基于多指标正交试验的链算机抽风干燥段热工参数优化

孙 玥，周 峰，李伯全
（江苏大学 机械工程学院，江苏 镇江 212013）

摘 要： 链算机是铁矿球团干燥脱水和预热氧化的热工设备，球团在链算机抽风干燥段的干燥效果直接影响着球团质量。基于传热学、局部非平衡热力学理论和干燥动力学原理建立抽风干燥段的流体力学（CFD）模型，采用CFD方法模拟球团料层在抽风干燥段（DDD）中的干燥过程，提出多指标正交试验法，并定义热能利用率的正交试验指标，得到球团料层在抽风干燥段的参数优化方案。在该优化参数方案下，抽风干燥段球团料层提前约14 s达到92%的干燥度。研究结果可为链算机抽风干燥段的热能有效利用提供理论参考。

关键词： 链算机；抽风干燥；多指标正交试验；参数优化
中图分类号： TF046.6；N945.15　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000－8764（2020）04－0035－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2020.04.052

Thermal parameter optimization in the DDD of chain grate by orthogonal test with multi－targets

Sun Yue，Zhou Feng，Li Boquan
（*School of Mechanical Engineering，Jiangsu University，Zhenjiang* 212013，*Jiangsu*）

Abstract Chain grate is a thermal equipment for drying and dehydration，preheating and oxidation of iron ore pellets，and the drying effect of pellets in down draft drying of chain grate directly affects the quality of pellets. Based on the theory of heat transfer，local non-equilibrium thermodynamic theories and the principles of drying kinetics，a computational fluid dynamics（CFD）model in the down-draft drying（DDD）of pellets is established. The drying process of pellets in the DDD is simulated by the method of CFD. A multi-targets orthogonal test is proposed，the orthogonal test targets for the utilization of heat energy are defined，and the parameter optimization scheme of pellets in the DDD is obtained. Under the optimized parameter scheme，the pellets layer in the DDD is advanced about 14s，up to 92% drying degree. So，a theoretical reference can be provided for the effective utilization of thermal energy in the DDD of chain grate.

Key words chain grate；down draft drying（DDD）；orthogonal test with multi-targets；parameter optimization

球团矿抗压强度高、质量均匀、能耗低，在钢铁工业中得到了大规模应用。链算机是球团料层干燥脱水和预热氧化的热工设备，球团随算床移动，其干燥过程分为鼓风干燥和抽风干燥两个阶段。生产实践发现：若球团在抽风干燥段结束时未能达到理想干燥状态，进入预热阶段后球团将不能被完全氧化，进而影响球团的质量，同时使得链算机运行部件的寿命下降[1-3]；若球团过早地达到理想干燥状态，则会造成热能浪费。所以球团的干燥情况对球团品质和热能有效利用有着直接的影响，而热能有效利用率对节能减排有着重要的意义。

在链算机球团干燥模型方面，Anna-Lena Ljung和T. Tsukerman[6-7]建立了球团干燥过程

收稿日期： 2020－04－11
基金项目： 国家自然科学基金资助项目（51675245）
作者简介： 孙 玥（1995—），女，硕士研究生，主要从事链算机抽风干燥段建模与仿真研究。
通讯作者： 李伯全（1956—），男，教授，博士生导师，主要从事远程自动化测控系统与现代仪器技术研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的二维数学模型，研究了球团的干燥速率，发现干燥分阶段进行。在热能使用方面，王铁臣[8]针对链算机－回转窑系统的生产工艺，进行了物料平衡和热量平衡分析和计算研究。冯俊小[7]等在对链算机进行热工测试的基础上，结合生产设备、工艺及运行特点，分析和诊断了链算机的热能利用状况。刘宝先[9]等分析了链算机的物料平衡和热平衡计算公式，提供了链算机热量收入和支出的计算思路。叶匡吾[10]从生产实践和我国的现状出发，对烧结和球团过程的能量流进行了分析，并初步根据㶲理论，对烧结和球团过程如何提高㶲效率，提出了节能的措施和方法。宋彦坡[11]等分别建立了链算机各工艺段的热分析和㶲分析模型，并根据实际生产中的热工测试数据，对其用能状况进行了计算分析，在此基础上，提出了链算机球团预热系统的优化用能方法。本文针对链算机抽风干燥段，基于 Fluent 软件对球团干燥模型中的源项进行数值模拟，根据能量守恒定律建立抽风干燥段的热能平衡模型，选取 4 个重要参数进行多指标正交试验，最终得到 1 组抽风干燥段优化工况参数，并对该组参数下料层的干燥效果和热能利用效果进行分析，以期可为链算机热能的有效利用提供参考。

