



粉煤灰掺量对泵送膏体充填料浆的 抗离析性能影响规律

张 鹏^{1,2}, 高 谦², 王有团¹, 张 涛^{1,2}, 吴 凡²

(1. 内蒙古工业大学 矿业学院, 呼和浩特 010051;

2. 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)

摘 要: 为揭示粉煤灰掺量对泵送膏体充填料浆抗离析性能的影响规律, 通过物化试验分析粉煤灰颗粒形状、粒径和组成物质。根据泵送膏体充填料浆中粗骨料颗粒在水平管道、垂直管道和采场内的受力状态, 提出了抗离析性能指数 K 。为验证该指数, 开展不同掺量流变、泌水率和分层度试验, 发现掺量与 K 指数呈正比关系, K 指数与泌水率和分层度呈反比关系。结合泌水机理、絮网理论、膏体定义和曲线估计对试验结果分析。结果表明: 粉煤灰可充当细骨料掺入泵送膏体充填料浆; K 指数可定量表示泵送膏体充填料浆抗离析能力, 当 $K \geq 1$ 时, 料浆不易离析且 K 值越大抗离析性能越强; 当 $K < 1$ 时, 料浆则极易离析; 将粉煤灰掺入泵送膏体充填料浆可有效提高抗离析性能, 但存在阈值 40%; 结合掺量- K 指数($R^2=0.978$)模型、 K 指数-饱和率($R^2=0.988$)模型、膏体定义和粉煤灰掺量(5%、10.5%和 15%), 充填料浆室内试验确定粉煤灰合理掺量区间为 10.4%~12%, 合理的 K 指数区间为 25.79~28.19, 且掺量- K 指数计算模型相对误差分别为 2.5%、0.16%和 0.58%, 精度较高, 可为现场制备高质量泵送膏体充填料浆提供理论基础和指导。

关键词: 地下采矿; 泵送膏体充填料浆; 粉煤灰掺量; 抗离析性能

文章编号: 1004-0609(2022)-01-0302-11

中图分类号: TP 028.8

文献标志码: A

引文格式: 张 鹏, 高 谦, 王有团, 等. 粉煤灰掺量对泵送膏体充填料浆的抗离析性能影响规律[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(1): 302-312. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36666

ZHANG Peng, GAO Qian, WANG You-tuan, et al. Influence of fly ash content on segregation resistance of pumped paste filling slurry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(1): 302-312. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36666

将粉煤灰加入充填料浆, 不仅可以解决其环境污染和存放占地等问题, 而且还可提高充填料浆流动性, 增加充填体强度。任昂等^[1]通过坍落度、流变和强度试验研究粉煤灰掺量对膏体充填料浆各性能影响规律。周华强等^[2]发现粉煤灰掺量达 83.3%时, 对高水充填材料后期强度增长有显著作用。赵才智^[3]通过分析粉煤灰掺量对充填料浆流变性影响规律发现当粉煤灰掺量由 400 kg/m^3 增加到 500 kg/m^3 , 其塑性黏度与粉煤灰掺量呈正比关系。刘音等^[4]开展大掺量粉煤灰浆体流动试验, 分析粉煤灰掺量、浆体浓度、水泥掺量及煤矸石掺量对浆

体流动性的影响。杨晓炳等^[5]针对金川棒磨砂粗骨料开发了掺粉煤灰的胶凝材料。冯波等^[6]借助微机控制电子万能试验机(ETM)力学试验系统、扫描电镜扫描装置和 X 射线衍射分析仪, 确定粉煤灰掺量对高水材料物理力学性能的影响规律。杜明泽等^[7]确定 3 组不同粉煤灰掺量对充填材料早龄期的体积电阻率、孔隙溶液电阻率、单轴抗压强度和弹性模量随时间的变化规律。为表征料浆抗离析性能, 王建栋等^[8]通过分析粗骨料静止状态下受力情况, 提出新疆某矿自流充填料浆抗离析性能指数。李红等^[9]根据两相流体力学、非牛顿流体力学和跳桌试

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0602903); 内蒙古工业大学自然科学基金资助项目(RZ1900000349)

收稿日期: 2021-02-25; **修订日期:** 2021-05-08

通信作者: 高 谦, 教授, 博士; 电话: 18600173341; E-mail: gaoqian@ces.ustb.edu.cn

验提出尾砂-碎石充填料浆抗离析性能指数。吴凡等^[10]通过对初始和临界离析状态的粗骨料受力分析, 提出抗离析性能决定系数。

根据研究现状可知, 粉煤灰可有效提高充填料浆的工作特性和强度, 但针对粉煤灰掺量对充填料浆抗离析性能影响规律鲜有研究。且目前提出的抗离析性能指数, 大部分是基于料浆静止状态下对粗骨料受力分析获得, 虽然李红等^[9]利用跳桌试验对料浆垂直向上和向下运动提出动态条件下的抗离析性能指数, 但缺少对料浆在管道输送全过程和采场内状态分析。为此, 本文作者以金川镍矿为研究背景, 首先对现场使用的粉煤灰进行物理化学性质分析, 评估其作为细骨料可行性; 通过分析料浆在不同工作状态下粗骨料颗粒的受力状态, 然后提出泵送膏体抗离析性能指数 K , 定量评价料浆抗离析能力; 通过开展不同粉煤灰掺量的料浆分层度、泌水率和流变试验, 验证该指数的准确性, 根据试验结果获得粉煤灰掺量对抗离析性能的影响规律。最后根据膏体定义确定粉煤灰掺量和抗离析性能指数合理区间, 为工业制备高质量泵送膏体充填料浆提供理论基础。

