

基于结构模态的纵向采空区群爆破动力响应

姜立春^{1,2}, 肖康², 吴爱祥³, 李令鑫²
(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 安全科学与工程研究所, 广东 广州 510640; 3. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 构建纵向采空区群离散多自由度动力响应模型, 提出基于结构模态的空区群爆破动力响应分析方法. 针对某金矿工程实例, 对该方法进行检验分析. 结果表明: 该方法计算结果可直观反映采空区群内部岩体的位移与速度响应规律, 揭示岩体爆破动力响应特性, 与数值模拟结果趋于一致; 受内部阻尼作用, 岩体作减幅振动, 振幅逐渐衰减至 0; 在爆破荷载施加位置, 岩体响应强度最大, 随着与爆破作用点之间距离增大, 响应强度呈减弱趋势. 结构模态分析方法可大幅缩短计算时间、提高计算效率, 为岩体的动力响应研究提供了一种新方法.

关 键 词: 采空区群; 结构模态; 动力响应; 模型; 爆破荷载

中图分类号: TD 853.391 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)11-1615-05

Vertical Gob Group Blasting Dynamic Response Based on Structural Modal

JIANG Li-chun^{1,2}, XIAO Kang², WU Ai-xiang³, LI Ling-xin²
(1. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Institute of Safety Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Corresponding author: WU Ai-xiang, professor, E-mail: wuaixiang@126.com)

Abstract: Discrete multi-freedom-degree dynamic response model of vertical gob group was developed. Based on structural modal, a new method analyzing gob group blasting response was presented. In combination with a typical engineering problem, verification and discussion were made for the method. Results indicate that the method can directly reflect gob group rock mass response law of displacement and velocity, and describe its blasting response characteristics. The results are in accordance with that of numerical simulation. For internal damping, rock mass vibration damping, the amplitude decays to zero gradually. Rock mass where the blasting loads act on has the strongest response strength. With an increase in the distance between rock mass and the blasting position, response strength of rock mass weakens. The method can greatly decrease computation time and increase calculation efficiency and it provides a new direction for dynamic response analysis of rock mass.

Key words: gob group; structural modal; dynamic response; model; blasting load

地下矿山多个中段相互联系的采空区形成纵向采空区群. 为了提高资源利用率, 矿山对采空区群内部顶(底)板、矿柱等残矿体进行回收. 爆破作业是矿体回收的有效手段. 频繁的爆破冲击荷载, 直接影响采空区群的稳定性, 引发大面积的次生工程地质灾害^[1-6]. 因此, 研究采空区群的爆破动力响应, 对于预防灾害事故发生具有十分重要的意义.

目前, 国内外学者对采空区爆破动力响应的研究, 主要集中在现场监测与数值模拟两方面^[1-5]. 现场监测数据可直观地反映爆破震动的危害, 但无法有效分析其动力响应特性; 数值模拟

结果可系统研究采空区动力响应,但模拟耗时长、计算效率低.因此,寻找一种既能有效研究采空区爆破动力响应,又能缩短计算时间、提高计算效率的分析方法,是国内外学者关注的焦点.

结构动力学研究系统结构对动荷载的响应,具有计算量小、计算过程简便、可靠性高等优点^[6].本文探索性提出基于结构模态分析采空区群爆破动力响应特性的方法.针对具体工程实例,建立采空区群动力响应模型,构建并求解其响应的微分方程,获取各单元空区顶(底)板、围岩的位移、速度时程曲线.利用数值模拟的结果,检验分析结果的正确性.该方法为该领域的研究提供了一条新思路.

1 动力响应模型构建

将采空区群看成一个系统,构建系统动力响应模型.由于岩体质量连续分布,不同空间位置点的位移相互独立,具有无限自由度.因此,对系统质量进行离散化处理,把岩体质量集中为有限质点,将采空区群转化为有限自由度的系统.

