

批式循环粮食干燥机板式换热器优化设计

Optimization design of heat exchanger for plate type heat exchanger

张 宇 谢洁飞

ZHANG Yu XIE Jie-fei

(中南林业科技大学机电工程学院, 湖南 长沙 410004)

(Mechanical and Electrical Engineering Institute, Central South University of
Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

摘要:基于前人研究得出的高效小型批式粮食干燥工艺,将批式循环粮食干燥机用列管式换热器设计为板式换热器,以更易得到的 100℃ 高温蒸汽代替 800℃ 烟气,将板式换热器采用更为高效的材料,最后在保证换热效率不变的情况下利用 matlab 优化工具箱优化换热器的尺寸。研究表明:改善之后的换热器具有更高的换热效率,减少了换热器占地面积以及材料的浪费。

关键词:板式换热器;粮食干燥机;优化设计

Abstract: Based on the previous research of small batch of grain drying process, exchange the batch type recirculating grain dryer tube for heat exchanger with plate heat exchanger, with easier access to 100 DEG C high temperature steam instead of 800 DEG C flue gas, at the same time, plate heat exchanger can also adopt a more efficient material. Finally, using the matlab optimization toolbox for plate heat exchanger model optimization, under the guarantee for thermal efficiency unchanged, the size of the heat exchanger was optimized. Research has shown that after improvement is higher than before the heat exchanger in heat efficiency, and reduces heat exchanger area and the waste materials.

Keywords: plate heat exchanger; grain drier; optimal design

换热器作为一种高效换热装置广泛应用于食品、化工等多个工业领域,在生产中占有重要地位,提高换热器的换热性能,通常被认为是提高能源利用效率的关键因素之一^[1]。板式换热器具有结构紧凑,传热系数高等特点^[2]。随着板式换热器各项技术的逐渐成熟,在各个工业领域中能够利用板式换热器也是一种有效提高生产效率以及能源利用率的手段。

李建民等^[3]在小型批式粮食干燥工艺研究中,采用技术

体系较为完整的列管式换热器^[4],以高温气体作为热介质。利用 solidworks 软件对列管式换热器进行了建模,以及流体分析模拟,得出了干燥工艺中列管式换热器的流体温度迹线图,其中热介质从 800℃ 降到 400℃,冷空气从 20℃ 升高到 100℃,换热功率为 82.5 kW。该研究中指出热介质还有继续降温的空间,换热器的效率可以进一步提高。赵晓文等^[5]的研究表明板式换热器与常规的壳管式换热器相比,在泵功率和流动阻力相同的情况下,板式换热器传热系数可以高出 1 倍。

本试验拟针对换热器效率不足的问题,改良干燥工艺,并用日益成熟的板式换热器替代干燥工艺中的列管式换热器,利用 solidworks 软件进行建模以及流体仿真模拟验证,证明板式换热器进一步提高了干燥工艺的换热效率,提高了干燥工艺适用性。在保证换热效率不变的情况下,采用 matlab 优化工具箱作为优化工具,以板式换热器换热面积为目标函数,板式换热器结构尺寸,长、宽、高、板间距离作为设计变量,对板式化热器的外围结构尺寸做出了优化。

1 换热器的初步建模与工艺的优化

1.1 工艺的改善

板式换热器具有良好的换热效率,为了能更好地利用其优点,避免高温对板式换热器的不利影响,适当改善干燥工艺的相关流程。

在批式小型循环粮食干燥工艺中,将 800℃ 高温介质,改为使用 100℃ 左右蒸汽,热介质经过换热器加热冷空气,温度升高的冷空气直接进入烘干机中。在此工艺中,由于热介质较易得到,所以可以提高冷、热介质的流量。热介质温度的降低同时可以将板式换热器用材料优化,将不锈钢 201 改为拥有更好热导率的铝合金材料。

1.2 板式换热器的初步建模

根据工艺要求,批式循环粮食干燥机用板式换热器模型设计为由 2 个结构、尺寸完全相同的换热机芯并联组成。多

作者简介:张宇,男,中南林业科技大学在读硕士研究生。
通讯作者:谢洁飞(1968—),男,中南林业科技大学副教授,博士。
E-mail:1412996646@qq.com

