

高速摄影测量在旋冲钻进试验中的应用*

郑 皓, 赵统武, 李池佳, 阳 宁, 高 波

(长沙矿冶研究院深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室 长沙, 410012)

摘要 利用高速相机记录液压旋冲钻进中钎杆不同冲击压力、旋转压力和推进力情况下的作业过程,同时采用数字图像处理技术,绘制钎杆在旋冲钻进过程中的冲击振动、扭转振动以及试验台架在冲击过程中的受迫振动的曲线,得到钎杆冲击频率和扭振频率、钎杆及试验台架的振幅及其相关性等重要数据。试验结果同传统电测结果基本一致,但与传统传感器测量比较,高速图像采集分析技术是一种无接触、全局化、适用范围广、自动化程度高,精度满足试验要求的量测手段,能够更直观充分地描述旋冲钻进中钎杆振动变化过程。

关键词 旋冲钻进; 高速相机; 冲击振动; 扭转振动

中图分类号 TD41

引 言

液压凿岩机因钻孔速度快、效率高且容易实现自动化,作为重要的凿岩设备广泛应用于采掘、建筑、地质钻探及工程等行业中各种爆破孔的钻凿^[1]。其旋冲钻进作业是在一定条件下冲击、回转、推进和冲洗多重功能对岩石联合作用的结果。高澜庆等^[2]对国内外液压凿岩理论和设备做出研究和分析,提出液压凿岩机的冲击性能和回转性能在其高效完成钻进作业过程中起到关键作用。

液压凿岩机冲击性能试验主要是测定在设定流量下冲击能与冲击频率,并计算冲击功率、能量利用率等,必要时测试活塞与阀的运动规律、压力变化规律、流量变化规律等。目前常用的方法大致可分为两类:应力波法和末速度法。根据冲击碰撞的机理,当高速运动的活塞冲击钎杆时,活塞的动能就会通过碰撞在钎杆内产生应力波,以应力波的形式由钎尾传递给钎头,再传递给受冲体,最终转化为破碎物体的能量,达到工作目的。应力波法是靠测定受冲击活塞冲击的钎杆上所产生的应力波形的方法测定冲击能^[3-4],利用超动态应变测试系统捕获钎杆上任意一点的应力历程,然后用计算机进行快速运算;末速度法是通过传感器直接测定冲击活塞冲程阶段的末速度,然后通过计算公式确定冲击能的方法。末

速度法分为接触式与非接触式两大类^[5]。接触式中有电容式传感器法和感应式速度传感器法;非接触式中有活塞端面反射光测法和光电位移微分法^[6],都能取得比较理想的结果。此外还有触点法、气压法^[7]、示功图法等^[8]。此外,文献[8-9]提出多种新的冲击器性能测试方法,利用日益进步的软硬件技术,搭建测试平台,取得了一定的效果。但这些方法限于其非全局性和适用范围较窄,很难做到高度自动化和高精度要求,依然难以达到对液压冲击器的实时、直观、精确的测量要求。

高速摄影测量法在过去因成本高、拍摄过程复杂和胶片冲洗过程困难等原因在实际凿岩测量分析应用中比较少见,但随着数字技术的进步和高速相机国产化进程的推进,其成本和拍摄便利性有了极大的提高,为其在凿岩钻进过程中开展光学测量提供了基础。基于高速摄影技术的图像采集处理系统能在采样率和数据实时处理速率在 1 000 帧/s 以上的状态下进行图像采集和处理工作^[11],能对高速旋转冲击过程中对钎杆和机架上标定点的空间位置做出准确捕捉,并基于空间和时间参数获取其各项运动性能指标。同传统振动测量方式相比,其具有全局化、非接触、自动化程度高、环境适应性强等特点,可以实现对高速运动目标的实时采集、跟踪和传输,已被越来越广泛的应用于军事、航天、工业生产及科研等领域^[12-18]。廖小翠等^[12]通过高速摄影试验观

