

# 软弱破碎围岩压实 - 固结二次成岩机制试验研究

王平<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 余伟健<sup>2, 3</sup>, 冯涛<sup>2, 3</sup>, 朱永建<sup>2, 3</sup>, 黄钟<sup>3</sup>, 任恒<sup>3</sup>, 赵训<sup>3</sup>

- (1. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;  
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;  
4. 湖南科技大学 煤炭清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 为研究软弱破碎围岩二次成岩机制, 采用自制压实装置对二次成岩影响因素和成岩后的力学行为进行试验研究。结果表明: 软弱破碎围岩二次成岩过程可分为压实破碎和固结二次成岩 2 个阶段, 偏芯挤压和对芯挤压是压实破碎阶段主要的 2 种力学机制, 自胶结和粗粒块间黏结是固结二次成岩阶段的主要成岩机制。提出采用破断指数和固结指数分别表征岩块破断难易程度和固结二次成岩程度。统计结果表明岩样粒径越大, 不规则系数越大, 越难以压实成型。二次成岩受含水率影响, 粒径 < 1 mm 的岩粉其含水率需达到 4.76% 以上才能压实成型。二次成岩试件单轴抗压强度随粒径增大而线性减小, 具有细粒试件类岩性, 粗粒试件类塑性, 应力加载波动性等力学性质。二次成岩试件的三轴抗压强度随含水率呈三次多项式增长, 随压实应力线性增长, 以及随岩样粒径呈三次多项式减小。

**关键词:** 岩石力学; 二次成岩; 破断指数; 固结指数; 力学性质

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2018)08 - 1884 - 12

## Experimental study on second diagenesis by compaction and consolidation of soft and broken rock

WANG Ping<sup>1, 2, 3, 4</sup>, YU Weijian<sup>2, 3</sup>, FENG Tao<sup>2, 3</sup>, ZHU Yongjian<sup>2, 3</sup>, HUANG Zhong<sup>3</sup>, REN Heng<sup>3</sup>, ZHAO Xun<sup>3</sup>

- (1. *Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China*; 2. *Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China*; 3. *School of Resource and Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China*; 4. *Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China*)

**Abstract:** To study the mechanism of secondary diagenesis of the weak and broken rock, the compaction device developed in-house was used to investigate the factors affecting the secondary diagenesis and the mechanical behavior of the specimen after diagenesis. The results show that the secondary diagenesis process has a compaction-broken stage and a consolidation diagenesis stage. The eccentric core extrusion and the core extrusion are two main mechanisms at the compaction-broken stage, whereas, the self-cementation and the bonding among coarse blocks are the main diagenesis mechanisms at the consolidation stage. The breakage and consolidation

**收稿日期:** 2018 - 02 - 26; **修回日期:** 2018 - 04 - 23

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51574122, 51774130); 湖南科技大学煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室开放基金项目资助(962 - E21703)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 5157412 and 51774130) and Open Foundation of Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection(Grant No. 962 - E21703)

**作者简介:** 王平(1987 -), 男, 2016 年于中南大学采矿工程专业获博士学位, 现任讲师, 主要从事深部开采岩石力学及围岩控制的教学与研究。E-mail: 674053967@qq.com。通讯作者: 余伟健(1978 -), 男, 博士, 现任教授。E-mail: ywjlh@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0185

indexes were proposed to characterize the level of difficulty in rock breaking and the degree of the consolidation diagenesis respectively. The statistical results show that, for the rock with large size, the large irregularity coefficients result in greater difficulty in compaction. In addition, the secondary diagenesis is affected by the water content. The compaction of the rock powder with the particle size smaller than 1 mm can be fulfilled when the water content is higher than 4.76%. The uniaxial compressive strength of secondary diagenetic specimens decreases linearly with the increasing in particle size. The triaxial compressive strength of the secondary diagenetic specimen increases with the water content in a relationship of cubic polynomial, increases linearly with the compaction stress but decreases with the increasing of particle size in a cubic polynomial manner.

**Key words:** rock mechanics; secondary diagenesis; breaking index; consolidation index; mechanical properties

## 1 引 言

在煤矿井巷工程中,大多数围岩均为破碎岩体,甚至存在许多再生岩体,给煤炭安全、高效开采带来了极大困难。例如:山西冀中能源邢台矿六采区厚煤层下分层弃煤回采;河南平煤六矿改扩建新明斜井穿越丁<sub>5-6</sub>煤层采空区回采下部煤层;广西州景煤矿五煤一层压实采空区下回采五煤三层等矿井均涉及到变形破坏极为特殊的再生岩体。此类围岩经历了压实破碎与固结二次成岩 2 个过程,岩体成分和结构重新调整,力学性质随之改变<sup>[1]</sup>。国内外专家、学者对破碎岩样压实、固结特性进行了大量研究,并取得了许多有益的成果。

相比于完整岩样,破碎岩样具有碎胀性,在侧限压缩过程中会发生再次破碎与压实。缪协兴等<sup>[2]</sup>通过不同块度岩(煤)块的侧限压缩实验,发现碎胀系数与轴压之间为负指数关系,压实特性曲线呈指数形式变化。张振南等<sup>[3]</sup>认为侧限压缩模量与孔隙率之间表现出指数和幂函数 2 种关系,侧限压缩模量与岩块强度之间呈线性关系。苏承东等<sup>[4]</sup>对不同强度、块径的破碎岩样在不同压实应力条件下的碎胀特征、变形特征、压实特征和能耗特征进行了深入分析;改变侧限约束条件后,曹树刚等<sup>[5]</sup>研究了钢筋网+锚杆约束下不同级配和堆叠数量对散体矸石的承载、变形规律的影响。改变破碎岩样含水状态,马占国等<sup>[6-7]</sup>研究了饱水状态下破碎煤岩(岩)压实特征和蠕变特征,指出孔隙度与轴压呈三次多项式关系。陈晓祥等<sup>[8]</sup>认为水对低强度、小粒径破碎岩块压实特性的影响较大。钱自卫等<sup>[9]</sup>发现压缩岩块浸水后破碎程度增大,具有“湿陷”现象;压缩过程中岩块粒径不断变化,不同粒径级配具有不同的压实特性,姜振泉等<sup>[10]</sup>将煤矸石压密过程分为破碎压密和固结压密两阶段,并分析了矸石压密后粒

径级配和密实性变化。王 文等<sup>[11]</sup>指出满足泰波曲线的级配方案压缩率较低,压实度较高。张德辉和李 辉<sup>[12]</sup>认为连续级配矸石压缩率与轴压呈指数关系与侧压之间呈线性关系。冯梅梅等<sup>[13]</sup>提出了粒径分布系数  $r$  的概念,研究了满足连续级配的饱和破碎岩块压实前后粒径分布规律。

在破碎围岩注浆固结方面,张俊英和王金庄<sup>[14]</sup>证实了破碎岩样浸水后压缩应变增大、强度降低,注入水泥浆后压应变明显减小。P. D. Evdokimov 等<sup>[15-17]</sup>分别研究了注浆对岩体裂隙、岩石结构面和硬岩节理抗剪特性的影响,发现注浆可显著改善结构面的力学性能;李召峰等<sup>[18]</sup>通过富水破碎岩体注浆试验发现注浆可改变岩石界面区域的组分,形成类岩石矿物。雷进生等<sup>[19]</sup>分析了注浆浆液在非均质土层中的渗透特性,并探讨了注浆加固土体的力学行为;宗义江等<sup>[20]</sup>试验研究了破裂岩体承压注浆加固的力学特性;徐宏发等<sup>[21]</sup>系统总结了已有的破碎岩体注浆前后强度增长率,提出了注浆加固体强度增长率经验公式。

在工程应用方面,余伟健和王卫军<sup>[22]</sup>根据条带开采中矸石充填体压实特征,分析了矸石置换“三下”煤柱岩层移动规律及二次稳定机制;张吉雄等<sup>[23]</sup>基于不同矸石(固体废物)压缩特征,提出了矸石直接充填开采矿压规律的等价采高模型;孙利辉等<sup>[24]</sup>通过破碎岩块压缩和崩解试验,分析了弱胶结地层垮落带岩层膨胀变形 - 破碎冒落 - 充填压实 - 蠕变固结变形特征。

