

文章编号:0253-2778(2015)11-0911-06

铅铋冷却反应堆补偿棒组件概念设计与分析

张康龙^{1,2}, 宋 勇², 郭浩民², 汪建业²

(1. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230027;

2. 中国科学院核能安全技术研究所中子输运理论与辐射安全重点实验室, 安徽合肥 230031)

摘要:根据铅铋冷却反应堆补偿棒运行面临的液态铅铋的高密度高浮力环境特点,设计了一种补偿棒组件结构方案,包括吸收体棒束、棒束抓手、配重体、内套筒、外套管等.通过有限元方法对组件承力部件内套筒和棒束上抓手进行了力学分析,计算比较了内套筒应力变化规律,分析验证了棒束上抓手的结构可行性,在此基础上确认了铅铋冷却反应堆补偿棒组件结构设计方案的合理性,为铅铋反应堆内其他面临同样高密度高浮力环境的其他构件设计提供了参考.

关键词:铅铋冷却反应堆;补偿棒;组件

中图分类号:TL352.1 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2015.11.005

引用格式: Zhang Kanglong, Song Yong, Guo Haomin, et al. Conceptual design and analysis of the shim-rod assembly for lead-bismuth eutectic (LBE) cooled reactor[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015,45(11):911-916.

张康龙,宋勇,郭浩民,等. 铅铋冷却反应堆补偿棒组件概念设计与分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2015,45(11):911-916.

Conceptual design and analysis of the shim-rod assembly for lead-bismuth eutectic (LBE) cooled reactor

ZHANG Kanglong^{1,2}, SONG Yong², GUO Haomin², WANG Jianye²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: A structure scheme of shim-rod assembly including absorber bundle, gripper, ballast, inner wrapper, wrapper etc. was proposed to solve the problem caused by the high density and high buoyancy coolant in the lead-bismuth cooled reactor. The mechanical analysis of the inner wrapper and the upper gripper was carried out based on the computation performed by finite element method. The stress changing tendency of the inner wrapper was analyzed and the structure of the upper gripper was verified, which indicates the feasibility of the shim-rod assembly design, providing a reference for other internals facing similar environments in LBE cooled reactors.

Key words: lead-bismuth cooled reactor; shim-rod; assembly

收稿日期:2015-03-10;修回日期:2015-05-21

基金项目:国家自然科学基金(91026004),中国科学院战略性先导科技专项(XDA03040000)资助.

作者简介:张康龙,男,1988年生,硕士生.研究方向:铅铋冷却反应堆控制棒. E-mail: zkl@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:宋勇,博士/副研究员. E-mail: yong.song@fds.org.cn

0 引言

铅铋冷却反应堆作为加速器驱动次临界系统 (accelerator driven sub-critical system, ADS) 以及第四代反应堆最有潜力堆型在国际范围内得到广泛关注^[1-3]. 中国科学院 2011 年启动了战略性先导科技专项“未来先进核裂变能—ADS 嬗变系统”研究, 其中, 中国科学院核能安全技术研究所 FDS 团队作为 ADS 专项的牵头单位之一, 负责中国铅基反应堆 (China lead-based reactor, CLEAR) 设计与研制工作^[4].

目前 FDS 团队在铅基反应堆物理^[5-6]、反应堆设计与分析软件开发^[7-9]、反应堆结构材料^[10-12]、液态重金属铅基合金工艺^[13-14]等方面开展了深入研究, 在此过程中完成了具有临界和加速器驱动次临界双模式运行能力的 10 MW 铅基研究实验堆 (CLEAR-I) 概念设计^[4].

在已完成的铅铋冷却反应堆概念设计中, 控制棒负责调节反应堆功率与紧急停堆, 对反应堆安全至关重要, 其由补偿棒、调节棒以及安全棒 3 种棒组成, 其中, 补偿棒负责反应堆正常运行时绝大部分反应性的控制工作, 对反应堆安全尤其重要, 本文重点研究铅铋冷却反应堆补偿棒.

