

# 基于Fluent的分级尾砂料浆满管流输送技术

王新民, 贺严, 陈秋松

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 针对某矿山分级尾砂充填料浆自由下落对管道产生严重磨损的现状, 引入分级尾砂料浆满管流输送技术。基于Fluent软件, 并结合运用工程流体力学和深井管道输送相关理论, 对不同充填倍线条件下的分级尾砂料浆满管流输送的工作特性进行了数值分析。结果表明, 满管流输送相对于自由下落系统可以大大降低料浆对管道的冲击磨损和管道所受的压力, 且分级尾砂满管流输送系统的管道出口压力随充填倍线的增大而减小, 系统总压力基本保持不变; 管径的变化对充填料浆的水力坡度具有很大影响, 变径管措施有助于深井充填中实现满管流输送; 当充填倍线  $N=6.0$  时, 该矿山分级尾砂在实现满管流输送的同时, 弯管处压力损失达到最小值  $0.247\text{ MPa}$ 。

**关键词** 分级尾砂; 满管流; Fluent数值分析; 充填倍线

**中图分类号** TD8

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.007

## Full Pipeline Flowing Transportation Technology of Classified Tailings Based on the Fluent Software

WANG Xinmin, HE Yan, CHEN Qiusong

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** In view of the serious wear on the pipeline owing to the free falling of the classified tailing slurry, a classified tailing slurry full pipeline flowing transportation technology is adopted. Combining with the related transportation theory of Engineering Fluid Mechanics and for deep level pipelines, the classified tailing slurry under different stowing gradient conditions with full pipeline flowing characteristics of transportation is numerically simulated based on the Fluent software. It is shown that compared with the free fall system, the full pipeline flowing system greatly reduces the impact abrasion and pressure to the pipeline. The outlet pressure of the classified tailing full pipeline flowing conveying system increases with the stowing gradient, and the total pressure remains constant; the diameter has a great influence on the hydraulic slope of the filling slurry, the measures of adjusting the pipeline are beneficial to the full pipeline flowing transportation in deep mines; when the pipe length-backfilling depth ratio  $N=6.0$ , the pressure loss of the classified tailings reaches the minimum of  $0.247\text{ MPa}$ .

**Keywords** classified tailings; full pipeline flowing; Fluent numerical analysis; pipe length-backfilling depth ratio

充填采矿法将地表堆积废料回填到井下处理采空区, 成为深井最安全、高效、环保的采矿方法。良好的充填料浆管道输送性能是成功运用充填法开采的必要前提, 特别是深井高浓度料浆的管道输送性能研究显得尤其重要<sup>[1]</sup>。但分级尾砂深井管道输送系统由于料浆自由下落运行速度高, 充填料粒级大、颗粒形状不规则, 对充填管道产生严重的冲击磨损,

难以控制。

目前, 针对分级尾砂充填料浆自由下落对管道产生严重磨损的问题, 国内外的主要研究方向集中在钻孔修复和管道材料研制上。郑晶晶<sup>[2]</sup>通过AHP量化分析方法对金川矿区的充填钻孔磨损因素进行了定量分析, 并提出了充填钻孔内充填管道不耦合安装新技术; Steward<sup>[3]</sup>针对南非金矿充填管

收稿日期: 2013-08-20; 修回日期: 2013-10-28

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAB32B03)

作者简介: 王新民, 教授, 研究方向为采矿与充填技术, 电子信箱: wxm1958@126.com

引用格式: 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): 55-58.

