

铅铋次临界堆 XADS 束流超功率事故研究

张 玲 辜峙铎 戴嘉宁 欧文澜 潘麒文 龚政宇 张牧昊

(成都理工大学 核技术与自动化工程学院 成都 610059)

摘要 加速器驱动次临界系统(Accelerator Driven sub-critical System, ADS)利用加速器产生的高能强流质子束轰击重金属靶核,产生散裂中子作为外源中子来驱动和维持反应堆自身运行。质子束流的不稳定性将对此类反应堆的功率水平产生影响,进而威胁 ADS 的安全。加速器束流超功率是 ADS 系统的一种典型事故瞬态,该事故导致 ADS 堆芯功率骤然上升,堆芯温度骤升,可能超过材料的安全限值,威胁反应堆完整性。本文利用多物理耦合程序 MPC-LBE,对加速器驱动铅铋冷却次临界堆(eXperimental Accelerator Driven System, XADS)的束流超功率事故进行模拟,并研究了这种事故下反应堆的瞬态安全特性。

关键词 加速器驱动铅铋冷却次临界堆,束流超功率, MPC-LBE, 多物理耦合, 瞬态安全特性

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.100602

Accident of lead-bismuth subcritical reactor XADS

ZHANG Ling GU Zhixing DAI Jianing OU Wenlan PAN Qiwen GONG Zhengyu ZHANG Muhao

(College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract [Background] In accelerator driven sub-critical system (ADS), the high-energy proton beam produced by accelerator is used to strike the target nucleus, and generate spallation neutrons as external neutrons to drive and maintain its operation. The power level and the safety of ADS are susceptible to the instability of proton beam, such as beam overpower (BOP) which is treated as the typical transient accident for ADS system. In ADS core, the sudden increases of power and temperature will be caused by BOP accident, which may exceed the safety limits of materials, threatening ADS safety. [Purpose] This study aims to investigate the transient safety characteristics of the eXperimental accelerator driven system (XADS) under BOP accident. [Methods] The multi-physics coupling code MPC-LBE, in which the fuel pin heat conduction (HC) model and the point reactor kinetics (PK) model were coupled with self-developed computational fluid dynamics (CFD) code, was employed to simulate BOP accident of XADS. Firstly, the MPC-LBE simulation model of XADS was constructed and then the steady state condition was established. On this basis, the double and triple BOP accident cases were simulated, and the safety boundary of BOP accident conditions was also evaluated. [Results] For the simulation results, in the double and triple BOP cases, the reactor powers increase to only 1.88 and 2.7 times of the original ones, respectively. The maximum temperature of the cladding is about 843 K in the triple BOP case, exceeding its safety limit. [Conclusions] Conclusions can be drawn that the negative temperature feedback effect plays an important role in protecting the reactor from power sharp rise, and the double BOP case can be treated as the BOP safety boundary of BOP accident in XADS.

Key words XADS, Beam overpower, MPC-LBE, Multi-physics coupling, Transient safety behavior

国家自然科学基金(No.12005025)、四川省自然科学基金(No.2022NSFSC0253)资助

第一作者: 张玲, 女, 1997年出生, 2020年毕业于烟台大学, 现为硕士研究生, 研究领域为反应堆热工水力设计与安全分析

通信作者: 辜峙铎, E-mail: guzhixing17@163.com

收稿日期: 2022-05-18, 修回日期: 2022-09-09

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12005025), Natural Science Foundation of Sichuan Province (No.2022NSFSC0253)

First author: ZHANG Ling, female, born in 1997, graduated from Yantai University in 2020, master student, focusing on thermal-hydraulic design and safety analysis of reactors

