

DOI:

# 高密实石墨-膨润土块体的“两步压实”制备方法

谈云志<sup>1,2</sup>, 赵凌晖<sup>1,2</sup>, 张金生<sup>1,2</sup>, 祝雨<sup>1,2</sup>, 明华军<sup>\*1,2,3</sup>

(1. 三峡大学特殊土力学研究所, 湖北 宜昌 443002; 2. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;

3. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 膨润土和石墨细腻如粉, 压成高密实大型块体, 需要超大吨位的加载设备。为破解该难题, 提出“两步压实”法, 即先把细腻的粉粒压成高密实块体, 再破碎成团; 然后, 团粒与粉粒再混合, 以较低的荷载压成尺寸更大的高密实块体。研究表明, 相较于用纯粉粒膨润土直接压实, “两步压实”法可以实现用相同吨位压力机制备出更高密实度的块体, 提升块体密度超 4%。当目标干密度为  $1.93 \text{ g/cm}^3$  时, 压实应力可减少 4 MPa。压实过程中, 团粒经历“重排、破碎、压密”的变化, 当团粒含量在 30% 时, 复压块体能更好地发挥压实效益、具备更优的成型能力和均匀性。微观试验也表明: “两步压实法”能够减小复压块体中的孔径, 提高块体的密实度。

**关键词:** 球状石墨; 膨润土; 压实; 块体; 缓冲层

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548

作者简介: 谈云志(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事特殊土土力学与特殊土资源化利用方面的研究工作。E-mail: yztan@ctgu.edu.cn。

## High density graphite-bentonite mixture block prepared with “Two-Step Compaction” method

TAN Yunzhi<sup>1,2</sup>, ZHAO Linghui<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinsheng<sup>1,2</sup>, ZHU Yu<sup>1,2</sup>, MING Huajun<sup>\*1,2,3</sup>

(1. The Institute of Problematic Soils Mechanics, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 3. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Bentonite and graphite, as fine as powder, are pressed into large, high-density blocks that require super-tonnage loading equipment. For solving this problem, the Two-step compaction method is proposed, that is, the fine powder particles are first pressed into high dense blocks and then broken into clusters. The aggregates are then remixed with the powder particles and pressed into larger high-density blocks at lower loads. The results show that the "two-step compaction" method can achieve higher density blocks prepared by the same tonnage press, and increase the block density by more than 4%, compared with direct compaction with pure powder bentonite. When the target dry density is  $1.93 \text{ g/cm}^3$ , the compaction stress can be reduced by 4 MPa. During the compaction process, the granules undergo changes of "rearrangement, fragmentation, and densification". When containing 30% pellet content, the re-compacted block demonstrates optimal compaction efficiency, better forming ability and uniformity. The microscopic test shows that the two-step compaction method can reduce the pore diameter in the re-compacted block and improve the compactness of the block.

**Key words:** spheroidal graphite; bentonite; compaction; block; buffer layer

## 0 引言

膨润土富含蒙脱石, 具有高膨胀、低渗透和强吸附的性能, 被视为构建核废料地下处置库缓冲层的首选材料<sup>[1-2]</sup>。石墨是天然的高导热率材料<sup>[3]</sup>, 为加快核废料衰变热消散, 已有学者建议往膨润土中掺入石墨, 以提高缓冲层导热能力<sup>[4]</sup>。同时部分学者发现<sup>[5-7]</sup>, 相对片状石墨, 球状石墨既能提高导热性能, 又不显著影响膨润土的防渗性能。然而, 膨润土和球状石墨都

呈粉末状, 十分细腻, 可压实性差, 但密实度显著影响着缓冲层的隔离防渗和导热能力。

把以膨润土为基材的粉末材料压制成为具有特定形

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279102); 湖北省自然科学基金-三峡创新发展联合基金项目(2023AFD198); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2024AFA004)

收稿日期: 2024-07-31

\*通信作者(E-mail: hjming@ctgu.edu.cn)

状和厚度的高密实块体，不仅需要超大吨位压实设备，还需要合理可行的技术方法。世界各国为开展缓冲材料模型试验，通过单轴静压制备缓冲材料砌块，如图1。然而，试图把膨润土一次性压制成型，且压实成高密实状态，需要巨大的机械压实力<sup>[8]</sup>（如图1a）。即使是将尺寸稍小（500 mm×571 mm×400 mm）的回填块体，压至密度 2.0 g/cm<sup>3</sup>，压实应力也高达 50-100 MPa（约 5700-14250 kN）<sup>[9]</sup>。法国 ANDRA 等<sup>[10]</sup>利用 60000 T 的大型压力试验机制备了干密度为 1.96 g/cm<sup>3</sup>（直径 2.25 m，高度 50 cm）的缓冲材料圆环形砌块。中国学者张虎元等<sup>[11]</sup>通过 200 T 四柱液压机配合 1/12 砌块模具，成功制备了最大干密度为 1.8 g/cm<sup>3</sup> 的混合型缓冲砌块，并使用 CT 技术分析了其均匀性<sup>[12]</sup>。刘月妙等<sup>[13]</sup>采用自制 1000 T 级砌块专用压力机制备了干密度为 1.7 g/cm<sup>3</sup>（575 mm×505 mm×100 mm）的长方体膨润土砌块。曹胜飞等<sup>[14]</sup>利用 2000 T 的大型压力设备成功制备了干密度为 1.8 g/cm<sup>3</sup> 的扇形和环形等缓冲材料砌块。

