

# 汽车碰撞护栏事故再现方法

申杰<sup>1</sup>, 金先龙<sup>1,2</sup>, 陈建国<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240;

2. 振动、冲击、噪声国家重点实验室, 上海 200240; 3. 司法部司法鉴定科学技术研究所, 上海 200063)

**摘要** 为了应对大量的汽车碰撞护栏事故, 提出了基于 CRASH3 碰撞模型的事故再现方法。该方法根据护栏的刚度特性, 以车辆和护栏的残余变形量为输入, 计算车辆的碰撞前速度, 因此具有很强的可操作性。研究主要针对一款常见的高速公路波形梁护栏, 通过对汽车冲击作用下的护栏进行有限元分析, 研究了该款高速公路护栏的动力特征。研究发现在大多数情况下, 随着变形量的增加, 护栏受力几乎呈线性上升, 基本符合 CRASH3 的线性假设。最后, 应用上述方法, 再现一起真实的汽车 - 护栏碰撞事故, 将得到的碰撞前车速与 PC - CRASH 结果进行比较, 初步证明了该方法的可行性。

**关键词:** 事故再现, 计算机仿真, 高速公路护栏

**中图分类号:** U491.3; TP391.9 **文献标识码:** A

汽车与固定障碍物碰撞事故是道路交通事故的主要形式之一, 其中, 常见的固定障碍物有护栏、电线杆等。据统计, 美国 2004 年约有 1.2 万人死于汽车与固定障碍物碰撞的事故, 约占交通事故死亡总数的 31.4%。在中国, 每年也有约 1/3 的死亡事故是车辆与路侧碰撞的单车事故中。研究固定障碍物与汽车碰撞的动力学问题具有重要意义。特别是, 对于诸如护栏、电线杆等路侧障碍物, 它们的设计和生產都有相应的行业规范或国家标准, 具有结构简单、可重复性强、取证容易等特点。

汽车与固定障碍物碰撞已经成为交通安全的主要研究方向。Richard<sup>[1]</sup> 针对木质电线杆, 利用静态和动态有限元分析方法, 估算电线杆折断所需动能。赵甲荐<sup>[2]</sup> 通过冲击实验和有限元分析的方法, 初步探讨了护栏波形梁的动力特征。黄小清<sup>[3]</sup> 将半刚性护栏系统 (包括波形梁、防阻块和立柱) 作为研究对象, 研究各部件在冲击条件下的变形和吸能特性。石红星<sup>[4]</sup>、雷正保<sup>[5]</sup> 则分别提出将汽车和护栏结合成一个完整耦合系统, 计算汽车冲撞护栏的冲击力的同时, 也分析车辆的运动规律。上述研究结果对固定障碍物接触特性的描述缺乏普遍性, 无法与目前常用的事故再现方法结合使用, 不能满足事故鉴定对可操作性的要求。

CRASH3 是一种于上世纪 70 年代发展起来的汽车 - 车碰撞事故再现方法, 也是目前常用的事故再现软件 CRASH、EDCRASH 的理论基础。为了应用已有的事故再现方法和工具, 本文根据对护栏接触刚度特性的研

究结果, 提出一种基于 CRASH3 碰撞模型的汽车碰撞护栏的事故再现方法。该方法利用已有事故再现碰撞模型 CRASH3, 车身和障碍物变形反求碰撞前后的汽车速度变化。由于无需汽车的接触刚度, 具有很强的实用性。文中, 选取一款典型的高速公路波形梁钢护栏, 利用显式瞬态有限元方法, 分析护栏的刚度特性, 得到相应的 CRASH3 模型参数。最后, 以一起真实事故为例, 应用上述方法计算碰撞前车速。通过与 PC - CRASH 得到的计算结果进行比较, 初步判断了该方法的可行性。

## 1 护栏刚度分析

我国现行的一系列行业标准或国家标准, 如 JTG D81 - 2006《公路交通安全设施设计技术规范》和 JTG F71 - 2006《公路交通安全设施施工技术规范》, 对高速公路防护栏的设计、生产和安装做出了较为明确的规范。相对汽车而言, 护栏不仅种类有限, 而且结构简单, 所用材料普通, 非常便于建模和计算。因此, 对于事故再现和鉴定而言, 有必要计算几种常见的障碍物的动力特性, 为具体的事故再现提供支持。

