



基于环管试验的改性全尾砂 充填料浆输送性能

郑伯坤^{1,2}, 姚 维^{1,2}, 黄腾龙^{1,2}, 张凌云^{1,2}, 尹旭岩^{1,2}

(1. 长沙矿山研究院有限责任公司, 长沙 410012;
2. 国家金属采矿工程技术研究中心, 长沙 410012)

摘 要: 针对深部矿山充填系统中由于小充填倍线引起的竖直管段势能高、易造成爆管事故增加的问题, 本文利用坍落度和环管试验研究低密改性剂、C 料含量、料浆质量浓度对全尾砂充填料浆输送性能的影响, 并在环管试验的基础上, 结合宾汉流体模型对不同工况的充填料浆流变参数进行了计算。结果表明: 低密改性剂的掺入、C 料含量和料浆质量浓度的增加都会使得料浆的扩展度降低; 与未改性的充填料浆相比, 改性后料浆的屈服应力增长幅度在 31.99%(68%)到 20.67%(72%)之间, 塑性黏度降低幅度约为 23%; 通过流体静力学平衡理论和扩展度与屈服应力、塑性黏度间的回归函数, 建立了三山岛金矿充填料浆沿程阻力经验计算公式, 该公式可用于现场快速、有效地预估料浆的输送性能。

关键词: 全尾砂充填料浆; 流变参数; 环管试验; 深井充填; 沿程阻力

文章编号: 1004-0609(2021)-02-0520-10

中图分类号: TD853

文献标志码: A

引文格式: 郑伯坤, 姚 维, 黄腾龙, 等. 基于环管试验的改性全尾砂充填料浆输送性能[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 520–529. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-35941

ZHENG Bo-kun, YAO Wei, HUANG Teng-long, et al. Transportable performance of modified unclassified tailings filling slurry based on loop test[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 520–529. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-35941

金属矿产资源是国民经济发展的命脉, 据不完全统计, 我国 95%以上的能源、80%的工业原料均来源于矿产资源^[1]。但随着地表浅部资源的开采殆尽, 同时为满足国内经济快速、稳定发展对矿石资源的巨大需求量, 采矿行业逐渐向地球深部进军。国外超千米深的矿井已多达 80 多座, 其中南非的姆波尼格金矿更是延伸到了地下 4350 m, 而国内许多矿山的开采深度也已经超过 1000 m, 例如, 夹皮沟金矿开采深度以达到 1600 m 水平^[2]。但矿井深度的增加给采矿带来了一系列工程技术难题, 主要表现为地压升高导致岩爆、采场失稳问题显著, 顶板突水事故增加以及高地温造成的恶劣工作环境等问题^[3]。而胶结充填体在采空区通过让压支护作用

能有效改善采场应力分布, 减少围岩冒落、垮塌, 同时能获得可观的矿石回收率和较小的损失贫化率, 另一方面能有效降低地表固废堆存给矿山企业带来的环境压力和尾矿库溃坝风险^[4]。因此, 胶结充填采矿法逐渐成为深部矿山开采的首选方法。

充填料浆通常由选厂的尾砂经过浓密机浓密到一定浓度后与胶凝材料和其他改性剂按一定比例混合均匀后通过管道自流或泵送到采空区。为保证采矿作业的安全性, 需要等待充填料浆在采空区硬化形成一定强度后才能进行下一步开采作业^[5], 所以保证充填料浆稳定的从地表输送至井下空区是实现采场安全、正常生产的关键所在。大量学者从流变学理论出发, 认为全尾砂充填料浆属于一种非

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2018YFC0604603, 2018YFC0604601)

收稿日期: 2020-04-13; 修订日期: 2020-12-07

通信作者: 姚 维, 助理工程师, 硕士; 电话: 13840545872; E-mail: yaoxmw@126.com

牛顿流体, 料浆内部存在一定的抗剪切能力, 通常用料浆的流变参数来表征料浆的输送性能^[6-7]。杨晓炳等^[8]和侯国权等^[9]基于宾汉姆模型和非牛顿流体理论, 结合 L 管和流变仪实验分析了粗骨料充填料浆的流变特性, 并建立了相应的管道输送水力坡度模型; DENG 等^[10]利用流变仪研究超细全尾砂 ($d_{80} < 9.72 \mu\text{m}$) 充填料浆的流变特性, 发现料浆在较低剪切速率下具有高的表观黏度, 并随时间表现出剪切稀化现象; 王志凯等^[11]利用流变仪研究发现, 超声波能显著降低充填料浆的屈服应力和塑性黏度, 利用超声波的非接触性有望降低充填系统中堵管现象发生的概率。由于充填料浆在管道输送过程中会管壁产生剪切、滑移现象, 同时受物料分布均匀性影响, 利用流变仪测得的流变参数与实际情况将存在一定差距^[12], 而 L 管试验中料浆流动距离较短, 得出的结果同样会产生较大偏差。为了得到可靠的流变参数, 在采矿工程中通常利用半工业环管试验获取料浆的沿程阻力, 在利用相应的公式计算流变参数。李夕兵等^[13]以黄磷渣为胶凝材料, 通过环管试验分析了利用全磷废料进行井下充填的可行性, 并结合流体力学理论构建了磷石膏高浓度充填的沿程阻力计算公式; 刘志祥等^[14]以三山岛金矿充填过程中遇到的高浓度、高倍线、强阻力等难题

