

连续盘式热风干燥器干燥盘结构与传热分析

Structure design and heat transfer analysis of drying tray part of hot-air disc dryer

苏全卫 周航

SU Quan-wei ZHOU Hang

(河南机电职业学院机电工程学院, 河南 郑州 451191)

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Mechanical and Electrical
Vocational College, Zhengzhou, Henan 451191, China)

摘要:为使食品得到更好的干燥以及提高干燥生产效率,在分析盘式干燥器工作原理的基础上,对干燥盘零件进行了几何结构设计、应力及变形分析,给出所选制造材料厚度的计算公式;分析干燥盘在工作中与物料颗粒的传热过程,总结出传热系数公式。参考该文相关理论生产的盘式干燥器运行良好,干燥效果显著。

关键词:干燥盘;结构设计;传热分析

Abstract: To make the food be dried better as well as improve the drying efficiency, based on the analysis of the working principle of rotary disc dryer, for its critical part drying tray, the geometry structure design, the stress and its deformation were analyzed. Moreover, the calculating formulas of the thickness of the steel material manufactured for the drying tray were also provided. After analyzing the heat transfer process between drying tray and bulk solids bed in the work, the heat transfer coefficient formula was then summed up. According to the relevant theory given in this study, rotary disc dryer was built and ran well, and its drying effect was remarkable.

Keywords: drying tray; structure design; heat transfer analysis

物料干燥是一项常见而又重要的化工单元操作,其本质是将被干燥固相物料中的湿分转移到气相中而除去。传统的干燥往往是将物料放入托盘再放入烘箱烘烤,待物料烘干后,再打开烘箱从中取出。一方面,每一批物料烘干后,需要停下来人工取出物料,不能够连续生产;另一方面,托盘中的物料呈静止状态,因不能被翻动搅拌而往往使物料干燥不均

匀。现代的干燥作业,普遍采用盘式干燥器,这是一种由多层加热圆盘、带转耙搅拌的、竖型连续干燥装置,其独特的结构和工作原理决定了它具有干燥效率高、能耗低、占地面积小、操作简单等特点,目前已被广泛地应用于食品、饲料、农副产品加工、化工、医药等行业的干燥作业^[1-3]。

盘式干燥器的结构形式,按加热方式分有接触传导型、热风对流型以及对流传导混合型;按操作压力分有常压型、真空型^[1]。针对食品、农副产品烘干作业,选用的连续盘式热风干燥器,是属常压下操作的,热风对流、干燥盘热传导的混合型干燥器。干燥盘是连续盘式干燥器的关键零件,它在干燥过程中起到加热体的作用,物料在干燥盘上连续流动并受到加热,最终被干燥。故干燥盘结构及传热设计是否得当,直接影响干燥器整体的性能。目前,干燥盘的设计在很大程度上是依赖中试和经验相结合完成的,缺少理论分析依据^[4-5]。因此,本试验从理论分析的角度,研究了干燥盘的结构,并对其进行应力、变形以及传热分析,为干燥盘的设计提供借鉴。

1 干燥盘的功能分析

干燥盘是盘式干燥器的主要功能部件,为更好地设计,必须了解其所处的工作环境及工作原理。盘式干燥器也称圆盘干燥器、板式干燥器,是一种高效节能的连续热传导型干燥设备,其结构及工作原理^[6-7]见图 1,小、大两种干燥盘自上而下依次安装在干燥器的内腔里;工作时,湿物料从干燥器顶部的料斗处连续地加入并落到最上层小干燥盘盘面的内缘处,带有耙叶的刮板装置(由主轴、耙臂、耙叶组成,耙叶具有方向性且可在盘面上浮动)作回转运动,耙叶一边连续地翻动湿物料,一边将湿物料从小干燥盘内缘以螺旋线轨迹逐渐推向小干燥盘外缘,最后从外缘跌落到下一层干燥盘(大干燥盘)面的外缘处;大干燥盘上的耙叶与小干燥盘上的方向相反,因此,物料在大干燥盘上是从盘面的外缘以螺旋

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(编号:17A460011);河南省科技攻关项目(编号:172102210239);河南省教育技术装备和实践教育研究重点课题(编号:GZS013)

