

放矿条件下塌陷区内尾砂穿流特性

任凤玉, 刘洋, 何荣兴, 张晶  
(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

**摘 要:** 针对尾矿堆存和塌陷区占用土地资源的问题,研究尾砂干排至活动地表塌陷区的可行性. 设计了放矿条件下尾砂穿流特性实验,以矿岩散体高度和尾砂高度作为影响因素,采用高速摄影技术,实现尾砂移动过程的可视化. 实验结果表明:松动体高度小于尾砂和矿岩散体的交界面时,尾砂不能到达放矿口;松动体高度高于交界面时,尾砂受到放矿扰动的影响且与尾砂接触的岩石发生松散,随即颗粒大量到达放矿口,对井下回采造成影响. 随着尾砂高度的不断增加,尾砂在初始阶段渗入量增大,但松动体高度小于尾砂和矿岩散体的交界面时,尾矿未能到达放矿口,因此持续向塌陷区内干排尾砂对矿石的贫化影响较小.

**关 键 词:** 放矿;塌陷区;干排尾砂;穿流特性;高速摄像

**中图分类号:** TD 853      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)06-0858-06

Flow-Through Features of Tailings in Subsidence Area Under Ore Drawing Conditions

REN Feng-yu, LIU Yang, HE Rong-xing, ZHANG Jing  
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Yang, E-mail: liuyang1510448@163.com)

**Abstract:** The feasibility of dry filling of tailings in the subsidence mine area was studied to overcome those problems caused by stockpiling and land occupation of tailings. The experiment of flow-through features of tailings under mining influence was designed, and the height of overburden rock and tailings was set as influencing factors. The visualization of tailings' moving process was realized by high-speed camera. The results showed that the tailings cannot reach the drawing holes when the height of the loosening zone is lower than that of the interface between the tailing and the granular media. When the height of the loosening zone is higher than that of the interface, the tailing and the connected rock are loosened by ore drawing, so that the tailing can reach the drawing holes thus affecting mining activities. With the increase of the tailings height, the initial inflow volume of tailings increases, however, it cannot reach the drawing holes if the height of the loosening zone is lower than that of the interface. Therefore, the influence of the dry filling on the stripping ratio of the ore is little.

**Key words:** ore drawing; subsidence area; dry filling of tailing; flow-through features; high-speed camera

随着我国矿产资源开发力度的增加,尾砂排放量也极具增加. 目前大部分尾矿都存放在地表尾矿库中,利用率仅为 8.3% 左右. 尾矿库堆存不仅造成严重的资源浪费,也会对环境造成直接污染. 同时,尾矿库也是一个重大的安全隐患,尾矿库溃坝等重大事故时有发生<sup>[1-2]</sup>. 尾矿干式堆存是近年来发展起来的一种新型尾矿处置方法,具有基建投资少、维护简单及综合成本低等优点,已在美国格林克里克地区的矿山、加拿大的 Ekai Diamond 矿及 Kidd Creek 矿、坦桑尼亚的 Bulyanhulu 矿、俄罗斯的 Kubaka 矿、印度的 Hindustan 矿及中国的寿王坟铜矿、归来庄金矿及

金岭铁矿等矿山中应用<sup>[3-6]</sup>. 但由于脱水处理后的尾砂黏度过小或没有黏度, 导致干排区域和地点有着严格的限制, 多选择在峡谷、低洼平地及已废弃的塌陷区等区域内堆存. 但对于尾砂干排在活动地表塌陷区内的研究较少, 尤其是井下开采对尾砂穿流特性的影响研究.

随着我国经济的快速发展, 对矿产资源的需求量也在不断提高, 带来的岩移和地表变形问题日趋严重. 地表塌陷将会严重威胁矿山开采及工作人员的生命财产安全, 同时也占用了大量土地资源<sup>[7-8]</sup>. 如果将尾砂干排至塌陷区内, 并能够避免尾砂干排对井下回采的影响, 不仅可以处理塌陷区造成土地浪费问题, 也可以避免尾矿处理造成的资源浪费.

