

# 套袋机热封刀拓扑分析及结构优化

马靖<sup>1,2</sup>, 魏上云<sup>2,3</sup>, 胡晓兵<sup>2,3</sup>, 罗庆怡<sup>2,3</sup>

(1. 四川省宜宾普什集团有限公司技术中心, 宜宾 644007;

2. 宜宾四川大学产业技术研究院, 宜宾 644005; 3. 四川大学机械工程学院, 成都 610065)

**摘要:** 为了降低热封刀的加热等待时间, 同时将加热管产生的能量集中到热封膜接触面上, 本文对包装机中热封刀结构进行改进. 首先, 我们建立热封刀温度场模型, 并检验模型的准确性; 然后, 利用 Ansys Workbench 中目标驱动优化工具对热封刀特定尺寸进行优化; 其次, 利用 Ansys Workbench 中 Genesis 模块对热封刀结构进行拓扑分析并优化; 在两者优化的基础上利用试凑法进行仿真实验, 逐步调整热封刀尺寸. 最终在封膜质量得到保证以及热封刀安装尺寸不变的情况下, 加热管产生的能量大部分集中到封膜接触面上, 而且封膜接触面的最高温度从 160.25 °C 提高至 373.61 °C. 结果表明借助 Ansys Workbench 仿真软件对热封刀结构进行改进, 可以达到降低热封刀的加热等待时间, 同时将加热管产生的能量集中到热封膜接触面上的目的.

**关键词:** 热封刀; 温度场; 尺寸优化; 拓扑优化

**中图分类号:** TB486.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.033002

## Topology analysis and structure optimization of the heat-sealing knife of the bagging machine

MA Jing<sup>1,2</sup>, WEI Shang-Yun<sup>2,3</sup>, HU Xiao-Bing<sup>2,3</sup>, LUO Qing-Yi<sup>2,3</sup>

(1. The Technology Center of Sichuan Yibin Pushi Group Company, LTD, Yibin 644007, China;

2. Industrial Technology Research Institute of Yibin Sichuan University, Yibin 644005, China;

3. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In order to reduce heating waiting time of the heat-sealing knife, and concentrate energy generated by the heating tube on the contact surface of heat-sealing film, an improvement meoth is proposed for the structure of heat-sealing knife in the packaging machine. The temperature field model of heat-sealing knife is established first and its accuracy is verified. The goal-driven optimization tool in Ansys Workbench is then used to optimize the specific size of heat-sealing knife, and the topological analysis is performed and the structure of heat-sealing knife is optimized with the Genesis module in Ansys Workbench. On the basis of the two above optimization, the trial and error method is used in simulation experiments and the size of the heat sealing knife is gradually adjusted. Finally, under the condition that the quality of the sealing film is guaranteed and the installation size of the heat sealing knife remains unchanged, most of the energy generated by the heating tube is concentrated on the sealing film contact surface, and the maximum temperature of the sealing film contact surface is increased from 160.25 °C to

收稿日期: 2021-12-06

基金项目: 川大-宜宾校地合作项目(2019CDYB-13)

作者简介: 马靖(1969-), 女, 高级工程师, 主要研究工业电气自动化. E-mail: 1902979286@qq.com

通讯作者: 胡晓兵, E-mail: huxb@scu.edu.cn

330.11 °C. According to the simulation result, with the help of Ansys Workbench simulation software, the structure of heat-sealing knife is improved, which can achieve the purpose of reducing heating waiting time of the heat-sealing knife, and the energy generated by the heating tube is concentrated on the contact surface of heat-sealing film at the same time.

**Keywords:** Heat sealing knife; Temperature fields; Size optimization; Topology optimization

## 1 引言

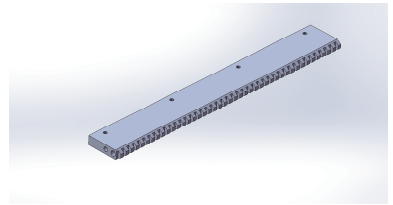
近年来,智能包装行业发展迅速<sup>[1]</sup>,而热封作为包装过程最为关键的环节,起着决定性的作用,因此对于热封装置的研究有着重要的意义. Aghkand 等<sup>[2]</sup>和王孟萍等<sup>[3]</sup>模拟了热封过程的温度场分布. 曹菲等<sup>[4]</sup>研究了热封温度,热封压力以及热封时间对于热封质量的影响. 魏银文等<sup>[5]</sup>通过改变加热丝排布结构提高热封质量. 周大双等<sup>[6]</sup>通过改进热封烫刀中加热管的数量以及排布结构提高热封质量. 以上文献只研究了热封装置对于热封质量的影响,以及如何对热封装置改进从而提高热封质量. 对于包装机而言,开机后需要等待热封装置达到设定温度值后才能正常工作,在某些大型包装机中这个过程尤为漫长,因此降低这个等待时间可以提高包装机的包装效率. 同时在热封过程中,热封刀只有与热封膜接触的部分是工作面,其余都是非工作面,加热管产生的能量有很大一部分都扩散到非工作面上,造成浪费. 因此研究如何让加热管产生的能量集中到热封工作面对于减少机器的能耗也具有实际意义. 目前鲜有学者对这两个方面进行研究. 本文则在保证热封质量的前提下,对以上两个方面对包装机热封刀进行结构优化,提高包装机的包装效率以及降低包装机的能耗.

