

高浓度粗骨料充填料浆抗离析特性及其数学模型

吴凡¹, 杨晓炳¹, 杨志强^{1,2}, 高谦¹

- (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, 甘肃 金昌, 737100)

摘要: 为研究高浓度粗骨料充填料浆的抗离析特性, 对初始与临界离析状态下的粗骨料进行受力分析, 提出抗离析特性决定系数。为检验该系数, 以废棒比、砂灰比和料浆质量分数为影响因素, 采用泌水率测试实验和料浆流变特性实验进行验证, 并对实验结果拟合。基于决定系数, 构建抗离析特性数学模型, 采用图像法对模型预测结果进行检验。研究结果表明: 决定系数与泌水率呈明显的线性关系, 判定料浆离析分界点的决定系数为1, 对应泌水率为10%, 决定系数大于1或泌水率小于10%时料浆具备良好的抗离析特性。模型误差率基本不超过5%, 满足精度要求。充填体截面骨料分布特征与模型预测抗离析结果吻合良好, 模型可合理指导制备矿山充填料浆。

关键词: 充填料浆; 抗离析特性; 粗骨料; 泌水率; 数学模型

中图分类号: TD853

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)

文章编号: 1672-7207(2020)05-1309-08



Anti-segregation property and its mathematical model of high concentration filling slurry with coarse aggregate

WU Fan¹, YANG Xiaobing¹, YANG Zhiqiang^{1,2}, GAO Qian¹

- (1. Key Laboratory of Ministry of Education of China for High-efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China;
2. Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang 737100, China)

Abstract: To study the anti-segregation property of high concentration filling slurry with coarse aggregate, the force analysis of coarse aggregate under initial and critical segregation conditions was carried out, and the coefficient of determination for anti-segregation property was proposed. To verify this coefficient, the bleeding rate test experiment and slurry rheological property experiment were carried out with the three factors, i.e. waste bar ratio, sand-cement ratio and slurry mass fraction, and fitting analysis of the results was conducted. Based on the coefficient of determination, a mathematical model of anti-segregation property was constructed. The predicted results of the model were verified by the image method. The results show that there is a clear linear relationship between the coefficient and the bleeding rate. The coefficient of determination slurry for segregation boundary point is 1, and the corresponding bleeding rate is 10%; when the coefficient of determination is more than 1 or

收稿日期: 2019-06-21; 修回日期: 2019-08-23

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划项目(2017YFC0602903) (Project(2017YFC0602903) supported by the National Key Research and Development Program of China)

通信作者: 高谦, 博士, 教授, 从事充填采矿技术与固体废弃物综合利用研究; E-mail: gaoqian@ces.ustb.edu.cn

bleeding rate is less than 10%, the slurry has good anti-segregation property. The error rate of the model is less than 5%, which meets the accuracy requirement. Distribution characteristics of aggregate in the filling section are in good agreement with the predicted anti-segregation results of the model, which can reasonably guide the preparation of filling slurry.

Key words: filling slurry; anti-segregation property; coarse aggregate; bleeding rate; mathematical model

由于充填采矿技术具备安全、经济、环保等优点,越来越多的国家将此项技术应用于矿山开采中^[1-4],然而在生产过程中充填料浆离析是至今尚未完全解决的难题。充填料浆在管道输送中,料浆离析导致管道堵塞,影响矿山采充顺序^[5-6]。此外,当料浆达到井下采空区后,料浆离析还会造成充填体分层进而导致强度大幅下降,影响矿山安全作业^[6-8]。同时,矿山胶结充填料可看成一种低标号流态混凝土^[9],研究料浆离析问题在充填采矿、混凝土等领域具有重大的工程意义与理论意义。目前,许多国内外专家学者就此开展了研究。赵国彦等^[10]对块石胶结充填料浆中的颗粒离析进行了机理研究;NILI等^[11]提出了评价自密实混凝土抗离析性能的新方法;吴爱祥等^[12]研究了颗粒级配对粗骨料充填料浆离析的影响规律;TREGGER等^[13]研究了混凝土动态离析与塌落度之间关系;史采星等^[14]研究了充填料浆离析分层对充填体强度的影响规律;PANESAR等^[15]研究了离析对混凝土运输及耐久性能的影响;张云国等^[16]通过配合比方法控制自密实轻骨料混凝土抗离析性。然而,与混凝土不同的是,目前关于矿山充填料浆抗离析特性的理论研究较少。高浓度充填是近几十年来充填研究的主要方向^[17],以甘肃某镍矿为工程背景,目前该矿棒磨砂无法满足充填骨料的需求,急需矿山周边丰富廉价的掘进废石补充。因此,研究高浓度下废石-棒磨砂混合而成的粗骨料充填料浆的抗离析特性对指导同类型矿山的充填采矿具有重要意义。基于上述分析,本文作者总结初始及临界状态下粗骨料在浆体中的受力情况,提出抗离析特性决定系数,采用泌水率测试实验和料浆流变特性实验对决定系数进行验证,构建抗离析特性数学模型,并运用图像法对模型进行验证,充填体截面骨料分布情况很好地吻合数学模型预测结果,模型可实现对料浆抗离析特性的精准预测,合理指导制备矿山充填料浆。