以最常见的高速公路波形梁钢护栏为研究对象, 建立详细的三维有限元模型, 运用非线性显式有限元算法, 计算在汽车碰撞下的动力特性。该有限元模型总共包括 4 段护栏, 每段护栏包括波形梁板、防阻块、立柱, 相邻两段立柱的中心距离为 4m, 具体细节参考相关标准。

针对护栏通常长达数公里的情况, 对未予以建模的部分, 参考 Tabie<sup>[6]</sup> 提出的边界条件确定方法来等效模拟未予以建模的部分护栏。另外, 还考虑立柱周围土壤与立柱之间的相互作用, 用面面接触模拟土壤与立柱的相互作用。如图 1 所示, 除土壤由 8 节点实体

基金项目: 本课题得到国家自然科学基金 (60174023) 和教育部博士点基金 (20010248008) 资助。

收稿日期: 2006 - 06 - 29 修改稿收到日期: 2006 - 07 - 25

第一作者 申杰男, 博士生, 1980 年 7 月生

单元建立以外,其它结构均采用壳单元,共包括 31 948 个节点和 30 953个单元,材料模型均为考虑各向同性硬化的弹塑性材料。

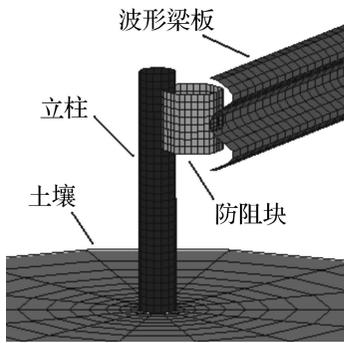


图 1 部分护栏有限元模型

将刚性的汽车模型以一定速度和碰撞角撞击护栏,研究冲击作用下的护栏动力特征。该汽车模型仅是一个刚性壳单元有限元模型,几何外形和质量参数则大致参照一款常见轿车。仿真中的碰撞角为汽车行驶方向与护栏的夹角,如图 2 所示。文中,以护栏未变形状态为基准,将垂直于护栏的方向作为法向,平行于护栏方向为切向。碰撞点选择在护栏板的中间位置。车辆与波形护栏板之间的摩擦系数为 0.4,即摩擦角  $22^\circ$ 。所有的仿真均采用显式有限元软件 LS-DYNA,在高性能计算机 SGI Onyx3800 上完成,仿真时间为 450ms。

大致参考相关行业标准<sup>[7]</sup>,确定仿真的初始条件。为了规范高速公路护栏安全性能评价,该标准专门推荐了护栏实车碰撞的试验条件。对于小型客车(质量小于 1.5t),碰撞速度 100km/h,碰撞角度  $20^\circ$ 。此时,汽车法向速度约为 34km/h,切向速度约为 94km/h。由于在小碰撞角时,车辆存在严重的侧向滑移,不利于仿真分析,因此仿真所采用的碰撞角偏大。

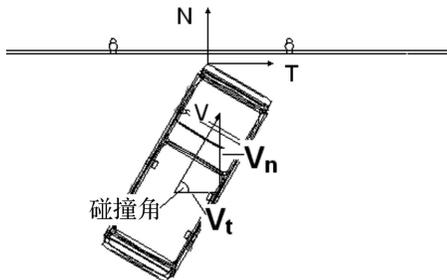


图 2 仿真初始条件设置

当碰撞角  $60^\circ$  车速 40km/h 时,护栏约在碰撞后 140ms 达到最大动态变形,约在碰撞后 300ms 完成回弹过程,如图 3 所示。由仿真结果发现,护栏压缩阶段的动态变形量,即车辆与护栏碰撞过程中沿护栏的垂直方向护栏所产生的动态变形量,与护栏的法向和切向接触力之间呈线性关系,如图 3 所示。切向力与法向力之比维持在 0.5 附近,大于摩擦系数 0.4。这是