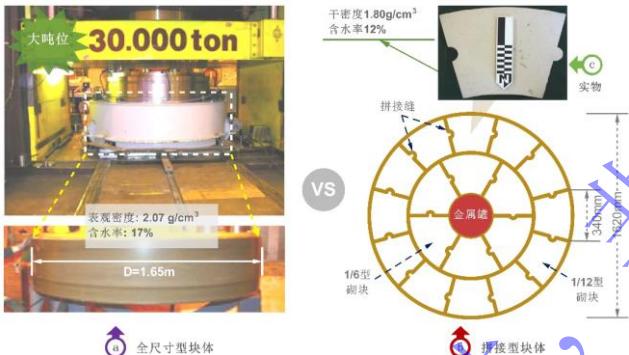


图 1 压实设备<sup>[9, 15]</sup>

Fig. 1 Equipment for compaction

现场用或模型试验用砌块尺寸都比较大，制作难度倍增。主要表现为：一是压实成型的设备要求高，需要施加的荷载吨位大（如图1a）；二是块体尺寸较大时，存在外密内松，压实不均的现象<sup>[11]</sup>。究其原因，压实成型实际是颗粒移动或滚动靠拢的过程，当尺寸较大，摩阻效应明显，压实作用从外向内逐渐弱化，致使块体内部压实不充分；换言之，把石墨-膨润土粉粒“一步压实”到大尺寸块体，属于“毕其功于一役”，弊端凸显。不过，可以发现，试验用膨润土试块的尺寸小，比较容易拌合和压实；那么，能否把制备小尺寸块体的优势，延续到制备大尺寸块体呢？

为此，本文提出将大尺寸块体压实过程分为两步，先把细粉压实成小型块体，经过“压实-破碎-磨圆”工艺制备高密颗粒；再把颗粒与粉混合压实成块，即变“一步压实”为“两步压实”。从复压块体完整性、均匀性和压实功等方面综合优选出合适的团粒含量，进而为制备适用于工程条件的大型砌块提供一种“压

实荷载小、压实均匀性好”的方法。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用内蒙古高庙子膨润土呈白色粉末状，质地细腻，自然含水率 10%~12%。蒙脱石含量约 63%、石英含量为 23%；根据《土工试验方法标准（GB/T 50123-2019）》<sup>[16]</sup>，确定其液限和塑限分别为 180% 和 30%，自由膨胀率 190%，比重 2.65。

试验用球状石墨颗粒最大直径 2000 目（6.5 μm）、含碳量 99.95%、比重 2.3，委托青岛腾达碳素机械有限公司生产。

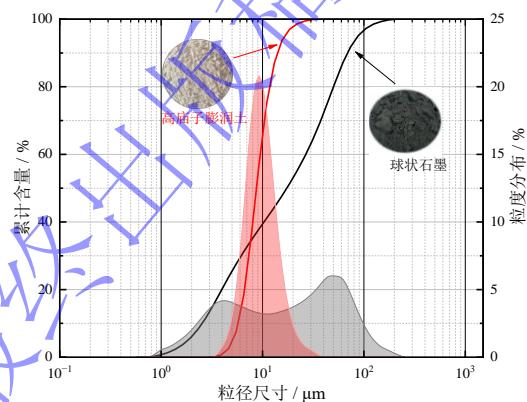
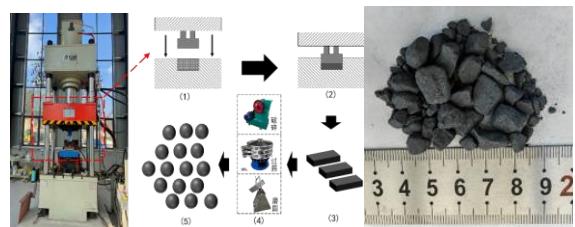


图 2 膨润土和球状石墨颗粒分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution of bentonite and graphite

前期研究表明<sup>[7]</sup>，按照球状石墨：膨润土=20: 80 的质量比混合，其混合物的导热系数为 1.7 W/(m·K)，是纯膨润土的 1.74 倍；渗透系数  $9.44 \times 10^{-13}$  m/s、膨胀力 5.76 MPa，既能提高导热性能，又能满足防渗要求。

