



## 井下动水截流施工骨料堆积生长机制研究

苏培莉 杨述 刘锋

### 引用本文:

苏培莉, 杨述, 刘锋. 井下动水截流施工骨料堆积生长机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 209–221.

SU Peili, YANG Shu, LIU Feng. Study on aggregate accumulation and growth mechanism in underground dynamic water cutting-off construction[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 209–221.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0706>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 煤岩体突水通道中骨料沉积运移规律研究

Study on the migration law of aggregate sediment in the water inrush channel of coal rock mass

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 200–207 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0986>

#### 突水淹没矿井动水巷道截流阻水墙建造技术研究

Study on construction technology of water blocking wall in hydrodynamic pathway of submerged mine

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 294–303 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.027>

#### 天然气储层裂隙中气液两相流的流态转变条件数学模型

Mathematical model for flow regime transition conditions of gas–liquid two–phase flow in natural gas reservoir fracture

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 155–164 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1054>

#### 煤与瓦斯突出两相流运移规律研究进展

Research progress on the two–phase flow migration law of coal and gas outburst

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 129–139 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1826>

#### 基于气水两相流的注热CO<sub>2</sub>增产CH<sub>4</sub>数值模拟研究

Numerical study of heat injection CO<sub>2</sub> to increase CH<sub>4</sub> production based on gas–water two–phase flow

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 115–128 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0690>

#### 基于撞击流调控的煤泥水混合过程强化研究

Study of slime water mixing process intensification using impingement flow regulation

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 323–335 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1460>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

苏培莉, 杨 述, 刘 锋. 井下动水截流施工骨料堆积生长机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 209–221.  
SU Peili, YANG Shu, LIU Feng. Study on aggregate accumulation and growth mechanism in underground dynamic water cutting-off construction[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 209–221.

## 井下动水截流施工骨料堆积生长机制研究

苏培莉, 杨 述, 刘 锋

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 灌注骨料形成阻水屏障实现截流降速是井下治水工程的关键所在。为定量描述骨料堆积生长的时空演化机理, 提出了将骨料沉降堆积过程切分为具有一定厚度的片状颗粒层堆叠过程的分析计算方法, 以及动水环境中骨料灌注后从沉降到堆积全过程关键参量 (颗粒水平移距  $x_d$ , 动水休止角  $\psi$ , 未接顶区流速  $U$ , 骨料留存临界流速  $U_{cr}$ ) 的理论计算公式, 在此基础上构建了骨料堆积体生长预测模型。通过 CFD-DEM 双向耦合算法研究了骨料灌注期间流场分布演化特征和骨料堆积形态差异, 并验证了预测模型合理性。研究表明: 空间上, 依据初始流速  $U_s$  是否超过骨料起动流速  $U_c$  或骨料留存临界流速  $U_{cr}$ , 可将截流初期骨料沉积主域的所在位置划分为 3 个区域, 若沉积主域位于③区, 则将其视为无效灌注; 时间上, 骨料堆积体生长过程可归结为 3 个阶段: 高度快速增长阶段、高度长度同步生长阶段、仅水平向伸长阶段; 初始流速决定了第 1 阶段的有无, 而灌注条件 (骨料粒径、灌注速度) 主导着第 1 阶段所持续的时间; 基于泥沙运动力学中推移质输沙率、起动流速等概念, 得出了堵孔现象发生及骨料能否留存的临界判据; 数值模拟试验结果表明, 预测模型能够较好地刻画骨料灌注后的堆积生长规律, 骨料堆积稳定后, 理论计算值与模拟试验值相对误差小于 10%。

**关键词:** 煤矿突水; 骨料灌注; 临界流速; 沉积主域; 固-液两相流

中图分类号: TD741

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)05-0209-13

### Study on aggregate accumulation and growth mechanism in underground dynamic water cutting-off construction

SU Peili, YANG Shu, LIU Feng

(College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The key to inrush water control engineering in coal mine lies in forming a water-resistant barrier through the pouring of aggregate, which achieves flow interception and reduction. In order to quantitatively describe the spatiotemporal evolution mechanism of aggregate accumulation, an analytical calculation method is proposed to divide the process of aggregate settling and stacking into the process of particle layers superposition with a certain thickness and theoretical formulas for the entire process from settlement to pile after aggregate pouring in a dynamic water environment about critical parameters (horizontal displacement of particle  $x_d$ , dynamic repose angle  $\psi$ , flow velocity in the topping zone  $U$ , critical flow velocity for aggregate retention  $U_{cr}$ ) are proposed. Based on this, a prediction model about the growth of aggregate accumulation is constructed. The distribution characteristics of the flow field and the differences in aggregate accumulation morphology during the pouring period are studied with CFD-DEM, and the rationality of the prediction model is verified. The study reveals that spatially, the location of the main sedimentary domain during the initial interception phase can be divided into three regions, depending on whether the initial flow velocity  $U_s$  exceeds the incipient flow velocity for particles  $U_c$  or the critical flow velocity for aggregate retention  $U_{cr}$ . That is considered ineffective pouring if the main sedimentary domain lies in region ③. Temporally, the growth process of aggregate accumulation can be summarized into three stages: a height rapid increase stage, a synchronous growth stage in height

收稿日期: 2023-05-14

责任编辑: 周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-0706

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51508462); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2018JM5126)

作者简介: 苏培莉 (1982—), 女, 山西朔州人, 副教授, 博士。E-mail: supeili824@163.com

通讯作者: 杨 述 (1996—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生。E-mail: 605383508@qq.com

and length, and a stage with only horizontal elongation. The presence of the first stage is determined by the initial flow velocity, while the duration of the first stage is predominantly governed by the pouring conditions (particle size, pouring rate). A critical criterion for pore clogging and aggregate retention is derived based on sediment transport rate and incipient flow velocity from sediment dynamics. The numerical simulation experimental results indicate that the prediction model effectively characterizes the growth law of aggregate accumulation because the relative error between the theoretical calculation values and the simulated experiment values is less than 10% after the aggregate stacking stabilizes.

**Key words:** water inrush from coal mine; pouring aggregate; critical flow velocity; main sedimentary domain; solid-liquid two-phase flow

## 0 引言

煤矿巷道发生突水淹井事故后,通常先灌注骨料形成高阻弱渗堆积体,将管道流变为渗流,为后期注浆工作中水泥浆液的有效积聚和凝固创造条件<sup>[1]</sup>。

其中,骨料堆积体的建成是决定封堵成败的关键,众多学者在此方面进行了大量的理论研究和模拟试验工作。邵红旗等<sup>[2]</sup>提出在静水条件下骨料灌注效率低时采用双液浆法快速建造阻水墙骨架,再采用综合注浆法灌注水泥浆液加固墙体,达到了快速堵水抢险救援的目的;牟林<sup>[3]</sup>从骨料灌注期间的水力学状态出发,对截流工程技术综合优化等方面进行了研究,将截流过程分为了 4 个阶段,即骨料灌注前的施工准备阶段、铺底-充填阶段、骨料接顶阶段、注浆加固阶段;董书宁等<sup>[4]</sup>基于流体力学理论,考虑水头压差、渗流突破和浆液初凝时间等要素,建立了截流所需骨料堆积段最小临界长度估算模型;杨志斌等<sup>[5]</sup>针对突水巷道截流接顶困难这一技术难点,提出了截流、堵源同步进行的治理方案。为研究骨料灌注后在动水中的堆积过程,惠爽<sup>[6]</sup>设计研制了可视化的矿井淹没巷道动水骨料灌注试验平台,对骨料截流过程中的影响因素及堵水效果进行了分析;李军<sup>[7]</sup>采用 FLUENT 软件开展骨料灌注阶段的数值模拟试验,研究了骨料颗粒的运动轨迹、运动速度及管道内水压力变化情况。

以往研究成果以定性研究截流工作中骨料灌注后其运移堆积过程及封堵效果评价为主,未能提出能够描述骨料堆积生长时空演化过程的定量分析方法,导致其内在力学机理仍缺乏深入研究。鉴于此,通过理论分析满流状态下骨料灌注后的沉积主域位置与动水流速间的响应关系,建立骨料可留存堆积的临界判据;采用以单位时间灌注量对骨料颗粒分层的处理手段,将连续的骨料灌注堆积过程简化为颗粒层堆叠过程,并构建了能够反映随骨料持续灌注,堆积体高度及长度增长情况的骨料堆积生长预测模型,以期煤矿水害治理工程施工提供参考。

## 1 堆积形态时空演化规律

### 1.1 基本假定

1) 采用泥沙运动力学中输沙率 ( $\text{kg/s}$ ) 表示水流携砂能力  $q_s^*$  ( $\text{kg/s}$ ),且仅考虑水流携带骨料颗粒中推移质<sup>[8]</sup>的能力;

2) 堆积体形成稳定结构后,其内部骨料堆积密实,阻水能力强,同一横截面不同高度处流速相同;

