

放射源运输容器力学设计和试验验证

陈磊, 庄大杰, 孟东原, 焦力敏, 孙谦, 王长武, 李国强*
(中国辐射防护研究院, 太原 030006)

摘要: **目的** 设计一种用于运输工业辐照用特殊形式放射源的运输容器, 通过试验验证运输容器的安全性能。**方法** 根据《放射性物品安全运输规程》和《放射性物质安全运输条例》中 B(U) 型货包的规定进行设计, 设计的运输容器主要包括屏蔽容器、吊篮、防护罩及运输托架 4 部分组成, 并对运输容器进行正常运输工况和运输事故工况下的 3 次跌落试验。**结果** 试验对容器外防护罩和保温层造成部分损坏, 但防火层完整, 不影响包装的密封和屏蔽功能, 试验结果表明运输容器满足标准要求。**结论** 运输容器在正常运输工况和运输事故工况下的跌落测试后, 包装的屏蔽和密封仍然有效, 即该运输容器在规定的正常运输工况和运输事故工况下能保证放射源的运输安全。

关键词: 放射源; 运输容器; 力学设计; 试验验证

中图分类号: TB485.3 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)07-0260-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.07.032

Mechanical Design and Experimental Validation of Radioactive Sources Transport Containers

CHEN Lei, ZHUANG Dajie, MENG Dongyuan, JIAO Limin, SUN Qian,
WANG Changwu, LI Guoqiang*

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

ABSTRACT: The work aims to design a transport container for transporting special forms of radioactive sources for industrial irradiation and verify the security of the transport container through experiments. According to the provisions of the B(U) cargo package in the "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials" and the "Regulations on the Safe Transport of Radioactive Materials", a transport container for transporting special forms of radioactive sources for industrial irradiation was designed, mainly including shielding container, hanging basket, protective cover and transport carrier. The transport container was subject to three drop tests under normal transportation conditions and transport accident conditions. The test caused partial damage to the outer protective cover and insulation layer of the container, but the fire barrier was intact and it did not affect the sealing and shielding functions of the package. The results showed that the transport container met the requirements of the standard. After the drop test of the transport container under normal transport conditions and transport accident conditions, the shielding and sealing functions of the package are still valid. It means that transport containers ensure the safety of the transport of radioactive sources under the specified normal transport conditions and transport accident conditions.

KEY WORDS: radioactive sources; transport containers; mechanical design; experimental validation

收稿日期: 2023-11-16

基金项目: 中国辐射研究院创新团队基金 (YC22000503)

*通信作者

放射源是核技术利用领域中最主要的放射性物品, 广泛应用于医疗、工业、农业、勘探等领域, 我国目前已有多种放射源运输容器^[1-3]。随着我国利用放射源进行辐照加工工业的发展, 辐照站装源活度已达到二三百万居里, 而国外已有装源活度达千万居里以上的辐照站, 辐照产业的发展推动设计装运大活度放射源容器^[3]。放射性物质运输是工业、农业、医学、科研等领域实现核能和核技术利用的必要环节^[4]。为确保放射性物质的安全运输, 保护环境、工作人员和公众, 国际原子能组织 (IAEA) 特别制定了相关法规, 明确了放射性材料运输时的防护等事项。IAEA 的各成员国基本上遵照 IAEA 的《放射性物质安全运输条例》(SSR-6)^[5]开展运输容器的设计和验证, 如美国的《联邦法规》第 10 篇第 71 部分 (10CFR PART 71)^[6]、俄罗斯的《放射性物质安全运输规程》(HП-053-04)^[7]和我国的 GB 11806—2019《放射性物品安全运输规程》^[8]对货包的规定。

本文设计一种用于运输工业辐照用特殊形式放射源的运输容器, 承担将新放射源从生产储存库运输到全球各地辐照站和从全球各地辐照站将旧放射源运输到储存库, 以及各辐照站之间和从辐照站到废物库的运输任务, 单个货包中最多可装载 18 万 Ci, 适用于道路、铁路和水路运输, 货包设计使用寿命 20 年。根据 GB 11806—2019 和 IAEA SSR-6 的相关规定, 需要验证运输容器在正常运输条件与运输事故条件下的安全性能。

