强夯法加固煤矸石地基动应力模型试验研究

张清峰[1]，王东权[2]

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

摘　要：通过强夯法加固煤矸石地基物理模型试验，用 DH5939 动态应变仪完整地记录了强夯每一击作用下煤矸石地基中的动应力，系统地研究了不同夯击能和夯击次数作用下不同深度煤矸石地基动应力的分布特征及其衰减规律。结果表明，在强夯冲击荷载作用下，动应力为单一的波峰，沿夯锤不同深度的动应力达到峰值具有明显的时滞性。强夯动应力在水平方向的衰减速度比竖直方向快，竖直方向的影响范围比平方向大。在相同的夯击能作用下，动应力峰值随深度衰减很快，近似呈负幂指数规律衰减。另外，对不同的测点，在夯击能一定的条件下，随着夯击次数的增加，有效加固范围内的动应力增加明显，但在 3～6 击后基本稳定。研究为精确模拟分析强夯加固机理提供了有效途径。

关键词：强夯法；煤矸石地基；动应力；模型试验

中图分类号：TU472　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－4548(2012)06－1142－06

作者简介：张清峰(1977－)，女，江苏沛县人，硕士，讲师，主要从事道路和岩土工程方面的教学科研工作。E-mail: zangqingfeng@yahoo.com.cn。

Model tests on dynamic stress in colliery wastes improved by dynamic compaction

ZHANG Qing-feng[1], WANG Dong-quan[2]

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

Abstract: Through physical model tests on colliery wastes improved by dynamic compaction, the dynamic strain gauge DH5939 is used to record the induced dynamic stress. The distribution and rules of the dynamic stress at different depths under different impact loadings and numbers of dynamic compaction are studied. It is shown that the dynamic stress has a single peak, and it has a significant decay to reach the peak under the impact loadings along the depth of the hammer. The decay speed of the horizontal dynamic stress is faster than that of the vertical one, and the range of influence of the vertical dynamic stress is more extensive than that of the horizontal one. The peak value of the dynamic stress attenuates quickly with the depth and similar in an approximate way of negative exponential decay law under the same tamping energy. In addition, for different measuring points, with the increase of compaction number, the dynamic stress tends to be stable after three to six blows. It may provide an efficient way to analyze the mechanism of dynamic compaction.

Key words: dynamic compaction; colliery waste; dynamic stress; model test

0　引　　言

煤矸石是煤炭生产过程中产生的固体废弃物，煤矸石每年的排放量相当于当年煤炭产量的 15%～20%，全国每年产生的煤矸石约 1.5～2.0×10^8 t。据不完全统计，中国目前已累计煤矸石山 1500 多座，堆存量达 40 多亿吨，占地 1.33 万公顷，而且每年还以约 1 亿吨的速度递增，新增占地约 400 公顷。而煤矸石的综合利用率尚不到 15%，数量众多的煤矸石山不仅侵占大量耕地，而且还会产生一系列的环境问题[1]。采用强夯法对结构松散的煤矸石场地进行加固密实处理，然后用作建筑用地，现已在全国多个矿区推广应用，取得了大量的经验数据。国内的一些学者通过试验手段，研究了煤矸石地基的强度特性、动力特性、破碎特性和分层振动碾压特性，为煤矸石在地基中的应用提供了理论依据[2-4]。

强夯法涉及的是地基土在夯锤巨大冲击力作用下的动态响应问题，在夯击过程中，锤底与地基土表面的接触应力和接触位移是一组相互协调的未知量，求解相当困难。吴铭炳等[5]根据经验将强夯产生的瞬态荷载简化为一已知的三角形波或半正弦波，作为输入

收稿日期：2011－05－06

应力边界进行计算并假设锤底应力是均布的，但由于确定的已知荷载与强夯实际接触应力之间的差异，影响结果的合理性。孔令伟等[6-7]研究了强夯作用下成层地基的表面接触应力分布特征，并对强夯的边界接触应力与沉降特性进行研究。宋修广等[8]同时考虑流固动力藕合和夯锤与地基土的接触藕合，得到了地基土位移及表面接触应力等在强夯作用时间内的变化规律。蒋鹏等[9]则充分考虑到夯击过程中的这种非线性接触，提出采用冲击－动力接触模型计算动接触应力。童小东等[10]提出了解决动力接触问题的一种新方法。何长明等[11]进行了强夯动应力的量测及现场试验研究。刘汉龙等[12]针对钱家欢加卸载弹性模型中强夯冲击应力在加荷阶段应力偏大，卸荷阶段应力函数形式复杂的不足，对应力峰值进行修正和对应力函数进行改进，根据动力分析中应力边界与速度边界之间的关系，将应力边界时程转化为速度边界时程，并将正弦荷载函数引入，推导出计算土体竖向位移的简化计算方法。