补偿棒的结构设计需考虑多种因素, 尤其是液态铅铋的高密度高浮力环境. 国际上的铅铋快堆, 如欧盟 ALFRED^[15] 以及 ELFR^[16], 针对调节棒 (ALFRED 和 ELFR 的调节棒功能相当于本文补偿棒) 开展了相关设计研究, 二者均采用浮力落棒式结构, 但该结构在冷却剂丧失时会严重影响停堆能力. 钠冷快堆补偿棒工程设计^[17]采用重力落棒式结构, 但钠的密度较小, 对落棒影响较小. 综合考虑目前快堆的设计经验, 同时针对铅铋冷却反应堆控制棒系统面临的冷却剂高密度高浮力服役环境, 为保证事故工况安全停堆, 本文设计出一种可以在高浮力环

境下实现重力落棒的补偿棒结构设计, 并初步分析了补偿棒组件结构的可行性以及结构设计参数的变化对结构可靠性的影响规律.

1 补偿棒组件结构设计

反应堆功率通过控制棒的上下移动进行调节. 当控制棒由上向下全部插入堆芯时, 反应堆停堆, 由下向上全部拔出时, 堆芯具有最大反应性. 针对 CLEAR-I 的设计特点, 补偿棒组件驱动方案采用重力落棒停堆, 高密度冷却剂丧失反而有利于反应堆停堆. 补偿棒组件结构主要包括吸收体棒束、棒束抓手、配重体、内套筒、外套筒、传力杆以及内套筒封头, 径向结构示意图和轴向装配示意图分别如图 1 和图 2 所示.

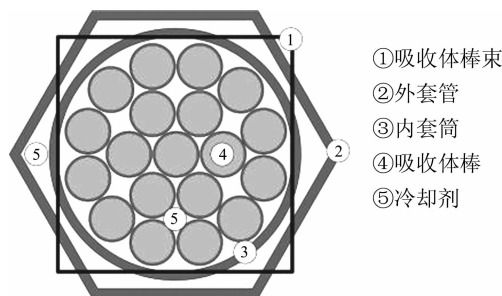


图 1 补偿棒组件径向结构示意图

Fig. 1 Horizontal cross-section of shim-rod assembly

吸收体棒束是补偿棒组件核心结构, 由 19 根吸收体棒规则排列组成, 吸收体棒束头部结构如图 3 所示.

棒束抓手按照位置不同可分为上抓手和下抓手, 抓手不仅要可靠约束 19 根吸收体棒, 还要允许棒与棒之间微量的相对位移, 经受力分析, 上抓手受到棒束约 150 kg 的向上作用力, 下抓手基本不受力, 故我们提出刚度较大的上抓手方案, 其对称剖切视图如图 4 所示, 下抓手参考 ALFRED 采用柔度较大的爪盘式约束抓手^[15], 如图 5 所示.