将球状石墨-膨润土混合物，采用“压实-破碎-磨圆”工艺制成高密团粒（如图3），过 10 mm 孔径筛。



(a) 制备流程

(b) 样品

图 3 高密实团粒

Fig. 3 High density aggregates of bentonite-graphite mixture

球状石墨-膨润土粉粒也按照石墨：膨润土=20: 80 的质量比混合均匀。然后，将团粒和粉粒按照  $i: (10-i)$  的配比混合，其中  $i$  为 0~10 的整数，以  $Mix_{af}$  表示团-粉粒混合物，其后以括号中数字表示两者质量比，如  $Mix_{af}(1-9)$  是指 10% 团粒和 90% 粉粒混合。将

各比例的试样混合好以后，装入密封箱中，置于干燥处待用。Mix<sub>af</sub>(0-10)是纯粉粒、Mix<sub>af</sub>(10-0)是纯团粒，两者作为对照组。

## 1.2 试验方案

通过压实性能和干密度均匀性，确定最优团-粉粒混合比，具体试验方案，见表 1，每组试验设置 3 个平行试样，试验结果取平均值。

表 1 试验方案

Table 1 Testing schemes

试验内容	试验目的	试验材料	表征方法
1	制备球状石墨-膨润土复压块体	球状石墨-膨润土团-粉粒混合料	块体成型情况
2	团粒含量对复压块体的压实性能影响	球状石墨-膨润土复压块体	压实曲线
3	团粒含量对复压块体的均匀性影响	球状石墨-膨润土复压块体	均匀性

## 1.3 试验方法

①制备团粒。采用“压实-破碎-磨圆”的工艺制备球状石墨-膨润土高密团粒，主要步骤如下：(i) 压实成块：借用伺服式液压制砖机（最大量程 315 T）将球状石墨-膨润土混合物压实成块。根据膨润土有效干密度 (1.85 g/cm<sup>3</sup>) 和待压实的砌块的目标尺寸 (10 mm×115 mm×240 mm)，称取所需质量的混合物材料，将混合物材料通过布料设备倒入模具(尺寸 53 mm×115 mm×240 mm) 料槽，然后设定加载速度和保压时间，其中，压力采用位移控制，保压时间为 5 h。混合物材料被压实成目标干密度的试块，再借由压力机的脱膜程序，将试样脱出，得到完整压实块。(ii) 机械破碎：使用颚式破碎机将试块破碎成最大粒径为 10 mm 的颗粒，破碎颗粒过孔径为 10 mm 的圆孔筛，筛上颗粒继续破碎，直到全部过筛为止；(iii) 去角磨圆：机械破碎所得颗粒表面带有尖锐棱角，使用磨圆机，借由颗粒自身与圆盘面之间摩擦、颗粒间碰撞和自身滚动，将颗粒表面棱角磨平，得到圆润团粒。磨圆机圆盘倾斜角度设置为 45°，转速为 45 r/min，转动时间 15 min。

②压实方法。采用单轴压缩法制备球状石墨-膨润土复压块体，主要步骤如下：(i) 按照膨润土有效干密度目标值 (1.85 g/cm<sup>3</sup>) 和尺寸 (25 mm×115 mm×240 mm)，称量球状石墨-膨润土团-粉粒混合料，倒入模具槽内，然后抹平混合料上表面。(ii) 依据膨润土有效干密度，换算成块体目标压实高度，采用位移控制，当压实到目标位移后，维持恒定荷载 10 h。(iii) 压实完成后，卸载取出压实成型的块体，复核块体尺寸和重量。

压实过程中，连续记录压实应力和位移，换算成

复压块体的瞬时干密度 (如式 1)，建立压实应力和干密度的关系。

$$\rho_i = \frac{m}{(H - \Delta H_i) S} \quad (1)$$

式中， $\rho_i$ ，某荷载对应的复压块体整体干密度 (g/cm<sup>3</sup>)； $m$ ，复压块体干质量 (g)； $H$ ，填料后的初始高度 (cm)； $\Delta H_i$ ，某荷载对应累积位移量 (cm)； $S$ ，模具底部面积 (cm<sup>2</sup>)。

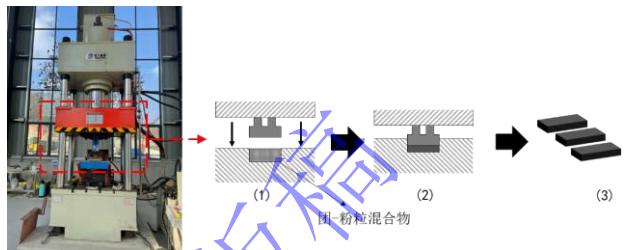


图 4 复压块体制备流程

Fig. 4 Preparation of re-compaction block

③均匀性试验。按照图 5 指定的复压块体位置，钻孔取样，利用蜡封法<sup>[16]</sup>测量每块样品的密度，再通过公式 (2) 换成膨润土的有效干密度。

$$\rho_b = \frac{\rho_d \rho_g (1 - R_g)}{\rho_g - R_g \rho_d} \quad (2)$$

式中： $\rho_b$ ，膨润土有效干密度 (g/cm<sup>3</sup>)； $R_g$ ，石墨掺入率 (%)； $\rho_d$ ，石墨-膨润土干密度 (g/cm<sup>3</sup>)； $\rho_g$ ，石墨相对密度。