笔者通过物理模拟试验，用 DH5939 动态应变仪完整地记录了强夯每一击作用下煤矸石地基中的动应力分布特征及其衰减规律，并尝试用动应力的传播与衰减曲线说明冲击波在地基中的传播，为今后的强夯设计、施工和科研提供参考。改变夯击能量进行不同能量的夯击，以便测出不同能量下不同夯击次数动应力的传播和衰减规律。

1　模型试验设计

1.1　模化设计与模拟参数

根据相似理论，推导相似准则，为简化模型试验条件，模型试验采用与原型相同的材料，对强夯动应力，模型与原型相同。综合考虑模型试验台的规模，煤矸石的颗粒组成特点，量测系统的精度等因素，确定模型试验的几何缩比为 C_L=10。对夯锤质量为 25 t，模型锤质量为 0.025 t，最后确定的试验参数见表 1。

表 1　模型试验参数表

Table 1 Parameters of model tests

参数	落距 /m	锤尺寸/m Φ×*h*	夯击能 /(kN m)
原型	16	2.2×2.2	4000
模型	1.6	0.22×0.22	0.4
原型	14	2.2×2.2	3500
模型	1.4	0.22×0.22	0.35
原型	12	2.2×2.2	3000
模型	1.2	0.22×0.22	0.3
原型	10	2.2×2.2	2500
模型	1.0	0.22×0.22	0.25
原型	8	2.2×2.2	2000
模型	0.8	0.22×0.22	0.2

1.2　模型试验台设计

本着模型试验结果准确可靠、试验方便、试验费用相对较低的原则，并考虑了煤矸石的颗粒大小及组成特点设计了强夯加固煤矸石地基的相似模型试验台。考虑到实际强夯影响范围一般不超过 15 m，为消除强夯时边界效应的影响，根据相似理论，设计试验台高 1000 mm，它由 2 个直径为 410 mm，高度为 500 mm，厚度为 10 mm 半圆弧板和厚度为 10 mm 的底板通过 M16 螺栓联结组成，在半圆弧板外部焊有加固筋板。与地震或机器振动的周期性循环荷载不同，强夯是间歇性冲击荷载。因此，为模拟冲击荷载作用下煤矸石地基的动力特征，需采用落锤加载[13]。用吊车将夯锤提到预定的高度，然后使其做自由落体运动。夯锤为钢筋混凝土锤，外壳为钢管，钢管厚度为 10 mm，顶面钢板厚 10 mm，底面钢板厚 10 mm，顶面与底面钢板和钢管采用焊缝连接。钢管内浇注混凝土，混凝土等级为 C30。为使夯锤落下时不发生偏斜，设计成孔半径为 12 mm 的穿心锤，使重锤从导杆上落下。

1.3　动应力量测系统

动应力量测处理系统由压电式土压力盒、YE-5853 超动态电荷放大器、DH-5939 数据采集仪、计算机 4 部分组成。为了模拟强夯冲击荷载作用下煤矸石地基的动应力衰减规律和有效加固深度，需要沿纵向不同距离布置一系列土压力盒。土压力盒选用洛阳 89002 部队研制生产并经过实际使用考验的 DY-1 型压电式土压力盒，其外形尺寸Φ×*h*=25 mm×5 mm。试验时可先沿垂向每隔 150 mm 布置一个土压力盒，测其竖向动应力，再沿侧向布置土压力盒，测其侧向动应力。土压力盒编号及布置示意图见图 1，2。

