

文章编号: 1001-0920(2013)04-0547-05

基于落滚法则的球团矿生球堆积改进模型

彭俊, 王建辉, 顾树生, 方晓柯

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 针对球团矿生产过程生球堆积排列对球床渗透率、表面积等物理特性的影响, 根据由实际物理现象抽象出的“落滚法则”, 考虑生球球体塑性变形和生球粒度分布, 建立了球团矿生球顺次累加堆积的改进数学模型. 对于不同的堆积高度和生球粒度分布进行了生球堆积模拟, 并对球床的空隙率、渗透率和单位体积表面积进行了精确计算. 仿真结果表明该模型符合实际生产过程, 为球团矿生球干燥和烧结过程精确模型的建立奠定了坚实的基础.

关键词: 落滚法则; 球体堆积; 塑性变形; 粒度分析

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Improved model of iron-ore pellets packing based on dropping and rolling method

PENG Jun, WANG Jian-hui, GU Shu-sheng, FANG Xiao-ke

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Correspondent: PENG Jun, E-mail: impengjun@gmail.com)

Abstract: In the iron-ore pellet induration process, the green ball packing influences the porosity, the permeability, and the surface area of pellet bed. Take the plastic deformation and size distribution of green balls into consideration, an improved numerical model for sphere packing process is presented by using dropping and rolling rules which are derived from a realistic physical phenomenon. The simulation is taken for different packing heights and size distributions, and the corresponding accurate porosity, permeability and surface area for normal distribution of sphere radii can be got. The simulation result shows that the model is efficient and well reflects realistic packing process, and it also provide the foundation of accurate drying and induration model.

Key words: dropping and rolling method; sphere packing; plastic deformation; size distribution

0 引言

利用链篦机-回转窑球团法可将造球机造好的生球进行干燥预热、焙烧固结和冷却. 首先, 布球机将生球布在慢速运行的蓖板上, 利用环冷机三冷段余热及预热二段排除的热气流对生球进行鼓风机干燥及抽风干燥; 然后由二冷段和回转窑的热气进行预热氧化, 脱除吸附水或结晶水, 并达到足够的抗压强度后直接送入回转窑进行焙烧. 因为回转窑焙烧温度高且回转, 所以加热温度均匀, 不受矿石种类的限制, 并且可以得到质量稳定的球团^[1].

冶金领域的学者对球团矿烧结过程模型进行了大量的研究^[2-6]. Voskamp等^[2]首次提出了烧结过程模型; Young等^[3]构建了链篦机-回转窑球团法的完整模型; Thurlby^[4]将链篦机-回转窑过程分解为几个子过

程, 并通过气体流速和气压变化分析了这几个子过程的联系. 相对于链篦机-回转窑球团法, 带式焙烧机球团法的研究文献较多. Barati^[5]提出了完整的带式焙烧机过程模型, 包括干燥、烧结和冷却过程, 并考虑了球床的收缩率; Majumder^[6]在现有的模型基础上进行了部分改进, 开发出带式焙烧机模拟器, 对烧结过程进行模拟并对一些关键参数进行了预测.

在上述球团矿烧结过程模型中, 球床空隙率一般取为定值, 模型中对于球床的空隙率和单位体积表面积没有严格的计算. 实际上, 力学和流体动力学研究表明, 球体堆积排列方式等内部微观因素的变化对造粒系统的许多宏观的物理特性(如渗透率等)影响较大, 因而本文对生球堆积排列方式进行了微观研究, 由实际生产数据得出生球粒度分布; 考虑到生球球团

收稿日期: 2012-01-11; 修回日期: 2012-04-11.

基金项目: 中央高校基本科研专项资金项目(N100404017); 辽宁省工业攻关计划项目(2010220014).

作者简介: 彭俊(1982-), 男, 博士生, 从事复杂工业过程建模与控制的研究; 王建辉(1957-), 女, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业过程建模与控制、智能控制等研究.

这种颗粒聚合体在堆积过程中发生的塑性变形, 在实际物理现象中抽象出的“落滚法则”基础上, 得出球体顺次累加算法; 通过仿真实验模拟各个因素对球床的空隙率和渗透率的影响, 进而对精确的球团矿烧结过程模型的建立提出了理论和计算依据.

