



非胶结充填采场压风强化脱水 实验与数值模拟

程海勇, 吴爱祥, 周升平, 王贻明

(北京科技大学 土木与资源工程学院 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 全尾砂非胶结充填是矿山经济高效的充填方式, 如何实现采场快速有效地脱水是非胶结充填中最难解决的问题。研究压风强化脱水机理, 根据相似原理建立采场压风强化脱水实验模型。通过实验探索压风强化脱水工艺参数, 并得出压风强化脱水管参数, 为矿山全尾砂非胶结充填压风强化脱水工艺提供理论指导。利用流体力学数值模拟软件 FLUENT 建立压风强化脱水数值分析模型, 通过压风强化脱水数值模拟分析, 揭示全尾砂非胶结充填压风强化脱水过程中气、水运移规律及强化脱水效果的影响因素, 进一步验证全尾砂非胶结充填压风强化脱水的可行性。

关键词: 非胶结充填; 脱水; 压风; 全尾砂; 数值模拟

文章编号: 1004-0609(2017)-04-0811-07

中图分类号: TD853

文献标志码: A

非胶结充填采矿技术能够有效解决采场空区处理问题, 同时解决了地表固废排放, 具有广泛的应用前景。但在非胶结充填时, 采场大量水分往往不能及时排出。若不能使水从料浆中迅速分离脱出, 一方面, 采场内的大量积水会对密闭墙和空区周围的岩体产生较大的静水压力, 可能会压垮密闭挡墙和使充填料从空区周围岩体裂隙中喷出, 造成跑浆事故; 另一方面, 为避免密闭墙受到过大的静水压力, 需要实行间隔充填, 从而降低了充填能力^[1-5]。

如何解决采场快速脱水问题, 缩短采场的充填周期已成为了非胶结充填系统高效稳定运行的头等重要问题。19 世纪中期, 法国水力学家 DARCY 通过渗透实验发现, 水在岩土孔隙中的渗流速度与水力坡度成正比^[6]。基于达西定律, 充填集料中的渗流脱水研究都是以此为基础的。气体在充填集料中运动时, 需要考虑气体的压缩性, 科林斯^[7]给出了考虑气体压缩性的达西定律, 杨代泉等^[8]通过实验验证了非饱和土中水、气运动遵循达西定律的可靠性。因此, 在充填集料压风强化脱水过程中, 气在充填集料的孔道中运动仍多以达西定律来描述^[9]。韦华南^[10]通过数值模拟建立了负压强制脱水模型, 并揭示了渗流速度与负压参数之间的关系。本文作者从压风强化脱水思路出发,

通过风能提高孔隙间的渗透作用, 打通渗流通道, 提高脱水能力。

1 压风强化脱水机理

压风强化脱水技术思路是在渗流理论基础^[11], 通过强化充填料体内的渗流作用来实现自由水的排出。将风压等效为水头, 设定压风强化脱水的风压 p 为常数, 孔隙水受到的合力可表示:

$$\Delta F = p\pi r^2 - (\gamma_w h\pi r^2 + 2\pi rT \cos \alpha) \quad (1)$$

式中: T 为表面张力, kN/m; α 为孔隙通道管壁与表面张力夹角; r 为孔隙通道半径, m; h 为气水界面以上的水头高度, m; p 为给定压力, kPa; γ_w 为水的重度, kN/m³。

将合力 ΔF 等效为水头差, 可得水头差 ΔH , 即有

$$\Delta H \gamma_w \pi r^2 = p\pi r^2 - (\gamma_w h\pi r^2 + 2\pi rT \cos \alpha) \quad (2)$$

将水头差 ΔH 代入达西公式, 经变换可得

$$v = k \left[\left(\frac{p}{\gamma_w} - \frac{2T \cos \alpha}{r\gamma_w} \right) \frac{1}{h} - 1 \right] \quad (3)$$

由式(3)可知,在压风强化脱水中,压风强化脱水速度与气压力成正比,也与尾砂颗粒间的孔隙通道半径成正比,但与水头 h 成反比,且随着水的脱出,当水头减小到一定程度时,脱水速度逐步增大直至发生气窜。所谓气窜是指充填集料中压风的气体与大气连通的瞬间现象。因此,对充填体压风强化脱水时,当整个充填体发生气窜时,应停止压风,此时的脱水速度也达到最大。