* 国家自然科学基金资助项目(51304030);国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2012AA091201);国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2012CB724205)

收稿日期:2014-02-17;修回日期:2014-04-18

察和分析 16 mm 断药导爆管传爆过程,研究断药的规整导爆管在传爆过程中爆轰波的传播特征,并得到规整导爆管存在断药时的传爆速度随时间变化的规律。畅里华等^[13]用高速摄影技术研究高压气体膨胀驱动空气-水界面的不稳定性清晰图像,得到气炮尖顶运动速度及湍流混合层高度增长速度与时间关系曲线。唐孝容等^[14]利用 S-150 型相机开展了水中射流运动的图像和弹丸着靶及侵彻靶板的图像观测试验,其结果表明,高速相机能够满足高速动态摄影的要求,可以获得清晰的实验图像,在常规兵器战斗部实验中具有广泛的应用。王英杰等^[15]还利用高速相机拍摄对水力提升系统中大颗粒的运动规律进行了试验研究,观察了颗粒及颗粒群体的运动状态,通过数字图像处理技术,得到了单颗粒的运动轨迹和颗粒群分布规律,同时获得了颗粒轴向速度、径向速度等各种运动参数,并分析了颗粒粒径对其轴向速度的影响。此外,赵征等^[16-18]分别在焊接技术、爆破作用下岩体层间天冲突运动和弹丸侵彻高强度混凝土试验中运用了高速摄影技术,并获得了较理想的数据采集结果。可以看出高速摄影测量是研究高速运动过程的一种行之有效的方法,为高速动态试验提供丰富的试验信息。

笔者引入高速摄影法对液压凿岩机撞击钎杆产生旋冲钻进的过程进行量测分析,不仅能测量出钎杆凿岩破碎时的位移变化、瞬时冲击速度、冲击频率等情况,还能测算出其扭振速度、频率和长时域的转速曲线,同时利用在高速图像采集系统中多点采集技术,获取钎杆和试验台架标定点的位移和速度曲线,进而求得其互相关性。

1 高速摄影测量

1.1 摄影测量设备简介

高速图像采集使用的是千眼狼 2F04 型高速相机,为一款基于高端 CMOS 图像传感器的数字化高性能、高清、高帧率相机,具有体积小、功耗低、噪声低等特点,在 640×480 分辨率下最高采样频率可达 1 000 帧/s 以上,能满足钎杆冲击振动和扭转振动高速测量采样要求。其采用 USB 3.0 接口,可将采集的图像数据实时传输到电脑主机的内存中,可以通过增加电脑主机的内存的方式很方便地增加相机连续采集的时间。其具体性能参数如下:传感器为 CMOS 型号;最大分辨率为 $2\,320 \times 1\,720$ 像素点;动态范围为 60 dB;模拟增益为 1~8 dB;灵敏度为

5200DN/Lux. s, 550 nm;接口为 CameraLink 80 bit/USB3.0;快门速度为 $2\ \mu\text{s} \sim 30\ \text{ms}$, $2\ \mu\text{s}$ 连续可调;数据传输用 USB3.0 接口;光谱范围为 $400 \sim 1\,000\ \text{nm}$;拍摄速度在 640×480 分辨率下可获得 1 000 帧/s 的帧率;A-D 转换为 8 bit。

1.2 拍摄过程标示手段和图像识别分析方法

摄影测量中,人工标示的应用是提高测量速度和精度的手段之一。根据测试平台工作特点和测量内容,分别在钎杆和机架上作出如图 1 所示标示,钎杆上为固定一圈刻度尺作为测量参照物,钎杆一圈共有 15 个粗线刻度,这样可以计算出钎杆每旋转一格为 24° ,从而能够计算出其旋转速度。钎杆的竖直方向位移,则可直接通过记录水平线的移动即可。右侧机架上为由银粉漆画上标示线。这样可以直观地跟踪测量平台机架的竖直方向位移。



