

基于偏离效应核素筛选方法的水冷聚变堆源项计算

郭庆洋, 张竞宇, 张会杰, 王庆斌

Calculation of Source Terms for Water-cooled Fusion Reactor Based on Deviation Effect Nuclide Screening Method

Guo Qingyang, Zhang Jingyu, Zhang Huijie, and Wang Qingbin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.05.0001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[主回路裂变产物源项计算程序CPFP的开发](#)

Development of Calculation Code CPFP for Fission Product in Primary Loop of Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant
核动力工程. 2018, 39(4): 33–38

[六角形组件源项计算方法研究](#)

Research on Calculation Method for Hexagonal Assembly Source
核动力工程. 2018, 39(4): 11–15

[钠冷快堆碎片床长期冷却阶段冷却性能分析程序的开发及验证](#)

Development and Verification of Coolability Analysis Program for Debris Bed of Sodium-Cooled Fast Reactor in Long-Term Cooling Phase
核动力工程. 2020, 41(6): 14–18

[小型模块化超临界水冷堆研发](#)

Supercritical Water-Cooled Small Modular Reactor R&D
核动力工程. 2021, 42(6): 72–76

[中国聚变工程试验堆氦冷包层安全分析研究](#)

Safety Analysis of China Fusion Engineering Test Reactor Helium Cooled Blanket
核动力工程. 2021, 42(S2): 29–32

[压水堆核电站放射性源项的估算方法研究](#)

Research on Calculations of Radioactive Source Terms for PWR Nuclear Power Plants
核动力工程. 2019, 40(1): 116–119



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)05-0001-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.05.0001

基于偏离效应核素筛选方法的水冷聚变堆源项计算

郭庆洋¹, 张竞宇^{2*}, 张会杰¹, 王庆斌¹

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京, 100049; 2. 华北电力大学核科学与工程学院, 北京, 102206

摘要: 活化腐蚀产物是水冷聚变堆正常运行过程中主要的放射性源项, 一般采用解析方法求解, 但解析方法无法在满足精度要求的同时提高计算效率。本文提出一种基于量化偏离效应分析的核素筛选方法, 以放射性活度和剂量率 2 个参数定义偏离效应指标, 通过分析偏离效应指标, 筛选出满足接收准则的核素, 以确定计算所需要的目标核素, 这种分析方法既能满足精度需求, 又能提高计算效率。将该核素筛选方法应用于国际热核聚变实验堆 (ITER) 限制器-外包层水冷回路 (LIM-OB) 的活化腐蚀产物源项分析, 并与此问题下的高精度基准解进行对比。结果表明, ⁵⁷Co、⁵⁸Co、⁵⁵Fe、⁵¹Cr 等主要活化腐蚀产物核素的比活度计算结果相对于基准解的偏差均控制在 1.5% 以内; 应用核素筛选方法后的计算效率相对于基准解的计算效率提高了 279 倍。

关键词: 活化腐蚀产物; 水冷聚变堆; 偏离效应; 计算效率; 源项分析

中图分类号: TL48 **文献标志码:** A

Calculation of Source Terms for Water-cooled Fusion Reactor Based on Deviation Effect Nuclide Screening Method

Guo Qingyang¹, Zhang Jingyu^{2*}, Zhang Huijie¹, Wang Qingbin¹

1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;
2. School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China

Abstract: The activated corrosion products are the main radioactive source terms in the normal operation of water-cooled fusion reactor, and are generally solved by analytical methods, but analytical methods cannot improve the calculation speed while meeting the accuracy requirements. In this paper, a nuclide screening method based on quantitative deviation effect analysis is proposed, which defines the two parameters of radioactivity and dose rate as deviation effect indicators. By analyzing the deviation effect indicators, nuclides meeting the acceptance criteria are screened to determine the target nuclides required for calculation. This analysis method can not only meet the accuracy requirements, but also improve the calculation efficiency. This nuclide screening method is applied to the source term analysis of activated corrosion products in the International Thermonuclear Experimental reactor (ITER) limiter-outer cladding water-cooled loop (LIM-OB), and compared with the high-precision benchmark solution under this issue. The results show that the relative deviations of the specific activity calculation results of important activated corrosion product nuclides such as ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁵⁵Fe, and ⁵¹Cr compared with the benchmark solution are all controlled within 1.5%; The calculation efficiency of the nuclide screening method is 279 times higher than that of the benchmark solution.