道冲击磨损严重的问题,研制了新型耐磨金属管道进行了应用分析并加以推广。但高压头分级尾砂料浆满管流输送技术尚缺乏客观、系统的研究,大多是通过类比法、经验公式及相关实验来确定充填管道运行特征参数,带有极大的主观性,且耗费大量人力、财力和时间<sup>[4]</sup>。

Fluent 是基于完全非结构化网络的有限体积法的高真度三维流体动力学和传热分析软件,具有丰富的物理模型、先进的数值方法和强大的前后处理功能<sup>[5]</sup>。本文运用该软件模拟不同充填倍线条件下分级尾砂满管流输送状态下的性能,分析了浆体直管进出口压力、弯管进出口压力、流量和流度等重要技术参数,选择合适的管道运行特征参数,使管道压力损失值达到最小,以期为分级尾砂满管流运输系统的经济可靠运行提供参考。

## 1 自由下落输送系统

### 1.1 自由下落输送系统简介

在自流充填系统中,料浆流动的动力来自料浆在垂直管段产生的静压头。假设某充填系统管道垂直高度为  $H$ , 水平管长  $L$ , 料浆体重  $\gamma$ , 摩擦阻力损失  $i$ , 则一个正常的自由下落输送系统有下面两种情况: 当  $\gamma H = i_s(H+L)$  时, 料浆的压头正好平衡掉其沿程阻力损失, 系统处于满管流动状态; 当  $\gamma H > i_s(H+L)$  时, 系统中料浆的自然压头过剩, 垂直管段上部处于自由下落流动状态。分级尾砂料浆在垂直管中的自由下落输送系统如图 1 所示。

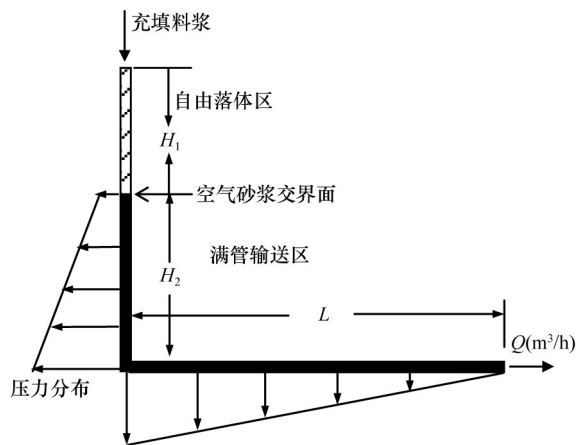


图 1 单段自由下落输送系统

Fig. 1 Conveying system of single free falling

### 1.2 自由下落输送系统的缺陷

1) 在自由下落带中, 砂浆的最终速度很高, 可能达到 50 m/s 甚至更高, 高速流动的砂浆向管壁迁移冲刷导致管路的高速磨损。如果垂直管段带有偏斜, 管路局部的磨损将更加严重, 自由降落带管道磨损截面如图 2 所示。

