

低放废水处理设施升级改造设计中的安全

王 帅¹, 秦 强¹, 邓 玥², 马洪军¹, 何柳斌¹, 乔延波¹,
刘学阳¹, 王红玉¹, 钱正华¹, 蔡 军¹, 李长园¹, 陈 堃^{1*}

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800; 2. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为确保低放废水处理设施的安全, 采取了一系列安全措施。1) 将设备布局优化和局部加固。2) 对处理对象的放射性总活度、酸根离子等进行了限定。3) 为保证放射性废水暂存、输送、处理和排放过程安全, 从废水储罐、特排管道、自动化控制、报警、安全联锁等方面进行了优化设计。4) 为保证人员安全, 从辐射分区、送排风、出入控制、辐射监测和辐射屏蔽等方面进行了设计。5) 为防止无关人员误入或入侵, 设计了门禁控制、入侵报警和视频监控等系统。该低放废水处理设施符合国家标准, 目前已完成了设计、加工制造、安装、调试和验收。

关键词: 放射性废水; 安全; 改造; 辐射监测; 辐射屏蔽

中图分类号: TL941

文献标志码: A

文章编号: 1672-755X(2015)03-0001-06

Safety Research in Upgrade of Low-level Radioactive Wastewater Treatment Facility

WANG Shuai¹, QIN Qiang¹, DENG Yue², MA Hong-jun¹, HE Liu-bin¹, QIAO Yan-bo¹,
LIU Xue-yang¹, WANG Hong-yu¹, QIAN Zheng-hua¹, CAI Jun¹, LI Chang-yuan¹, CHEN Kun^{1*}

(1. Shanghai Institute of Applied Physics of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: We adopted a series of safety measures to ensure the safety of low-level radioactive wastewater treatment facility. 1) We took such measures as equipment layout optimization and partial reinforcement. 2) The total radioactivity and acid ions of the wastewater were limited. 3) An optimized design was made in the following aspects such as wastewater tanks, pipes, process automation and control, alarm and safety interlock to ensure the safety during wastewater temporary storage, transport, treatment and discharge. 4) To ensure the safety of staff and the public, another optimized design was made in the aspect of radiation zoning, access control, ventilation, radiation monitoring and shielding. 5) We also designed access control system, intrusion alarm system and video surveillance system to prevent the invasion of unauthorized persons. The system meets the requirements of GB. We have completed the design, manufacturing, installation, debugging and acceptance.

Key words: radioactive wastewater; safety; upgrade; radiation monitoring; radiation shielding

某低放射性废水处理设施建于 1964 年, 原为单层局部二层的砌体结构。1981 年加建一层, 成为二层(局部三层)建筑。原设计及加层均未考虑抗震设防。建筑长 30.4 m, 宽分别为 10.0 m 和 6.0 m。一、二、三层层高 4.0 m, 二、三层层高 3.7 m, 总建筑面积约 600 m²[1]。设施内的原处理工艺为化学沉淀和离子交换, 2002 年

收稿日期: 2015-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(2150743); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA02050300)

作者简介: 王帅(1980—), 男, 内蒙古化德人, 博士后, 主要从事放射性废物处理研究。

通信作者: 陈堃(1977—), 男, 安徽合肥人, 研究员, 博士, 主要从事反应堆安全分析、事故分析与实验验证研究。

更换了新的离子交换系统,并于 2005 年使用过一次,此后一直处于闲置状态。设施内的工艺系统和配套设施大多超出了设计寿命,出现了严重的老化现象,已无法满足目前中科院应用物理研究所放射性废水的处理需要。因此从 2012 年开始对其进行改造设计,此次改造采用的是传统的沉淀、蒸发和离子交换组合工艺^[2]。2014 年底完成了配套设施的改造和工艺系统的安装,2015 年初完成了工艺系统的调试和验收。

维护好核设施的安全是更好利用核能、实现核能更大发展的前提。放射性废水处理设施作为核设施的一种,在设计、改造过程中必须采取切实有效的措施以保证其运行安全,防止发生放射性泄漏,保护人员和环境免受辐射危害。在此次低放废水处理设施改造中我们主要考虑了以下几个方面的安全因素:1) 建筑结构安全;2) 低放废水处理系统的安全;3) 低放废水暂存、输送、处理和排放过程的安全;4) 辐射安全;5) 安全防范。

