

# 煤矸石地基在强夯冲击荷载作用下的 物理模型试验研究

张清峰<sup>1</sup>, 王东权<sup>2</sup>

(1. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 为了研究强夯法加固煤矸石地基的加固效果, 了解强夯过程中不同深度处动应力分布规律, 测定不同夯击能的有效加固深度, 进行室内模型试验研究。用 DH5939 动态应变仪采集不同夯击能、不同击数、不同测点位置煤矸石地基中的动应力。试验结果表明: 单击夯沉量随夯击次数的增加而减小。在夯击次数相同情况下, 单击夯击能越大, 夯沉量也越大。在强夯作用下, 动应力主要为单一的波峰, 没有明显的第二波峰, 作用时间极短, 动应力达到峰值所需的时间明显小于衰减时间。沿夯锤不同深度的动应力达到峰值具有明显的时滞性, 在同一深度, 随着夯击能、夯击次数的增加, 动应力也相应增加。另外, 强夯后煤矸石地基的物理力学特性指标如压实度、黏聚力等较夯前有较大提高, 夯击能越大, 提高幅度越明显, 夯击能相同时, 距夯点位置越近, 提高幅度越明显。满足实际工程需要的最佳夯击能约为 3 000 kN·m, 最佳夯击数为 7~9 击。该成果不仅适用于强夯法处理煤矸石地基, 对其他松散易碎介质如建筑渣土的强夯地基加固也有一定的参考价值。

**关键词:** 基础工程; 强夯法; 冲击荷载; 煤矸石地基; 夯沉量; 动应力; 物理模型试验

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2013)05 - 1049 - 08

## PHYSICAL MODEL TESTS OF COAL GANGUE FOUNDATION UNDER DYNAMIC COMPACTION LOADS

ZHANG Qingfeng<sup>1</sup>, WANG Dongquan<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. School of Mechanics and Architecture Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

**Abstract:** In order to study reinforcement effect in coal gangue foundation improved by dynamic compaction, the distribution and rules of the dynamic stress at different depths, effective strengthening depths under different impact loadings, a serial of physical model tests are carried out. The dynamic strain gauge DH5939 is used to record the induced dynamic stress of different tamping energies, different blows and different measuring points. It is shown that the single blow settlement decreases with the increase of the number of tamping and increases with the increase of tamping energy under the same blows. The dynamic stress has mainly a single peak, no obvious second crest, acts in a very short time and the time that dynamic stress reaches peak is less than the decay time. It has a significant decay to reach the peak under the impact loadings along the depth of the hammer. For the same depth, with increasing of tamping energy and compaction number, the dynamic stress increases correspondingly. In addition, the physico-mechanical properties of the coal gangue foundation such as degree of compaction and cohesion have greatly improved after dynamic compaction; and they increase with the increasing of tamping energy, the distance from the rammer point is more near, the increasing amplitude is more obvious under the same tamping energy. It is concluded that the best tamping energy is about 3 000 kN·m and the best blow count is 7 - 9

收稿日期: 2012 - 10 - 04; 修回日期: 2012 - 11 - 24

基金项目: 江南大学青年基金资助项目(2005LQN0025)

作者简介: 张清峰(1977 - ), 女, 2004 年于中国矿业大学岩土工程专业获硕士学位, 现任讲师, 主要从事道路和岩土工程方面的教学与研究工  
作。E-mail: zangqingfeng@yahoo.com.cn

blows for meeting the actual engineering. The results are suitable for coal gangue foundations improved by dynamic compaction. These results also have a certain reference value for other loose friable media such as construction wastes.

**Key words:** foundation engineering; dynamic compaction; dynamic load; coal gangue foundation; tamping settlement; dynamic stress; physical model test

## 1 引言

对煤炭生产过程中产生的固体废弃物煤矸石, 存在许多危害, 已经成为制约煤炭行业持续发展的一个沉重包袱, 也是人类环境的一大公害。因此, 如何治理和综合利用煤矸石, 越来越得到人们的重视。煤矸石主要用于发电、砖、水泥掺合料、充填复垦、作路基填料、路面基层掺和料等。近年来, 国内许多矿区开始将煤矸石填筑塌陷区, 然后用作建筑地基。煤矸石作为人工地基的充填材料, 其密度以及承载力能否满足工程的要求, 是其用作地基填料要考虑的主要问题。由于天然煤矸石结构松散, 孔隙率大, 天然级配存在缺陷, 粗大矸块含量比例过高和细小颗粒含量比例过低, 承载能力低, 必须对天然松散的煤矸石地基进行加固处理<sup>[1]</sup>。

