

隧道式涂层电极干燥机的设计与研究

董高彬¹,丁武学¹,潘准峰²

(1. 南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094; 2. 宜兴恩创环保有限公司,江苏 宜兴 214200)

摘 要:针对钛基涂层电极的烘干过程设计了一种隧道式干燥机,通过相应计算合理规划了隧道长度、料架运行速度等参数。为使隧道内风速、温度分布均匀,保证电极得到均匀充分的干燥,通过CFD数值计算的方法对隧道内流体域进行仿真,通过设计相应的正交实验对仿真结果进行分析,对隧道截面宽度、隧道高度、进风角度、热风循环位置等结构参数进行了优化。

关键词:隧道式干燥机;CFD数值仿真;正交实验

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)05-0057-04

Study of Tunnel-type Coating Electrode Dryer and Its Design

DONG Gaobin¹, DING Wuxue¹, PAN Zhunfeng²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Yixing Entrustech Environmental Co., Ltd., Yixing 214200, China)

Abstract: A tunnel dryer is designed according to the drying process of titanium-based coating electrodes, and the parameters such as tunnel length and frame operating speed are reasonably planned by the corresponding calculation. To make the wind speed and temperature well-distributed in the tunnel and to ensure uniform, full dry of the electrodes, the paper simulates the fluid condition in the tunnel by means of CFD numerical calculation, analyzes the simulation results by designing the corresponding orthogonal experiment, and optimizes the structural parameters such as tunnel cross-section width, tunnel height, wind angle and hot air cycle position.

Keywords: tunnel dryer; CFD numerical simulation; orthogonal experiment.

0 引言

随着人们环境保护意识的提高,认识到水资源缺乏的严重性,污水资源化也显得愈发重要。国家环境治理力度不断加强,习近平十多年前就提出了“绿水青山就是金山银山”的论断,以“努力建设美丽中国,实现中华民族永续发展”为伟大目标,党和政府也大力推进生态文明建设。通过外加电场,设计电化学反应的方法对生活污水、工厂废水进行处理,避免对环境造成二次污染。这种环境友好型的水处理技术应用越来越广泛,电解去污所使用的钛基涂层电极也迎来了广阔的市场前景。

电极基体主要为阀型金属钛,表面会生成坚固的氧化膜薄层,使电极基体电阻大幅增加,为了让电解液获得大电流只能增加外部电势差,因此从经济性与可行性的角度考虑,电解污水时不能直接使用阀型金属作电极。常见解决方法为:在基体表面包覆一层贵金属盐材料的活性涂层,增加钛基体的耐电化学腐蚀性与导电性。热分解法是最常见的生产涂层电极的方法,该方法为将贵金属盐溶液涂覆于基体表面,烘干后进行高温烧结,金属盐通过热分解的方式生成氧化物涂层。本文将针对涂层电极生产过程中的烘干操作设计相应的隧道式干燥设备,保证电极基体能够均匀、高效地完成烘干。

1 隧道长度与湿物料运行速度

1.1 电极在隧道内姿态的确定

板类零件干燥时,常见摆放方式有平放、平行于运动方向竖直摆放、垂直于运动方向竖直摆放。相较于竖直摆放,电极平放时涂层与料架之间接触面积较大,烘干后电极与料架的接触部位必然会留有明显水渍,竖直摆放时电极与料架主要接触部位为侧边,接触面积较小,对涂层几乎无影响。竖直迎风摆放时,板由于钛基之间相互阻隔,每架电极只有边缘处一块电极受风,物料干燥较快,且两边电极对风场阻力大,中部数块电极风速低,空气湿度高,物料干燥缓慢,因而造成总体物料干燥不均匀,影响产品品质。本课题中采用顺风竖直摆放的方式对完成涂覆后的钛基进行烘干。

1.2 隧道长度的计算

待烘干电极为 $l_1 \times l_2 = 230 \text{ mm} \times 440 \text{ mm}$ 形状规则的矩形薄板类零件。使用料架搭载电极,拟每架搭载5片电极,每片间距 $X = 100 \text{ mm}$,插槽 $h_1 = 5 \text{ mm}$,料架尺寸 $L_1 \times L_2 \times L_3 = 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$;电极单侧所携带溶液质量近似为 $m_1 = 5.9 \text{ g}$ 。