## 2 热封刀温度场

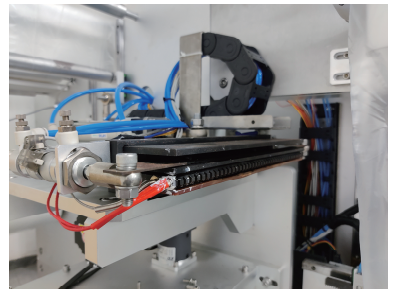
### 2.1 封刀模型

本文采用一款自研的 TD150 全自动套袋机作为研究模型. 全自动套袋机热封刀三维模型以及实际安装实物如图 1 所示. 热封刀贴合面是与套袋机另一侧相同尺寸的热封刀进行贴合挤压完成封膜. 由于在实际安装现场,热封刀安装孔中会拧入螺钉填充安装孔,且安装孔本身尺寸较小,对于整个热封刀的传热产生的影响可以忽略;同时温度传感器安装孔尺寸也较小,对整体传热影响也可以忽略. 因此,我们可以对热封刀三维模型做如下简化:将热封刀上的安装孔以及温度传感器安装孔作填充处理. 根据传热学原理<sup>[7]</sup>,短时间内环境的变化不

会引起较大的温差变化. 同时,对于温度不高的热封刀,热辐射这一传热方式也可以忽略<sup>[8]</sup>. 基于本文实验均在实验室环境下进行,因此本文的模型可以作如下规定:加热管的功率恒定不变,周围的环境温度不变,热封刀与其它零件的接触面看做以热对流方式进行热交换<sup>[9,10]</sup>.



(a) 热封刀三维模型



(b) 实际热封刀

图 1 热封刀

Fig. 1 Heat sealing knife

### 2.2 有限元分析

常见传热问题的边界条件可以分为三类<sup>[11]</sup>.

第一类:

$$t|_{\Gamma} = t_0 \quad (1)$$

第二类:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} |_{\Gamma} = q \quad (2)$$

第三类:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} |_{\Gamma} = \alpha(t - t_f) \quad (3)$$

式中, $\Gamma$ 为物体边界; $t_0$ 为初始温度; $\lambda$ 为材料的热导率; $q$ 为热流密度; $\alpha$ 为热扩散系数,可由材料比热容以及材料密度求出; $t_f$ 为流体介质的温度.

本文采用 Ansys Workbench 对热封刀进行研究分析<sup>[12]</sup>,热封刀整体外形尺寸为 300 mm×40

mm×10 mm, 材料为 45 钢, 密度为 7850 kg/m<sup>3</sup>. 由于热封刀与环境以热对流进行热交换, 根据式(3), 我们需要知道材料的比热容以及热导率. 但是 45 钢的比热容以及热导率是随温度改变而逐渐变化的<sup>[13]</sup>, 因此需要在软件中加以定义, 以符合实际情况. 两者随温度的变化过程见表 1. 本文研究套袋机所在实验室环境为 18 °C, 且根据前文所作规定, 设置环境温度恒定为 18 °C. 本文研究模型是通过加热管以热流的方式对热封刀进行加热, 属于第二类边界条件, 由于加热管在安装孔中与热封刀紧密接触, 因此可以以热功率代替热流, 套袋机加热管功率为 300 W, 则设定加热热功率为 300 W. 热封刀与环境之间通过热对流进行传热, 属于第三类边界条件, 参考文献[14]定义热封刀与环境的对流换热系数为 8.45 W/(m<sup>2</sup>·°C).