1 建筑结构的安全

低放废水处理设施的原有基础采用的是砌体墙下的刚性基础,高度 200 mm,宽度 600~700 mm,75 号素混凝土。按照目前的规范要求,该种形式的基础承载能力较差,而工艺设备的重量为 0.2~2.9 t。为了满足工艺设备的承重要求,采用了如下几种处理方式。1) 尽可能将设备布置在一层;2) 增大一层新增设备底板面积以保证地基承载力及沉降,同时调整设备位置以便避开原有建筑刚性基础;3) 对于必须放置在二层的取样手套箱、蒸发系统和离子交换系统,在原有二层楼板下架设 2 道钢梁,钢梁与原有楼板贴紧并支撑于原有承重墙上以分散上部结构的设备荷载,同时要将设备放置在 2 道钢梁的中部,见图 1。

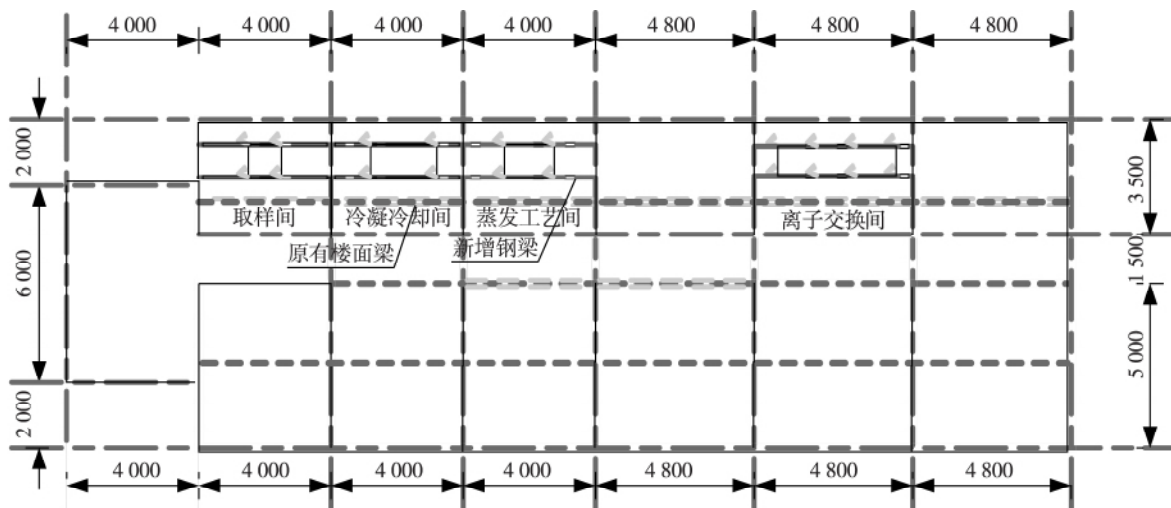


图 1 低放废水处理设施二层楼面新增钢梁布置

Fig. 1 Layout of new steel beam at the second floor of low level radioactivity wastewater treatment facility

2 低放废水处理系统和处理过程的安全

2.1 低放废水处理系统的安全

为了保证低放废水处理系统运行期间的安全、经处理的废水能达标排放,减少低放废水输送、暂存和处理过程对设备和管道的腐蚀。在设计之初,就根据研究所放射性废水的产生情况和各处理工艺的处理能力确定了低放废水处理系统的接收要求和处理对象。废水的接收要求是放射性总活度 $\leq 4 \times 10^6 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$, 废水中硝酸根离子浓度 $\leq 2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 其他酸根离子总浓度 $\leq 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中不包含氯离子和硫酸根离子,且废水处理前需将 pH 调至弱碱性。如放射性废水总活度 $> 4 \times 10^6 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$, 则不经处理直接进行水泥固化,如放射性废水中的酸根离子大于上述要求,则对废水进行预处理,直到满足废水的接收要求。

