

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.01.017



# 落锤冲击气囊施加均布动荷载的试验方法

潘腾, 陈力, 方秦

(解放军理工大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 南京 210007)

**摘要:**在结构构件上施加均布冲击(爆炸)荷载一直是动力试验领域的难题。提出了一种落锤冲击气囊施加均布动荷载的试验装置,和一个双自由度弹簧阻尼冲击加载简化分析模型;给出了该模型的基本力学方程、边界条件和求解方法,并进行了有限元验证;建立了所提出冲击加载试验装置的精细化有限元模型,分析了构件上各受荷区域的荷载均布情况,验证了所提出装置的可行性。基于所建立的简化分析模型,讨论了刚度、荷载作用时间和阻尼比等关键参数,对构件上动荷载的影响,并给出了基本规律。计算结果表明,在选定合适的参数后,落锤冲击气囊试验装置能够较好地模拟构件上的均布动荷载,为实验室中进行爆炸冲击试验提供了一种可能。

**关键词:**冲击;气囊;均布动荷载;爆炸荷载

**中图分类号:**TU317      **文献标志码:**A      **文章编号:**1674-4764(2016)01-0122-07

## Experimental method of imposing uniform dynamic loads by impacting an airbag with the drop hammer

*Pan Teng, Chen Li, Fang Qin*

(State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact,  
PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, P. R. China)

**Abstract:** It is very difficult to apply a uniform impact (explosion) loads on the structural member in the laboratory. We presented an innovative loading apparatus using a drop hammer impacting on the airbag to simulate the uniform loads, and proposed a two-DOF (degree-of-freedom) analytical model. The fundamental mechanical equation, boundary conditions and solution method were given and verified. A fine finite element model was established and the loading effects on the divided area were compared to verify the feasibility of presented apparatus. Some key factors of the dynamic loads were also discussed, including stiffness, load duration and damping ratio. The results show that the presented apparatus can be applied to simulate the uniform dynamic loads with choosing parameters, which provides a possibility for experiments simulating blast loading in the laboratory.

**Keywords:** impact; airbag; uniform dynamic loads; explosion load

**收稿日期:**2015-09-20

**基金项目:**国家自然科学基金(51378016,51508565)。

**作者简介:**潘腾(1990-),男,主要从事结构试验方法研究,(E-mail)panteng1022@163.com。

陈力(通信作者),男,博士,副教授,(E-mail)chenli1360@qq.com。

**Received:**2015-09-20

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51378016,51508565)

**Author brief:** Pan Teng (1990-), main research interest: structure testing method, (E-mail)panteng1022@163.com.

Chen Li (corresponding author), PhD, associate professor, (E-mail)chenli1360@qq.com.

燃气爆炸、恐怖袭击等偶然性爆炸灾害频繁发生,常常造成工程结构损伤破坏,乃至坍塌。因此,结构构件在爆炸荷载作用下的动力响应一直是学术界的研究热点<sup>[1-4]</sup>。在常见比例爆距范围,通常认为构件上的爆炸荷载是均布动荷载<sup>[1]</sup>,而野外爆炸试验又有难度大、费用高的不足,所以人们一直致力于寻找一种在实验室范围内模拟结构上均布动荷载(爆炸)的试验方法。

目前,实验室模拟冲击(爆炸)动荷载的装置主要有:模爆器、爆坑、轻气炮,SHPB 和落锤等。模爆器和爆坑试验费用高、危险性大、试验条件苛刻,所需炸药不易获得,且荷载持续时间长于实际情况。落锤虽然在荷载作用时间和量级上接近爆炸,但是无法实现均布加载。SHPB 和轻气炮的试验只能针对材料,无法对结构构件施加荷载。由于气囊刚度低,把气囊作为分配力媒介能够很好地解决构件变形后的荷载均布问题。Wang 等<sup>[5]</sup>将作动器作用于钢板约束气囊,实现了水箱上壁的均布静力加载;陈帅等<sup>[6]</sup>通过理论分析,证明了气囊能较好地对机翼施加均布荷载;王琦等<sup>[7-8]</sup>则通过液压油缸及柔性橡胶研制出一种柔性均布压力加载装置,真实模拟了深部岩土应力边界条件。课题组<sup>[9]</sup>在前期工作中亦研制了一种适用于梁、柱构件的气囊均布加载拟静力试验装置。Chen 等<sup>[10]</sup>采用摆锤撞击约束气囊,首次实现了对双层多拱板施加均布动荷载,但是其对加载效果没有进行评估。