近年来, 一些学者对强夯法加固不同的地基土进行了研究。费香泽等<sup>[2]</sup>进行了黄土强夯的模型试验研究。谢能刚等<sup>[3]</sup>研究了强夯动接触力的碰撞分析与并行优化求解。年廷凯等<sup>[4]</sup>针对不同土质条件下高能级强夯加固效果, 进行了测试与对比分析。贾敏才等<sup>[5]</sup>通过可视室内强夯模型试验仪, 得到不同夯击次数下砂土位移等值线图和动接触应力时程曲线等宏观力学响应。张兴元等<sup>[6]</sup>根据自行设计的室内模型试验装置, 对 3 000, 8 000 和 10 000 kN·m 能级强夯开展了室内模型试验研究。熊巨华等<sup>[7]</sup>采用半圆模型夯锤, 对强夯加固粉土地基进行室内模型试验, 并对夯击时土体内部的动应力进行了研究。何长明等<sup>[8]</sup>进行了强夯动应力的量测及现场试验研究。罗恒等<sup>[9]</sup>进行了红砂岩碎石土高填方路基强夯加固时的动应力扩散及土体变形试验研究。张清峰等<sup>[10-12]</sup>通过室内模型试验, 进行了强夯法加固煤矸石地基的动应力、破碎密实机制等问题的研究。石亮等<sup>[13-14]</sup>设计了一种便捷强夯模型试验装置及并应用此装置进行了砂土地基地面变形规律的模型试验研究。冯世进等<sup>[15]</sup>进行了强夯参数对夯击效果影响的室内模型试验。

通过室内物理模型实验研究煤矸石地基在强夯冲击荷载作用下沿不同深度的动应力分布特点及规律, 研究强夯前后煤矸石工程性质如压实度、黏聚

力、内摩擦角等的变化情况, 以通过对比来说明强夯加固后的效果, 并提出满足工程需要的试夯的主要参数。对确保强夯作用下煤矸石地基的承载能力, 填筑建筑场地的整体稳定、施工后沉降量小、建筑物的安全性和耐久性, 都有重要的意义。另外, 也可以在用强夯法处理煤矸石地基方面积累有益的试验资料, 对强夯处理煤矸石地基的理论加以完善, 对提高煤矸石综合利用水平以及煤矸石地基处理技术都具有一定的工程意义。同时, 本文的研究成果不仅适用于强夯加固煤矸石地基, 对其他松散易碎介质(如建筑渣土)的强夯地基加固也具有一定的借鉴意义和参考价值。

## 2 物理模型试验方案

### 2.1 模型试验装置设计

利用模型试验的相似第二准则和量纲分析法, 推导相似准则。本次模型试验中, 几何缩比设计为  $C_L = 10$ 。根据相似准则, 夯锤质量为 25 000 kg, 夯锤直径为 2.2 m, 高度为 2.2 m, 模型锤质量为 25 kg, 模型锤直径为 0.22 m, 高度为 0.22 m。原型夯击能分别为 2 000 kN·m(落距 8 m), 2 500 kN·m(落距 10 m), 3 000 kN·m(落距 12 m), 3 500 kN·m(落距 14 m), 4 000 kN·m(落距 16 m), 即对应的模型夯击能分别为 0.20 kN·m(落距 0.8 m), 0.25 kN·m(落距 1.0 m), 0.30 kN·m(落距 1.2 m), 0.35 kN·m(落距 1.4 m), 0.40 kN·m(落距 1.6 m)的 5 种情况分别做模型试验。以找到满足工程需要的最佳夯击能与最佳锤击数, 为现场试夯提供依据。

模型试验分两部分进行, 小型模型试验和大型模型试验, 设计 2 套模型试验装置。模型试验以小型模型试验为主, 大型模型试验为辅。小型模型试验台高 1 000 mm, 直径为  $\phi 410$  mm(见图 1), 此试验装置主要用于单点夯击试验。为了确定合理的夯点间距, 需要进行多点夯击模型试验, 试验时按正三角形布置夯点, 间距为 4 m。大型模型试验台为直径 1 000 mm, 高为 1 000 mm 的圆管结构。圆管壁厚为 10 mm(见图 2)。试验时采用落锤加载<sup>[16]</sup>, 夯锤为混凝土锤, 外壳为壁厚 10 mm 的钢管, 管内为现浇强度等级为 C30 的混凝土。重锤剖面见图 3。



图 1 小型模型试验装置  
Fig.1 Small type model test device



图 2 大型模型试验装置  
Fig.2 Big type model test device

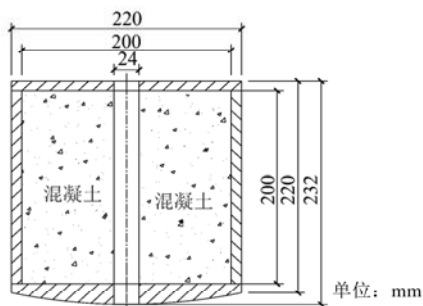


图 3 重锤剖面图  
Fig.3 Arrangement of heavy hammer

### 2.2 模型试验量测处理系统设计

根据本试验的内容和要求，对不同的夯击能，需要量测的主要参数有：沿煤矸石地基不同深度处的动应力，每击作用下的夯沉量，夯后不同深度处的煤矸石地基的压实度、黏聚力、内摩擦角。由于夯后不同深度处的煤矸石的压实度、黏聚力、内摩擦角均可采用室内标准试验仪器进行，无须设计量测系统。对每击作用下的夯沉量，可用直尺直接量取。因此，模型试验量测系统主要为沿煤矸石地基不同深度处的动应力量测系统。