2.2 低放废水暂存期间的安全

低放废水的暂存主要集中在 103 放化楼和低放废水处理设施。在 103 放化楼的地下一层设置了 2 个 1 m^3 低放废水暂存罐;在低放废水处理设施外的地下设置了 2 个 20 m^3 的低放废水暂存罐。为了保证低放废水在暂存期间的安全,采取如下措施:1) 设置了备用暂存罐(一用一备);2) 选用不锈钢 321 为暂存罐材料;3) 将暂存罐放置在设有钢覆面的地下钢筋混凝土箱体内,从而增加了双重安全屏障;4) 在暂存罐内设有液位计和 pH 计,可远程显示液位和酸碱度;5) 在相邻的暂存罐间设有输送泵,正常工况下用于搅拌,事故工况下用于将破损罐内的废水抽送至完整罐内,从而避免放射性污染的进一步扩大。

2.3 低放废水输送过程的安全

低放废水的输送主要有两部分:一是将 103 放化楼产生的废水通过室外特排水管道输送至低放废水处理设施旁的 20 m^3 废水暂存罐;二是处理过程中废水在低放废水处理设施内的输送。为防止废水在输送过程中发生意外渗漏,室外特排水管道设计为双层管,内管材料为不锈钢 321,套管材料为不锈钢 304,套管采用碳钢托架固定,托架间距不超过 3 m,管道与碳钢托架之间垫橡胶垫,支架刷两道红丹酚醛防锈漆防腐。特排水管道放置在地沟内,地沟深 0.55 m,壁厚 0.2 m,沟宽 0.4 m,盖板选用 B10-9,跨度为 0.6 m,地沟覆土深 0.1~1 m,防水等级为一级。特排水管道焊缝进行 100% 的 X 射线检测,检测结果符合《压力容器无损检测标准(JB4730-94)》规定的 II 级焊缝质量要求。特排水管道还进行了强度试压和严密性试验,试压介质采用清水,强度试验压力为设计压力的 1.5 倍,持续稳压时间为 4 h。低放废水处理设施内的工艺管道材料为不锈钢 304,工艺管道分为中放管道和低放管道,中放管道用于输送蒸残液和泥浆,其余均为低放管道。中放管道的焊缝进行 100% 的 X 射线检测,低放管道的焊缝进行 10% 的 X 射线抽检并结合其他方法进行全面检查。公称直径 $\geq 50\text{ mm}$ 的工艺管道支吊架间距为 6 m,其它 3 m。工艺管道同上述特排水管道一样进行强度试压和严密性试验。

2.4 低放废水处理过程的安全

低放废水处理采用沉淀、蒸发和离子交换组合工艺。为确保处理过程的安全,设计了如下内容:1) 采用了工艺自动化控制系统,该系统能够远程控制自动阀门、输送泵和压空系统等的启动与停止,实时显示各设备的状态,如阀门和泵的开启状态、液位、流量、压力、温度和 pH 值等;2) 设计了报警和安全连锁系统,当沉淀罐、蒸残液接收罐、中间水罐、扬液器、冷凝液罐和泥浆接收罐的液位达到设定高度时安全连锁系统会自动启动,报警并自动关闭输送泵或阀门,此外还有一些是只有报警系统的,如离子交换柱、 20 m^3 废水暂存罐、 10 m^3 缓冲水槽和废树脂接收罐,见表 1;3) 设计了视频监控系统,对一些比较重要的区域进行实时监控和录像,这些区域主要有蒸残液贮存间、扬液器间、蒸发间、冷凝冷却间和水泥固化间。

表 1 低放废水处理系统报警和安全连锁一览

Table 1 Alarm and safety interlock of low level radioactive wastewater treatment system

项目名称	报警类型	连锁设备	连锁类型
沉淀槽	液位上限	1.0 m 时停泵 P103	液位上限
蒸残液接收罐	液位上限	1.1 m 时关阀 V14b	液位上限
中间水槽 A/B	液位上限	1.5 m 时关阀 V13a、V13b	液位上限
蒸残液扬液器	液位上限	0.65 m 时关阀 V141	液位上限
冷凝液罐 A/B	液位上限	1.5 m 时关阀 V15b、V15f	液位上限
泥浆接收罐	液位上限	0.5 m 时停泵 P105、关阀 V21c	液位上限
离子交换柱(阴、阳、混)	压力上限	无	无
20 m^3 废水暂存罐 A/B	液位上限	无	无
10 m^3 缓冲水槽 A/B	液位上限	无	无
废树脂接收罐	液位上限	无	无

