控制棒性能分析软件COTTON的开发与验证

王开元　杨盛智　卫小艳　陈忠村　金 鑫

（中广核研究院有限公司　深圳 518026）

摘要　控制棒通过吸收中子调节核反应堆功率，确保反应堆运行安全。为了评估控制棒在反应堆内长期运行条件下的辐照性能变化，开发了一款控制棒性能分析软件（COTTON）。该软件采用积分热导率方法实现了吸收体和包壳的温度计算，建立力学传递矩阵算法求解控制棒的应力应变，通过时间离散和空间离散方法实现了控制棒在全寿期内的行为模拟。采用核电厂池边检测试验数据对软件进行了验证评估，结果表明：软件计算值满足控制棒设计要求，包壳外径计算值（*P*）与测量值（*M*）吻合较好，*M*/*P* 的平均值为0.992，标准差为0.003。控制棒吸收体和包壳的温度计算值远低于熔点温度，吸收体温度裕量为393.9 ℃。利用COTTON软件已实现控制棒性能分析功能，能够为控制棒机械设计与运行提供技术支持。

关键词　控制棒，性能分析，积分热导率，传递矩阵，包壳外径，验证

中图分类号　TL99

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.240520

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.240520

Development and verification of control rod performance analysis code COTTON

WANG Kaiyuan　YANG Shengzhi　WEI Xiaoyan　CHEN Zhongcun　JIN Xin

(*China Nuclear Power Technology Research Institute Co. Ltd*, *Shenzhen 518026*, *China*)

Abstract　**[Background]** The control rod is mainly composed of neutron absorber, stainless steel cladding and absorber spring. During reactor operation, control rods modulate the reactor's power output by absorbing neutrons through the absorber, thereby ensuring its safe operation. **[Purpose]** This study aims to develop and verify a 1.5-dimensional control rod performance analysis software, named as COTTON, used to simulate the performance change process of control rods under the action of heat and radiation in the reactor. **[Methods]** First of all, a set of basic theoretical models, such as thermal analysis model, mechanical calculation model, internal pressure model and spring model, was established to analyze the radiation behavior of control rods with COTTON code. In particular, the integral thermal conductivity method and the mechanical transfer matrix algorithm were established for heat transfer and stress-strain calculation respectively. Then, the method of time discretization and space discretization were used to complete the software development, and the multidimensional analysis of the control rod at different times and different positions in its life cycle was realized. Finally, the validation assessment was conducted using pool-side inspection data from nuclear power plants by China Nuclear Power Technology Research Institute. **[Results]** Based on the operation example of nuclear power plant, the results show that the predicted values meet the design requirements. The temperature of the absorber and the cladding temperature are lower than the melting point, especially the temperature margin of the absorber is 393.9 ℃. The predicted value (*P*) of cladding diameter is in good

第一作者：王开元，男，1988年出生，2015年于哈尔滨工程大学获硕士学位，研究领域为反应堆工程安全分析软件研究，E-mail：wky20080795@126.com

收稿日期：2024-12-25，修回日期：2025-03-31

First author: WANG Kaiyuan, male, born in 1988, graduated from Harbin Engineering University with a master's degree in 2015, focusing on reactor engineering safety analysis software research, E-mail: wky20080795@126.com

Received date: 2024-12-25, revised date: 2025-03-31

agreement with the experiment data (*M*), the mean value of *M*/*P* is 0.992, and the standard deviation of *M*/*P* is 0.003. **[Conclusions]** The COTTON code proposed in this study integrates comprehensive functionality for analyzing control rod performance, offering technical support for both the mechanical design and operational processes.

Key words Control rod, Performance analysis, Integral thermal conductivity, Transfer matrix, Cladding diameter, Validation

控制棒是实现核反应堆启动、停堆和功率调节的重要反应性控制设备。压水堆控制棒由吸收体、包壳、弹簧等重要部件组成，长期处于高温、高压、中子辐照等复杂环境下，其热力机械性能不断发生变化，影响控制棒在堆内运行的可靠性[1]。在核反应堆控制棒发展历程中，国内外研究者普遍关注控制棒吸收体材料优化[2]、控制棒布置方案优化[3-4]，以及围绕控制棒快速、安全插入堆芯的时间长度问题[5-6]，针对控制棒落棒动力学领域开展了大量理论与试验研究[7-9]，以提升控制棒寿命与安全性。对于控制棒在反应堆内服役的综合性能变化鲜有研究报道，如控制棒运行寿期内几何尺寸连续变形研究。控制棒外径是影响控制棒能否有效插入堆芯的重要因素，与吸收体和包壳的辐照性能密切相关。压水堆控制棒吸收体主要采用银铟镉三元合金（80wt.% Ag，15wt.% In，5wt.% Cd），具有优异的中子吸收能力，但也存在力学性能较差，辐照变形较快的缺陷[10]。银铟镉吸收体在长期辐照条件下会发生明显的辐照肿胀变形。当控制棒吸收体-包壳间隙闭合后，银铟镉吸收体肿胀迫使包壳直径显著增大。这将影响控制棒在导向管内自由移动，甚至出现控制棒卡在导向管内的情况，导致控制棒失效[11]。在国际上，核电强国均有针对控制棒性能分析开发专业软件，如法国阿海珐CRABE软件、美国西屋ABROD软件，却鲜有研究成果公开报道。ABROD软件用于控制棒传热分析，无法进行力学分析。CRABE软件在计算精度上存在较大的偏差，尤其是对控制棒寿命预测过于保守。在国内，中国核动力研究设计院以“华龙一号”控制棒为研究对象，开展了棒束型控制棒机械性能分析方法研究[12]。