1 粉煤灰物化分析

将粉煤灰充当细骨料掺入充填料浆前需开展粉煤灰的物理和化学特性试验, 并根据相关标准评价粉煤灰作为充填细骨料的可行性。物理试验利用扫描电子显微镜(SEM)对粉煤灰的微观结构和形状进行检测分析, 试验条件为: 加速电压为 30 kV, 工作距离为 10.5 mm, 放大倍数分别为 5000 和 20000 倍(见图 1)。由图 1 可知, 粉煤灰颗粒整体分布均匀, 未见特大或极小颗粒, 且颗粒尺寸相似; 多数颗粒呈球状且表面光滑, 少数呈不规则球体状, 部分球体表面有黑色莫来石析晶。通过化学分析检测粉煤灰的化学成分, 其结果见表 1。两组粉煤灰的主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 , 质量分数大于 50%; 含硫量仅为 0.62% 和 1.41%, 其他有害物质经检测未见。参考《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176—2010 标准)中关于细骨料有害物质含量要求(硫化物含量 $< 2\%$), 两组粉煤灰均符合要求。由物化试验结果可知, 本研究选用的金昌热电厂粉煤灰满足细骨料的使用标准。

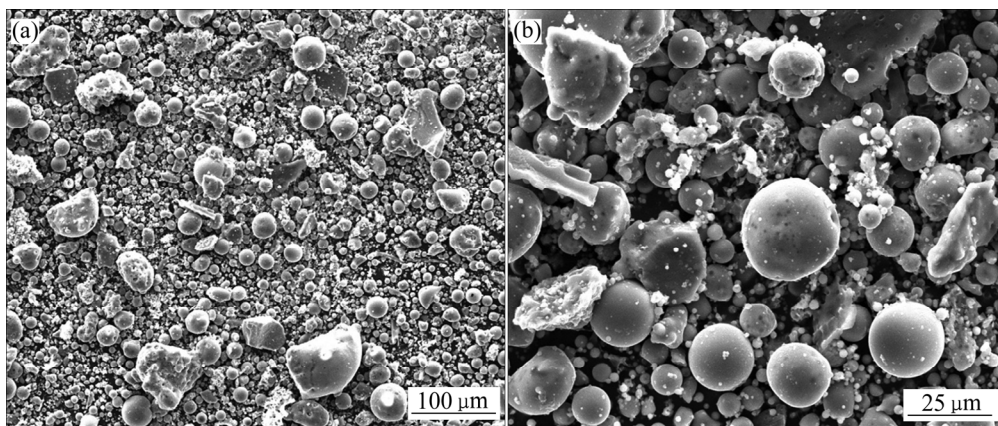


图 1 粉煤灰形貌 SEM 像

Fig. 1 SEM images of vanadium-bearing steel slag

表 1 金昌热电厂粉煤灰的主要化学成份

Table 1 Main chemical composition of fly ash

Chemical composition	Mass fraction/%						
	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	CaO	Fe_2O_3	S
Dry ash	38.38	19.57	0.82	0.04	3.13	22.36	0.62
Wet ash	32.76	12.22	2.91	0.03	1.65	28.36	1.41

2 泵送膏体充填料浆抗离析性能指数

泵送膏体充填料浆离析可理解为料浆中粗骨料受力不平衡、颗粒无规则运动的结果^[8-10],因此,开展粗骨料在料浆中的受力分析研究,建立泵送膏体充填料浆抗离析性能指数,对金川镍矿控制泵送膏体离析具有一定指导意义。

粗骨料在料浆中所受作用力较复杂且形状差异较大,为开展理论研究,对粗骨料进行理想化假设:1)粗骨料之间互不接触;2)粗骨料形状为标准球形^[8];3)以球心为原点建立坐标系,粗骨料受力和运动速度正负号与坐标轴一致。由于膏体在管输过程和采场内时粗骨料受力状态均不同,且膏体在弯管处停留时间较短,对粗骨料受力状态影响较小,因此,基于上述假设以单一粗骨料颗粒为研究对象,开展膏体在水平管道、垂直管道和采场内时粗骨料的受力状态分析(见图2)。

2.1 膏体管输过程和采场内的粗骨料受力分析

1) 水平管道中粗骨料受力分析

当膏体在水平管道中输送(向左或向右)时,粗骨料除受浮力(F)、重力(G)和黏滞力(f)之外,还受到由供料泵提供的水平压力(P)作用(见图2(a)),即粗骨料在水平和垂直方向所受合力(F_t)为

水平:

$$F_t = P - f \quad (1)$$

垂直:

$$F_t = F + f - G \quad (2)$$

2) 垂直管道中粗骨料受力分析

当膏体在垂直管道内上向和下向输送时,粗骨料不受水平方向的力,只受垂直方向的力,且输送方向不同使粗骨料所受黏滞力方向发生变化(见图2(b)和(c)),即当膏体在上向输送时,粗骨料所受合力为

垂直:

$$F_t = F + P - f - G \quad (3)$$

下向输送时,粗骨料所受合力为

垂直:

$$F_t = F + f - P - G \quad (4)$$

3) 采场内粗骨料受力分析

当膏体通过管道输送到采场时,由于管口与底板之间存在垂直高度,此时粗骨料颗粒在垂直方向受向下的惯性力(M)、重力(G)、黏滞力(f)和浮力(F),且无水平作用力(见图2(d)),即粗骨料所受合力为