2.5 排放过程的安全

经蒸发或离子交换处理后的废水先收集在 10 m^3 的缓冲水槽中,缓冲水槽共有 2 个,为接收和监测排

放2种交替使用方式。当一个缓冲水槽用于接收废液时,另一个则用于取样、分析和监测排放。当废水的放射性浓度超过《污水综合排放标准(DB31/199—2009)》中的控制值(总 $\alpha < 1 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$,总 $\beta < 10 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$),则废水通过缓冲水槽出水泵打回冷凝液罐重新处理;当废水的放射性浓度满足排放要求(总 $\alpha < 1 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$,总 $\beta < 10 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$),则排放至 150 m^3 废水暂存池暂存或复用。在缓冲水槽入口管道上设有一套剂量监测仪,用于实时监测排放到缓冲水槽中的废水的放射性浓度,同时对缓冲水槽、废水暂存池进行取样监测,如监测到废水的放射性浓度超过规定的限值,则进行重新处理。

3 辐射安全

3.1 辐射分区及送、排风系统

参考《EJ380—1989》中的规定,根据辐射水平和可能污染的程度,将低放废水处理设施分成监督区和控制区,见图2。监督区有卫生通道、锅炉房、配电间和送风机房,采用自然通风。控制区中蒸残液贮存间、扬液器间和水泥固化间的换气次数为 $12 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$,其余房间的换气次数为 $5 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3.2 人员及物料进出控制系统

低放废水处理设施属于放射性工作场所,为防止人员误入辐射区而受到辐射伤害以及便于对工作人员进行剂量管理,需在辐射分区的基础上建立进出控制系统。人员进出控制系统设置在一楼的卫生通道入口处,人员由此进出。物料的进出通道设置在2个地方,一处是一楼水泥固化间的北门,水泥固化过程所需的水泥、沙子,以及固化好的 200 L 标准桶从此门进出;另一处是一楼东门,其他工具和材料等从此门进出,物料进出通道设置双锁安全门进行控制,见图2。

3.3 辐射监测系统

为了监测低放废水处理设施的辐射水平变化,确保工作人员、周围居民和环境的辐射安全,在低放废水处理设施内建立了辐射监测系统。辐射监测系统主要包括区域 γ 监测、表面污染监测和流出物辐射监测。

区域 γ 监测包括2台区域 γ 探测器,分别设置在一楼蒸发工艺间和二楼水泥固化间处,用于监测工作场所区域的辐射剂量水平。表面污染监测包括1台手足表面污染测量仪,设置在一楼卫生通道入口处,用于对人员或物品进行表面污染监测,防止放射性污染向外界扩散。流出物辐射监测包括1台放射性废液监测仪,设置在蒸残液贮存间,用于监测进入 10 m^3 缓冲水槽中废水的放射性浓度,见图2。

3.4 辐射屏蔽

低放废水处理过程产生的蒸残液可能达到中放水平,因此需要对其进行辐射屏蔽^[3]。从蒸残液的产生、输送和处理流程可以看出,需要进行屏蔽的内容有蒸残液接收罐、扬液器和水泥固化桶。

根据国家标准,放射性工作人员所接受的年平均有效剂量不超过 20 mSv ^[4]。遵循合理可行尽量低的原则(ALARA)^[5],本单位取国家标准剂量限值的 $1/4$,其屏蔽设计目标是保证任何放射性工作人员年平均有效剂量不超过 5 mSv 。考虑到低放废水处理设施所在园区还存在其它实验装置,因此将低放废水处理设施工作人员所接受的年平均有效剂量定为 2.5 mSv 。低放废水处理设施控制区中的中间走廊和北墙外侧,工作人员的年居留时间按 500 h 计算,其剂量率不超过 $5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$;控制区中的蒸残液接收罐、扬液器和水泥固化桶所在房间,年居留时间按 100 h 计算,其周围剂量率不超过 $25 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。屏蔽设计中为安全保守考虑,屏蔽计算数据均考虑了2倍安全系数,即中间走廊和北墙外侧的计算目标值为 $2.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$,蒸残液接收罐、扬液器和水泥固化桶所在房间的计算目标值为 $12.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

