第 29 卷第 5 期 中国有色金属学报 2019 年 5 月
Volume 29 Number 5 The Chinese Journal of Nonferrous Metals May 2019
DOI：10.19476/j.ysxb.1004.0609.2019.05.23

废石−尾砂高浓度料浆管道输送特性模拟

张修香[1]，乔登攀[2]，孙宏生[3]

(1. 东华理工大学 放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室，南昌 330000；
2. 昆明理工大学 国土资源工程学院，昆明 650093；3. 玉溪矿业有限公司大红山铜矿，玉溪 653100)

摘 要：废石−尾砂高浓度充填是解决矿山废尾排放的最有效途径，也是实现绿色采矿的主体支撑技术之一。管道输送特性作为高浓度料浆管道输送的核心内容具有重要的研究意义。本文将矿山实际充填管路进行还原，应用 Fluent 软件进行输送模拟研究，重点以速度、质量浓度对管道自流输送特性及弯管部位的影响进行分析。结果表明：随着速度的增加，管道的阻力损失呈指数增长，弯管底部受到的压力最大。当料浆速度达到 2.8 m/s，料浆浓度为 85%时，浆料无法自流；当料浆速度超过 3.0 m/s 时，阻力损失增长变快；当料浆速度达到 3.2 m/s，料浆浓度达到 84%时，浆料无法自流，也会出现滞留现象，造成堵管。适合高浓度管道自流输送的料浆浓度为 83%~84%。通过半工业实验及矿山实际阻力监测，验证了数值模拟结果的可靠性。

关键词：废石−尾砂充填采矿；自流输送；高浓度料浆；阻力损失；数值模拟
文章编号：1004-0609(2019)-05-1092-10 **中图分类号**：TD853.34 **文献标志码**：A

高浓度充填因具备不离析不沉淀，充填质量好等优点，已成为国内外优选的采矿方法。管道输送技术是高浓度充填的核心技术之一，管道输送系统设计的成败直接关系到充填系统能否正常运行。国内金川有色金属公司、大冶有色金属公司铜绿山矿、江西武山铜矿等矿山先后应用了泵送高浓度膏体充填技术[1−2]。虽然泵压输送不受充填倍线的限制，可以输送高浓度的充填浆体，但是整个泵送系统投资很大，并且维护费用较高，设备的故障率较大[3−4]，不利于矿山长久发展。自流输送依靠浆体自重克服管道阻力进行输送，其工艺简单、经济性好，特别是针对当前深井开采，自流输送的研究显得尤为重要。计算机模拟作为现代研究的一种重要手段，在此方面已被广泛应用。目前国内外专业用于流体分析的软件为 FLUENT[5]。甘德清等[6]针对高浓度全尾砂胶结充填料浆，采用 FLUENT-2ddp 研究了料浆在充填管道内的流动状态。刘杰等[7]采用简单的 L 型管道，基于流体力学及浆体管道自流输送理论，研究了不同配比、不同浓度的料浆与充填倍线及输送阻力间的关系。邓代强等[8]基于此软件研究了充填料浆 L 型管道自流输送模拟实验，同时还分析不同浓度的充填料浆对弯管处的磨损情况 。WANG 等[9]使用 FLUENT 软件对深井煤矿自流输送充填系统中料浆的流动速度进行了研究。吴迪等[10]针对固液两相流，使用 FLUENT 软件对料浆输送的阻力损失和弯管部分的受力情况进行了分析。温震江等[11]将鞍钢张家湾铁矿的充填系统，简化为 L 型管道，应用 FLUENT 对全尾砂充填料浆在管道中的流动情况进行模拟。陈新等[12]运用计算流体力学(CFD)技术建立泡沫砂浆 W 型管长距离管道，对不同配比及不同充填能力料浆输送中管道和弯管处压力、速度进行模拟分析。丁璐等[13]针对磷石膏基充填料浆，运用 FLUENT 软件建立 L 型管道对料浆的管道输送过程进行数值模拟，探究料浆输送过程中的压力、速度、剪切应力的分布规律。张亮等[14]针对高浓度全尾砂充填料浆，建立 L 型管道，采用 FLUENT 软件对料浆管流输送速度分布规律和压力变化规律进行模拟研究。张钦礼等[15]基于某金属矿深井开采充填料浆管道输送系统运行的工程实例，对充填料浆管道输送的动力学过程进行模拟分析。YU 等[16]基于对胶结尾砂充填料浆的特性分析，应用 FLUENT 进行输送模拟，选择的管道直径为 75 mm，结果表明在最大浓度为 65%时，自然流动速度可以达到 2.6 m/s，大于临界速度并能达到采矿生产需求。KUMAR 等[17]的模拟对象为 90°水平管道(直径为 53 mm)，实验使用的颗粒平均直径为

基金项目：江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ160568)；国防重点学科实验室开放基金资助项目(RGET1611)；江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ160567)
收稿日期：2017-12-18；**修订日期**：2019-03-26
通信作者：张修香，讲师，博士，电话：15797936164；E-mail：zxx_lw@126.com

448.5 μm 的硅砂，研究料浆在弯曲处的流动特性，结果表明随着速度的增加管道弯头处的压降有所增加。KAUSHAL 等[18]针对单分散细颗粒应用 FLUENT 进行管道料浆流模拟，通过欧拉模型对浓度和速度的变化进行了预测。