为解决控制棒长期服役期间的辐照性能变化模拟难题，实现控制棒性能分析软件自主可控，中广核研究院决定建立具有自主知识产权的控制棒性能分析软件COTTON。本文基于控制棒堆内辐照行为现象，从基本的棒束传热分析、力学分析、内压分析以及弹簧受力分析等理论模型出发，建立一套可在寿期内科学评估控制棒温度、内压以及几何尺寸变化的自主控制棒性能分析方法。基于这套方法完成软件开发，并使用电厂数据完成了软件验证评估。

1 理论模型

压水堆控制棒主要由银铟镉吸收体、不锈钢包壳和吸收体弹簧构成。COTTON软件是一款1.5维控制棒性能分析软件，用于模拟控制棒在堆内经受热、辐射作用下的性能变化过程，理论模型主要包括热学分析模型、力学分析模型、内压分析模型和弹簧分析模型。

1.1 热学分析模型

控制棒经受中子与伽马射线辐照产生热量，这些热量通过吸收体和包壳导热、吸收体-包壳间隙传热，最终由冷却剂将热量带出堆芯，传热过程如图1所示。为简化计算，控制棒传热分析假定控制棒为轴对称圆柱体，只考虑径向传热，忽略轴向传热和周向传热。控制棒温度计算采用逆传热过程，从控制棒包壳外侧向控制棒中心逐步计算，每一步的计算初值都来自上一步的计算结果，直到计算出控制棒中心温度。

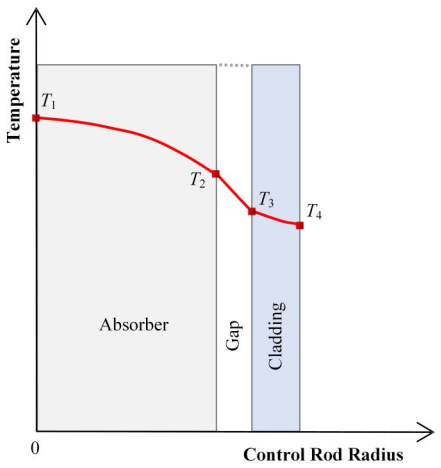


图1 控制棒传热过程示意图
Fig.1 The heat transfer diagram of control rod

1.1.1 温度分布计算

控制棒吸收体和包壳温度求解方法相同，本文以吸收体为例进行理论推导。在圆柱体坐标下，基于传热基本假设得到带内热源的一维稳态传热方程：

$$\begin{aligned}&\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T)r\frac{\partial T}{\partial r}\right)=-q_{\mathrm{V}}(r)\\&r=r_{\mathrm{i}}\qquad\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_{\mathrm{i}}}=0\\&r=r_{\mathrm{s}}\qquad T=T_{\mathrm{s}}\end{aligned}\tag{1}$$

式中：T_{s}为吸收体外表面温度，℃；r_{s}为吸收体外半径，m；r_{i}为吸收体内半径，m；λ为吸收体热导率，$\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot ℃^{-1}}$；$q_{\mathrm{V}}$为吸收体释热率，$\mathrm{W\cdot m^{-3}}$。释热率表示材料吸收中子后产生的热量密度。

温度变化对吸收体热导率影响显著，软件采用积分热导率方法求解吸收体温度分布，无须对热导率进行平均或者近似处理，可提升温度计算结果准确度。对式(1)进行积分处理可得吸收体温度计算方程：

$$\int_{T_{\mathrm{s}}}^{T}\lambda(T)\mathrm{d}T=\int_{r}^{r_{\mathrm{s}}}\frac{\mathrm{d}r''}{r''}\int_{r_{\mathrm{i}}}^{r''}r'q_{\mathrm{V}}(r)\mathrm{d}r'\tag{2}$$

式(2)右边项是吸收体半径和吸收体释热率的函数，通过在原积分区域内进行二重积分变换很容易求解，为简化表述令其等于Q。式(2)左边项，只需将吸收体热导率模型代入后进行积分处理，即可转换为关于温度的多项式形式。

在软件计算中，吸收体径向分为n个细环，总共N(N=n+1)个径向节点。边界条件为吸收体外表面温度，并且每个相邻细环的交界面处温度相等。令吸收体细环上的温差为：

$$\delta T=T(i)-T(i+1)\tag{3}$$

式中：$T(i)$、$T(i+1)$分别表示第i环的内表面温度和外表面温度，℃。

假定吸收体的热导率公式形式如下：

$$\lambda(T)=a_1+a_2\cdot T+a_3\cdot T^2+a_4\cdot T^3\tag{4}$$

式中：a_1、a_2、a_3、a_4分别为热导率模型系数。

联立式(2)~(4)可以将热导率积分项化简为：

$$\begin{aligned}\int_{T(i+1)}^{T(i)}\lambda(T)\mathrm{d}T&=\sum_{j=1}^{4}\frac{a_j}{j}\left[\left(\delta T+T(i+1)\right)^j-T^j(i+1)\right]\\&=\sum_{j=1}^{4}\left(\delta T^j\cdot X_j\right)\end{aligned}\tag{5}$$

$$\begin{aligned}X_1&=\sum_{j=1}^{4}a_jT^{j-1}(i+1)\\X_2&=\frac{1}{2}a_2+a_3T(i+1)+\frac{3}{2}a_4T^2(i+1)\\X_3&=\frac{1}{3}a_3+a_4T(i+1)\\X_4&=\frac{1}{4}a_4\end{aligned}\tag{6}$$

根据上述推导，可以得到吸收体温度求解的代数方程。

$$\sum_{j=1}^{4}\left(\delta T^j\cdot X_j\right)=Q\tag{7}$$

软件采用Newton-Raphson方法求解上述代数方程，求得细环内表面温度，再根据相邻细环界面温度相等的连续性条件，即可得到吸收体径向节点温度分布。采用相同方法，以包壳外表面温度为边界条件可以计算得到包壳径向温度分布。