1 球团干燥模型与数值模拟

抽风干燥段处于干燥的第二阶段(图 1)，在该阶段热气流入口位于上部，即料层上部先接触到温度更高的热风。球团在进入抽风干燥段时已达到临界湿度，其干燥过程进入内部扩散阶段，与鼓风干燥段完全不同[4]。鼓风干燥段的干燥质量并不决定抽风干燥段结束时球团

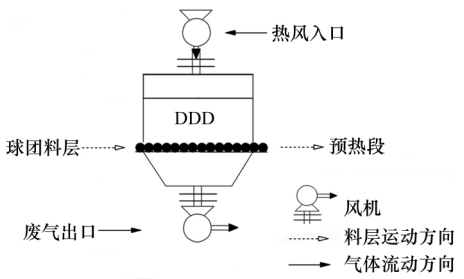


图 1 链算机抽风干燥段干燥示意

的干燥质量[4-5]，因此，需要单独建立抽风干燥段球团料层的干燥模型并进行数值仿真。

1.1 对流换热

对流换热是指流体流经固体时，其与固体表面之间的传热现象。单位时间内气相与固相的传热(q,J)可由式(1)计算:

$$q = h_v A(T_p - T_f) \tag{1}$$

式中: T_f 为气体温度，K; T_p 为球团表面温度，K; h_v 为气固对流换热系数，W/(m·K); A 为料层单位体积的球团比表面积，m^2/m^3。对流换热系数(h_v)的计算公式如下[12]。

$$h_v = \lambda_f(2.0 + 1.8Pr^{\frac{1}{3}}Re^{\frac{1}{2}})/d_p \tag{2}$$

式中: d_p 为球团直径，m; λ_f 为气相导热系数，W/(m·K); Pr 为普朗特数; Re 为雷诺数。

1.2 球团干燥模型

随着干燥过程的进行，球团湿度下降到临界湿度(W_{sc}，kg/m^3)，球团干燥过程进入内扩散阶段。W_{sc}与球团的半径和物理化学性质有关，其为球团初始湿度的 70%[13]。内部扩散阶段的干燥速率(R_w，$kg/(m^3·s)$)可由下式计算[14]。

$$R_w = (1-\varepsilon_s)A\frac{W_f^e - W_f}{\frac{r_p^2 - r_c r_p}{r_c D_{H_2O}} + \frac{1}{K_w}} \tag{3}$$

式中: r_p 为球团半径，r_c为湿芯半径，m; D_{H_2O} 为水蒸气在空气中的扩散系数，m^2/s; ε_s 为孔隙率，%; W_f 为湿芯半径和颗粒的临界湿度，kg/m^3，其可根据水分平衡方程计算。

$$W_f = \frac{P_v}{RT_f}M_v \tag{4}$$

式中: P_v 为水蒸气的分压，Pa; R 为气体常数，取 8.314 J/(mol·K); M_v 为水的摩尔质量，kg/mol; k_w 为球团料层与热气流之间的对流传质系数，计算公式如下。

$$k_w = \frac{D_{H_2O}}{d_p}\left[2.0 + 0.6\left(\frac{Re}{\varepsilon_s}\right)^{\frac{1}{2}}(Sc)^{\frac{1}{3}}\right] \tag{5}$$