3) 实测数据<sup>[9]</sup>表明,截流成功前的流量基本稳定,水流绝大部分从巷道顶部未接顶区域通过,堆积体接顶成功后流量快速下降。

### 1.2 灌注初期沉积主域空间分布

对灌注初期沉积主域的研究,能够帮助预判骨料灌注后能否顺利堆积形成具有一定规模的阻水体。事实上,粒径较大的均匀颗粒群在沉降时由于颗粒间的碰撞挤压,会出现明显分层凝聚<sup>[10]</sup>。据此将连续的骨料沉降及堆积过程拆解简化为无限个具有相同厚度  $\delta$  的片状颗粒层堆叠及塌落过程,如图 1 所示。

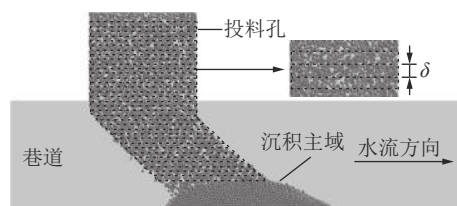


图 1 灌注初期骨料沉降堆积过程

Fig.1 Aggregate settlement and stacking process at the initial stage of pouring

取首个颗粒层为隔离体进行分析,如图 2 所示,轨迹线 1、2、3 为颗粒层在不同流场中的沉降路径。静水中 ( $U_s=0$ ),颗粒沿轨迹线 1 沉降,后一颗粒层堆叠在前层之上,两颗粒层中心线重合,床面上部分颗粒(红色)沿水下休止角  $\theta$  塌落(图 3a);当初始流速  $U_s$  大于零时,颗粒层沉降在轨迹线 1 右侧(①、②、③区),沉积主域与孔口中心水平距离记为  $x_d$ 。由于颗粒层铺底后主流区被压缩,床面瞬时水流速升高,导致后一颗粒层着床前水平位移略微增大,与首层

在垂向上有微小“错动”(图 3b), 两颗粒层水平移距差记为  $\Delta x_d$ ; 轨迹线 2 为初始流速  $U_s$  与颗粒临界起动流速  $U_c$  相同时颗粒层的沉降路径, 将该情形下的  $x_d$  记为  $x_{dc}$ , 若  $U_s$  超过  $U_c$ , 水流携砂能力  $q_s$  不再为 0, 颗粒层在②区沉降后床面层部分骨料(红色颗粒)被二次起动带离至下游(图 3c); 轨迹线 3 为初始流速  $U_s$  与颗粒层能够有效堆叠的临界流速  $U_{cr}$ (骨料留存临界流速)相同时的颗粒层沉降路径, 若  $U_s$  超过  $U_{cr}$ , 则骨料在③区沉降触底后无法在原位置附近稳定沉积, 而被高速水流加速搬运至下游(红色颗粒), 导致后一层颗粒无法着床(图 3d), 该情形为无效灌注。当灌注速度  $\phi$  小于水流携砂能力  $q_s$  时, 骨料无法留存, 因此本文将  $q_s$  与  $\phi$  相同时的水流速定义为骨料留存临界流速  $U_{cr}$ , 水流携砂能力为单位时间内被水流搬运带离至下游的骨料质量。

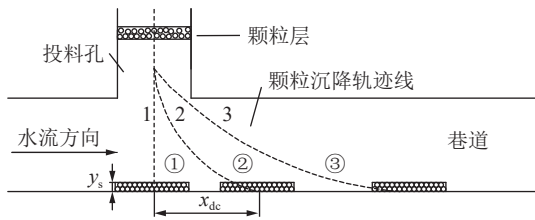


图 2 骨料沉积主域空间分布

Fig.2 Spatial distribution of main sedimentary domain

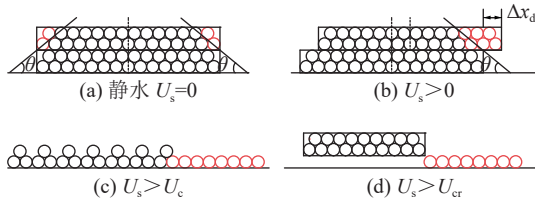


图 3 不同流场中颗粒层堆叠示意

Fig.3 Aggregate layer superposition in different flow fields

### 1.3 骨料堆积生长影响因素分析及预测模型建立

从分析静水条件下影响骨料堆积的关键因素出发, 通过增加水流对骨料沉降堆积的作用, 逐步过渡到动水中骨料堆积生长机制的研究中, 并建立动水中骨料灌注后的堆积体生长预测模型。

将进入巷道的骨料按单位时间切分, 每单位时间内进入巷道的骨料为同一颗粒层, 首个颗粒层在巷底沉积的瞬间记为 0 时刻, 首层颗粒沉积后, 其高度  $y_s$  和长度  $l_s$  可通过灌注速度、粒径和孔隙率三者的关系得到:

$$y_s = \frac{V_p}{A_H} = \frac{V_v}{(1-\varepsilon)A_H} = \frac{\phi}{(1-\varepsilon)\rho_s A_H} \quad (1)$$

$$l_s = \frac{V_p}{y_s L} = \frac{V_v}{(1-\varepsilon)y_s L} = \frac{\phi}{(1-\varepsilon)\rho_s y_s L} \quad (2)$$

式中:  $V_p$  为颗粒占据空间体积,  $m^3$ ;  $V_v$  为颗粒总体积,  $m^3$ ;  $\phi$  为灌注速度,  $kg/s$ ;  $L$  为巷道宽度,  $m$ ;  $\varepsilon$  为孔隙率, %;  $A_H$  为投料孔面积,  $m^2$ ;  $\rho_s$  为颗粒密度,  $kg/m^3$ 。

后续的骨料颗粒着床后, 一部分稳定沉积在床面以增加堆积高度, 另一部分在重力作用下沿休止角  $\theta$  塌落(图 3a), 则 1 时刻的堆积高度增量  $\Delta y_{(1)}$  为

$$\Delta y_{(1)} = \frac{m_{r(1)}}{(1-\varepsilon)\rho_s L(l_s - 2y_s/\tan \theta)} \quad (3)$$

其中:

$$m_{r(1)} = \phi - m'_{(1)} \quad (4)$$

$$m'_{(1)} = \frac{l_H - \left(l_s - \frac{4y_s}{\tan \theta}\right)}{l_H} \phi \quad (5)$$

式中:  $m_{r(t)}$  为  $t$  时刻稳定着床的颗粒质量,  $kg$ ;  $m'_{(t)}$  为  $t$  时刻沿休止角塌落的颗粒质量,  $kg$ ;  $\theta$  为水下休止角, ( $^\circ$ );  $l_H$  为投料孔边长,  $m$ 。

1 时刻堆积高度为:

$$y_1 = y_s + \Delta y_{(1)} \quad (6)$$

骨料颗粒层沉降着床后, 部分颗粒塌落并附着在堆积体两侧坡面使休止角大小保持不变(图 4a、图 4b)。为便于描述并计算这一过程的堆积高度及长度增量, 可将这部分颗粒视为“颗粒桩”竖直嵌入堆积体内部, 使堆积体向两侧伸展, 如图 4c 所示, 图中红色颗粒质量与图 4b 相同。

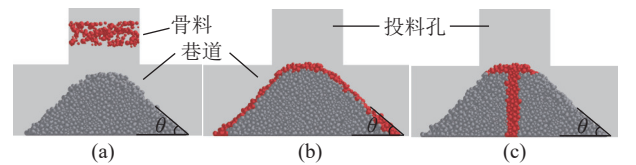


图 4 静水中堆积形态演化过程

Fig.4 Evolution of accumulation morphology in still water

则堆积体长度增量计算公式可表示为:

$$\Delta l_{(1)} = \frac{m'_{(1)}}{(1-\varepsilon)y_1 \rho_s L} \quad (7)$$

第二层颗粒沉降后的堆积体长度为:

$$l_1 = l_s + \Delta l_{(1)} \quad (8)$$

$t$  时刻堆积体高度增量为:

$$\Delta y_{(t)} = \frac{m_{r(t)}}{(1-\varepsilon)\rho_s L(l_{t-1} - 2y_{t-1}/\tan \theta)} \quad (9)$$

$t$  时刻堆积体长度增量为:

$$\Delta l_{(t)} = \frac{m'_{(t)}}{(1-\varepsilon)y_t \rho_s L} \quad (10)$$



其中:

$$m_{r(t)} = \phi - m'_{(t)} \quad (11)$$

$$m'_{(t)} = \frac{l_H - \left[ l_{t-1} - \frac{2}{\tan \theta} (y_{t-1} + y_s) \right]}{l_H} \phi \quad (12)$$

$t$ 时刻的堆积高度和长度分别为:

$$y_t = y_{t-1} + \Delta y_{(t)} = y_s + \sum_{x=1}^t \Delta y_{(x)} \quad (13)$$

$$l_t = l_{t-1} + \Delta l_{(t)} = l_s + \sum_{x=1}^t \Delta l_{(x)} \quad (14)$$

