

燃料棒性能分析软件 FRIPAC 评估

张斌, 汪洋, 韦俊, 邓勇军

(中广核研究院有限公司, 四川 成都 610042)

摘要: 为有效预测燃料棒堆内辐照行为, 需将很多复杂物理现象的形成机理与实验观测相结合, 建立合理的计算模型。中广核研究院有限公司开发的燃料棒综合性能分析软件 FRIPAC 考虑了运行过程中物理、化学、材料、热力学、辐照等综合效应对燃料棒性能的影响, 可对堆内燃料棒行为进行合理预测。本文介绍了 FRIPAC 软件的物理模型, 通过与实验数据的对比对软件进行了评估。结果显示, FRIPAC 能准确预测芯块中心温度和裂变气体释放, 验证了 FRIPAC 模型的正确性。后续将继续开展气腔体积、包壳腐蚀等模型的评估, 并基于评估结果不断优化软件模型。

关键词: FRIPAC; 燃料棒; 模型; 评估

中图分类号: TL352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2019)05-0869-07

doi: 10.7538/yzk.2018.youxian.0475

Assessment of Fuel Rod Performance Analysis Code FRIPAC

ZHANG Bin, WANG Yang, WEI Jun, DENG Yongjun

(China Nuclear Power Technology Research Institute Co. Ltd., Chengdu 610042, China)

Abstract: In order to predict the behavior of the fuel rod in reactor, mechanisms and experiment observations of many physical phenomena need to be combined to establish proper calculation models. China Nuclear Power Technology Research Institute Co. Ltd. (CNPRI) recently developed a fuel rod performance analysis code named FRIPAC, which considers the combined effects of physics, chemistry, materials, thermodynamics, irradiation, etc. on the performance of fuel rods during operation. Thus, FRIPAC can predict fuel behavior in reactors reasonably. The physical model of FRIPAC was briefly introduced in this article. The assessment was made based on experimental data. The results show that the prediction of FRIPAC on fuel central temperature and fission gas release is in good agreement with the measured data, which verifies the correctness of the FRIPAC model. For the future work, the FRIPAC is expected to continue with the assessment of internal rod void volume, cladding corrosion, etc. and to continuously optimize the models based on the assessment results.

Key words: FRIPAC; fuel rod; model; assessment

收稿日期: 2018-06-27; 修回日期: 2018-09-04

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX06004002)

作者简介: 张斌(1987—), 男, 湖北荆州人, 工程师, 硕士, 计算力学专业

网络出版时间: 2018-12-21; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20181218.1827.002.html>

燃料棒作为反应堆内的第1道屏障,直接决定着整个电厂的安全性。我国压水堆核电厂堆芯系统设计^[1]根据燃料棒在堆内的多种关键现象制定了相应的设计准则,包括内压准则、芯块中心温度准则、腐蚀准则、应变准则等,以规定燃料棒运行的性能要求。由于在反应堆运行过程中,燃料棒处于高温、高压、强中子辐射的恶劣工作环境中,且燃料芯块、包壳在功率水平及中子注量变化的情况下涉及到的物理、化学、热学和力学现象及其形成机理均非常复杂,无法直接观测或简单计算它们随功率和燃耗变化的情况,这更加剧了对燃料棒的综合性能进行预测分析的难度。对此,国际上通常利用燃料棒性能分析软件,通过建立一系列热学、力学模型对燃料芯块、包壳的堆内行为进行模拟,从而实现对燃料棒综合性能的预测。为解决我国燃料设计软件自主化问题,中广核研究院有限公司开发了燃料棒综合性能分析软件 FRIPAC。

燃料棒性能分析软件在开发建模、评估、验证阶段,均需各类精确的实验数据以保证其计算模型的正确性与可靠性。国际上已开展了广泛的研究项目,在研究堆或商用堆中开展相关堆内实验来获取燃料棒相关辐照数据,如 CIP (Cabri International Project)、HRP (Halden Reactor Project)、SCIP (Studs vik Cladding Integrity Project) 等。其中,HRP 是 OECD/NEA (经济合作与发展组织核能署) 下最大的国际核燃料联合研究项目,始于 1958 年,它主要基于挪威的 Halden 反应堆开展。HRP 具有数据信息量大、实验过程严谨、实验数据准确的特点,从国外软件研发、验证及安全评审相关资料来看,目前 HRP 的实验数据已成为国际核燃料软件建模及验证的主要来源。目前,国际上较为广泛应用的燃料棒性能分析软件包括二维或准二维分析软件 FRAPCON、PAD、FALCON、TRANSURANUS、FEMAXI 及三维分析软件 BISON、TOUTATIS、ALCYONE 等,其中认可度较高的 FRAPCON、TRANSURANUS、FALCON 及 BISON 的验证与确认均采用 Halden 的实验数据^[2-5]。

