第41卷第5期 东北大学学报(自然科学版) Vol.41,No.5
2020年5月 Journal of Northeastern University(Natural Science) May 2020

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2020.05.006

不同浓度料浆流变特性与混合骨料级配相关性试验

温震江[1],高 谦[1],王永定[2],何建元[2]
(1.北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室,北京 100083;
2.金川集团股份有限公司 镍钴资源综合利用国家重点实验室,甘肃 金昌 737100)

摘 要:为了探究混合骨料配比及粒径级配对料浆流变特性的影响,首先对矿山充填常用的废石和棒磨砂及其混合骨料进行粒径分析,并得到相应的特征粒径.其次采用流变仪对不同骨料配比、不同质量分数条件下的料浆进行测定,采用H-B流变模型拟合出相应的流变参数.然后对流变参数和流变特性进行分析,并基于最小二乘法研究骨料粒径级配与料浆流变特性的相关性.最后对料浆稳定性进行讨论,并通过建立力学模型确定了混合骨料不沉降离析的临界粒径范围为13.8~21.6 mm.试验结果表明:料浆屈服应力和表观黏度均随料浆质量分数的增大而增大;随着剪切速率的增大,料浆流变特性表现出不同的模型特性;料浆流变特性参数与骨料粒径级配的相关性随着特征粒径值的增大而增大.随着质量分数的提高,料浆屈服应力与骨料粒径级配相关性逐渐减弱,而表观黏度与之相反,质量分数和骨料粒径级配对料浆稳定性有很大影响.

关 键 词:充填料浆;流变特性;混合骨料;质量分数;粒径级配;相关性
中图分类号:TD 853;X 751 **文献标志码**:A **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:
文章编号:1005-3026(2020)05-0642-07

Experiment on Correlation Between Rheological Properties of Filling Slurry with Different Mass Concentration and Mixed Aggregate Gradation

WEN Zhen-jiang[1], *GAO Qian*[1], *WANG Yong-ding*[2], *HE Jian-yuan*[2]
(1. Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mine, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. National Key Laboratory of Nickel and Cobalt Resources Comprehensive Utilization, Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang 737100, China. Corresponding author: GAO Qian, E-mail: gaoqian@ces.ustb.edu.cn)

Abstract: In order to explore the effects of mixed aggregate ratio and particle size gradation on the rheological properties of the slurry, firstly, the particle size of the waste rock, rod mill sand and the mixture of them commonly used in filling was analyzed, and the corresponding characteristic particle size was obtained. Secondly, the slurry with different aggregate ratios and different mass concentrations was prepared by rheometer. The rheological parameters were fitted by H-B rheological model. Then, the rheological parameters and rheological properties were analyzed, and the correlation between aggregate size distribution and rheological properties of slurry was studied based on least square method. Finally, the stability of slurry is discussed, and the critical particle size range of non-settling segregation of aggregate is 13.8~21.6 mm by establishing mechanical model. The test results show that the yield stress and apparent viscosity of the slurry increase with the increase of slurry mass concentration. The rheological properties of slurry show different model characteristics with the increase of shear rate. The correlation between rheological properties parameters of slurry and aggregate particle size distribution increases with the increase of characteristic particle size. With the increase of mass concentration, the correlation between slurry yield stress and aggregate size gradation gradually decreases, while apparent viscosity gradually increases. The mass concentration and aggregate size gradation have a great

收稿日期:2019-08-27
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0602903).
作者简介:温震江(1991-),男,河南周口人,北京科技大学博士研究生;高 谦(1956-),男,江苏徐州人,北京科技大学教授.

influence on slurry stability.

Key words: filling slurry; rheological properties; mixed aggregate; mass concentration; particle size gradation; correlation

随着社会的快速发展,矿产资源的开采与利用日益增多,采矿活动也逐渐向高应力、高地压的深部发展[1]. 现有的充填采矿方法中,充填采矿法由于其损失贫化小、安全性高等特点被矿山广泛应用[2]. 金川矿山采用下向分层胶结充填法进行采矿,为了提高充填体强度,同时降低充填成本,金川采用混合骨料进行充填[3],然而当骨料混合不均匀、级配不合理时,对料浆流变特性和管道输送带来影响,会导致一系列料浆输送问题,不仅关系到充填体整体稳定性和安全生产,而且还会直接影响充填成本[3]. 所以,对充填料浆流变特性进行研究是保证料浆安全稳定输送的重点. 影响料浆流变特性的因素很多,其中骨料粒径级配和料浆质量分数较为显著[4]. 对此国内外专家进行了深入研究,其中,Santos 等[5]研究表明,采用连续级配骨料配制的自密实混凝土,相比于间断级配骨料混凝土具有更好的抗离析性能;朱梦良等[6]研究了骨料粒径级配对混凝土强度和流变特性的影响;王洪江等[7]阐述了粗粒级膏体充填存在的问题;杨志强等[3]研究了质量分数对料浆流变特性的影响,并对临界浓度就行了研究;吴爱祥等[8-9]研究表明料浆质量分数的变化直接影响料浆性质,进而影响管输阻力. 对于混合骨料的高浓度充填矿山来说,确定合理的骨料配比和料浆质量分数,对避免因骨料粒径过大造成料浆分层离析甚至堵管至关重要. 为了探究混合骨料配比及料浆质量分数对料浆流变特性的影响,确定保证料浆骨料不沉淀离析的临界粒径,在现有研究成果的基础上,结合金川矿山实际情况,通过进行流变试验研究充填料浆流变性指标与骨料级配参数的关系[3],为确定和优化混合骨料配比、选择合理的粒径范围和料浆质量分数、保证高浓度料浆的制备和输送提供理论依据.