1 实验

1.1 实验方法

泌水率^[18]反映了充填料浆的保水性能,实际上也是浆体的离析特性。将搅拌均匀的充填料浆盛入量杯,测定浆体质量,并换算出其中清水质量;静置 60 min 后,用合理的泌水工具将清水析出,并测定其质量,一般取 3 次测试结果平均值,泌水率 M 的计算公式如下:

$$M = \frac{W}{m(1 - C_w)} \quad (1)$$

式中: M 为浆体泌水率, %; W 为泌出清水质量, g; m 为原浆体质量, g; C_w 为料浆质量分数, %。

流变特性实验选用美国 Brookfield 公司生产的 R/S 型软固体流变测试仪,并配备 V40-20 型桨式转子测定充填料浆的屈服应力。

1.2 实验材料

实验所用的粗骨料由废石和棒磨砂按不同质量比混合均匀而成,两者均来自甘肃某镍矿,前者为井下掘进废石经颚式破碎机破碎后的废石,后者为戈壁集料经棒磨机加工后的棒磨砂,骨料形状及级配曲线如图 1 所示。胶结料为 42.5 硅酸盐水泥,实验用水为室内自来水。实验原材料的力学性能参数如表 1 所示。

1.3 实验方案

综合各方面因素,确定采用废棒比(废石与棒磨砂的质量比)、砂灰比(骨料与水泥的质量比)和料浆质量分数作为实验影响因素,测定不同浆体的泌水率与屈服应力,实验方案如表 2 所示。

2 粗骨料受力特征分析

2.1 粗骨料初始离析力学模型

粗骨料充填料浆沉降离析可理解为由于固体颗粒受力不平衡发生固液分层与离析的现象,其



(a) 废石; (b) 棒磨砂; (c) 粒径曲线
1—废石; 2—棒磨砂。

图1 骨料形状与级配曲线

Fig. 1 Shape and grading curves of aggregates

表1 实验原材料参数

Table 1 Parameters of experimental raw materials

原材料	密度/(t·m ⁻³)	容重/(t·m ⁻³)	孔隙率/%
废石	2.87	1.585	40.11
棒磨砂	2.67	1.593	40.64
水泥	2.97	1.583	0.50

表2 实验影响因素水平

Table 2 Level of experimental in fluencing factors

实验编号	影响因素		
	废棒比	砂灰比	料浆质量分数/%
A1	3:7	5	80
A2	3:7	5	82
A3	3:7	5	84
A4	3:7	5	86
B1	3:7	4	84
B2	3:7	5	84
B3	3:7	6	84
B4	3:7	7	84
C1	4:6	5	84
C2	3:7	5	84
C3	2:8	5	84
C4	1:9	5	84

实质在于浆体中未形成稳定的空间絮网结构^[6,19]。浆体由固体颗粒、空间自由水和颗粒吸附水组成, 假设料浆具有良好的均质性, 粗骨料为标准圆形状且互不接触。通过分析粗骨料在其絮网结构中的受力状态, 建立粗骨料抗离析受力模型。在新拌充填料浆中, 初始条件下的粗骨料受到重力 G 、浮力 F_1 和黏滞阻力 F_2 的共同作用^[20-22], 其受力分析如图2所示。