动水环境中,若初始流速较小,则可以认为首层高度  $y_s$  及长度  $l_s$  与静水中相同。考虑到因骨料铺底后主流区被压缩,流速升高使后续颗粒层在沉降时产生较大水平位移从而使部分颗粒无法着床,将这部分颗粒质量记为  $m''$ 。另外,由于迎水坡处塌落量较少(图3b),因此在计算时将其忽略以简化计算,得到高度增量计算公式:

$$\Delta y_{(t)} = \frac{m_{r(t)}}{(1-\varepsilon)\rho_s L(l_{t-1} - y_{t-1}/\tan \psi)} \quad (15)$$

其中:

$$m_{r(t)} = \phi - m'_{(t)} - m''_{(t)} \quad (16)$$

$$m''_{(t)} = \frac{\Delta x_{d(t)}}{l_H} \phi = \left[ \frac{u_{(t)}(H - y_{t-1})}{u_{(t-1)}(H - y_{t-2})} - 1 \right] \frac{x_{d(t-1)}y_{t-1}}{y_s l_H} \phi \quad (17)$$

式中:  $x_{d(t)}$  为  $t$ 时刻的颗粒沉底时的水平移距,  $m$ ;  $H$  为巷道高度,  $m$ 。

由于水流速未达到颗粒起动流速,水下休止角保持不变,则  $m'$  计算公式如下:

$$m'_{(t)} = \frac{l_H - \left[ l_{t-1} - \frac{2}{\tan \theta} (y_{t-1} + y_s) \right]}{l_H} (\phi - m''_{(t)}) \quad (18)$$

$t$ 时刻堆积体长度增量为:

$$\Delta l_{(t)} = \frac{m'_{(t)} + m''_{(t)}}{(1-\varepsilon)y_t \rho_s L} \quad (19)$$

式(15)~式(19)成立前提为随堆积高度增加,顶区流速  $U$  始终未达到  $U_c$ 。随着堆积高度增加,水流速进一步抬升,当  $U \geq U_c$  时,堆积体的生长进入第2阶段;若堆积高度达到  $H-D$  时流速仍小于  $U_c$ ,则将会引发堵孔,导致有效堆积段过短,即:

$$\begin{cases} y_t \geq H - D \\ U \leq U_c \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $D$  为颗粒粒径,  $m$ 。

当堆积体生长进入第2阶段时,由水流速度所

主导的携砂能力  $q_s > 0$ ,因此在计算高度和长度增量时,需要将其考虑在内,高度增量公式同式(15)。

其中:

$$m_{r(t)} = \phi - m'_{(t)} - m''_{(t)} - q_{s(t)} \quad (21)$$

由于初始沉积主域右侧长度远超过左侧长度,因此在计算长度增量时省略左侧部分,计算公式如下:

$$\Delta l_{(t)} = \frac{m'_{(t)} + m''_{(t)} + q_{s(t)}}{(1-\varepsilon)y_t \rho_s L} \quad (22)$$

如图5所示,当床面长度超过灌注孔边长时,即式(23)成立,则可以消除颗粒层塌落和偏移所导致的增量变化。

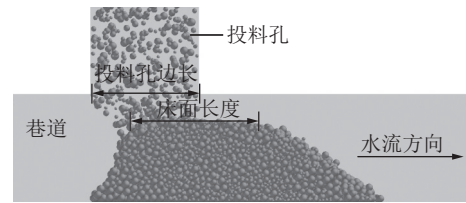


图5 动水中骨料堆积体生长示意

Fig.5 Aggregate stacking growth process in dynamic water

$$l_t - \frac{y_t}{\tan \psi} > l_H \quad (23)$$

高度和长度增量计算公式变为:

$$\Delta y_{(t)} = \frac{\phi - q_{s(t)}}{(1-\varepsilon)\rho_s L(l_{t-1} - y_{t-1}/\tan \psi)} \quad (24)$$

$$\Delta l_{(t)} = \frac{q_{s(t)}}{(1-\varepsilon)\rho_s L y_t} \quad (25)$$

$t$ 时刻堆积高度和长度计算公式同式(13)、式(14)。当携砂能力  $q_s^*$  不断增大至与灌注速度  $\phi$  相同时,即顶区流速达到  $U_c$ ,骨料灌注后无法在堆积体顶部留存,则预示着生长进入第3阶段,  $\Delta y$  减小为0,此阶段堆积体仅水平向长度增加。

若  $U_s$  超过  $U_c$ ,灌注初期沉积主域位于②区,则堆积体生长直接从第2阶段开始,高度  $\Delta y$ 、长度  $\Delta l$  增量计算同式(15)、式(19),首层高度  $y_s$ 、长度  $l_s$  为:

$$y_s = \frac{V_P}{A_H} = \frac{V_V}{(1-\varepsilon)A_H} = \frac{\phi - q_s}{(1-\varepsilon)\rho_s A_H} \quad (26)$$

$$l_s = \frac{V_P}{y_s L} = \frac{V_V}{(1-\varepsilon)y_s L} = \frac{\phi + q_s}{(1-\varepsilon)\rho_s y_s L} \quad (27)$$

工程现场流速一般小于0.5 m/s,小于截流工程常用粒径(5~30 mm)骨料的起动流速<sup>[3]</sup>,因此堆积生长过程多从第1阶段开始,若灌注方案制定不当,则极易造成堵孔,因此截流初期选取小粒径骨料灌注,当堆积体具有一定高度及长度后,再行更换大粒径骨料或增大灌注速度直至堆积体接顶。

## 2 关键参量的确定

一个适用性强、准确度高的骨料堆积体生长预测模型, 不仅取决于正确的理论基础、科学的假定处理及合理的公式结构, 还依赖于所取参量是否合理。对于本文预测模型, 主要涉及颗粒动水沉降时水平移距  $x_d$ , 散体颗粒堆积动水休止角  $\psi$ , 巷道顶区未接顶空间流速  $U$ , 以及水流携砂能力  $q_s$  等关键参量的确定。

### 2.1 颗粒动水沉降时水平移距计算公式

基于恒定流条件计算颗粒在满流巷道中自由沉降时的水平移距。假设投料孔较高, 孔内充满水, 颗粒由投料孔进入巷道前已经达到颗粒沉降末速  $u_g$  (m/s)。由于颗粒水平向作变加速运动, 水流拖曳力  $F_D$  相比于其他作用力具有主导作用<sup>[11]</sup>, 因此影响作用较小的力不予考虑。另外, 需要考虑因颗粒作变加速运动而产生的与运动方向相反的惯性力  $F_G$ , 如图 6 所示。

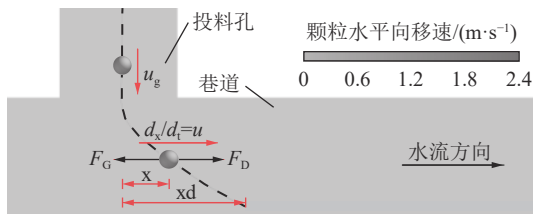


图 6 动水中颗粒自由沉降受力分析

Fig.6 Force analysis of particle setting in dynamic water

作用于颗粒上的水流拖曳力:

$$F_D = C_D \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho(U-u)^2}{2} \quad (28)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $u$  为颗粒水平向移速,  $\text{m/s}$ ;  $C_D$  为拖曳力系数, 其经验公式为<sup>[12]</sup>:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re}(1 + 0.15Re^{0.687}), & Re < 1\,000 \\ 0.44, & Re \geq 1\,000 \end{cases} \quad (29)$$

式中:  $Re$  为雷诺数。

颗粒变加速运动产生的惯性力<sup>[13]</sup>:

$$F_G = (M' + \lambda) \frac{du}{dt} \quad (30)$$

式中:  $M'$  为颗粒质量,  $\text{kg}$ ;  $\lambda$  为颗粒因不定常运动带来的虚质量<sup>[14]</sup>,  $\text{kg}$ ; 分别表示为

$$M' = \frac{\pi D^3 \rho_s}{6} \quad (31)$$

$$\lambda = \frac{\pi D^3 \rho}{12} \quad (32)$$

根据牛顿定律得到颗粒运动平衡方程:

$$F_D = F_G \quad (33)$$

将式 (28)、式 (30)—(32) 代入式 (33) 得到:

$$k(U-u)^2 = \frac{du}{dt} \quad (34)$$

其中:

$$k = \frac{3C_D}{4d \left( \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{2} \right)} \quad (35)$$

对式 (34) 积分, 并代入边界条件  $t = 0, u = 0$ ;  $t = 0, x = 0$ , 可得:

$$x = \int_0^t u dt = Ut - \frac{\ln(kUt + 1)}{k} \quad (36)$$

将  $t = H/u_g$  代入式 (36), 并改用颗粒群沉降末速代替单颗粒沉降末速, 得到颗粒层中心处颗粒沉底时的水平移距:

$$x_d = \frac{UH}{u_g} - \frac{4 \ln \{ 3C_D UH / [(4D\rho_s/\rho + 2D) + 1] u_g \} (\rho_s/\rho + 1/2)}{3C_D/D} \quad (37)$$

