

# 放射性物品 C 型货包密封结构设计及性能研究

李娜, 张青平, 张思才, 徐勇

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** **目的** 确定一种可抵御放射性物品 C 型货包撞击试验环境的内容器密封结构, 为类似放射性物品运输容器的密封结构设计提供参考和依据。**方法** 开展 C 型货包内容器密封结构设计, 利用数值分析方法确定一种可行的密封结构, 通过撞击试验校验此密封结构的有效性。**结果** 货包在经历速度不小于 90 m/s 的箱顶角碰、箱顶正碰及箱体侧碰至刚性靶试验后, 内容器的整体标准漏率均小于  $0.01 \text{ mPa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。**结论** 设计的密封结构可抵御冲击刚性靶速度不小于 90 m/s 的撞击试验环境, 可对放射性物品进行有效防护。

**关键词:** 放射性物品; C 型货包; 密封结构设计; 密封性能; O 形密封圈; 漏率

**中图分类号:** TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)01-0180-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.01.028

## Sealing Structural Design and Performance of Radioactive Material Type C Packages

LI Na, ZHANG Qing-ping, ZHANG Si-cai, XU Yong

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

**ABSTRACT:** The work aims to affirm a type of container's sealing structure which can resist impacting test environment of radioactive material type C packages, so as to provide references and basis for sealing structural design of analogical radioactive material transport containers. The sealing structure of type C package's containers was designed, and a type of feasible sealing structure was determined by numerical analysis. The impacting test was completed to validate availability of such sealing structure. The integral standard leak rates of containers were all smaller than  $0.01 \text{ mPa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  after angled impact, top down impact and side impact onto an unyielding target at velocities not less than 90 m/s. The sealing structure designed can withstand the impacting test experiment whose impact unyielding target speed is not less than 90 m/s, and can protect radioactive materials effectively.

**KEY WORDS:** radioactive material; type C packages; sealing structural design; sealing performance; O-ring; leak rate

放射性物品的运输历来备受国际社会和公众关注。国家高度重视放射性物品的运输安全,颁布了《放射性物品运输安全管理条例》(国务院令第 562 号),制定了 GB 11806—2004《放射性物质安全运输规程》指导、规范国内放射性物质的安全运输工作。2019 年,生态环保部发布了 GB 11806—2019《放射性物品安全运输规程》。

《放射性物品安全运输规程》强调,运输安全应

放在货包的设计与试验上,因为运输容器的可靠性是安全运输的重要前提。据欧洲核学会《核新闻网》1996 年 10 月 22 日报道,IAEA 在 B 型货包的基础上针对容器进行了额外安全加固,形成 C 型货包,可用于大量“可分散”放射性物质的空运,而 B 型货包继续用于放射性物质的陆地或海洋运输,及不携带大量“可分散”放射性物质的空运,C 型货包可对放射性物品进行最高级别的包装防护。

收稿日期: 2019-09-16

作者简介: 李娜(1985—),女,硕士,工程师,主要研究方向为抗事故包装箱结构设计及分析。

《放射性物品安全运输规程》规定 C 型货包在经历陆运、水运、空运过程中出现力、热、水浸环境后，放射性物品的漏失应限制在规定限值内，故在规定条件环境下的密封可靠性是 C 型货包的关键性能指标，其密封结构设计的优劣直接关系到整个货包安全性。

国内虽有关于 B 型货包详细结构设计的报道，如 RY-1 型乏燃料运输容器<sup>[1]</sup>、TC-I 型放射性材料运输容器等<sup>[2]</sup>，但还未有关于 C 型货包结构方面的报道。

文中分析《放射性物品安全运输规程》中 C 型货包的试验要求，明确撞击试验为其中最严酷的力学试验项目，以此为基础开展 C 型货包内容器密封结构设计，通过数值计算方法对密封结构进行初步校验及优选，通过撞击试验进一步校验文中优选密封结构的合理性，可为类似放射性物品运输容器的密封结构设计提供参考和依据。

## 1 C 型货包试验要求

《放射性物品安全运输规程》规定 B 型、C 型货包在正常运输条件下，放射性物品每小时漏失在  $10^{-6}A_2$  以内， $A_2$  为表征不同放射性材料放射性活度的参数；经历运输事故条件（见表 1）后，1 周内放射性内容物氡-85 的累积漏失不大于  $10A_2$ ，其他放射性核素不大于  $A_2$ 。

