

# 采用有限元方法的放射性物质货包 自由下落试验研究

徐潇潇, 赵 兵, 张建岗, 李国强, 王学新, 汤荣耀

(中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006)

**摘要:**放射性物质货包力学试验是证明货包结构设计安全性的重要试验之一。货包力学试验通常是一种破坏性试验,为得到对货包损坏最大的下落取向,通过预先计算分析确定货包下落取向成为目前国际上使用较多的方法。本工作采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,对货包的力学试验进行仿真分析。通过对计算结果分析,得到货包最大损坏的下落取向及应变和加速度数值,并与试验结果进行了比较。

**关键词:**货包;放射性物质;力学试验;有限元法;ANSYS 软件

**中图分类号:**TL93      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-6931(2010)03-0381-04

## Drop Test Using Finite Element Method for Transport Package of Radioactive Material

XU Xiao-xiao, ZHAO Bing, ZHANG Jian-gang, LI Guo-qiang,  
WANG Xue-xin, TANG Rong-yao

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

**Abstract:** Mechanical test for transport package of radioactive material is one of the important tests for demonstrating package structure design. Drop test of package is a kind of destructive test. It is a common method of adopting the pre-analysis to determine drop orientation. Mechanical test of a sealed source package was calculated with finite element method (FEM) software. Based on the analysis of the calculation results, some values were obtained such as the stress, strain, acceleration and the drop orientation which causes the most severe damage, and the calculation results were compared with the results of test.

**Key words:** package; radioactive material; mechanical test; finite element method; ANSYS software

货包力学试验是一种破坏性试验,为得到对货包损坏最大的下落取向,如果用多个货包

进行试验,其成本难以接受。因此,通过预先的计算分析确定货包下落取向成为目前国际上使

用较多的方法。美国圣地亚国家实验室在 20 世纪 80 年代已开发出基于有限元技术的货包力学计算机软件,并为验证软件分析结果的可靠性而开展了大量的实验。目前,国际国内常用的有限元分析软件主要有 ANSYS、LS-DYNA、ALGOR 等<sup>[1-4]</sup>。

本工作采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,对属于 B(U)型用于装载运输医用<sup>60</sup>Co 放射性源的货包进行 9 m 自由下落的研究。根据 GB 11806—2004《放射性物质安全运输规程》的要求,B(U)型货包 9 m 自由下落试验的目的是为验证货包经受运输事故条件的能力。试验要求试样以能受到最严重损坏的取向自由下落到靶上,且从试样最低点到靶上表面高度应为 9 m。

## 1 仿真分析容器

放射性密封源货包由防护罩(图 1)和装在防护罩内的源容器(图 2)组成。防护罩材料主要为 Q235 钢、耐热纤维毯和木板,尺寸为 1 300 mm×1 150 mm×1 451 mm,主要作用是减震和隔热,以保护源容器。源容器材料为铅和 16Mn 钢、1Cr18Ni9 不锈钢,外形尺寸为 880 mm×660 mm×930 mm,主要用来装载和屏蔽放射源。货包总质量约为 4 200 kg。

进行 9 m 自由落体试验时,在防护罩表面上安装了 7 个加速度传感器和 7 个应变计,具体位置示于图 1(1~3 点在同一个侧面上、4~5 点在同一个侧面上、7 点在顶面、6 点在底面,图 1 中无法显示 6 点)。源容器共安装 4 个加速度传感器和 4 个应变计,具体位置示于图 2 中的 8~11 点,其中,8 点在源容器底座的上表面,9 点和 10 点在源容器铅体的外壳表面,11 点在源抽屉处。在上述 1~11 点的位置上各装有 1 个加速度传感器和 1 个应变计,以采集力学试验时的货包加速度和应变数据。