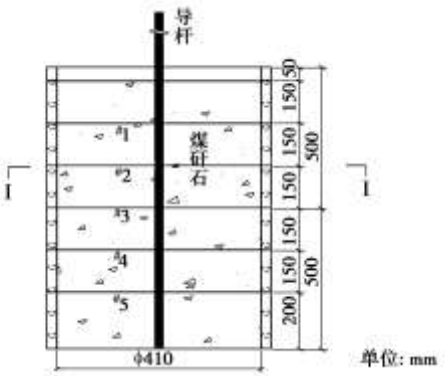

图 1　竖向土压力盒布置示意图

Fig. 1 Vertical layout of earth pressure cells

2　模型试验数据处理和结果分析[14]

试验前后宏观现象表明，强夯前，大颗粒之间架

空的空洞很多，结构松散而不均匀，强夯后煤矸石经过冲击和破碎，原大颗粒之间架空的空隙被破碎颗粒和小颗粒充填和压实。粗大煤矸石块被破碎，煤矸石粗颗粒减少，细颗粒增加，煤矸石地基由松散变的均匀密实。夯坑形状为椭球形，且有一定隆起，夯坑体积随夯击能、夯击次数的增大而增大。

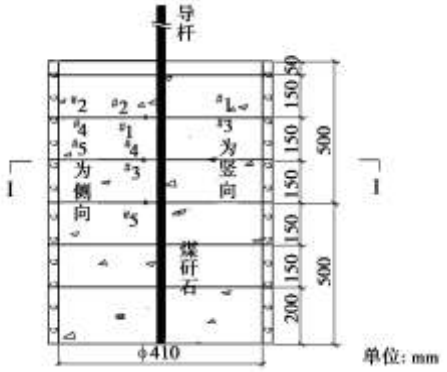

图 2 竖向、侧向土压力盒布置示意图

Fig. 2 Vertical and lateral layout of earth pressure cells

夯击能为 2000 kN·m 的第 1 和第 2 击的不同测点的实测竖向的 $P-T$ 曲线如图 3，4 所示。

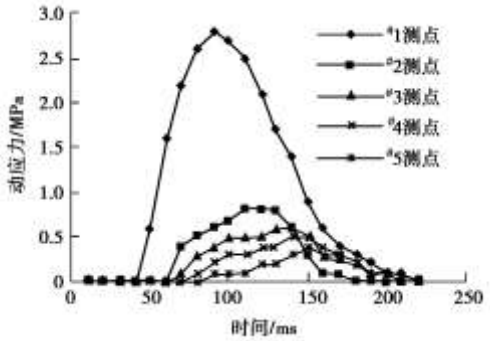

图 3 2000 kN·m 第 1 击 $P-T$ 曲线

Fig. 3 $P-T$ curves of the first blow of 2000 kN·m

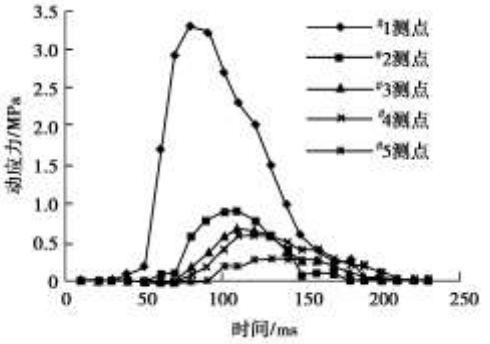

图 4 2000 kN·m 第 2 击 $P-T$ 曲线

Fig. 4 $P-T$ curves of the second blow of 2000 kN·m

从图 3 可看出，在强夯冲击荷载作用下，动应力为单一的波峰，为抛物线形，说明夯锤底部的煤矸石加固以压缩波为主，作用时间极短，约为 20～250 ms。还可以看出，动应力曲线并未出现第二峰值，可以解释为夯锤下煤矸石只受压缩波作用，没有其他波的干扰，其传播方向也是由振源向外传播，质点振动方向和波的前进方向一致。动应力峰值在夯锤底衰减很快，当夯击能为 2000 kN·m，第 1 击时，在距锤底 1.5 m 处，动应力峰值为 2.8 MPa，在距锤底 3 m 处，动应力峰值衰减为 0.8 MPa，在距锤底 4.5 m 处，动应力峰值为 0.6 MPa，在距锤底 6 m 处，动应力峰值为 0.5 MPa，在距锤底 7.5 m 处，动应力峰值为 0.4 MPa。另外，沿夯锤不同深度的动应力达到峰值具有明显的时滞性，经过一定的波动后很快趋于稳定，应力波起压密作用。这表明应力波在煤矸石地基中有一个自表面向深处传播的过程，在这个过程中，煤矸石颗粒破碎，相互错动，形成新的排列，改变了原来的颗粒结构，产生了不可恢复的永久变形。这一点恰好能说明，强夯的有效加固深度是有一定限度的。

