

# 矸石充填的压实特性试验分析

题正义, 秦洪岩, 李树兴

(辽宁工程技术大学 研究生学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:**“三下”压煤问题已成为煤矿开采中越来越突出的问题之一,而充填开采技术因其具有控制岩层移动、限制地表沉降的作用,目前已成为解决“三下”压煤问题的重要途径。充填开采技术中,充填体的变形情况可直接反映充填效果。矸石是一种散体材料,因此没有固定的参数对其力学特性进行表征。通过一系列的压实试验进行测试,研究充填材料在受压状态下的变形情况,可以了解充填体的变形情况,掌握充填矸石的压实过程中的本构关系,为研究充填体的变形特征提供理论基础。同时,也可作为充填矸石的级配选择提供依据,有利于运输加工设备设施的选型与设计。

**关键词:**“三下”开采; 矸石充填; 压实特性

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)04-0129-03

## Experimental analysis of compaction characteristics filled by coal gangue

TI Zhengyi, QIN Hongyan, LI Shuxing

(Graduate College, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** “Three” pressing coal mining problem has become one of the increasingly prominent problem, therefore the filling mining technology has become the more important way to solve the “three” pressing coal at present because of its function of control the strata movement, restricting the surface settlement. In the filling mining technology, backfill deformation situation can directly reflect the effect of filling. The coal gangue is a kind of granular materials, so there is no fixed parameters to describe the mechanical properties. Through a series of compacted test and the research of deformation of filling materials under a compression situation we can understand the backfill deformation, master the constitutive relation of filling coal gangue with compaction process. The result can provide a theoretical basis for study on the filling body's deformation characteristics. At the same time, it can provide the basis for the selection of gradation for filling coal gangue, It is useful for selection and design for the transportation and processing equipments. .

**Key words:** under three mining; coal gangue filling; compaction characteristics

## 1 概述

“三下”(建筑物下、铁路下、水体下)压煤问题已成为煤矿开采中越来越突出的问题之一,而充填开采技术因其具有控制岩层移动、限制地表沉降的作用,目前已成为解决“三下”压煤问题的重要途径,研究、并推广应用充填开采技术已经成为当前“三下”压煤开采的必然趋势。与此同时,矸石作为煤矿生产过程中排放的废弃物,以常规方法处理时不仅占用了大量的人力、物力资源,而且对自然环境造成了极大的破坏,不利于人类健康和生态建设。因此,选择矸石作为充填材料,不仅可以开采“三下”压煤、控制地表变形,而且还能充分利用废弃资源,有利于环境保护。充填材料是充填综采技术中的重要部分,研究充填矸石在压实过程中的力学特性,可为掌握充填体与覆岩

变形的基本特征,了解充填开采采场覆岩变形的基本规律提供理论依据。此外,研究矸石压实特性的方法,也可推广适用于黄土、风积砂、矸石与粉煤灰的混合材料等作为充填材料时其采场压力和覆岩变形规律的研究。因此,研究矸石压实力学特性,不仅对矸石充填综采技术的充分了解具有重要作用,而且对全面掌握充填开采中围岩变形规律、深入研究充填开采技术都具有的重大意义。

为深入了解充填矸石的压实变形特征,充分掌握充填体变形规律,确切预测充填工作面覆岩变形情况,开展充填矸石碎胀特性的测试,充填矸石基本压实特性测试以及充填矸石压实变形的时间相关性测试。

## 2 试验内容

通过 MTS 815.02 电液伺服岩石力学试验系统,

收稿日期:2012-02-08; 修回日期:2012-05-12

作者简介:题正义(1957-),男,辽宁阜新人,博士,教授,从事矿业系统工程、三下开采等方面的研究。

选取开滦(集团)有限责任公司唐山矿业分公司的洗选矽石进行压实试验。对矽石试样进行轴向加载,分析矽石在压实过程中的变形特征,具体试验内容:

(1)研究充填矽石在压实过程中的变形特征,即对矽石试样进行轴向加载,分析其轴向变形特征,为采空区充填体变形的预计提供依据;

(2)分析充填矽石的容重随压实力的变化特征,为计算充填开采中的采充比提供数据基础;

(3)探讨充填矽石在不同压实条件下的变形模量变化规律,为掌握充填材料的基本力学特性提供理论参考。

### 3 试验基本方案

根据对矽石的分级情况,定义六种分级粒径:0~5、5~10、10~15、15~20、20~25、25~30 mm 分别为  $g_1$ 、 $g_2$ 、 $g_3$ 、 $g_4$ 、 $g_5$ 、 $g_6$ 。对各粒径的矽石进行均匀质量配比,即  $g_1:g_2:g_3:g_4:g_5:g_6=1:1:1:1:1:1$ ,分别对6种粒径的矽石以及均匀级配的矽石进行压实变形特征测试,然后研究7组试样的压实变形特征。最大压实力选取15 MPa,即258 kN,加载速率为1 kN/s,采集的数据为时间、轴向力、轴向应力、轴向位移、轴向应变和弹性模量。