作者简介:苏全卫,男,河南机电职业学院副教授,硕士。

通信作者:周航(1971—),男,河南机电职业学院讲师,博士。

E-mail: zgoing@163.com

收稿日期:2016—09—09

线轨迹逐渐被推向大干燥盘的内缘,而大干燥盘的内缘有一孔洞,因此物料从内缘孔洞又跌落至下一层小干燥盘的内缘处;物料继续在该小干燥盘面被耙叶逐渐推向外缘,然后又跌落至下一层大干燥盘的外缘处;如此周而复始,物料在大小上下交替的干燥盘中通过,最后从干燥器的最下端流出。大小干燥盘内均通入加热介质,湿物料在干燥盘上受热,湿分从物料中溢出,由设在容器顶部的排湿口排出,物料在从上到下迁移的过程中逐渐被干燥。由此可见干燥盘是连续盘式干燥器的关键部件,其设计的优劣直接影响物料的干燥效果。

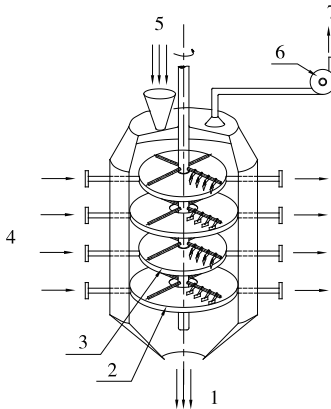


图 1 盘式连续干燥器结构简图

Figure 1 Structural representation of the rotary disc dryer

2 干燥盘的结构分析

2.1 干燥盘的几何结构设计

耙叶通过主轴旋转而推动物料在干燥盘面上移动,故干燥盘设计为圆形。又因为干燥盘需要通过传热介质加热,故其内部设计为中空,并且考虑到更好地传热,内部空间采用隔板(也起到加强筋的作用)焊接以构成曲折的流体通道[8][9]151-152,见图 2。内立筒和外立筒分别焊接于上下板的内缘和外缘,以构成封闭腔体。干燥盘外缘两侧分别焊接输入、输出管,用于加热介质的进出。干燥盘的材质选用常见的 45# 钢板。

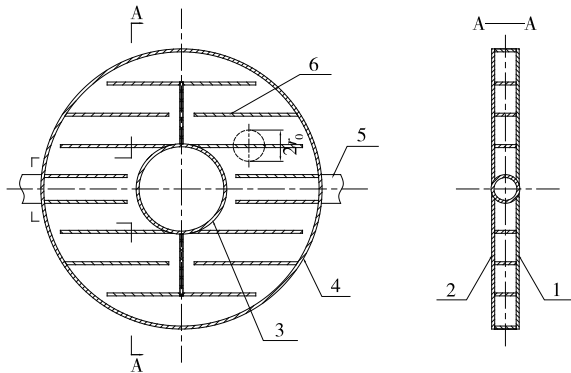


图 2 干燥盘的结构简图

Figure 2 Structural representation of the drying tray part

2.2 干燥盘的应力及变形分析

干燥盘的应力及变形分析的目的:当干燥盘中通入一定压力的传热介质后,确保干燥盘的上、下板强度不会超出许用应力,变形在许可范围内,基于干燥盘的结构和尺寸,通过计算分析,选择合适的上下板厚度。

如图 2 所示,干燥盘是盘式干燥器的承压元件,其工作时,上、下板夹层内通有一定压力的加热介质,在介质(如过热水蒸气)压力和热量作用下,上下板将发生变形。为便于对上、下板的应力及板的变形进行分析,特作如下假设:

- ① 由于隔板高度较小(一般 24 mm 左右),因此可以忽略隔板在承载时的变形;
- ② 上、下板的变形为小变形;
- ③ 隔板在上、下板上均布。

根据以上假设,选取的力学模型如图 2 中虚线圆所示,该模型是以隔板为中心,以两隔板之间距离一半 r_0 为半径选取一小圆板,该小圆板视为具有内孔半径为 a 的小圆平板,且内孔周边支撑在刚性支座上。在介质压力(均布载荷) p 作用下,小圆平板受到的约束为:均布在半径为 a 的小圆孔周边上的剪力 P ;周围相邻板对支撑处的力矩 Mr_0 。因为与该小圆板相邻部分的受力及变形情况与该小圆板相同,所以该小圆板周围的剪力为 0。该小圆板受力变形如图 3 中的虚线所示。