目前国内外对于加有粗骨料(废石)的高浓度料浆研究较少，对其在矿山的应用缺乏理论依据。本文对大红山铜矿的实际充填管路进行建模，以废石、尾砂为原料配置高浓度充填料浆，研究浆体在管道中输送特性，分析输送过程中压力损失随浓度和速度的变化情况，以及弯管处压力损失的情况，确定适合管路输送的料浆浓度与速度，为废石−尾砂高浓度自流充填技术的应用提供理论参考。

1　充填材料

1) 实验中所使用的废石及尾砂均来自大红山铜矿，实验测定废石破碎集料的密度为 2815 kg/m^3，堆集密实度为 0.554，通过 0.25 mm 筛孔的细粒料为 6.4%，颗粒的大小主要集中在 7~15 mm 之间。管输中大颗粒易发生沉积，不利于管道输送，所以废石必须配以细料来改善级配，增大填隙效应和骨料密实度。

2) 尾砂的密度为 2897 kg/m^3，堆集密实度为 0.506，尾砂的加权平均粒径 d_{50}=0.149 mm，尾砂级配指数 n=0.501，级配合理，密实度较好。总体来看，大红山铜矿尾砂粒度比较集中，在 0.097~0.246 mm 粒度区间的占 50%左右，在 0.05~0.097 mm 粒度区间的占 35%左右，粒径小于 74 μm 的细粒料占 20%左右，粒径小于 37 μm 的细粒料占 1.17%。

3) 骨料的堆积密实度能全面反映骨料填隙效应，骨料的堆集密实度最大，则可使充填体骨料之间的填隙效应达到最充分，使骨料之间处于紧密嵌锁状态，这种状态能使混合骨料的强度效应发挥最充分[19]。为了确定废石与尾砂混合最优配比，进行级配实验，实验结果见表 1。根据实验结果选用最优级配废石尾砂质量比为 7:3 进行输送模拟。

表 1　废石破碎集料−尾砂混合堆积密实度

Table 1　Packing density between waste rock and tailings

Waste rock/ mixing quality	Mixture density/ (t·m^{-3})	Packing density, Φ
0	2.897	0.506
0.1	2.889	0.531
0.2	2.880	0.559
0.3	2.872	0.595
0.4	2.864	0.630
0.5	2.855	0.660
0.6	2.847	0.698
0.7	2.839	0.694
0.8	2.831	0.675
0.9	2.823	0.636
1.0	2.815	0.601

2　数值建模

2.1　大红山铜矿充填系统

大红山铜矿充填分为地表充填系统和地下充填系统，地表充填系统主要用于充填料的制备，充填生产水处理、水处理后的底流排放及放砂四个部分[20]。井下充填系统是采用耐磨管道从充填制备站接通到井下各中段充填回风井，井下充填盘区有充填井与充填回风井相连通，料浆经充填管输送到充填盘区充填井口，再从充填井充入采空区。

2.2　几何模型的建立

应用前处理软件 Gambit 模拟大红山铜矿的实际情况，建立物理模型。地表搅拌站的标高为 924 m 水平，通过充填进风斜井进行地下充填部分，到达 640 联道，然后到达 500 措施联道，通过充填钻孔及其联道进入到充填进风斜井，最后到达地下 220 m 充填处。管道的几何模型与实际尺寸及布置方式保持一致，如图 1 所示，为了使地上与地下管路都绘制在一张图上，由于地下部分管道较长，所以绘制比例为 1:10，而实际 Gambit 建模时是按 1:1 的比例进行绘制。充填管道的内直径为 150 mm，弯管处角度如图所示，弯管半径为 1.5 m，总充填倍线为 6.8。弯管处是最易受损的部分，在管道每个弯管直径方向取监测线，共 8 条。

2.3　模拟实验方案

根据大红山铜矿前期实验结果分析[21]，水泥量在 200 kg/m^3，质量浓度(质量分数)为 83%时基本达到高浓度和强度的要求。以此为依据，本次模拟中充填浆体采用废石与尾砂质量比为 7:3，水泥用量为 200~220 kg/m^3，浓度 82%~85%，根据矿山的实际充填能力设定速度分别为 2.0、2.4、2.8、3.0 和 3.2 m/s，模拟方案共 40 组，浆体基本参数如表 2 所示。