Corresponding author: GU Zhixing, E-mail: guzhixing17@163.com

Received date: 2022-05-18, revised date: 2022-09-09

作为未来潜在的裂变反应堆系统,加速器驱动次临界反应堆(Accelerator Driven sub-critical System, ADS)依靠外源中子驱动,不需要使用控制棒,具有固有安全性,且能量分布宽、中子能谱硬、通量大、嬗变长寿命核素能力强,在嬗变核废料、核燃料增殖、产能等领域具有重大的应用前景。加速器在ADS中起着至关重要的作用,加速器产生的高能强流质子束轰击置于次临界堆堆芯内的金属靶核,通过散裂反应产生散裂中子作为外源中子来驱动和维持次临界堆的运行^[1],这一理念被广泛应用于ADS系统。因此,质子束流的不稳定性将对加速器驱动次临界堆的功率水平产生影响,进而威胁ADS的安全。加速器束流超功率(Beam OverPower, BOP)是一种典型的ADS束流瞬变事故^[2-3],该事故将会导致次临界堆堆芯功率急剧上升,进而使堆芯温度剧增,可能会超过材料的安全限值,威胁反应堆的完整性。

多年以来,对于ADS束流瞬变事故开展的研究大多采用一体化多物理耦合粗网格程序,或者是系统分析程序,或者多尺度耦合程序。就一体化多物理耦合粗网格程序而言,2005年,Suzuki等^[4]使用反应堆安全分析代码SIMMER-III对PDS-XADS的无保护束流超功率(Unprotected Beam OverPower, UBOP)、束流中断(Beam Trip, BT)等事故进行了模拟。模拟结果表明,目前的PDS-XADS设计即使在堆芯退化的条件下也会对严重的瞬态事故具有显著的防御力。2015年汪振等^[5]利用中子学与热工水力学耦合安全分析软件NTC-2D,对FDS团队设计的一种热功率为10 MW依靠自然循环驱动铅铋冷却ADS的失束事故及束流超功率事故进行了模拟。结果表明ADS次临界堆的功率对束流瞬变的响应几乎是瞬时的。就系统分析程序而言,2012年,Ahmad等^[6]利用FAST代码系统中的TRAC/AAA程序模拟研究了XADS在BOP事故期间燃料棒的行为,验证了不同的燃料模块与FAST代码系统的成

功集成。就多尺度耦合层面,2013年,Sugawara等^[7]耦合SIMMER-III和RELAP5/mod3.2两种程序对铅铋冷却ADS的BOP等事故进行了瞬态分析以评估堆芯损坏的可能性,结果表明BOP事故的模拟结果未超过其对应的安全标准,堆芯未损坏。2019年辜峙铎等^[8]基于商业CFD程序FLUENT开发了一个针对铅铋堆的安全分析耦合平台HC-PK-CFD^[9],也可用于BOP事故分析。

相较于系统分析程序,基于CFD的模拟方法可以更加有效地揭示池式堆中涉及的多维复杂行为。考虑到数值计算规模,本文采用多物理耦合粗网格程序MPC-LBE^[10]对XADS堆的BOP事故进行模拟。分析了在不同BOP事故工况下该反应堆的瞬态安全特性,得到了XADS反应堆的BOP事故边界。

1 XADS次临界堆MPC-LBE计算模型构建

本文XADS次临界堆的MPC-LBE计算模型参考了D'Angelo等公开发布的基准报告^[9],该报告对XADS堆的BT瞬态事故进行了程序基准验证,采用了XADS单棒通道,该通道由冷却剂和燃料棒区域组成,如图1所示^[8]。燃料棒产生的热量首先通过热传导传递给包壳,再通过包壳与流体交界面的对流换热传递到流体区,最后由冷却剂流出带走,该通道几何数据如表1所示^[9]。

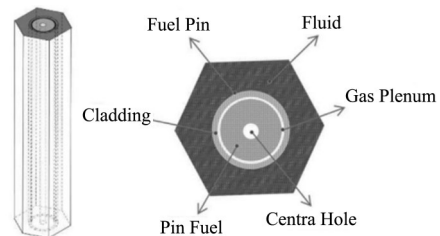


图1 单棒通道示意图^[8]
Fig.1 Schematic diagram of single fuel pin channel^[8]

表1 计算模型相关设计参数^[9]
Table 1 Related design parameters for the computational model^[9]