1.1.2 吸收体-包壳间隙传热

吸收体-包壳间隙传热包括气体换热、辐射换热和接触导热三部分，用于计算间隙温升，将包壳与吸收体传热耦合在一起。吸收体-包壳间隙温升计算公式如下：

$$\Delta T_{\mathrm{gap}}=\frac{q''}{h_{\mathrm{gap}}}\tag{8}$$

$$h_{\mathrm{gap}}=h_{\mathrm{irr}}+h_{\mathrm{gas}}+h_{\mathrm{con}}\tag{9}$$

式中：ΔT_{gap}为吸收体-包壳间隙温升，℃；q''为吸收体外表面的热流密度，$\mathrm{W\cdot m^{-2}}$；h_{gap}为间隙总传热系数，$\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}}$；$h_{\mathrm{irr}}$为辐射换热系数，$\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}}$；$h_{\mathrm{gas}}$为气体导热系数，$\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}}$；$h_{\mathrm{con}}$为吸收体-包壳接触热导系数，$\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}}$。

式(9)中辐射换热采用经典的Stefan-Boltzmann模型[13]，气体换热采用Wesley-Yovanovich模型[14]，接触导热采用Mikic-Todreas修正模型[15]计算，最终求得间隙总传热系数，计算间隙温升。

1.2 力学分析模型

控制棒应力应变计算可以假定为轴对称问题。图2给出了控制棒吸收体和包壳局部空间内的微元体圆柱坐标系示意图。控制棒力学分析采用平面弹性应变假设，同一轴向高度上的轴向弹性应变为常数，通过求解带有边界条件的几何方程、应力平衡方程并结合应力-应变本构关系式，计算控制棒的应力与应变。

1)几何方程

$$\varepsilon_r^{\mathrm{el}}=\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}r},\ \varepsilon_\theta^{\mathrm{el}}=\frac{u}{r},\ \varepsilon_z^{\mathrm{el}}=\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}z}\tag{10}$$

2)本构方程

$$\begin{aligned}\sigma_r&=\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_r^{\mathrm{el}}+\nu(\varepsilon_\theta^{\mathrm{el}}+\varepsilon_z^{\mathrm{el}})\right]\\\sigma_\theta&=\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_\theta^{\mathrm{el}}+\nu(\varepsilon_r^{\mathrm{el}}+\varepsilon_z^{\mathrm{el}})\right]\\\sigma_z&=\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_z^{\mathrm{el}}+\nu(\varepsilon_\theta^{\mathrm{el}}+\varepsilon_r^{\mathrm{el}})\right]\end{aligned}\tag{11}$$

3)应力平衡方程

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_r}{\mathrm{d}r}+\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{r}=0\tag{12}$$

4)轴向力平衡方程

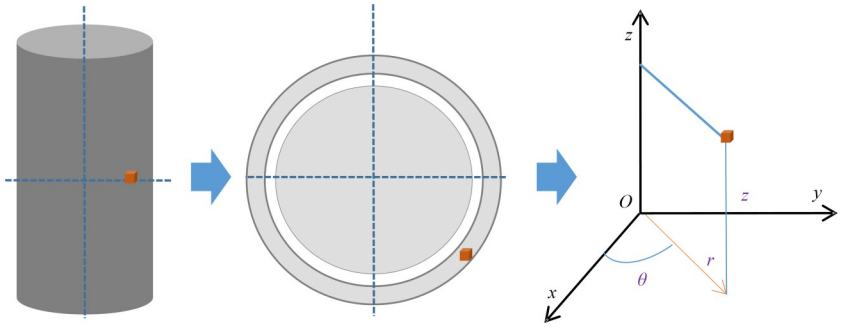


图2 控制棒微元体圆柱坐标系示意图
Fig.2 The cylindrical coordinate diagram of control rod microelement

$$\int r\sigma_z(r)\mathrm{d}r = -F_z/2\pi \tag{13}$$

式中：E为杨氏模量，MPa；v为泊松比；u为径向位移，mm；w为轴向位移，mm；F_z为轴向作用力（考虑弹簧对吸收体的压紧力），N；σ代表应力，MPa；$\varepsilon^{\mathrm{el}}$代表弹性应变；$r$、$\theta$、$z$作为下标分别代表径向、环向和轴向三个方向；el作为上标代表弹性应变。

同传热分析一样，在力学计算中控制棒几何结构被划分为多个同心圆环，包壳作为一个独立圆环。本文采用传递矩阵算法进行力学应力应变计算。针对每一个圆环，在考虑非弹性变形后联立求解带有边界条件的几何方程、应力平衡方程以及应力-应变本构关系，建立包壳外表面的径向位移$u^c(R_o^c)$、径向应力$\sigma_r(R_o^c)$以及轴向应变ε_z^c之间的传递矩阵关系，具有形式简单、求解速度快的特点。非弹性变形主要考虑了吸收体辐照肿胀、吸收体热蠕变、包壳辐照肿胀、包壳辐照蠕变以及热应力影响。

$$\begin{pmatrix} u^c(R_o^c) \\ \sigma_r(R_o^c) \\ \varepsilon_z^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{1,1}^c & T_{1,2}^c & T_{1,3}^c \\ T_{2,1}^c & T_{2,2}^c & T_{2,3}^c \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u^c(R_i^c) \\ \sigma_r(R_i^c) \\ \varepsilon_z^c \end{pmatrix} = \boldsymbol{T}^c \begin{pmatrix} u^c(R_i^c) \\ \sigma_r(R_i^c) \\ \varepsilon_z^c \end{pmatrix} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} T_{1,1}^c &= \frac{1}{2(1-v)} \frac{1}{R_i^c R_o^c} \left[(1-2v)\left(R_o^c\right)^2 + \left(R_i^c\right)^2\right] \\ T_{1,2}^c &= \frac{(1+v)(1-2v)}{2(1-v)E} \frac{\left(R_o^c\right)^2 - \left(R_i^c\right)^2}{R_o^c} \\ T_{1,3}^c &= -\frac{v}{2(1-v)} \frac{\left(R_o^c\right)^2 - \left(R_i^c\right)^2}{R_o^c} \\ T_{2,1}^c &= \frac{E}{2(1-v^2)} \frac{\left(R_o^c\right)^2 - \left(R_i^c\right)^2}{\left(R_o^c\right)^2 R_i^c} \\ T_{2,2}^c &= \frac{1}{2(1-v)} \frac{\left(R_o^c\right)^2 + (1-2v)\left(R_i^c\right)^2}{\left(R_o^c\right)^2} \\ T_{2,3}^c &= \frac{Ev}{2(1-v^2)} \frac{\left(R_o^c\right)^2 - \left(R_i^c\right)^2}{\left(R_o^c\right)^2} \end{aligned} \tag{15}$$

