

某型强夯机单抽施工法夯击能效率实验研究

张俊强¹, 杨帆¹, 汤迎红^{2*}, 米承继², 吕震泽²

(1. 湖南博邦重工有限公司, 湖南 常德 410600; 2. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对某型强夯机快速动态冲击过程中能量损失理论计算不精准、接触式测量方法有偏差等技术瓶颈, 本文开展了基于非接触式方法测试某型强夯机单抽施工法的夯击能效率实验研究。实验使用美国 Phantom Miro M310 高速摄影机, 采用非接触式动态测量方式, 对非脱钩施工(单抽施工)与脱钩施工两种工作状态进行数据采集。通过分析计算出夯锤撞击地面动态过程中的瞬时速度响应, 对比了脱钩与非脱钩工况时3种不同质量的夯锤在3种不同高度下的能量损耗率。考虑到实验时夯锤在同一位置落锤两次, 高速摄像机无法测出第二锤的真实夯击面, 故通过有限元的方法对工况进行模拟仿真, 对夯锤瞬时落地速度进行修正。实验结果表明: 相同质量下, 能量损耗率随夯锤提升高度的增加而降低; 相同高度下, 能量损耗率随夯锤质量的增加而降低; 单抽施工法的能量损耗率可以控制在8%以内。本文为强夯机夯击能效率的精准测试提供了技术依据, 为降低单抽施工法能效损耗提供了思路, 同时也为今后同类重工机械的使用与改进设计积累了经验数据。

关键词: 强夯机; 夯击能; 单抽施工法; 能量损耗率; 非接触式测量

中图分类号: TU662

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)04-0319-09

Experimental study on compaction energy efficiency of single-rope construction method for a dynamic compactor

ZHANG Junqiang¹, YANG Fan¹, TANG Yinghong^{2*}, MI Chengji², LV Zhenze²

(1. Hunan Bobang Heavy Industry Co., Ltd., Changde 410600, Hunan, China;

2. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, China)

Abstract: Aiming at the technical bottlenecks such as the inaccurate theoretical calculation of the energy loss in the rapid dynamic impact process and the deviation of the contact measurement method, this study conducted experimental research on the compaction energy efficiency of single-rope construction method of a certain type of dynamic compactor based on the non-contact method. The experiment employed the American Phantom Miro M310 high-speed camera for non-contact dynamic measurement, collecting data under two working conditions: non-decoupling construction (single-rope construction) and decoupling construction. By analyzing the instantaneous velocity of the hammer, the energy loss rates of three different hammer weights at three different heights were compared under decoupling and non-decoupling conditions. Considering that the hammer fell twice in the same position in the experiment, the high-speed camera could not measure the real tamping surface of the second hammer, the working condition was simulated by the finite element method, and the instantaneous landing speed of the hammer was corrected. The experimental results show that under the same mass, the energy loss rate decreases with the increase of the height of the hammer. At the same height, the energy loss rate decreases with the increase of hammer mass. The energy loss rate of single-rope method can be controlled within 8%. This paper provides technical basis for accurate test of the compaction energy efficiency of dynamic compactor, offers insights for reducing the energy loss of single-rope construction method, and also accumulates empirical data for the use and improvement design of similar heavy machinery in the future.

Key words: dynamic compactor; compaction energy; single-rope construction method; energy loss rate; non-contact measurement

收稿日期: 2023-12-13

作者简介: 张俊强(1970—), 男, 湖南长沙人, 高级机械工程师, 主要从事强夯机的设计、研发与制造。E-mail: 951829998@qq.com。

*通信作者: 汤迎红(1973—), 男, 湖南醴陵人, 硕士, 副教授, 主要从事工程机械设计与测试技术工作。E-mail: 335694300@qq.com。

0 引言

强夯机是基于强夯法原理设计的,用于土石方填平后进行夯实的机械设备^[1-2]。近40年来,我国工程界先后将强夯技术应用于山区高填方、围海造地等场地形成后的地基处理和湿陷性黄土、淤积土、砂土、粉质黏土等原地基处理,取得了良好的加固效果,具有明显的社会效益和经济效益^[3]。强夯机的工作原理是通过起升机构将夯锤提升至指定高度后,夯锤下落,夯击地面。强夯机的工作状态一般分为两种:(1)使用脱钩器释放夯锤,使其自由下落,脱钩施工;(2)不需要脱钩器,夯锤和钢丝绳一起下落的非脱钩施工,即为单抽施工法。脱钩施工时,每完成一次夯击都需要将脱钩器与夯锤重新连接,有时候还需要人工协助,因此这种方式的工作效率和安全性较低。单抽施工时,夯锤可以连续夯击,工作效率和安全性能明显提高,但这种工作状态下,夯锤下落时会受到工作机构的牵引阻力,夯击能的损耗会增加。因此,在合理的能量损耗下提高工作效率和安全性是强夯机设备制造方和施工方的共同目标,故测试出脱钩和单抽两种工作方式的夯击能效率,并将结果进行对比分析,验证单抽施工的可行性很有必要^[4-6]。