表 1 45 钢比热容及热导率

Tab.1 Specific heat capacity and thermal conductivity of 45 steel

温度/°C	比热容/ (J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	热导率/ (W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
100	480	43.53
200	498	40.44
300	524	38.13
400	560	36.02

本文在 Ansys Workbench 中对材料密度、比热容和热导率进行定义, 随后导入热封刀模型, 再对模型进行网格划分, 由于模型的结构特殊性, 故采用四面体单元进行划分. 由于加热管安装孔的存在, 单采用四面体单元划分会影响整体网格划分的质量, 对后期仿真结果产生影响, 因此需要对加热管安装孔附近进行加密处理, 以提高网格质量. 为了避免网格数量对于仿真结果产生影响, 我们进行网格无关性验证<sup>[15]</sup>: 在相同的条件下, 选取 6 组不同数量的网格进行实验, 以热封刀贴合面的最高温度为衡量指标. 实验结果如图 2 所示, 结果显示当网格数量到达 75 249 时, 贴合面最高温度随网格数量的变化趋于稳定, 网格的单元质量平均为 0.7639, 标准偏差为 0.1425, 质量较好. 综合考虑网格质量以及仿真运算速度两个方面, 本文最终采用网格数为 75 249 进行研究.

根据前述定义的材料属性以及边界条件, 我们选取合适的步长进行仿真实验. 步长过长会导致仿真实验的不准确, 步长过短会对计算机的性能要求

过高, 导致计算出错. 综合考虑以上两方面要求, 本文选择最大步长为 0.5 s, 最短步长为 0.05 s. 本文所研究套袋机膜的尺寸为 140 mm×0.01 mm; 根据工厂实际封膜操作得知, 该膜的最佳热封温度为 160 °C. 当实验运行至 160 s 时热封刀贴合面最高温度达到 160 °C, 因此选取此刻的仿真结果进行分析, 结果如图 3 所示. 热封刀接触面沿轴向的长度为 300 mm, 但实际所需要的热封宽度为 140 mm. 根据图 3 可以看出, 在热封接触面中点温度最高为 160.25 °C, 两侧的温度最低为 159.27 °C. 温差为 0.98 °C. 由于实际封膜的宽度为 140 mm, 考虑这个区间内的温度情况, 最低温度为 160.19 °C, 温差为 0.06 °C, 且温度分布均匀. 这个温差可以很好地保证封膜的质量. 但是非工作面的温度也达到了 160 °C, 这就造成了加热管能量的浪费. 因此研究如何将能量集中到膜接触面上具有现实意义. 此外, 根据仿真结果可知, 本文研究包装机所需要的待机时间为 160 s, 如何对热封刀进行改进以减少等待时间, 对提高包装机热封效率有实际意义.

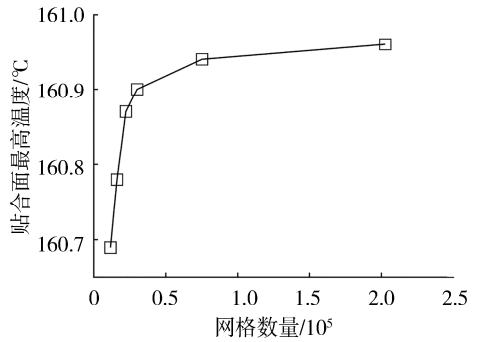


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification



图 3 热封刀贴合面表面温度

Fig. 3 Surface temperature of hot sealing knife

### 2.3 模型验证

为了验证本文所建模型的准确性, 通过热封刀上温度传感器采集 160 s 内的温度数据与仿真模型中相应温度传感器所在位置温度数据作比较. 温度传感器是与西门子 S7-200 Smart PLC 的 AT04

模拟量输入模块相连接. PLC 与麦格米特 MZ800 型号触摸屏通过串口通信, 触摸屏实时显示温度信息. 启动机器, 每隔 5 s 对触摸屏上加热管 1(本文所研究热封刀上的加热管)的温度数据进行一次采样, 采样过程见图 4.

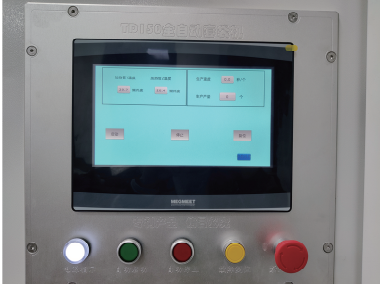


图 4 触摸屏温度采样

Fig. 4 Touch screen temperature sampling

我们将实际采样所得数据与仿真数据进行比较, 比较结果见图 5. 根据图 5 可以看出, 在开始的 0~30 s 时间内仿真温度值与实际温度值有细微偏差, 在后续的时间里, 两者偏差很小甚至重合, 由此可见本文建模准确.