由图2可见: 当 $F_2 \geq G - F_1$ 时, 粗骨料所受合力 ≥ 0 且垂直向上, 不易发生离析; 反之, 当 $F_2 < G - F_1$ 时, 粗骨料所受合力 < 0 且垂直向下, 易发生离析。因此, 粗骨料充填料浆具有良好抗离析特性需满足条件:

$$\frac{F_2}{G - F_1} \geq 1 \quad (2)$$

黏滞阻力 F_2 来自屈服应力 τ_y 在颗粒表面的作用, 可表示为

$$F_2 = C_s \tau_y A \quad (3)$$

式中: C_s 为颗粒形状系数, 长方形颗粒取0.6~0.7, 扁平形颗粒取0.4~0.6, 结合图2所示粗骨料的大颗粒介于两者之间, 确定本研究 C_s 为0.6; A 为颗粒的最大截面面积, m^2 。假设粗骨料与水平方向成 θ 角处的微分面积为 dA , 则其对应微元体的黏滞阻力 F_2 在垂直方向上的分力为

$$dF_2 = C_s \tau_y \cos\theta dA = C_s \pi r^2 \cos^2\theta \tau_y d\theta \quad (4)$$

对式(4)进行积分可得到1/4的粗骨料的黏滞阻力, 进而获得充填料浆中的粗骨料所受黏滞阻力为

$$F_2 = 4C_s \pi r^2 \tau_y \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2\theta d\theta = \frac{1}{4} C_s \pi^2 d^2 \tau_y \quad (5)$$

粗骨料所受重力 G 与浮力 F_1 计算式为

$$\begin{cases} G = \rho_a g V = \frac{1}{6} \pi \rho_a g d^3 \\ F_1 = \rho_s g V = \frac{1}{6} \pi \rho_s g d^3 \end{cases} \quad (6)$$

式中: ρ_a 为粗骨料的密度, t/m^3 ; ρ_s 为充填料浆的密度, t/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; d 为粗骨料颗粒直径, m 。

联立式(2), (5)与(6), 得到初始状态下具备良

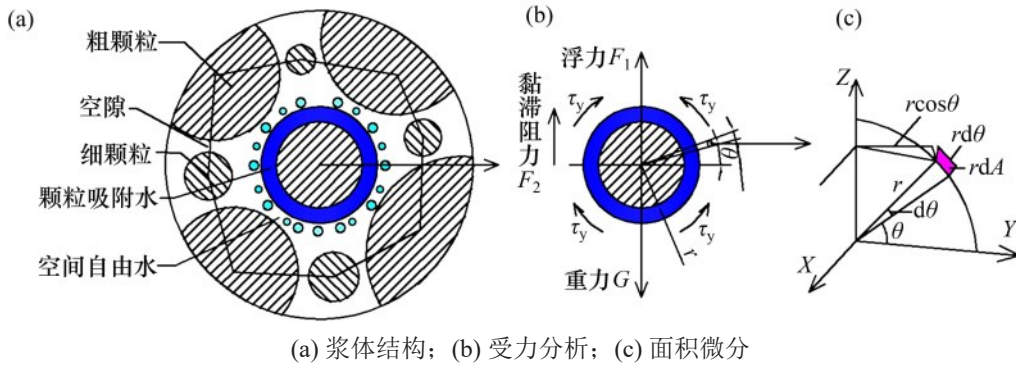


图2 粗骨料初始受力分析

Fig. 2 Initial forces analysis of coarse aggregate

好抗离析特性的粗骨料充填料浆的理论条件为

$$\frac{3C_s\pi\tau_y}{2gd(\rho_a - \rho_s)} \geq 1 \quad (7)$$

2.2 粗骨料临界离析力学模型

粗骨料充填料浆在管道输送过程中,浆体处于运动状态,内部固体颗粒的受力情况更为复杂,不同于新拌充填料浆的初始状态。与粗骨料初始受力分析相比,临界离析条件下的粗骨料除受到自身重力G、浮力F₁和黏滞阻力F₂外,还受到左上方和右上方粗骨料的作用力Fcosβ和Fsinβ,其受力分析如图3所示。

