

第四届军品防护与包装发展论坛专栏

## 抗事故包装箱碰撞过程靶体等效方法研究

李娜<sup>1</sup>, 刘剑钊<sup>1,2</sup>, 张思才<sup>1</sup>, 薛江<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 绵阳 621999; 2. 西北工业大学, 西安 710072)

**摘要:**目的 为危险材料运输过程中的安全性评估提供依据。方法 将包装系统(包括箱体、缓冲结构及靶体)简化为由3个非线性弹簧及1个质量块组成的弹簧-质量块模型,利用能量守恒定律,分析抗事故包装箱碰撞过程中冲击动能与应变能之间的转化过程,假设使包装箱吸收相同变形能的冲击速度等效,研究碰撞过程中屈服靶体与非屈服靶体的速度等效关系,并通过实例应用此数学方法。结果 得出抗事故包装箱跌落碰撞过程中屈服靶体与非屈服靶体速度关系等效的数学方法,并通过实例分析得出包装箱以一定速度(13.9 m/s)碰撞非屈服靶体可等效为更高速度(26.8 m/s)的屈服靶体碰撞。结论 研究提出的等效方法可为危险材料的运输安全性评估提供依据。

**关键词:** 抗事故包装箱; 屈服靶体; 非屈服靶体; 等效方法; 碰撞

**中图分类号:** TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)01-0025-04

## Equivalent Method for the Targets in Impact Process of Accident-resistant Packaging Container

LI Na<sup>1</sup>, LIU Jian-zhao<sup>1,2</sup>, ZHANG Si-cai<sup>1</sup>, XUE Jiang<sup>1</sup>

(1. Institute of Systems Engineering China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;  
2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**ABSTRACT:** The aim of this work was to provide a basis for security evaluation during transportation process of dangerous substances. The package system (cask body, impact limiter and target) was simplified to a spring-mass model composed of three nonlinear springs and a concentrated mass, then based on the principle of conservation of energy, the transfer course between kinetic energy and strain energy of accident-resistant packaging container was analyzed during impact process, supposing that velocities resulting cask body and impact limiter absorbing the same energy were equivalent, then the equivalent velocity between yielding target and unyielding target during the impact process was studied, and this equivalent relationship was applied in an example. A math method of researching equivalent velocity between yielding target and unyielding target during impact process of accident-resistant packaging container was presented, and then it was validated by an example that when the packaging container collided with unyielding target at a determinate velocity (13.9 m/s), it was equivalent with a higher velocity (26.8 m/s) colliding with yielding target. This equivalent method introduced in this paper could provide a basis for security evaluation during transportation process of dangerous substances.

**KEY WORDS:** accident-resistant packaging container; yielding target; unyielding target; equivalent method; Impact

国外早从20世纪60年代就开始进行抗事故包装容器的研究和设计,并建立了一套安全评估体系<sup>[1]</sup>。对于运输物质的包装箱而言,在正式投入使用前,须对其进行一系列的试验验证,以考核其在经历一系列

事故环境后是否能保持其箱体结构的完整性<sup>[2-4]</sup>。抗事故包装箱的假想意外事故包括跌落、冲击、碰撞、挤压、火烧及浸没等,其中跌落试验是抗事故包装箱整体研究中最重要项目之一。

收稿日期: 2015-07-05

作者简介: 李娜(1985—),女,湖北荆门人,硕士,工程师,主要研究方向为抗事故包装容器结构设计及分析。

国内关于抗事故包装箱的研究相对较少,且大多数研究工作都是针对火烧事故环境开展的,如抗事故包装箱的火灾环境条件、耐火性能的理论分析模型及其数值模拟研究<sup>[5-8]</sup>,仅文献[9]在调研美国圣地亚国家实验室相关文献的基础上,介绍了抗事故包装箱的基本构成及相关环境试验技术。

考虑到跌落试验是抗事故包装容器整体研究中最重要项目之一,跌落试验的跌落速度及目标靶面是试验的关键因数。实验中一般采用钢靶,而钢靶被认为是非屈服靶体,在抗事故包装容器运输过程中,其所经路线的路面情况是多变的,且绝大部分路段是屈服的,对碰撞过程中屈服靶体与非屈服靶体的等效关系进行研究,可以降低试验抗事故包装箱安全评估过程中的跌落试验次数,降低试验成本。