Sc 为施密特数，其计算公式:

$$Sc = \frac{V_f}{D_{H_2O}} \tag{6}$$

流体的湿度(V_f)可根据水汽分压(P_v)计算:

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$V_f = \frac{P_v}{RT_f} M_v \tag{7}$$

气体平衡湿度(W_f^e)可根据水蒸气的饱和压力(P_{sat})计算:

$$W_f^e = \frac{P_{sat}}{RT_n} M_v \tag{8}$$

式中: T_n 为球团外表面温度值，K; 水蒸气饱和压力(P_{sat})可由下式计算:

$$P_{sat}/p^* = \left[\frac{2C}{-B + (B^2 - 4AC)^{0.5}}\right]^4 \tag{9}$$

式中: $p^* = 1$ MPa; 参数 A、B、C 为 Ψ 的函数，其定义为

$$A = \Psi^2 + n_1\Psi + n_2 \tag{10}$$

$$B = \Psi^2 n_3 + n_4\Psi + n_5 \tag{11}$$

$$C = \Psi^2 n_6 + n_7\Psi + n_8 \tag{12}$$

$$\Psi = T + \frac{n_9}{T - n_{10}} \tag{13}$$

式(10) ~ (13)中的系数($n_1 \sim n_{10}$)取值如表 1所示[15]。

1.3　球团干燥数值模拟

通过 Fluent 软件的 UDF(用户自定义函数)建立球团料层抽风干燥过程的数学模型。在编写程序时，将气体饱和湿度(W_f^e)，球团水分析出速率即干燥速率(R_w)，球团湿度(W_p)分别设为用户自定义变量 UDM_0、UDM_1 和 UDM_2; 由于流体模型为黏性流动，湍流模型选取收敛性较好的 $k-\varepsilon$ 模型，控制方程选择能量方程和组分传输方程; 计算时间步长设为1 s; 抽风干燥段内空间初始温度设定为 473 K，料层初始温度设为 353 K; 初始化料层湿度为鼓风干燥段料层初始湿度的 70%[13]，即 154 kg/m^3。

表 1　水蒸气饱和压力系数的取值

i	n_i
1	0.116 705 214 527 67 × 104
2	−0.724 213 167 032 06 × 106
3	−0.170 738 469 400 92 × 102
4	0.120 208 247 024 70 × 105
5	−0.323 255 503 223 33 × 107
6	0.149 151 086 135 × 102
7	−0.482 326 573 615 91 × 104
8	0.405 113 405 420 57 × 106
9	−0.238 555 575 678 49
10	0.650 175 348 447 98 × 103

采用瞬态分析进行仿真，将重力因数考虑在内; 将球团料层设为多孔介质，传热系数选择 “udf heat_sf::libudf”; 气流入口的边界条件设为速度入口(“velocity-inlet”)，气流出口的边界条件设定为压力出口(“pressure-outlet”)。相关边界条件设置成为壁面，由于模型壁面上没有流体运动和旋转，壁面与周围环境之间的传热、传质现象可以忽略不计，因此假定壁面为绝热无滑移边界条件[18]。抽风干燥段仿真所采用的主要热工参数和边界条件如表 2 所示。采用该组参数对球团料层的干燥速率和湿度变化进行仿真，仿真结果与前人的研究一致[6]。

表 2　抽风干燥段生产参数及物性参数

球团湿度 /(kg·m^{-3})	料层厚度 /mm	入口风速 /(m·s^{-1})	入口风温 /K	空间初始温度 /K	气体密度 /(kg·m^{-3})	气体常数 /(J·mol^{-1}·K^{-1})
154	40	1.36	673	473	1.093	8.314
算床移动速度 /(m·s^{-1})	**球团初始温度 /K**	**球团密度 /(kg·m^{-3})**	**球团比热容 /(J·kg^{-1}·K^{-1})**	**球团导热系数 /(W·m^{-1}·K^{-1})**	**球团料层孔隙度**	**算床移动速度 /(m·s^{-1})**
0.045	353	2 200	609.40	17.583	0.39	0.045