1 球体堆积排列

力学研究表明, 在重力场中等粒度球体的堆积排列只有4种方式: 立方体、正交、四方-楔形和菱面体, 且以球体的球心互相连接所构成的立体图形来命名.

球体堆积排列方式的参数主要有空隙率和配位数. 空隙率定义为空隙的体积占整体的比例, 其计算公式为

$$\varphi = \frac{V_0}{V} = \frac{V - V_1}{V} \quad (1)$$

其中: φ 为空隙率, V_0 为空隙体积, V 为整体体积, V_1 为球体体积, d 为直径. 以立方体堆积为例, 空隙体积为单位立方体减去8个顶角上的八分之一球体的体积, 即

$$\varphi = \left(d^3 - \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 \right) / d^3 \approx 0.4764.$$

此外, 也常用堆积密度来描述堆积形态, 计算式为 V_1/V .

配位数定义为与特定的球体相互接触的球体的个数, 如立方体堆积中, 每个球体的配位数为6. 不难得出其他堆积方式的空隙率和配位数, 如表1所示.

表1 堆积排列的空隙率和配位数

堆积方式	配位数	空隙率/%
立方体	6	47.64
正交	8	39.54
四方-楔形	10	30.19
菱面体	12	25.95

球团矿干燥烧结过程中, 造球机生产出的生球由布料机放置于蓖板上, 堆积成一定高度的多层的生球球床. 除了实验室测量外, 实际生产中无法对球床的堆积形态和空隙率进行测量和研究计算.

2 基于顺次累加的球体堆积改进算法

现有的堆积模拟算法大致可分3类: 1) 非顺次重排列, 球体无需按顺序排列, 尽可能地增加其堆积密度; 2) 动态模拟, 该方法以离散元法为基础, 将堆积过程视为动态过程, 并考虑了球体间的作用力; 3) 顺次累加^[7], 在重力场设定尺寸的容器中依次落入球体. 由于顺次累加最接近真实的物理现象, 本文在顺次累加算法思想的基础上, 以落滚法则作为判稳依据, 考虑生球粒度分布和塑性变形两大重要影响因素, 建立了球团矿生球堆积的精确模型.

2.1 基于落滚法则的顺次累加

落滚法则是球体落下堆积时的一种运动规则, 包

含落下法则和滚动法则两部分. 在三维坐标系 xyz 中, o 为原点, 该三维坐标系位于重力场中. xoy 平面随机落下粒度符合一定分布的球体, 其球心坐标为 (x, y, z) , 其中 (x, y) 坐标随机产生. 球体在落滚法则下进行堆积. 首先, 球体在重力作用下沿 z 轴反向落下, 启动落下法则, 即球心 z 坐标沿 z 轴按计算步长减小, 直到与 xoy 面接触 (z 坐标等于球体半径), 球体稳定; 当落球与别的球体接触时, 则按照滚动法则达到稳定. 记录稳定状态下球心的三维坐标和粒度数据, 循环顺次累加, 直到满足终止条件, 即球床高度达到设定值 z_{\max} , 程序终止, 输出所有的数据. 顺次累加算法流程如图1所示.

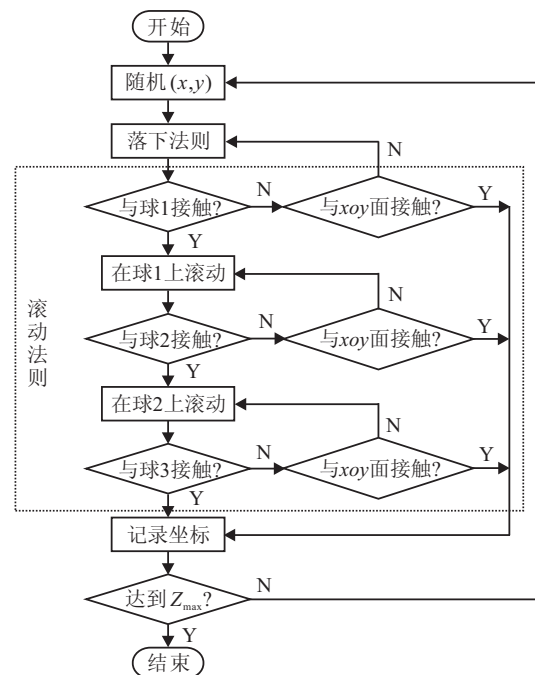


图1 顺次累加算法流程

对于落球没有直接接触 xoy 平面的情况, 在此运用滚动法则进一步详细分析落球的状态. 在三维坐标 xoy 俯视图 (图2) 中, 稳态球体用虚线表示, 坐标和半径分别为 (x_1, y_1) 和 r_1 ; 待稳定的球体用实线表示, 坐标和半径分别为 (x_0, y_0) 和 r_0 .

