

基于EDEM的烘干滚筒砂石颗粒抛洒特性仿真分析

王加豪¹, 田欣心², 沈景凤¹

¹上海理工大学机械工程学院, 上海

²上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2021年12月25日; 录用日期: 2022年1月13日; 发布日期: 2022年1月20日

摘要

为了掌握烘干滚筒内砂石颗粒的抛洒特性, 提高烘干滚筒中砂石颗粒的烘干效果, 本文基于工程实际, 设计了一种一段式折弯烘干滚筒扬料叶片, 建立了砂石颗粒的运动学模型, 并利用离散元软件EDEM, 以料帘均匀性与料帘密度为试验目的进行正交仿真试验。仿真结果表明, 扬料叶片的结构尺寸参数对料帘均匀性与料帘密度的影响从高到低分别为: 翼板高度与腹板高度的比值、折弯角度、腹板高度、扬料叶片圆周数目。对于直径3000 mm、转速为8.3 r·min⁻¹的烘干滚筒, 当一段式折弯扬料叶片的腹板高度为170 mm、翼板高度与腹板高度的比值为0.5、折弯角度为120°、扬料叶片圆周数目为21片时, 综合料帘密度与料帘均匀性要求达到最佳平衡点。此仿真试验可为扬料叶片的设计提供理论依据, 为工程实际的应用提供一定的帮助。

关键词

烘干滚筒, 叶片, 料帘, 离散元

Simulation Analysis of Scattering Characteristics of Sand and Gravel in Drying Roller Based on EDEM

Jiahao Wang¹, Xinxin Tian², Jingfeng Shen¹

¹College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Collage of Health Sciences and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 25th, 2021; accepted: Jan. 13th, 2022; published: Jan. 20th, 2022

文章引用: 王加豪, 田欣心, 沈景凤. 基于 EDEM 的烘干滚筒砂石颗粒抛洒特性仿真分析[J]. 建模与仿真, 2022, 11(1): 149-160. DOI: 10.12677/mos.2022.111013

Abstract

In order to grasp the drying cylinder scattering characteristics of sand particles, improve the effect of drying in the drying cylinder, this article is based on the engineering practice, which designed a one bending drying drum feed blade, sand particle kinematics model was established, and by using discrete element software EDEM, shade uniformity and the density of the curtain material for test purposes of orthogonal simulation test. The experimental results showed that the influence of the structural dimension parameters of the hoisting blade on the curtain uniformity and the curtain density from high to low are the ratio of the wing height to the web height, bending Angle, the height of the web and the number of the hoisting blade circumference. For the drying cylinder with a diameter of 3000 mm and a rotation speed of 8.3 rpm, bending feed when one leaves the web height is 170 mm, the wing plate height and the ratio between the depth of the web 0.5, bending Angle is 120°, feed circular blade number is 21, comprehensive shade density and material curtain uniformity requirements to achieve the best balance point. The simulation test can provide a theoretical basis for the design of the material hoisting blade and a certain help for the practical application of engineering.

Keywords

Drying Cylinder, Leaf Blade, Curtain Material, Discrete Element

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

烘干滚筒是回转烘干窑的重要部件之一,其主要功能是对湿冷物料(例如砂石)进行烘干加热,以便获得高质量的建筑类原材料。其内部放置有导料叶片、扬料叶片和出料叶片等。当滚筒旋转时,物料在被扬料叶片提升的过程中从不同的位置落下形成料帘,然后继续被提升。整个过程中,物料和热烟气充分接触而被烘干[1]。单位体积内,料帘密度越大,物料参与热交换的总量相对越多,热效率越高;物料被抛洒得越均匀,即料帘越均匀,烘干效果越好,从而热效率也越高。影响回转烘干窑热效率的因素有很多,扬料叶片结构尺寸设计是否合理将直接影响料帘的均匀性与料帘密度,继而影响烘干窑的热效率。

对于烘干滚筒内物料的运动,国内外许多专家学者已经有了比较广泛的研究。叶片式烘干滚筒的设计方法是 Baker C.G.最先提出来的,同时对于叶片持料量,也建立了相应的数学模型,在理想情况下,叶片的数量要确保叶片持料量满足总量的 10%~15% [2]。Bodhisattwa C.等使用离散元模型对烘干滚筒内石料的混流及烘干过程进行了仿真试验,通过对比了几种不同类型的烘干滚筒后得出,扬料叶片在石料烘干的过程起到了十分重要的作用[3]。Lisboa M.H.等人通过数学模型求解得出二段式叶片在不同角度的叶片持料量以及落料距离,通过试验得出烘干滚筒内烘干效率同扬料叶片数量的关系,同时得出了随含水率的变化,石料与石料之间动摩擦系数的变化范围为 0.974~1.015 [4]。黄志刚通过建立颗粒在烘干转筒内运动状况的数学模型,较为精确得模拟出颗粒在烘干转筒内的停滞时间,构建了颗粒在烘干过程中的传热模型,并能够准确预测出颗粒的温度以及含水率的变化[5]。王雪等学者通过对烘干滚筒的倾角、转速以及扬料叶片的数量等方面对料帘分布的影响进行研究,对于如何形成均匀料帘的影响因素做了详