因为较大的碰撞角能产生自锁效应,使得接触力的合力方向与车辆行驶方向相同。



图 3 碰撞后 140ms 的护栏变形

为了研究不同速度、相同角度下的护栏动力特性,在保持碰撞角  $60^\circ$  的前提下,又模拟了车速在 10km/h、20km/h、30km/h 时的碰撞情形。将 30km/h 结果与 40km/h 结果比较,发现:除了最大动态变形量不同以外,护栏的刚度特性基本相同,见图 4。而且,不同速度时护栏的残余变形和最大动态变形量与速度也基本呈线性关系(图 5),斜率相当接近。

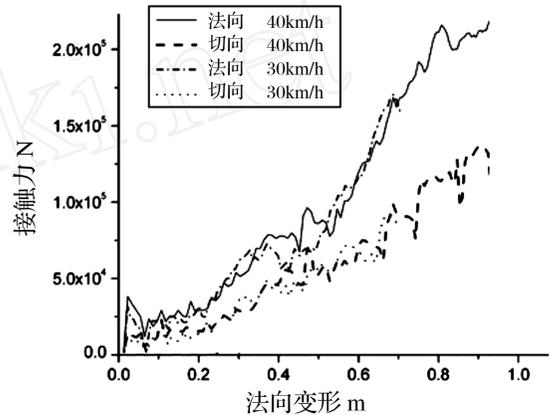


图 4 护栏的变形和受力关系

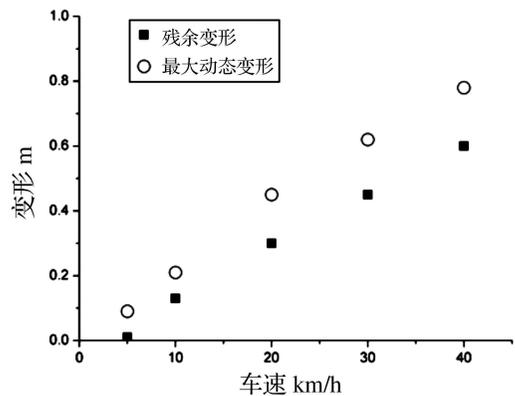


图 5 不同速度的护栏变形比较

在实际的碰撞事故中,由于碰撞角通常较小,汽车会出现比较明显的滑动。在本次仿真试验中,还模拟了碰撞角  $30^\circ$  车速 50km/h 时的碰撞过程,考察车辆沿护栏切向滑动的影响。仿真结果见图 6,在压缩的初始阶段,切向力与法向力之比维持在 0.4 附近,与摩擦系数相等。但是,在压缩过程的后半段,随着汽车的接触

位置从护栏板的中间部位向立柱处滑动 (见图 7), 导致立柱对汽车切向移动的阻碍作用逐渐显现, 切向力也随之大幅度增加。因此, 当碰撞角较小且车速较大时, 护栏所受切向力与动态变形量不成线性关系。至于护栏的法向刚度, 少量的碰撞角度改变对其影响不大。

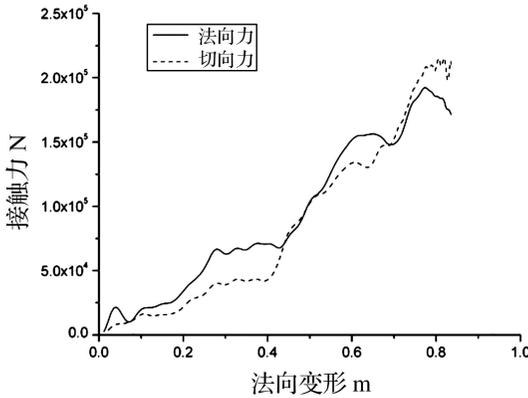


图 6 碰撞角 30°车速 50km/h 的护栏刚度特性



图 7 碰撞角 30°车速 50km/h 的仿真结果

## 2 事故再现方法

CRASH3碰撞模型将车身变形描述为弹性变形和塑性变形之和, 正面碰撞时车身塑性变形与碰撞力存在如下关系:

$$F_i = A_i + B_i C_i \quad (1)$$

式 (1) 中,  $F$  为垂直于碰撞平面的接触力,  $A$  是车身在无残余变形的情况下结构所能承受的最大接触力,  $B$  是车身刚度,  $C$  为碰撞过程中产生的车身永久变形量, 下标  $i=1, 2$  用于区分不同的事故车辆。

