

## 泥石流冲击脉动荷载概率分布特征

陈洪凯<sup>1,2</sup>, 唐红梅<sup>1,2</sup>, 鲜学福<sup>2</sup>, 张玉萍<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 岩土与地质工程系, 重庆 400074;

2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400040)

**摘 要:** 针对 0.3 cm~0.8 cm、0.8 cm~15 cm 和 1.5 cm~3.0 cm 三种固相粒径组和 0.02、0.08、0.16、0.20、0.25 五种固相比组合的 15 种水石流体的室内模型试验数据,采用小波方法消噪处理,揭示泥石流冲击脉动荷载概率分布特性,体现在三个方面:固相粒径相同时,泥石流冲击荷载随固相比的增加而增大,粒径较大的泥石流流体冲击荷载越大;泥石流冲击荷载累计曲线呈现反 S 型非线性分布,且粒径越小,反 S 形态越清晰;固相浓度较低的泥石流冲击概率密度分布接近于正态分布,而固相浓度较大(超过 0.08)时近似服从高斯分布,并且泥石流流体粒径越大,冲击概率密度分布曲线易于出现多峰和极值。成果对于推动泥石流动力特性科学研究具有积极意义。

**关键词:** 泥石流冲击脉动荷载; 概率分布特征; 模型试验; 固相比; 颗粒粒径

中图分类号: P642.23      文献标识码: A

泥石流冲击力是指泥石流在运动过程中对所接触的一切物体所产生的动荷载<sup>[1]</sup>,是泥石流区道路、桥涵毁损破坏的主要动力机制,多年来一直是泥石流流体力学研究的一个最薄弱环节<sup>[2-4]</sup>。20世纪70年代以来,根据云南东川蒋家沟泥石流流1974~1975年的冲击观测资料,吴积善等将泥石流冲击力概化为锯齿形脉谱、矩形脉谱和尖峰形脉谱三种谱型,将泥石流中巨砾的撞击力概化为矩形脉谱,将浆体的冲击力概化为三角脉谱<sup>[5]</sup>;刘雷激等提出泥石流冲击力标准频谱曲线中振幅谱与工程结构响应的反应谱关系,并利用功率谱周期图法得到冲击力频谱图<sup>[6]</sup>;朱鹏程根据蒋家沟测站的几次典型的泥石流冲击观测资料,对泥石流内部能量传递与损耗、空间变化、时间变化进行了初步解释<sup>[7]</sup>;魏鸿等通过室内水槽试验结果,提出了泥石流龙头对坝体冲击力的计算公式<sup>[8]</sup>;Arattano等通过水槽试验探讨了泥石流能量波问题<sup>[9]</sup>;Bagnold通过球形颗粒在牛顿流体中的转筒试验,建立了颗粒之间法向应力和切向应力的经典计算式<sup>[10]</sup>;Iverson发现泥石流舌后部存在Brazil核效应区,据此可描述颗粒动力分选及逆序结构的沉积相特征<sup>[11]</sup>;Brien等提出了泥石流二维模拟方法<sup>[12]</sup>;陈洪凯等分析了泥石流龙头压胀效应<sup>[13]</sup>,并基于固液两相流理论初步建立了泥石流分相冲击力计算方法<sup>[14,15]</sup>。这些研究成果主要体现在平均冲击荷载方面,计算方法仍然属于半定量阶段,缺乏对泥石流冲击荷载内在变化特性的探讨。

2006 年以来,张玉萍进行了系统的水石流冲击试验,运用小波分析方法<sup>[16]</sup>对冲击频谱进行滤波消噪处

理,对泥石流冲击特性的内在机制进行了初步分析<sup>[17]</sup>。本文以泥石流冲击试验曲线为分析对象,探讨了泥石流冲击脉动荷载的概率分布特征,为深入认识泥石流的冲击特性,推动泥石流动力学的科学研究提供了一定的科学借鉴。

## 1 泥石流冲击实验数据

### 1.1 试验模型

在重庆交通大学泥石流动力模型试验场建造沟谷泥石流试验模型(图1),模型主沟长度9.0 m、高差3.6 m、沟床平均坡度26°;泥石流沟由水泥砂浆现场浇筑而成,沟槽较光滑;沟源为水源箱,尺寸1.0 m(长)×1.0 m(宽)×1.5 m