综上所述,气囊加载方法目前主要应用于结构构件的拟静力加载,对于冲击动载下的研究较少,其适用条件和关键影响因素也尚待进一步研究。本文结合落锤试验和气囊加载技术,提出了一种落锤冲击气囊模拟结构上均布动荷载的试验装置,给出了相应的简化理论分析模型,系统验证了冲击气囊均布加载装置的可行性。

## 1 试验装置和方法

本文建立的落锤冲击气囊试验装置主要由落锤冲击加载系统、钢质分配梁、气囊、支座和 PC 板气囊挡板组成。如图 1 所示,该加载系统通过落锤冲击产生压力作用于大刚度钢质分配梁上,继而钢质分配梁传递力给气囊,气囊再将力均布分配与梁试件上,从而实现均布加载的目的。具体传力路径为:落锤-钢质分配梁-气囊-试件。系统采用透明高强 PC 板作为气囊均布加载系统的围护装置,能够实现

构件破坏形态的实时观测并保证安全。

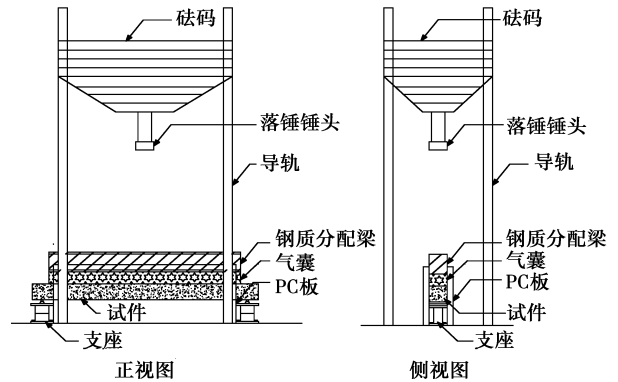


图 1 落锤冲击气囊均布动荷载加载装置  
Fig. 1 Drop hammer impacting airbag uniform dynamic loading apparatus

## 2 双自由度弹簧阻尼冲击加载分析模型

### 2.1 理论分析模型

本试验装置中,由于钢质分配梁抗弯刚度较大,冲击过程中可近似认为整体无变形,各点位移随时间同时变化,可用  $x(t)$  来表示。根据爆炸荷载作用下梁的等效单自由度 SDOF (single degree-of-freedom) 模型理论<sup>[11]</sup>,由于气囊底部能够在试验过程中贴合试验梁上表面发生协调变形,因此,也可将气囊同样简化为一个等效单自由度来进行动力响应分析,参考点选为梁上表面跨中点,用位移  $y(t)$  表示。因此,落锤冲击气囊施加均布动荷载试验装置可简化为一个双自由度弹簧阻尼冲击加载分析模型,如图 2 所示,其中  $m$ 、 $k$ 、 $c$  分别表示质量、刚度和阻尼, $x(t)$  和  $y(t)$  分别表示质体 1 和质体 2 的位移, $F(t)$  为落锤荷载,下标 1、2 分别表示钢质分配梁和气囊。

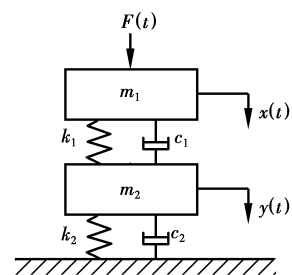


图 2 双自由度弹簧阻尼冲击加载分析模型  
Fig. 2 Two-DOF-Spring-Mass-Dashpot impact loading analytical model

根据结构动力学相关理论<sup>[12]</sup>,冲击外荷载  $F(t)$

作用下该等效双自由度体系的基本动力学方程为

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式中： $\mathbf{M}$  为等效质量矩阵， $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} =$

$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$ ， $m_{ij}$  为质量影响系数，表示由  $j$  坐标单位

质量所引起的对应于  $i$  坐标的力； $\mathbf{C}$  为等效阻尼矩

阵， $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 + c_2 \end{bmatrix}$ ， $c_{ij}$  为阻尼影

响系数，表示  $j$  坐标单位速度所引起的对应于  $i$  坐

标的力； $\mathbf{K}$  为等效刚度矩阵， $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} =$

