



推荐阅读:

[我国煤矿冲击地压发展 70 年:理论与技术体系的建立与思考](#)

[我国大采高综采技术及围岩控制研究现状](#)

[保水采煤研究 30 年回顾与展望](#)

[煤矿“短充长采”科学开采模式研究](#)

[西部煤炭绿色开发地质保障技术研究现状与发展趋势](#)

[基于保水采煤的煤炭开采带与泉带错位规划问题](#)

[煤矿冲击地压灾害防控技术研究现状及展望](#)

[基于负煤柱巷道布置的煤矿冲击地压防治技术研究](#)

[软弱厚煤层沿顶掘进并沿底回采技术研究](#)

[松散煤岩组合体不均匀破坏试验研究](#)

[采场空间结构模型及相关动力灾害控制研究](#)

[坚硬顶板型冲击地压发生机理及监测预警研究](#)

[基于动静载叠加原理的冲击矿压灾害防治技术研究](#)

[大空间采场远场关键层破断形式及其对矿压显现的影响](#)

[岩层移动理论与力学模型及其展望](#)

[我国水体下保水采煤技术研究进展](#)

[层影响下岩体采动灾变响应研究现状与展望](#)

[特大断面冲击地压巷道破坏机理及控制技术研究](#)

[动压影响下的软岩巷道加固治理技术研究](#)

[弱胶结富水顶板巷道围岩控制技术研究](#)

采矿科学与工程



移动扫码阅读

李新旺,赵新元,程立朝,等.限定顶板条件下矸石充填体横向推实特性试验研究[J].煤炭科学技术,2020,48(3):18-24. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.05.002

LI Xinwang, ZHAO Xinyuan, CHENG Lichao, et al. Experimental study on lateral compaction characteristics of gangue filling body under limited roof conditions[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 18-24. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.05.002

限定顶板条件下矸石充填体横向推实特性试验研究

李新旺^{1,2},赵新元¹,程立朝^{1,2},秦义岭¹

(1.河北工程大学 矿业与测绘工程学院,河北 邯郸 056038;2.河北工程大学 河北省高校煤炭资源开发与建设应用技术研发中心,河北 邯郸 056038)

摘要:基于相似模拟原理,自主设计了一套模拟试验台,通过对充填矸石散体横向推压,利用推压安息角和体积变化率这2个变形参数,分析研究了放料步距、横向推力、含水量和黄土掺量对充填矸石散体在限定顶板下推实特性的影响规律。试验结果表明,放料步距的增大不利于矸石散体推压后的固结成型;横向推力增大,有助于矸石散体的固结成型,横向推力1.25 kN是推压安息角增大和体积变化率曲线斜率变缓的拐点;含水量对矸石散体推实特性影响较为显著,在横向推力5.0 kN和7.5 kN条件下,当含水量达到3%,矸石散体开始固结成型。黄土掺量对矸石散体的推实特性影响最显著,黄土掺量超过4%后,对矸石散体推实特性影响相对减弱。

关键词:充填开采;矸石散体;横向推压;体积变化率

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)05-0018-07

Experimental study on lateral compaction characteristics of gangue filling body under limited roof conditions

LI Xinwang^{1,2}, ZHAO Xinyuan¹, CHENG Lichao^{1,2}, QIN Yiling¹

(1. College of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Coal Resources Development and Construction Application Technology Research Center of Universities in Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Based on the principle of similar simulation, a set of simulation test board was designed by laterally pushing on the gangue-filled bulk, using the two deformation parameters of pushing angle and volume change rate, the influence of discharge step distance, pushing force, water content and loss content on the compaction characteristics of the filled gangue under the limited roof conditions was analyzed. The test results show that the increase of discharge step distance is not conducive to the consolidation of gangue; the increase of the lateral thrust contributes to the consolidation formation of the gangue. The inflection point of the slope of the large and volume change rate curve is slow; the water content has a significant effect on the consolidation characteristics of the gangue under laterally pushing. Under the lateral thrust of 5.0 kN and 7.5 kN, when the water content reaches 3%, the gangue starts to consolidate. The amount of loss has the most significant effect on consolidation of granular gangue under lateral pushing. When the amount of loss is more than 4%, the effect on consolidation of granular gangue is relatively weakened.

