

一体化快堆悬臂式换料机防组件跌落设计研究

刘志芳, 郭晓娴, 于团结, 张 威, 王浩仲

(中国原子能科学研究院 核工程设计研究所, 北京 102413)

摘要: 一体化快堆是世界核能系统的主流发展方向, 具有最高的核燃料循环效率。一体化快堆首次采用直拉式换料系统, 即悬臂式换料机、直拉式提升机和平移式转运机的组合方式。对换料机而言, 组件跌落是危害性最大的一种事故。对该事故的发生原因进行分析得出, 有2种情形会导致组件跌落: 抓手套发生严重塑性变形或断裂以及操作流程错误。可通过提高抓手套的机械强度来提高可靠度; 通过全自动控制换料并设置必要的连锁来避免操作流程错误。对于人因导致的操作流程错误无法彻底避免, 通过合理地设计导向管运动行程可将组件跌落高度降至最低, 从而减小跌落产生的危害性。因此, 换料机发生组件跌落的概率极低, 即使发生跌落, 也不会影响反应堆的安全。

关键词: 换料机; 组件跌落; 一体化快堆

中图分类号: TL353

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)S1-0134-06

doi: [10.7538/yzk.2024.youxian.0869](https://doi.org/10.7538/yzk.2024.youxian.0869)

Design and Research on Anti-assembly Drop of Integrated Fast Reactor Cantilever Transfer Mechanism

LIU Zhifang, GUO Xiaoxian, YU Tuanjie, ZHANG Wei, WANG Haozhong

(Department of Nuclear Engineering Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Nuclear energy is a high-tech strategic industry and a crucial support for fulfilling emission reduction commitments. The integrated fast reactor represents the world's mainstream development direction and offers the highest nuclear fuel cycle efficiency. The reactor is the core component of the integrated fast reactor and the largest facility within the integrated closed fuel nuclear energy cycle system. In the integrated fast reactor, the reactor equipment adopts a compact and integrated design, further enhancing its economic efficiency. Unlike previous fast reactor refuelling systems, the straight-pull refuelling system was adopted in the Chinese integrated fast reactor for the first time, which combined the cantilever transfer mechanism, straight-pull elevator, and translation transporter. This design makes the reactor more compact and improves its economic efficiency. The cantilever transfer mechanism is a specialized device for in-pile transfer of fuel assemblies. It was fixed on the small rotary plug and can cover an area exceeding the diameter of the rotary plug. This design offers a significant advantage when the top arrangement space is limited and the size of the rotary plug is constrained. By using the cantilever transfer mechanism, the number of rotary plugs can be reduced from 3 to 2. Fuel assembly drop is one of the most harmful and serious accidents. Analysis of the gripper components

reveals two scenarios that may cause the fuel assembly to fall: severe plastic deformation or fracture of the gripping glove (including strength failure and fatigue failure) and operational flow errors. Reliability can be improved by increasing the mechanical strength of the gripping gloves. Based on strength and fatigue calculations, the probability of gripping glove failure is very low. Process errors can be avoided by fully controlling the refuelling system and implementing necessary interlocks. Human intervention is minimized during fully automatic operation. While errors caused by human factors cannot be entirely eliminated, the drop height of the fuel assembly can be minimized by rationally designing the movement stroke of the guide tube, thereby reducing potential harm. According to drop test results of the CFR600 fuel assembly, free fall from this height does not cause damage to the fuel assembly. Therefore, the probability of fuel assembly drops in the transfer mechanism is extremely low, and even if a drop occurs, it will not affect the safety of the reactor.

Key words: transfer mechanism; assembly drop; integrated fast reactor

核电在清洁替代和能源生产与消费革命的转型中具有突出的优势^[1]。一体化快堆采用同厂址燃料再生模式,由于裂变燃料通过贫铀电厂自身生产,燃料费仅包含组件制造加工费,与压水堆等热堆需要购买天然铀不同,其燃料成本极大降低,且长期稳定在低位。未来一体化快堆全寿期的经济性将显著优于目前的核能系统。因此,一体化快堆是世界的主流发展方向^[2],具有非常高的核燃料循环效率,中国、美国、俄罗斯都有目标相似的方案^[3]。俄罗斯计划于2035年底前建成首座BN-1200钠冷快堆^[4],实现闭式燃料循环^[5]。在此背景下,中核集团主力推行一体化闭式循环快堆核能系统的开发。