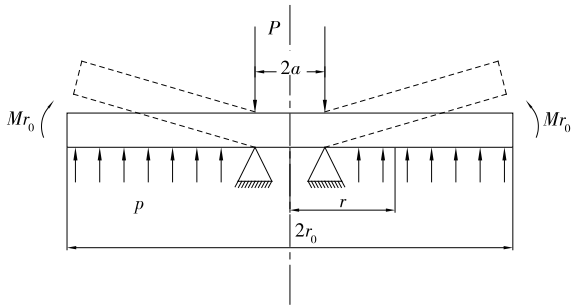


图 3 小圆平板力学模型所受到的约束

Figure 3 Constraint on the small round plate mechanics model

为求板的应力及变形,将上述小圆板视为其上施加均布载荷 p 和在内孔边缘施加分布力 P 且周边固定的圆平板,如图 4 所示,其中 $P \approx \frac{r_0^2 p}{2a}$ 。

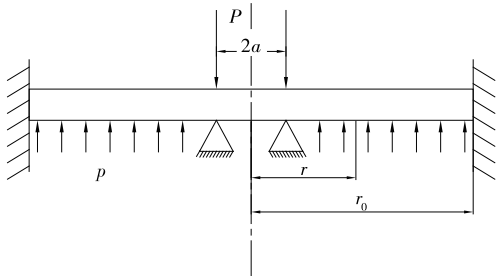


图 4 均布载荷 p 及 P 作用下且周边固定的小圆平板

Figure 4 The small round plate mechanics model under the action of uniformly distributed load p and P

根据平板理论^[10],在介质压力 p (均布载荷)作用下,该小圆板上、下表面的应力分别为:

$$\sigma_{r1} = \pm \frac{3p}{8S^2} [r_0^2 (1 + \mu) - r^2 (3 + \mu)] , \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta1} = \pm \frac{3p}{8S^2} [r_0^2 (1 + \mu) - r^2 (1 + 3\mu)] 。 \quad (2)$$

在介质压力 p 作用下引起板位移 W_1 为:

$$W_1 = -\frac{p}{64D} (r_0^2 - r^2)^2 , \quad (3)$$

其中, $D = \frac{ES^3}{12(1 - \mu^2)}$ 。

式中:

S ——板的厚度,m;

D ——板的抗弯刚度,N/m;

E ——材料的弹性模量,MPa;

μ ——材料的泊松比。

该小圆板在其内孔(半径为 a)周边受到均布力 P 时,所产生的位移 W_2 由式(4)求得:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \frac{dW_2}{dr} \right) \right] = \frac{Pa}{rD} (r \geq a) 。 \quad (4)$$

解该方程得:

$$W_2 = \left(\frac{Pa}{4D} r^2 + C_2 \right) \ln r + \left(\frac{C_1}{4} - \frac{Pa}{4D} \right) r^2 + C_3 。 \quad (5)$$

因为 a 很小,且 $a \ll r_0$,所以由小变形假设可得: $C_2 \approx 0$,由边界条件: $r = r_0$, $W_2 = 0$, $\frac{dW_2}{dr} = 0$,可得: $C_1 = \frac{Pa}{D} \left(\ln r_0 - \frac{1}{2} \right)$, $C_3 = \frac{Pa}{8D} r_0^2$ 。

所以将 C_1 、 C_2 、 C_3 代入(5)式可得:

$$W_2 = \frac{Pa}{4D} r^2 \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) + \frac{Pa}{8D} (r_0^2 - r^2) (r \geq a) 。 \quad (6)$$

在内孔边缘施加分布力 P 的作用下,板内的力矩由式(7)、(8)计算:

$$M_{r2} = -D \left(\frac{d^2 W}{dr^2} + \frac{u}{r} \cdot \frac{dW}{dr} \right) , \quad (7)$$

$$M_{\theta2} = -D \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{dW}{dr} + u \frac{dW^2}{dr^2} \right) 。 \quad (8)$$

将式(6)及 $D = \frac{ES^3}{12(1 - \mu^2)}$ 代入式(7)、(8),可得该力引起板上、下表面的力矩:

$$M_{r2} = - \left[\frac{Pa}{2} \ln \frac{r}{r_0} (1 + u) + \frac{Pa}{2} \right] (r \geq a) , \quad (9)$$

$$M_{\theta2} = - \left[\frac{Pa}{2} \ln \frac{r}{r_0} (1 + u) + \mu \frac{Pa}{2} \right] (r \geq a) 。 \quad (10)$$