考虑文中产品的最大放射性活度值，根据 GB/T 17230—1998《放射性物质安全运输货包的泄漏检验》及《放射性物品安全运输规程》进行源项估算，并考虑一定的安全裕度，内容器标准氦漏率小于  $0.01 \text{ mPa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，即可保证正常运输条件及运输事故条件的运输安全。

从表 1 可以看出，C 型货包和 B 型货包在力学试验方面最大区别是按破坏最严重取向以  $90 \text{ m/s}$  的速

度撞击刚性靶撞击试验，撞击试验较 C 型货包其他力学试验（自由下落试验 I、击穿/撕裂试验、自由下落试验 III）冲击能量要高得多（相当于货包从  $420 \text{ m}$  处自由下落至刚性靶体<sup>[3]</sup>），是 C 型货包力学试验项目中最严酷的<sup>[4]</sup>。

## 2 C 型货包组成

C 型货包由 6 个部分组成，见图 1。牺牲结构在碰撞事故环境下可吸收大量冲击动能，防止外容器产生结构破坏，同时保护内容器密封结构；外容器吸收冲击动能的同时为隔热/吸能层提供了 1 个密闭空间，隔绝空气，防止火焰直接接触隔热/吸能层；隔热/吸能层在冲击环境下吸能，在热环境下隔热，保护内容器密封结构；内容器提供有效密封结构，确保产品经历规定事故环境时放射性物品的漏失不超过规定限值；定位支撑压紧结构在冲击环境下发挥缓冲作用，降低产品惯性力对内箱密封结构的影响；产品为被包装对象。

## 3 内容器密封结构设计及数值分析

内容器为正常使用及经历事故环境后的货包提供有效密封结构，为保证密封结构的有效性，内容器尽量设计成刚性结构，使密封结构在冲击环境下变形应尽可能小。内容器应选取强度高、刚性好的钢材，综合比较各种钢材的力学性能参数（包括屈服强度、强度极限、断后伸长率、断面收缩率）加工性能、抗腐蚀性能，选取马氏体沉淀硬化不锈钢 05Cr17Ni4Cu4Nb 制备内容器。

O 形橡胶密封圈-法兰-螺栓结构是内容器最常用的一种密封形式，具有结构简单、密封可靠的优点。

表 1 验证货包能承受运输中事故条件能力的试验

Tab.1 Tests for demonstrating ability of packages to withstand accident conditions during transport

试验项目	试验要求	B 型货包	C 型货包
自由下落试验 I	货包从高 $9 \text{ m}$ 处以破坏最严重取向向下落到刚性靶上	√	√
自由下落试验 II	货包从高 $1 \text{ m}$ 处落到立于刚性靶上的尺寸为 $150 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 钢棒上	√	
击穿/撕裂试验	质量小于 $250 \text{ kg}$ 的货包，将其置于刚性靶上，截面直径为 $20 \text{ cm}$ ，冲击端为圆锥体；质量为 $250 \text{ kg}$ 的试验用棒从高 $3 \text{ m}$ 处下落至货包上；质量大于 $250 \text{ kg}$ 的货包，将其从高 $3 \text{ m}$ 处下落到置于刚性靶的试验用棒上		√
自由下落试验 III	$500 \text{ kg}$ ，尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的钢板从高 $9 \text{ m}$ 处落到置于刚性靶的货包上	√	√
撞击试验	按破坏最严重取向以 $90 \text{ m/s}$ 的速度撞击刚性靶		√
耐热试验	货包在温度不低于 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热环境中暴露 $30 \text{ min}$	√	
强化耐热试验	货包在温度不低于 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热环境中暴露 $60 \text{ min}$		√
水浸没试验	货包在水深至少为 $15 \text{ m}$ 处浸没 $8 \text{ h}$	√	
强化水浸没试验	货包在水深至少为 $200 \text{ m}$ 处浸没不少于 $1 \text{ h}$		√

撞击试验后,内容器密封结构在冲击作用下产生弹塑性变形,可利用O形橡胶密封圈材料的压缩回弹性补偿密封结构处变形<sup>[5]</sup>,确保内容器在撞击试验后的密封性能。