收稿日期: 2021-11-09; 修回日期: 2022-01-25

基金项目: 高能同步辐射光源国家重大科技基础设施项目 [发改高技 (2017) 2173]

作者简介: 郭庆洋 (1991—), 女, 博士研究生, 工程师, 现从事辐射屏蔽计算研究, E-mail: gqy2171015@126.com

*通讯作者: 张竞宇, E-mail: poptnt@163.com

Key words: Activated corrosion products, Water-cooled fusion reactor, Deviation effect, Calculation efficiency, Source term analysis

0 引言

反应堆正常运行工况下,主回路中的放射性来源主要包括冷却剂自身活化产物、结构材料活化腐蚀产物、燃料棒中的裂变产物^[1]3种。对于采用水冷方式的聚变堆,由于其水冷回路中不存在裂变反应及相应产物,因此其结构材料与冷却剂接触后经过腐蚀、活化等一系列反应产生的活化腐蚀产物成为放射性的主要来源。活化腐蚀产物在衰变过程中会持续不断地释放出高能 γ 射线,对工作人员造成辐照损伤,影响设备维修或检修等工作进程。为了优化人员的辐射防护工作,需要对活化腐蚀产物核素存留量及其分布进行精确计算。

从1960年开始,核科学领域内的学者们就开始对活化腐蚀产物计算模型进行了大量研究。迄今为止已经开发出多个模型^[2],其中大部分模型为了便于计算,在核素种类、核反应类型等方面进行限制。比如美国电力研究院(EPRI)开发的CORR-II^[3]模型只考虑Cr、Fe、Mn、Ni、Co这5种元素的6种中子活化反应;日本研究机构开发的ACE-II^[4]模型仅考虑Fe、Ni、Co这3种元素的2种中子活化反应;法国原子能和替代能源委员会(CEA)开发的PACTOLE^[5]只考虑Cr、Fe、Mn、Ni、Co这5种元素的10种中子活化反应,在此基础上开发的PACTITER^[6]增加了Cu元素及其活化反应;中国华北电力大学开发的CATE^[7-10]考虑了Cr、Fe、Mn、Ni、Co在内的几十种元素及其活化反应。

实际上,反应堆中产生的活化腐蚀产物种类多达千百种。早期计算模型虽然具备了模拟活化腐蚀产物源项的能力,但由于人为截断了某些核素的核反应关系网,舍弃掉了多个衰变核素,在计算精度方面存在欠缺。同时,一旦冷却回路中采用新材料,产生新的活化腐蚀产物核素时,早期模型便无法计算,需要扩充核素种类数据。由于不同种类核素的半衰期差别巨大,如果将中子活化数据库EAF-2007^[11]中的2231种核素及所有核反应全部嵌入模型,形成的活化腐蚀产物计算

模型在数学上具有大规模、强刚性的特点,虽然能够得到高精度的基准解,但耗时很长。因此,如何在满足放射性源项计算精度需求的同时极大提高计算效率成为亟待解决的问题。

本文依托华北电力大学开发的CATE-V3.0^[12-13]程序进行活化腐蚀产物源项计算的加速研究,提出了一种基于量化偏离效应分析的核素筛选方法。随后将经过筛选后的目标核素求解和EAF-2007全核素(2231种)高精度直接求解分别应用于国际热核聚变实验堆(ITER)限制器-外包层水冷回路(LIM-OB)的活化腐蚀产物计算,对比分析此工程问题下活化腐蚀产物源项的计算精度和计算效率。

1 量化偏离效应分析的核素筛选

1.1 偏离效应分析的数据基础

偏离效应分析的数据基础是在特定源项问题下直接求解的高精度计算结果。这就要求对中子活化数据库EAF-2007中的全部核素进行求解,明确此情况下所能达到的计算精度和计算效率。

基于模型的数学特点和数值计算的经验和数值计算的经验,选取成熟的GEAR方法进行求解,以提供高精度基准解。GEAR方法是通常用于求解具有刚性特点方程组的向后差分方法^[14],其 q 阶隐式算法见文献[14-15]。GEAR方法对计算过程中使用的步长没有限制,步长和阶数均可以周期性改变,并且稳定性较好。