1　试验材料

1.1　充填材料物化分析

本试验骨料主要采用废石和棒磨砂混合骨料,利用 XRF 分析其化学组成,如表 1 所示,并分别测定其物理指标,如表 2 所示. 可以看出二者主要成分均为 SiO_2,质量分数分别为 36.31% 和 63.6%,二者堆积密实度均为 60% 左右;胶凝材料采用矿山专用的 P. O 38.5 水泥,初凝时间大于 45 min.

表 1　充填骨料化学成分组成(质量分数)

Table 1　Chemical composition of filling aggregate (mass fraction)　%

骨料	SiO_2	MgO	Fe_3O_4	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Cr_2O_3	其他
废石	36.31	28.15	9.51	3.86	3.39	—	—	18.11
棒磨砂	63.6	3.68	—	1.39	—	3.44	0.132	27.58

表 2　充填骨料物理参数

Table 2　Physical parameters of filling aggregate

骨料	密度 $t\cdot m^{-3}$	堆积密度 $t\cdot m^{-3}$	含泥量 %	堆积密实度 %	空隙率 %
废石	2.87	1.59	15.05	60.89	39.11
棒磨砂	2.67	1.58	10.98	57.36	42.64

1.2　混合骨料配比及粒径级配分析

为了确定废石和棒磨砂混合骨料配比(以下简称“废砂比”)范围,首先对废石和棒磨砂粒径级配进行分析,并采用泰波公式进行拟合,结果如图 1 所示. 可知废石级配和棒磨砂级配指数分别为 0.619 9 和 0.307 2,相对于理想状态的 Fuller 级配指数 0.5 分别偏大和偏小,因此二者均不宜单独使用. 而是将废石作为粗骨料,棒磨砂作为细骨料混合使用,以改善废石级配[10]. 然后根据工业充填中使用的废砂比范围进行骨料粒径级配分析和堆积密实度试验,结果如图 2 和图 3 所示. 基于泰波级配理论和堆积密实度最大原则,确定试验中废石和棒磨砂配比为 6∶4,7∶3,8∶2,9∶1 四种级配,并且计算得出级配特征值,如表 3 所示.

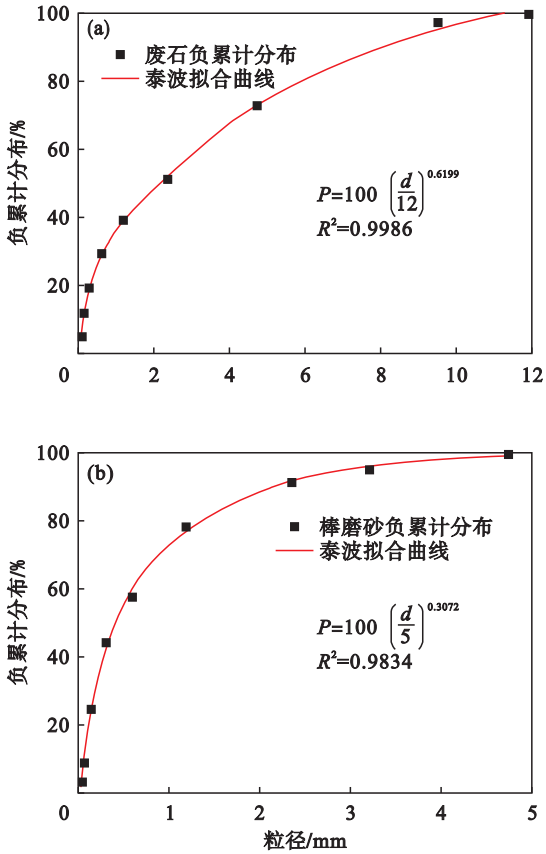

图 1 废石和棒磨砂粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of waste rock and rod mill sand

(a)—废石;(b)—棒磨砂.