本文以本溪大北山铁矿干排尾砂为研究对象, 设计了放矿条件下尾砂穿流特性实验, 以矿岩散体的高度和干排尾砂的高度为主要影响因素, 借助高速摄像机实现尾砂移动可视化, 研究尾砂的移动规律, 为类似矿山尾砂干排塌陷区提供借鉴.

## 1 实验模型及材料

尾砂是本溪大北山铁矿的干排尾砂( 粒径如表 1 所示). 矿岩散体选用白云岩散体. 实验采用立体模型架, 为了便于观察实验动态, 模型前面为有机玻璃; 为了保证设备强度, 其余三面为钢板. 实验几何相似常数取  $a = 100$ , 设备模型尺寸为  $120\text{ cm} \times 80\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  (高  $\times$  长  $\times$  宽), 在模型背部最下部布置了 6 个放矿口, 放矿口尺寸为  $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$  (长  $\times$  宽); 为了便于装填矿石, 模型背部是由 12 块可拆卸的钢板组成的. 本组实验采用高速摄像机对放矿过程进行拍摄, 高速摄像机采用德国 Allied Vision 公司的 GC2450C, 它在分辨率为  $2\,448 \times 2\,050$  的情况下可以达到每秒 15 帧, 并且随着分辨率的下降, 还可以进一步提升拍摄帧率, 并配有高品质的 Sony ICX625 CCD 传感器, 可以获取高品质、高灵敏度、低噪声的图像. 采用加拿大 Norpit 公司的 StreamPix 软件对拍摄画面进行调控, 在实验完成后使用 Insight 4G 软件对拍摄图片进行分析, 即可得到尾砂的移动轨迹, 实现了尾砂移动过程的可视化, 并配有三脚架用来调节摄像范围和角度<sup>[9-10]</sup>, 如图 1 所示.

表 1 尾砂粒径组成  
Table 1 Particle size of the tailings

粒径/mm	>0. 20	0. 20 ~0. 12	0. 12 ~0. 06	0. 06 ~0. 012	<0. 012
比率/%	12. 57	14. 03	20. 61	38. 76	14. 03

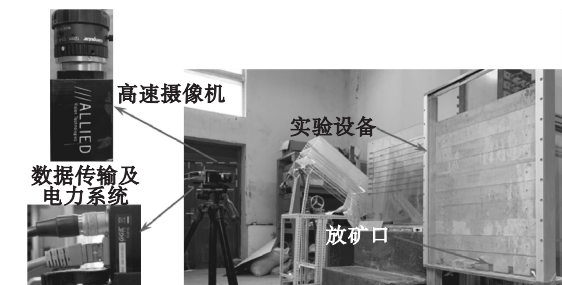


图 1 实验模型示意图

Fig. 1 The diagram of experimental facility

选取 4 种矿岩散体高度 (36. 9, 49. 2, 61. 5, 73. 8 cm), 4 种回尾砂高度 (10, 20, 30, 40 cm) 共 7 次实验. 松动体高度与放出体高度的关系式<sup>[11]</sup>:

$$H_s = 2.46h. \tag{1}$$

式中:  $H_s$  是松动体的高度, m;  $h$  是放出体的高度, m.

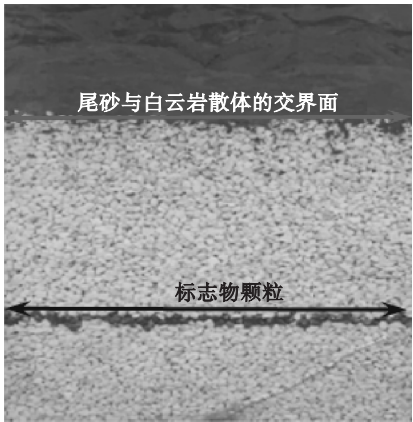


图 2 实验装填图

Fig. 2 The filling scheme of the experiment

## 2 实验过程及结果分析

### 2.1 实验方案设计

本次实验是研究放矿条件下尾砂颗粒的穿流特性, 主要研究矿岩散体高度和尾砂层厚度对尾砂到达放矿口时间的影响. 同时, 为了进一步研究松动体和尾砂到达放矿口时间的关系, 在矿岩散体中放置了一层红色标志物颗粒( 如图 2 所示).