1 容器结构设计

放射源运输容器采用多层结构, 主要由屏蔽容器、吊篮、防护罩与运输托架组成。货包总质量约 5 100 kg, 最大装源量为 6.66×10^{15} Bq (180 000 Ci), 根据《放射性物品分类和名录》^[9]和 GB 11806—2019 规定, 货包属于 B(U) 型货包, III 级 (黄)。运输容器整体结构如图 1 所示。

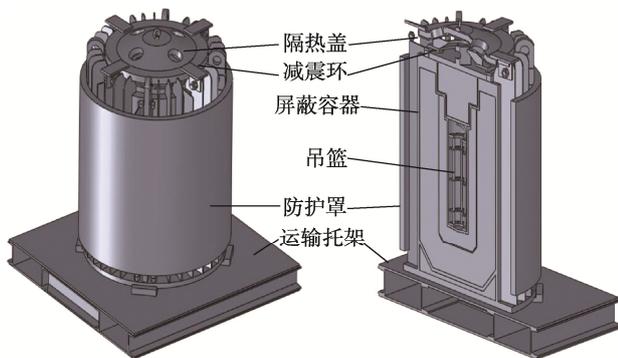


图 1 运输容器示意图
Fig.1 Schematic diagram of transport container

1.1 内容物及设计要求

1.1.1 内容物

运输容器装运的 ^{60}Co 成品放射源为内含 ^{60}Co 的双层包壳密封放射源, 外层包壳为不锈钢材料。 ^{60}Co 成品源满足 GB 11806—2019《放射性物品安全运输规程》^[5]中对特殊形式放射性物质的相关要求, 同时也满足 GB 4075—2009《密封放射源一般要求和分级》^[10]中 E66646 (7) 的要求。

1.1.2 设计要求

运输容器主要起包容放射源和屏蔽射线的作用, 容器设计参考采用 2004 年版 ASME BPVC-III 的第三册相关要求^[11], 设计应满足 WB-3100 和 WB-3200 的要求, 两者有矛盾时, 以 WB-3300 的要求为准。同时, 设计时应考虑正常和假想事故工况, 包括运输和厂内装卸这样的正常工况以及 GB 11806—2019 对运输容器应经受的试验工况, 运行及试验工况相关的应力限制参考 WB-3220 及 WB-3230 中规定。

对运输容器来说, 其关键部分为容器的包容系统, 运输容器的包容系统由内壳、铅塞内壳、气管、水管、堵头及屏蔽塞子螺栓组成。因此, 如果在 GB 11806—2019 规定的运输正常条件和事故条件下, 其包容和屏蔽性能都完好, 则该运输容器能保证放射源在规范使用过程中处于安全状态。为达成此目标, 包容系统设计准则参考 2004 年版 ASME BPVC-III 的第三册 WB-3200 应力限制相关要求^[11]。需要说明的是, 上述准则不适用于容器本体壳体上直接撞击附近的局部区域, 即在冲击件 1.5 倍直径的较小范围内或者从冲击件端部所测量到的安全容器厚度 2 倍范围内。

非包容系统包括容器外壳、铅塞外壳, 设计准则参考 ASME 锅炉及压力容器规范^[12]相关要求, 选取应变系数, 按照塑性失稳限制进行评定, 即不同工况下的应变系数分别为 A 级工况: 1.67; B 级工况: 1.67; C 级工况: 1.40; D 级工况: 1.10。在运输正常情况下, 按照 A 级使用限制工况确定其许用应力限值。在运输事故情况下, 按照 D 级使用限制工况确定其许用应力限值。需要说明的是, 上述准则不包括屏蔽材料铅, 以及容器外的筋板和硅酸铝棉针刺毯、隔热筒、隔热盖、减震环、防护罩。对于这些部件和材料, 不需要应力限制, 因为在货包设计中已考虑允许这些材料变形。

1.1.3 设计流程

明确设计要求后, 结合容器使用环境, 如工作条件, 运输条件、环境条件等, 综合考虑安全性能, 开展初步设计。对该运输容器, 设计考虑为圆柱形, 同时考虑运输、移动、吊装等需求, 增设运输托架, 结合实际需求, 运输容器结构应包括用于完成屏蔽

功能的组件、用于放射源吊装、转移功能的组件，用于冲击、振动防护功能的组件，以及用于运输容器、吊装、移动的组件组成。据此，完成运输容器的初步设计，初步设计完成后，需建立参数化几何模型，以便对容器进行进一步的修正和优化，同时应用有限元分析软件对容器开展仿真计算分析。根据仿真计算结果对容器包容系统及非包容系统进行评价，判断其是否满足设计准则要求，对不符合及存在问题的地方进行修改和优化，如此反复，最终完成容器的结构定型，并通过样机试验验证其安全性能。容器设计流程如图2所示。

