

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201809034



变产量下扬料叶片对干燥滚筒料帘分布的影响特性

吴铭禧, 房怀英, 杨建红, 陆杨

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 搭建单叶片滚筒料帘实验平台,通过可移动的接料装置评价每个位置的料帘分布,并采用料帘变异系数构建料帘分布评价模型.研制 6 种结构的叶片,对每种叶片的料帘分布特性和变产量特性进行实验研究,得到适合变产量特性的叶片结构形式.实验结果表明:V 字缺口叶片是 6 种叶片中料帘分布最佳、最适应变产量要求的叶片.

关键词: 变产量;干燥滚筒;料帘分布;扬料叶片

中图分类号: U 415.52

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)01-0009-05

Influence of Lifting Blade on Distribution of Rotary Dryer Material Curtain Under Variable Output

WU Mingxi, FANG Huaiying, YANG Jianhong, LU Yang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A single blade roller material curtain experimental platform was set up, the material curtain distribution of which at each position was evaluated by using a movable material receiving device. The material curtain variation coefficient was used to construct the material curtain distribution evaluation model. Six kinds of blades with different structures were developed. The distribution characteristics and variable production characteristics of the material curtain of each blade were studied experimentally, and the form of the blade structure suitable for the variable production characteristic was obtained. The experimental results show that the blade with V-notch is the optimal structure for material curtain distribution, and is most suitable for variable production requirements.

Keywords: variable production; rotary dryer; material curtain distribution; lifting blades

干燥滚筒被大量运用于农业、工程、化学、医学等多个领域,筒体作为直接与所烘干物料接触的部件,它的结构对滚筒烘干机的烘干效率有着至关重要的作用,因此,对滚筒结构的研究有重大意义^[1].当干燥滚筒产量小于额定产量时,扬料区料帘均匀性变差,导致排出的烟气温度变高,影响除尘效果和除尘系统的使用寿命.扬料叶片在旋转过程中从滚筒底部提起物料,升高至一定程度后,物料开始从叶片尾端抛撒下来^[2].可见,料帘均匀性与扬料叶片的设计有关,需要获得适应变产量要求的扬料叶片结构.Piton 等^[3]开发热与颗粒耦合的模型,得出定产量下,两道折弯叶片的料帘分布比 L 型叶片更加均匀.Scherer 等^[4]耦合离散元素法(DEM)和计算流体力学(CFD)模拟得出,定产量下,L 型挡板干燥器的

收稿日期: 2018-09-18

通信作者: 房怀英(1978-),女,副教授,博士,主要从事高端机制砂产品的研究. E-mail: happen@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家国际合作项目(2015DFA710402);福建省产学研合作重大项目(2016H6013);福建省泉州市科技计划项目(2018C100R)

料帘分布比直挡板的更均匀. Xie 等^[5]经验证得出, 叶片数量较多时, 料帘分布表现更好; 叶片越高, 料帘分布更连续. 文献[6-8]研究表明, 定产量下, 当滚筒转速为 $7.0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 结构角为 90° 时, 采用 90° 的安装角能使料帘分布更均匀. 文献[9-10]建立持料量和抛撒角的数学模型, 得出两道折弯叶片抛撒的物料均匀性最好. 沈杭等^[11]在定产量下研究 L 型直齿叶片, 利用离散元仿真软件 (EDEM) 得出, 当转速为 $6.6 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 折弯角为 90° , 齿距为 50 mm , 齿边长为 100 mm 时, 采用三角形 (或梯形) 齿得到的料帘分布较均匀. 刘立强^[12]得出在定产量下, 直角带孔型叶片能增加平均抛撒次数, 料帘密度随叶片数量的增加而增加. 张晨光等^[2]建立料帘密度的数学模型, 使用 EDEM 进行验证, 得出定产量下, 三段式叶片更有利于形成密集的料帘. 黄文景等^[13]在定产量下, 对干燥滚筒进行离散元仿真建模, 研究 L 型直齿叶片结构, 得出当齿间距为 $30.0 \sim 42.5 \text{ mm}$, 叶片宽度为 40 mm , 折弯角在 $120^\circ \sim 135^\circ$ 时, 料帘分布均匀性较好. Van Puyvelde^[14]提出一种用于预测叶片持料量的模型, 得出在定产量条件下, 三道折弯叶片的料帘分布范围更大. 文献[15-16]通过实验和图像分析获取数据, 发现将产量控制在最优产量能使料帘分布更均匀. 以上研究中, 研究者一般在定产量下, 通过建立数学模型或仿真对直板型叶片、一道折弯叶片和两道折弯叶片进行研究. 本文在变产量下, 通过可移动的接料装置评价每个位置的料帘分布, 采用料帘变异系数构建料帘分布评价模型, 对 6 种结构叶片的料帘分布特性和变产量特性进行研究.