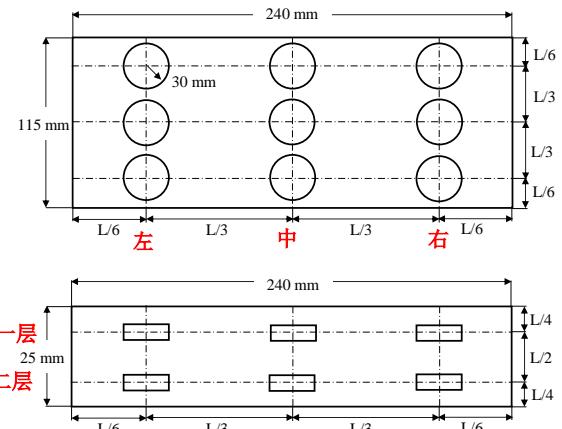


图 5 复压块体取样图

Fig. 5 Sampling locations in re-compaction block

④扫描电镜试验 (SEM)。分别取复压块体膨胀前后边长为 3~4 mm 的破碎块，对于水化后试样，首先置于 -196 °C 的液氮中，使水分迅速凝结成不具有膨胀特性的非结晶态冰，然后使用真空饱和缸促使非结晶态冰直接升华，保留试样内部孔隙的原始分布状态。最后转移至冷冻干燥机冷冻干燥处理 24 h，取冷冻干燥后试样在日本电子 JSM-7500F 扫描电子显微镜上开展试验，为保证微观下电镜图片的清晰度，应对试样

进行镀金处理，保证试样导电性。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 压实性能

复压块体压制过程中压实应力与块体干密度的关系，如图 6。为了清晰表达团粒掺比对压制过程中所需荷载的影响，图 6 仅保留纯粉粒膨润土（Mix<sub>af</sub>(0-10)）、纯团粒膨润土（Mix<sub>af</sub>(10-0)）和粉团各半混合物（Mix<sub>af</sub>(5-5)）的数据结果。

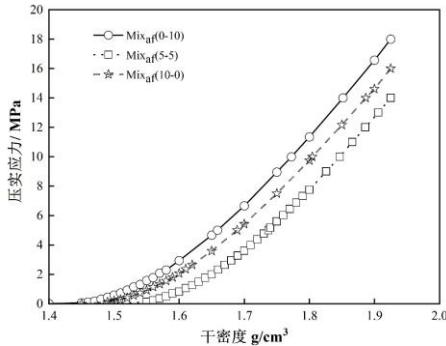


图 6 块体压制过程中压实应力与干密度的关系

Fig. 6 Relationship between pressure and dry density during block compaction

由图 6 可见，压制相同干密度块体，纯粉粒膨润土（Mix<sub>af</sub>(0-10)）所需压实应力最大，纯团粒膨润土（Mix<sub>af</sub>(10-0)）次之，粉团各半混合物（Mix<sub>af</sub>(5-5)）所需压实应力最小。以压制干密度为 1.925 g/cm<sup>3</sup> 块体为例，纯粉粒膨润土需要 18 MPa 才能压制而成，而 50% 团粒掺比的混合料仅需 14 MPa 就可压制而成，其仅为纯粉粒膨润土所需压实应力的 77.8%。

进一步分析不同团粒含量混合料在压实过程中，不同压实应力作用下的干密度，如图 7 所示。

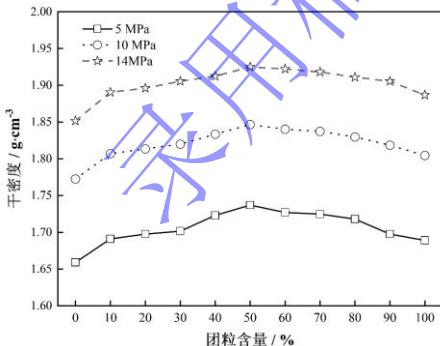


图 7 不同压实应力作用下压实干密度与团粒含量关系

Fig. 7 Relationship between obtained dry density and aggregate content under different pressure

可以看出，相同压实应力下，复压块体干密度随团粒含量增多均呈先增大后减小的变化趋势。团粒含量为 50% 时，干密度均达到最大。5 MPa 载荷作用下，

团粒含量从 0 增大到 50% 时，复压块体干密度从 1.66 g/cm<sup>3</sup> 增大到 1.74 g/cm<sup>3</sup>，干密度提升 4.82%；10 MPa 载荷作用下，复压块体干密度从 1.77 g/cm<sup>3</sup> 增大到 1.85 g/cm<sup>3</sup>，干密度提升 4.52%；14 MPa 载荷作用下，复压块体干密度从 1.85 g/cm<sup>3</sup> 增大到 1.93 g/cm<sup>3</sup>，干密度提升 4.32%。可见，当使用相同的压力吨位进行块体压制时，“两步压实法”相比“一步压实法”可以将块体密度提升超 4%。