2　多指标正交试验

2.1　试验参数选取

根据热力学第一定律，链算机热量收支平衡，即链算机热量收入等于其热量支出，即:

$$Q_{in} = Q_{out} \tag{14}$$

抽风干燥段的热量收入(Q_{in})为预热Ⅱ段的热风、球团以及球团水分携带的热量; 抽风干燥段的热量支出(Q_{out})为废气、水分蒸发以及球团带出的热以及链算机自身散热量[16]。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

温度、风量、压力和运行时间的设定和控制是球团料层在链算机内干燥过程的关键。结合热能平衡方程可知：通过改变入口风速可以间接改变风量；通过改变算床运行速度可以间接改变运行时间；入口风温越高，进入抽风干燥段热风所携带的能量越高；鼓风干燥段结束时料层携带水分越多，进入抽风干燥段时就需要吸收更多的热量来蒸发水分和提高自身温度。

因此，选择入口风速(A)、算床运行速度(B)、入口风温(C)和抽风干燥段料层初始湿度(D)4个热工参数进行正交试验。气流温度的水平取值范围为653～713 K[19]，气流速度的水平取值范围为1.16～1.76 m/s[4]。根据实际的生产工况并结合前人的研究，每个因素选取4个水平值，如表3所示。

表3 试验因数水平数值

水平	试验因素			
	入口风速/(m·s^{-1})	算床运行速度/(m·s^{-1})	入口风温/K	料层初始湿度/(kg·m^{-3})
	A	B	C	D
1	1.16	0.040	653	110
2	1.36	0.045	673	132
3	1.56	0.050	693	154
4	1.76	0.055	713	176

2.2 正交试验评价指标

在选择正交试验指标时，很难用单一的指标评价抽风干燥段内的热工参数，如：较高的入口风温可以让干燥球团料层的湿度更低，但存在温度过高造成能量浪费的情况。因此，根据链算机抽风干燥段的球团干燥度和有效热能利用率2个评价指标，以及综合评分法计算的综合评分作为热工参数的评价指标。

2.2.1 干燥度

假设球团料层在抽风干燥段的初始湿度为W_{pi}，干燥结束时球团料层湿度为W_{pe}，则定义球团料层出抽风干燥段时的干燥度(ξ)为

$$\xi=\frac{W_{pi}-W_{pe}}{W_{pi}}\times 100\% \tag{15}$$

该指标为直接评定球团料层是否达到理想干燥状态的物理量。

2.2.2 有效热能利用率

研究表明：干燥中的料层平均湿度为初始湿度的8%时，达到理想干燥状态[20]，即料层干燥度达到92%。而干燥度达到92%所使用的热能为有效利用热量总和($Q_{92\%}$)，完整的抽风干燥段料层干燥所消耗的热量为总输入热量($Q_{总}$)，由此可得出用于干燥的热能利用率计算公式为

$$\eta=Q_{92\%}/Q_{总}\times 100\% \tag{16}$$

若球团料层在抽风干燥结束时干燥度未达到92%，此时定义用于干燥的热能利用率为负值，用下式计算：

$$\eta=(Q_{总}-Q_{92\%})/Q_{总}\times 100\% \tag{17}$$

2.2.3 综合评分法

采用综合评分法分析干燥度和有效热能利用率，由于其均为自定义指标，在确定权重时具有相同的重要性，因此权重值均取0.5，得到综合评分(α)的计算方法如式(18)所示。由式(18)可知：α越大，球团综合干燥效果越好[20]。

$$\alpha=0.5\times\eta+0.5\times\xi \tag{18}$$

2.3 正交试验结果与讨论

构造4因素4水平的正交试验($L_{16}(4^4)$)，采用CFD方法对16个试验进行研究，代入因素水平后的正交试验结果如表4所示。采用极差分析法评价正交试验结果如表5所示。

