



# Heat Exchange Simulation Study on Energy Saving Devices of Smoked Oven

Liu Hong, Hu Wenhao<sup>\*</sup>, Shen Shijia

School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, China

## Email address:

hliu@zjut.edu.cn (Liu Hong), 15296369499@qq.com (Hu Wenhao)

<sup>\*</sup>Corresponding author

## To cite this article:

Liu Hong, Hu Wenhao, Shen Shijia. Heat Exchange Simulation Study on Energy Saving Devices of Smoked Oven. *Asia-Pacific Journal of Food Science and Technology*. Vol. 1, No. 1, 2019, pp. 16-20.

Received: July 24, 2019; Accepted: August 21, 2019; Published: September 5, 2019

**Abstract:** According to the problem that smoked ovens directly discharge the hot waste gas, and the research about heat recovery and energy saving device is still a blank, the paper suggests out the assumption about heat recovery and energy saving for smoked ovens, and discusses the basic requirements for energy-saving device. Taking a conventional type of smoked oven as an example, considering the factors such as the position and size range of energy-saving devices on the smoked oven, the structural model of recycling parts in the form of tubular heat transfer is given. And based on CFD platform tubular heat exchanger structure model for the simulation calculation, the heat transfer temperature field and the internal flow field structure. Analysis of tubular heat exchanger structure model of the distribution of internal flow field, the temperature and heat transfer in a heat exchanger structure model import and export structure in the calculation of thermal efficiency. The results show that the proposed tubular heat transfer structure model can reach the waste heat recovery rate of more than 18%.

**Keywords:** Smoked Ovens, Waste Heat Recovery, Energy Saving Device, Simulation

---

## 烟熏炉节能装置换热仿真研究

刘红, 胡文豪<sup>\*</sup>, 沈施佳

浙江工业大学机械学院, 杭州, 中国

## 邮箱

hliu@zjut.edu.cn (刘红), 15296369499@qq.com (胡文豪)

**摘要:** 针对目前食品加工行业的烟熏炉生产时直接排放热废气, 其余热回收节能的研究还是空白的问题, 提出了烟熏炉余热回收节能的设想, 讨论了余热回收节能装置的基本要求。论文以某款常见的烟熏炉为例, 考虑节能装置在烟熏炉上的摆放位置、尺寸范围等因素, 给出了管式换热形式的回收部件结构模型, 并基于CFD平台对管式换热结构模型进行了仿真计算, 得到了换热结构的温度场与内部流场。分析管式换热结构模型的内部流场的分布情况、换热结构模型进出口的温度及换热结构换热效率的计算。结果表明, 所提出的管式换热结构模型可以达到烟熏炉18%以上的余热回收利用率。

**关键词:** 烟熏炉, 余热回收, 节能装置, 仿真模拟

---

## 1. 引言

烟熏是食品贮藏的一种方法，不仅能延长保存时间还能改善食品的风味[1]。中国的食品工业烟熏炉中绝大部分是中小型烟熏炉[2-3]，排烟温度较高，排出速度较快，烟热损失大。

国内外相关研究中，许多学者对我国余热利用情况、设备及技术做了研究。连红奎等[4]从余热利用过程能力转换角度，概述了中国余热回收利用采用的技术及设备技术特点与应用概况。刘武标[5]介绍了一种新型低阻燃气锅炉尾部烟气余热回收节能器的结构与实际应用情况，分析了影响节能器换热效果的主要因素，研究了液气比与锅炉排烟温度的关系、锅炉热效率与排烟温度的关系及节能器系统阻力与烟气流速的关系。Katharina[6]研究了工业—城市网络中的工业余热回收现状及回收意义，同时强调了工业余热利用的技术潜力，提出了热储存概念。在烟熏炉研究中，施明等[7]通过增加导流板改善加热仓内流场，从而提高加热效率。但在烟熏炉生产领域，余热回收节能装置的研究尚未报道。