图 8 为不同团粒含量混合料经复压成块后，复压块体干密度相对纯粉粒膨润土在相同荷载作用下压实块体干密度的提高率。复压块体的有效干密度提高率随团粒含量的增加呈现上升趋势。不同压实应力（10 MPa 和 14 MPa）作用下，复压块体的干密度提高率差别不大，结果证明了先制团的“两步压实法”可得到更高的块体密实度。

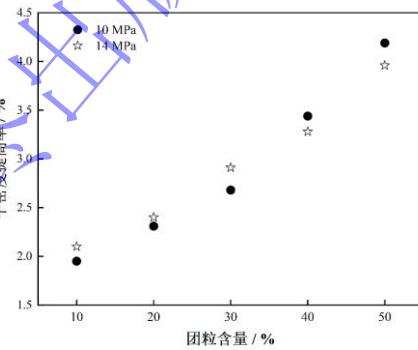


图 8 复压块体干密度提高率与团粒含量关系

Fig. 8 Increase in dry density of recompacted blocks

同样地，复压块体目标密实度分别为 1.6 g/cm<sup>3</sup>、1.7 g/cm<sup>3</sup>、1.8 g/cm<sup>3</sup> 和 1.925 g/cm<sup>3</sup> 时，不同团粒掺入率下所需压实应力，如图 9。

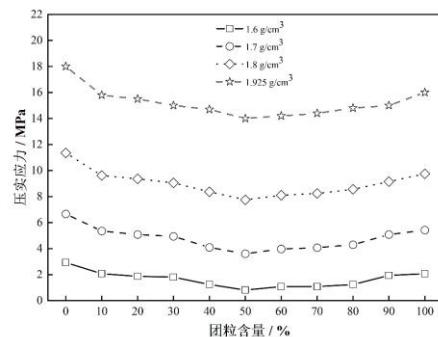


图 9 对应干密度下压实应力与团粒含量关系

Fig. 9 Relationship between required pressure and aggregated content

当复压块体的目标干密度相同时，压实应力随团粒含量增加均呈现先减小后增大的整体变化趋势，且团粒含量为 50% 时，压实应力均最小。当目标干密度为 1.60 g/cm<sup>3</sup> 时，Mix<sub>af</sub>(5-5) 所需压实应力比 Mix<sub>af</sub>(0-10) 小 2.12 MPa；当目标干密度为 1.925 g/cm<sup>3</sup> 时，Mix<sub>af</sub>(5-5)

所需压实应力比  $\text{Mix}_{\text{af}}(0-10)$  小 4.0 MPa。可见，压实目标干密度越大，采取“两步压实法”节约的压实功越多，即“两步压实法”节约压实功的优势在制备高干密度的块体时更明显。

## 2.2 复压块体成型情况

按照目标干密度  $1.85 \text{ g/cm}^3$ ，开展“两步压实法”制备的复压块体，其成型情况如图 10。

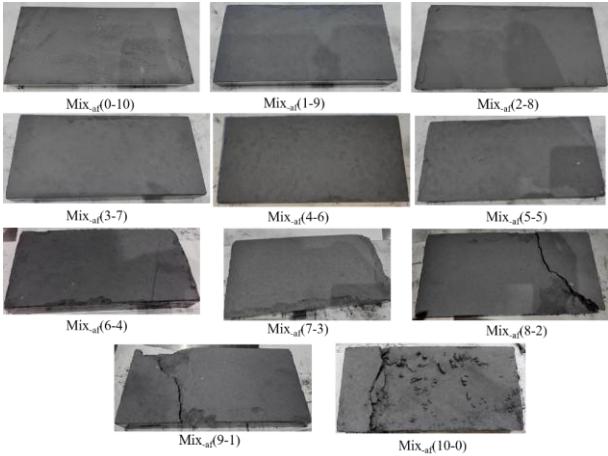


图 10 复压块体成型图

Fig.10 Shape of re-compaction blocks

对比发现，纯粉压实块体 ( $\text{Mix}_{\text{af}}(0-10)$ ) 成型最好，表面无明显裂缝，边缘无掉粉脱落现象；加入团粒后 ( $\text{Mix}_{\text{af}}(1-9)$ )，块体边缘出现少量脱粉现象，表面仍无法观察到明显裂缝和团粒轮廓，整体成型良好；当团粒含量处于 30%-50% 时，块体边缘脱落现象变严重，块体边角处发现少量裂缝，团粒轮廓变得更清晰；当团粒含量进一步增大到 60%-90%，块体表面出现贯穿裂缝，且裂缝越来越深，导致块体出现断裂现象，无法成型；纯团粒压实的块体 ( $\text{Mix}_{\text{af}}(10-0)$ ) 已无法成型。