强夯作用下的沿煤矸石地基不同深度处的动应力是一种超动态、脉冲应力波，频率很高，要求量测系统具有超动态响应、足够的量程和动态记录功能。动应力量测处理系统由 DH5939 动态数据采集记录分析仪、YE - 5853 宽频多通道电荷放大器、压电式土压力盒、计算机四部分组成。由于煤矸石

的粒度分布范围较广，要求压力盒直径尽可能大，但要使压力盒直径大于煤矸石的最大直径，实际上不太可能实现，且不易埋设，较难获得测试信号。为此，选用小直径的压力盒，其厚度要尽可能薄，在其周围用细砂保护。试验时选用 DY - 1 型压电式土压力盒，外形尺寸的直径为 25 mm，高度为 5 mm。

压电式土压力盒在煤矸石地基内布置原则为测点处的测试信号在其量程范围之内且其之间相互距离合理，之间不相互干扰，有利于数据处理。依据上述原则，为了测试强夯冲击荷载作用下不同深度的煤矸石地基的动应力，可沿模型试验台中心位置竖向每隔 150 mm 布置一个压力盒。对小型模型试验：测点 1<sup>#</sup>，2<sup>#</sup>，3<sup>#</sup>，4<sup>#</sup>，5<sup>#</sup>土压力盒距试验台顶面的距离分别为 200，350，500，650 和 800 mm，具体见图 4 所示。

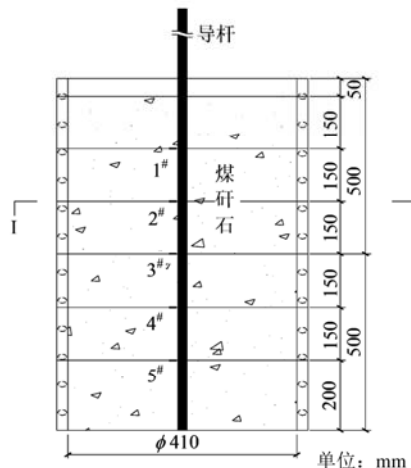


图 4 压电式土压力盒布置示意图  
Fig.4 Sketch of layout of piezoelectric earth pressure cells

### 2.3 煤矸石的物理力学性能指标测定

对筛分试验结果分析表明：粒径小于 4.75 mm 的煤矸石细料含量较少：仅占 15.58%；大于 4.75 mm 的煤矸石粗料含量较多：达到 84.42%。为利用所设计的小型模型试验台进行室内试验，需要对大于 31.5 mm 的超标颗粒进行处理。根据《土工试验规程》(SD128—84)的规定，按照相似级配法对超标颗粒进行缩尺处理。

相似级配法是根据原级配的最大粒径  $d_{0max}$  和容许最大粒径  $d_{max}$  的比例，将各粒径缩小，缩小前、后对应粒级间的含量百分数不变，或者说在颗粒组成累计曲线上以  $d_{max}$  点代替  $d_{0max}$  点，以此点为起始点将颗粒组成曲线平移，保持两曲线间的水平距离始终相等<sup>[17]</sup>。处理后级配的计算为

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{d_{0\max}}{d_{\max}} \\ d_i &= \frac{d_{0i}}{n} \\ p_i &= p_{0i} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $d_{0\max}$  为原级配的最大粒径(mm)， $d_{\max}$  为相似级配(缩小后)的最大粒径(mm)， $d_{0i}$  为原级配某粒径(mm)， $d_i$  为相似级配(缩小后)某粒径(mm)， $n$  为缩小倍数， $p_i$  为  $d_i$  的含量百分数， $p_{0i}$  为  $d_{0i}$  的含量百分数。

缩尺后的煤矸石颗粒组成见表 1。

表 1 煤矸石颗粒组成

Table 1 Coal gangue particle compositions

| 粒组/mm     | 原级配/% | 相似级配/% |
|-----------|-------|--------|
| 200~150   | 10.70 | -      |
| 150~75    | 5.91  | -      |
| 75~60     | 7.89  | -      |
| 60~31.5   | 11.25 | -      |
| 31.5~26.5 | 15.12 | 5      |
| 26.5~13.2 | 15.64 | 17     |
| 13~2.5    | 17.91 | 33     |
| <5        | 15.58 | 45     |

对煤矸石细料进行标准击实试验，用最小二乘法求得煤矸石细料最佳含水量  $W_{op} = 9.85\%$ ，最大干密度  $\rho_{d\max} = 2.01 \text{ g/cm}^3$ 。用间接方法求得煤矸石混合料的最佳含水量  $W_{op} = 5.36\%$ ，最大干密度  $\rho_{d\max} = 2.05 \text{ g/cm}^3$ 。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 不同夯击能作用下不同夯击次数煤矸石地基的夯沉量分析