$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{bmatrix}$ ， $k_{ij}$  为刚度影响系数，表示由  $j$  坐

标单位位移所引起的对应于  $i$  坐标的力； $\mathbf{U}$  为随时间

变化的位移向量， $\mathbf{U} = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix}$ ， $x(t)$ 、 $y(t)$  分别为

钢质分配梁、气囊随时间变化的位移。 $\mathbf{F}(t)$  是随时间

变化的荷载向量， $\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{bmatrix}$ ， $F_1(t)$ 、 $F_2(t)$

分别为作用在钢质分配梁、气囊的外力。本理论模型为重锤冲击钢质分配梁，因此  $F_2(t) = 0$ ，所以

$\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ 0 \end{bmatrix}$ 。如果不考虑阻尼，即阻尼  $c_1 =$

$c_2 = 0$ ，则基本动力学方程式(1)可进一步简化为

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}(t) \quad (2)$$

由于试验模型的初始状态是静止的，所以边界条件中钢质分配梁和气囊的初始速度、初始位移均为 0，将  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{C}$  的相关表达式代入方程(1)进行求解，可求出  $x(t)$ 、 $y(t)$  的解析解。

### 2.2 理论模型求解方法的验证

为验证简化理论模型和求解方法的正确性，使用 ABAQUS 软件 Spring/Dashpot 功能，建立了双自由度弹簧阻尼冲击系统的有限元模型<sup>[13]</sup>，如图 3 所示。

钢质分配梁质量  $m_1 = 300 \text{ kg}$ ，弹性模量  $E_1 = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，顶面面积  $A_1 = 0.5 \text{ m}^2$ ，受压方向集合长度  $l_1 = 0.2 \text{ m}$ ，得刚度  $k_1 = 5.25 \times 10^{11} \text{ N/m}$ ；气囊质量  $m_2 = 50 \text{ kg}$ ，橡胶气囊材料参数  $C_{10}$ 、 $C_{01}$  分别为  $3\ 200 \text{ MPa}$ 、 $800 \text{ MPa}$ <sup>[14]</sup>；由剪切模量  $\mu = E_2/3 = 2(C_{10} + C_{01})$ ，得气囊弹性模量  $E = 6(C_{10} + C_{01}) = 2.4 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ；接触面积  $A_2 = 0.5 \text{ m}^2$ ， $l_2 = 0.1 \text{ m}$ ，

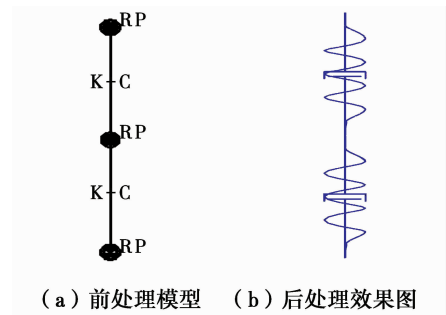


图 3 双自由度弹簧阻尼冲击加载分析模型有限元模型  
Fig. 3 Finite element model of two-DOF-Spring-Mass-Dashpot impact loading analytical model

气囊刚度  $k_2 = 1.2 \times 10^9 \text{ N/m}$ ；冲击力取  $F(t) = 500\ 000(1 - 100t)$ 。暂不考虑阻尼。求解微分方程组和 ABAQUS 有限元计算比较结果如图 4 所示。