在美国核管制委员会一份关于核材料运输风险的评估报告<sup>[10]</sup>中进行了相关的等效研究,该方法是一种试验方法,其中包装箱属性未知,认为使包装箱产生相同变形量的冲击速度是等效的。通过包装箱碰撞不同靶体的试验对比分析得到等效速度。在Fischer等<sup>[11]</sup>关于乏燃料运输包装箱的危险评估报告中也进行了相关的等效研究,其中由包装系统的属性可知,屈服靶体与非屈服靶体之间的等效关系与包装系统属性相关。假设包装箱的损坏程度一致时冲击速度等效,得出了等效速度与靶体变形量之间的关系。

文中介绍一种将抗事故包装容器碰撞过程中屈服靶体与非屈服靶体碰撞速度等效的数学方法,正确模拟碰撞过程中冲击动能与应变能之间的转换,并通过实例分析证明此方法能得到有效的应用。

## 1 包装箱跌落数学模型

跌落碰撞过程中能量是守恒的,按照能量转换规律,包装箱(箱体及缓冲结构)从一定高度开始跌落,到与靶体碰撞前,系统(包装箱与靶体)的能量为包装箱的动能。在系统最大变形处,动能为0,包装箱的动能将全部转化为系统应变能。对于刚性靶体,系统应变能为箱体及缓冲结构的应变能,对于屈服靶体,系统的应变能为箱体、缓冲结构及靶体应变能之和。一般情况下,缓冲结构应变能比箱体应变能要大得多。忽略惯性效应,冲击过程中作用在包装容器上的力与作用在缓冲结构及靶体的力相等。

可将包装系统简化为由3个非线性弹簧及一个质量块组成的弹簧-质量块模型,见图1。可以看出,简化模型忽略了靶体的质量,将系统的质量简化为包装

箱的质量 $m$ 。由于靶体的等效速度一般较小,因而其动能较小,忽略其质量不会对分析结果造成大的偏差。把抗事故包装箱箱体、缓冲结构及靶体的弹性部分简化为3个非线性弹簧。为了便于分析,不考虑包装系统的阻尼,且把碰撞过程简化为一维且类静态冲击,忽略横向载荷、惯性效应和应变率效应。

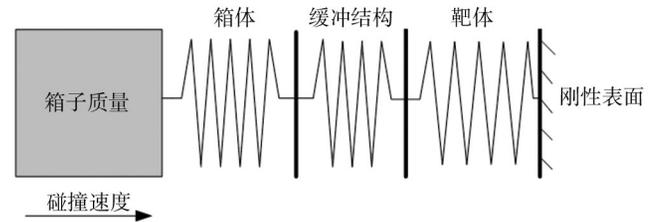


图1 简化冲击模型

Fig.1 Simplified impacting model

对弹簧而言,当位移一定时,弹簧应变能可由其载荷-位移曲线所围面积表示。对于线性弹簧,应变能:

$$E = \frac{1}{2} k \delta^2 \quad (1)$$

式中: $E$ 为弹簧应变能; $k$ 为线性弹簧的弹性系数,且为常量; $\delta$ 为弹簧变形量。

对于非线性弹簧,其应变能:

$$E = \int_0^{\delta} F(x) dx \quad (2)$$

式中: $E$ 为弹簧应变能; $F(x)$ 为位移为 $x$ 时弹簧所受弹性力; $\delta$ 为弹簧变形量,等于弹簧载荷位移曲线在一定位移处与横坐标所围区域的面积。

由能量守恒定律,3个弹簧的应变能之和与质量块的初始动能相等,且3个弹簧的受力相等,即:

$$\frac{1}{2} m v_y^2 = E_c + E_i + E_t \quad (3)$$

$$F_c = F_i = F_t \quad (4)$$

式中: $m$ 为跌落过程中产生冲击能量的有效质量; $v_y$ 为包装系统与屈服靶体碰撞的等效冲击速度; $E_c, E_i, E_t$ 为箱体、缓冲结构及靶体的应变能; $F_c, F_i, F_t$ 为3个弹簧的弹性力。