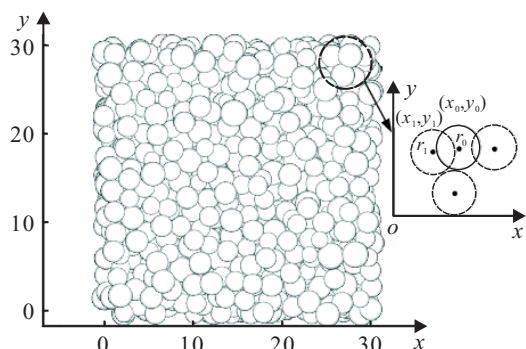


图2 球体堆积形态示意图

如果两者平面圆心距小于半径和, 即 $(x_1 - x_0)^2 +$

$(y_1 - y_0)^2 < (r_1 + r_0)^2$, 则两球处于接触状态. 只有与相邻3个稳定球体相接触, 落球才会稳定. 落球首先与球1接触后并不稳定, 沿着与 xoy 垂直且包含落球与球1球心间连线的平面滚动, 若没有与 xoy 面接触, 则沿着如图3(a)所示方向滚动, 直到与球2接触.

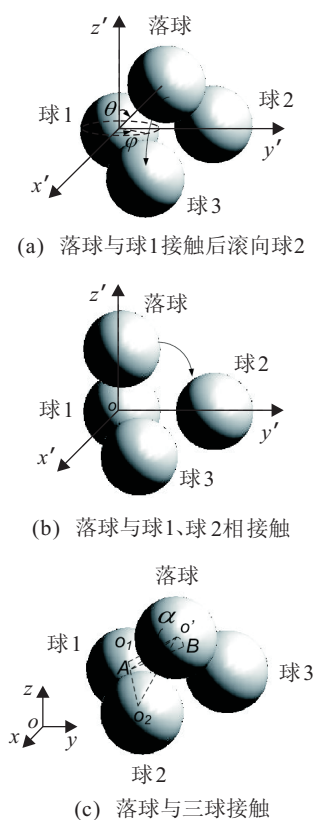


图3 落球状态

为便于计算, 以球1的圆心为原点, 建立一个与原始三维坐标平行的新坐标 $x'y'z'$, 不难得出落球的位置坐标 (x'_0, y'_0, z'_0) 为

$$\begin{cases} x'_0 = x_1 + (r_1 + r_0) \cos \theta \cos \varphi, \\ y'_0 = y_1 + (r_1 + r_0) \cos \theta \sin \varphi, \\ z'_0 = z_1 + (r_1 + r_0) \sin \theta. \end{cases} \quad (2)$$

其中: θ 为球心连线与 z' 轴的夹角, φ 为球心连线在 $x'y'$ 平面上的投影与 x' 轴的方位角.

落球与两球接触后, 若没有与 xoy 面接触, 则将继续沿着与包含3个球心的平面相垂直的平面的方向滚动. o' 、 o_1 和 o_2 分别为落球、球1和球2的球心, $o'B$ 为球心滚动的弧形轨迹, $o'A$ 为 o_1o_2 的垂线, $o'A$ 与 AB 的夹角为 α . B 为落球的新的球心位置, 坐标可以由向量计算, 即

$$\begin{cases} \overrightarrow{oB} = \overrightarrow{oA} + \overrightarrow{AB}, \\ \overrightarrow{oA} = \overrightarrow{oo_1} + \overrightarrow{o_1o_2} \cdot \frac{\overrightarrow{o_1o'} \cdot \overrightarrow{o_1o_2}}{|\overrightarrow{o_1o_2}|^2}, \\ \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{Ao'} + \frac{\overrightarrow{Ao'} \times \overrightarrow{o_1o_2}}{|\overrightarrow{Ao'} \times \overrightarrow{o_1o_2}|} |\overrightarrow{Ao'}| \tan \alpha. \end{cases} \quad (3)$$

最终, 落球与3个稳定球体相接触, 达到稳定状态. 在累加过程中, 采用周期性边界方法消除球床边界的壁面效应, 即当 $x < 0$ 时, $x = x + x_{\max}$; 当 $x > x_{\max}$ 时, $x = x - x_{\max}$. y 坐标同理可得.