夯击能为 3000 kN·m 的第 1 击和第 2 击的不同测点的实测竖向的 $P-T$ 曲线如图 5，6 所示。

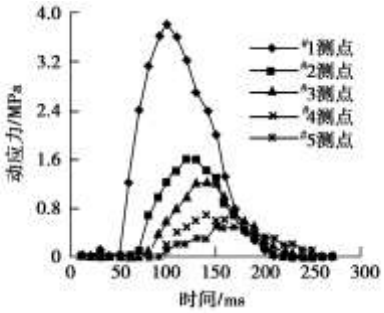

图 5 3000 kN·m 第 1 击 $P-T$ 曲线

Fig. 5 $P-T$ curves of the first blow of 3000 kN·m

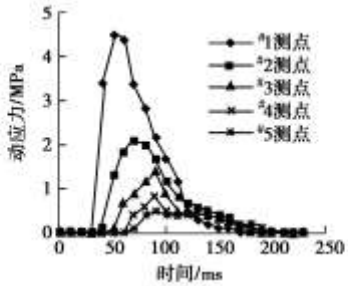

图 6 3000 kN·m 第 2 击 $P-T$ 曲线

Fig. 6 $P-T$ curves of the second blow of 3000 kN·m

夯击能为 4000 kN·m 的第 1 击和第 2 击的不同测点的实测竖向的 $P-T$ 曲线如图 7，8 所示。夯击能为 4000 kN·m 的第 1 击和第 2 击的不同测点的实测竖向和侧向 $P-T$ 曲线如图 9，10 所示。

从图 9，10 可看出，同一深度，侧向的动应力明显小于竖向的动应力。当夯击能为 4000 kN·m 第 1 击时，距锤底 1.5 m 处，竖向动应力为 2.4 MPa，而同

一深度的侧向动应力仅为 0.5 MPa，距锤底 3.0 m 处，竖向动应力为 3.6 MPa，而同一深度的侧向动应力仅为 0.8 MPa，距锤底 4.5 m 处，侧向动应力几乎为 0。说明应力波主要沿竖向传播，侧向传播距离不大，也就是说夯击能主要加固竖向，水平方向的加固范围不大。应力波出现负值，其值较小，较小的负值则起到拉伸作用，说明表层的煤矸石被震松。

