

放射性物质运输容器缩比模型试验的数值模拟

蓝霄^{1a}, 孟东原², 李国强², 李志强^{1a,1b,1c}

(1.太原理工大学 a.应用力学与生物医学工程研究所 b.材料强度与结构冲击山西省重点实验室
c.力学国家级实验教学示范中心, 太原 030024; 2.中国辐射防护研究院, 太原 030006)

摘要: **目的** 为了解决使用放射性物质运输容器原型在真实环境中进行跌落冲击试验的困难, 研究一种缩比模型, 使缩比模型可代替原型进行试验。**方法** 通过量纲分析中的 Buckingham “ Π 定理”, 推导出缩比模型容器的比例定律。以简化的圆柱形放射性物质运输容器为例, 采用 ABAQUS 动态显式算法对原型和 1/4 缩比模型, 在事故条件下于 9 m 高处以底角跌落姿态冲击刚性地面的动态响应进行数值模拟。**结果** 两模型力学性能 (包括关键位置的应变、应力、加速度, 以及与刚性地面之间的接触力) 的变化规律与理论分析结果具有很好的一致性。**结论** 在一定缩比范围内, 比例定律适用于放射性物质运输容器缩比模型的试验测试, 可为原容器的替代试验提供科学依据。

关键词: 运输容器; 比例定律; 自由跌落; 动态响应

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)13-0064-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.13.012

Numerical Simulation of Scale Model Test for Radioactive Material Transportation Container

LAN Xiao¹, MENG Dong-yuan², LI Guo-qiang², LI Zhi-qiang^{1a,1b,1c}

(1.Taiyuan University of Technology a.Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering b.Shanxi Key Laboratory of Material Strength and Structural Impact c.National-level Mechanics Experimental Teaching Demonstration Center, Taiyuan 030024, China; 2.China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

ABSTRACT: The work aims to study one scale model to replace the prototype for the test, so as to solve the difficulty in the drop impact test for the prototype of radioactive material transportation container. The scaling law for scale model was derived from the Buckingham “ Π theorem” in the dimensional analysis. Taking the simplified cylindrical radioactive material transportation container as an example, the dynamic responses of its prototype model and quarter-scale model dropping to (colliding with) the rigid ground were numerically simulated by ABAQUS dynamic display algorithm under the accident conditions, from the height of 9 m with bottom angle drop. The change law of mechanical properties (including the strain, stress and acceleration at key positions as well as the contact force with the rigid ground) was well consistent with the theoretical analysis results. In certain scale range, the scaling law is applicable for the test of scale model of the radioactive material transportation container and can provide scientific basis for the alternative experiment of nal container.

KEY WORDS: transportation container; scaling law; free drop; dynamic response

随着世界各国核能与核技术的大力发展,放射性物质运输的需求量日益增长。为了保障公众的身心健

康、保护环境、促进经济和核能的持续发展,放射性物质运输安全的重要性显得尤为重要^[1]。我国制定的

收稿日期: 2018-02-26

基金项目: 国家自然科学基金 (11672199); 山西省自然科学基金项目 (201601D011011)

作者简介: 蓝霄 (1992—), 女, 太原理工大学硕士生, 主攻冲击动力学。

通信作者: 李志强 (1973—), 男, 博士, 太原理工大学教授, 主要研究方向为冲击动力学和计算力学。

《放射性物质安全运输规程》(GB 11806—2004)规定,验证容器在运输过程中经受事故能力的冲击动力学试验为容器从 9 m 高自由下落冲击刚性靶^[2]。

由于容器的体积、质量均较大,试验设施复杂,真实环境模拟条件要求严苛等,用传统试验方法对运输容器进行原型试验不仅成本高昂,而且费时费力^[3],所以使用缩比模型来代替原型容器进行安全试验是一种经济有效的方法。在使用缩比模型进行试验时,因尺寸参数的不同,模型的应力、应变、受力、加速度、碰撞时间等变量会产生不同的变化,所以需要以比例定律作为理论依据,给出原型和缩比模型之间各个变量的变化关系。

