

灰分分布规律研究

任志虎, 范肖南

(安徽理工大学 材料科学与工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:介绍了一种计算选煤产品灰分的方法,根据影响产品灰分的因素,建立多元线性回归方程,使产品灰分的确定快捷、准确。该计算方法为产品灰分的确定提供理论依据,为浮沉试验中累计灰分的确定提供可行方法,在实践和理论上均具有重大意义。

关键词:分配率; E_p ; δ_p ; F ; 规划求解

中图分类号: TD94

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2010)06-0006-05

1 产品灰分影响因素计算

影响选煤产品灰分的主要因素有: 入料灰分,

分配率, E_p , δ_p 等, 因此首先要对检测数据进行处理, 求得自变量, 如分配率, E_p 值和 δ_p 值。试验煤样入料和产品密度分析结果见表 1。

表 1 入料和产品密度分析

密度/($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	入料		精煤		矸石	
	占本级/%	灰分/%	占本级/%	灰分/%	占本级/%	灰分/%
-1.3	5.67	7.92	8.83	7.30	0.00	
1.3~1.4	23.41	11.80	49.78	12.13	0.07	12.72
1.4~1.5	14.04	21.09	27.52	21.26	0.05	20.04
1.5~1.6	5.21	30.71	9.17	29.88	0.13	32.96
1.6~1.8	3.73	41.22	4.59	35.65	5.60	43.62
+1.8	47.94	84.22	0.11	54.33	94.15	86.55
小计	100.00		100.00		100.00	

1.1 分配率计算

$$\begin{cases} r_c + r_t = 1 \\ r_c \cdot c_i + r_t \cdot t_i = f_i \end{cases}$$

式中, r_c 为精煤产率; r_t 为矸石产率; c_i 为精煤占本级含量; t_i 为矸石占本级含量。

$$Q = \sum (f_i - \hat{f}_i)^2 = \sum [f_i - (r_c \cdot c_i + r_t \cdot t_i)]^2 = \sum [f_i - (r_c \cdot c_i + (1 - r_c) \cdot t_i)]^2 = \sum [(f_i - t_i) - (c_i - t_i) \cdot r_c]^2 =$$

$$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min^{[1]}$$

式中, $y_i = f_i - t_i$; $\hat{y}_i = (c_i - t_i) \cdot r_c$ 。应用最小二乘法, 使 Q 取得最小值。这是一个一元线性回归问题, 线性回归方程式为:

$$y = a + bx$$

由公式 $r_c = \text{SLOPE}(E3:E8, F3:F8)$ 得:

$r_c = 0.49, r_t = 1 - r_c = 0.51$ 。由公式 $C = r_c \cdot c_i, T = r_t \cdot t_i$, 得到各密度级占入料产率。由公式 $E = T/F \times 100, F$ 为计算原煤产率, 各密度级分配率见表 2。

收稿日期: 2010-08-13

作者简介: 任志虎(1986—), 男, 山东淄博人, 安徽理工大学材料学院矿物加工专业研究生, 从事利用 EXCEL 建立选煤数学模型的研究工作。

表2 分配率计算表

F9 = SLOPE(E3:E8, F3:F8)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		占本级			中间变量		占入料产率			
2	密度级	f	c	t	$f-t$	$c-t$	C	T	F	E
3	-1.3	5.88	9.14	0.00	5.87	9.14	4.51	0.00	4.51	0.03
4	1.3~1.4	23.47	49.64	0.07	23.40	49.57	24.48	0.04	24.51	0.15
5	1.4~1.5	14.03	27.19	0.05	13.97	27.13	13.41	0.03	13.43	0.20
6	1.5~1.6	5.20	9.15	0.14	5.06	9.01	4.51	0.07	4.58	1.56
7	1.6~1.8	3.76	4.70	5.52	-1.76	-0.82	2.32	2.80	5.12	54.69
8	+1.8	47.67	0.18	94.21	-46.54	-94.03	0.09	47.76	47.85	99.82
9					$r_c =$	0.49				
10					$r_t =$	0.51				