2.2 生球粒度分布

在以往的球团矿干燥或者烧结模型中, 生球一般被假设为等粒度球体, 在此假设基础上计算出的球床空隙率或单位体积表面积与实际情况相差较大, 降低了后续模型的精确度.

实际生产过程中, 造球机生产出的生球并不是单粒度的. 粒度既要满足高炉冶炼的需要, 同时也要考虑造球设备的条件 and 生产量. 一般高炉用的球团粒度中, 6 ~ 16 mm 粒级的占 80% ~ 95%^[1]. 根据文献[8]提供的5.5小时获得的23个批次的数据, 筛分粒度从小到大分为10组. 原始数据中测量的是每个筛分粒度组中的质量百分比, 由粒度筛分组中生球的平均质量和造球机的产量, 可计算出23个批次、10个筛分组的生球个数.

根据计算结果产生的数据样本, 对其概率分布进行分析, 从而得出造球机生产出的生球的粒度分布, 虽然 P 值小于0.005, 但考虑到样本点中除两端的点偏离实际分布外, 大部分都符合分布. 在实际造球中, 两端的样本点对应粒度过大或过小的生球都属于不合格产品, 会重新回收造球, 故两端可以视为离群值, 不予考虑^[9]. 因此在实际生产过程中, 生球的粒度符合近似正态分布, 本文采用的粒度数据符合正态分布 $N(12.11, 1.3)$.

2.3 生球的塑性变形

对于球团这种颗粒聚合物, 在堆积过程中重力和挤压力的作用下势必发生一定的塑性变形. 如图4所示, 塑性变形会导致球度变化, 球团间会有部分重叠进而导致空隙率的变化, 因此从实际情况出发, 将塑性变形因素引入模型中.

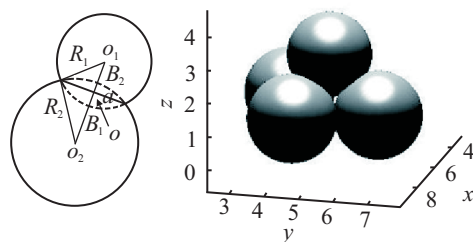


图4 互相接触的球团间的塑性变形

图4中: a 为接触区域半径, B_1o 和 B_2o 分别是球体 o_1 和 o_2 的塑性变形量, R_1 和 R_2 分别是接触球体的半径, o_1o_2 是球心距. 球床由多层生球堆积而成, 为了避免堆积过程中上层生球的重力作用以及鼓风段的气流作用而导致生球破裂, 球床的高度一般控制

在 18 ~ 22 cm 范围内. 由弹塑性力学的知识可知, 生球塑性形变量与其所处的高度成反比.

生球接触区域半径与其 z 坐标的关系可表示为

$$z = -m_1 a^2 + m_2 a + m_3. \quad (4)$$

其中: m_1 和 m_2 为正实数; m_3 为球床高度上限, 取值范围为 18 ~ 22 cm; 破裂零界点处即球床高度为 22 cm 时, 最底层生球塑性形变量为 1 ~ 1.5 mm [10], 约为球体半径的 0.1 倍, 则不难计算接触区域半径约为球体半径的 0.43 倍.

3 堆积过程模拟和结果分析

模拟程序采用 Fortran 语言和 NAG 公司 Fortran Builder 5.2 编译器. 为选取适当的堆积尺寸, 首先进行单粒度刚性球体堆积模拟, 堆积高度采用球团烧结过程球床高度的下限, 即 18 cm, 长度和宽度选取 5 组数据, 计算其对应的空隙率如表 2 所示.