2) 料浆在空气与砂浆界面因碰撞产生的冲击压力是巨大的, 这种巨大的冲击力可导致管路的破裂<sup>[6]</sup>, 如图 3 所示。

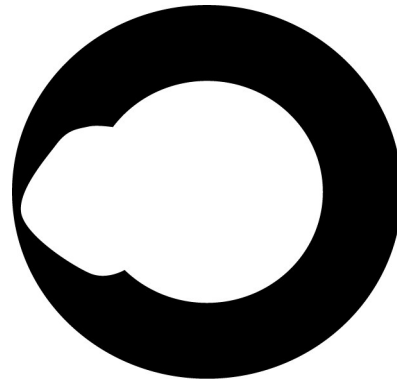


图 2 80 mm 管因砂浆自由降落而磨损的截面示意

Fig. 2 Schematic diagram of damage in 80 mm ducts for free falling slurry

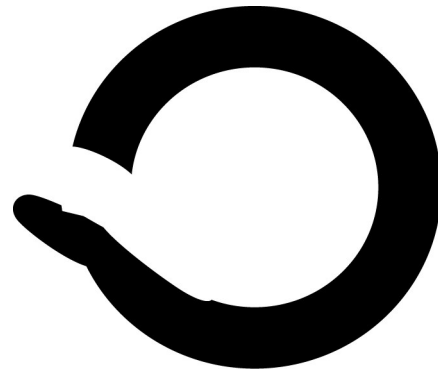


图 3 充填管在空气-砂浆界面处磨损的截面示意

Fig. 3 Schematic diagram of damage in the air-mortar interface

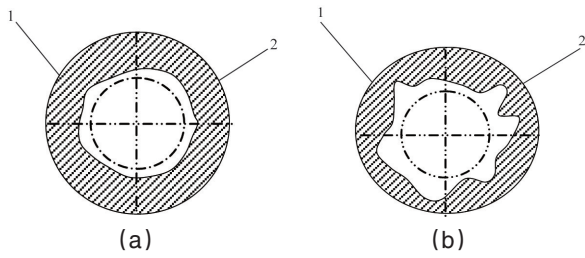
3) 由于在垂直管段, 料浆存在自由降落区域, 给垂直管和水平管的交界处产生了巨大的压力, 同时由于此部分料浆的流向发生突然的转变, 料浆对管壁的法向冲击力非常大, 因此加快了管道的局部磨损, 管壁穿孔现象十分严重<sup>[7]</sup>。

## 2 分级尾砂料浆满管流工作原理及应用

### 2.1 满管流输送原理

当系统的有效水头等于垂直管段高度时, 说明此时系统没有剩余水头, 处于理想状态, 即为满管流状态, 此时, 砂浆在整个管路中平稳流动。要在深井充填中形成满管流状态, 必须采取有效措施, 使系统的有效水头等于垂直管段高度, 从而消除垂直管段的自由下落现象, 才能将垂直管段磨损降低到最低程度<sup>[8-10]</sup>。

满管流动系统的最大优点是, 管道局部冲击磨损率大大降低, 从而破坏减轻<sup>[11]</sup>。满管流动系统与自由下落系统管道的磨损情况对比见图 4。由图 4 可见, 满流系统管道的磨损平整均匀, 磨损率较低, 而自由下落系统管道的磨损极其剧烈, 往往会无规律出现, 形成沟槽磨损形状, 这些沟槽破损往往会导致管道裂口式损坏。



1—管道原来的内表面;2—磨损后的管道内表面

图4 满管流情况(a)和自由下落情况(b)下的磨损形式  
Fig. 4 Wear condition of full pipeline flowing (a) and free falling slurry (b)

将水平管道与垂直管道相结合,可形成一个满管流输送组合系统,如图5所示。图5中两条曲线的交点A代表系统处于平衡的点,此时全部可用的压头(即垂直立管中的料浆产生的静压头)全部消耗于垂直立管和水平管,即:可用静压头( $H_{总}$ )=消耗于井筒立管或钻孔的压头( $H_s$ )+消耗于水平管段的压头( $H_A$ )。