垂直:

$$F_t = F + f - N - G \quad (5)$$

2.2 建立粗骨料抗离析性能指数

为保证泵送膏体具备良好的抗离析性能,避免粗骨料颗粒发生无规则运动,当膏体在水平管道中输送(向左或向右)时,粗骨料在水平方向所受合力

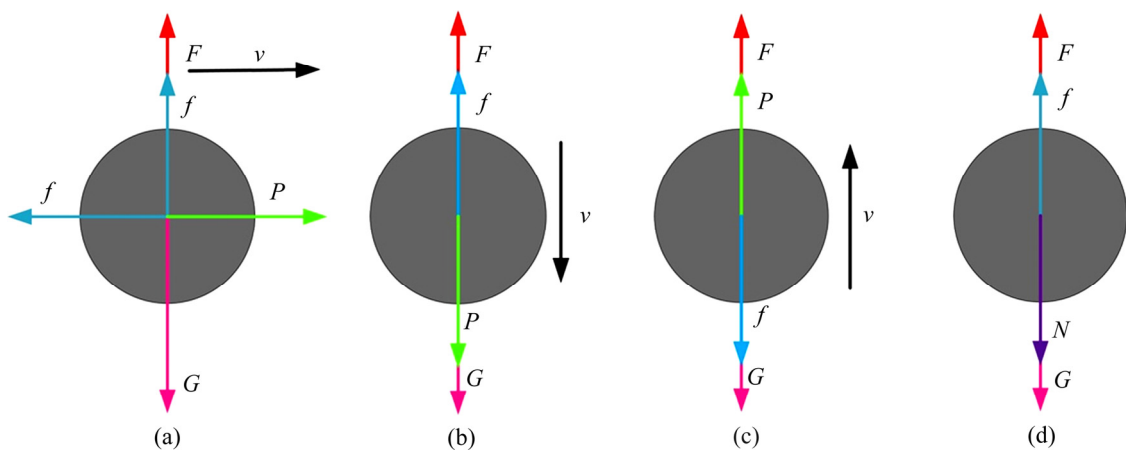


图2 粗骨料受力分析图

Fig. 2 Force analysis diagram of coarse aggregate

应等于或大于0,即 $f \leq P$ 。若 $f > P$,粗骨料所受合力小于0,膏体极易发生离析,因此 $f \leq P$ 为膏体在水平管道中水平方向具备良好抗离析特性的力学条件。由此可推断,膏体在管输过程和采场内同时具备良好抗离析特性的力学条件为

$$\begin{cases} f \leq G - F \\ f \geq N + G - F \\ f \leq P \\ f \leq F + P - G \\ f \leq P + G - F \end{cases} \quad (6)$$

式中:由于粗骨料密度大于泵送膏体充填料浆密度,即 $G > F$,且 $N = mg = G$,所以 f 不等式解集为

$$\begin{cases} f \geq 2G - F \\ f \leq F + P - G \end{cases} \quad (7)$$

整理式(7)为同向不等式:

$$\begin{cases} f + F \geq 2G \\ F + P \geq f + G \end{cases} \quad (8)$$

对式(8)中不等式同向相乘,得到泵送膏体充填料浆具备良好抗离析性能力学条件式:

$$K = \frac{(f + F)(F + P) - 2Gf}{2G^2} \geq 1 \quad (9)$$

K 为泵送膏体抗离析性能指数,指数越大说明抗离析性越强;当指数小于1时,料浆极易发生离析。

式(9)中粗骨料所受黏滞力为^[11-12]:

$$f = CA\tau_0 \quad (10)$$

式中: f 为黏滞力, N; τ_0 为屈服应力, Pa; A 为粗骨料最大截面积, m^2 ; C 为黏滞系数,光滑球体取1,非球形颗粒取1.2~2.0,椭球形取1.2~1.5^[8-12],根据式(6)~(9)可知, C 与 K 指数呈正比关系,由于工业应用料浆中废石粗骨料颗粒形状差异较大,且多数为不规则形状,确定合理的 C 值较困难。当粗骨料为光滑球体时,料浆 K 指数为最小值,因此本研究取 C 值为1,利用 K 指数临界值(最小值)评价料浆抗离析性能。同时,可通过比较各组料浆 K 指数临界值,分析粉煤灰掺量对泵送膏体充填料浆抗离析影响规律。重力(G)为

$$G = \rho_g V_g g \quad (11)$$

式中: ρ_g 为骨料密度, kg/m^3 ; V_g 为骨料体积, m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

浮力(F)为

$$F = \rho_j V_g g \quad (12)$$

式中: ρ_j 为泵送膏体料浆密度, kg/m^3 。为计算粗骨料体积和最大截面积,需进一步计算粗骨料的平均粒径。骨料的平均粒径是表征骨料级配组成状态的重要参数^[13-14],基于 Fuller 公式对粗骨料级配拟合,获得粒径分布函数:

$$M(x) = A \left(\frac{x}{D_{\max}} \right)^B \quad (13)$$

式中: $M(x)$ 为骨料各粒级的通过率, %; A 和 B 为模型拟合系数; D_{\max} 为骨料最大粒径, mm。对 $M(x)$ 求导即可得到粒径概率密度函数 $m(x)$,利用该函数可对任一粒径区间分布概率 J_i 为

$$J_i = M(b) - M(a) = \int_a^b m(x) dx \quad (14)$$

则粗骨料平均粒径为

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{D_{\max}} xm(x) dx}{\int_0^{D_{\max}} m(x) dx} \quad (15)$$

泵送压力在膏体管输过程中必须克服粗骨料所受浮力、重力和黏滞力的合力,由式(6)可知临界压力(P_1)为

$$P_1 = G + f - F \quad (16)$$

式中: P_1 为泵送临界压力, N。

2.3 试验验证

为验证抗离析性能指数和研究粉煤灰掺量对泵送膏体充填料浆抗离析性能影响规律,分别开展掺粉煤灰充填料浆的流变、分层度和泌水率试验。

1) 试验材料

粉煤灰来源于金川热电厂,密度为 $2170 kg/m^3$ 。粗骨料为金川生产的粒径小于 $12 mm$ 的废石,密度为 $2800 kg/m^3$,级配见图3,根据式(15)计算废石的平均粒径为 $4.987 mm$ 。胶凝材料选用普通硅酸盐水泥,密度为 $2970 kg/m^3$ 。料浆拌合用水满足《混凝土用水标准 JGJ—2006》。