细的阐述,同时建立了单叶片物料抛洒轨迹和洒落区域的数学模型并首次提出料帘密度的概念[6]。张晨光等人对筒内石料的运动进行建模,采用几何法分象限建立了叶片的持料量模型,并利用离散元软件 EDEM 进行仿真,结果表明适宜的料帘密度范围为 $30\sim 35\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [7]。刘晓东等人建立沥青拌和站烘干滚筒烘干区叶片离散元仿真模型,基于离散元仿真与模拟试验相结合的方法,利用 DOE 响应曲面法对烘干区叶片参数匹配进行研究,获得满足不同产量下的最优参数组合及该组合下叶片最佳周向排布个数[8]。

上述研究的重点主要集中在对于烘干滚筒内扬料叶片持料量进行建模以及影响物料颗粒活动轨迹的研究[7],对于料帘分布的分析和研究较少。然而,在砂石的加热与烘干过程中,提高烘干效率最关键的因素在于砂石与热空气是否能进行最大限度的热交换;烘干滚筒内料帘的分布形式,是实现料帘均匀性并使热空气与砂石接触进行热交换的决定因素[9] [10]。因此,本文在已有研究的基础上,运用离散元软件 EDEM,以料帘均匀性与料帘密度为试验目的,设计四因素四水平正交仿真试验,试验的因素为腹板高度、翼板高度与腹板高度的比值、扬料叶片折弯角度、扬料叶片圆周数目。研究以上四个因素对料帘均匀性与料帘密度的影响,从仿真结果确定最优的扬料叶片结构尺寸参数,为实际工程应用提供一定的理论依据[11]。

2. 料帘形成机理与扬料叶片的设计

叶片沿圆周依次布置于烘干滚筒轴线上,当烘干滚筒工作时,砂石的填充率一般维持在 $15\%\sim 20\%$ 之间,扬料叶片边旋转边从烘干滚筒底部的填充区域提起砂石,当叶片尾部到达筒体中心水平线时,整个扬料叶片被砂石填满,随着烘干滚筒的不断转动,叶片持续提升并到达一定位置后,堆积在叶片上的砂石就开始从叶片尾部处洒落下来,形成料帘,接着重新落入烘干滚筒底部位置,如图 1 所示。并且烘干滚筒在安装时通常会保持 $3^\circ\sim 5^\circ$ 的倾斜角度,所以砂石的每一次被提升和洒落都会向出料口前进一步[12] [13]。本文结合了砂石的运动学理论,着重研究烘干滚筒内扬料叶片参数对料帘均匀性与料帘密度的影响。

本文设计的一段式扬料叶片应用于内径 3000 mm 、外径 3050 mm 、转速为 $8.3\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的烘干滚筒,叶片有腹板和翼板两个组成部分,腹板和翼板间有一个特定的角度,三维模型如图 2 所示。在满足设计要求并保证扬料板叶片结构强度的前提下,初步设定叶片长度 L 为 800 mm ,厚度 t 为 8 mm ,折弯处圆角半径 r 为 5 mm ,腹板高度 h 的取值范围为 $170\sim 200\text{ mm}$,翼板高度与腹板高度的比值范围在 $0.5\sim 1.25$,折弯角的取值范围为 $90^\circ\sim 135^\circ$,扬料叶片圆周数量为 $15\sim 21$ 片。