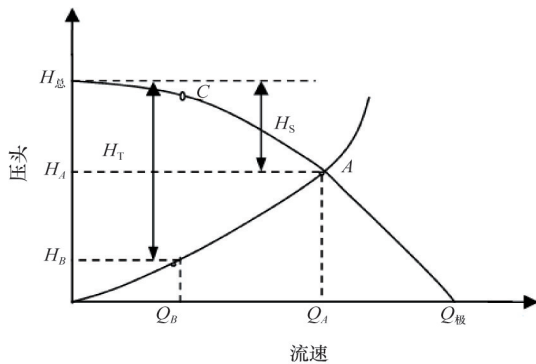


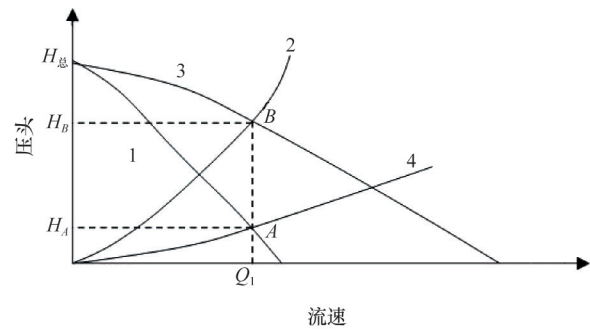
图5 满管流管网系统曲线

Fig. 5 Curves of full pipeline flowing network system

该系统处于流速为 $Q_1$ 的满流状态,即以最高的流速流动。在流速低于 $Q_1$ ,即在平衡点A的左边时,该系统未处于平衡状态,为自由下落输送系统。如流速为 $Q_B$ 时,水平管段内的摩擦会引起充填料浆的空气-砂浆界面回行到 $H_B$ 的高度,最高压力为 $H_T$ ,此时垂直管道输送曲线处于C点。但当存在自由下落状态时,充填料浆的流动不再是连续的,一般的摩擦流动关系不再成立,可用压头的其余部分消耗于垂直管道自由落体部分的湍流方面,因此磨损形式不规则,磨损速率很高。

如改变垂直管或水平管直径,则起离心泵作用的“泵”曲线和系统曲线的斜度都会发生变化,如图6所示。由图6可见,两种不同的管道系统在满流状态下的流速 $Q_1$ 相同。

在由小直径垂直管道和大直径水平管道组成的系统中,大部分可利用的静压头都消耗在垂直管道的摩擦阻力损失方面(在平衡点A)。消耗在水平管道方面的压头很小( $H_A$ ),因而导致在水平管道方面的系统压力低,流速适当。



1—井筒小直径立管;2—小直径水平管;  
3—大直径立管;4—大直径水平管

图6 不同管道直径的满管流系统曲线  
Fig. 6 Full pipeline flowing system curves of different pipe diameters

在由大直径垂直管道和小直径水平管道组成的系统中,料浆的静压头几乎没有消耗在垂直管道上面(在平衡点B)。消耗在水平管段的压头很高( $H_B$ ),因而导致在水平管段的系统压力和流速都很高。

### 2.2 分级尾砂料浆在不同直径管道中的压头损失

考虑到充填料浆进入采场之后的脱水问题,充填体固化速度、充填体强度的增长、充填料浆在采场的流动速度不能大于其沉降速度等因素,对细粒级含量应该加以限制。计算所用的分级尾砂来自于某矿山选场,其中粒径小于0.1 mm的颗粒占25.5%,60.9%的颗粒粒径介于0.1~0.3 mm之间,剩余13.6%的颗粒粒径为0.3~0.6 mm;浆体相对密度为1.60~1.70 t/m<sup>3</sup>,3种不同管径输送的水利坡度计算结果见表1~表3。

从表1~表3可以看出,在垂直管路中,料浆全断面满管流动时的最大流速受“自由降落满管流的末速度”的限制,而这个速度又受每米管道中损失1 m压头时的流速限制,因此不可能形成太高的流速,除非再给系统添加一个附加压头。

表1 不同浆体密度下内径为49.3 mm管道中  
分级尾砂的压头损失

Table 1 Pressure loss of classified tailings in 49.3 mm ducts in different slurry density

流速/ (m · s <sup>-1</sup> )	压头损失/kPa			
	1.00 t · m <sup>-3</sup>	1.60 t · m <sup>-3</sup>	1.65 t · m <sup>-3</sup>	1.70 t · m <sup>-3</sup>
1.5	1.383	1.026	1.086	1.150
2.0	1.523	1.632	1.746	2.028
2.5	1.903	2.422	2.819	3.004
3.0	1.963	3.687	3.908	4.160
3.5	2.644	4.884	5.169	5.494
4.0	3.424	6.245	6.600	7.005
4.5	4.305	7.769	8.199	8.689
5.0	5.286	9.455	9.967	10.548

表2 不同浆体密度下内径为42.9 mm管道中  
分级尾砂的压头损失

Table 2 Pressure loss of classified tailings in 42.9 mm ducts in different slurry density