求解隧道长度可从干燥器的干燥能力入手,根据干燥器干燥面积求得。隧道式干燥器干燥面积可由式(1)计算获得

$$w = G_c(y_2 - y_1) = k_x F_1 (\Delta y)_m \quad (1)$$

式中: w 为干燥能力, kg/h ; G_c 为干燥器截面空气流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; y_1 为入口空气含湿量, %; y_2 为出口空气含湿量, %; k_x 为汽化系数, $\text{kg}(\text{H}_2\text{O})/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \Delta y)$; F_1 为每行面积, m^2 ; $(\Delta y)_m$ 为对数平均含湿量, %。

料架上每两片电极间的间隙面积近似为 $S_{\text{间隙}} = X \times l_1 = 100 \times 230 = 23\,000 \text{ mm}^2$ 。为计算简便,每道间隙之间只取单侧电极表面进行计算,则每个间隙的截面面积也只取一半,即

$$S_1 = 50 \times 230 = 11\,500 \text{ mm}^2 = 1.15 \times 10^{-2} \text{ m}^2。$$

根据已有生产经验,风速暂取 $v_1 = 2 \text{ m/s}$,则每小时通过每道间隙的风量为:

$$Q_1 = v_1 t S_1 = 2 \times 60 \times 60 \times 1.15 \times 10^{-2} = 82.8 \text{ m}^3。$$

每道间隙每小时流过的空气质量可由式(2)求得:

$$M_1 = \rho Q_1 \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ,可由式(3)求得

$$\rho = 1.293 \times \left(\frac{273.15}{T + 273.15} \right) \quad (3)$$

式中: T 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据生产经验,空气温度取 150°C ,则空气 150°C 条件下密度为 $\rho = 0.835 \text{ kg}/\text{m}^3$;将其代入式(2)中得每道间隙单位时间流过的空气值质量为 $M_1 = 0.835 \times 82.8 = 69.14 \text{ kg}$ 。

干燥器干燥能力由单位时间内可干燥出的水分来表征,可由式(4)求得:

$$W = (y_2 - y_1) M_1 \quad (4)$$

空气含湿量取经验值,入口取 $y_1 = 0.015$,出口取 $y_2 = 0.03$ 。则理想情况下每小时可干燥出的水分为 $W = (0.03 - 0.015) \times 39.14 = 1.037 \text{ kg/h}^{[1]}$ 。

对数平均湿含量 $(\Delta y)_m$ 可由式(5)解出:

$$(\Delta y)_m = \frac{\Delta y_2 - \Delta y_1}{\ln \frac{\Delta y_2}{\Delta y_1}} = \frac{(y - y_2) - (y - y_1)}{\ln \frac{(y - y_2)}{(y - y_1)}} \quad (5)$$

式中 y 为物料表面空气湿含量, %。

干燥过程中,为保证干燥效果,使出口空气的含湿量不超过 $y = 0.05$,则:

$$\Delta y_1 = y - y_1 = 0.035$$

$$\Delta y_2 = y - y_2 = 0.020$$

$$(\Delta y)_m = \frac{\Delta y_2 - \Delta y_1}{\ln \frac{\Delta y_2}{\Delta y_1}} = 0.0268$$

由式(1)变换可得:

$$F = \frac{W}{K_x (\Delta y)_m} \quad (6)$$

汽化系数 K_x 取 $40 \frac{\text{kg}(\text{H}_2\text{O})}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$,将式(4)、式(5)代入式(6)中得干燥面积 $F = 0.967 \text{ m}^2^{[1-2]}$ 。

电极宽 $l_1 = 0.23 \text{ m}$,假设电极在隧道中紧密排列,那么沿隧道方向上每米长度、每道间隙之间待干燥的电极面积

为:

$$S_2 = 230 \times 10^{-3} \times 1 = 0.23 \text{ m}^2 \quad (7)$$

则隧道长度:

$$L = \frac{F}{S_1} = 4.2 \text{ m} \quad (8)$$

根据实际生产,进入隧道的料架之间定会有适当间隙,为后续设计与计算方便,隧道长度取整 $L = 4.5 \text{ m}^{[1-2]}$ 。

1.3 料架运行速度的计算

为使涂层与基体之间紧密结合,干燥过程中需使溶剂充分挥发。干燥彻底的电极经过热氧化后,表面不会出现明显裂纹,并且涂层与基体结合牢固,使用滤纸擦拭,其上不会出现明显黑色。根据已有生产经验,待干燥电极在 150°C 环境下保温 $3 \sim 5 \text{ min}$ 即可使溶剂彻底挥发、涂层质量达到要求。因此料架运行速度取为 $v_{\text{料}} = 4.5 \div 180 = 0.025 \text{ m/s}$ 。