颗粒沉底时的水平移距  $x_d$  决定了骨料灌注后堆积主域的所在位置, 若  $x_d$  大于  $x_{dc}$ , 主域落于②区, 则预示着堆积体生长不存在第 1 阶段 (堆积高度迅速增长阶段), 而直接从第 2 阶段 (高度长度同步生长阶段) 开始。

### 2.2 散体颗粒堆积动水休止角计算公式

动水中骨料散体堆积休止角  $\psi$  是水流和堆积体相互作用塑造的一种动态平衡形态, 坡面上的颗粒处于临界起动状态, 动水休止角是描述这一临界状态的关键物理参数<sup>[15]</sup>。本节从堆积体稳定坡面上颗粒受力分析出发, 引入作用流速  $U_b$  建立动水休止角计算公式。

如图 7 所示, 颗粒主要受到有效重力  $G'$ , 水流拖曳力  $F_D$ 、上举力  $F_L$  的作用。其中, 拖曳力  $F_D$  计算公式同式 (28), 式中  $U = U_b$ ;  $u = 0$ 。

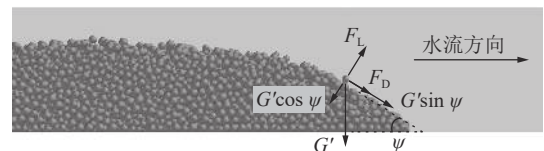


图 7 动水中坡面颗粒受力分析

Fig.7 Force analysis of particles on slope in dynamic water

$$F_L = C_L \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho U_b^2}{2} \quad (38)$$

$$G' = \frac{\pi D^3 (\gamma_s - \gamma)}{6} \quad (39)$$

式中:  $F_L$  为上举力, kN;  $C_L$  为上举力系数, 对暴露于床面的单球体颗粒一般取 0.1<sup>[16]</sup>;  $U_b$  为作用流速, m/s;  $G'$  为有效重力, kN;  $\gamma_s$  为颗粒容重, kN/m<sup>3</sup>;  $\gamma$  为流体容重, kN/m<sup>3</sup>。

突水稳定阶段, 巷道内水流流动为管道流; 骨料灌注阶段, 堆积尚未接顶时, 巷道内部具有床沙的二元结构, 未接顶区流速较高为管道流, 水流可将骨料携带至堆积体前端, 堆积稳定的骨料内部为低速渗流<sup>[17]</sup>。考虑管道携砂的阻力形式与明渠流相似, 管流与明渠流流速分布相似<sup>[18]</sup>, 因此作用流速采用指数流速分布公式<sup>[19-20]</sup>:

$$U_b = (1 + \beta)\alpha^\beta U \left(\frac{D}{h}\right)^\beta \quad (40)$$

式中:  $\alpha$  为近底颗粒高度系数, 取值 1/4;  $\beta$  为指数, 取值 1/6;  $h$  为水深, m。

根据斜面上骨料颗粒起动临界条件:

$$F = G' \sin \psi + F_D \quad (41)$$

$$N = G' \cos \psi - F_L \quad (42)$$

$$F/N \geq f \quad (43)$$

式(41)—式(43)联立得:

$$\tan \frac{\psi}{2} = \frac{-G' + \sqrt{(G')^2 - [-F_D + f(G' + F_L)][-F_D - f(G' - F_L)]}}{-F_D + f(G' + F_L)} \quad (44)$$

上述公式中, 若动水流速相对于骨料粒径过大, 计算结果会小于 0, 这与事实不符。因此若计算值小于 0, 将其规定为 0。

淹没状态下, 骨料颗粒处于饱和状态, 颗粒间不存在黏聚力, 水下休止角与内摩擦因数满足式(45), 此时的内摩擦因数取决于颗粒形态特征及成分<sup>[21]</sup>:

$$f = \tan \theta \quad (45)$$

式中:  $\theta$  为水下休止角, 由张红武<sup>[21]</sup>公式计算得到:

$$\theta = 29.5 + 4.5 \lg D \quad (46)$$

### 2.3 巷道顶区未接顶空间流速估算公式

巷道内主流区流速由初始流速决定, 而影响瞬时携砂能力的主要因素为未接顶区所能达到的最大流速。掌握流速的变化规律可进行骨料粒径的动态匹配, 保证堆积体快速长距离接顶<sup>[17]</sup>, 若顶区流速相对骨料粒径过低, 则会引发堵孔问题。

设定初始动水流速  $U_s$ , 则矩形断面巷道内满流状态下单位时间流量为:

$$Q = U_s L H \quad (47)$$

随着堆积高度  $y$  增加, 剩余过水断面高度减小为  $H-y$ , 假设堆积体内部孔隙率  $\varepsilon$  为 0, 属于完全不透水情况, 则顶部流速  $U$  升高至:

$$U = \frac{Q}{L(H-y)} \quad (48)$$

流速增幅  $\Delta U = U - U_s$ , 牟林<sup>[9]</sup>采用此方法估算了截流过程中顶部未接顶空间的流速。事实上水流在堆积体内部低速渗流, 孔隙率不会为 0, 若堆积体内孔隙率为 1, 堆积体不存在, 则  $\Delta U = 0$ 。因此, 根据孔隙率不同, 流速增幅处于  $(0 \sim 1)\Delta U$  范围内。假设  $\Delta U$  与孔隙率  $\varepsilon$  线性相关, 随  $\varepsilon$  增大,  $\Delta U$  减小, 则骨料堆积体顶部流速  $U$  可由下式计算得到:

$$U = \left[ \frac{Q}{L(H-y)} - U_s \right] (1 - \varepsilon) + U_s \quad (49)$$

### 2.4 水流携砂能力及骨料留存临界流速计算公式

骨料留存临界流速  $U_{cr}$  关系着骨料灌注后能否留存堆积, 同时, 水流携砂能力  $q_s$  与堆积能力 (由灌注速度和骨料粒径所决定) 的相互作用主导着堆积体能够达到的极限高度。因此对上述参量的把控, 可以帮助预判骨料的留存和堆积状态, 减少无效灌注。

单位时间内单位床面上水流势能损失  $E$  表示为<sup>[22]</sup>:

$$E = \tau_1 U \quad (50)$$

$$\tau_1 = \tau (1 - h_s/h) \quad (51)$$

式中:  $\tau_1$  为主流区与床层颗粒交界面处的流体剪切应力, kN/m<sup>2</sup>;  $h_s$  为床面可动层厚度, m;  $\tau$  为流体剪切应力, kN/m<sup>2</sup>。

其中一部分能量用于床面颗粒的起动  $E_c$ , 另一部分用于床面推移质输运  $E_s$ , 分别表示为:

$$E_c = \tau_c U_c \quad (52)$$

$$E_s = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} q_s^* \tan \theta \quad (53)$$

式中:  $\tau_c$  为颗粒起动剪切应力, kN/m<sup>2</sup>。

$E'$  表示除  $E_s$ ,  $E_c$  以外的能量损耗<sup>[23]</sup>, 根据能量守恒原理列出如下方程:

$$E = E_c + E_s + E' \quad (54)$$

由于推移质输沙问题的复杂性,  $E'$  的形式尚且难以给出, 因此依照物理学常用处理方式将式表示为<sup>[24]</sup>:

$$E_s = \eta (E - E_c) \quad (55)$$

其中,  $\eta$  为输沙效率系数,  $\eta = e_b F_r$ 。根据 Bagnold 假定, 取  $e_b = 0.5$ <sup>[25]</sup>; 弗汝德数  $F_r$  作为一定水深修正的水流强度指标<sup>[26]</sup>:

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (56)$$

将式 (50)—式 (53) 代入式 (55) 可得:

$$\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} q_s^* \tan \theta = \eta(\tau U - \tau_c U_c) \quad (57)$$

其中:

$$\tau = \gamma R J = \gamma \frac{U^2}{C^2} \quad (58)$$

$$\tau_c = \gamma R J_c = \gamma \frac{U_c^2}{C^2} \quad (59)$$

式中:  $C$  为谢才系数;  $R$  为水力半径。

实际上由于水流的冲刷作用, 不同流速下骨料堆积体休止角变化范围较大, 在计算携砂能力时采用水下休止角略显粗糙, 因此将式 (57) 中水下休止角  $\theta$  改用式 (44) 计算得到的动水休止角  $\psi$  代替, 将式 (56)、式 (58)、式 (59) 代入式 (57) 得水流携砂能力:

$$q_s^* = e_b \frac{\gamma^2}{\gamma_s - \gamma} \tan \psi \frac{U^3(1 - h_s/H) - U_c^3}{C^2} \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (60)$$