流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	压头损失/kPa			
	$1.00 t \cdot m^{-3}$	$1.60 t \cdot m^{-3}$	$1.65 t \cdot m^{-3}$	$1.70 t \cdot m^{-3}$
1.5	1.074	1.207	1.285	1.371
2.0	1.622	1.941	2.083	2.426
2.5	1.645	3.168	3.367	2.592
3.0	2.335	4.399	4.667	4.973
3.5	3.145	5.826	6.172	6.566
4.0	4.073	7.449	7.879	8.368
4.5	5.121	9.265	9.786	10.377
5.0	6.287	11.274	11.892	12.593

表3 不同浆体密度下内径为38.1 mm管道中  
分级尾砂的压头损失

Table 3 Pressure loss of classified tailings in 38.1 mm ducts in different slurry density

流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	压头损失/kPa			
	$1.00 t \cdot m^{-3}$	$1.60 t \cdot m^{-3}$	$1.65 t \cdot m^{-3}$	$1.70 t \cdot m^{-3}$
1.5	1.246	1.392	1.488	1.596
2.0	1.722	2.255	2.424	2.829
2.5	1.908	3.686	3.920	4.188
3.0	2.709	5.118	5.434	5.796
3.5	3.648	6.778	7.184	7.649
4.0	4.725	8.664	9.168	9.744
4.5	5.939	10.775	11.385	12.080
5.0	7.292	13.108	13.833	14.655

不同管径和浆体密度条件下,与之相对应的砂浆降落的末速度计算结果见表4。从表4可以看出,在3种不同管径条件下,流量为 $20 m^3/h$ 的砂浆速度均低于该管径对应的砂浆降落的末速度。

表4 不同浆体密度下通过垂直管道时分级尾砂料浆的终端流速  
Table 4 Terminal velocity of classified tailing slurry through vertical pipes in different slurry density

管径/mm	终端流速/( $m \cdot s^{-1}$ )		
	$1.60 t \cdot m^{-3}$	$1.65 t \cdot m^{-3}$	$1.70 t \cdot m^{-3}$
49.3	6.55	6.48	6.40
42.9	5.96	5.90	5.82
38.1	5.51	5.44	5.36

### 2.3 分级尾砂不同管径组合的满管流输送方案

变径管满管流输送的系统示意如图7所示。在地表设置储料槽的主要目的是向垂直管道供应过量的充填料,因而确

保垂直管道中的满管流条件,防止由于垂直管道的静压头不足而产生堵管现象。

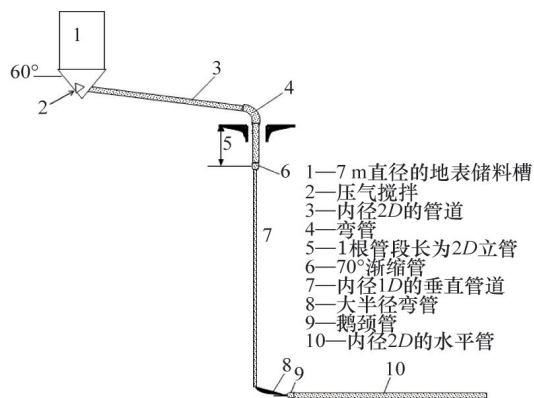


图7 分级尾砂满管流输送系统示意

Fig. 7 Schematic diagram of classified tailing full pipeline flowing transmission system

管路中采用不同的管径组合,浆体密度为 $1.65 t/m^3$ 、流量为 $20 m^3/h$ 时的自由落体段的长度计算结果见表5。从表5可以看出,后3种管径管路的组合条件下料浆的流动状态为满管流动。

表5 充填直管道中自由落体段的长度  
Table 5 Length of free fall backfilling pipeline

选择 方案	垂直管道		水平管道		自由落体柱长 度/mm
	直径 /mm	长度 /mm	直径 /mm	长度 /mm	
1	49.3	1600	49.3	2500	856
2	42.9	1600	42.9	2500	-478°
3	38.1	1600	38.1	2500	-950°
4	42.9	1600	49.3	2500	550
5	49.3	1600	42.9	2500	128
6	49.1	1162	38.1	2500	—
7	49.3	476	49.3	2500	—
8	49.3	1600	49.3	1326	—