2 实验

2.1 风压分析

压风强化脱水速度等于零时对应的风压 p_c 定义为临界风压,由式(3)可得

$$p_c = \gamma_w h + \frac{2T \cos \alpha}{r} \quad (4)$$

根据文献[12]对散体颗粒表面张力与温度关系的研究,推出颗粒表面张力随温度变化曲线,如图1所示。

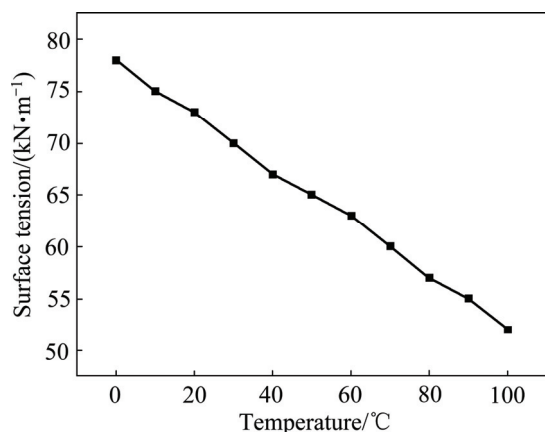


图1 尾砂颗粒温度与表面张力关系曲线

Fig. 1 Relationship between temperature and surface tension of tailing particle

在常温条件下,即 20 °C 左右时,假设充填体初始水头 h_0 达到 1 m 时,根据式(4),在压风气流强化充填集料尾砂颗粒中自由水脱出时,尾砂颗粒间孔隙半径与压风临界风压之间的关系如表 1 所示。尾砂颗粒孔径在 10 μm 左右,对应的临界风压力为 42 kPa,除去 1 m 初始水头水压 10 kPa,同时考虑风压系数,实验确定的风压为 38 kPa。

表1 风压与孔隙半径对应值

Table 1 Corresponding value between wind pressure and pore radius

$r/\mu\text{m}$	p_c/kPa	$r/\mu\text{m}$	p_c/kPa
0.0005	296027	0.5	323
0.001	148027	1	175
0.005	29627	5	57
0.01	14827	10	42
0.05	2987	50	30
0.1	1507	100	29

2.2 模型制作及实验方案

实验模型采用相似原理模拟空场采矿法采场结构。模型尺寸为 50 cm×20 cm×70 cm,底部布置为堑沟形式,上盘堑沟倾角为 60°,下盘堑沟倾角为 25°,模型中堑沟尺寸为 4 cm×4 cm,如图 2(a)所示。模型中布置有出矿巷道,同时作为压风强化脱水孔和溢流孔。PVC 管和钢丝管的管径为 2.5 cm,滤水孔孔径为 3 mm。试验中采用 0.15 mm 的纱布作为滤水材料来包裹脱水管,为了防止充填料浆渗漏堵住滤水管,影响试验结果,用纱布包裹两层后,再用皮筋包扎。

实验用充填料浆质量浓度为 70%。试验方案中,脱水材料选用两种,PVC 管和钢丝管,如图 2(b)和(c)所示;滤水孔排距布置 3 种水平,脱水管包裹的滤水材料纱布选用两种目数的纱布。其中脱水管布置的位置分别为出矿进路巷道和凿岩巷道。每组试验都是从充填集料充填完毕后,先在自然渗流条件下进行脱水,期间记录每个脱水管中脱水量,并观察充填体液面变化情况,当充填体进入稳定渗流脱水阶段后开始采取压风强化脱水方法进行脱水。

2.3 结果分析

2.3.1 脱水方式及效果分析

实验发现,当非胶结充填体自然渗流脱水到一定程度时,脱水速度几乎接近于零,此时要实行压风强化脱水时,需令式(3)大于 0,此时会加大脱水速度,压风强化脱水随即发生,此时:

$$r > \frac{2T \cos \alpha}{P - \gamma_w h} \quad (5)$$

由式(5)可知,当充填体中风压和压风位置固定时,由于充填体尾砂颗粒间的孔隙通道大小不一,压风强化脱水作用加大了尾砂颗粒间的孔隙通道,使集料中的自由水能顺利流通。由式(5)可知,充填集料尾砂颗粒孔隙通道半径越大,脱水速度也越大。因此,

