

文章编号: 0258-0926(2021)03-0080-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.03.0080

# 数值拟合方法评价燃料芯块制造参数对燃料棒性能的影响

王 坤, 张 坤, 邢 硕, 何 梁, 殷明阳

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:** 从理论计算模型出发, 分析出与燃料棒性能相关的芯块制造参数, 并采用自主研发的 FUPAC 燃料棒性能分析软件, 逐一针对这些参数进行敏感性分析, 筛选影响燃料棒性能的关键参数。基于大量敏感性分析计算数据, 采用数值拟合的方法获得了关键参数与燃料棒性能间的变化关系函数, 实现了对芯块制造参数所致燃料棒性能影响的快速、准确评价。对数值拟合方法与专业软件分析的结果进行对比验证, 结果表明: 数值拟合方法可以高效地分析燃料芯块制造参数对燃料棒性能的影响。

**关键词:** 燃料芯块; 制造参数; 数值拟合; 燃料棒性能; FUPAC

**中图分类号:** TL352 **文献标志码:** A

## Evaluation of Effect of Fuel Pellet Manufacturing Parameters on Fuel Rod Performance by Numerical Fitting Method

Wang Kun, Zhang Kun, Xing Shuo, He Liang, Yin Mingyang

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** Based on the theoretical calculation model, the manufacturing parameters related to the performance of fuel rods are obtained. With the help of FUPAC fuel rod performance analysis software, the sensitivity analysis of the parameters is carried out one by one, and the key parameters affecting the performance of fuel rods are selected. Based on a large number of calculation data of sensitivity analysis, the relationship function between the key parameters and the fuel rod performance is obtained by numerical fitting method, and the rapid and accurate evaluation of the effect of the manufacturing parameters of the pellet on the fuel rod performance is realized. The conclusion is that the numerical fitting method can effectively analyze the effect of fuel pellet manufacturing parameters on fuel rod performance through comparing the results of numerical fitting method and professional software analysis.

**Key words:** Fuel pellet, Manufacturing parameter, Numerical fitting, Fuel rod performance, FUPAC

### 0 引言

燃料棒性能受到芯块、包壳的多种堆内行为及其物性参数的综合影响, 过程非常复杂, 其堆内性能评价通常在设计定型后, 采用专业分析软件完成, 过程中涉及大量接口参数且耗时较长。

考虑到在燃料棒零部件的制造质量控制优化

和结构参数设计改进等领域, 需要快速、准确地判断物性参数变化对燃料棒性能产生的影响, 本文通过对理论计算模型的分析, 并基于自主开发的 FUPAC 燃料棒性能分析软件, 通过数值拟合的方法获得燃料芯块制造参数与燃料棒性能间的变化关系函数, 实现了在不借助专业分析软件的

收稿日期: 2020-06-16; 修回日期: 2020-11-27

作者简介: 王 坤 (1981—), 男, 工程师, 现从事核燃料元件设计研究, E-mail: wangkun731@sina.com

情况下，为燃料芯块制造过程中的质量控制优化提供数据支撑。

## 1 理论计算模型分析

对 FUPAC 软件理论计算模型的分析旨在筛选出与燃料棒性能表现（如内压、燃料中心温度、氧化膜厚度、包壳应变、包壳应力）有关的燃料芯块制造参数。

### 1.1 内压

燃料棒内的气体遵循理想气体状态方程，即：

$$P = R \frac{\sum_i n_i}{\sum_i \frac{V_i}{T_i}} \quad (1)$$

式中， $i$  为自由空间； $P$  为内压，Pa； $V_i$  为燃料棒内某一自由空间的体积， $m^3$ ； $n_i$  为该体积内所有气体的摩尔数，mol； $R$  为理想气体常数； $T_i$  为该体积内的气体平均温度，K。

(1) 燃料棒内气体来自 2 个部分：一部分是预充压气体；另一部分是辐照中释放的裂变气体。与裂变气体释放有关的燃料芯块物性包括：平均晶粒尺寸、孔隙率、富集度。

(2) 燃料棒内自由空间由间隙、气腔、裂纹等组成。对于燃料芯块而言，影响燃料棒内自由空间的参数包括：外形尺寸（芯块外径、芯块高度、芯块倒角、芯块碟形、掉角体积）、开口孔隙、芯块密实。

### 1.2 燃料中心温度

将燃料棒的热学求解模型简化为（一维问题）圆柱径向热传导方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T_1) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \ddot{q} \quad (2)$$

式中， $T_1$  为温度，K； $r$  为半径，m； $\ddot{q}$  为体积释热率， $W/m^3$ ； $k$  为热导率， $W/(m \cdot K)$ ； $c_p$  为定压比热容， $J/(kg \cdot K)$ ； $\rho$  为密度， $kg/m^3$ 。