其中, 床面可动层厚度采用 Bagnold<sup>[27]</sup> 建议的公式计算:

$$h_s = 1.4(U_*/U_{*c})^{0.6} D \quad (61)$$

式中:  $U_*$  为水流摩阻流速,  $U_* = (\tau/\rho)^{1/2}$ , m/s;  $U_{*c}$  为泥沙起动摩阻流速, m/s。

以曼宁—斯特里克勒公式为基础, 参考钱宁、麦乔威等学者取  $D_{65}$  作为粗糙特征长度的处理, 谢才系数  $C$  可表示为<sup>[28]</sup>:

$$C = A_{65} \left( \frac{R}{D_{65}} \right)^{1/6} \quad (62)$$

式中:  $D_{65}$  为小于该粒径的颗粒占总质量百分比 65% 的粒径, m;  $A_{65}$  为摩阻参数。

根据大量床沙资料统计结果, 摩阻参数  $A_{65}$  同泥沙中值粒径  $D_{50}$  的关系式如下<sup>[23]</sup>:

$$A_{65} = 1.55h \left( \frac{D_{50}}{D_0} \right) + 32.1 \quad (63)$$

式中:  $D_{50}$  为中值粒径, m;  $D_0$  为避免量纲不和谐而引入的参考粒径, 为保持定量关系不变, 取  $D_0 = 1$  m。

颗粒被起动时, 除考虑拖曳力、上举力和水下重力外, 还应考虑由于颗粒间相互影响以及颗粒在床面的相对暴露度而产生的附加质量力, 因此何文社<sup>[29]</sup> 提出颗粒临界起动流速  $U_c$  计算公式, 上下限分别为:

$$U_c = \sqrt{2 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D_{50} + 5.5 \times 10^{-7} \frac{10 + h}{D_{50}^{0.7}} \left( \frac{h}{D_{50}} \right)^{1/6}} \quad (64)$$

$$U_c = \sqrt{1.134 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D_{50} + 3.1 \times 10^{-7} \frac{10 + h}{D_{50}^{0.7}} \left( \frac{h}{D_{50}} \right)^{1/6}} \quad (65)$$

由于床面可动层厚度  $h_s$  较薄, 根据牟林<sup>[30]</sup> 的研究, 颗粒层厚度为  $((1 \sim 2)D_{\max})$  时, 起动流速靠近拟合曲线的下限, 因此在后续计算中取颗粒起动流速下限。随着堆积体高度的增加, 主流场进一步被压缩, 流速升高, 导致水流携砂能力迅速增加, 当其与灌注速度达到动态平衡状态时, 得到骨料留存的临界流速:

$$U_{cr} = \frac{\sqrt{r} + \sqrt{r - 2r + 4k\sqrt{r}}}{2} \quad (66)$$

其中:

$$r = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} \quad (67)$$

$$k = \frac{U_c^3}{2r(1 - h_s/H)} \quad (68)$$

$$q = -\left( \frac{U_c^3}{1 - h_s/H} \right)^2 \quad (69)$$

$$p = \frac{4\phi C^2 \tan \psi \sqrt{gh} (\gamma_s - \gamma)}{e_b(1 - h_s/H) \gamma^2} \quad (70)$$

式 (60) 中携砂能力  $q_s^*$  表示一定水流条件下, 单位宽度上单位时间内通过断面的骨料颗粒重量, 量纲为 kg/(m·s)。取巷道宽度为  $L$ , 则  $q_s = Lq_s^*$ , 量纲与骨料灌注速度 (kg/s) 量纲一致。

### 3 骨料灌注堆积数值模拟试验

结合 CFD-DEM 双向瞬态耦合仿真方法<sup>[31]</sup>, 研究骨料堆积对流场分布的影响, 以及不同流场中堆积体形态差异, 并对预测模型进行验证。此方法中流体运动采用欧拉方法描述, 固体颗粒运动采用拉格朗日方法描述, 可以同时反映颗粒-颗粒以及颗粒-流体间的相互作用, 能够准确获取各网格单元的流速和压强数据, 以及颗粒的位置、速度以及受力情况<sup>[32]</sup>。

#### 3.1 模型建立

对流体计算域进行非结构化立方体网格剖分, 网格尺寸 30 mm。将骨料颗粒简化为球体, 颗粒间接触选用 Hertz-Mindlin 无滑移“软球”模型<sup>[33]</sup>, 拖曳力模型采用精度较高的 Gidaspow 曳力模型<sup>[34]</sup>, 材料基本参数均按表 1 设定<sup>[12]</sup>。

实际工程中煤岩体巷道多为断面尺寸 4×4 m 的矩形巷道, 本试验按相似比 1 : 20 设置计算域, 如图 8 所示, 灌注速度  $\Phi$  同样依据现场数据按比例 1 : 20 取值<sup>[30]</sup>。



表 1 计算模型材料参数  
Table 1 Material parameters used in the model

颗粒参数						流体参数	
颗粒密度 $\rho_s /$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E /$ ( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	泊松比 $\nu$	恢复系数 $e$	滑动摩擦因数 $\mu_s$	滚动摩擦因数 $\mu_r$	密度 $\rho /$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	动力黏度 $\mu_f /$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )
2 650	5	0.3	0.3	0.5	0.1	1 000	0.001

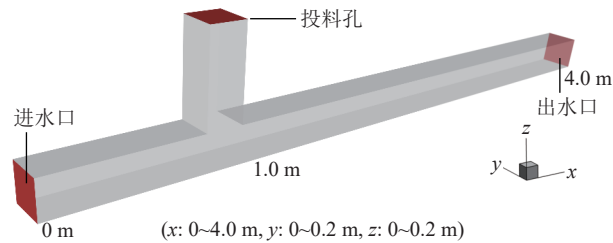


图 8 单孔巷道骨料灌注数值模型

Fig.8 Numerical model of aggregate pouring in single-hole tunnel

3.2 巷道内流场时空演化分析

以初始流速 0.5 m/s 动水环境中灌注中值粒径  $D_{50}$  为 15 mm 骨料 (粒径范围 13 ~ 17 mm, 为模拟一般性工况粒径级配按线性分布<sup>[30]</sup>) 为例, 探究巷道内流速分布的变化规律。

如图 9 所示, 骨料灌注期间, 巷道顶部高速水流区和底部低速区同步扩大, 由初始流速所决定的中部主流区 (动水流速位于 0.26 ~ 0.52 m/s 之间) 不断被“压缩”。如图 9a 所示,  $t=8$  s 时, 骨料堆积体已接近巷道顶部, 但由于堆积长度较短, 流场受影响范围较小, 程度较弱。 $t=10$  s 时, 过水断面高度不足原来的 20%, 顶部高速水流区范围 (动水流速大于 1.04 m/s) 扩大, 背水坡处流场受到的压缩程度加剧。 $t=15$  s 水流携砂能力超过骨料堆积能力, 骨料颗粒已无法稳定沉积在堆积体顶部。其中, 突出在床面上的和位

于堆积体前沿的颗粒都是最容易起动的, 从图 9c 中可以发现以上两位置的颗粒速度均已接近 0.75 m/s, 颗粒在堆积体顶部表面做接触质、跃移质运动。

为定量分析骨料堆积生长对断面流速分布的影响, 创建监测线实时监测巷道  $x=1.2$  m 处底部到顶部 ( $z=0.2 \sim 0.18$  m) 的流速变化情况。如图 10 所示,  $t=2$  s 时, 骨料开始堆积, 水流流经堆积体时受阻, 进而从堆积体顶部“绕行”, 导致堆积高度以上区域流速增大, 堆积体内部流速降低。 $t=15$  s 时, 骨料堆积稳定, 高度达到极限, 堆积体内部为低速渗流状态, 且不同高度流速大致相同, 稳定在 0.09 ~ 0.11 m/s 之间, 由此证明了 1.1 基本假定 2 的合理性。

3.3 骨料堆积体形态差异分析

分别在初始流速 0.3、0.5、0.8 m/s 及静水条件下以相同灌注速度灌注中值粒径 10、15、20 mm 骨料颗粒, 测试其堆积形态的差异。

如图 11 中虚线所示, 根据张红武公式<sup>[23]</sup>, 静水中 3 种粒径骨料颗粒的水下休止角分别为: 33.57°、34.56°、35.27°。理论公式值, 模拟试验值及张红武公式值吻合程度较好, 相对误差最大值仅为 1.26%。

如图 11 中实线所示, 动水休止角  $\psi$  随流速增大呈抛物线型趋势减小, 根据詹义正<sup>[19]</sup>的研究, 将动水休止角为 0 时所对应的流速定义为平床流速  $U_p$ 。3 种粒径颗粒的  $U_p$  分别为: 1.03、1.19、1.33 m/s。流速