则板上、下表面的应力为:

$$\sigma_{r2} = \mu \frac{6M_r}{S^2} = \pm \frac{3Pa}{S^2} \left[(1 + \mu) \ln \frac{r}{r_0} + l \right] , \quad (11)$$

$$\sigma_{\theta2} = \mu \frac{6M_\theta}{S^2} = \pm \frac{3Pa}{S^2} \left[(1 + \mu) \ln \frac{r}{r_0} + u \right] 。 \quad (12)$$

将 $P \approx \frac{r_0^2 p}{2a}$ 分别代入式(6)、(11)、(12)中,并与式(3)、(1)、(2)合并,得到板的总变形及上、下板表面内应力计算式:

$$W = W_1 + W_2 = \frac{pr_0^2}{8D} r^2 \ln \frac{r}{r_0} + \frac{p}{16D} (r_0^2 - r^2) \times \left(\frac{3}{4} r_0^2 + \frac{1}{4} r^2 \right) (r \geq a) , \quad (13)$$

$$\sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} = \pm \frac{3p}{2S^2} \left\{ r_0^2 \left[\frac{5}{4} + \frac{u}{4} + (1 + u) \ln \frac{r}{r_0} \right] - \frac{r^2}{4} (3 + u) \right\} (r \geq a) , \quad (14)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_{\theta1} + \sigma_{\theta2} = \pm \frac{3p}{2S^2} \left\{ r_0^2 \left[\frac{1}{4} + \frac{5}{4} u + (1 + u) \ln \frac{r}{r_0} \right] - \frac{r^2}{4} (1 + 3u) \right\} (r \geq a) 。 \quad (15)$$

最后确定干燥盘上、下板的厚度。干燥盘上板或下板厚度的确定需要考虑两个因素:既保证板料有足够的强度,又保证其不发生大的变形。因此,其设计准则为:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] , \quad (16)$$

$$W_{\max} \leq [W] 。 \quad (17)$$

由式(13)可得,当 $r = a$ 时,

$$W = W_{\max} = \frac{pr_0^2}{8D} a^2 \ln \frac{a}{r_0} + \frac{p}{16D} (r_0^2 - a^2) \times \left(\frac{3}{4} r_0^2 + \frac{1}{4} a^2 \right) 。$$

考虑 $r_0 \geq a$,所以 $W_{\max} \approx \frac{3p}{64D}$,将 $D = \frac{ES^3}{12(1 - \mu^2)}$ 代入,再由式(17)得:

$$S \geq \sqrt{\frac{9pr_0^4 (1 - u^2)}{16E [W]}} 。 \quad (18)$$

当泊松比 u 为 0.3 时,由式(14)、(15)可得 $r = a$ 时, $|\sigma|_{\max} = |\sigma_r|$, $r = a$ 。考虑 $r_0 \geq a$,由式(14)得:

$$\sigma_{\max} = \frac{3pr_0^2}{2S^2} \left[(1 + u) \ln \frac{r_0}{a} - \left(\frac{5}{4} + \frac{u}{4} \right) \right] 。$$

由式(16)得:

$$S \geq \sqrt{\frac{3pr_0^2 \left[(1 + u) \ln \frac{r_0}{a} - (1.25 + 0.25u) \right]}{2[\sigma]}} 。 \quad (19)$$

3 干燥盘的传热分析

从工作原理看,干燥盘对物料的干燥过程可归结为平板在搅动的颗粒床上的热传导。在该状态下的传热系数一般是依照 Schlunder^[11]提出的“颗粒热传递模型”,采用动态加热板的方法来计算传热系数。根据该理论,在动态加热面与待干燥的物料颗粒间的热传递主要是以下 3 个方面:① 加热板壁与颗粒间的热传递;② 颗粒内的热传导;③ 物料中由于颗粒相对运动引起的热对流。

加热板壁与颗粒间的传热系数与颗粒的直径、颗粒的堆积状况等因素密切相关,假定颗粒是球状,则板壁与颗粒间的传热系数 h_s 由以下方程确定:

$$h_p = \frac{4\lambda_g}{d_p} \left[(1 + \frac{2\sigma}{d_p}) \ln(1 + \frac{d_p}{2\sigma}) - 1 \right] , \quad (20)$$

$$\sigma = 2 \frac{2 - \gamma}{\gamma} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \cdot \frac{\lambda_g}{p(2C_g - \frac{R}{M})} , \quad (21)$$