对于非屈服靶面,质量块的初始动能转化为箱体与缓冲结构的应变能,即:

$$\frac{1}{2} m v_u^2 = E_c + E_i \quad (5)$$

式中: $v_u$ 为包装系统与非屈服靶面碰撞的等效冲击速度。

联立式(3)及(5),得到:

$$\frac{v_y}{v_u} = \sqrt{1 + \frac{E_t}{E_c + E_i}} \quad (6)$$

## 2 应用实例

应用所述方法时,必须获得箱体、缓冲结构及靶体的载荷-位移曲线,以求解相应结构的应变能。假设有一质量为90 700 kg的抗事故包装箱以26.8 m/s的速度碰撞硬土靶体。箱体、缓冲结构及靶体的载荷-位移曲线见图2。

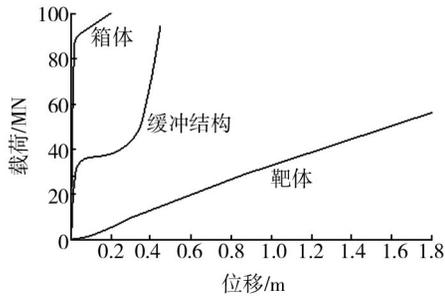


图2 箱体、缓冲结构、硬土靶体的载荷-位移曲线

Fig.2 Force-displacement curves for container body, impact limiter, and a hard soil target

经过试验数据拟合得到箱体的载荷-位移关系:

$$F_c = A(1 - e^{-Bx_c} + Cx_c) \quad (7)$$

式中: $A, B, C$ 为常数, $A$ 的单位为N, $B$ 和 $C$ 的单位为 $m^{-1}$ ; $x_c$ 为箱体在碰撞过程中的等效位移(m); $F_c$ 为箱体在位移为 $x_c$ 时所受力(N)。

由于箱体用来包覆缓冲材料及产品,同时在跌落碰撞过程中利用其塑性变形吸收冲击能量,为抵御之后可能伴随的火灾环境,其在跌落碰撞后应保持结构完整,因而箱体材料一般选用高熔点、高韧性的金属材料,其典型载荷-位移曲线见图2。式(7)中, $A$ 表示箱体材料屈服点处的受力, $B$ 可由箱体材料屈服力处对应的位移确定, $C$ 可由箱体材料应变(率)硬化阶段斜率确定。假设 $\delta_{yc}$ 为箱体材料屈服点处位移,则 $B$ 可以表示为:

$$B = -\ln(C \delta_{yc}) / \delta_{yc} \quad (8)$$

$C$ 可以表示为:

$$C = \text{箱体材料应变(率)硬化阶段斜率} / A \quad (9)$$

由此,可以确定 $A=89.0$  MN, $B=131$   $m^{-1}$ , $C=0.656$   $m^{-1}$ ,进一步可以得到箱体在碰撞过程中的应变能:

$$E_c = \int_0^{\delta_c} F_c dx_c = A \left[ \delta_c + \frac{1}{B} e^{-B\delta_c} - \frac{1}{B} + \frac{C}{2} \delta_c^2 \right] \quad (10)$$

式中: $\delta_c$ 为箱体在碰撞过程中的最大位移。

缓冲结构在碰撞过程中吸收冲击能量,且在随后的火灾环境中隔热以保护有效载荷。由于多孔材料(如发泡塑料、木材等)既能实现对有效载荷的减振缓

冲,同时又具有很好的隔热功能<sup>[12-14]</sup>,能够实现事故环境下的防护功能,因而缓冲结构多采用具有较长屈服应力平台的多孔材料。其典型载荷-位移曲线见图2中的缓冲垫曲线,曲线由3段组成,分别为弹性段、平台段及密实段。在应力平台段,泡孔是逐渐被破坏的,能量在近似恒应力下被吸收。缓冲结构的载荷-位移关系可用式(11)表示<sup>[15]</sup>:

$$F_i = D[1 - e^{-Ex_i} + F(e^{G(x_i-H)} - e^{-GH})] \quad (11)$$

式中: $D, E, F, G, H$ 为常数, $D$ 的单位为N, $E$ 和 $G$ 的单位为 $m^{-1}$ , $H$ 的单位为m, $F$ 为无量纲常数; $x_i$ 为缓冲结构在碰撞过程中的等效位移(m); $F_i$ 为缓冲结构在位移为 $x_i$ 时所受力(N)。