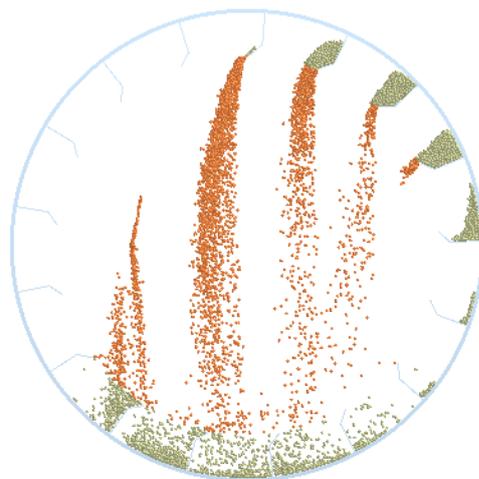


Figure 1. Material curtain formation mechanism
图 1. 料帘形成机理

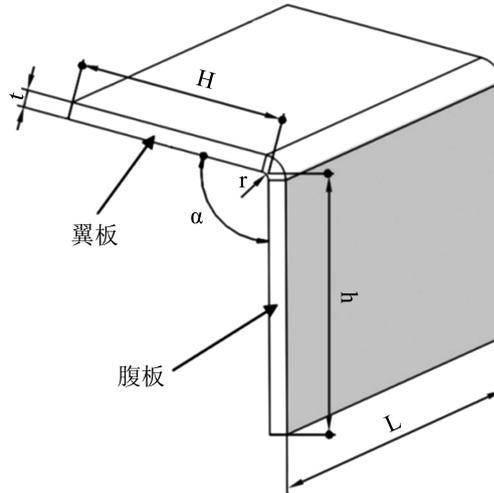


Figure 2. One-stage bending hoist blade
图 2. 一段式折弯扬料叶片

3. 料帘密度与料帘均匀性分析

3.1. 砂石颗粒运动分析

烘干滚筒中的砂石颗粒被扬料叶片提高到一定程度后，在自重的作用下，以一定的初速度被抛洒下来，颗粒运动轨迹是一条抛物线。砂石颗粒的初速度 V_0 是由牵连速度 V_ω 和相对速度 V_r 组合而成的，即 $V_0 = V_\omega + V_r$ [14]。其中，烘干滚筒内壁的旋转线速度即为牵连速度，约为 1.3 m/s；相对速度是砂石颗粒在扬料叶片自由表面上的滑移速度，其数值远比牵连速度小得多。因此，为了方便分析与计算，通常情况会将牵连速度作为砂石颗粒的抛撒初速度[15]。

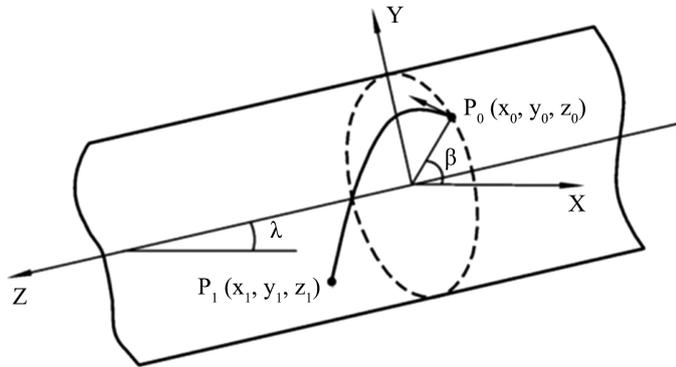


Figure 3. The spatial motion state of sand and stone particles in the drying drum
图 3. 砂石颗粒在烘干滚筒中的空间运动状态

建立如上 图 3 所示的空间坐标系，假定某一时刻砂石颗粒从 P_0 处(位置角为 β)被抛出，初速度为 V_0 ，则砂石颗粒在烘干滚筒内的运动方程可由式(1)表示：

$$\begin{cases} Md^2x/dt^2 = 0; \\ Md^2y/dt^2 = -Mg \cos \lambda; \\ Md^2z/dt^2 = Mg \sin \lambda - F_c; \end{cases} \quad (1)$$

上式中: x , y , z 分别为砂石颗粒在 X 轴、Y 轴和 Z 轴上的位移投影; t 为砂石颗粒在滚筒中的洒落时间; M 为砂石颗粒的质量; F_c 为烘干滚筒中热空气对砂石颗粒的阻力; λ 为烘干滚筒的倾角。

根据起始的边界条件, 当时间 $t = 0$ 时, 可得如下式(2):

$$\begin{cases} dx_0/dt = -r\omega \sin \beta; \\ dy_0/dt = r\omega \cos \beta; \\ dz_0/dt = 0; x_0 = r \cos \beta; \\ y_0 = r \sin \beta; z_0 = \beta. \end{cases} \quad (2)$$

联立式(2), 求解方程(1)可得:

$$\begin{cases} x = r \cos \beta - r\omega t \sin \beta; \\ y = r \sin \beta + r\omega t \cos \beta - (gt^2 \cos \lambda)/2; \\ z = (g \sin \lambda - F_c/M)t^2/2 \end{cases} \quad (3)$$

如式(3)所示, 抛物线的曲线与烘干滚筒内壁的交点 P_1 即为砂石颗粒在滚筒内作抛物线运动的终止点。如图(3)所示, 烘干滚筒横截面方程为:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (4)$$

联立(3)、(4)两式可得砂石颗粒在滚筒内的洒落时间与位置角 β 的关系为:

$$t = f(\beta) = 2r\omega \cos \beta / (g \cos \lambda) + \frac{2\sqrt{(r\omega \cos \beta)^2 - (r\omega)^2 + rg \sin \beta \cos \lambda}}{g \cos \lambda} \quad (5)$$

3.2. 料帘密度评价方法

烘干滚筒的料帘密度影响着砂石颗粒与热空气的热交换效率, 料帘密度指的是滚筒的料帘区单位空间中参与热交换的砂石量的多少[16], 其定义式为:

$$\rho = \cos \lambda M_i / SL \quad (6)$$

式中: ρ 为料帘密度; M_i 为 i 时刻料帘区砂颗粒的质量; S 为烘干滚筒的横截面面积; L 为烘干滚筒一段的长度; n 为同一时间参与砂石抛洒的扬料叶片的数量。料帘密度越大, 则单位体积内参与热交换的砂石颗粒越多, 热交换效率越高, 烘干效果越好, 反之则越差。