1.2 E_p, δ_p 计算

采用复合双曲正切函数拟合分配率,在单元区域 D2:D7 中输入公式“ $y = 100 [b_1 + b_2 x + b_3 \tanh (b_4 (x - b_5))]$ ”^[2]得到各密度级的计算分配率。选中单元格 D8,输入公式“=sumxmy2(C2:C7, D2:D7)”得到偏差平方和 Q 。利用规划求解法求得:

$$b_1 = 0.467, b_2 = 0.018, b_3 = 0.491, b_4 = 15.707,$$

$$b_5 = 1.694$$

利用单变量求解法分别求得:

$$\delta_p = 1.694, \delta_{25} = 1.658, \delta_{75} = 1.730, E_p = (\delta_{75} - \delta_{25}) / 2 = 0.036$$

分配率具体拟合过程见表3。

表3 分配率拟合表

$$D2 = 100 * (\$F\$3 + \$F\$4 * B2 + \$F\$5 * \text{TANH}(\$F\$6 * (B2 - \$F\$7)))$$

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	密度级	密度	E	复合双曲				
2	-1.3	1.25	0.031312	-0.07101				
3	1.3~1.4	1.35	0.146133	0.11574	$b_1 =$	0.466837		
4	1.4~1.5	1.45	0.20322	0.345047	$b_2 =$	0.018482	$\delta_p =$	1.693902
5	1.5~1.6	1.55	1.558813	1.547846	$b_3 =$	0.49065	$\delta_{25} =$	1.658314
6	1.6~1.8	1.70	54.69386	54.6946	$b_4 =$	15.70679	$\delta_{75} =$	1.729658
7	+1.8	2.20	99.81556	99.81482	$b_5 =$	1.693661	$E_p =$	0.035672
8				0.031629				

根据求得的分配率、 E_p, δ_p 以及入料灰分、精煤灰分和矸石灰分得到灰分影响因素数据表,见表4。

表4 灰分影响因素数据表

密度/(kg·L ⁻¹)	入料灰分/%	分配率/%	E_p /(kg·L ⁻¹)	δ_p /(kg·L ⁻¹)	精煤灰分/%	矸石灰分/%
-1.3	7.797	0.031	0.036	1.694	7.151	—
1.3~1.4	11.787	0.146	0.036	1.694	12.064	12.559
1.4~1.5	21.069	0.203	0.036	1.694	21.205	20.239
1.5~1.6	30.671	1.559	0.036	1.694	29.892	32.685
1.6~1.8	41.199	54.694	0.036	1.694	36.011	43.646
+1.8	84.239	99.816	0.036	1.694	59.351	86.479

为了确保计算结果的准确性,采用了12组不同选煤厂实际检查数据进行计算,得到12组灰分影响因素数据表。最后分密度级进行计算,不同的密度级得到不同的产品灰分回归方程。

2 多元线性回归方程的计算

试验以-1.3 kg/L为例进行精煤灰分多元线性回归方程的计算。

2.1 回归系数的计算

设随机变量 y 与自变量 x_j ($j=1,2,3,4$)之间存在线性相关关系,这个关系可用回归方程 $y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_4x_4$ 表示,其中 b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 是方程的回归系数, x_1 是入料灰分; x_2 是分配率; x_3 是

E_p ; x_4 是 δ_p ; y 是精煤灰分。

多元线性回归方程回归系数的确定方法是:

(1)用鼠标选取单元区域 B16:F20;

(2)在活动单元格 B16 输入公式“=LINEST(F3:F14,B3:E14,1,1)”^[3];

(3)按组合键 CTRL+SHIFT+ENTER,回归系数就出现在单元区域 B16:F20 的第一行;

(4)用鼠标选取单元区 G3:G14,在活动单元格 G3 中输入公式“=TREND(F3:F14,B3:E14,B3:E14,1)”,按组合键 CTRL+SHIFT+ENTER,计算精煤灰分就出现在单元区域 G3:G14。回归系数具体计算过程见表5。