目前,美国、德国、韩国等在大型运输容器试验中都大量使用了缩比模型试验以节约人力、物力,如德国的 1/2 比例 TN8/9 乏燃料运输容器跌落试验和韩国 1/3 比例 CASTOR/KN-12 乏燃料运输容器跌落试验等^[4—5],并对缩比模型的比例定律展开了研究。我国自 20 世纪 80 年代开始开展放射性物质安全运输方面的研究工作,在放射性物质运输容器的冲击动力学试验和有限元仿真模拟上都取得了较大的进展和成就。自 2008 年后,已完成多个型号的放射性物品运输容器原型容器力学试验和仿真计算等工作^[6—9],使用 Ansys, LS-DYNA, ABAQUS 等有限元软件对容器进行受力分析计算,获得容器的应力、应变、力、加速度、变形量等数据的分布云图和最大值^[10—11]。然而,关于运输容器冲击试验缩比模型的比例定律方面的研究和试验较少。

文中应用 Buckingham 定理推导缩比模型和原型之间的比例定律,以简化的圆柱形运输容器为例,采用动态显式算法对原模型和 1/4 缩比模型冲击刚性地面的过程进行数值模拟,并与理论分析结果进行对比,验证比例定律在放射性物质运输容器冲击试验中的适用性,为模型容器的实物跌落冲击试验提供科学的指导。

1 缩比模型比例定律推导

根据 Buckingham 的“Π定理”,若要缩比模型与

$$\begin{matrix} & E & k & v_0 & \theta & \rho & \lambda & \lambda_{ij} & x_i & \alpha & g & P & T_0 & t & v_t & \delta_i & \dot{\varepsilon}_{i,j} & \sigma_{i,j} & \varepsilon_{i,j} & h & \mu & \beta \\ m & \left(\begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right) \\ L & \left(\begin{matrix} -1 & 0 & 1 & -3 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right) \\ t & \left(\begin{matrix} -2 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -2 & 1 & 1 & -1 & 0 & -1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right) \\ \theta & \left(\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right) \end{matrix}$$

通过矩阵的初等变换将该矩阵化简为一个秩为 4 的阶梯矩阵:

$$\left(\begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right)$$

原型相似,两模型必须具有几何相似性、机械相似性、动力学相似性、重力相似性和材料相似性,才能使缩比模型与原型有相似的机械响应。在没有发生明显断裂的冲击碰撞过程中,采用 13 个驱动变量和 8 个响应变量来描述碰撞过程。驱动变量和响应变量分别见表 1—2。

表 1 驱动变量
Tab.1 Drive variables

变量符号	变量名称	量纲
E	弹性模量	N/m^2
k	应变率敏感参数	s
ρ	密度	kg/m^3
α	热膨胀系数	—
μ	摩擦因数	—
B	阻尼系数	—
λ	特征尺寸	m
λ_{ij}	i, j 的间距	m
x_i	点 i 的位置	m
h	热分布系数	$^{\circ}\text{C}$
θ	温度	$^{\circ}\text{C}$
v_0	碰撞速度	m/s
g	重力加速度	m/s^2

表 2 响应变量
Tab.2 Response variables

变量符号	变量名称	量纲
P	容器所受压强	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$
t_0	碰撞时间	s
t	碰后时间	s
v_t	t 时的速度	m/s
δ_i	i 点的挠度	m
$\varepsilon_{i,j}$	i, j 点间的应变	—
$\dot{\varepsilon}_{i,j}$	i, j 点间的应变率	$1/s$
$\sigma_{i,j}$	i, j 点间的应力	N/m^2

为了得到比例定律中的相似准则,需要将这些物理参数转换为一系列无量纲组。选质量(m)、长度(L)、时间(t)和温度(θ)为基本量,结构的量纲矩阵可以表示为:

Buckingham “ Π 定理”指出,问题中若有 N 个变量,而基本量的数目为 K ,那么一定会形成 $(N-K)$ 个无量纲变量,它们之间会形成确定的函数关系^[12]。无量纲变量的数量等于物理量减去矩阵的秩^[13],因此该问题中可得到 17 个无量纲变量。将量纲矩阵中的 $E, k, v_0 \cdots$ 分别记作 $a_1, a_2, a_3 \cdots$, 由阶梯矩阵得到 4 个齐次线性方程:

$$\begin{cases} a_1 + a_5 + a_{11} + a_{17} = 0 \\ a_2 + a_6 + a_7 + a_8 - a_{10} + a_{15} + a_{16} = 0 \\ a_3 - 2a_5 + a_6 + a_7 + a_8 + a_{10} + a_{14} + a_{15} = 0 \\ a_4 = a_9 \end{cases} \quad (1)$$