$h_s = \Psi h_p$, (22)

式中:

h_p ——加热板壁与接触颗粒间的理论传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

h_s ——考虑表面覆盖系数后,加热板壁与颗粒间的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

d_p ——物料颗粒直径, mm;

λ_g ——颗粒间隙气体的热导率, $W/(m \cdot K)$;

C_g ——颗粒间隙气体的比热, $J/(kg \cdot K)$;

M ——空气的分子量;

p ——干燥器内空气的压力, Pa;

T ——干燥器内空气的温度, K;

Ψ ——表面覆盖系数。

式(21)中 γ 为考虑空气影响而引入的调节系数,其经验公式^[12]为:

$$\lg(1/\gamma - 1) = 0.6 - (1\,000/T + 1)/2.8。$$
 (23)

根据物料颗粒在干燥盘上处于完全混合状态时,颗粒内的热传导系数 h_c 由“扩散理论”^[13-14]得出:

$$h_c = \sqrt{\frac{\lambda_p C_p \rho}{\pi \cdot \tau_R}}$$
 , (24)

式中:

h_c ——颗粒内的热传导系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

C_p ——颗粒的比热, $J/(kg \cdot K)$;

ρ ——物料密度, kg/m^3 ;

λ_p ——物料颗粒的热导率, $W/(m \cdot K)$;

τ_R ——物料颗粒与加热板壁的接触时间, s。

因物料颗粒在干燥盘上的运动十分复杂,且颗粒之间相对运动有限,故为简化计算,忽略颗粒运动引起的热对流对总的传热系数的影响。在此前提下,干燥盘与物料之间的总传热系数可以表示为:

$$h_i = \frac{1}{\frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_c}}。$$
 (25)

干燥盘的传热分析,为设计物料在干燥器内的停留时间提供了依据,并进一步合理设计出主轴转速、干燥盘个数,使物料经过干燥器既得以充分干燥,同时又保证时间最短。

4 应用分析

4.1 干燥盘结构设计的应用

该盘式干燥机最大干燥盘内孔径设计为 170 mm,外径为 980 mm,隔板间的距离为 80 mm,即 $r_0=80$ mm,材料选用 45# 钢,操作温度选定为 220 ℃,许用应力 $[\sigma]=375$ MPa, $E=5.6 \times 10^5$ MPa, $a=2$ mm, $u=0.3$,干燥盘内通压力为 0.4 MPa 水蒸气,工艺要求 $[W]=0.2$ mm,则该干燥盘上、下板的厚度由式(18)、(19)计算分别得到:

$$S \geq \sqrt[3]{\frac{9 \times 0.4 \times 0.08^4 \times (1 - 0.3^2)}{16 \times 5.6 \times 10^5 \times 0.2 \times 10^{-3}}} = 0.004\,89\text{ m};$$

$$S \geq \sqrt{\frac{3 \times 0.4 \times 0.08^2 [(1 + 0.3) \ln \frac{0.08}{0.002} - (1.25 + 0.25 \times 0.3)]}{2 \times 375}} =$$

0.005 961 m。

所以,取 $S=6$ mm,即上、下板材料均选用 6 mm 厚的 45# 钢板即可满足制造要求。

干燥器的大盘与小盘结构是一样的,其差别在于大盘的内孔径和外径尺寸均大于小盘的相应尺寸,而且尺寸相差不大,故二者的计算方法是一样的。同时注意到:通过计算满足大干燥盘的材料尺寸要求必定满足小干燥盘的材料尺寸要求^[15]。因此,为了便于生产,小干燥盘上、下板材料也选用 6 mm 厚的 45# 钢板。

4.2 干燥盘传热分析的应用

以干燥湿香菇物料为例,对于式(20)取物料颗粒平均直径 d_p 为 43 mm,颗粒间隙气体的热导率 λ_g 为 0.024 $W/(m \cdot K)$,颗粒间隙气体的比热 C_g 为 1×10^3 $J/(kg \cdot K)$,空气的分子量 M 为 29,干燥器内空气的压力 p 和温度 T 分别为 0.9×10^5 Pa、393.15 K,取表面覆盖系数 Ψ 为 0.55,热力学常数 R 为 8.314 $J/(mol \cdot K)$,由式(20)~(23)可得干燥盘板壁与颗粒间的实际传热系数 $h_s=16.655\,1$ $W/(m^2 \cdot K)$ 。