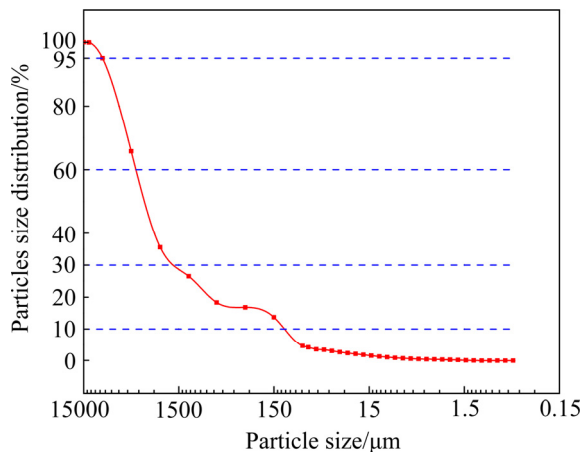


图3 粗骨料级配

Fig. 3 Grading of coarse aggregate

2) 试验方案

试验以粉煤灰掺量(粉煤灰与废石质量的百分比)为单因素设计, 废石掺量 1000 kg/m^3 , 水泥为 290 kg/m^3 , 拌合水为 435 kg/m^3 , 并以不掺粉煤灰作空白组对比。试验共分为 11 组, 各组粉煤灰掺量见表 2。根据试验结果计算各组料浆中粗骨料的 f 、 F 、 P 和 G 。各组充填料浆密度按照配合比计算公式为^[16-17]

$$\rho_j = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_i}{U_1 / \rho_1 + U_2 / \rho_2 + U_3 / \rho_3 + U_i / \rho_i} \quad (17)$$

式中: ρ_j 为充填料浆密度, kg/m^3 ; U_i 为各充填材

料单位体积消耗量(胶凝材料和骨料), kg ; ρ_i 为各充填材料密度, kg/m^3 。

充填料浆流变实验选用 R/S plus 流变仪检测充填料浆的屈服应力, 转子选用 V40-20 型浆式转子, 转速设置初始值 30 r/min 终了值 120 r/min , 检测频率 4.8 s , 检测次数 50 次, 测试前将料浆中的粗骨料剔除。膏体充填料浆可用宾汉塑性体模型表征流变参数, 利用式(18)对试验结果进行非线性回归获得不同粉煤灰掺量料浆的屈服应力^[18]。

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma^n \quad (18)$$

式中: τ 为剪切应力, Pa ; τ_0 为屈服应力, Pa ; μ 为黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; γ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为流变性能指数。

分层度试验选用砂浆稠度仪测量充填料浆分层度, 将各组料浆充分混合搅拌并测量稠度 C_1 , 测量后将料浆装满分层度桶并静置 30 min , 随后将分层度桶上部的砂浆去除, 取下部砂浆再次测量稠度 C_2 , C_1 与 C_2 的差即为各组料浆分层度。

泌水率实验先称量杯质量 D_1 , 然后将搅拌均匀的料浆倒满量杯并称取质量 D_2 , 通过 $D = (D_2 - D_1) \times (1 - w)$ 换算充填料浆内水的质量(D), 其中 w 为浆料固体质量分数(%). 随后将量杯密封静置 60 min 后, 用针管将浆体表面清水吸出并计算清水质量, 计算清水质量与料浆含水总量(D)之比即为泌水率, 每组料浆进行 3 次实验并取平均值。

表2 流变、分层和泌水试验结果

Table 2 Rheological, stratification and bleeding test results

Proportion/ %	Mass fraction, $w/\%$	$\rho_j/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	τ_0/Pa	F/N	f/N	P/N	K	Layering degree/%	Bleeding rate/%
0	74.78	1938.67	30.32	0.00126	0.0024	0.0029	12.56	4.32	29.12
10	76.16	1950.06	60.57	0.00127	0.0047	0.0053	20.33	4.05	10.25
20	77.40	1960.38	110.73	0.00127	0.0086	0.0092	33.19	3.97	5.43
30	78.52	1969.78	190.25	0.00128	0.015	0.015	53.57	3.56	2.32
40	79.53	1978.37	230.37	0.00128	0.018	0.019	63.87	3.31	1.36
50	80.45	1986.25	247.33	0.00129	0.019	0.020	68.25	3.21	0.83
60	81.29	1993.51	259.39	0.00129	0.020	0.021	71.37	3.12	0.46
70	82.06	2000.22	267.21	0.00130	0.021	0.021	73.40	2.67	0.32
80	82.77	2006.44	272.33	0.00130	0.021	0.022	74.74	1.56	0.26
90	83.42	2012.22	282.17	0.00131	0.022	0.023	77.29	1.45	0.11
100	84.03	2017.60	300.12	0.00131	0.023	0.024	81.92	0.96	0.04

3) 试验结果

重力 G 恒为 0.0018 N , 各组料浆屈服应力、黏滞力、浮力、压力、分层度和泌水率如表 2 所列。为比较各组料浆在同一泵送条件下 K 值, 保证粗骨料颗粒所受压力大于或等于各组料浆临界压力, 根据表 2 中各组料浆临界压力, 确定泵送压力为 0.024 N 时各组料浆 K 指数(见表 2)。