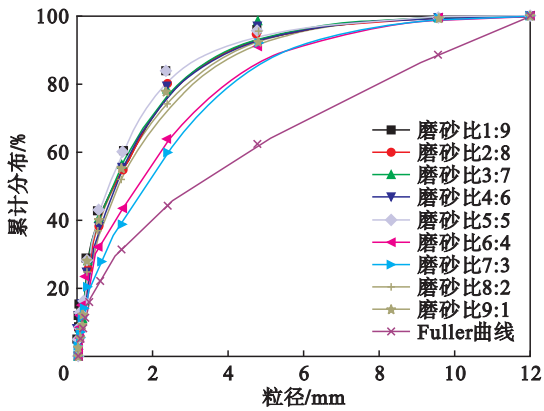

图 2 不同配比的混合骨料粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curves of mixed aggregates with different proportions

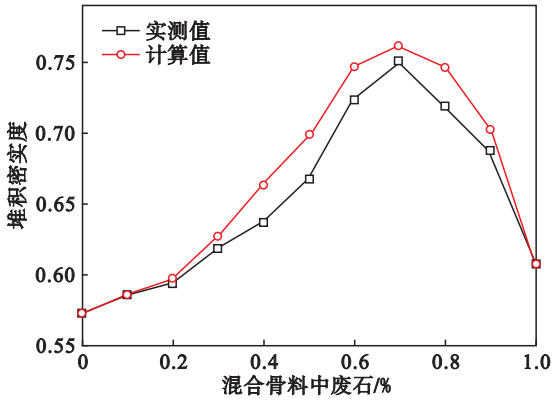

图 3 不同配比的混合骨料堆积密实度

Fig. 3 Packing density of mixed aggregate with different proportions

2 试验方法及结果

2.1 试验方法

试验采用高精度的 R/S + SST 型四叶桨式旋转流变仪,并通过 Rheo3000 软件设置操作参数进行实时监测. 根据矿山现场充填配比范围并结合前期研究[2],为了消除胶凝材料对试验的影响,按照骨料 400 g、固定胶凝材料 100 g 和一定比例的水分别制备质量分数为 78% ~84% 的料浆. 搅拌均匀后测定其流变参数,测试速率设定为 0 ~ 120 s^{-1},共 120 个转速点,每 1s 采集一组数据[9]. 对每组试验进行多次测量取平均值,以保证试验准确性.

2.2 试验结果

高浓度料浆常采用赫谢尔 - 尔克莱(简称 H - B)模型来表征,以初始屈服应力 τ_0、黏度 μ 和流变特性指数 n 等参数描述其流变特性[9],表达式如式(1)所示,并据此对试验数据进行处理分析,得到不同骨料配比和浓度下料浆流变特性参数,如表 4 所示.

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma^n. \tag{1}$$

式中:τ 为剪切应力,Pa;τ_0 为屈服应力,Pa;μ 为表观黏度,Pa·s;γ 为剪切速率,s^{-1};n 为流变特性指数. 当 $n=1$,$\tau_0=0$ 时,为牛顿体;当 $n=1$,$\tau_0>0$ 时,为宾汉姆体;当 $n>1$ 时,为膨胀体;当 $n<1$ 时,为伪塑性体[9,11].

表 3 不同配比的混合骨料粒径级配特征值

Table 3 Particle size gradation characteristic values of mixed aggregates with different proportions

废砂比	d_{10}/mm	d_{30}/mm	d_{50}/mm	d_{60}/mm	d_{90}/mm	平均粒径 d_{av}/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
6:4	0.15	0.80	1.57	3.24	4.63	3.97	21.42	1.30
7:3	0.16	1.03	1.79	3.54	4.60	4.19	22.11	1.88
8:2	0.20	0.64	1.01	2.13	3.85	2.97	10.57	0.95
9:1	0.17	0.50	0.85	1.76	3.51	2.65	10.51	0.86

表 4　不同配比的混合骨料充填料浆的流变参数测试结果

Table 4　Test results of rheological parameters of mixed aggregate filling slurry with different proportions

废砂比	质量分数 %	屈服应力 τ_0/Pa	表观黏度 μ/(Pa·s)	流变指数 n	相关系数 R^2
6∶4	78	47.98	0.622	1.039	0.970 5
	80	69.27	2.041	0.791	0.958 4
	82	145.58	2.144	0.937	0.937 7
	84	205.88	2.248	0.767	0.952 2
7∶3	78	35.48	0.331	0.963	0.855 7
	80	51.66	1.462	0.586	0.791 6
	82	83.93	1.683	0.642	0.898 5
	84	120.33	1.715	0.614	0.844 1
8∶2	78	14.56	1.358	0.589	0.908 6
	80	28.48	1.657	0.606	0.794 8
	82	51.75	1.677	0.636	0.875 7
	84	69.45	1.832	0.573	0.809 3
9∶1	78	13.71	0.534	0.494	0.965 9
	80	20.24	1.168	0.786	0.940 4
	82	35.02	1.325	0.660	0.905 1
	84	50.52	2.034	0.596	0.830 8