由式(2)可知，热传导过程的求解与体积释热率、热导率、定压比热容有关，其受燃料芯块影响的主要因素包括：富集度、芯块外径、孔隙率、燃料密实。

需要指出的是，在对上述热学模型进行数值计算时，按时间步对温度场分布求解过程中，热交换求解的稳态和瞬态处理方式不一致，本文仅针对稳态工况的情况。

### 1.3 氧化膜厚度

包壳外部氧化膜发生的 2 个阶段：

(1) 转折前 M5 合金使用 Arrhenius 抛物线关系式计算<sup>[1]</sup>：

$$\frac{ds^2}{dt} = K_{pre} \exp\left(-\frac{Q_{pre}}{RT_2}\right) \quad (3)$$

(2) 转折后：

$$\frac{ds}{dt} = K_{post} \exp\left(-\frac{Q_{post}}{RT_2}\right) \quad (4)$$

式中， $s$  为氧化膜厚度，m； $K_{pre}$  为转折前氧化反应的动力学常数， $m^2 \cdot s^{-1}$ ； $Q_{pre}$  为转折前氧化反应的反应激活常数，K； $Q_{post}$  为转折后的反应激活常数，K； $K_{post}$  为转折后的动力学常数， $m^2 \cdot s^{-1}$ ； $T_2$  为金属/氧化膜界面温度，K。

由式(3)、式(4)可知，包壳氧化膜厚度主要受界面温度影响，与燃料芯块参数关系不密切。

### 1.4 包壳应变

(1) 本构方程

在  $(r, \theta, z)$  坐标系下，燃料棒内任意一点的总应变  $\varepsilon_k$  ( $k=r$  表示径向， $k=\theta$  表示周向， $k=z$  表示轴向) 等于弹性分量  $\varepsilon_k^{el}$  和非弹性分量  $\varepsilon_k^{ex}$  之和，即：

$$\varepsilon_k = \varepsilon_k^{ex} + \varepsilon_k^{el} \quad (5)$$

非弹性分量  $\varepsilon_k^{ex}$  包括塑性分量  $\varepsilon_k^{pl}$ 、热分量  $\varepsilon_k^{th}$ 、蠕变分量  $\varepsilon_k^{cr}$ 、肿胀分量  $\varepsilon_k^{sw}$ 、密实分量  $\varepsilon_k^{de}$  和重定位分量  $\varepsilon_k^{re}$ ，即：

$$\varepsilon_k^{ex} = \varepsilon_k^{pl} + \varepsilon_k^{th} + \varepsilon_k^{cr} + \varepsilon_k^{sw} + \varepsilon_k^{de} + \varepsilon_k^{re} \quad (6)$$

(2) 径向位移的求解

燃料棒半径  $r$  处的径向位移  $u$  满足如下关系式：

$$u(r) = \frac{1-2\tilde{\nu}}{2(1-\tilde{\nu})} \left[ \frac{1}{r} \int_{r_s}^r r(\varepsilon_r^{ex} + \varepsilon_\theta^{ex}) dr + r \int_{r_s}^r \left( \frac{\varepsilon_r^{ex} + \varepsilon_\theta^{ex}}{r} \right) dr \right] + \frac{\tilde{\nu}}{1-\tilde{\nu}} \frac{1}{r} \int_{r_s}^r r(\varepsilon_r^{ex} + \varepsilon_z^{ex}) dr + C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad (7)$$

式中， $\tilde{\nu}$  为平均泊松比； $C_1$ 、 $C_2$  是根据边界条件确定的常数；积分下边界  $r_s$  为燃料棒的内半径。

(3) 几何方程

根据“轴向对称”假设和“平面应变”假设，

在 $(r, \theta, z)$ 坐标系下应变和位移满足：

$$\begin{cases} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \end{cases} = \begin{cases} \frac{du}{dr} - \frac{1}{2} \left( \frac{du}{dr} \right)^2 \\ \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left( \frac{u}{r} \right)^2 \\ C_3 - \frac{1}{2} C_3^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中， $C_3$  为由边界条件确定的常数。

由式(5)~式(8)可知，包壳应变的求解与芯块的热膨胀、气体和固体肿胀、燃料密实、重定位相关。其受外形尺寸、平均晶粒尺寸、孔隙率、芯块密实等燃料芯块制造参数的影响。