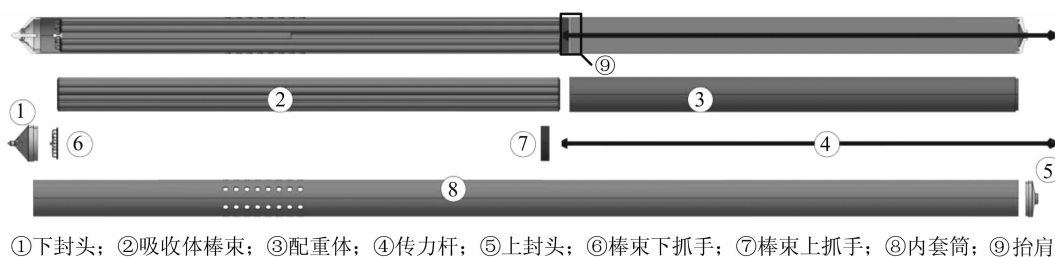


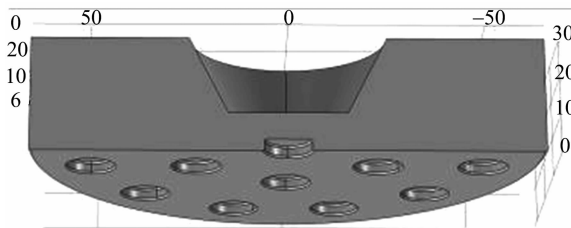
图 2 补偿棒组件装配示意图

Fig. 2 Sketch of shim-rod assembly



图 3 吸收体棒束头部结构

Fig. 3 Head construction of the bundle



图中数据单位均为 mm

图 4 棒束上抓手

Fig. 4 Upper gripper of the bundle

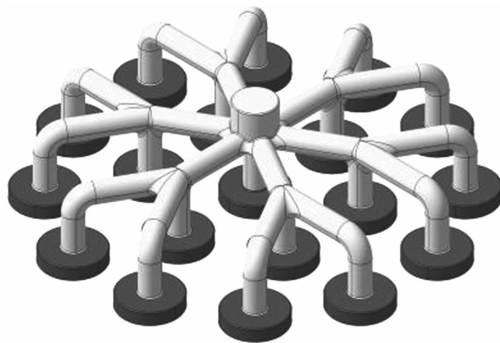


图 5 棒束下抓手

Fig. 5 Lower gripper of the bundle

配重物用于帮助补偿棒组件克服液态铅铋的巨大浮力使之能够依靠自身重力稳定自立在堆芯内,保证组件能够液力自紧,还有助于减小紧急停堆时的自由落棒时间.经分析比较,补偿棒组件采用钨作为配重物,由于钨吸收中子会活化,故将其置于吸收体棒束上方,远离堆芯.配重量设计基准为:组件在液态铅铋中受到的向下合力达到除去配重组件所受重力的 30%,如式(1)所示.

$$W_{\text{棒束}} + W_{\text{内套筒}} + W_{\text{传力杆}} + W_{\text{配重}} - W_{\text{总排LBE量}} = 30\% \times (W_{\text{棒束}} + W_{\text{内套筒}} + W_{\text{传力杆}}) \quad (1)$$

内套筒是包裹在棒束和配重物周围的不锈钢圆

筒,主要用于保护机械强度较差的吸收体棒束使之免于机械碰撞损坏以及承载并保护大质量配重物使之隔离冷却剂.由剖视图图 2 可见,台肩将棒束与配重物隔离,棒束受向上合力,配重受向下重力,配重通过内套筒台肩直接作用于传力杆承力头,棒束连接于勾杆承力头,不与内套筒及配重直接作用,可保证在正常运行以及紧急落棒工况下不受外界冲击力作用.

结合已经确定的棒束、内套筒、传力杆等结构,根据式(1)计算得到配重量约为 420 kg.补偿棒组件基本参数列于表 1.

表 1 铅铋冷却反应堆补偿棒参数

Tab. 1 Parameters of shim-rod for LBE-cooled reactor

配重材料	钨	吸收体棒数/根	19
配重质量/kg	约 420	内套筒材料	316L 钢
吸收体材料	B ₄ C	内套筒密度/(g · cm ⁻³)	7.9
吸收体密度/(g · cm ⁻³)	2.2	内套筒长度/mm	3 690
吸收体棒长度/mm	1 870	内套筒壁厚/mm	约 3

2 计算及分析

整个补偿棒组件结构的承力部件有内套筒和棒束上抓手.内套筒台肩与筒壁及中间孔壁是直角结构,为防止应力集中需要倒圆角,不同位置不同半径圆角对套筒应力分布的影响需要进行分析以选定最终倒角半径;另外,套筒壁厚变化对套筒应力分布及形变量的影响也需要分析,以确定最优的壁厚值.此外,棒束上抓手也需要做力学分析,以确定其是否满足设计要求.所有计算均采用有限元方法^[18].