解式 (1) 得: $a_1 = -a_5 - a_{11} - a_{17}$, $a_3 = a_2 + a_5 - 2a_{10} - a_{14} - a_{16}$, $a_4 = a_9$, $a_6 = -a_2 - a_7 - a_8 + a_{10} - a_{15} - a_{16}$ 。

根据齐次线性方程的解可写出零空间矢量矩阵:

$$\begin{matrix} E & k & v_0 & \theta & \rho & \lambda & \lambda_{ij} & x_i & \alpha & g & P & T_0 & t & v_t & \delta_i & \dot{\varepsilon}_{i,j} & \sigma_{i,j} & \varepsilon_{i,j} & h & \mu & \beta \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} & a_{20} & a_{21} \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Pi_1(a_2) & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_2(a_5) & -1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_3(a_7) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_4(a_8) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_5(a_9) & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_6(a_{10}) & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_7(a_{11}) & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_8(a_{12}) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_9(a_{13}) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_{10}(a_{14}) & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_{11}(a_{15}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_{12}(a_{16}) & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_{13}(a_{17}) & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_{14}(a_{18}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \Pi_{15}(a_{19}) & 0 \\ \Pi_{16}(a_{20}) & 0 \\ \Pi_{17}(a_{21}) & 0 \end{pmatrix}$$

整理后得到 17 个相似准则: $\Pi_1 = \frac{kv_0}{\lambda}$, $\Pi_2 = \frac{\rho v_0^2}{E}$, $\Pi_3 = \frac{\lambda_{ij}}{\lambda}$, $\Pi_4 = \frac{x_i}{\lambda}$, $\Pi_5 = \alpha\theta$, $\Pi_6 = \frac{\lambda g}{v_0^2}$, $\Pi_7 = \frac{P}{E}$, $\Pi_8 = \frac{v_0 T_0}{\lambda}$, $\Pi_9 = \frac{tv_0}{\lambda}$, $\Pi_{10} = \frac{v_t}{v_0}$, $\Pi_{11} = \frac{\delta_{i,j}}{\lambda}$, $\Pi_{12} = \frac{\lambda \dot{\varepsilon}_{i,j}}{v_0}$, $\Pi_{13} = \frac{\sigma_{i,j}}{E}$, $\Pi_{14} = \varepsilon_{i,j}$, $\Pi_{15} = h$, $\Pi_{16} = \mu$, $\Pi_{17} = \beta$ 。国际原子能机构安全标准丛书《放射性物质安全运输规程咨询材料》中指出,放射性物质运输容器比例模型在 9 m 跌落试验中,容器所用的材料 16MnDR 和 0Cr18Ni19 的应变率对材料力学性能的影响可忽略不计^[14],因此 Π_1 不作考虑。此外,因为重力影响不明显, Π_6 也不作考虑。根据其余 15 个相似准则可以得出结论,试验中缩比模型和原型容器需有精确的几何相似性,并且要求两者有相同的碰撞角度、碰撞速度、材料、温度、热分布系数、阻尼系数与摩擦因数。若模型按比例缩小为原型容器的 $1/M$ (M 大于 1),缩比模型与原型容器在以相同的角度及高度跌落的冲击试验中,相似时刻的速度、应变和应力

相同,碰撞持续时间和总时间变为原型容器的 $1/M$,挠度和应变率变为原型容器的 M 倍,而所受到的冲击力则变为原型容器的 M^2 倍。

2 有限元模型建立

2.1 运输容器描述及网格划分

为了简化问题,以圆柱形放射性物质运输容器为例。该容器主要由防护罩容器和屏蔽源容器组成。防护罩容器由上盖和筒身构成,外形几何尺寸为 $\Phi 300 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ 。上盖和筒身壳均采用厚度为 10 mm 的 0Cr18Ni19 不锈钢,中间采用落叶松木板填充用以隔热和缓冲吸能。

防护罩容器内部装有外形尺寸为 $\Phi 200 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 的屏蔽源容器,该容器也同样由上盖和筒身组成。其中上盖和筒身采用厚度 10 mm 的 16MnDR 钢^[15],中间填充铅以屏蔽放射性物质的辐射。整个容器的组装见图 1。