本研究给出了基于管式换热结构的余热回收方案，并基于CFD平台对管式换热结构模型进行仿真计算，得到余热回收部件的温度场与内部流场，通过观察管式换热结构模型内部流场的分布情况及余热回收部件模型进出口温度，分析回收部件对烟熏炉排放热废气的回收效果及回收部件对新鲜空气的加热程度，从而给出余热回收利用率高高的设计方案，旨在提高烟熏炉的废气回收效果。

## 2. 节能装置结构设计

### 2.1. 烟熏炉机构

烟熏炉由炉体系统、换热系统、循环系统、控制系统、发烟系统、物载系统、清洁系统七大系统组成[8]，具有发色、蒸煮、脱水、烟熏、烘烤等烹饪功能。常规烟熏炉的外形是一个矩形箱体（如图1所示），由箱体、换热器、出风管、均风板、回风口等组成[9]。该烟熏炉的结构是国内常见烟熏炉的结构[10]，其特点是排气方式为直排，排出的烟熏气体流速大。由于废气的温度较高，因此热能浪费较大。

烟熏炉的食品熏制加工过程为：经换热系统的换热器对由风机送入的空气进行加热，加热的干燥气体通过仓内上部左右两侧の出风管进入炉体加热仓内，在烟熏炉外部的木粒发烟器中的木粒燃烧产生烟熏气体从仓内下部进入加热仓，热干燥气体与烟熏气体对加热仓内的食品进行干燥、蒸煮、烟熏等加工，加工食品后的气体经过出风口，被排出加热仓。

### 2.2. 节能装置设计要求

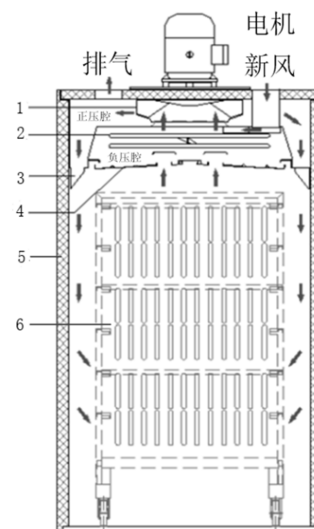
由烟熏炉的工作过程可以看出，排出加热仓的气体（以下简称废气）温度较高、含有较多的烟气，这导致了烟气损失较大、能量利用率不高的缺点，本研究提出了一种烟熏炉余热回收节能的设想，回收利用余热余烟，实现

节能减排。该烟熏炉余热回收节能的装置主要应具备以下基本功能。

废气热量的回收利用：烟熏炉在蒸煮加热状态下，外界空气（称为新风）经换热系统加热后对加热仓内食物进行加工。在加热仓内循环过后，由炉顶风机排出炉外。排出的气体（称为废气）带有大量热量，因此将其回收并对新鲜空气进行加热很有意义。

这一基本功能具体描述为：①回收利用烟熏炉热废气的余热；②减少烟熏炉用于加热新风的能耗。

根据烟熏炉节能装置的基本功能，基于常规烟熏炉尺寸，可以初步确定节能装置的外形和基本组成，如图2所示。即由箱体、换热器、除湿过滤器、热风进出口、新鲜空气进出口等部分组成，外形是一个长方体。