4) 结果分析

以 K 值为 X 轴, 分层度为 Y 轴, 泌水率为 Z 轴, 绘制三维散点图(见图 4)。分析图 4 中 X - Y 和 X - Z 面中曲线可知, 粉煤灰掺量愈大, K 指数愈大, 泌水率和分层度逐渐降低, 泵送膏体充填料浆抗离析性能增强。这说明当充填料浆中掺入粉煤灰后, 弥补了粗骨料级配的不足, 阻塞骨料之间的泌水通道^[17], 同时, 粉煤灰比表面积较大, 水分子会首先侵入粉煤灰颗粒中, 从而减少料浆中的自由水, 使料浆具有保水性。因此, 随着粉煤灰掺量增加, 料浆的泌水率逐渐降低^[1], K 指数增大。由表 1 可知, 随着粉煤灰掺量增加, 料浆屈服应力也应增加, 粗骨料颗粒所受黏滞力也会增加, 从而限制颗粒不规则运动, 所以料浆分层度也下降, K 指数同样增大。由此可知, 本文提出的泵送膏体抗离析性能 K 指数可对充填料浆的抗离析性能进行定量表征。

根据表 2 数据绘制粉煤灰掺量和抗离析性能指数关系图如图 5 所示。由图 5 可知: 1) 粉煤灰掺量与 K 指数呈正相关关系, 即随着粉煤灰掺量增加, K 指数不断增大, 说明提高粉煤灰掺量有助于提高

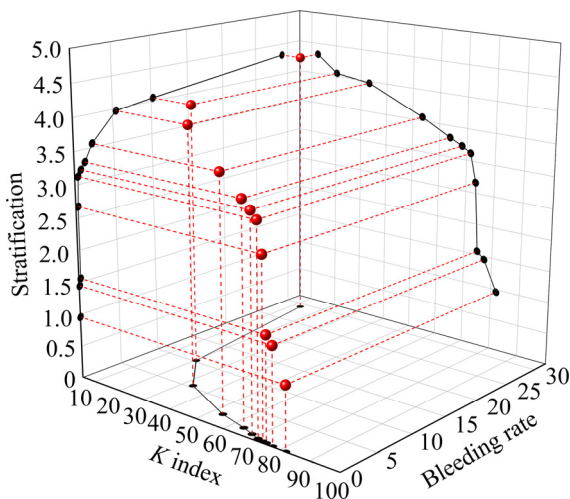


图 4 K 指数、分层度和泌水率对比分析图
Fig. 4 Comparison and analysis of K index, stratification and bleeding rate

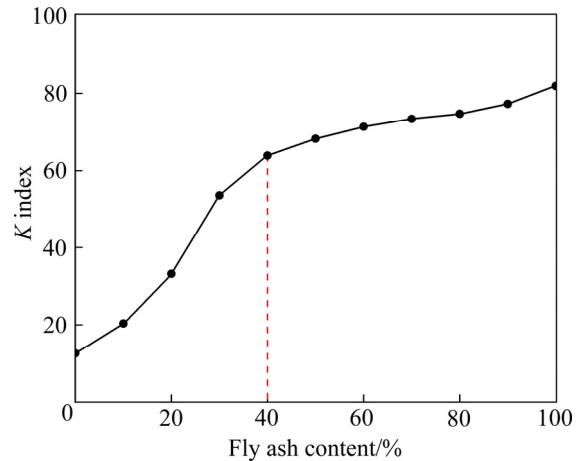


图 5 粉煤灰掺量和抗离析性能指数关系图
Fig. 5 Relationship between fly ash content and segregation resistance index

料浆的抗离析性能。根据文献[19]结论可知, 流变性能指数 n 与料浆的质量分数呈线性关系, 屈服应力随质量分数增大而增大。分析表 2 中掺量、质量分数和屈服应力数据, 并结合式(10)和(18)可确定, 粉煤灰掺量与黏滞力呈正比关系, 同时, 增加粉煤灰掺量可提高料浆的密度, 进而提高料浆的浮力。因此, 当颗粒在所受重力和压力一定的条件下, 增加粉煤灰掺量可有效提高料浆浮力和黏滞力, 最终导致 K 指数增大, 提高料浆抗离析性能。根据絮网理论^[20], 粉煤灰在高浓度料浆中作为细骨料会形成空间絮网结构, 该结构具有一定的刚度且可支撑粗骨料并防止因自身的重量下沉而导致离析, 从而提高料浆抗离析性能; 2) 粉煤灰掺量与 K 指数关系曲线存在阈值, 阈值位置掺量为 40% , $K=63.87$ 。在阈值位置前, 增大粉煤灰掺量可有效提高 K 指数, 在阈值之后增加粉煤灰掺量时, K 指数增长的效率降低。阈值的出现主要由于屈服应力后期增长较慢, 导致黏滞力增长迟缓, 继而导致 K 指数增长效率降低。又根据絮网理论可知, 当细骨料将粗骨料中的孔隙全部填充后, 絮网结构会达到阈值, 虽可继续提高抗离析性能, 但效果会逐渐减弱。因此, 增加粉煤灰掺量可有效提高抗离析能力, 但当粉煤灰掺量大于阈值 40% 时, 提高抗离析能力的效率会逐渐减低。

2.4 确定 K 指数和粉煤灰掺量的合理区间

王勇等^[21-22]认为, 适当的脱水有助于膏体制备

和管道输送,并结合土力学饱和度理论和流变试验提出膏体定义:工业应用膏体临界质量分数为浆体屈服应力在(200±25) Pa时的固相质量分数,且适用于工业应用饱和率为101.5%~105.3%时的料浆固相质量分数^[21-22]。定义中根据饱和率反推质量分数的计算过程较复杂,因此,本文为简化计算以曲线估计和非线性多元回归理论为基础,根据表2数据分别建立高精度的粉煤灰掺量-K指数和K指数-饱和率计算模型,利用膏体标准饱和率反推K指数和粉煤灰掺量,从而确定满足膏体定义的粉煤灰掺量和K指数的合理区间。