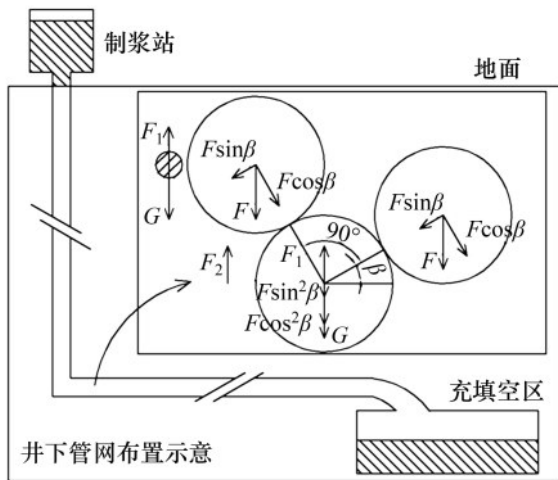


图3 粗骨料形临界受力分析

Fig. 3 Critical forces analysis of coarse aggregate

由图3可见:在临界离析条件下,粗骨料所受到的合力为

$$F_{\text{合}} = F\cos^2\beta + G - F_1 - F_2 + F\sin^2\beta = 2G - 2F_1 - F_2 \quad (8)$$

因此,在临界条件下,粗骨料充填料浆具备良好的抗离析特性的力学条件为

$$\frac{F_2}{2(G - F_1)} \geq 1 \quad (9)$$

联立式(9), (5)与(6),得到临界状态下具备良好的抗离析特性的粗骨料充填料浆的理论条件为

$$\frac{3C_s\pi\tau_y}{4gd(\rho_a - \rho_s)} \geq 1 \quad (10)$$

2.3 抗离析特性决定系数

粗骨料初始与临界离析力学模型表明,充填料浆的屈服应力越大,粗骨料与料浆的密度差越小以及粗骨料颗粒的粒径越小,料浆越不容易发生离析。由于临界条件下的粗骨料还受到两侧骨料的作用力,导致粗骨料更易发生离析,料浆不易具备基本的抗离析特性。

文献[20]表明,对于包含多种尺寸颗粒的充填料浆,较最小粒径或平均粒径而言,由最大粒径得到的离析判定值与离析率拟合度最高,能够准确预测抗离析性能,因此,选取粗骨料最大粒径对抗离析特性进行研究。为模拟工业管道输送中粗骨料离析的实际情况与提高抗离析特性表征结果的准确性,基于粗骨料临界离析力学模型,构建抗离析特性决定系数(J),表示为

$$J = \frac{3C_s\pi\tau_y}{4gd_{\text{max}}(\rho_a - \rho_s)} \quad (11)$$

由理论分析可知,当J>1时,粗骨料不易发生沉降,粗骨料充填料浆具备良好的抗离析特性,反之粗骨料充填料浆不具备抗离析特性。

3 结果与分析

3.1 实验结果

文献[23]表明, 充填料浆的密度可按料浆配合比计算, 因此, 料浆密度为

$$\rho_s = \frac{G_1 + G_2 + G_3 + G_4}{G_1/\rho_1 + G_2/\rho_2 + G_3/\rho_3 + G_4/\rho_4} \quad (12)$$

式中: G_1, G_2, G_3 和 G_4 分别为废石、棒磨砂、水泥和水的质量, t; ρ_1, ρ_2, ρ_3 和 ρ_4 分别为对应原材料的密度, t/m^3 。

粗骨料由废石和棒磨砂按比例混合而成, 参照式(12), 得到粗骨料密度为

$$\rho_a = \frac{G_1 + G_2}{G_1/\rho_1 + G_2/\rho_2} \quad (13)$$

由第2.1节的分析可知 $C_s=0.6$, 由图2可知粗骨料 $d_{max}=15\text{ mm}$, 测定各实验组的屈服应力与泌水率, 联立式(11), (12)与(13)计算 J , 实验结果如表3所示。

由表3可知: 随着A1~A4组料浆质量分数的增加, J 增加, 泌水率减小, 提高料浆的抗离析特性; 随着B1~B4组砂灰比的增加或C1~C4组废棒比的减小, J 减小, 泌水率增加, 降低料浆的抗离析特性。