1 实验部分

1.1 实验装置与材料

以原生滚筒为研究对象, 只涉及滚筒扬料区的一段. 考虑到实验数据的准确提取, 采用单叶片滚筒实验台. 实验装置及示意图, 如图 1, 2 所示. 实验装置分为 3 个部分: 筒体、单个扬料叶片和取料装置. 筒体的轴向长度为 $1\,000 \text{ mm}$, 直径为 $2\,500 \text{ mm}$, 筒体壁厚为 10 mm . 将不同结构的扬料叶片依次放入滚筒实验台中进行实验, 取料装置由 10 个收集盒子和可移动导轨组成, 10 个收集盒子从右至左分别进行编号, 依次为 1~10, 每个收集盒子的长为 $1\,000 \text{ mm}$, 宽为 165 mm , 高为 250 mm , 壁厚为 2.5 mm .



图 1 单个扬料叶片滚筒实验台

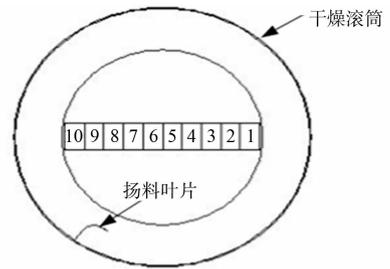


图 2 单个扬料叶片滚筒结构示意图

Fig. 1 Single blade roller experimental platform

Fig. 2 Single blade roller structure diagram

采用 6 种不同结构的扬料叶片分别进行实验, 叶片长度均为 $1\,000 \text{ mm}$, 材料为 Q235A, 安装角为 90° , 实验物料为花岗岩, 粒度为 $0 \sim 20 \text{ mm}$. 6 种扬料叶片结构, 如表 1 所示.

表 1 6 种扬料叶片结构

Tab. 1 Structures of six feed blades

叶片名称	叶片形状	折弯次数	折弯角度/ $(^\circ)$ (各段宽度/mm)	开口形状及 开口尺寸
一道折弯		一道	110 (95, 176)	—
两道折弯		两道	150, 120 (49, 93, 182)	—
三道折弯		三道	150, 130, 150 (36.3, 38.3, 148.3, 126.3)	—
V 字缺口		三道	150, 130, 150 (36.3, 38.3, 148.3, 126.3)	V 缺字口, 缺口宽度 400 mm , 缺口角度 132° ; 非 V 字缺口, 缺口深度为 70.2 mm

续表
Continue table

叶片名称	叶片形状	折弯次数	折弯角度/(°) (各段宽度/mm)	开口形状及 开口尺寸
四道折弯		四道	166,151,151,166 (77,53,54,54,130)	—
斜缺口		四道	166,151,151,166 (77,53,54,54,130)	斜口, 缺口距叶片左侧 上部长 200 mm, 右侧距底部 240 mm

1.2 实验方法

实验过程分为 4 个步骤:1) 把一定质量的物料投入滚筒实验台;2) 让滚筒以一定的转速逆时针转动一周,叶片随着滚筒一起转动,物料被叶片提升,物料先做自由滑动,再做抛撒运动,从而在取料装置上方形成料帘,物料依次落入取料装置的收集盒中;3) 对 10 个盒子分别进行称质量,通过取料装置各收集盒的质量可以反映出料帘分布情况;4) 更换不同叶片替代之前的扬料叶片,重复上述过程. 设定投料量分别为 40,80,120 kg,固定滚筒转速为 $8.3 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,具体实验流程,如图 3 所示.