本文简单介绍 FRIPAC 软件的物理模型,通过与实验数据的对比对软件进行初步评估。

1 软件介绍

1.1 软件功能

FRIPAC 适用于预测压水堆燃料棒在 I 类工况(正常运行工况)、II 类工况(中频事故工况)下的性能,可分析的燃耗范围为 $0\sim 62\text{ GW}\cdot\text{d}/\text{t}(\text{U})$,芯块类型包括 UO_2 、 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 、MOX,包壳类型为 Zr-4、ZIRLO。FRIPAC 分析燃料棒在反应堆内辐照条件下的各方面行为,主要包括:1) 芯块/包壳温度分布;2) 芯块热膨胀、密实及肿胀;3) 包壳热膨胀、蠕变及辐照生长;4) 包壳应力与应变;5) 包壳腐蚀吸氢;6) 芯块-包壳相互作用(PCI);7) 裂变气体释放;8) 燃料棒内压。

1.2 计算流程

由于燃料棒堆内热学、力学、辐照等行为耦合紧密,为准确模拟燃料棒堆内行为,需进行时间离散和空间离散。时间离散即对燃料棒辐照历史进行离散。空间离散即采用 1.5 维几何模型,先将燃料棒进行轴向分段,再对每个轴向段划分多个径向环进行一维径向分析,计算过程中不考虑轴向和方位角效应,以简化计算。

FRIPAC 计算流程如图 1 所示。它包括两个基本循环(时间步循环和轴向段循环)以及两个迭代计算(间隙迭代与内压迭代)。两个循环的目的是为了实现软件的时间离散与空间离散,两个迭代计算的目的是实现热-力-核耦合分析并提高计算准确性。

2 理论模型

FRIPAC 主要通过 4 部分模型来考虑燃料棒在堆内的不同现象:热学模型、力学模型、裂变气体释放模型和内压模型。

2.1 热学模型

热学模型主要用来进行燃料棒温度场的计算。在运行过程中,芯块内的裂变反应产生热量,这些热量通过芯块传热、间隙传热、包壳传热和对流换热过程传递到冷却剂中,如图 2 所示。燃料的温度变化主要受反应堆功率、材料特性(热导率、比热容、密度等)、燃料棒几何尺寸(间隙闭合与否)以及冷却剂流动特性(流量、密度)等因素的影响^[6]。