式中：R_i^c、R_o^c为考虑非弹性应变后的包壳内、外壁半径，mm；c作为上标代表包壳；$\boldsymbol{T}^c$为3阶传递矩阵，可实现包壳内径处的应力、位移、应变与外径之间的传递。

当吸收体-包壳间隙闭合后，控制棒包壳和吸收体径向变形满足如下几何关系：

$$u^c(R_i^c) + R_i^c = u^f(R_{N+1}) + R_{N+1} \tag{16}$$

式中：$u^c(R_i^c)$为包壳内壁的径向位移，mm；$u^f(R_{N+1})$为吸收体外表面的径向位移，mm；R_{N+1}为考虑所有非弹性应变后的吸收体外半径，mm；f作为上标代表吸收体。

假定间隙闭合后吸收体-包壳发生轴向锁定，吸收体和包壳的轴向变形量相同：

$$h^c - h_{\mathrm{bos}}^c = h^{f,\mathrm{OD}} - h_{\mathrm{bos}}^{f,\mathrm{OD}} \tag{17}$$

式中：h^c为考虑所有非弹性和弹性应变后包壳的轴向高度，mm；$h^{f,\mathrm{OD}}$为考虑所有非弹性和弹性应变后吸收体外径处的轴向高度，mm；h_{bos}^c为在时间步开始时刻包壳的轴向高度，mm；$h_{\mathrm{bos}}^{f,\mathrm{OD}}$为在时间步开始时刻吸收体外径处的轴向高度，mm；OD作为上标代表外径位置；bos作为下标代表初始时刻。

最后，在考虑所有弹性应变和非弹性应变贡献后，基于传递矩阵方法计算得到包壳外径处的变形$u^c(R_o^c)$、包壳中径处的各方向主应力：

$$u^c(R_o^c) = T_{1,1}^c u^c(R_i^c) - T_{1,2}^c P_{\mathrm{gas}} + T_{1,3}^c \varepsilon_z^c \tag{18}$$

$$\begin{aligned} \sigma_r(r) = &\frac{\left(R_i^c\right)^2\left(P_{\mathrm{gas}} + P_{\mathrm{con}}\right) - \left(R_o^c\right)^2 P_{\mathrm{cool}}}{\left(R_o^c\right)^2 - \left(R_i^c\right)^2} - \\ &\frac{\left(R_i^c \cdot R_o^c\right)^2}{\left(\left(R_o^c\right)^2 - \left(R_i^c\right)^2\right) r^2}\left(P_{\mathrm{gas}} + P_{\mathrm{con}} - P_{\mathrm{cool}}\right) \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta(r) = &\frac{\left(R_i^c\right)^2\left(P_{\mathrm{gas}} + P_{\mathrm{con}}\right) - \left(R_o^c\right)^2 P_{\mathrm{cool}}}{\left(R_o^c\right)^2 - \left(R_i^c\right)^2} + \\ &\frac{\left(R_i^c \cdot R_o^c\right)^2}{\left(\left(R_o^c\right)^2 - \left(R_i^c\right)^2\right) r^2}\left(P_{\mathrm{gas}} + P_{\mathrm{con}} - P_{\mathrm{cool}}\right) \end{aligned} \tag{20}$$

$$\sigma_z(r)=\frac{\left(R_i^c\right)^2P_{\text{gas}}-\left(R_o^c\right)^2P_{\text{cool}}+F_z^{\text{lock}}}{\left(R_o^c\right)^2-\left(R_i^c\right)^2} \tag{21}$$

式中：P_{gas}为吸收体-包壳间隙气体压力，MPa；P_{cool}为冷却剂压力，MPa；P_{con}为间隙接触压力，MPa；F_z^{lock}为包壳内表面轴向力，N。

1.3 内压分析模型

假定控制棒间隙气体满足理想气体状态方程，通过控制棒内的气体总量、各空间区域的温度和体积关系，计算控制棒内压。

$$P=R\frac{N_{\text{mol}}}{\sum_i\left(V_i/T_i\right)} \tag{22}$$

式中：P为控制棒内压，Pa；R为理想气体常数8.314，J·mol^{-1}·K^{-1}；V_i为第i种空间位置所占的体积，m^3；N_{mol}为总的气体摩尔数，mol；T_i为在V_i空间内的气体平均温度，K；下标i代表不同空间位置，如间隙、中心孔、开口孔隙、吸收体掉块、气腔等。

1.4 弹簧分析模型

控制棒吸收体弹簧用于固定吸收体，防止吸收体窜动。弹簧分析模型通过计算弹簧变形获得弹簧施加在吸收体轴向方向的压紧力，用于吸收体力学分析。

$$F_{\text{spr}}=K\cdot\left(L_{\text{th}}-H\right) \tag{23}$$

式中：F_{spr}为弹簧压紧力，N；K为弹簧刚度，N·m^{-1}；L_{th}为弹簧热态自由长度，m；H为反应堆运行时弹簧长度，m。

2 软件设计

COTTON软件基于反应堆内特定功率史条件，计算得到控制棒温度、内压和几何尺寸等关键性能结果。为此，软件采用时间离散和空间离散的方法，实现控制棒在寿期内不同时间、不同位置的多维度分析。时间离散指将整个运行期离散成多个时间步，以模拟辐照功率动态变化过程。空间离散指将控制棒吸收体在轴向分为多个轴向段，然后再将每一个轴向段进行径向分区，如图3所示。