2 隧道内流场仿真

本文将采用计算流体力学的方法对干燥器内部流场进行 CFD 建模并求解,从而获得隧道内流场信息。

2.1 模型的建立

按所确定的电极摆放方式与隧道长度建立隧道内流场模型如图1所示。根据产能要求,每小时干燥125片,即13个料架,每片电极的干燥时间为 $3 \sim 5 \text{ min}$,假设生产速度均匀,隧道内料架数不会超过2架。由于划分网格后电极处网格较密集,每多一架电极,网格数量和模型复杂程度将会巨幅增加。因此,隧道内料架数目取2架即可。考虑电极输送方式与电极之间的相互遮挡,选取进排风方式为下进风、下排风,使湿物料在隧道内逆流运行。为提高烘干系统的热利用率,降低设备能耗,往往将排风口排出的仍具有较高温度、湿度却不是很高的废气循环加热以排入隧道再次使用。使用工业热风机作为气源,并设置相应的渐扩装置使热空气均匀地扩散至隧道内。建立隧道内流体域模型如图1所示,表1为隧道部分关键尺寸^[3-6]。

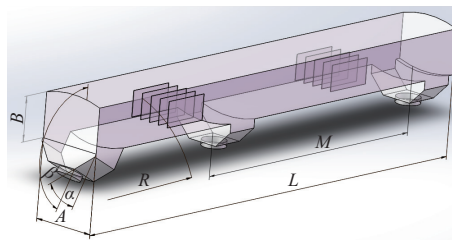


图1 隧道内流体域模型

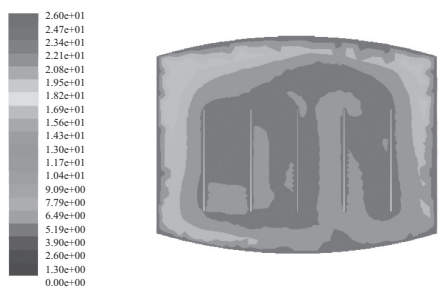
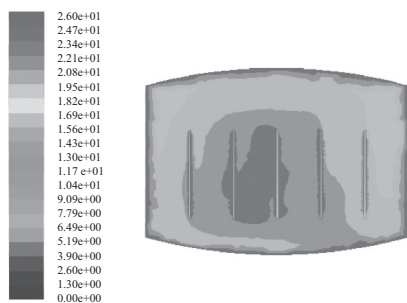
2.2 求解结果

1) 气体流速均匀性指数

选取 $x_1 = 315 \text{ mm}$, $z_1 = -1\,200 \text{ mm}$, $z_2 = -3\,300 \text{ mm}$, 3个面作为监测面,图2-图4分别为 x_1 、 z_1 、 z_2 3个有代表性的监测面的气流速度矢量图,记录各个监测面的风速均匀性指数。

表 1 隧道部分关键尺寸

名称	尺寸
隧道长 L/mm	4 500
隧道截面宽 A/mm	600
隧道截面高 B/mm	450
渐扩管倾角 $\alpha/(\circ)$	45
进口方向 $\beta/(\circ)$	60
隧道上下表面曲率 R/mm	2 000
回风口与出口之间距离 M/mm	2 500

图 2 监测面 x_1 风速云图图 3 监测面 z_1 风速云图图 4 监测面 z_2 风速云图

隧道截面上的热风均匀性对湿物料干燥过程的均匀性有重要影响。由于风量分布不均匀,风速较快的部位电极干燥速度快;气流速度较慢的部分电极干燥较慢,造成总体物料干燥不均匀,甚至加重涂层龟裂,以致出现明显裂隙。Fluent中可以通过均匀性指数 γ 来表征指定平面上某物理量的分布情况,由式(9)可计算截面上的风速均匀性指数。