总体来看,现有成果分别侧重于破碎岩样在不同条件下的压实特征、注浆加固特征以及破碎岩样压实特性在工程中的应用研究,对于软弱破碎岩样压实 - 固结二次成岩机制以及二次成岩后的力学特性研究较少。破碎岩体的压实 - 固结二次成岩机制是揭示再生岩体围岩力学特性和工程特性的关键科学问题。因此,本文利用自行设计、制作的压实成

岩装置和 RMT - 150C 岩石力学试验系统对广西右江州景煤矿再生顶板破碎围岩进行压实 - 固结二次成岩试验, 并对二次成岩试件进行单轴和三轴压缩试验, 深入探讨破碎岩样的成岩机制及成岩后的力学行为。

## 2 试验设计及基本参数测定

### 2.1 试验方案设计

(1) 破碎岩样粒径划分: 将岩样破碎、筛分为不同粒径组, 粒径组划分为: <1, 1~2.5, 2.5~5, 5~10, 和 >10 mm。受限于压缩装置尺寸, 主要选用前面 4 种粒径进行试验, 根据不同影响因素分别进行编号、试验。

(2) 影响因素设置: ① 不同含水率试验组: 将岩粉和水混合, 含水率设置为: 0%, 3.17%, 4.76%, 8.16% 和 11.11%, 最终轴压为 30 kN。② 不同轴压试验组: 以含水率为 11.11% 的岩粉为材料, 应力水平设置为: 10, 15, 20, 25 和 30 kN。③ 不同粒径试验组: 由岩块、岩粉、水泥和水混合为材料, 料质量比为: 8 : 4 : 1 : 1, 粒径设置为: <1, 1~2.5, 2.5~5, 5~10 mm, 最终轴压为 2 kN。

(3) 加载方式设置: 采用预压实和二次压实的方式对自然状态不同粒径岩样进行侧限压缩试验。采用力加载, 加载速率为 0.2 kN/s。预压实应力设置为岩样平均抗压强度的 10%, 二次压实成岩试验加载至压实成岩装置的行程极限(30 mm), 应力范围: 20~50 MPa。

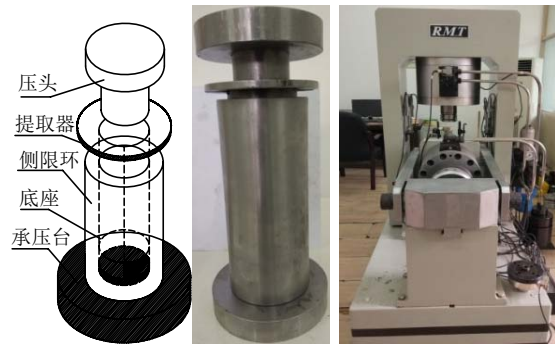
(4) 试件养护: 将压实二次成岩试件在常温(约 20 ℃)且湿度大于 90% 的条件下养护 28 d, 进行单轴和三轴压缩试验。

(5) 压实装置: 试验采用自制的压实成岩装置进行不同条件下的侧限压缩。压实成岩装置内径 50 mm、高 170 mm, 压实行程 0~70 mm。压缩装置泊松比 0.35, 弹性模量 210 GPa, 见图 1(a)。

(6) 加载装置: 采用 RMT - 150C 岩石力学试验机, 该试验机为伺服试验机, 垂直和横向位移误差不超过 ±0.1%, 剪切变形误差不超过 ±0.5%, 应力误差不超过 ±0.2%, 见图 1(b)。

### 2.2 破碎岩样基本参数测定

根据地质资料和实验对破碎岩块基本参数进行测定。图 2 为混合岩样元素测定结果, 将采集的岩粉进行元素测定, 结果发现混合岩粉中 Si 含量最高、Fe 和 Al 含量次之, 然后是 Ca, Cl 和 S, 其余



(a) 压实成岩装置 (b) 岩石力学试验机

图 1 压实及加载试验装置

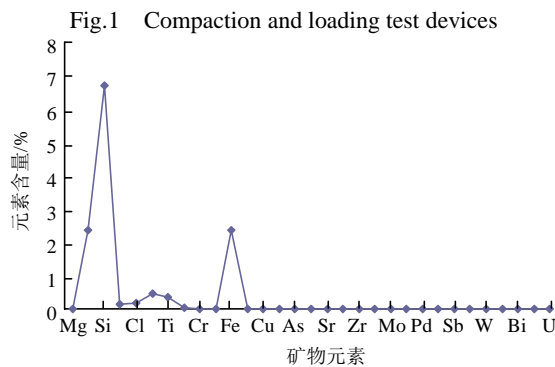


图 2 矿物元素测定结果

Fig.2 Mineral contents

元素含量极少。根据元素含量对比可知混合岩样中石英、斜方钙沸石、高岭石等矿物含量较多。

试验所用岩样为州景矿 5303 软弱破碎再生顶板围岩, 主要由泥岩、粉砂岩、泥质砂岩和碳质泥岩组成, 混合岩体的平均密度和强度平均较低, 属于软弱破碎岩体, 混合岩体的基本参数如表 1 所示。

表 1 破碎岩样基本参数

Table 1 Basic parameters of fractured rock sample

围岩类型	岩体质量比/%	密度/(g · mL <sup>-1</sup> )	抗压强度/MPa	粒度分布/mm	粒度质量比/%	
泥岩	22	2.23	9.92	<1	17.69	
粉砂岩	34	2.36	12.09	1~2.5	15.15	
泥质砂岩	26	2.12	10.05	2.5~5	19.60	
碳质泥岩	18	2.05	6.23	5~10	23.08	
均值			2.19	9.57	>10	24.48

## 3 压实特征及二次成岩效果

### 3.1 压实特征

将筛分好的岩样装入自制压实成岩装置内腔中、捣实进行侧限压缩试验。图 3 为单粒径试验组压实全过程应力 - 应变曲线(以 1~2.5 mm 粒径实

验组为例), 图 4 给出了不同粒径破碎岩样二次压实应力 - 应变曲线。其中, 应力为轴压与压头断面面积之比, 应变为压缩量与破碎岩样装岩高度之比。不同粒径岩样最终轴向应力(按粒径从小到大)分别为: 49.21, 51.34, 40.95, 23.33 MPa, 轴压分别为混合岩样平均抗压强度的 5.1, 5.4, 4.3, 2.4 倍。最终轴向应变分别为: 0.125, 0.162, 0.215 和 0.2。

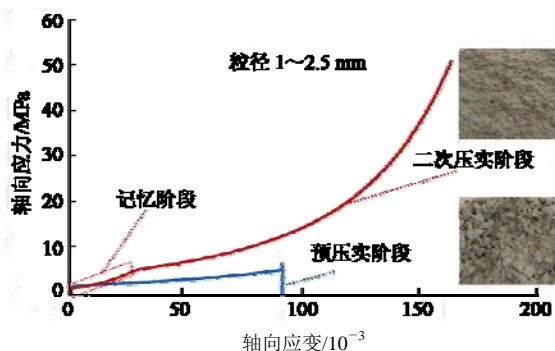


图 3 破碎岩样压实全过程曲线

Fig.3 Full curves of compaction process of crushed rock sample

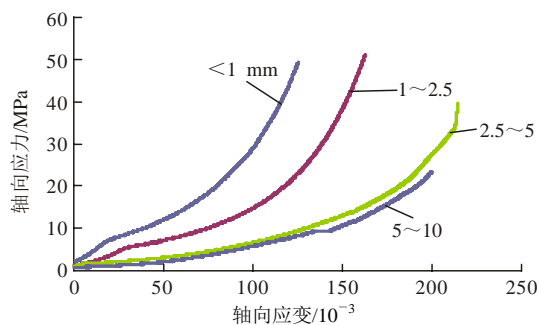


图 4 不同粒径岩样二次压实曲线

Fig.4 Second compaction curves of rock samples of different particle sizes

根据压实特性曲线特征, 可将其划分为预压实阶段、记忆阶段和二次压实 3 个阶段, 各阶段的物理意义和特征如下:

(1) 预压实阶段: 是指在破碎岩样压实初期, 不规则岩样初步破碎, 轴向应力随轴向应变近似线性、缓慢增长的阶段。此阶段轴向应力约为最终压实应力的 10%, 轴向应变可达最终压实应变的 50% 左右。随着压应变的增加轴压增量很小, 应力 - 应变呈线性关系, 置信度  $R^2 = 0.9602$ , 拟合表达式为

$$y = 0.0381x + 1.5428 \quad (1)$$

在加载初期, 碎石呈松散状, 经过预压实后取出, 发现没有任何固结, 但细粒岩块和岩粉明显增多。表明随着压缩行程增加岩块棱角断裂、块间摩擦产生岩粉, 粒度分布发生了变化。岩块颗粒间接接触状态调整, 粒间空隙迅速减小, 岩块处于快速调

整阶段, 但还未形成相对稳定的承载结构和充填结构, 岩块应力状态无明显变化, 整体表现出变形量大, 抗变形能力低的特点。

(2) 记忆阶段: 是指破碎岩样在预压实之后, 进行二次压实初期, 应力快速恢复至预压实最大值的阶段。这种应力快速恢复的现象称之为破碎岩块“压实应力记忆”, 即在破碎岩块多次压缩过程中, 后一次压缩具有迅速恢复至前一次压缩最大轴压的特性, 当轴压超过前一次最终加载应力后则继续形成破碎岩块压实新的“压实应力记忆”。在多次压缩条件下, 前一次轴压越大, 这种“记忆”越强烈, 表现为压缩曲线的斜率越大, 应力恢复越快。根据试验结果可知破碎岩块“压实应力记忆”曲线近似线性变化, 置信度  $R^2 = 0.9831$ , 表达式为

$$y = 0.1526x + 0.721 \quad (2)$$

在记忆阶段, 预压实后松散的结构又再次契合, 减少了岩块间调整的过程, 使应力快速恢复至前一次压缩的最大值。

(3) 二次压实阶段: 是指二次压缩时在记忆阶段之后的破碎岩样压实过程, 轴向压应力随轴向应变近呈指数形式增长阶段。在此阶段内最终压实应力达岩石单轴抗压强度 2.4~5.4 倍。二次压实初期, 压实曲线具有部分“记忆”。在“记忆”阶段, 应力随应变线性快速增加, 在大于等于预压实应力后应力增量略有减小随后逐渐增大。去掉“记忆”阶段, 在二次压实阶段应力随应变呈指数形式增加, 置信度  $R^2 = 0.9926$ , 其表达式为

$$y = 3.0542e^{0.0164x} \quad (3)$$

在二次压实阶段, 岩块进一步破断、调整, 粒间空隙被充填密实, 岩块应力状态逐步转变为三轴应力状态, 形成以粗颗粒为骨架、细颗粒充填、黏结材料胶结的相对稳定的承载结构。当轴压达到约 2 倍单轴抗压强度, 岩块基本被压实, 岩块停止破断。在较小的应变增量下应力迅速增加。整体表现出变形量逐渐减小, 抗变形能力快速增大的特点。在二次压实过程中, 粒径越小, 压实应变越小, 压实速度越快。粒径越大, 压实应变越大, 压时速度越慢。在相同压实应变条件下, 小粒径岩样压实应力更高。

### 3.2 二次成岩特征

图 5 为现场所取破碎岩样筛分后直接压实的成岩效果。可以看出, 不同粒径岩样直接压实均能固结形成较大岩块, 但固结程度较差, 取出试件时均发生了破断, 破断主要集中在压实试件中上部。从破断面来看小粒径试件内部颗粒分布更均匀, 其密





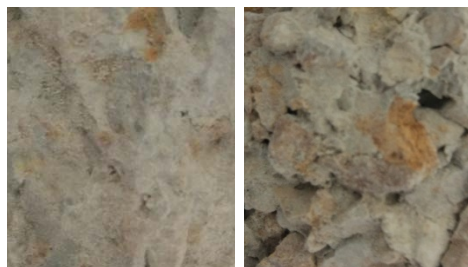
(a) 二次成岩试件形态



<1 mm



1~2.5 mm



2.5~5 mm



5~10 mm

(b) 压实岩体断面形貌

图5 直接压实试验结果

Fig.5 Results of direct compaction test

实程度和固结程度也越好，试件成型效果更好。主要原因在于压实过程是一个岩块粒度分布和应力状态不断调整的过程。粗粒试验组需经过挤压破碎，大颗粒咬合形成支撑骨架，压碎的细粒岩块运移充填空隙，逐渐调整密实。细粒试验组由于粒径较小，粒径小岩块间空隙越小，压实调整速度越快。岩块越大，充填细料相对不足，其密实程度较差，在相同的压实行程下，最终轴压也越小。此外，在重力作用下，粒间下部空隙首先被充填，形成下部相对密实，上部相对松散的非均匀试件，粒径较大的实验组这种非均匀性更明显。因此，大粒径岩块密实程度和成型效果差，且在试件中上部破断较多。

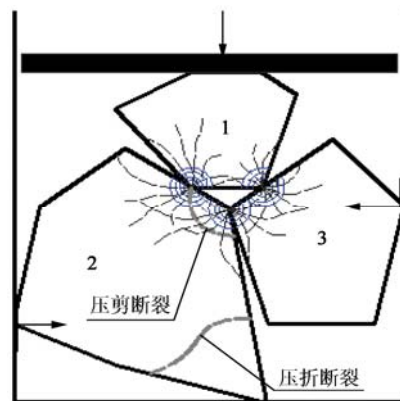
为进一步测定破碎岩样压实情况，将压实固结后的大块岩体进行密度测定，得到4种粒径的压实岩块密度分别为：2.07，2.01，1.99，1.98 g/mL，平均密度 2.01 g/mL，略小于压实之前的平均密度 2.19 g/mL，但两者非常接近，可见侧限压缩条件下轴压超过岩石单轴抗压强度的2倍以上能够将试验岩样基本压实。

## 4 侧限压缩二次成岩力学分析

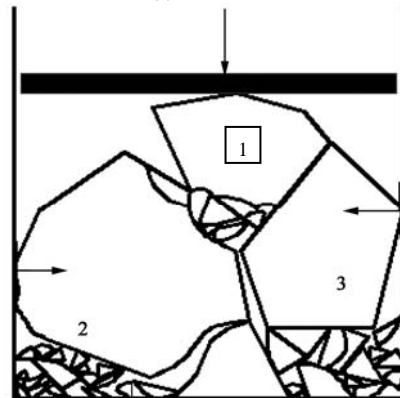
### 4.1 受压二次破碎力学机制

在侧限条件下的压实-固结二次成岩是指在应力作用下破碎围岩发生粗颗粒结构调整，细颗粒运移充填，在黏结材料和水的作用下再次形成具有一定固定形态岩体的过程。二次成岩岩体的力学特征与其二次成岩力学机制密切相关。根据成岩力学机制的不同，将成岩过程划分为：受压二次破碎阶段和固结二次成岩两个阶段。压实-固结二次成岩力学模型如图6所示。