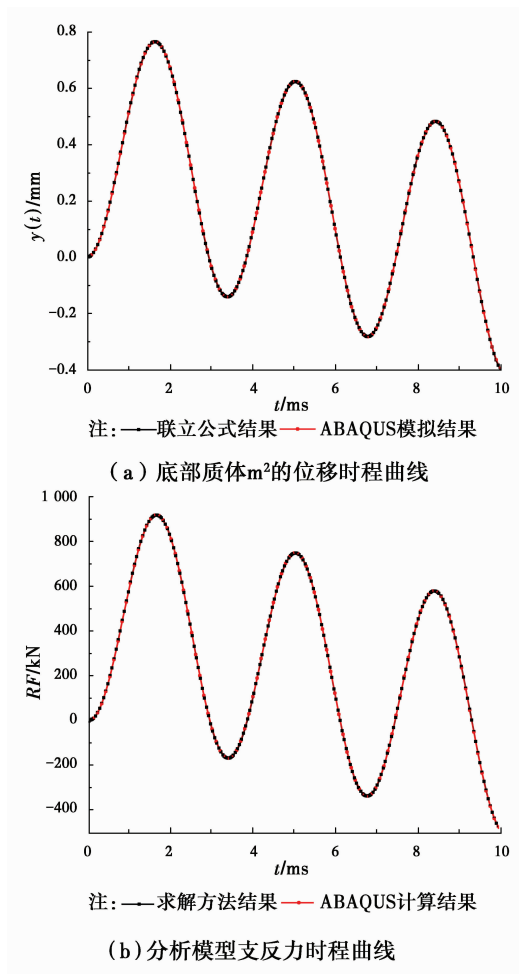


图 4 无阻尼情况下位移和支反力时程曲线  
Fig. 4 The  $y(t)$ -time curve and RF-time curve without dashpot

从图 4 可以看出，基本力学方程求出的解与 ABAQUS 结果完全重合，证明了基本力学方程和求解方法的正确性。

### 3 关键影响参数讨论

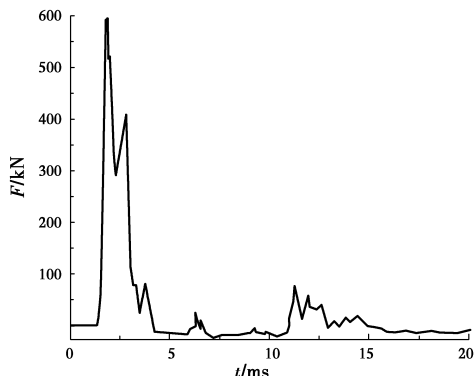
本文提出落锤冲击气囊试验装置的目的是尽可能模拟冲击、爆炸等均布动荷载。对于双自由度弹簧阻尼冲击加载分析模型来说,对构件施加的荷载就是简化分析模型的支反力  $RF(t)$ ,由于爆炸冲击荷载作用时间短,升压时间快,荷载峰值大,因此,亟需对支反力  $RF(t)$  的荷载特点进行评估。冲击荷载持续时间很短,一般情况下阻尼力还来不及吸收太多能量结构就达到了最大变形<sup>[15]</sup>,所以本文主要考虑冲击荷载下体系的无阻尼反应,而对于模拟冲击动荷载,仅仅需峰值响应时,例如最大荷载峰值时,可以忽略高阶振型的影响,只考虑低阶阵型。本文选取最低频率  $\omega_1$  对应的第一阵型的周期作为双自由度弹簧阻尼冲击加载分析模型的周期  $T$ 。

双自由度弹簧阻尼冲击加载分析模型可以通过质量和刚度正交条件解耦为两个独立的单自由度方程,并可分别求出模型内两质体的位移  $x(t)$ 、 $y(t)$ ,而支反力  $RF(t) = k_2 \cdot y(t)$ ,即支反力只与气囊位移  $y(t)$  以及其刚度  $k_2$  有关,所以,支反力问题是个单自由度相关问题。

落锤荷载可等效为三角形脉冲荷载,如图5所示<sup>[16]</sup>。可表示为

$$F(t) = \begin{cases} P_0(1 - \frac{t}{t_1}) & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & t \geq t_1 \end{cases} \quad (3)$$

其中: $t$  为时间, $t_1$  为荷载作用时间, $P_0$  为三角形脉冲荷载的初始大小。



注:— 冲击力

图5 落锤试验冲击力时程曲线

Fig. 5 The F-time curve of the drop hammer test

对于单自由度体系,无阻尼系统的运动方程为

$$m_1 \ddot{v}(t) + kv(t) = P_0 \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) (0 \leq t \leq t_1) \quad (4)$$

反应可以分为两个阶段:第1阶段相当于荷载

作用期间内的受迫振动,第2阶段是第1阶段结束后的自由振动。阶段I:方程的解  $v(t)$  包括自由振动通解  $v_c(t)$  和依赖于动力荷载形势的特解  $v_p(t)$ ,即  $v(t) = v_c(t) + v_p(t)$ 。

由结构动力学相关理论知,方程的解可设为

$$v(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t + \frac{P_0}{k} (1 - \alpha) \quad (5a)$$

