中国有色金属学报 The Chinese Journal of Nonferrous Metals



# 含硫高黏性三相流态充填浆体管道输送性能

杨 建,王新民,张钦礼,柯愈贤

(中南大学 资源与安全工程学院 深部金属矿床开发与灾害控制重点实验室,长沙 410083)

**摘 要:**为解决新桥矿含硫全尾砂浆体黏度大、易结块以及管道输送性能差的问题,将发泡技术引入全尾砂胶结 充填配浆实验中,研究灰砂比、质量分数和气泡率的变化对浆体流变性能的影响。基于 Fluent 的充填管道输送流 速和压力变化模拟,对三相流态充填体的输送性能进行分析。结果表明:灰砂比为 1:6、质量分数为 72%、气泡 率为 20%时,三相流态充填浆体较同配比不含气泡的两相流态浆体泌水率降低 29%,黏度降低 17%,管道沿程阻 力降低 25%。气相成分的加入在降低含硫高黏性充填浆体的剪切应力和塑性黏度以及改善其管道输送性能和提升 管道输送效率方面具有显著的优越性。

关键词:含硫高黏性尾砂;发泡技术;三相充填浆体;流变性能;管道输送 中图分类号:X753 文献标志码:A

## Pipeline transportation properties of high viscosity sulfur-content filling slurry in three-phase flow

YANG Jian, WANG Xin-min, ZHANG Qin-li, KE Yu-xian

(Key Laboratory of Mineral Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In order to improve transportability of its high sulphur content crude tailings with such bad features as high viscosity and easily caking, foaming agent was used in cemented crude tailings backfill test in Xinqiao Pyrite Mine. Influences of cement-tailings-ratio, mass fraction of slurry and bubble rate of foaming agent on rheological properties of backfill slurry were studied, and correspondence of rheological properties of backfill slurry to slurry velocity and pressure within the transporting pipe was simulated based on Fluent software. The results show that dewatering proportion, viscosity and friction loss of backfill slurry with cement-tailings ratio of 1:6 and mass fraction of 72% can be reduced by 29%, 17% and 25%, respectively, if foaming agent with bubble rate of 20% is added. Therefore, pipeline transportability of high sulphur content crude tailings backfill slurry can be greatly improved, and its pipeline transporting efficiency can be obviously raised by addition of gas phase material owing to the reduction of the viscosity and shear stresses.

Key words: sulfur-content slurry with high viscosity; foaming technology; three-phase backfill slurry; rheological properties; pipeline transportation

全尾砂胶结充填采矿法,具有尾砂利用率高,可 有效预防和控制地表沉降,保证采矿作业安全、降低 损失贫化等优点,在金属矿山中的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。 国内外研究人员在对部分矿山进行全尾砂胶结充填工 业实验中发现:由于全尾砂中杂质成分复杂,残留硫 较多,新鲜尾砂极易粘结成团,堆放时间过长易结块, 繁琐的搅拌破碎工艺严重影响了浆体的管道输送效 率,制约了全尾砂胶结充填技术在含硫矿山中的的推

基金项目:"十一五" 国家科技支撑计划资助项目(2008BAB32B03) 收稿日期: 2014-07-13; 修订日期: 2014-11-05

通信作者: 王新民, 教授, 博士; 电话: 13549683949; E-mail: wxm1958@126.com

1050

广应用。

针对上述问题,国内外的研究主要集中在尾砂脱 硫和新型改性材料研制方面。HULSHOF 等<sup>[2]</sup>利用有 机覆盖法,发现粘浆状有机废物覆盖可以使硫的最高 还原速度达到 5000 mg/(L·a)。刘丰韬等<sup>[3]</sup>通过添加 Minefill309 系列新型添加剂来改善浆体的流动特性, 实现长距离减阻输送。但是尾矿脱硫技术成本高、工 艺复杂,新型材料技术尚未成熟,市场应用不广,作 用效果有限,全尾砂胶结充填技术在含硫高黏性矿山 的应用仍然举步维艰。