收稿日期:2016—03—03

个经过特殊加工的铝箔片通过叠加的方式构成了换热机芯，相邻铝箔片折叠形成流体流道，每片铝片左右为冷、热流道。换热器冷、热流道分开。冷、热介质在机芯中形成十字流，仅靠铝片进行热传递散热，冷空气通过内循环风机从左侧机芯流动到右侧机芯，完成内部循环。热空气通过外循环风机从机芯右侧通过左侧机芯排出。在内外循环过程中完成内热空气的热传递换热。

采用 solidworks 软件进行换热器模型的建立，见图 1。

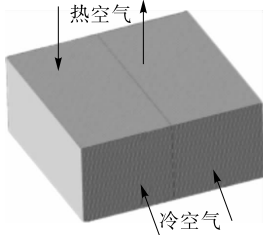


图 1 换热机芯三维模型

Figure 1 The heat exchange unit three-dimensional model

1.3 板式换热器基本参数

根据干燥工艺要求，经过经验公式计算，板式换热器单个机芯外型尺寸设计为 800 mm×450 mm×420 mm，板间距离设计为 4.5 mm，热介质风量为 7 020 m³/h，温度为 100 ℃。冷空气风机风量为 14 000 m³/h，温度为 20 ℃。

1.4 换热器模型的仿真结果与分析

将理论计算所得换热器模型通过与 solidworks flow simulation 软件进行流体模拟，冷空气温度流体迹线见图 2。

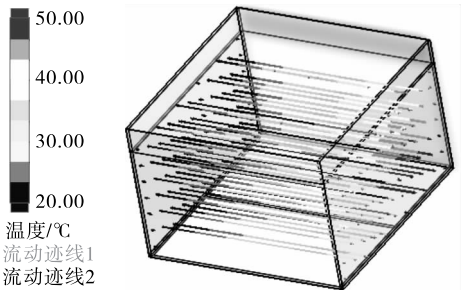


图 2 冷空气温度变化分布图

Figure 2 Cold air temperature distribution

仿真模拟结果表明冷空气从 20 ℃ 上升到 42.9 ℃，换热功率高达 90 kW，较之前的换热功率(82 kW)有明显提升。

2 换热器尺寸优化

2.1 优化目标

实际工程计算中，换热器的设计很多情况下依赖于理论公式与后期实验验证^[6]。流体理论计算公式基本是经验拟合公式，在运用过程中计算条件的不同，换热器工作环境的不同均会不可避免地导致偏差。

换热器尺寸优化目的在于，在保证换热功率达到设计要求的情况下，对板式换热器的整体换热面积做出优化，减少换热器的外围尺寸，进而减少整个工艺流程的相关体积，减少不必要的浪费。

2.2 设计变量的选取

在设计变量的选取中，各个变量之间应该是相互独立的，在板式换热器的设计优化中，优化目标为减少换热器的换热面积，设计变量可选择为板式换热器长度、宽度、高度、板间距，其中板间距影响较大。

$$A = l \times h \times N, \tag{1}$$

$$N = b / (d + 0.000\ 2), \tag{2}$$

式中：

A —— 换热面积，m²；

l —— 板式换热器机芯长度，m；

h —— 板式换热器机芯高度，m；

N —— 板式换热器机芯内部通道数；

b —— 板式换热器机芯宽度，m；

d —— 板式换热器机芯板间距离，m。

由式(1)、(2)可知换热面积 A 完全由设计变量 l 、 b 、 h 、 d 确定。

设计变量可以表示为：

$$X = [XX_1, XX_2, XX_3, XX_4]^T = [l, b, h, d]^T. \tag{3}$$

2.3 目标函数的推导

板式换热器的设计优化目标为在保证换热效率 90 kW 的情况下，优化板式换热器的换热面积、外型尺寸。以板式换热器换热面积为目标函数：

$$A = Q / \Delta TK, \tag{4}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{\gamma}{\lambda_u} + \frac{1}{h_c}}, \tag{5}$$

式中：

Q —— 换热功率，kW；

ΔT —— 温度差，℃；

K —— 总传热系数，W/(m²·℃)；

h_h —— 热空气内循环换热系数，W/(m²·℃)；

h_c —— 冷空气外循环换热系数，W/(m²·℃)；

γ —— 板式换热器平板厚度，m；

λ_u —— 材料传热系数，W/(m·℃)。

其中平板厚度与材料传热系数为定值。

$$h_h = \frac{N_r \cdot lambc}{D_r}, \tag{6}$$

$$N_r = \frac{\left(\frac{Fr}{8}\right) \cdot (Re_h - 1\ 000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{Fr}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{2/3}\right] \left(\frac{T_f}{T_w}\right)^{0.45}, \tag{7}$$