李建青等^[2]采用接触式测量方法,通过测试强夯机夯锤下落过程中的加速度,对加速度积分,得到夯锤落地速度和夯高,进而计算得到强夯机夯击能效率。魏双羽等^[7]利用光学测量传感器与接触式传感器集成方法,建立多轴测量系统,开展了叶片截面封闭曲线测量,并验证了该方法的可行性。童晓艳等^[8]设计了一种利用磁性编码器测量扭齿角度的接触式测量方案,测试出扭齿的角度。

接触式测量方法具有读取数据直接的优点。但在本次实验中,夯锤是动态的,因此应变片、数据线与夯锤的连接比较麻烦,且夯锤夯击时巨大的冲击极有可能导致应变片脱落,故本文采取的测试方法为非接触式测量法。该方法是以光电、电磁等技术为基础,在不接触被测物体表面的情况下,就能得到物体表面参数。此前有吕梦璐等^[9]基于此类方法,采用高速摄像技术对落果规律进行分析研究,故此方法是可行的。

本实验采用高速摄像机的自动触发工作方式,首先对夯锤夯击地表的瞬时过程进行拍摄,然后将拍摄视频导入视频处理软件进行分析与计算,通过对比连续拍摄的两张图片,得出物体的位移变化与

时间间隔的比值,即为瞬时速度^[10-14]。再基于能量守恒定律计算得到夯击能损耗率,最后利用有限元法模拟夯锤冲击地面的动态过程,修正夯击能损耗率的计算结果。

1 实验原理

1.1 高速摄像成像原理

高速摄像机是具有高速拍摄频率的相机,可以在极短的时间内连续拍摄大量照片。高速摄像动态分析就是根据所拍摄画面上的目标点位置、形状等特征对其定位,再比较不同时刻目标点的变化情况,得出目标的所需参数。高速摄像机的成像原理如图1所示^[15]。

根据高速摄像机成像原理,假设画面中位移为 c ,实际位移为 a ,像距为 x ,物距为 b ,镜头直径为 d ,则有:

$$a = \frac{cx + d(b+x)}{b} \quad (1)$$

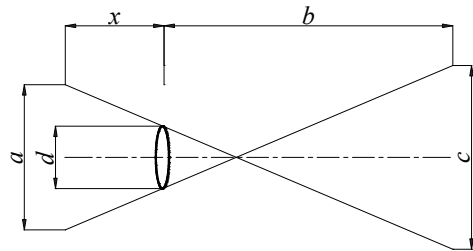


图1 高速摄像机的成像原理

Fig. 1 Imaging principle of high-speed camera

1.2 动态分析过程

建立参考平面,该平面与目标点分析平面平行,如图2所示。实验准备时,测量参考平面及目标点到相机的距离分别为 B 、 B_1 ,测量参考平面上基准点 M_1 至 M_2 的距离为 C ,其在相机画面内有 p 个像素间隔点,总距离为 A ,镜头直径 d 及像距 X 为高速相机的固有参数。则根据式(1)可知,每个像素点对应的实际距离 Y 为^[15]:

$$Y = \frac{A}{p} = \frac{CX + d(B+X)}{pB} \quad (2)$$

假设目标点 N 在一段时间内从 N_1 运动到 N_2 ,运动距离为 C_1 。假设两个时间点的定格画面之间在运动分析方向有 q 个像素间隔点,距离为 A_1 ,则根据式(1)可知,运动距离 C_1 为:

$$C_1 = \frac{B_1 A_1 - d(B_1 + X)}{X} \quad (3)$$

$$A_1 = Yq \quad (4)$$

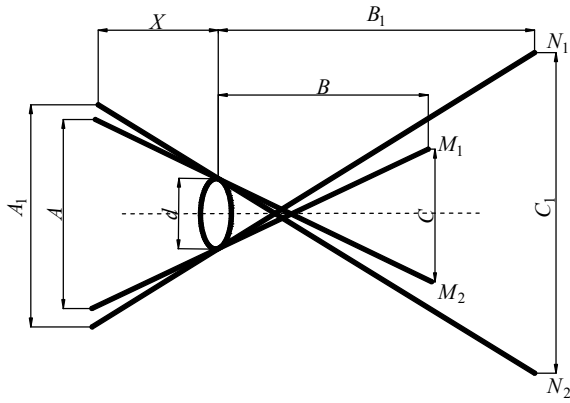


图2 参考平面与目标点的运动分析

Fig. 2 Motion analysis of the reference plane and the target points

本实验要测量的是夯锤落地时的瞬时速度, 通过高速摄像机连续拍摄到的夯锤落地瞬间的两张图片, 计算两张图片中目标点的位移与时间间隔的比值, 得到瞬时速度 v_1 :

$$v_1 = \frac{C_1}{\Delta t} \quad (5)$$

1.3 能量守恒定律

根据能量守恒原理, 夯锤从高度 h 自由落体, 其落地瞬间的动能理论上与重力势能相等, 则有:

$$E_{动} = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (6)$$

$$E_{势} = mgh \quad (7)$$

$$E_{动} = E_{势} \quad (8)$$

联立式 (6) ~ (8) 得到:

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (9)$$

式中: v_0 为夯锤落地的理论瞬时速度, m/s; m 为夯锤质量, kg; h 为夯高, m; g 为重力加速度, 取值为 9.8 m/s^2 。

在实际工作时, 夯锤下落过程中会受到空气阻力, 单抽施工时还会受到来自工作机构的牵引阻力, 夯锤落地瞬间实际动能为:

$$E_{实际} = \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (10)$$

式中: v_1 为夯锤落地的实际瞬时速度, m/s。

则强夯机夯击能速度损耗率为:

$$\eta_{速度} = \frac{|v_0 - v_1|}{v_0} \times 100\% \quad (11)$$

能量损耗率为:

$$\eta_{能量} = \frac{\left| \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \right|}{\frac{1}{2}mv_0^2} \times 100\% = \frac{|v_0^2 - v_1^2|}{v_0^2} \times 100\% \quad (12)$$

由式 (12) 可知, 要求出夯击能损耗率, 关键是要测得夯锤落地时的瞬时速度 v_1 。

2 实验过程

2.1 实验仪器及现场

本研究选择美国 Phantom Miro M310 型高速摄像机进行测试, 其拍摄频率为 3 200 帧/s。高速平面摄像测试系统由一个高速摄像镜头、图像回放转化系统、配套笔记本电脑、连接镜头和电脑的若干数据线、三脚架等组成。测试仪器及测试现场分别如图 3 和图 4 所示。



图3 测试仪器

Fig. 3 Testing instrument



(a) 非脱钩施工

(b) 脱钩施工

图4 测试现场

Fig. 4 Test site

2.2 实验步骤

- (1) 通过实物尺寸与图像尺寸标定得到高速摄像机的拍摄比例尺;
- (2) 夯锤下落至拍摄图像指定区域, 高速摄像

机自动触发开始拍摄;

(3) 保存夯锤下落至地面的拍摄片段;

(4) 使用高速摄像机软件测量模块处理夯锤落地速度。

3 实验数据及数据分析

强夯机夯击能是用夯锤的质量 (t) 或者重力 (kN) 乘以夯锤起吊的高度 (m) 计算得出的, 单位是 t·m 或者 kN·m。在实际工作中, 强夯机锤重的选取一般以 4~5 t 为一个阶梯。

本次实验强夯机最大提升高度为 20 m, 在单抽施工时额定锤重为 17.5 t, 即理论夯击能为 350 t·m。因此, 本次实验选择了 18.5 t (直径 $d=2.35$ m、高度 $h=0.90$ m) 及其上下两个等级的 14.0 t ($d=2.80$ m、 $h=0.28$ m) 和 23.5 t ($d=2.50$ m、 $h=0.58$ m) 夯锤, 选取分别为 8 m、13 m 和 18 m 的 3 种测试高度, 实验夯击能范围在 112~423 t·m, 其目的是为了获得实验机型夯击能损耗率与夯锤质量、提升高度以及总夯击能的关系, 为强夯施工方案的选择提供参考。

3.1 单抽施工

使用高速摄像机间接测得质量为 14.0 t、18.5 t、23.5 t 的 3 种夯锤分别在 8 m、13 m、18 m 高度下单抽施工时的落地速度 (每种高度下重复测 5 次), 测量数据如表 1~3 所示。

表 1 8 m 高度下测得的速度
Table 1 Speed measured at 8 m height

次数	14.0 t 锤速度/ (m/s)	18.5 t 锤速度/ (m/s)	23.5 t 锤速度/ (m/s)
1	11.811 1	12.161 1	12.097 6
2	10.779 7	11.502 1	12.220 2
3	11.901 1	12.693 5	11.833 3
4	11.800 3	12.291 8	12.290 5
5	10.589 1	11.020 5	12.199 7

表 2 13 m 高度下测得的速度
Table 2 Speed measured at 13 m height

次数	14.0 t 锤速度/ (m/s)	18.5 t 锤速度/ (m/s)	23.5 t 锤速度/ (m/s)
1	15.529 1	15.962 8	15.520 8
2	15.346 9	15.736 1	15.820 2
3	15.044 5	15.410 6	15.566 4
4	14.031 8	14.316 9	15.791 1
5	15.144 8	15.823 5	15.394 1

表 3 18 m 高度下测得的速度
Table 3 Speed measured at 18 m height

次数	14.0 t 锤速度/ (m/s)	18.5 t 锤速度/ (m/s)	23.5 t 锤速度/ (m/s)
1	18.125 0	18.367 9	18.383 2
2	18.067 1	18.092 8	18.681 7
3	18.950 2	18.488 1	18.694 5
4	17.660 7	19.168 1	18.742 7
5	18.734 9	18.511 7	18.931 7

能量损耗率分析步骤如下: (1) 将夯锤的提升高度 h 代入到式 (9) 中, 求出 3 种实验夯锤在 3 种实验高度下工作时落地的理论瞬时速度 v_0 ; (2) 将表 1~3 中的 5 次瞬时速度分别计算平均值, 得到不同高度和不同夯锤质量所对应的平均速度 \bar{v}_1 ; (3) 将 v_0 、 \bar{v}_1 代入式 (12), 计算出同一高度下不同夯锤质量以及同一夯锤质量下不同高度的能量损耗率, 对测得的能量损耗率数据进行拟合, 得到拟合方程, 拟合方程的曲线图分别如图 5 和图 6 所示。