图 1 高速相机拍摄实时画面

Fig. 1 Real-time picture of the high-speed camera

2 旋冲钻进试验

2.1 试验简介

文中将以搭建岩石破碎试验平台,开展液压旋冲钻进过程研究。分析在液压凿岩机的高频冲击、低频扭转和油缸推进的联合作用下钎杆的冲击振动、扭转振动和机架的受迫振动情况。

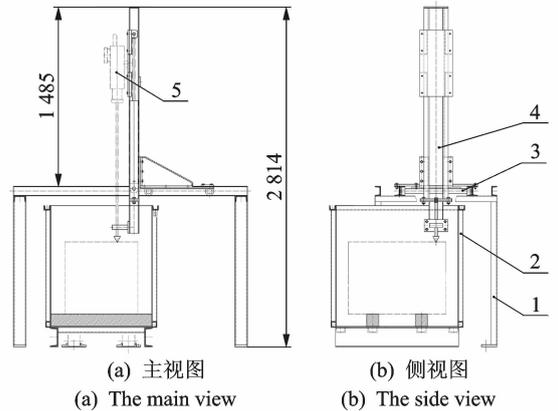
液压高频冲击力不同于静力,其明显的特征是:在很短的时间内其作用力会发生急剧的变化。物体在急剧变化的载荷作用下,它的应变就不是整体的均匀应变,质点的运动也不是整体一致的速度。应变和速度都有一个传播过程,传统的研究方式为采用波动力学理论来研究其能量的传递。液压冲击器工作时,钎杆端部受到冲击活塞的冲击时,该处的应变突然升高,与周围介质间产生压力差,导致周围介质的质点微动,处于微动质点微团的前进,又进一步把动量传递给后面的质点微团,并使后者变形,由近

及远,不断扩展,这种扰动的传播现象就是应力波。固体中的应力波通常分为纵波和横波两大类。钎杆内应力波的传播属于纵波,它包括压缩波(压应力波)和拉伸波(拉应力波)。当钎杆端部受到冲击后,它以压应力波(称入射波)的形式向钎头方向传播。当压应力波到达钎杆头与工作介质的接触表面时,将随着接触面状况出现不同的过程。如钎杆和介质表面在应力波到达时并没有接触,压应力波将全部从钎杆端面反射回来(称自由端反射),并以拉应力波的形式迅速向钎杆方向返回。所以当观察钎杆运动时可以看到,在单次冲击后钎杆会产生一定程度的反弹和振动^[3]。同时在冲击过程中还伴随着扭转,由于钎杆顶端受液压凿岩机钎尾的作用会产生一个匀速的回转运动,而钎杆底端在冲岩石时会受到岩石的强大阻力而不能动弹,所以这过程中在钎杆中部将不可避免地产生周期性扭振。本试验还将通过观测钎杆中部位位置的旋转速度,研究钎杆的扭振过程。

2.2 试验台架搭建

为开展岩石旋冲切削试验,进行各项性能观测,搭建如图 2 所示试验台架。将导轨式液压凿岩机放置于台架导轨上,台架导轨顶端设有推进油缸作为

液压凿岩机的推进动力来源,并可拖动凿岩机上下移动。台架导轨固定在横向移动架上,并随横向移动架横向移动变更作业方位。横向台架固定在旋冲平台支架上,支架中心放置岩石箱体,将岩石放在箱体内部,开展旋冲切削模拟试验。



1-旋冲切削平台支架;2-岩石箱体;3-横向移动架;4-台架导轨;5-液压凿岩机

图 2 破碎试验装置(单位:cm)

Fig. 2 Device of the crushing test (unit: cm)