分别测量和计算表2中各组料浆的质量分数和混合料密度及堆积密度,根据式(19)、(20)和(21)计算各组空隙率、体积比率和饱和率,计算结果见表3。

$$r = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (19)$$

$$R = \frac{1}{[1 + \rho_s w / \rho_w \times (100 - w)]} \quad (20)$$

$$\nu = \frac{R}{r} \quad (21)$$

式中: r 为空隙率,%; ρ_d 为堆积密度, kg/m^3 ; ρ_w 为混合料密度; R 为体积比率,%; ρ_s 为水的密度, kg/m^3 ; w 为料浆固体的质量分数,%; ν 为饱和率,%。

为确定高精度掺量-K指数和K指数-饱和率回

归模型,利用SPSS软件对表2和表3中数据进行曲线估计,参与回归的模型有线性、对数、逆、二次、三次、复合、幂、S、增长和指数,各模型参数和 R^2 计算结果见表4,各模型拟合曲线见图6。

对比分析表中各模型 R^2 ,一元三次回归模型最高,分别为0.978和0.988。同样在拟合曲线图中三次模型的曲线相比其他模型更接近实测值。将一元三次模型的系数代入,构建掺量为 x 、K指数为 y 、饱和率为 z 的计算模型:

$$y = 186.48761607611x - 166.149457135357x^2 + 51.2064458048773x^3 + 8.14435000314503 \quad (22)$$

$$z = -5.54795111368611y + 0.099951199135679y^2 - 0.000654558349093393y^3 + 193.129498243696 \quad (23)$$

将膏体标准饱和率101.5%~105.3%代入式(19)求解,可知合理K指数区间为25.79~28.19,指数区间小于图5中拐点值,说明该K指数区间能有效提高料浆抗离析能力且工业应用性价比较高。最后基于式(19)得到合理的粉煤灰掺量为10.4%~12%,根据膏体定义确定料浆临界浓度为78.52%,即粉煤灰临界掺量为30%小于K指数阈值40%,符合膏体定义标准。为验证上述合理区间,开展粉煤灰掺量5%、10.5%和15%时料浆流变、密度和堆积试验。试验方案及其他材料用量与第2节相同,根据试验结果分别计算K指数和饱和率见表5。

表3 饱和率计算表

Table 3 Saturation rate calculation table

Proportion/%	w/%	$\rho_w/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_d/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	r/%	R/%	ν /%
0	74.48	2800	1833	0.35	0.49	140.62
10	76.16	2730.25	1604.22	0.41	0.46	111.72
20	77.40	2672.36	1447.35	0.46	0.44	95.61
30	78.52	2626.72	1340.27	0.49	0.42	85.38
40	79.53	2587.13	1258.63	0.51	0.40	77.84
50	80.45	2553.45	1195.45	0.53	0.38	72.00
60	81.29	2527.61	1148.92	0.55	0.37	67.43
70	82.06	2504.32	1104.58	0.56	0.35	63.29
80	82.77	2483.72	1078.15	0.57	0.34	60.22
90	83.42	2466.62	1045.21	0.58	0.33	57.06
100	84.03	2446.33	1017.31	0.58	0.32	54.31

表 4 曲线估计计算结果表

Table 4 Curve estimation calculation results table

Model	$y(x)$	$z(y)$
Linear	0.859	0.947
Logarithm	N_a^1	0.963
Inverse	N_a^1	0.913
Quadratic	0.976	0.952
Cubic	0.978	0.988
Composite	0.743	0.956
Power	N_a^1	0.919
S	N_a^1	0.822
Growth	0.743	0.956
Exponential	0.743	0.956

1) N_a means that independent variable contains zero and cannot be fitted.

表 5 实测值和预测值对比分析表

Table 5 Comparison and analysis of measured and predicted values

Proportion/ %	τ_0/Pa	K	K_{predict}	Relative error/%	ν
5	45.54	17.20	17.06	0.81	113.17
10.5	78.13	25.94	25.95	0.064	103.40
15	107.34	33.77	32.55	3.60	106.80

由表 5 可知, 粉煤灰掺量为 10.5% 的 K 指数和饱和率均在合理区间范围内, 说明该配合比的料浆满足膏体标准, 且具有良好的抗离析能力, 而掺量大于或者小于合理区间料浆的饱和率均不满足膏体标准。利用公式(22)对 K 指数计算, 结果分别为 17.06、25.95 和 33.77, 相对误差 0.81%、0.064% 和 3.6%, 说明该模型预测精度较高。

综上所述, 在料浆中加入粉煤灰可有效提高泵送膏体抗离析性能, 但在实际应用过程中料浆的 K 指数并不是越高越好, 具有高抗离析性能的料浆在管输过程中需要克服较高的压力损失, 增加管输成本, 同时在采场内需要长时间脱水, 进一步增加时间成本; 若 K 值较小, 则料浆极易发生离析导致管道发生堵管或爆管事故, 且影响充填体的力学参数。因此, 通过室内试验确定的粉煤灰掺量为 10.39%~11.98% 和 K 指数为 25.79~28.19, 这两项指标既可满足膏体抗离析性能要求, 又适合工程应用。同时, 利用计算模型预测料浆的 K 指数, 可指导工业生产, 为初期充填材料配合比设计提供参考。本文提出的粉煤灰掺量和 K 指数合理区间, 是参考膏体定义针对金川镍矿提出的充填材料指导性范围。不同的矿山使用的充填材料不同, 因此这两项指标的合理区间也不同, 但利用本节介绍的方法可建立适用于各矿山合理的粉煤灰掺量和 K 指数的合理区间。