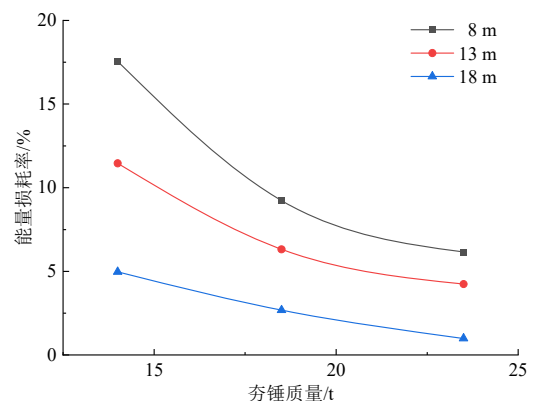


图 5 同一高度下不同夯锤质量的能量损耗率

Fig. 5 Energy loss rate of different masses at the same height

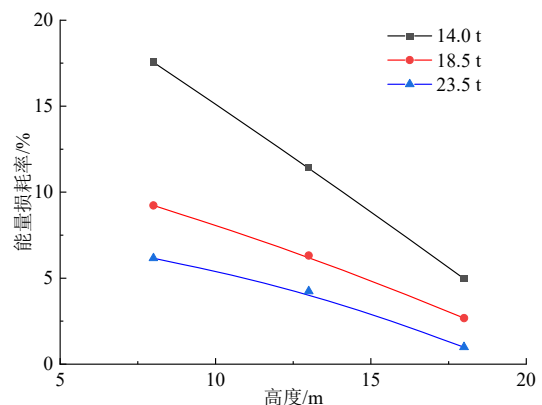


图 6 同一夯锤质量下不同高度的能量损耗率

Fig. 6 Energy loss rate at different heights under the same mass

图 5 中的 3 条曲线方程分别如下所示。

当 $h=8$ m 时, 方程为:

$$y = 5.563 + 995.891 \times 0.729^x, \text{ 拟合率为 } R^2 =$$

0.917 6。

当 $h=13\text{ m}$ 时, 方程为:

$y = 3.724 + 418.361 \times 0.752^x$, 拟合率为 $R^2 =$

0.954 9。

当 $h=18\text{ m}$ 时, 方程为:

$y = -2.138 + 23.828 \times 0.917^x$, 拟合率为 $R^2 =$

0.995 1。

图 6 中的 3 条曲线方程分别如下所示。

当 $m=14.0\text{ t}$ 时, 方程为:

$y = 43.076 - 18.525e^{0.0401x}$, 拟合率为 $R^2 = 0.9843$ 。

当 $m=18.5\text{ t}$ 时, 方程为:

$y = 11.829 - 0.95e^{0.126x}$, 拟合率为 $R^2 = 0.9856$ 。

当 $m=23.5\text{ t}$ 时, 方程为:

$y = 7.815 - 0.533e^{0.142x}$, 拟合率为 $R^2 = 0.9758$ 。

由图 5 可知, 相同高度下, 随着夯锤质量从 14.0 t 增加到 23.5 t, 8 m 高度下的能量损耗率从 17.55% 降低到 6.16%; 13 m 高度下的能量损耗率从 11.46% 降低到 4.24%; 18 m 高度下的能量损耗率从 4.97% 降低到 0.99%。

由图 6 可知, 相同质量下, 随着实验高度从 8 m 增加到 18 m, 14.0 t 锤的能量损耗率从 17.55% 降低到 4.97%; 18.5 t 锤的能量损耗率从 9.23% 降低到 2.68%; 23.5 t 锤的能量损耗率从 6.16% 降低到 0.99%。

由图 5~6 可得出结论: 相同高度下, 能量损耗率随质量的增加而降低; 相同质量下, 能量损耗率随高度的增加而降低; 能量损耗率随总夯击能的增加而降低。

3.2 脱钩施工

本实验型号强夯机在脱钩工况下常用的工作高度为 8 m 和 13 m, 实验测出 14.0 t 锤在 8 m、13 m 工作高度的落地速度 (每种高度下重复测 5 次), 将实验落地速度和对应的理论速度绘制成点线图, 分别如图 7~8 所示。