3.2 拟合分析

为进一步分析理论表征结果与实验结果间的匹配关系, 对抗离析特性决定系数与泌水率之间

的关系拟合, 回归方程为

$$M = -4.347J + 14.439 \quad (14)$$

复相关系数 $R^2=0.972>0.95$, 回归效果佳。

图4所示为抗离析特性决定系数与泌水率的拟合结果。

由图4可见: A3, B2与C2实验组由于实验方案相同, 出现坐标点重合现象; 随着 J 增加, 泌水率呈线性减小趋势; 料浆是否离析存在分界点, 分界点位置 J 为1, 对应泌水率为10%; 当充填料浆抗离析特性差、抗离析特性良好、抗离析特性优良时, J 分别在0.4~1.0, 1.0~1.8和1.8~2.5范围内波动, 泌水率分别在12.70%~10.09%, 10.09%~6.61%和6.61%~3.57%范围内波动。因此, 提高 J 有利于减小料浆的泌水率, 增强料浆抗离析特性, 但大幅提高 J 不利于料浆在管道中的输送, 增加充填成本。基于上述分析, 可最终得到适合甘肃省某镍矿工程应用的粗骨料充填料浆具备抗离析特性的 J 范围为1.0~1.8, 对应泌水率范围为10.09%~6.61%。值得一提的是, 在实际应用中若无法获取料浆特性相关参数的情况下, 可直接用泌水率来确定料浆抗离析特性。

4 抗离析特性数学模型

4.1 模型建立

为进一步研究抗离析特性与实验影响因素之间的关系, 由式(11)可知, J 取决于料浆屈服应力

表3 各实验组 J 与泌水率计算结果

Table 3 Calculation results of J and bleeding rate of each experimental group

编号	骨料密度/($kg \cdot m^{-3}$)	料浆密度/($kg \cdot m^{-3}$)	屈服应力/Pa	J	泌水率/%
A1	2 727.01	2 043.48	55.5	0.78	11.7
A2	2 727.01	2 098.22	57.9	0.88	10.9
A3	2 727.01	2 155.97	98.0	1.65	7.3
A4	2 727.01	2 216.98	125.0	2.36	4.8
B1	2 727.01	2 159.88	116.8	1.98	5.3
B2	2 727.01	2 155.97	98.0	1.65	7.3
B3	2 727.01	2 153.18	73.4	1.23	8.9
B4	2 727.01	2 151.10	52.7	0.88	10.5
C1	2 746.56	2 164.49	125.3	2.07	5.1
C2	2 727.01	2 155.97	98.0	1.65	7.3
C3	2 707.74	2 147.51	50.8	0.87	10.8
C4	2 688.74	2 139.11	33.4	0.58	11.3

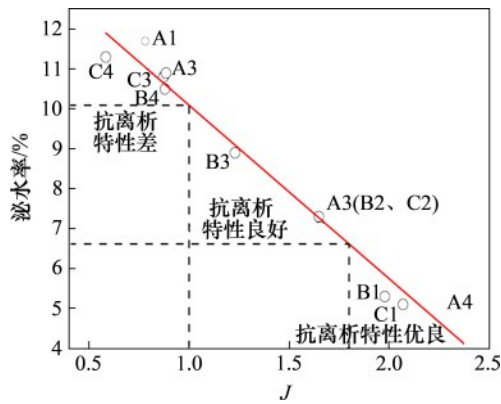


图 4 J 与泌水率的关系

Fig. 4 Relationship between J and bleeding rate

τ_y 、粗骨料密度 ρ_s 和料浆密度 ρ_s 等参数, 同时, 这些参数又与废棒比、砂灰比和料浆质量分数等实验影响因素相关。

为了便于数据处理, 将实验方案中的废棒比转化为废石在废石与棒磨砂混合而成的粗骨料中的占比, 对表 3 中的屈服应力 τ_y 与各实验方案中的废棒比、砂灰比和料浆质量分数进行多元回归拟合, 回归方程为

$$\tau_y = -330.25F_s - 21.39B + 1221.06C_w - 922.62 \quad (15)$$

式中: F_s 为废石在废石与棒磨砂混合而成的粗骨料中的占比; B 为砂灰比; 复相关系数 $R^2=0.959>0.95$, 显著性系数 $F=62.972$, 回归效果佳。

考虑粗骨料与实验影响因素的关系, 对式(13)进行化简, 得到粗骨料密度为

$$\rho_a = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + F_s(\rho_2 - \rho_1)} \quad (16)$$