Key words: backfill mining; granular gangue; lateral pushing; volume change rate

0 引言

矸石充填是一种绿色的开采技术,利用大量废

弃的矸石充填采空区来控制地表沉陷,体现了绿色开采的理念^[1-3]。煤矸石作为矸石充填的骨料,其压实特性关系到矸石充填的效果^[4-6]。针对矸石散

收稿日期:2019-03-22;责任编辑:杨正凯

基金项目:河北省重点研发计划资助项目(18273815D);河北省高等学校科学技术研究资助项目(QN2017031)

作者简介:李新旺(1979—),男,河北邢台人,教授,博士。

通讯作者:程立朝(1981—),男,河北南和人,副教授,博士。Tel:0310-8579513, E-mail:chenglichao169@163.com

体的压实特性,胡炳南等^[7]采用大容器、大粒径、大载荷和仿真煤体条件进行了矸石压缩试验,总结了压缩过程中应力应变关系曲线和轴压侧压关系曲线的形态及其特征;张吉雄^[8]对松散矸石进行了压实试验,得到了压实过程中的应变、压实度与应力的关系;马占国等^[9]通过试验总结出了松散煤矸石压实过程中的轴向应变、弹性模量等参数的变化规律,并分析了压实过程变形机理;姜振泉等^[10]通过特殊的压密试验探讨了煤矸石压密性与矸块破碎之间的关系;钱志等^[11]对连续级配矸石进行压缩力学试验,得出原生矸石粒径与矸石压缩率的关系等,还有众多专家学者也进行了相关分析研究^[12-15]。这些成果大多都研究了充填矸石在竖向压力下的一些侧限压实承载特性,而对充填矸石散体在顶板限定下的横向推实特性鲜有研究。

充填开采过程中,由于充填支架和围岩的共同支撑作用,工作面后方一定距离内顶板不会出现瞬时下沉和垮落,而在短期内形成顶板限定条件下的充填矸石推实空间^[16-17]。在该充填矸石推实空间内,充填支架上的夯实机构对充填矸石进行横向推压,使松散的充填材料堆积、受压,与顶板连接,以增加充填体的密实性,提高充填质量^[18-20];对于松散矸石,夯实机构回退后,推实后的散体会自然放落,形成一定的放落角,体积较施加横向推力前也会发生变化,当松散矸石与其它胶黏材料混合时,在横向推压作用下,充填质量会明显提高。而实际充填现场,充填矸石在限定空间下的横向推实特性通常受多种因素影响,比如放料步距、推力、含水量等。

本文基于相似模拟原理,自主设计了一套充填矸石横向推实模拟试验台,分别研究放料步距、横向推力、含水量以及黄土掺量等因素对矸石散体在限定顶板条件下的横向推实特性的影响规律,对提高充填矿井采空区矸石充填质量和经济效益具有重要的理论研究价值和指导意义。

1 试验台设计

1.1 试验原型及相似比

模拟背景为山西某矿充填工作面。该充填工作面是近水平煤层开采,平均采高为3 m,顶板为砂岩,硬度大,断层少。工作面充填液压支架宽度为1.5 m,其中夯实机构上的挡矸板和推实板宽度均为1.5 m,高度为0.75 m,推实板对充填体采用上下夯实方式。该矿充填矸石容重为25 kN/m³,粒径范围为0~50 mm。

根据相似理论,并依据现场实际情况和试验模

型条件,建立模拟相似比如下:

$$C_L = L_H / L_M$$

其中: C_L 为几何相似比; L_H 为原型尺寸,m; L_M 为模型尺寸,m。计算可得 $C_L = 15$ 。

$$C_\gamma = \gamma_H / \gamma_M$$

其中: C_γ 为容重相似比; γ_H 为实际充填材料容重,kN/m³; γ_M 为试验材料容重,kN/m³。计算可得 $C_\gamma = 1.4$ 。

$$C_\sigma = C_L C_\gamma$$

其中: C_σ 为应力相似比; C_L 为几何相似比; C_γ 为容重相似比。计算可得 $C_\sigma = 21$ 。

1.2 试验台结构设计

为了模拟充填工作面的夯实过程,自行设计制作了试验台。该试验台采用高强度厚钢板和分体式千斤顶制作而成,可模拟不同放料高度、不同充填步距、不同采空区宽度等试验条件。三块高强度厚钢板依次叠放,上方根据需要覆盖高强玻璃板,加上高强度移动垫块,使其紧密围成一个矩形半密闭空间,空间横向可承受最大30 kN的推力。分体式千斤顶模拟充填支架的夯实机构,是整个试验台的推压装置,千斤顶缸体前端套有高强度钢板,可对试验材料进行横向推压。试验台结构简图如图1所示。根据1:15几何相似比,本试验采用的采空区模型尺寸为20 cm×20 cm×20 cm(长×宽×高),推实板模型尺寸为20 cm×17 cm(宽×高),模拟全断面横向一次推实,横向推力最大值取10 kN。采空区顶板模型采用厚5 cm高强度玻璃板代替。整个试验台如图2所示。

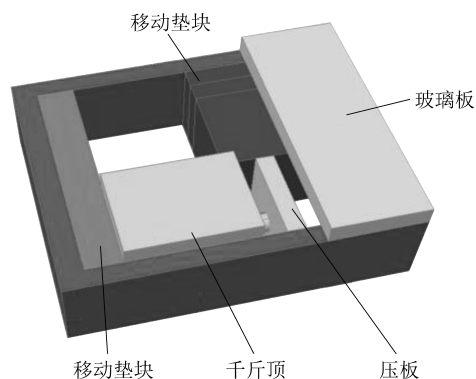


图1 试验台结构设计

Fig.1 Test bench structure design

2 试验材料选取

随机选取该矿粗碎后的原生矸石,分别用10、20、30、40 mm四种规格的分级筛筛分,得到原生矸石不同粒径区间的质量占比。然后根据相似理论,将原生矸石进行细碎,用网孔直径为0.63、1.25、

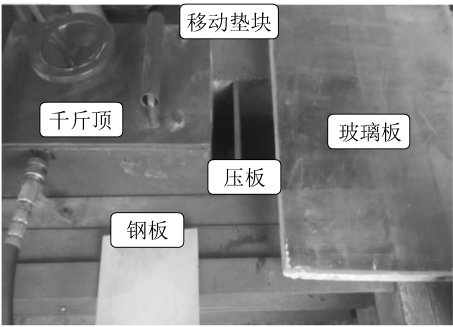


图 2 模拟试验台

Fig.2 Simulation test bench

2.50 mm 的筛网进行筛分,按照相应的原生矸石各粒径区间占比来配制试验材料,经测试得到试验材料经压缩后容重为 18 kN/m³。试验材料不同粒径区间质量占比见表 1。

表 1 试验材料不同粒径区间质量占比

Table 1 Quality ratio of different particle size ranges of experimental materials

原生矸石粒径 区间/mm	试验材料粒径 区间/mm	质量占比/%
0—10	0—0.63	15.60
10—20	0.63—1.25	18.15
20—30	1.25—2.50	33.67
30—40		
40—50	2.50—3.50	32.58

3 试验方案与过程

3.1 试验方案

为研究放料步距、横向推力、含水量和黄土掺量对矸石散体的横向推实特性的影响,制定试验方案见表 2—表 5。

表 2 放料步距影响因素方案设计

Table 2 Design of influencing factors for discharging steps distance

方案编号	放料步距/ cm	横向推力/ kN	含水量/ %	黄土掺量/ %
A ₁	2	5.0	0	0
A ₂	4	5.0	0	0
A ₃	6	5.0	0	0
A ₄	8	5.0	0	0
A ₅	2	7.5	0	0
A ₆	4	7.5	0	0
A ₇	6	7.5	0	0
A ₈	8	7.5	0	0