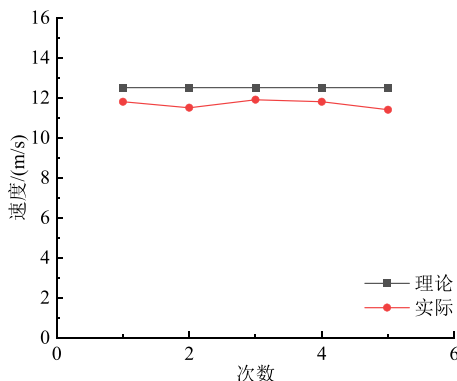


图 7 14.0 t 锤在 8 m 高落下的速度

Fig. 7 Falling speed of 14.0 t hammer at 8 m height

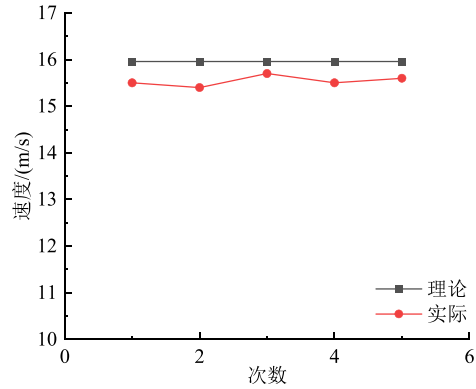


图 8 14.0 t 锤在 13 m 高落下的速度

Fig. 8 Falling speed of 14.0 t hammer at 13 m height

由图 7~8 可以看出, 脱钩施工时所测得的实际落地速度与理论速度相差不多, 式 (12) 可计算出强夯机能量损耗约为 2%~5%, 应该是空气阻力、卷扬和钢丝绳摩擦等原因所造成的。

3.3 两种工况下能量损耗率的对比

为了对比单抽施工与脱钩施工的能量损耗率, 将质量分别为 14.0 t、18.5 t、23.5 t 的 3 种夯锤在 8 m、13 m 高度下进行单抽施工和脱钩施工, 测试出的能量损耗率分别绘制出对比图, 如图 9~10 所示。

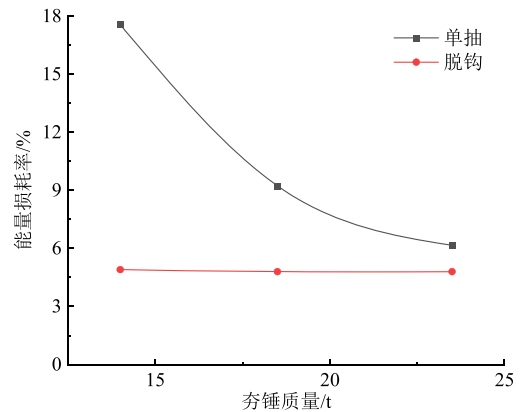


图 9 3 种夯锤在 8 m 高度夯击的能量损耗率

Fig. 9 Energy loss rate of three hammers tamping at a height of 8 m

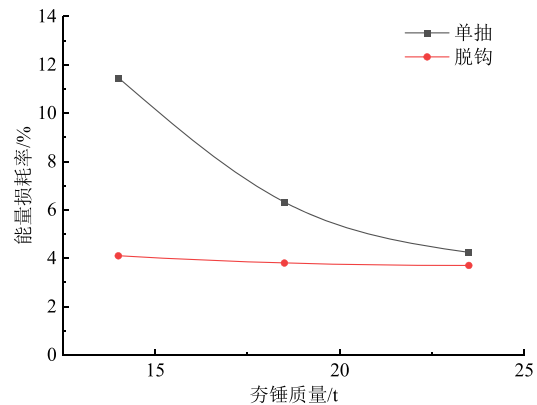


图 10 3 种夯锤在 13 m 高度夯击的能量损耗率

Fig. 10 Energy loss rate of three hammers tamping at a height of 13 m

观察图 9 可知,脱钩状态下,能量损耗率几乎不会随着夯锤质量的改变而受到影响,始终在 5.5% 上下细微波动;单抽状态下,能量损耗率随夯锤质量的增加,由 17.55% 逐渐降低到 6.16%,逐渐趋近于脱钩状态下的能量损耗率。

观察图 10 可知,脱钩状态下,能量损耗率始终在 4% 上下细微波动;单抽状态下,能量损耗率随夯锤质量的增加,由 11.46% 逐渐降低到 4.24%,并且逐渐趋近于脱钩状态下的能量损耗率。

对比图 9~10 可以得出,相同高度下脱钩施工时,能量损耗率不会因夯锤质量的改变而产生太大变化;不同高度下脱钩施工时,能量损耗率随着下落高度的增加而减少;相同高度下单抽施工时,能量损耗率随夯锤质量的增加而降低;当夯锤质量接近 23 t 时,非脱钩与脱钩两种工况下的能量损耗率差别不大,这也说明当总夯击能增加时,能量损耗的占比越来越小。

4 夯击模拟仿真

考虑到实验时夯锤在同一位置落锤两次,第二锤的夯击面在地表面以下,高速摄像机无法测出第二锤的真实夯击面,故通过有限元的方法对工况进行模拟仿真,对落地瞬时速度进行修正,弥补偏差。夯锤在非脱钩工作时,能量损耗会受到钢丝绳和卷扬的影响,但本次冲击仿真的碰撞时间设定间隔极短,因此忽略钢丝绳和卷扬对仿真数据的影响。夯锤与土壤的参数如表 4 所示。

表 4 夯锤与土壤的参数

Table 4 Parameters of hammer and soil

名称	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
夯锤	8.125×10 ³	2.06×10 ⁵	0.30
土壤	1.8×10 ³	5	0.42

4.1 8 m 高度下 14.0 t 锤夯击仿真

夯击模拟仿真的第 1 项任务是在有限元软件 Hypermesh 中构建夯锤与土壤的网格模型。一方面,把土壤大小定义为 20 m×20 m×2 m,然后抽取中面,在中面上将土壤划分成 62 500 个网格单元;另一方面,将直径 2.8 m、高度 0.28 m 的 14.0 t 夯锤在软件中等比例建模,将夯锤划分成 2 288 个网格单元,得到冲击仿真重合节点为 95 个。14.0 t 锤和土壤有限元模型如图 11 所示。