### 1.5 包壳应力

根据弹性力学基本原理，弹性应变 $\varepsilon_k^{el}$ 和应力 $\sigma_k$ 满足胡克定律，写成微分形式为：

$$\begin{cases} d\sigma_r \\ d\sigma_\theta \\ d\sigma_z \end{cases} = \mathbf{D}^{-1} \begin{cases} d\varepsilon_r^{el} \\ d\varepsilon_\theta^{el} \\ d\varepsilon_z^{el} \end{cases} + (d\mathbf{D})^{-1} \begin{cases} \varepsilon_r^{el} \\ \varepsilon_\theta^{el} \\ \varepsilon_z^{el} \end{cases} \quad (9)$$

根据“各向同性、空间上不变化的弹性常数”假设，对弹性矩阵 $\mathbf{D}$ 进行简化后，可得：

$$\begin{cases} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \end{cases} = \frac{\tilde{E}}{1+\tilde{\nu}} \mathbf{I} \begin{cases} \varepsilon_r - \varepsilon_r^{ex} \\ \varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^{ex} \\ \varepsilon_z - \varepsilon_z^{ex} \end{cases} + \frac{\tilde{\nu}\tilde{E}}{(1+\tilde{\nu})(1-2\tilde{\nu})} \mathbf{I}_0^T \begin{cases} \varepsilon_r - \varepsilon_r^{ex} \\ \varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^{ex} \\ \varepsilon_z - \varepsilon_z^{ex} \end{cases} \mathbf{I}_0 \quad (10)$$

式中， $\tilde{E}$ 为平均弹性模量，MPa； $\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{I}_0$ 分别为单位矩阵和单位列向量。

可以发现，包壳应力受燃料芯块制造参数的影响同1.4节所述。

## 2 敏感性分析及数值拟合

### 2.1 敏感性分析

采用FUPAC软件，逐一针对芯块制造参数的变化，对稳态工况下燃料棒性能进行了计算分析，得到芯块制造参数对燃料棒性能的影响程度，如表1所示。

从表1中可以发现，软件分析得到的燃料棒性能受芯块制造参数影响特性与理论模型分析的结果基本一致。芯块制造参数对燃料棒腐蚀性能的影响可忽略不计。

### 2.2 数值拟合

由燃料棒性能模型可知，除腐蚀模型外，其他模型在求解处理后，其计算结果与变量（与芯块制造参数相关）之间的函数关系均为线性或多项式关系。因此，针对2.1节中的计算结果，采用线性或多项式数值拟合的方法建立燃料棒性能与芯块制造参数间变量关系式，并对拟合优度进行评价。

#### (1) 燃料棒内压

内压与芯块参数间的数值拟合关系式如表2所示。

#### (2) 燃料中心温度

燃料中心温度与各芯块制造参数间的数值拟合关系式如表3所示。

表1 芯块制造参数对燃料棒性能的影响

Tab. 1 Effect of Pellet Manufacturing Parameters on Fuel Rod Performance

芯块参数	波动范围/%	应力影响程度/%	应变影响程度/%	腐蚀影响程度/%	温度影响程度/%	内压影响程度/%
芯块外径	25	1.5	11	—	3	4
晶粒尺寸	108	—	—	—	—	5
孔隙率	104	1.5	3	—	7	10
富集度	71	—	—	—	1	1
开口孔隙率	100	—	—	—	—	—
芯块高度	19	—	—	—	—	2
碟形高度	98	1.5	1	—	—	7
碟形半径	40	1.5	—	—	—	2
倒角长度	105	1.5	1	—	—	3
倒角高度	51	1.5	—	—	—	2
掉角体积	133	1.5	1	—	—	4
芯块密实	80	3.1	13	—	1	4

“—” — 无数据

表 2 内压与芯块制造参数间拟合关系式

Tab. 2 Fitting Relational Expression between Internal Pressure and Pellet Parameters

芯块参数	拟合关系式	相关系数
芯块外径	$\sigma_1 = -18.61\sigma_{\text{DOF}} + 0.010$	0.997
平均晶粒尺寸	$\sigma_2 = -3.74 \times 10^{-6}\sigma_{\text{KOR}}^3 + 3.99 \times 10^{-4}\sigma_{\text{KOR}}^2 - 3.86 \times 10^{-2}\sigma_{\text{KOR}} - 2.43 \times 10^{-2}$	0.999
孔隙率	$\sigma_3 = 5.02 \times 10^{-4}\sigma_{\text{POR}}^2 + 9.69 \times 10^{-2}\sigma_{\text{POR}} + 1.25 \times 10^{-2}$	0.999
富集度	$\sigma_4 = -4.92 \times 10^{-6}\sigma_{\text{ENR}}^3 - 6.45 \times 10^{-5}\sigma_{\text{ENR}}^2 + 2.6 \times 10^{-2}\sigma_{\text{ENR}} - 1.56 \times 10^{-2}$	0.999
芯块高度	$\sigma_5 = 0.07\sigma_{\text{HPE}} - 0.043$	0.996
碟形高度	$\sigma_6 = -0.069\sigma_{\text{HDI}} - 0.162$	0.989
碟形半径	$\sigma_7 = -0.036\sigma_{\text{RDI}} + 0.006$	0.996
倒角长度	$\sigma_8 = -0.028\sigma_{\text{LCH}} + 0.035$	0.999
倒角高度	$\sigma_9 = -0.03\sigma_{\text{HCH}} + 0.004$	0.998
掉角体积	$\sigma_{10} = -0.023\sigma_{\text{PCH}} + 0.02$	0.999
芯块密实	$\sigma_{11} = -0.055\sigma_{\text{DRM}} - 0.025$	0.999