在不同的单点夯击能作用下，小型模型试验的单击夯沉量与夯击次数的关系，累计夯沉量与夯击次数的关系分别见图 5，6。在夯击能 3 000 kN·m 作用下，不同夯点间距为 4 m 的大型模型试验的单击夯沉量与夯击次数的关系、累计夯沉量与夯击次数关系分别见图 7，8。

由图 5 可以看出，强夯时，在夯点上连续夯击，第 1 击夯沉量较大，为 180~215 mm，连续夯击多次后，单击夯沉量逐渐减少。夯击次数越多，单击夯沉量越小。以夯击能 2 000 kN·m 为例分析，第 1 击时，夯沉量为 180 mm，第 2 击时，夯沉

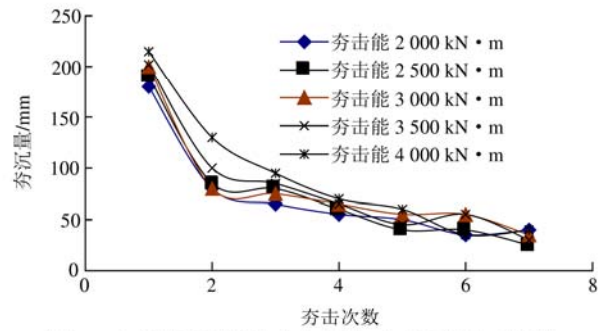


图 5 小型模型试验的夯沉量与夯击次数关系曲线

Fig.5 Curves of settlement and tamping times of small type model test

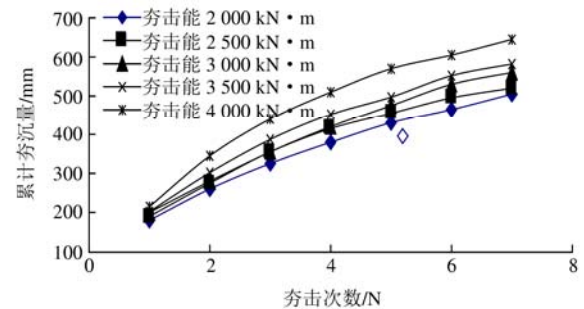


图 6 小型模型试验的累计夯沉量与夯击次数关系曲线

Fig.6 Curves of cumulative settlement and tamping times of small type model test

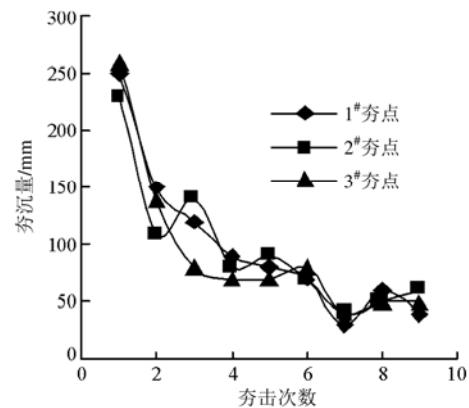


图 7 大型模型试验的夯沉量与夯击次数关系曲线

Fig.7 Curves of settlement and tamping times of big type model test

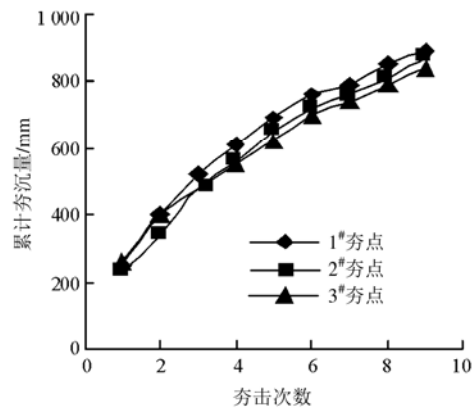


图 8 大型模型试验的累计夯沉量与夯击次数关系曲线

Fig.8 Curves of cumulative settlement and tamping times of big type model test

量为 80 mm，第 3 击时，夯沉量为 65 mm，第 4 击时，夯沉量为 55 mm，第 5 击时，夯沉量减小为 50

细颗粒增加，煤矸石地基由松散变为密实，夯沉量逐渐减小。还可以看出，在夯击数相同的情况下，单击夯击能越高，则单击夯沉量也就越大，以第 1 击为例分析，在夯击能为 2 000, 2 500, 3 000, 3 500 和 4 000 kN·m 时，夯沉量分别为 180, 190, 200, 202 和 215 mm。从图 7 可以看出，在夯击能、夯击数相同的情况下，对不同的夯点位置，夯沉量也不同，说明煤矸石地基的密实程度不同。