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2A} \int_A \frac{|W - W_m|}{W_m} dA = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n \frac{\sqrt{(v_j - \bar{v})^2}}{\bar{v}} \quad (9)$$

式中: γ 为均匀性实数(面积权重); A 为指定截面面积,

m^2 ; n 为指定截面网格数目; v_j 为单元格气流速度, m/s ; $\bar{v}$ 为指定截面平均风速, m/s 。

γ 取值范围 $[0,1]$, γ 越大表示流动均匀性越好, 1 表示理想状态下的均匀流动。所取 3 个截面的均匀性指数如表 2 所示。

表 2 各监测面风速均匀性指数

监测面	均匀性指数 γ
$x_1 = 500 \text{ mm}$	0.667 3
$z_1 = -1 \ 200 \text{ mm}$	0.725 2
$z_2 = -3 \ 300 \text{ mm}$	0.834 9

由速度云图与表 2 可知;进口位置的各壁面结构对气流具有阻隔或导向的作用,气流扰动剧烈,接近进口处热风的流动均匀情况最差;随着热风在隧道内运动距离增加,流速场趋于稳定,均匀性指数逐渐增加;接近排风口的的位置均匀性稍微有所降低。

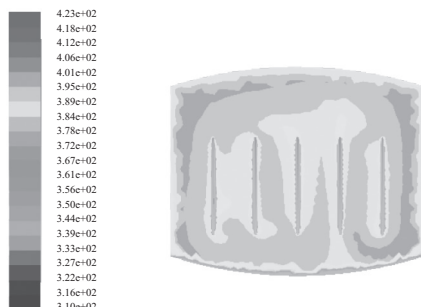
2) 隧道内温度均匀性指数

隧道内温度分布的均匀性对湿物料的均匀干燥有着重要影响,图 5 为监测面 $x_1 = 315 \text{ mm}$ 温度分布情况,观测并记录其温度均匀性指数。监测面 x_1 温度均匀性指数为 $\gamma_1 = 0.994 \ 5$ 。

图 5 监测面 x_1 温度云图

3) 隧道内平均温度

电极干燥过程中要求热气温度为 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,选取隧道内具有代表性的两截面 $z_1 = -1 \ 200 \text{ mm}$, $z_2 = -3 \ 300 \text{ mm}$,记录两截面的平均温度情况: $t_1 = 404.76 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_2 = 408.39 \text{ }^\circ\text{C}$ (图 6、图 7)。

图 6 监测面 z_1 温度云图

3 干燥设备其他关键参数

隧道结构上除最关键的隧道长度、湿物料运行速度

等参数决定着干燥设备的干燥能力外,其他结构参数诸如隧道截面尺寸、渐扩管形状等在一定程度上也影响着设备的性能。本小节将结合上文隧道流体域的仿真结果进行正交试验分析,寻求隧道截面宽度、高度、渐扩部分倾角等参数的最佳水平组合,为后续干燥设备的结构设计提供参考^[7-10]。

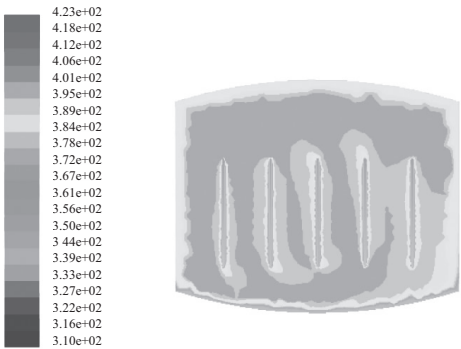


图7 监测面 z_2 温度云图

3.1 实验设计

为选择最佳的参数组合,实验选择隧道口宽度、隧道高度、渐扩部分倾角、入口风速4个参数作为因素,每个因素3个水平,设计18组正交试验方案,表3为正交实验结果的统计。

隧道宽度 A : 600 mm、650 mm、700 mm(分别记为 A_1 、 A_2 、 A_3);

隧道高度 B : 350 mm、400 mm、450 mm(分别记为 B_1 、 B_2 、 B_3);

渐扩部分倾角 C : 30°、45°、60°(分别记为 C_1 、 C_2 、 C_3);

入口方向 D : 45°、60°、75°(分别记为 D_1 、 D_2 、 D_3);

回流位置 E : 1 500 mm、2 500 mm、3 000 mm(分别记为 E_1 、 E_2 、 E_3);