由表4可知：当入口风速为1.36 m/s时，综合评分达到最大值87.28；当算床移动速度在0.04～0.05 m/s之间增加时，综合评分随算床移动速度的增加先降低到最低值，随后在0.05 m/s时达到最大值81.31；当风温从653 K上升到673 K时，综合评分从63.88降低到57.29，当风温上升到693 K时，综合评分达到最大值74.68，当风温上升到最大值713 K后，综合评分又降低为73.26；随着抽风干燥段球团料层初始湿度的降低，综合评分持续升高，在初始湿度为132 kg/m^{3}时，综合评分达到最大值75.89，在达到最低湿度为110 kg/m^{3}时，综合评分开始下降。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

因此，为了使正交试验指标“有效热能利用率”和“干燥度”的综合评分达到最高，选择各因素的最佳水平(优化参数组合)为 A = 1.36 m/s，B = 0.05 m/s，C = 693 K，D = 132 kg/m^3。

综合评分的极差 R_i 可以反映因素对两个指标的影响程度，极差大的因素为主要影响因素，极差小的因素为次要影响因素。由表 5 可知，因素 A 的极差达到最大值 51.97，这表明 A 是上述参数中的最重要因素；因素 C 为最小极差 17.39，对试验指标影响很小。由此，得到上述因素对试验指标由大到小的顺序：入口风速(A)、链篦机篦床运行速度(B)、球团料层初始湿度(D)和入口风温(C)。

表 4　16 组正交试验及结果

试验编号	A	B	C	D	ξ	η	综合评分
1	1.16	0.040	653	110	−3.16	90.01	43.43
2	1.36	0.040	673	132	53.24	98.83	76.04
3	1.56	0.040	693	154	58.23	96.44	77.34
4	1.76	0.040	713	176	54.36	98.83	76.60
5	1.16	0.045	693	132	−2.16	90.01	43.93
6	1.36	0.045	713	110	65.35	97.76	81.55
7	1.56	0.045	653	176	−25.16	74.19	24.52
8	1.76	0.045	673	154	−1.05	91.89	45.42
9	1.16	0.050	713	154	−2.69	87.68	42.50
10	1.36	0.050	693	110	98.48	91.95	95.21
11	1.56	0.050	673	176	100.00	92.65	96.33
12	1.76	0.050	653	132	87.93	94.52	91.22
13	1.16	0.055	673	176	−42.42	65.20	11.39
14	1.36	0.055	653	154	100.00	92.67	96.33
15	1.56	0.055	713	132	87.47	97.32	92.39
16	1.76	0.055	693	110	68.20	96.31	82.26