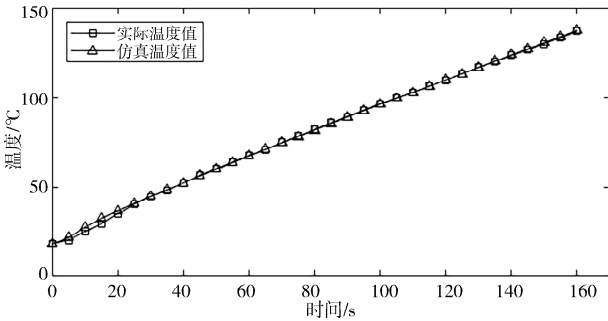


图 5 采样温度与仿真温度对比

Fig. 5 Comparison between sampling temperature and simulation temperature

### 3 热封刀结构优化

在对热封刀结构进行优化之前, 我们需要考虑两个方面的问题: (1) 热封刀结构的改进不能改变原有热封刀的安装尺寸, 只对热封刀进行改进, 而不影响其他零件; (2) 热封刀结构的改进不能影响封膜的质量以及封膜的尺寸. 考虑以上两个方面, 我们利用 Ansys Workbench 进行尺寸优化以及拓扑优化实现对热封刀结构的改进.

#### 3.1 尺寸优化

由于不能改变热封刀的安装尺寸以及影响封膜的质量, 因此将热封刀加热管安装孔与贴合面的

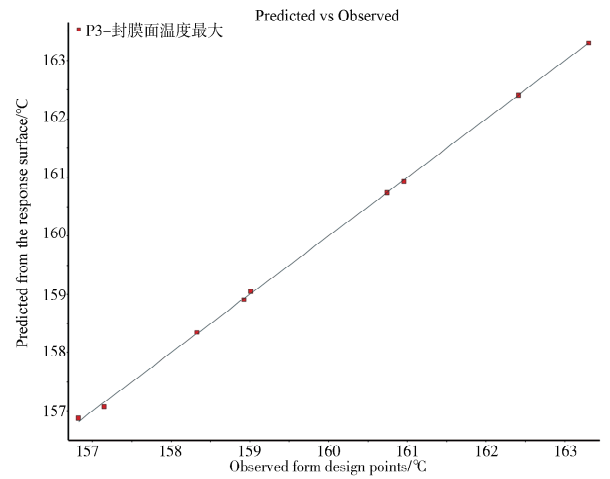
距离  $L$  作为输入变量 1, 热封刀上表面与前刀面夹角  $\alpha$  为输入变量 2, 通过在 Solidworks 2020 中对待修改尺寸进行“DS\_”命名, 使得该尺寸可以在 Ansys Workbench 中可以被识别<sup>[16]</sup>. 具体热封刀尺寸变量见图 6.



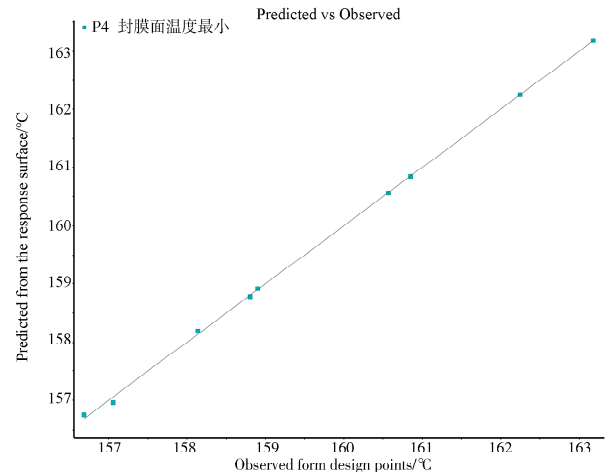
图 6 热封刀尺寸变量

Fig. 6 Heat sealing knife size variable

本文选取热封刀封膜接触面上的温度最大值以及最小值为输出参数, 借助 Ansys Workbench 目标驱动优化工具<sup>[17]</sup>, 通过 DOE 试验设计、响应曲面拟合以及多目标优化分析 3 个步骤, 改变待修改结构尺寸参数, 使得优化目标达到相对最优数值.



(a) 封膜面温度最大值拟合度曲线



(b) 封膜面温度最小值拟合度曲线

图 7 拟合度曲线

Fig. 7 Fitting curve



3.1.1 DOE 实验设计 将选定的输入参数以及输出参数导入,同时根据实际情况制订输入输出参数的边界.通过 DOE 实验设计自动生成 9 组实验点.

3.1.2 响应面拟合 得到 9 组实验点的数据之后,Ansys Workbench 采用二次插值函数的方式对实验数据进行拟合,得到拟合度曲线,灵敏度模型以及响应面模型.通过拟合度曲线来检验响应面模型与实验点数据的拟合准确性,拟合度曲线见图 7.根据图 7 可以看出,响应面模型的预测值与实验点数据值基本一致,拟合性高.