2.1 内套筒倒圆角结构分析

对内套筒,按其结构将边界编号 1~7,连同计算得到的边界条件一起示于图 6(所有面均受到正压,5、6 面受水平铅铋压力, z 为垂直坐标值,单位为 mm).

需要倒圆角的位置标记为 r_1, r_2, r_3 ,连接处倒角分布如图 6 所示.基于补偿棒空间限制,内套筒壁厚设置为 3 mm,采用二维轴对称计算模型,其四边形网格见图 7.结合图 6 边界条件,倒角处不同倒角半径对应最大应力曲线见图 8.

由图 8 可见, r_1 在 0.1~3 mm 的倒角变化范围内最大应力基本是 r_2 的 3 倍, r_3 的 5 倍左右.当倒角半径由 0.1 mm 增加到 0.6 mm 时, r_2 与 r_3 最大应力可降低约 40%,其后便无明显变化, r_1 最大应力值随着倒角半径增加一直减小,3 mm 时最大应力较

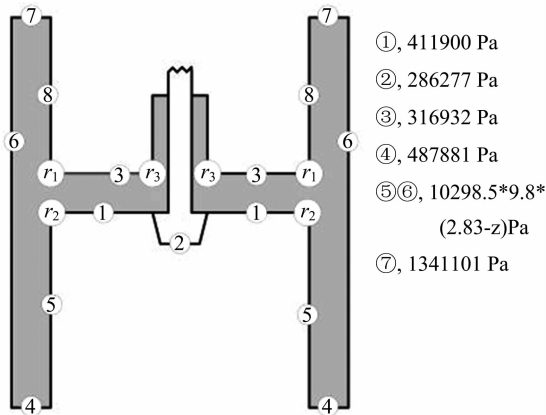


图 6 内套筒边界条件

Fig. 6 Boundary conditions of inner wrapper

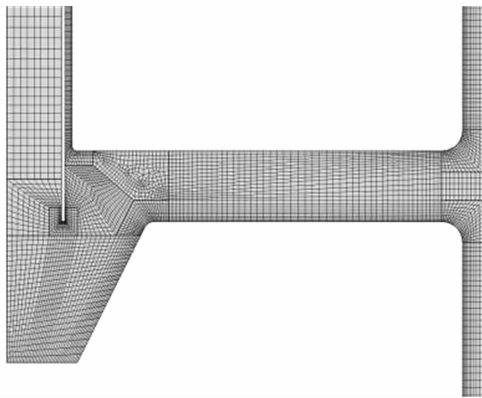


图 7 内套筒台肩计算网格

Fig. 7 Computation model of the shoulder

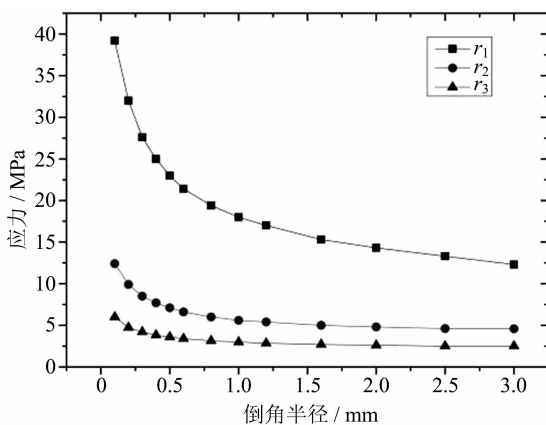


图 8 不同半径对应倒角处应最大应力

Fig. 8 Maximum stress of fillet with variational radius

0.1 mm 降低约 65%。以 r_1 为例,其整个圆角结构应力分布如图 9 所示,可见,随着倒角半径的增加,倒角处的应力分布愈发平缓,应力极值逐渐减小。