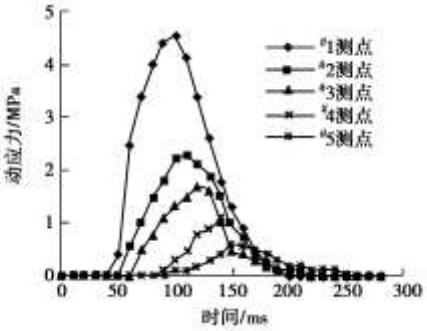

图 7　4000 kN·m 第 1 击 $P-T$ 曲线

Fig. 7 $P-T$ curves of the first blow of 4000 kN·m

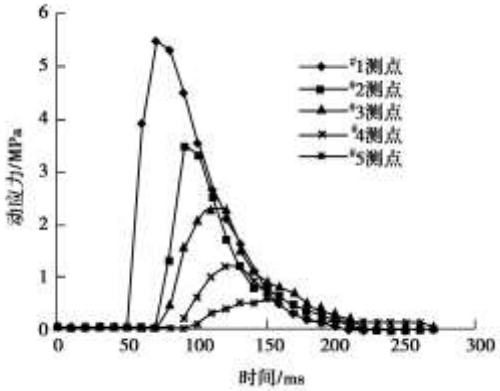

图 8　4000 kN·m 第 2 击 $P-T$ 曲线

Fig. 8 $P-T$ curves of the second blow of 4000 kN·m

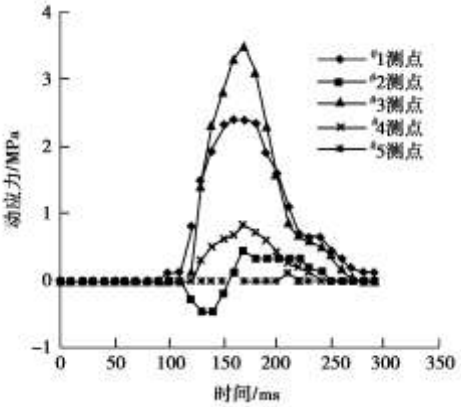

图 9　4000 kN·m 第 1 击 $P-T$ 曲线

Fig. 9 $P-T$ curves of the first blow of 4000 kN·m

现将夯击能分别为 2000，2500，3000，3500，4000 kN·m 不同击数下的强夯动应力峰值找出，根据此数值绘制#1 和#2 测点的不同夯击次数的动应力峰值曲线分别如图 11，12 所示。

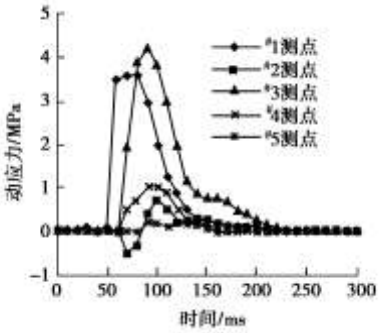

图 10　4000 kN·m 第 2 击 $P-T$ 曲线

Fig. 10 $P-T$ curves of the second blow of 4000 kN·m

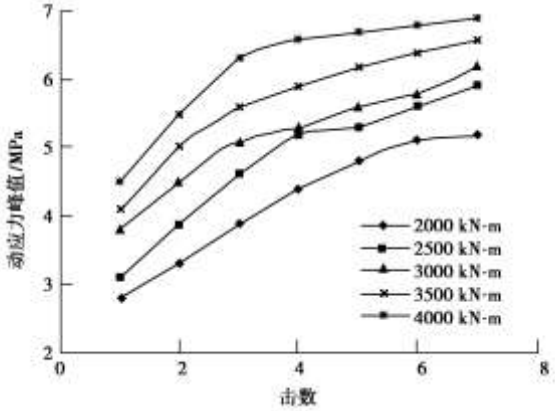

图 11　#1 测点的不同击数的动应力峰值

Fig. 11 Peak value of dynamic stress at measuring point No. 1 under different blows

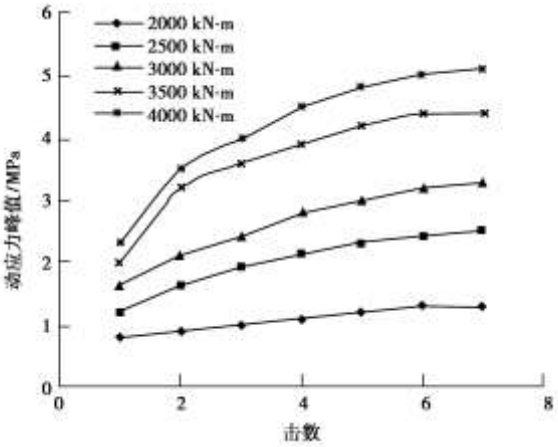

图 12　#2 测点的不同击数的动应力峰值

Fig. 12 Peak values of dynamic stress at measuring point No. 2 under different blows

从图 11，12 可看出，对不同的测点，在夯击能一定的条件下，在连续夯击作用下，随着夯击次数的增加，煤矸石地基的动应力也相应增加，前 3～6 击动应力持续增长，且增长幅度较大，主要有两方面的

原因，一是由于连续夯击后煤矸石地基受压缩以致夯锤和土压力盒的距离相对缩小，夯击力相对增加，另一方面是随着夯击的不断进行，煤矸石破碎，煤矸石地基的密实度得到提高，这也便于压力波的传播。5～6 击后动应力增长不明显，说明煤矸石地基已在一定程度上压密，这说明仅仅通过增加夯击次数提高加固效果是不经济的。从图 11，12 也可看出，夯击能越大，同一深度处动应力也越大，近似呈线性关系。