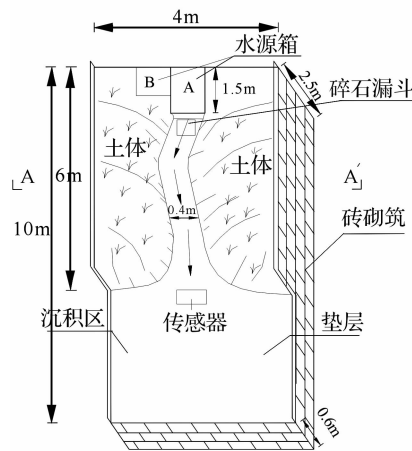


图 1 试验模型

Fig. 1 Experimental model

(高), 储水量  $1.5 \text{ m}^3$ ; 水源箱出口处设置碎石漏斗, 其高度  $0.5 \text{ m}$ , 顶部直径  $0.6 \text{ m}$ , 底面直径  $0.4 \text{ m}$ , 漏斗底部阀门设置为抽板式, 开口大小可以根据试验中固相比的大小进行调整; 泥石流沟口安置 HS200 型动态应力传感器。

## 1.2 试验工况

本文重点分析不同固相粒径及不同固相比条件下泥石流的冲击荷载,属于水石流室内模型试验。固相粒径分 A (粒径 0.3 cm ~ 0.8 cm)、B (粒径 0.8 cm ~ 1.5 cm)、C (粒径 1.5 cm ~ 3.0 cm) 三组,固相比分 0.02、0.08、0.16、0.20 和 0.25 共五种情况,按照正交

组合方式拟定 15 种试验工况(表 1)。

表 1 泥石流冲击试验工况

Tab.1 Experimental work conditions of debris flow impact

| 固相比 | 0.02 | 0.08 | 0.16 | 0.2 | 0.25 |
|-----|------|------|------|-----|------|
| A 组 | A-1  | A-2  | A-3  | A-4 | A-5  |
| B 组 | B-1  | B-2  | B-3  | B-4 | B-5  |
| C 组 | C-1  | C-2  | C-3  | C-4 | C-5  |

1.3 试验数据

针对拟定的 15 种试验工况,采用高速摄像机记录连续记录泥石流运动形态,动态应变仪连续记录泥石流冲击荷载变化过程。每次试验持续时间控制在 10 s ~ 20 s 范围内,且每个工况实施 3 次试验,共计 40 余组,获得 85 000 多个测试数据。本文选用 15 种工况的代表性冲击荷载数据作为研究对象,探讨其脉动荷载概率分布特征。

2 实验数据去噪处理

信号科学中,长度为  $N$  的信号  $f_n$  被噪声  $e_n$  所干扰,所测得的含噪数据为  $X_n=f_n+e_n$ 。滤噪分析的根本目的在于从含噪数据  $X$  中得到信号  $f$  的一个逼近信号  $\hat{f}$ ,使得在某种误差估计下  $\hat{f}$  是  $f$  的最优逼近,即获取真实信号。经小波分解后,信号的小波系数幅值要大于噪声的系数幅值。信号的小波 Lipschitz 指数大于零时,其小波变换极大值的幅度将随尺度增大而增加;而噪声的小波 Lipschitz 指数是负数,所对应的小波变换模极大值将随尺度的增大而减小。据此,在不同的分解尺度上设置一定的阈值,将小于该阈值的模极大值点认为是噪声的小波变换引起的,因而将其置为零;大于该阈值的模极大值点则认为是信号小波变换引起,予以保留<sup>[16]</sup>。

研究发现,对于随机性较强的泥石流冲击脉动荷载,选用 Daubechie( dbN)小波系数、Symlet( symN)均可以实现曲线的降噪平滑处理,由于 db 小波具有正交性,对该类信号的重构可获得较好的平滑效果,如图 2 所示。