选用集中质量法,对 n 个采空区单元组成的纵向采空区群(图 1a)进行离散化处理^[7].分别将各单元空区顶(底)板、围岩的质量进行集中,得到相应的 $(3n-1)$ 个质点.1 个质点具有 1 个自由度,经离散化处理后,采空区群最终被转换成具有 $(3n-1)$ 个自由度的结构动力体系.

以弹簧作为反映岩体弹性变形的元件,以黏性阻尼作为反映岩体能量耗散的元件,连接各离散质点,最终形成采空区群动力响应模型(图 1b).图 1b 中: k 为弹簧的刚度; c 为黏性阻尼系数; m 为各单元采空区围岩的质量; m_1, m_2, \dots, m_{n-1} 为各单元采空区顶板的质量; $x_i = x_i(t) (i = 1, 2, \dots, 3n-1)$ 为模型广义坐标,表示第 i 个质点的位移; f_i 为第 i 个质点所受的外部作用力.

2 动力响应的微分方程

根据结构动力学理论,图 1b 的动力响应模型满足式(1)运动微分方程.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F.$$

(1)

其中: M, K, C 分别为系统的质量、刚度和阻尼矩阵,三者为 $(3n-1)$ 阶矩阵; X, \dot{X}, \ddot{X} 分别为模型各质点的位移、速度和加速度矩阵,三者为 $(3n-1) \times 1$ 矩阵; F 为系统的外部作用力矩阵.

$$F = Q + P.$$

(2)

其中: Q 为系统所受爆破力矩阵; P 为系统围岩与外部岩体之间作用的剪切力矩阵.

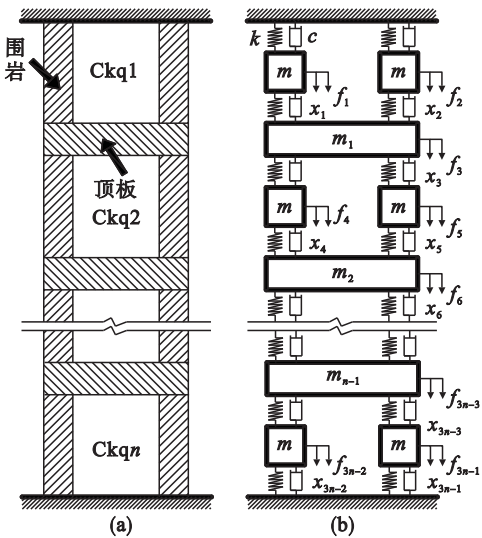


图 1 工程结构体及动力响应模型
Fig. 1 Engineering structure and dynamic response system model
(a)—结构体; (b)—动力响应模型.

运动微分方程中各参数的计算如下.

1) 质量(M)、刚度(K). 根据 Lagrange 方程,动力响应模型质量矩阵 M ,刚度矩阵 K 分别为

$$M = \text{diag}(m, m, m_1, m, m, m_2, \dots, m_{n-1}, m, m).$$

(3)

$$K = k \begin{bmatrix} 2 & 0 & -1 & & & & & & \\ 0 & 2 & -1 & & & & & & \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 & & & & \\ & & -1 & 2 & 0 & -1 & & & \\ & & -1 & 0 & 2 & -1 & & & \\ & & & -1 & -1 & 4 & & & \\ & & & & & & \ddots & & \\ & & & & & & & 4 & -1 & -1 \\ & & & & & & & -1 & 2 & 0 \\ & & & & & & & -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

(4)

其中,弹簧刚度 k 由文献[8]的方法计算求得, $k = EA/2L$. E 为岩体弹性模量, A 为单元采空区围岩的水平截面积, L 为单元采空区的高度.