从图 6, 8 可以看出，夯击次数越多，累计夯沉量也越大。同时还可以看出，单击夯击能越高，则累计夯沉量也就越大，近似呈线性关系。对小型模型试验，当夯击次数为 7 击时，最后两击的平均夯沉量已小于 50 mm，说明最佳夯击次数为 7 次。对大型模型试验，当夯击次数为 9 击时，最后 2 击的平均夯沉量已小于 50 mm，说明最佳夯击次数为 9 次。所以，最佳夯击次数为 7~9 击。对比图 5, 7 可以看出，在相同的夯击能、相同击数作用下，单击夯沉量大型模型试验的比小型模型试验的大，说明小型模型试验和大型模型试验的约束条件不相同，大型模型试验的约束条件更接近实际情况。

### 3.2 不同夯击能、不同测点、不同夯击次数下煤矸石地基中动应力分析

不同夯击能第 3 击的不同测点的实测竖向的  $P-t$  曲线如图 9(a)~(d)所示。其他击数的不同测点的实测竖向的  $P-t$  曲线相似于图 9，这里不再画出。

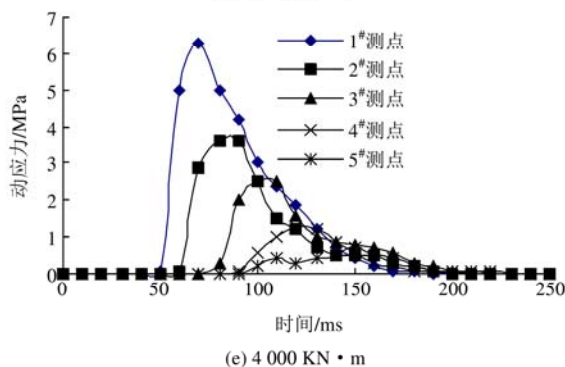
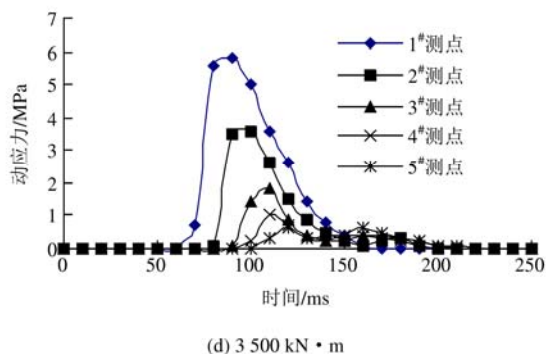
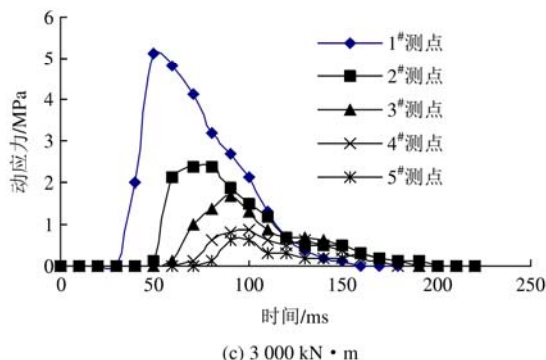
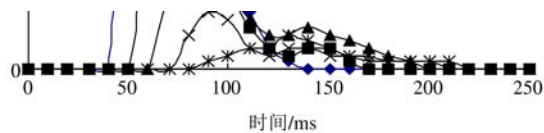
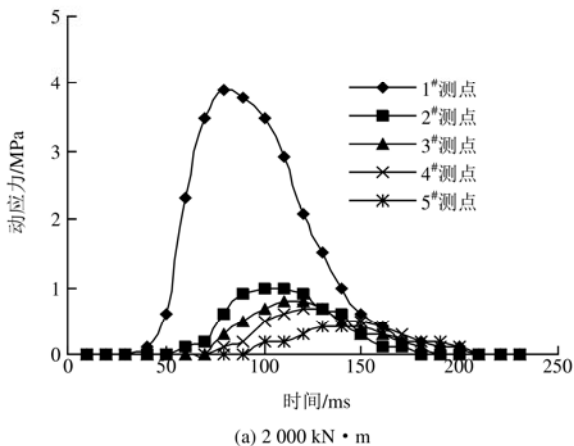