注:\*表示没有足够的压头保持 $20 m^3/h$ 的浆体流动。

### 3 Fluent数值计算结果及分析

满管流输送系统的特性参数主要包括充填倍线、料浆工作流速、管道流量、压力4个方面。由Fluent软件数值计算结果可知,模拟的分级尾砂充填系统始终保持满管流状态,当料浆流动稳定时,整个管道系统任意截面的流量基本相等,从而保证了充填管道系统正常、稳定地运行<sup>[12]</sup>。

#### 3.1 直管进出口压力分析

分级尾砂自由下落输送系统与满管流数值计算结果分别如表6和表7所示。可以看出,分级尾砂满管流输送系统的出口压力随充填倍线的增大而减小,系统总压力基本保持

不变;分级尾砂满管流浆体在断面压力分布情况相比自由下落输送系统要小很多,如图8和图9所示。

表6 分级尾砂自由下落输送系统数值计算结果

Table 6 Results of numerical simulation of classified tailing free falling system

充填倍线	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	进口压力 值/kPa	出口压力 值/kPa
5.0	0.021	2.40	4.047	1.603
5.5	0.020	2.33	3.689	1.476
6.0	0.020	2.28	3.366	1.335
6.5	0.020	2.24	3.188	1.253
7.0	0.019	2.19	3.012	1.188
7.5	0.018	2.12	2.843	1.122
8.0	0.018	2.08	2.574	1.078

表7 分级尾砂满管流输送系统数值计算结果

Table 7 Results of numerical simulation of classified tailing full pipeline flowing system

充填倍线	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	进口压力 值/kPa	出口压力 值/kPa
5.0	0.014	1.60	2.762	0.412
5.5	0.013	1.55	2.545	0.326
6.0	0.013	1.52	2.268	0.241
6.5	0.013	1.50	1.987	0.168
7.0	0.013	1.46	1.644	0.112
7.5	0.012	1.42	1.406	0.097
8.0	0.012	1.38	1.132	0.053

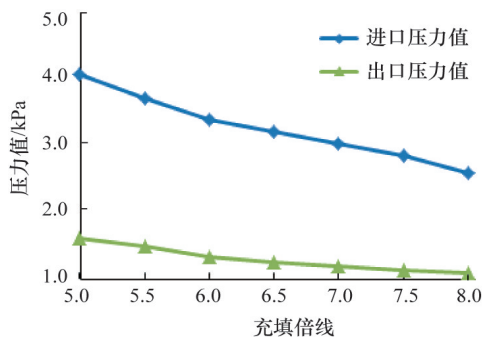


图8 分级尾砂自由下落浆体断面压力分布  
Fig. 8 Pressure profile on section of classified tailing free falling slurry

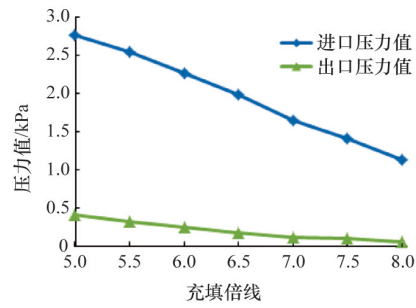


图9 分级尾砂满管流浆体断面压力分布

Fig. 9 Pressure profile on section of classified tailing full pipeline flowing slurry

### 3.2 弯管进出口压力分析

压力损失的增加,意味着流体受到管壁的摩擦加大,即管壁的磨损增加,减低了充填系统的使用寿命,增加了充填系统的使用成本,且垂直管道与水平管道连接处是整个充填管道系统最脆弱的地方<sup>[13,14]</sup>。