缩比模型运输容器按比例将防护罩容器和屏蔽源容器的半径和高缩小为原运输容器的 $1/4$ 。除此之外,缩比模型的内部结构和材料均和原模型完全相

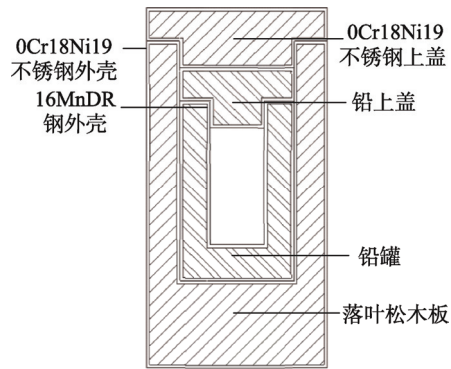


图 1 运输容器结构
Fig.1 Structure of transportation container

同。采用 ABAQUS CAE 模块对运输容器原型和缩比模型的三维几何模型进行网格划分，见图 2。单元类型均为 C3D8R 八节点三维实体单元，单元总数为 32 636，节点数为 46 057。

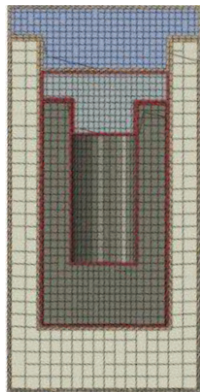


图 2 运输容器的有限元网格
Fig.2 Finite element mesh for transportation containers

2.2 材料模型

运输容器中所有金属材料采用弹塑性随动强化模型，不考虑应变率效应。力学参数见表 3，落叶松木采用正交各向异性弹性材料模型，力学参数见表 4，其中 σ_s 和 σ_b 分别为屈服强度和抗拉强度， G 为剪切模量。

表 3 金属材料的力学性能
Tab.3 Mechanical properties of metal material

材料名称	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	μ	σ_s/GPa	σ_b/GPa
0Cr18Ni9	7930	195	0.3	205	520
16MnDR	7850	206	0.28	315	517
Pb	11 370	15.72	0.42	2.5	3.4

表 4 落叶松木的力学性能
Tab.4 Mechanical properties of larch

类别	E/GPa	G/GPa	μ	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
顺纹	17.06	0.67	0.335	622
横向径纹	1.42	1.17	0.490	
横向弦纹	0.68	0.066	0.0296	

2.3 初始条件和接触设置

运输容器跌落试验中规定，事故条件下容器从 9 m 高自由跌落，落地速度 (v_0) 为 13.3 m/s。跌落角度选择底角冲击，容器重心与底角的连线垂直于地面，容器轴线与地面间夹角为 66.4° ，见图 3。容器中各部件采用面对面接触来模拟其真实连接关系，文中讨论容器动力响应涉及到的 2 个关键接触点见图 4。接触点 1 位于防护罩容器外壳与地面的接触处；接触点 2 位于屏蔽源容器外壳且与防护罩内壳接触处。

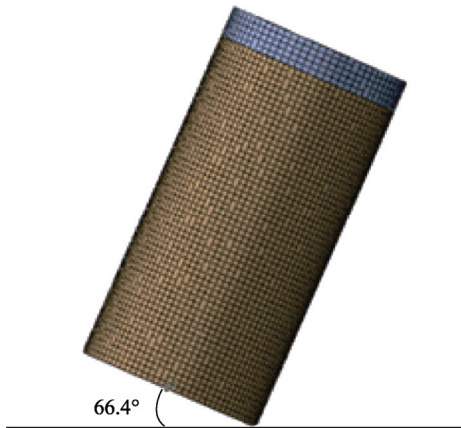


图 3 容器底角冲击刚性地面的计算模型
Fig.3 Computation model of with container bottom angle impacting the rigid ground