式(11)中, $D$ 为所选缓冲材料在应力平台段对应的力, $E$ 由应力平台段起始点的位移确定, $F$ 与缓冲材料应力平台段斜率相关, $G$ 与缓冲材料密实段斜率相关, $H$ 为缓冲材料密实段起始点位移。其中 $E, F, G$ 的具体数值可由曲线2经计算机拟合确定, $D=35.6$  MN, $E=98.4$   $m^{-1}$ , $F=0.1$ , $G=13.12$   $m^{-1}$ , $H=0.244$  m。虽然精确确定常数 $E, F, G$ 值比较困难,但是可以通过以上定性解释给出其近似值。进一步可以得到缓冲结构在碰撞过程中的应变能:

$$E_i = \int_0^{\delta_i} F_i dx_i = D \left[ \delta_i + \frac{1}{E} (e^{-E\delta_i} - 1) + \frac{F}{G} e^{-GH} (e^{G\delta_i} - 1 - G\delta_i) \right] \quad (12)$$

确定屈服靶体的载荷位移关系十分困难,A.Gonzales<sup>[16]</sup>就不同靶体(包括混凝土靶体与硬土靶体等)对包装箱跌落碰撞响应的影响做过试验及数值模拟方面的研究,其中硬土靶体的载荷位移关系可以近似为线性关系,即可近似表示为:

$$F_t = Kx_t \quad (13)$$

式中: $K$ 为常数,表示屈服靶体的线刚度(N/m)。对图2中所示的硬土靶体而言, $K$ 约为32.56 MN/m。由此得到靶体在碰撞过程中的应变能:

$$E_t = \int_0^{\delta_t} F_t dx_t = \frac{1}{2} K \delta_t^2 \quad (14)$$

由式(3)知,箱体弹簧、缓冲结构弹簧及靶体弹簧的应变能之和与包装箱动能相等,即为 $\frac{1}{2} mv^2$ ,其中 $m=90$  700 kg, $v=26.8$  m/s,故3个弹簧应变能之和为32.6 MN·m。为得到应变能在箱体、缓冲结构及硬土靶体之间的分布,需解由式(3),(4),(7),(10)~(14)组成的非线性方程组,可以利用计算机技术进行数值计算。通过求解非线性方程组,得到箱体弹簧的应变

能为 $0.09 \text{ MN}\cdot\text{m}$ ,缓冲结构弹簧的应变能为 $8.69 \text{ MN}\cdot\text{m}$ ,硬土靶体弹簧的应变能为 $23.82 \text{ MN}\cdot\text{m}$ 。作用于3个弹簧上的最大弹性力为 $39.4 \text{ MN}$ ,箱体弹簧的压缩量为 $4.4 \text{ mm}$ ,缓冲结构弹簧的压缩量 $0.252 \text{ m}$ ,靶体弹簧的压缩量为 $1.21 \text{ m}$ ,抗事故包装箱(包括箱体弹簧及缓冲结构弹簧)总应变能为 $8.78 \text{ MN}\cdot\text{m}$ 。由式(6)可以得到此包装箱以 $26.8 \text{ m/s}$ 的速度撞击硬土靶体等效于其以 $13.9 \text{ m/s}$ 的速度碰撞非屈服靶体。

假设此包装箱无缓冲结构,以 $26.8 \text{ m/s}$ 的速度撞击相同的屈服靶体,此时模型简化为2个非线性弹簧(箱体弹簧及靶体弹簧)。即箱体弹簧与靶体弹簧的应变能之和为 $32.6 \text{ MN}\cdot\text{m}$ 。通过求解由式(4),(5),(7),(10),(13)及式(14)组成的非线性方程组,得到箱体弹簧的应变能为 $0.14 \text{ MN}\cdot\text{m}$ ,硬土靶体弹簧的应变能为 $32.46 \text{ MN}\cdot\text{m}$ 。作用于箱体弹簧及靶体弹簧的最大弹性力为 $45.5 \text{ MN}$ ,箱体弹簧的弹性变形为 $5.4 \text{ mm}$ ,靶体弹簧的弹性变形为 $1.41 \text{ m}$ 。由式(6)可以得到此包装箱以 $26.8 \text{ m/s}$ 的速度撞击硬土靶体等效于其以 $1.76 \text{ m/s}$ 的速度碰撞非屈服靶体。

通过以上分析可以看出无论包装箱有无缓冲结构,其以 $26.8 \text{ m/s}$ 的速度撞击硬土靶体,箱体弹簧的弹性变形均不超过 $6 \text{ mm}$ 。由图2可以看出,此时箱体载荷-位移曲线还未达到其屈服点),故不会对包装容器箱体的结构造成破坏。

