

Predicting separation performance using crude slime hindered settling models in the teetered bed separator

CHEN Youliang, LIU Wenli, MA Ruixin, YAO Jiayin, PENG Feng, YAN Zengyan

School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing, China

youliangch@126.com

Abstract: The three empirical hindered-settling models are applied to predict the separation results in the teetered bed separator. The three predicted data are validated using the experimental data generated from the laboratory teetered bed separator. The effect of the teeter water, particle property and particle misplacement are analyzed from three mathematical models. The results show that while Asif model and Das model fail in predicting the overflow product yields of coarse coal at laboratory scale, Galvin model is available in product yields. Asif model, Das model and Galvin model are incapable of describing the product ash and distortion of predicted data occurs due to the ignorance of the bed inversion phenomenon and the structure of distribution plates. In the future researches, mathematical model is established from basic principles and carried out to evaluate the separation efficiency considering various factors, including the teeter water velocity, feed concentration and velocity, and particle misplacement and so on.

Keywords: teetered bed separator; mathematical model; product yield prediction; particle misplacement; distributor structure

粗煤泥干扰沉降分选数学模型的研究

陈友良, 刘文礼, 马瑞欣, 姚嘉胤, 彭峰, 颜增彦

中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京, 中国, 100083

youliangch@126.com

【摘要】利用三种干扰沉降数学模型对粗煤泥干扰床分选机的分选效果进行了预测, 验证了模型的可行性。通过模型分析了上升干扰水流、颗粒性质和错配现象对干扰床分选效果的影响。结果表明, Galvin 模型预测的溢流产品产率与试验结果没有显著性差异, 可以准确地预测分选效果; 而 Asif 模型和 Das 模型预测时有显著性差异, 因而不能用来预测干扰床的溢流产品产率。还分析了三个模型预测产品灰分失败的原因。由于三种干扰沉降模型没有考虑颗粒错配的现象和分布板结构的影响, 因而预测的产品灰分与试验结果相差较大。最后提出只有从基本机理出发, 才能打破了现有经验公式的局限, 建立对入料粒度没有限制、考虑入料浓度和速度、考虑上升水流等因素和错配现象的数学模型。

【关键词】干扰床; 数学模型; 预测产率; 颗粒错配; 分布板结构

1 引言

粗煤泥干扰床分选机具有处理能力大、分选精度高的优点, 目前已较广泛地应用于选煤行业^[1-3]。影响干扰床分选机分选效果的因素很多, 主要有结构参数(如分布器结构、分选带高度等)和操作参数(如干扰床上升水流速、入料性质等)。建立干扰床分选机分选效果与各影响参数之间的数学模型, 进而预测在不同操作制度下的干扰床分选效果, 对干扰床分选机

的设计选型及操作管理具有重要的意义。

一直以来, 许多研究者都试图建立干扰床中颗粒的干扰沉降速度公式, 以准确确定干扰水流速度与干扰床的分选效果的关系, 从而为工业上泵的设计提供理论依据。目前, 预测干扰床分选效果的干扰沉降模型较多, 有 Asif 模型^[4]、Galvin 模型^[5]和 Das 模型^[6]等, 它们都可以根据入料产品的粒度和密度组成和上升干扰水流的大小预测产品产率和灰分。本文的目的是把应用广泛的 Asif 模型、Galvin 模型和 Das 模型分别预测的产品产率和灰分与试验结果相比较, 确定适

基金项目: 国家 863 项目 (2007AA05Z314)

合干扰床颗粒分选的数学模型，从而为工业上干扰床的选型，提供很好的理论支持。

2 数学模型

预测干扰床分选机分选效果的数学模型主要有 Asif 模型、Galvin 模型和 Das 模型。这三种模型都采用 Concha 和 Almenda^[7]提出的计算式 (1) 来确定颗粒的干扰沉降末速。三种模型的区别是在式 (1) 确定

u_{ii} 和 n_i 的方法不同，而 u_{ii} 主要由雷诺数 Re_{ii} 来确定。表 1 是三种模型中参数 n_i 和 Re_{ii} 的确定方法

$$u_{ii} = u_{ii} \left(\frac{\rho_{si} - \rho}{\rho_{si} - \rho_f} \right)^{n_i - 1} \quad (1)$$

式中， u_i 为颗粒 i 的干扰沉降末速； u_{ii} 为颗粒 i 的自由沉降末速； ρ_{si} 为颗粒 i 的密度； ρ_f 为液体的密度； ρ 为悬浮液的密度； n_i 为待定参数。

Table 1 Formulas in Asif model, Galvin model and Das model
表 1 Asif 模型、Galvin 模型和 Das 模型中的计算公式