2) 阻尼(C). 在岩土工程中,结构整体阻尼一般采用 Rayleigh 阻尼计算^[9],多自由度系统的阻尼矩阵 C 由刚度和质量矩阵以一定的比例组合求得.

$$C = aM + bK,$$

(5)

$$a = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i^2 - \omega_j^2}(\omega_i h_i - \omega_j h_j).$$

(6)

$$b = \frac{2(\omega_i - \omega_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2}(\omega_i h_i - \omega_j h_j) . \quad (7)$$

其中： a, b 分别表示模型质量和刚度因子； ω_i, ω_j 分别为模型第 i, j 阶主振频率； h_i, h_j 分别为模型第 i, j 阶振型阻尼比。在岩土工程中，岩体阻尼比 (h) 的取值范围为 $0 \sim 15\%$ ^[10]，这里 h 取 6% 。

3) 爆破荷载. 矿山回采残矿过程中，爆破荷载直接作用于残采矿体，大小和方向根据实际爆破情况确定；在动力响应模型中，爆破荷载合力直接作用于残采矿体的离散质点。

4) 剪切力. 受外部的强力作用，组成岩体的颗粒之间相互错动，在系统和外部围岩的截面上形成剪切应力。为简化计算，主要考虑采空区群与外部岩体接触面上的剪切应力，应力大小通过广义胡克定律计算，方向与岩体运动方向相反。

在动力响应模型中，剪切力直接作用于岩体离散质点，第 r 个质点所受剪切力 p_r 为

$$p_r = \bar{\tau}_r A_r . \quad (8)$$

其中： $\bar{\tau}_r$ 为质点 r 离散岩体所受平均剪应力； A_r 为相应岩体与外部岩体接触面积。

实际岩土工程计算中，剪切应力的大小受多种因素的影响，很难精确计算。这里，借鉴文献 ^[11]，引入修正系数 (η) 对施加于质点的剪切力进行修正， η 的合理取值范围为 $[0, 1]$ 。经修正后，第 r 个质点所受剪切力 $p_{r,修}$ 为

$$p_{r,修} = \eta p_r . \quad (9)$$

采用 Matlab 工具软件包求解式 (1)，得到模型各质点的位移矩阵 \mathbf{X} 和速度矩阵 $\dot{\mathbf{X}}$ 。

3 实例验证

某金矿为大型地下开采矿山，含金角砾岩带 ($A_n K_{sb}$) 主要分布于泥盆系中统古道岭组地层中，围岩主要由泥盆系中统的王家楞组 (D_{2w}) 和古道岭组 (D_{2g}) 的碎屑岩和碳酸岩组成。采矿方法主要为无底柱崩落法，辅以浅空留矿法。经过多年的开采，矿山已经形成了数量众多的采空区。为了提高资源利用率，拟对采空区周边的残矿进行二次回采。

选取该矿山 3 个中段的采空区单元形成的纵向采空区群 (图 2a)，研究爆破残采空区 3 顶板过程中，空区群内部岩体的爆破响应规律。单元采空区跨度 25 m，矿房宽度 20 m，高度 30 m，顶板厚度 8 m，围岩厚度 10 m。对该采空区群进行离散化处理，得到 8 个质点，构建 8 自由度的纵向采空区群动力响应模型 (图 2b)。

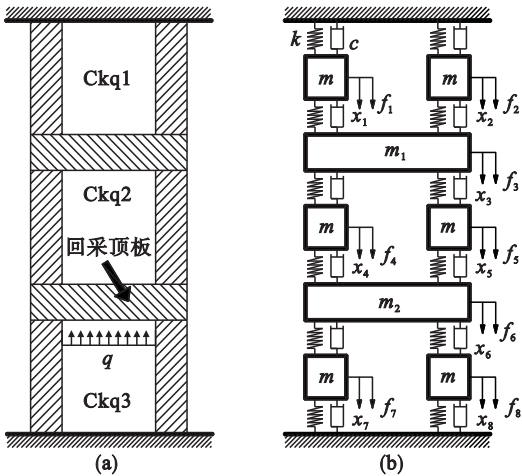


图 2 工程结构体及动力响应模型
Fig. 2 Engineering structural system and dynamic response Model
(a)—结构体；(b)—动力响应模型。