式中：

N_r —— 努赛尔数；

$lambc$ —— 定值，取 0.029；

D_r —— 板式换热器内循环通道特征长度，m；

F_r —— 内循环阻力系数；

Re_h —— 内循环雷诺数；

Pr —— 普朗特常数；

T_f ——流体平均温度,℃;

T_w ——壁面温度,℃。

$$Dr = \frac{2 \cdot l \cdot d}{l + d}, \tag{8}$$

$$Fr = \frac{1}{(1.82 \cdot \lg Re_h - 1.64)^2}, \tag{9}$$

$$Re_h = \frac{V_h \cdot Dr}{\nu_r}, \tag{10}$$

式中:

ν_r ——流体动力粘度,N·s/m²;

V_h ——流体的体积流量,m³/h。

$$V_h = \frac{2M_h}{l \cdot d \cdot N}, \tag{11}$$

式中:

M_h ——板式换热器内通道介质质量流量,kg/h。

同理可以得到冷循环换热系数 h_c 。

从式(1)~(11)可知:总换热系数 K 也可以由设计变量,换热器机芯长度 l 、宽度 b 、高度 h 、板间间距 d 推导得到,且仅由 4 个设计变量确定。由此板式换热器优化设计目标函数可以确定为:

$$F(x) = A = BSFunction(l,b,h,d) = BSFunction(XX_1,XX_2,XX_3,XX_4)。 \tag{12}$$

2.4 约束条件

确定设计变量的上下限。

(1) 板式换热器总体外围尺寸:单个板式换热器机芯长、宽、高等分别小于或等于 800,450,420 mm,即 $l \leq 800$, $b \leq 450$, $h \leq 420$ 。

(2) 板式换热器板间距不得大于 4.5 mm,即 $d \leq 4.5$ 。

(3) 根据结构参数尺寸要求,平板式换热器长、宽、高以及板间距应分别大于或等于 600,380,350,3.8 mm,即 $l \geq 600$, $b \geq 380$, $h \geq 350$, $d \geq 3.8$ 。

(4) 换热功率大于或等于 90 kW,即 $Q \geq 90$ 。

2.5 优化算法的选择

在约束条件中不难看出板式换热器的优化问题是一种有约束的非线性优化极值问题。

在 Matlab 优化工具箱^[7]中,fmincon 函数^[8]是专用于解决这类最优化理论与算法^[9-10],可以运用该函数进行求解。fmincon 函数适合于求多变量有约束非线性函数的最小值^[11-12]。在优化计算中可以直接调用该函数。

2.6 Matlab 程序的编制

2.6.1 目标函数

$$F(x) = A = BSFunction(XX_1,XX_2,XX_3,XX_4)$$

2.6.2 约束函数

function [c,ceq]=myhuanreliang(XX)

Global Q

c=[];

ceq=Q-90000;

End

2.6.3 主函数

clear all

x0=[0.65,0.40,0.37,0.003 9];

lb=[0.6,0.35,0.35,0.003 8];

ub=[0.8,0.45,0.42,0.004 5];

options=optimset('display','off');

[x,Q]=fmincon(@BSFunction,x0,[],[],[],[],lb,

ub,@myhuanreliang,options)

2.7 优化结果及其分析

2.7.1 优化结果 经过 matlab 软件的计算,计算后设计变量 X 取整后取值为:

$$X = \begin{bmatrix} l \\ b \\ h \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.68 \\ 0.39 \\ 0.38 \\ 0.004\ 0 \end{bmatrix}。$$