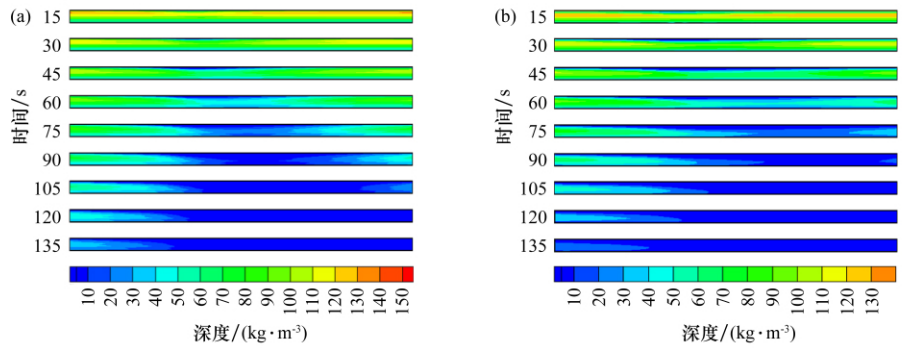
表 5　多指标正交试验指标分析

指标	试验因素			
	A	B	C	D
K_{i1}	141.24	273.40	255.50	302.45
K_{i2}	349.14	195.42	229.17	303.58
K_{i3}	290.58	325.26	298.73	261.59
K_{i4}	295.49	282.37	293.04	208.83
k_{i1}	35.31	68.35	63.88	75.61
k_{i2}	87.28	48.85	57.29	75.89
k_{i3}	72.64	81.31	74.68	65.40
k_{i4}	73.87	70.59	73.26	52.21
R_i	51.97	32.46	17.39	23.69

注：K_{in} 为各对应列上相同水平的试验指标之和；k_{in} 为各水平试验指标之和的平均值；R_i 为对应列的极差，反映因素 i 的水平对有效热能利用率和干燥度的综合影响(i = A，B，C，D；n = 1，2，3，4)。

3　优化参数及节能分析

多指标正交试验的优化参数组合的综合评分为 97.76，高于 16 次试验的综合评分(表 4)。为了分析优化参数对球团料层干燥性能和热能利用的影响，对原参数和优化参数下球团料层的干燥性能进行对比分析如图 2 所示(图 2 为优化前、后球团料层的干燥过程，以 15 s 为间隔保存一次仿真结果，云图中不同颜色代表球团料层不同的湿度值)。由图 2 可看出：参数优化后，料层具有更好的干燥效果，图 2(b)中球团料层在 120 s 时已经达到理想干燥度，并且在干燥结束时球团几乎完全干燥。

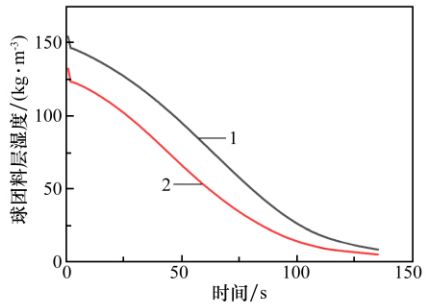


(a)优化前；(b)优化后

图 2　优化前、后球团料层干燥性能对比

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

优化前、后球团料层的湿度变化如图3所示。由图3可看出：原参数下的球团料层湿度变化与文献中一致[19]，证明了本文所建模型的有效性；优化参数下的球团料层湿度低于原参数下的湿度，干燥性能更好；优化参数下球团料层干燥进行108 s后便达到92%的干燥度，其比原参数组合提前了约15 s。



1—优化前；2—优化后。

图3 优化前、后料层的湿度变化

在优化参数下进行仿真计算，得知球团料层干燥所消耗热能为5 389.46 kJ/t。为了验证热能匹配模型，采用多指标正交试验得到的优化参数进行试验，根据试验热工测试参数进行热量平衡计算，结果如表6所示。

表6 试验设备热量平衡计算

热收入		热支出	
项目	热量/(kJ·t⁻¹)	项目	热量/(kJ·t⁻¹)
热风带入的热量	39 096.98	热风带走的热量	23 843.94
生球带入的热量	1 035.96	干团带走的热量	7 378.06
水分带入的热量	252.67	水分蒸发吸热量	5 238.76
—	—	热损失	5 087.16
合计	40 385.61	合计	41 547.92

由表6可知：试验设备输入及输出热量的相对误差为2.89%，符合工况要求；球团料层干燥过程消耗的热量为5 238.76 kJ/t，其与仿真值的相对误差为2.87%。由此可知，该参数优化方法对改善球团料层干燥性能有重要意义，可为链算机抽风干燥段热工参数设置和温度场控制提供思路[21]。

4 结 论

(1) 为了提高链算机的热能利用率，减少干燥过程中的能量浪费，建立了抽风干燥段热能平衡模型。基于多指标正交试验法研究不同热工参数下球团料层的有效热能利用率和干燥度，通过综合评分和极差分析法，得到了相对优化的热工参数。