表5 回归系数计算表

B16: =LINEST(F3:F14,B3:E14,1,1)

	A	B	C	D	E	F	G	H	
1					-1.3				
2	XO	入料灰分	分配率	E_p	δ_p	精煤灰分	计算精煤	回归平方和	剩余平方和
3	1	7.797	0.031	0.036	1.694	7.151	7.236	1.383	0.007
4	1	7.920	0.000	0.036	1.692	7.300	7.363	1.698	0.004
5	1	6.881	0.119	0.050	1.718	6.453	6.377	0.100	0.006
6	1	6.593	0.148	0.058	1.738	6.132	6.095	0.001	0.001
7	1	6.380	0.164	0.069	1.767	5.860	5.876	0.034	0.000
8	1	5.670	0.356	0.073	1.782	5.760	5.161	0.809	0.358
9	1	5.380	1.359	0.098	1.784	4.210	4.837	1.496	0.393
10	1	7.600	0.000	0.046	1.604	7.390	7.341	1.640	0.002
11	1	4.280	0.519	0.035	1.459	4.580	4.449	2.597	0.017
12	1	6.420	3.183	0.028	1.466	5.300	5.920	0.020	0.385
13	1	6.610	3.183	0.042	1.474	6.420	6.153	0.009	0.071
14	1	6.970	6.628	0.068	1.511	6.170	5.916	0.021	0.065

15					6.060		9.807	1.311
16	-2.53955	5.243884	-0.17928	0.935819	4.060342	$b_0 =$	4.060	
17	3.166121	16.71587	0.148593	0.191785	3.779104	$b_1 =$	0.936	
18	0.882119	0.432697	#N/A	#N/A	#N/A	$b_2 =$	-0.179	
19	13.09551	7	#N/A	#N/A	#N/A	$b_3 =$	5.244	
20	9.807309	1.310586	#N/A	#N/A	#N/A	$b_4 =$	-2.540	

2.2 回归方程显著性检验

由表 5 可知:回归平方和 $U = 9.807$, 剩余平方和 $Q = 1.311$ 。

显著性水平取 0.01, 则查表得临界值 $F = 7.85$; 回归自由度 $f_{回} = P = 4$, 剩余自由度 $f_{剩} = N - P - 1 = 7$, 其中 N 是实验次数, P 是自变量个数; 由公式 $F = (U/f_{回}) / (Q/f_{剩})$ [4] 得回归方程显著性水平 $F = 13.1 > 7.85$, 回归方程显著。

2.3 回归系数显著性检验

系数矩阵 A^{-1} 计算方法如下:

(1) 用鼠标选取单元区域 B16:F20;

(2) 在活动单元格 B16 中输入公式“=MMULT(TRANSPOSE(B3:F14),B3:F14)”;

(3) 按组合键 CTRL + SHIFT + ENTER, 系数矩阵 A 就出现在单元区域 B16:F20;

(4) 用鼠标选取单元区域 B22:F26;

(5) 在活动单元格 B22 中输入公式“=MINVERSE(B16:F20)”;

(6) 按组合键 CTRL + SHIFT + ENTER, 逆矩阵 A^{-1} 就出现在单元区域 B22:F26, 具体过程见表 6。

表 6 系数矩阵 A^{-1} 计算表

B16: =MMULT(TRANSPOSE(B3:F14),B3:F14)

	A	B	C	D	E	F
1				-1.3		
2	序号	XO	入料灰分	分配率	E_p	δ_p
3	1	1	7.797	0.031	0.036	1.694
4	2	1	7.920	0.000	0.036	1.692
5	3	1	6.881	0.119	0.050	1.718
6	4	1	6.593	0.148	0.058	1.738
7	5	1	6.380	0.164	0.069	1.767
8	6	1	5.670	0.356	0.073	1.782
9	7	1	5.380	1.359	0.098	1.784
10	8	1	7.600	0.000	0.046	1.604
11	9	1	4.280	0.519	0.035	1.459
12	10	1	6.420	3.183	0.028	1.466
13	11	1	6.610	3.183	0.042	1.474
14	12	1	6.970	6.628	0.068	1.511
15						
16		12	78.50093	15.69092	0.638816	19.687776744
17		78.50093	525.6993	102.3123	4.102955	128.9772764
18	A =	15.69092	102.3123	66.50144	0.878828	23.99227914
19		0.638816	4.102955	0.878828	0.038755	1.0658689
20		19.68777	128.9773	23.99228	1.065861	32.48786372
21						
22		76.2799	2.049115	-2.61583	275.9181	-61.48144805