利用 MIDAS/GTS 软件，建立该纵向采空区群数值模型，模型长 165 m，宽 20 m，高 266 m，周边围岩的厚度为采空区跨度的 3 ~ 5 倍 ^[12]。计算过程中，岩体破坏准则为 Mohr - Coulomb 准则，初始应力为岩体的自重应力。采用 Lysmer 提出的黏性边界条件约束数值模型底部、左右边界；应用位移条件约束前后边界 ^[13]。

3.1 参数设置

1) 岩体物理力学参数. 根据现场实测数据，赋存矿体、围岩的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 岩体物理力学参数 Table 1 Rock mechanics parameters						
岩石类型	弹性模量 GPa	抗拉强度 MPa	内摩擦角 (°)	内聚力 MPa	容重 kN/m ³	泊松比
板岩	35	8.8	45	18	25.5	0.24
含金角砾岩	28	6.5	40	14	27.3	0.26

2) 质量、刚度及阻尼矩阵. 由式 (3)，式 (4)，分别计算动力响应模型的质量矩阵 \mathbf{M} 和刚度矩阵 \mathbf{K} 。经无阻尼自由振动分析，得到模型 8 阶主频率，取基频与第 4 阶主频率计算岩体的 Rayleigh 阻尼，获取系统阻尼矩阵 \mathbf{C} 。

3) 外部作用力。

① 爆破荷载. 依据文献 ^[14] 及矿山实际爆破炸药当量，确定爆破荷载的大小。爆破作用的时间周期为 0.1 s，荷载大小的力学方程见式 (10)。根据式 (10) 得到荷载时程曲线 (见图 3)。

$$q(t) = 3.2 \times 10^7 \times (e^{-115.53t} - e^{-231.05t}) . \quad (10)$$

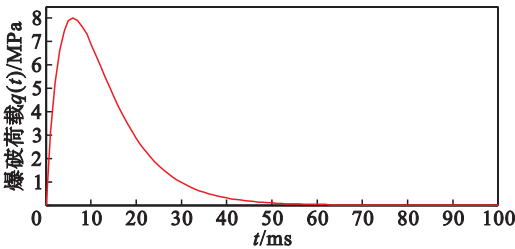


图 3 爆破荷载时程曲线
Fig. 3 Time history curve of blasting load

在动力响应模型中,爆破面荷载的合力集中作用在残采矿体相应的离散质点上,模型所受爆破作用力矩阵 Q :