反应堆是一体化快堆的核心环节,也是一体化闭式燃料核能循环系统中规模最大的设施。在一体化快堆中,反应堆设备采取了紧凑化、集成化的方式,进一步提升了经济性。换料系统包括堆内换料系统与堆外换料系统。通过堆内、外换料系统相配合实现将新燃料组件从堆外转运至反应堆,将乏燃料组件从反应堆转运出堆的全流程操作。

与600 MW示范快堆的换料系统不同,一体化快堆首次采用直拉式换料系统,即悬臂式换料机、直拉式提升机和平移式转运机的组合方式。悬臂式换料机是一体化快堆堆内换料系统的关键设备之一,是堆内转运组件的专用设备。俄罗斯的BN-1200反应堆和美国Fermi反应堆均采用悬臂式换料机结构。美国Fermi反应堆的悬臂式换料机体积较大,占用堆顶上方空间,而BN-1200反应堆的悬臂换料机外形细长,有利于反应堆上设

备的紧凑化布置。国内快堆以往均采用直拉式换料机,其优点是结构简单,工作可靠性较高,缺点是经济性较差,相较于悬臂式换料机,其所需配备的旋塞直径较大,数量较多,导致堆容器直径增大。而一体化快堆对经济性的要求较高,因此宜采用悬臂式换料机。我国首次研发的悬臂式换料机,安装在旋塞上,借助于旋塞和自身的旋转,用于堆内插拔组件或将组件放入提升机吊桶内。换料机能否安全可靠运行,直接影响反应堆的可靠性。在悬臂式换料机的所有故障模式中,组件跌落是危害性最大、后果最严重的一种故障模式,因此防跌落设计是悬臂式换料机设计时需要考虑的重中之重,本文将对此进行设计研究。

1 直拉式换料系统优势

一体化快堆采用的直拉式换料系统如图1所示。换料机固定安装在小旋塞上,采用悬臂式换料机,换料机的覆盖范围可超出旋塞的直径。在堆顶布置空间紧张,对旋塞的尺寸有限制的情况下

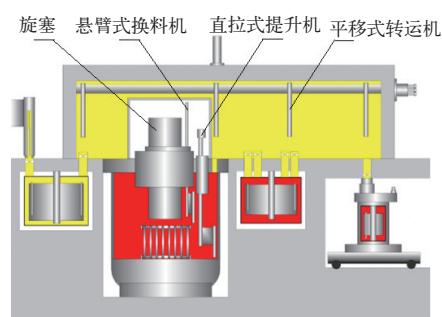


图1 直拉式换料系统示意图

Fig. 1 Straight-pull refuelling system

下具有相对的优势。此外,旋塞的数量可以由3个减少为2个。堆内提升机、堆顶转运室影响容器内结构设计及堆顶大设备的布置。在堆内采用直拉式提升机,组件能够通过提升机沿竖直方向进出反应堆堆芯。相对于倾斜式提升机,在堆内大设备尺寸较大、堆芯屏蔽较厚的情况下,在缩小堆容器尺寸方面具有优势。

采用平移式转运机,可沿直线水平往复移动,组件的各操作工位沿转运机的运行轨迹分布,其转运室为直线型,占据的堆顶布置空间更小。在堆芯较小、堆顶大设备较大的情况下,其对优化堆容器尺寸,减小容器内注钠量具有优势。