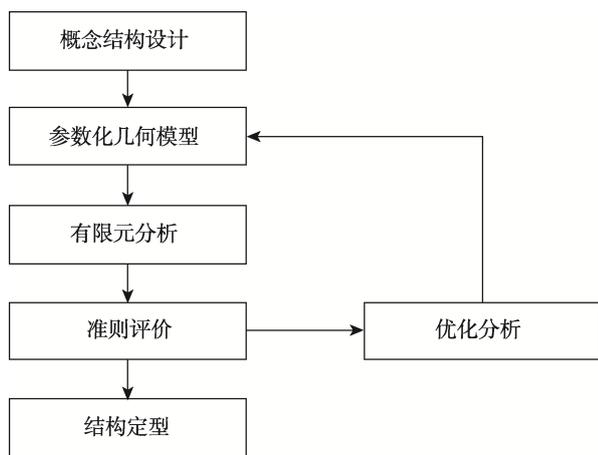


图2 容器设计流程
Fig.2 Flow chart of package design

1.2 容器设计

整体容器参数如表1所示。

1.2.1 屏蔽容器

容器的屏蔽功能主要依靠屏蔽容器来实现的。屏

蔽容器主要由铅塞、容器主体构成。

铅塞由上部的圆形铅柱、下部的柱台状的钨合金盖以及包裹的不锈钢构成。铅塞顶部有1个固定吊耳，外部尺寸为146 mm×24 mm×80 mm，孔径为36 mm，该吊耳与主体焊接成整体，用于铅塞的装卸。铅塞的中部台面与容器主体接触部位配有不锈钢连接环；有一条螺旋状排气管，贯穿铅柱与钨合金盖。

容器主体呈圆柱形，上开口，为钢—钨—铅—钢结构，容器从内往外依次为不锈钢内壳、钨合金筒与钨合金底、钨合金护套、铅屏蔽层、不锈钢外壳。不锈钢内壳内腔尺寸为 $\phi 146$ mm，壁厚为10 mm，内腔中装有吊篮；钨合金筒外部尺寸 $\phi 291$ mm×614 mm，主体部位径向厚度为62 mm；钨合金底外部尺寸为 $\phi 291$ mm×74 mm；钨合金护套厚度为5 mm，从外部包住钨合金筒与钨合金底；铅屏蔽层径向厚度为147.5 mm。屏蔽功能结构底部呈锥台状。容器主体底板为 $\phi 850$ mm×28 mm的不锈钢，其与呈锥台状屏蔽功能结构底部之间设置隔热层，填充材料为硅酸铝棉针刺毯。容器主体底板有4组定位孔，通过螺栓与运输托架上底板4组定位部件紧固，使其固定在运输托架上。容器主体外部轴向焊接有吸收冲击能的筋板。共6种规格筋板共36块，材料为不锈钢。容器主体底部有一条螺旋状排水管，贯穿钨铅层。

1.2.2 防护罩

容器的防冲击和隔热性能主要依靠防护罩实现。防护罩分为内筒、隔热层、外筒以及隔热盖，内筒和外筒为不锈钢圆筒，内筒外部尺寸为 $\phi 845$ mm×880 mm、壁厚为6 mm；外筒外部尺寸为 $\phi 909$ mm×880 mm、壁厚为6 mm；隔热层内填充硅酸铝棉毯，厚度为26 mm。内筒壁上固定支耳8个，用于隔热筒的固定。顶部有吊环螺钉共4个，用于隔热筒的吊装操作，其材质