图 3 所示为旋冲切削试验现场,试验台架两侧为直流照明灯,为高速摄影提供足够的光源,中间为高速相机对着被测钎杆,对旋冲钻进过程进行高速

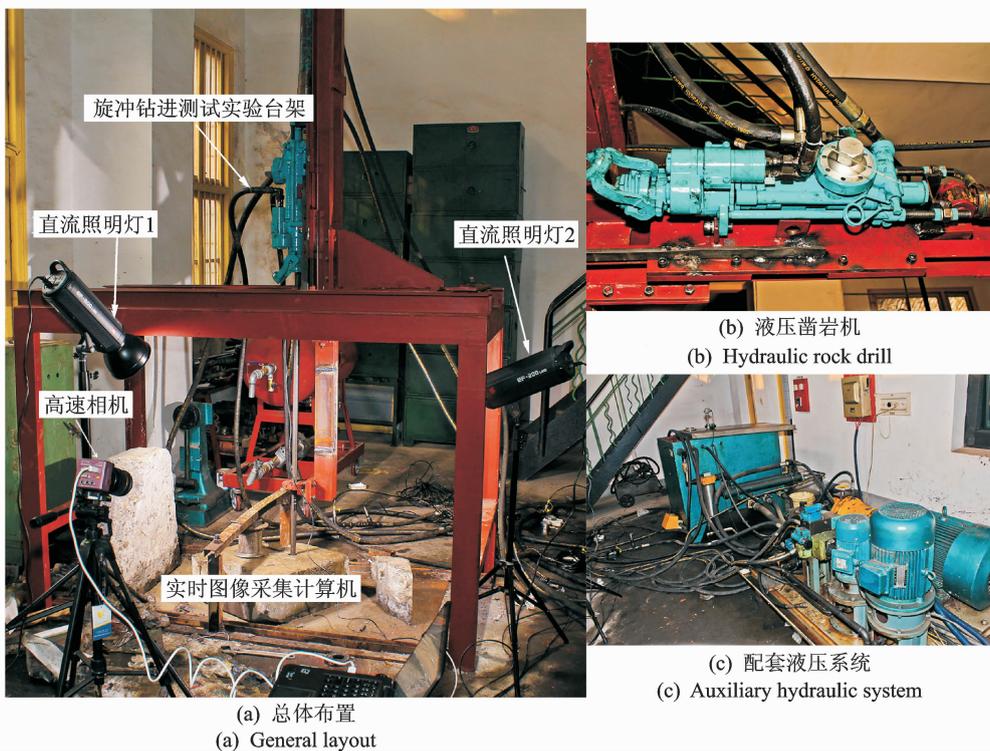


图 3 高速图像采集系统布置

Fig. 3 The layout of the high-speed image acquisition system

图像采集。其采用 USB 3.0 接口,可将采集的图像数据实时传输到电脑主机的内存中,通过增加电脑主机的内存可以很方便地增加相机连续采集的时间,用于观测其不同工况下旋转冲击对于岩石的破碎效果。图 2(b)为试验用液压凿岩机,2(c)表示配套液压系统,为液压凿岩机提供冲击动力和旋转动力,并为凿岩机顶部的推进油缸提供推进动力。

2.3 试验过程分析

为了测试钎杆在不同工作参数下的运动状态,针对以下两种典型运行参数来进行高速图像采集试验。

试验 1: 旋转压力 4.0 MPa, 冲击压力 8.5 MPa, 推进力 1.47 kN;