### 3 结语

抗事故包装箱以一定速度撞击非屈服靶体可以等效于以更高速度撞击屈服靶体。抗事故包装与屈服靶体碰撞时,屈服靶体可吸收部分冲击动能,降低跌落碰撞事故的严酷度。抗事故包装箱中的缓冲结构可以吸收大量冲击动能,降低包装箱的整体刚度,进而降低跌落碰撞事故对包装箱箱体的破坏程度。对于不带缓冲结构的包装系统,由于抗事故包装容器的刚度比屈服靶体大得多,绝大部分能量均被靶体吸收。

文中把抗事故包装箱箱体、缓冲结构及靶体弹性部分简化为无质量的弹簧,把碰撞过程简化为一维且类静态冲击,忽略横向载荷,载荷被视为分布载荷,忽略惯性效应和应变率效应。大部分放射性材料运输包装箱箱体刚度比缓冲结构刚度大得多,故忽略横载及集中载荷,仅考虑一维冲击对分析结果的影响。在缓冲结构与靶体碰撞过程中,横向载荷冲击缓冲结构或靶体会消耗部分冲击能量,进而降低包装系统与屈服靶体碰撞的严酷程度。由于横向载荷及高应变

率效应导致的失效模式改变无法模拟,所以文中介绍的等效方法将与屈服靶面的碰撞考虑得比实际情况更为严酷,用于风险评估偏保守。

### 参考文献:

- [1] IAEA Safety Standards, Regulation for the Safe Transport of Radilactive Materials[S].
- [2] HUERTA M, LAMOREAUZ G H, ROMSBERG L E, et al. Analysis, Scale Modeling, and Full-Scale Tests of Low-Level Nuclear Waste Drum Response to Accident Environments[R]. SAND80-2517, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1983.
- [3] AMMWEMAN D J, BOBBE J G, ARVISO M. Testing in Support of On-site Storage of Residues in the Pipe Overpack Container[R]. SAND97-0716, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1997.
- [4] DOUGLAS J. Ammerman. Regulatory And Extra-regulatory Testing to Demonstrate Radioactive Material Packaging Safety [R]. SAND97-1248C, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1997.
- [5] 刘朝, 史光梅. 抗事故包装箱结构中木材层的非傅立叶热传导[J]. 工业加热, 2006, 35(2): 16—19.  
LIU Chao, SHI Guang-mei. Non-fourier Heat Conduction in Wood Slab of Accident-resistant Packaging Container[J]. Industrial Heating, 2006, 35(2): 16—19.
- [6] 李明海, 翟贵立, 宋耀祖, 等. 抗事故包装箱热防护结构的设计及其性能分析[J]. 包装工程, 2000, 21(2): 5—8.  
LI Ming-hai, ZHAI Gui-li, SONG Yao-zu, et al. Design and Performance Analyses of Thermal Protection Structure of Accident-resistant Packaging Container[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(2): 5—8.
- [7] 李明海. 火灾环境下抗事故包装结构热-力耦合响应的数值模拟[R]. GF-A-0090584, 2008.  
LI Ming-hai. Numerical Simulation of Accident-resistant Packaging Structure's Thermal-mechanical Coupling Response in Fire Conditions[R]. GF-A-0090584, 2008.
- [8] 吴松, 李明海, 张中礼. 火灾环境下含炸药结构传热问题的数值模拟[J]. 含能材料, 2014, 22(5): 617—623.  
WU Song, LI Ming-hai, ZHANG Zhong-li. Numerical Simulation of Heat Transfer Problems in Structure with Explosive under Fire[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(5): 617—623.
- [9] 王宝乾. 有效载荷抗事故包装箱的环境和试验环境[J]. 环境技术, 1995(4): 7—13.  
WANG Bao-qian. Environment and Experimentation Environment of Accident-resistant Packaging Container Packing Effective Load[J]. Environment Technology, 1995(4): 7—13.