3　流变试验结果分析

3.1　流变参数分析

屈服应力和黏度是表征料浆流变特性的两个常用指标，二者均与料浆的质量分数、固体颗粒的粒径与级配等因素密切相关[11-12]. 根据表 4 结果可以看出，随着骨料配比和料浆质量分数的变化，屈服应力和黏度均发生不同程度的变化，如图 4 所示. 骨料配比对流变参数有明显的影响，随着混合骨料中棒磨砂含量的增大，料浆屈服应力和黏度也基本表现出逐渐增大的趋势：随着料浆质量分数的增大，屈服应力和黏度均发生不同程度增大，并且屈服应力在料浆质量分数为 78% ~80% 时增长较平缓，而当料浆质量分数大于 80% 时，屈服应力增长较快. 随着料浆质量分数的增大，料浆黏稠性也增大，从而使得浆体颗粒之间摩擦力加大，导致料浆黏度增大.

根据表 4 中料浆流动性指数 n 的结果可以看出，除了废砂比 6∶4 的 78% 的料浆流变性指数 n 大于 1，属于膨胀体，其余均小于 1，属于伪塑性体.

3.2　流变特性分析

金川矿山工业充填，当系统稳定时，料浆质量分数为 80% 左右，限于篇幅，以质量分数 78% 和 80% 为代表来研究料浆流变特性. 质量分数 78% 各配比骨料的料浆流变特性曲线如图 5 所示，可以看出：不同配比混合骨料的料浆流变曲线随着

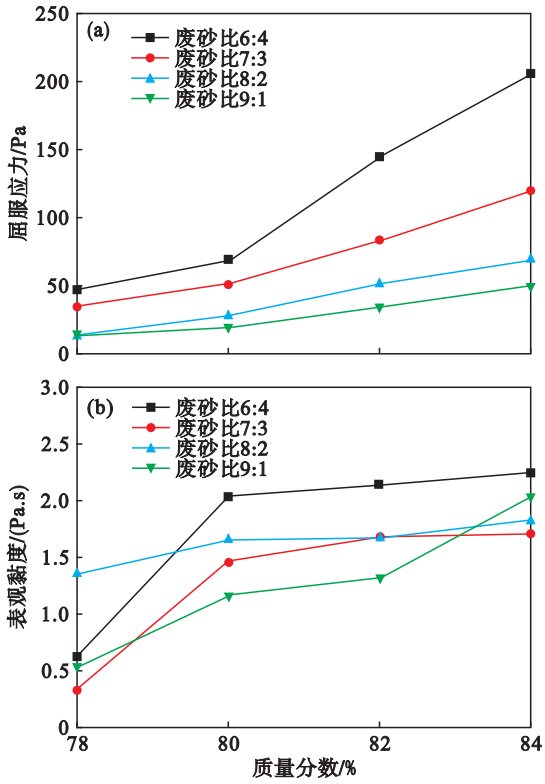

图 4　不同配比的混合骨料料浆流变参数与质量分数的关系

Fig. 4　Relationship between rheological parameters and mass concentration of mixed aggregate slurry with different proportions

(a)—屈服应力；(b)—表现黏度.

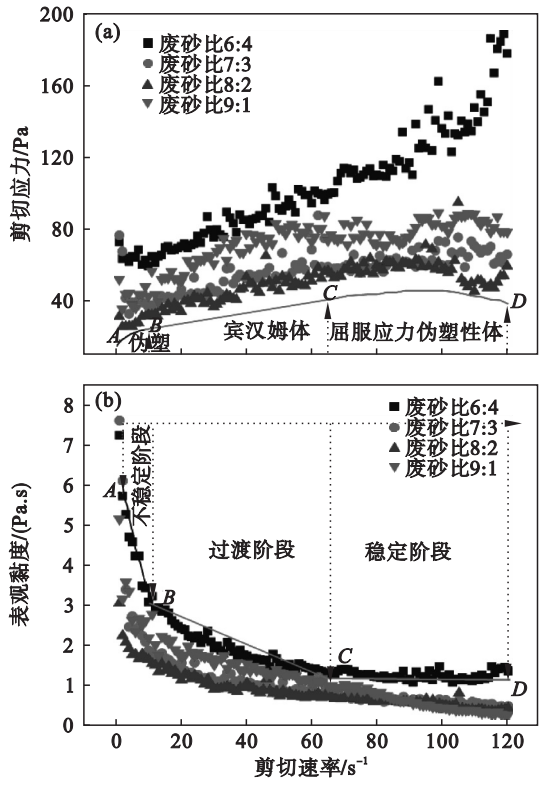

图 5　质量分数 78% 的料浆流变特性曲线

Fig. 5　Rheological characteristic curves of slurry with 78%　mass concentration

(a)—剪切应力；(b)—表观黏度.