固液气三相流态充填浆体继承了传统固液两相充 填料浆流动性能好,易于实现管道自流输送的优点, 同时兼有输送浓度高、充填质量好、接顶率高等优势, 是一种具有广阔发展应用前景的新型充填工艺<sup>[4]</sup>。但 是三相流充填技术应用研究尚有诸多空白,国内外鲜 有矿山应用实例。本文作者将发泡技术引入新桥硫铁 矿全尾砂胶结充填配浆和管道输送实验中,研究其在 降低含硫高黏性全尾砂浆体的剪切应力和塑性黏度, 改善其流变特性以及提升管道输送性能方面的作用。

### 1 发泡系统

发泡剂为一种表面活性剂,能有效降低液体的表面张力,在液膜表面双电子层排列包围空气形成气泡<sup>[5]</sup>。图 1 所示为三相泡沫发泡机理示意图。由图 1



图1 三相泡沫发泡机理示意图

**Fig. 1** Schematic diagrams of mechanism of three-phase foam: (a) Foaming agent; (b) Bubble; (c) Adsorption of carboxyl; (d) Three-phase filling

可知,经均匀稀释的 LC-01 型复合发泡剂分子,通入 空气后,分子结构中的亲水集团便开始捕获空气分子, 形成一层亲水集团整齐排列在气泡外围的稳定吸附 层,从而降低水溶液的表面张力,提高气泡的稳定性。 在机械搅拌、射流冲击等外力作用下,水泥和尾砂的 固料颗粒以一定的速度向气泡发生碰撞,由于复合发 泡剂分子具有多个能与钙、镁等离子形成化学键的羧 基,从而水泥水化反应产物和尾砂表面的钙、镁离子 极易与羧基结合而吸附于泡沫表面,并形成一层保护 壳使泡沫更加稳定<sup>[6-7]</sup>。

目前,常用的制泡技术主要包括高速搅拌法和压 缩空气法,压缩空气法发泡效率相对较高、泡沫粗细 均匀且能够有效地防止中间环节导致的泡沫破灭<sup>[8]</sup>。 室内实验采用 HT-10 型全自动发泡器,自动化程度 高,易于维护,泡沫产量大且均匀稳定。

### 2 实验

均匀稳定的泡沫与水泥、全尾砂、水及必要的外加剂等按照一定的比例混合搅拌均匀,并经物理化学作用硬化,即形成含有固、液、气三相流态的充填体<sup>[9]</sup>。

### 2.1 全尾砂物化性质

新桥硫铁矿全尾砂粒级较细(见表 1), 粒径在 0.05 mm 以下的颗粒占 65%以上,中值粒径仅为 0.038 mm, 渗透系数小(1.62×10<sup>-4</sup>~4.41×10<sup>-4</sup> cm/s)。尾砂中含有 较多的杂质成分(见表 2), 其中残留硫含量较大, 新鲜 全尾砂容易粘结成团(见图 2), 堆放时间过长易结块, 不利于储存和输送。

### 2.2 浆体流变模型

经配浆后的全尾砂浆体各相组成比例的微小变动 即可对浆体的整体性能产生较大的影响,因此,三相

#### 表1 新桥硫铁矿全尾砂粒径分布

 Table 1
 Particle size distribution of total tailings in Xinqiao

Diameter/mm	Content/%		
2-0.5	1.4		
0.5-0.25	6.9		
0.25-0.075	18.4		
0.075-0.05	8.3		
0.05-0.005	62.0		
< 0.005	3.0		

