性数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [11] FANG Y L, QIN H, WANG C L, et al. Numerical investigation on thermohydraulic performance of high temperature hydrogen in twisted rod channels[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 161: 108434.
- [12] HARTMANN C, TOTEMEIER A, HOLCOMBE S, et al. Measurement station for interim inspections of Lightbridge metallic fuel rods at the Halden boiling water reactor[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2018, 170: 04011.
- [13] University of Wisconsin –Madison. DAGMC: direct accelerated geometry Monte Carlo[EB/OL]. (2021-07-08)[2022-05-05]. <https://svalinn.github.io/DAGMC>.
- [14] LOVECKÝ M, ZÁVORKA J, VIMPEL J. VVER-1000 fuel assembly model in CAD-based unstructured mesh for MCNP6[J]. *Kerntechnik*, 2019, 84(4): 262-266.
- [15] WU Y C, SONG J, ZHENG H Q, et al. CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 82: 161-168.
- [16] TALAMO A, GOHAR Y, LEPPÄNEN J. SERPENT validation and optimization with mesh adaptive search on stereolithography geometry models[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2018, 115: 619-632.
- [17] WANG K, LI Z G, SHE D, et al. RMC—a Monte Carlo code for reactor core analysis[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 82: 121-129.
- [18] SHEN P F, LIANG J G, LIU S C, et al. Implementation and verification of the DAGMC module in Monte Carlo code RMC[C]//Proceedings of the 29th International Conference on Nuclear Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2022.

(责任编辑: 张明军)