剪切速率的变化存在一定的差异,除了废砂比为 6∶4 的混合骨料,其余各配比骨料充填料浆流变特性曲线趋势基本相似. 这是因为同一骨料配比的料浆随着剪切速率的变化,其流变特性也随之变化,大致分为三个阶段[13-14]:第一阶段 *AB* 段,即剪切速率在 0 ~ 10 s^{-1} 范围内,处于不稳定阶段,料浆具有伪塑性,属于伪塑性体;第二阶段 *BC* 段,即剪切速率介于 10 ~ 65 s^{-1} 之间,属于宾汉姆体;第三阶段 *CD* 段,即剪切速率大于65 s^{-1},符合屈服应力伪塑性体的特征,而表观黏度大致保持定值,料浆处于稳定阶段.

图 6 为质量分数 80% 不同骨料配比的充填料浆流变特性曲线. 可以看出其与 78% 条件下的流变特性规律大致相似,但是其剪切应力和表观黏度相应的增值均较质量分数 78% 条件下大,其原因是料浆质量分数越大,水分含量越少,浆体颗粒间摩擦力加大,使得屈服应力增长较快;同时料浆黏稠性也增大,从而使得浆体颗粒之间摩擦力加大,导致料浆黏度增大.

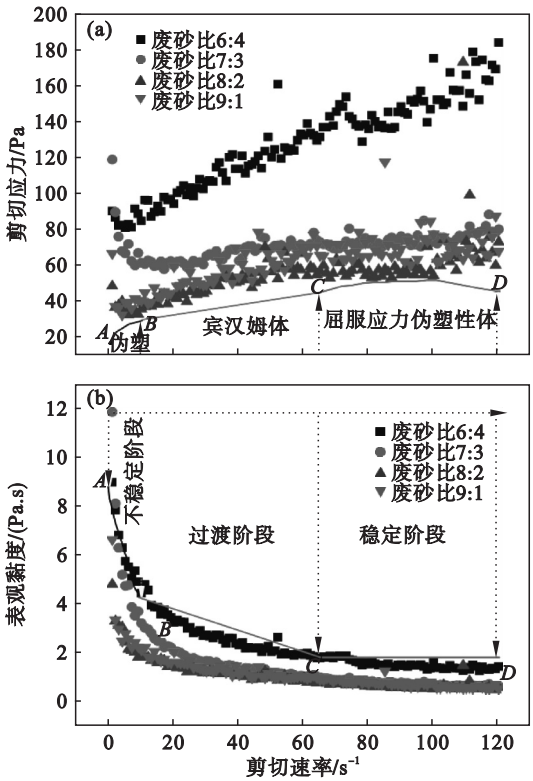

图 6 质量分数 80% 的料浆流变特性曲线

Fig. 6 Rheological characteristic curve of slurry with 80% mass concentration

(a)—剪切应力;(b)—表观黏度.

由图 5 和图 6 的料浆流变特性曲线分析可以看出,随着剪切速率的变化,相同骨料配比的料浆,其黏度先减小后趋于稳定,而对于不同骨料配比,废砂比为 7∶3 的混合骨料的表现出明显的料浆流变特性,并且流变模型较为稳定. 结合表 3、图 1 和图 2 级配参数和堆积密实度试验可以看出,废砂比为 7∶3 的混合骨料堆积密实度最大,粒径级配特征曲线更接近理想状态的 Fuller 曲线,较其余 3 组更优;表明混合骨料级配对料浆流变特性具有很大的影响.

3.3 流变特性参数与骨料级配相关性分析

为了探究料浆流变特性参数 *y* 与骨料级配参数 *x* 的相关性,采用最小二乘法拟合:

$$y = a + bx . \tag{2}$$

据此得到 *x* 与 *y* 的相关系数 *r*. 其中:当 $0.8 < |r| \leq 1$ 时,*x* 与 *y* 极强相关;$0.6 < |r| \leq 0.8$ 时,强相关;$0.4 < |r| \leq 0.6$ 时,中等相关;$|r| \leq 0.4$ 时,不相关或弱相关[15].