表 3 燃料中心温度与芯块制造参数间拟合关系式

Tab. 3 Fitting Relational Expression between Fuel Center Temperature and Pellet Parameters

芯块制造参数	拟合公式	相关系数
芯块外径	$\sigma_{12} = -12.09\sigma_{\text{DOF}} - 0.095$	0.997
孔隙率	$\sigma_{13} = 0.068\sigma_{\text{POR}} - 0.008$	0.999
富集度	$\sigma_{14} = -0.010\sigma_{\text{ENR}} - 0.028$	0.992
芯块密实	$\sigma_{15} = 0.010\sigma_{\text{DRM}} - 0.016$	0.995

### (3) 包壳应力

包壳应力与各芯块参数间的数值拟合关系式如表 4 所示。

表 4 包壳应力与芯块参数间拟合关系式

Tab. 4 Fitting Relational Expression between Clad Stress and Pellet Parameters

物性名称	拟合公式	相关系数
芯块外径	$\sigma_{16} = 12.30\sigma_{\text{DOF}} - 0.615$	1
孔隙率	$\sigma_{17} = -0.024\sigma_{\text{POR}} - 0.666$	1
碟形高度	$\sigma_{18} = -0.031\sigma_{\text{HDI}} - 0.564$	1
碟形半径	$\sigma_{19} = -0.076\sigma_{\text{RDI}} - 0.461$	1
倒角长度	$\sigma_{20} = 0.043\sigma_{\text{LCH}} + 0.538$	1
倒角高度	$\sigma_{21} = -0.075\sigma_{\text{HCH}} - 0.576$	1
掉角体积	$\sigma_{22} = -0.038\sigma_{\text{PCH}} + 0.769$	1
芯块密实	$\sigma_{23} = 0.038\sigma_{\text{DRM}}$	1

### (4) 包壳应变

包壳应变与各芯块制造参数间的数值拟合关系式如表 5。

表 5 包壳应变与芯块制造参数间拟合关系式

Tab. 5 Fitting Relational Expression between Clad Strain and Pellet Parameters

芯块制造参数	拟合公式	相关系数
芯块外径	$\sigma_{24} = -42.65\sigma_{\text{DOF}} - 0.262$	0.993
孔隙率	$\sigma_{25} = -2.29 \times 10^{-4}\sigma_{\text{POR}}^2 - 3.14 \times 10^{-2}\sigma_{\text{POR}} - 1.42 \times 10^{-2}$	1
碟形高度	$\sigma_{26} = 0.009\sigma_{\text{HDI}} - 0.464$	1
倒角长度	$\sigma_{27} = 0.009\sigma_{\text{LCH}} - 0.55$	1
掉角体积	$\sigma_{28} = 0.012\sigma_{\text{PCH}}$	1
芯块密实	$\sigma_{29} = 0.168\sigma_{\text{DRM}} + 0.192$	0.997

表 2~表 5 中,  $\sigma_{\text{DOF}}$ 、 $\sigma_{\text{KOR}}$ 、 $\sigma_{\text{POR}}$ 、 $\sigma_{\text{ENR}}$ 、 $\sigma_{\text{HPE}}$ 、 $\sigma_{\text{HDI}}$ 、 $\sigma_{\text{RDI}}$ 、 $\sigma_{\text{LCH}}$ 、 $\sigma_{\text{HCH}}$ 、 $\sigma_{\text{PCH}}$ 、 $\sigma_{\text{DRM}}$  分别为芯块外径、平均晶粒尺寸、孔隙率、富集度、芯块高度、碟形高度、碟形半径、倒角长度、倒角高度、掉角体积以及密实的变化量, %;  $\sigma_i$  为芯块制造参数变化导致的燃料棒性能变化量, %。其中,  $i=1\sim 11$  为内压变化量;  $i=12\sim 15$  为燃料温度变化量;  $i=16\sim 23$  为包壳应力变化量;  $i=24\sim 29$  为包壳应变变化量。