考虑充填料浆与实验影响因素的关系, 对式(12)进行化简, 得到料浆密度为:

$$\rho_s = \rho_1 \rho_2 \rho_3 \rho_4 \left\{ C_w [BF_s \rho_3 \rho_4 (\rho_2 - \rho_1) + B \rho_1 \rho_3 (\rho_4 - \rho_2) + \rho_1 \rho_2 (\rho_4 - \rho_3)] + (1 + B) \rho_1 \rho_2 \rho_3 \right\} \quad (17)$$

将式(15), (16)和(17)代入式(11)中, 得到抗离析特性数学模型为

$$J(F_s, B, C_w) = \frac{(3.17F_s - 0.21B + 11.74C_w - 8.87) / \left(\frac{7.66}{2.87 - 0.2F_s} - \frac{22.76B + 22.76}{-0.59BF_s C_w - 14.29BC_w - 15.1C_w - 22.76B + 22.76} \right)}{\quad} \quad (18)$$

将各实验方案代入数学模型中, 利用模型计算结果与实验结果计算模型误差率, 结果如图 5 所示。

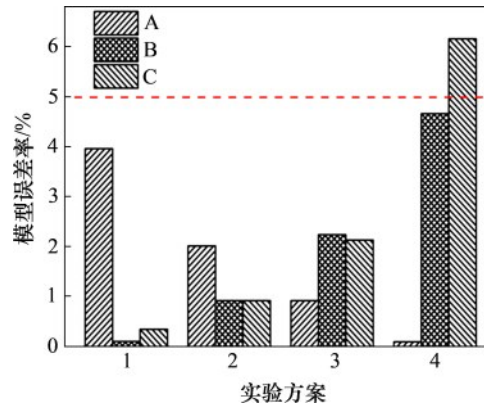


图 5 模型误差率

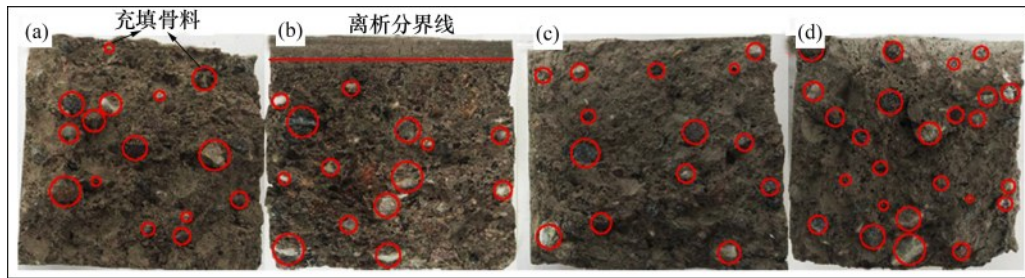
Fig. 5 Error rate of model

由图 5 可见: 各实验组模型误差率基本不超过 5%, 模型平均误差率为 2.05%, 满足精度要求; A4 实验组模型误差率最小(0.10%), C4 实验组模型误差率最大(6.17%); 随着 A1~A4 组料浆质量分数的增加, 模型误差率减小; 随着 B1~B4 组砂灰比的增加或 C1~C4 组废棒比的减小, 模型误差率增大。

4.2 实例验证

为进一步验证抗离析特性数学模型的准确性, 从图像细观尺度观察粗骨料在充填料浆中的离析情况, 与模型计算结果进行对比分析。由于 A3, B2 与 C2 实验组的材料配比相同, 选取 A3 组为参照组, 同时需要考虑废棒比、砂灰比和料浆质量分数对料浆离析的影响, 故选取 A1, B1 与 C1 组为对比组。按照材料配比制备充填料浆, 将配制好的料浆倒入长×宽×高为 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 的立方体试模中, 静置 3 d 后拆模, 用刀具从底部中线位置沿着立方体高的方向将充填体试样平均切割成两半, 使用高清数码相机观察被切割截面粗骨料的分布情况。充填体试块切割截面骨料分布如图 6 所示, 抗离析特性数学模型计算结果如表 4 所示。

