

基于压电力传感器冲击功的检测方法研究

吴召明¹, 陆洪智^{*2}

(1. 山东省第八地质矿产勘查院, 山东 日照 276800; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 液动冲击回转钻探具有防止岩心堵卡、提高勘探效率的重要作用, 冲击器冲击功的无损精确检测一直是困扰冲击器研究机构及生产单位的难题。本文利用压电力传感器、电荷放大器将冲击器的冲击力波形转换为电压波形信号, 再利用MP4221采集板和基于Visual C++语言研发的实时采集、显示软件将冲击力波形采集到PC机, 并实时显示冲击力波形曲线; 依据动量定理和冲量定理, 通过研究冲击器冲击功与最大冲击力的关系, 确定了冲击功与最大冲击力的关系式, 即冲击功与最大冲击力的平方成正比。文章通过标定实验台架进行了可行性验证, 实验表明, 利用压电力传感器可以准确地检测出冲击力波形, 结合标定台标定出的“冲击功-冲击力”关系式系数可以准确地计算出对应的冲击功波形。

关键词: 冲击器; 冲击力; 冲击功; 压电力传感器; 电荷放大器; MP4221采集板; 液动冲击回转钻探

中图分类号: P634.5⁺6; TN98 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)04-0055-06

Research on the impact energy detection method based on piezoelectric force sensors

WU Zhaoming¹, LU Hongzhi^{*2}

(1.No.8 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province,
Rizhao Shandong 276800, China;

2.Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: The impactor is one of the important tools for preventing core blockage and improving exploration drilling efficiency of drilling. The non-destructive and accurate detection of impact energy has been a difficult issue for impactor manufacturers and research institutions. In this study, the impactor impact waveform is successfully converted to the voltage waveform signal by employing the piezoelectric force sensor and the charge amplifier. After that, the signal will be collected and interpreted again by PC through the MP4221 acquisition system and the real-time acquisition and display software based on Visual C++. According to the theorems of momentum and impulse, the specific relationship between impact energy of the impactor and the maximum impact force is built: the impact energy is proportional to the square of the maximum impact force. Besides, the corresponding feasibility is verified by the calibration experiment bench. The experiment shows that the impact force waveform can be accurately detected by using the piezoelectric sensor, and the corresponding impact power waveform can be accurately calculated by the relationship coefficient calibrated by the calibration bench between impact energy and impact force.

Key words: impactor; impact force; impact energy; piezoelectric force sensor; charge amplifier; MP4221 acquisition system; hydraulic percussive rotary drilling

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-06-25 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.04.008

第一作者: 吴召明, 男, 汉族, 1971年生, 副书记, 高级工程师, 地质工程专业, 长期从事钻探工程经营管理和钻探技术研究工作, 山东省日照市开发区秦皇岛路18号, wu466653@163.com。

通信作者: 陆洪智, 男, 汉族, 1974年生, 副教授, 地质工程专业, 博士, 长期从事钻探机具及智能钻探相关领域研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, 18971576988@189.cn。

引用格式: 吴召明, 陆洪智. 基于压电力传感器冲击功的检测方法研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(4): 55-60.

WU Zhaoming, LU Hongzhi. Research on the impact energy detection method based on piezoelectric force sensors[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4): 55-60.

0 引言

液动冲击回转钻探具有防止岩心堵卡、提高勘探效率的重要作用,近几年被岩心钻探、石油钻井等行业广泛应用。影响液动冲击回转钻探中冲击器工作性能的关键参数之一就是冲击功。

工程上关于冲击功的测量只是一种模糊的概念,大多数冲击器的出厂说明书中标注的冲击功只是一种理论计算值或者经验值,对于冲击器在实际工作中的真实冲击功(或碎岩能量)并不能准确的进行出厂标定^[1]。目前测量不同型号冲击器冲击功的方法主要包括:应力波法、液(气)压测量法^[2]、末速度法、机械测量法、示波图法、高速摄影法以及基于计算机模拟软件仿真分析等方法^[3-4]。