夯击能分别为 2000，3000，4000 kN m 作用下动应力峰值随深度的衰减规律曲线分别如图 13～15 所示。

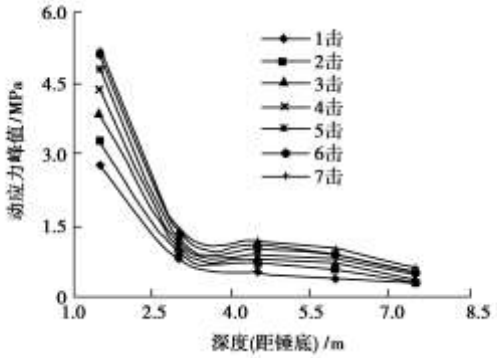

图 13 夯击能 2000 kN m 的动应力峰值随深度衰减规律

Fig. 13 Attenuation rule of peak value of dynamic stress at different depths under impact loading of 2000 kN m

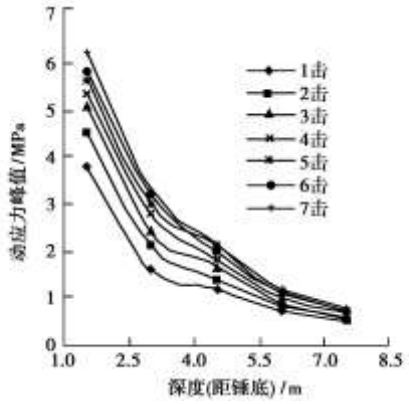

图 14 夯击能 3000 kN m 动应力峰值随深度衰减规律

Fig. 14 Attenuation rule of peak value of dynamic stress at different depths under impact loading of 3000 kN m

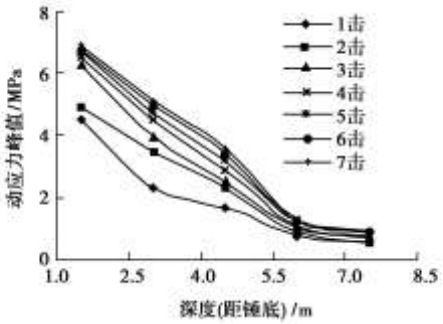

图 15 夯击能 4000 kN m 动应力峰值随深度衰减规律

Fig. 15 Attenuation rule of peak value of dynamic stress at different depths under impact loading of 4000 kN m

从图 13～15 可看出，在相同的夯击能作用下，动应力峰值随深度衰减很快，近似呈负指数幂规律衰减。随夯击次数的增加，上部煤矸石地基首先得到破碎密实，然后夯击能才能对较深处的煤矸石地基进行加固。在较浅处，动应力衰减较快，而较深处，动应力衰减较慢。对夯击能 2000 kN m，距锤底 3 m 深处，动应力峰值衰减很慢，据此，可得出，纵向有效加固深度约为 3.0 m。对夯击能 3000 kN m，距锤底 6 m 深处，动应力峰值衰减很慢，据此，可得出，纵向有效加固深度约为 6.0 m。对夯击能 4000 kN m，距锤底 6 m 深处，动应力峰值衰减很慢，据此，可得出，纵向有效加固深度约为 6.0 m。这说明仅仅通过增加夯击能提高纵向有效加固深度是不经济的。通过模型试验，得出满足实际工程需要的最佳夯击能约为 3000 kN m。

3 结论与建议

（1）强夯动应力在坚直方向的衰减速度快，动应力值越大，衰减速度也越快。水平方向的动应力的衰减更快，故强夯加固水平方向的有效范围不大，这是由于锤底上层受夯击作用结构破坏，侧向挤压力加大的缘故。

（2）随着夯击次数的增加，锤底有效加固范围内的动应力提高值相当明显，但在第 6 击后基本稳定。对同一夯点，随着夯击次数的增加，夯点下煤矸石地基的的破碎密实，使动应力加大，在强夯的有效加固范围内，动应力的增幅明显，反之不显著。

（3）在相同的夯击能作用下，动应力峰值随深度衰减很快，近似呈负指数幂规律衰减。随夯击次数的增加，上部煤矸石地基首先得到破碎密实，然后夯击能才能对较深处的煤矸石地基进行加固。在较浅处，动应力衰减较快，而较深处，动应力衰减较慢。据此得出满足实际工程需要的最佳夯击能约为 3000 kN m。