蒸残液接收罐、扬液器和水泥固化桶内的核素按照 Cs-137 源来考虑。蒸残液接收罐和扬液器的放射性总活度按照 200 mCi 计算,水泥固化桶的放射性总活度按照 50 mCi 计算。蒸残液接收罐和扬液器的材质为不锈钢321,罐体厚度为 8 mm ,水泥固化桶的材质为冷轧钢,厚度为 1.2 mm 。

屏蔽计算使用基于蒙特卡罗方法的三维粒子输运MCNP程序^[6-8],计算结果表明,在蒸残液接收罐、扬液器和水泥固化桶的周围添加 0.5 cm 钢+ 3 cm 铅+ 0.5 cm 钢的铅夹板后,可将北墙外侧和中间走廊的剂量当量率降低到 $2.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下,蒸残液接收罐、扬液器和水泥固化桶所在房间的剂量当量率降低

到 $12.5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下,满足屏蔽计算目标值,见表 2。

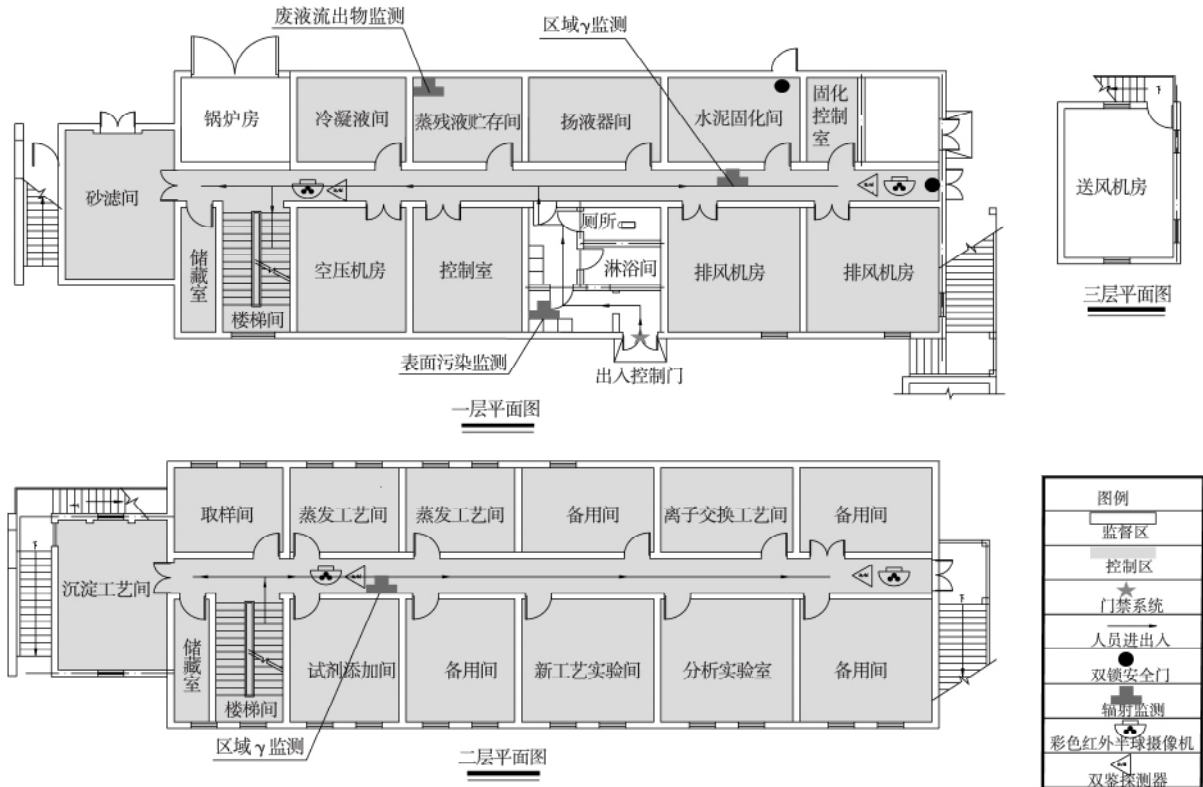


图 2 辐射分区、出入通道线路、辐射监测、入侵报警和视频监控位置图

Fig. 2 The location of radiation zoning, access, radiation monitoring, intrusion alarm, cameras and surveillance