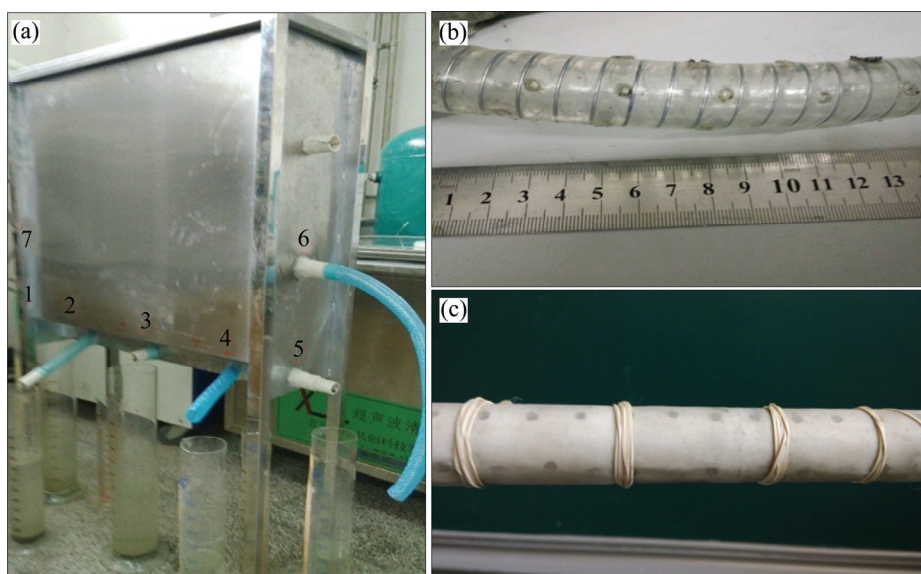


图 2 实验模型及脱水装置

Fig. 2 Experimental model and dehydration tube: (a) Model; (b) Steel tube; (c) PVC tube

在全尾砂非胶结充填体中相对较大颗粒孔隙通道内产生优先流现象。风压越大, 影响的孔径范围越大, 充填体中自由水孔隙通道也越大, 同时, 气窜现象也表现的更为明显。

压风强化脱水实验中脱水量和充填体液面高度随时间的变化关系如图 3 所示。由图 3 可以看出, 脱水过程可分为 3 个阶段, 阶段 I 是自然脱水阶段, 阶段 II 是自然脱水稳定阶段, 阶段 III 是压风强化脱水阶段。自然脱水初始阶段(阶段 I)充填体脱水速率均衡, 然后逐渐趋于稳定进入阶段 II, 此阶段脱水速率趋于零, 充填液面呈现自然渗流脱水试验中的稳定假象状态。此时的充填体处于不稳定固化状态, 同时大量水分仍

未脱出。在压风强化脱水条件下(阶段 III), 充填体能够实现快速有效地脱水, 其脱水速率超越了阶段 I 时的脱水速率。

实验发现, 若采用持续压风强化脱水会导致充填体处于严重扰动状态, 很难实现有效脱水和沉降固化。若采取间断式压风强化脱水方式可实现充填体的有效脱水, 使充填体液面高度下降至最低点, 最终趋于稳定值。脱水 9000 min 后, 充填体表面已实现良好固化, 无法进一步脱水沉降, 充填体不再发生液化现象。

2.3.2 脱水管布置分析

根据不同脱水管的脱水量与脱水时间关系可看出自然脱水阶段能维持 2.5 h 左右, 随后充填体进入自然渗流脱水稳定阶段。经过 12 h 采取压风强化脱水措施, 即压风 0.5 h 后停止压风, 记录压风强化脱水后 12 h 内的充填体自然渗流脱水量, 结果如图 4 所示。

通过脱水管优化筛分压风强化脱水试验可得出各类脱水管的脱水速度, 由表 2 可知, PVC 管的脱水效果明显优于钢丝管, 而且受敷设位置影响较小。同一脱水位置 PVC 管脱水速度比钢丝管的脱水速度提高高达 62%~82%。研究分析, PVC 管脱水效果优于钢丝管的与脱水管的弯曲有关, PVC 管是竖直的脱水管, 钢丝管具有一定弯曲度。在脱水过程中, 尾砂颗粒能均衡分布于 PVC 管壁周围, 孔隙水能沿管壁滤水孔排出; 而对钢丝脱水管而言, 充填集料中的尾砂颗粒容易聚集于钢丝管弯曲段的滤水孔处, 引起弯曲段的应力集中, 压风强化脱水措施在钢丝管弯曲段作用困难, 导致充填料浆脱水速度下降, 影响脱水管的脱水效果。因此, 在矿山采空区全尾砂非胶结充填过程中, 为了