图 9 不同夯击能下第 3 击的  $P-t$  曲线

Fig.9  $P-t$  curves of third blow under different tamping energies

从图 9 可以看出，在强夯作用下，动应力主要为单一的波峰，为抛物线形，第二波峰不明显，作用时间极短，为 100~250 ms，且动应力达到峰值

所需的时间明显小于衰减时间。动应力峰值在夯锤底衰减很快且沿夯锤不同深度的动应力达到峰值具有明显的时滞性。以图 9(e)为例来分析,具体如下:在距锤底 1.5 m 处,动应力峰值为 6.3 MPa,达到峰值的时间约为 20 ms,衰减时间约为 180 ms;在距锤底 3 m 处,动应力峰值衰减为 3.8 MPa,达到峰值的时间约为 30 ms,衰减时间约为 170 ms;在距锤底 4.5 m 处,动应力峰值衰减为 2.5 MPa,达到峰值的时间约为 50 ms,衰减时间约为 170 ms;在距锤底 6 m 处,动应力峰值衰减为 1.0 MPa;在距锤底 7.5 m 处,动应力峰值衰减为 0.7 MPa。从图 9 中还可看出,在距锤底 6 和 7.5 m 处,动应力出现波动现象,这是由于第 3 击后,夯击产生的大部分纵波在到达此处前已被上部煤矸石地基吸收,少量的纵波在此处受到煤矸石地基内部反弹波的影响较大,从而产生动应力时程曲线波动的现象。通过此应力波的分析,也从侧面反映第 3 击时位于煤矸石地基深度 6 和 7.5 m 处的地基并没有得到有效的加固。

不同测点、不同夯击次数的动应力峰值曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,在同一深度处,夯击能相同时,经过多次连续夯击,动应力也相应增加。夯击次数相同时,同一深度的动应力峰值随夯击能的提高而提高。另外,从图 10(a)可以看出,在距锤底 4.5 m 处,在夯击能为 2 000~3 500 kN·m 时,随着夯击次数的增加,动应力增加不明显,而当夯击能提高到 4 000 kN·m 时,随着夯击次数的

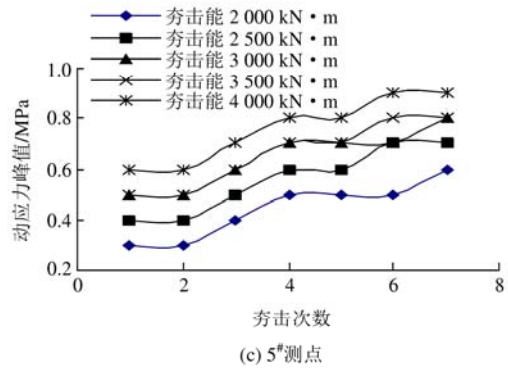
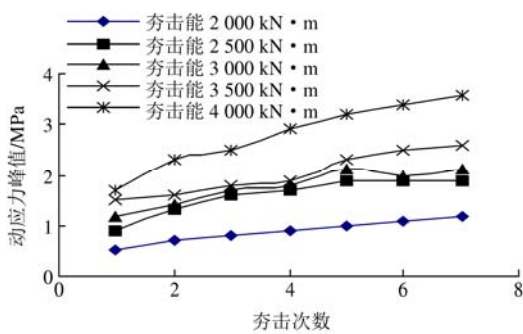


图 10 不同测点、不同夯击次数的动应力峰值曲线  
Fig.10 Peak value curves of dynamic stress at different measuring points under different tamping blows

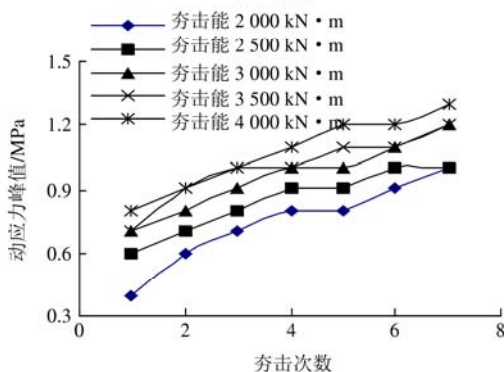
增加,动应力增加明显。这说明要加固深部的煤矸石地基,光增加夯击次数是不行的,必须提高夯击能。不同的夯击能,其有效加固深度不同,夯击能 2 000 kN·m,加固深度约为 3 m;夯击能 2 500 kN·m,加固深度约为 4.5 m;夯击能 3 000 和 3 500 kN·m,加固深度约为 6 m。得出满足实际工程需要的最佳夯击能约为 3 000 kN·m。

### 3.3 强夯前后煤矸石地基物理力学特性研究

强夯结束后,取煤矸石试样,取样位置见图 11。测定夯后煤矸石的物理力学性质指标压实度、黏聚力、内摩擦角。



(a) 3#测点



(b) 4#测点

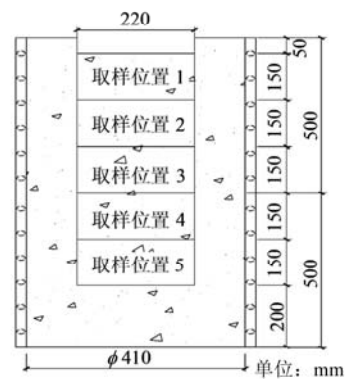


图 11 取样位置图

Fig.11 Sampling locations

压实度定义为现场测的干密度与试验室通过重型标准击实试验得到的最大干密度的比值。夯前,煤矸石的压实度平均值为 78%,夯后,不同取样位置的不同夯击能的压实度见图 12。从图 12 可以看出:强夯后一定范围内煤矸石地基的压实度增大。对夯击能 2 000 kN·m,压实度平均值为 85%,提高比为 1.09;对夯击能 2 500 kN·m,压实度平均值为 86%,提高比为 1.10;对夯击能 3 000 kN·m,