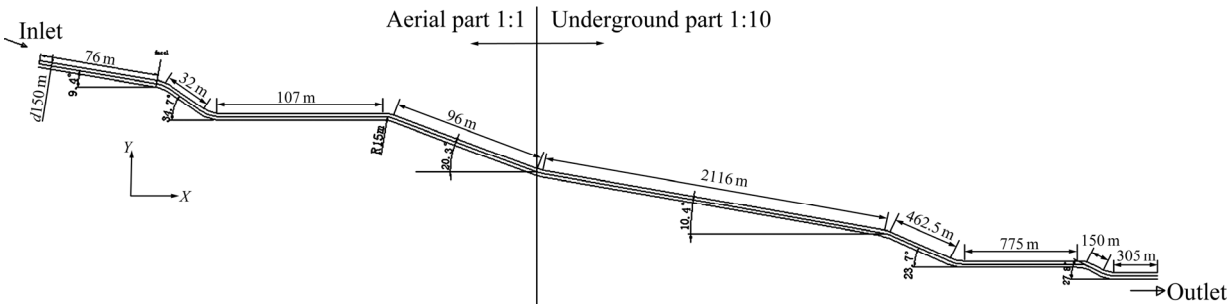

图 1 大红山充填管路

Fig. 1 Route of filling pipeline about Dongshan

表 2 浆体管输模拟方案

Table 2 Simulation scheme of slurry pipeline transportation

Scheme	Cement content/ ($kg·m^{-3}$)	Concentration/ %	Density/ ($kg·m^{-3}$)	Velocity/($m·s^{-1}$)	Consistency index	Flow index	Viscosity/ (Pa·s)	Yield stress/ Pa
1−5	200	82	2145.6	2.0,2.4,2.8,3.0,3.3	0.526	0.920	0.526	19.991
6−10	200	83	2175.66	2.0,2.4,2.8,3.0,3.3	0.573	0.812	0.573	23.711
11−15	200	84	2206.58	2.0,2.4,2.8,3.0,3.3	0.681	0.870	0.681	26.332
16−20	200	85	2238.38	2.0,2.4,2.8,3.0,3.3	0.733	0.862	0.733	32.157
21−25	220	82	2146.87	2.0,2.4,2.8,3.0,3.3	0.641	0.766	0.641	18.782
26−30	220	83	2176.94	2.0,2.4,2.8,3.0,3.3	0.664	0.899	0.664	22.115
31−35	220	84	2207.88	2.0,2.4,2.8,3.0,3.3	0.697	0.926	0.697	26.042
36−40	220	85	2239.70	2.0,2.4,2.8,3.0,3.3	0.781	0.802	0.781	30.803

通过模拟分析，既可以比较不同配比下的料浆管输阻力，又可以对比同种料浆在不同速度下的管输阻力。

2.4 模型设置

根据实验方案在 FLUENT 软件中进行设置，管道入口设置为速度入口(Velocity-inlet)，管道出口设置为自由流(Outflow)，操作条件为标准大气压，在竖直方向存在重力加速度−9.8 m/s^2(y 轴负方向)。选用欧拉法来描述流体运动进行计算，最后输出计算结果。

3 数值模拟结果分析

3.1 速度对管道阻力的影响

通过模拟计算分析发现，方案中的速度整体变化规律是一致的，为了避免重复，在此展示方案 6(充填料浆浓度为 83%、速度为 2.0 m/s)的管道压强分析结果，见图 2。在管道半径方向，越接近圆心速度越大，存在着明显的速度梯度，垂直管段越靠近弯管处，其速度沿着管径的梯度越大。在入口处及其发展段，由于重力的存在，浆体速度逐渐增大，然后趋于稳定。在弯管处，靠近圆心方向的速度相对较大，经过弯管后还有一段发展区间，然后速度才趋于稳定。在第四个到第五个弯管之间，第六个到第七个之间出现最大速度。图 3 显示了弯管管段内浆体速度在断面的变化情况，速度梯度较明显，且会出现最大的速度值。入口速度越大，在弯管处出现的最大速度则越大。

以质量浓度为 82%，水泥量为 200kg/m^3 为例，速度由 2.0 m/s 变化到 3.2 m/s 时，管道入口和出口压强的分析结果见表 3，阻力损失随速度的变化情况如图 4 所示。当料浆速度为 2.0 m/s 时，管道的阻力损失最小。速度对管道阻力损失的影响较明显，随着速度变大，管道的入口和出口压强差明显增大，阻力损失呈指数增长。速度小于 3.0 m/s 时，阻力损失随速度呈线性增长趋势，速度大于 3.0 m/s 后，管道的阻力损失增长速率变大。