表 2 低放废水处理设施的剂量当量率

Table 2 Radiation dose rate of low level wastewater treatment facility

设备名称	位置	只考虑墙体屏蔽/ ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	添加铅夹板(0.5 cm 钢+3 cm 铅+0.5 cm 钢)/ ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
蒸残液接收罐	罐体侧面	520	11.2
	罐体侧面 1 m 处	180	3.9
	北墙外侧	27	0.54
	中间走廊	5.5	0.2
扬液器	罐体侧面	520	11.2
	罐体侧面 1 m 处	180	3.9
	北墙外侧	55	1.8
	中间走廊	15	1.1
水泥固化桶	桶体侧面	460	10
	桶体侧面 1 m	30	0.7
	北墙外侧	7.3	0.5
	中间走廊	4.2	0.3

4 安全防范系统

低放废水处理设施按照《安全防范工程技术规范(GB50348—2004)》中的三级风险等级设计,系统由入侵报警、视频监控系统和门禁控制系统组成。入侵报警、视频监控系统包括 4 套红外双鉴探测器和 4 套

彩色红外半球摄像机,分别设置在一、二楼走廊的两侧,见图2。当系统探测到非法入侵,探测器报警并联动报警区及附近的摄像机,后台自动弹出报警画面。在一楼卫生通道入口处设置门禁控制系统,授权人员通过刷卡可进出,并存储人员通行记录,定期核查。在一楼配电间设置安防机柜,接收本设施安防系统的报警、视频信号,并将信号上传至103放化楼值班室。

5 结 语

核安全是核能与核技术利用事业发展的生命线。我国核能与核技术利用始终坚持“安全第一、质量第一”的根本方针,贯彻纵深防御等安全理念,采取有效措施,保障了核安全。随着核能与核技术利用发挥越来越重要的作用,妥善处理放射性废水已经成为国际上的共识。确保放射性废水的安全贮存、运输和处理是提高核能与核技术利用安全水平、加快放射性污染防治的重要基础。

此次低放废水处理设施改造是在原有建筑承重不够、空间狭小等不利条件下进行的。改造设计中既要考虑低放废水处理系统的安全,又要考虑建筑结构的安全。在建筑结构方面,通过设备的合理布置、钢梁加固等措施以保证其安全。在低放废水处理系统方面,通过采用成熟的处理工艺和新型的自动化控制技术,如远程控制、视频监控和安全联锁等,以保证放射性废水在贮存、运输和处理过程的安全。在改造过程中始终把安全放在最重要的位置,坚持高标准、严要求,从而保证了低放废水处理设施能够保质保量完成。除设施本身安全外,还需大力培育核安全文化,提高全员责任意识,使决策层、管理层、执行层都能将确保核安全作为自觉的行动。

参考文献:

- [1] 王帅,秦强,钱正华,等.低放废水处理设施升级改造工程[J].中国给水排水,2015,31(8):85-89
- [2] 葛建平,王建永,高朋杰,等.低放射性废水处理技术研究进展[J].河北化工,2013,36(3):64-66
- [3] 中国核工业总公司.EJ 380-1989 开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范[S].北京:中国标准出版社,1989
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB 18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S].北京:中国标准出版社,2002
- [5] 潘文.ALARA 原则[J].中国核工业,1998(2):37
- [6] 裴鹿成,张孝泽.蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用[M].北京:科学出版社,1980:1-3
- [7] 许淑艳.蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M].北京:原子能出版社,2006:1
- [8] LANL Group. MCNP5-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport[R]. Springfield:USA EC Report,1979

(责任编辑:湛江)