其中未知数 A、B 取决于反应的初始条件。对于由静止开始运动的体系,也即初始条件为时,易求得

$$A = -\frac{P_0}{k}, B = \frac{P_0}{k t_1 \omega} = \frac{P_0}{2\pi k \frac{t_1}{T}}, \text{因此得}$$

$$y(t) = \frac{P_0}{k} \left( \frac{1}{t_1 \omega} \sin \omega t - \cos \omega t + 1 - \frac{t}{t_1} \right) \quad (5b)$$

所以支反力

$$RF(t) = k y_2(t) = P_0 \left( \frac{1}{t_1 \omega} \sin \omega t - \cos \omega t + 1 - \frac{t}{t_1} \right) \quad (6)$$

令  $\frac{dRF(t)}{dt} = 0$  可求得  $t = t_m$  时  $RF(t)$  取最大值,即  $RF_{\max} = RF(t_m)$ 。

$$RF(t_m) = P_0 \left( \frac{1}{\omega t_1} \sin \omega t_m - \cos \omega t_m + 1 - \frac{t_m}{t_1} \right) \quad (7a)$$

化简得

$$RF(t_m) = P_0 \left( 1 - \frac{1}{\omega t_1} \tan^{-1} \omega t_1 \right) \quad (7b)$$

式(7b)的适用条件为  $\omega t_1 \geq \frac{3}{4}\pi = 2.356$ ,即

$$t_1 \geq \frac{3T}{8} (T \text{ 为结构的自振周期})。$$

模拟爆炸冲击均布动荷载主要关注两个方面,一是动荷载升压时间及动荷载全周期时间,二是动荷载的峰值,以下将对这两个方面进行探讨,对于双自由度弹簧阻尼冲击系统的有限元模型,动荷载即为支反力  $RF(t)$ ,故可以通过研究支反力来得出影响冲击动荷载的影响因素。

1) 动荷载升压时间和荷载全周期的影响因素:由式(6)可知,结构的固有频率  $\omega$  为影响支反力周期的主要因素。本文取第一阵型对应的最小频率  $W_{\min}$  为固有频率,由  $W^2 = \frac{k}{m}$ ,可以通过增大结构刚度或减少结构质量达到使  $\omega$  增大的效果使支反力的升压时间和荷载全周期时间减小。

2) 支反力峰值的影响因素:由式(7b)可知,支反力的影响因素主要为结构的固有频率  $W$ 、荷载作用时间  $t_1$  以及脉冲荷载的初始大小  $P_0$ 。可以通过增

大结构刚度或减少结构质量达到使  $W$  增大的效果、通过增大荷载作用时间  $t_1$  以及增大脉冲荷载的初始大小  $P_0$  使支反力的峰值增大。

通过双自由度弹簧阻尼冲击加载分析模型,基于 ABAQUS 有限元软件 Spring/Dashpot 功能来验证影响支反力的关键参数。

从图 6 可以看出,荷载作用时间越长,升压时间变化不大,且支反力峰值越高;从图 7 可以看出,气囊刚度在  $1.2 \times 10^7 \sim 1.2 \times 10^9 \text{ N/m}$  范围内,刚度越大,升压时间越短,峰值越大;而当气囊刚度处于  $1.2 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^7 \text{ N/m}$  范围时,升压时间大体相同,峰值变化大,但是不明显,因为与钢质分配梁的刚度相比,气囊刚度太小,对支反力的升压时间和峰值影响很小。

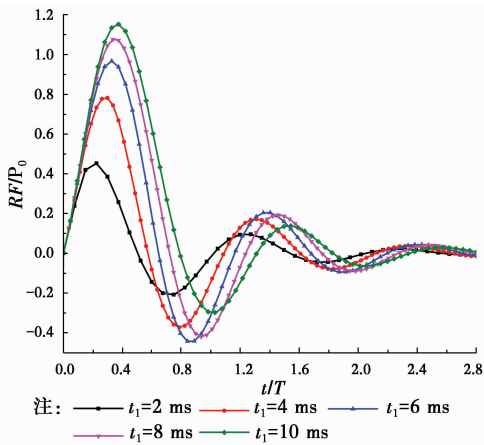


图 6 不同荷载作用时间下系统的支反力时程曲线 (气囊刚度为  $1.2 \times 10^8 \text{ N/m}$ , 周期  $T=10.7 \text{ ms}$ )

Fig. 6 The RF-time curve under the condition of different load duration (the stiffness of the airbag is  $1.2 \times 10^8 \text{ N/m}$  and the period is  $10.7 \text{ ms}$ )