表1 容器主要结构参数
Tab.1 Main structure parameters of container

序号	名称	部件名称	参数
1		铅塞	吊耳外部尺寸为146 mm×24 mm×80 mm；孔径为36 mm
2	屏蔽容器	容器主体	不锈钢内壳内腔尺寸为 $\phi 146$ mm，壁厚为10 mm；钨合金筒外部尺寸为 $\phi 291$ mm×614 mm，主体部位径向厚度为62 mm；钨合金底外部尺寸为 $\phi 291$ mm×74 mm；铅屏蔽层径向厚度为147.5 mm；容器主体底板尺寸为 $\phi 850$ mm×28 mm
3		内筒	外部尺寸为 $\phi 845$ mm×880 mm；壁厚为6 mm
4	防护罩	隔热层	填充材质为硅酸铝棉毯，厚度为26 mm
5		外筒	外部尺寸为 $\phi 909$ mm×880 mm，壁厚为6 mm
6		隔热盖	外部尺寸为 $\phi 825$ mm×192 mm，填充材质为硅酸铝棉毯，厚度为26 mm
7	运输托架	运输托架	外部尺寸为1 250 mm×1 250 mm×230 mm，上下底板尺寸为1 238 mm×1 238 mm×10 mm
8	吊篮	吊篮	外部尺寸为 $\phi 140$ mm×478 mm
9	其他	减震环	外部尺寸为 $\phi 388$ mm×49 mm

为不锈钢。隔热盖整体呈锥帽形, 其最大外部尺寸为 $\phi 825 \text{ mm} \times 192 \text{ mm}$ 。内部为 26 mm 厚的硅酸铝棉针刺毯隔热材料, 外部为 6 mm 的不锈钢壁。底部有 4 个固定支耳, 用于隔热盖的固定。顶部中央有一个可拆卸的吊环螺钉, 用于隔热盖的吊装操作。

1.2.3 运输托架

运输托架为方形, 外部尺寸为 $1\,250 \text{ mm} \times 1\,250 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$, 包括定位固定件 4 个、定位槽钢 2 个、锁销 2 个、下底板、上底板及其之间的 8 根槽钢构成。如图 3 所示, 运输托架上底板 4 个定位固定件, 通过与运输容器主体底部螺栓连接, 将运输容器主体固定于其上。上底板通过四周的 20 个螺栓与 2 个锁销, 将防护罩固定于其上。上下底板尺寸为 $1\,238 \text{ mm} \times 1\,238 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 通过运输托架可以方便地进行起吊、拴系等操作。



图 3 运输托架
Fig.3 Shipping carriers

1.2.4 吊篮

吊篮由 1 个提手、1 个上板、4 根连接杆、3 个中板与 1 个底板构成, 其材质均为不锈钢, 最大外形尺寸为 $\phi 140 \text{ mm} \times 478 \text{ mm}$, 如图 4 所示。

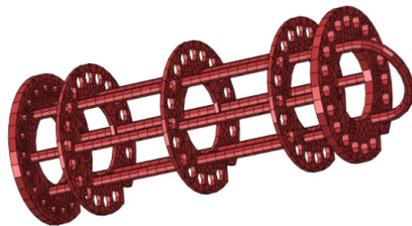


图 4 吊篮
Fig.4 Hanging basket

1.2.5 其他

在铅塞上方与隔热盖间有减震环, 外形尺寸为 $\phi 388 \text{ mm} \times 49 \text{ mm}$, 材质为不锈钢。

2 试验验证

2.1 试验要求

依据 GB 11806—2019, 该容器应进行跌落测试,

验证其安全性能。主要包括: 根据 GB 11806—2019 第 C4.4.2 节, 自由下落试验试样应自由下落在靶上, 以使试验部件的安全特性受到最严重的损坏, 从试样的最低点至靶的上表面所测的下落高度不得小于 1.2 m; 根据 GB 11806 第 C4.6.1 节, 自由下落试验 I, 试样应自由下落在靶上, 以使试验部件的安全特性受到最严重的损坏, 而从试样的最低点至靶的上表面高度应是 9.0 m; 根据 GB 11806—2019 第 C4.6.1 节, 自由下落试验 II, 试样应自由下落到牢固地直立在靶上的一根棒上, 以使试样受到最严重的损坏, 从试样的预计冲击点至棒的端面高度应是 1 m^[5]。

容器设计完成后, 加工了 1 套试样, 利用这 1 套试样进行了正常运输工况和运输事故工况下的 3 次跌落试验。试验时, 在容器上布置了加速度传感器和应变传感器, 用于检测试验时的加速度和应变。应变测量位置位于容器表面上, 在每一测量点布置三向 90°应变花应变传感器, 分别测量该位置的应变。加速度测量位置分别位于容器表面上, 在每一测量点布置三向 90°加速度传感器, 分别测量该位置的加速度。应变及加速度测点布置见图 5。