针对表 3 和表 4 试验数据,根据相关性方程对其进行最小二乘法计算,并得到不同料浆质量分数条件下相应的拟合结果,限于篇幅,文中仅列出质量分数 78% 和 80% 的结果,见表 5 ~ 表 6. 可以看出:在不同质量分数条件下,屈服应力与各特征粒径相关系数基本都大于 0.6,表明强相关,其中与 d_{90} 相关系数均达到 0.8,表明二者极相关;但随着特征粒径的减小,其相关性也逐渐减弱;随着特征粒径的增大,其与表观黏度二者的相关系数逐渐增大,表明相关性逐渐增强,其中表观黏度与 d_{90} 相关系数都大于 0.6,表明二者相关性强;随着料浆质量分数的提高,流变特性参数与骨料粒径级配二者相关性发生变化趋势如图 7 所示,其中屈服应力大致表现为:极强相关(78%,80%)—强相关(82%)—中等相关(84%),其中

表 5 质量分数 78% 的料浆流变参数与骨料粒径级配相关性

Table 5 Correlation between rheological parameters of slurry with 78% mass concentration and aggregate size

拟合关系式	*a*	*b*	|*r*|
$\tau = a + bd_{10}$	126.200	−578.897	0.706
$\tau = a + bd_{30}$	−10.554	51.886	0.757
$\tau = a + bd_{50}$	−14.243	32.293	0.866
$\tau = a + bd_{60}$	−18.169	17.312	0.887
$\tau = a + bd_{90}$	−88.655	28.099	0.935
$\tau = a + bd_{av}$	−41.050	20.024	0.898
$\mu = a + bd_{10}$	−2.383	18.228	0.456
$\mu = a + bd_{30}$	1.376	−0.896	0.488
$\mu = a + bd_{50}$	1.408	−0.533	0.495
$\mu = a + bd_{60}$	1.400	−0.259	0.534
$\mu = a + bd_{90}$	2.022	−0.316	0.803
$\mu = a + bd_{av}$	1.724	−0.294	0.492

表 6　质量分数 80% 的料浆流变参数与骨料粒径级配相关性

Table 6　Correlation between rheological parameters of slurry with 80% mass concentration and aggregate size

拟合关系式	a	b	$\lvert r \rvert$
$\tau = a + bd_{10}$	150.363	−632.995	0.731
$\tau = a + bd_{30}$	−8.074	68.738	0.785
$\tau = a + bd_{50}$	−11.863	41.941	0.859
$\tau = a + bd_{60}$	−17.470	22.675	0.887
$\tau = a + bd_{90}$	−112.465	37.447	0.951
$\tau = a + bd_{av}$	−47.451	26.230	0.898
$\mu = a + bd_{10}$	2.051	−2.764	0.565
$\mu = a + bd_{30}$	1.192	0.526	0.589
$\mu = a + bd_{50}$	1.084	0.381	0.599
$\mu = a + bd_{60}$	0.986	0.224	0.604
$\mu = a + bd_{90}$	−0.245	0.440	0.859
$\mu = a + bd_{av}$	0.674	0.264	0.540

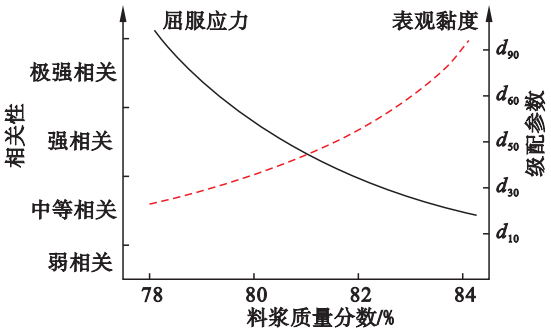

图 7　流变特性参数与骨料级配相关性趋势图

Fig. 7　Trend diagram of correlation between rheological parameters and aggregate gradation

质量分数为 80% 时，相关性最大. 然而，随着质量分数的提高，表观黏度与骨料粒径级配的相关性则是逐渐增大，表现为：中等相关(78%，80%)—强相关(82%)—极强相关(84%). 在同等条件下，特征粒径 d_{90} 与料浆屈服应力和表观黏度的相关性最大，则说明粗颗粒对于料浆流变特性影响较大；随着料浆质量分数的增大，特征粒径 d_{90} 与表观黏度和屈服应力的相关性先增大后减小，均在质量分数 80% 时达到最大，这是因为料浆质量分数过高时，其对流变特性的影响要大于骨料粒径级配.