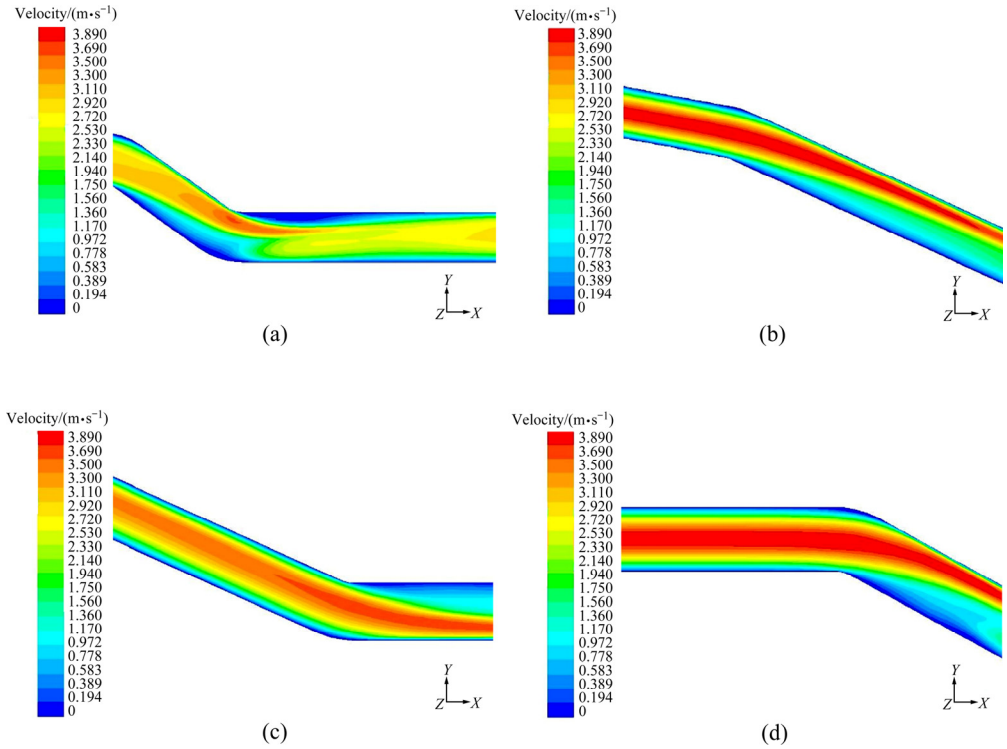

图 2　方案 6 的速度云图

Fig. 2　Velocity contour of scheme six: (a) 1st and 2nd bends; (b) 5th bend; (c) 6th bend; (d) 7th bend

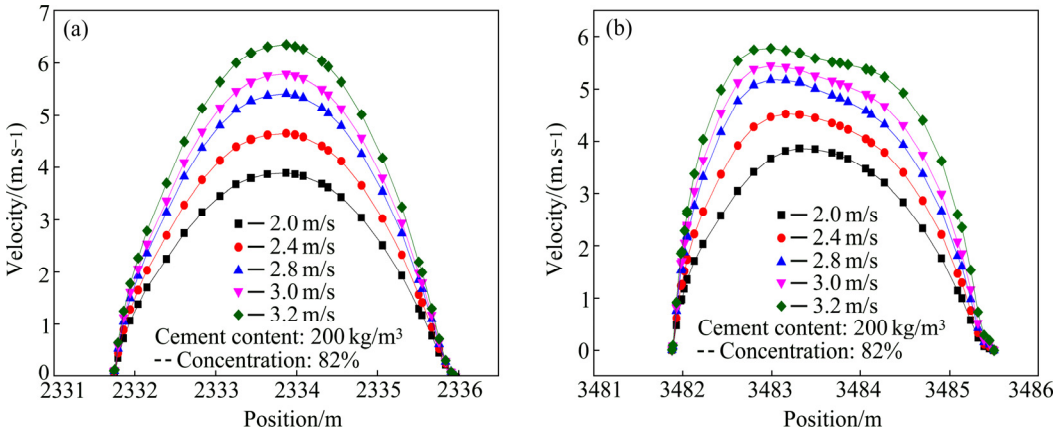

图 3　监测线上的速度变化

Fig. 3　Velocity changes on monitoring lines: (a) Lin5; (b) Lin7

表 3　水泥量为 200 kg/m^3 时不同速度下料浆管道阻力损失

Table 3　Slurry pipeline resistance loss under different velocities with 200 kg/m^3 in cement content

Velocity/(m·s^{-1})	Inlet pressure/kPa	Outlet pressure/kPa	Resistance loss/kPa
2.0	66.440	−8029.216	8095.656
2.4	87.124	−9128.181	9215.306
2.8	109.881	−10923.454	11033.336
3.0	122.071	−11854.119	11976.191
3.2	141.387	−13283.645	13425.032

3.2　质量浓度对阻力的影响

根据模拟结果将不同质量浓度下造成的阻力损失绘制成图(见图 5)，显示阻力损失随质量浓度的变化情况。由图 5 可知，随着质量浓度的增加，阻力损失的增长走势保持一致，浓度大于 83%后，阻力损失增长变快。当料浆在管道中的阻力损失大于重力产生的势能则不能自流。根据阻力计算结果可知，当速度大于等于 2.8m/s，浓度为 85%时无法自流；当速度达到 3.2m/s，浓度为 84%~85%时不能自流，所以管道输送浓度选取应在 83%~84%之间。

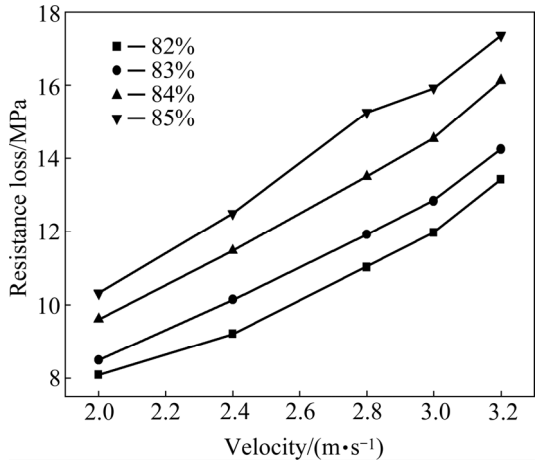

图 4 速度与阻力损失的关系曲线

Fig. 4 Relation curves between velocity and resistance loss

3.3 弯管处阻力分析

浆体在管道内的压力由两部分组成，一部分由重力产生，为静压力，另一部分由速度产生，为动压力，总压是静压与动压叠加的结果。经过 FLUENT 的计算，可以得出浆体在管道内压力变化的基本规律。

为了避免重复，现将方案 13(速度为 2.4 m/s，浓度 84%，水泥量 200 kg/m^3)的 z=0 面上的压力变化云图以及各监测面的压力云图分别列于图 6。