(2) 仿真结果表明：优化参数下球团料层比原参数组合提前约15 s达到92%的干燥度，干燥性能得到了提升；仿真结果和试验对比具有一致性，在优化参数下进行试验得到球团料层干燥过程消耗的热能为5 238.76 kJ/t，其与仿真值的相对误差仅为2.87%。研究结果表明，合理地提高球团料层初始干燥度，适当提高入口风温能够使球团料层的干燥达到比较理想的状态，并减少能量损失。研究结果可为链算机抽风干燥段的热能有效利用提供理论参考。

参考文献

[1] 蓝庆滔,李要武,姚月亭. 我国氧化铁球团生产技术现状及产业发展前景[J]. 安徽科技,2011(6):46-47.

[2] G. E. Stewart,D. M. Gorinevsky,G. A. Dumont. Feedback controller design for a spatially-distributed system: the paper machine problem[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2003,11(5):612-628.

[3] R. W. Young,M. Cross,R. D. Gibson. Mathematical model of grate-kiln-cooler process used for induration of Iron Ore Pellets[J]. Ironmaking and steelmaking,1979,6(1):1-13.

[4] 郭建慧. 链算机球团料层干燥预热过程温度场建模仿真及参数优化[D]. 镇江:江苏大学,2014.

[5] 李洋. 球团干燥过程的数学建模与数值模拟研究[J]. 烧结球团,2018,43(4):33-39.

[6] A. L. Ljung,T. S. Lundström,K. Tano,et al. Simulation of convective drying of a cylindrical iron ore pellet[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 2011(21):703-716.

[7] T. Sukerman,C. Duchesne,D. Hodouin. On the drying rates of individual iron oxide pellets[J]. International Journal of Mineral Processing,2007,83(3-4):99-115.

[8] 王铁臣. 链算机-回转窑系统热平衡分析及其模型化[D]. 沈阳:东北大学,2006.

[9] 刘宝先,任大鹏. 链算机物料平衡及热平衡计算[J]. 现代冶金,2009,37(6):64-66.

[10] 叶匡吾. 烧结过程、球团过程的能量流和优化选择[J]. 烧结球团,2010,35(1):1-6.

(下转第60页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量精度误差、机体振动、颗粒杂质等因素的影响。-5 mm 矿产率的预测值、仿真值和试验值误差大小均在 5% 以内，进一步验证了本文建立的物料黏结颗粒模型的可靠性以及基于离散元法优化惯性圆锥破碎机破碎性能的可行性。

5 结 论

(1) 通过对母系类矩形体的动态填充构建物料黏结颗粒模型，并定义颗粒黏结模型的力学参数，为进行更加符合实际惯性圆锥破碎机破碎过程的数值仿真试验奠定了前期基础。

(2) 利用 EDEM 软件对惯性圆锥破碎机进行仿真分析，解释了破碎区下半部分颗粒流动不均匀的原因：大颗粒群在破碎区容易出现堵塞，导致在大颗粒群下方容易形成空隙，这种堵塞行为是一种短期瞬态效应。

(3) 通过正交仿真试验得出了 -5 mm 矿产率的回归方程，分析得出试验因素对 -5 mm 矿产率影响的主次顺序：激振器转速、给料量和偏心力矩。通过 MATLAB 遗传算法工具箱对破碎性能评价指标进行寻优，当激振器转速为 25.7 r/s、偏心力矩为 1 340.6 N·mm、给料量为 67.4 kg/s 时，惯性圆锥破碎机破碎性能最佳。

参考文献

[1] 毕秋实，王国强，黄婷婷，等. 基于 DEM-FEM 耦合的双齿辊破碎机辊齿强度分析[J]. 吉林大学学报(工学版)，2018，48(6)：1 770-1 776.

[2] 马彦军，范秀敏，何其昌. 适用于多种物料的圆锥破碎机腔型时变磨损预测[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2016，47(4)：1 121-1 127.