综上所述,直拉式换料系统可减小旋塞尺寸、数量;减小堆容器尺寸;紧凑化堆外换料系统的布置,优化占用空间,从而提高反应堆的经济性。

2 悬臂式换料机的防组件跌落设计与分析

2.1 抓手部件结构设计

悬臂式换料机抓手部件的结构如图2所示。

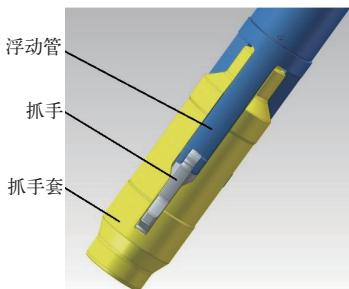


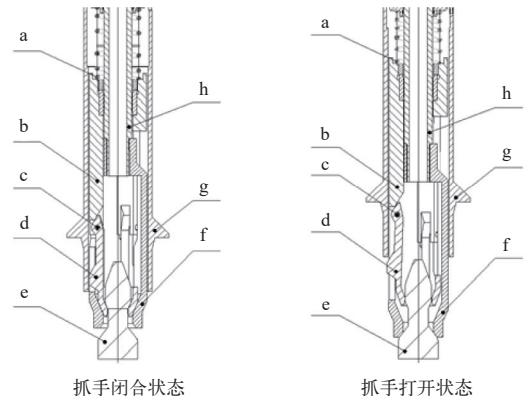
图2 抓手部件模型图

Fig. 2 Gripper model

抓手数量为3个,周向均布。抓手上部的连杆通过销轴挂在浮动管上,自由状态下可绕销轴随意转动,当3个抓手合拢时,抓手内壁的锥面可托住组件的操作头。

抓手套的作用是聚拢且支承抓手。抓手套上部与刚性杆连接,在驱动机构的带动下实现竖直方向的升降运动。抓手套侧面开有3个长槽,抓手侧面的凸块在槽内轴向运动,起导向作用的同时,也起到周向定位的作用,防止抓手与抓手套发生相对转动。抓手套底部为锥形,在抓手和组件的重力和弹簧弹力的作用下,抓手套的内锥面与抓手底部的外壁贴合,达到聚拢抓手的目的。

抓手和抓手套贴合的状态即为抓手的闭合状态。在闭合状态下,由于外层导向管的存在,同样限制了抓手的打开,对抓手的约束形成了双保险,如图3所示;驱动机构将导向管和浮动管提升一定距离后,抓手套和导向管对抓手的双保险约束消失,此时抓手处于打开状态,可以进行组件的抓取和释放,亦如图3所示。



a—弹簧;b—浮动管;c—销轴;d—抓手;e—组件;
f—抓手套;g—导向管;h—刚性杆

图3 抓手闭合和打开状态示意图

Fig. 3 Gripper closure state and open state

2.2 组件操作流程

正确的抓取组件流程为:抓手部件下降到下部工作位→导向管下降到下部工作位→抓手部件上升到上部工作位→导向管上升到上部工作位。此时,组件被提升到了上部工作位,旋塞启动旋转将换料机抓手部件定位到待插组件的空位置。

正确的插入组件流程为:导向管下降到下部工作位→抓手部件下降到下部工作位→导向管上升到上部工作位→抓手部件上升到上部工作位。此时,组件被插入到堆芯指定位置,抓手部件和导向管皆回归上部工作位。

2.3 组件跌落故障分析

由抓手结构可知,抓手套和导向管的双保险限制了抓手的自由度,从结构原理的角度不会发生张开,确保组件不发生跌落事故。但在以下2种意外状态下,依然会发生组件跌落事故。

1) 抓手套失效

由抓手部件结构可知,抓手部件在带组件进行升降运动时,组件、抓手、浮动管的重力、弹簧弹力和提升组件过程中受到的阻力全都通过抓手作用在抓手套内侧锥面上,在地震工况下需叠加

地震载荷。因此,抓手套是主要承载零件,当抓手套发生严重塑性变形或断裂时,组件会随着断裂零件一起跌落堆芯。

2) 操作流程错误

插入组件过程中,若未按规定流程操作,导向管仍在上部工作位时即下降抓手部件,则在抓手伸出导向管后,抓手张开,组件会发生跌落事故。

以上2种故障客观存在且不可避免,如何降低该故障发生的概率以及降低该故障发生后造成危害性就成为设计研究的重点。

2.4 防组件跌落设计

1) 防止抓手套失效设计

(1) 防止强度失效

在结构设计时,通过安全系数将材料的分散性、制造过程中的不确定性、分析方法的不确定性予以保守考虑。利用安全系数来表示设计裕度,值越大,说明结构越可靠,发生概率越低。反之,安全系数越小,概率越高^[6]。

换料机正常抓取组件时,抓手部件受到组件的正压力,在提升过程中受到阻力时,抓手部件与组件之间的正压力可达40 kN。抓手部件材料使用321奥氏体不锈钢。用有限元计算应力分布,输入条件:工作温度250 °C,抓手部件受拉力40 kN。边界条件:导向管顶部施加固定约束,刚性杆与驱动机构连接处施加固定约束,抓手套与抓手锥面接触压紧,抓手内锥面与组件头部接触。计算结果显示:拉力应力最大处在抓手套上,应力为60 MPa,如图4所示。