如图 6 所示，在重力的作用下沿着管道方向压力逐渐减小，在流动过程中一部分压力被消耗造成压力损失，在弯管处靠近弯管圆心方向一侧的压力较小。刚进入水平段(即弯管的发展段)，压力波动较大，之后逐渐呈现有规律的变化，靠近管壁处的压力小，这是由边界效应造成的。管道中心的压力较大，呈现出明显的压力梯度，与速度变化规律保持一致。料浆经过弯管段压力波动较大，在弯管外侧压力明显大于弯管内测，流出弯管后经过一段距离后压力(即流动)才会趋于平稳。通过压力云图可以看出，越往管道中心压力越大，呈现出了明显的压力梯度，这与边界层理论以及伯努利方程是吻合的。

为了更直观地表现出压力梯度和沿着管道压力的变化情况，利用 FLUENT 的后处理功能，把监测线上的压力绘制成折线图(将监测线上的数值取出，然后绘制成散点图)，图 7 所示为方案 13 中的监测线上的压力梯度散点图。

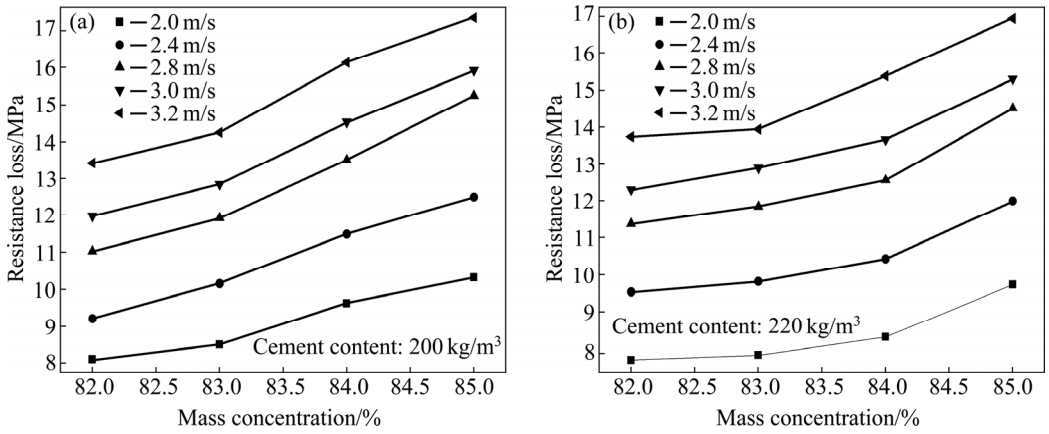

图 5 质量浓度与阻力损失的关系

Fig. 5 Relationships between concentration and resistance loss: (a) Cement content of 200 kg/m^3; (b) Cement content of 220 kg/m^3

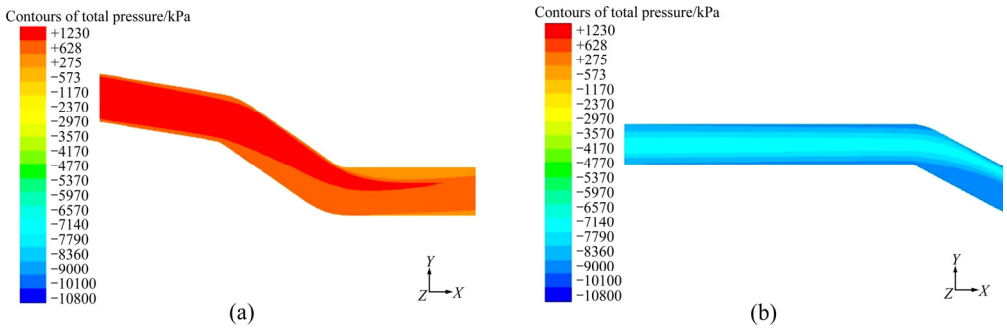

图 6 方案 13 的 z=0 面的压力云图

Fig. 6 Stress nephogram of scheme 13 on z=0 face: (a) 1st and 2nd bends; (b) 7th bend

由图 7 可知，在管道弯管处以弯管的圆心为中心，远离圆心的壁面受到的压力最大，这与前面的分析是一致的，在实际生产工作过程中，重点检测压力大的部分，其最易受损。

通过以上的分析表明，大红山铜矿废石−尾砂高浓度料浆自流输送是可以实现的，在管道输送工程中浓度选取应在 83%~84%之间，速度选取 2.0 m/s。

4　工业验证

为了验证料浆在管道中的输送情况，进行半工业实验。废石−尾砂管输实验的结果表明，在废石尾砂比 7:3、水泥用量 200~220 kg/m^3、质量浓度 83%～84%条件下，料浆均能实现管道自流输送充填。可以满足矿山需要，且可在现有系统下进行自流充填。料浆在流动中基本无离析、分层现象，属典型的高浓度高流态浆体，如图 8 所示。