液(气)压测量法、机械测量法、示波图法以及基于计算机模拟软件仿真分析法检测冲击功原理简单,但是测量误差较大。末速度法和高速摄影法的检测对象都是冲击器冲锤,因此需要对原有冲击器进行外观改造才能进行测量,大大提高了测试成本^[5]。

利用应力波法对冲击力波形进行采样,可以避免由于对原冲击器外观进行改造而造成设备破坏,同时可大幅提高测量精度^[6]。

1 冲击力与冲击功关系模型

1.1 冲击模型的组成

当高速运动的冲锤冲击铁砧时,冲锤的动能通过碰撞铁砧后以应力波的方式传递给钻头,从而将冲锤的动能转化为破碎岩石的能量。在测试过程中,我们将钻头替换为压电力传感器^[7-8]即可测定铁砧上产生的冲击力,进而可以计算得到冲击功。

为了准确计算冲击器的冲击功,我们需要研究压电力传感器采集到的电信号(代表冲击力)与冲击功的对应关系。按照实际工况,可以设定冲锤、铁砧、压电力传感器(替换钻头)的安装部署示意图如图1所示,把冲锤刚接触铁砧开始冲击到冲击结束这一段作为整个研究的冲击过程。

1.2 对应关系推导

根据图1所示,在不考虑能量损耗的情况下可以认为冲锤的动能全部转换为冲击功^[8],即冲锤接触铁砧时的速度 v 在冲击结束后变为零,根据动能定理^[9]则有:

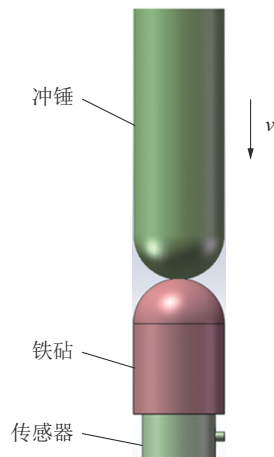


图1 冲击模型示意

Fig.1 Schematic diagram of the impact model

$$W = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

式中: W ——冲击过程冲锤对铁砧做的功,即冲击功,J; m ——冲锤质量,kg; v ——冲锤接触铁砧时的速度,m/s。

再根据动量定理则有:

$$\int F(t)dt = mv \quad (2)$$

式中: $F(t)$ ——冲击过程中任意一时刻,铁砧所受的冲击力,N; t ——冲击过程中的任意一时刻,s; m ——冲锤质量,kg; v ——冲锤接触铁砧时的速度,m/s。

设 \bar{F} 为冲击过程的有效平均冲击力,则有:

$$\bar{F}T = \int F(t)dt \quad (3)$$

式中: \bar{F} ——冲击过程的有效平均冲击力,N; T ——整个冲击过程所用的时间,s,根据文献[10-12]可知,冲击材料和形状一定时,则整个冲击过程所用的时间为定值。

对式(2)和式(3)整理变形可得:

$$\bar{F}T = mv \quad (4)$$

联合式(1)和式(4)整理可得:

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{(\bar{F}T)^2}{2m} \quad (5)$$

任意画出一条冲锤与铁砧冲击过程力与冲击时间的关系曲线(如图2所示),设:

$$\bar{F} = kF_{\max} \quad (6)$$

式中: \bar{F} ——冲击过程的有效平均冲击力,N; F_{\max} ——冲锤所受的最大冲击力,N; k ——用最大冲击

力 F_{\max} 计算有效平均冲击力的系数。

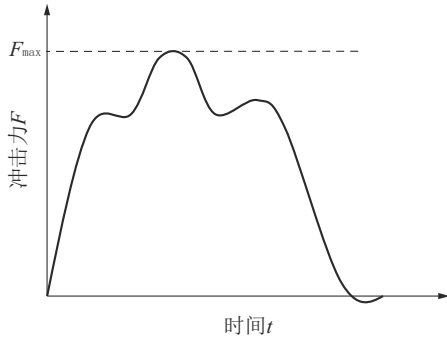


图2 冲击过程中冲击力与时间关系曲线

Fig.2 Curve of impact force vs time during impacting

把式(6)带入式(5)中,可得:

$$W = \frac{k^2 T^2}{2m} F_{\max}^2 \quad (7)$$

由于式(7)中在冲击材料和形状一定时 k 、 T 、 m 均为常数,因此可以确定冲击功 W 与最大冲击力 F_{\max} 的平方成正比。假设 $K = \frac{k^2 T^2}{2m}$, 则式(7)变为:

$$W = K F_{\max}^2 \quad (8)$$

2 最大冲击力和冲击功对应关系系数标定

2.1 标定台架设计及其工作原理

由于压电力传感器在冲击力的作用下会产生电荷,再经过电荷放大器进行放大、归一化,从而得到在冲击力作用下的电压信号(一般为 $-5 \sim +5$ V),电压信号经过高精度 AD 转换^[13]可以得到对应的冲击力。

由式(8)可知,要想准确计算冲击器的冲击功,只要测定最大冲击力 F_{\max} 和对应关系系数 K 即可。对应关系系数 K 可以由标定台架进行多次测试标定后进行曲线拟合获取。

对应关系系数 K 的标定台架结构如图3所示。标定台架主要包括外管、冲锤、铁砧、短接、传感器安装架、压电力传感器等部分。其工作原理为:冲锤可以在外管内做自由落体运动;铁砧和外管采用轴套连接,并且可以沿外管轴线自由活动 $30 \sim 50$ mm;短接两端分别用螺纹连接在铁砧底部和传感器安装架顶部;传感器安装架底部挖空,并被盖板压紧。标定前先测量冲锤的质量 m ,标定时将冲锤提高到不同高度 h 进行自由落体运动,则冲锤的动能

为 $W = mgh$,在冲击瞬间压电力传感器产生电荷,经过电荷放大器^[14]、MP4221 采集板将对应的电荷信号转换成数字信号,再经过 PC 机采集软件采集、计算可得到冲击力数据。

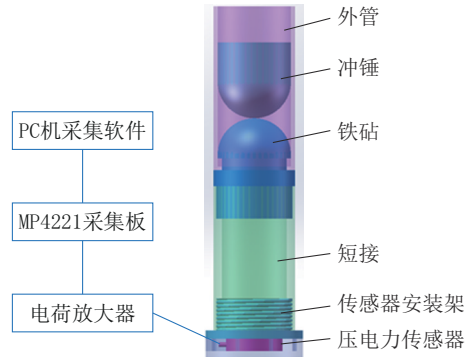


图3 标定台架结构示意图

Fig.3 Structure of the calibration bench

将多组标定数据按照式(8)计算对应关系系数 K ,由于实验过程中测量高度、管壁摩擦、空气阻力等原因会产生误差,因此取所有计算出来系数的平均值。

2.2 冲击器及传感器选择

实验选定的是核工业北京地质研究院刘晓阳研发的 $\varnothing 73$ mm 液动冲击器,其冲锤质量为 8 kg,设计最大冲击功为 50 J。

压电力传感器是利用压电石英晶体的纵向压电效应设计而成的,当沿晶体的 X 轴(此处的 X 轴是指石英晶体坐标系的 X 轴,相当于传感器的 Z 轴,即“灵敏轴”)方向施加力 F 后,晶体发生变形,并产生极化现象。因而在晶体两表面产生大小相等、极性相反的电荷 Q ,其电荷 Q 的大小与作用力 F 成正比,与石英晶体的几何尺寸无关,即纵向压电效应。电荷 Q 与作用力 F 有如下关系:

$$Q = Fd \quad (9)$$

式中: Q ——电荷的数值, pC; F ——沿传感器 Z 轴方向上的作用力, N; d ——石英晶体的压电模数, pC/N。

本项目选用的压电力传感器型号为 LC2304(外观见图4),量程为 300 kN,灵敏度为 0.0141 mV/N。主要技术指标见表1。

LC23系列压电力传感器内装 IC,是一款集成了电路放大器的压电石英力传感器,它将传统的压



图4 压电力传感器

Fig.4 Piezoelectric force sensor

表1 LC2304压电力传感器主要技术指标

Table 1 Main specifications of LC2304 piezoelectric force sensor

型号	量程/kN		质量/g	外形尺寸/mm
	压缩	拉伸		
LC2304	300	100	350	Ø68.00×16.00(高)

电石英力传感器与电荷放大器集于一体,能直接与记录和显示仪器连接,简化了测试系统,提高了测试精度和可靠性。

LC23系列压电力传感器采用2~20 mA的恒定电流,典型值为4 mA;激励电压为18~30 VDC,典型值为24 VDC;线性度 $\leq 1\%$ 。

2.3 标定数据及标定系数的确定

实验室部分采集的标定数据见表2。

由表2中的数据可以看出:系数 K 在0.0007~0.0008之间波动,将表2中的“冲击力”数值平方后和“冲击功”数值进行线性拟合,如图5所示,通过线性拟合方程式可知系数 $K=0.000708$;也可将表2中“系数 K ”的平均值作为冲击功计算系数 K ,经过计算平均值得 $K=0.000707$ 。由系数 K 两种求解方法得到的值可以看出,本次标定数据准确率较高(仅小数点后第6位数字差1)。

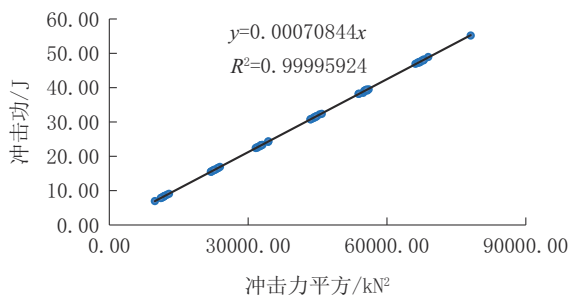


图5 线性拟合

Fig.5 Linear fitting

3 实际数据的采集与计算验证

为验证冲击器实际工作中采集数据的正确性,基于Visual C++语言^[15]开发了高速数据连续采集软件,软件界面如图6所示,实际采集数据如图7所示,根据系数 K 计算出来的冲击功波形如图8所示。



图6 数据连续采集软件主界面

Fig.6 Main interface of the continuous data acquisition software

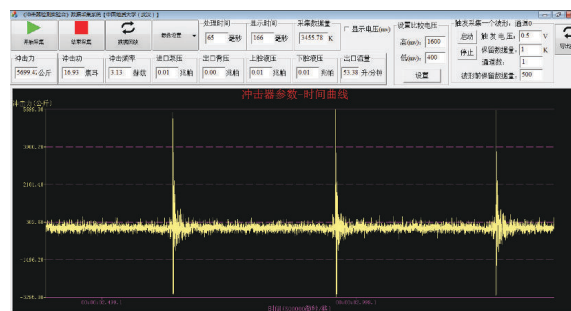


图7 实际采集到的冲击力数据

Fig.7 Actually collected impact force data

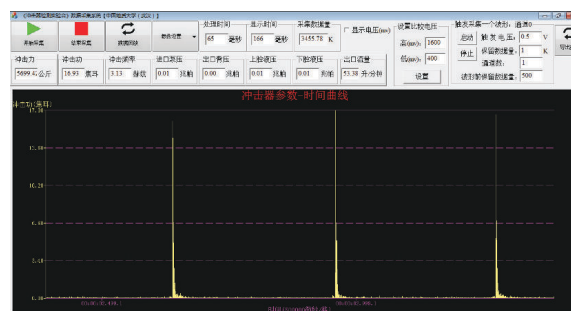


图8 计算得到的冲击功数据

Fig.8 Calculated impact energy data

由图7和图8可以看出,最大冲击力在5600~5700 kg (56~57 kN) 范围波动,对应的冲击功在16~17 J波动。采集到的波形图可明显的显示出冲击器的工作状态。