燃料芯块总功率(初始值) Pin fuel total power (initial value) / W	7 203.6
冷却剂入口温度 Coolant inlet temperature / K	573
冷却剂出口温度(初始值) Coolant outlet temperature (initial value) / K	673.0
冷却剂(液体)流通截面 Coolant (fluid) flow area / m ²	9.89×10 ⁻⁵
燃料区(计算区域)高度 Fuel zone (computational domain) height / m	0.9
燃料芯块内半径(内孔半径) Inner pin fuel radius (inner hole radius) / m	0.9×10 ⁻³
燃料芯块外半径 Outer pin fuel radius / m	3.57×10 ⁻³
包壳内半径 Inner cladding radius / m	3.685×10 ⁻³
包壳外半径 Outer cladding radius / m	4.25×10 ⁻³

考虑到 MPC-LBE 程序目前只能分析封闭空间,因此我们构建了一个全堆的计算模型^[10],具体见图 2,该模型主要由堆芯、热池、冷池、下腔室、泵、泵管道和换热器组成。其中,堆芯区域的 4 号通道为目标通道(模拟的核心区域),泵和换热器为其提供了边界条件,并与前述单棒通道边界保持一致。另外,考虑到计算资源问题,该模型以燃料组件为最小单元进行网格划分,因此,4 号通道由数个 XADS 单棒通道组成,不影响模拟结果。

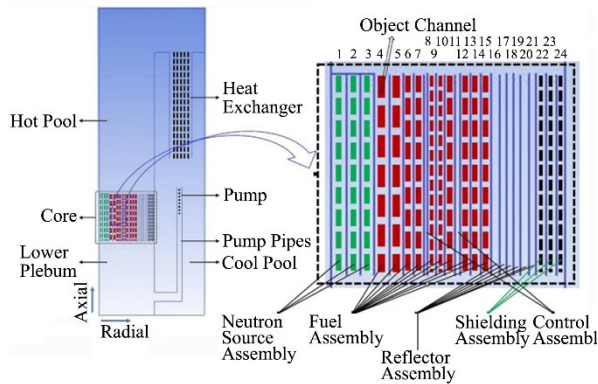


图 2 MPC-LBE 代码计算模型^[10]
Fig.2 Computational model for MPC-LBE code^[10]

2 计算结果与分析

2.1 稳态工况调试

首先对反应堆进行稳态调试,直到反应堆的关键参数在误差允许范围内达到堆设计值,并保持相对稳定,即可认为反应堆稳态建立,可开展瞬态模拟。图 3 展示了稳态目标通道反应堆相关材料温度的轴向分布,其中冷却剂的出口温度稳定在约 673 K,燃料芯块内部中平面温度稳定在约 995 K,燃料芯块外部中平面温度稳定在约 826 K,上述参数均在误差范围内与设计值相符,反应堆稳态建立,可开展瞬态计算。

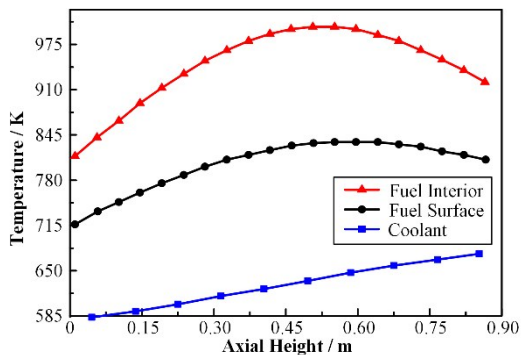


图 3 稳态目标通道相关材料温度轴向分布
Fig.3 Axial temperature distribution of relevant materials in the steady-state object channel