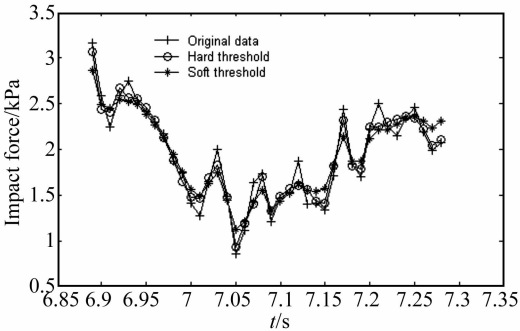


图 2 C-3 试验曲线小波消噪

Fig.2 Wavelet denoise to experimental curve

3 泥石流冲击脉动荷载概率分布特征

基于对代表性冲击荷载数据分析,获得泥石流冲击脉动荷载统计信息(表 2、图 3,4)、脉动荷载分布(图 5,6,7)和概率密度分布(图 8),具有下述特性:

表 2 每组信号的均值及标准偏差

Tab.2 Typical value and standard deviation each set of signa

| 试验工况 | A-1   | A-2   | A-3   | A-4   | A-5   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 信号均值 | 2.047 | 2.254 | 3.195 | 3.392 | 4.103 |
| 标准差  | 0.397 | 0.764 | 0.979 | 1.404 | 2.271 |
| 试验工况 | B-1   | B-2   | B-3   | B-4   | B-5   |
| 信号均值 | 1.887 | 2.131 | 3.279 | 3.846 | 3.868 |
| 标准差  | 0.459 | 0.538 | 1.177 | 1.485 | 2.218 |
| 试验工况 | C-1   | C-2   | C-3   | C-4   | C-5   |
| 信号均值 | 1.525 | 2.387 | 4.008 | 5.203 | 5.296 |
| 标准差  | 0.466 | 0.910 | 1.609 | 1.232 | 2.050 |

表中:“信号均值”单位为 kPa。

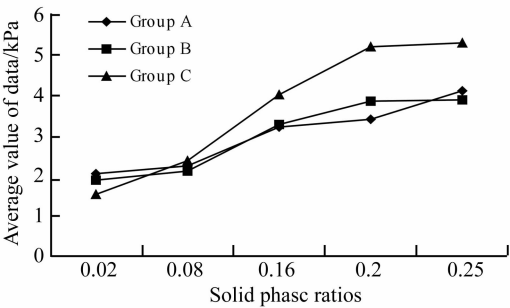


图 3 各组脉动荷载均值分布

Fig.3 Typical value distribution each fluctuating impact force

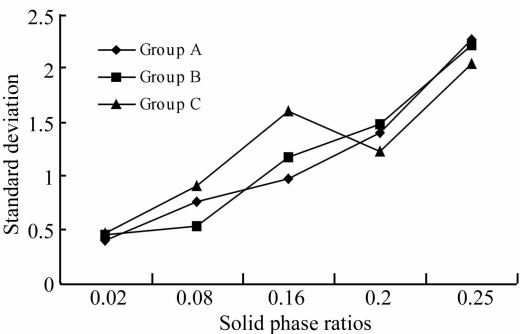


图 4 各组脉动荷载的标准差分布

Fig.4 Standard deviation distribution each fluctuating impact force

(1) 同组粒径泥石流中,随着固相比即流体浓度的增大,冲击脉动荷载均值呈显著上升趋势,其中固相比在 0.08 ~ 0.20 间上升速率最大(图 3)。同时,泥石流冲击脉动荷载的标准差也随固相比的增大与增加(图 4)。固相比相同时,固相颗粒粒径越大的泥石流冲击脉动信号均值具有增大趋势,但标准差具有一定

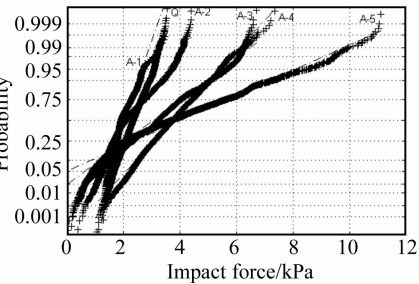


图5 A组泥石流冲击荷载累积曲线  
(图中Q组为清水流)  
Fig.5 Accumulation curve of  
impact force for group A  
(Q represents clear water case)