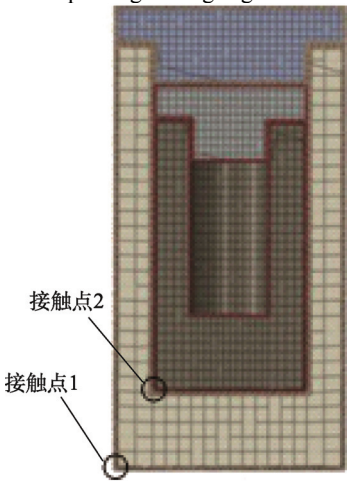


图 4 关键位置
Fig.4 The key location

3 计算结果与分析

采用动态显式算法对原型和缩比模型进行底角跌落冲击计算，重点分析 2 个模型与刚性地面的接触力以及关键位置的应力、应变和加速度之间的相似关系。

3.1 模型验证

为了保证计算结果的准确性，给出了原型和缩比模型在跌落冲击过程中系统的能量变化曲线，见图 5。

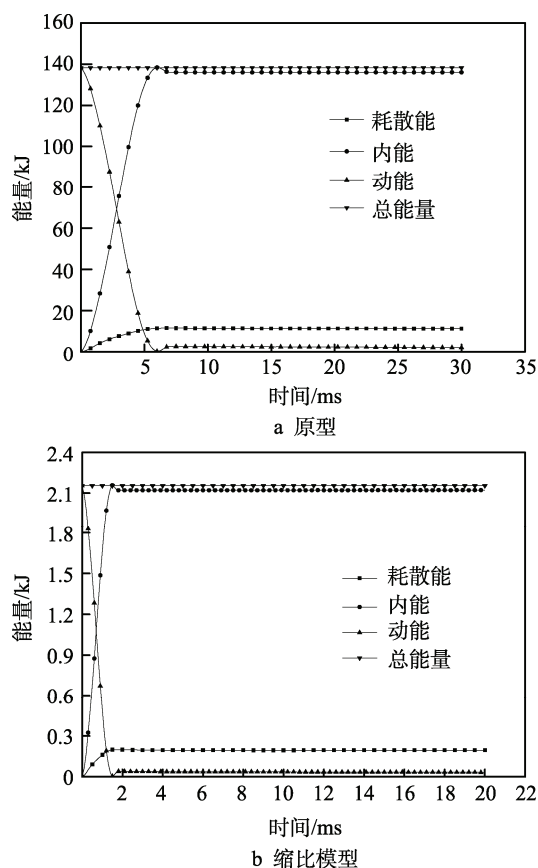


图5 系统能量时程曲线

Fig.5 Energy history curves of the system

可以看出,两模型的系统总能量始终保持守恒,耗散能占总能量的比例小于10%,验证了计算模型的可靠性。

3.2 响应变量分析

两模型分别与刚性地面之间接触力的时程曲线见图6。由图6可以看出,跌落试验中缩比模型接触力在1.4 ms时达到峰值,为306.9 N。原型的接触力在5.6 ms时达到峰值,为4951.7 N。缩比模型和原型完全脱离地面的时间分别为1.8和7.2 ms。缩比模型接触力峰值为原型的1/16,碰撞持续时间和总时间为

原模型的1/4。该结果与相似准则 $\Pi_7 = \frac{P}{E}$, $\Pi_8 = \frac{v_0 T_0}{\lambda}$, $\Pi_9 = \frac{tv_0}{\lambda}$ 吻合。

两模型接触点1与接触点2的应力时程曲线见图7。由图7可知,原型接触点1的应力在6 ms时达到峰值,为725 MPa,7.2 ms时为197 MPa。缩比模型接触点1的应力在1.5 ms时达到峰值,为732 MPa,在1.8 ms时为198 MPa。原型接触点2的应力在5.65 ms时达到峰值,为260 MPa,7.1 ms时为102 MPa。缩比模型接触点2的应力在1.4 ms时达到峰值,为270 MPa,在1.8 ms时为103 MPa。由此,缩比模型与原型接触点的应力相同,与相似准则 $\Pi_{13} = \frac{\sigma_{i,j}}{E}$ 相一致。