根据机械可靠性设计方法^[7],将结构的应力大于材料的屈服强度时的情况定义为结构失效,如图5中两曲线干涉区域即为可能发生失效的概率

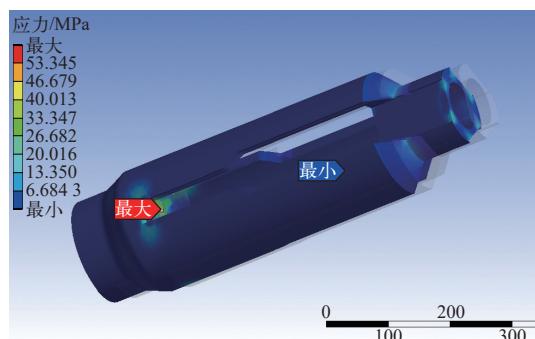


图4 抓手套应力分布云图

Fig. 4 Cloud diagram of stress distribution of gripper gloves

率^[8]。在得到应力分布后,再通过查询的材料屈服强度分布,根据应力-强度干涉理论^[9],可得到抓手套的可靠度数值即该结构不发生失效的概率。

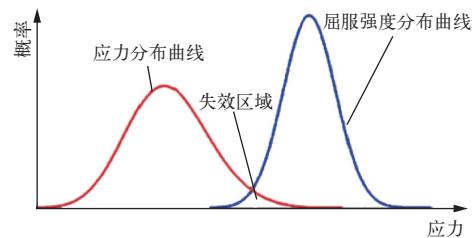


图5 应力-强度干涉模型
Fig. 5 Stress-strength interference model

机械零件的材料的屈服强度和应力值均为随机变量^[10],通常服从正态分布。在换料工况温度250 °C下,321奥氏体不锈钢的屈服强度150 MPa^[11]。当应力和强度均服从正态分布时,连接系数 Z_R 的计算公式^[12]为:

$$Z_R = \frac{\bar{x}_s - \bar{x}_i}{(S_{x_s}^2 + S_{x_i}^2)^{\frac{1}{2}}}$$

$$S_{x_s} = \bar{x}_s V_s = 150 \times 0.1 = 15$$

其中: \bar{x}_s 为材料强度均值,即150 MPa; \bar{x}_i 为应力均值,即有限元计算结果60 MPa; S_{x_s} 为材料强度标准差; V_s 为材料强度变异系数,保守取值0.1^[13]; S_{x_i} 为应力强度标准差。

在换料机操作组件过程中,抓手套所受应力是一随机变量,受多重因素影响,其中组件重量为定值,其余随机变量包括组件弯曲量、被抓组件周围6根组件弯曲量、旋塞定位误差,一体化快堆的换料机尚无数据支撑,参考CFR600换料机的试验统计数据,保守取值 $S_{x_i}=10$ 。

$$Z_R = \frac{\bar{x}_s - \bar{x}_i}{(S_{x_s}^2 + S_{x_i}^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{150 - 60}{(15^2 + 10^2)^{\frac{1}{2}}} = 5.0$$

Z_R 与可靠度 R 的正态分布关系($R=\Phi(Z_R)$)列于表1^[12]。查表1可知,抓手套不发生失效的可靠度为:0.999 999< R <0.999 999 9。组件因抓手套发生失效导致跌落的概率极低。

(2) 防止疲劳失效

机械零件经过一定次数的循环载荷或交变应力作用后引发的断裂现象称为疲劳断裂,也称为机械疲劳。在反应堆停堆换料工况下,换料机连续操作组件时,抓手套的应力循环如图6所示。特殊情况下,换料机可以用40 kN的力来拔组件,