$$Q = (0,0,0,0,0,q(t) \cdot A_h,0,0)^T. \quad (11)$$

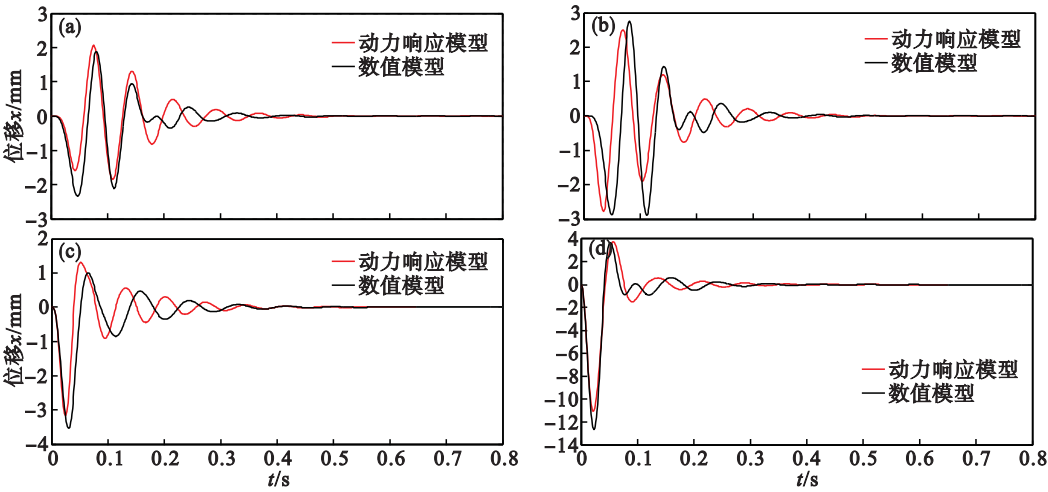


图 4 岩体位移响应曲线
Fig. 4 Response curve of rock displacement

(a)—1#采空区围岩;(b)—2#采空区顶板;(c)—2#采空区围岩;(d)—3#采空区顶板。

受岩体阻尼的作用,空区群内部岩体作减幅振动,位移幅值随时间的增加逐渐衰减至 0。爆破荷载作用位置(3#采空区顶板)位移响应最强,随

其中, A_h 为采空区顶板的面积。

②剪切力. 利用式(9)计算可得第 i 个质点修正后的剪切力 p_i . 修正系数的取值受多种因素影响,目前尚无准确的定量计算方法. 这里,结合前人经验及现场实测数据,综合考虑岩体物理力学性质、应力作用面积、赋存深度等影响因素,将该动力响应模型 8 个质点修正系数 η 的取值序列选为 0.15,0.15,0.45,0.87,0.87,0.3,0.85,0.85。

3.2 结果分析

1) 位移分析. 图 4 为采空区群内部岩体位移响应曲线. 从图 4 中可以看出,结构模态分析方法与数值模拟方法的计算结果趋势相近,位移响应曲线具有相似的演化规律。

着与爆破作用点之间距离的增大,系统内部岩体的位移响应强度呈减弱趋势。

2) 速度分析. 图 5 为采空区群内部岩体的速

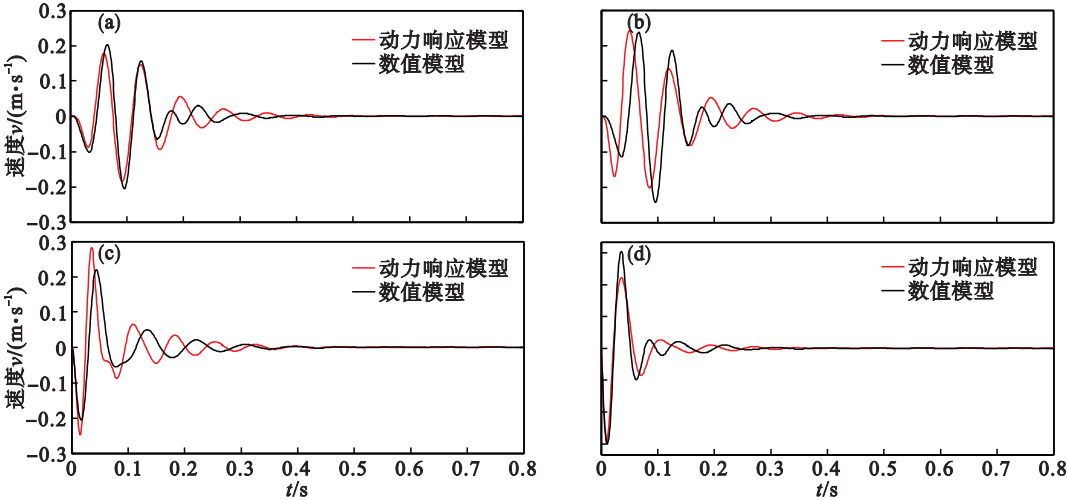


图 5 岩体速度响应曲线
Fig. 5 Response curve of rock velocity

(a)—1#采空区围岩;(b)—2#采空区顶板;(c)—2#采空区围岩;(d)—3#采空区顶板。

度响应曲线. 从图 5 中可以看出,两种方法计算得到的速度响应曲线吻合较好. 在爆破荷载作用下,采空区群内岩体振动速度迅速达到最大值,在阻尼的作用下做减幅振动;随着时间的增加,速度幅值逐渐衰减至 0. 各部分岩体的速度响应随着与爆破作用点之间距离的变化而不同,爆破荷载直接作用的 3[#]采空区单元顶板位置,响应最强.

综上分析可知,结构模态分析方法与数值模拟方法的计算结果较一致,两者计算所得空区群内部岩体的位移、速度时程曲线吻合较好,具有相似的变化规律. 因此,采用结构模态分析方法研究纵向采空区群爆破动力响应特性是可行的.