分级尾砂满管流输送料浆在弯管处的压力损失情况如图10所示。由曲线可知,充填倍线为6.0时,满管流料浆在弯管处压力损失达到最小值。不同充填倍线下的分级尾砂满管流输送充填系统,弯管连接处的最大压力出现在弯管进口处,而不是理论上的出口处,如表8所示。

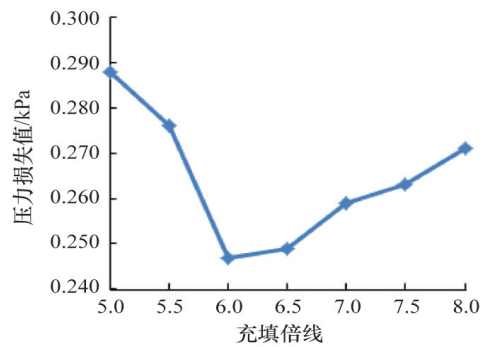


图10 弯管处压力损失曲线

Fig. 10 Pressure loss of bend pipeline

表8 弯管处压力数值计算结果

Table 8 Numerical results of pressure on bend pipeline

充填倍线	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	压力损失值/kPa
5.0	1.702	1.414	0.288
5.5	1.711	1.435	0.276
6.0	1.715	1.468	0.247
6.5	1.722	1.473	0.249
7.0	1.728	1.469	0.259
7.5	1.736	1.473	0.263
8.0	1.741	1.470	0.271

### 3.3 管道流速流量分析

随着充填管道长度的增加,沿程阻力损失随之加大,所

以整个充填系统的流量、流速相应减小<sup>[15]</sup>。当进行满管流输送时,充填系统的实际工作流速值比较接近临界流速,若低于临界流速,料浆颗粒大量沉积,增大管道的阻力与压力,容易堵塞输送管道。分级尾砂满管流浆体水平钻孔底端弯管处流速分布情况如图11所示。

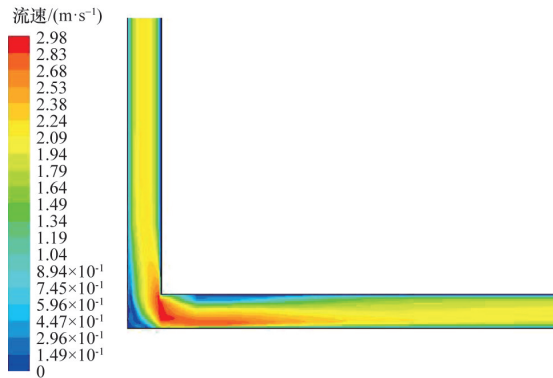


图11 分级尾砂满管流浆体水平钻孔底端弯管处流速分布  
Fig. 11 Velocity profile at horizontal borehole bottom bend of classified tailing full pipeline flowing slurry

#### 4 结论

本文以某矿分级尾砂为例,通过工程流体力学和深井管道输送理论对分级尾砂满管流输送特性进行理论分析,进而运用Fluent流体软件对料浆满管输送进行数值模拟,得出结论如下。

1) 自由下落带最终流速较高,对管道的快速冲刷,使自由下落带的管道磨损最为严重和频繁;高流速导致垂直管道中空气-砂浆界面部分受到极大的料浆冲击,甚至发生管道被压裂的现象。

2) 满管流输送系统由于料浆对管道的磨损率小,管道所受的压力低,尤其适合深井矿山充填需要。通过分级尾砂满管流管网系统曲线对满管流输送系统的实现原理进行了理论分析。

3) 管径的变化对充填料浆的水力坡度具有很大影响,因此变径管措施有助于深井充填中实现满管流输送。可通过确定不同管径垂直管道与水平管道的组合,实现满管流输送。

4) 模拟的分级尾砂充填系统始终保持满管流状态,当料浆流动稳定时,整个管道系统任意截面的料浆流量基本相等,从而保证了充填管道系统的正常、稳定运行。基于Fluent软件,综合考虑各充填倍线在流速、压力损失、流量以及弯管处压力损失比较分析,发现充填倍线为6.0时,实验采用的分级尾砂在实现满管流输送的同时,弯管处压力损失达到最小值0.247 MPa。