取物料颗粒的比热 C_p 为 3.77×10^3 $J/(kg \cdot K)$,物料密度 ρ 为 1.2×10^3 kg/m^3 ,物料颗粒的热导率 λ_p 为 0.8 $W/(m \cdot K)$,物料颗粒与单个加热板壁的接触时间 τ_R 为 12 s,由公式(24)可得颗粒内的热传导系数 $h_c=309.92$ $W/(m^2 \cdot K)$ 。

根据以上 h_s 和 h_c 的计算结果由公式(25)最终得到干燥盘与物料之间的总传热系数 $h_i=15.805\,7$ $W/(m^2 \cdot K)$ 。

比较传热系数 h_s 和 h_c 可知, h_s 比 h_c 小得多,因此 h_s 成为决定干燥盘与物料之间的总传热系数 h_i 的主要因素;此外,在干燥器内自下而上有气体强制流过,这就在前述传导换热的基础上,附加了对流换热,通常对流换热系数大致量级为 20~100 $W/(m^2 \cdot K)$ (具体根据气体的温度和流速而定)^{[9]113},而前述传导换热的总传热系数 h_i 也在这个数量级范围内,因此热风对流对于干燥器的干燥作业也起到重要的作用。

参考本文设计与分析而生产的盘式干燥器运行良好,干燥效果显著,并获得了较高的干燥速率,在对含水 40% 的湿香菇物料进行干燥,蒸发速率达到 22 $kg/(m^2 \cdot h)$ 。

5 结论

在分析盘式干燥器工作原理的基础上,设计出干燥盘的内部传热结构,并经过应力、变形分析,给出所选制造材料厚度的计算方法;分析了干燥盘在工作中与物料的传热过程,并总结归纳出传热系数公式,得出干燥盘板壁与物料颗粒间的实际传热系数是决定干燥盘与物料之间的总传热系数的主要因素,同时提出热风对流对物料干燥具有重要的影响;对结构设计和传热分析进行了应用验证,结果表明该结构设计和传热分析对盘式干燥器的制造具有一定的参考价值,所生产的盘式干燥器运行良好,干燥效果显著,提高了干燥作业效率。

参考文献

[1] 刘广文. 盘式干燥机[J]. 农药, 2008, 47(5): 388-389.

[2] 郝万鹏. 盘式连续干燥机在聚天冬氨酸生产中的应用[J]. 化工管理, 2015(17): 18-18.

高低与 DPPH 自由基清除能力大小的变化趋势一致。即苦荞麦芽苗中总黄酮的含量与 DPPH 自由基清除能力有一定的相关性。超声波处理对种子中生物活性成分的富集机理有待更深入的探究。

参考文献

[1] ZHU Fan. Chemical composition and health effects of Tartary buckwheat [J]. Food Chemistry, 2016, 203(6): 231-245.

[2] 王学辉, 薛风照. 苦荞麦萌发过程中营养物质的变化及分布研究 [J]. 农业机械, 2013, 4(11): 63-66.

[3] BARTELME M Z. Germinated buckwheat more nutritious [J]. Food Technology, 2015, 69(7): 14-16.

[4] NAM T G, LEE S M, PARK J H, et al. Flavonoid analysis of buckwheat sprouts [J]. Food Chemistry, 2015, 170: 97-101.

[5] JIA Cai-feng, HU Wan-hong, CHANG Zhong-yi, et al. Acid alpha-galactosidase is involved in D-chiro-inositol accumulation during tartary buckwheat germination [J]. Acta Societatis Botanorum Poloniae, 2015, 84(1): 53-58.

[6] ZHOU Xiao-li, FANG Xiang-zhou, YI Ming-ou, et al. Effect of magnetic field stimulation on flavonoid synthesis in tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum Gaertn.*) sprouts [J]. Food Science, 2012, 33(21): 20-23.

[7] IOAN O, SINGUREANU V, MOLDOVAN G, et al. High frequency pulsatile electromagnetic fields and ultrasound pulsatile fields impact on germination dynamic at ocimum basilicum L. and O. basilicum var. purpurascens benth., observed with open source software [J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2016, 44(1): 41-47.

[8] CARBONELL M V, MARTINEZ E, AMAYA J M. Stimulation of germination in rice (*Oryza sativa*.) by astatic magnetic field [J]. E-lectromagnetic Biology and Medicine, 2000, 19(1): 121-128.