#### 第25卷第4期

表 2 新桥硫铁矿全尾砂化学成分

<b>U</b> 1
Mass fraction/%
0.23
0.036
0.064
8.50
14.28
4.62
32.86
2.06
10.19

**Table 2** Chemical composition of total tailing in Xingiao



图 2 含硫全尾砂照片

Fig. 2 Photo of sulfur-content total tailings

流体较传统的固液两相流体管道输送系统更复杂、更 难于实验模拟<sup>[10]</sup>。考虑到三相流态充填体质量分数较 高、含水率低,泡沫与浆体混合均匀、整体性好,更 倾向于膏体(似膏体)的浆体类型,同时,借鉴已在土 木工程中广泛应用的泡沫混凝土的输送经验,三相流 态充填体应为假塑性体,适宜采用 Hershel Bulkley 模 型。H-B流变模型与牛顿模型相比增加了初始屈服应 力 $\tau_0$ (即流体静止时自身的分子粘聚力),充分体现流 体的流变特性,其剪切应力表达式为

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma^n \tag{1}$$

式中: *τ* 为剪切应力; *η* 为塑性黏度; *γ* 为剪切速率; *n* 为流变特性指数, *n*<1。

#### 2.3 实验步骤

考虑到泡沫含量过低经管道输送消泡作用后所剩 无几,泡沫含量过高对充填体的后期强度提升不 利<sup>[11]</sup>,结合矿山生产实际,室内配浆实验初选的气泡 率为10%~30%,灰砂比为1:4~1:12,质量分数为65%~ 75%。室内剪切实验采用布氏 R/S 型旋转流变仪,十 字形转子可最大程度地减小对样品结构的破坏,克服圆柱面的滑移效应,提高测量的精度<sup>[12]</sup>。

 室内泡沫制备系统安放要求平稳可靠,温度、 湿度恒定,尽量避免外界干扰。将配比组成各异的全 尾砂浆体与均匀稳定的泡沫混合,配制成灰砂比、质 量分数和气泡率各不相同的三相流态充填体。

2) 分别测定各配比条件下充填体的 7 d、28 d 抗 压强度的大小,根据采场作业对充填体强度的要求, 进行灰砂比、质量分数、气泡率的等充填配比参数初 选。

3) 采用控制变量法进行室内剪切流变实验,分别 测定灰砂比、质量分数和气泡率对浆体剪切应力和塑 性黏度的影响规律,并根据实验结果,优选适合含硫 高黏性全尾砂的最优充填配比。

### 3 结果与分析

按照新桥硫铁矿高强度开采、快速充填的要求<sup>[13]</sup>,采场打底充填体7d、28d的作业强度分别要达到0.7、1.6MPa,表3所列为不同配比组成的三相流态充填体抗压强度。经初选适宜的充填配比条件为 气泡率为10%~20%,灰砂比为1:4~1:8,质量分数为70%~75%。

#### 表3 不同配比组成的三相流态充填体抗压强度

 Table 3 Compressive strength of three-phase filling with different composition

Cement-sand	Mass	Bubble	Strength/MPa		
ratio	fraction/%	rate/%	7 d	28 d	
1:4	75	0	0.75	1.65	
1:4	75	10	0.72	1.64	
1:4	75	20	0.68	1.57	
1:4	75	30	0.49	1.44	
1:4	70	10	0.72	1.62	
1:4	65	10	0.55	1.51	
1:6	70	20	0.70	1.60	
1:8	70	20	0.66	1.56	
1:10	75	10	0.58	1.55	
1:12	75	10	0.42	1.38	

### 3.1 气泡率对浆体流变性能的影响

灰砂比为 1:6、质量分数为 72%、不同气泡含量 的三相流态充填体的剪切应力和塑性黏度随剪切速率 的变化规律如图 3 所示。随着剪切速率的增加,三相 流态充填体的剪切应力逐渐增大,塑性黏度逐渐降低; 当剪切速率超过 60 r/s 时,砂浆内部泡沫结构逐渐被 破坏,剪切应力和塑性黏度趋于稳定。随着气泡含量 的增多,浆体的初始屈服应力、剪切应力和塑性黏度 不断减小,表明气相成分的加入有效地降低了浆体的 黏度,改善了浆体的流变性能。