根据上述拟合关系式, 可计算出芯块制造参数变化所导致的燃料棒性能变化, 表达式如下:

$$\sigma_{\text{内压}} = \sum_{i=1}^{n=11} \sigma_i \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{中心温度}} = \sum_{i=12}^{n=15} \sigma_i \quad (12)$$

$$\sigma_{\text{应力}} = \sum_{i=16}^{n=23} \sigma_i \quad (13)$$

$$\sigma_{\text{应变}} = \sum_{i=24}^{n=29} \sigma_i \quad (14)$$

## 3 对比验证

采用上述拟合公式, 改变燃料芯块制造参数输入, 对燃料棒内压、燃料中心温度、包壳应力、包壳应变进行计算, 结果同 FUPAC 软件分析结果进行对比验证, 如图 1~图 4 所示。

从图 1~图 4 中可以看出, 采用数值拟合计算得到的燃料棒性能计算结果与 FUPAC 软件分析结果的符合性较好, 数据几乎均位于等值线上。

## 4 结论

(1) 基于数值拟合获得的拟合关系式, 能够

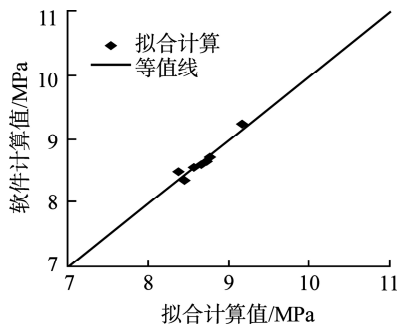


图1 内压拟合计算值与软件计算值对比

Fig. 1 Comparison of Internal Pressure Calculated by Fitting Method and Software

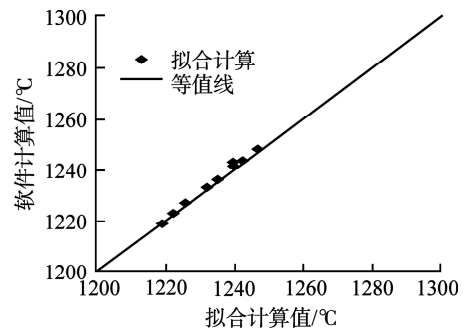


图2 燃料中心温度拟合计算值与软件计算值对比

Fig. 2 Comparison of Fuel Center Temperature Calculated by Fitting Method and Software

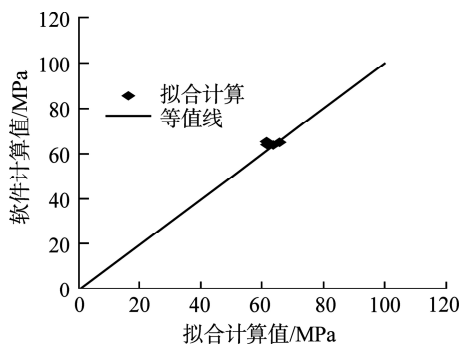


图3 应力拟合计算值与软件计算值对比

Fig. 3 Comparison of Stress Calculated by Fitting Method and Software

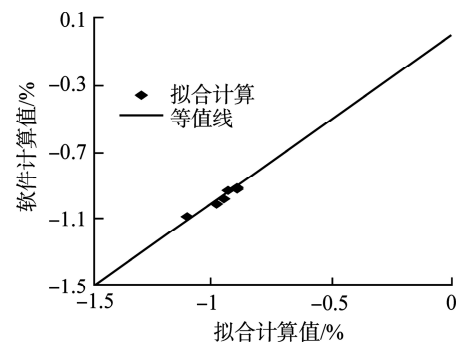


图4 应变拟合计算值与软件计算值对比

Fig. 4 Comparison of Strain Calculated by Fitting Method and Software

有效计算出稳态运行工况下, 燃料芯块制造参数改变所导致的燃料棒内压、燃料中心温度、包壳应力、包壳应变的变化。

(2) 采用数值拟合计算得到的燃料棒性能变化与 FUPAC 软件计算结果符合性较好。

(3) 采用数值拟合的方法, 可简单快速分析燃料芯块制造参数对燃料棒性能的影响, 为燃料

芯块制造的质量控制优化和结构设计改进提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 张坤, 郭兴坤, 刘振海, 等. Zr-1Sn-1Nb-0.3Fe 合金腐蚀模型研究[J]. 核动力工程, 2015, 36(S2): 93-96.

(责任编辑: 张祚豪)