### 4 试验设备及选取

#### 4.1 加载设备选取

本试验采用美国 MTS 公司的 MTS 815.02 电液伺服岩石力学试验系统进行测试。该试验系统可以进行岩石的单轴压缩、常规三轴等试验,具有先进的伺服控制以及数据自动采集系统,可以精准地反应岩石破坏的全过程、采集试验全过程的全应力应变曲线。

#### 4.2 压实刚筒设计

试验中矽石的最大粒径为30 mm,本试验中设计模具形状也为圆筒,内径为150 mm。设计最大单轴压力为20 MPa,取侧压系数为0.67,则筒内壁的径向最大压力为15 MPa。由厚壁圆筒的环向应力计算公式得到筒壁内最大环向应力发生在筒内壁,即:

$$\sigma_{\theta} = \left(\frac{b^2}{a^2} + 1\right) / \left(\frac{b^2}{a^2} - 1\right) q_a \quad (1)$$

式中: $a$ 、 $b$ 分别代表圆筒的内外半径,此处  $a = 75$  mm;筒壁内压  $q_a = 15$  MPa。

在试验中要保证圆筒发生弹性变形,最大环向应力应小于刚筒的剪切屈服极限。试验所选取的刚筒材料为 Q235 无缝钢管,其屈服极限约为170 MPa。取安全系数为1.5,由式1计算得筒壁外径  $b = 85$

mm。根据无缝钢管尺寸标准,最终选取外径为159 mm,壁厚为9 mm的无缝钢管尺寸进行压筒加工。

#### 4.3 试样选取及制备

试验矽石选自开滦(集团)有限责任公司唐山矿业分公司的洗选矽石,原始矽石粒径范围为0~50 mm。为将原始矽石进行下一步划分,设计专用的分级筛对原始矽石进行分级,分级粒径为:0~5、5~10、10~15、15~20、20~25、25~30 mm。

### 5 试验结果分析

#### 5.1 压实过程应力-应变关系

通过对充填矽石的压实试验,研究了不同粒径的矽石试样在轴向受压时的变形特性和变形模量变化规律,为现场充填体变形特征的预测提供一定的理论依据。矽石试样在轴向受压的过程中,定义其压缩变形量为  $\Delta h$ ,原始装料量为  $h$ ,则试样的应变量为:

$$\varepsilon = \Delta h / h \quad (2)$$

根据试验数据采集结果,得到6种配比条件矽石(0~5、5~10、10~15、15~20、20~25、25~30 mm、均匀配比)的压实变形曲线,见图1所示。

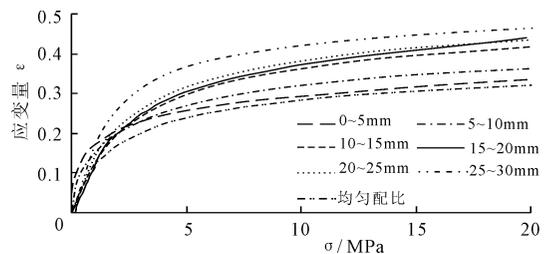


图1 不同粒径矽石应力-应变曲线比较图

表1 矽石在不同压实力条件下的应变量mm, %

应变量	均匀 配比	0~ 5	5~ 10	10~ 15	15~ 20	20~ 25	25~ 30
2 MPa	16.6	19.7	20.4	20.8	21.3	23.0	25.8
15 MPa	30.6	31.0	34.7	39.0	40.3	41.6	42.4
2~15 MPa	14.0	11.3	14.3	18.2	19.0	18.6	16.6

由图1可知,矽石试样的应力-应变曲线整体上呈对数分布趋势。在初始压实阶段(0~3MPa),应变增长量较大,变形速度较快;随着压力的逐步增大,矽石试样的逐渐压实,应变增长量逐渐减小。

对于不同粒径的压实特征进行比较,分析各粒径试样在2 MPa和15 MPa时的变形情况,如图4所示。由图2和表1可知:随着矽石粒径的增大,其压实变形量也逐步增大;与其它各粒径相比,均匀配比的矽石试样变形量最小,表明其抗压性能最强。各粒径矽石在0~15 MPa压实过程中,总变形量为

30.6%~42.4%,其中0~2 MPa范围内的变形量较大,为16.6~25.8,2~15 MPa范围内变形量相对较小,为9.0%~11.6%。

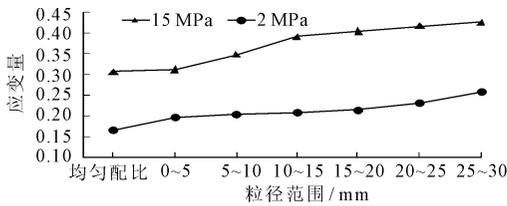


图2 不同粒径矽石应变规律比较

### 5.2 容重变化规律

充填材料的容重作为其自身的一个重要参数,可用于计算其充填体积,是分析充填量与开采量比例关系的重要参数。对压实过程中充填材料的容重进行测试,分析其值随压实力的变化规律,得到现场充填材料压实度随压实力变化曲线如图3所示。