表 3 横向推力影响因素方案设计

Table 3 Design of influencing factors for pushing force

方案编号	放料步距/ cm	横向推力/ kN	含水量/ %	黄土掺量/ %
B ₁	4	0	0	0
B ₂	4	1.25	0	0
B ₃	4	2.50	0	0
B ₄	4	5.00	0	0
B ₅	4	7.50	0	0
B ₆	4	10.00	0	0
B ₇	6	0	0	0
B ₈	6	1.25	0	0
B ₉	6	2.50	0	0
B ₁₀	6	5.00	0	0
B ₁₁	6	7.50	0	0
B ₁₂	6	10.00	0	0

表 4 含水量影响因素方案设计

Table 4 Design of influencing factors for water content

方案编号	放料步距/ cm	横向推力/ kN	含水量/ %	黄土掺量/ %
C ₁	4	5.0	1	0
C ₂	4	5.0	2	0
C ₃	4	5.0	3	0
C ₄	4	5.0	4	0
C ₅	4	5.0	5	0
C ₆	4	7.5	1	0
C ₇	4	7.5	2	0
C ₈	4	7.5	3	0
C ₉	4	7.5	4	0
C ₁₀	4	7.5	5	0

表 5 黄土掺量影响因素方案设计

Table 5 Design of influencing factors for loess content

方案编号	放料步距/ cm	横向推力/ kN	含水量/ %	黄土掺量/ %
D ₀	4	2.5	5	0
D ₁	4	2.5	5	2
D ₂	4	2.5	5	4
D ₃	4	2.5	5	6
D ₄	4	2.5	5	8
D ₅	4	5.0	5	2
D ₆	4	5.0	5	4
D ₇	4	5.0	5	6
D ₈	4	5.0	5	8
D ₉	4	7.5	5	2
D ₁₀	4	7.5	5	4
D ₁₁	4	7.5	5	6
D ₁₂	4	7.5	5	8

3.2 试验过程

在实际操作过程中,除了控制各因素变量外,其余的试验过程基本相同,在此不再赘述。相同的试验过程一般为混合试验材料→倒入试验台→测算矽石散体初始放落角和初始体积→横向推压矽石散体→撤去推板→测算推压后的推压安息角和体积。以含水量 3% 对矽石散体推实特性的影响试验过程为例,如图 3 所示。首先对试验用的矽石材料加入矽石质量 3% 的自来水,搅拌均匀(图 3a),搅拌混合后的试验材料如图 3b 所示。然后用方形铲在距离采空区模型底面高 17 cm、距离内侧钢板 4 cm 处开始缓慢倒入矽石散体。待矽石散体堆积高度为 17 cm 时,停止倾倒(图 3c),测算矽石散体的初始安息角和体积(图 3d),然后千斤顶推动压板对矽石散体进行推压,观察液压表读数,当压力为 5.0 kN 和 7.5 kN 时,持续时间 5 s,之后撤回压板,观察此时矽石散体的固结成型状态(图 3e),最后分别测算并记录两种横向推力下的矽石散体推压安息角和推实体积(图 3f)。依此类似操作,分别测算并记录矽石散体含水量为 1%、2%、4%、5% 时,在横向推力为 5.0 kN 和 7.5 kN 情况下的推压安息角和推实体积。