为了最大程度地减少与步长和方法阶数选择相关的复杂性,在GEAR方法的积分过程中,每一步都会根据预定的精确度、当前步长求解的积累误差及所用公式的同阶、高一阶、低一阶公式的截断误差来确定下一步积分所需要的合理步长和阶数。

1.2 核素筛选方法与流程

在核工程研究领域,对放射性核素的筛选有3种常用方法:①直接筛选出目标核素以及所有与其相关联的核反应道;②筛选出目标核素某一条或某几条重要的核反应道,保留与之相关联

的转化关系；③直接剔除某些半衰期较短容易衰变的放射性核素，将其相关联的转化关系全部叠加给衰变子体。如果根据这3种筛选方法直接人为选取或者删除某些核素或核反应道，不可避免地会影响活化腐蚀产物的计算精度。本文以放射性活度和剂量率参数定义了2个偏离效应指标，如式(1)所示。对于特定的工程计算问题，根据需要提前设定好接受准则，即在计算过程中对用户接受的精度进行定量控制。分析2个偏离效应指标是否满足设定好的接受准则，在2个指标同时满足接受准则的情况下，筛选出来的核素即可确定为对放射性活度和剂量率贡献较大的目标核素。将对活化腐蚀产物源项贡献较小的核素剔除直接求解时的系数矩阵，从而提高计算效率。放射性活度和剂量率偏离效应指标：

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\sum_j \sigma_j \phi_j n'_j + \sum_j \lambda_j \chi_j n'_j - \sum_j \sigma_j \phi_j n_j - \sum_j \lambda_j \chi_j n_j}{\sum_j \sigma_j \phi_j n_j + \sum_j \lambda_j \chi_j n_j} \right| \leq \eta_1 \\ \left| \frac{\sum_j \sum_m Q_j E_{j,m} N'_{j,m} - \sum_j \sum_m Q_j E_{j,m} N_{j,m}}{\sum_j \sum_m Q_j E_{j,m} N_{j,m}} \right| \leq \eta_2 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中， η_1 、 η_2 为用户设定标准； σ_j 为第 j 种活化腐蚀产物的活化截面， m^2 ； ϕ_j 为第 j 种活化腐蚀产物的中子注量率， $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ； n'_j 为通过核素筛选方法得到的第 j 种活化腐蚀产物的核子密度， m^{-3} ； n_j 为第 j 种活化腐蚀产物的核子密度的基准值， m^{-3} ； λ_j 为第 j 种活化腐蚀产物的衰变常数， s^{-1} ； χ_j 为第 j 种活化腐蚀产物的衰变分支比； Q_j 为第 j 种活化腐蚀产物比活度的基准值， Bq/kg ； Q'_j 为通过核素筛选方法得到的第 j 种活化腐蚀产物比活度， Bq/kg ； $E_{j,m}$ 为第 j 种活化腐蚀产物发射的第 m 条 γ 射线的能量， MeV ； $N_{j,m}$ 为第 j 种活化腐蚀产物发射第 m 条 γ 射线的绝对强度的基准值； $N'_{j,m}$ 为通过核素筛选方法得到的第 j 种活化腐蚀产物发射第 m 条 γ 射线的绝对强度。

核素筛选流程如图1所示。首先采用GEAR方法对EAF-2007数据库中的全部核素进行求解，提供偏离效应分析的基准解；其次筛选出结构材料中所包含的元素，保留与其相关的所有核反应道。在EAF-2007数据库内通过放射性核素长短

寿命的判断标准来剔除短寿命衰变核素，将与短寿命核素相关的活化、衰变关系叠加给衰变子体。利用设定的接受准则进行偏离效应分析，若满足接收准则，即可形成目标核素库；若不满足接受准则，将会重新预估核素长短寿命的判断标准，进而再次筛选，直到偏离效应指标满足接受准则为止。这样，目标核素库中既包括了冷却剂回路中所有结构材料元素及其同位素，又涵盖了对放射性活度和剂量率贡献较大的其他核素。