## 2.3 压实均匀性

复压块体不同位置的有效膨润土干密度与目标干密度  $1.85 \text{ g/cm}^3$  的对比情况，如图 11。

可以看出，压实块体的有效膨润土干密度基本符合中间高，四周低的分布规律，且随团粒含量增大，该趋势变得更显著。换言之，当团粒含量过大，有可能出现复压块体密度分布显著不均现象。

Zhu 等<sup>[12]</sup>通过 200 T 四柱液压机配合 1/12 砌块模具，压制目标干密度  $1.8 \text{ g/cm}^3$  混合型缓冲砌块，经 CT 扫描实际干密度处于  $1.73 \sim 1.85 \text{ g/cm}^3$ 。本文当复压块体中团粒含量  $\leq 50\%$  时，实际干密度相对目标干密度  $1.85 \text{ g/cm}^3$  的平均偏差百分比处于  $1.0\% \sim 1.6\%$ ，最大偏差百分比处于  $3.0\% \sim 3.9\%$ 。本文复压块体均匀度偏差与张虎元等<sup>[12]</sup>结果相近。同时，谈云志等<sup>[17-18]</sup>研究发现，即使存在部分密度偏差，长期水化饱和后亦可实

现水化均匀；密度分布越均匀性，水化速率越快。

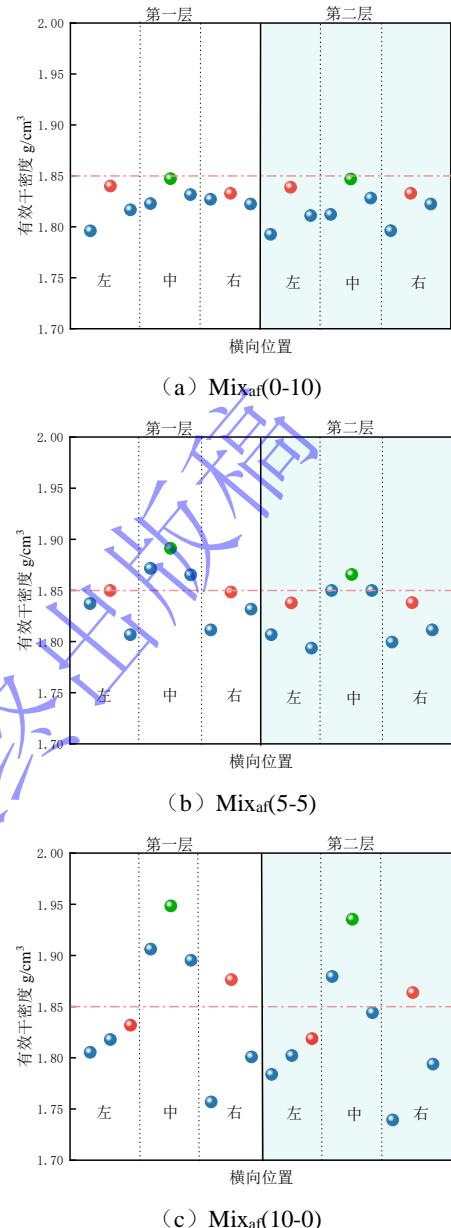


图 11 复压块体膨润土有效干密度

Fig. 11 Distribution of effective dry density of bentonite

## 3 讨论

由复压块体的压实应力与干密度的关系（图 6）可将团-粉粒混合物的压实过程分三阶段，如图 12。

(1) 团粒重排。初始状态，混合物中团粒和粉粒松散堆积，团粒间存在大量孔隙；随荷载增大，团粒相互移动或滚动靠拢，粒间的孔隙减小。该阶段以粒间孔隙挤压为主、团粒微破裂为辅。

(2) 团粒破碎。随压实应力增加，宏观的粒间孔隙消失，团粒与团粒硬挤压，导致压实应力随干密度呈现上凹型快速上升趋势（如图 6）。该阶段团粒破碎压密为主。

(3) 再次压密。随压实应力进一步增加, 干密度增大不明显。该阶段破碎的团粒和由粉粒压密的填充体, 被再次压实成协同体。

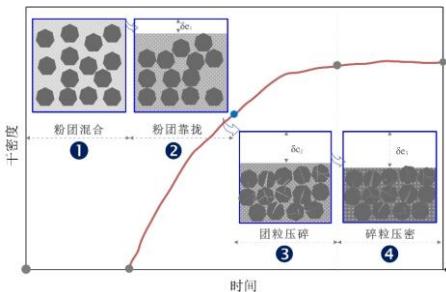


图 12 压实过程

Fig. 12 Compaction process

由图 9 复压块体的压实应力随团粒含量变化规律可知, 团粒与粉粒的相互作用对压实应力与团粒含量也有一定的影响。随团粒含量增多, 其占位效应增加, 更易压实。此外, 压实时团粒易于滚动堆积, 流动性增强, 用于克服团粒靠拢所需的压实力减少, 表现为整体压实应力减小。然而, 随混合物中团粒含量继续增多, 其填充效应减少; 团粒经历先被破碎填充孔隙, 再重新被压密的过程(如图 13), 导致整体压实应力增大。