试验 2: 旋转压力 8.5 MPa, 冲击压力 9.0 MPa, 推进力 2.36 kN。

2.3.1 钎杆位移分析

图 4,5 给出了试验 1,2 的钎杆轴向位移曲线。

试验 1: 高速摄影采样间隔 2 帧,共 2 806 帧,总时长 1.557 s。

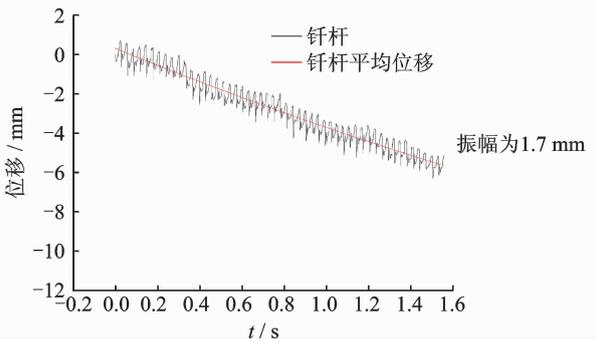


图 4 试验 1 钎杆轴向位移曲线

Fig. 4 Test 1 The axial displacement curve of drill rod

试验 2: 高速摄影取样间隔 2 帧,共 2 936 帧,总时长 1.499 s。

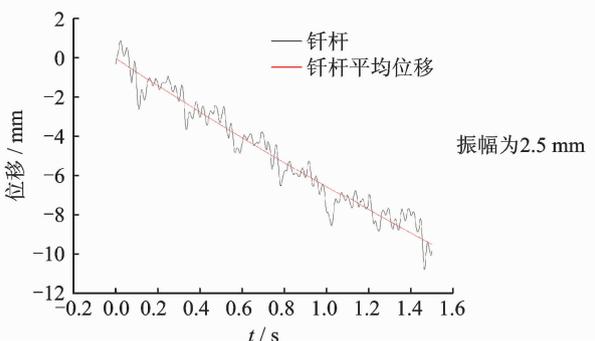


图 5 试验 2 钎杆轴向位移曲线

Fig. 5 Test 2 The axial displacement curve of drill rod

从钎杆轴向位移曲线可以得出以下结果。

1) 钎杆轴向运动为一非平稳动态随机过程,可近似视为一个线性函数(匀速运动)和一个随机振动的叠加。

$$f(t) = vt + g(t) \tag{1}$$

其中: v 为钎杆下向移动速度(钻速); $g(t)$ 为随机振动函数。

高速摄影分析的主要运动参数及钻孔试验的有关结果列于表 1。

表 1 高速摄影主要运动参数及钻孔电测试验的有关结果
Tab.1 The main motion parameters of high speed photography and the related results of electrical test

试验序号	钻孔方式	钻速 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	振动最大		钻孔电测试验的有关结果			
			基频/Hz	振幅/mm	冲击力 F/kN	冲击频率 f/Hz	钻进速度 $V/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	冲击能 E/J
1	冲击	4.04	33.28	1.7	1.47	31.74	4.17	45.85
2	旋-冲	5.92	32.16	2.5	2.36	31.74	5.92	45.85

2) 两种工况的钎杆轴向移动速度(钻速)和钻孔试验结果基本相符,其振动基频和凿岩机冲击频率一致。

3) 钎杆随机振动的产生来源于岩石的弹性,钎杆在冲击凿入时为一在冲击活塞激励下的强振系统,未被岩石吸收的能量反射回钎杆构成钎杆的振动,振动的随机性反映了破岩过程的随机特性。

试验 1 的钎杆轴向振动速度曲线如图 6 所示。

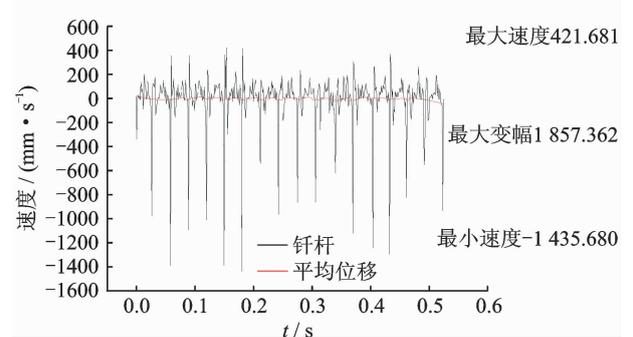


图 6 钎杆轴的振动速度曲线(试验序号:1)

Fig. 6 The vibration velocity curves of the drill rod (test No. : 1)