#### 参考文献 (References)

[1] 王新民, 古德生, 张钦礼, 等. 深井矿山充填理论与管道输送技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005: 28-31.  
Wang Xinmin, Gu Desheng, Zhang Qinli, et al. Theory and technology of deep mine backfilling [M]. Changsha: Central South University Press,

2005: 28-31.  
[2] 郑晶晶. 金川矿区破损充填钻孔永久修复使用综合技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009: 48-76.  
Zheng Jingjing. A comprehensive study about repeated repair technique of failed pipeline in vertical backfill hole in Jinchuan Mines[D]. Changsha: Central South University, 2009: 48-76.  
[3] Steward N R, Spearing A J S. Wear of backfill pipelines in South African gold mines[C]//4th International Conference on Bulk Materials, Storage, Handling and Transportation: 7th International Symposium on Freight Pipelines Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia, 1992: 115-121.  
[4] 刘同有. 充填采矿技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 42-57.  
Liu Tongyou. Backfilling mining technology and application[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2001: 42-57.  
[5] 李勇, 刘志友, 安亦然. 介绍计算流体力学通用软件—Fluent[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2001, 16(2): 254-258.  
Li Yong, Liu Zhiyou, An Yiran. A brief introduction to Fluent—A general purpose CFD code[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2001, 16(2): 254-258.  
[6] Cooke R. Modeling of the flow of highly concentrated backfill slurries in mine fill[J]. Johannesburg SAIMM, 2008, 23: 225-233.  
[7] Varughese K. *In situ* pipeline rehabilitation techniques, equipment improved[J]. Oil and Gas Journal, 1993, 91: 54-57.  
[8] 王新民. 基于深井开采的充填材料与管输系统的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.  
Wang Xinmin. A study of filling materials and pipeline transportation systems in deep mines[D]. Changsha: Central South University, 2005.  
[9] 许毓海, 许新启. 高浓度充填流变特性及自流输送参数的合理确定[J]. 矿冶, 2009, 13(3): 16-19.  
Xu Yuhai, Xu Xinqi. High concentration backfilling rheological properties and reasonably determine the parameters of self-flowing transportation[J]. Mining and Metallurgy, 2009, 13(3): 16-19.  
[10] Steward N R, Spearing A J S. Effect of particle sharpness of the wear of backfill pipelines[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1993, 93(5): 129-134.  
[11] 王新民, 潘常甲, 徐东升. 变径管满管流系统垂直管道最大高度的确定[J]. 矿业研究与开发, 2008, 26: 76-85.  
Wang Xinmin, Pan Changjia, Xu Dongsheng. Determine the maximum safe height of adjustable vertical pipe in full pipe flow system[J]. Mining Research and Development, 2008, 26: 76-85.  
[12] 王新民, 张德明, 张钦礼, 等. 基于FLOW-3D软件的深井膏体管道自流输送性能[J]. 中南大学学报, 2011, 42(7): 124-131.  
Wang Xinmin, Zhang Deming, Zhang Qinli, et al. Pipeline self-flowing transportation property of paste based on FLOW-3D software in deep mine[J]. Journal of Central South University, 2011, 42(7): 124-131.  
[13] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 125-160.  
Han Zhanzhong, Wang Jing, Lan Xiaoping. Simulation examples and application of FLUENT[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004: 125-160.  
[14] 吴立春. FLUENT软件在水力学中的应用与进展[J]. 重庆教育学院学报, 2009, 3: 21-28.  
Wu Lichun. Development and application of FLUENT software in the hydraulics[J]. Journal of Chongqing College of Education, 2009, 3: 21-28.  
[15] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 76-92.  
Fei Xiangjun. Paste and granular material handling hydraulics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 76-92.

(责任编辑 吴晓丽)