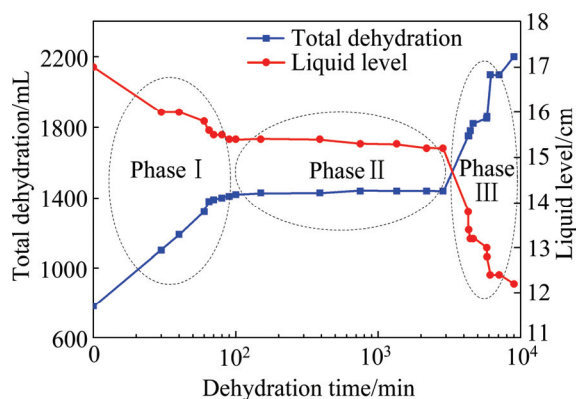


图 3 压风强化脱水实验中脱水量和液面高度随时间的变化曲线

Fig. 3 Changing curve of dehydration water and liquid level with time for experiment of reinforcement dehydration by pressing wind

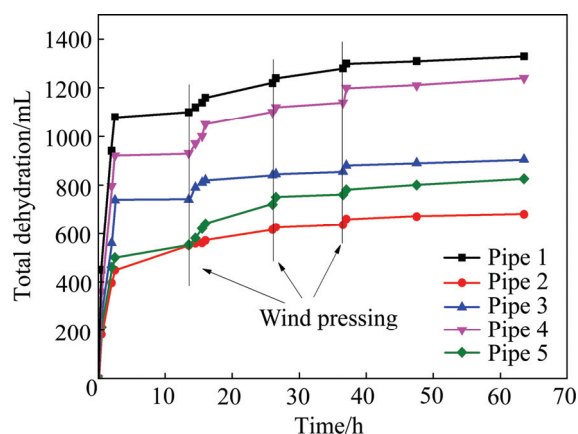


图4 不同脱水管及脱水位置的脱水效果

Fig. 4 Dehydration effect of different dewatering pipes and location

表2 不同脱水管的脱水速度

Table 2 Dehydration rates of different dewatering tubes

Dehydration pipe No.	Pipe type	Dehydration rate/($\text{mL} \cdot \text{h}^{-1}$)
1	PVC	21.0
2	Steel wire	10.7
3	PVC	14.3
4	PVC	19.5
5	Steel wire	13.0

保证充填脱水效果,建议矿山不要采用弯曲的脱水管,应优先采取竖直的脱水管。

3 数值模拟

全尾砂非胶结充填压风强化脱水涉及多相流体流动力学,计算模型复杂,无法直接观察流体的运动情

况。拟通过数值模拟技术分析非胶结充填体在压风强化脱水过程中水流速度特征及压力变化特征^[13-15],揭示全尾砂非胶结充填压风强化脱水规律。

3.1 数值模型的建立

数值模型采用 FLUENT 中的 SolidWorks 进行建模,模型的网格划分则采取处理软件 ICEM 完成。网格类型采用混合网格划分技术,几何形状规则区域采用六面体型结构化网格,不规则区域采用四面体型非结构化网格,保证模拟的精确性和稳定性^[16-17]。几何模型如图 5(a)所示,共生成 121 万个网格,计算域的网格划分如图 5(b)所示。

3.2 流场压力特征分析

模拟研究发现,由于风流沿着脱水管方向有沿程阻力损失,风流速度呈递减趋势。由迹线图可知,当风压过小时,风流对难以进入充填体中,无法起到压风强化脱水的作用,此时的风流迹线只是局部地充满充填模型中;当风压大于临界压力(1032 kPa)时,风流可以影响到整个充填料浆空间,风流迹线布满充填模型,如图 6 所示。此时充填体内的风流打乱了自然渗流状态下自由水的分布形态,形成气流的孔隙通道,使自由水便宜排出,最终达到整个采场脱水的目的。

3.3 流场速度特征分析

当非胶结充填体在自然渗流状态下时,起始阶段脱水速度较快。脱水速度最大处集中在脱水管附近,越远离脱水管处的自然渗流脱水速度越小,最后趋近于 0,如图 7(a)所示。可以看出,在自然脱水条件下,脱水管的有效脱水面积较窄,不能发挥大面积采场的脱水作用。