FRIPAC 热学模型分为 4 部分。

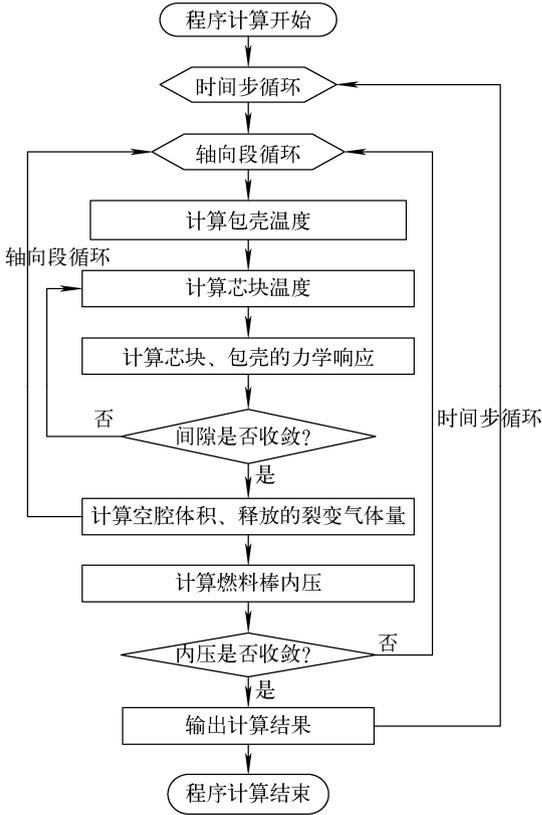


图 1 FRIPAC 计算流程

Fig. 1 Calculation flow of FRIPAC

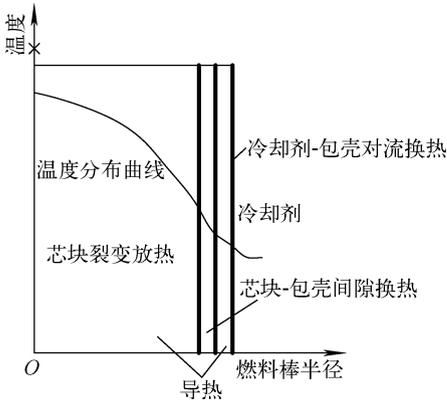


图 2 燃料棒传热过程示意图

Fig. 2 Schematic of fuel rod heat transfer

1) 冷却剂-包壳对流换热

通过冷却剂-包壳对流换热模型计算包壳外表面温度。在反应堆 I、II 类工况下,冷却剂-包壳对流换热包括两种模式:单相强迫对流换热和过冷核态沸腾换热。

在强迫对流情况下,采用 Dittus-Boelter 对流换热关系式^[7]:

$$h_{\text{film}} = \frac{0.023}{D_e} K \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (1)$$

式中: h_{film} 为换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; D_e 为热力直径, m ; K 为冷却剂热导率, $W/(m \cdot K)$ 。

在过冷泡核沸腾情况下,采用 Jens-Lottes 沸腾换热关系式:

$$T_{P2} = T_{\text{sat}} + \Delta T_{\text{sat}} = T_{\text{sat}} + 7.91e^{-p/62} \cdot q''^{0.25} \quad (2)$$

式中: T_{P2} 为包壳外壁面温度, $^{\circ}C$; T_{sat} 为冷却剂饱和温度, $^{\circ}C$; ΔT_{sat} 为沸腾换热温升, $^{\circ}C$; q'' 为热流密度, W/m^2 ; p 为系统压力, MPa 。

2) 包壳传热

燃料棒包壳传热模型利用基本传热方程计算包壳温度分布,不考虑包壳内部释热,忽略包壳轴向和切向的传热。包壳热导率为温度的一次函数:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 T \quad (3)$$

式中: λ 为包壳热导率, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$; λ_1 、 λ_2 为包壳热导率的系数; T 为包壳温度, $^{\circ}C$ 。

最终依据传热基本方程(式(4))得到包壳内壁温度 T_{ci} :

$$\frac{q'}{2\pi r} = -\lambda \frac{dT}{dr} = -(\lambda_1 + \lambda_2 T) \frac{dT}{dr} \quad (4)$$

$$T_{ci} = \frac{\lambda_1 + \sqrt{\lambda_1^2 + \frac{\lambda_2 q''}{\pi} \ln \frac{D_{co}}{D_{ci}}}}{\lambda_2} \quad (5)$$

式中: r 为包壳径向尺寸, m ; q' 为功率密度, W/s ; D_{ci} 、 D_{co} 分别为包壳内、外径, m 。

3) 芯块-包壳间隙换热

芯块-包壳间隙换热用于计算间隙温升及芯块外表面温度,间隙换热包括 3 部分:气体导热、辐射换热和接触导热(芯块-包壳间隙闭合)。

$$\Delta T_{\text{gap}} = q''/h_{\text{gap}} \quad (6)$$

式中: ΔT_{gap} 为芯块-包壳间隙温升, $^{\circ}C$; h_{gap} 为间隙换热系数, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ 。

4) 芯块传热

燃料棒芯块传热模型同样基于基本传热方程,忽略芯块轴向和切向传热,但芯块传热模型需考虑芯块释热及芯块径向功率分布。

根据傅里叶定律,具有内热源的圆柱热传导模型^[8]如下:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda(T)r \frac{\partial T}{\partial r}) = -q_v \quad (7)$$

式中, q_v 为燃料棒功率密度。FRIPAC 芯块热导率采用 Halden 模型^[9]:

$$\lambda = 1/(0.1148 + 1.1599Gd + 0.004Bu + 2.475 \times 10^{-4}(1 - 0.00333Bu)T + 0.0132 \exp(0.00188T)) \quad (8)$$