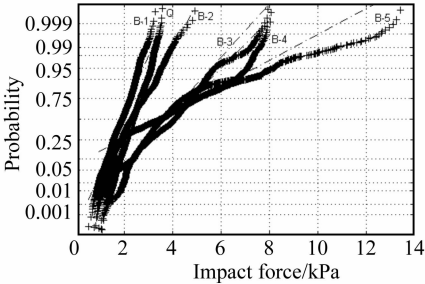


图6 B组泥石流冲击荷载累积曲线  
(图中Q组为清水流)  
Fig.6 Accumulation curve of  
impact force for group B  
(Q represents clear water case)

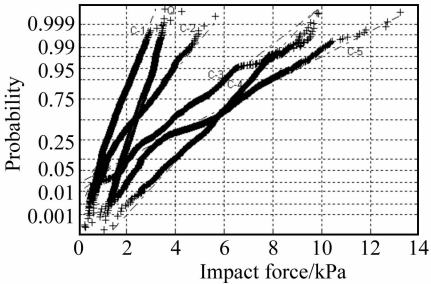


图7 C组泥石流冲击荷载累积曲线  
(图中Q组为清水流)  
Fig.7 Accumulation curve of  
impact force for group C  
(Q represents clear water case)

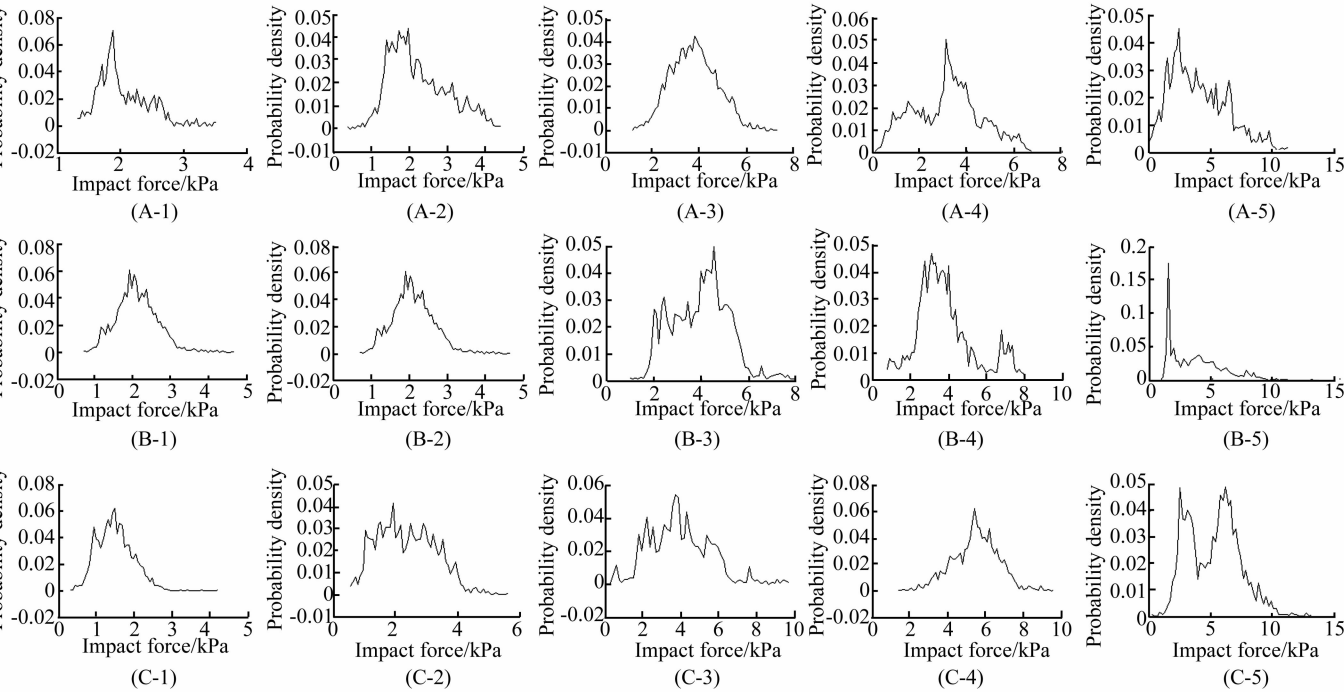


图8 泥石流冲击荷载的概率密度  
Fig.8 Probability distribution of debris flow impact force

随机波动特征。

(2) 泥石流固相颗粒浓度较低时(如0.02和0.08),泥石流冲击荷载累积曲线与清水流的冲击荷载累积曲线相近,均呈线性分布,冲击力变幅较小,在5kPa以内(图5,6,7)。随着泥石流中固相颗粒浓度的增大,冲击荷载累积曲线显著偏离清水流冲击荷载累积曲线,并由线性分布演变为反S型非线性分布(图5,6,7),且颗粒粒径越小,曲线的反S形态越典型,C组粒径的泥石流冲击累积曲线反S形态末端不显著(图7)。

(3) 在固相颗粒浓度较低时(如固相比<0.02),泥石流冲击荷载概率密度分布基本符合正态分布;在固相比比较大如A-5、B-5、C-5工况,泥石流冲击荷载概率密度分布近似服从高斯分布(图8)。泥石流提中固相比超过0.08后,粒径越大,出现多峰的概率增

大,如B-4和C-5工况,这可能与高浓度泥石流运动过程中易出现阵流现象有关。

4 结 论

针对室内模型试验获取的稀性泥石流冲击试验数据,通过小波消噪处理,获得了五种固相比、三组固相颗粒组合泥石流体的冲击荷载概率分布特性如下:

(1) 泥石流体中固相颗粒粒径相同时,冲击荷载均值及标准差随固相比的增加而呈现非线性增大趋势,而固相比相同时,颗粒粒径较大的泥石流体冲击荷载更大。