数学模型	n_i	Re_{ii}
Asif 模型	$\frac{4.8 - n_i}{n_i - 2.4} = 0.043Ga^{0.57}$	$Re_{ii} = (2.33Ga^{0.018} - 1.53Ga^{-0.016})^{3.3}$
Galvin 模型	$n_i = \frac{5.1 + 0.27 Re_{ii}^{0.9}}{1.0 + 0.1 Re_{ii}^{0.9}}$	$Re_{ii} = \left[(14.5 + (g(\rho_{si} - \rho))^{0.5} 1.83d_i^{1.5} / \mu)^{0.5} - 3.81 \right]^2$
Das 模型	$n_i = \frac{2(2.35 + 0.175 Re_{ii}^{0.75})}{1.0 + 0.175 Re_{ii}^{0.75}}$	$\log_{10} Re_{ii} = P(A) + \log_{10} R(A)$

注： $Ga = \frac{(\rho_s - \rho)d_i^3 g}{\mu^2}$, $Re_{ii} = \frac{u_{ii} \rho d_i}{\mu}$, $Ar = \frac{gd_i^3 \rho(\rho_{si} - \rho)}{\mu^2}$, $A = \log_{10} Ar$
 $P(A) = [(0.0017795A - 0.0573)A + 1.0315]A - 1.26222$, $R(A) = 0.99947 + 0.01853 \sin(1.848A - 3.14)$

干扰床分选机的分选机理本质上就是对于一定密度和粒度的颗粒，如果此颗粒的干扰沉降末速小于上升干扰水流速，那么它就随溢流成为精矿产品；如果它的干扰沉降末速大于上升干扰水流速，那么它成为底流产品。Asif 模型、Galvin 模型和 Das 模型都是基于不同的系数 n_i 和雷诺数 Re_{ii} ，计算出颗粒的干扰沉降末速，预测不同粒度和密度颗粒的运动行为，从而预测干扰床的分选效果。

在计算颗粒干扰沉降末速时，Asif 模型中系数 n_i 和雷诺数 Re_{ii} 是通过伽利略数 Ga 确定的。Galvin 模型中，系数 n_i 采用 Garside 与 Al-Dibouni 提出的公式表示^[8]，而雷诺数采用的是 Zigrang 和 Sylvester 提出的更为明确的方程^[9]。但 Hartman 等^[10]认为 Zigrang

和 Sylvester 提出的方程存在较大误差，从而 Das^[6]认为在预测干扰床的分选效果时，雷诺数用阿基米德数 Ar 确定更为合适，而且系数 n_i 与雷诺数相关，它是 Rowe^[11]提出的经验方程。

在 Asif 模型和 Galvin 模型中，由公式计算所得的颗粒自由沉降末速基本一致，但 Das 模型中自由沉降末速的计算值与之相比较，大部分粒度和密度级的计算值小 45%。Galvin 模型、Asif 模型和 Das 模型中求得的系数 n_i 依次约为 2.7, 2.4, 2.0。

本次研究分别对不同粒度和密度的颗粒采用三种模型进行预测了颗粒的干扰沉降末速，其结果如表 2 和表 3 所示。

Table 2 Hindered-settling terminal velocities at the density level of 1300kg/m³, 1400kg/m³ and 1500kg/m³
表 2 1300kg/m³、1400kg/m³ 和 1500kg/m³ 密度级的干扰沉降末速计算表

干扰沉降末速 密度 (mm/s)	1300kg/m ³			1400kg/m ³			1500kg/m ³		
	Asif 模型	Galvin 模型	Das 模型	Asif 模型	Galvin 模型	Das 模型	Asif 模型	Galvin 模型	Das 模型
0.3mm	12.88	7.88	4.82	26.13	18.24	11.98	37.56	27.90	18.48
0.45mm	15.39	9.82	5.66	31.08	22.69	13.99	44.52	34.67	21.48
0.8mm	19.21	13.32	6.88	38.58	30.71	16.79	55.04	46.89	25.53
1.0mm	20.75	14.96	7.31	41.60	34.48	17.77	59.25	52.63	26.94
1.25mm	22.32	16.79	7.71	44.65	38.69	18.69	63.51	59.04	28.28
1.6mm	24.07	19.06	8.14	48.05	43.92	19.69	68.24	67.01	29.78
2.0mm	25.65	21.37	8.53	51.12	49.23	20.65	72.50	75.09	31.27

注：悬浮液密度为 1200kg/m³

Table 3 Hindered-settling terminal velocities at the density level of 1600kg/m³、1800kg/m³ and 2000kg/m³
表 3 1600kg/m³、1800kg/m³ 和 2000kg/m³ 密度级的干扰沉降末速计算表