表 1 连接系数与可靠度的关系
Table 1 Relationship between Z_R and R

R	Z_R
0.9	1.282
0.99	2.326
0.999	3.09
0.9999	3.719
0.99999	4.625
0.999999	4.753
0.9999999	5.199
0.99999999	5.612

此时抓手套的最大应力为 55 MPa。为计算结果的保守性,用 55 MPa 来计算换料工况(250 °C)下抓手套的疲劳寿命。疲劳寿命可通过 S-N 曲线进行预测,孙伟明等^[14]曾对 321 奥氏体不锈钢的疲劳性能做过测试(试验温度 350 °C),将测试结果拟合出 S-N 曲线,如图 7 所示。对于 321 奥氏体不锈钢在 350 °C 的试验结果,按 ASME 规定的安全系数绘制的曲线,均在 ASME Sec. III Div. I NH 1420-1B 所推荐的 316SS 常温的疲劳设计曲线所包围的范围之内,因此采用 ASME Sec. III Div. I NH 1420-1B 的疲劳设计曲线进行疲劳分析是可行的。据此可计算出抓手套在 55 MPa 的应力条件下,循环次数大于 10^7 。抓手、销轴、操作杆等零件的应力均小于 55 MPa,因此可判断出抓手、销轴、操作杆等零件的循环次数大于 10^7 ,远大于

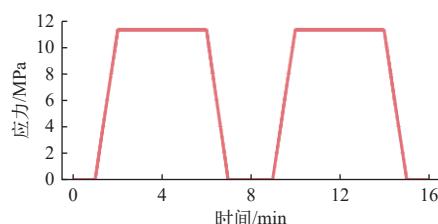


图 6 抓手套应力循环图

Fig. 6 Stress cycle diagram of gripper gloves

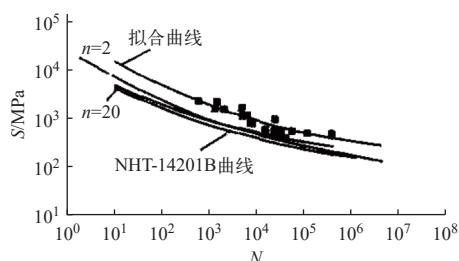


图 7 321 奥氏体不锈钢 S-N 曲线

Fig. 7 S-N diagram of 321 stainless steel

换料机寿期内抓手套的应力循环次数,因此机械疲劳损伤为 $54\ 000/10^7=0.005\ 4$,非常微小可忽略不计。

2) 防止操作流程错误设计

为换料系统操作组件的过程设计一套控制系统,全自动模式严格按照预定的控制流程操作组件,设置必要的连锁^[15],减少人为干预,提高换料的安全性和可靠性^[16]。插入组件时,抓手部件下降的必要条件是:堆芯栅格或提升机吊桶是空着的;已收到旋塞引导定位已完成的信号;导向管在下部工作位。

通过以上连锁设置可避免导向管在上部工作位时下降抓手部件所导致的组件跌落。全自动控制可避免人因故障的发生。但在反应堆长达几十年的寿期中,不可避免地会遇到各种状况。如果在换料过程中控制系统发生故障或电机发生故障,需操作人员使用手动机构将组件提升或下降,一旦操作人员发生失误,在插入组件过程中,导向管处在上部工作位时就下降抓手部件,那么,在抓手伸出导向管后,抓手张开,组件就会发生跌落事故。

这种事故原因从原理上无法完全避免,此时的设计需要尽可能降低将组件跌落后所造成的危害,即降低组件可能发生的跌落高度。抓手在伸出导向管后才会张开,因此,需要最大限度降低导向管停留在上部工作位时的高度,即导向管的工作行程。导向管的行程在确保能够打开抓手,且导向管底部高于组件头并留有一定的安全距离不会在旋塞旋转定位时与堆内组件发生干涉的前提下,只需要 300 mm 行程。安全距离参考 CEFR 换料机和 600 MW 示范快堆换料机取 120 mm。在此行程下,抓手下降伸出导向管后,组件跌落的高度为 139.4 mm,如图 8 所示。一体化快堆组件在 139.4 mm 的高度自由落体所产生的影响尚未进行试验验证,参考 CFR600 组件的跌落试验结果,该高度自由落体后不会造成组件破损。

3 小结

本文对换料机发生组件跌落事故的发生原因进行了分析,仅在抓手套发生失效、操作流程错误这 2 种故障下会发生组件跌落事故。为降低该事故发生概率,从设计角度采取了以下措施:通过提高抓手套的机械强度提高可靠度,经计算,抓手