料浆随静置时间的延长，表面出现“冒泡”现象，这是因为尾砂密度大，在下沉密实过程中粗细粒尾砂有一定的分选现象，且料浆中包含有少量空气所致。

通过表 4 的对比结果可知，大红山的数值模拟的结果与工业实验的误差在 5%以内。结果表明数值模拟对于大红山铜矿管道输送是可行的。

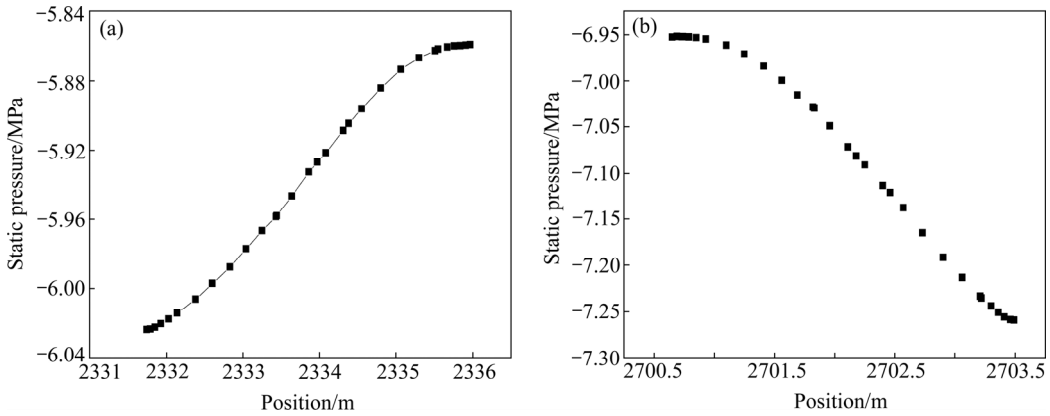

图 7　方案 13 监测线的压力变化

Fig. 7　Pressure variation of scheme 13 on monitoring lines: (a) Line5; (b) Line6

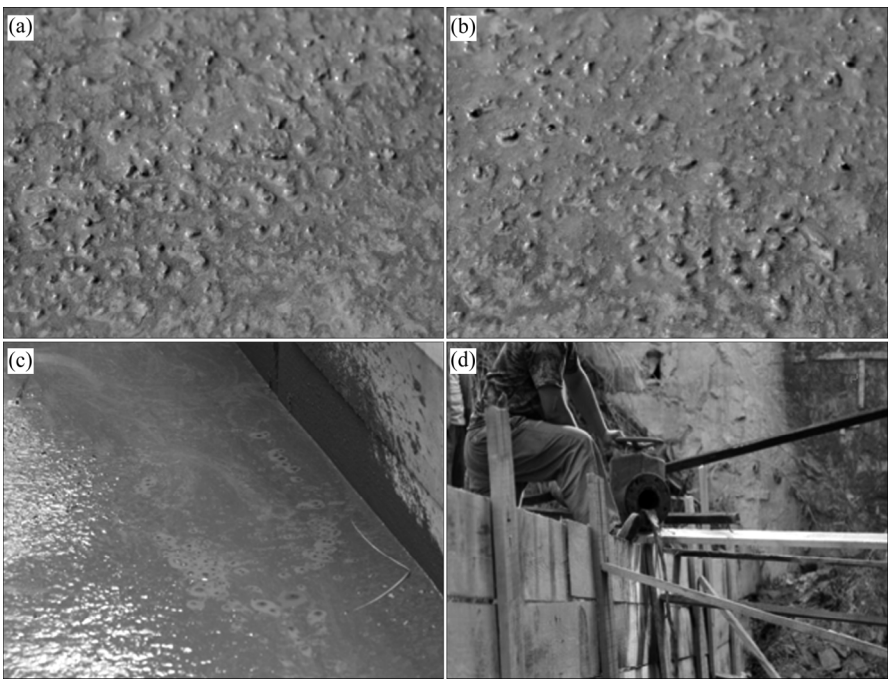

图 8　管输实验图片

Fig. 8　Photographs of pipeline test: (a), (b) Slurry state after filling; (c), (d) Stowing operation

表 4 大红山矿区不同速度下各监测点的压强值与阻力损失

Table 4 Pressure value and resistance loss of each monitoring point under different velocities (Slurry concentration of 82%)

Time	Velocity/ ($m \cdot s^{-1}$)	CH001/ MPa	CH002/ MPa	CH003/ MPa	Resistance loss/($Pa \cdot m^{-1}$)					
					$(P_1-P_2)/14$	$(P_2-P_3)/38$	$(P_1-P_3)/52$	Average	Mean	Simulate
11:11:00	2.0	0.27	0.255	0.15	1071	2763	1965	1933		
11:11:30	2.0	0.27	0.265	0.14	357	3290	2014	1887		
11:12:00	2.0	0.26	0.24	0.168	1456	1871	1759	1695	1836	1960.444
11:12:30	2.0	0.29	0.265	0.186	1765	2085	1999	1949		
11:13:00	2.0	0.335	0.33	0.21	357	3158	1938	1718		
11:13:30	2.4	0.36	0.355	0.21	357	3816	2316	2163		
11:14:00	2.4	0.32	0.301	0.2126	1332	2335	2065	1910		
11:14:30	2.4	0.34	0.33	0.185	714	3816	2442	2324	2347	2231.579
11:15:00	2.4	0.31	0.28	0.165	2143	3026	2497	2555		
11:15:30	2.4	0.365	0.345	0.19	1429	4079	2846	2785		
11:16:00	2.8	0.325	0.305	0.175	1429	3421	2469	2440		
11:16:30	2.8	0.315	0.29	0.16	1786	3421	2596	2601		
11:17:00	2.8	0.355	0.325	0.175	2143	3947	3025	3038	2780	2671.833
11:17:30	2.8	0.38	0.355	0.195	1786	4210	3049	3015		
11:18:00	2.8	0.38	0.355	0.21	1786	3816	2822	2808		
11:18:30	3.0	0.345	0.31	0.2	2500	2895	2547	2647		
11:19:00	3.0	0.3	0.265	0.15	2500	3026	2623	2716		
11:19:30	3.0	0.375	0.35	0.2	1786	3947	2898	2877	2849	2900.155
11:20:00	3.0	0.38	0.355	0.195	1786	4210	3049	3015		
11:20:30	3.0	0.42	0.415	0.21	357	5394	3221	2991		
11:21:00	3.2	0.39	0.36	0.215	2143	3816	2949	2969		
11:21:30	3.2	0.405	0.375	0.2	2143	4342	3251	3245		
11:22:00	3.2	0.365	0.31	0.175	3929	3553	3432	3638	3397	3251.006
11:22:30	3.2	0.515	0.485	0.29	2143	5132	3703	3659		
11:23:00	3.2	0.525	0.505	0.3	1429	5394	3602	3475		