换热功率 $Q = 90\text{ kW}$ 。

2.7.2 优化结果对比与分析 Solidworks 软件对比检验。以优化计算结果重新建立板式换热器模型,用相同的边界条件进行流体仿真模拟,仿真结果见图 3。

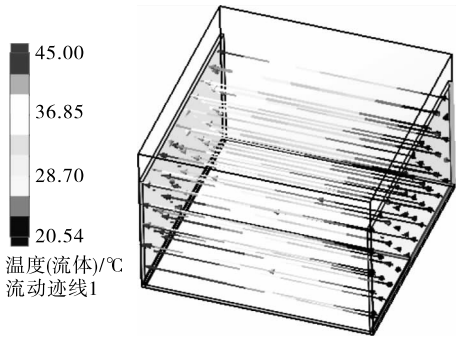


图 3 冷空气温度变化分布图

Figure 3 Cold air temperature distribution

仿真结果表明优化之后的板式换热器机芯,冷空气从 20℃上升到 41.8℃。与尺寸优化前仿真结果几乎一致。所以尺寸优化之后的结果是正确的。

与模型优化结果相比,matlab 尺寸优化结果不仅保证了 90 kW 的换热功率,缩减了板式换热器的尺寸,节约了板式换热器的占地面积,还缩减了理论设计与换热器参数选择上的误差,提高了材料的利用率。

3 结论

针对批式循环粮食干燥机,将列管式换热器更改为换热功率更高的平板式换热器,将 800℃高温介质改为更易得到的 100℃空气,获得了更高的换热效率,同时由于高温介质较容易获得,使得干燥工艺适用性更为广泛。板式换热器模型通过优化数学模型,运用 matlab 软件进行了板式换热器的尺寸优化设计与分析。通过优化板式换热器的设计,不仅缩小了板式换热器外围尺寸,同时为板式换热器的维修与清洁提供了便利。对于板式换热器的应用研究,具有一定的指导意义。

(下转第 193 页)

十八烷等具有辛辣味,而相比于对照组,处理组的烟气颗粒物成分中此两种物质分别下降了 39.47%和 100%,说明经酶解—美拉德强化修饰处理后,薄片的刺激感减弱、杂气降低,与感官评吸结果相一致。

3 结论

酶解—美拉德强化修饰联用技术可以在提高烟末提取率的同时,使薄片香气成分中有利成分有所增加,如大马士酮与巨豆三烯酮 1 分别提高 192.0%,356.0%;烟气颗粒物中部分不利成分有所下降,处理组中未检测到 4-乙炔基愈创木酚与 *N,N*-二甲基苯胺,具有辛辣味的十七烷、二十八烷分别下降 39.47%和 100%。处理后的薄片香气更加丰富、协调,焙烤香浓郁,杂气、刺激性减小,抽吸品质明显改善。

参考文献

[1] 蒋宇凡,徐保明,姚政.造纸法生产烟草薄片研究进展[J].轻工科技,2015(12):137-139.

[2] 缪应菊,刘维涓,刘刚,等.烟草薄片制备工艺的现状[J].中国造纸,2009(7):55-60.

[3] 彭琛,陈越立.烟草薄片技术应用与研究[J].科技信息,2011(19):37.

(上接第 100 页)

参考文献

[1] 陈楠,贺小华,邵虎跃,等.换热器管板有限元分析模型研究[J].食品与机械,2012,28(2):90-93.

[2] 冯聶,徐涵庆,顾瑾.一种新型换热器——板壳式换热器[J].食品与机械,1997(4):35-36.

[3] 李健民,李长友,徐凤英,等.批式循环粮食干燥机换热器的三维流场模拟——基于 Solidworks[J].农机化研究,2013(1):18-21.

[4] 马云霞.列管式换热器的设计与计算[J].粮食流通技术,2005(2):18-19.

[5] 赵晓文,苏俊林.板式换热器的研究现状及进展[J].冶金能源,2011(1):52-55.

[6] 刘红,杨哲人,蒋兰芳,等.基于 CFD 的 U 型管换热器温度降模型[J].食品与机械,2015,31(2):152-156.

(上接第 156 页)

参考文献

[1] 国家药典委员会.中国药典:一部[S].北京:中国医药科技出版社,2015:156-157.

[2] 刘大伟,康利平,马百平.远志化学及药理作用研究进展[J].国际药学研究杂志,2012,39(1):32-36,44.

[3] Liu Jun, Stefan Willför, Xu Chun-lin. A review of bioactive plant polysaccharides: Biological activities, functionalization, and biomedical applications[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2015, 5(1): 31-36.

[4] 时宵雨,姚春霞,林晓,等.多糖药物应用与研究进展[J].中国新药杂志,2014,23(9):1 057-1 062.