图 3 单个叶片滚筒实验流程图

Fig. 3 Single blade roller experiment flow chart

1.3 数据分析方法

干燥滚筒料帘分布的好坏,不仅与料帘的稀密程度有关,还与其分布的均匀性有关,综合以上两个因素,采用变异系数评价滚筒料帘分布情况.

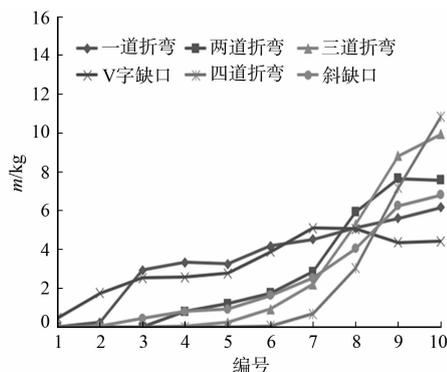
当需要比较的两组数据的测量尺度相差过大,无法直接采用标准差对实验数据进行比较时,应当先消除测量尺度带来的影响. 变异系数是衡量抛撒效果好坏的重要标准^[17],其数据大小不仅受变量值离散程度的影响,也反映变量值的平均水平. 变异系数(CV)计算式为

$$CV = \frac{k}{\bar{A}}, \quad k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}}, \quad \bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}.$$

上式中: k 为 10 个盒子中物料质量的标准差; \bar{A} 为 10 个盒子中物料质量的平均值; A_i 为每个盒子中物料的质量; n 为数据个数, $n=10$. 由上式可知,标准差越小,料帘分布就越均匀,平均值越大,料帘就越密集,所以变异系数越小越好.

2 结果与讨论

1) 当转速为 $8.3 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,投料量分别为 40,80,120 kg 时,分别对 6 种不同结构叶片进行抛料实验,10 个集料盒中收集物料的质量(m),如图 4 所示. 由图 4 可知:物料的起始抛撒位置除了和投料量相关外,还与叶片的额定持料量、叶片的缺口有关. 一般情况下,若投料量小于叶片的额定持料量,物料的起始抛撒位置一般会大于 0° 转角;若叶片有缺口,则在 0° 转角处也会有物料从叶片中抛撒出来.



(a) 投料量为 40 kg

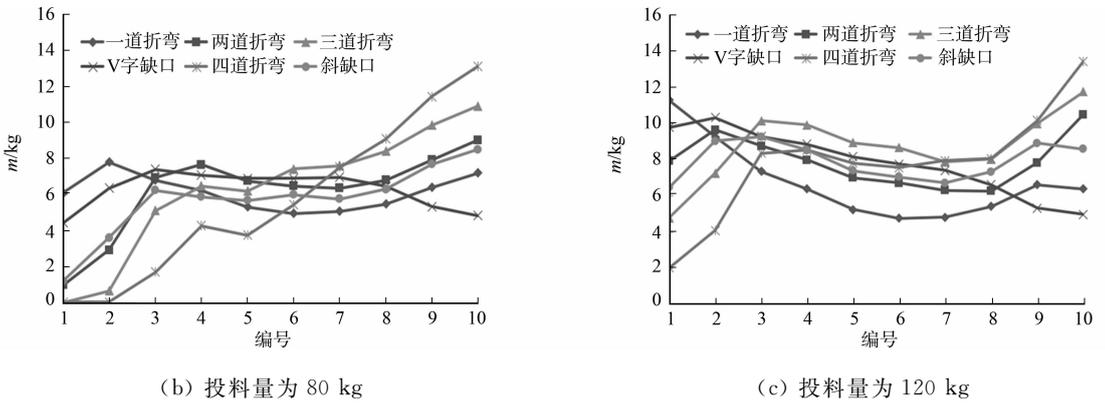


图4 不同投料量的筒内料帘分布

Fig. 4 Distribution of material curtain in cylinder when feeding amount is different

由图4(a)可知:当投料量较小时,1,2号集料盒中除了V字缺口叶片和斜缺口叶片有物料抛出,其他叶片均没有物料抛撒出来.这是因为这两种叶片中的物料能从缺口中抛撒出来,其他叶片由于投料量少于额定持料量且没有缺口,在滚筒转角小于 90° 时,仍有大量的物料在叶片中.