式中: Gd 为芯块 Gd_2O_3 的质量分数; T 为芯块温度, K; Bu 为局部损耗, $MW \cdot d/kg(UO_2)$ 。

通常采用空间离散方法将芯块划分为多个径向环, 求解式(7)即可得到芯块温度分布。

2.2 力学模型

燃料棒的力学行为会影响芯块和包壳的变形、芯块-包壳间的径向间隙尺寸及接触压力, 进而影响燃料棒的温度分布和内压。FRIPAC 的力学模型主要计算包壳及芯块尺寸变化, 综合考虑芯块密实及肿胀、芯块热膨胀、包壳热膨胀、包壳蠕变等现象从而得到芯块及包壳径向尺寸、芯块-包壳间隙、接触压力等关键信息。

芯块力学模型主要考虑了芯块热膨胀、芯块密实及肿胀对芯块尺寸的影响:

$$t_{eos} = t_{bos}(1 + \epsilon_{th})(1 + \epsilon_{sw})(1 + \epsilon_{den}) \quad (9)$$

式中: t_{bos} 、 t_{eos} 分别为时间步初与时间步末芯块径向环厚度; ϵ_{th} 、 ϵ_{sw} 、 ϵ_{den} 分别为芯块热膨胀应变、芯块肿胀应变、芯块密实应变。

包壳弹性力学模型采用平面应变假设, 轴向应变为常量。包壳受力变形满足 3 个基本方程: 平衡微分方程、几何方程及物理方程, 据此可推导得到欧拉方程:

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0 \quad (10)$$

结合包壳边界条件(式(11))求解式(10)可得到包壳位移关系式 $u(r)$ 。

$$\sigma_r|_{r=R_o} = -p_o, \sigma_r|_{r=R_i} = -p_i \quad (11)$$

式中: σ_r 为包壳在半径 r 处的径向应力; R_o 、 R_i 分别为包壳外壁、内壁半径; p_o 、 p_i 分别为包壳外壁、内壁压力。

2.3 裂变气体释放模型

燃料棒在运行过程中, 由于裂变反应, 芯块会不断地生成气体裂变产物和固体裂变产物。部分气体裂变产物将释放到燃料棒内部, 这一过程称为裂变气体释放(FGR)。释放到燃料棒内的裂变气体将引起燃料棒内压升高, 可能导致闭合的芯块包壳间隙重新打开, 传热性能恶化, 甚至发生包壳失效。通常, 裂变气体释放

现象分为两种情况: 非热释放和热释放。非热释放主要是裂变气体由于击出和反冲现象, 造成气体从芯块内部释放, 通常使用经验关系式来考虑非热释放。热释放模型则依据扩散方程^[10-11]得到:

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = D(t)\Delta_r C(r,t) + \beta(t) \quad (12)$$

式中: C 为裂变气体浓度; D 为裂变气体扩散系数; β 为裂变气体的生成率; Δ_r 为拉普拉斯算子; t 为时间, s。

式(12)的边界条件为:

$$C(r,0) = 0, C(1,t) = 0, \frac{dC}{dr}|_{r=0} = 0 \quad (13)$$

假设晶内气体在晶粒边界聚集, 当晶粒边界气体浓度达到一定限制时开始释放, 求解式(12)可得到每步的裂变气体释放率, 进而求得对应的裂变气体释放量。

2.4 内压模型

在现有燃料棒分析软件中, 内压大多采用理想气体状态方程。FRIPAC 在具备此功能的基础上, 使用更为接近真实情况的 Peng-Robinson 方程来分析燃料棒空腔内气体在高温、高压下的气体压力, 降低了结果误差^[12]。Peng-Robinson 方程内压计算公式为:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2 + 2Vb - b^2} \quad (14)$$

式中: p 为燃料棒内压, Pa; R 为理想气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; V 为间隙气体体积, m^3 ; a 为内聚力参数; b 为协体积参数^[13]。 a 和 b 是混合气体温度与压力的函数。

3 初步评估

3.1 评估数据

本文采用 HRP 实验数据结合 FRAPCON 软件评估数据^[2], 对 FRIPAC 进行初步评估, 实验数据列于表 1。表 1 中 X 表示该实验数据点是验证项。

3.2 温度评估

在燃料棒性能分析领域中, 燃料温度会涉及到多方面模型, 是众多模型耦合结果的产物, 而芯块中心温度作为燃料温度中最具代表性、易表征的参数, 它涉及冷却剂-包壳对流换热、包壳传热、包壳-芯块间隙换热、芯块传热等热