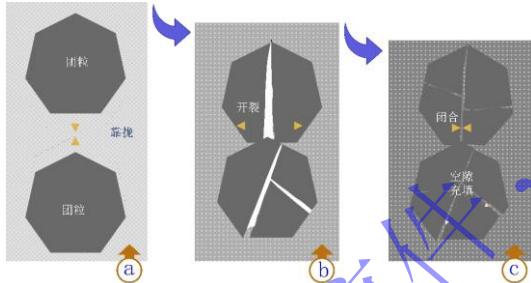


图 13 压实过程中团粒变化示意图

Fig. 13 Diagram of aggregate change during compaction

压实过程中, 位于模具周边的团-粉粒与模具内壁存在摩擦阻力, 团-粉粒移动受到壁面效应影响, 粒间孔隙无法被充分填充, 故干密度较低。另外, 复压块体整体尺寸相对较小, 压实后为  $240 \text{ mm} \times 115 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ; 而团粒的最大粒径  $10 \text{ mm}$ , 且团粒棱角较分明, 团(粉)粒流动性差, 压实时难以滚动调整均匀。随团粒含量增多并占主导地位, 混合物的填充效应减弱。复压块体四周, 特别是四个边角处, 由于填充不够, 欠压实而无法成型, 如图 10 中 Mix<sub>af</sub>(9-1) 和 Mix<sub>af</sub>(10-0)。

团粒含量为 0 和 10% 的复压块体 (Mix<sub>af</sub>(0-10) 与 Mix<sub>af</sub>(1-9)) 扫描电镜结果, 如图 14。

可以发现, 纯粉粒压实后, 在 8000 倍下块体中存在较大的孔隙, 即使在 20000 倍下块体中仍然存在少数的大孔隙; 而在团粒含量为 10% 时, 即使放

大 20000 倍, 在复压块体中只能观察到少数的小孔隙或微孔隙。这进一步证实了团粒含量 10% 的复压块体能有比纯粉粒压实块体更高的密实度。这也证明“两步压实法”可以减少复压块体中孔隙的大小, 提高复压块体的密实度。

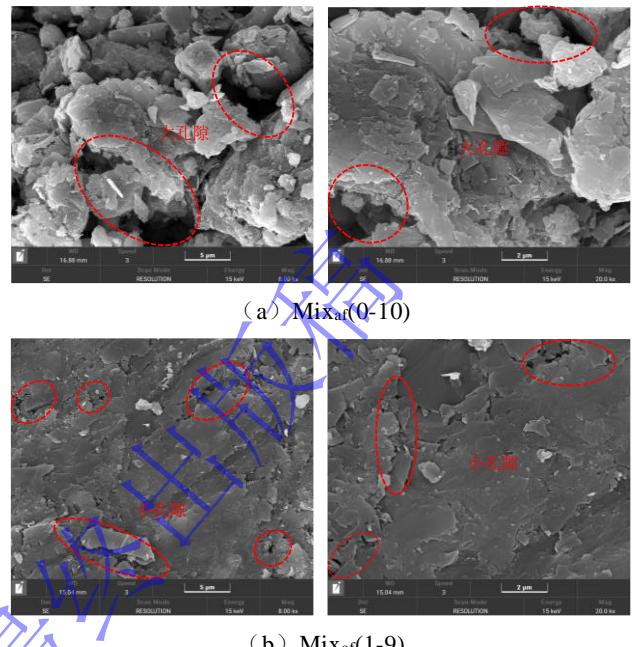


图 14 Mix<sub>af</sub>(0-10) 与 Mix<sub>af</sub>(1-9) 的 SEM 结果

Fig.14 SEM images of Mix<sub>af</sub>(0-10)and Mix<sub>af</sub>(1-9)

## 4 结论

(1) 压实应力相同时, 复压块体的干密度随团粒含量的增大呈现先增大后减小的趋势, 当团粒含量为 50% 时, 复压块体干密度均最大, 可提升块体密度超 4%。

(2) 当目标干密度相同时, 复压块体的压实应力随团粒含量的增大均呈现先减小后增大趋势。当目标干密度为  $1.60 \text{ g/cm}^3$  时, 团粒含量为 50% 时的压实应力相较于纯粉粒减少  $2.12 \text{ MPa}$ ; 而当目标干密度为  $1.93 \text{ g/cm}^3$  时, 压实应力减少  $4 \text{ MPa}$ 。“两步压实法”更适合于制备高密实度的大尺寸块体。

(3) 对“两步压实”块体, 当团粒含量在 30% 时, 复压块体能更好地发挥压实力效益、具备更优的成型能力和均匀性。建议球状石墨-膨润土复压块体的最优团粒含量为 30%。