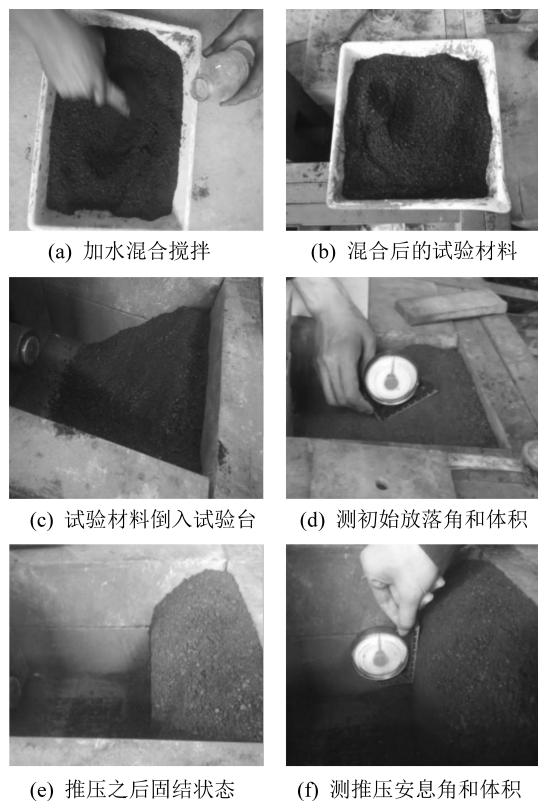


图 3 含水量影响因素试验过程

Fig.3 Test procedure of water content influencing factor

为模拟不同放料步距,试验中在距离内侧钢板 2、4、6、8 cm 处分别缓慢倒入充填材料;为研究横向推力的影响,将横向推力分别加载到 0、1.25、2.50、

5.00、7.50、10.00 kN,模拟放料步距分别为 4 cm 和 6 cm 两种情况;为研究黄土掺量的影响,含水量定为 5%、放料步距定为 4 cm,在矽石材料中分别掺入质量分数为 0%、2%、4%、6%、8% 的黄土,每个黄土掺量条件下分别用 2.5、5.0、7.5 kN 的横向推力进行压实试验。

试验中,利用测算得到的矽石散体推压安息角和体积变化率这 2 个变形参数来量化反应各因素对矽石散体的推实特性的影响,矽石散体的推压安息角越大,体积变化率越大,反映出矽石散体的推实成型特性越显著。其中,推压安息角定义为矽石散体在经过一定横向推力的推压并撤回推实板,待稳定之后,矽石物料堆积体斜面与试验台水平面之间的夹角。体积变化率定义为推压后变化的体积与初始体积的比值,即:

$$A = \frac{V_s - V_t}{V_s};$$

式中: A 为体积变化率; V_s 为刚放入矽石散体的初始体积, cm^3 ; V_t 为每次横向推压之后的体积, cm^3 。

4 试验结果与分析

4.1 放料步距对矽石散体推实特性的影响

通过表 2 试验方案 A_1 — A_8 ,改变矽石散体的放料步距,并在横向推力为 5.0 kN 和 7.5 kN 情况下,分别测算得矽石散体的推压安息角和体积变化率曲线如图 4 和图 5 所示。

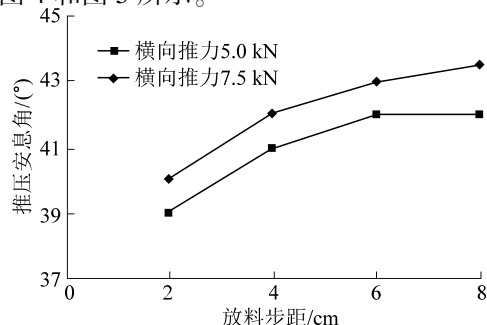


图 4 不同放料步距的矽石散体推压安息角变化

Fig.4 Change of pushing rest angle of gangue in different discharge step distance

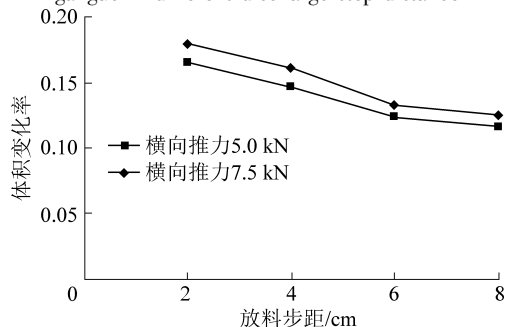


图 5 不同放料步距的矽石散体体积变化率

Fig.5 Volume change rate of gangue in different discharge step distance

1)在横向推力为5.0 kN和7.5 kN情况下,随着放料步距的增加,矽石散体推压安息角却增加很少,最多仅增加3°左右,影响甚微。

2)在横向推力为5.0 kN和7.5 kN时,矽石散体的体积变化率随着放料步距的增加而不断减小,并趋于稳定。放料步距达到6 cm时,体积变化率开始缓慢减小。放料步距为8 cm时,体积变化率最小,分别为0.118、0.125。