为背景, 利用环管试验分析了不同配比参数下充填料浆的流变特性, 制定了适合该矿山充填的最佳管输参数; 王少勇等^[15]则利用自主研发的小型环管试验装置研究了不同工况条件下膏体管道输送的流变参数, 研究结果发现, 利用屈服伪塑性体来描述充填膏体的流变模型更为合适。

为了矿山的实际充填要求, 通常需要加入一定的外加剂来改变料浆的物理性能, 如料浆的屈服应力、塑性黏度及硬化后的强度等^[16-17]。例如, 利用粉煤灰的滚珠效应和减水剂的分散作用就可以有效降低充填料浆的流变参数^[16, 18-19]。相较于浅部矿山通过改善料浆的流变性能来减少管道堵管事故, 对于小倍线的深井充填, 充填料浆在直管段的高势能会对管道形成的巨大压力, 则容易造成爆管和喷管事故发生^[20]。为解决此类问题, 本课题组以三山岛千米深井充填为背景, 依托《深部金属矿绿色开采关键技术研发与示范》项目, 提出如下解决方案: 先向充填料浆中加入低密改性剂对充填料浆进行改性, 通过降低充填料浆的密度来降低深井充填管道静压; 然后在采空区附近设置临时搅拌槽添加增强剂, 对低密改性充填料浆进行消泡和增强, 以消除低密剂造成的充填体强度损失, 改性剂添加工艺流程图如图 1 所示。

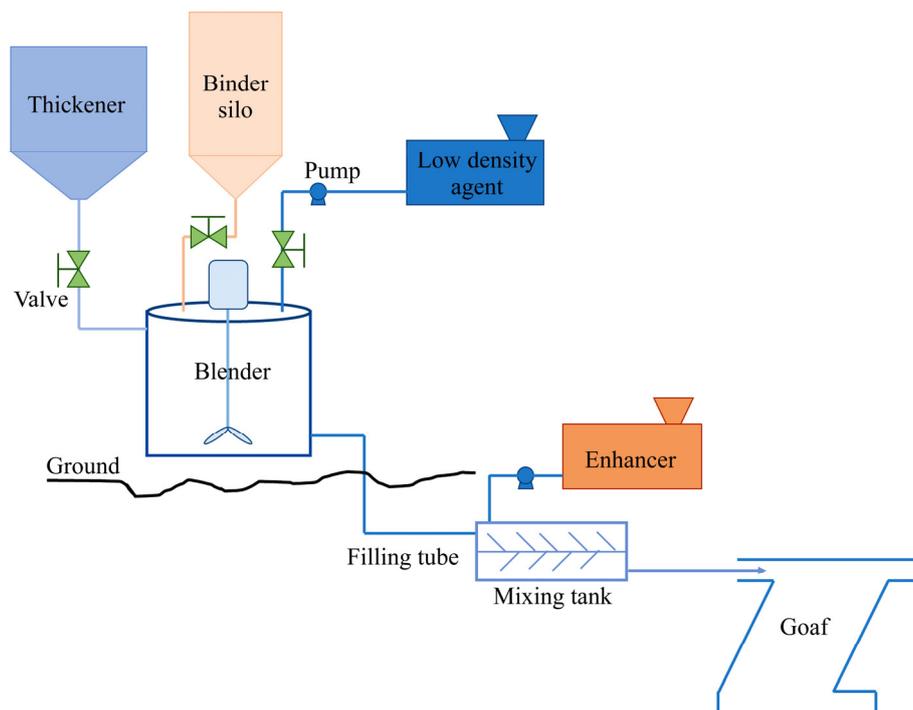


图 1 改性剂添加工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of modifier addition

本文作为充填料浆低密增强改性试验的一部分,是在低密剂配方优选试验基础上进行的^[21]。尝试利用半工业环管试验研究低密改性剂、料浆质量浓度和C料含量对充填料浆流变参数的影响,并尝试建立料浆流变参数与扩展度之间的关系,为三山岛下一步千米深井充填提供理论指导。

1 实验

1.1 试验材料

本次试验用到的材料包括全尾砂、C料、拌合水和低密剂。

1.1.1 全尾砂

试验用到的全尾砂来自三山岛选矿厂,利用电热鼓风机烘干后备用。全尾砂粒度组成采用Mastersizer2000激光粒度仪测定,结果如图2所示。从图中发现,全尾砂粒径小于20 μm颗粒含量占比约为42%,属于中等细度尾砂。经过计算,其不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 分别为12.86和0.6,级配较差。利用X射线荧光光谱仪(XRF)对全尾砂的化学成分组成进行了分析,其中发现 SiO_2 、 Al_2O_3 的含量分别为62.9%和15.2%,重金属未检出或成分含量极低,这表明三山岛尾矿属于一种无毒无害的惰性材料,可用于井下充填,化学成分如表1。

1.1.2 胶结剂和拌合水

黏土矿和石灰石作为生产水泥用的原料均属于不可再生资源,同时以普通硅酸盐水泥作为胶结剂进行充填存在充填体强度低,成本高的局限性^[22]。因此,本文选用山东黄金矿业有限公司焦家金