4　料浆稳定性及临界粒径

4.1　料浆稳定性分析

金川矿山采用的是废石和棒磨砂混合骨料的高浓度自流输送充填技术，在充填过程中，料浆稳定性的好坏不仅影响管道磨损，而且影响输送过程中骨料的沉降，甚至造成堵管、爆管，是料浆顺利输送与否的关键[14]. 骨料级配不均匀和骨料颗粒过大会造成料浆泌水、粗骨料沉降、料浆分层离析，甚至造成堵管，影响料浆稳定性. 料浆的稳定输送实质就是在保证充填体强度的前提下，选择合理的质量分数和骨料粒径级配，尽可能地控制料浆分层离析、降低管输阻力、减小管道磨损，使其能够稳定地通过管道自流输送到采空区.

4.2　骨料临界粒径的确定

骨料粒径级配是影响料浆稳定性的一个重要因素，因此，在合理质量分数的条件下确定骨料临界粒径，对于控制料浆分层离析、保证料浆稳定输送具有重要意义. 为了研究骨料在料浆中的受力情况，可将其简化为质地均匀的球形颗粒[14]，其受力分析如图 8 所示. 可以看出骨料颗粒在料浆中不仅受到重力 G，还受到一个沉降阻力 F，为了确保骨料不发生沉降离析，即粗颗粒在料浆中处于一个临界平衡状态，其合力为零[15]：

$$F - G = 0 . \tag{3}$$

其中，球形颗粒在料浆中所受重力 G 为

$$G = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_2 - \rho_1) g . \tag{4}$$

沉降阻力 F 为料浆屈服应力 τ_0 在骨料颗粒表面引起的剪切阻力的合力，如式(5)所示：

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{d}F &= \tau_0 \cos\varphi \mathrm{d}A = 2\pi r^2 \cos^2\varphi \tau_0 \mathrm{d}\varphi , \\ F &= 4\pi r^2 \tau_0 \int_0^{\pi/2} \cos^2\varphi \mathrm{d}\varphi = \frac{1}{4}\pi^2 d^2 \tau_0 . \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中：ρ_1 为料浆密度，kg/m^3；ρ_2 为粗骨料表观密度，kg/m^3；d 为骨料颗粒直径，m；A 为骨料粗颗粒横截面积，m^2；τ_0 为料浆屈服应力，Pa.

联立式(3)～式(5)得到临界条件下料浆中骨料不发生沉降离析的粒径 d 如式(6)所示，可以看出，临界粒径与料浆流变特性相关.

$$d = \frac{3\pi\tau_0}{2(\rho_2 - \rho_1) g} . \tag{6}$$

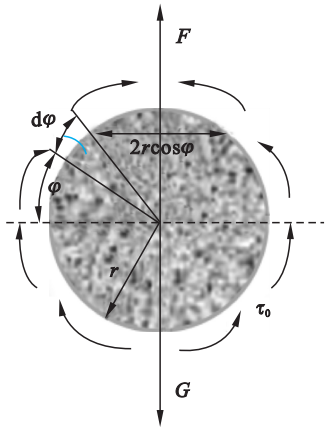

图 8　骨料受力分析图

Fig. 8　Force analysis of aggregate

根据环管试验及现场工业充填管道输送阻力监测结果显示,对于工业充填配比的废石和棒磨砂混合骨料,料浆质量分数 78% ~84% 时能够满足自流输送而且阻力较小,结合料浆流变特性参数与骨料粒径相关性研究,确定废砂比 6∶4 ~9∶1 在 78% ~84% 条件下流变模型较为稳定,屈服应力 τ_0 介于 13.71 ~205.88 Pa. 根据表 4 中相关参数及相应条件下骨料表观密度 ρ_2 及料浆密度 ρ_1 代入式(6),可得到金川矿山混合骨料临界粒径范围为 13.8 ~21.6 mm. 因此金川矿山将废石破碎最大粒径由 20 mm 和 16 mm 改为 12 mm,以保证料浆稳定性,降低甚至避免骨料沉降造成堵管.

5 结 论

1) 采用流变仪对各骨料配比下不同质量分数的料浆进行测定,并基于 H - B 模型进行拟合,得出相应的流变参数,可以看出除了废砂比 6∶4,质量分数为 78% 时,流变指数 $n>1$,属于膨胀体,其余流变性指数 n 均小于 1,均属于伪塑性体.

2) 随着料浆剪切速率的增大,料浆流变特性曲线也随之变化,呈现出不同的流变模型特性,料浆剪切应力(表观黏度)可分为三个阶段:伪塑性体(不稳定阶段)—宾汉姆体(过渡阶段)—屈服应力的伪塑性体(稳定阶段).

3) 料浆屈服应力和表观黏度均与骨料特征粒径 d_{90} 相关性最高,说明骨料粒径级配对流变特性有很大影响;随着料浆质量分数的增大,屈服应力(表观黏度)与骨料粒径级配相关性变化趋势分别为:78% ,80% 极强相关(中等相关)—82% 强相关(强相关)—84% 中等相关(极强相关).