分别对两个因变量与两个自变量进行回归分析,得出各因变量与自变量的关系敏感图见图 8.根据图 8 可以看出,两个自变量分别对于两个因变量的影响大致相同,同时自变量  $L$  对于因变量的影响最大占 80%,自变量  $\alpha$  对因变量的影响次之占 20%.综合以上得出最终响应面模型如图 9.

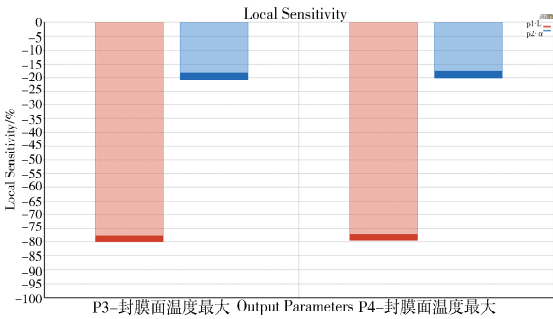


图 8 各因素灵敏度关系

Fig. 8 Sensitivity relationship of various factors

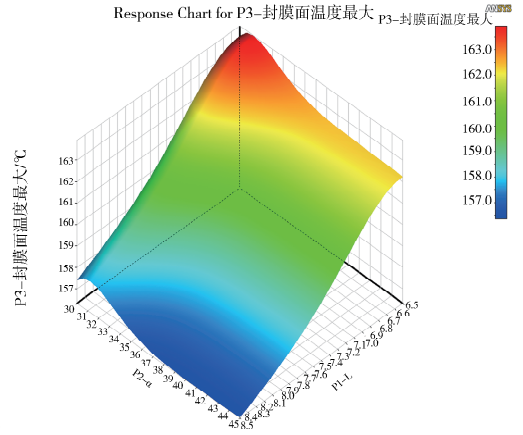
3.1.3 多目标优化 根据优化要求,既要保证热封的质量同时让热封接触面的温度升高.因此以热封接触面温度最大值变量达到最大,同时热封接触面温度最小值变量也达到最大值为目标<sup>[18]</sup>.我们通过遗传算法对目标函数进行求解,得到三组候选解如图 10.本文综合考虑选取第二组解为最优解.

### 3.2 拓扑优化

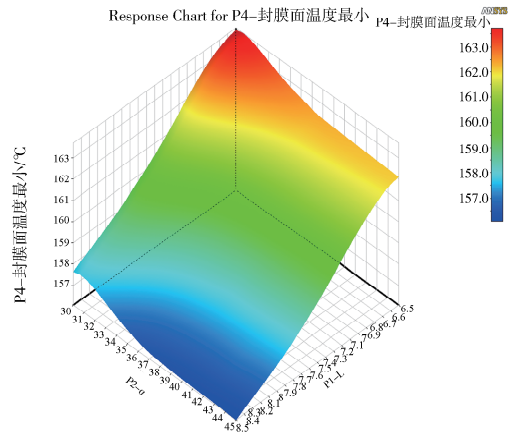
3.2.1 Genesis 模块 Genesis 是一个将有限元求解器和高级优化算法基于一体的结构优化软件,主要用于结构轻量化和拓扑优化设计<sup>[19]</sup>.Genesis 优化模型的构建基于高级近似概念方法,可以快速可靠地进行优化迭代,计算效率高,所需优化迭代次数更少.Genesis 算法模型如下式所示.

$$\begin{cases} \min F(\rho) = \alpha \frac{\lambda_i(\rho)}{\lambda_1(\rho)} + \beta \frac{\mu_1(\rho)}{\mu_i(\rho)} + (1 - \alpha - \beta) \frac{\nu_1(\rho)}{\nu_i(\rho)} \\ \text{find } \rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)^T, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $F(\rho)$  为多目标函数;  $\alpha$  为应变能目标函数的权重;  $\lambda_i(\rho)$  为应变能在第  $i$  轮迭代时的响应值;  $\mu_i(\rho)$  为封膜接触面温度最大值在第  $i$  轮迭代时的响应值;  $\nu_i(\rho)$  为封膜接触面温度最小值在第  $i$  轮迭代时的响应值;  $n$  为网格单元总数.