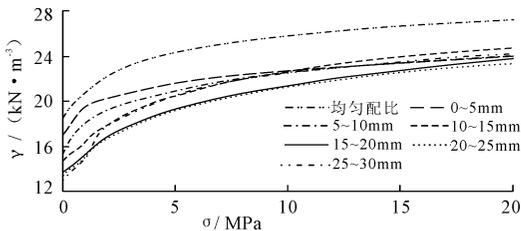


图3 不同粒径矽石容重变化规律图

表2 各粒径矽石不同压实条件下的容重 mm, kN/m³

	均匀	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30
	配比	5	10	15	20	25	30
原始容重	18.5	16.2	15.3	14.7	13.7	13.4	13.0
2 MPa 容重	22.2	20.3	19.1	17.9	16.9	16.7	17.6
压实后的采充比	1.5	1.36	1.28	1.20	1.14	1.12	1.18

根据容重变化曲线图3以及表2,可得出如下结论:①现场充填材料的容重随着压实力的增大是递增的,在0~3 MPa范围内增幅较大;随着压实力的增大,变形量逐渐增大,容重在压实后期增幅较慢,表现为后期的曲线较为平缓。②在自然松散状态下的容重为13.0~18.5 kN/m³,加载至2 MPa时各粒径矽石容重为17.6~22.2 kN/m³,按照煤的容重14.9 kN/m³计算,压实后的采充比达到1.5,即每采1 t煤需要充入1.5 t矽石。

### 5.3 变形模量变化特征

破碎矽石并非弹性体,因此没有固定的参量来表示其压实过程中的应力-应变关系,为进一步研究破碎矽石压实过程中的本构关系,定义矽石试样的变形模量:  $E = \sigma/\epsilon$ ,其中 $\sigma$ 表示矽石试样所示压实力, $\epsilon$ 为应变变量。

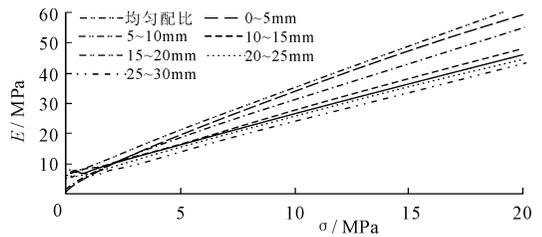


图4 不同粒径矽石变形模量变化特征

表3 各粒径矽石试样的 E-σ 方程

序号	粒径等级	E-σ 方程
1	均匀配比	$E = 2.7958\sigma + 6.7557$
2	0~5 mm	$E = 2.8311\sigma + 4.7453$
3	5~10 mm	$E = 2.5159\sigma + 5.4693$
4	10~15 mm	$E = 2.1014\sigma + 6.3100$
5	15~20 mm	$E = 2.0366\sigma + 5.9730$
6	20~25 mm	$E = 2.0098\sigma + 5.1370$
7	25~30 mm	$E = 1.9578\sigma + 4.0882$

根据试验数据采集结果,计算得出各粒径矽石试样在压实过程中的 E-σ 曲线,如图4所示。由图4可知,各粒径矽石试样的变形模量 E 随着压力 σ 的增大时不断增大的,E变化的范围为0~60 MPa,与完整矽石的弹性模量相比,量级差别较大。E与σ的变化关系为线性,其本构关系的 E-σ 方程,见表3。

## 6 结 语

试验表明,粒径越大,压缩率越高,压缩效果越差;虽然粒度越小,压缩率越低,充填效果越好,但却增加了破碎的成本。因此,要对原矽的粒度组成运输和加工成本等进行综合考虑,确定矽石的粒径范围。由于用于充填的矽石主要来源于洗选矽石,粒径在0~50 mm之间,同时要考虑手选白矽和掘金矽石块度较大的因素,为了减少破碎成本,选择充填矽石的粒径范围为0~150 mm,即,最大粒径为150 mm。

### 参考文献:

[1] 杜计平. 采矿学[M]. 北京:中国矿业大学出版社,2009.  
 [2] 张吉雄. 矽石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究[D]. 北京:中国矿业大学.2008.  
 [3] 刘长友,杨培举,侯朝炯,等. 充填开采时上覆岩层的活动规律和稳定性分析[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(2):166-169.  
 [4] 何国清,马伟民,王金庄. 威布尔型影响函数在地表移动的计算中的应用——用碎块体理论研究岩层移动基本规律探讨[J]. 中国矿业大学学报(自然科学版),1982(1):1-20.  
 [5] 刘天泉. 波兰城镇及建筑物下采煤技术[J]. 世界煤炭技术,1985(8):5-9.