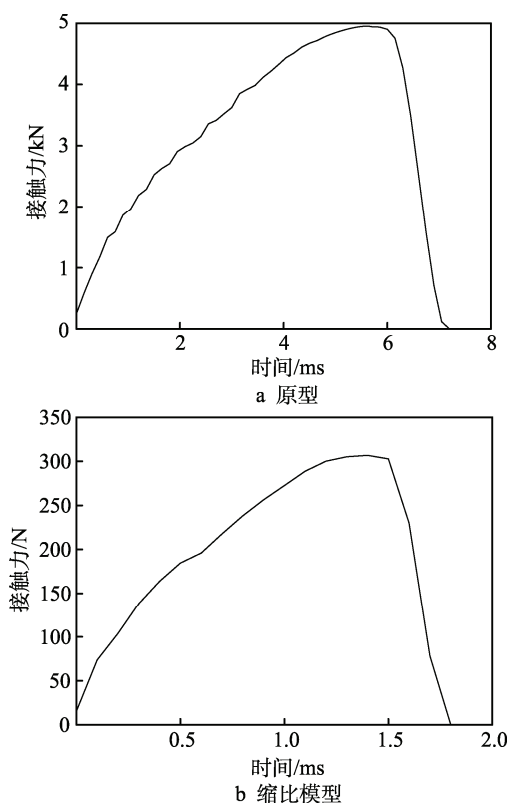


图6 接触力时程曲线

Fig.6 Contact force history curves

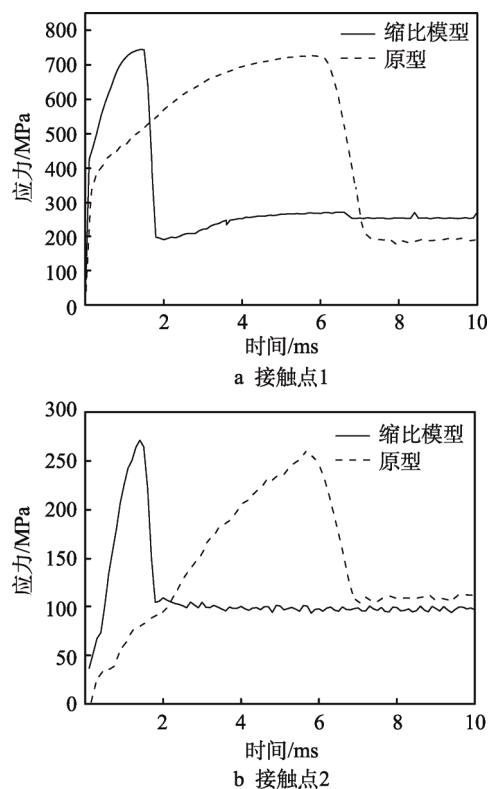


图7 两模型不同接触点的应力时程曲线

Fig.7 Stress history curves of different contact points for two models

两模型接触点 1 与接触点 2 的应变时程曲线见图 8。由图 8 可知, 原型接触点 1 在 5.2 ms 时应变为 0.195。缩比模型在 1.3 ms 时应变为 0.202。两模型接触点 2 的应变分别在 13.0 和 5.2 ms 时达到最大值, 为 0.000 55。由此, 两模型具有相同的应变, 与相似准则 $\Pi_{14} = \varepsilon_{i,j}$ 吻合。

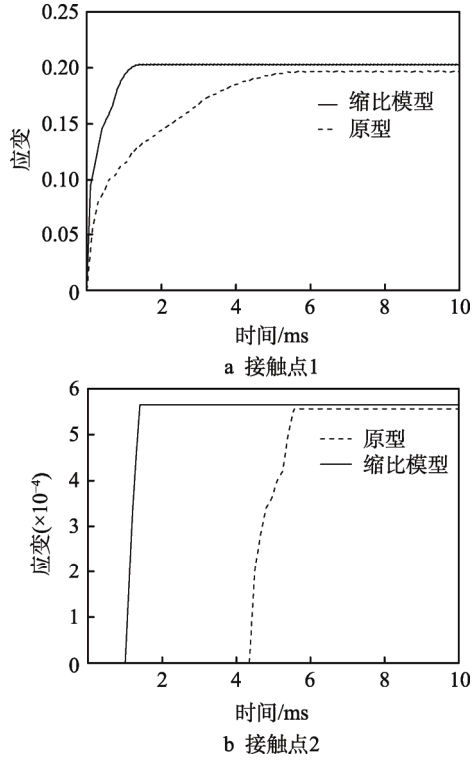


图 8 两模型不同接触点的应变时程曲线
Fig.8 Strain history curves of different contact points for two models