## 2 货包 9 m 自由下落有限元计算

### 2.1 计算初始条件定义

进行模型仿真计算前,简化了本体容器吊耳和防护罩的吊环及槽钢等对系统冲击振动响应影响较小的部件,在计算模型中附加了简化部件的质量。

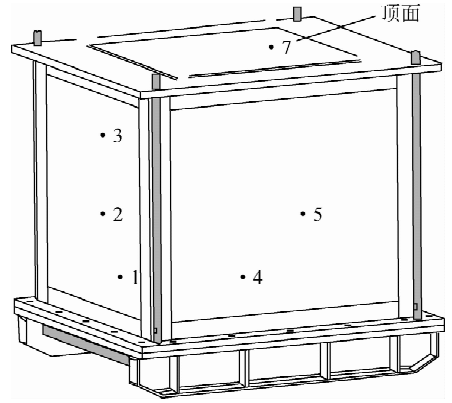


图 1 货包防护罩

Fig. 1 Shield of package

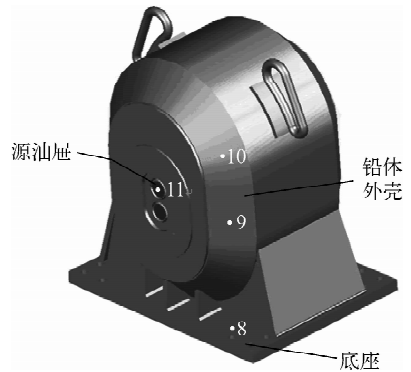


图 2 货包源容器

Fig. 2 Source container of package

网格划分主要采用非结构体六面体网格。本工作仿真结构单元选取单点积分方式,计算的单元总数为 434 088,节点数为 588 600。

货包 9 m 自由下落,因此,设定初始速度为  $v = \sqrt{2gh} = 14 \text{ m/s}$ ,在整个过程分析中施加重力加速度场。计算所用的材料机械性能参数列于表 1。

### 2.2 货包 9 m 自由下落取向

根据货包形状,取 5 个下落取向进行分析。通过比较计算结果,确定对货包最不利的取向,实施 9 m 自由下落实验。计算的货包自由下落 5 种取向如下。

1) 底面下落:防护罩底面着地,且底面与刚性面平行。

2) 顶面下落:防护罩顶面着地,且顶面与刚性面平行。

3) 顶角下落:防护罩顶角为着地点,且重心与着地点的连线垂直于靶面。

表 1 材料机械性能参数  
Table 1 Mechanical properties parameters of materials

材料	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	切线模量/GPa	泊松比
16Mn	7.85	345	200	0.74	0.30
Q235	7.85	235	203	0.66	0.30
45 号钢	7.81	355	200	1.53	0.30
1Cr18Ni9	7.85	205	199	0.74	0.27
铅	11.37	55	14	0.02	0.42

4) 底边下落:防护罩底边着地,且重心与边的连线垂直于边并垂直于靶面。

5) 底角下落:防护罩底角为着地点,且重心与着地点的连线垂直于靶面。

### 2.3 有限元计算结果

#### 1) 货包底面下落

货包下落底面着地后,货包最大应力强度为 151.6 MPa,发生在防护罩螺杆顶部,所产生的应变为 0.183 7。货包最大应变为 0.618 8,源抽屉最大应力强度为 41.24 MPa,源抽屉瞬时最大加速度为 24 571g。

#### 2) 货包顶面下落

货包下落顶面着地后,货包最大应力强度为 119.7 MPa,发生在防护罩螺杆的底部。源抽屉最大应力强度为 414.3 MPa,容器顶面下落产生的最大应变为 0.622,源抽屉瞬时最大加速度为 21 650g。

#### 3) 货包顶角下落

货包顶面下落后,货包最大应力强度为 596.9 MPa,发生在防护罩的顶板。源抽屉最大应力强度为 338.1 MPa,容器顶面下落产生的最大应变为 0.5,源抽屉瞬时最大加速度为 18 479g,货包的顶板边已明显卷曲,螺杆发生了变形。

#### 4) 货包底边下落

货包底边下落后,货包最大应力强度为 650.3 MPa,发生在防护罩的底座,且螺杆出现了位移。源抽屉最大应力强度为 164.2 MPa,货包底边下落产生的最大应变为 2.0,源抽屉瞬时最大加速度为 19 352g。