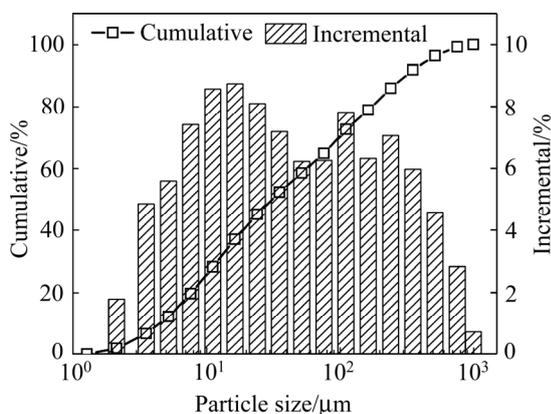


图2 全尾砂粒径分布图

Fig. 2 Particle size distribution of unclassified tailings

表1 全尾砂化学成分

Table 1 Chemical composition of unclassified tailings (mass fraction, %)

SiO_2	K_2O	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO
62.9	5.86	1.16	15.2	2.31
MgO	Na_2O	CO_2	Others	
0.90	3.10	7.20	1.37	

矿自主研发的充填C料作为胶结剂,该材料是以尾砂、水淬矿渣、石灰、石膏、水泥熟料及特殊外加剂等经粉磨形成的一种新型固结剂,外观呈白色粉末状^[23],化学成分与硅酸盐水泥类似,主要为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO和MgO。C料+80 μm含量不大于9.5%,比表面积为750 m^2/kg ,初凝时间和终凝时间分别为360 min和540 min。

拌合水来自三山岛金矿充填生产水,经检测发现pH值为7.2, Cl^- 为15171.2 mg/L,铜、锌、铅等重金属离子未检测出。

1.1.3 低密剂

由于三山岛金矿采深较大,在-1005 m中段的充填倍线约为2.1,小倍线容易造成料浆在垂直管段加速运动形成真空不满管流,增加爆管风险^[20],本文依托前期工作,提出向料浆中引入低密剂来降低充填垂直管段料浆的势能,以达到降低爆管事故的目的。低密剂为本课题组通过室内优选实验得到,由两种表面活性剂混合组成,外观为白色粉末状,如图3(a)所示。

1.2 试验方案及坍塌度试验结果

根据本课题组为三山岛金矿设计的方案,设置C料用量为16.7%和9.1%。同时,前期的低密试验发现低密改性剂会增加料浆的黏稠性,因此将料浆质量浓度降低两个百分点,设置为72%、70%和68% 3个等级。前期的室内密度试验发现,当低密剂的掺量(占C料质量)为4%时,充填料浆的密度降低幅度达到了23%,满足充填管道全程静压降低20%的考核目标^[21]。试验方案如表2所示,其中N-16.7和N-9.1为对照组,用于对比分析低密剂对充填料浆流变性的影响。

1.3 试验方法

1.3.1 环管试验

环管试验最接近采矿工程中充填料浆的实际输送情况, 可以精确测量料浆流变参数和研究其影响因素^[15]。环管试验选用一台双轴卧式搅拌机制备充填料浆, 设计搅拌时间为 10 min。输送泵选用一台 HBT90.21.200S 型混凝土泵, 最大输送能力为 90 m³/h。液压测试采用德国 Hydrotechnik 公司生产的 MultiSystem5060 便携式测试仪, 如图 3(c)所示。输送管为内径 78 mm 的 DN80 耐磨钢管, 总长约为 60 m, 泵送管路布置如图 3(e)所示。试验开始前先用水清洗管路, 然后按照试验方案将试验材料加入

搅拌机中, 搅拌 10 min 后形成均质料浆, 采用由浓到稀的浓度调整方法, 即先进行浓度 72%的试验, 试验完成后根据方案添加一定量的水, 以降低浓度。每改变一次浓度, 需要经过 10~20 min 的连续泵送循环和搅拌, 所有循环的料浆基本均匀后, 进行数据读取操作。泵送排量设为最大排量的 7%、13%、18%和 25%, 以此改变料浆流速, 测定不同流速下管道压力损失情况。在闭路实验期间, 每隔 5 min, 调整一次泵的频率, 同时需要记录料浆浓度、流量、各个监测点的压力和泵的工作压力等参数。

表 2 试验方案及坍落度试验结果

Table 2 Test scheme and slump test results

Classification	Test No.	Binder dosage/%	Solid content/%	Additive/%	Slump/cm	Flow spread/cm
Slump and loop test	N-16.7	16.7	68	0	28.6	120
			70		28	103
			72		27.6	75
Slump and loop test	Y-16.7	16.7	68	4	27.5	69.4
			70		26.4	53
			72		26	47
Slump test	N-9.1	9.1	68	0	29.3	130
			70		29.2	121
			72		29	110
Slump and loop test	Y-9.1	9.1	68	4	27.8	97
			70		27.2	77
			72		26.6	52



图 3 实验过程中使用的部分测试设备和材料

Fig. 3 Partial test equipments and material used during experiment: (a) Low density agent; (b) Slump test; (c) Blender; (d) Pressure measurement; (e) Loop test; (f) Control system