两模型不同接触点的加速度时程曲线见图 9。由图 9 可知, 缩比模型接触点 1 的最大加速度为 165.03 m/s^2 , 原型的最大加速度为 41.26 m/s^2 , 是缩比模型的 1/4。缩比模型接触点 2 的最大加速度为 245.07 m/s^2 , 原型的最大加速度为 73.84 m/s^2 , 略大于缩比模型的 1/4, 这是由于加速度在计算中受接触条件设置影响较大, 因此存在一定误差。根据相似准则 $\Pi_8 = \frac{v_0 T_0}{\lambda}$, $\Pi_9 = \frac{tv_0}{\lambda}$, $\Pi_{10} = \frac{v_i}{v_0}$ 可知, 缩比模型的加速度约为原型的 M (M 大于 1) 倍, 与模拟结果基本一致。

两模型不同接触点的位移时程曲线见图 10。由图 10 可知, 缩比模型接触点 1 的最大位移为 2.53 mm, 原型的最大位移为 10.49 mm, 是缩比模型的 4 倍; 模型接触点 2 的最大位移为 4.26 mm, 原型的最大位移为 16.77 mm, 是缩比模型的 4 倍。根据相似准则 $\Pi_{11} = \frac{\delta_{i,j}}{\lambda}$, 缩比模型的位移约为原模型的 $1/M$ 倍。

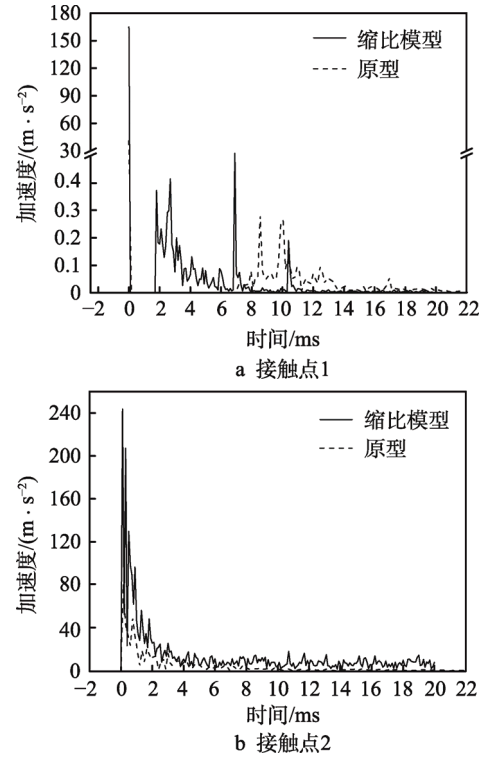


图 9 两模型不同接触点加速度时程曲线
Fig.9 Acceleration history curves of different contact points for two models

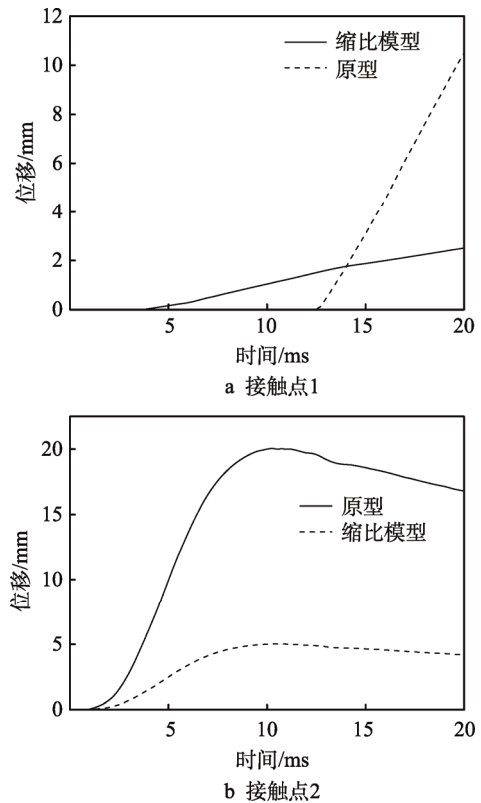


图 10 两模型不同接触点位移时程曲线
Fig.10 Displacement history curves of different contact points for two models