表 1 用于 FRIPAC 初步评估的实验数据
 Table 1 Experimental data used for preliminary assessment of FRIPAC

棒号	平均燃耗/(GW·d·t ⁻¹ (U))	芯块中心温度	裂变气体释放	来源
IFA-431R1	4.57	X		Halden
IFA-431R2	4.79	X		Halden
IFA-431R3	4.97	X		Halden
IFA-431R5	4.65	X		Halden
IFA-431R6	4.5	X		Halden
IFA-432R1	32.96	X		Halden
IFA-432R3	42.1	X		Halden
IFA-432R5	44.4	X		Halden
IFA-432R6	27.3	X		Halden
IFA-513R1	11.86	X		Halden
IFA-513R2	11.68	X		Halden
IFA-513R6	11.72	X		Halden
IFA-515.10-A1	86.41	X		Halden
IFA-515.10-B1	84.31	X		Halden
IFA-562R16	87.93	X		Halden
IFA-562R18	79.88	X		Halden
TSQ002	53.24		X	USPWR
AN1	41.06		X	RISØ3
AN8	40.63		X	RISØ3
PK6-2	36.8		X	SUPER-RAMP
PK6-3	36.5		X	SUPER-RAMP
15309	50		X	FRAPCON
111i5	48.6		X	FRAPCON
24i6	60.1		X	FRAPCON
28i6	13.2		X	FRAPCON
30-I-8 FGR Case	57.85		X	FRAPCON
4110-ae2	6.2		X	FRAPCON
4110-be2	6.6		X	FRAPCON
B&W Rod 1	62.3		X	FRAPCON
bnfl-de	42		X	FRAPCON
F7-3	35		X	FRAPCON
F9-3	33		X	FRAPCON
FUMEX 6f	43.47		X	FRAPCON
FUMEX 6s	56.36		X	FRAPCON
GE-2 FGR Case	41.9		X	FRAPCON
GE-6 FGR Case	42.29		X	FRAPCON
GE-7 FGR Case	41		X	FRAPCON
Ramped_Rodlet_D200	25		X	FRAPCON
Ramped_Rodlet_D226	44		X	FRAPCON
Rod 5-DH	33.9		X	FRAPCON

学模型,所以它是确认燃料棒性能分析软件的准确性与可靠性的必要参数。另外,在实验过程中,芯块中心温度具备良好的可测量能力,目前国际中已积累不少与该参数有关的实验结果,所以通常使用芯块中心温度作为软件评估的参数。

本文基于 Halden 反应堆实验数据对燃料中心温度预测值(P)与测量值(M)进行了对比,结果如图 3 所示。本文初步评估采用了 16 根棒的实验数据,共约 2 400 个数据点,平均燃耗分布为 4.5~88 GW·d/t(U),P/M 平均值为 1.044,标准差 σ 为 0.117,上下包络线为 $P/M=1\pm 2\sigma$ 。从图 3 可看出,FRIPAC 对芯块中心温度的预测值与测量值符合较好。

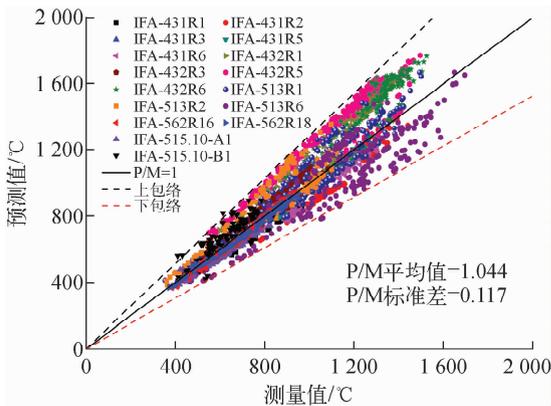


图 3 芯块中心温度评估

Fig. 3 Assessment of pellet centerline temperature

3.3 裂变气体释放评估

裂变气体释放是燃料棒性能评估需要考虑的另一重要现象,尤其对高燃耗燃料更是如此。在辐照过程中,由 U 和 Pu 裂变产生的惰性气体会从燃料基体中释放到燃料棒的空腔中,这些气体在空腔中的累积将会降低燃料棒的导热性能并提高其内压,提高燃料棒破损的风险。因此,裂变气体释放的准确预测对燃料棒性能有着重大影响。