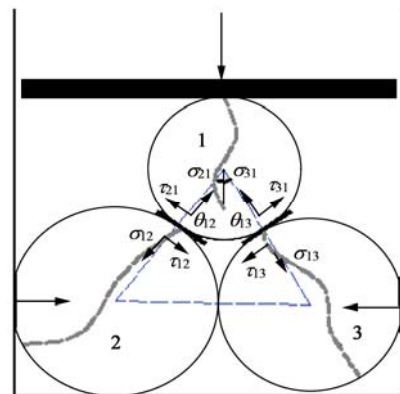
破碎岩块在预压实阶段，以挤压断裂、接触调



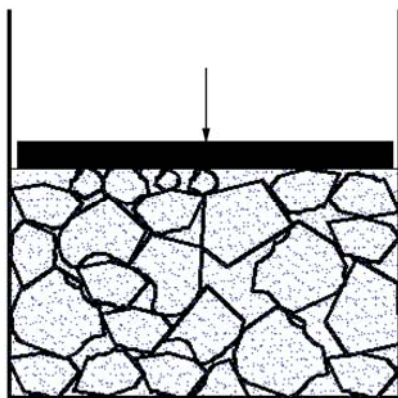
(a) 挤压断裂



(b) 运移调整



(c) 对芯挤压



(d) 固结成岩

图 6 压实二次成岩过程

Fig.6 Second diagenetic processes of compaction

整和运移充填为主, 见图 6(a), (b)所示。受岩块粒径大小及其不规则性影响, 岩块颗粒间存在不同程度的间隙。破碎岩块在受侧限条件下压缩主要发生 2 种挤压方式: 偏芯挤压和对芯挤压。

(1) 偏芯挤压, 是指两接触岩块间挤压作用力方向不经过两岩块形心的挤压, 这类挤压多造成岩块尖角部分发生压剪断裂或压折断裂(见图 6(a)), 这 2 种断裂所需应力较小, 在压缩初期的预压实阶段发生较多。偏芯挤压使得岩块粒径、形态均发生改变, 粒间接触由点接触向线接触和面接触转变。

(2) 对芯挤压, 是指两岩块颗粒间挤压力作用线经过两岩块形心, 其力学模型为球颗粒之间的挤压见图 6(c), 这类挤压多导致颗粒发生穿芯断裂, 所需挤压力相对较大, 在岩块不规则性降低或者岩块难以转动时发生较多。对芯挤压使得岩块间接触进一步改变, 充填体更加密实, 破碎岩样整体承载能力增量逐渐增大。

根据偏芯挤压和对芯挤压力学机制, 对破碎岩块压缩特性可作如下解释: 在受侧限压缩过程中, 岩块之间存在偏芯挤压和对芯挤压两种力学作用机制, 发生何种挤压断裂与岩块形态及其所处的应力状态有关。在压缩试验初期由于岩块不规则, 粒间空隙较大, 发生偏芯挤压的概率更大, 压缩初期密集的轻声脆断即是发生偏芯断裂, 轴向应变增量较大, 轴向应力增量较小。随着偏芯断裂增多, 岩块的不规则性减小, 岩块间隙被断裂的细小颗粒运移充填, 应力状态逐步变化, 发生对芯挤压的概率增加, 压缩过程中沉闷的断裂声即是发生对芯断裂, 所需的挤压力随之增加, 宏观上表现为轴向应变增量减小, 轴向应力增量变大。

## 4.2 岩块破断指数

根据破碎岩块受压二次破碎力学机制可知岩块的强度、大小、形状、含水状态以及应力状态对于岩块是否发生断裂均有影响。例如: 当岩块强度相同时, 形状不规则的岩块容易发生偏芯断裂。发生对芯挤压时, 较小的岩块则更容易发生压裂破坏<sup>[25]</sup>。如果岩块含水, 则岩块强度会发生软化而挤压破坏。基于此, 提出受侧限压缩岩块破断指数  $n$  的概念, 破断指数是表征岩块颗粒在受侧限压缩时整体发生破断难易程度的综合指标, 也可作为单个岩块破断的判据, 它与岩块的不规则系数和所受压差成正比, 与岩块的软化系数和单轴抗压强度以及体积呈反比, 具体表达式如下:

$$n = \frac{\eta \zeta}{\mu \sigma_c v} \quad (0 < \mu \leq 1) \quad (4)$$

式中:  $\mu$  为岩块强度软化指数, 是受岩性、水、温度等因素影响的参数;  $\sigma_c$  为岩芯单轴抗压强度 (MPa);  $v$  为岩块体积 ( $\text{m}^3$ );  $\zeta$  为应力状态函数 (MPa); 侧限压缩时可取  $\sigma_v - \sigma_h$ ;  $\eta$  为岩块不规则系数。研究表明, 侧向应力与轴向应力之间线性相关<sup>[2]</sup>, 而轴向应力与应变之间为指数关系, 则有

$$\sigma_v = ae^{b\varepsilon} \quad (5)$$

$$\sigma_h = k\sigma_v + c \quad (6)$$

$$\zeta = (1-k)ae^{b\varepsilon} - c \quad (7)$$

式中:  $\sigma_v$  为轴向应力 (MPa);  $\varepsilon$  为轴向应变;  $\sigma_h$  为侧向应力 (MPa);  $a$ ,  $b$ ,  $k$  和  $c$  均为拟合系数。  $\eta$  的表达式如下:

$$\eta = (l_1 - l_2 + 1)(l_2 - l_3 + 1)(l_1 - l_3 + 1) \quad (8)$$

式中:  $l_1$  为岩块最大长度 (m);  $l_2$  为垂直  $l_1$  方向岩块的最大长度 (m);  $l_3$  为与  $l_2$  在同一平面上且垂直  $l_2$  的最大岩块长度 (m), 三者间的关系为  $l_3 \leq l_2 \leq l_1$ 。

根据式(8)对粒径为 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50 mm 的岩块颗粒进行样本总数为 500 的不规则系数统计, 岩块体积  $v$  可近似取为  $l_1 l_2 l_3$ , 统计结果如图 7 所示。

可以看出, 岩块粒径越小, 不规则系数均值越小。压缩时岩块越容易运移调整, 更快进入到三轴应力状态, 压缩应力增量更大。这就说明岩块不规则性是影响岩样压实特征的内在原因之一。同时, 随着粒径增大, 不规则系数与岩块体积的比值先减小后增大, 在其他条件相同时, 岩样整体破断指数  $n$  也表现为先减小后增大。这是由于小粒径岩石颗

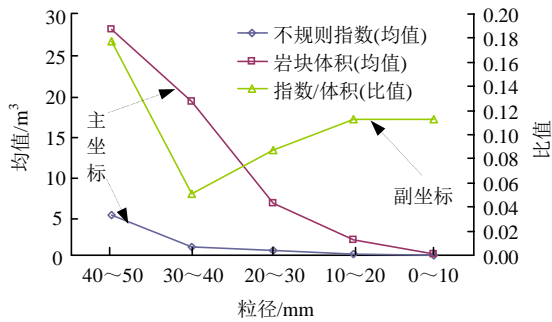


图7 不同粒径岩块不规则系数  
Fig.7 Irregular indexes of different size rocks

粒不规则系数小，侧限压缩时密实程度较高，发生破断的概率较小。随着岩块体积和不规则性增大，其密实程度逐渐降低，岩块越容易发生破断。当岩块体积和强度足够大，不规则系数虽有增加，但大粒径岩块自身承载能力增加更快，故破断指数更大。需要指出的是破断指数作为侧限压缩破断的综合指标，是统计意义上的破断，包括了偏芯挤压断裂和穿芯断裂两种破断机制。

在实际压缩过程中较大粒径岩块由于不规则系数较大，在加载初期发生偏芯破断较多。随着偏芯断裂的发生，大粒径岩块的形状系数逐渐减小，充填率增加则应力状态系数逐渐增加，发生对芯挤压断裂的概率增加，如果某一岩块周围间隙已被小块岩石完全充填，则该岩块应力状态逐渐变为三轴应力状态，则该岩块不再发生挤压断裂，进入到固结二次成岩阶段。可见，破断指数可作为破碎岩样压缩破断的宏观指标。