3.3. 料帘均匀性评价方法

烘干滚筒的料帘均匀性同样影响着砂石颗粒与热空气的热交换效率, 料帘的均匀性可用变异系数作为评价指标, 变异系数能反应一组数据分布离散的程度, 其定义为标准差与平均数的比值, 可通过方差分析计算求解。方差指的是每个数同平均数的差的平方和的平均数, 即

$$s^2 = \frac{1}{n} [(x_1 - x)^2 + (x_2 - x)^2 + \dots + (x_n - x)^2] \quad (7)$$

式中: x 表示数据样本的平均数, n 表示样本的个数, x_i 表示不同的个体, s^2 即为方差。于是, 变异系数 c_v 可用如下式(8)表示:

$$c_v = \frac{\sqrt{s^2}}{x} \quad (8)$$

变异系数越小, 则料帘越均匀, 砂石颗粒与热空气的热交换效率越高, 烘干效果越高, 反之则越差。

4. 离散元软件 EDEM 仿真试验与结果分析

4.1. 正交仿真试验

运用三维建模软件 SOLIDWORKS 进行建模, 为了方便后期仿真计算, 现截取烘干滚筒的一段进行建模, 扬料叶片固定于内径为 3000 mm, 外径为 3050 mm 的滚筒内, 如图 4 所示。滚筒的转速为 $8.3 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 滚筒旋转一周。扬料叶片将烘干滚筒底部的砂石颗粒不断提升并抛撒。仿真结束以后, 利用离散元软件 EDEM 后处理模块中 Mass Flow Sensor 功能对滚筒内处于抛洒状态的砂石颗粒进行质量统计, 再利用式 (6) 计算出料帘密度, 取每组的最大值并记录; 再利用 EDEM 后处理模块中 Grid Bin Group 功能, 设置 10 个取样格并统计滚筒旋转一周, 砂石颗粒从底部被扬料叶片逐步提升起来至完成抛洒落回底部这段时间内, 10 个取样格的质量并利用式 (8) 计算变异系数, 如图 5 所示。

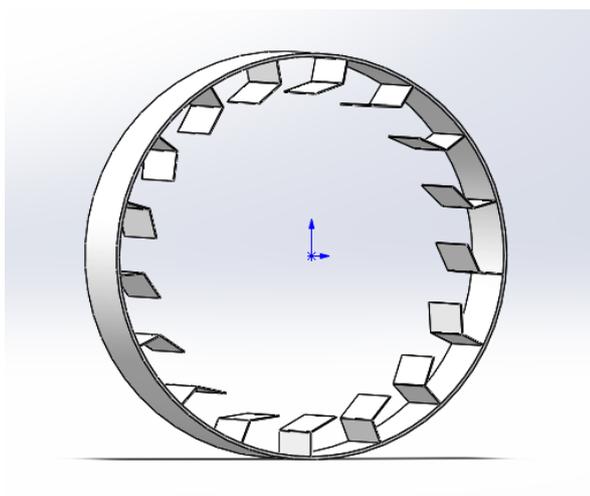


Figure 4. SOLIDWORKS modeling
图 4. SOLIDWORKS 建模

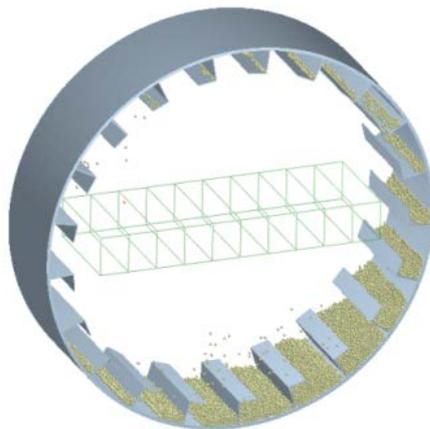


Figure 5. Discrete element model
图 5. 离散元模型

本文中建立的砂石颗粒与扬料板叶片的离散元模型采用了 Hertz-Mindlin 及相关理论[17] [18] [19] [20]。砂石颗粒的材质为石灰岩, 叶片、滚筒的材质为钢, 如下表 1 为具体仿真参数[21]。

Table 1. Simulation test parameters
表 1. 仿真试验参数

| 属性 | 参数 | 数值 |
|---------------|---|----------------------|
| 砂石颗粒 材料属性 | 密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 2550 |
| | 剪切模量 G/Pa | 2.10×10^8 |
| | 泊松比 μ | 0.25 |
| | 颗粒半径 r/mm | 10 |
| 叶片、滚筒 材料属性 | 密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 7850 |
| | 剪切模量 G/Pa | 8.0×10^{10} |
| | 泊松比 μ | 0.3 |
| 相互作用 | 颗粒与颗粒碰撞恢复系数 | 0.4 |
| | 颗粒与颗粒静摩擦系数 | 0.3 |
| | 颗粒与颗粒动摩擦系数 | 0.1 |
| | 颗粒与内壁碰撞恢复系数 | 0.45 |
| | 颗粒与内壁静摩擦系数 | 0.35 |
| | 颗粒与内壁动摩擦系数 | 0.1 |