(4) 团-粉粒混合物的压实过程分 3 阶段: ① 团粒重排; ② 团粒破碎; ③ 再次压密。

## 参考文献:

- [1] 曾召田, 林铭宇, 孙德安, 等. 高温条件下膨润土缓冲材料工程屏障性能热老化的时间效应及微观机理[J/OL]. 岩土

- 工程学报, 2024: 1-11. (ZENG Zhao-tian, LIN Ming-yu, SUN De-an, et al. Influence of thermal ageing time on barrier properties of bentonite as a buffer material at high temperature conditions and its micro-mechanism[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024: 1-11. (in Chinese))
- [2] 廖饶平, 陈永贵, 刘聪, 等. 高压实膨润土与孔隙溶液物理作用机制研究进展[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(12): 2465-2475. (LIAO Raoping, CHEN Yonggui, LIU Cong, et al. Advances in physical interaction mechanism between highly compacted bentonite and pore solution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(12): 2465-2475. (in Chinese))
- [3] 高晓晴, 郭全贵, 刘朗, 等. 高导热炭材料的研究进展 [J]. 功能材料, 2006, 37(2): 173-177. (GAO Xiao-qing, GUO Quan-gui, LIU Lang, et al. The study progress on carbon materials with high thermal conductivity [J] Journal of Functional Materials, 2006, 37(2): 173-177. (in Chinese))
- [4] 刘晓燕, 刘路路, 蔡国军, 等. 温度和盐/碱作用下膨润土-砂-石墨缓冲材料膨胀力性能演化[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(12): 2463-2471. (LIU Xiaoyan, LIU Lulu, CAI Guojun, et al. Evolution of swelling pressure properties of bentonite-sand-graphite buffer materials under action of temperature and salt/alkali[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(12): 2463-2471. (in Chinese))
- [5] Pacovský J., Svoboda J., Zapletal L. Saturation development in the bentonite barrier of the Mock-Up-CZ geotechnical experiment [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2007, 32(8-14): 767-779.
- [6] 谈云志, 彭帆, 钱芳红, 等. 石墨-膨润土缓冲材料的最优配置方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3387 - 3396. (TAN Yun-zhi, PENG Fan, QIAN Fang-hong, et al. Optimal mixed scheme of graphite-bentonite buffer material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3387 - 3396. (in Chinese))
- [7] 谈云志, 魏康旭, 祝雨, 等. 球状石墨-膨润土压实后的导热与防渗性能[J/OL]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44: 1-9. (TAN Yunzhi, WEI Kangxu, ZHU Yu, et al. Thermal conductivity and impermeability of spheroidal graphite-bentonite mixture after compaction[J/OL]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44: 1-9. (in Chinese))
- [8]. Peter Eriksson. System design of backfill: Basic engineering of buffer production system[R]. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB, 2014.
- [9] Torbjörn Sandén, Linus Andersson, Victor Jensen. System design of backfill: Full scale production test of backfill blocks[R]. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB, 2015.
- [10] Chris De Bock, Jean-Michel Bosgiraud, Hanspeter Weber et al. Achievements of the ESDRED project in Buffer Construction Technology[C], Proceeding of EURADWASTE 08 Conference, Luxembourg, 2008.
- [11] 张虎元, 赵秉正, 童艳梅. 混合型缓冲砌块导热性能及其均匀性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(S1): 1-9+18. (ZHANG Hu-yuan, ZHAO Bing-zheng, TONG Yan-mei. Thermal conductivity and uniformity of hybrid buffer blocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S1): 1-9+18. (in Chinese))
- [12] Zhu Jianghong, Wang Zhaoming, Zhang Huyuan, et al. Density spatial distribution and anisotropy of full-scale bentonite-sand blocks[J]. Construction and Building Materials, 2024, 438: 137230.
- [13] 刘月妙, 蔡美峰, 王驹, 等. 高放废物地质处置库预选缓冲材料压缩性能研究[J]. 铀矿地质, 2007, 23(2): 91-95. (LIU Yue-miao, CAI Mei-feng, WANG Ju, et al. Compressibility of buffer material for HLW disposal in China[J]. Uranium Geology, 2007, 23(2): 91-95. (in Chinese))
- [14] 曹胜飞, 刘月妙, 谢敬礼, 等. 米级尺度缓冲材料砌块的制备方法研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2411-2419. (Cao Shengfei, Liu Yuemiao, Xie Jingli, et al. Manufacturing method for meter-scale buffer material blocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11): 2411-2419. (in Chinese))
- [15] 王学文. 高放废物缓冲砌块压实性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. (Wang Xuewen. Research on compacting properties of bentonite buffer block for HLW disposal[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese))
- [16] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准 GB/T50123-2019[S].北京:中国计划出版社, 2019. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method GB/T 50123-2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [17] Tan YZ, Hu SX, Li H, et al. Effect of technological voids on hydro-mechanical behavior of compacted bentonite[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(17): 517.
- [18] Hu SX, Tan YZ, Sun DA, et al. Investigation on the packing and hydration homogeneity of bentonite pellet mixtures[J]. Annals of Nuclear Energy, 2025, 215: 111239.