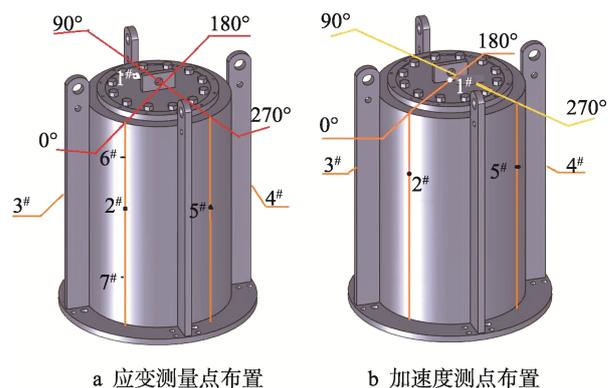


图 5 测量点布置
Fig.5 Measurement point arrangement

2.2 试验结果

试验在中国辐射防护研究院放射性物质包装容器安全试验中心进行, 该中心具备 140 吨级放射性物品运输容器试验能力, 满足 SSR-6 和 GB 11806—2019 的相关技术要求^[13-15]。根据仿真计算结果^[16], 选择了最严重的损坏工况, 分别为自由下落试验姿态选择底面下落姿态; 自由下落试验 I 姿态为顶角下落, 容器轴线与靶面的夹角为 57.5°; 自由下落试验 II 姿态选择顶面下落, 顶面冲击点为中心区域。跌落试验姿态如图 6 所示。

试验后, 对容器进行检查, 自由下落试验后, 运输托架底盘中间 2 条竖向板部分扭曲, 长约 500 mm, 扭曲高度小于 10 mm, 其他部位没有明显变形, 运输托架底盘变形情况见图 7。各测量点的测量值均小于材料的使用应力值, 其中, 最大主应力出现在 6#, 最

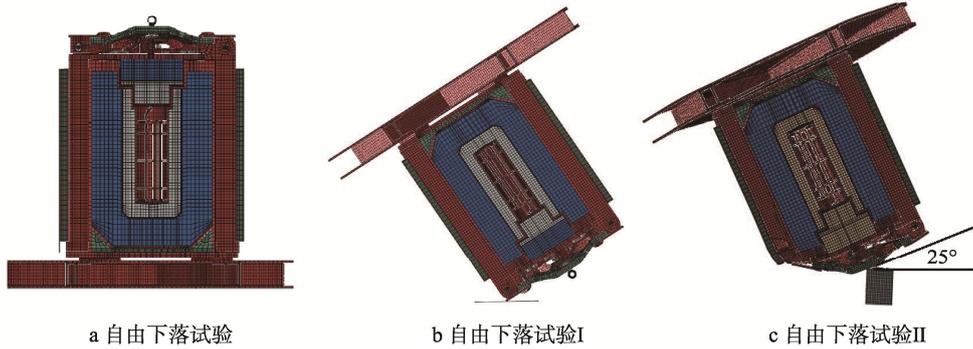


图6 跌落试验姿态
Fig.6 Drop test attitude

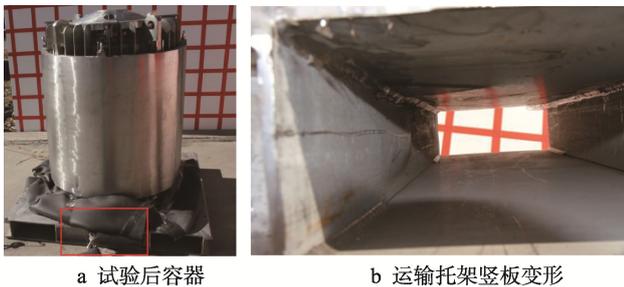


图7 自由下落试验后
Fig.7 After free drop test

大值约为 111.1 MPa，最大加速值位于 1# 径向 90°~270° 方向，最大值约为 209.3g。

自由下落试验 I 后，隔热盖冲击部位成一个约 45° 斜面，紧贴压盖，冲击部位约 30 cm 范围焊缝开裂，缝隙宽度小于 1 mm，防护罩筒体冲击位置出现开裂，内壁开裂约 41 cm，外壁开裂约 41 cm，其中 7.5 cm 长为完全开裂，其他为裂纹，断裂位置位于焊口；180° 方向处隔热筒与吊耳安装处开裂约 3 cm；隔热筒上冲击点处吊环从底座处断裂；2 个吊耳间上沿 10 cm 范围发生弯曲，其中小于 4 cm 范围向内侧弯曲约 2 cm，[4, 90) cm 范围向外鼓起约 1 cm。隔热材料未漏出，防火功能完好，自由下落试验 I 试验后冲击端面变形情况见图 8。同时，各测量点的测量值均小于材料在事故情况下的设计限值。其中，最大主应力出现在 1# 处，最大值约为 303.7 MPa，最大加速值位于 2# 径向方向，最大值约为 1 430.6g。