### 3.2 灰砂比、质量分数对浆体流变性能的影响

气泡率为 20%、剪切速率为 60 r/s、不同灰砂比 的三相流态充填浆体的剪切应力和塑性黏度随质量分 数的变化规律如图 4 所示。在灰砂比一定的条件下,





表4 三相流态充填体与普通充填体各项参数指标对比

浆体的剪切应力和塑性黏度均随着浆体质量分数的增加而增大。在质量分数一定的条件下,浆体的塑性黏度随着灰砂比的增大而逐渐增大;浆体的剪切应力随灰砂比的变化规律较复杂,整体上呈现出灰砂比越大,浆体剪切应力越小,浆体流动性能更好的特点。

### 3.3 充填配比参数优化

经多次的室内配浆实验优化选择,新桥矿三相流态充 填浆体的最优配比为:灰砂比为1:6、质量分数为72%、 气泡率为20%。同等条件下,表4所列为与不含气泡 的全尾砂浆体的强度参数和流动性指标对比。



图 4 灰砂比和质量分数对浆体流变性能的影响



Table 4	Comparison of rheological	parameter between three-	phase filling slurry and	ordinary filling slurry

Sampla	Bubble Density/		Bleeding	Strength/MPa		Consistence/	Slump/	Viscosity/
Sample	rate/% $(t \cdot m^{-3})$	$(t \cdot m^{-3})$	rate/%	7d	28d	cm	cm	(Pa·s)
Ordinary filling slurry	0	1.86	6.16	0.75	1.66	10.5	23.2	2.87
Three-phase filling slurry	20	1.40	4.37	0.70	1.60	12.6	27.2	2.16

经配浆后的三相流态充填浆体泌水率下降 29%, 稠度 和坍落度增加约 20%, 黏度降低 25%, 浆体的流变性 能得到了极大的改善。

### 3.4 降粘减切机理

对于含有气、固、液三相流体的充填体而言,各 相的物化性质不同,表现的整体特性也不同<sup>[14]</sup>。当不 易流动的固料分散到连续介质的液体之后,一方面受 到液体的浮力,有效质量减小,一方面受到液体的包 裹和润滑,变的易于流动。在固、液体中掺入均匀分 布的气泡之后,水的湍流黏性底层实际被浆体内部均 布的气泡代替,介质的平均密度和面积都变小,从而 使混合浆体的运动阻力大大减小。

图 5 所示为灰砂比为 1:6、质量分数为 72%的两 相和三相流态充填体在养护 28 d 后的 SEM 像。由图 5 可知,气相成分的加入不仅可以有效地增大胶凝材 料的表面积,促进其水化反应的进行,同时连续均匀 分布的气泡有助于浆体形成致密的网状结构<sup>[15]</sup>,在改 善其流变性能的基础上,可以有效提升浆体的整体性。

### 3.5 管道输送性能

为了验证气相成分的加入在改善新桥硫铁矿含硫 高黏性全尾砂浆体流变性能,提高管道输送效率方面 的优越性,运用 Fluent 软件进行三相流态充填体管路 输送模拟<sup>[16]</sup>。作为典型的非牛顿流体,经均匀混合配 浆后的三相流态充填体整体性好,可视为均质满管流 的输送状态,浆体的流动作不可压缩定常流处理<sup>[17]</sup>。 浆体模型选用欧拉法中的混合物模型,将垂直管道的 模型的入口边界设为速度入口,水平管道的出口边界 设为出口流动<sup>[18]</sup>,垂直方向重力加速为 9.8 m/s<sup>2</sup>。将 气泡率为 20%和不含气泡的全尾砂浆体在入口流速相 同的情况下分别通过一个水平管内径为 98 mm、垂直 管内径为 49 mm、管道粗糙度为 0.12 mm、充填倍线 为 3.0 的充填管路,其流速变化、压力损失结果如表 5、 图 6 和 7 所示。

设水平钻孔弯管处压力为 0,在其他条件相同的 情况下,三相流态充填浆体的出口压力为-2.17×10<sup>6</sup> Pa,较传统两相流态充填浆体的-3.15×10<sup>6</sup> Pa 降低约