1.3.2 坍落度试验

坍落度是用于泵送泥浆的工程操作中的简单直观的参考指标,其值取决于材料的屈服应力和密度(密度与材料组成,颗粒密度和颗粒尺寸有关),直接反映了充填料浆的稠度、流动性和流变性^[24]。其值定义为提起截锥后的浆料初始高度与最终高度之差,坍落度试验按照普通新拌混凝土的测试标准进行(GB/T 50080)。在本工作中,使用截锥的顶部直径为100 mm,底部直径为200 mm,高度为300 mm,如图3(b)所示。由于在这次试验中料浆流动性较好,坍落度值随变量变化不明显,因此,料浆最终形态的扩展度用于试验分析。在提起坍落度桶后的2 min内,测量充填料浆在两个垂直方向上的铺展直径,将其平均值记为充填料浆的扩展度。

2 结果与讨论

2.1 低密剂对充填料浆扩展度的影响

图4所示为不同质量浓度料浆的坍落度测试结果。从图4中可以看出,C料含量和低密剂的加入不会改变料浆的扩展度值与质量浓度呈负相关的趋势,当料浆质量浓度从68%增加到72%时,扩展度相应的减小了45~20 cm。对于未加低密剂时,C料含量的增加对不同质量浓度料浆的流动特性均起到抑制作用。这是因为C料作为一种细颗粒胶凝材料掺入到料浆后,表面会迅速吸收水分子形成一定厚度的水膜^[25],而过多的水分子吸收会加速水化产物的形成,导致充填料浆的剪切应力增加^[24],从而使料浆流动阻力增加,扩展度值减小。

相关研究文献表明^[25],浆体在制备的过程中,拌合水会优先填充骨料颗粒之间的孔隙,剩余的水会包裹在固体颗粒表面形成一定厚度的水膜,而这骨料表层水膜的厚度直接与浆体的流动性呈正相关函数。当加入低密剂后,充填料浆的扩展度值减小,以C料含量16.7%为例,随着料浆质量浓度的增加,扩展度相应地降低了42.17%~37.33%。这是因为低密剂低作为一种表面活性剂,在充填料浆搅拌过程中形成大量微小气泡^[26],这些均匀分布在料浆中的气泡表面会吸附一定厚度的水分子,降低了固体颗粒表面的水膜厚度,从而使得流动性降低。

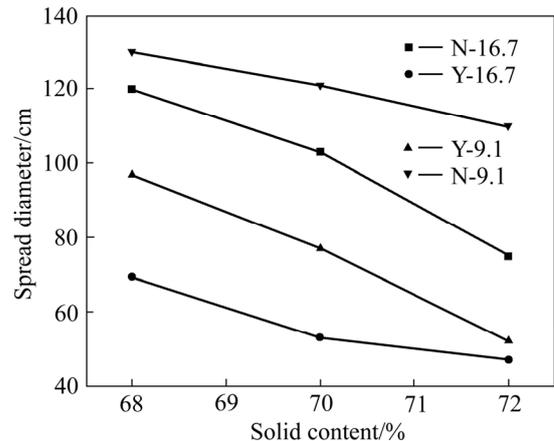


图4 低密剂对充填料浆扩展度的影响

Fig. 4 Effect of low density agent on spread diameter of filling slurry

此外,由于气泡表面带负电荷而与带正电荷的水化产物桥接在一起形成“气泡桥”^[27],这种桥接作用加强了固体颗粒之间、固体颗粒与水化产物的凝聚性,进一步阻碍了料浆的流动。因此,低密剂在料浆中通过降低料浆势能和增加料浆稠度来起到增压阻降压的作用,能有效缓解深井小倍线充填管道压力大、料浆流速快造成的爆管问题。

2.2 流变参数计算

大量学者从流变学的角度出发,通过研究剪切应力和剪切速率之间的关系发现全尾砂高浓度或膏体充填料浆符合宾汉塑性体和屈服伪塑性体(H-B)的流变特征^[7, 14-15]。通过对两种模型拟合发现不同工况的料浆流型更符合宾汉塑性体,拟合结果如图5所示,从图中可以看出,充填料浆的质量浓度越低,料浆的屈服应力 τ_0 、塑性黏度 μ 也就越小。因此,料浆的本构方程可用下式表示^[15]:

$$\tau_w = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad (1)$$

式中: τ_w 为料浆在管道中流动时与管壁的切应力,Pa; γ 为料浆的剪切速率,s。对于管道中的流体,剪切速率 γ 等于流速 v 沿管径方向的梯度 $dv/d\gamma$,流变方程可用下式表示^[13]:

$$\tau_w = \frac{4\tau_0}{3} + \mu \cdot \frac{8v}{D} \quad (2)$$

式中: v 为料浆流速,m/s; D 为充填管道内径,m。

根据环管试验采集的直管段点位压力差 Δp ,

可以计算出沿程阻力 j_m :

$$j_m = \frac{\Delta p}{L} \quad (3)$$

式中: L 为直管段测点距离, 在本文中为 6.92 m。

根据流体静力学平衡理论, 充填料浆在管道中与管壁的摩擦力等于沿程阻力, 因此, 管壁切应力 τ_w 还可用下式表示^[13]:

$$\tau_w = \frac{D}{4} \times \frac{\Delta p}{L} \quad (4)$$

联立式(1)~(4), 并利用 Origin 自定义函数拟合可以得到不同工况的充填料浆流变特性参数如表 3 所示。

从表 3 中可以看出, 随着充填料浆的质量浓度增加, 屈服应力、塑性黏度逐渐增大。这主要是因

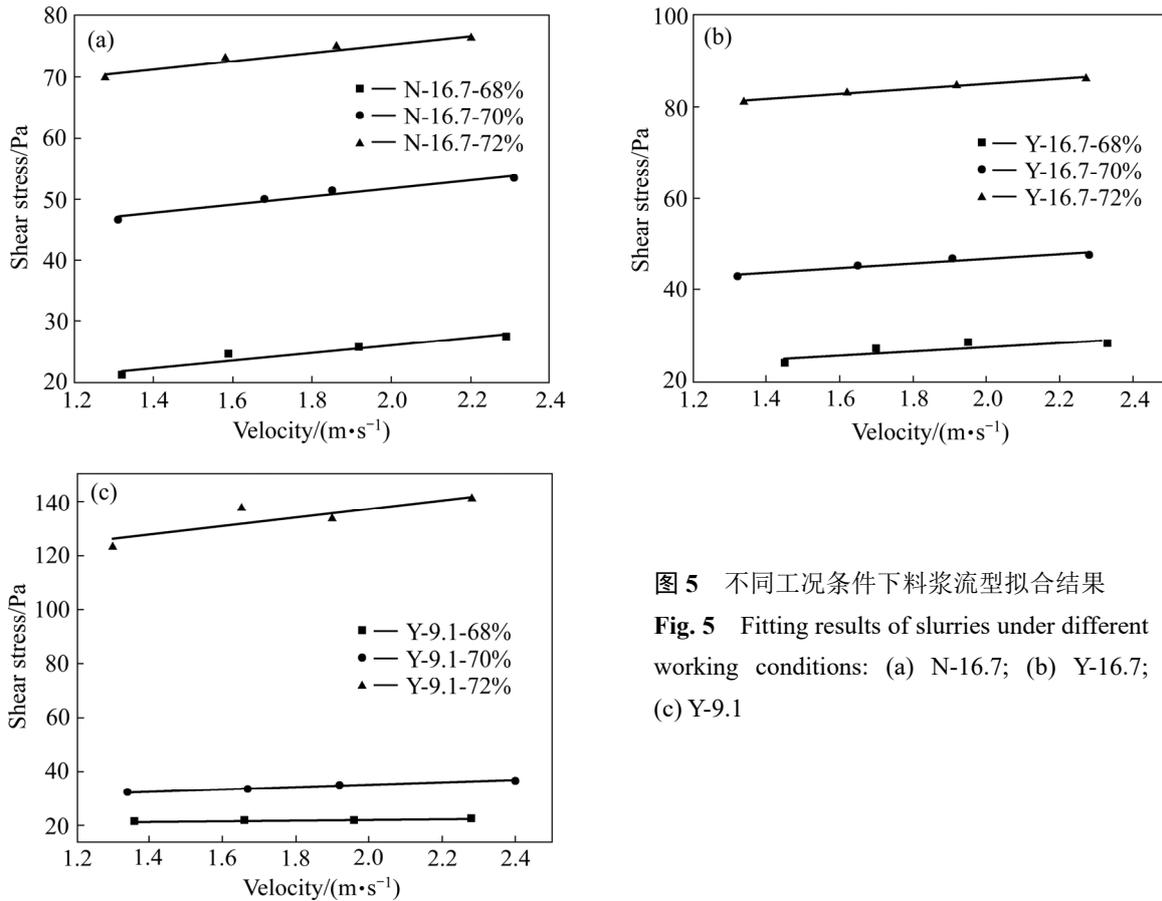


图 5 不同工况条件下料浆流型拟合结果

Fig. 5 Fitting results of slurries under different working conditions: (a) N-16.7; (b) Y-16.7; (c) Y-9.1

表 3 不同工况条件下充填料浆流变参数

Table 3 Rheological parameters of filling slurry under different working conditions

Test No.	R^2	Linear equation	Yield stress, τ_0 /Pa	Plastic viscosity, μ /(Pa·s)
N-16.7-68%	0.88	$\tau=12.12+6.90v$	10.44	0.0587
N-16.7-70%	0.95	$\tau=38.31+6.75v$	28.73	0.0658
N-16.7-72%	0.83	$\tau=66.70+4.22v$	46.10	0.0684
Y-16.7-68%	0.70	$\tau=18.38+4.62v$	13.78	0.0450
Y-16.7-70%	0.93	$\tau=36.67+5.0v$	27.50	0.0487
Y-16.7-72%	0.98	$\tau=74.18+5.36v$	55.63	0.0523
Y-9.1-68%	0.93	$\tau=19.65+1.21v$	14.74	0.0118
Y-9.1-70%	0.98	$\tau=26.18+4.31v$	19.63	0.0420
Y-9.1-72%	0.71	$\tau=106.37+15.51v$	79.78	0.1512