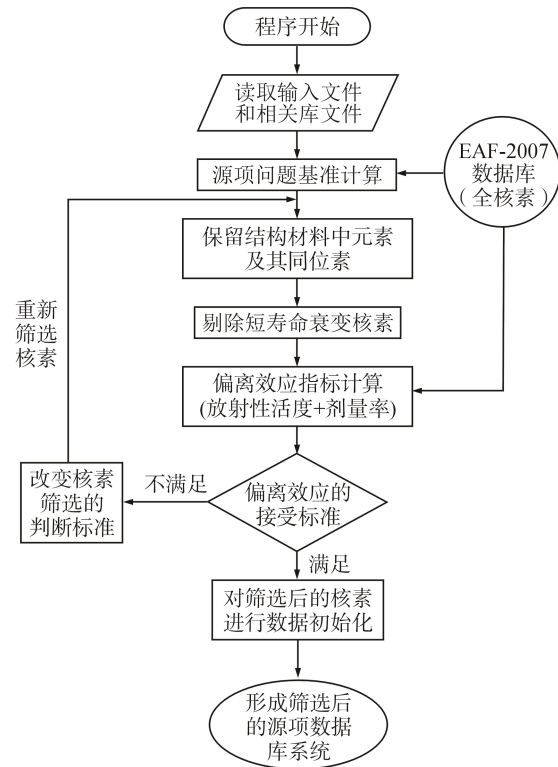


图1 核素筛选流程

Fig. 1 Nuclide Screening Process

2 核素筛选方法的应用

2.1 算例描述

为了验证核素筛选方法的计算精度和计算效率，选取ITER LIM-OBB稳定运行一段时间后活化腐蚀产物的存留量为源项分析的代表性算例。设定LIM-OBB在稳定工况下运行1.2 a，采用“四相三节点”模型进行模拟，依据物质产生、迁移、转化机理的不同将物质形态细分为氧化层、沉积层、离子、微粒4种。依据空间区域受到中子照射情况的不同将回路细分为中子辐照区、非辐照区，冷却剂作为载体可看作回路中的第三区

域^[12-13]。模型求解过程中分别应用 EAF-2007 全核素 (2231 种) 进行高精度直接求解和采用经过筛选后的目标核素进行求解, 给出不同物质形态的活化腐蚀产物在回路中的分布情况, 对比分析出全核素直接求解和目标核素求解的计算精度与计算效率。表 1 是 LIM-OB 的运行参数。

ITER LIM-OB 使用的材料是奥氏体不锈钢 SS316, 经实验测得, SS316 在 140~180℃ 范围内 (与 LIM-OB 的实际工况相似) 腐蚀率随时间 t 的变化规律为^[16]: $0.02t^{-0.614} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2.2 高精度直接求解结果分析

表 2 列出了 LIM-OB 中辐照区、非辐照区、冷却剂中不同物质形态腐蚀产物的总质量和活化腐蚀产物的总比活度。表 3 列出了 LIM-OB 中活化腐蚀产物的主要成分核素及其比活度。计算结果可以作为 ITER 源项分析问题的高精度基准

表 1 LIM-OB 水冷回路的运行参数

Tab. 1 Operating Parameters of LIM-OB Water Cooling Circuit

参数名	参数值
辐照区流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1~6
非辐照区流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3~5
辐照区温度/℃	174
非辐照区温度/℃	140
冷却剂密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	9.10×10^2
中子注量率/($\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.58×10^{17}
流经辐照区的时间/s	2
流经非辐照区的时间/s	26
过滤器流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.55
过滤因子/%	50

解, 但由于计算过程中考虑到的核反应关系网过于精细, 利用 GEAR 方法直接计算耗时长达 21 h。

表 2 LIM-OB 水冷回路中腐蚀产物及活化腐蚀产物的比活度计算结果

Tab. 2 Specific Activity Calculation Results of Specific Activity of Corrosion Products and Activated Corrosion Products in LIM-OB Water Cooling Circuit

腐蚀产物(CPs)总质量	辐照区/kg		非辐照区/kg		冷却剂/kg	
	氧化层	沉积层	氧化层	沉积层	离子	微粒
	20.48	0.71	29.09	1.45	6.42×10^{-3}	4.48×10^{-3}
活化腐蚀产物总比活度	辐照区/($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$)		非辐照区/($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$)		冷却剂/($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)	
	氧化层	沉积层	氧化层	沉积层	离子	微粒
	1.04×10^{12}	6.06×10^{10}	4.07×10^5	2.85×10^{10}	2.40×10^9	7.01×10^9

表 3 LIM-OB 水冷回路中活化腐蚀产物主要核素的比活度

Tab. 3 Specific Activity of Main Nuclides of Activated Corrosion Products in LIM-OB Water Cooling Circuit