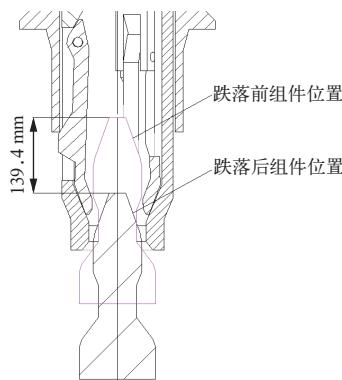


图 8 组件跌落位置图

Fig. 8 Fuel assembly drop location diagram

套不发生失效的可靠度在 $0.999\ 999 \sim 0.999\ 999\ 9$ 之间, 组件因抓手套发生失效导致跌落的概率极低; 通过全自动控制换料并设置必要的连锁可避免操作流程错误。人因导致的操作流程错误无法彻底避免, 通过合理设计导向管运动行程可将组件跌落高度降至最低 139.4 mm。参考 CFR600 组件的跌落试验结果, 该高度自由落体后不会造成组件破损。因此, 换料机发生组件跌落的概率极低, 即使发生跌落, 也不会影响反应堆安全。

参考文献:

- [1] 李林蔚, 白云生. “双碳”目标下我国核能“三步走”发展战略思考[J]. 中国电力企业管理, 2023(28): 71-73.
LI Linwei, BAI Yunsheng. Thinking on the three-step development strategy of China's nuclear energy under the target of “double carbon” [J]. China Power Enterprise Management, 2023(28): 71-73(in Chinese).
- [2] PETRENKO A, MAKSIMOV A, KATALEVICH A. Current state of development of industrial power complexes with fast neutron reactors[J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, 386: 111547.
- [3] 张东辉, 王松平, 代智文. 国际快堆发展综述[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(增刊): 265-270.
ZHANG Donghui, WANG Songping, DAI Zhiwen. Review on development of sodium-cooled fast reactor worldwide[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(Suppl.): 265-270(in Chinese).
- [4] 李晨曦, 王兴春. 俄计划 2035 年底前建成首座 BN-1200 钠冷快堆[J]. 国外核新闻, 2022(2): 8.
LI Chenxi, WANG Xingchun. Russia plans to build the first BN-1200 sodium-cooled fast reactor before the end of 2035[J]. Foreign Nuclear News, 2022(2): 8(in Chinese).
- [5] VASILEV B A, VASYAEV A V, ZVEREV D L, et al. Development of the new generation power unit with the BN-1200 reactor, IAEA-CN245-402[R]. Vienna: IAEA, 2015.
- [6] 邱宣怀. 机械设计[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [7] 龚庆祥. 型号可靠性工程手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [8] 欧阳杰, 俞思源. 一种基于机械可靠性的安全设计方法[J]. 机电工程技术, 2022, 51(7): 207-209, 230.
OUYANG Jie, YU Siyuan. A safety design method based on mechanical reliability[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(7): 207-209, 230(in Chinese).
- [9] 王金武. 可靠性工程基础[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [10] 乐滨, 石端伟. 基于可靠性的机械安全系数设计方法的探讨[J]. 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(2): 48-52.
LE Bin, SHI Duanwei. Probing into design of mechanical safety factor based on reliability[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, 34(2): 48-52(in Chinese).
- [11] ASME 锅炉及压力容器材料委员会. ASME 锅炉及压力容器规范国际性规范 II: 材料 D 篇[S]. 北京: 中国石化出版社, 2015.
- [12] 闻邦椿. 机械设计手册, 第 6 卷[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [13] 许卫宝, 钟涛. 机械产品可靠性设计与试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [14] 孙伟明, 任欣金, 伟娅, 等. 321 奥氏体不锈钢的疲劳性能测试和 S-N 曲线的验证[C]//全国反应堆结构力学学会. 上海: 中国力学学会反应堆结构力学专业委员会, 2004.
- [15] 董升国, 马洪盛, 赵莉霞. 中国实验快堆换料机控制系统设计及台架调试[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(2): 135-139.
DONG Shengguo, MA Hongsheng, ZHAO Lixia. Design and adjustment on test bed of replacing subassembly machine control system for China Experimental Fast Reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(2): 135-139(in Chinese).
- [16] 朱皓, 董升国, 马洪盛, 等. CEFR 换料控制系统全自动监控程序的开发与实现[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(2): 141-145.
ZHU Hao, DONG Shengguo, MA Hongsheng, et al. Development and implementation of full-automatic supervision and control programme for CEFR refueling control system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(2): 141-145(in Chinese).