[3] 周弘扬，王春雨，巩云鹏. 惯性圆锥破碎机主轴的动力学特性分析[J]. 机械设计与制造，2018(7)：63-65；69.

[4] 任廷志，黄凯锋，程加远，等. 新型惯性圆锥破碎机的减振性能[J]. 中国机械工程，2019，30(22)：2 704-2 708.

[5] 张子龙，任廷志，程加远，等. 考虑粒形转化特性的圆锥破碎机层压破碎行为研究[J]. 机械工程学报，2017，53(16)：173-180.

[6] 王晓，张长献，薛玉君，等. 基于 EDEM 的球磨机不同填充率下颗粒碰撞与能量变化探究[J]. 矿山机械，2019，47(8)：29-34.

[7] Ferellec J F，McDowell G R. A method to model realistic particle shape and inertia in DEM[J]. Granular Matter，2010，12(5)：459-467.

[8] 李冬飞，张海，王超. 单颗粒岩石在反击式破碎机内的破碎机理研究[J]. 机械工程师，2019(6)：16-20.

[9] Celigueta M A，Latorre S，Arrufat F，et al. Accurate modelling of the elastic behavior of a continuum with the Discrete Element Method[J]. Computational Mechanics，2017，60(6)：1-14.

[10] 朱洪民，王泽红，孙维波，等. 离散元及其耦合方法在球磨机研究中的应用[J]. 金属矿山，2018(9)：1-8.

[11] 刘瑞江，张业旺，闻崇炜，等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理，2010，27(9)：52-55.

[12] 杜义贤，王伟，田启华. 结构拓扑优化参数的正交试验设计[J]. 机械设计与研究，2011，27(5)：14-17.

[13] 黄鹏鹏，胡名亮，李成. 基于 EDEM 的反击式破碎机破碎效率仿真分析[J]. 机械设计与制造，2016(12)：64-68.

[14] 叶涛，刘付志标. 基于 DEM-FEM 的圆锥破碎机动锥衬板受力特性研究[J]. 矿业研究与开发，2017，37(8)：76-79.

(上接第 40 页)

[11] 宋彦坡，董武，彭小奇，等. 链箅机球团预热系统能耗分析及优化[J]. 金属材料与冶金工程，2012，8(4)：10-14.

[12] 尹洪超，朱元师，李德付. 基于耦合气固传热箅冷机的数值模拟与研究[J]. 热科学与技术，2012，11(3)：229-233.

[13] L Hong，H Yin，Z Ming，et al. Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln[J]. Powder Technology. 2016(287)：239-247.

[14] 王祎. 铁矿氧化球团链箅机-回转窑模拟模型和控制指导专家系统的研究[D]. 长沙：中南大学，2012.

[15] B. Alazmi，K. vafai. Analysis of fluid flow and heat transfer interfacial conditions between a porous medium and a fluid layer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2001，44(9)：1 735-1 749.

[16] 冯俊小，郑海薇，张永明，等. 链箅机的热工测试及节能研究[J]. 工业炉，2008，30(1)：11-13.

[17] M. Barati. Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system[J]. International Journal of Mineral Processing. 2008，89(1-4)：30-39.

[18] Wei Shao，Zheng Cui，Wang Naihua，et al. Numerical simulation of heat transfer process in cement grate cooler based on dynamic mesh technique[J]. Science China(Technological Sciences)，2016(59)：1 065-1 070.

[19] 张汉泉. 链箅机-回转窑铁矿氧化球团干燥预热工艺参数研究[J]. 矿冶，2005，14(2)：59-62.

[20] 黄柱成，王林，易凌云，等. 低品位铁矿石内配煤球团的回转窑脱水工艺研究[J]. 金属矿山，2017(11)：57-63.

[21] 李伯全，沈宗辉，王宏余. 链箅机箅床温度场间接监控技术[J]. 烧结球团，2007，32(3)：28-30.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net