(2) 泥石流中固相颗粒浓度增大时,冲击荷载累计曲线显著偏离清水流曲线,呈现反S型非线性分布,且泥石流流体中粒径越小,反S形态越典型。

(3) 泥石流流体中固相比比较低时,泥石流冲击荷载概率密度分布趋于正态分布,而固相浓度较大时冲击荷载概率密度分布近似服从高斯分布。并且,泥石流流体中粒径越大,出现多峰的频率越高,这可能与高浓度泥石流运动过程中易出现镇流现象有关。

进一步研究中,应基于不同浆体粘度和不同固相比组合下粘性泥石流冲击试验数据分析,全面揭示泥石流冲击荷载频谱特性,为建立涵盖不同类型泥石流的统一冲击力计算方法提供科学依据。

参 考 文 献

[ 1 ] 陈洪凯,唐红梅,陈野鹰. 公路泥石流力学[M]. 北京:科学出版社,2007.

[ 2 ] 吴积善,田连权,康志成等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:科学出版社,1993.

[ 3 ] 章书成. 泥石流研究述评[J]. 力学进展,1989,19(3): 365 – 375.

[ 4 ] 费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[ 5 ] 吴积善. 云南蒋家沟泥石流观察研究[M]. 北京:科学出版社,1990.

[ 6 ] 刘雷激,魏 华. 泥石流冲击力研究[J]. 四川联合大学学报(工程科学版),1997,1(2): 99 – 102.

[ 7 ] 朱鹏程. 泥石流冲击力谱及地声谱的透视[J]. 泥沙研究. 1993,3:59 – 65.

(上接第 114 页)

阶数为第 5 阶和第 7 阶。曲轴耦合振动时有两阶模态,而这两个频率相差在 10% 以内,可以称其为密集模态<sup>[9]</sup>。密集模态在模态组合方法中是按照单个有效模态而不是按照两个模态进行计算的,所以在密集模态分析时必须单独处理。对于本文中曲轴的耦合共振频率处产生密集模态,根据密集模态分析方法,此时密集模态的产生可以抑制共振时扭转、弯曲、纵向振动的响应值,也说明该型号柴油机结构设计的合理性。另外作者对曲轴不安转减振器时的固有频率进行分析,发现不加装曲轴减振器时一阶扭转频率为 183 Hz,而这个频率正好位于柴油机作为发电机时基频的 7.5 谐次左右,容易导致曲轴扭振破坏;可见加装曲轴减振器的合理性。