COTTON软件计算流程如图4所示，包括两个循环和一个迭代。两个循环指时间步循环和轴向段循环，一个迭代指热力机械迭代。对于每个轴向段存在热力机械迭代，收敛判断的标准是间隙尺寸是否收敛。软件计算流程实现过程如下：

1）调用输入模块，从输入文件中读取输入参数；

2）调用数据处理模块，进行控制棒结构尺寸、辐照功率史等数据预处理；

3）读取一个时间步的功率史信息，并调用算法模块（热学分析、力学分析、内压分析和弹簧分析等），利用各计算子模块进行控制棒性能分析；

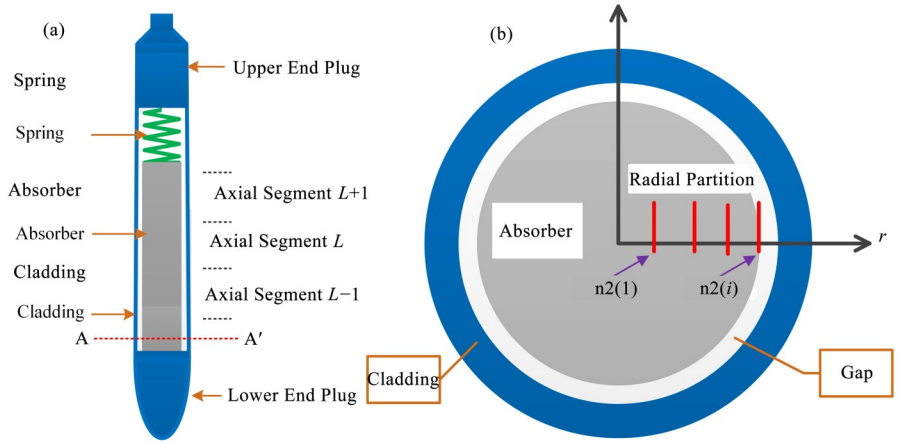


图3 控制棒空间离散示意图 (a) 轴向离散，(b) 径向离散

Fig.3 The space discrimination diagram of control rod (a) Axial discretization, (b) Radial discretization

4）若计算时间达到结束时间，则转到5）输出计算结果；否则，转到3）进行下一个时间步的控制棒性能分析；

5）调用输出模块，将控制棒性能分析结果写到结果文件中。

3 结果与讨论

本文以大亚湾核电厂1、2号机组反应堆控制棒中的3个温度调节棒组（R棒组）为例，基于堆内辐照运行功率史和池边检测数据开展控制棒性能分析软件验证分析。在正常功率运行期间，R棒组下端长期处于堆芯活性区内，经受高温、高中子注量辐照，

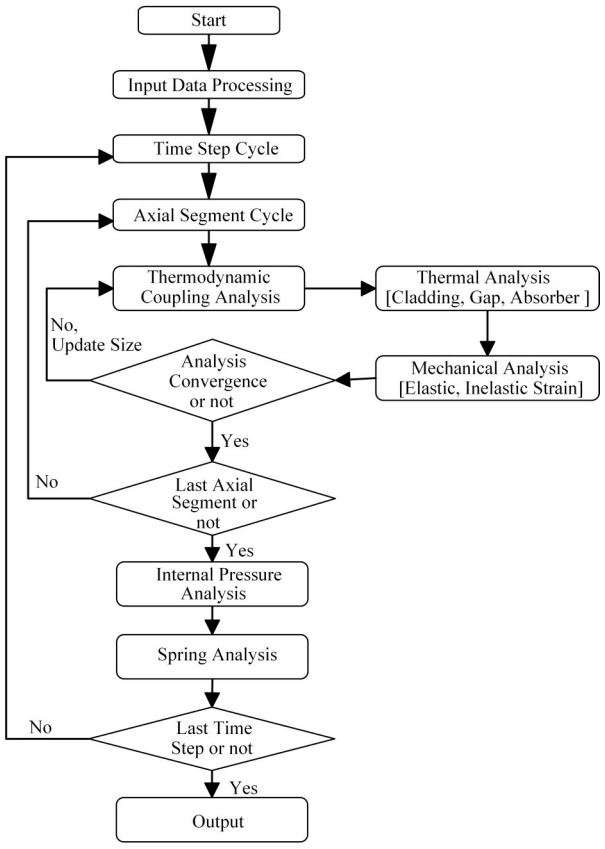


图4 COTTON计算流程图
Fig.4 Calculation flow chart of COTTON

对开展控制棒性能变化研究具有很好的代表性。以上控制棒由银铟镉吸收体、316L不锈钢包壳、吸收体弹簧等组成，基础参数见表1[16-17]。

基于R棒组控制棒初始几何参数、冷却剂边界条件和功率史等参数共制备了3个验证算例，其中算例A和B经历了11个换料循环，算例C经历了12个换料循环。图5给出了三个算例在全寿期内的吸收体最大释热率变化趋势，图中释热率大小反映了控制棒插入堆芯活性区位置深度和功率大小水平。从整体趋势看，算例C的释热率最大，算例B略低，且明显大于算例A的释热率。这对于中子注量参数也是相同的变化趋势。软件计算得到服役期内的控制棒温度、包壳外径、内压等关键参数，并与设计限值和试验数据进行对比分析。