图 5 不同流态的充填浆体的 SEM 像 Fig. 5 SEM images of filling slurry of different flows: (a) Two-phase flow; (b) Three-phase flow

30%。三相流态充填体的弯管流速区间为 2.99~4.27 m/s,出口流速为 1.28 m/s,均明显高于不含气泡的两相流态充填体。运用 Fluent 软件计算出三相流态充填 浆体的管道沿程阻力为 3.42 MPa,较之两相流态充填 浆体的 4.58 MPa,降低约 25%。

通过新桥矿室内环管实验和现场工业实验反复验 证,气相成分的加入可有效降低含硫高黏性全尾砂浆 体的剪切应力和塑性黏度,大大改善了其流变性能, 避免了繁琐的搅拌破碎工艺,提高了管道输送效率。 同时,发泡材料来源广泛、发泡技术成熟、全尾砂胶 结充填工艺简单,三相流全尾砂胶结充填技术在含硫 矿山有广阔的推广应用前景。

表5 Fluent 管道模拟结果

on

Sample	Bubble rate/%	Flow velocity/ $(m \cdot s^{-1})$	Duct pressure/ kPa	Export velocity/ (m·s <sup>-1</sup> )	Export pressure/MPa	Friction loss/ MPa
Ordinary filling slurry	0	2.36-3.54	0.73-3.60	1.05	-3.15	4.58
Three-phase filling slurry	20	2.99-4.27	0.97-3.84	1.28	-2.71	3.42



图 6 三相流态充填体弯管流速分布





图7 三相流态充填体弯管壁面压力分布

Fig. 7 Pressure distribution of three-phase filling slurry at elbow wall

### 4 结论

 1)通过配浆实验优选出适新桥硫铁矿含硫高黏 性全尾砂的充填配比为:灰砂比为 1:6、质量分数为
 72%、气泡率为 20%。对比两相流态充填浆体,其泌 水率降低 29%,黏度下降 17%。

2)固、液相中掺入均匀分布的气泡后,水的湍流 黏性底层实际被浆体内部均布的气泡代替,介质的平 均密度和面积都变小,混合浆体的运动阻力大大减小; 同时,连续均匀分布的气泡有助于浆体形成致密的网 状结构,从而使整体性大大提高。

3) 基于 Fluent 的充填管道输送过程模拟, 三相流 态充填浆体的出口压力为-2.17×10<sup>6</sup> Pa, 比两相流态 充填浆体的出口压力-3.15×10<sup>6</sup> Pa 降低约 30%; 弯管 流速区间为 2.99~4.27 m/s, 出口流速为 1.28 m/s, 均 明显高于不含气泡的两相流态充填体; 管道沿程阻力 为 3.42 MPa, 降低约 25%。 4) 通过新桥硫铁矿现场工业实践结果表明:气相成分的加入在降低含硫高黏性全尾砂浆体的剪切应力 和塑性黏度,改善其流变性能,提高管道输送效率等 方面具有显著的优越性。

### REFERENCES

- [1] 李夕兵,姚金蕊,宫风强.硬岩金属矿山深部开采中的动力 学问题[J].中国有色金属学报,2011,21(10):2551-2563.
  LI Xi-bing, YAO Jin-rui, GONG Feng-qiang. Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2551-2563.
- [2] HULSHOF A H M, BLOWES D W, GOULD W D. Evaluation of in situ layers for treatment of acid mine drainage: A field comparison[J]. Water research, 2006, 40(9): 1816–1826.
- [3] 刘丰韬,丁剑锋,陈国平,李树磊,王京生,周 波. 深井长
   距离大倍线高浓度自流充填技术研究[J]. 金属矿山, 2014, 2:
   40-44.

LIU Feng-tao, DING Jian-feng, CHEN Guo-ping, LI Shu-lei, WANG Jing-sheng, ZHOU Bo. Study on the high-density gravity-flow backfilling technology of deep-well long-distance with large line[J]. Metal Mine, 2014, 2: 40–44.