[9] 易翠平, 李艳, 黄寿恩, 等. 高浓度臭氧水对高粱种子发芽及其活性成分的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 27-30.

[10] KADLEC P, RUBECOVA A, HINKOVA A, et al. Processing of yellow pea by germination, microwave treatment and drying [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2001, 2(2): 133-137.

[11] ALADJADJIYAN A. Physical factors for plant growth stimulation improve food quality [J]. Food Production-Approaches,

Challenges and Tasks, Publisher InTech, 2012, 1 (20): 145-168.

[12] DHAWI F, AL KHAYRI J M. Magnetic field induced biochemical and growth changes in date palm seedlings [M]. [S. l.]: Date Palm Biotechnology, Springer Netherlands, 2011; 287-309.

[13] 李妹娟, 唐湘如, 聂俊, 等. 在盐胁迫下超声波处理对水稻种子萌发的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27(6): 2 440-2 443.

[14] YU Miao, LIU Hong-zhi, YANG Ying, et al. Optimisation for resveratrol accumulation during peanut germination with phenylalanine feeding & ultrasound-treatment using response surface methodology [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2016, 51(4): 938-945.

[15] 赵萌萌, 崔向军, 汪斌, 等. 超声波处理对黄豆种子萌发过程的影响[J]. 湖南农业科学, 2013, 35(7): 39-42.

[16] UPPAL V, BAINS K. Effect of germination periods and hydro-thermal treatments on in vitro protein and starch digestibility of germinated legumes [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2012, 49(2): 184-191.

[17] 杜若源, 谢晶, 王婷, 等. 超声波辅助提取银杏叶中总黄酮的工艺优化[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 167-170.

[18] 周燕芳, 丁利君. 超声波辅助提取艾叶黄酮的工艺研究[J]. 食品与机械, 2006, 22(4): 39-41.

[19] 陈洪彬, 郑金水, 蔡英卿, 等. 紫苏叶中总黄酮的超声波辅助提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 232-236.

[20] 张冬晨, 刘海杰, 刘瑞, 等. 超声波处理对荞麦种子营养物质累积以及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(7): 69-73, 78.

[21] JI Hong-bin, TANG Wen, ZHOU Xiao-li, et al. Combined effects of blue and ultraviolet lights on the accumulation of flavonoids in tartary buckwheat sprouts [J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2016, 66(2): 93-98.

[22] 李元, 牛文全, 吕望, 等. 加气灌溉改善大棚番茄光合特性及干物质积累[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 125-132.

[23] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 197-199.

[24] YALDAGARD M, MORTAZAVI S A, TABATABAIE F. The effect of ultrasound in combination with thermal treatment on the germinated barley's alpha-amylase activity [J]. Korean J Chem Eng, 2008, 25(3): 517-523.

(上接第 100 页)

[3] 李远志, 蔡颖荷, 鲍金勇, 等. 哈密瓜片干燥特性的研究[J]. 食品与机械, 2005, 21(4): 32-34.

[4] 张卫利, 司欢欢, 申涛. 基于圆盘干燥机的城市污泥干燥过程研究[J]. 广东化工, 2016, 43(9): 201-203.

[5] 张宇, 谢洁飞. 批式循环粮食干燥机板式换热器优化设计[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 98-100.

[6] 查国才. 盘式连续干燥机的特点及结构细节的探讨[J]. 机电信息, 2005(24): 21-24.

[7] 杨艳, 原学腾, 周亮, 等. 磷酸盐盘式干燥机故障处理[J]. 设备管理与维修, 2015(4): 27-28.

[8] 管国峰, 赵汝溥. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 142-144.

[9] 刘广文. 干燥设备设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[10] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 211-212.

[11] SCHLUNDER E U. Partical heat transfer model [J]. Chem Ing Tech, 1981, 12(5): 53-59.

[12] MARTIN H. Theories of heat transfer coefficient between heating wall and particle [J]. Drying Tech, 1982, 15(2): 179-183.

[13] GARSIDE J. Novel on-machine drying techniques [J]. Paper Technology, 1995, 36(5): 40-45.

[14] 贺海波. 用颗粒热传递模型计算旋转管排式干燥机的传热系数 [J]. 轻工机械, 2006, 24(1): 51-54.

[15] 贺海波. 旋转式间接干燥机的设计开发 [J]. 轻工机械, 2003 (3): 67-69.