发生回弹前, 汽车结构变形所吸收能量:

$$E_i = A_i C_{vi} + B_i C_{vi}^2 / 2 + A_i^2 / 2B_i \quad (2)$$

式 (2) 中,  $C_{vi}$  是碰撞后测得的汽车  $i$  的车身残余变形量。

当车速不垂直于碰撞平面时, 接触力的合力方向与碰撞平面的法向之间存在夹角。此时, 汽车结构变形所吸收能量表示为

$$E_i = (A_i C_{vi} + B_i C_{vi}^2 / 2 + A_i^2 / 2B_i) * (1 + \tan^2 \alpha) \quad (3)$$

Campbell<sup>[8]</sup> 经过大量的汽车碰撞刚性墙实验后发现, 在满足车身无残余变形的前提下, 所能达到的最大碰撞速度  $b_0$  一般近似等于 5km/h, 且满足如下关系式:

$$b_0 = A_i \sqrt{\frac{1}{B_i M_i}} \quad (4)$$

式 (4) 中,  $M_i$  为汽车质量。

对于汽车撞护栏 ( $i=1$  代表汽车,  $i=2$  代表护栏), 由上文可知, 波形梁钢护栏的刚度特性基本符合 CRASH3 碰撞模型的假设。经过线性拟合, 可求得该规格护栏法向变形的刚度参数  $A = 2.1 \times 10^4$ ,  $B = 2.7 \times 10^5$ 。因此, 已知沿护栏的垂直方向测得的残余变形量  $C_{v2}$ , 就可以通过式 (3) 计算汽车结构变形所吸收能量  $E_2$ 。根据碰撞初始条件的不同, 的确定可以分为以下三种情况:

当碰撞角大于或等于 (90° - 摩擦角) 时, 等于 (90° - 碰撞角);

当碰撞角较小且车速较小时, 即碰撞过程中汽车沿护栏方向的滑移不大时, 等于摩擦角;

当碰撞角较小且车速较大时, 护栏所受切向力过大不适合用参数  $A, B$  描述护栏刚度。

因此, 如同 CRASH3 将限制在  $\pm 45^\circ$  一样, 基于 CRASH3 碰撞模型的事故再现方法不适用于小碰撞角、大车速的汽车 - 护栏碰撞事故。

另外, 由于汽车与护栏相互作用, 两者所承受的碰撞力  $F_1, F_2$  大小相等、方向相反。而且, 由于护栏是固定障碍物, 汽车碰撞前动能应等于  $E_1 + E_2$ 。这样, 已知碰撞双方中一方的刚度特性以及双方的残余变形量, 就可以反推另一方的刚度特性。本研究将护栏的刚度特性作为已知参数, 假设汽车车身刚度特性符合 CRASH3 的简化形式, 利用碰撞双方的残余变形, 求解汽车碰撞前车速。具体步骤如下:

根据障碍物残余变形量  $C_{v2}$ , 求解  $F_2$ 。

$F_1 = F_2$ , 根据公式 (1)、(4), 求解  $A_1, B_1$ 。

分别计算  $E_1, E_2$ , 汽车碰撞前车速

$$V = \sqrt{2(E_1 + E_2) / M_1}$$

## 3 算例

以一起真实的汽车撞防护栏事故为例, 应用上文所述事故再现方法, 估算汽车碰撞前车速。该起事故是一起发生在高速公路上的三车碰撞事故, 三车均为轿车。甲车在追尾乙车后, 改变方向, 与中央隔离带边的护栏发生碰撞并侧翻。乙车被撞后, 向前滑行并打转, 在临近停止时与同向行驶的丙车发生轻微碰撞。事故再现后, 三车停止位置和路面遗留轨迹如图 8 所示。事故中的高速公路波形梁钢护栏与上文研究护栏的规格相同, 现场测量到的护栏残余变形深度约为 0.9m, 甲车上残余变形约 0.1m, 甲车的总质量 2370 kg, 现要求估算甲车碰撞护栏前瞬间的车速。

(下转第 48 页)

- [4] 曾勤谦, 华宏星, 韩祖舜. 耦合结构中的功率流有限元法 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(4): 503—506
- [5] Bobrovnikskii Y. Estimating the vibrational energy characteristics of an elastic structure via the input impedance and mobility [J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 217(2): 351—368
- [6] Lee S K. Identification of a vibration transmission path in a vehicle by measuring vibrational power flow [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2004, 218(2): 167—175.
- [7] 左鹤声. 机械阻抗方法与应用 [M]. 北京, 机械工业出版社, 1987.
- [8] Goyder H, White R. Vibrational power flow from machines into builtup structures, Part I introduction and approximate analyses of beam and plate-like foundations, Journal of Sound and Vibration, 1980, 68(1): 59—75.
- [9] Singh R, Kim S. Examination of multi-dimensional vibration isolation measures and their correlation to sound radiation over a broad frequency range [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 262(3): 419—455.