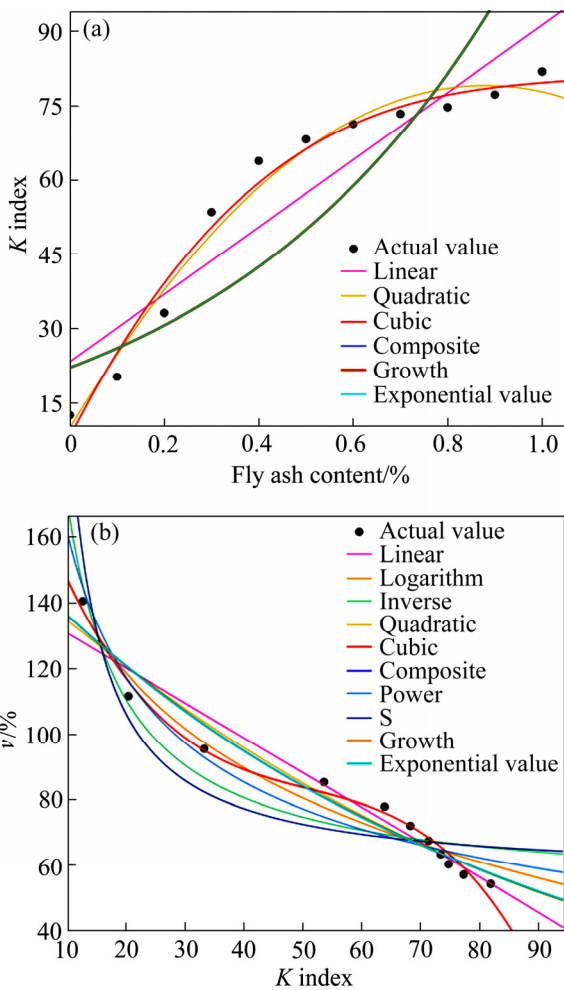


图 6 曲线估计拟合图

Fig. 6 Curve estimation fitting diagram

3 结论

1) 粉煤灰颗粒体积整体分布均匀, 无特大或特小颗粒, 形状多为表面光滑球体。粉煤灰主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 , 含硫量 $< 2\%$, 未见其他有害物质, 满足《混凝土和砂浆用再生细骨料 GB/T

25176—2010》标准要求，证明粉煤灰可充当细骨料使用。

2) 基于膏体在水平、垂直管道和采场内的粗骨料受力分析，又通过流变、分层度和泌水率试验验证，本研究建立的泵送膏体充填料浆抗离析性能指数 K 可定量表示充填料浆抗离析性能。当 $K < 1$ 时，料浆极易发生离析；当 $K \geq 1$ 时，料浆不易发生离析，且 K 指数越大料浆抗离析性能越强。

3) 提高粉煤灰掺量有利于提高 K 指数，但存在阈值 40%，掺量小于阈值时， K 指数增加效率较高；当掺量大于阈值时， K 指数增加效率较低。

4) 结合曲线估计和膏体定义，分别构建粉煤灰掺量- K 指数和 K 指数-饱和率高精度计算模型，确定金川镍矿掺粉煤灰泵送膏体 K 指数合理区间为 25.79~28.19，具有良好抗离析性能料浆的粉煤灰掺量为 10.4%~12%。通过开展粉煤灰掺量 5%、10.5% 和 15% 料浆室内试验，研究结果表明，掺量 10.5% 的 K 指数在合理区间内，理论推导正确。同时掺量- K 指数模型计算值与实测的相对误差分别为 0.81%、0.064% 和 3.6%，模型精度较高，可预测料浆抗离析性能指导施工。

REFERENCES

- [1] 任 昂, 冯国瑞, 郭育霞, 等. 粉煤灰对煤矿充填膏体性能的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2374-2380.
REN Ang, FENG Guo-rui, GUO Yu-xia, et al. Influence on performance of coal mine filling paste with fly ash[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2374-2380.
- [2] 周华强, 全永红, 郑保才, 等. 膏体充填原材料水分与配比计量误差分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 270-273.
ZHOU Hua-qiang, QUAN Yong-hong, ZHENG Bao-cai, et al. Proportioning of paste backfilling materials to moisture and its allowable measurement error[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3): 270-273.
- [3] 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 properties and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [4] 刘 音, 李金平, 路 瑶, 等. 煤矸石大粒径粗骨料比例对充填膏体性能影响的试验研究[J]. 煤矿开采, 2016, 21(5): 1-3, 17.
LIU Ying, LI Jing-ping, LU Yao, et al. Experimental studying of coal gangue large particle size coarse aggregate ratio to filling paste property[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(5): 1-3, 17.
- [5] 杨晓炳, 王永定, 高 谦, 等. 利用脱硫灰渣和粉煤灰开发充填胶凝材料及在金川矿山应用[J]. 矿产综合利用, 2019(4): 130-134.
YANG Xiao-bing, WANG Yong-ding, GAO Qian, et al. Research on a new cementitious materials based on desulphurization ash and fly ash and its application in Jinchuan mine[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4): 130-134.
- [6] 冯 波, 刘长武, 谢 辉, 等. 粉煤灰改性高水材料力学性能试验研究及机理分析[J]. 工程科学学报, 2018, 40(10): 1187-1195.
FENG Bo, LIU Chang-wu, XIE Hui, et al. Experimental study and analysis of the mechanical properties of high-water-content materials modified with fly ash[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(10): 1187-1195.
- [7] 杜明泽, 康天合, 尹 博, 等. 粉煤灰充填材料早龄期物理力学特性及其水化过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 826-836.
DU Ming-ze, KANG Tian-he, YIN Bo, et al. Physic-mechanical properties of fly ash filling material at early age and its hydration process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 826-836.
- [8] 王建栋, 吴爱祥, 王贻明, 等. 粗骨料膏体抗离析性能评价模型与实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 866-872.
WANG Jian-dong, WU Ai-xiang, WANG Yi-ming, et al. Evaluation model and experimental study for segregation resistance of paste with coarse aggregate[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(5): 866-872.
- [9] 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 Ai-xiang, WANG Hong-jiang, 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.
- [10] 吴 凡, 杨晓炳, 杨志强, 等. 高浓度粗骨料充填料浆抗