由图4(b)可知:一道折弯叶片和V字缺口叶片各集料盒中的物料质量相差不多,相比其他几种叶片,这两种叶片的前两个集料盒中的物料较多,表明这两种叶片的额定持料量和投料量相近,且较早抛撒物料;两道折弯叶片和斜缺口叶片的前两个集料盒中的物料较少,由于两道折弯叶片折弯数少,其额定持料量也小,在较小转角时就会有物料抛撒出来,而斜缺口叶片得益于其缺口,即使该叶片有四道折弯,在小转角时也有物料抛撒出来;三道折弯叶片和四道折弯叶片的集料盒中,左右两边的物料质量相差巨大,三道折弯叶片和四道折弯叶片由于折弯数多,额定持料量大,导致起始抛撒的角度较大,前半部分集料盒收集到的物料质量小,后半部分收集到的物料质量大.

由图4(c)可知:两道折弯叶片和斜缺口叶片各集料盒中的物料质量较为平均,表明这两种叶片的额定持料量与投料量相近;V字缺口叶片和一道折弯叶片的额定持料量小于120 kg,导致右侧集料盒收集到的物料质量大于左侧的质量,但由于V字缺口叶片有缺口,该叶片抛撒时,物料质量不会骤减;三道折弯叶片和四道折弯叶片的额定持料量较大,均大于120 kg,其中,三道折弯叶片的额定持料量更接近120 kg,在四道折弯叶片的集料盒中,物料质量非常不均匀,右侧少,左侧多.

综上所述,多道折弯叶片的额定持料量较大,左右两边集料盒中的物料质量相差较大.但在多道折弯叶片上增加缺口,会减少额定持料量,使集料盒中的物料质量变得均匀.

2) 仅依据集料盒中的物料质量,并不能判断料帘分布的均匀性,需要通过变异系数进行判断.因此,根据集料盒中收集物料的质量,计算采用6种不同结构叶片时的变异系数,如图5所示.

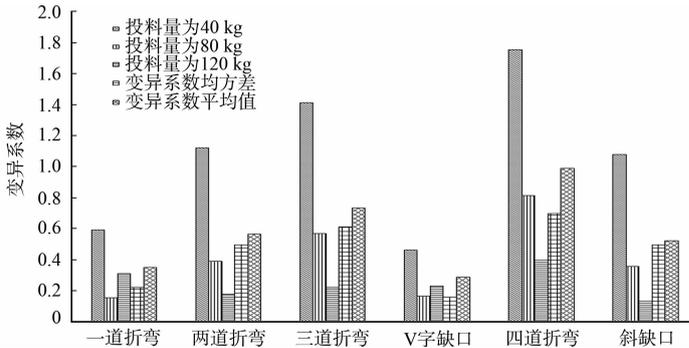


图5 不同投料量下6种叶片的变异系数

Fig. 5 Variation coefficient of six kinds of blades with different feeding amount

由图5可知:当投料量为40 kg时,V字缺口叶片的变异系数最小,即料帘分布最均匀;当投料量为80 kg时,一道折弯叶片的料帘分布最均匀;当投料量为120 kg时,斜缺口叶片的料帘分布最均匀.在3种投料量下,料帘分布最均匀的叶片都不同.因此,需要通过变异系数的均方差和平均值进行综合的评定.V字缺口叶片的变异系数均方差最小,其变异系数平均值也最小,由此可以判断,V字缺口叶片的

料帘分布最均匀, 最适应变产量的要求. 由图 5 还可知: 多道折弯叶片的变异系数很大, 随产量的变化起伏也很大. 这反映出多道折弯叶片的料帘分布均匀性较差, 变产量适应性也较差, 随着叶片折弯数增多, 料帘表现也变差. 对比相同折弯数的折弯型叶片, 缺口型叶片的料帘分布均匀性更好.