在研究多因素多水平问题时，正交试验往往具有高效性的特点，结合这一特点，选择常用的 $L_{16}(4^4)$ 型正交表进行仿真实验[22]。仿真试验的因素和水平如表 2 所示。

Table 2. Factors and level of simulation test
表 2. 仿真试验因素与水平

| 水平 | 腹板高度 h/mm | 翼板高度与腹板 高度的比值 a | 折弯角度 $\alpha/(\text{°})$ | 扬料叶片圆周 数量(片) |
|----|--------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|
| 1 | 170 | 0.5 | 90 | 15 |
| 2 | 180 | 0.75 | 105 | 17 |
| 3 | 190 | 1.00 | 120 | 19 |
| 4 | 200 | 1.25 | 135 | 21 |

以扬料均匀性与料帘密度为试验目的，按照要求，依次完成 16 组仿真实验，计算每组试验的变异系数与料帘密度，以料帘密度与变异系数作为衡量叶片扬料量与料帘均匀性的指标，16 组仿真实验的结果如表 3 所示。

Table 3. Simulation results of orthogonal test
表 3. 正交试验仿真结果

| 试验号 | 因素 | | | | 评价指标 1 | 评价指标 2 | 综合评分 |
|-----|--------------|------------------------|--------------------------|-----------------|---------------------------------------|--------|----------|
| | 腹板高度 h/mm | 翼板高度与 腹板高度的 比值 a | 折弯角度 $\alpha/(\circ)$ | 扬料叶片圆 周数量(片) | 料幕密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 变异系数 | |
| 1 | 170 (1) | 0.5 (1) | 90 (1) | 15 (1) | 12.0861 | 0.3484 | 29.1774 |
| 2 | 170 (1) | 0.75 (2) | 105 (2) | 17 (2) | 12.9944 | 0.8275 | 22.5537 |
| 3 | 170 (1) | 1.00 (3) | 120 (3) | 19 (3) | 16.4820 | 1.4591 | 20.6348 |
| 4 | 170 (1) | 1.25 (4) | 135 (4) | 21 (4) | 15.6399 | 1.6183 | 15.0296 |
| 5 | 180 (2) | 0.5 (1) | 105 (2) | 19 (3) | 14.6340 | 0.6242 | 31.3898 |
| 6 | 180 (2) | 0.75 (2) | 90 (1) | 21 (4) | 11.0231 | 0.9644 | 14.0228 |
| 7 | 180 (2) | 1.00 (3) | 135 (4) | 15 (1) | 14.9370 | 1.3203 | 18.7392 |
| 8 | 180 (2) | 1.25 (4) | 120 (3) | 17 (2) | 16.8044 | 1.8726 | 13.5419 |
| 9 | 190 (3) | 0.5 (1) | 120 (3) | 21 (4) | 15.6613 | 0.8791 | 29.4836 |
| 10 | 190 (3) | 0.75 (2) | 135 (4) | 19 (3) | 15.3118 | 1.3001 | 20.2479 |
| 11 | 190 (3) | 1.00 (3) | 90 (1) | 17 (2) | 9.3952 | 1.1482 | 5.6008 |
| 12 | 190 (3) | 1.25 (4) | 105 (2) | 15 (1) | 12.1589 | 1.7875 | 1.3771 |
| 13 | 200 (4) | 0.5 (1) | 135 (4) | 17 (2) | 15.2508 | 1.0071 | 25.7707 |
| 14 | 200 (4) | 0.75 (2) | 120 (3) | 15 (1) | 14.6112 | 1.2869 | 18.4205 |
| 15 | 200 (4) | 1.00 (3) | 105 (2) | 21 (4) | 16.1949 | 1.7706 | 13.7148 |
| 16 | 200 (4) | 1.25 (4) | 90 (1) | 19 (3) | 9.0007 | 2.5682 | -23.2191 |