为质量浓度升高增加了尾砂颗粒在流动过程中的接触机会，颗粒间的作用力迅速增加，浆体颗粒间的相对滑动变得更加困难^[15]。另外，质量浓度的提高使得固体颗粒间的间距变小，C料颗粒堆积的更紧密，固体颗粒更容易在水化产物C-S-H凝胶的胶结作用下形成抵抗外力的絮状网络^[28]。黏度是浆体内部结构阻碍流动的性能，由于料浆内部气泡之间的桥接作用和固体颗粒间的小间距增加了C-S-H的凝聚性，表现为料浆的塑性黏度随低密剂的加入和质量分数增大而增大。

当C料含量为16.7%时，低密剂的加入使料浆的屈服应力增大，但屈服应力的增加随浓度增加逐渐减小，从31.99%(68%)降为20.67%(72%)。充填料浆塑性黏度随低密剂的加入呈现降低的趋势，这可能是由于低密剂生成的气泡表面吸附了大量水分子，使料浆实际质量浓度升高，而料浆浓度的增加使得浆体在管道输送过程中趋向于“柱塞流”，颗粒间相对滑动减弱，另一方面，浆体中的微小气泡在管道输送过程中吸附在管壁上起到了润滑层的作用^[29]，从而使得固体颗粒之间、固体颗粒和管壁之间的摩擦力减小，最终表现为低密剂使充填料浆的塑性黏度降低。

2.3 基于低密充填料浆的沿程阻力公式

料浆的扩展度与坍塌度值一样，它们直接反映了充填料浆的流变特性，可作为现场快速评估料浆输送性能的参考依据。但充填料浆是一种多参数流体，一个扩展度值在原则上可以表示多种不同稠度的充填料浆^[30]。为了有效、快速的估计充填料浆的输送性能，根据表3中的流变参数和表2中的扩展度值，可以拟合出不同C料含量下扩展度与屈服应力、塑性黏度的拟合函数，进而得到它们的回归方程，相关拟合系数 R^2 值均在0.83以上，拟合结果如图6~7所示。

根据式(1)~(4)可得出充填料浆的沿程阻力理论计算公式：

$$j_m = \frac{16\tau_0}{3D} + \frac{32\mu}{D^2} \cdot v \quad (5)$$

将图5中的回归方程带入式(5)就可以得到三山岛金矿不同工况条件下的沿程阻力经验计算公式，

如表4所示。表中， x 为不同质量浓度料浆的扩展度值，cm； v 为充填料浆流速，m/s。

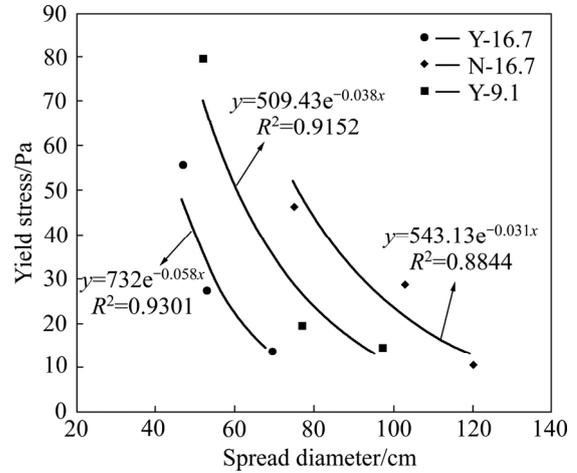


图6 屈服应力与扩展度的关系

Fig. 6 Relationship between yield stress and spread diameter of filling slurry

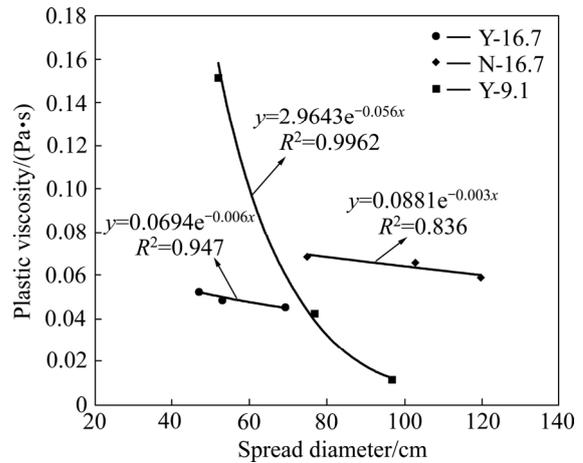


图7 塑性黏度与扩展度的关系

Fig. 7 Relationship between plastic viscosity and spread diameter of filling slurry

表4 沿程阻力经验计算公式

Table 4 Empirical calculation formula of resistance along way

Test No.	Empirical formula
N-16.7	$j_m = \frac{2896.69e^{-0.031x}}{D} + \frac{2.82e^{-0.03x}}{D^2} \cdot v$
Y-16.7	$j_m = \frac{8207.47e^{-0.07x}}{D} + \frac{4.56e^{-0.018x}}{D^2} \cdot v$
Y-9.1	$j_m = \frac{2716.96}{D} + \frac{94.86e^{-0.056x}}{D^2} \cdot v$