4) 通过对骨料颗粒建立力学模型分析,得到相应临界粒径范围约为 13.8 ~21.6 mm,为金川矿山粗骨料破碎的最大粒径选择提供理论依据.

参考文献:

[1] 李夕兵,周健,王少锋,等. 深部固体资源开采评述与探索[J]. 中国有色金属学报,2017,27(6):1236 - 1262.
(Li Xi-bing, Zhou Jian, Wang Shao-feng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(6):1236 - 1262.)

[2] 杨志强,高谦,王永前,等. 金川全尾砂 - 棒磨砂混合充填料胶砂强度与料浆流变特性研究[J]. 岩石力学与工程报,2014,33(sup2):3985 - 3991.
(Yang Zhi-qiang, Gao Qian, Wang Yong-qian, et al. Research on filling body strength and rheological properties of mixed filling mortar with unclassified tailings and rod milling sand in Jinchuan mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(sup2):3985 - 3991.)

[3] 杨志强,高谦,王永前,等. 废石尾砂混合料浆流变特性及充填采场流动性试验[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2017,56(2):294 - 299.
(Yang Zhi-qiang, Gao Qian, Wang Yong-qian, et al. Test study on rheological characteristics for mixed filling slurry including waste rock and tailings and its liquidity in the stope[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2017, 56(2):294 - 299.)

[4] 张修香,乔登攀. 废石 - 尾砂高浓度充填料浆流变参数的确定[J]. 矿冶工程,2018,38(5):11 - 15.
(Zhang Xiu-xiang, Qiao Deng-pan. Determination of rheological parameter of slurry backfill composed of waste rock and sand tailings[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2018, 38(5):11 - 15.)

[5] Santos A C P, Ortiz-Lozano J A, Villegas N, et al. Experimental study about the effects of granular skeleton distribution on the mechanical properties of self compacting concrete (SCC)[J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 78(78):40 - 49.

[6] 朱梦良,唐小林,刘伟. 粗集料对水泥稳定碎石骨架结构形成的影响[J]. 交通科学与工程,2010,26(1):1 - 5.
(Zhu Meng-liang, Tang Xiao-lin, Liu Wei. Effect of coarse aggregate on skeleton structure formation of cement stabilized crushed stone[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2010, 26(1):1 - 5.)

[7] 王洪江,吴爱祥,肖卫国,等. 粗粒级膏体充填的技术进展及存在的问题[J]. 金属矿山,2009(11):1 - 5.
(Wang Hong-jiang, Wu Ai-xiang, Xiao Wei-guo, et al. The progresses of coarse paste fill technology and its existing problem[J]. *Metal Mine*, 2009(11):1 - 5.)

[8] 吴爱祥,刘晓辉,王洪江,等. 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,2014,42(5):736 - 740.
(Wu Ai-xiang, Liu Xiao-hui, Wang Hong-jiang, et al. Calculation of resistance in total tailings paste piping transportation based on time-varying behavior[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 42(5):736 - 740.)

[9] 徐文彬,杨宝贵,杨胜利,等. 矸石充填料浆流变特性与颗粒级配相关性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(4):1282 - 1289.
(Xu Wen-bin, Yang Bao-gui, Yang Sheng-li, et al. Experimental study on correlativity between rheological parameters and grain grading of coal gauge backfill slurry[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(4):1282 - 1289.)

[10] 高谦,杨晓炳,温震江,等. 基于 RSM - BBD 的混合骨料充填料浆配比优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019,46(6):47 - 55.
(Gao Qian, Yang Xiao-bing, Wen Zhen-jiang, et al. Optimization of proportioning of mixed aggregate filling slurry based on BBD response surface method[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(6):47 - 55.)

[11] Zhang J B, An X H, Nie D. Effect of fine aggregate characteristics on the thresholds of self-compacting paste rheological properties[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 116:355 - 365.

[12] 赵才智. 煤矿新型膏体充填材料性能及其应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2008.
(Zhao Cai-zhi. Study on coal mine new paste filling material performance and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.)

[13] 刘志双. 充填料浆流变特性及其输送管道磨损研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2018.
(Liu Zhi-shuang. Study on rheological properties of filling slurry and wear of conveying pipeline[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2018.)

[14] 赵国彦,杜雪鹏. 块石胶结充填颗粒离析机理[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(8):3196 - 3199.
(Zhao Guo-yan, Du Xue-peng. Mechanism on particle segregation of rocky cemented fill[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(8):3196 - 3199.)

[15] Jossic L, Magnin A. Drag and stability of objects in a yield stress fluid[J]. *AIChE Journal*, 2001, 47(12):2666 - 2672.