(a) 因变量为  $P_3$  的响应面模型



(b) 因变量为  $P_4$  的响应面模型

图 9 响应面模型

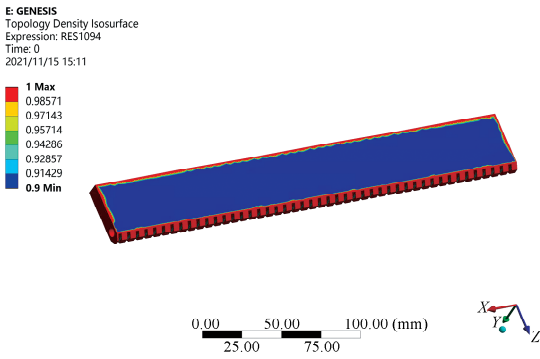
Fig. 9 Response surface model

		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
9				
10	P1-L	6.5016	6.5037	6.5039
11	P2- $\alpha$	31.057	31.004	30.95
12	P3-封膜面温度最大值/℃	★ 163.9	★ 163.9	★ 163.89
13	P4-封膜面温度最小值/℃	★ 163.7	★ 163.71	★ 163.71

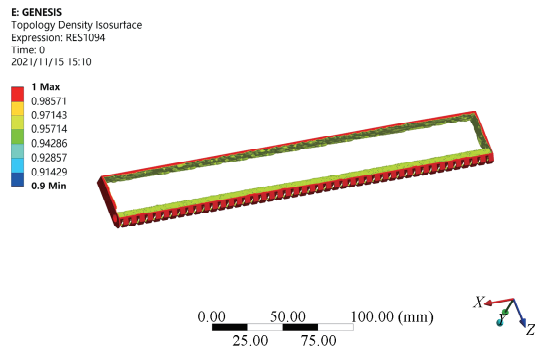
图 10 候选解

Fig. 10 The candidate solutions

3.2.2 拓扑优化过程 将本文建立模型导入 Genesis 模块,设置响应的边界条件,定义优化设计变量以及目标函数.以网格单元的密度为优化变量,封膜接触面的最高温度为目标函数.为了达到优化的目标,需要让目标函数达到最大值.再对模型的待优化区域进行优化,加热管安装孔附近区域需要保留.最终优化结果如图 11 所示.



(a) 显示待去除区域



(b) 隐藏待去除区域

图 11 拓扑优化结果

Fig. 11 Topology optimization results

### 4 联合优化实验

由于拓扑优化模型中忽略了热封刀安装孔以及温度传感器孔,拓扑优化的结果会影响实际安装.因此我们将以上因素考虑进去,对拓扑优化结果进行调整,同时结合尺寸优化的结果,对热封刀结构做如下改进:(1)取参数  $L=6.5037$ ; (2)取参数  $\alpha=31.004$ ; (3)对热封刀中间进行挖方孔处理.改进后的热封刀结构如图 12.

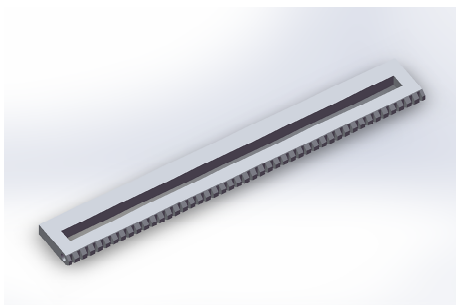


图 12 一次改进热封刀

Fig. 12 Once improved heat sealing knife

本文将改进后的热封刀模型导入 Ansys Workbench,按照前文所定约束以及边界条件进行

仿真实验,仿真结果如图 13 所示.

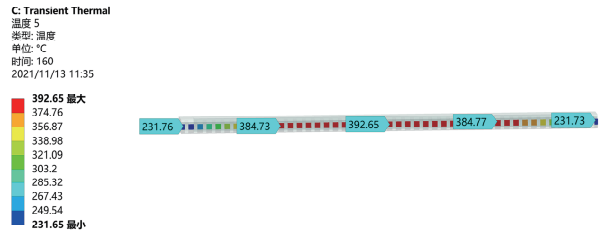


图 13 一次改进后温度仿真结果

Fig. 13 Temperature simulation results after an improvement

根据仿真结果可以看出,相对改进前热封贴合面温度大幅度上升,最高温度提高了 145.02%.但是在封膜接触面上温差达到了 7.92 °C.根据文献 [20],这个温差不能保证热封膜的质量,因此还需要对热封刀结构进行二次改进.考虑热封贴合面温度分布情况,对挖孔的形状进行改进,采用“凹”形孔.二次改进后热封刀模型如图 14.

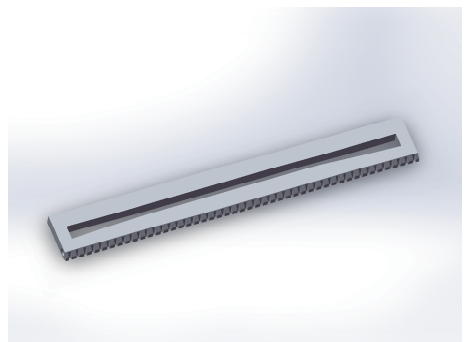


图 14 二次改进热封刀模型

Fig. 14 Second improvement of heat sealing knife model

我们对二次改进后的模型再次进行仿真实验,为了保证封膜的质量,将“凹”形孔的具体尺寸进行调整,采用试凑法 [21],逐步调整,以达到最优的效果.“凹”形孔的具体调整尺寸如图 15 所示.