基于保守考虑,设计许用应力值参考 ASME 核

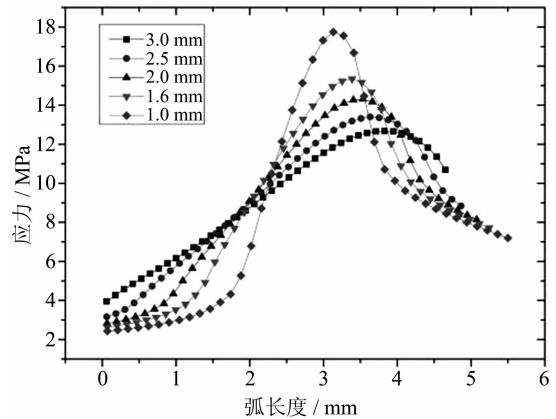


图 9 r_1 倒角应力分布

Fig. 9 Stress distribution of fillet r_1

电站压力容器标准^[19],取 111 MPa,根据以上分析, r_2 与 r_3 最大应力值不超过 15 MPa,而当 r_1 倒大于 1.2 mm 圆角时,最大应力不超过 20 MPa,远低于标准许用应力值,同时,经分析倒角处应力集中现象随着倒角半径增加得到明显缓解。根据机械零件倒圆与倒角标准^[20]推荐, r_1 与 r_2 处倒角半径取 3 mm, r_3 处倒角半径取 0.8 mm,对应最大应力值分别为 13,4.6,3.4 MPa。

2.2 套筒壁厚分析

由于内套筒壁薄而长且承受液态铅铋较大压力,需分析不同壁厚内套筒的应力表现。套筒壁厚为 3 mm 时的应力云图与形变图如图 10 所示。

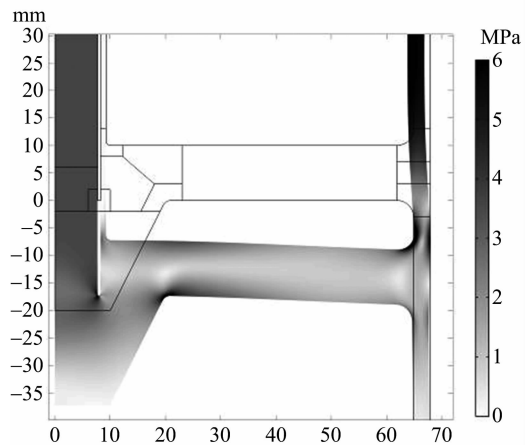
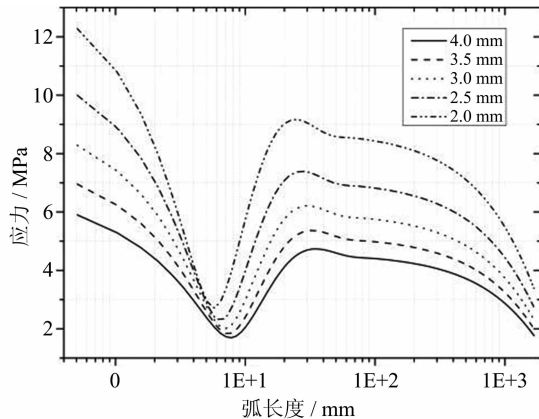


图 10 内套筒应力云图

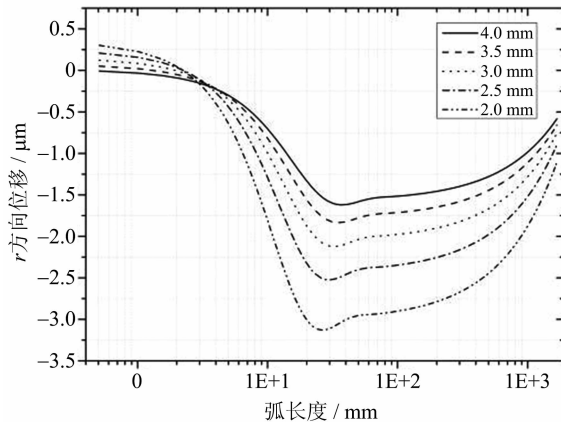
Fig. 10 Stress contour of inner wrapper

计算表明,台肩上部套筒壁变形最大,其中面 8 (位置见图 6)应力最大。由于补偿棒组件空间限制,取可能的 5 个壁厚值进行分析,其应力分布和径向位移分布如图 11 所示。