1. 风叶 2. 换热器 3. 出风管 4. 均风板 5. 箱体 6. 烟熏车

图1 烟熏炉机构及流动特性。

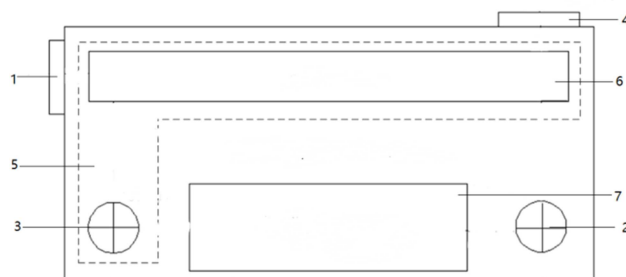


图2 烟熏炉节能装置功能图示。

1. 空气进口 2. 空气出口 3. 热气进口 4. 热气出口 5. 余热回收部件 6. 换热器 7. 除湿过滤器

以常规烟熏炉为载体，针对节能装置的以上几点设计要求，初步确定了基本尺寸：节能装置的长×宽×高为1450 mm×580 mm×850 mm；热气进口和新风出口各2个，位于箱体的两侧，直径均为150 mm，与管道连接；空气进口和热气出口各1个，热气出口位于上方，直径设计均为300 mm；换热器和除湿过滤器分别占据节能装置不同空间，具体尺寸根据内部余热回收部件而定。

2.3. 方案结构设计

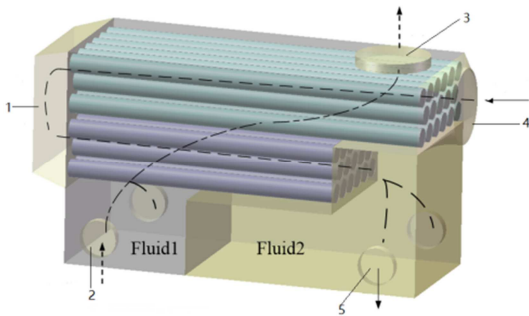
按照节能装置的设计要求，确定接口通道、模型总体尺寸大小，根据经验初步设计了节能装置内部余热回收部件的方案，表1为两个节能装置方案的各项几何参数，包括流通面积，换热面积等。

为了使节能装置内部的流量和烟熏炉接口（进出口）的流量基本相同，换热管规格选用Φ76 mm×δ2 mm，数量

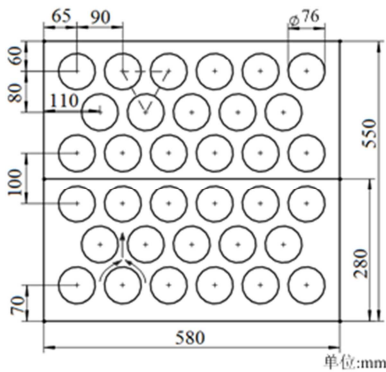
为17，换热管的总流通面积为0.0771 m<sup>2</sup>，与进出口流通面积基本相同。图3（a）为管式换热节能装置示意图，包括两个气体流域：Fluid1热废气流域和Fluid2新风流域，图3(b)为换热管的分布示意图，管与管间本着分布均匀的原则排列，水平相邻管之间均匀分布，上下两层管错位分布，相邻三根管构成等腰三角状，有利于流体在空隙间受阻拐弯前行，增加换热管外壁与流体的热交换时间。

表1 换热器主要几何参数。

几何参数	数值/m	数量	几何参数	数值/m <sup>2</sup>	总数值/m <sup>2</sup>
进（Inlet1）口管直径	Φ0.150	2	进口管面积	0.017 7	0.035 3
出（Outlet1）口管直径	Φ0.300	1	出口管面积	0.070 7	0.070 7
管换热器	换热管的直径	Φ0.076	管流道截面	0.004 5	0.077 1
	换热管的间距	0.090	换热面积	0.608 8	10.350 3