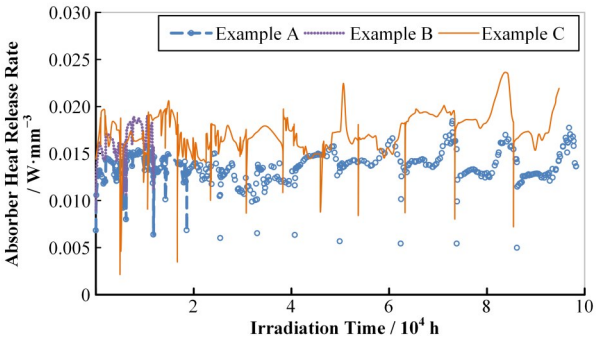


图5 吸收体释热率随时间变化（彩图见网络版）
Fig.5 Variation of absorber heat release rate with time (color online)

3.1 温度分析

表2给出了控制棒最大温度计算值与熔点对比结果。结果表明，在当前辐照运行功率史条件下，吸收体和包壳的最大温度均低于对应材料的熔点，具有较大的温度裕量，满足设计准则要求[18]。从表2可知，对于吸收体中心温度和包壳内表面温度，算例C略大于算例B，明显大于算例A，这与各算例的释热率变化密切相关。

表1 控制棒基础参数
Table 1 The control rod basic parameter

参数项Parameter	参数值Value
吸收体材料Absorber material	银铟镉Silver indium cadmium（80wt.% Ag，15wt.% In，5wt.% Cd）
包壳材料Cladding material	AISI 316L
弹簧材料Spring material	AISI 302
吸收体外径（变径段）Absorber diameter (reducer) / mm	8.665（8.53）
包壳外径Cladding diameter / mm	9.7
吸收体总长度Absorber overall length / mm	3 606.8
导向管变径段内径 Guide tube inside diameter at the reduced section / mm	10.09
服役时间Service time in pile / a	12~14

图6给出了控制棒底部区域的吸收体中心温度随时间变化关系。吸收体温度与释热率密切相关，各算例的吸收体中心温度大小变化与释热率变化基本一致。算例C和算例B的吸收体中心温度整体明显大于算例A。控制棒不同于燃料棒，没有剧烈的裂变反应，辐照过程中发热量较低，因此控制棒温度变化幅度较小。从图6可知，控制棒吸收体中心温度在寿期初期达到最大值，随后出现了显著下降现

表2 控制棒温度计算结果与熔点对比
Table 2 Comparison of control rod temperature calculation results with melting point

参数 Parameter		最大计算值 Maximum calculated value / ℃	熔点（设计限值） Melting point (design limit) / ℃
吸收体中心温度 Absorber center temperature	Example A	358.2	758.0[19]
	Example B	360.3	
	Example C	364.1	
包壳内表面温度 Cladding inner temperature	Example A	346.2	1 402.0[20]
	Example B	346.4	
	Example C	346.5	

象。这主要是吸收体外径在蠕变和辐照肿胀作用下不断增加，控制棒间隙宽度逐渐减小直至闭合，间隙换热系数显著增强，导致吸收体中心温度显著下降。由于在每一个换料循环结束后，反应堆重新启动，在控制棒插入达到预定位置过程中的释热率较低，从而吸收体温度较低，所以出现图中温度曲线脉动的情况。

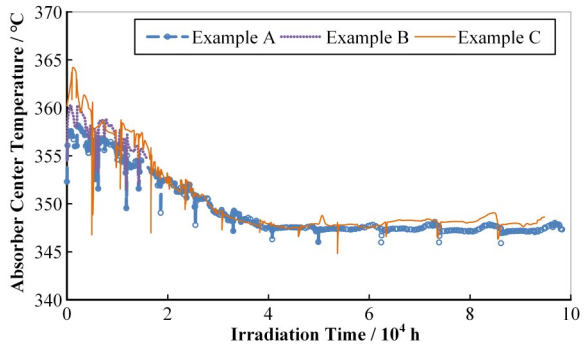


图6 吸收体中心温度随时间变化（彩图见网络版）
Fig.6 Variation of absorber center temperature with time (color online)

3.2 包壳外径分析

控制棒包壳外径变化受中子辐照、高温蠕变及吸收体肿胀变形的协同作用，其中吸收体-包壳间隙闭合后由吸收体辐照肿胀主导变形机制。本研究采用的控制棒服役时间超过 12 a，其底部因长期处于堆芯活性区已形成间隙闭合状态，包壳进入塑性扩张阶段。

以算例C的模拟结果为例（图7），寿期末控制棒包壳外径与热中子注量呈现显著的轴向关联性分布。计算结果表明，包壳外径最大值出现在控制棒底部区域，随后沿轴向快速衰减并趋于稳定。这种空间分布特征源于底部区域长期处于高功率密度区，热中子注量高达 5.4×10^{21} n·cm^{-2}，促使吸收体产生显著肿胀变形。当肿胀体积超过初始间隙容限后，包壳在双轴应力状态下发生塑性扩张。而随着轴向位置升高，中子注量呈指数级衰减，肿胀减小，对应位置的间隙空间可有效容纳吸收体肿胀，因此控制棒上部区域的包壳外径显著降低。

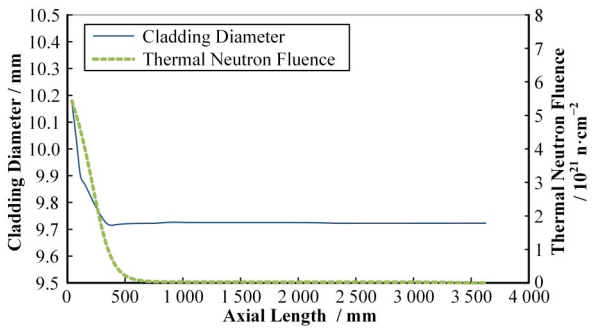


图7 寿期末包壳外径与热中子注量的轴向分布
Fig.7 Axial distribution of cladding diameter and thermal neutron fluence at end of life