分别在矿岩散体高度为 15,20,25 及 30 cm 处放置一层红色标志物颗粒. 根据式(1)可知,当标志物颗粒到达放矿口时,松动体的垂直高度刚好到达尾砂和白云岩散体的交界面,即可以观察松动体对尾砂流动特性的影响情况. 具体实验方案见表 2. 实验过程中采用 6 个放矿口均匀放矿,每次放矿量为 200 g.

表 2 实验设计表  
Table 2 Experimental schemes

方案	矿岩散体高度/cm	尾砂高度/cm	标志物放置位置高度/cm
方案一	36.9	20	30
方案二	61.5	20	25
方案三	73.8	20	15
方案四	49.2	20	20
方案五	49.2	10	20
方案六	49.2	30	20
方案七	49.2	40	20

2.2 实验结果分析

将高速摄像机拍摄的图片导入 Insight 4G 软件中进行分析,得出各方案每个阶段中尾砂和白

云岩的移动速度云图如图 3~图 9 所示.

对于采动地表塌陷区内干排尾砂,研究单个尾砂颗粒运动规律无意义,只有研究大面积的尾砂移动规律才有工程意义,因此仅对大面积的尾砂移动进行研究. 将软件分析的速度云图与实验过程中拍摄的图片相对比,得出速度云图中出现的正向快速运动区域和反向快速运动区域均为尾砂占据的区域. 根据方案一~方案四的云图得出,尾砂放置在白云岩散体表面时,受到重力作用,尾砂颗粒会通过白云岩散体之间的孔隙向下穿流,直至孔隙被填满,但尾砂穿流量较小. 由于松动体的垂直高度低于尾砂与白云岩的交界面,因此与尾砂层接触的白云岩散体并未发生松散,呈现出水平下降. 当标志颗粒达到放矿口时,可以看出尾砂层发生大面积快速移动,在白云岩散体层中出现的反向快速运动区域和正向快速运动区域明显增多,尾砂随即大量穿流到达放矿口. 即当松动体的垂直高度到达尾砂和白云岩散体交界面时,尾砂受到放矿扰动的影响且与尾砂接触的岩石发生松散,白云岩散体中的孔隙增多,为尾砂移动提供空间. 放矿过程中,颗粒的移动速度与颗粒的粒径

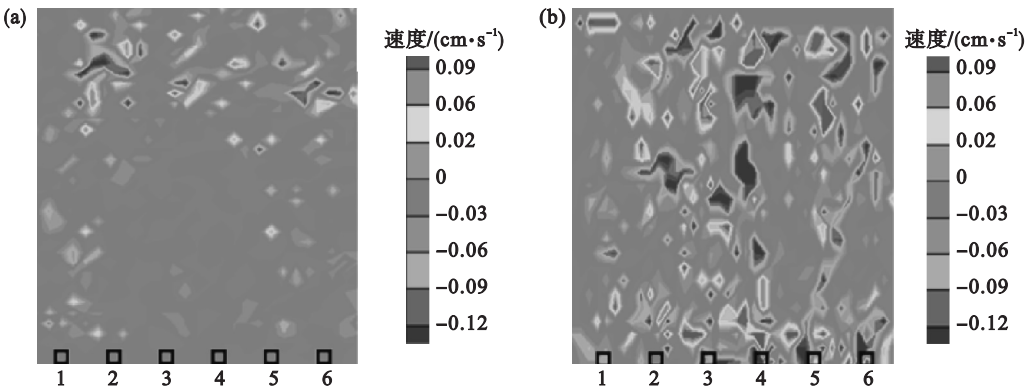


图 3 方案一速度云图  
Fig.3 The velocity image of scheme 1

(a)—标志颗粒首次到达放矿口时; (b)—尾砂大量到达放矿口时.