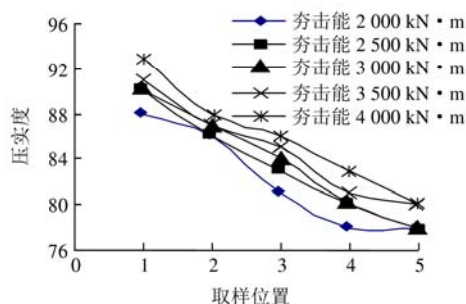


图 12 压实度变化曲线

Fig.12 Variation curves of degree of compaction

压实度平均值为 87%，提高比为 1.12；对夯击能 3 500 kN·m，压实度平均值为 88%，提高比为 1.13；对夯击能 4 000 kN·m，压实度平均值为 89%，提高比为 1.14。这说明经过强夯处理以后，煤矸石地基的密实程度有了较大的提高，且夯击能越大，提高幅度越明显，距夯点位置越近，提高幅度越明显。距夯点位置越远，提高幅度越不明显。

强夯前煤矸石地基的黏聚力为 14.05 kPa。夯后，对夯击能 2 000 kN·m，煤矸石地基的黏聚力平均值为 23.1 kPa，比夯前提高 1.64 倍；对夯击能 2 500 kN·m，煤矸石地基的黏聚力平均值为 26.08 kPa，比夯前提高 1.86 倍；对夯击能 3 000 kN·m，煤矸石地基的黏聚力平均值为 27.15 kPa，比夯前提高 1.93 倍；对夯击能 3 500 kN·m，煤矸石地基的黏聚力平均值为 28.88 kPa，比夯前提高 2.06 倍；对夯击能 4 000 kN·m，煤矸石地基的黏聚力平均值为 32.87 kPa，比夯前提高 2.34 倍。可见，夯击能越大，黏聚力提高幅度越明显。

强夯后煤矸石的内摩擦角提高幅度不如黏聚力明显，随着夯击能的增加，内摩擦角提高的幅度也不明显。强夯前煤矸石的内摩擦角为 54°，夯后，对不同的夯击能，内摩擦角平均值几乎均为 57°，提高比为 1.06<sup>[18]</sup>。

## 4 结 论

为了研究强夯冲击荷载作用下煤矸石地基沿不同深度的动应力，测定不同夯击能对强夯的影响程度。根据模型试验的相似第二定理和量纲分析方法，自行设计了室内模型试验装置，进行了强夯法加固煤矸石地基的室内模型试验，得到的主要结论如下：

(1) 在强夯荷载作用下，单击夯沉量随夯击次

数的增加而减少，减小幅度随夯击次数的增加而逐渐减小。单击夯击能越高，则单击夯沉量也就越大。夯击次数越多，累计夯沉量也越大，单击夯击能越高，则累计夯沉量也就越大，近似呈线性关系。

(2) 在强夯作用下，动应力主要为单一的波峰，为抛物线形，第二波峰不明显。作用时间极短，为 100~250 ms，动应力达到峰值所需的时间明显小于衰减时间。沿夯锤不同深度的动应力达到峰值具有明显的时滞性。夯击能相同时，连续多次夯击后，锤底有效加固深度内的动应力提高值相当明显。夯击次数相同时，同一深度的动应力峰值随夯击能的提高而提高。

(3) 在距锤底 6 和 7.5 m 处，动应力出现波动现象，夯击产生的大部分纵波在到达此处前已被上部煤矸石地基吸收，少量的纵波在此处受到煤矸石地基内部反弹波的影响较大，从而产生动应力时程曲线波动的现象。通过此应力波的分析，也从侧面反映第 3 击时位于煤矸石地基深度 6 和 7.5 m 处的地基并没有得到有效的加固。

(4) 在强夯加固深度内，煤矸石的黏聚力、压实度较夯前有了较大的提高。夯击能越大，提高幅度越明显，距夯点位置越近，提高幅度越明显。

(5) 满足实际工程需要的最佳夯击能约为 3 000 kN·m，最佳夯击数为 7~9 击。该成果不仅适用于煤炭生产过程中产生的固体废弃物煤矸石堆积形成的矸石山，用强夯法处理后用作建筑地基。对其它松散易碎介质(如建筑渣土)的强夯地基加固也有一定的借鉴意义和参考价值。

## 参考文献(References):

- [1] 姜振泉, 赵道辉, 隋旺华, 等. 煤矸石固结压密性与颗粒级配缺陷关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(3): 212 - 216.(JIANG Zhenquan, ZHAO Daohui, SUI Wanghua, et al. Study on relationship between consolidation-compactness and size grade shortage of coal gangue[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1999, 28(3): 212 - 216.(in Chinese))
- [2] 费香泽, 王 钊, 周正兵, 等. 黄土强夯的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 437 - 441.(FEI Xiangze, WANG Zhao, ZHOU Zhengbing, et al. Experimental research on dynamic compaction of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 437 - 441.(in Chinese))