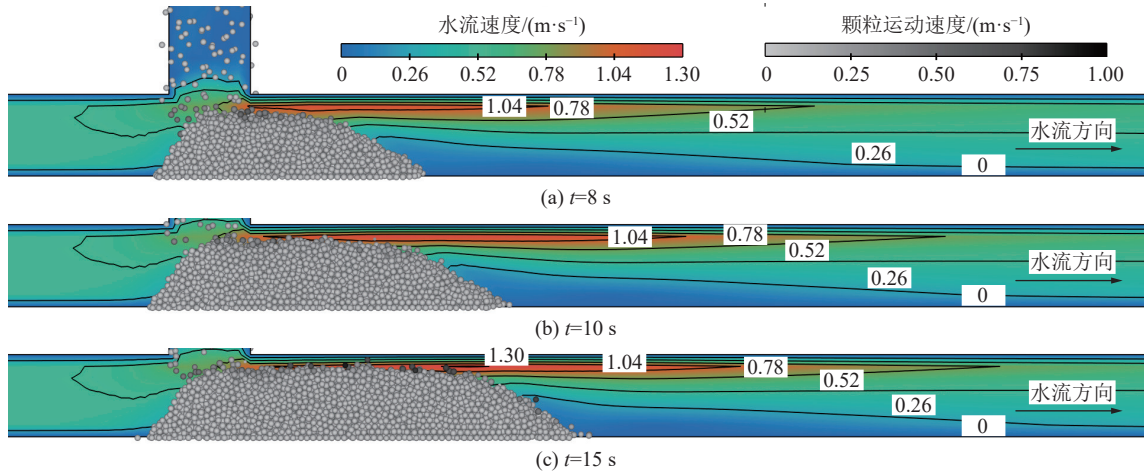


图 9 灌注期间骨料堆积形态及流速分布

Fig.9 Stacking morphology of aggregates and velocity distribution during pouring

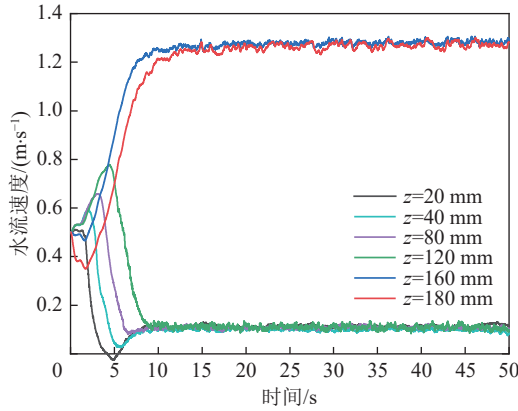


图 10 巷道横断面不同高度处流速变化曲线

Fig.10 Evolution of velocity at different height in a section

与平床流速比值  $K$  为相对流速, 当  $K \in (0, 0.5)$  时, 动水休止角的大致范围为  $27^\circ \sim 35^\circ$  (图 12), 颗粒自身内摩擦系数作为影响动水休止角的主导因素, 内摩擦系数越大则动水休止角越大, 此时流速对动水休止角影响较小。当  $K \in (0.5, 1)$  时, 流速对动水休止角的影响作用不断增强, 相同流速条件下, 粗颗粒的动水休止角大于细颗粒, 对流速变化的敏感度低于细颗粒 (图 11、12), 该趋势与文献 [19] 中得到的结论一致, 但流速增大对于堆积体内部孔隙率的影响较弱, 如表 2 所示, 最大变化值仅有 2.02%。

### 3.4 骨料堆积生长预测模型验证分析

1) 试验方案设计。依据以往工程案例, 截流初期巷道内流速一般为  $0 \sim 0.5$  m/s, 但骨料堆积临近接顶时, 顶区流速可达初始流速的数倍以上 [4]。因此, 同时在高流速 (流速大于 0.5 m/s) 条件下开展骨料堆积过程及截流阻水机理研究对截流工程施工更具有指导意义 [17]。截流堵水工作中, 由于初期流速较小,

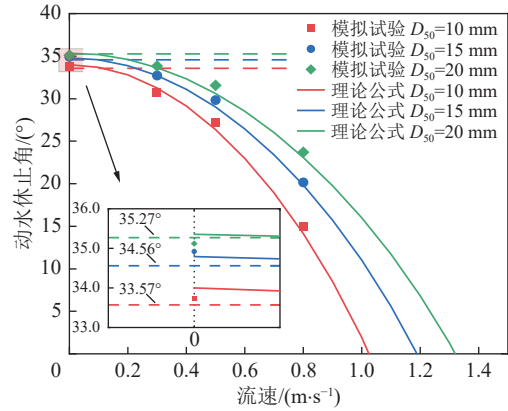


图 11 动水休止角理论公式值与试验数据对比

Fig.11 Comparison between theoretical formula and experiment for dynamic repose angle

先灌注  $5 \sim 10$  mm (小石子) 骨料进行铺底, 抬升巷道内水流流速, 然后灌注粒径  $10 \sim 30$  mm (中石子) 骨料对巷道进行充填 [35], 接顶阶段会混合灌注粒径超过 30 mm (大石子) 的骨料。重点研究内容为充填阶段的骨料堆积生长, 因此选取中值粒径  $D_{50}$  为 15 mm 的骨料颗粒开展模拟试验。试验过程中保持进水口初始流速及灌注速度恒定不变, 试验方案见表 3。

2) 结果对比分析。预测模型中各参变量取值与模拟试验一致, 关键参量取值由理论公式计算得到, 孔隙率  $\varepsilon$  根据 3.3 节模拟试验结果取值。由图 13 可以看出预测模型能够较好的反映堆积体高度及长度随时间的演化规律。灌注速度越大, 水流速度越低, 堆积高度增长速度越快, 第 1 阶段持续时间越短; 相同灌注速度下, 初始流速越高, 堆积体极限高度越小, 堆积长度增速越快。如图 13a 所示, 灌注开始后, 堆积高度呈线性迅速增长,  $\Phi=2.0$  kg/s 条件下,  $t=8$  s 时, 已达极值 (168.33 mm) 的 93.5%, 此时骨料堆积生长

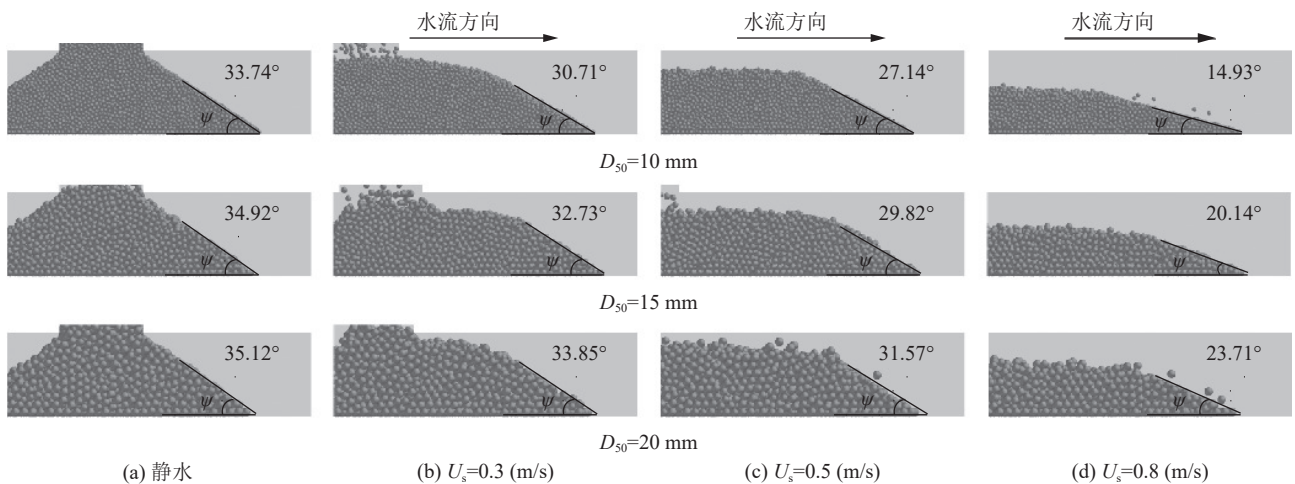


图 12 不同流场中骨料堆积形态差异对比

Fig.12 Comparison of differences in aggregate stacking morphology in different flow fields

表 2 骨料堆积体内部孔隙率  
Table 2 Porosity of aggregate accumulation

粒径/mm	初始流速/(m·s <sup>-1</sup> )	孔隙率/%
10	0	41.17
	0.3	42.48
	0.5	42.74
	0.8	43.06
15	0	41.53
	0.3	43.05
	0.5	43.27
	0.8	43.55
20	0	42.25
	0.3	42.74
	0.5	43.02
	0.8	43.69

仍处于高度快速增长阶段; 8 s 后过渡至第 2 阶段, 高度增速放缓呈抛物线型增长趋势, 长度与高度同步生长; 直至水流携砂能力  $q_s$  与灌注速度  $\Phi$  达到平衡,

表 3 模拟试验方案  
Table 3 Simulation test scheme

编号	初始流速/(m·s <sup>-1</sup> )	粒径/mm	灌注速度/(kg·s <sup>-1</sup> )
方案一	0.5	15	0.5、1.0、2.0
方案二	0.3、0.5、0.8	15	1.0