（4）由于受试验条件的限制，只进行了单点夯击模拟试验，和实际工程相比有一定的出入，为进行强夯加固煤矸石地基的动应力定量的分析研究，还需进行更加细致的模型试验。

参考文献：

[1] 张庆利，渠立权．煤矸石山生态复垦研究进展[J]．安徽农业科学，2009，**37**(3)：1289－1291．(ZHANG Qing-li, QU Li-quan. Research progress of ecological reclamation of colliery wastes[J]. Journal of An-hui Agricultural Sciences,

2009, **37**(3): 1289－1291. (in Chinese))

[2] 刘松玉, 邱　钰, 童立元, 等. 煤矸石的强度特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(1): 199－205. (LIU Song-yu, QIU Yu, TONG Li-yuan, et al. Experimental study on strength properties of coal wastes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(1): 199－205. (in Chinese))

[3] 刘松玉, 童立元, 邱　钰, 等. 煤矸石颗粒破碎及其对工程力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(5): 505－510. (LIU Song-yu, TONG Li-yuan, QIU Yu, et al. Crushable effects on engineering mechanical properties of colliery wastes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 505－510. (in Chinese))

[4] 刘松玉, 邱　钰, 童立元, 等. 煤矸石的动力特性试验研究[J]. 东南大学学报, 2005, **35**(2): 280－283. (LIU Song-yu, QIU Yu, TONG Li-yuan, et al. Experimental research on dynamic properties of coal mining wastes[J]. Journal of Southeast University, 2005, **35**(2): 280－283. (in Chinese))

[5] 吴铭炳, 王钟琦. 强夯机理的数值分析[J]. 工程勘察, 1989(3): 1－5. (WU Ming-bing, WANG Zhong-qi. The numerical analysis of the dynamic consolidation mechanisms[J]. Engineering Reconnaissance, 1989(3): 1－5. (in Chinese))

[6] 孔令伟, 袁建新. 强夯作用下成层地基的表面接触应力分布特征[J]. 力学学报, 1999, **31**(2): 250－256. (KONG Ling-wei, YUAN Jian-xin. Study on surface contact stress distribution properties for multi-layered foundation during dynamic consolidation[J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, **31**(2): 250－256. (in Chinese))

[7] 孔令伟, 袁建新. 强夯的边界接触应力与沉降特性研究[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(2): 86－92. (KONG Ling-wei, YUAN Jian-xin. Study on surface contact stress and settlement properties during dynamic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(2): 86－92. (in Chinese))

[8] 宋修广, 李英勇, 韩　军. 强夯法加同地基的多重耦合分析[J]. 岩土力学, 2003, **24**(3): 471－474. (SONG Xiu-guang, LI Ying-yong, HAN Jun. Multi-coupling analysis of dynamic consolidation method for reinforcing foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(3): 471－474. (in Chinese))

[9] 蒋　鹏, 李荣强, 孔德坊. 强夯大变形冲击碰撞数值分析[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 222－226. (JIANG Peng, LI Rong-qiang, KONG De-fang. Numerical analysis of large deformation impact and collision properties during dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(2): 222－226. (in Chinese))

[10] 童小东, 蒋永生, 龚维明. 解决动力接触问题的一种新方法[J]. 工程力学, 2000, **17**(6): 82－86. (TONG Xiao-dong, JIANG Yong-sheng, GONG Wei-ming. A new method for dynamic contact analysis[J]. Engineering Mechanics, 2000, **17**(6): 82－86. (in Chinese))

[11] 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 Chang-ming, ZOU Jin-feng, 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))

[12] 刘汉龙, 高有斌, 曹建建, 等. 强夯作用下接触应力与土体竖向位移计算[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(10): 1493－1497. (LIU Han-long, GAO You-bin, CAO Jian-jian, et al. Calculation of contact stress and soil vertical displacement under dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(10): 1493－1497. (in Chinese))

[13] 韩文喜. 上海浦东机场场道地基强夯处理极其机理研究[D]. 成都: 成都理工学院, 1999. (HAN Wen-xi. Study on the mechanism of dynamic compaction of airport runway of shang-hai pudong[D]. Chengdu: College of Chengdu Technology, 1999. (in Chinese))

[14] 张清峰. 强夯法在煤矸石地基加固中的应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004. (ZHANG Qing-feng. Study on the application of dynamic compaction in coal gangue foundation improving[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2004. (in Chinese))