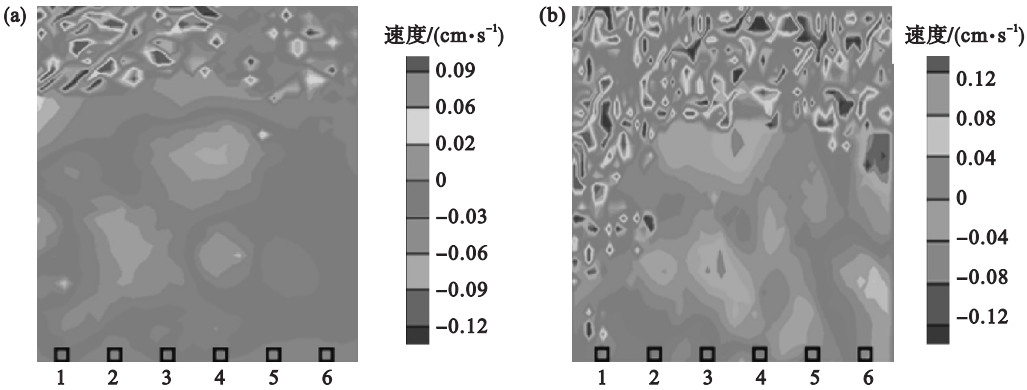


图 4 方案二速度云图  
Fig.4 The velocity image of scheme 2

(a)—标志颗粒首次到达放矿口时; (b)—尾砂大量到达放矿口时.