干扰沉降末速 (mm/s) 粒度	密度	1600kg/m ³			1800kg/m ³			2000kg/m ³		
		Asif 模型	Galvin 模型	Das 模型	Asif 模型	Galvin 模型	Das 模型	Asif 模型	Galvin 模型	Das 模型
0.3mm		47.51	36.67	23.99	64.26	51.93	20.96	78.17	64.97	38.69
0.45mm		56.16	45.52	27.77	75.64	64.40	32.53	91.73	80.51	44.16
0.8mm		69.19	61.51	32.76	92.70	86.93	37.38	111.96	108.60	51.00
1.0mm		74.40	69.04	34.49	99.49	97.53	43.56	119.99	121.82	53.47
1.25mm		79.65	77.43	36.16	106.32	109.37	45.73	128.04	136.58	56.05
1.6mm		85.47	87.86	38.10	113.87	124.08	47.92	136.94	154.92	59.26
2.0mm		90.72	98.45	40.06	120.66	139.01	50.56	144.92	173.55	62.68

注：悬浮液密度为 1200kg/m³

由表 2 和表 3 可见，用 Das 模型计算的不同粒度和不同密度颗粒的沉降末速整体偏低，Galvin 模型中的值次之，Asif 模型中的计算值最大。因此，与 Asif 模型和 Galvin 模型相比较，在一定的干扰水流时，Das 模型预测的干扰床分选结果肯定偏高。在粒度一定的情况下，颗粒的干扰沉降末速随密度递增，在密度一定的情况下，颗粒的干扰沉降末速随粒度也递增。但是三个模型随密度或粒度的增长速率不同，Galvin 模型增长速率最快，其次是 Asif 模型，Das 模型增长的速率最小。

3 干扰床试验和结果分析

3.1 试验部分

为了验证三种模型预测干扰床分选机分选效果的准确性，筹建了实验室干扰床分选系统，该系统由 10cm×10cm 的试验用干扰床分选机、清水泵和流量计等组成。试验选用 20l/min、25l/min、30l/min 和 35l/min 四种流量，对应的上升干扰水流速分别为 33.1mm/s、41.7mm/s、50mm/s 和 58.3mm/s。入料颗粒来自古交西曲选煤厂，粒度范围为 0.3~2mm。

3.2 模型的验证

分别把三种模型的预测值与试验值相比较，如图 1、图 2 和表 4 所示。从图 1 和图 2 可以看出，试验结果和三种模型所预测的溢流产品产率和灰分都随上升干扰水流速的增大而变大。Das 模型预测的产品产率曲线远离试验曲线，而且从均方差分析来看，它的偏差较大，很明显不适合本试验所用的干扰床分选效果的预测。Asif 模型和 Galvin 模型的预测曲线比较接近试验真实曲线，而且 Galvin 模型预测值的均方差更小，这两种模型计算的产品灰分都低于试验值。因而，从表 4 可以得出，Asif 模型和 Das 模型与试验结果差异显著，不能用来预测本试验所用的干扰床的产率，而

Galvin 模型和试验结果并无显著性差异，认为 Galvin 模型可以用来预测产品的产率。

由于 Asif 模型建立时考虑了颗粒的分散性和由于湍动造成的颗粒对流现象，使得 Galvin 模型计算的颗粒干扰沉降末速比 Asif 模型的计算结果整体偏低。Das 模型用阿基米德数确定雷诺数的方法，由于其预测误差如此之大，可以认为不能用来预测干扰床分选机的分选效果，可能因为模型建立之初，没有考虑流体的流态。由于 Galvin 模型建立时和其他两种数学模型一样没有考虑颗粒错配现象，因此 Galvin 模型预测的灰分结果与试验值相差较大。

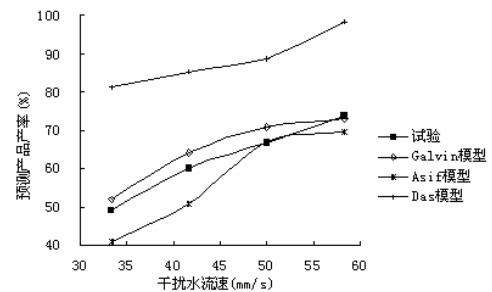


Fig.1 Predicted and experimental curves of overflow product yields with teeter water velocities

图 1 预测溢流产品产率和试验产率变化图

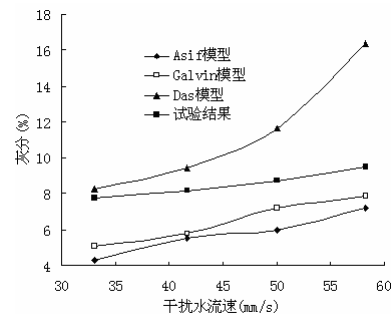


Fig.2 Predicted and experimental curves of overflow product ash with teeter water velocities