第 2 项任务是仿真模型的参数设定,有以下几个内容:(1)按照表 4 中的数据设定夯锤和土壤的

参数;(2)将土壤的四边添加约束,使其固定;(3)依据实验时高速摄像机所测的夯锤与地面接触瞬间的速度为 11.37 m/s,设定 11.4 m/s 为夯锤的初始速度;(4)依据实验时测量的 14.0 t 夯锤在 8 m 提升高度夯击 1 次后下沉深度为 0.2 m,在软件中定义夯锤接触土壤后的工作深度为 0.2 m;(5)依据夯锤夯击地面是一个瞬间过程,设定碰撞时间为 0.1 s。

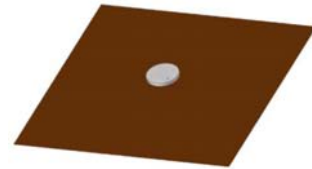


图 11 14.0 t 锤和土壤有限元模型

Fig. 11 Finite element model of 14.0 t hammer and soil

至此,仿真模型构建完成。在 Hypermesh 中开始冲击仿真,将仿真得到的数据导入 Ls-dyna 软件进行分析,得到 14.0 t 锤的仿真动能随时间变化的情况,如图 12 所示。

由图 12 可知,锤子的最大动能为 9.4369×10^8 N·mm。锤子总下降高度为 8.2 m,根据式(7)得到夯锤的重力势能为 1.125×10^9 N·mm。将二者代入式(12),计算得到 14.0 t 锤在 8 m 高度的仿真工况下,能量损耗率为 16.12%。

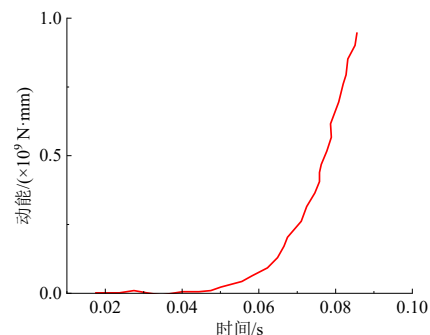


图 12 14.0 t 锤的仿真动能

Fig. 12 Kinetic energy simulation of 14.0 t hammer

4.2 8 m 高度下 18.5 t 锤夯击仿真

本组仿真中的土壤大小及其网格单元划分数量与 4.1 节一致。18.5 t 夯锤的高度为 0.9 m,直径为 2.35 m,按照 4.1 节中的步骤将夯锤划分成 2 659 个网格单元,得到仿真重合节点为 75 个。18.5 t 锤和土壤有限元模型如图 13 所示。

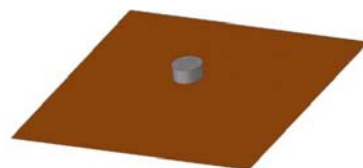


图 13 18.5 t 锤和土壤有限元模型

Fig. 13 Finite element model of 18.5 t hammer and soil

本次仿真参数的设定和 4.1 节不同的是: 夯锤的初始速度设定为 11.9 m/s, 夯锤接触土壤后的工作深度设定为 0.32 m。18.5 t 锤的仿真动能如图 14 所示。

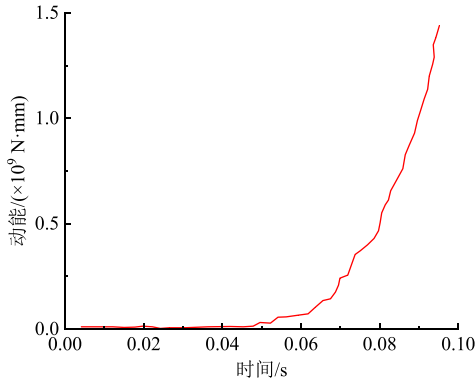


图 14 18.5 t 锤的仿真动能
Fig. 14 Kinetic energy simulation of 18.5 t hammer

由图 14 可知, 18.5 t 夯锤的最大动能为 $1.5082 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。锤子的总下降高度为 8.32 m, 根据式 (7) 得到夯锤的重力势能为 $1.508 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。将二者代入式 (12), 得到 18.5 t 锤在 8 m 高度的仿真工况下, 能量损耗率为 9.22%, 与实验测试得到的数据计算结果几乎无偏差。

4.3 8 m 高度下 23.5 t 锤夯击仿真

本组仿真中的土壤大小及其网格单元划分数量仍与 4.1 节一致。23.5 t 夯锤的高度为 0.58 m, 直径为 2.5 m, 按照 4.1 节中的步骤将夯锤划分成 3 735 个网格单元, 得到仿真重合节点为 78 个。23.5 t 锤和土壤有限元模型如图 15 所示。