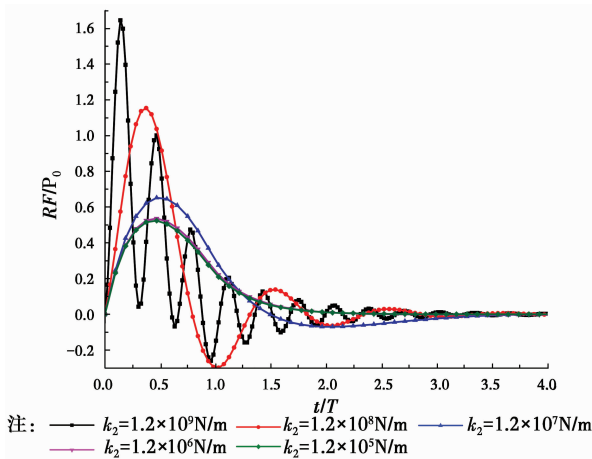


图 7 不同气囊刚度时系统的支反力时程曲线 (荷载作用时间为  $10 \text{ ms}$ , 周期  $T=10.7 \text{ ms}$ )

Fig. 7 The RF-time curve under the condition of stiffness of airbag (the load duration is  $10 \text{ ms}$  and the period is  $10.7 \text{ ms}$ )

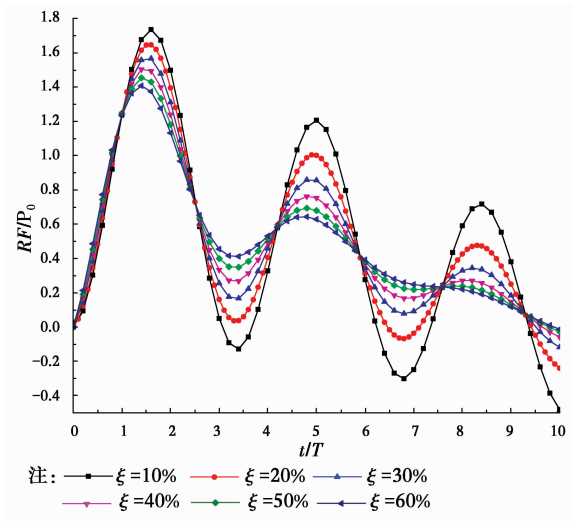


图 8 不同气囊阻尼比时系统的支反力时程曲线 (气囊刚度为  $1.2 \times 10^9 \text{ N/m}$ , 周期  $T=3.4 \text{ ms}$ )

Fig. 8 The RF-time curve under the condition of damping ratio (the stiffness of the airbag is  $1.2 \times 10^9 \text{ N/m}$  and the duration is  $3.4 \text{ ms}$ )

同时,本文还考虑了气囊阻尼比对支反力的影响,从图 8 可以看出,阻尼比主要影响荷载的峰值,阻尼比越大,荷载峰值越小,但是阻尼比太小时支反力曲线会出现明显的震荡线性,这对模拟爆炸冲击均布动荷载是不利的。

综上所述,比较发现,升压时间  $t_1$  取  $2 \text{ ms}$ 、气囊刚度取  $1.2 \times 10^8 \text{ N/m}$ 、阻尼比取  $30\%$  时能较好地兼顾升压时间和峰值两个影响因素,且能全周期震荡较少,与爆炸荷载模拟较好。

### 4 荷载均布情况分析

#### 4.1 有限元模型的建立

采用气囊加载的目的是施加结构所需的均布动荷载,因此,必须对这种加载方式产生的荷载均布情况进行评估。基于 ABAQUS 软件平台建立了该试验装置的精细化有限元模型,如图 9 所示。