5 结论

1) 在管径方向存在着速度和压力梯度，并有明显的压力损失；在弯管处压力和速度都有明显的变化；在料浆速度相同时，随着料浆浓度的增加，管道的阻力损失逐渐增加。

2) 在料浆浓度相同时，随着速度的增加，管道的阻力损失逐渐增加，且增长幅度也逐渐变大。料浆速度为 2.0 m/s 时，阻力损失最小。随着料浆速度的增加，管道的阻力损失及弯管处的最大压强值呈增长趋势，弯管底部受到的压力最大，距离原点越近，压力值越小。

3) 在满足充填条件时速度应尽量选取小值，适宜管道输送。当料浆速度达到 2.8 m/s，料浆浓度为 85%时无法自流；当料浆速度达到 3.2 m/s，料浆浓度为 84%~85%时，不能自流，出现滞留现象，造成堵管。在满足强度以及高浓度要求的前提下，大红山铜矿的废石−尾砂的最佳管道输送的料浆浓度为 83%~84%。

4) 半工业实验以及矿山实际阻力监测结果表明，

应用 Fluent 数值模拟高浓度料浆的管道输送是可行的，为浆体输送管路的设计和压力损失估算提供了试验基础与理论依据。

REFERENCES

[1] 吴爱祥, 王　勇, 王洪江. 膏体充填技术现状及趋势[J]. 金属矿山, 2016(7): 1−9.
WU Ai-xiang, WANG Yong, WANG Hong-jiang. Status and prospects of the paste backfill technology[J]. Metal Mine, 2016(7): 1−9.

[2] 董慧珍, 冯国瑞, 郭育霞, 戚庭野, 康立勋, 郭晓彦, 韩玉林. 新阳矿充填料浆管道输送特性的试验研究[J].采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 880−885.
DONG Hui-zhen, FENG Guo-rui, GUO Yu-xia, QI Ting-ye, KANG Li-xun, GUO Xiao-yan, HAN Yu-lin. Pipe transportation characteristics of filling slurry in Xinyang mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(6): 880−885.

[3] 刘晓辉. 膏体流变行为及其管流阻力特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
LIU Xiao-hui. Study on rheological behavior and pipe flow resistance of paste backfill[D]. Beijing: University of Science & Technology Beijing, 2015.

[4] 何哲祥, 隋利军, 解　伟. 矿山充填料管道挤压输送计算机模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(6): 1144−1151.
HE Zhe-xiang, SUI Li-jun, XIE Wei. Computer simulation of squeezed-transport of mine hydraulic filling in pipeline[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39(6): 1144-1151.

[5] 韩占忠, 王　敬, 兰小平. FLUENT-流体工程仿真计算机实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
HANG Zhan-zhong, WANG Jing, LAN Xiao-ping. FLUENT simulation computer instances and application[M]. Beijing: Beijing Institute Technology Press, 2010.

[6] 甘德清, 高　锋, 陈超, 刘爱兴, 张云鹏. 高浓度全尾砂料浆管道输送数值模拟研究[J]. 金属矿山, 2014(10): 138−141.
GAN De-qing, GAO Feng, CHEN Chao, LIU Ai-xing, ZHANG Yun-peng. Numerical simulation study of high density total tailings slurry pipeline transport[J]. Metal Mine, 2014(10): 138−141.

[7] 刘　杰, 赵　奎, 许杨东, 何　文, 钟　文, 陈　康. 基于 L 型管道料浆输送性能试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(2): 100−104.
LIU Jie, ZHAO Kui, XU Yang-dong, HE Wen, ZHONG Wen, CHENG Kang. Experimental research on the transportation performance of the filling slurry based on the L-shaped pipeline[J]. Mining Research and Development, 2016, 36(2): 100−104.

[8] 邓代强, 朱永建, 王发芝, 王　莉, 余伟健. 充填料浆长距离管道输送数值模拟[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2012, 36(6): 36−43.
DENG Dai-qiang, ZHU Yong-jian, WANG Fa-zhi. WANG Li. YU Wei-jian. Transportation numerical simulation of filling slurry in long distance pipeline[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2012, 36(6): 36−43.

[9] WANG X M, ZHAO J W, XUE J H, YU G F. Features of pipe transportation of paste-like backfilling in deep mine[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(5): 1413−1417.

[10] 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实验[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.