回流气体比例 F : 1 : 2、1 : 1、2 : 1(分别记为 F_1 、 F_2 、 F_3);

隧道上下表面曲率 G : 1 000 mm、2 000 mm、 ∞ (分别记为 G_1 、 G_2 、 G_3)。

表3 正交实验结果统计

编 号	风速均匀性指数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			温度均匀性指数		平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	
	监测面 1	监测面 2	监测面 3	监测面 1	电极表面	监测面 2	监测面 3
1	0.599 3	0.666 3	0.692 0	0.993 0	0.987 6	397.85	403.41
2	0.667 3	0.725 2	0.834 9	0.994 9	0.990 5	404.76	408.39
3	0.738 9	0.769 3	0.908 6	0.994 8	0.988 4	407.75	407.09
4	0.752 5	0.725 3	0.933 4	0.994 0	0.990 5	405.95	408.00
5	0.701 0	0.822 7	0.900 7	0.996 1	0.988 4	408.26	407.31
6	0.605 1	0.620 6	0.700 8	0.992 6	0.988 5	394.90	401.71
7	0.733 4	0.771 1	0.926 3	0.994 2	0.983 1	409.68	406.65
8	0.608 3	0.743 8	0.716 4	0.995 0	0.989 5	404.54	400.18
9	0.691 7	0.863 2	0.760 8	0.995 5	0.989 8	409.06	405.69
10	0.657 1	0.732 3	0.830 7	0.994 8	0.988 9	404.54	407.46
11	0.757 6	0.716 9	0.898 1	0.995 1	0.986 0	410.10	408.71
12	0.599 0	0.732 8	0.680 3	0.993 0	0.988 0	398.08	401.72
13	0.710 4	0.765 8	0.729 6	0.994 5	0.988 7	406.87	401.83
14	0.651 5	0.736 3	0.832 1	0.992 0	0.988 9	397.67	407.80
15	0.668 7	0.795 2	0.895 5	0.994 7	0.985 6	411.83	406.69
16	0.698 8	0.750 5	0.829 3	0.995 1	0.983 9	410.17	406.45
17	0.653 4	0.729 9	0.736 1	0.993 1	0.988 9	403.83	399.21
18	0.630 2	0.842 0	0.635 0	0.994 1	0.985 6	408.87	395.35

3.2 实验结果分析

极差分析法(R法)计算简单,形象直观,是正交试验常用的结果分析方法。本次实验指标有3个,分别为3个监测

面的风速均匀性指数,隧道内温度均匀性指数和隧道内平均温度。先采用极差法直观分析各因素对单一指标的影响,然后对各指标的分析结果进行综合比较,确定最优方案。

(下转第67页)

表2具体描述了摩擦副系统存在的共振频率,且均低于7 kHz。摩擦副系统的法向共振频率有2 340.6 Hz和6 181.3 Hz;在系统振动响应测试频谱图中,主要振动频率发生在2 350 Hz和6 200 Hz附近。由此可以发现:摩擦副系统的某些共振频率与系统振动响应频谱中的频率吻合度非常高,说明摩擦激发了系统的共振。从表中还可以发现,不同方向采集到了相近的共振频率,说明该共振频率能同时激发多个方向的振动,这也使得多方向振动之间存在必然的耦合关系。特别是摩擦副的法向和切向共振频率,它们均在2 350 Hz附近有相同的振动频率,容易产生振动耦合。

3 结语

1) 系统响应时域波形具有随机性,存在振动幅值突变现象,系统振动频率主要集中在2 000 ~ 7 000 Hz频率段,且在该频段内有丰富的谐波成分,摩擦系统存在不稳定的碰撞现象;

2) 系统不稳定振动主要集中在4个频率附近,且提高接触载荷和相对滑动速度均能使高频的振动幅值更突出;

3) 试验模态分析揭示了系统共振频率,且在2 350 Hz和6 200 Hz频率点处与试验中系统振动响应的主要频率吻合度高,说明摩擦引起了系统不稳定的共振,并发生振动耦合。

参考文献:

- [1] 陈光雄,周仲荣. 金属往复滑动摩擦振动形成机理的实验研究和分析[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(6): 425-429.
- [2] 陈光雄,石心余. 摩擦力—相对滑动速度关系的实验研究[J]. 润滑与密封, 2002(3): 44-45.
- [3] 陈光雄,周仲荣,黎红,等. 金属往复滑动摩擦噪声与摩擦表面形貌特征关系的研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(8): 85-88.
- [4] 麦云飞,刘志亮,王书文,等. 旋转滑动摩擦高频噪声产生机理的实验研究[J]. 中国机械工程, 2017, 28(18): 2198-2203, 2208.
- [5] SUN D, LI G, WEI H, et al. Investigation on frictional vibration behavior of tribological pairs under different wear states[J]. Journal of Tribology, 2015, 137(2): 021606.
- [6] HOFFMANN N, GAUL L. Effects of damping on mode-coupling instability in friction induced oscillations[J]. ZAMM, 2003, 83(8): 524-534.
- [7] KANG J. Theoretical model for friction-induced vibration of ball joint system under mode-coupling instability[J]. Tribology Transactions, 2015, 58(5): 807-814.
- [8] 王东伟,莫继良,陈光雄,等. 滑动摩擦振动噪声的非线性显式动力学分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(10): 1395-1399.

收稿日期:2020-05-26

(上接第60页)

因素A:取值A2时风速均匀性指数与温度均匀性指数两个指标均为最优,因此取值A2为最佳水平。

因素B:取值B1时风速均匀性指数、隧道内平均温度两个指标达到最优,因此取值B1为最佳水平。

因素C:取值C1时温度均匀性指数、隧道内平均温度两个指标为最优,则最佳水平取C1即可。

因素D:取值D3时风速均匀性指数、温度均匀性指数两个指标达到最优值,则取值D3为最佳水平。

因素E:取值E3时隧道内风速均匀性指数、平均温度两个指标达到最优值,因此取值E3为最佳水平。

因素F:取值F3时隧道内风速均匀性指数、温度均匀性指数两个指标达到最优值,因此取值F3为最优水平。

因素G:取值G2时隧道内温度均匀性指数、平均温度两个指标达到最优值,取值G2为最优水平。

因此综合分析得到最佳水平组合为A2、B1、C1、D3、E3、F3、G2,即隧道关键尺寸为隧道长3 m、隧道截面宽650 mm、高350 mm、渐扩倾角30°、入口方向75°、回流位置距离出口3 000 mm、进气与回流气体比例2:1、隧道上下表面曲率2 000 mm。

4 结语

使用fluent软件对隧道内流体域进行了数值仿真,仿真结果结合正交试验分析,以隧道内风速均匀性、温度均

匀性等参数为指标,合理地选取了隧道截面宽、高穹顶曲率、进风方向等结构参数,保证涂层电极得到均匀彻底的干燥,为后续干燥设备的结构优化设计以及实际生产提供了参考。

参考文献:

- [1] 金国森. 干燥设备[M]. 北京:化学工业出版社,2002:54-55.
- [2] 刘晓娟,赵长滨,林君堂. 隧道式蔬菜热风脱水干燥机的研究[J]. 农机化研究,2008(10):113-115.
- [3] 师建芳,吴忠华,刘清. 不同进风方案下隧道烘干窑热风流场CFD模拟和优化[J]. 农业工程学报,2014,30(12):315-321.
- [4] 王炳刚,于颖. 隧道式灭菌烘箱的风压平衡[J]. 机电信息, 2013(8):33-35.
- [5] 孙逸,李桂琴,徐新虎,等. 红外隧道式烘干炉的研制[J]. 机械设计与制造,2011(12):125-127.
- [6] 杨波. 导光板红外干燥设备的设计与研究[D]. 苏州:苏州大学,2017.
- [7] 原野. 甘草干燥设备的研究与研制[D]. 兰州:兰州理工大学,2016.
- [8] 谢斌,陈震,蒋伟. 银杏叶片隧道式干燥机监控系统的设计[J]. 廊坊师范学院学报,2016(3):61-66.
- [9] 武亮,刘锐,张波. 隧道式挂面烘房干燥介质特征分析[C]. 北京:第18届CIGR国际农业工程学会世界大会,2014:363-368.
- [10] 李文好,韩庆民. 隧道式梗丝干燥机进料方式优化[J]. 设备管理与维修,2012(2):44-45.

收稿日期:2020-06-26