3)放料步距的增加,对矽石散体的横向推压固结成型产生不利影响。

4.2 横向推力对矽石散体推实特性的影响

通过表3试验方案B₁—B₁₂,对放料步距分别为4 cm和6 cm的矽石散体施加不同的横向推力,测算得出了矽石散体的推压安息角和体积变化率的数据,将所测数据绘制如图6和图7所示。

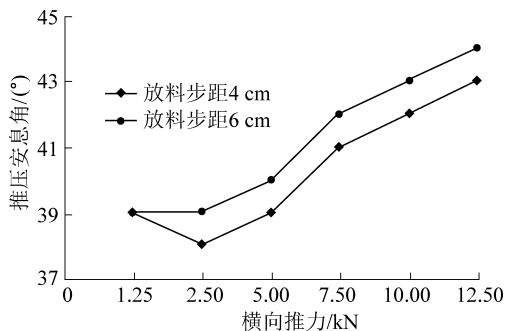


图6 不同横向推力下的矽石推压安息角变化

Fig.6 Change of pushing rest angle

of gangue under different pushing forces

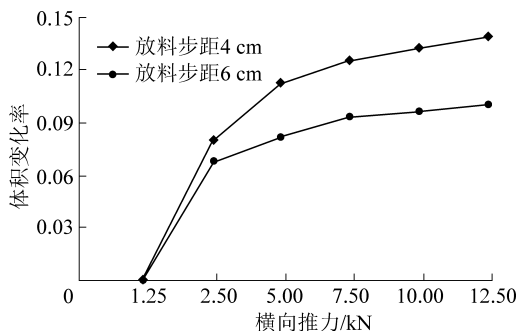


图7 不同横向推力下的矽石体积变化率

Fig.7 Volume change rate of gangue

under different pushing forces

1)矽石散体的推压安息角随着横向推力的增大而呈现增大趋势,但角度增加较小。横向推力为1.25 kN是矽石散体推压安息角缓慢增加的拐点。

2)随着横向推力的增大,矽石散体的体积变化率呈先快速增长后变缓趋势。横向推力1.25 kN是体积变化率由快速增加到缓慢增加的拐点,此时体积变化率为0.08。

3)横向推力的增大有利于矽石散体的固结

成型。

4.3 含水量对矽石散体推实特性的影响

通过试验方案B₄、B₅和C₁—C₁₀,研究了矽石含水量对矽石散体固结成型特性的影响作用,得到试验结果如图8和图9所示。

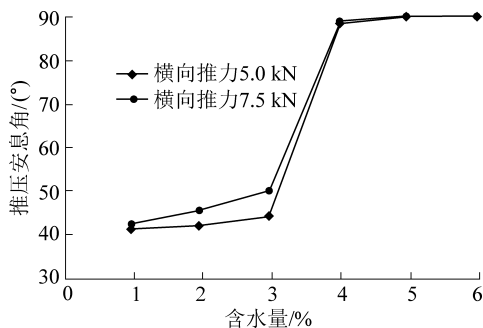


图8 不同含水量的矽石散体推压安息角变化

Fig.8 Change of pushing rest angle of gangue bulk with different water content

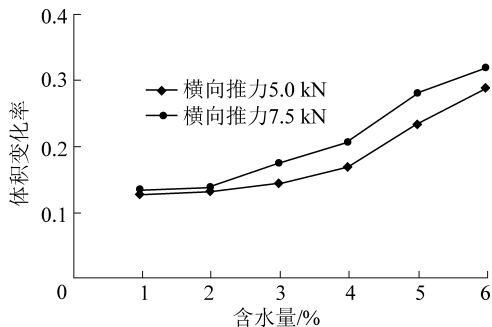


图9 不同含水量的矽石散体体积变化率

Fig.9 Volume change rate of gangue

with different water content

1)当含水量小于2%时,矽石散体的推压安息角增加缓慢,最大角度为50°左右。当含水量达到3%时,在5.0 kN和7.5 kN横向推力下,矽石散体的推压安息角接近90°并开始固结成较为规整的矩形体(图3e)。