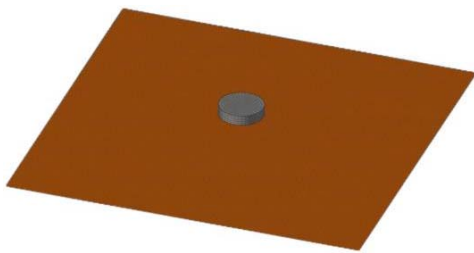


图 15 23.5 t 锤和土壤有限元模型
Fig. 15 Finite element model of 23.5 t hammer and soil

本次仿真参数的设定和 4.1 节不同的是: 夯锤的初始速度设定为 12.1 m/s, 夯锤接触土壤后的工作深度设定为 0.4 m。23.5 t 锤的仿真动能如图 16 所示。

由图 16 可知, 23.5 t 夯锤的最大动能为 $1.8049 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。锤子的总下降高度为 8.4 m, 根据式 (7) 得到夯锤的重力势能为 $1.912 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。将二者代入式 (12), 得到 23.5 t 锤在 8 m 高度的仿真工况下, 能量损耗率为 5.48%。

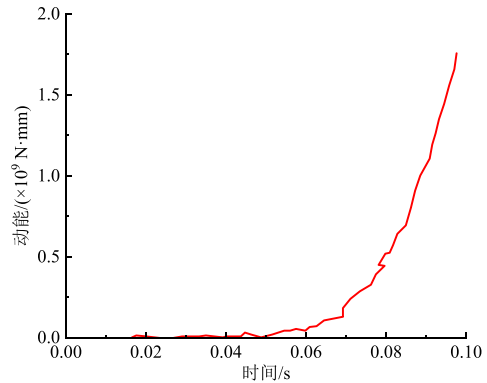


图 16 23.5 t 锤的仿真动能
Fig. 16 Kinetic energy simulation of 23.5 t hammer

4.4 能量损耗率修正

根据 3 次仿真计算结果, 得到修正后 3 种不同质量的夯锤在 8 m 高度下的能量损耗率, 拟合绘制出修正后能量损耗率和夯锤质量关系图, 如图 17 所示。

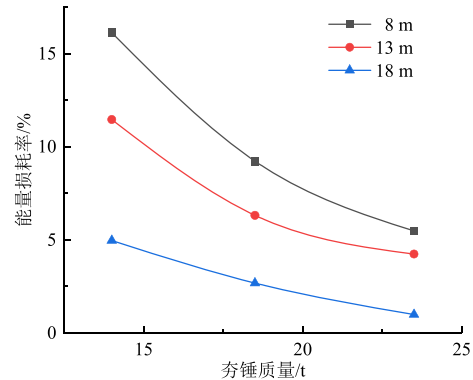


图 17 修正后能量损耗率和夯锤质量的关系
Fig. 17 Relationship between energy loss rate and hammer mass after modification

图 17 中 8 m 高度下的曲线方程和拟合率分别为: $y = -0.15 + 85.39 \times 0.89^x$, $R^2 = 0.96$ 。

结果表明, 8 m 高度下实验夯机能量损耗率的曲线拟合率从 0.92 提高至 0.96。

5 结 论

脱钩施工时能量损耗率随高度和夯锤质量的变化很小; 单抽施工的能量损耗率会随着夯锤质量和高度的增加 (总夯击能的增加) 而减少, 并且逐渐趋近于脱钩状态下的能量损耗率。

单抽施工时, 对应于 8 m、13 m、18 m 3 种高度, 14.0 t 锤的能量损耗率分别为 16.12%、11.46%、4.97%; 18.5 t 锤的能量损耗率分别为 9.22%、6.32%、2.68%; 23.5 t 锤的能量损耗率分别为 6.16%、4.24%、0.99%。这表明, 单抽施工时, 轻质量夯锤在低高度 (夯击能小) 工作时, 能量损耗率较高; 3 种实验落锤夯击高度超过 18 m (夯击能大于 250 t·m) 时

的能量损耗率都在 5%以内。

根据上述结论, 针对测试对象的施工建议如下: (1) 在设备额定工况内, 建议增加夯锤质量、提升工作高度, 当总夯击能大于 230 t·m 时, 选择单抽施工, 并通过图 5 和图 6 中的曲线以及方程进行夯锤质量与高度的选择, 单抽施工能量损耗率可低于 8%。(2) 轻质量夯锤在低高度(夯击能小于 230 t·m)工作时, 建议选择脱钩工作状态, 可以有效控制能量损耗。