图 7(b)所示为压风强化脱水时的水流速度分布图。由图 7(b)看出,采用压风强化脱水时,整个采场脱水效果均较为明显。充填体进入压风强化脱水阶段后,脱水管附近的脱水速度随之增大,随着时间推移,

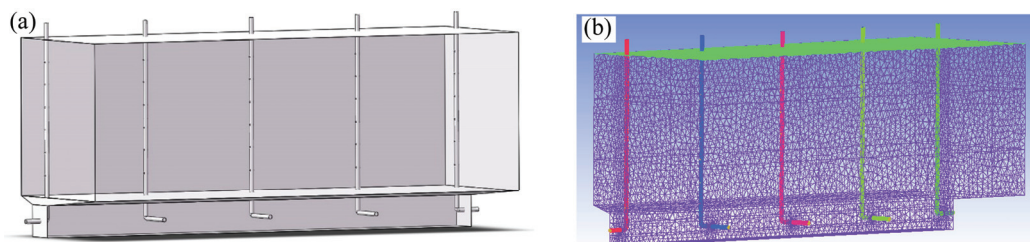


图5 几何模型及网格划分

Fig. 5 Geometry model and meshing: (a) Geometry model; (b) Mesh generation

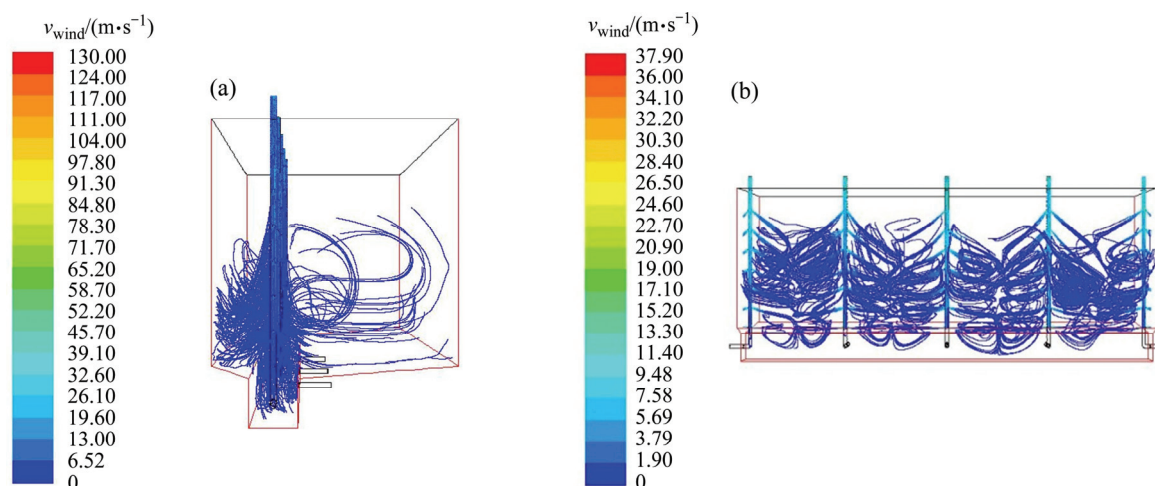


图 6 非胶结充填料浆中风流迹线图(风压 $p=1032$ kPa)

Fig. 6 Fluid trace of wind flow in non-cemented backfilling (wind pressure $p=1032$ kPa): (a) Longitudinal section; (b) Cross section

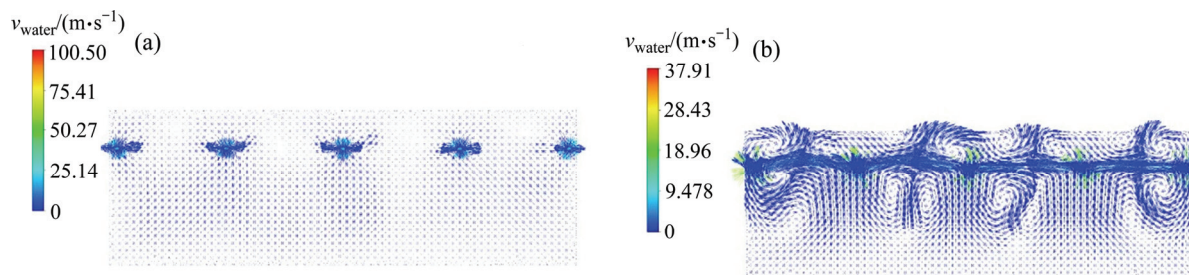


图 7 非胶结充填料浆中水流速度分布图

Fig. 7 Velocity distribution of water flow in non-cemented backfilling: (a) Natural dehydration; (b) Reinforcement dehydration