### (上接第 40 页)

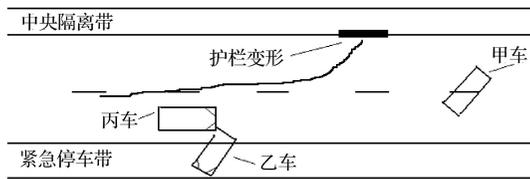


图 8 事故现场图

结合上文所得的护栏刚度参数  $A_2$ 、 $B_2$ , 由公式 (1) 可得:

$$F_1 = F_2 = A_2 + B_2 C_{v2} = 2.64 \times 10^5 \text{ N}$$

由式 (1)、(4), 得到汽车刚度参数  $A_1 = 1.2 \times 10^6$ ,  $B_2 = 1.5 \times 10^6$ .

根据碰撞护栏前的甲车制动印迹, 可以估计该车撞击护栏的碰撞角约为  $60^\circ$ ; 即  $\alpha = 30^\circ$ :

$$E_1 = (A_1 C_{v1} + B_1 C_{v1}^2 / 2 + A_1^2 / 2B_1) \cdot (1 + \tan^2 \alpha) = 3.24 \times 10^4 \text{ J}$$

$$E_2 = (A_2 C_{v2} + B_2 C_{v2}^2 / 2 + A_2^2 / 2B_2) \cdot (1 + \tan^2 \alpha) = 1.72 \times 10^5 \text{ J}$$

最后, 计算甲车碰撞护栏前车速  $v = \sqrt{2(E_1 + E_2) / M_1} = 13.1 \text{ m/s} = 47 \text{ km/h}$

为验证上述结果, 采用动量冲量法事故再现软件 PC-CRASH, 以基于轨迹的优化方法, 重新对该起事故进行事故再现, 得到甲车撞击护栏前瞬间的车速为  $50 \text{ km/h}$ , 虚拟再现得到的车辆停止位置如图 9 所示。由此可见, 本文提出的事故再现方法有一定可行性。

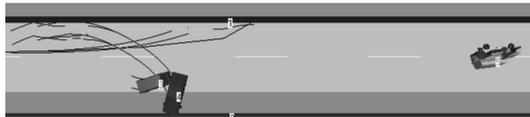


图 9 PC-CRASH 仿真结果

## 4 结论

(1) 利用仿真得到的护栏刚度特性, 基于障碍物和车身变形, 对真实事故进行事故再现, 初步验证了本文所提出的事故再现方法。而且, 该方法以护栏变形

为主要依据, 计算效率高, 无需车身刚度参数, 具有较强的可操作性, 是对其它事故再现方法的一种很好的补充。

(2) 通过仿真试验的方法, 针对一款典型的高速公路波形梁钢护栏, 分析了它在不同碰撞角度和碰撞速度下的变形、受力特性。发现垂直于护栏方向的碰撞力分量与护栏动态变形量呈线性关系。但是, 平行于护栏方向的作用力则仅在一定条件下与护栏动态变形量保持线性关系。文中所述的事故再现方法不适用于小碰撞角、大车速的汽车-护栏碰撞事故。

(3) 上述方法适用于汽车与各种固定障碍物的碰撞事故, 继续分析其它类型固定障碍物的刚度特性, 将有利于扩大该方法的实际应用。另外, 今后的护栏刚度特性研究也有必要建立更长的护栏有限元模型, 进一步考察高速小碰撞角对结果的影响。