速度曲线表明:钎杆在旋冲钻进过程中其速度呈周期性变化,最大速度基频同冲击频率一致,为 33.28 Hz;振动幅度较大,其最大变幅接近 2 m/s;下向速度峰值显著高于上向速度峰值,下向和上向幅值比(1 435.680/421.681)达 3.4,该值随被冲击凿入岩石的力学特性不同而变化。

2.3.2 钎杆转动的高速摄影分析

试验 1 的钎杆转动高速摄影转速曲线如图 7 所

示(取样间隔 2 帧,共 658 帧,总时长 0.37 s)。

通过 Savitzky-Golay 平滑处理,平滑系数为 20,其转速曲线如图 8 所示。

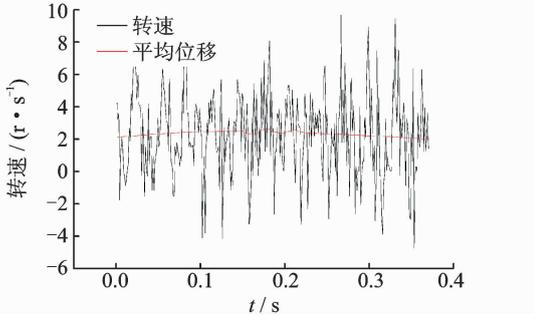


图 7 钎杆转速曲线

Fig. 7 The speed curve of the drill rod

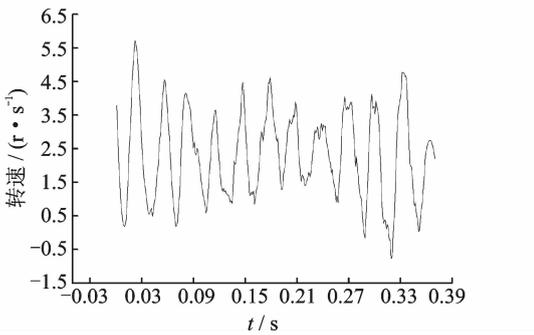


图 8 平滑处理后转速曲线

Fig. 8 The smoothed speed curve

由转速曲线分析得出以下几点。

1) 从长时域上看,钎杆分别在 600, 1 420, 2 280, 3 120, 3 960, 4 780, 5 600, 6 369, 7 100, 7 800 帧时完成一圈旋转,其平均周期为

$$T = \frac{7\ 820 - 600}{9} \times 5.5 \times 10^{-4} = 0.441\ 25$$

平均转速为 136 r/min,这和钻孔电测试验结果(134.8 r/min)基本一致。

2) 钎杆在旋转过程中,转速并非恒定不变,其转速在 9.6~−4.7 r/s 间变化,为一窄带随机振动过程,从图上看,在 0.004 5~0.348 9 s 之间,0.344 4 s 内出现 11 个振动周期,其基频为

$$f_r = \frac{11}{0.348\ 9 - 0.004\ 5} = 31.94\ \text{Hz}$$

这和冲击频率 31.74 Hz 基本一致,即转速和钎杆轴向位移的随机振动呈现显著的周期性互相关特性,在冲击后会出现旋转短暂停滞或反向旋转过程,这在本质上也反映了旋转-冲击破岩过程作用的相关性。

3) 在一个钎杆旋转周期中,前半周(冲击活塞回程)为加速段,由棘轮机构带动钎杆旋转;后半周(冲击活塞回程)为惯性段,在阻尼和旋切岩石阻力

的作用下逐渐减速至 0,且会出现负转速,将钎杆视为弹性扭杆,实质上为扭转振动过程。

2.3.3 机架振动分析

在观测钎杆运动过程的同时对其机架的振动特性进行测试分析,图 9 和 10 分别为试验序号 1,2 的机架振动位移曲线的比较:取样间隔 2 帧,共 930 帧,总时长 0.523 9 s;取样间隔 2 帧,共 1 010 帧,总时长 0.515 s。