表 2 不同底面面积, 单粒度堆积下的空隙率

底面面积/cm ²	25 ²	30 ²	35 ²	40 ²	50 ²
空隙率/%	42.57	42.38	42.36	42.37	42.36

由表 2 数据可知, 随着底面面积的逐渐增大, 空隙率会变小, 直到面积达到 35 × 35 后, 空隙率稳定在 42.36%, 与文献 [11] 报道的堆积体积密度为 0.58 相近. 为避免随机性对计算结果的影响, 对应每组三维尺寸程序运行 3 次, 结果显示空隙率的误差在 0.04% 以内. 因而在随后的实际模拟中, 容器底部的尺寸分别设为 $x_{\max} = 30$ cm, $y_{\max} = 30$ cm.

3.1 不同球床高度下的生球塑性变形

由式 (4) 提供的球床高度和生球塑性形变的关系, 以及 2.2 节统计结果, 模拟粒度均值为 12.11 mm, 标准差为 1.3 mm 的正态分布球体堆积, 并考虑生球的塑性变形, 破裂零界点处塑性变形接触区域半径取值为 0.43R. 图 5 分别为不同球床高度下, 堆积形态 3D 图和生球间的应力网络图. 随着堆积高度的增加, 下层球体间的应力不断加大, 塑性变形加剧. 图中表现为 3D 图中下层球体与接触球间的重叠区域增大; 而应力网络图中, 应力线更加密实. 由此可见, 本模拟算法有效地反映了不同堆积高度下生球塑性变形的情况.

3.2 不同生球粒度范围下的堆积模拟

根据文献 [1] 提供的生球参考粒度 11 mm 以及 2.2 节的统计结果, 模拟程序将其分别设为均值, 对不同的粒度范围分布和不同的球床高度, 计算其对应的空隙率和渗透率, 如表 3 所示.

空隙率和渗透率的关系由经典 Carman-Kozeny 方程描述, 即

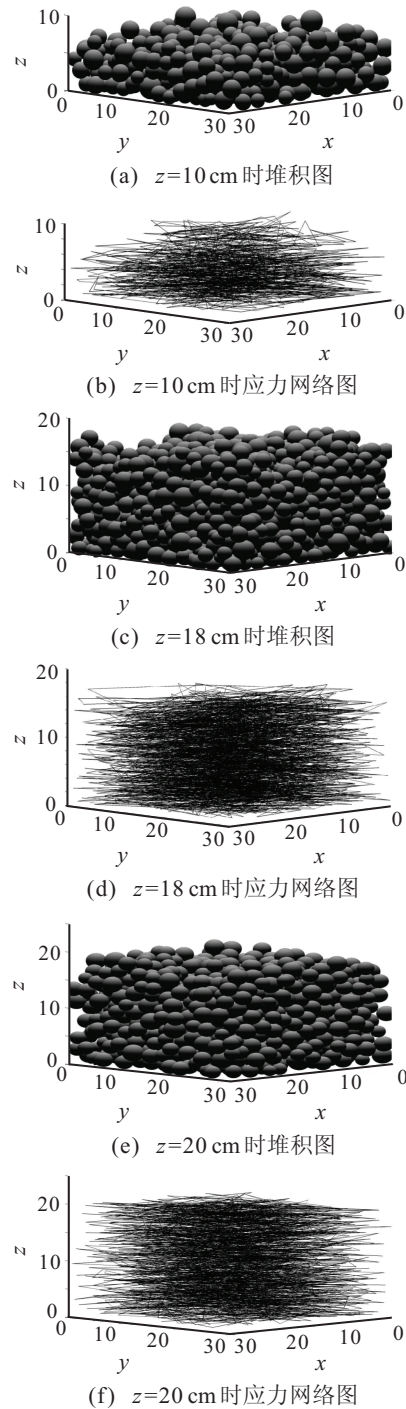


图 5 不同球床高度下的堆积图和应力网络图

$$\kappa = \frac{d_s^2}{180} \cdot \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2}. \quad (5)$$