对 FRIPAC 裂变气体释放的评估基于 24 组裂变气体释放实验数据(表 1),裂变气体释放率的预测值与测量值对比如图 4 所示。P/M 平均值为 1.008 6,标准差为 0.369 1,由此可见,FRIPAC 对裂变气体释放率的预测值与测量值符合良好。

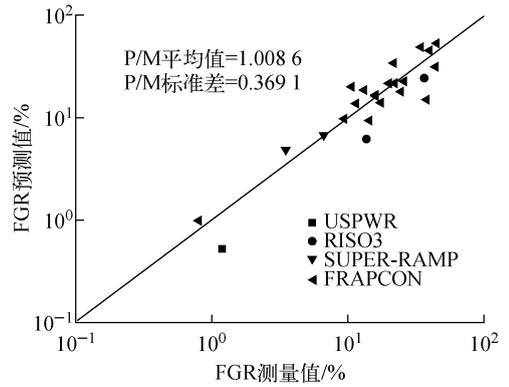


图 4 裂变气体释放评估

Fig. 4 Assessment of fission gas release

4 结论

本文介绍了燃料棒性能分析软件 FRIPAC 的总体研发情况,对 FRIPAC 模型进行了简单描述,并与实验数据进行对比,对 FRIPAC 进行初步评估。评估结果表明,FRIPAC 能准确预测燃料棒的芯块中心温度与裂变气体释放(包括高燃耗下燃料棒性能),从较大程度上可认为 FRIPAC 计算结果是准确、可靠的,具备满足工程设计需求的潜力。

随着后续 HRP 实验数据梳理工作的完善,还将对 FRIPAC 进行更加全面的评估,并根据评估结果开展 FRIPAC 模型优化,提高软件的安全性及可靠性。

参考文献:

- [1] NB20057. 3Y2012 压水堆核电站反应堆系统设计:堆芯:第 3 部分:燃料组件[S]. 北京:原子能出版社,2012.
- [2] GEELHOOD K J, LUSCHER W G. FRAPCON-4.0; Integral assessment[R]. US; PNNL, 2015.
- [3] Van UFFELEN P, SCHUBERT A. Verification of the TRANSURANUS fuel performance code: An overview[C]// 8th International Conference on WWER Fuel Performance. [S. l.]; [s. n.], 2007.
- [4] LYON W F, JAHINGIR M N. Fuel analysis and licensing code: FALCON MOD01; Volume 3: Verification and validation [R]. US; EPRI, 2004.
- [5] WILLIAMSON R L, GAMBLE K A. Validating

- the BISON fuel performance code to integral LWR experiments[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, 301: 232-244.
- [6] LASSMANN K, BLANK H. Modeling of fuel rod behavior and recent advances of the TRANSURANUS code[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 106: 291-313.
- [7] DITTUS F W, BOELTER L M K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type[J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 1985, 12(1): 3-22.
- [8] HOLMAN J P. Heat transfer[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 35-37.
- [9] LANNING D D, BEYER C E. FRAPCON-3 updates, including mixed-oxide fuel properties[R]. US: PNNL, 2005.
- [10] NOBLE L D, RIM C S. Background and derivation of ANS-5.4 standard fission product release model[R]. US: American Nuclear Society, 1982.
- [11] SPEIGHT M V. A calculation on the migration of fission gas in material exhibiting precipitation and resolution of gas atoms under irradiation[J]. Journal of Nuclear Materials, 1969, 37: 180-185.
- [12] 王鑫, 申杨. 论范氏气体方程和理想气体状态方程的关系[J]. 大学物理, 2010, 29(4): 8-10.
WANG Xin, SHEN Yang. On the relationship between equations of state for van der Waals and ideal gas[J]. College Physics, 2010, 29(4): 8-10(in Chinese).
- [13] 刘昆元, 汪文川. Peng-Robinson 状态方程计算含氢系统汽液平衡——超临界气体的参数处理[J]. 化工学报, 1989, 40(1): 73-81.
LIU Kunyuan, WANG Wenchuan. Calculations of vapor-liquid equilibria of hydrogen-containing systems with Peng-Robinson equation of state—Modification of parameters for the supercritical gas[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1989, 40(1): 73-81(in Chinese).