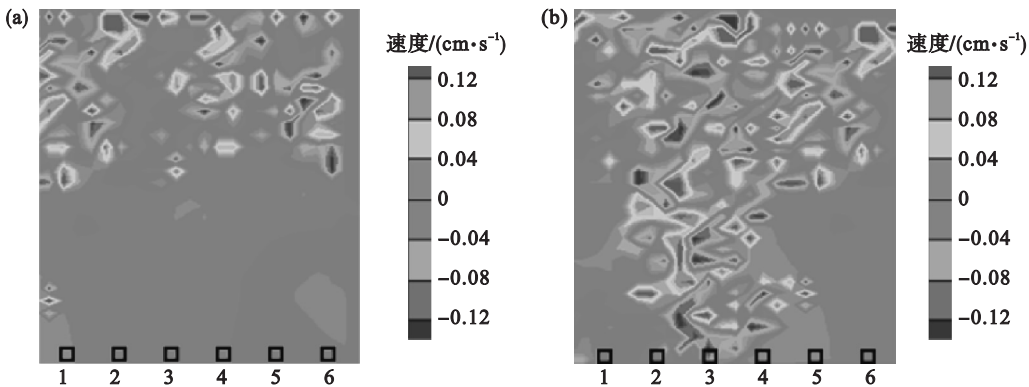


图 5 方案三速度云图  
Fig.5 The velocity image of scheme 3

(a)—标志颗粒首次到达放矿口时；(b)—尾砂大量到达放矿口时。

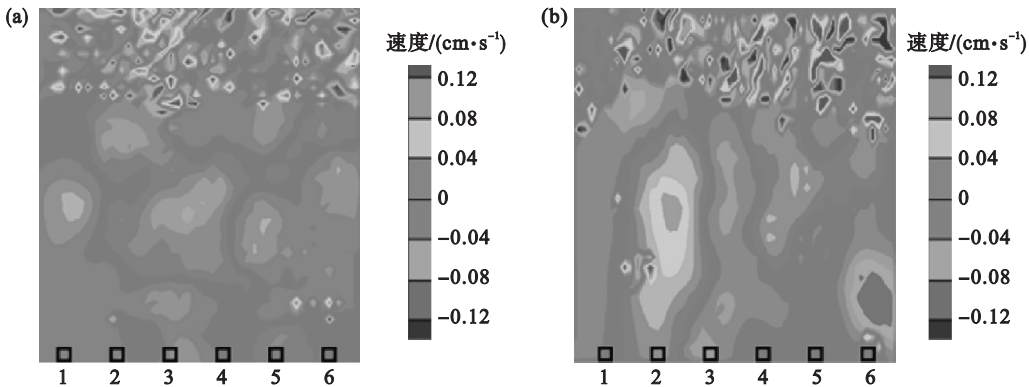


图 6 方案四速度云图  
Fig.6 The velocity image of scheme 4

(a)—标志颗粒首次到达放矿口时；(b)—尾砂大量到达放矿口时。

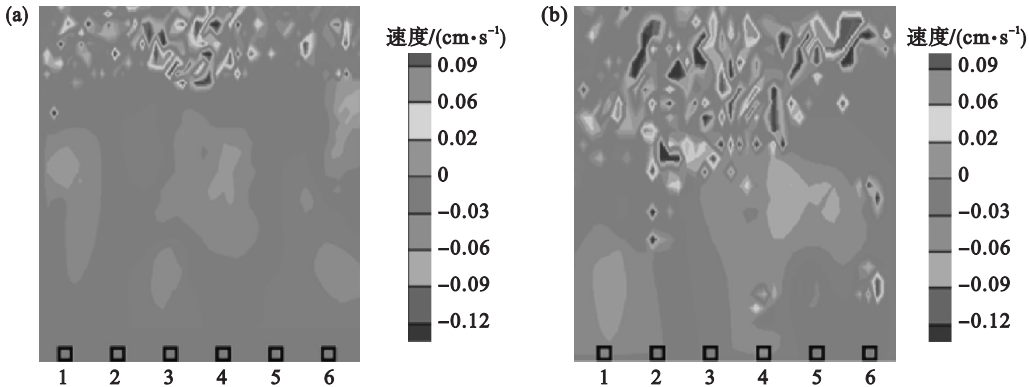


图 7 方案五速度云图  
Fig.7 The velocity image of scheme 5

(a)—标志颗粒首次到达放矿口时；(b)—尾砂大量到达放矿口时。

成反比,因此白云岩散体的移动速度远小于尾砂颗粒的移动速度.随着下部放矿的进行,导致尾砂颗粒先于散体到达放矿口.最终,放出的散体上面裹着一层尾砂,造成矿石贫化也增加选矿费用.因此,得出松动体的高度对尾砂到达放矿口的时间起着显著作用,尾矿颗粒和矿岩散体的接触面高于放矿产生的松动体高度就可以避免尾砂大量到达出矿口.

通过方案四~方案七的实验结果得出,由于尾砂层厚度的增加,导致尾砂颗粒放置在白云岩散体上时,尾砂穿流到白云岩散体中的数量明显增多.前几次放矿过程中,松动体未到达尾砂与白云岩散体的交界面,因此,与尾砂层接触的白云岩散体并未发生松散.尾砂会沿着白云岩散体中原有的孔隙移动,由于尾砂上部压力的增加,穿流量随着尾砂层厚度的增加而增加,但放矿口未见尾



砂颗粒. 标志物颗粒被放出后,与尾砂接触的岩石发生松散,白云岩散体中的孔隙增多,尾砂颗粒沿

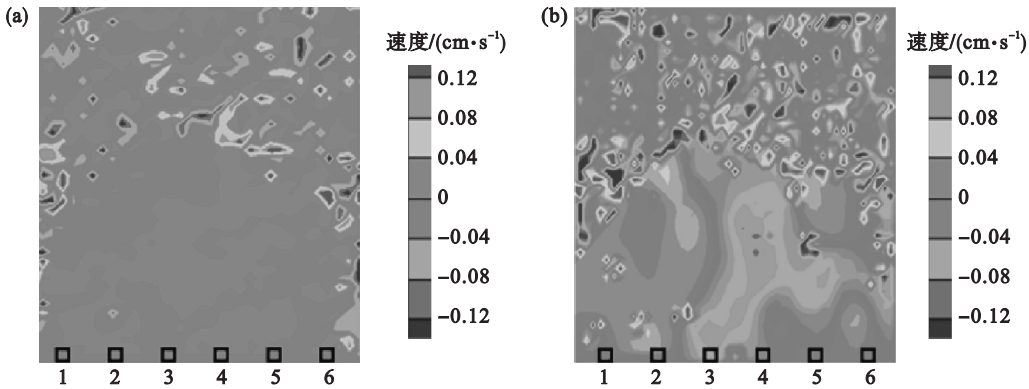


图 8 方案六速度云图  
Fig.8 The velocity image of scheme 6

(a)—标志颗粒首次到达放矿口时; (b)—尾砂大量到达放矿口时.