破碎岩样压实二次破碎内在机制可总结为：压缩过程中主要存在偏芯破断和对芯破断 2 种破坏机制，发生何种破断与岩块所处的应力状态、不规则系数、岩块大小、岩性以及含水率相关。在压缩初期以偏芯破断为主，随着应力状态和不规则系数变化逐渐转变为对芯破断为主。统计结果表明大粒径岩块不规则系数大于小粒径岩块，在压缩过程中大粒径岩块发生偏芯破断的时间更长。从而在整体上，压实破碎过程表现出小粒径岩块压实应变小，大粒径岩块压实应变大。在加载初期轴压随应变增量较小，呈线性增加，在加载后期应力随应变增量逐渐增大，呈指数型变化的压实特征。

### 4.3 固结二次成岩机制分析

在破碎岩石空隙充填密实后，轴压与围压快速增加，二次破碎后的岩样进入细观颗粒间的相互作用层面。在此阶段内，泥质黏土或外加胶结材料将不同粒径岩块固结形成整体，如图 6(d)所示。受压

固结阶段是破碎岩体二次成岩强度增长的重要阶段，主要包括胶结材料的自胶结和岩块间胶结两种机制。压实应力对于二次成岩强度的影响在于提高压实度，减小二次成岩试件内部空隙从而提高二次成岩岩体强度。因此，提出固结指数  $g$  的概念，固结指数是表征破碎岩体压实 - 固结二次成岩的固结程度指标。物理内涵为：在相同的压实度条件下，压实二次成岩的固结程度取决于岩块自身强度、黏结材料强度以及黏结材料与岩块交界面的强度。它与混合材料的压实度、胶结材料自胶结后的强度、岩块强度、胶结材料含量以及岩块与充填胶结料之间的胶结程度均相关。岩块与胶结料之间的胶结程度又与岩块的不规则系数岩块体积相关，综合各因素后得到破碎岩体固结指数表达式如下：

$$g = \zeta k_i \frac{\sigma_g \sigma_r}{(\sigma_g + \sigma_r)^2} \frac{M_g}{M_g + M_r} \frac{\bar{\eta}}{\bar{v}} \quad (9)$$

式中： $\zeta$  为与亲水性和含水率相关的修正系数； $\sigma_g$ ， $\sigma_r$  分别为胶结材料胶结后的抗压强度和岩样平均单轴抗压强度(MPa)； $M_g$ ， $M_r$  分别为胶结材料和岩块的质量(kg)； $\bar{\eta}$  为不规则系数平均值( $m^3$ )； $\bar{v}$  为岩块体积平均值( $m^3$ )； $k_i$  为破碎岩块压实度，表达式为

$$k_i = \frac{v_0 - v_i}{v_0} \quad (10)$$

式中： $v_0$  为破碎岩块的堆积体积( $m^3$ )， $v_i$  为第  $i$  次压缩后的体积( $m^3$ )。

根据式(4)~(10)，可知压实应力、含水状态和粒径是影响二次成岩的重要影响因素。下面分别研究这 3 个因素对二次成岩后的力学特性分析。

## 5 二次成岩影响因素试验分析

### 5.1 二次成岩特征分析

为提高破碎岩样压实成型率，含水率试验组 and 不同轴压试验组均采用粒径  $< 1 \text{ mm}$  的岩粉作为试验材料。图 8 为不同条件下的二次成岩试件。根据图 8(a)可以看出，含水率为 0 和 3.17% 的试验组在 30 kN 轴压作用下不能压实形成完整的试件，在试件中上部发生断裂，且含水率越小断裂部分越大。含水率为 4.76%，8.16% 和 11.11% 试验组能够压实形成完整的试件。说明含水率可以改善试验岩样的压实 - 固结效果，含水率达 4.76% 后能达到较好的成型效果。根据图 8(b)可以看出，在不同轴压下(5~30 kN)，含水率为 11.11% 的岩粉均能够压实形成完整的试件。由于大粒径岩块难以直接压实成型，故



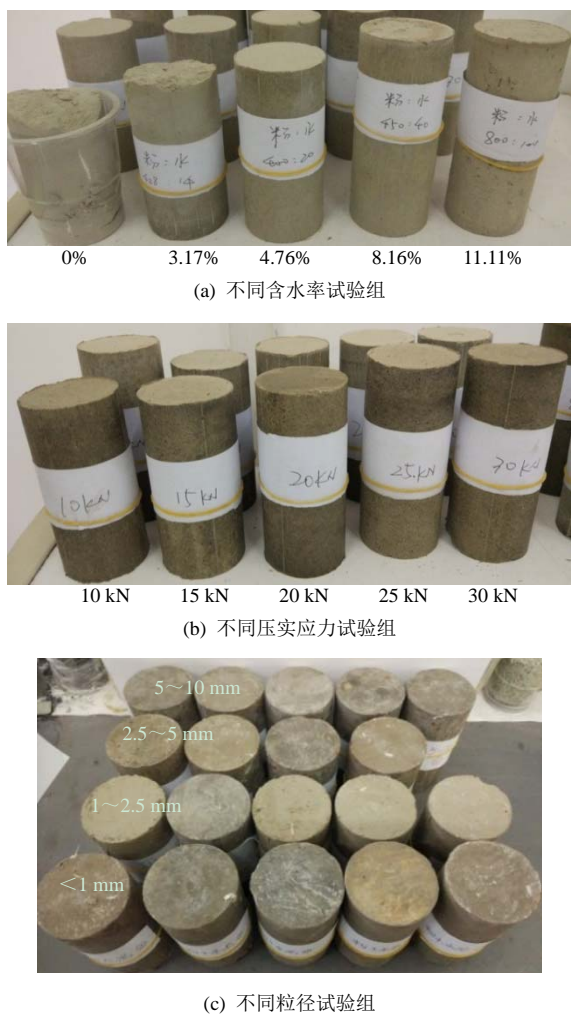


图 8 不同条件下二次成岩试件

Fig.8 Second diagenetic specimens under different conditions

对不同粒径试验组掺入了少量岩粉和水泥增强其黏结性。根据图 8(c)可以看出，不同粒径的岩块通过掺入岩粉和水泥(质量比 = 8 : 4 : 1 : 1)混合后，在 2 kN 轴压下试件能够成型良好，但存在部分空隙未被压实。

### 5.2 再生岩体力学特性分析

#### 5.2.1 单轴加载特征

将不同影响因素下二次成岩试件进行单轴压缩试验，其中不同含水率试验组 and 不同压实应力试验组试件在预加载阶段即发生破坏，难以获得其单轴抗压强度。主要原因在于这 2 个试验组二次成岩试件没有添加任何黏结材料，依靠混合岩体自身的黏土类成分黏结，其固结程度相对较低。单轴压缩时，试件表面呈“壳状”破坏，上、下两断面为底的“圆锥台”，如图 9(a), (b)所示。不同粒径试验组在掺入水泥和岩粉混合后，固结程度较好，单轴破断形态如图 9(c)所示。图 10 为不同粒径试验组二次成岩试件与完整砂岩试件的单轴应力 - 应变曲线。

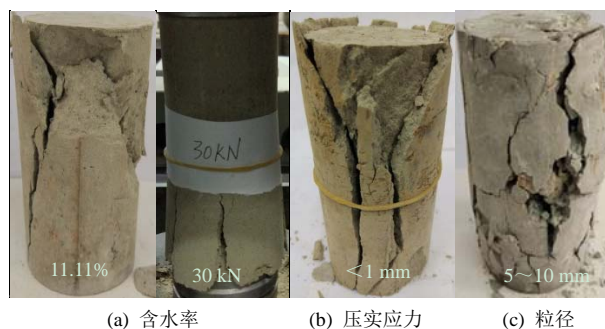
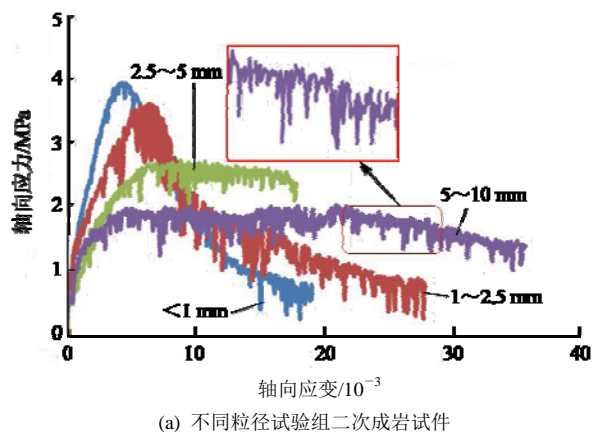
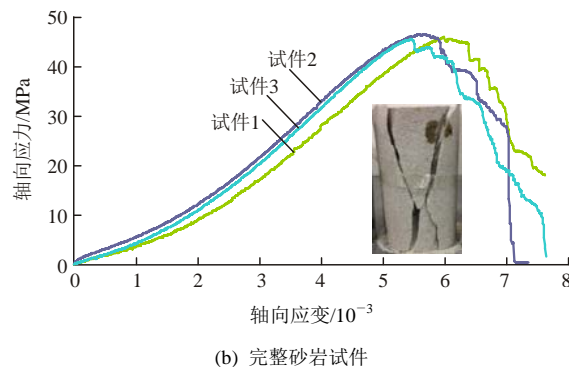