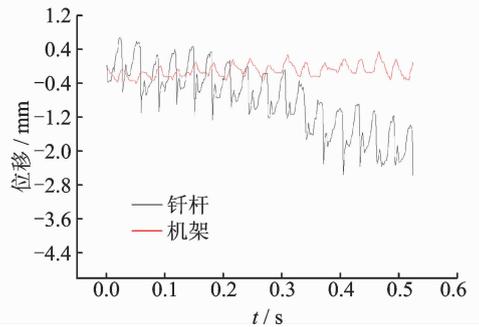


图 9 机架和钎杆振动位移曲线的比较(试验序号:1)

Fig. 9 Comparison of vibration displacement curve of the frame and the drill rod (test No. :1)

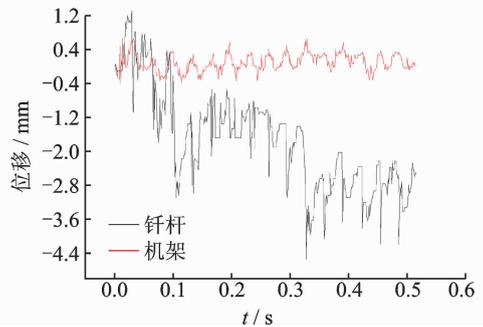


图 10 机架和钎杆振动位移曲线的比较(试验序号:2)

Fig. 10 Comparison of vibration displacement curve of the frame and the drill rod (test No. : 2)

可以看出机架振动基频和钎杆振动基频一样,均和冲击频率一致;其振幅分别为 0.5 和 0.7 mm,为钎杆振幅(1.7, 2.5 mm)的 29.4% 和 28%,可以看出机架振动为冲击运动带来的受迫振动,其振幅和频率均受冲击参数影响,其振动特性可为岩石钻探装备整体动载确定提供依据。

3 结束语

笔者用高速摄像技术研究用于液压旋冲钻进试验中,能够准确地观测液压旋冲钻进过程中钎杆标定点的瞬时和长时钻进速度、轴向振动和扭转振动变化,能准确读出钎杆钻进速度和旋转速度,并得出机架振动和钎杆振动的互相关性。高速摄影测量应

用简单,能准确捕获被测物体的运动信息,且不接触被测物体,不会对被测物体产生干扰,自动化程度高,相对于其他传统测试方法来讲,测试成本低,观测细节丰富,测试结果准确。