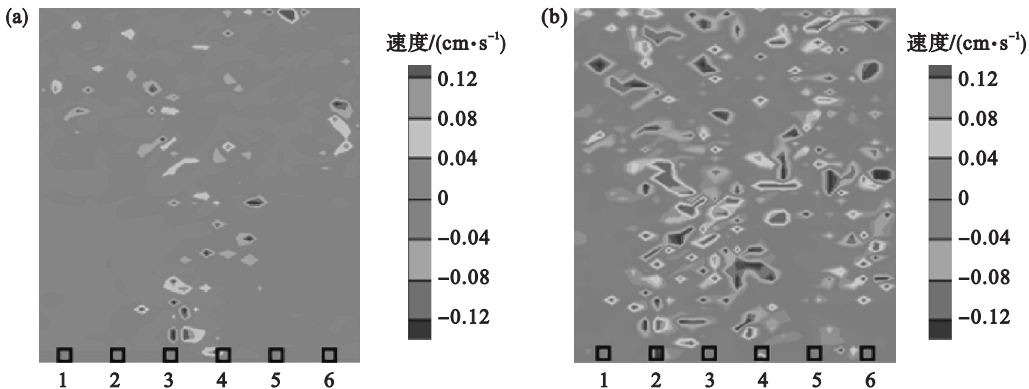


图 9 方案七速度云图  
Fig.9 The velocity image of scheme 7

(a)—标志颗粒首次到达放矿口时; (b)—尾砂大量到达放矿口时.

着白云岩孔隙移动,尾砂颗粒将很快到达放矿口,且尾砂的放出量不断增加. 因此,尾砂层的厚度对于尾砂大量到达放矿口时间的影响不显著. 只要尾砂和矿岩散体的交界面始终在松动体范围之上,向塌陷区内持续干排尾砂不会导致尾砂大量到达放矿口.

通过上述实验分析得出,矿岩散体高度对尾砂到达放矿口的时间影响较大,只要保持矿岩散体高度始终大于松动体高度就可以减缓对井下开采的影响.

3 结 论

- 1) 提出放矿条件下尾砂穿流特性实验,采用高速摄影技术,可视化研究放矿条件下活动塌陷区内干排尾砂穿流特性,为类似矿山尾砂干排塌陷区提供借鉴.
- 2) 通过不同矿岩散体高度的尾砂穿流特性实验得出,当松散体的高度小于尾砂和矿岩散体

的交界面时,尾砂不能到达放矿口;当松散体的高度高于交界面时,尾砂颗粒先于散体到达放矿口,造成了矿石贫化也增加了选矿费用.

- 3) 通过不同尾砂高度的尾砂穿流特性实验得出,尾砂层的厚度对于尾砂到达放矿口的时间影响较小. 因此,保证尾砂和矿岩散体的交界面始终在松动体范围之上,向活动地表塌陷区内持续干排尾砂对矿石贫化的影响较小.

参考文献:

[ 1 ] Peng K,Li X B,Wan C C,et al. Safe mining technology of undersea metal mine [ J ]. *Transactions of the Nonferrous Metals Society of China*,2012,22( 3 ):740 – 746.

[ 2 ] Correa J A,Castilla J C,Ramírez R,et al. Copper, copper mine tailings and their effect on marine algae in Northern Chile[ J ]. *Journal of Applied Phycology*,1999,11( 1 ):57 – 67.

[ 3 ] Mu G Q,Wang J F,Lv S R. Experimental analyze of blasting effects on dry-beach in abandoned tailings dam[ J ]. *Applied Mechanics and Materials*,2014,501:193 – 199.

(下转第 887 页)