由图 11 可见,随着厚度增加,套筒壁的最大应



(a) 应力分布



(b) 径向位移

图 11 面 8 应力分布和径向位移

Fig. 11 Stress distribution and radial direction displacement of plane 8

力及形变量都逐渐减小,应力分布曲线也愈发平缓.随着壁厚进一步增大,应力与形变的降低趋势越不明显,且在可能的壁厚范围内,应力极值仅为 12 MPa,径向形变量极值仅为 $-3 \mu\text{m}$ 左右,完全满足设计基准要求^[17],综合分析后内套筒壁厚取 3 mm,这样既能保证足够的机械强度又不会因为内套筒外径过大与外套筒挤压摩擦而影响其自由移动.

2.3 吸收体棒束上抓手结构分析

除内套筒外,补偿棒组件移动部件内主要承力部件还有棒束上抓手,由于其为对称结构,故划取其整体结构 1/12 进行受力分析.计算网格和应力云图分别如图 12 和图 13 所示.

由图 13 可见,棒束上抓手应力最大不超过 1 MPa,远低于设计许用应力,满足设计要求.

3 结论

本文针对铅铋冷却反应堆补偿棒面临的液态铅

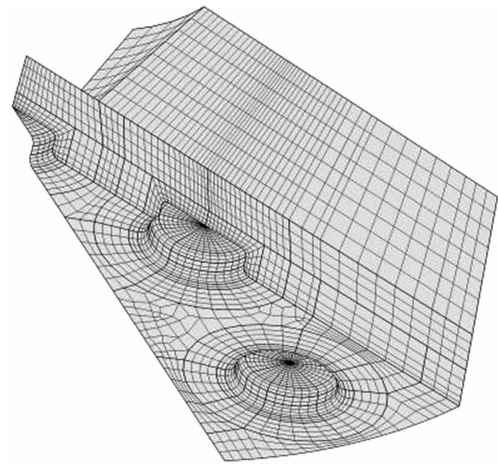


图 12 棒束上抓手 1/12 结构计算网格

Fig. 12 Computation model of the 1/12 upper gripper

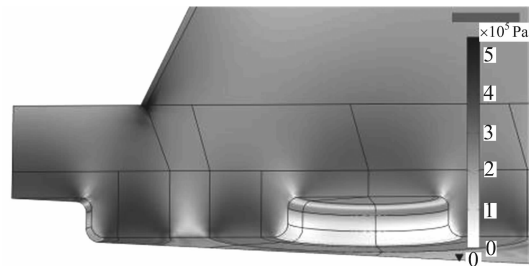


图 13 棒束上抓手应力云图

Fig. 13 Stress contour of upper gripper

铋的高密度高浮力服役环境,设计出一套完整补偿棒组件结构,包括吸收体棒束、棒束抓手、配重体、外套筒等结构.

对补偿棒组件主要承力部件内套筒和棒束上抓手做了受力分析,经计算分析比较内套筒直角连接处不同倒圆角半径及壁厚对套筒应力分布的影响,确定了内套筒的直角结构倒圆角半径及内套筒壁厚,验证了吸收体棒束上抓手结构力学可行性.

本文通过结构设计及有限元分析所得到的铅铋冷却反应堆补偿棒组件结构方案,对铅铋冷却反应堆内面临相同高密度高浮力环境的其他构件设计提供了一定参考.在未来的工作中,需要通过热工水力学分析优化补偿棒组件结构,确保组件能够被有效冷却;还需进行落棒时间分析,以确保在紧急停堆时,补偿棒组件能够及时快速插入堆芯,关停反应堆.

致谢 FDS 团队柏云清研究员指导完成总体结构设计,张勇博士指导完成相关结构分析,在此表示衷心感谢!