图 2 预测溢流产品灰分和试验灰分变化图

Table 4 Comparison of overflow product yields and ash between predicted and experimental results
表 4 模型预测溢流产品产率和灰分与试验结果的比较

数学模型	预测产率与试验产率的比较				预测灰分与试验灰分的比较			
	均方差	均值	t	显著性	均方差	均值	t	显著性
Asif 模型	2.171	5.240	2.41	有	0.239	-2.798	11.71	有
Galvin 模型	1.129	2.547	2.26	无	0.279	-2.078	7.46	有
Das 模型	2.116	26.078	12.33	有	1.419	2.900	2.04	无

注: $t_{0.05,3}=2.3534$, 若 $t < t_{0.05,3}$, 无显著差异; 否则, 有显著差异。

3.3 颗粒错配

三个模型预测结果都与试验结果存在差异, 部分原因是建立模型时颗粒错配现象没有考虑。从理论上讲, 颗粒在干扰床内的分布应该是有序分层的, 粗的重颗粒在床层的最底部, 细的重颗粒次之; 其他的颗粒都应该在分选机内按粒度和密度分层。然而, 在实际分选过程中, 在槽体内的细的重颗粒和轻的粗颗粒容易发生错配现象, 这也是数学模型无法考虑的问题。因而, 预测的灰分会与试验值相差较大。上升干扰水流经过分布板后, 水流分布平稳, 床层较稳定, 此时, 轻颗粒不容易混入床层底部; 但若水流分布不稳定, 颗粒群的正常分层被打破, 容易引起错配现象的产生。因而, 分布板结构也直接影响错配物含量。

4 结论

Asif 模型和 Das 模型由于建模时的缺陷性, 使得它们不能准确的预测干扰床分选机的分选效果; 三个模型中的 Galvin 模型相比之下预测结果最精确, 而且预测的溢流产品产率与试验结果无显著性差异, 可以认为 Galvin 模型适合预测干扰床的产率。由于颗粒运动行为除了受到上升干扰水流影响外, 还有设备本身的结构(如分布器等)、入料的粒度和密度组成以及浓度和速度等, 特别是发生在干扰床中的错配现象, 因而 Asif 模型、Galvin 模型和 Das 模型的预测灰分与试验值之间存在差异。因此, 以后建立干扰床分选机的模型应打破现有经验公式的局限, 从基本原理出发,

建立对入料粒度没有限制、考虑上升水流、入料浓度和速度、设备结构参数和颗粒错配等的数学模型。

致谢

本工作受国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2007AA05Z314)资助。

References (参考文献)

- [1] Maharaj L, Pocock J, Loveday B K. The effect of distributor configuration on the hydrodynamics of the teetered bed separator[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(11):1089-1098.
- [2] LIU Wenli, CHEN Zitong, WEI Geilao, et al, Study on Law of Coarse Coal Slime Separation by Hindered Bed Separator[J], Coal Preparation technology, 2007, (4), P11-13(Ch). 刘文礼, 陈子彤, 位革老, 等, 干扰床分选机分选粗煤泥的规律研究[J], 选煤技术, 2007, (4), P11-13.
- [3] Asif M, Petersen J N, Kaufman E N, et al. A dynamic model of the hydrodynamics of a liquid fluidized bed[J]. Ind. Eng. Chem. Res, 1994, 33. 2151-2156.
- [4] Galvin K P, Pratten S J, Nicol S K. Dense medium separation using a teetered bed separator[J]. Minerals Engineering, 1999a, 12(9):1059-1081.
- [5] Das A, Sarkar B, Mehrotra S P. Prediction of separation performance of floatex density separator for processing of fine coal particles[J]. Mineral Processing, 2009.1-9.
- [6] Concha F, Almendra E R. Settling velocity of particulate systems: Settling velocity of suspension of spherical particles[J]. Mineral Processing, 1979, 6:31-41.
- [7] Garside J, Al-Dibouni M R. Particle mixing and classification in liquid fluidised beds[J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1979, 57: 95-103.
- [8] Zigrang D J, Sylvester N D. An explicit equation for particle settling velocities in solid-liquid systems[J]. AIChE Journal, 1981, 27 (6) : 1043-1044.
- [9] Hartman M, Havlin V, Trnka O. Predicting the free fall velocities of spheres[J]. Chemical Engineering Science, 1989, 44 (8) : 1743-1745.
- [10] Rowe P. A convenient empirical equation for estimation of the Richardson-Zaki exponent[J]. Chemical Engineering Science, 1987, 42: 2795-2796.