由图 6 和表 4 可知: A3 组模型 J 为 1.59, 骨料基本均匀分布在充填体试块切割截面上, 具有良好的抗离析特性; 与 A3 组相比, A1 组料浆质量分数减小, 模型 J 降为 0.63, 骨料集中于切割截面中下部, 出现了明显的离析分界线, 料浆抗离析特性变差; 与 A3 组相比, B1 组砂灰比减小, 模型 J



(a) A3: 骨料分布较均匀, 无明显离析; (b) A1: 骨料集中于试件中下部, 离析明显; (c) B1: 粗骨料减少, 分布均匀, 无明显离析; (d) C1: 骨料均匀分布在截面上, 无离析

图 6 充填体试块切割截面骨料分布

Fig. 6 Aggregate distribution in cutting section of filling test block

表 4 模型 J 计算结果

Table 4 Calculating results of model J

编号	废棒比	砂灰比	料浆质量分数/%	模型 J
A3	3:7	5	84	1.59
A1	3:7	5	80	0.63
B1	3:7	4	84	1.97
C1	4:6	5	84	2.11

增至 1.97, 砂灰比的减小使得粗骨料减少, 骨料均匀分布在切割截面中, 优化了料浆抗离析特性; 与 A3 组相比, C1 组废棒比增大, 模型 J 增至 2.11, 废棒比的增大使得充填浆体中的废石增多, 骨料在切割截面上的分布更为均匀, 优化了料浆抗离析特性; 随着 A1, A3, B1 和 C1 这 4 组的模型 J 依次递增, 骨料分布由集中于切割截面中下部变为基本均匀分布进而转变为均匀分布, 充填料浆抗离析特性由差变为良好进而转变为优良。

5 结论

1) 根据粗骨料在充填料浆中初始与临界离析状态下的力学模型, 得到了高浓度粗骨料充填料浆抗离析特性决定系数 $J = \frac{3C_s \pi \tau_y}{4gd_{\max}(\rho_a - \rho_s)}$, $J > 1$ 时充填料浆具备良好的抗离析特性。

2) 对抗离析特性决定系数与泌水率进行拟合分析结果表明, 随着决定系数 J 增加, 泌水率 M 呈线性减小趋势; 判定料浆离析分界点的 J 为 1, M 为 10%; 充填料浆抗离析特性差、良好以及优良时, J 分别在 0.4~1.0, 1.0~1.8 和 1.8~2.5 范围内波动, M 分别在 12.70%~10.09%, 10.09%~6.61% 和

6.61%~3.57% 范围内波动。

3) 从抗离析特性决定系数出发, 提出用废棒比、砂灰比和料浆质量分数量化表征屈服应力、骨料密度和料浆密度, 进而构建了抗离析特性数学模型。各实验组模型误差率基本小于 5%, 平均误差率为 2.05%, 满足精度要求, 可实现对粗骨料充填料浆抗离析特性的准确预测。

4) 从图像细观尺度分析了充填体切割截面骨料分布与抗离析特性模型预测结果的关系, 改变废棒比、砂灰比或料浆质量分数等影响因素引起的切割截面骨料分布的改变, 与模型预测 J 变化规律吻合。综上可得, 抗离析特性数学模型可靠准确。

参考文献:

- [1] NASIR O, FALL M. Coupling binder hydration, temperature and compressive strength development of underground cemented paste backfill at early ages[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(1): 9-20.
- [2] LI L. Generalized solution for mining backfill design[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(3): 4014006-4014011.
- [3] 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 Xibing, LIU Bing, YAO Jinrui, et al. Theory and practice of green mine backfill with whole phosphate waste[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(9): 1845-1865.
- [4] FALL M, CELESTIN J, SEN H F. Potential use of densified polymer-pastefill mixture as waste containment barrier materials[J]. Waste Management, 2010, 30(12): 2570-2578.
- [5] 杨志强, 陈得信, 高谦, 等. 粗骨料充填料浆长距离管道输送关键技术[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(4): 1306-1312.