（a）管式换热节能装置示意图



（b）换热管分布图

图3 管式换热节能装置三维建模图。

3. 节能装置仿真计算

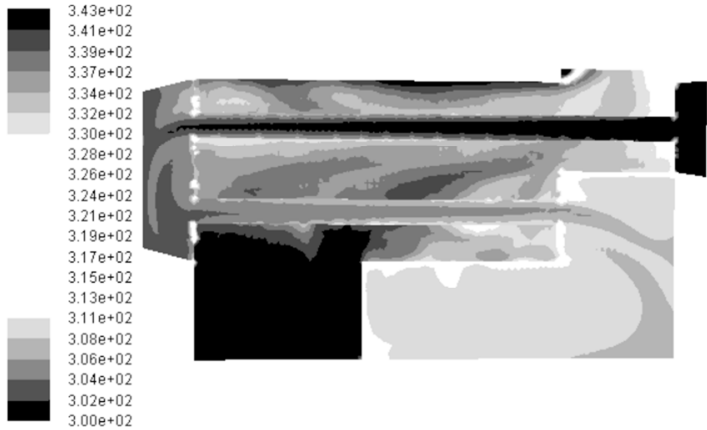
3.1. 仿真结果

在烟熏炉运行时检测出风口流速，根据试验测试结果，得到节能装置仿真模型的边界条件为：烟熏炉排气口即节能装置热气进口气流流速10 m/s、压强130 Pa，烟熏炉新风口即节能装置空气出口气流的流速 -10 m/s、压强 -130 Pa（流速和压强方向以垂直管道截面朝向节能装置内部为正），表2为Fluent仿真计算边界条件具体设置。

表2 换热器仿真计算边界条件设置。

几何名称	边界名称	边界条件	数值大小/Pa	温度/K(℃)
进口管1	Inlet1	Pressure - inlet	130	343.15(70)
出口管1	Outlet1	Pressure-outlet	0	300(26.85)
进口管2	Inlet2	Pressure - inlet	0	300(26.85)
出口管2	Outlet2	Pressure-outlet	-130	300(26.85)
换热壁面	Wall-guan/ wall-fam	Coupled Wall		
其余壁面	Wall	无滑移、光滑、绝热壁面		

选取节能装置中部有代表性的对称截面，见图3中的沿管长方方向的垂直面，从截面的温度、速度等云图直观地观察热气流场分布情况。由图知，管式换热节能装置Fluid1流域的温度分布更加均匀，换热管等腰三角形分布形成迷宫式流道，使热废气气流流向发生改变，充满整个空间，同时也减缓了流速，有利于管壁与热废气的换热。



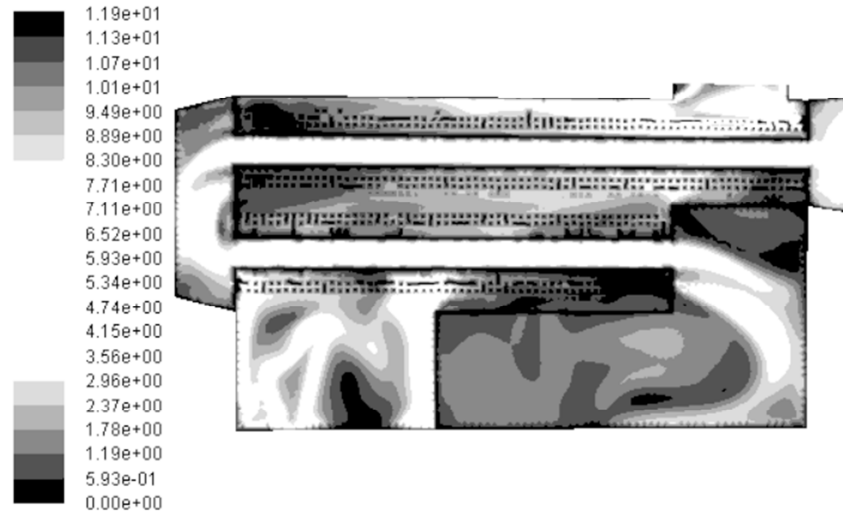
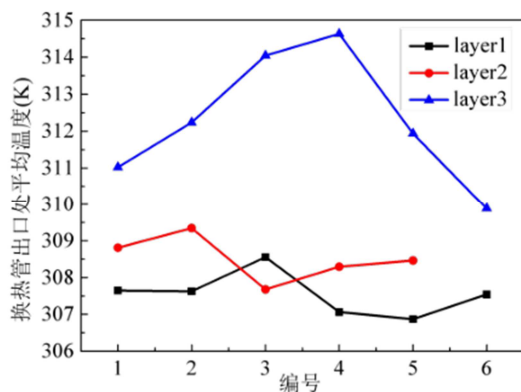