核素	辐照区核素比活度/($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$)		非辐照区核素比活度/($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$)		冷却剂/($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)	
	氧化层	沉积层	氧化层	沉积层	离子	微粒
^{53}Fe	1.57×10^{10}	5.46×10^8	7.54×10^{-1}	5.63×10^4	3.62×10^7	9.96×10^7
$^{53}\text{Fe}^m$	5.08×10^9	1.77×10^8	6.75×10^{-2}	5.03×10^3	1.17×10^7	3.23×10^7
^{55}Fe	1.98×10^{11}	1.96×10^{10}	2.11×10^5	1.48×10^{10}	4.57×10^8	1.47×10^9
^{59}Fe	4.19×10^8	2.24×10^7	1.30×10^2	9.17×10^6	9.67×10^5	2.79×10^6
^{57}Co	8.43×10^{10}	7.27×10^9	7.28×10^4	5.07×10^9	1.95×10^8	6.08×10^8
^{58}Co	5.18×10^{10}	3.16×10^9	2.35×10^4	1.64×10^9	1.20×10^8	3.52×10^8
$^{58}\text{Co}^m$	3.41×10^{10}	1.19×10^9	9.36×10^1	6.98×10^6	7.86×10^7	2.16×10^8
^{60}Co	8.96×10^8	9.12×10^7	9.91×10^2	6.98×10^7	2.06×10^6	6.69×10^6
$^{60}\text{Co}^m$	7.75×10^9	2.70×10^8	4.18×10^{-1}	3.12×10^4	1.78×10^7	4.93×10^7
^{57}Ni	2.15×10^{10}	7.63×10^8	2.38×10^2	1.77×10^7	4.97×10^7	1.37×10^8
^{63}Ni	3.61×10^7	3.79×10^6	4.16×10^1	2.95×10^6	8.33×10^4	2.72×10^5
^{51}Cr	3.47×10^{11}	1.63×10^{10}	6.93×10^4	4.98×10^9	8.01×10^8	2.28×10^9
^{55}Cr	1.88×10^9	6.55×10^7	3.43×10^{-2}	2.56×10^3	4.34×10^6	1.19×10^7
^{54}Mn	3.32×10^{10}	2.93×10^9	2.97×10^4	2.07×10^9	7.68×10^7	2.41×10^8
^{56}Mn	2.10×10^{11}	7.33×10^9	1.68×10^2	1.25×10^7	4.85×10^8	1.34×10^9

当反应堆正常运行时，对 LIM-OBB 中不可移动源项（氧化层+沉积层）贡献较大的核素有 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 $^{58}\text{Co}^m$ 、 ^{54}Mn 、 ^{55}Fe 、 ^{51}Cr ，占总比活度的 80% 以上。对辐照区放射性总比活度贡献较大的核素有 ^{55}Fe 、 ^{51}Cr 、 ^{56}Mn 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 $^{58}\text{Co}^m$ 等；对非辐照区放射性总比活度贡献较大的核素有 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{54}Mn 、 ^{55}Fe 、 ^{51}Cr 。当反应堆停止运行后， $^{58}\text{Co}^m$ 等短寿命核素会在很短时间内完全衰变， ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 等长寿命核素成为水冷回路的主要辐射源项。

2.3 目标核素求解结果分析

表 4 列出了应用核素筛选方法后计算得到的

活化腐蚀产物中主要核素比活度及其相对高精度基准解的相对偏差。表 5 列出了偏离效应分析的核素筛选方法求解和高精度直接求解 2 种情况下的计算结果和计算效率。

采用 CATE-V3.0 模型，对 EAF-2007 数据库中全部核素进行计算，可以得到数千种活化腐蚀产物核素在不同区域内的基准解，但每次计算需要消耗时长达 21 h。在全部核素基础上进行偏离效应分析，可以得到数百种关键核素在不同区域内的分布，每次计算仅需 4.5 min。与基准解相比，数百种核素所造成的活度贡献在 90% 以上，说明通过筛选已经得到了活化腐蚀产物源项的目

表 4 基于核素筛选方法得到的活化腐蚀产物主要核素的比活度及相对于高精度基准解的相对偏差

Tab. 4 Specific Activity of Main Nuclides of Activated Corrosion Products Obtained Based on Nuclide Screening Method and Their Relative Deviation from High-precision Benchmark Solution