2)矽石散体的体积变化率随着含水量的增加而先缓慢增大后快速增大,3%的含水量是矽石散体变化率曲线斜率变化由小到大的拐点。

3)含水量对矽石散体的推实成型特性影响较为明显,当含水量达到3%,矽石散体开始固结成型。

4.4 黄土掺量对矽石散体推实特性的影响

为了研究黄土掺量对矽石散体推实特性的影响,通过试验C₅、C₁₀和D₀—D₁₂,得到试验结果如图10和图11所示。

1)在含水量为5%的矽石散体中加入不同量黄土后,当横向推力大于2.5 kN时,推压安息角均为90°,矽石散体已经固结成密实的矩形体。

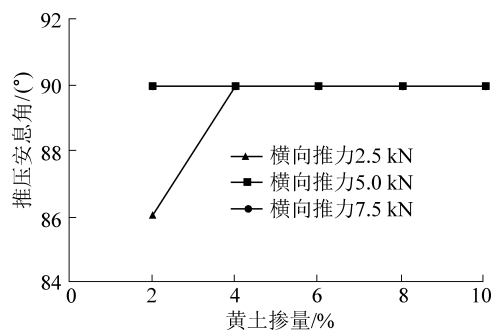


图10 不同黄土掺量的矸石散体推压安息角变化

Fig.10 Change of pushing rest angle of gangue with different loess content

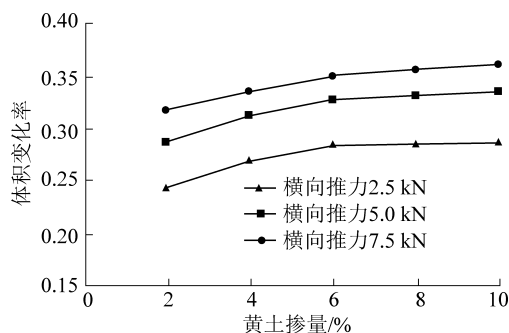


图11 不同黄土掺量的矸石散体体积变化率

Fig.11 Volume change rate of gangue with different loess content

2)随着黄土掺量的增加,体积变化率也随着增大。黄土掺量超过4%之后,体积变化率增加变缓,表明黄土掺量过多对矸石散体推实特性影响相对减弱。

3)黄土掺量对矸石散体的推实特性影响显著,但黄土成本高,掺量不宜过多。

5 结 论

1)在横向推力为5.0 kN和7.5 kN下,放料步距的增大对矸石散体的推压安息角影响甚微,而体积变化率却呈现减小趋势,表明增加放料步距不利于矸石散体的横向推压固结成型。

2)横向推力的增大,有助于矸石散体的固结成型。横向推力1.25 kN是推压安息角增大和体积变化率斜率变缓的拐点。

3)含水量对于矸石散体的推实特性影响较为明显。在5.0 kN和7.5 kN横向推力下,当含水量达到3%,矸石散体开始固结成型。

4)黄土掺量对矸石散体的推实特性影响最显著,黄土掺量超过4%之后,对矸石散体推实特性的影响开始相对减弱。

参考文献 (References):