3 结束语

搭建单叶片滚筒料帘实验平台, 通过可移动的接料装置评价每个位置的料帘分布, 采用料帘变异系数构建料帘分布评价模型, 研制 6 种结构的叶片, 对每种结构叶片的料帘分布特性进行研究, 并对每种叶片的变产量特性进行实验, 得到适合变产量特性的叶片结构形式. 结果表明: 多道折弯叶片的料帘分布均匀性较差, 而在叶片上增加缺口, 可以改善料帘分布的均匀性; 通过变异系数均方差和平均值的对比, 得出 V 字缺口叶片的料帘分布最均匀, 最适应变产量的要求. 文中研究主要针对折弯型叶片和缺口型叶片的料帘分布表现, 弥补了扬料叶片在这两方面研究的空缺. 研究结果为扬料叶片的结构优化设计及变产量下烟气和成品骨料的温度控制奠定理论基础, 对设计变产量滚筒具有一定的工程应用价值.

参考文献:

- [1] 秦强, 李志刚. 滚筒烘干机筒体结构对烘干物料的影响[J]. 中国高新技术企业, 2015(21): 41-42. DOI:10.13535/j.cnki.11-4406/n.2015.21.021.
- [2] 张晨光, 焦生杰, 谢立扬, 等. 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. DOI:10.13245/j.hust.170511.
- [3] PITON M, HUCHET F, LE CORRE O, *et al.* A coupled thermal-granular model in flights rotary kiln: Industrial validation and process design[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 1011-1021. DOI:10.1016/j.appltherm-eng.2014.10.052.
- [4] SCHERER V, MÖNNIGMANN M, BERNER M O, *et al.* Coupled DEM-CFD simulation of drying wood chips in a rotary drum: Baffle design and model reduction[J]. Fuel, 2016, 184: 896-904. DOI:10.1016/j.fuel.2016.05.054.
- [5] XIE Qiang, CHEN Zuobing, MAO Ya, *et al.* Case studies of heat conduction in rotary drums with L-shaped lifters via DEM[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2018, 11: 145-152. DOI:10.1016/j.csite.2018.02.001.
- [6] 刘磊. 沥青搅拌设备烘干筒物料升温影响因素分析[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [7] 王雪. 沥青搅拌设备烘干筒骨料运动学分析[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [8] 韩宝庆. 沥青料烘干滚筒结构设计及物料升温因素仿真分析[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [9] 郭永亮. 搅拌设备烘干筒叶片对骨料加热特性影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [10] 石拓. 沥青搅拌设备烘干筒结构分析与优化[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [11] 沈杭, 杨建红, 张认成, 等. 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. DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2016.08.013.
- [12] 刘立强. 基于 CFD-DEM 耦合方法烘干筒传热过程仿真[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [13] 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. DOI:10.3969/j.issn.1000-033X.2017.01.016.
- [14] VAN PUYVELDE D R. Modelling the hold up of lifters in rotary dryers[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87(2): 226-232. DOI:10.1016/j.cherd.2008.08.018.
- [15] KARALI M A, SUNKARA K R, HERZ F, *et al.* Experimental analysis of a flighted rotary drum to assess the optimum loading[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 138: 772-779. DOI:10.1016/j.ces.2015.09.004.
- [16] KARALI M A, HERZ F, SPECHT E, *et al.* Comparison of image analysis methods to determine the optimum loading of flighted rotary drums[J]. Powder Technology, 2016, 291: 147-153. DOI:10.1016/j.powtec.2015.11.053.
- [17] 李小聪. 稻秸秆对行抛撒装置设计与试验[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 崔长彩)