- [4] NAMBIAR E K, RAMAMURTHY K. Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(9): 752–760.
- [5] 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, 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, 9: 43-47.
- [6] CAMBRONERO L E G, RUIZ-ROMAN J M, CORPAS F A, RUIZ-PRIETO J M. Manufacturing of Al-Mg-Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(4): 1803–1809.
- [7] 杨慧芬, 党春阁, 马 雯, 景丽丽. 硝酸钠对改善赤泥陶粒性 能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(10): 1260-1265.
   YANG Hui-fen, DANG Chun-ge, MA Wen, JING Li-li. Effect of sodium nitrate on improvement in the properties of ceramist using red mud[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(10): 1260-1265.
- [8] 肖红力.泡沫混凝土发泡剂性能的研究[D].杭州:浙江大学, 2011: 3-10.
   XIAO Hong-li. Study on the performance of foaming agents applied to the foamed concrete[D]. Hangzhou: Zhejiang
- [9] 胡焕校, 沈增辉, 彭春雷, 夏凌云, 唐良智. 轻质充气泡沫水 泥注浆材料发泡剂的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6): 96-99.

University, 2011: 3-10.

HU Huan-xiao, SHEN Zeng-hui, PENG Chun-lei, XIA Ling-yun, TANG Liang-zhi. Study of foaming agent on foam-ad mixture cement of light-weight grouting materials[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(6): 96–99.

- [10] 郑洲顺, 曲选辉, 徐勤武, 李俏杰, 刘建康. 粉末注射成形两 相流动三维数值模拟及粉末与粘结剂的分离[J]. 中国有色金 属学报, 2014, 24(1): 122-129.
  ZHENG Zhou-shun, QU Xuan-hui, XU Qin-wu, LI Qiao-jie, LIU Jian-kang. Three dimensional numerical simulation of two-phase flow for powder injection molding and separation of powder and binder[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,
- [11] GARCÍA-TEN J, SABURIT A, BERNARDO E, COLOMBO P. Development of lightweight porcelain stoneware tiles using foaming agents[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32(4): 745–752.

2014, 24(1): 122-129.

 [12] 吴爱祥,刘晓辉,王洪江,焦华喆,李 辉,刘斯忠.考虑时 变性的全尾膏体管输阻力计算[J].中国矿业大学学报,2013, 42(5):736-740.

WU Ai-xiang, LIU Xiao-hui, WANG Hong-jiang, JIAO Hua-zhe, LI Hui, LIU Si-zhong. Calculation of resistance in total tailings paste piping transportation based on time-varying behavior[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(5): 736–740.

[13] 刘晓玲,王新民,吴 鹏.煤矸石似膏体快速充填实验研究[J]. 金属矿山,2011,6:6-8.

LIU Xiao-ling, WANG Xin-min, WU Peng. Experimental research of rapid filling with paste-like coal gangue[J]. Metal Mine, 2011, 6: 6–8.

[14] 张德明. 深井充填管道磨损机理及可靠性评价体系研究[D].

长沙: 中南大学, 2012: 90-98.

ZHANG De-ming. A study on wear mechanism and the reliability evaluation system for backfilling pipelines in deep mine[D]. Changsha: Central South University, 2012: 90–98.

- [15] 秦波涛,王德明,张仁贵. 三相泡沫发泡器发泡机理及设计 原理[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(4):439-443. QIN Bo-tao, WANG De-ming, ZHANG Ren-gui. Foaming mechanism and design principles of a three-phase-foam generator[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(4): 439-434.
- [16] YANG X, ZHU J, HE D, LAI Z H, NONG Z S, LIU Y. Optimum design of flow distribution in quenching tank for heat treatment of A357 aluminum alloy large complicated thin-wall workpieces by CFD simulation and ANN approach[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(5): 1442–1451.
- [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实验[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 2133-2139.
  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): 2133-2139.
- [18] 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.

(编辑 王 超)