23		2.04912	0.196455	-0.10117	12.96002	-2.37218689
24	$A^{-1} =$	-2.61583	-0.10117	0.117932	-11.1944	2.267018399
25		275.9181	12.96023	-11.1944	1492.418	-259.3558981
26		-61.4814	-2.37219	2.267018	-259.356	53.54113175

由公式 $F_j = (b_j^2 / C_{jj}) / (S_{\text{剩}} / f_{\text{剩}})$, 其中 b_j 是回归系数, C_{jj} 是回归系数对应的逆矩阵对角线系数, 分别

求得 $F_1 = 23.81, F_2 = 1.46, F_3 = 0.10, F_4 = 0.64$, 回归系数显著性检验表如表 7。

表 7 回归系数显著性检验

$$F_8 = (B_8^2 / C_2) / (D_7 / D_8)$$

	A	B	C	D	E	F
1		76.2799	2.049115	-2.61583	275.9181	-61.4814
2		2.04912	0.196455	-0.10117	12.96002	-2.37219
3	$A^{-1} =$	-2.61583	-0.10117	0.117932	-11.1944	2.267018
4		275.9181	12.96023	-11.1944	1492.418	-259.356
5		-61.4814	-2.37219	2.267018	-259.356	53.54113
6						
7	$b_0 =$	4.060342	剩余平方和	1.311	回归系数显著性检验	
8	$b_1 =$	0.935819	自由度	7	$F_1 =$	23.81
9	$b_2 =$	-0.17928	显著性水平	0.01	$F_2 =$	1.46
10	$b_3 =$	5.243884	临界 $F =$	7.85	$F_3 =$	0.10
11	$b_4 =$	-2.53955			$F_4 =$	0.64

其中变量 F_1 最大, 即入料灰分对产品灰分影响最大, 变量 F_3 最小, 即 E_p 值对产品灰分影响最小, 得到 -1.3 kg/L 精煤产品灰分回归方程:

$$y = 4.060 + 0.936x_1 - 0.179x_2 + 5.244x_3 - 2.540x_4$$

将 x_1, x_2, x_3, x_4 的值代入上述回归方程即可得到 -1.3 kg/L 密度级精煤产品灰分。

3 结 语

利用 EXCEL 数学建模, 通过建立一个多元线性回归方程很好地解决了选煤产品灰分的计算问题, 弥补了这一领域的理论空白, 对解决工程问题的专

业工作者有重要的参考价值, 有效减少了选煤设计和数据处理过程中的误差。

参考文献:

- [1] 范肖南. 选煤产品实际产率格式法的快捷计算方法[J]. 选煤技术, 2005(1): 44-46.
- [2] 范肖南. 复合双曲正切分配曲线模型参数与分选密度变化关系研究[J]. 淮南矿业学院学报, 1997, 17(3): 43-49.
- [3] 范肖南. 用 EXCEL 进行选矿数学建模[J]. 煤炭工程, 2004(3): 50-52.
- [4] 冯绍灌. 选煤数学模型[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.

Study on the regularity of distribution of coal ash

REN Zhi-hu, FAN Xiao-nan

(School of Material Science and Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Introduce the method of coal ash calculation. According to the factors affecting the products ash, establish multiple linear regression equation, so the products ash can be decided quickly and accurately. This is also a feasible method to determine the total ash content in float and sink test, and has significant meaning in theory and practice.

Key words: distribution rate; E_p ; δ_p ; F ; programming solver