- YANG Zhiqiang, CHEN Dexin, GAO Qian, et al. Key technologies in long-distance pipeline transportation of filling slurry of coarse aggregate[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2016, 41(4): 1306–1312.
- [6] 李炜, 周旭. 高浓度胶结充填料浆管道输送离析成因分析[J]. 金属矿山, 2011(增刊): 180–182.
- LI Wei, ZHOU Xu. Cause analysis of separation in pipeline transportation of high concentration cemented filling slurry[J]. Metal Mine, 2011(Suppl): 180–182.
- [7] KLEIN K, SIMON D. Effect of specimen composition on the strength development in cemented paste backfill[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(3): 310–324.
- [8] THOMPSON B D, BAWDEN W F, GRABINSKY M W. In situ measurements of cemented paste backfill at the Cayeli Mine[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(7): 755–772.
- [9] 肖柏林, 杨志强, 陈得信, 等. 充填骨料颗粒形态参数定量评价方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(5): 545–553.
- XIAO Bolin, YANG Zhiqiang, CHEN Dexin, et al. Evaluation of the quantifying methods for shape characteristics of filling aggregate[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2019, 52(5): 545–553.
- [10] 赵国彦, 杜雪鹏. 块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): 3195–3199.
- ZHAO Guoyan, DU Xuepeng. Mechanism on particle segregation of rocky cemented fill[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2012, 43(8): 3195–3199.
- [11] NILI M, RAZMARA M, NILI M, et al. Proposing new methods to appraise segregation resistance of self-consolidating concrete based on electrical resistivity[J]. Construction and Building Materials, 2017, 146(13): 192–198.
- [12] 吴爱祥, 王建栋, 彭乃兵. 颗粒级配粗骨料充填料浆离析的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 3201–3207.
- WU Aixiang, WANG Jiandong, PENG Naibing. Effect of grain composition on coarse aggregate filling slurry segregation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(9): 3201–3207.
- [13] TREGGER N, GREGORI A, FERRARA L, et al. Correlating dynamic segregation of self-consolidating concrete to the slump-flow test[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 499–505.
- [14] 史采星, 郭利杰, 陈鑫政. 采场充填料浆流动与离析规律的试验研究[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(4): 520–527.
- SHI Caixing, GUO Lijie, CHEN Xinzheng. Experimental study on the law of flow and segregation of filling slurry in stope[J]. Gold Science and Technology, 2018, 26(4): 520–527.
- [15] PANESAR D K, SHINDMAN B. The effect of segregation on transport and durability properties of self consolidating concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(2): 252–264.
- [16] 张云国, 吴智敏, 张小云, 等. 自密实轻骨料混凝土抗离析性控制与试验方法[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(2): 234–238.
- ZHANG Yunguo, WU Zhimin, ZHANG Xiaoyun, et al. Segregation resistance control and test methods for self-compacting lightweight concrete[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(2): 234–238.
- [17] 张修香, 乔登攀. 粗骨料高浓度充填料浆的管道输送模拟及试验[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 258–266.
- ZHANG Xiuxiang, QIAO Dengpan. Simulation and experiment of pipeline transportation of high density filling slurry with coarse aggregates[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 258–266.
- [18] 吴爱祥, 王洪江. 金属矿膏体充填理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 6–7.
- WU Aixiang, WANG Hongjiang. Theory and technology of paste filling in metal mines[M]. Beijing: Science Press, 2015: 6–7.
- [19] 陈广文, 古德生, 高泉. 高浓度浆体的浓度判据及其层流输送特性[J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(4): 35–39.
- CHEN Guangwen, GU Desheng, GAO Quan. Concentration criterion of high concentration slurry and its laminar flow transport characteristics[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(4): 35–39.
- [20] 李红, 吴爱祥, 王洪江, 等. 粗粒级膏体充填材料静动态抗离析性能表征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3909–3915.
- LI Hong, WU Aixiang, WANG Hongjiang, et al. Static and dynamic anti-segregation property characterization of coarse-grained paste backfill slurry[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(11): 3909–3915.
- [21] JOSSIC L, MAGNIN A. Drag and stability of objects in a yield stress fluid[J]. AIChE Journal, 2001, 47(12): 2666–2672.
- [22] BERIS A N, TSAMOPOULOS J A, ARMSTRONG R C, et al. Creeping motion of a sphere through a Bingham plastic[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1985, 158: 219–244.
- [23] 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: 中南大学资源与安全工程学院, 2006: 85–86.
- WANG Xinmin. A study of filling materials and pipeline transportation systems in deep mines[D]. Changsha: Central South University. School of Resources and Safety Engineering, 2006: 85–86.

(编辑 杨幼平)