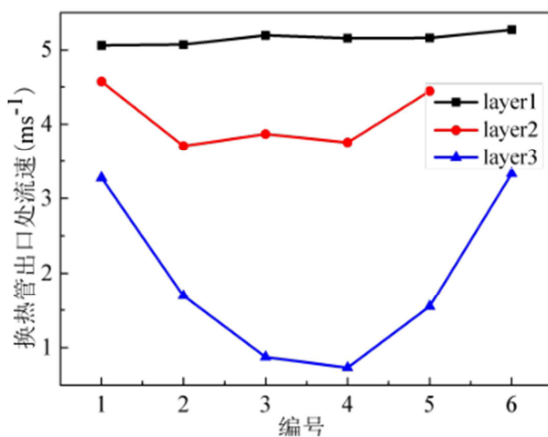
图4 管式换热节能装置对称截面温度场、速度场分布云图。

Fluid2的新风流域，管式换热节能装置按换热管的轴线高度从下到上可分为1~6层，其中1~3层换热管为热交换的重点区域，温度有明显的提高，靠近节能装置中部的第3层热量增加最快，这是因为这部分换热管的温度高。

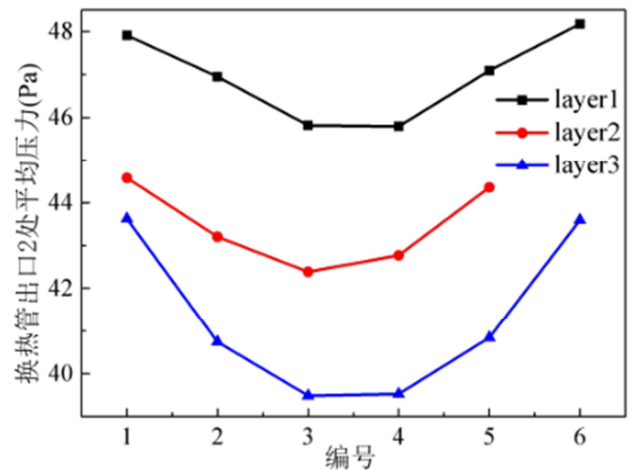
取1~3层各换热管出口处的平均物理量绘制成折线。由图5可知，第3层（靠近节能装置中部的第4根换热管出口处）平均温度最高，为314.6K，第1层（靠近箱体的第5根换热管）温度最低，为306.9K，最高温与最低温相差7.7K。



(a) 平均温度



(b) 平均流速



(c) 平均压力

图5 1~3层换热管出口处的平均温度、平均流速、平均压力。

### 3.2. 换热效率

换热器的换热效率 $\varepsilon$ 是用来评价换热器传热性能高低的指标，可定义为实际传热量 $Q$ 与最大传热量 $Q_{max}$ 之比，即 $\varepsilon = Q / Q_{max}$ 。根据式（1）可以求得节能装置进出口单位时间内的流体流量，（2）为热量求解公式，本文管式换热器的热量回收效率计算过程如式（3）。

$$Q_1 = v \times A \quad (1)$$

$$Q = CM\Delta T \quad (2)$$

式中： $Q_1$ ——流体体积流量，单位 $m^3/h$ ； $v$ ——平均流速，单位 $m/s$ ； $A$ ——管道截面积，单位 $m^2$ ； $Q$ ——热量，单位 $kJ$ ； $C$ ——比热容，单位 $J/(kg \cdot K)$ ； $M$ ——质量，单位 $kg$ ； $\Delta T$ ——温度差，单位 $K$ 。