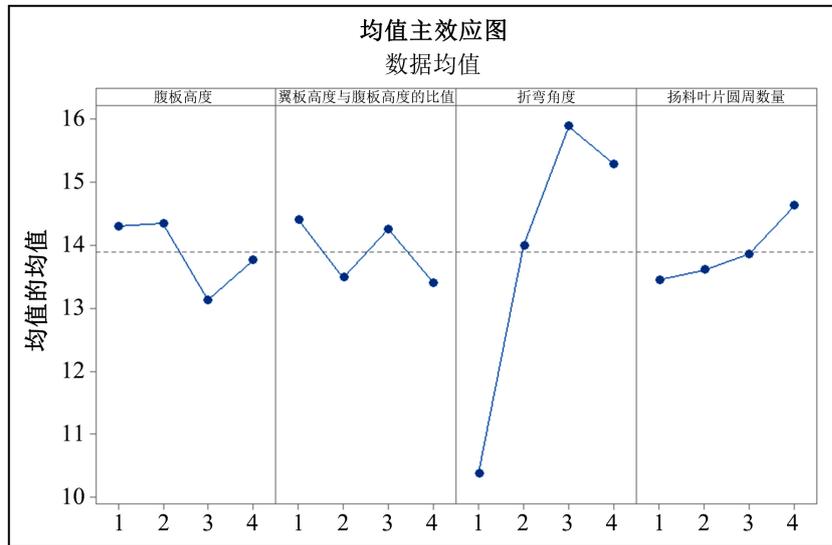
综合评分 = 料帘密度/料帘密度 max $\times 100 \times 0.5 + (-$ 变异系数/变异系数 max $\times 100 \times 0.5)$ 。

4.2. 正交仿真试验结果分析

分别对上述两个评价指标(料帘密度与变异系数)下 16 组数据进行极差分析, 分析结果如图 6、图 7 所示。

| 水平 | 腹板高度 | 翼板高度 与腹板高 度的比值 | 折弯角度 | 扬料叶片 圆周数量 |
|-------|-------|----------------------|-------|--------------|
| 1 | 14.30 | 14.41 | 10.38 | 13.45 |
| 2 | 14.35 | 13.49 | 14.00 | 13.61 |
| 3 | 13.13 | 14.25 | 15.89 | 13.86 |
| 4 | 13.76 | 13.40 | 15.28 | 14.63 |
| Delta | 1.22 | 1.01 | 5.51 | 1.18 |
| 排秩 | 2 | 4 | 1 | 3 |

(a) 均值响应图

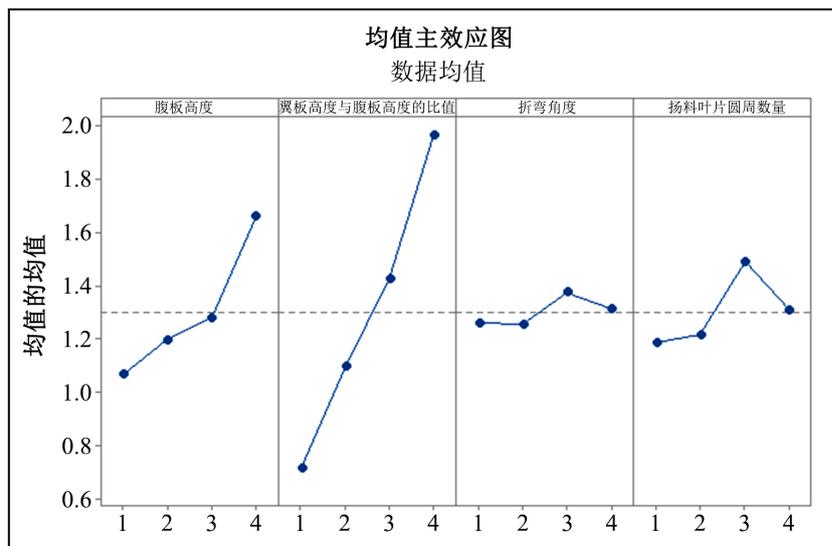


(b) 均值主效应图

Figure 6. Range analysis of material curtain density
图 6. 料帘密度极差分析

| 水平 | 腹板高度 | 翼板高度 与腹板高 度的比值 | 折弯角度 | 扬料叶片 圆周数量 |
|-------|--------|----------------------|--------|--------------|
| 1 | 1.0633 | 0.7147 | 1.2573 | 1.1858 |
| 2 | 1.1954 | 1.0947 | 1.2525 | 1.2139 |
| 3 | 1.2787 | 1.4246 | 1.3744 | 1.4879 |
| 4 | 1.6582 | 1.9616 | 1.3115 | 1.3081 |
| Delta | 0.5949 | 1.2470 | 0.1220 | 0.3021 |
| 排序 | 2 | 1 | 4 | 3 |

(a) 均值响应图



(b) 均值主效应图

Figure 7. Range analysis of coefficient of variation
图 7. 变异系数极差分析

可得如下结论：

1) 如图 6 所示，扬料叶片结构尺寸参数对料帘密度的影响由高到低分别为：折弯角度、腹板高度、扬料叶片圆周数量、翼板高度与腹板高度的比值。料帘密度越大，参与热交换的砂石颗粒越多，烘干效果越好。料帘密度随着扬料叶片圆周数量的增加而提高，叶片圆周数量从 15 片增加到 19 片时，料帘密度提高了 3.7% 左右，从 19 片增加到 21 片时，料帘密度提高了 5.1% 左右；折弯角度从 90° 增加到 120° 时，料帘密度显著提高，提高了 53.4% 左右，120° 以后折弯角度对料帘密度的影响开始降低。