4 结语

如需使放射性物质运输容器的缩比模型试验与比例定律相符合,原型与 1/4 缩比模型必须满足以下条件:具有精确的几何相似性,相同的碰撞角度、碰撞速度、材料、温度、热分布系数、阻尼系数以及摩擦因数。一定缩比范围内,缩比模型和原型试验模拟得到的应力、应变、加速度、接触力和位移均符合比例相似定律。

文中仅考虑一种缩比模型,下一步将考虑更多的缩小比例,以期确定最小的比例模型,对节约更多成本具有更重要的意义。另外,考虑应变率效应,材料的力学参数将发生相应的变化,对缩比模型模拟结果将会产生一些影响,需对相似准则进行修正,这也是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 张雷,赵兵,王学新,等.放射性物质运输货包试验工作进展[J].辐射防护通讯,2010,30(6):1—6.
ZHANG Lei, ZHAO Bing, WANG Xue-xin, et al. Progress in Demonstration Test for Radioactive Material Transport Packages[J]. Radiation Protection Bulletin, 2010, 30(6): 1—6.
- [2] GB/T 11806—2004, 放射性物质安全运输规程[S].
GB/T 11806—2004, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[S].
- [3] 苏步云,李志强,王志华,等.放射性运输容器跌落冲击不同路面的动态响应研究[C]//全国冲击动力学学术会议,2013.
SU Bu-yun, LI Zhi-qiang, WANG Zhi-hua, et al. Investigation on Dynamic Response of Radioactive Transport Container Dropping on the Different Road[C]// National Symposium on Impact Dynamics, 2013.
- [4] DROSTE B. Testing of Type B Packages in Germany to Environments beyond Regulatory Test Standards[J]. Packaging Transport Storage & Security of Radioactive Material, 2013, 18(2): 73—85.
- [5] SEO K S. Free Drop for Castor/kn-12 Radioactive Material Transportation Cask[J]. International Journal of Radioactive Materials Transport, 2003, 14(2): 122.
- [6] LI Guo-qiang, ZHANG Jian-gang, ZHAO Bing, et al. Test of Type FCo70-YQ Transport Container for Medical Radioactive Source in CIRP[C]// Progress in Nuclear Science and Technology, 2011.
- [7] ZHANG Jian-gang, LI Guo-qiang, ZHAO Bing, et al. Safety Test for Radioactive Material Transport Packages in CIRP[C]// Proceedings of the 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, 2013.
- [8] 周玉清. RY-I 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-I Type Spent Fuel Container[J]. Radiation Protection Bulletin, 1991(5): 51—58.
- [9] 李国强,张建岗,赵兵,等. FCo70-YQ 型放射源运输容器耐热试验[J]. 辐射防护, 2009(5): 352—355.
LI Guo-qiang, ZHANG Jian-gang, ZHAO Bing, et al. Thermal Test of FCo70-YQ Container for Radioactive Sources Transport[J]. Radiation Protection Bulletin, 2009(5): 352—355.
- [10] 李国强,赵兵,张建岗,等.放射性物质运输货包安全试验[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(S): 668—670.
LI Guo-qiang, ZHAO Bing, ZHANG Jian-gang, et al. Test for Radioactive Material Transport Package Safety[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(S): 668—670.
- [11] 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 Zi-qiang, LI Guo-qiang, SU Bu-yun, et al. Numerical Simulation of the Impact Test under the Condition of the Accident of Transporting Cargo Bags by Industrial Irradiated Sources[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(2): 247—252.
- [12] 谈庆明. 量纲分析[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2005.
TAN Qing-ming. Dimensional Analysis[M]. Beijing: Press of University of Science and Technology of China, 2005.
- [13] 李之光. 相似与模化(理论及应用)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
LI Zhi-guang. Similarity and Modeling (Theory and Application)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982.
- [14] ST IAEA. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[J]. American Journal of Public Health & the Nation, 1998, 13(3): 26.
- [15] 庞百鸣,许少普,唐郑磊,等. 160 mm 特厚低温压力容器钢 16MnDR 的工艺与组织性能研究[J]. 金属材料与冶金工程, 2013, 41(2): 7—10.
PANG Bai-ming, XU Shao-pu, TANG Zheng-lei, et al. Research on the Process and Structure Property of 160 mm Super Thick 16MnDR Steel for Low Temperature Pressure Vessel[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2013, 41(2): 7—10.