2.2 BOP 事故计算结果及分析

在上述稳态工况的基础上,BOP 事故发生,整个事故过程反应堆不停堆且无其他动作。

2.2.1 两倍 BOP 事故工况

首先模拟的是两倍 BOP 事故,图 4 给出了事故过程中目标通道功率和反应性的变化曲线。一方面,由于束流功率增加一倍,堆芯目标通道功率瞬间上升至约 190% 初始功率值,这主要是因为瞬发中子的快响应。此外,由于反应性的温度负反馈(燃料多普勒效应及冷却剂反应性温度负反馈)作用,使得在束流加倍的情况下通道功率并没有完全上升至原来的两倍,同时在此作用的调节下功率反而出现了略微下降,最终在约 100 s 时重新达到稳定,此时的功率净增值为 88% 的稳态功率值。另一方面,随着反应堆功率的上升,堆芯材料温度急剧上升(图 5),由于反应性温度负反馈的作用,反应性急剧下降,然后出现了略微上升,最终保持稳定。

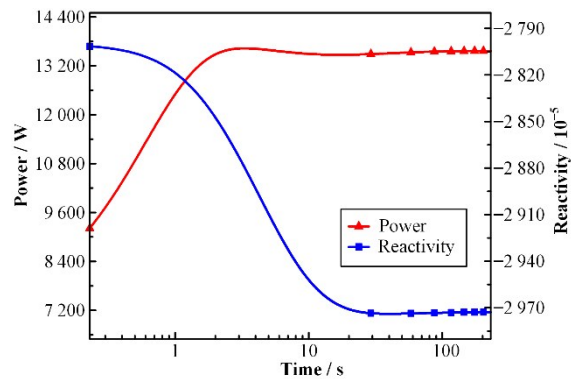


图 4 两倍 BOP 目标通道功率及反应性随时间的变化
Fig.4 Power and reactivity of object channel change with time under the double BOP accident

图 5 给出了两倍 BOP 事故过程中目标通道出口冷却剂以及燃料芯块内、外部中平面温度的变化曲线。由于束流功率增加一倍导致堆芯功率迅速增加,使得堆芯材料温度上升,其中燃料芯块内部中平面温度涨幅最大,增加了约 400 K,稳定值约为 1395 K,但低于燃料的温度限值(2663±20) K^[11],燃料芯块外部中平面温度涨幅次之,增加了约 179 K,稳定值约为 1005 K,也低于燃料的温度限值。冷却剂温度增加近 66 K,达到约 739 K,但仍远低于液态铅铋的沸点 1943 K^[12],冷却剂不会发生沸腾。由于功率增加导致冷却剂、燃料芯块温度上升,从而引发反应性温度负反馈使得功率下降,这也解释了图 4 为什么在束流功率加倍的情况下反应堆目标通道的功率没有升至相应倍数。

图 6 为两倍 BOP 事故过程中燃料和冷却剂的反应性温度负反馈情况,其中采用的燃料、冷却剂反应

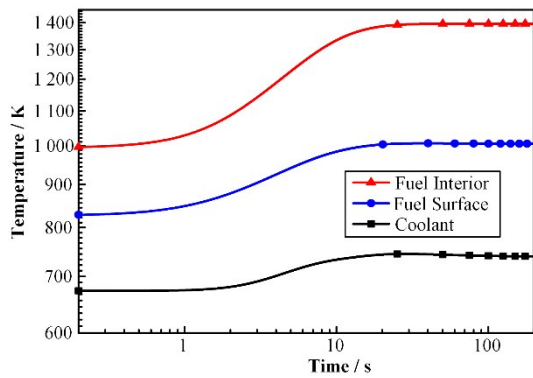


图5 两倍BOP事故目标通道相关材料温度变化
Fig.5 Temperatures change of relevant materials in object channel with time under the double BOP accident

性反馈模型^[9-10]在式(1)和式(2)中给出。负反馈对反应堆功率的调节起着重要作用,由图6可以看出,反应性的温度负反馈在事故发生时就开始响应,其中相较于冷却剂的反应性温度负反馈,燃料的反应性温度负反馈是剧烈的,反应性的温度负反馈效应影响反应堆功率变化,所以通过反应堆燃料以及冷却剂的反应性温度负反馈效应,反应堆安全在一定程度上得以保证。同图4所示,正是由于反应性温度负反馈作用,导致在束流增加一倍的情况下目标通道的功率不至于上升到原来的两倍。

$$\rho_{\text{Fuel},f}(t+h) = \left[\overline{T_{\text{Fuel}}}(t+h) - \overline{T_{\text{Fuel}}}(t) \right] \frac{A_D}{\overline{T_{\text{Fuel}}}(t+h)} \quad (1)$$

$$\rho_{\text{Coolant},f}(t+h) = \left[\overline{T_{\text{Coolant}}}(t+h) - \overline{T_{\text{Coolant}}}(t) \right] B_V \quad (2)$$