图 9 不同试验组二次成岩试件单轴破断形态

Fig.9 Breaking forms of second diagenetic specimens under uniaxial compression



(a) 不同粒径试验组二次成岩试件



(b) 完整砂岩试件

图 10 二次成岩试件与完整砂岩试件单轴应力 - 应变曲线

Fig.10 Uniaxial stress-strain curves of second diagenetic specimens and sandstone

可以看出，不同粒径二次成岩试件的强度特征相差较大，细粒岩块压实二次成岩试件峰值强度大，但残余强度减小快。粗粒压实二次成岩试件没有明显的峰值强度，但残余强度较大，且持续时间长。不同粒径压实二次成岩试件的强度(按粒径从小到大)分别为：3.92，3.60，2.71 和 2.02 MPa，平均强度为 3.06 MPa。压实二次成岩试件单轴抗压强度随着粒径增大而逐渐减小，但残余强度则是随粒径呈先增大后减小的趋势。进行对比分析的 3 个完整砂岩试件单轴抗压强度分别为：46.52，45.96 和 45.41 MPa，平均抗压强度为 45.96 MPa。相比于完整砂



岩试件，二次成岩试件单轴抗压强度约为完整砂岩强度的 6.66%。

根据不同粒径试验组试件单轴破坏形态和应力 - 应变曲线得到二次成岩试件变形破坏特征如下：

特征 1：细粒二次成岩试件类岩性。从单轴压缩曲线整体变化趋势来看，粒径 < 1 mm 和 1~25 mm 的二次成岩试件单轴加载曲线，首先由线性和非线性快速增长至峰值强度，然后快速跌落进入到残余强度阶段，具有明显的峰值强度和残余强度，表现出与完整砂岩试件类似的加载特性。同时，从单轴破坏形态来看也具有类似的破坏特征。

特征 2：粗粒二次成岩试件类塑性。粒径为 2.5~5 和 5~10 mm 二次成岩试件的单轴加载曲线首先呈非线性增长，随后逐渐趋于平稳，直接进入残余强度阶段，没有明显的峰值强度，更多表现出应变硬化的塑性材料加载特征。

特征 3：应力变化波动性。不同粒径的二次成岩试件在加载过程中应力均具有较大波动性，在加载初期这种波动性还不明显，在进入非线性变化阶段持续表现出较大的应力波动，且粒径越大，出现应力波动的时间越早，应力波动幅值越大。

不同粒径岩样二次成岩试件表现出以上变形破坏特征，主要是由于二次成岩试件在短时间内压实、固结而成，没有经过长期的变质作用，试件内部结构不稳定，且非均质性较大。粒径越大，这种非均质性越明显。岩体颗粒越细，在胶结介质作用下形成的二次成岩试件均质性更好，其变形特征也越接近完整岩样，表现出类岩性特征。在峰前阶段，试件的均匀性和胶结程度决定了的峰值强度。在残余强度阶段，主要靠颗粒间的摩擦作用。小粒径二次成岩试件能够形成明显的压剪断面，该断面上的颗粒大小决定了压剪断面的粗糙度，粒径越大其残余强度越大。当粒径过大，二次成岩试件的胶结程度降低，粗颗粒不能稳定固结，在单轴压缩时，不能形成较规整的压剪断面。从单轴破坏形态上来看，小粒径压实二次成岩试件呈整体性的开裂破坏，大粒径压实二次成岩试件则是不规则的密集破裂，破裂多为岩块胶结不稳而发生脱落。

### 5.2.2 三轴加载特征

由于不同含水率试验组 and 不同轴压试验组未能获得单轴强度特征，为进行各影响因素的对比分析，将不同条件下成型的试件进行 1 MPa 围压条件

下的三轴加载，采用力/围压加载模式，围压加载速率为 0.01 MPa，轴压加载速率 0.05 kN/s，得到三轴应力 - 应变关系如图 11 所示。

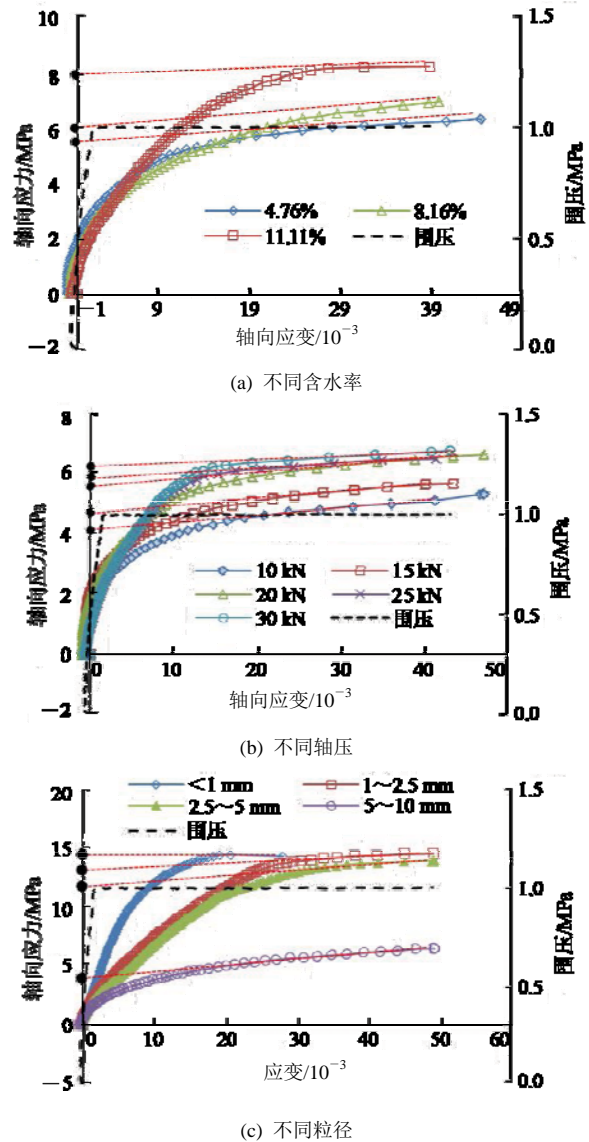


图 11 二次成岩试件三轴应力 - 应变曲线

Fig.11 Stress-strain curves of triaxial compression of second diagenetic specimens

可以看出，在三轴加载过程中所有二次成岩试件特征曲线变化类似于土的非线性特征。在加载初期轴向应力随轴向应变较快增长，但增长速度逐渐减小，一段时间后趋于平稳。在整个加载过程中没有出现轴压降低的情况，表现出应变硬化的特点。二次成岩试件的破坏可借鉴土力学理论，当应变达到一定限度(通常为 15%)认为试样破坏。在 1 MPa 围压下，不同含水率试验组二次成岩试件破坏的平均应变为 0.006 18。不同轴压应力试验组的二次成岩试件的破坏时的平均应变为 0.006 77。不同粒径试验组的破坏平均应变为 0.006 56。