内容器用O形密封圈以具有优良耐老化性能的三元乙丙橡胶为基材,纳米层状无机物如蒙脱土(OMMT)、石墨等为补强功能填料,采用熔融插层法制备,具有优良的耐高温性能、气体阻隔性能(达到 $10\text{ mPa}\cdot\mu\text{m}^3/\text{ms}$ )及辐照环境下的耐老化性能<sup>[6-7]</sup>。

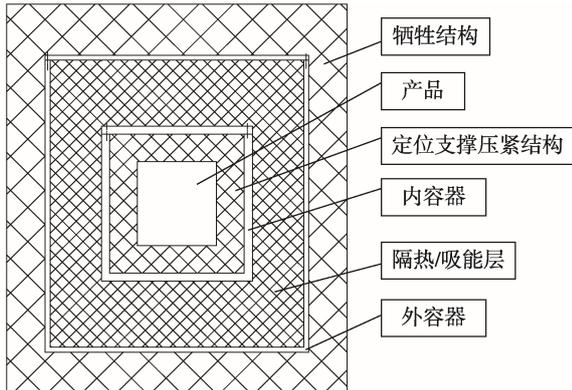


图1 C型货包  
Fig.1 Type C packages

### 3.1 密封结构 I

密封结构 I 采取如图 2 所示的双重 O 形密封圈-螺栓-法兰结构,由下箱体和箱盖组成上下法兰,利用联接螺栓拧紧力矩克服密封圈与密封面之间的摩擦阻力;密封圈受侧向挤压发生弹性变形,可填补密封面之间的微观间隙以实现密封;双重 O 形密封圈可降低内容器初始漏率<sup>[8-9]</sup>。密封结构 I 装配完成后的密封性能不受联接螺栓拧紧力矩的影响,只要下箱体与箱盖不脱离,即使在联接螺栓力矩全部为 0 时,亦可保证内容器的密封性能<sup>[10]</sup>。

为校验密封结构 I 的密封性能,对文中货包进行了多姿态撞击试验数值计算<sup>[11-12]</sup>。考虑到撞击试验

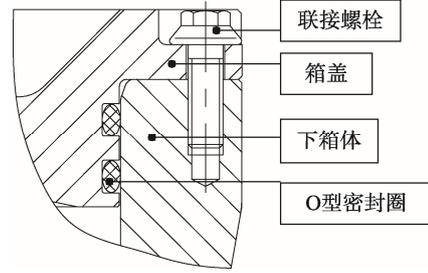
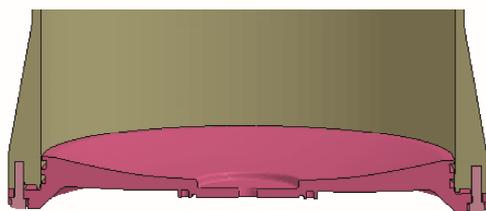


图2 内容器密封结构 I  
Fig.2 Sealing structure I of container

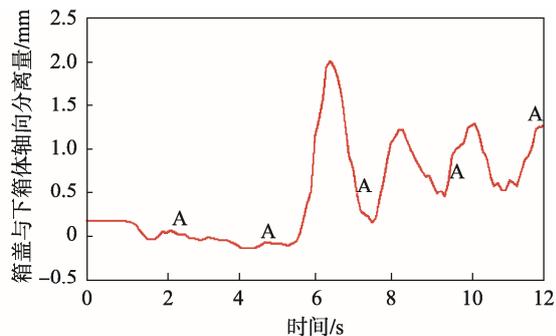
速度控制误差,计算设置的碰靶速度为 95 m/s。计算结果表明,箱底正碰(碰撞时货包与靶面轴线垂直)及箱底角碰(货包重心与碰靶点之间的连线与靶面垂直)时,内容器密封结构基本无变形;箱顶正碰后,内容器密封结构及联接螺栓无肉眼可见变形,仅箱盖与下箱体轴向分离约 1 mm(见图 3);箱体侧碰(碰撞时货包与靶面轴线平行)后,内容器连接螺栓大部分断裂,箱盖在碰撞部位出现局部结构破坏(见图 4),分析认为箱盖密封结构处局部厚度较薄,侧向刚度不足,货包侧碰过程中箱盖在碰撞端出现较大塑性变形,同时下箱体挤压密封沟槽,局部应力超过其强度极限导致结构破坏;箱顶角碰(货包重心与碰靶点之间的连线与靶面垂直)后,箱盖与下箱体之间的连接螺栓断裂,箱盖与下箱体脱离(见图 5),分析认为箱顶角碰时碰撞端缓冲吸能材料变形吸能,向内压紧箱盖,同时碰撞端另一端的箱盖向外运动,内容器联接螺栓在冲击作用下断裂,碰撞端另一端的箱盖与下箱体脱离。