- [1] 钱鸣高,缪协兴,许家林.资源与环境协调(绿色)开采[J].煤炭学报,2007,32(1):1-7.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Mining coordinating with resource and environment[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 1-7.
- [2] ZHANG Q, ZHANG J X, HUANG Y L, et al. Back filling technology and strata behaviors in fully mechanized coal mining working face[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(2): 151-157.
- [3] United Nations. Report of the world commission on environment and development; our common future[R/OL]. <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>, 1987: 1-3.
- [4] 朱川曲,周泽,李青锋,等.矸石充填材料压缩力学特性试验研究[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2015,30(4):1-6.
ZHU Chuanqu, ZHOU Ze, LI Qingfeng, et al. Experimental study on the compression properties of gangue[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2015, 30(4): 1-6.
- [5] LIU Zhan, ZHANG Jixiong, ZHOU Nan. Random gravel model and particle flow based numerical biaxial test of solid backfill materials[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(4): 463-467.
- [6] ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, SUN Qiang, et al. Surface subsidence control theory and application to backfill coal mining technology[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2): 1439-1448.
- [7] 胡炳南,郭爱国.矸石充填材料压缩仿真试验研究[J].煤炭学报,2009,34(8):1076-1080.
HU Bingnan, GUO Aiguo. Testing study on coal waste back filling-material compression simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1076-1080.
- [8] 张吉雄.矸石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2008.
- [9] 马占国,浦海,张帆,等.煤矸石压实特性研究[J].矿山压力与顶板管理,2003(1):95-96.
MA Zhanguo, PU Hai, ZHANG Fan, et al. Research on compaction characters of coal gangue[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2003, 19(1): 95-96.
- [10] 姜振泉,季梁军,左如松.煤矸石的破碎压密作用机制研究[J].中国矿业大学学报,2001,30(2):139-142.
JIANG Zhenquan, JI Liangjun, ZUO Rusong. Research on mechanism of crushing-compression of coal waste[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(2): 139-142.
- [11] 钱志,徐斗斗,郭广礼,等.原生矸石连续级压压缩试验研究[J].煤炭工程,2012(6):100-106.
QIAN Zhi, XU Doudou, GUO Guangli, et al. Research on continued gradation compression experiment of primary coal rejects[J]. Coal Engineering, 2012(6): 100-106.
- [12] 查剑锋,吴兵,郭广礼.充填矸石级配特性及其压缩性质试验研究[J].矿业快报,2008,12(12):40-42.
ZHA Jianfeng, WU Bing, GUO Guangli. Experimental investigation

- on gradation characteristics and compression property of filling refuse[J]. Express Information of Mining Industry, 2008, 12(12): 40-42.
- [13] 涂 强, 张修峰, 刘鹏亮. 不同粒径级配煤矸石散体压缩变形试验研究[J]. 煤炭工程, 2009(11): 68-70.
TU Qiang, ZHANG Xiufeng, LIU Pengliang, *et al.* Different particle size gradation gangue dispersion experimental study on deformation compression[J]. Coal Engineering, 2009(11): 68-70.
- [14] 苏承东, 顾 明, 唐 旭, 等. 煤层顶板破碎岩石压实特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 18-26.
SU Chengdong, GU Ming, TANG Xu, *et al.* Experiment study of compaction characteristics of crushed stones from coal seam roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 18-26.
- [15] 闫 浩, 张吉雄, 张 升, 等. 散体充填材料压实力学特性的宏观研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 413-420.
YAN Hao, ZHANG Jixiong, ZHANG Sheng, *et al.* Macro-micro research on compaction properties of granular backfilling materials[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 413-420.
- [16] 李 猛, 张吉雄, 姜海强. 固体密实充填采煤覆岩移动弹性地基薄板模型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2369-2373.
LI Meng, ZHANG Jixiong, JIANG Haiqiang, *et al.* A thin plate on elastic foundation model of overlying strata for dense solid backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2369-2373.
- [17] 王家臣, 杨胜利, 杨宝贵, 等. 长壁矸石充填开采上覆岩层移动特征模拟试验[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1256-1262.
WANG Jiachen, YANG Shengli, YANG Baogui, *et al.* Simulation experiment of overlying strata movement features of longwall with gangue backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1256-1262.
- [18] 刘 清, 牛剑锋, 时统军. 综采工作面矸石自动充填捣实控制系统设计[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(11): 111-115.
LIU Qing, NIU Jianfeng, SHI Tongjun. Design on automatic coal refuse backfill and tamping control system of fully-mechanized coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(11): 111-115.
- [19] 张 强, 张吉雄, 巨 峰, 等. 固体充填采煤充实率设计与控制理论研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 64-71.
ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, JU Feng, *et al.* Backfill body's compression ratio design and control theory research in solid backfill coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 64-71.
- [20] 李 猛, 张吉雄, 黄艳利, 等. 基于固体充填材料压实特性的充实率设计研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1110-1115.
LI Meng, ZHANG Jixiong, HUANG Yanli, *et al.* Research on compression ratio design based on compaction properties of solid backfill materials[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1110-1115.