参 考 文 献

- [1] 李军. 液压凿岩机的发展与应用[J]. 有色金属: 矿山部分, 2008, 60(3): 36-38.
Li Jun. Development and application of hydraulic rock drill [J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2008, 60(3): 36-38. (in Chinese)
- [2] 高澜庆, 郭孝先. 液压凿岩机理论、设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 1-20.
- [3] 赵统武. 冲击钻进动力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 10-12.
- [4] 熊家泽, 于嘉君, 王筑生, 等. 钎杆工作应力的随机分析[J]. 矿冶工程, 2013, 33(6): 10-12.
Xiong Jiase, Yu Jiajun, Wang Zhusheng, et al. Random analysis of operating stress of drill rod [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 33(6): 10-12. (in Chinese)
- [5] 狄志勇. 液压凿岩机冲击性能测试方法的对比分析[J]. 凿岩机械气动工具, 1995(3): 30-36.
Di Zhiyong. Comparative analysis of measurement methods of hydraulic rock drill impact performance [J]. Rock Drilling Machinery and Pneumatic Tools, 1995(3): 30-36. (in Chinese)
- [6] 郭孝先, 王路, 狄志勇, 等. 液压凿岩机冲击性能及其试验方法[J]. 凿岩机械气动工具, 1994(1): 54-60.
Guo Xiaoxian, Wang Lu, Di Zhiyong, et al. Impact performance and its test method of hydraulic rock drill [J]. Drilling Machinery and Pneumatic Tools, 1994(1): 54-60. (in Chinese)
- [7] 黄志强, 宋嘉宁, 卜艳, 等. 冲击器性能测试方法研究现状与发展[J]. 凿岩机械气动工具, 2008(4): 1-5.
Huang Zhiqiang, Song Jianing, Bu Yan, et al. Research condition and developmental direction of the test method of impactor performance [J]. Drilling Machinery and Pneumatic Tools, 2008(4): 1-5. (in Chinese)
- [8] 许勤. 液压冲击器系统性能的测试与分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [9] 刘忠, 伍劲松, 李伟. 液压冲击机械测试原理与方法及试验研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(15): 1769-1772, 1818.
Liu Zhong, Wu Jinsong, Li Wei. Research on testing principles & methods and experimental research on hydraulic impact machine [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(15): 1769-1772, 1818. (in Chinese)
- [10] 丁冲冲, 杨国平, 梁翠平, 等. 液压冲击器性能测试方法的研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(4): 56-58.
Ding Chongchong, Yang Guoping, Liang Cuiping, et al. Research on performance testing method for hydraulic impactor [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(4): 56-58. (in Chinese)
- [11] 谭显详, 韩立石. 高速摄影技术[M]. 北京: 原子能出版社, 1990: 1-6.
- [12] 廖小翠, 郭学彬. 断药导爆管传爆过程的高速摄影试验研究[J]. 爆破, 2009, 26(1): 89-91, 95.
Liao Xiaocui, Guo Xuebing. Experiment study of high-speed photography on detonation propagating of explosive faults nonel [J]. Blasting, 2009, 26(1): 89-91, 95. (in Chinese)
- [13] 畅里华, 李作友, 肖正飞, 等. 高速摄影在流体动力学不稳定性研究中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1479-1482.
Chang Lihua, Li Zuoyou, Xiao Zhengfei, et al. Application of high-speed photography to hydrodynamic instability research [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1479-1482. (in Chinese)
- [14] 唐孝容, 高宁, 郝建中, 等. 高速摄影技术在常规战斗部实验中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(3): 105-106.
Tang Xiaorong, Gao Ning, Hao Jianzhong, et al. Application of high-speed photography to warhead [J]. Journal of Projects, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(3): 105-106. (in Chinese)
- [15] 王英杰, 阳宁, 金星. 水力提升管道大颗粒运动特性的高速摄影分析[J]. 泥沙研究, 2012(3): 64-69.
Wang Yingjie, Yang Ning, Jin Xing. High speed photographic analysis of characteristics of large particle movement in hydraulic lifting system [J]. Journal of Sediment Research, 2012(3): 64-69. (in Chinese)
- [16] 赵征, 苏生华. 高速摄影在焊接技术中的应用[C]// 第15次全国焊接学术会议论文集. 西宁: [s. n.], 2010: 827-831.
- [17] 肖定军, 郭学彬, 刘恺德, 等. 爆破作用下岩体层间充填土运动的高速摄影试验[J]. 西南科技大学学报, 2008, 23(3): 33-37.
Xiao Dingjun, Guo Xuebin, Liu Kaide, et al. High-speed photography test on the motion of interlayer fill soil of rock mass under the action of blasting [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2008, 23(3): 33-37. (in Chinese)
- [18] 齐曼卿, 夏元友, 肖正学, 等. 弹丸侵彻高强度混凝土的高速摄影试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(S2): 178-184.
Lin Manqing, Xia Yuanyou, Xiao Zhengxue, et al. Experimental investigation of projectile penetrating high strength concrete target with high-speed photography [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 178-184. (in Chinese)



第一作者简介: 郑皓, 男, 1981年6月生, 博士、高级工程师。主要研究方向为采矿工程。曾发表《Simulation of fuzzy PID control of heave compensation system for deep-ocean mining》(《World Journal of Modelling and Simulation》2012, Vol. 8, No. 1)等论文。
E-mail: 13786187617@126.com