### 3.2 密封结构 II

针对密封结构 I 在箱体侧碰时箱盖结构破坏及箱顶角碰后箱盖与下箱体脱离问题,提出了将双重柱面密封结构调整为端面密封结构+单圈柱面密封结构。采用单圈柱面密封结构可提高箱盖侧向刚度;增加端面密封结构可保证箱体侧碰后箱盖与下箱体侧向错位时内容器的密封性能,同时降低内容器初始漏



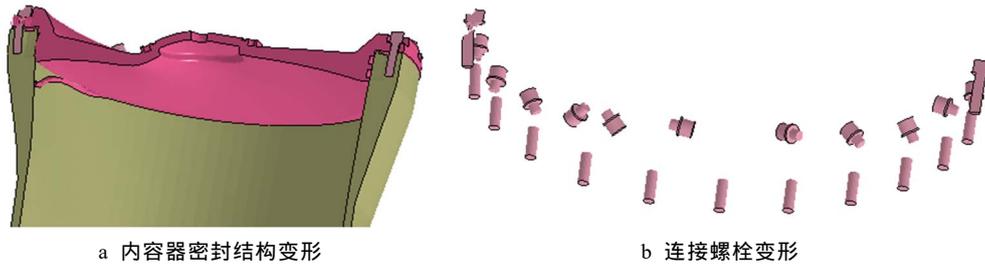
a 内容器密封结构变形



b 箱盖与下箱体轴向分离量

图3 箱顶正碰后内容器密封结构 I 变形

Fig.3 Deformation of container's sealing structure I after top down impact

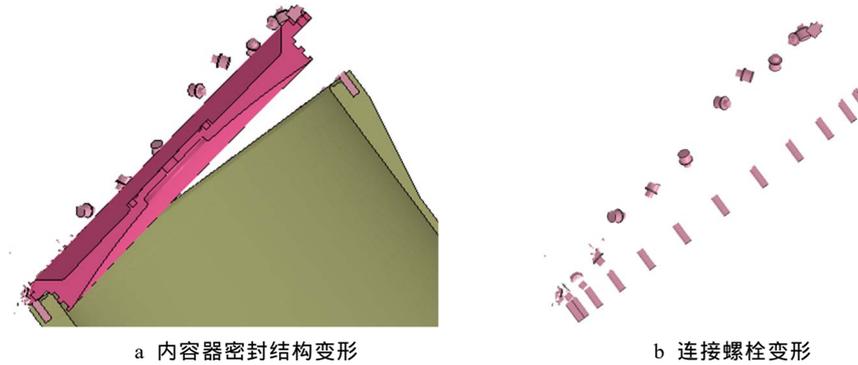


a 内容器密封结构变形

b 连接螺栓变形

图 4 箱体侧碰后内容器密封结构 I 变形

Fig.4 Deformation of container's sealing structure I after side impact



a 内容器密封结构变形

b 连接螺栓变形

图 5 箱顶角碰后内容器密封结构 I 变形

Fig.5 Deformation of container's sealing structure I after angled impact

率；卡环结构限制下箱体与箱盖之间的轴向及侧向相对运动，保护内容器密封结构，见图 6。

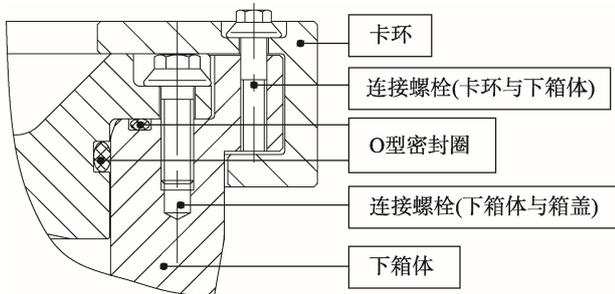


图 6 内容器密封结构 II

Fig.6 Sealing structure II of container

为校验密封结构 II 的密封性能，对文中货包进行了多姿态撞击试验数值计算（速度为 95 m/s）。计算结果表明，采用密封结构 II 的货包在箱体侧碰、箱顶角碰、箱顶正碰时内容器箱盖与下箱体均未产生脱