顶区流速  $U$  达到骨料留存临界流速  $U_{cr}$ , 生长进入第 3 阶段,  $t=15$  s 时, 堆积体垂向高度已达到极限。在水平长度方面, 其初期增长呈“凹”型曲线 (图 13b、图 13d); 若堆积体生长顺利过渡至第 3 阶段, 堆积长度将呈线性增长趋势。若初始流速与灌注条件不匹配, 灌注过程将面临堵孔风险, 如图 13c,  $t=25$  s 时, 骨料堵塞投料孔, 而此时堆积段长度不足, 增势趋于平缓 (图 13d 中红色曲线), 导致堆积体抵抗水力冲击的能力较弱。

灌注初期, 堆积高度模拟试验值略低于理论公式计算值 (图 13a、图 13c), 长度方面则情况相反 (图 13b、图 13d)。分析原因: 由于前期堆积还未形成稳定结构, 颗粒间存在相对移动, 空隙较大, 且实际

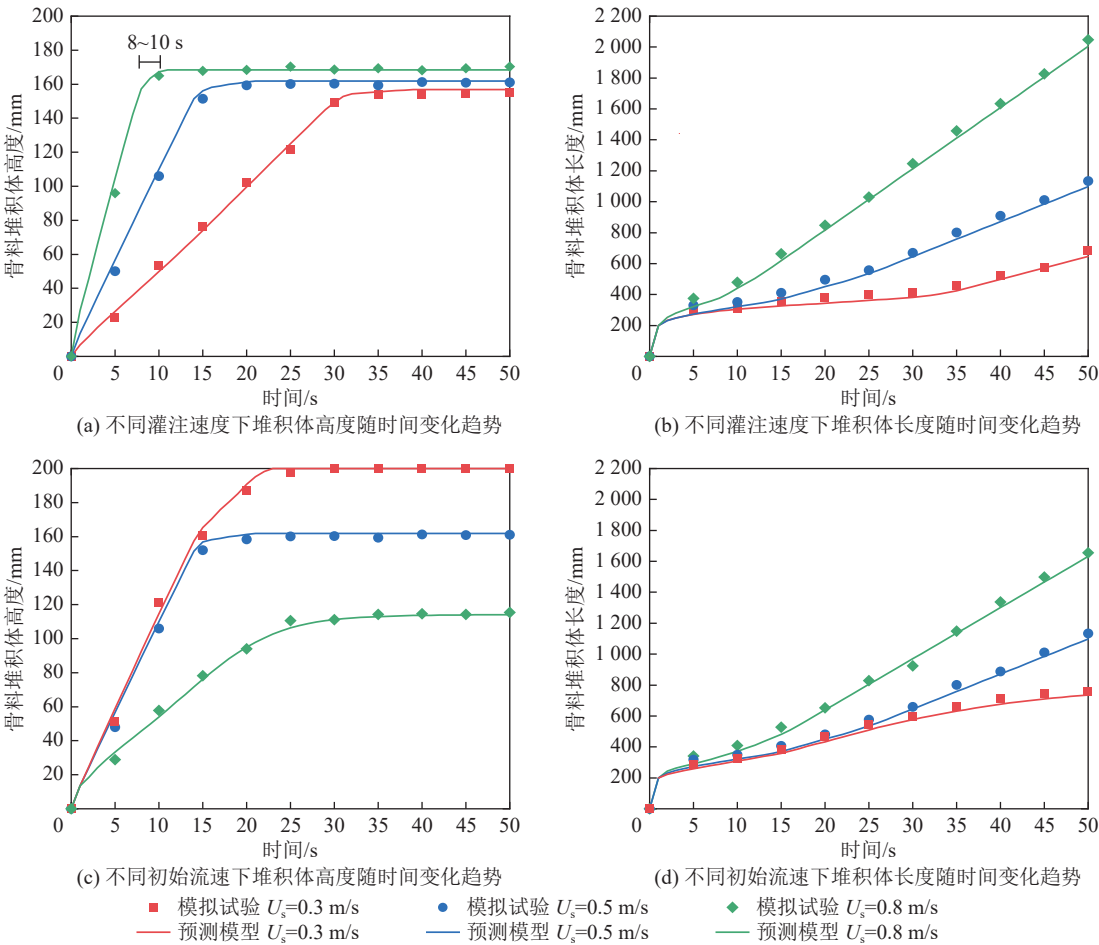


图 13 预测模型与模拟试验结果对比

Fig.13 Comparison between prediction model and simulation test

的坡面角度小于理论公式动水休止角计算值,因此两结果的相对误差较大(表 4)。但随着骨料的持续灌注,内部骨料受到压力不断增大,颗粒相互挤压,空隙随之减小达到稳定,堆积体坡角接近动水休止角理论计算值。10 s 后,预测模型值与模拟试验值之间的“误差带”带宽逐渐缩小(图 13),相对误差最大值( $e_{y,max}$ 、 $e_{l,max}$ )均小于 10%,由此可以认定截流初期的结果误差并未对后续计算产生较大影响,预测模型具有较高的计算精度。

表 4 预测模型与模拟试验误差统计

Table 4 Statistical analysis of relative errors between prediction model and simulation test

$t/s$	$e_{y,max}/\%$		$e_{l,max}/\%$	
	方案一	方案二	方案一	方案二
5	15.2	18.0	16.9	17.7
10	6.6	6.6	8.8	9.9
15	3.0	3.2	9.7	8.6
20	2.7	1.9	9.3	8.1
25	3.0	3.8	8.5	7.7
30	1.0	1.0	6.6	3.4
35	1.6	1.6	7.4	5.5
40	1.8	0.8	4.4	5.4
45	1.6	0.7	2.6	4.5
50	1.2	1.1	6.0	3.3

注： $e_{y,max}$ 为堆积高度相对误差最大值； $e_{l,max}$ 为堆积长度相对误差最大值

## 4 结 论

1) 分析了灌注初期骨料沉积主域的所在位置与初始流速间响应关系,将其在空间上分为 3 个区域,若沉积主域位于区域③,则标志着骨料灌注后无法留存堆积,属于无效灌注。截流降速工程中应根据水流条件制定合理的骨料灌注方案,包括灌注速度、骨料粒径。

2) 研究了骨料灌注过程中由于堆积体床面颗粒沿休止角塌落,流速抬升导致颗粒沉降时水平移距增大,以及颗粒着床后被高速水流二次起带离等因素在堆积体生长过程中的作用机理,据此提出了静水和动水条件下堆积高度及长度预测模型;分析了导致堵孔现象发生的原因,建立了动水中骨料灌注堵塞投料孔的临界判据。

3) 考虑了动水环境中骨料堆积体内孔隙率等因素,得出了巷道顶部未接顶区流速估算方法;对堆积体坡面颗粒受力分析,提出了骨料动水休止角计算

公式;根据颗粒沉降时的受力情况,提出了颗粒水平移距计算公式;基于床面层能量平衡方程,提出了水流携砂能力和骨料留存临界流速计算公式。

4) 建立了考虑初始流速、灌注速度、骨料粒径、骨料摩擦系数和水流黏度系数等因素的数值模型,模拟了骨料在动水环境中的堆积过程,研究了流场随骨料灌注的演化规律,对比分析了不同流场中骨料堆积形态的差异,验证了预测模型计算结果的可靠性。

## 参考文献(References):

- [1] 姬中奎. 矿井大流量动水注浆细骨料截流技术[J]. 煤炭工程, 2014, 46(7): 43-45.  
JI Zhongkui. Fine aggregate grouting closure technology of high flow running water in mine[J]. Coal Engineering, 2014, 46(7): 43-45.
- [2] 邵红旗, 王 维. 双液注浆法快速建造阻水墙封堵突水巷道[J]. 煤矿安全, 2011, 42(11): 40-43.  
SHAO Hongqi, WANG Wei. Rapid construction of water blocking wall by double liquid grouting method to block water inrush roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(11): 40-43.
- [3] 牟 林. 过水大断面截流堵巷工程若干关键技术问题的探讨[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3525-3535.  
MOU Lin. Discussion on key technical problems of water cutting-off engineering in submerged roadway with large-cross section[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3525-3535.
- [4] 董书宁, 牟 林. 突水淹没矿井动水巷道截流阻水墙建造技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 294-303.  
DONG Shuning, MOU Lin. Study on construction technology of water blocking wall in hydrodynamic pathway of submerged mine due to water inrush[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 294-303.
- [5] 杨志斌, 董书宁. 动水大通道突水灾害治理关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(4): 110-116.  
YANG Zhibin, DONG Shuning. Key technology of water inrush disaster control under hydrodynamic large channel condition[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 110-116.
- [6] 惠 爽. 矿井淹没巷道多孔灌注骨料封堵模拟试验[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018: 14-57.  
HUI Shuang. An experimental investigation on pouring aggregate to plug an inundated mine tunnel through boreholes[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018: 14-57.
- [7] 李 军. 地铁突水抢险中粗骨料注浆快速封堵数值模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021: 21-48.  
LI Jun. Numerical simulation study on rapid plugging of coarse aggregate grouting in subway water inrush rescue[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021: 21-48.
- [8] 沈 淇, 顾峰峰, 万远扬, 等. 基于泥沙随机交换过程及不同推移形式的推移质输沙公式[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(3): 599-610.  
SHEN Qi, GU Fengfeng, WAN Yuanyang, et al. A formula for