参考文献

- [1] 王欣, 郑亚辉, 白朝阳, 等. 强夯机的技术现状与发展[J]. 建筑机械化, 2012, 33(3): 39-43, 7.
WANG Xin, ZHENG Yahui, BAI Chaoyang, et al. Technical current situation and development of the dynamic compaction machinery[J]. Construction Mechanization, 2012, 33(3): 39-43, 7.
- [2] 李建青, 周楚健, 雷发荣. 强夯机夯击能效测试方法研究[J]. 内燃机与配件, 2021(6): 76-77.
LI Jianqing, ZHOU Chujian, LEI Farong. Research on the test of tamping energy efficiency of dynamic compactor[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(6): 76-77.
- [3] 董炳寅, 水伟厚, 秦劭杰. 中国强夯 40 年之技术创新[J]. 地基处理, 2022, 4(1): 1-16.
DONG Bingyin, SHUI Weihou, QIN Shaojie. Technological innovation of dynamic compaction in China for forty years[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(1): 1-16.
- [4] 饶剑. 航空发动机尾喷流中颗粒物运动参数测量研究[D]. 四川绵阳: 西南科技大学, 2023.
RAO Jian. Research on measurement of particles motion parameters in aero-engine exhaust plume[D]. Mianyang, Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2023.
- [5] LIU C X, HU J, LI Y F, et al. Numerical simulation of the trajectory of UAVs electrostatic droplets based on VOF-UDF electro-hydraulic coupling and high-speed camera technology[J]. Agronomy, 2023, 13(2): 512.
- [6] LU H F, RUAN H, GUO X L, et al. Study on friction and conveying characteristics of the pneumatic logistics transmission system[J]. Powder Technology, 2023, 417: 118282.
- [7] 魏双羽, 白跃伟, 刘凯. 接触式激光传感器集成测量方法的研究[J]. 工具技术, 2022, 56(5): 117-120.
WEI Shuangyu, BAI Yuewei, LIU Kai. Research on integrated measurement method of touch probe and laser sensor[J]. Tool Engineering, 2022, 56(5): 117-120.
- [8] 童晓艳, 鲁东生, 柏慧, 等. 一种测扭齿的接触式角度测量方法[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2023. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0721>.
TONG Xiaoyan, LU Dongsheng, BAI Hui, et al. A contact angle measurement method for torsional teeth[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0721>.
- [9] 吕梦璐, 王春耀, 罗建清, 等. 基于高速摄像技术落果运动规律的研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(9): 190-193.
LV Menglu, WANG Chunyao, LUO Jianqing, et al. Researching the movement of fruit dropping based on high-speed camera[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9): 190-193.
- [10] RINALDI C, LEPIDI M, POTENZA F, et al. Identification of cable tension through physical models and non-contact measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 205: 110867.
- [11] HUANG R J, ZHANG W B, SUO C G. Non-contact voltage measurement of residential cables based on internal parameter conversion and centering probe assistance[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(1): 015024.
- [12] 张兴华, 刘清泉. 泉州市某仓储中心地基强夯处理与承载力检测[J]. 地基处理, 2021, 3(6): 527-531.
ZHANG Xinghua, LIU Qingquan. Dynamic compaction treatment and bearing capacity test of a warehouse foundation in Quanzhou[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(6): 527-531.
- [13] 周远荣, 华志超. 基于光谱共焦技术的非接触式内径测量系统研究[J]. 中国检验检测, 2023, 31(5): 17-19, 12.
ZHOU Yuanrong, HUA Zhichao. Research on non-contact inner diameter measurement system based on spectral confocal technology[J]. China Inspection Body & Laboratory, 2023, 31(5): 17-19, 12.
- [14] 耿嘉一, 辛振, 石亚飞, 等. 用于 SiC MOSFET 开关电压测量的非接触式电场耦合电压传感器[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 3154-3165.
GENG Jiayi, XIN Zhen, SHI Yafei, et al. Non-contact electric field coupled voltage sensor for switching voltage measurement of SiC MOSFET[J]. Proceedings of the

CSEE, 2023, 43(8): 3154-3165.

- [15] 李帆, 漆岸凌, 徐世平, 等. 基于高速摄像的汽车碰撞动态分析方法研究[J]. 汽车零部件, 2022(8): 32-35.

LI Fan, QI Anling, XU Shiping, et al. Research on dynamic analysis method of vehicle collision based on high-speed video[J]. Automobile Parts, 2022(8): 32-35.

- [16] 吴民晖, 刘海旺. 强夯法处理吹填海砂地基现场试验研究[J]. 地基处理, 2022, 4(4): 322-328.

WU Minhui, LIU Haiwang. Field test on the treatment of hydraulic reclamation sand foundation by dynamic compaction[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(4): 322-328.

- [17] 徐文涛, 董宝志, 于永堂, 等. 直接强夯法处理低含水量大厚度湿陷性黄土的效果分析[J]. 地基处理, 2022, 4(增刊 1): 134-143.

XU Wentao, DONG Baozhi, YU Yongtang, et al. Effect analysis of direct dynamic compaction method in treating collapsible loess with low water content and large thickness[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(S1): 134-143.

- [18] ALI L, WANG C, ULLAH I, et al. Design and

optimization of microwave sensor for the non-contact measurement of pure dielectric materials[J]. Electronics, 2021, 10: 3057.

专栏主持人 水伟厚



同济大学博士, 教授级高级工程师, 大地巨人(北京)工程科技有限公司总经理, 大地巨人(广东)岩土工程有限公司总经理, 曾任中化岩土集团有限公司副总经理, 华东建筑集团股份有限公司(原上海现代建筑设计集团)副总工程师。获北京市“科技创新领军人才”, 上海市“十大杰出青年”提名奖, 上海市“五一劳动奖章”等荣誉称号。主编参编《建筑地基处理技术规范》、《复合地基技术规范》、《高填土地基技术规范》、《建筑地基检测技术规范》等 19 部国家和行业规范。编写学术专著 6 部, 主持国家重大地基处理工程项目 60 余项, 长期从事高填方场地形成和强夯法地基处理设计施工研究和工程实践。