- [3] 谢能刚, 王璐, 邱晗. 强夯动接触力的碰撞分析与并行优化求解[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2172 - 2176.(XIE Nenggang, WANG Lu, QIU Han. Collision analysis and parallel optimum resolution for dynamic contact action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2172 - 2176.(in Chinese))
- [4] 年廷凯, 李鸿江, 杨庆, 等. 不同土质条件下高能级强夯加固效果测试与对比分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 139 - 144.(NIAN Tingkai, LI Hongjiang, YANG Qing, et al. Improvement effect of high energy dynamic compaction under complicated geological conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 139 - 144.(in Chinese))
- [5] 贾敏才, 王磊, 周健. 砂性土宏观强夯加固机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3282 - 3290.(JIA Mincai, WANG Lei, ZHOU Jian. Experimental research on macro-meso consolidation mechanism of sandy soil with dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 3282 - 3290.(in Chinese))
- [6] 张兴元, 张豫川, 张可, 等. 高能级强夯室内模型试验研究[J]. 工程勘察, 2011, (9): 9 - 13.(ZHANG Xingyuan, ZHANG Yuchuan, ZHANG Ke, et al. Research on laboratory model experiment of high energy dynamic compaction[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2011, (9): 9 - 13.(in Chinese))
- [7] 熊巨华, 胡斌, 冯世进, 等. 强夯法加固粉土地基室内模型试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增): 241 - 246.(XIONG Juhua, HU Bin, FENG Shijin, et al. Model test study on silt foundation improvement by dynamic compaction[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(Supp.): 241 - 246.(in Chinese))
- [8] 何长明, 邹金锋, 李亮. 强夯动应力的量测及现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 628 - 632.(HE Changming, ZOU Jinfeng, LI Liang. Field tests on measurement of dynamic stress of dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 628 - 632.(in Chinese))
- [9] 罗恒, 邹金锋, 李亮, 等. 红砂岩碎石土高填方路基强夯加固时的动应力扩散及土体变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 2701 - 2706.(LUO Heng, ZOU Jinfeng, LI Liang, et al. Test study on soil dynamic stress diffusion and deformation during dynamic compaction in roadbed primed with large granule red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 2701 - 2706.(in Chinese))
- [10] 张清峰, 王东权. 强夯法加固煤矸石地基动应力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1142 - 1147.(ZHANG Qingfeng, WANG Dongquan. Model tests on dynamic stress in colliery wastes improved by dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1142 - 1147.(in Chinese))
- [11] 张清峰, 王东权, 王伟. 强夯法加固煤矸石地基破碎密实机制探讨[J]. 建筑科学, 2010, 26(7): 13 - 16.(ZHANG Qingfeng, WANG Dongquan, WANG Wei. Research on mechanism of dynamic compaction of crushing compression of coal gangue[J]. Building Science, 2010, 26(7): 13 - 16.(in Chinese))
- [12] 张清峰. 强夯加固煤矸石地基物理模拟试验研究[J]. 铁道建筑, 2010, (2): 52 - 54.(ZHANG Qingfeng. Model tests on colliery wastes improved by dynamic compaction[J]. Railway Engineering, 2010, (2): 52 - 54.(in Chinese))
- [13] 石亮. 冲击作用下砂土地基地面变形规律的模型试验研究[硕士学位论文][D]. 赣州: 江西理工大学, 2011.(SHI Liang. Model tests on ground deformation rules in sand foundation improved by dynamic compaction[M. S. Thesis][D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2011.(in Chinese))
- [14] 赵康, 石亮, 罗嗣海. 一种便捷强夯模型试验装置的设计及应用[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2012, 44(2): 224 - 229.(ZHAO Kang, SHI Liang, LUO Shihai. The design of a convenient device for dynamic compaction model test and its application[J]. Journal of Xi'an Architecture and Technology University: Natural Science, 2012, 44(2): 224 - 229.(in Chinese))
- [15] 冯世进, 胡斌, 张旭, 等. 强夯参数对夯击效果影响的室内模型试验[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(8): 1147 - 1153.(FENG Shijin, HU Bin, ZHANG Xu, et al. Model test study on impact parameters influence on tamping effect[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(8): 1147 - 1153.(in Chinese))
- [16] 韩文喜. 上海浦东机场场道地基强夯处理机理研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工学院, 1999.(HAN Wenxi. Study on the mechanism of dynamic compaction of airport runway Shanghai Pudong[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: College of Chengdu Technology, 1999.(in Chinese))
- [17] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998: 41 - 43.(GUO Qingguo. Coarse-grained soil engineering properties and applications[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1998: 41 - 43.(in Chinese))
- [18] 张清峰. 强夯法在煤矸石地基加固中的应用研究[硕士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004.(ZHANG Qingfeng. Study on the application of dynamic compaction in coal gangue foundation improving[M. S. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2004.(in Chinese))