参考文献(References)

- [1] Sienicki J J, Moisseytsev A, Yang W S, et al. Status report on the Small Secure Transportable Autonomous Reactor (SSTAR); Lead-cooled Fast Reactor (LFR) and supporting research and development [R]. Argonne, IL: Argonne National Laboratory (ANL), 2008.
- [2] Carchon R, Borella A, van der Meer K. Safeguards for a Gen IV type reactor: Safeguards approach versus design information [C]// IAEA Symposium on International Safeguards: Preparing for Future Verification Challenges, Vienna, 2010. Vienna, Austria: The International Atomic Energy Agency (IAEA), 2010; IAEA-CN-184/308.
- [3] Grasso G, Petrovich C, Mattioli D, et al. The core design of ALFRED, a demonstrator for the European lead-cooled reactors [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 278: 287-301.
- [4] Wu Yican, Bai Yunqing, Song Yong, et al. Conceptual design of China lead-based research reactor CLEAR-I [J]. Nuclear Science and Engineering, 2014, 34: 201-208.
吴宜灿, 柏云清, 宋勇, 等. 中国铅基研究反应堆概念设计研究[J]. 核科学与工程, 2014, 34: 201-208.
- [5] Wu Y, Xie Z, Fischer U. A discrete ordinates nodal method for one-dimensional neutron transport calculation in curvilinear geometries [J]. Nuclear Science and Engineering, 1999, 133(3): 350-357.
- [6] Wu Y, Zhu X, Zheng S, et al. Neutronics analysis of dual-cooled waste transmutation blanket for the FDS [J]. Fusion Engineering and Design, 2002, 63-64: 133-138.
- [7] Wu Y, FDS Team. CAD-based interface programs for fusion neutron transport simulation [J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 84 (7-11): 1 987-1 992.
- [8] Wu Y, Zheng S, Zhu X, et al. Conceptual design of the fusion-driven subcritical system FDS-I [J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81: 1 305-1 311.
- [9] Wu Yican, Li Jingjing, Li Ying, et al. An integrated multi-functional neutronics calculation and analysis code system. VisualBUS [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, 27 (4): 365-373.
吴宜灿, 李静惊, 李莹, 等. 大型集成多功能中子学计算与分析系统 VisualBUS 的研究与发展[J]. 核科学与工程, 2007, 27(4): 365-373.
- [10] Huang Q, Li J, Chen Y. Study of irradiation effects in China low activation martensitic steel CLAM [J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 329-333: 268-272.
- [11] Huang Q, Baluc N, Dai Y, et al. Recent progress of R&D activities on reduced activation ferritic/martensitic steels [J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 442: S2-S8.
- [12] Li Y, Huang Q, Wu Y, et al. Mechanical properties and microstructures of China low activation martensitic steel compared with JLF-1 [J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367-370: 117-121.
- [13] Wu Yican, Huang Qunying, Zhu Zhiqiang, et al. Progress in design and development of series liquid lithium-lead experimental loops in China [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2009, 29(2): 161-169.
吴宜灿, 黄群英, 朱志强, 等. 中国系列液态锂铅实验回路设计与研发进展[J]. 核科学与工程, 2009, 29(2): 161-169.
- [14] Huang Q, Gao S, Zhu Z, et al. Progress in compatibility experiments on lithium-lead with candidate structural materials for fusion in China [J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 84: 242-246.
- [15] Manni F. Description, functional sizing and drawing of the main component of the ETDR control and shutdown rods [R]. Roma: S R S Servizi di Ricerche e Sviluppo S r l, 2013.
- [16] Döderlein C, Tuček K. Definition of the ELFR core and neutronic characterization [R]. Brussels: JRC (including contributions from AGH, ENEA, KIT), 2013.
- [17] 谢光善. 快中子堆燃料元件[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 229-244.
- [18] 胡于进, 王璋奇. 有限元分析及应用[M], 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [19] 美国机械工程师协会. ASME 规范第 II 卷 D 篇[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 6403.4-2008 零件倒圆与倒角[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.