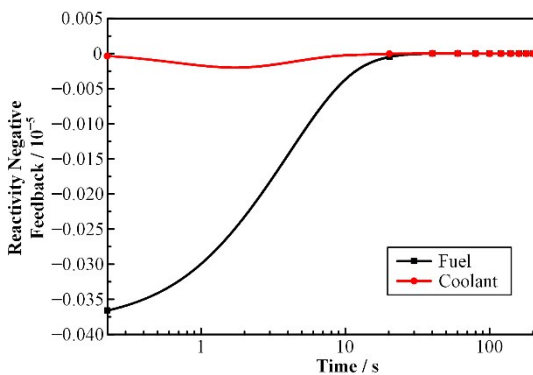


图6 两倍BOP事故反应性的负反馈变化
Fig.6 Negative feedback change of reactivity under the double BOP accident

2.2.2 三倍BOP事故工况

三倍BOP事故与两倍BOP事故的整体趋势和影响规律一致。

图7是三倍BOP事故过程中目标通道功率和反应性的变化曲线。一方面,由于束流功率增加两倍,堆芯目标通道功率瞬间上升至约278%初始功率值,然后略微下降,最终在约100 s时重新稳定,此时的功率净增值为170%的稳态功率值。另一方面,

反应堆总反应性随功率的上升而急剧下降,然后略微上升,最终保持稳定。

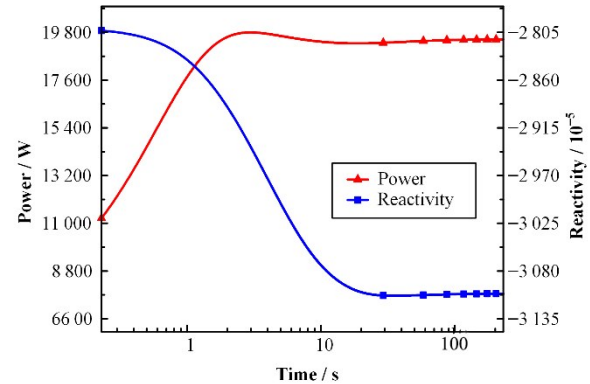


图7 三倍BOP目标通道功率及反应性随时间的变化
Fig.7 Power and reactivity change in object channel with time under the triple BOP accident

图8给出了三倍BOP事故过程中目标通道出口冷却剂以及燃料芯块内、外部中平面温度的变化曲线。其中燃料芯块内部中平面温度涨幅最大,增加了约790 K,稳定值约为1785 K,但低于燃料的温度限值(2663±20) K^[11],燃料芯块外部中平面温度涨幅次之,增加了约326 K,稳定值约为1152 K,也低于燃料的温度限值。冷却剂温度增加近119 K,达到约792 K,但仍远低于液态铅铋的沸点1943 K^[12],冷却剂不会发生沸腾。

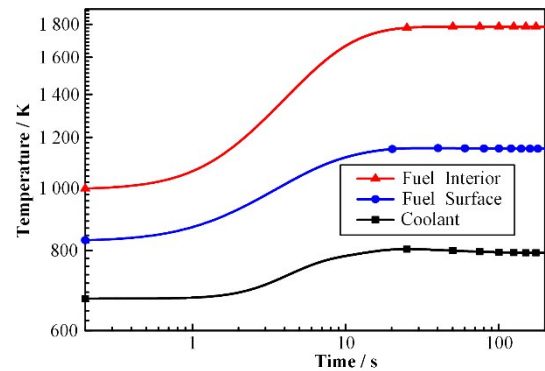


图8 三倍BOP事故目标通道相关材料温度变化
Fig.8 Temperature changes of relevant materials in object channel under the triple BOP accident