图8进一步展示了R棒组在寿期末、冷态条件（40 ℃）下的包壳外径验证结果。通过对比23根控制棒底部区域的包壳外径测量数据，发现包壳外径计算值（P）与测量值（M）具有良好一致性：M/P平均值为0.992，M/P标准差为0.003。这表明COTTON软件具备了控制棒包壳外径准确计算能力，这对工程安全评估具有重要价值。

在控制棒运行过程中，为保证控制棒能够自由插入导向管底部，控制棒包壳外径不允许大于导向

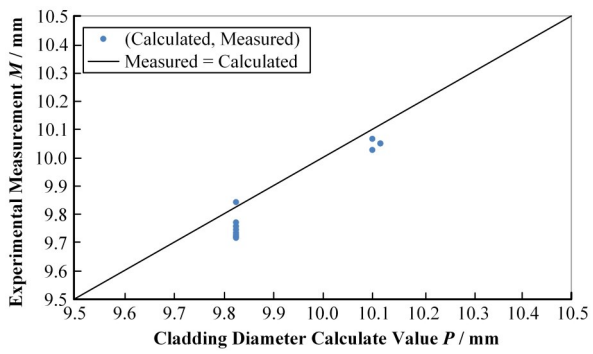


图8 包壳外径计算值与测量值对比
Fig.8 Comparison of cladding outer diameter calculation results with experimental data

管内径。以算例C为例，控制棒在辐照结束时间点（第12循环末期）出现不能完全落入导向管底部的情况[11]，软件计算输出警告信息。由图9可知，当前R棒组控制棒包壳外径计算值在控制棒间隙闭合前，因受到内外压差作用的蠕变影响，包壳外径相对初始值略微降低。随着辐照运行时间增加，控制棒间隙闭合后，包壳外径因受到吸收体肿胀影响而不断增加。在达到一定辐照剂量后因吸收体肿胀速率加大出现控制棒包壳外径快速增加的现象，很快达到并超过导向管内径值，诱发控制棒卡涩，不能完全落入堆芯。这是因为银铟镉吸收体中的银和铟元素辐照嬗变引起材料成分和组织结构显著变化，从银铟镉三元合金演变为四元合金，随着嬗变产物锡浓度增加，产生第二相析出物（六方相结构），肿胀速率显著增加[21]。计算结果表明，图中交叉点Z为控制棒包壳外径大于导向管内径的起始时间（已运行3 803个等效满功率天，即控制棒寿命预测值），相对于辐照结束时间，即实际发现卡涩的时间，提前了146 d。交叉点Z时间处于当前第12循环中后期，与实际卡涩时间点处于同一循环。因此，当前软件能够为控制棒尺寸变化过大引起的卡涩风险提供预警，对控制棒换料设计具有重要指导意义。

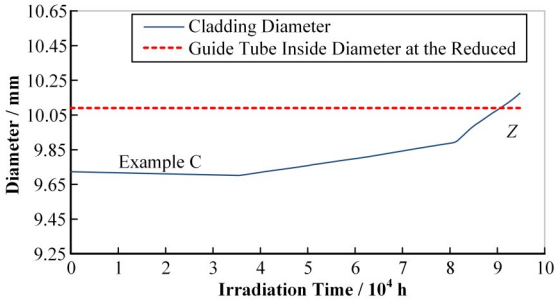


图9 包壳外径随时间变化
Fig.9 Variation of cladding diameter with time

3.3 内压分析

表3给出了R棒组在辐照运行中的控制棒内压与系统名义压力对比结果。结果表明，当前控制棒内压计算值远低于反应堆一回路系统压力15.5 MPa，满足控制棒内压低于系统压力的设计要求[18]，且具有较大的内压裕量。这主要是因为银铟镉吸收体在辐照过程中并未产生额外气体，控制棒预充压力较低，内压变化主要受温度和自由体积影响。此外，对于采用碳化硼作为吸收体材料的控制棒，需要重点关注控制棒寿期内的内压变化，因为碳化硼吸收中子后释放氦气，造成内压升高。COTTON软件具备碳化硼分析功能，相关内容已进行了研究报道[22]。

表3 控制棒内压计算结果与系统压力对比
Table 3 Comparison of control rod inner pressure calculation results with system pressure value

参数 Parameter		最大计算值 Maximum calculated value / MPa	系统名义压力 System nominal value / MPa
控制棒内压 Control rod inner pressure	Example A	0.286	15.5
	Example B	0.294	
	Example C	0.302	

4 结语

控制棒性能分析软件COTTON实现了控制棒温度、内压和几何尺寸分析功能，本文对软件的理论模型和软件设计进行了介绍，并采用试验数据和设计准则对软件计算准确性进行验证评估。结果表明，软件针对银铟镉控制棒的温度、内压计算结果符合设计准则要求，控制棒包壳外径预测值与试验数据吻合较好。COTTON软件具备了控制棒性能分析能力，能够为控制棒机械设计与运行提供技术支持。

作者贡献声明 王开元负责论文研究，软件模型开发与验证，撰写论文；杨盛智负责背景调研与论文修改；卫小艳负责实验数据整理；陈忠村负责软件测试分析；金鑫负责技术指导。

参考文献

1 Bourgoin J, Couvreur F, Gosset D, *et al*. The behaviour of control rod absorber under irradiation[J]. Journal of Nuclear Materials, 1999, **275**(3): 296 – 304. DOI: 10.1016/S0022-3115(99)00124-5.

2 黄波, 江鸿, 贺周同, 等. 熔盐堆石墨控制棒套管碳纤维布增强工艺及性能研究[J]. 核技术, 2021, **44**(4): 040602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040602.
HUANG Bo, JIANG Hong, HE Zhoutong, *et al*. Study on the reinforcement process and performance of carbon fiber fabric for graphite control rod guide tube of molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(4): 040602.