- 离析特性及其数学模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(5): 1309–1316.
- WU Fan, YANG Xiao-bing, YANG Zhi-qiang, et al. Anti-segregation property and its mathematical model of high concentration filling slurry with coarse aggregate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(5): 1309–1316.
- [11] JOSSIC L, MAGNIN A. Drag and stability of objects in a yield stress fluid[J]. *AIChE Journal*, 2001, 47(12): 2666–2672.
- [12] 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.
- [13] 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 Ai-xiang, WANG Jian-dong, PENG Nai-bing. Effect of grain composition on coarse aggregate filling slurry segregation[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2016, 47(9): 3201–3207.
- [14] 温震江, 高 谦, 陈得信, 等. 混合骨料级配充填料浆离析的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2264–2272.
- WEN Zhen-jiang, GAO Qian, CHEN De-xin, et al. Effect of mixed aggregate gradation on segregation of filling slurry[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(9): 2264–2272.
- [15] NEHDI M, RAHMAN M A. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction[J]. *Cem Concr Res*, 2004, 34(11): 1993.
- [16] 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, 2006: 85–86.
- WANG Xin-min. A study of filling materials and pipeline transportation systems in deep mines[D]. Changsha: Central South University, 2006: 85–86.
- [17] 刘数华, 冷发光, 李丽华. 混凝土辅助胶凝材料[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2010: 100–104.
- LIU Shu-hua, LENG Fa-guang, LI Li-hua. Supplementary cementing materials used in concrete[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2010: 100–104.
- [18] 寇云鹏, 齐兆军, 盛宇航, 等. 运动状态下全尾砂胶结料浆流变参数时变性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(1): 15–19.
- KOU Yun-peng, QI Zhao-jun, SHENG Yu-hang, et al. Study on time-dependent rheological parameters of unclassified tailings cemented slurry under motion state[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2019, 71(1): 15–19.
- [19] 翟永刚, 吴爱祥, 王洪江, 等. 全尾砂膏体充填临界质量分数[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(7): 795–799.
- ZHAI Yong-gang, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, et al. Threshold mass fraction of unclassified-tailings paste for backfill mining[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, 33(7): 795–799.
- [20] 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 De-sheng, 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.
- [21] 王 勇, 吴爱祥, 王洪江, 等. 从屈服应力角度完善膏体定义[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(7): 855–860.
- WANG Yong, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, et al. Further development of paste definition from the viewpoint of yield stress[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(7): 855–860.
- [22] 王洪江, 王 勇, 吴爱祥, 等. 从饱和率和泌水率角度探讨膏体新定义[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(6): 85–89.
- WANG Hong-jiang, WANG Yong, WU Ai-xiang, et al. Research of paste new definition from the viewpoint of saturation ratio and bleeding rate[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(6): 85–89.
- [23] American Society for Testing and Materials. Standard test method for static segregation of self-consolidating concrete using column technique: ASTM MC1610/C1610M-10[S]. Philadelphia: ASTM International, 2010: 18–19.

Influence of fly ash content on segregation resistance of pumped paste filling slurry

ZHANG Peng^{1,2}, GAO Qian², WANG You-tuan¹, ZHANG Tao^{1,2}, WU Fan²

(1. Institute of Mining Technology, Inner Mongol University of Technology, Huhhot 010051, China;

2. Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mine, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To reveal the influence of the fly ash content on the anti-segregation performance of the pumped paste filling slurry, the shape, particle size and composition of fly ash particles were analyzed through physicochemical tests. Then, according to the pumping paste filling slurry in coarse aggregate particles in horizontal and vertical pipes, the stress of the public-listed segregation resistance index K was tested. To test the index, the rheological, exudation rate and delamination degree tests were carried out. The results indicate that the fly ash content and K index are positively correlated and the K index and bleeding rate exhibit an inversely proportional relationship. Combined with the mechanism of bleeding, flocculation theory, paste definition and curve estimation, the experimental results show that the fly ash can be used as a fine aggregate to mix into the slurry of the pumping paste filling; the K index quantitatively represents the anti-segregation ability of the pumped paste filling slurry. When $K \geq 1$, the slurry does not easily segregate, and the higher the value of K is, the stronger the anti-segregation performance will be. When $K < 1$, the slurry easily segregates. The addition of fly ash into the pumping paste filling slurry can effectively improve the anti-segregation performance, but there is a threshold value of 40%. A reasonable range for the fly ash content is 10.4%–12%, and a reasonable range for the K index is 25.79–28.19. These ranges are based on the model of the dose- K index ($R^2=0.978$), the model of K -index saturation ($R^2=0.988$), the paste definition and the laboratory test of fly ash contents of 5%, 10.5% and 15% in filling slurry. The relative errors of the dose- K index calculation models are 2.5%, 0.16% and 0.58%, respectively, which demonstrate a high accuracy and provide a theoretical basis and guidance for the field preparation of high-quality pumping paste filling slurry.

Key words: underground mining; pumping paste filling slurry; fly ash content; anti-segregation performance

Foundation item: Project(2017YFC0602903) supported by the National Basic Research Development Program of China; Project(RZ1900000349) supported by the Natural Science Foundation of Inner Mongolia University of Technology, China

Received date: 2021-02-25; **Accepted date:** 2021-05-08

Corresponding author: GAO Qian; Tel: +86-18600173341; E-mail: gaoqian@ces.ustb.edu.cn

(编辑 李艳红)