[11] 温震江, 高　谦, 王忠红, 游　化. 基于FLUENT的全尾砂充填料浆输送特性模拟与分析[J]. 化工矿物与加工, 2017(9): 54−58.
WEN Zhen-jiang, GAO Qian, WANG Zhong-hong, YOU Hua. Simulation test and analysis of full tailings filling slurry transportation characteristics based on FLUENT[J]. Industrial Minerals & Processing, 2017(9): 54−58.

[12] 陈　新, 史秀志, 周　健, 邱贤阳, 吝学飞. 泡沫砂浆 W 型管长距离输送特性的CFD 模拟[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1782−1793.
CHEN Xin, SHI Xiu-zhi, ZHOU Jian, QIU Xian-yang, LIN Xue-fei. CFD simulation of transportation properties of W type and long-distance pipeline for foam slurry backfilling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(8): 1782−1793.

[13] 丁　璐, 陶　能, 梅甫定. 磷石膏基充填料浆长距离管道输送特性研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(4): 68−73.
DING Lu, TAO Neng, MEI Fu-ding. Investigation into the behavior of long-distance pipeline transport of ardealite-based filler slurry[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(4): 68−73.

[14] 张　亮, 罗　涛, 许杨东, 陈忠熙, 刘　杰. 高浓度充填料浆流变特性及其管道输送模拟优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(4): 36−41.
ZHANG Liang, LUO Tao, XU Yang-dong, CHEN Zhong-xi,

LIU Jie. Research on the rheological characteristics of high-concentration filling slurry and the simulation and optimization on its pipeline transportation[J]. Mining Research and Development, 2016, 36(4): 36−41.

[15] 张钦礼, 刘 奇, 赵建文, 刘贱刚. 深井似膏体充填管道的输送特性[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3190−3195.
ZHANG Qi-li, LIU Qi, ZHAO Jian-wen, LIU Jian-gang. Pipeline transportation characteristics of filling paste-like slurry pipeline in deep mine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(11): 3190−3195.

[16] YU G B, YANG P, CHEN Z C, MEN R Y. Study on pipeline self-flowing transportation of cemented tailing fill slurry based on FLUENT software[J]. Advanced Materials Research, 2013, 734/737: 833−837.

[17] KUMAR A, KAUSHAL D R, KUMAR U. 3D CFD modeling and experimental validation for slurry flow through pipe bend[J]. Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 2008, 7: 105−110.

[18] KAUSHAL D R, THINGLAS T, TOMITA Y, KUCHII S, TSUKAMOTO H. CFD modeling for pipeline flow of fine particles at high concentration[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 43: 85−100.

[19] 姚维信. 矿山粗骨料高浓度充填理论研究与应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
YAO Wei-xin. Study on the filling theory of high-density with coarse aggregate and application[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012: 53−62.

[20] 刘 凯. 全尾砂充填空区的脱水试验研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
LIU Kai. A study on the dehydration of tailings filling area[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.

[21] 张修香, 乔登攀, 孙宏生, 杨兴宏, 卢光远, 李广涛. 大红山铜矿粗骨料充填料浆的高浓度判定[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2014, 39(6): 32−39.
ZHANG Xiu-xiang, QIAO Deng-pan, SUN Hong-sheng, YANG Xing-hong, LU Guang-yuan, LI Guang-tao. High density criterion of filling slurry with coarse aggregates for Dahongshan copper[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 39(6): 32−39.

Simulation on conveying characteristics in pipe about high-density slurry with waste rock-tailing

ZHANG Xiu-xiang[1], QIAO Deng-pan[2], SUN Hong-sheng[3]

(1. Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China University of Technology, Nanchang 330000, China;
2. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
3. Dahongshan Copper Mine, Yuxi Mining Co., Ltd., Yuxi 653100, China)

Abstract: It is the most effective way to solve waste rock-tailing emissions and is one of main support techniques to realize the green mining that high-density slurry with waste rock and tailing. Pipeline characteristics has an important research significance as the core content of pipeline transportation about high-density slurry. This article reduced the mine actual filling line, the pipeline simulation research was conducted using Fluent software, the effects of velocity/quality concentration on the characteristics of gravity and bending parts were analyzed. The results show that the pipe resistance losses increase exponentially with the increase of flow velocity, the bottom of the pipe bending has the most pressure. When the velocity is more than 3.0 m/s, the resistance loss grows faster. When the velocity reaches 2.8 m/s, the slurry is not able to self-flow when the slurry concentration is 85%, when the velocity reaches 3.2 m/s, the concentration is 84%, which cannot be self-flowing, and the retention phenomenon occurs, causing the plugging pipe. It is suitable for pipe flow that the concentration of high density slurry is 83%−84%. Semi-industrial experiments and actual resistance monitoring verify the reliability of numerical simulation results in mines.

Key words: filling by waste rock-tailing; gravity delivery; high-density slurry; resistance loss; numerical simulation

Foundation item: Project(GJJ160568) supported by the Education Science and Technology Research Program of Jiangxi Provincial Department, China; Project(RGET1611) supported by the Open Fund Project of Defense Key Subject Laboratory, China; Project(GJJ160567) supported by the Education Science and Technology Research Program of Jiangxi Provincial Department, China

Received date: 2017-12-18; **Accepted date:** 2019-03-26

Corresponding author: ZHANG Xiu-xiang; Tel: +86-15797936164; E-mail: zxx_lw@126.com

(编辑　何学锋)