表 2 部分采集的标定数据

Table 2 Part of the collected calibration data

冲锤提升高度/mm	传感器输出电压/V	锤重/kg	冲锤势能(即冲击功)/J	最大冲击力/kN	系数 K
102.00	1.4995	8.00	7.9968	106.34751773	0.00070707
103.00	1.5137	8.00	8.0752	107.35460993	0.00070067
107.00	1.5354	8.00	8.3888	108.89361702	0.00070745
108.00	1.5402	8.00	8.4672	109.23404255	0.00070962
105.00	1.5261	8.00	8.2320	108.23404255	0.00070271
100.00	1.4868	8.00	7.8400	105.44680851	0.00070510
203.00	2.1149	8.00	15.9152	149.99290780	0.00070741
207.00	2.1415	8.00	16.2288	151.87943262	0.00070354
199.00	2.0949	8.00	15.6016	148.57446809	0.00070677
198.00	2.0883	8.00	15.5232	148.10638298	0.00070767
199.00	2.0950	8.00	15.6016	148.58156028	0.00070671
205.00	2.1222	8.00	16.0720	150.51063830	0.00070947
204.00	2.1215	8.00	15.9936	150.46099291	0.00070648
296.00	2.5522	8.00	23.2064	181.00709220	0.00070830
298.00	2.5641	8.00	23.3632	181.85106383	0.00070648
288.00	2.5228	8.00	22.5792	178.92198582	0.00070531
286.00	2.5080	8.00	22.4224	177.87234043	0.00070870
289.00	2.5204	8.00	22.6576	178.75177305	0.00070911
309.00	2.6125	8.00	24.2256	185.28368794	0.00070567
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
504.00	3.3373	8.00	39.5136	236.68794326	0.00070533
500.00	3.3237	8.00	39.2000	235.72340426	0.00070547
503.00	3.3235	8.00	39.4352	235.70921986	0.00070979
599.00	3.6265	8.00	46.9616	257.19858156	0.00070991
612.00	3.6665	8.00	47.9808	260.03546099	0.00070958
604.00	3.6500	8.00	47.3536	258.86524823	0.00070665
624.00	3.7016	8.00	48.9216	262.52624113	0.00070983
607.00	3.6535	8.00	47.5888	259.11347518	0.00070880
604.00	3.6420	8.00	47.3536	258.29787234	0.00070976
603.00	3.6415	8.00	47.2752	258.26241135	0.00070878
615.00	3.6764	8.00	48.2160	260.73758865	0.00070922
607.00	3.6561	8.00	47.5888	259.29787234	0.00070779
612.00	3.6739	8.00	47.9808	260.56028369	0.00070673
704.00	3.9405	8.00	55.1936	279.46666667	0.00070669

4 主要结论与展望

本文利用动量定理和冲量定理,通过研究基于压电式测力传感器冲击器冲击功与冲击力的关系,确定了冲击功与冲击力的关系式,并对关系式进行了实验验证,得出如下结论:

(1)利用压电力传感器配合冲击器的标定实验,可确定冲击力和冲击功的对应关系,能够进行无损检测冲击器的最大冲击功。

(2)通过对选定的 $\varnothing 73$ mm 液动冲击器进行冲击功测试,发现该款液动冲击器检测的最大冲击功与理论最大冲击功相比数值偏小,需要在不同泵压、

泵量等参数的情况下进行测试,从而找出获得最大冲击功的工作参数。

(3)为精确地得到冲击功计算系数,需要尽可能多地进行标定采样,同时人工测量冲锤高度、冲锤质量时应尽可能采用高精度的测量手段。

参考文献(References):