### 参考文献

- [1] Richard W K, Charles E S. Wooden pole fracture energy in vehicle impacts [J]. SAE paper 980214.
- [2] Zhao J J, Wei D M, Tang L Q. Experimental investigation and optimized analyses of highway guardrails under impact loads [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2005, 33(11): 98—103.
- [3] 黄小清, 张秀丽, 汤立群. 三跨与单跨护栏系统的抗冲击性能比较 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学学报), 2005, 33(10): 62—66.
- [4] 石红星, 吕伟民. 车辆碰撞混凝土护栏的数值模拟与应用 [J]. 济大学学报, 2002, 30(9): 1061—1063.
- [5] 雷正保. 大力开展半刚性护栏防撞新机理的研究 [J]. 振动与冲击, 2002, 21(1): 1—6.
- [6] Tabiei A, Wu J. Validated crash simulation of the most common guardrail system in the USA [C]. Detroit 6<sup>th</sup> International LS-DYNA Conference Crashworthiness, 2000.
- [7] JTG/T F83-01-2004, 高速公路护栏安全性能评价标准 [S].
- [8] Campbell K L. Energy basis for collision severity [C]. 3rd International Conference on Occupant Protection, Troy, Michigan, July 1974, 10—12.

MFs from mode confusing

**Key words:** MF (intrinsic mode function), fast band-pass filtering, analytic signal, Hilbert spectrum

## A NONLINEAR VISCO-HYPERELASTIC CONSTITUTIVE MODEL BASED ON YEOH STRAIN ENERGY FUNCTION WITH ITS APPLICATION TO IMPACT SIMULATION

ZHOU Xiang-rong<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>, WANG Bao-zhen<sup>2</sup>

(1. Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China; 2. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** According to the viscoelastic-hyperelastic theory and the visco-hyperelastic model proposed by L. M. Yang etc, a new nonlinear visco-hyperelastic constitutive model (VHCM) based on Yeoh strain energy function is proposed to describe middle-high strain rate effects of incompressible rubber. The new VHCM is composed of only one variable—the first invariant of the left Cauchy-Green deformation tensor  $B$ , which simplifies the Yang's VHCM. A user material subroutine (ABAQUS/VUMAT) of the new VHCM is also compiled to simulate impact responses of rubber pads and rubber shock absorbers. The good agreement between experiment results and simulation ones shows that the new VHCM is effective and feasible in the cases of middle-high strain rates of rubber.

**Key words:** rubber, Yeoh, strain rate, visco-hyperelastic constitutive model, ABAQUS/VUMAT, impact

## A METHOD OF CAR-HIGHWAY BARRIER CRASH ACCIDENT RECONSTRUCTION

SHEN Jie<sup>1</sup>, JIN Xian-long<sup>1,2</sup>, CHEN Jian-guo<sup>3</sup>

(1. High Performance Computing Center, Shanghai Jiaotong University (SJTU), Shanghai 200030, China;  
2. State Key Laboratory of Vibration, Shock & Noise, SJTU, Shanghai 200030, China;  
3. Institute of Forensic Sciences, Ministry of Justice, Shanghai 200063, China)

**Abstract** A new method of car-highway barrier crash accident reconstruction is presented based on CRASH3 damage algorithm. Because the stiffness of a barrier is easy to obtain, the stiffness coefficients of a vehicle determined by this method is based on residual crush and the velocity before impact is calculated with change of kinetic energy. Also, a detailed FE model of a typical type of highway guardrail is established. Using this model, the dynamic characteristics of this guardrail under vehicle impact are investigated. It is found that the normal contact force between the vehicle and the barrier can be a linear function of the residual crush in most conditions, but the linear relation for the tangential force can only be satisfied in some conditions. Finally, the above-mentioned method is applied to a real-world accident. Compared with PC-CRASH, this method is proved to be feasible for accident reconstruction.

**Key words:** accident reconstruction, computer simulation, highway barrier

## FEATURES OF ENERGY DISTRIBUTION OF SINGLE DECK BLAST VIBRATION SIGNALS WITH WAVELET PACKET ANALYSIS

LING Tong-hua<sup>1,2</sup>, LI Xi-bing<sup>2</sup>

(1. School of Bridge and Structural Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410083, China;  
2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract** Blast vibration analysis is a foundation for studying control of blast vibration damage and provides a prerequisite to controlling blast vibration. Based on the characteristic of a short-time non-stationary random signal, the feature of energy distribution of a single deck blast vibration signal is investigated by means of wavelet packet method. Firstly, the