图9为三倍BOP事故过程中燃料和冷却剂的反应性温度负反馈情况,由图可以看出反应性的温度负反馈在事故发生时就开始响应,其中燃料的反应性温度负反馈是剧烈的。

2.3 BOP事故边界

BOP引起的功率骤变直接影响反应堆材料的温度变化,导致热应力效力,威胁反应堆的完整性,同时,在铅铋冷却快堆中,由于液态铅铋合金对金属材料具有强烈的腐蚀性,会影响反应堆的安全稳定运

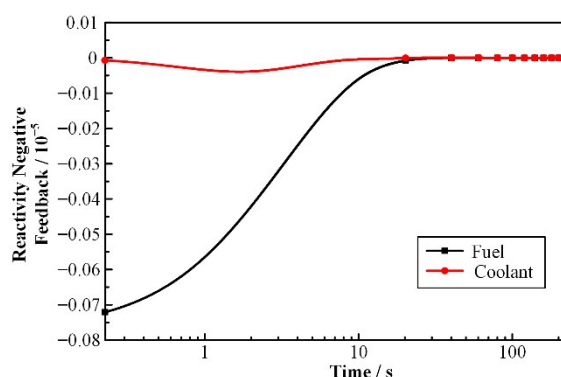


图9 三倍BOP事故反应性的负反馈变化
Fig.9 Negative feedback change of reactivity under the triple BOP accident

行。因此本文分别模拟了两倍、三倍BOP事故工况下目标通道燃料芯块内表面、冷却剂以及燃料包壳的最热温度变化,通过分析结果得出了BOP事故边界。

图10是不同倍数BOP事故工况下目标通道燃料芯块内表面、冷却剂以及燃料包壳的最热温度变化,通过分析它们各自在事故中达到的最高温度可知,即使束流功率增加至原来的三倍,目标通道燃料芯块内表面最热温度的最高值约为1793 K,冷却剂最热温度的最高值约为803 K,都没有达到各自的安全限值^[11-12],反应堆不会受到芯块熔化和冷却剂沸腾的威胁。而包壳最热温度在两倍功率事故下的最高值约为773 K,三倍功率事故下最高值约为843 K,在11 s左右就已经达到燃料包壳的温度安全限值,可见在三倍BOP事故下,燃料包壳的温度会超出安全限值^[13],威胁反应堆的安全。因此可得出,堆芯目标通道燃料包壳温度安全限值所对应的BOP事故边界即为两倍BOP事故。

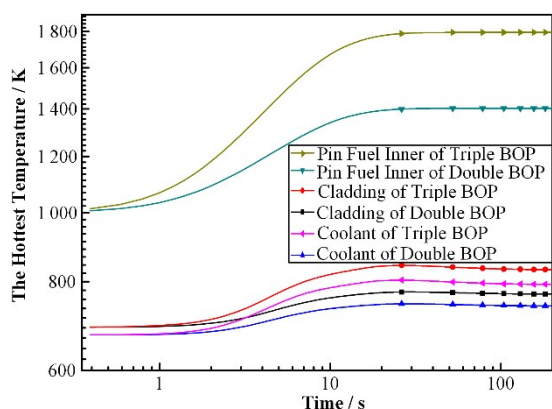


图10 不同倍数BOP事故目标通道相关材料最热温度
Fig.10 Highest temperature of relevant materials in object channel at different BOP

3 结语

从上述事故结果的分析中可以得出:1)XADS堆的功率对外部中子源变化的响应几乎是瞬时的;2)两倍、三倍BOP事故发生后,在反应性温度负反馈的作用下,最终反应堆功率分别为初始功率的1.88倍和2.7倍,没有达到相应的两倍和三倍。在此过程中燃料芯块内、外表面温度以及出口冷却剂温度均低于安全限值,表明燃料不会损坏,冷却剂不会发生沸腾;3)事故中负反馈作用对功率的调节效果显著,反应堆的固有安全性好;4)三倍BOP事故下,目标通道燃料芯块内表面及冷却剂的最热温度不会超出对应安全限值,但反应堆燃料包壳的最热温度会超出安全限值,因此BOP事故边界即为两倍BOP事故。