- [1] 李运升,王耀邦.冲击器回转试验台冲击功的计算机测量方法[J].中国水运(学术版),2007(11):72-73.
LI Yunsheng, WANG Yaobang. Computer measurement method for impact energy of impactor rotary test-bed[J]. China Water Transport, 2007(11):72-73.
- [2] 丁问司.液压冲击机构冲击性能在线检测方法[J].液压与气动,2001(9):35-37.
DING Wensi. The on-line test method of hydraulic impactor's performance[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2001(9):35-37.
- [3] 张昊,李晶.液动冲击器测试实验台设计[J].河南科技,2013(19):106.
ZHANG Hao, LI Jing. Design of hydraulic impactor test bench[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2013(19):106.
- [4] 李小洋,李宽,张永勤,等.新型涡轮扭力冲击器的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):40-43,49.
LI Xiaoyang, LI Kuan, ZHANG Yongqin, et al. Experiment on a new turbine torsional impactor[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(12):40-43,49.
- [5] 梁家玮.液动冲击器测试实验台设计和研建[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
LIANG Jiawei. The design and building of hydraulic hammer test stand[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [6] 周志鸿,许同乐,高丽稳.液压破碎锤冲击能检测方法分析[J].建筑机械,2004(8):54-55.
ZHOU Zhihong, XU Tongle, GAO Liwen. Analysis of measurement method for impact energy of hydraulic breaking hammer[J]. Construction Machinery, 2004(8):54-55.
- [7] 张晓飞,王新杰,吕中虎,等.基于压电传感器的地质灾害监测系统[J].自动化与仪表,2022,37(3):44-49.
ZHANG Xiaofei, WANG Xinjie, LÜ Zhonghu, et al. Design of geological disaster monitoring system based on piezoelectric sensor[J]. Automation & Instrumentation, 2022,37(3):44-49.
- [8] 凿岩机冲击功的电测法[J].凿岩机械气动工具,1979(2):30-37.
Electric measurement of impact energy of rock drill[J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 1979(2):30-37.
- [9] 施小群.力学功与能的区别联系研究[J].教育教学论坛,2014(27):94-96.
SHI Xiaoqun. Study on the difference between mechanical work and energy[J]. Education Teaching Forum, 2014(27):94-96.
- [10] 马明江,陈丽.冲击作用时间的分析计算[J].平顶山工学院学报,2004(4):68-70.
MA Mingjiang, CHEN Li. Analysis and calculation on working time of collision[J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology, 2004(4):68-70.
- [11] 凌邦国.碰撞时间的精确测定及其应用[J].南通工学院学报(自然科学版),2002(3):4-6.
LING Bangguo. High precision measurement of collision time and its application[J]. Journal of Nantong Institute of Technology(Natural Science), 2002(3):4-6.
- [12] 徐芝纶.弹性力学[M].北京:高等教育出版社,1999.
XU Zhilun. Elasticity[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [13] 党元一.AD转换精度对温度测量的影响[J].企业技术开发,2015,34(6):179-180.
DANG Yuanyi. Influence of AD conversion accuracy on temperature measurement[J]. Technological Development of Enterprise, 2015,34(6):179-180.
- [14] 杨志文,赵冬青,焦新泉,等.一种微弱电荷检测放大电路设计[J].电子元件与材料,2019,38(2):71-75.
YANG Zhiwen, ZHAO Dongqing, JIAO Xinquan, et al. Research and design of weak charge detection amplification circuit[J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(2):71-75.
- [15] 曹琳,彭圆,张风珍,等.基于Visual C++的声信号分析系统图形显示界面问题的研究[J].舰船电子工程,2016,36(6):76-78.
CAO Lin, PENG Yuan, ZHANG Fengzhen, et al. Problem of graphic display interface in acoustic data-sampling system based on Visual C++[J]. Ship Electronic Engineering, 2016,36(6):76-78.

(编辑 荐华)