(下转第38页)

- 工程, 2006, 27(3): 74—76.
- YANG Shi-jian, SHENG Yong-mei. Study of Seal and Storage Packaging Technology of Foreign Military Equipment[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(3): 74—76.
- [6] OOIJEN I V, FRANSEN M L, VERLEGH P W J, et al. Atypical Food Packaging Affects the Persuasive Impact of Product Claims[J]. Food Quality and Preference, 2016, 48: 33—40.
- [7] OZTURK I, SAGDIC O, YALCIN H, et al. The Effects of Packaging Type on the Quality Characteristics of Fresh Raw Pistachios (*Pistacia vera* L) During the Storage[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 65: 457—463.
- [8] HUSSEIN Z, CALEB O J, OPARA U L. Perforation-mediated Modified Atmosphere Packaging of Fresh and Minimally Processed Produce—A Review[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2015, 6: 7—20.
- [9] 高飞, 纪梁宸, 王韶光. 我军军品包装发展的问题及对策[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 182—197.
- GAO Fei, JI Liang-chen, WANG Shao-guang. Study on Problem and Countermeasure of Military Packaging Development[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 182—197.
- [10] 陈晓玲. 密封包装箱内温湿度软测量系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- CHEN Xiao-ling. Research on Soft Measurement of Internal Temperature and Relative Humidity in Sealed Packages[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [11] 李明海, 任建勋, 罗群生, 等. 钢-木组合结构在火灾中的热响应数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(2): 68—71.
- LI Ming-hai, REN Jian-xun, LUO Qun-sheng, et al. Numerical Simulation of the Thermal Response of Steel-wood Composite Structure On Fire[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2001, 41(2): 68—71.
- [12] 黄鹏, 郝志明, 黎维芬, 等. 火烧环境下包装箱结构的热响应有有限元模拟[J]. 固体力学学报, 2013, 33(S): 247—252.
- HUANG Peng, HAO Zhi-ming, LI Wei-fen, et al. The Response Simulations of the Packing Container in Fire Environment Using the Finite Element Method[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 33(S): 247—252.
- [13] 杨春. 武器产品的金属包装箱结构设计[J]. 战术导弹技术, 2011(5): 38—40.
- YANG Chun. Metal Packaging Box Structural Design of the Weapons[J]. Tactical Missile Technology, 2011(5): 38—40.
- [14] 蔡鹏, 李斐如. 军品包装采用射频识别技术的探讨[J]. 包装与食品机械[J], 2009, 27(6): 23—25.
- CAI Peng, LI Fei-ru. Discussing on Military Product Packing Adopting Radio Frequency Identification Technique[J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(6): 23—25.
- [15] 罗群生, 史光梅, 李明海. 有限元热分析中空气夹层传热处理方法及其验证[J]. 包装工程, 2011, 32(23): 117—145.
- LUO Qun-sheng, SHI Guang-Mei, LI Ming-hai. Air Interlayer Heating Exchange Treatment Method Using Finite Element Analysis and Its Validation[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(23): 117—145.

(上接第 28 页)

- [10] NUCLEAR U S. Regulatory Commission. Final Environmental Statement on the Transportation of Radioactive Material by Air and Other Modes, U.S. Nuclear Regulatory Commission [R]. Washington, DC, NUREG-0170, 1977.
- [11] FISCHER L E. Shipping Container Response to Severe Highway Accident Conditions[R]. NUREG/CR-4829, Rebruary, 1987.
- [12] 葛任伟, 欧阳勇, 张怀宇, 等. 抗事故包装箱缓冲结构厚度计算方法研究[J]. 机械设计与制造, 2011(12): 38—40.
- GE Ren-wei, OUYANG Yong, ZHANG Huai-yu, et al. Research of Computing Methods for Thickness of Buffering Structure of Accident Resistant Packing Cases[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(12): 38—40.
- [13] 马晓雄, 何斌, 胡新媛, 等. 抗事故包装箱用酚醛泡沫制备及其性能评估[J]. 工程塑料, 2008, 36(7): 60—64.
- MA Xiao-xiong, HE Bin, HU Xin-yuan, et al. Preparation and Evaluation Performance of Phenolic Foam Using for Accident-resistant Packaging Container[J]. Engineering Plastics, 2008, 36(7): 60—64.
- [14] REID S R, PENG C. Dynamic Uniaxial Crushing of Wood[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(6): 531—570.
- [15] AMMERMAN D J. A Method for Comparing Impacts with Real Targets to Impacts onto the IAEA Unyielding Target[R]. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico. United States of America.
- [16] GONZALES A. Target Effects on Package Response: An Experimental and Analytical Evaluation[R]. SAND86-2275, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1987.