2) 如图 7 所示，扬料叶片结构尺寸参数对变异系数的影响由高到低分别为：翼板高度与腹板高度的比值、腹板高度、扬料叶片圆周数量、折弯角度。变异系数越低，料帘均匀性越好，烘干效果越好。变异系数随着腹板高度的增加而提高，腹板高度从 170 mm 增加到 200 mm 时，变异系数提高了 57.1% 左右；变异系数同样随着翼板高度与腹板高度的比值的增加而提高，呈一次线性关系，比值从 0.5 增加到 1.25 时，变异系数提高了 178.6% 左右。

采用正交试验综合评分法，根据实际工程要求与专业知识，分别对料帘密度与变异系数赋予权值，料帘密度为 0.5，变异系数为 0.5。因此，可得综合评分的计算式为：

$$\text{综合评分} = \text{料帘密度} / \text{料帘密度 max} * 100 * 0.5 + (-\text{变异系数} / \text{变异系数 max} * 100 * 0.5) \quad (9)$$

16 组仿真试验的综合评分已在表 3 中列出，对其进行极差分析，分析结果如图 8，表 4 所示。

翼板高度与腹板高度的比值对料帘密度与变异系数的影响最大，折弯角度次之，腹板高度再次之，扬料叶片圆周数量对料帘密度与料帘均匀性的影响最小。扬料叶片最佳的结构尺寸参数应该为腹板高度取第 1 水平，翼板高度与腹板高度的比值取第 1 水平，折弯角度应取第 3 水平，扬料叶片圆周数量应取第 4 水平。最佳方案并未在正交仿真试验的 16 组试验中出现，但是同第 9 号试验非常接近。第 9 号试验中只有腹板高度不处于最优的水平位置。因此，对最佳方案再进行一次仿真实验。最佳方案中，料帘密度为 15.1671 kg·m⁻³，变异系数为 0.6957，综合评分为 31.5839，综合评分为所有已做仿真试验中的最大值。

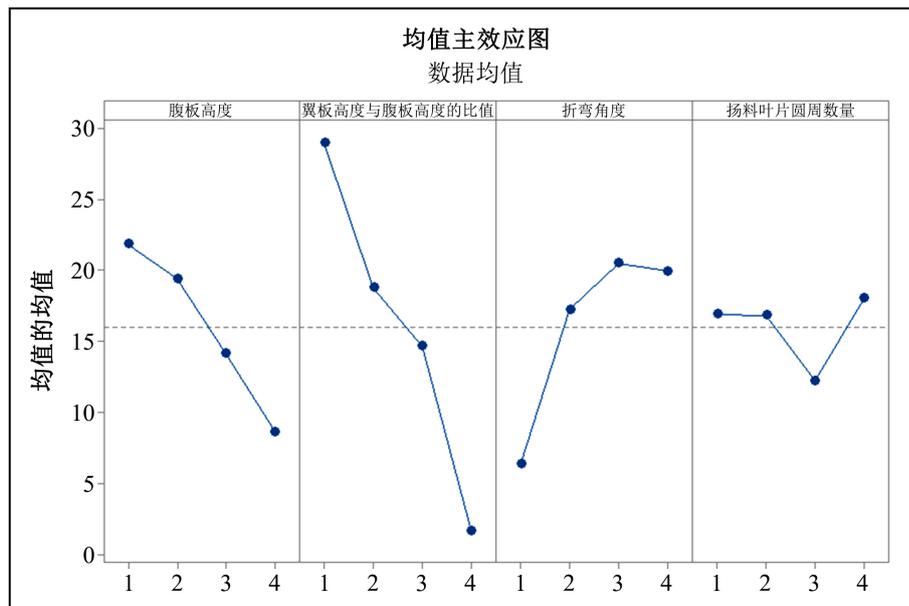


Figure 8. Comprehensive score range analysis mean main effect diagram
图 8. 综合评分极差分析均值主效应图

Table 4. Comprehensive score range analysis results
表 4. 综合评分极差分析结果

| 综合评分 | 因素 | | | |
|------|--------------|--------------------|--------------------------|-----------------|
| | 腹板高度 h/mm | 翼板高度与腹板 高度的比值 a | 折弯角度 $\alpha/(\circ)$ | 扬料叶片圆周 数量(片) |
| K1 | 21.849 | 28.955 | 6.395 | 16.929 |
| K2 | 19.423 | 18.811 | 17.259 | 16.867 |
| K3 | 14.177 | 14.672 | 20.520 | 12.263 |
| K4 | 8.672 | 1.682 | 19.947 | 18.063 |
| 极差 | 13.177 | 27.273 | 14.125 | 5.799 |
| 排序 | 3 | 1 | 2 | 4 |
| 最佳方案 | 170 (1) | 0.5 (1) | 120 (3) | 21 (4) |

5. 结语

1) 基于对料帘形成机理的分析研究, 设计了一种一段式折弯扬料叶片, 应用于直径 3000 mm, 转速为 $8.3 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的烘干滚筒。