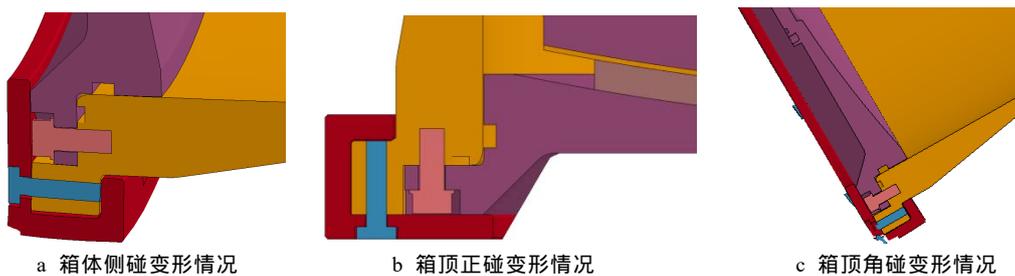
离，且下箱体与箱盖之间的连接螺栓均未产生肉眼可见的塑性变形或结构破坏，见图 7。预计内容器的密封性能可以满足 C 型货包在撞击试验后的密封要求。

## 4 撞击试验

### 4.1 过程

试验件为 3 套采用密封结构 II 的货包，试验前对货包内容器充注示漏气体氦气，使得内容器中氦气体积分数不小于 90%，且绝对压力为 101 kPa。

通过火箭橇试验平台进行了撞击试验<sup>[13-14]</sup>，利用火箭发动机进行加速，使货包达到 90~95 m/s 的撞击速度要求，通过加速轨道末端的下倾导轨及感应电刷、爆炸螺栓等实现对货包的释放，释放后货包依靠惯性向前飞出，维持初始飞行姿态并与靶体撞击。



a 箱体侧碰变形情况

b 箱顶正碰变形情况

c 箱顶角碰变形情况

图 7 密封结构 II 变形

Fig.7 Deformation of sealing structure II

碰撞姿态选取了对密封结构影响较大的箱顶正碰、箱体侧碰及箱顶角碰，见图 8。撞击试验用靶主体选取强度等级为 C30 的混凝土硬质靶体，在其碰撞面及背面均覆盖厚度为 10 cm 的钢板，靶体质量不小于货包质量的 100 倍，满足《放射性物品安全运输规程》中 C 型货包撞击试验的刚性靶要求<sup>[15-16]</sup>。

### 4.2 结果

撞击试验结果与数值分析结果基本吻合，撞击试验后，对内容器进行了整体真空氦检漏，试验结果见表 2 及图 9。由撞击试验结果可知，文中货包经历撞击试验后，内容器整体标准氦漏率小于 0.01 mPa·m<sup>3</sup>/s，满足《放射性物品安全运输》中 C 型货包的撞击试验要求。



图 8 撞击试验  
Fig.8 Impacting test

表 2 撞击试验结果  
Tab.2 Impacting test result

撞靶姿态	撞靶速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	内容器变形情况	内容器整体氦漏率/ (mPa·cm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
箱顶角碰	96	内容器保持完整，无肉眼可见变形及破坏	87
箱体侧碰	99	内容器保持完整，除卡环外无肉眼可见变形及破坏	580
箱顶正碰	93	内容器保持完整，无肉眼可见变形及破坏	350



图 9 内容器密封结构变形  
Fig.9 Deformation of container's sealing structure

## 5 结语

通过分析 C 型货包试验要求，明确了撞击试验为其力学试验中最严酷的试验项目。设计 C 型货包内容器密封结构，通过数值计算方法对密封结构进行了初步校验及优选，通过撞击试验进一步验证了文中优选的密封结构能抵御撞击刚性靶速度不小于 90 m/s 的撞击试验环境，可对放射性物品进行有效防护，同时可为类似放射性物品运输容器的密封结构设计提供

参考和依据。

参考文献：

[1] 周玉清. RY-1 型乏燃料运输容器设计、试验概况[J]. 辐射防护通讯, 1991(5): 51—58.  
ZHOU Yu-qing. Design and Test of RY-1 Type Transport Cask for Spent Fuels[J]. Radiation Protection Communication, 1991(5): 51—58.