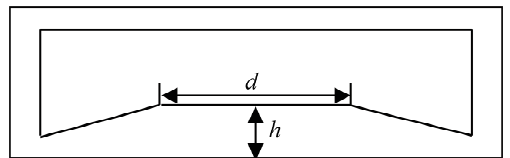


图 15 “凹”形孔调整尺寸

Fig. 15 "Concave" hole resizing

本文结合一次改进模型仿真实验结果,首先,取  $d=150\text{ mm}$ ,  $h=13.00\text{ mm}$ ,进行仿真实验,在热封膜接触面上温度最大值为  $360.34\text{ °C}$ ,温度最小值为  $358.19\text{ °C}$ ,差值为  $2.15\text{ °C}$ ;由于温差较大不

能满足要求,因此我们增大  $h$  的数值取  $h=13.10$  mm,再次进行实验,观测温差数值,温差为  $2.41$   $^{\circ}\text{C}$ ;从第 2 次实验可以发现温差变大,因此选择减小  $h$  的数值,选取  $h=12.90$  mm,进行实验,温差为  $1.89$   $^{\circ}\text{C}$ ,温差变小.以上实验我们可以得知,减小  $h$  的数值可以降低热封膜贴合面的温差.我们继续减小  $h$  的数值,直至温差不再减小,此时,  $h=12.35$  mm,温差为  $0.83$   $^{\circ}\text{C}$ .接下来,我们保证  $h$  的值不变,调整  $d$  的大小.取  $d=149$  mm,实验仿真温差为  $0.87$   $^{\circ}\text{C}$ ,则调整  $d$ ;取  $d=151$  mm.温差为  $0.79$   $^{\circ}\text{C}$ .继续减小  $d$  的取值发现温差增大,停止实验.仿真实验中间过程所得数据见表 2.

表 2 试凑法实验过程数据

Tab. 2 trial-and-error experimental process data

实验组号	$d/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	温差/ $^{\circ}\text{C}$
1	150	13.00	2.15
2	150	13.10	2.41
3	150	12.90	1.89
4	150	12.50	1.07
5	150	12.00	1.40
6	150	12.30	0.85
7	150	12.40	0.90
8	150	12.20	0.93
9	150	12.25	0.87
10	150	12.35	0.83
11	149	12.35	0.87
12	151	12.35	0.79
13	152	12.35	0.82

我们最终取第 12 组的实验数据,  $d=151$  mm,  $h=12.35$  mm,热封刀封膜接触面的温差低至  $0.79$   $^{\circ}\text{C}$ ,可以保证较好的封膜质量.二次改进模型温度仿真结果如图 16 所示.

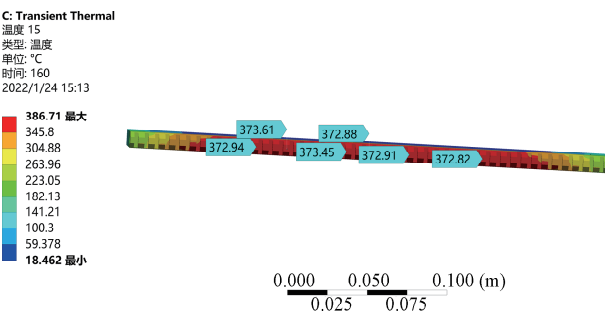


图 16 二次改进模型仿真结果

Fig. 16 Second improvement model simulation results

为了更直观地表示热封刀机构改进后相对原有结构所具有的提升,我们从两个方面再次进行仿

真实验:(1) 保持加热管功率以及其他边界条件不变,计算热封刀封膜接触面到达  $160$   $^{\circ}\text{C}$ 所需要的时间;(2) 保持加热时间不变,以及其他边界条件不变,计算热封刀接触面达到  $160$   $^{\circ}\text{C}$ 所需要的加热管功率.实验所得数据与原有数据对比见表 3.

表 3 实验数据对比

Tab. 3 Comparison of experimental data

状态	加热管加热等待时间/s	加热管功率/W
改进前	160	300
改进后	130	134

根据表 3 数据得出,改进后模型的套袋机开机后等待时间减少了  $30$  s,在相同条件下,加热管功率可以降低至  $134$  W,大幅降低能耗.