应用结构模态方法计算采空区群动态响应耗时 4 s,采用数值模拟耗时 4. 47 h,前者远小于后者. 前者计算量大幅减少,计算效率大幅提高.

4 结 论

1) 将结构模态分析方法引入岩体动力响应研究中,构建多自由度的纵向采空区群动力响应模型,提出了基于结构模态的采空区群爆破动力响应分析方法.

2) 某金矿实例研究表明,结构模态方法能直观反映采空区群各部分岩体位移与速度响应规律,揭示其爆破动力响应特性,与数值模拟结果一致. 爆破条件下,岩体受阻尼影响做减幅振动,随着时间的增加,振幅逐渐衰减至 0;在爆破荷载直接作用位置,动力响应最强;随着与爆破作用点之间距离增大,岩体响应强度呈减弱趋势.

3) 结构模态分析方法能有效解决采空区群的动力响应分析难题,为岩体的动力响应研究提供了一种新方法.

参考文献:

[1] Zhou J, Li X b, Mitre H S, et al. Identification of large-scale goaf instability in underground mine using particle swarm optimization and support vector machine [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, 23 (5) : 701 – 707.

[2] Konicek P, Soucek K, Stas L, et al. Long-hole distress blasting for rock burst control during deep underground coal mining [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 61 : 141 – 153.

[3] Yasitli N E, Unver B. 3D numerical modeling of longwall mining with top-coal caving [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005, 42 : 219 – 235.

[4] Singh B P, Bhattacharjee B. Deep (long) hole blasting to

induce caving in longwall panela strata control technique [J]. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2006, 54 (8/9) : 157 – 163.

[5] 闫长斌,徐国元,李夕兵. 爆破震动对采空区稳定性影响的 FLAC^{3D}分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24 (16) : 2894 – 2899.

(Yan Chang-bin, Xu Guo-yuan, Li Xi-bing. Stability analysis of mined-out areas influenced by blasting vibration with FLAC^{3D} [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24 (16) : 2894 – 2899.)

[6] Ozelcik O, Attar P J, Altan M C, et al. Experimental and numerical characterization of structural dynamics of flapping beams [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332 : 5393 – 5416.

[7] Gholampour A A, Ghassemieh M. Nonlinear structural dynamics analysis using weighted residual integration [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2013, 20 (3) : 199 – 216.

[8] Tileyliglu S, Stewart J P, Nigbor R L. Dynamic stiffness and damping of a shallow foundation from forced vibration of a field test structure [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137 (4) : 344 – 353.

[9] Nielsen A H. On the use of Rayleigh damping for seismic analysis [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers; Engineering and Computational Mechanics*, 2009, 162 (4) : 215 – 220.

[10] 李宁,张承客,周钟. 边坡爆破开挖对邻近已有洞室影响研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31 (sup2) : 3471 – 3476.

(Li Ning, Zhang Cheng-ke, Zhou Zhong. Influence research of slope blasting excavation on adjacent existed tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31 (sup2) : 3471 – 3476.)

[11] 余凯,姚鑫,张永双,等. 基于面积和应力修正的直剪试验数据分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33 (1) : 118 – 124.

(Yu Kai, Yao Xin, Zhang Yong-shuang, et al. Analysis of direct share test data based on area and stress correction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33 (1) : 118 – 124.)

[12] Schmid C J, Newcomen H W, Buchanan M, et al. Stability evaluation of stopes and pillars at MAX mine and development of a Surpac-FLAC^{3D} model-building technique [C] // 47th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium. San Francisco: American Rock Mechanics Association, 2013 : 1216 – 1221.

[13] Wu Z S, Chen G Q, Kouki Z, et al. Effect of blasting on the adjacent underground tunnels [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 90/91/92/93 : 1870 – 1878.

[14] Fallah A S, Micallet K, Langdon G S, et al. Dynamic response of Dyneema[®] HB26 plates to localised blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 73 : 93 – 100.