整体来看，在围压和轴压加载之初，二次成岩试件便发生了屈服，在较小的应变条件下发生破坏，随着轴向应力的继续加载，破坏的压实二次成岩又进入到围压为 1 MPa 条件下的再压实过程。将应力 - 应变曲线进入平稳阶段后的切线与应力轴的交点定义为压实二次成岩试件在设定围压下的三轴强度，若出现应力 - 应变曲线下降时，在曲线最大值处做切线与应力轴相交取值。根据三轴强度的定义得到不同含水率条件下二次成岩试件的三轴抗压强度分别为：4.75, 5.41, 7.60 MPa。不同轴压下二次成岩试件三轴抗压强度分别为：4.12, 4.81, 5.56, 5.88, 6.15 MPa，不同粒径二次成岩试件的三轴抗压强度分别为(按粒径从大到小依次)：4.79, 12.23, 13.21, 14.42 MPa。可见破碎岩样中含水率越高，压实轴压越大粒径越小压实、固结二次成岩试件的三轴抗压强度越高。

5.3 二次成岩影响因素分析

将不同含水率、压实应力、岩块粒径条件下二次成岩试件的三轴强度统计得到如图 12 所示。在 1 MPa 围压下，二次成岩试件三轴强度与含水率之间为三次多项式增长关系，可靠度  $R^2 = 0.8711$ ，其表达式为

$$y = -0.01x^3 + 0.1619x^2 + 0.1197x - 0.2152 \quad (11)$$

水对于破碎岩体二次成岩试件的作用主要在于使黏结材料发生水化反应，将岩块颗粒黏结形成整

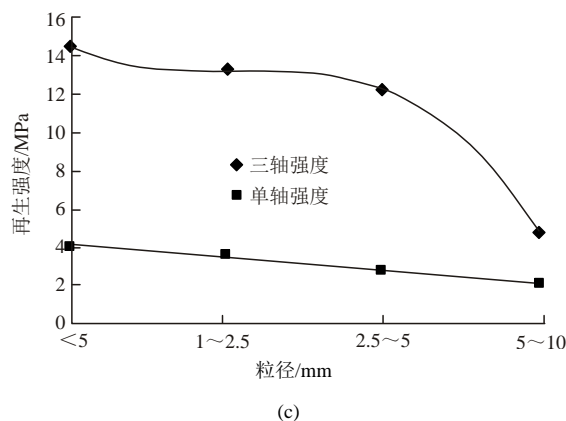
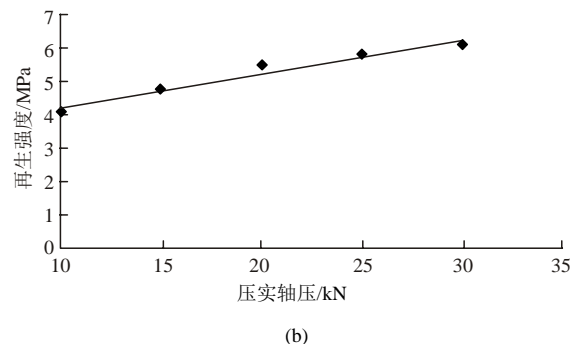
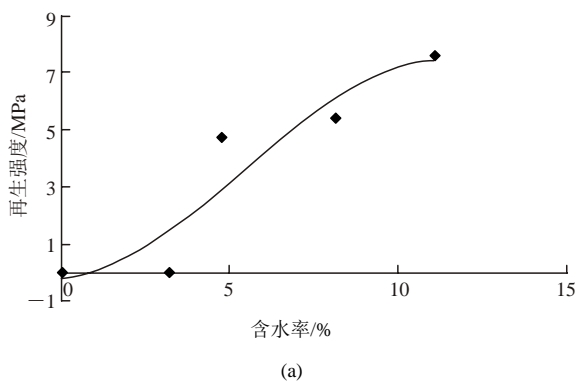


图 12 不同成岩条件试件三轴强度  
Fig.12 Triaxial strengths under different diagenetic conditions

体结构，产生强度。同时，在二次破碎阶段水可以软化岩块，使得不规则大岩块更容易破断，水楔作用使细小颗粒更易移动、调整，充填密实岩块间隙。

在 1 MPa 围压下，二次成岩试件的三轴强度与压实应力之间为线性增长关系，可靠度  $R^2 = 0.9539$ ，其表达式为

$$y = 0.1026x + 3.252 \quad (12)$$

二次成岩试件的强度受试件空隙率影响较大，即使在较大压实应力作用下，破碎岩体仍具有残余碎胀性<sup>[5]</sup>。应力主要通过对岩块的二次破碎和对细小岩块颗粒的运移调整来提高破碎岩体密实度，从而减小二次成岩试件岩内部空隙率提高试件强度。

在 1 MPa 围压下，二次成岩试件的三轴强度与粒径之间呈三次多项式减小关系，单轴抗压强度与粒径之间为线性减小关系。可靠度分别高达 1 和 0.9714，表达式分别为

$$y = -10.115x^3 + 6.805x^2 - 13.82x + 22.55 \quad (13)$$

$$y = -0.659x + 4.71 \quad (14)$$

岩块粒径对于二次成岩强度试件的影响主要可分为 2 种情况：(1) 在粒径较小时，在压缩破断过程中岩块和胶结材料能够形成较为均匀的介质。在屈服破坏之前，作为整体抵抗破坏，岩块的强度、胶结材料的强度以及两者交界面的强度共同决定了试件的峰值强度。试件屈服后能够形成较为明显的压剪断面，而粒径的大小决定了断面的粗糙度，粒径的强度决定了试件的残余强度。由于粒径较小，其残余强度较小，在摩擦作用下压剪断面逐渐磨平，残余强度下降较快。(2) 在粒径较大时，二次成岩的强度主要取决于岩块与胶结材料交界面的强度以及胶结材料的强度，在压缩过程中往往是岩块与胶结材料交界面首先破坏，岩块脱落，不能形成明显

的压剪断面。其破断过程就是岩块与胶结材料分离的过程，其次，才有胶结材料的破裂和岩块的断裂。因此，残余强度时间长，没有明显的峰值强度。

## 6 结 论

州景矿再生顶板软弱破碎围岩含有一定量的黏土成分，在破碎岩体压实过程中可作为黏结材料实现固结二次成岩。因此，采用这种混合岩体通过不同条件下的压实-固结试验研究破碎岩体二次成岩机制以及二次成岩后再生岩体的力学特性得到如下几点结论：

(1) 破碎围岩压实-固结二次成岩过程包括受压二次破碎和固结二次成岩 2 个阶段。受压二次破碎阶段存在偏芯挤压和对芯挤压 2 种力学机制，固结二次成岩阶段包含自胶结和块间胶结 2 种成岩机制。采用破断指数和固结指数分别表征岩块破断的难易程度和固结强化程度，破断指数越大岩块越容易破断，固结指数越大压实-固结二次成岩试件强度更高。

(2) 含水率、压实应力和岩样粒径对二次成岩试件具有重要影响。粒径 $<1\text{ mm}$ 的岩样，在 $30\text{ kN}$ 轴压下，压实成型的最低含水率为 $4.76\%$ 。当含水率为 $11.11\%$ 时，在 $10\sim 30\text{ kN}$ 不同应力下均能压实成型。粒径较大的岩样即使含水率大于 $11.11\%$ ，也不能压实成型。

(3) 岩样：岩粉：水泥：水 =  $8:4:1:1$  压制的二次成岩试件，在单轴压缩试验中表现出：细粒二次成岩试件类岩性、粗粒二次成岩试件类塑性、应力加载波动性等不同于完整岩石试件的加载特性。

(4) 二次成岩试件的三轴强度与含水率呈三次多项式增长关系，与压实应力呈线性增长关系，与粒径之间呈三次多项式减小关系。二次成岩试件单轴抗压强度随粒径增大而线性减小。