其中: $d_s = \frac{\int d^3 f(d) d(d)}{\int d^2 f(d) d(d)}$ 为表面平均直径, κ 为渗透率 (mm²), $f(d)$ 为球体粒度的分布函数. 由积分函数的定义, 可转换为

$$d_s = \frac{\sum n_i d_i^3 / \sum n_i}{\sum n_i d_i^2 / \sum n_i}. \quad (6)$$

空隙率和单位体积表面积的关系由下式表示:

$$A = 6(1-\varphi)/d_s. \quad (7)$$

表 3 不同粒度范围下的空隙率和渗透率

粒度均值 mm	粒度范围 mm	高度 cm	空隙率 %	ds mm	渗透率 mm ²	单位体积表面积 m ⁻¹
11	6.0~16	15	40.04	12.24	0.1486	29.39
		18	39.71	12.01	0.1380	30.12
		20	39.55	11.95	0.1343	30.35
11	7.0~15	15	40.09	11.87	0.1405	30.28
		18	40.01	11.79	0.1374	30.53
		20	39.96	11.67	0.1339	30.87
11	8.0~14	15	40.29	11.54	0.1357	31.05
		18	40.06	11.42	0.1296	31.50
		20	39.99	11.35	0.1271	31.73
12.1	9.5~14.7	15	41.07	12.41	0.1707	28.49
		18	40.15	12.35	0.1531	29.07
		20	40.28	12.28	0.1535	29.18

由表 3 可知: 相同的粒度范围内, 随着球床高度的增加, 生球的塑性变形加剧, 空隙率变小, 渗透率变小, 表面积增大; 而在相同的球床高度情况下, 粒度范围越宽, 空隙率越小, 渗透率也变小. 可见, 渗透率受粒度均值的影响更大一些. 表面平均粒度与粒度均值正相关, 与球床高度无关; 而粒度范围越宽, 表面平均粒度越大. 单位体积表面积更多地受表面平均粒度的影响. 因而在实际生球干燥过程中, 为了获得较好的球床渗透率, 造球机的生球粒度设定值在满足其他参数的情况下应稍高一些.

4 结 论

本文根据实际物理现象抽象出“落滚法则”, 并考虑实际球团生产过程中生球的粒度符合近似正态分布, 以及堆积过程中球体产生的塑性变形, 对生球堆积过程进行了仿真模拟, 得出了球床精确的空隙率、渗透率和单位体积表面积, 这对后续的生球干燥以及烧结过程模型的建立奠定了坚实的基础.

参考文献(References)

[1] 张一敏. 球团矿生产技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 69-70.
(Zhang Y M. Technology of iron ore pellets

manufacture[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 69-70.)
[2] Voskamp J, Brasz J. Digital simulation of the steady state behaviour of moving bed processes[J]. Measurement and Control, 1975, 8: 23-32.
[3] Young R, Cross M, Gibson R. Mathematical model of grate-kiln-cooler process used for induration of iron ore pellets[J]. Ironmaking Steelmaking, 1979, 6(1): 1-13.
[4] Thurlby J. A dynamic mathematical model of the complete grate/kiln iron-ore pellet induration process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1988, 19(1): 103-112.
[5] Barati M. Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system[J]. Int J of Mineral Processing, 2008, 89(1/2/3/4): 30-39.
[6] Majumder S, Natekar P, Runkana V. Virtual indurator: A tool for simulation of induration of wet iron ore pellets on a moving grate[J]. Computers and Chemical Engineering, 2009, 33(6): 1141-1152.
[7] Visscher W M, Bolsterli M. Random packing of equal and unequal spheres in two and three dimensions[M]. New Mex: Los Alamos Scientific Lab, 1973: 98-99.
[8] Thurley M J, Andersson T. An industrial 3D vision system for size measurement of iron ore green pellets using morphological image segmentation[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(5): 405-415.
[9] Navidi W C. Statistics for engineers and scientists[M]. New York: McGraw-Hill, 2004: 251-254.
[10] Forsmo S P E, Apelqvist A J, Björkman B M T, et al. Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder[J]. Powder Technology, 2006, 169(3): 147-158.
[11] Tory E, Church B, Tam M, et al. Simulated random packing of equal spheres[J]. The Canadian J of Chemical Engineering, 1973, 51(4): 484-493.

下 期 要 目

基于测试性的电子系统综合诊断与故障预测方法综述 邓 森, 景 博
 动态多目标优化的预测遗传算法 武 燕, 等
 直觉模糊群决策中专家权重确定的一种精确方法 周 伟, 等
 基于流形学习的局部保持 PCA 算法在故障检测中的应用 王 健, 等
 无线传感器网络中 2-连通 k-支配的容错连通支配集构造 郑 婵, 等
 面向集合论的灰度定义及灰色粗糙集模型建立 管利荣
 基于 WLC 的钢铁企业多工序、多路径订单投放方法 张春生, 李铁克