## 5 结 论

利用 Ansys Workbench 仿真软件对 TD150 全自动套袋机的热封刀进行尺寸优化以及拓扑优化.尺寸优化利用遗传算法可以求解出热封刀尺寸变量的最优值.拓扑优化可以根据预设目标求解出热封刀结构需要更改的地方.通过两种优化方式优化结构,再在改进的结构上利用试凑法调整挖孔的尺寸,降低封膜接触面的温差,保证封膜的质量.最终改进后的热封刀可以在更短的时间内达到目标封膜温度,同时可以将加热管产生的热量集中到封膜接触面上.这对于提高包装机的包装效率以及降低包装机的能耗提供了一种新的研究思路,同时也为以后对不同型号包装机热封刀的结构改进奠定了基础.

## 参考文献:

[1] 赵冬菁, 仲晨, 朱丽, 等. 智能包装的发展现状、发展趋势及应用前景[J]. 包装工程, 2020, 41: 72.

[2] Aghkand Z K, Dil E J, Aji A, *et al.* Simulation of heat transfer in heat sealing of multilayer polymeric films; Effect of process parameters and material properties [J]. Ind Eng Chem Res, 2018, 57: 14571.

[3] 王孟萍, 石秀东, 黄巧, 等. 基于感应加热的食品纸盒包装机封口温度场研究[J]. 包装工程, 2017, 38: 130.

[4] 曹菲, 郝晓秀. 热封参数对食品软包装薄膜热封性能的影响[J]. 数字印刷, 2020(4): 68.

[5] 魏银文, 朱磊, 高贵虹. 基于 SolidWorks 96 孔薄膜热封板温度场模拟与优化设计[J]. 包装工程,

- 2013, 34: 9.
- [6] 周大双, 杨玉萍, 季彬彬, 等. 制袋机热封装置温度场模拟与优化设计[J]. 包装工程, 2018, 39: 178.
- [7] 潘小勇. 流体力学与传热学[M]. 南昌: 江西高校出版社, 2019.
- [8] 张玉存, 田孟奇, 李亚彬. 基于瞬态传热的含裂缝环形锻件传热模型[J]. 中国机械工程, 2018, 29: 1240.
- [9] 张凯, 胡众欢, 杨明金, 等. 太阳能干燥箱的自然对流数值模拟与实验研究[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2020, 45: 58.
- [10] Campo A, Arici M. Numerical analysis of unsteady heat conduction in regular solid bodies comprising natural convection to nearby fluids [J]. Heat Transf-Asian Res, 2018, 47: 887.
- [11] Lv C, Wang G J, Chen H. Estimation of time-dependent thermal boundary conditions and online reconstruction of transient temperature field for boiler membrane water wall[J]. Int J Heat Mass Tran, 2020, 147: 94.
- [12] 李双俐, 李志华, 喻新荣. 基于多目标优化的虚拟机放置方法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2020, 32: 356.
- [13] 朱子宏, 魏宪军. 45 钢零件淬火过程中温度场的 ABAQUS 模拟 [J]. 现代制造工程, 2009, 2009: 59.
- [14] 刘红, 阮灵伟, 蒋兰芳, 等. 基于 ANSYS 的热板温度场模拟与优化设计[J]. 模具工业, 2010, 36: 18.
- [15] 董欣勃, 魏操兵, 高晋, 等. 冷压缩机温度场仿真及其冷却参数优化分析[J]. 工程热物理学报, 2020, 41: 1851.
- [16] 龚中良, 游江辉, 梁力, 等. 梁式称重传感器弹性体的固有频率的提高及结构参数优化[J]. 传感器与微系统, 2019, 38: 29.
- [17] 杨肖龙. 基于 ANSYS Workbench 的海洋模块钻机基座多目标优化设计[J]. 中国海上油气, 2020, 32: 165.
- [18] 阮杰, 魏国梁, 林炜钰. 目标假车高速实心轮胎温度场仿真及温升控制[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2020, 41: 670.
- [19] 宋占杰, 管殿柱, 林冠屹. 基于 ANSYS Workbench 的龙门式折弯机机架模态分析及工作台拓扑优化[J]. 锻压技术, 2020, 45: 154.
- [20] 赵漫漫, 卢立新. 热封温度对 PET/Al/PE 包装膜热封性能的影响[J]. 合成树脂及塑料, 2008, 25: 57.
- [21] 张伟博, 舒林森. 基于正交试验与 BP 神经网络的 304 不锈钢激光切割工艺参数优化[J]. 应用激光, 2021, 41: 780.

#### 引用本文格式:

中文: 马靖, 魏上云, 胡晓兵, 等. 套袋机热封刀拓扑分析及结构优化[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2022, 59: 033002.

英文: Ma J, Wei S Y, Hu X B, *et al.* Topology analysis and structure optimization of the heat-sealing knife of the bagging machine [J]. J Sichuan Univ; Nat Sci Ed, 2022, 59: 033002.