- bedload transport based on the stochastic sediment interchanges and the different motion patterns[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(3): 599–610.
- [9] 牟林,董书宁.截流巷道骨料堆积体中浆液运移规律与阻水机制[J].*地下空间与工程学报*, 2020, 16(6): 1891–1900.
- MOU Lin, DONG Shuning. Migration rule and water blocking mechanism of cement slurry in aggregate accumulation of underground tunnel closure[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(6): 1891–1900.
- [10] 陈光国,阳宁,唐达生,等.垂直管道颗粒及颗粒群沉降运动规律研究[J].*泥沙研究*, 2010(4): 16–21.
- CHEN Guangguo, YANG Ning, TANG Dasheng, *et al.* Study on the settling regularity of solid particles in vertical pipelines[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(4): 16–21.
- [11] 苏东升.基于CFD-DEM耦合模拟方法的水流泥沙运动研究[D].天津:天津大学, 2015: 8–21.
- SU Dongsheng. Study on flow and sediment movement based on CFD-DEM coupling simulation method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015: 8–21.
- [12] 周宗青,李利平,石少帅,等.隧道突涌水机制与渗透破坏灾变过程模拟研究[J].*岩土力学*, 2020, 41(11): 3621–3631.
- ZHOU Zongqing, LI Liping, SHI Shaoshuai, *et al.* Study on tunnel water inrush mechanism and simulation of seepage failure process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3621–3631.
- [13] 詹义正,寇树萍.球体的移距及稳定移距公式[J].*武汉水利电力大学学报*, 1996, 29(2): 85–90.
- ZHAN Yizheng, KOU Shuping. Equations of sphere's falling distance[J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 1996, 29(2): 85–90.
- [14] 姚仕明,梁兰,刘卫峰,等.抛石移距规律初探[J].*武汉水利电力大学学报*, 1997, 30(6): 24–27.
- YAO Shiming, LIANG Lan, LIU Weifeng, *et al.* Preliminary study of throwing distance of riprap[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 1997, 30(6): 24–27.
- [15] 姚令侃,李仕雄,蒋良淮.自组织临界性及其在散粒体研究中的应用[J].*四川大学学报(工程科学版)*, 2003, 35(1): 8–14.
- YAO Lingkan, LI Shixiong, JIANG Liangwei. Self-organized criticality and its application in granular mixtures[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2003, 35(1): 8–14.
- [16] 何文社,方铎,曹叔尤,等.泥沙起动判别标准探讨[J].*水科学进展*, 2003, 14(2): 143–146.
- HE Wenshe, FANG Duo, CAO Shuyou, *et al.* Study on standards for incipient motion of sediment[J]. *Advances In Water Science*, 2003, 14(2): 143–146.
- [17] 牟林.动水条件巷道截流阻水墙建造机制与关键技术研究[D].北京:煤炭科学研究总院, 2021: 29–92.
- MOU Lin. Study on construction mechanism and key technology of water-blocking wall in hydrodynamic pathway[D]. Beijing: Chinese Institute of Coal Science, 2021: 29–92.
- [18] 范玉.水沙两相流理论及引水工程管道输沙问题的研究[D].天津:天津大学, 2014: 88–110.
- FAN Yu. Study on the theory of water-sediment two-phase flow and the problem of sediment transport in the pipeline of water diversion project[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 88–110.
- [19] 陈立,宋涛,李东峰,等.侧向水流作用下均匀沙休止角变化的试验研究[J].*泥沙研究*, 2017, 42(3): 1–6.
- CHEN Li, SONG Tao, LI Dongfeng, *et al.* Experiment study on repose angle of uniform sand under influence of lateral flow[J]. *Journal of Sediment Research*, 2017, 42(3): 1–6.
- [20] 马子普,张宝森,邓宇,等.适用于明渠流及冰盖流的统一泥沙颗粒起动流速公式[J].*水利学报*, 2021, 52(8): 969–978.
- MA Zipu, ZHANG Baosen, DENG Yu, *et al.* Unified incipient velocity formula of non-cohesive sediments for open channel flow and ice-cover flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(8): 969–978.
- [21] 张红武,汪家寅.沙石及模型沙水下休止角试验研究[J].*泥沙研究*, 1989(3): 90–96.
- ZHANG Hongwu, WANG Jiayin. Experimental study on underwater angle of repose of sand and model sand[J]. *Journal of Sediment Research*, 1989(3): 90–96.
- [22] 夏永水,廖世智,肖志建.基于床面层能量平衡关系的推移质输沙率计算式[J].*水利水电工程学报*, 2006(4): 1–9.
- XIA Huayong, LIAO Shizhi, XIAO Zhijian. Formula for bedload sediment transport rate based on energy balance relationship within bed-surface layer[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2006(4): 1–9.
- [23] 张红武,张俊华,卜海磊,等.试论推移质输沙率公式[J].*南水北调与水利科技*, 2011, 9(6): 140–145.
- ZHANG Hongwu, ZHANG Junhua, BU Hailei, *et al.* Discussion of bed-load transport equations[J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(6): 140–145.
- [24] 张红武,张清.黄河水流挟沙力的计算公式[J].*人民黄河*, 1992, 14(11): 7–9, 61.
- ZHANG Hongwu, ZHANG Qing. Formula of sediment carrying capacity of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 1992, 14(11): 7–9, 61.
- [25] Bagnold. The flow of cohesionless grains in fluids[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1956, 249(964): 235–297.
- [26] 贺梦杨,尚海鑫,张宽地,等.仿机翼形便携式量水槽水力特性试验与数值模拟[J].*农业工程学报*, 2021, 37(12): 117–124.
- HE Mengyang, SHANG Haixin, ZHANG Kuandi, *et al.* Hydraulic performance experiments and numerical simulation of portable water measuring flume of imitating airfoil shape[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(12): 117–124.
- [27] BAGNOLD. The nature of saltation and of 'bed-load' transport in water[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences*, 1973, 332(1591): 473–504.
- [28] 张红武,张罗号,彭昊,等.冲积河流糙率由来与计算方法研究[J].*水利学报*, 2020, 51(7): 774–787.
- ZHANG Hongwu, ZHANG Luohao, PENG Hao, *et al.* Research on cognition and calculation method of alluvial river roughness[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(7): 774–787.

- [ 29 ] 何文社, 方 铎, 杨具瑞, 等. 泥沙起动流速研究[J]. 水利学报, 2002, 33(10): 51–56.  
HE Wenshe, FANG Duo, YANG Jurui, *et al.* Study on incipient velocity of sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(10): 51–56.
- [ 30 ] 牟 林, 董书宁, 郑士田, 等. 基于 CFD-DEM 耦合模型的阻水墙建造过程数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 481–491, F0002, F0003.  
MOU Lin, DONG Shuning, ZHENG Shitian, *et al.* Numerical simulation of construction of water-blocking wall based on CFD-DEM coupling method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 481–491, F0002, F0003.
- [ 31 ] 王 胤, 艾 军, 杨 庆. 考虑粒间滚动阻力的 CFD-DEM 流-固耦合数值模拟方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1771–1780.  
WANG Yin, AI Jun, YANG Qing. A CFD-DEM coupled method incorporating soil inter-particle rolling resistance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1771–1780.
- [ 32 ] 刘巨保, 王 明, 王雪飞, 等. 颗粒群碰撞搜索及 CFD-DEM 耦合分域求解的推进算法研究[J]. 力学学报, 2021, 53(6): 1569–1585.  
LIU Jubao, WANG Ming, WANG Xuefei, *et al.* Research on particle swarm collision search and advancement algorithm for cfd-Dem coupling domain solving[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(6): 1569–1585.
- [ 33 ] TSUJI Y, TANAKA T, ISHIDA T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe[J]. *Powder Technology*, 1992, 71(3): 239–250.
- [ 34 ] GIDASPOW D. Hydrodynamics of fluidization and heat transfer: supercomputer modeling[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1986, 39(1): 1–23.
- [ 35 ] 蒋勤明. 大埋深突水巷道“阻水段”骨料灌注技术 [C]//2017 年钻探工程学术研讨会论文集. 鄂尔多斯: 中国煤炭学会钻探工程专业委员会, 2017: 210–212.  
JIANG Qinming. Aggregate pouring technology for "water blocking section" of deep water inrush pathway[C]//Proceedings of the 2017 Symposium on Drilling Engineering. Ordos: Drilling Engineering Professional Committee of China Coal Society, 2017: 210–212.