5 结 论

传统的柴油机运动机构强度分析方法已经很难适应工业发展的需求;而随着计算机应用技术的发展,基于多体系统动力学理论的运动机构动态强度耦合分析也成为可能,其可以压缩柴油机设计周期,实现运动机构组件强度校核、结构优化以及故障分析等。

本文建立柴油机运动机构刚柔多体系统模型,提出了以机构的外在表现参数来验证模型的方法,其应用价值不可忽视。转速波动的仿真实现与实验验证,可以用于判断柴油机某缸发火异常,另外可以通过不同负荷下

[ 8 ] 魏 鸿. 泥石流龙头对坝体冲击力的试验研究[J]. 中国铁道科学,1996,17(3): 50 – 62.

[ 9 ] Arattano M, Savage W Z. Modeling debris flows as kinematic waves[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 1994, (49): 3 – 13.

[ 10 ] Bagnold R A. experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear[J]. Proc. Royal Soc. London. 1954, 225(Ser. A): 49 – 63.

[ 11 ] Iverson R M. The physics of debris flow[J]. Review of Geophysics, 1997, 35(3): 245 – 296.

[ 12 ] O' Brien J S, Julien P Y, Fullerton W T . Two dimensional water flood and mudflow simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering. 1993, 119(2): 244 – 261.

[ 13 ] 陈洪凯,杜榕桓,唐红梅,等. 泥石流龙头压胀机理探析[J]. 重庆交通大学学报自然科学版,2008,27(5): 790 – 793.

[ 14 ] 陈洪凯,唐红梅. 泥石流两相冲击力及冲击时间计算方法[J]. 中国公路学报,2006,19(3): 19 – 23.

[ 15 ] Chen Hongkai, Tang Hongmei. Essential principle of debris flow dynamics[J]. Wseas Transactions on Fluid Mechanics, 2006,10(1): 932 – 936.

[ 16 ] 孙云莲,刘敦敏. 时频分析与小波变换及其应用[J]. 武汉大学学报(工程科学版),2003,36(2): 103 – 106.

[ 17 ] 张玉萍. 泥石流冲击信号识别方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2009.

的转速波动特性判断柴油机的负荷情况。曲轴振动分析模型的建立,可以虚拟测量曲轴不同位置的扭角,计算曲轴在实际约束条件下的扭振频率等。多体动力学方法对组件的耦合动强度分析以及通过有限元方法的验证,可以计算机构的疲劳寿命,可以应用于其它复杂机构,实现零部件强度校核。该分析方法代价较小,可重复性较强,易于实现机构较复杂的边界条件。

参 考 文 献

[ 1 ] 郝志勇,林 琼,段秀兵. 曲轴系统动力学特性的数字化仿真与试验研究[J]. 内燃机工程,2006,27(1): 38 – 40.

[ 2 ] 高浩鹏,黄映云,王雪山. 船用柴油机运动机构动力学动态分析方法研究[J]. 振动与冲击,2009,28(8): 84 – 87.

[ 3 ] Ma Zheng – Dong, Noel C. An Efficient Multi – body Dynamics Model for Internal Combustion Engine Systems [J]. Multi – body system dynamics,2003,10(4): 363 – 391.

[ 4 ] 张国庆,黄伯超,浦狄强,等. 汽车发动机曲轴系动态仿真[J]. 系统仿真学报,2006,18(8): 2293 – 2295.

[ 5 ] 梁兴雨,舒歌群,李东海,等. 基于柔体曲轴多体动力学的轴系扭振响应分析[J]. 内燃机工程,2007,28(4): 46 – 49.

[ 6 ] 丁培杰,吴昌华. 柴油机曲轴计算方法发展的回顾、现状与展望[J]. 内燃机工程,2003,24(3): 74 – 79.

[ 7 ] 孙 军,桂长林,李 震. 内燃机曲轴强度研究的现状、讨论与展望[J]. 内燃机学报,2002,20(2): 179 – 184.

[ 8 ] 洪嘉振,蒋丽忠. 动力刚化与多体系统刚 – 柔耦合动力学[J]. 计算力学学报,1999,16(3): 295 – 301.

[ 9 ] 汪 玉,华宏星. 舰船现代冲击理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2005.