图8 自由下落试验 I 后变形情况
Fig.8 Deformation after free drop test I

自由下落试验 II 后，隔热盖上冲击端面有 2 次冲击痕迹，第 1 次为靶边缘半圆形切入痕迹，第 2 次为靶平面冲击痕迹。第 1 次冲击形成的半圆形剪切宽为 2~3 mm，深为 1 mm，未穿透。第 2 次冲击形成外径约 20 cm 的圆形凹陷，裂缝长约 16 cm，位于外圆边界。隔热盖吊环断裂，并嵌入靶上表面，但隔热盖保持原位置，防火功能保持，压盖上端面不平整，冲击位置处下凹 1 cm，沿周向约 10 cm 的范围；压盖与冲击点方向垂直的方向上约 5 cm 范围的压盖鼓起。冲击点处周向小于 20 cm 范围内法兰口向下弯曲约 1 cm，见图 9。同时，各测量点除去正对冲击靶的 1# 位置外，容器外壁各测量点的测量值都非常小，低于材料的许用应力。最大主应力出现在铅塞外壁上 1# 位置，最大值约为 532.2 MPa，小于材料在事故情况下的设计限值。最大加速度位于 1# 轴向方向，最大值约为 161.4g。



图9 自由下落试验 II 后变形情况
Fig.9 Deformation after free drop test II

跌落测试分析结果表明，在各种跌落工况下，容器外防护罩和保温层造成了部分损坏，但防火层完整，不影响容器的热学性能。同时，屏蔽容器几乎无变形，防护罩吸收绝大多数冲击，其产生的变形不影响包装的密封和屏蔽功能。因此，在正常情况下和事故条件下进行测试后，包装的屏蔽和密封仍然有效，即试验结果符合设计和标准要求，随后的耐热试验及屏蔽试验也证明了这一点，该运输容器已取得国家核安全局的设计批准^[17-18]。

3 结语

放射源运输容器遵从 GB 11806—2019 的相关要求完成了设计,并制造了试验样机完成了容器安全性能试验。试验结果表明,容器的结构设计满足 GB 11806—2019 规定的正常运输工况和运输事故工况下的跌落试验要求。该运输容器能保证放射源在规范使用过程中处于安全状态。该放射源运输容器可为类似运输容器的力学设计提供参考和依据。

参考文献:

- [1] 孙洪超,李国强,庄大杰,等.放射源运输容器安全设计有限元分析方法[J].核电子学与探测技术,2019,39(5):582-586.
SUN H C, LI G Q, ZHUANG D J, et al. Finite Element Analysis Method for Safety Design Verification of Transport Package of Radioactive Sources[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2019, 39(5): 582-586.
- [2] 李国强,李志强,罗晓渭.一种医疗放射源运输容器冲击试验和数值仿真[J].辐射防护,2020,40(1):52-57.
LI G Q, LI Z Q, LUO X W. Impact Test and Numerical Simulation on a Model Container for Transport of Medical Radioactive Sources[J]. Radiation Protection, 2020, 40(1): 52-57.
- [3] 李国强,罗晓渭,李志强,等.一种⁶⁰Co运输容器热工设计和验证试验[J].科学技术与工程,2014,14(33):220-223.
LI G Q, LUO X W, LI Z Q, et al. Heat Structure Design and Verification Test of a Kind of ⁶⁰Co Transport Container[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(33): 220-223.
- [4] 刘新华.放射性物品安全运输概论[M].北京:科学出版社,2015:1-9.
LIU X H. Introduction to Safe Transportation of Radioactive Materials[M]. Beijing: Science Press, 2015: 1-9.
- [5] 国际原子能组织.放射性物质安全运输条例:SSR-6(Rev.1)[S].维也纳:国际原子能组织,2018:1-4.
International Atomic Energy Agency. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: SSR-6(Rev.1)[S]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2018: 1-4.
- [6] Government Publishing Office of United States. Packaging and Transportation of Radioactive Material: Title 10 Part 71[S]. American: Government Publishing Office of United States, 2015: 1-3.
- [7] Ordinance of the Federal Environmental Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: H[-053-04][S]. Russian: Ordinance of the Federal Environmental Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia, 2004: 1-5.
- [8] 生态环境部,国家市场监督管理总局.放射性物品安全运输规程:GB 11806—2019[S].北京:中国环境出版社,2019:1-79.
Ministry of Ecology and Environment, State Administration of Market Supervision. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: GB 11806-2019[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019: 1-79.
- [9] 中华人民共和国国务院.放射性物品运输安全管理条例(国务院令 第562号)[EB/OL].(2009-09-14) [2009-09-22].
https://www.gov.cn/zhengce/2009-09/22/content_2602547.htm. State Council of the People's Republic of China. Regulations on the Safety of the Transportation of Radioactive Material(Order No.562 of The State Council of the People's Republic of China)[EB/OL]. (2009-09-14) [2009-09-22]. https://www.gov.cn/zhengce/2009-09/22/content_2602547.htm.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.密封放射源一般要求和分级:GB 4075—2009[S].北京:中国标准出版社,2010:1-19.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Sealed Radioactive Sources-General Requirements and Classification: GB 4075-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 1-19.
- [11] 上海发电设备成套设计研究院,上海核工程研究设计院,译. ASME 核电规范与标准, BPVC-III 核设施部件建造规则 第3册 用于运输与储存乏燃料和高放射性材料及废料的安全容器 2004版[M].上海:上海科学技术文献出版社,2007:327-358.
Shanghai Power Generation Equipment Design and Research Institute, Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute. ASME Nuclear Power Code and Standards, BPVC - III Rules for the Construction of Nuclear Facility Components, Volume 3, Safety Containers for the Transportation and Storage of Spent Fuel, Highly Radioactive Materials, and Waste, 2004 Edition[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Publishing House, 2007: 327-358.
- [12] MCLAUGHLIN R E, FINNEY N A, AURIOLES G, et

- al. Code Cases Nuclear Components Section III Construction of Nuclear Facility Components BPVC CC NC III-2019[M]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2020: 359-423.
- [13] 李国强, 张建岗, 罗晓渭, 等. 放射性物质运输货包力学试验评价技术[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(4): 762-768.
LI G Q, ZHANG J G, LUO X W, et al. Assessment Technology on Mechanical Test of Package for Radioactive Material Transport[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(4): 762-768.
- [14] 孙谦, 庄大杰, 孙洪超, 等. 核燃料组件运输容器应用现状概述[J]. 包装工程, 2022, 43(13): 142-150.
SUN Q, ZHUANG D J, SUN H C, et al. Overview of Application Status for Nuclear Fuel Assembly Transport Package[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 142-150.
- [15] 张建岗, 李国强, 孙洪超, 等. 放射性物品运输容器试验验证经验总结[J]. 辐射防护, 2018, 38(5): 422-427.
ZHANG J G, LI G Q, SUN H C, et al. Safe Test Experience on Radioactive Material Transport Packages[J]. Radiation Protection, 2018, 38(5): 422-427.
- [16] 唐自强, 李国强, 苏步云, 等. 工业辐照放射源运输货包事故条件下冲击试验的数值模拟[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(2): 247-252.
TANG Z Q, LI G Q, SU B Y, et al. Numerical Simulation on Impacting Test of Industrial Irradiation Transport Package for Radioactive Material under the Accident Condition[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(2): 247-252.
- [17] 国家核安全局. 关于批准颁发 FCTC10 运输容器设计批准书的通知[EB/OL]. (2014-10-15) [2023-07-28]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201410/t20141020_290354.htm.
National Nuclear Safety Administration. Notice on Approving the Issuance of FCTC10 Transport Container Design Approval Letter[EB/OL]. (2014-10-15) [2023-07-28]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201410/t20141020_290354.htm.
- [18] 国家核安全局. 关于批准 FCTC10 运输容器设计批准书有效期延续的通知[EB/OL]. (2019-08-19) [2023-07-28]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk09/201908/t20190823_729818.html.
National Nuclear Safety Administration. Notice on the Extension of Validity of the Approval Letter for the Design of FCTC10 Transport Containers[EB/OL]. (2019-08-19) [2023-07-28]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk09/201908/t20190823_729818.html.