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040602.

3 吴智强, 谢金森, 娄磊, 等. 长寿期小型棒控压水堆控制棒方案研究[J]. 核技术, 2024, **47**(3): 030604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030604.
WU Zhiqiang, XIE Jinsen, LOU Lei, *et al*. Control rod strategy for long-term small rod-controlled pressurized water reactors[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(3): 030604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030604.

4 李长征, 林少芳, 曹进, 等. 控制棒组件置换策略优化研究[J]. 核动力工程, 2020, **41**(1): 54–58. DOI: 10.13832/j.jnpe.2020.01.0054.
LI Changzheng, LIN Shaofang, CAO Jin, *et al*. Optimization of shuffling strategy for rod cluster control assemblies[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, **41**(1): 54–58. DOI: 10.13832/j.jnpe.2020.01.0054.

5 刘新, 陈先龙, 张修, 等. 控制棒下落时间计算模型[J]. 核技术, 2014, **37**(11): 110604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.110604.
LIU Xin, CHEN Xianlong, ZHANG Xiu, *et al*. Calculation model of controlling rod drop time[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(11): 110604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.110604.

6 张恒凯, 柳继坤, 赵云涛, 等. CPR1000型核电机组控制棒组件落棒时间的验收准则初步优化[J]. 核科学与工程, 2022, **42**(6): 1291–1295.
ZHANG Hengkai, LIU Jikun, ZHAO Yuntao, *et al*. Criterion optimization of the rod drop time of the control rod assembly in CPR1000 nuclear power plant[J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, **42**(6): 1291–1295.

7 莫锦涛. 一种基于重叠网格的反应堆控制棒落棒行为分流域耦合仿真方法[J]. 核技术, 2020, **43**(5): 050605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.050605.
MO Jintao. A multi-field coupling simulation method for rod dropping behavior based on overset mesh[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(5): 050605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.050605.

8 Jiang X J, Zhou W, Hou J. Construction of fault diagnosis system for control rod drive mechanism based on knowledge graph and Bayesian inference[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(2): 21. DOI: 10.1007/s41365-023-01173-8.

9 Yoon K H, Kim J Y, Lee K H, *et al*. Control rod drop analysis by finite element method using fluid–structure interaction for a pressurized water reactor power plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, **239**(10): 1857–1861. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2009.05.023.

10 IAEA-TECDOC-1132. Control assembly materials for water reactors: experience, performance and perspectives [R]. Proceedings of a Technical Committee Meeting Held in Vienna, 1998.

11 环境保护部核与辐射安全监管二司, 环境保护部核与辐射安全中心. 中国核电厂运行事件综合报告[M]. 2012版. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 173–177.
Nuclear Power Safety Regulation Department, Nuclear and Radiation Safety Center. Comprehensive report on operation events of China nuclear power plant[M]. 2012 ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2012: 173–177.

12 秦勉, 蒲曾坪, 陈平, 等. “华龙一号”控制棒机械性能分析方法研究[J]. 核动力工程, 2017, **38**(6): 170–174. DOI: 10.13832/j.jnpe.2017.06.0170.
QIN Mian, PU Zengping, CHEN Ping, *et al*. Method study on mechanical performance analysis for control rod used in HPR1000[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, **38**(6): 170–174. DOI: 10.13832/j.jnpe.2017.06.0170.

13 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.

14 Wesley D A, Michael Yovanovich M. A new gaseous gap conductance relationship[J]. Nuclear Technology, 1986, **72**(1): 70–74. DOI: 10.13182/nt86-a33754.

15 Geelhood P B K J, Luscher W G, Beyer C E. FRAPCON-3.4: a computer code for the calculation of steady state thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup[M]. Washington, DC: U. S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, 2011.

16 陈宝山, 刘承新. 轻水堆燃料元件[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 77–80.
CHEN Baoshan, LIU Chengxin. Light water reactor fuel element[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 77–80.

17 广东核电培训中心. 900 MW压水堆核电站系统与设备(上册)[M]. 2版. 北京: 原子能出版社, 2007: 55−56.
Guangdong Nuclear Power Training Center. 900 MW PWR nuclear power plant system and equipment (Volume I) [M]. 2nd ed. Beijing: Atomic Energy Press, 2007: 55−56.

18 国家能源局. 压水堆核电厂反应堆系统设计堆芯 第4部分: 燃料相关组件: NB/T 20057.4—2012[S]. 北京: 原

子能出版社, 2012.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. PWR nuclear power plants reactor system design-Core-Part 4: Core components: NB/T 20057.4—2012[S]. Beijing: Atomic Energy Press, 2012.

19 李继威, 薛晶晶, 刘家正, 等. 银铟镉吸收体棒性能研究[J]. 动力工程学报, 2016, **36**(5): 416–420. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7607.2016.05.013.
LI Jiwei, XUE Jingjing, LIU Jiazheng, *et al*. Performance study of silver-indium-cadmium absorber rods[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, **36**(5): 416–420. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7607.2016.05.013.

20 Pichler P, Leitner T, Kaschnitz E, *et al*. Surface tension and thermal conductivity of NIST SRM 1155a (AISI 316L stainless steel) [J]. International Journal of Thermophysics, 2022, **43**(5): 66. DOI: 10.1007/s10765-022-02991-5.

21 Chen H S, Xiao H X, Long C S, *et al*. A model for calculating the irradiation swelling of AgInCd absorber in nuclear control rods[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2024, **56**(2): 552–557. DOI: 10.1016/j.net.2023.10.032.

22 Wang K, Liu X, Jin X. Analysis and ealuation of prformance for eriched B_4C asorber ued as cntrol rod[C]. International Conference on Nuclear Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2022, **86410**: V07AT07A021.