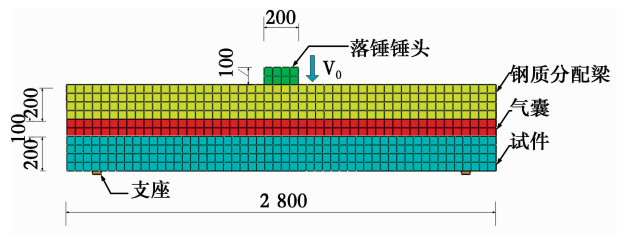


图 9 试验装置有限元模型

Fig. 9 Finite element model of test apparatus

气囊内部设置为空腔,通用气体常数 (Universal

gas constant)为 8.314。采用关键字 \* Fluid cavity 描述空腔,特定环境压力 (Specify ambient pressure)为 101.36 kPa,理想气体分子量(Ideal gas molecular weight)为 0.044。通过在气囊四周施加法向位移约束来模拟气囊四周的 PC 板围护。为准确模拟梁构件的简支约束条件,分别在两端设置小垫块。采用通用接触关键字 \* General Contact 来模拟重锤与钢质分配梁、钢质分配梁与气囊、构件与支座垫块之间的接触;采用通用关键字 \* Tie 来模拟气囊与构件的贴合。

为简化计算,本文近似将锤头放置于大刚度钢质分配梁顶部,并给定个初速度  $v_0$  来模拟落锤下落冲击过程;通过 ABAQUS/Explicit 求解器求解。气囊壳体采用四节点缩减积分壳单元 S4R 离散,其余组成部分采用三维八节点缩减积分单元 C3D8R 离散,单元尺寸大小均为 50 mm。

#### 4.2 计算结果验证

采用气囊加载的目的是施加结构所需的均布动荷载。因此,将受荷构件上表面划分为 8 个区域,通过比较各区域荷载时程曲线来验证荷载均布情况,如图 10 所示。根据对称性,图 11 为落锤冲击初速度 15 m/s 时,试验梁上表面区域 1~4 上的荷载时程曲线。图 12 为 2 ms 时刻,试件上的 Mises 应力分布云图。

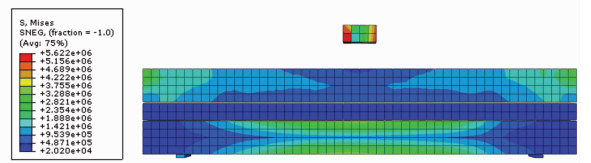


图 12 试件的 Mises 应力分布云图 ( $t=20\text{ ms}$ )

Fig. 12 Mises stress of the test of the test apparatus

从图 11 可以看出,区域 2~4 上的荷载时程曲线吻合较好,说明区域 2~4 荷载均布情况较好。区域 1 的荷载与区域 2~4 相差较大,其主要原因是,随着落锤冲击力的传递,区域 2~4 所在的试验梁会发生挠曲,而区域 1 受支座限制,不能变形,所以受荷较其余区域大得多。模拟结果表明,支座之间区域的所受动荷载是均匀的,本文提出的落锤冲击气囊试验装置能较好地对构件施加均布动荷载。

### 5 结 论

本文提出了一种落锤冲击气囊施加均布动荷载的试验装置,建立了相应的双自由度弹簧阻尼冲击加载理论分析模型,给出了基本动力方程和求解方法,并进行了有限元验证。讨论了刚度、荷载作用时间和阻尼比等关键参数对构件上动荷载时程曲线的影响。建立了落锤冲击气囊施加均布动荷载试验装置的精细化有限元模型,对构件表面受荷均布情况进行了讨论。

1)等效双自由度弹簧阻尼冲击加载分析模型的计算结果表明,刚度、荷载作用时间和阻尼比等是影响构件上动荷载时程曲线的关键参数。在一定范围内,支反力升压时间随刚度的增大而缩短,而其峰值变大。荷载作用时间越长,升压时间越长,且支反力峰值越高。阻尼比越大,支反力峰值越小。

2)落锤冲击气囊试验装置能较好地对支座内试件区域施加均布动荷载,但在支座附近的荷载均布效果不理想。

3)分析给出了落锤冲击气囊施加均布动荷载试验装置最佳材料参数,为实验室模拟构件爆炸冲击试验提供了一种可能。

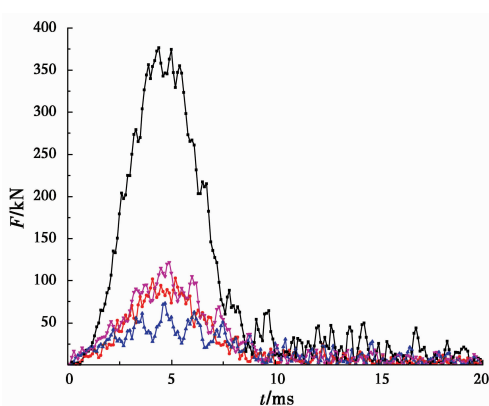
#### 参考文献:

[1] 方秦,柳锦春,张亚栋,等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁破坏形态有限元分析[J]. 工程力学,2001,18(2): 1-8.  
Fang Q, Liu J C, Zhang Y D, et al. Finite element



图 10 受力表面区域划分示意图

Fig. 10 Schematic diagram of divide of the loading area



注: — 区域1 — 区域2 — 区域3 — 区域4

图 11 受力表面不同区域的荷载时程曲线

Fig. 11 F-time of different of the loading area

- analysis of failure modes of blast-loaded R/C beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(2): 1-8. (in Chinese)
- [2] 师燕超, 李忠献. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的动力响应与破坏模式[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(4): 112-117.  
Shi Y C, Li Z X. Dynamic responses and failure modes of RC columns under blast load [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(4): 112-117. (in Chinese)
- [3] 阎石, 张亮, 王丹, 等. 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的破坏模式分析[J]. *沈阳建筑大学学报*, 2005, 21(3): 177-180.  
Yan S, Zhang L, Wang D, et al. Failure mode analysis for RC slab under explosive loads [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University*, 2005, 21(3): 177-180. (in Chinese)
- [4] 王礼立. 爆炸与冲击荷载下结构和材料动态响应研究的新进展[J]. *爆炸与冲击*, 2001, 21(2): 81-88.  
Wang L L. Progress in studies on dynamic response of structures and materials under explosive/impact load [J]. *Explosive and Shock Waves*, 2001, 21(2): 81-88. (in Chinese)
- [5] Wang Y H, Liew J Y R, Lee S C. Performance of water tank under static and dynamic pressure loads [C]// 6th International Conference on Protection of Structures against Hazard, Tianjin, 2014: 588-597.
- [6] 陈帅, 杨智春, 李斌. 结构试验中均布荷载的气囊加载系统设计方法[J]. *工程力学*, 2012, 29(6): 146-150.  
Chen S, Yang Z C, Li B. Design method of uniform loading system using airbags in structure test [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(6): 146-150. (in Chinese)
- [7] 王琦, 王汉鹏, 李术才, 等. 柔性均布压力加载装置的研制及试验分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(1): 133-139.  
Wang Q, Wang H P, Li S C, et al. Development and test analysis of flexible uniform pressure loading device [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(1): 133-139. (in Chinese)
- [8] 李术才, 王琦, 李为腾, 等. 柔性均布压力加载装置在模型试验中的应用研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(1): 61-66.  
Li S C, Wang Q, Li W T, et al. Research on application of flexible uniform pressure loading device to model test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 61-66. (in Chinese)
- [9] 中国人民解放军理工大学. 一种拟静力试验装置[P]. 中国, 204679269U. 2015-09-30.  
PLA University of science and technology. A kind of quasi-static loading apparatus [P]. China, 20204679269U. 2015-09-30. (in Chinese)
- [10] Chen W S. Experimental and numerical studies of novel protective panels against blast and impact loadings[D]. Perth: The University of Western Australia, 2013.
- [11] 方秦, 柳锦春. 地下防护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.  
Fang Q, Liu J C. Underground defensive project[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese)
- [12] 拉夫 R, 彭津 J. 结构动力学[M]. 王光远, 译. 北京: 高等教育出版社, 2013.  
Ray C J. Structural dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013. (in Chinese)
- [13] Abaqus Inc. Abaqus Example Problems Manual[M]. USA: Abaqus Inc, 2013.
- [14] 潘腾, 陈力, 方秦, 等. 钢筋混凝土梁气囊拟静力加载数值试验分析[J]. *实验室研究与探索*, 2015.  
Pan T, Chen L, Fang Q, et al. Numerical testing analysis of quasi-static loading using airbag on reinforced concrete beam [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2015. (in Chinese)
- [15] 相恒波, 方秦, 王玮, 等. 磁流变阻尼器抗爆隔震性能数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(11): 106-111.  
Xiang H B, Fang Q, Wang W, et al. Numerical simulation on shock isolation of blast resistant structure with magneto rheological dampers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(11): 106-111. (in Chinese)
- [16] 喻忠操. 基于落锤试验机的砌体填充墙抗爆加固试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.  
Yu Z C. Study on blast resistance of reinforced masonry infill wall based on impact of drop hammer machine [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)

(编辑 胡玲)