核素	辐照区				非辐照区				冷却剂			
	氧化层		沉积层		氧化层		沉积层		离子		微粒	
	比活度/ (Bq·m ⁻²)	相对偏 差/%	比活度/ (Bq·m ⁻²)	相对偏 差/%	比活度/ (Bq·m ⁻²)	相对偏 差/%	比活度/ (Bq·m ⁻²)	相对偏 差/%	比活度/ (Bq·m ⁻³)	相对偏 差/%	比活度/ (Bq·m ⁻³)	相对偏 差/%
^{53}Fe	1.57×10^{10}	0	5.47×10^8	-0.18	7.54×10^{-1}	0	5.63×10^4	0	3.62×10^7	0	9.96×10^7	0
$^{53}\text{Fe}^m$	5.08×10^9	0	1.77×10^8	0	6.75×10^{-2}	0	5.04×10^3	-0.20	1.17×10^7	0	3.23×10^7	0
^{55}Fe	1.98×10^{11}	0	1.95×10^{10}	0.51	2.10×10^5	0.47	1.47×10^{10}	0.68	4.57×10^8	0	1.47×10^9	0
^{59}Fe	4.19×10^8	0	2.24×10^7	0	1.30×10^2	0	9.17×10^6	0	9.67×10^5	0	2.79×10^6	0
^{57}Co	8.43×10^{10}	0	7.27×10^9	0	7.30×10^4	-0.27	5.05×10^9	0.39	1.95×10^8	0	6.08×10^8	0
^{58}Co	5.18×10^{10}	0	3.17×10^9	-0.32	2.35×10^4	0	1.64×10^9	0	1.20×10^8	0	3.52×10^8	0
$^{58}\text{Co}^m$	3.41×10^{10}	0	1.19×10^9	0	9.36×10^1	0	6.98×10^6	0	7.86×10^7	0	2.16×10^8	0
^{60}Co	8.94×10^8	0.22	9.06×10^7	0.66	9.89×10^2	0.20	6.90×10^7	1.15	2.06×10^6	0	6.67×10^6	0.30
$^{60}\text{Co}^m$	7.75×10^9	0	2.71×10^8	-0.37	4.18×10^{-1}	0	3.12×10^4	0	1.79×10^7	-0.56	4.93×10^7	0
^{57}Ni	2.15×10^{10}	0	7.65×10^8	-0.26	2.38×10^2	0	1.77×10^7	0	4.96×10^7	0.20	1.37×10^8	0
^{63}Ni	3.60×10^7	0.28	3.76×10^6	0.79	4.15×10^1	0.24	2.91×10^6	1.36	8.31×10^4	0.24	2.71×10^5	0.37
^{51}Cr	3.47×10^{11}	0	1.63×10^{10}	0	6.93×10^4	0	4.98×10^9	0	8.01×10^8	0	2.28×10^9	0
^{55}Cr	1.88×10^9	0	6.56×10^7	-0.15	3.43×10^{-2}	0	2.56×10^3	0	4.34×10^6	0	1.19×10^7	0
^{54}Mn	3.32×10^{10}	0	2.93×10^9	0	2.97×10^4	0	2.06×10^9	0.48	7.67×10^7	0.13	2.41×10^8	0
^{56}Mn	2.10×10^{11}	0	7.35×10^9	-0.27	1.68×10^2	0	1.25×10^7	0	4.85×10^8	0	1.34×10^9	0

表 5 基于核素筛选方法的比活度计算结果和高精度基准解对比

Tab. 5 Comparison of Results Based on Nuclide Screening Method and High-precision Benchmark Solution

核素种类	活化腐蚀产物比活度						计算时间
	辐照区/(Bq·m ⁻²)		非辐照区/(Bq·m ⁻²)		冷却剂/(Bq·m ⁻³)		
	氧化层	沉积层	氧化层	沉积层	离子	微粒	
筛选后核素（数百种）	1.04×10^{12}	6.06×10^{10}	4.07×10^5	2.85×10^{10}	2.40×10^9	7.01×10^9	4.5 min
全部核素（数千种）	1.11×10^{12}	6.34×10^{10}	4.12×10^5	2.90×10^{10}	2.56×10^9	7.47×10^9	21 h
筛选后核素放射性贡献/%	93.7	95.6	98.8	98.3	93.7	93.9	—