作者贡献声明 张玲:负责酝酿和设计研究方案,实施研究,采集、分析/解释数据,起草撰写文章;辜峙研:负责对文章的知识性内容作批评性审阅,获取研究经费;戴嘉宁:负责技术支持;欧文澜、潘麒文:负责材料支持;龚政宇、张牧昊:负责文章内容的审阅指导。

参考文献

- 1 Cammi A, Luzzi L, Porta A A, *et al.* Modelling and control strategy of the Italian LBE-XADS[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2006, **48**(6): 578 - 589. DOI: 10.1016/j.pnucene.2006.03.006.
- 2 Liu P, Chen X N, Rineiski A, *et al.* Transient analyses of the 400 MWth-class EFIT accelerator driven transmuter with the multi-physics code: SIMMER-III[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, **240**(10): 3481 - 3494. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.05.023.
- 3 于涛, 李吉根, 凌球, 等. ADS加速器束流瞬变分析程序开发[J]. *核动力工程*, 2007, **28**(2): 124 - 127. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2007.02.028.
YU Tao, LI Jigen, LING Qiu, *et al.* Development of a beam transient code for ADS[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2007, **28**(2): 124 - 127. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2007.02.028.
- 4 Suzuki T, Chen X N, Rineiski A, *et al.* Transient analyses for accelerator driven system PDS-XADS using the extended SIMMER-III code[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2005, **235**(24): 2594 - 2611. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2005.06.012.
- 5 汪振, 王刚, 辜峙研, 等. 加速器驱动铅铋冷却自然循环次临界堆束流瞬变事故研究[J]. *核技术*, 2015, **38**(1):

010604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.010604.
- WANG Zhen, WANG Gang, GU Zhixing, *et al.* Beam transient accident for lead-bismuth cooled ADS by natural circulation[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(1): 010604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.010604.
- 6 Ahmad A, Lindley B A, Parks G T. Accelerator-induced transients in accelerator driven subcritical reactors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, **696**: 55 - 65. DOI: 10.1016/j.nima.2012.09.004.
- 7 Sugawara T, Nishihara K, Tsujimoto K. Transient analyses for lead-bismuth cooled accelerator-driven system[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, **55**: 238 - 247. DOI: 10.1016/j.anucene.2012.12.016.
- 8 Gu Z X, Li F, Ge L Q, *et al.* Verification of a HC-PK-CFD coupled program based a benchmark on beam trip transients for XADS reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, **133**: 491 - 500. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.05.053.
- 9 D'Angelo A, Gabrielli F. Benchmark on beam interruptions in an accelerator-driven system. Final report on phase 1 calculations[J]. OECD Papers, 2005, **4**(8): 273 - 278.
- 10 Gu Z X, Zhang Q X, Gu Y, *et al.* Verification of a self-developed CFD-based multi-physics coupled code MPC-LBE for LBE-cooled reactor[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(5): 52. DOI: 10.1007/s41365-021-00887-x.
- 11 Lyon W L, Baily W E. The solid-liquid phase diagram for the UO₂-PuO₂ system[J]. Journal of Nuclear Materials, 1967, **22**(3): 332 - 339. DOI: 10.1016/0022-3115(67)90051-7.
- 12 苏子威, 周涛, 刘梦影, 邹文重. 液态铅铋合金热物性研究[J]. 核技术, 2013, **36**(9): 090205. DOI: DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.090205.
- SU Ziwei, ZHOU Tao, LIU Mengying, *et al.* Thermophysical properties of liquid lead-bismuth eutectic [J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(9): 090205. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.090205.
- 13 Ahmad A, Sheehy S L, Parks G T. The effect of beam interruptions on the integrity of ADSR fuel pin cladding: a thermo-mechanical analysis[J]. Annals of Nuclear Energy, 2012, **46**: 97 - 105. DOI: 10.1016/j.anucene.2012.03.021.