[2] 陈治江, 蔡吉庆, 张志强, 等. TC-1 型放射性材料运

- 输容器的设计[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 6—8.  
CHEN Zhi-jiang, CAI Ji-qing, ZHANG Zhi-qiang, et al. Design of TC-1 Type Transport Cask for Radioactive Materials[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 6—8.
- [3] IAEA. Safe Transport of Radioactive Material Training Course Series 1 (Third Edition)[G]. Vienna: IAEA, 2002: 178.
- [4] IAEA. Safety Standards Series No.TS-R-1, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 1996 Edition (Revised)[G]. Vienna: IAEA, 2000: 112.
- [5] 宋鹏云. 软填料密封机理分析[J]. 润滑与密封, 2000(6): 64—66.  
SONG Peng-yun. An Analysis of the Sealing Mechanism of a Soft-packed Stuffing-box Seal[J]. Lubrication Engineering, 2000(6): 64—66.
- [6] 黄远红, 张方晓, 郭静, 等. 插层复合型三元乙丙橡胶密封圈的高温密封性能[J]. 润滑与密封, 2014, 39(11): 107—109.  
HUANG Yuan-hong, ZHANG Fang-xiao, GUO Jing, et al. Sealing Properties of EPDM Intercalation Composite Rings in High Temperature[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(11): 107—109.
- [7] 黄琨, 黄渝鸿, 郭静, 等. 三元乙丙橡胶/膨胀石墨复合材料的制备及其性能研究[J]. 化工新型材料, 2008, 36(6): 21—23.  
HUANG Kun, HUANG Yu-hong, GUO Jing, et al. Study on Preparation and Properties of EPDM/EG Composite[J]. New Chemical Materials, 2008, 36(6): 21—23.
- [8] SATOSHI K, SHINSAKU M. Reconsideration of the Seal Mechanism in the Con Flat System[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2001, 19(6): 693—696.
- [9] 韩琰, 刘兴悦, 闫荣鑫, 等. 典型双密封结构泄漏机理研究[J]. 真空, 2015, 25(6): 27—33.  
HAN Yan, LIU Xing-yue, YAN Rong-xin, et al. Research on Leakage Mechanism of Double Sealed Structure[J]. Vacuum, 2015, 25(6): 27—33.
- [10] 李娜, 张思才, 徐伟芳. 抗事故包装箱密封结构性能研究[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 1—5.  
LI Na, ZHANG Si-cai, XU Wei-fang, et al. Seal Structure Performance of Accident-resistant Packaging Container[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 1—5.
- [11] 李海龙, 孙造占, 孙树海, 等. 放射性物质运输容器的跌落冲击分析方法[J]. 核技术, 2013, 36(4): 1—4.  
LI Hai-long, SUN Zao-zhan, SUN Shu-hai, et al. Drop Impact Analysis Method of Radioactive Material Container[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(4): 1—4.
- [12] 徐伟芳, 谢若泽, 钟卫洲. 抗事故包装箱的跌落冲击分析技术[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 25—29.  
XU Wei-fang, XIE Ruo-ze, ZHONG Wei-zhou. Drop Impact Analysis Technique of Accident-resistant Container[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 25—29.
- [13] GOLDFINCH E P. Directory of Test Facilities for Radioactive Materials Transport Packages[J]. International Journal of Radioactive Materials Transport, 1991, 2(1): 4—5.
- [14] 李国强, 王学新, 赵兵. 美国放射性物质货包试验技术简介[J]. 辐射防护, 2008, 28(5): 229—334.  
LI Guo-qiang, WANG Xue-xin, ZHAO Bing. American Test Technology for the Transport of Radioactive Packages[J]. Radiation Protection, 2008, 28(5): 229—334.
- [15] IAEA. Safety Standards Series No.TS-G-1.1 (ST-2), Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[G]. Vienna: IAEA, 2002: 62.
- [16] 汪佳明. 解读《放射性物质安全运输规程》GB 11806—2004 中的货包试验[J]. 辐射防护, 2009, 29(5): 346—351.  
WANG Jia-ming. Understanding about Package Test of GB 11806—2004 "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material"[J]. Radiation Protection, 2009, 29(5): 346—351.