3 结论

1) 通过坍落度测试发现, C料含量和料浆质量浓度的增加以及掺入低密剂都会降低充填料浆的输送性能, 当料浆质量浓度从68%增加到72%时, 扩展度相应地减小了45~20 cm, 当C料含量为16.7%时, 低密剂掺入使料浆扩展度相应地降低了42.17%~37.33%。

2) 利用宾汉流体模型对环管试验数据进行拟合处理得到了相应的流变参数, 发现料浆的塑性黏度和屈服应力随低密剂的加入分别表现出减小和增大的现象, 但屈服应力的增加幅度随质量浓度增加而逐渐减小, 从31.99%(68%)降为20.67%(72%)。这可能是由于低密剂生成的气泡表面吸附了大量水分子, 使料浆实际质量浓度升高, 在管道输送过程中趋向于“柱塞流”, 颗粒间相对滑动减弱。此外, 浆体中的微小气泡吸附在管壁上可能对输送起到了润滑的作用。

3) 根据流体静力学平衡理论, 结合不同C料含量下扩展度与屈服应力、塑性黏度间的回归方程, 得出了三山岛金矿不同工况条件下的沿程阻力经验计算公式。该公式可用于现场快速、有效地评估充填料浆的输送性能。

REFERENCES

- [1] 蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略[J]. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417-426.
CAI Mei-feng, XUE Ding-long, REN Fen-hua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426.
- [2] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [3] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE He-ping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [4] HOU Chen, ZHU Wan-cheng, YAN Bao-xu, et al. The effects of temperature and binder content on the behavior of frozen cemented tailings backfill at early ages[J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117752.
- [5] XU Shuai, SUORINENI F T, LI Kun-meng, LI Yuan-hui. Evaluation of the strength and ultrasonic properties of foam-cemented paste backfill[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2017, 31.8: 544-557.
- [6] 王富林, 杨仕教, 苏帅, 等. 高浓度全尾砂充填料浆流变特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 87-90, 96.
WANG Fu-lin, YANG Shi-jiao, SU Shuai, et al. Experimental study on rheological properties of high-density slurry of full tailings[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(2): 87-90, 96.
- [7] 寇云鹏, 齐兆军, 宋泽普, 等. 全尾砂高浓度充填料浆流变特性试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(12): 32-35.
KOU Yun-peng, QI Zhao-jun, SONG Ze-pu, et al. Experimental study on rheological properties of high-concentration experimental study on rheological properties of high-concentration[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(12): 32-35.
- [8] 杨晓炳, 吴凡, 杨志强, 等. 粗骨料高质量分数充填料浆管输水力坡度模型及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(11): 2851-2858.
YANG Xiao-bing, WU Fan, YANG Zhi-qiang, et al. Pipeline hydraulic gradient model and its application for coarse aggregate filling Pipeline hydraulic gradient model and its application for coarse aggregate filling[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2019, 50(11): 2851-2858.
- [9] 侯国权, 郭利杰. 破碎风化砂粗骨料高浓度充填料浆输送阻力特性分析[J]. 中国矿业, 2018, 27(S2): 112-115, 133.
HOU Guo-quan, GUO Li-jie. Analysis of resistance characteristics of coarse aggregate filling slurry in weathered sand[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(S2): 112-115, 133.
- [10] 王志凯, 吕文生, 杨鹏, 等. 超声波对充填料浆流变特性的影响及流变参数预测[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(7): 1442-1452.
WANG Zhi-kai, LÜ Wen-sheng, YANG Peng, et al. Effect of ultrasonic waves on rheological properties of backfilling slurry and prediction of rheological parameters[J]. The

- Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(7): 1442-1452.
- [11] DENG Xue-jie, KLEIN B, TONG Li-bin, et al. Experimental study on the rheological behavior of ultra-fine cemented backfill[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 985-994.
- [12] 吴爱祥, 程海勇, 王貽明, 等. 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, et al. Transport resistance characteristic of paste pipeline considering effect of wall slip[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(1): 180-187.
- [13] 李夕兵, 刘冰, 姚金蕊, 等. 全磷废料绿色充填理论与实践[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1845-1865.
- LI Xi-bing, LIU Bing, YAO Jin-rui, et al. Theory and practice of green filling of total phosphorus waste[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(9): 1845-1865.
- [14] 刘志祥, 肖思友, 王卫华, 等. 海底开采高倍线强阻力充填料浆的输送[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1802-1810.
- LIU Zhi-xiang, XIAO Si-you, WANG Wei-hua, et al. Pipeline transportation of backfilling slurry with high filling times line and strong[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(8): 1802-1810.
- [15] 王少勇, 吴爱祥, 阮竹恩, 等. 基于环管实验的膏体流变特性及影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(10): 2519-2525.
- WANG Shao-yong, WU Ai-xiang, RUAN Zhu-en, et al. Rheological properties and influencing factors of pastes based on ring tube experiments[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(10): 2519-2525.
- [16] 盛宇航, 李广波, 姜海强. 减水剂与粉煤灰对全尾砂胶结充填料浆流变性能的影响[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(4): 55-63.
- SHENG Yu-hang, LI Guang-bo, JIANG Hai-qiang. Effects of water reducing agent and fly ash on the rheological properties of full tailings cemented filler slurry[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(4): 55-63.
- [17] 姜关照, 吴爱祥, 李红. 高硫尾砂充填体性能及化学外加剂对其影响[J]. 金属矿山, 2017(10): 171-175.
- JIANG Guan-zhao, WU Ai-xiang, LI Hong. High sulfur tailings backfill properties and effect of chemical additives[J]. Metal Mine, 2017(10): 171-175.
- [18] 刘宇, 黎梦圆, 阎培渝. 矿物掺合料对胶凝材料浆体流变性能和触变性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5): 594-601.
- LIU Yu, LI Meng-yuan, YAN Pei-yu. Effect of mineral admixtures on rheological properties and thixotropy of binder paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(5): 594-601.
- [19] YANG Lei, Yilmaz, Erol, LI Jun-wei, et al. Effect of superplasticizer type and dosage on fluidity and strength behavior of cemented tailings backfill with different solid contents[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 290-298.
- [20] 张钦礼, 刘奇, 赵建文, 等. 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 Qin-li, LIU Qi, ZHAO Jian-wen, et al. Pipeline transportation characteristics of filling paste-like slurry pipeline in deep mine[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(11): 3190-3195.
- [21] 郑伯坤, 尹旭岩, 黄腾龙, 等. 深井充填料浆改性调压输送技术试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(5): 32-35.
- ZHENG Bo-kun, YIN Xun-yan, HUANG Teng-long, et al. Experimental research on modified pressure conveying technology of filling slurry in deep mine[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(5): 32-35.
- [22] 张小瑞, 侯俊, 赵国彦. 基于新型固结剂的胶结充填管道输送技术研究[J]. 黄金, 2015, 36(9): 32-36.
- ZHANG Xiao-rui, HOU Jun, ZHAO Guo-yan. Research on the cemented filling of a new type consolidator with pipeline material transportation[J]. Gold, 2015, 36(9): 32-36.
- [23] DENG Xue-jie, ZHANG Ji-xiong, Klein, Bern, et al. Experimental characterization of the influence of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill[J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 168: 116-125.
- [24] QIU Jing-ping, GUO Zhen-bang, YANG Lei, et al. Effects of packing density and water film thickness on the fluidity behaviour of cemented paste backfill[J]. Powder Technology, 2020, 359: 27-35.
- [25] 黄艳玲, 元强, 刘耀强, 等. 外加剂对半流动性自密实混凝土滑模施工性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(S1): 254-260.
- HUANG Yan-ling, YUAN Qiang, LIU Yao-qiang, et al. Effect of additives on slip-form construction performance of semi-flowable self-compacting concrete[J]. Materials

- Reports, 2019, 33(S1): 254–260.
- [26] STRUBLE L J, JIANG Q. Effects of air entrainment on rheology[J]. *Materials Journal*, 2004, 101(6): 448–456.
- [27] JIANG H Q, FALL M, CUI L. Yield stress of cemented paste backfill in sub-zero environments: experimental results[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 92: 141–150.
- [28] ZHAO Jian-wen, WANG Xin-min, PENG Kang, et al. Utilization of foaming technology in cemented paste backfill of high-mud superfine unclassified tailings[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 2017: 6157869.
- [29] WALLEVIK J E. Relationship between the Bingham parameters and slump[J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(7): 1214–1221.

Transportable performance of modified unclassified tailings filling slurry based on loop test

ZHENG Bo-kun^{1,2}, YAO Wei^{1,2}, HUANG Teng-long^{1,2}, ZHANG Ling-yun^{1,2}, YIN Xu-yan^{1,2}

(1. Changsha Mine Research Institute Co., Ltd., Changsha 410012, China;

2. National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha 410012, China)

Abstract: Aiming at the problem of the high potential energy of the vertical pipe section caused by the small filling double line in the deep mine filling system, it is easy to cause the increase of tube explosion accidents. In this paper, slump and loop tests were used to study the influences of low-density modifier, C material content, and slurry mass concentration on the conveying performance of full tailings filler slurry. Based on the loop test, combined with the Bingham fluid model, the rheological parameters of the filling slurry under different working conditions were calculated. The results show that the incorporation of low-density modifiers, the increase of C material content and the mass concentration of the slurry will reduce the spread diameter of the slurry; compared with the unmodified filler slurry, the yield stress of the modified slurry increases from 31.99% (68%) to 20.67% (72%), and the plastic viscosity decreases about 23%. Combined with the hydrostatic equilibrium theory and the regression equations among the slump and yield stress, apparent viscosity, rheological index, the empirical calculation formula for the resistance along the way of the Sanshandao Gold Mine was established. The formula can be quickly and effectively used to estimated slurry transport performance in the field.

Key words: filling slurry with unclassified tailings; rheological parameters; loop test; deep well filling; resistance along the way

Foundation item: Projects(2018YFC0604603, 2018YFC0604601) supported by the National Key Research and Development Program During the Thirteenth Five-year Plan Period, China

Received date: 2020-04-13; **Accepted date:** 2020-12-07

Corresponding author: YAO Wei; Tel: +86-13840545872; E-mail: yaoxm@126.com

(编辑 何学锋)