2) 建立了砂石颗粒的运动学模型, 提出了料帘密度与料帘均匀性的评价方法。以料帘密度与料帘均匀性为试验目的, 设计了正交仿真试验。

3) 利用离散元软件 EDEM 进行仿真试验, 结果表明: 叶片数量从 15 片增加到 21 片时, 料帘密度提高了 7.4% 左右; 腹板高度从 170 mm 增加到 200 mm 时, 变异系数提高了 57.1% 左右; 翼板高度与腹板高度的比值从 0.5 增加到 1.25 时, 变异系数提高了 178.6% 左右。

4) 扬料叶片的结构尺寸参数对料帘密度与料帘均匀性的影响从高到低分别为: 翼板高度与腹板高度的比值、折弯角度、腹板高度、扬料叶片圆周数目。当一段式折弯扬料叶片的腹板高度为 170 mm、翼板高度与腹板高度的比值为 0.5、折弯角度为 120° 、扬料叶片圆周数目为 21 片时, 综合评分为 31.5839, 为所有已做仿真试验中的最大值, 综合料帘密度与料帘均匀性要求达到最佳平衡点。

参考文献

- [1] DIRA, DIMF (2005) An Improved Integral Non-Linear Model for the Contact of Particles in Discrete Element Simulations. *Chemical Engineering Science*, **60**, 1303-1312. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.10.004>
- [2] Baker, C.G.J. (1988) The Design of Flights in Cascading Rotary Dryers. *Drying Technology*, **6**, 631-653. <https://doi.org/10.1080/07373938808916402>
- [3] Bodhisattwa, C., Fernando, J.M. and Tomassone, M.S. (2010) Experimentally Validated Computations of Heat Transfer in Granular Materials in Rotary Calciners. *Powder Technology*, **198**, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.09.024>
- [4] Lisboa, M.H., Vitorino, D.S., Delaiba, W.B., et al. (2007) A Study of Particle Motion in Rotary Dryer. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **24**, 365-374. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322007000300006>
- [5] 黄志刚. 转筒干燥器中颗粒物料流动和传热传质过程的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [6] 王雪. 沥青搅拌设备烘干筒骨料运动学分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.
- [7] 张晨光, 焦生杰, 谢立扬, 顾海荣. 沥青搅拌设备烘干筒料帘密度建模及仿真[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 55-60. <https://doi.org/10.13245/j.hust.170511>
- [8] 刘晓东, 王晨, 黄建华, 何建, 吕威龙. 基于 DOE 的烘干滚筒叶片参数优化[J]. 工程机械, 2020, 51(4): 48-54+8.

- [9] 谢立扬, 王雪, 张晨光. 沥青搅拌设备烘干筒物料颗粒运动分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10): 57-60.
- [10] 郭永亮. 搅拌设备烘干筒叶片对骨料加热特性影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [11] 杨卫东. 间歇式沥青搅拌设备骨料烘干加热系统匹配研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2008.
- [12] 梁东升, 黄文景, 杨建红. 基于离散单元法的干燥滚筒扬料叶片设计与仿真[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(8): 116-119.
- [13] Ndiaye, L.G., Caillat, S., Chinnayya, A., *et al.* (2010) Application of the Dynamic Model of Saeman to an Industrial Rotary Kiln Incinerator: Numerical and Experimental Result. *Waste Management*, **30**, 1188-1195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.023>
- [14] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 徐立章, 赵湛. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 117-121.
- [15] 王海霞, 陈炳贵. 沥青搅拌设备滚筒对流区骨料料帘的分布形式[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(4): 107-111.
- [16] Song, Y., Thibault, J. and Kudra, T. (2003) Dynamic Characteristics of Solids Transportation in Rotary Dryers. *Drying Technology*, **5**, 755-773. <https://doi.org/10.1081/DRT-120021685>
- [17] Kremmer, M. and Favier, J.F. (2001) A Method for Representing Boundaries in Discrete Element Modeling. *International Journal for Numerical Method in Engineering*, **51**, 1407-1421. <https://doi.org/10.1002/nme.184>
- [18] Nakamura, H. (2007) Numerical Analysis of Particle Mixing in a Rotating Fluidized Bed. *Chemical Engineering Science*, **62**, 3043-3056. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.02.043>
- [19] Hobbs (2009) Simulation of an Aggregate Dryer Using Coupled CFD and DEM Methods]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **23**, 199-207. <https://doi.org/10.1080/10618560802680971>
- [20] 黄文景, 杨建红, 王小宁. 滚筒干燥器能耗分析及参数优化设计[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(1): 81-86.
- [21] 沈杭, 杨建红, 张认成, 颜伟泽. 干粉站用干燥滚筒离散元仿真分析与试验研究[J]. 机械设计, 2016, 33(8): 67-71. <https://doi.org/10.13841/j.cnki.jxsj.2016.08.013>
- [22] 凌杰. 热再生沥青混凝土加热滚筒粘料处理方法[J]. 工程机械, 2007(12): 39-42+133.