本研究中管式换热器的热量回收效率按式（3）进行计算。

$$\varepsilon = \frac{Q_{吸}}{Q_{总}} = \frac{CM_1\Delta T_1}{CM_2\Delta T_2} = \frac{C\rho V_1\Delta T_1}{C\rho V_2\Delta T_2} = \frac{C\rho(a_1\pi R_1^2v_1t)\Delta T_1}{C\rho(a_2\pi R_2^2v_2t)\Delta T_2} = \frac{(a_1R_1^2v_1)\Delta T_1}{(a_2R_2^2v_2)\Delta T_2}$$

(3)

式中： $\varepsilon$ ——换热效率； $Q$ 、 $Q_{总}$ ——新鲜空气实际吸收的热量和理论上热废气的最大传热量，单位kJ； $C$ ——空气比热容，单位J/(kg·K)； $M_1$ 、 $M_2$ ——分别为空气和热气质量，单位kg； $\rho$ ——空气密度（假设换热前后空气密度不变），单位kg/m<sup>3</sup>； $\Delta T_1$ 、 $\Delta T_2$ ——空气吸热前后和热气完全放热温度差，单位K； $R_1$ 、 $R_2$ ——空气和热废气入口

口管道的半径，单位m； $v_1$ 、 $v_2$ ——空气出口和热气进口流速，单位m/s； $t$ ——换热时间，单位s； $V_1$ 、 $V_2$ ——空气和热气体积，单位m<sup>3</sup>； $a_1$ 、 $a_2$ ——空气和热气入口数量，单位m<sup>2</sup>。

已知仿真后换热器的各项参数如表3所示，代入公式（3），可求得换热器的效率。

表3 换热参数表。

符号	$a_1$	$a_2$	$R_1/\text{m}$	$R_2/\text{m}$	$v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta T_1/^\circ\text{C}$	$\Delta T_2/^\circ\text{C}$
管换热	2	2	0.15	0.075	8.94	8.42	7.91	43.15

设管式换热器的换热效率为 $\varepsilon_1$ ，则有 $\varepsilon_1=19.47\%$ 。按式（2），求得管式换热节能装置中空气吸收的热量为3.233 kJ。

4. 结论

本试验针对烟熏炉的研究与应用现状提出了回收工作废气余热的设想，以一款常用的烟熏炉为例，分析回收过程，给出节能装置的设计方案，并基于CFD平台对节能装置的换热结构进行了换热分析。结果表明，本研究提出的管式换热的换热结构模型可有效回收烟熏炉余热废气，具有较好的节能环保应用前景。由于烟熏废气中有油脂与烟粒，因此需要进一步研究换热结构的清洗方式以保证节能装置余热回收利用率的稳定。

参考文献

[1] 杨星, 张美彦, 才让卓玛, 等. 肉制品烟熏加工技术的应用及发展[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(7): 142-144.

[2] 汤定明.肉制品加工中的烟熏技术[J].肉类研究, 2007(2): 36-39.

[3] 于连江. 肉制品加工烟熏炉的技术特点[J]. 养殖技术顾问, 2013(7): 249.

[4] 连红奎, 李艳, 束光阳子, 等. 我国工业余热回收利用技术综述[J]. 节能技术, 2011, 29(2): 123-128+133.

[5] 刘武标, 林世平, 陈鹏飞, 等. 新型燃气锅炉尾部烟气余热回收节能器的应用研究[J]. 能源工程, 2007(3): 70-72.

[6] Katharina K, Russell M, Marian K, et al. Industrial excess heat recovery in industry-city networks: A technical, environmental and economic assessment of heat flexibility[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 193(193): 771-783.

[7] 施明, 刘红, 李伟国, 等. 烟熏炉加热仓流动性能研究[J]. 轻工机械, 2016, 34(4): 79-82.

[8] 冯剑斌. 食品的烟熏设备[J]. 食品科技, 2004(1): 47-49.

[9] 施明, 郭锡铎. 烟熏炉原理与应用技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016: 32-45.

[10] 刘宏洋. 烟熏炉的选择和设计要求[J]. 肉类工业, 2001(6): 8-9.

[11] 沈施佳. 基于CFD的烟熏炉节能装置关键技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.