“—”——无此项

核素, 满足计算需求。对于 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 $^{58}\text{Co}^m$ 、 ^{54}Mn 、 ^{55}Fe 、 ^{51}Cr 等放射性活度贡献较大的核素, 其计算结果相对于高精度基准解的相对偏差全部控制在 1.5% 以内, 说明筛选方法可以保证核素较完整的核反应关系网, 满足计算精度。在满足计算需求和计算精度的同时将计算时间由 21 h 缩短到 4.5 min, 计算效率提高了 279 倍。

3 结论

本文依托 CATE 程序, 对活化腐蚀产物源项计算进行加速研究。通过分析活化腐蚀产物源项模型的数学特性, 提出了一种基于量化偏离效应分析的核素筛选方法。随后将该方法应用于聚变堆稳态运行时 LIM-OBB 中活化腐蚀产物存留量的计算问题, 并与此问题下的高精度基准解进行对比。结果表明, ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{55}Fe 、 ^{51}Cr 等重要活化腐蚀产物核素的比活度计算结果相对于基准解的相对偏差均控制在 1.5% 以内; 应用核素筛选方法后的计算效率相对于基准解的计算效率提高了 279 倍。采用量化偏离效应分析的核素筛选方法能够保证目标核素计算精度的同时, 又能提高计算效率。

参考文献:

- [1] 刘原中. 轻水堆一回路中放射性核素浓度的计算方法及计算机程序[J]. 辐射防护, 1986, 6(6): 409-424.
- [2] RAFIQUE M, MIRZA N M, MIRZA S M, et al. Review of computer codes for modeling corrosion product transport and activity build-up in light water reactors[J]. Nukleonika, 2010, 55(3): 263-269.
- [3] KANG S, SEJVAR J. CORA-II model of PWR corrosion-product transport[R]. Pittsburgh: Westinghouse Electric Corp, 1985: 11-169.
- [4] NISHIMURA T, KASAHARA K. Improvement of crud behavior evaluation code (ACE)[C]//Proceedings of 1998 JAIF International Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants. Kashiwakazi: Japan Atomic Industrial Forum, 1998.
- [5] BESLU P, FREJAVILLE G, LALEX A. A computer code PACTOLE to predict activation and transport of corrosion products in a PWR[C]//Proceedings of an International Conference Organized by the British Nuclear Energy Society. Bournemouth: ICE, 1978.
- [6] DI PACE L, DACQUAIT F, SCHINDLER P, et al. Development of the PACTITER code and its application to safety analyses of ITER primary cooling water system[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82(3): 237-247.
- [7] LI L, ZHANG J Y, SONG W, et al. CATE: a code for activated corrosion products evaluation of water-cooled fusion reactor[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 100: 340-344.
- [8] LI L, ZHANG J Y, HE S X, et al. The development of two-phase three-node model used to simulate the transport of ACPs[J]. Progress in Nuclear Energy, 2017, 97: 99-105.
- [9] ZHANG J Y, LI L, HE S X, et al. Development of a three-zone transport model for activated corrosion products analysis of Tokamak cooling water system[J]. Fusion Engineering and Design, 2016, 109-111: 407-410.
- [10] 张竞宇, 李璐, 宋文, 等. 水冷聚变堆活化腐蚀产物源项分析程序开发[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(S1): 68-74.
- [11] FORREST R A, KOPECKY J, SUBLET J C. The European activation file: EAF-2007 neutron-induced cross section library[R]. Abingdon: EURATOM/UKAEA Fusion Association, 2007: 19-21.
- [12] 郭庆洋, 张竞宇, 陈义学. 聚变堆水冷回路中多物相活化腐蚀产物计算分析[J]. 核技术, 2019, 42(6): 060602.
- [13] GUO Q Y, ZHANG J Y, FANG S, et al. Activation analysis of coolant in a water-cooled loop of China fusion engineering test reactor[J]. Fusion Engineering and Design, 2018, 136: 694-698.
- [14] HINDMARSH A C. Ordinary differential equation system solver[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1992.
- [15] RADHAKRISHNAN K, HINDMARSH A C. Description and use of LSODE, the Livermore solver for ordinary differential equations[R]. Washington: NASA, 1993.
- [16] KARDITSAS P J. Activation product transport using TRACT: ORE estimation of an ITER cooling loop[J]. Fusion Engineering and Design, 1999, 45(2): 169-185.

(责任编辑: 左璇玉)