需要注意的是：压实-固结二次成岩试件强度与含水率、压实应力以及粒径之间的关系是在本文试验范围内获得。事实上，在其他条件相同的情况下含水率应该存在一个最优值，压实应力在增大到一定程度后，对压实试件空隙率的减小有限，粒径对二次成岩的影响也与试验尺度以及细料及黏结材料的含量有关，相关内容有待进一步深入研究。

## 参考文献(References):

- [1] 赵和松. 再生顶板的结构形式及其顶板控制[J]. 煤炭科学技术, 1993, (5): 2 - 5.(ZHAO Hesong. Constitution and control of regenerated roof[J]. Coal Science and Technology, 1993, (5): 2 - 5.(in Chinese))
- [2] 缪协兴, 茅献彪, 胡光伟, 等. 岩石(煤)的碎胀与压实特性研究[J]. 实验力学, 1997, 12(3): 394 - 400.(MIAO Xiexing, MAO Xianbiao, HU Guangwei, et al. Research on broken expand and press solid characteristics of rocks and coals[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(3): 394 - 400.(in Chinese))
- [3] 张振南, 茅献彪, 葛修润. 松散岩块侧限压缩模量的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3 049 - 3 054.(ZHANG Zhennan, MAO Xianbiao, GE Xiurun. Testing study on compressive modulus of loose rock blocks under confining constraint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3 049 - 3 054.(in Chinese))
- [4] 苏承东, 顾明, 唐旭, 等. 煤层顶板破碎岩块压实特征的试验研究[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.(in Chinese))
- [5] 曹树刚, 张适, 李国栋, 等. 散体研石的承载性能试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1 164 - 1 171.(CAO Shugang, ZHANG Shi, LI Guodong, et al. Experimental study on the bearing properties of granular gangue[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(5): 1 164 - 1 171.(in Chinese))
- [6] 马占国, 兰天, 潘银光, 等. 饱和破碎泥岩蠕变过程中孔隙率变化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1 447 - 1 454.(MA Zhanguo, LAN Tian, PAN Yinguang, et al. Experimental study on variation law of saturated broken mudstone porosity during creep process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1 447 - 1 454.(in Chinese))
- [7] 陈占清, 李顺才, 茅献彪, 等. 饱和含水石灰岩散体蠕变过程中孔隙度变化规律的试验[J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 26 - 30.(CHEN Zhanqing, LI Shuncai, MAO Xianbiao, et al. Experiment on the porosity changing of water-saturated granular limestone during its creep[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1): 26 - 30.(in Chinese))
- [8] 陈晓祥, 苏承东, 唐旭, 等. 饱水对煤层顶板破碎压实特征影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 1): 3 318 - 3 326.(CHEN Xiaoxiang, SU Chengdong, TANG Xu, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on compaction property of crushed stone from coal seam roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp.1): 3 318 - 3 326.(in Chinese))



- [9] 钱自卫, 曹丽文, 姜振泉, 等. 煤矸石侧限加载 - 浸水 - 卸载实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 578 - 582.(QIAN Ziwei, CAO Liwen, JIANG Zhenquan, et al. Experimental study on confined loading-water immersion-unloading of coal gangue[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(4): 578 - 582.(in Chinese))
- [10] 姜振泉, 季良军, 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 and Technology, 2001, 30(2): 139 - 142.(in Chinese))
- [11] 王 文, 李化敏, 熊祖强, 等. 粒径级配对矸石压实变形特性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(6): 1 553 - 1 694.(WANG Wen, LI Huamin, XIONG Zuqiang, et al. Research on the influence of diameter gradation on compressive deformation characteristics of gangues[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(6): 1 553 - 1 694.(in Chinese))
- [12] 张德辉, 李 辉. 连续级配矸石压缩特性的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 30(3): 337 - 340.(ZHANG Dehui, LI Hui. Experimental study on compression performance of continuous grading gangue[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2011, 30(3): 337 - 340.(in Chinese))
- [13] 冯梅梅, 吴疆宇, 陈占清, 等. 连续级配饱和破碎岩块压实特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2 195 - 2 202.(FENG Meimei, WU Jiangyu, CHEN Zhanqing, et al. Experimental study on the compaction of saturated broken rock of continuous gradation[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2 195 - 2 202. (in Chinese))
- [14] 张俊英, 王金庄. 破碎岩块的碎胀与压实特性实验研究[C]// 开采沉陷与“三下”采煤学术会议. [S. l.]: [s. n.], 2005: 30 - 32.(ZHANG Junying, WANG Jinzhuang. Experimental study on the crushing and compaction characteristics of broken rock blocks[C]// Mining Subsidence and the Academic Conference of “three Under” Coal Mining. [S. l.]: [s. n.], 2005: 30 - 32.(in Chinese))
- [15] EVDOKIMOV P D, ADAMOVICH A N, FRADKIN L P, et al. Shear strengths of fissures in ledge rock before and after grouting[J]. Hydrotechnical Construction, 1970, 4(3): 229 - 233.
- [16] 韩立军, 宗义江, 韩贵雷, 等. 岩石结构面注浆加固抗剪特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2 570 - 2 577.(HAN Lijun, ZONG Yijiang, HAN Guilei, et al. Study of shear properties of rock structural plane by grouting reinforcement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2 570 - 2 577.(in Chinese))
- [17] SWEDENBORG S, DAHLSTRÖM L O. Rock mechanics effects of cement grouting in hard rock asses[C]// Proceedings of the 2003 Specialty Conference on Grouting at the Third International Conference on Grouting and Ground Treatment, New Orleans, Grouting and Ground Treatment. [S. l.]: [s. n.], 2003: 1 089 - 1 102.
- [18] 李召峰, 李术才, 刘人太, 等. 富水破碎岩体注浆加固实验与机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 200 - 207.(LI Zhaofeng, LI Shucai, LIU Rentai, et al. Grouting reinforcement experiment for water-rich broken rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 200 - 207.(in Chinese))
- [19] 雷进生, 刘 非, 王乾峰, 等. 非均质土层的注浆扩散特性与加固力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2 245 - 2 253.(LEI Jinsheng, LIU Fei, WANG Qianfeng, et al. Diffusion characteristics and reinforcement mechanics of grouting in non-homogeneous soil strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2 245 - 2 253.(in Chinese))
- [20] 宗义江, 韩立军, 韩贵雷. 破裂岩体承压注浆加固力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 483 - 488.(ZONG Yijiang, HAN Lijun, HAN Guilei. Mechanical characteristics of confined grouting reinforcement for cracked rock mass[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(4): 483 - 488.(in Chinese))
- [21] 许宏发, 耿汉生, 李朝甫, 等. 破碎岩体注浆加固强度估计[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2 018 - 2 022.(XU Hongfa, GENG Hansheng, LI Caofu, et al. Estimating strength of grouting reinforced bodies in broken rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2 018 - 2 022.(in Chinese))
- [22] 余伟健, 王卫军. 矸石充填整体置换“三下”煤柱引起的岩层移动与二次稳定理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 105 - 112.(YU Weijian, WANG Weijun. Strata movement induced by coal-pillar under three circumstances exchanged by gangue backfill and quadratic stability law[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 105 - 112.(in Chinese))
- [23] 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼. 矸石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 395 - 401.(ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, GUO Guangli. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(4): 395 - 401.(in Chinese))
- [24] 孙利辉, 纪洪广, 蒋 华, 等. 弱胶结地层条件下跨落带岩层破碎冒落特征与压实变形规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2 565 - 2 572.(SUN Lihui, JI Hongguang, JIANG Hua, et al. Experimental study on characteristics of broken caving and regularity of compaction deformation of rocks in caving zone in the weakly cemented strata[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2 565 - 2 572.(in Chinese))
- [25] 周 健, 张艳伟, 周韵鸿, 等. 考虑粒间法向接触力作用的粗粒土颗粒破碎试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1 565 - 1 574.(ZHOU Jian, ZHANG Yanwei, ZHOU Yunhong, et al. Experimental study on particle breakage of coarse-grained soil considering normal contact force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1 565 - 1 574.(in Chinese))