逐步影响到远离脱水管处的充填体, 加大了整个充填体的脱水速度。当充填体的脱水速度达到稳定值时, 脱水管周围形成大量的脱水通道, 使充填体中水流方向趋向于脱水管处, 脱水量也随之增加。根据模拟结果, 压风强化平均脱水速度较自然渗流平均脱水速度提高 55%~68%, 具有优良的脱水效果, 能有效达到采场快速脱水的目的。

4 结论

1) 针对全尾砂非胶结充填采场脱水困难的问题, 通过室内实验, 根据相似原理建立了全尾砂非胶结充填采场压风强化脱水模型, 模型实现了采场有效脱水目的。

2) 选取了 PVC 管和钢丝管进行了脱水管优化试验。实验发现, 竖直的 PVC 脱水管脱水速度较钢丝管的脱水速度提高 62%~82%。主要是钢丝脱水管弯曲段受尾砂颗粒聚集影响易产生应力集中, 限制了脱水管

的压风强化脱水效果。

3) 利用流体力学模拟软件对全尾砂非胶结充填压风强化脱水进行了数值模拟, 揭示了全尾砂非胶结充填压风强化脱水过程中气、水运移规律及强化脱水效果的影响因素, 验证了压风强化脱水的可行性, 为全尾砂非胶结充填采场压风强化脱水工艺提供了理论依据。

REFERENCES

- [1] 刘同有. 充填采矿技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 13-55.
LIU Tong-you. The application and technology of backfilling mining[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001: 13-55.
- [2] 王洪江, 陈琴瑞, 吴爱祥, 翟永刚, 张新普. 全尾砂浓密特性研究及其在浓密机设计中的应用[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(6): 676-681.
WANG Hong-jiang, CHEN Qin-rui, WU Ai-xiang, ZHAI Yong-gang, ZHANG Xin-pu. Study on the thickening properties of unclassified tailings and its application to thickener design[J].

- Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(6): 676–681.
- [3] 吴爱祥, 程海勇, 王贻明, 王洪江, 刘晓辉, 李公成. 考虑管壁滑移效应膏体管道的输送阻力特性[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(1): 180–187.
- WU Ai-xiang, CHENG Hai-yong, WANG Yi-ming, WANG Hong-jiang, LIU Xiao-hui, LI Gong-cheng. Transport resistance characteristic of paste pipeline considering effect of wall slip[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(1): 180–187.
- [4] NASIR O, FALL M. Coupling binder hydration, temperature and compressive strength development of underground cemented paste backfill at early ages[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(1): 9–20.
- [5] 李保健, 周涌, 刘允秋, 翟利军, 郭同晓. 会宝岭铁矿全尾砂非胶结充填新工艺[J]. 金属矿山, 2015(11): 33–35.
- LI Bao-jian, ZHOU Yong, LIU Yun-qiu, ZHAI Li-jun, GUO Tong-xiao. New technology of full tailings non-cemented backfilling in Huibaoling Iron Mine[J]. Metal Mine, 2015(11): 33–35.
- [6] 孙恒虎. 当代胶结充填技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 200–220.
- SUN Heng-hu. Technology of cement filling in contemporary[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 200–220.
- [7] 科林斯 R E. 流体通过多孔材料的流动[M]. 陈钟祥, 吴望一, 译. 北京: 石油工业出版社, 1984: 3–20.
- COLLINS R E. Flow of fluids through porous materials[M]. CHEN Zhong-xiang, WU Wang-yi, transl. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984: 3–20.
- [8] 杨代泉, 沈珠江. 非饱和土孔隙气、水、汽、热耦合运动之模拟[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 357–361.
- YANG Dai-quan, SHEN Zhu-jiang. Modelling fully coupled moisture, air and heat transfer in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 357–361.
- [9] FALL M, BENZAAZOUA M, OUELLET S. Experimental characterization of the influence of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill[J]. Minerals Engineering, 2005, 18(1): 41–44.
- [10] 韦华南. 水力充填负压强制脱水研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 14–19.
- WEI Hua-nan. Dehydration of hydraulic filling in negative pressure[D]. Changsha: Central South University, 2010: 14–19.
- [11] 杨守志. 固液分离[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 55–60.
- YANG Shou-zhi. Solid-liquid Separation[M]. Beijing: The Metallurgical Industry Press, 2003: 55–60.
- [12] 李茂辉, 高谦, 南世卿. 泡沫剂对充填胶结材料强度和流变特性的影响[J]. 金属矿山, 2012, 41(9): 43–47.
- LI Mao-hui, GAO Qian, NAN Shi-qing. The influence of foam on strength and rheological characteristics of filling cementing[J]. Metal Mine, 2012, 41(9): 43–47.
- [13] 黄玉诚, 董羽, 许保国, 王子升, 吕艳奎. 似膏体管道输送弯管段浆体流动数值模拟研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(3): 84–86.
- HUANG Yu-cheng, DONG Yu, XU Bao-guo, WANG Zi-sheng, LÜ Yan-kui. Numerical simulation study on paste-like slurry flow at elbow section of paste material transportation pipeline[J]. Coal Engineering, 2014, 46(3): 84–86.
- [14] 王新民, 贺严, 陈秋松. 基于 Fluent 的分级尾砂料浆满管流输送技术[J]. 科技导报, 2014, 32(1): 55–60.
- WANG Xin-min, HE Yan, CHEN Qiu-song. Full pipeline flowing transportation technology of classified tailings based on the Fluent software[J]. Science and Technology, 2014, 32(1): 55–60.
- [15] 张强胜. H-B 模型在似膏体管道输送数值模拟中的应用[J]. 山西焦煤科技, 2013(12): 22–25.
- ZHANG Qiang-sheng. Application of H-B model in like paste pipeline numerical simulation[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2013(12): 22–25.
- [16] 张钦礼, 谢盛青, 郑晶晶, 王新民. 充填料浆沉降规律研究及输送可行性分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(1): 105–109.
- ZHANG Qin-li, XIE Sheng-qing, ZHENG Jing-jing, WANG Xin-ming. Sedimentation law research and transportation feasibility study of backfilling slurry[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(1): 105–109.
- [17] 吴迪, 蔡嗣经, 杨威, 王文潇, 王章. 基于 CFD 的充填管道固-液两相流输送模拟及试验[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 2133–2140.
- WU Di, CAI Si-jing, YANG Wei, WANG Wen-xiao, WANG Zhang. Simulation and experiment of backfilling pipeline transportation of solid-liquid two-phase flow based on CFD[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(7): 2133–2140.

Experiment and simulation of reinforcement dehydration by pressing wind in non-cemented backfilling

CHENG Hai-yong, WU Ai-xiang, ZHOU Sheng-ping, WANG Yi-ming

(Key Laboratory for High Efficient Mining and Safety in Metal Mine, Ministry of Education,
School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Non-cemented backfilling in unclassified tailings is the most economical and efficient way of backfilling for the mine, whereas, the most difficult question of non-cemented backfilling in unclassified tailings is how to achieve fast and efficient dehydration for the non-cemented filling body. The mechanism of forced dehydration by pressing wind was studied, and a laboratory model was established according to the similarity principle. The technological parameters of forced dehydration, including parameters of dehydration tubes that provides theoretical guidance for the unclassified tailings non-cemented filling in the way of forced dehydration by pressing wind were explored by experiments. The numerical simulation analysis of forced dehydration was carried out by using the fluid dynamics simulation software FLUENT. The results reveal the migration regularity of gas and water in the process of forced dehydration and further validate feasibility of the forced dehydration by pressing wind in the unclassified tailings non-cemented backfilling.

Key words: non-cemented backfilling; dehydration; pressing wind; unclassified tailings; numerical simulation

Foundation item: Project(2012BAB08B02) supported by the National Key Technologies R&D Program for the 12th Five-year Plan; Projects(51374034, 51574013, 51674012) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2016-03-11; **Accepted date:** 2016-06-27

Corresponding author: WU Ai-xiang; Tel: +86-13501268918; E-mail: wuaixiang@126.com

(编辑 龙怀中)