#### 5) 货包底角下落

货包底角下落后,货包受到最大应力强度为 920.7 MPa,发生在与靶面接触的防护罩底座,所产生的应变最大为 1.887。货包底座边

已明显卷曲,螺杆发生了大的弯曲并有移位,且防护罩的角钢也有明显变形。源抽屉受到最大应力强度为 355.6 MPa,防护罩横撑和立撑产生的应变最大为 0.921,源抽屉瞬时最大加速度为 15 863g。

通过对 5 种下落取向的有限元分析可知,9 m 自由下落时防护罩的减震作用使源容器基本上未受到破坏。考虑到后续还进行 800 °C 耐热验证试验<sup>[1]</sup>,因此,确定对防护罩密封性的损坏最严重的底角下落取向为 9 m 自由下落试验的取向。

## 3 货包 9 m 自由下落真实试验

### 3.1 试验装置

9 m 自由下落试验装置由试验靶、加速度测量系统、应变测量系统和货包变形测量系统组成,试验装置示意图示于图 3。

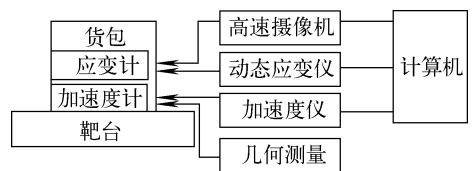


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Test equipment

试验在中国辐射防护研究院放射性物质运输安全试验场的下落试验靶上进行。下落试验靶由 18 m 长的  $\phi 800$  mm 的钢筋混凝土桩、钢筋混凝土承台和其表面铆接的 Q460 钢板组成,总质量约为 130 t,大于货包总质量的 10 倍。

### 3.2 试验结果

#### 1) 货包的应变

试验测到最大应变为 0.012,位置是 8 号

点(图2),在源容器底板处的冲击点处。有限元计算的相同位置的应变为0.042。

### 2) 货包的变形

通过试验后对货包的观察,固定底座和防护罩用的20-M20螺钉有6颗剪断飞出货包,加强固定用的4-M30螺杆有1根发生断裂。测量到防护罩的底板冲击点向上卷曲约为

20 cm,有限元计算结果在相同位置也发生了向上卷曲的变形,其竖直方向上的变形为23.4 cm。

### 3) 加速度

试验测得货包上各部位(其中1~7点在防护罩上,8~11点在源容器)的加速度与计算的加速度比较列于表2(8点和6点未得到数据)。

表2 试验测得的加速度与计算的比较

Table 2 Comparison of acceleration from test and calculation

位置	试验测得的加速度	瞬时加速度	位置	试验测得的加速度	瞬时加速度
1	188g	459g	7	92g	110g
2	161g	360g	9	257g	798g
3	167g	480g	10	76g	633g
4	185g	263g	11	88g	1 086g
5	212g	389g			

由于货包在离靶面9 m处自由下落,因此,在试验中风向、钢丝绳的松弛、释放装置和货包自身摆动等因素,使得试验与计算在下落角度及数据结果上存在偏差。

## 4 小结

采用数值模拟确定货包最不利下落取向是目前国际上使用较多的放射性物质货包自由下落试验方法。利用有限元计算技术,可建立与实际货包质量、结构、尺寸、材料等近似的货包模型,来模拟货包破坏性自由下落试验,不仅可得到在不同下落取向下货包各个部件瞬时的计算结果,对试验和测量工作具有很好的指导作用,而且可大幅节省试验成本及试验周期。

本工作的计算结果与试验结果吻合较好,

验证了数值计算的合理性和可靠性,为同类设备的设计研发积累了工程经验。

### 参考文献:

- [1] 中国国家标准化管理委员会第七分委员会. GB 11806—2004 放射性物质安全运输规程[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [2] IAEA. IAEA safety standards series No. TS-R-1(SR-1, Revised)[S]. Vienna: IAEA, 1996.
- [3] LEE M, PAEK S W, KIM K P, et al. Safety evaluation of type B transport container for tritium storage vessel[J]. Journal of the Korean Radioactive Waste Society, 2007, 5: 155-169.
- [4] HOLDEN G V. Radioactive materials packaging test facility at GRAVATOM engineering systems [J]. International Journal of Radioactive Materials Transport, 2001, 12: 153-156.