[5] Xin Tao, Zhang Fu-bin, Jiang Qiu-ying, et al. Purification and antitumor activity of two acidic polysaccharides from the roots of *Polygala tenuifolia* [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(4): 1 671-1 676.

[6] 魏永俊,周秋菊,黄树颖,等.小远志多糖的提取及纯化[J].江

[4] 许日鹏,苏文强,段继生.烟草薄片的开发与应用[J].上海造纸,2008(6):46-49.

[5] 唐兴平,陈学榕,戴达松,等.烟草废弃物造纸法制烟草薄片[J].福建农林大学学报:自然科学版,2007(2):205-207.

[6] 李丹,刘熙.生物技术应用于造纸法再造烟叶生产的研究进展[J].现代食品科技,2013(6):1 463-1 466.

[7] 吴亦集,沈光林,陶红,等.造纸法再造烟叶原料的加酶萃取[J].烟草科技,2011(7):33-36.

[8] Onishi A Nishi. Process for reacting amino acid and an activecarbonyl sugar in a polyhydric alcohol: US, 3478015[P].1969-11-11.

[9] 黎新钦,张静,田兆福,等.液相美拉德反应优化烟梗烟末提取液的应用研究[J].食品与机械,2015,31(5):21-27.

[10] 郑小嘎,赵昌政,韦绪伦,等.酶法改善造纸法烟草薄片品质初探[J].山东食品发酵,2010(1):11-13.

[11] 骆莉,卓浩廉,周榕,等.生物技术及美拉德反应改良烟梗提取液的性质[J].食品工业科技,2012(6):189-192.

[12] 张欢欢.卷烟制丝过程中烟丝化学成分和感官质量的动态变化研究[D].郑州:河南农业大学,2014:19-20.

[13] 何建龙.国内低焦油卷烟市场现状及发展前景[J].流通经济,2011(11):137-140.

[14] 姚二民,宋豪,李晓,等.茶叶再造烟叶对卷烟烟气成分的影响[J].茶叶科学,2012,32(4):319-324.

[7] 杨世文,徐小健. MATLAB 优化工具箱在结构优化设计中的应用[J].科学技术与工程,2008,8(5):1 347-1 349.

[8] Woon S F, Rehbock V, Loxton R. Global optimization method for continuous-times sensor scheduling[J]. Nonlinear Dynamics and Systems Theory, 2010, 10(2): 175-188.

[9] Chai Q Q, Loxton R, Teo K L, et al. A class of optimal state-delay control problems[J]. Nonliners Analysis: Real World Application, 2013, 14: 1 536-1 550.

[10] 褚洪生,杜增吉,阎金华,等. MATLAB7.2 优化设计实例指导教程[M].北京:机械工业出版社,2007:198-204.

[11] 段明序.混合动力客车机械式自动变速器参数优化设计方法研究[D].长春:吉林大学,2013:11-15.

[12] 吴银亮,陈林,郭礼波.基于非线性 Fmincon 法的抗滑桩优化设计[J].铁道建筑,2011(5):81-84.

苏师范大学学报:自然科学版,2014,32(1):60-63.

[7] 方元,许铭强,汪欣蓓,等.超声波辅助提取哈密大枣多糖的工艺优化[J].食品与机械,2014,30(2):175-180.

[8] Jing Yong-shuai, Zhu Jian-hua, Liu Ting, et al. Structural characterization and biological activities of a novel polysaccharide from cultured *Cordyceps militaris* and its sulfated derivative[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(13): 3 464-3 471.

[9] 吴兰芳,蒋爱民,郭善广,等.凝固型紫薯酸乳发酵工艺及抗氧化活性研究[J].食品与机械,2013,29(5):198-203.

[10] Solomon Rajesh Thambiraj, Michael Phillips, Sundar Rao Koyyal-amudi. Antioxidant activities and characterisation of polysaccharides isolated from the seeds of *Lupinus angustifolius* [J]. Industrial Crops and Products, 2015, 74(11): 950-956.

[11] Jing Yong-shuai, Huang Li-jiao, Lv Wen-jie, et al. Structure characterization of a novel polysaccharide from pulp tissues of *Litchi chinensis* and its immunomodulatory activity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(4): 902-911.