

基于 SolidWorks 96 孔薄膜热封板温度场模拟与优化设计

魏银文¹, 朱磊¹, 高贯虹²

(1. 常州大学, 常州 213000; 2. 常州福生生物技术有限公司, 常州 213000)

摘要: 针对生化分析领域 96 孔样品池薄膜热封的热封板温度场分布问题, 运用 SolidWorks 三维软件进行建模, 并运用插件 Simulation 对其施行有限元分析和优化设计。首先, 对现有的薄膜热封板进行了建模仿真分析, 其次经过实验验证, 得出模拟数据与实测数据吻合, 说明该模拟仿真的思路和方法适合于优化此类非等温平板的传热问题的。最后通过对热封板中的电热丝不同排布及不同排布方式中电热丝绕行间距的调整, 使得优化设计方案达到热板表面最大温差在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

关键词: 薄膜热封; 有限元分析; 优化设计; 电热丝; SolidWorks 仿真

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)17-0009-03

Temperature Field Simulation and Optimization Design of 96-hole Thin-film Heat-sealing Plate Based on SolidWorks

WEI Yin-wen¹, ZHU Lei¹, GAO Guan-hong²

(1. Changzhou University, Changzhou 213000, China; 2. Changzhou Biofortune Sciences Corporation Limited, Changzhou 213000, China)

Abstract: In order to solve the problem of the 96-hole thin film heat-sealing plate's temperature field distribution in the field of biochemical analysis, SolidWorks 3D modeling software with its plug-ins Simulation was applied to analyze and design the heat plate. Simulation analysis was carried out on the existing thin-film heat sealing plate. The simulation data were verified with experiment. The results showed that simulation data coincide with experimental data, which prove that the idea and method is suitable for simulation to optimize such non-isothermal plate. The heating wire arrangement in the plate was adjusted according to the simulation, which reduce the maximum temperature difference on the surface of the hot plate within $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: film sealing; finite element analysis; optimal design; heating wire; SolidWorks simulation

96 孔样品池薄膜热封板主要用于生化分析领域, 包括分子扩增仪、PCR 仪等。PCR (Polymerase Chain Reaction) 技术是 20 世纪 90 年代才兴起于美国, 虽然近 10 年在我国也兴起了研究热潮, 但是成型的产品很少, 主要还是依靠进口, 因此有关 96 孔样品池薄膜热封板的分析也很稀少。

近年来国内对于热板温度场分布的研究取得了很大的进展。华丹红^[1]等对热管功率排布和热电偶位置进行了优化, 使热板温度场分布控制在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 李爽^[2]、董林福等采用遗传算法全局搜索和序列二次规划局部寻找组合的优化方法, 对平板硫化机热板温度

场进行优化设计, 使最小温差达到了 $4.26\text{ }^{\circ}\text{C}$; 刘红^[3]、阮灵伟等对热管间距和热管功率进行优化分析, 使热板表面最大温差降低了 61%。目前, 这些研究大多是运用热管或 TEC (Thermoelectric Cooler, 半导体制冷器) 作为发热源, 而且极少考虑到热板内电热丝作为发热源及其电热丝绕行排布对温度场分布的影响。

采用电热丝作为发热源, 其具有成本低廉、控制简便等优点。基于 SolidWorks 三维设计软件及其插件 Simulation 对 96 孔薄膜热封板中电热丝的绕行排布与排布间距进行有限元分析和优化, 以达到减小热

收稿日期: 2013-05-14

基金项目: 江苏省科技支撑计划 (BE2011652)

作者简介: 魏银文 (1987-), 男, 常州人, 常州大学硕士生, 主要研究方向为机械平移机构设计和仿真分析。

封板面温差的目的。

1 薄膜热封板温度场有限元分析

1.1 薄膜热封板 3D 模型

对薄膜热封板的传热过程作以下假设:周围外界温度恒定,板与周围外界以热对流的方式进行热交换,不考虑辐射散热,材料物性参数不随外界温度变化。

此热板尺寸为 120 mm×76 mm×3 mm,由上下两块板组合而成,下板为热封板,上板为电热丝盖板。运用 SolidWorks 建立薄膜热封板的简化模型见图 1。

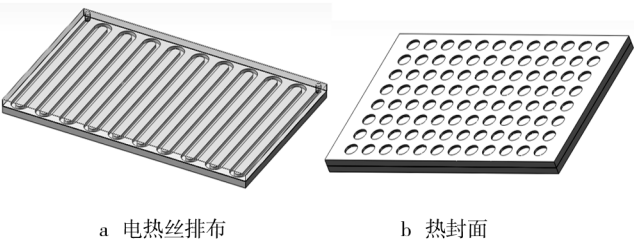


图 1 薄膜热封板 3D 图
Fig. 1 3D map of film heat sealing plate

1.2 数学模型及有限元分析

常物性、稳态、三维且无内热源问题的温度场控制方程式^[4]为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \tag{1}$$

此式也称作拉普拉斯(Laplace)方程,式中: T 为稳态温度(℃)。

稳态导热问题的常见边界条件可归纳为以下 3 类:

$$T|_r = T_0 \text{ (第 1 类边界条件)} \tag{2}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = q \text{ (第 2 类边界条件)} \tag{3}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h(T - T_f) \text{ (第 3 类边界条件)} \tag{4}$$

根据薄膜热封板稳态导热过程基本假设,分别在热板上表面、下表面和侧面设定对流边界条件(第 3 类边界条件),同时在热板内槽面设定第 2 类边界条件,用功率代替热流密度。

薄膜热封板材质为铝合金 6061-T6,密度 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$,比热 $C_p = 170 \text{ J/(kg} \cdot \text{℃)}$,导热系数 $\lambda = 896 \text{ W/(m} \cdot \text{℃)}$ 。查阅文献[5],以确定自然对流换热系

数,热板初始温度和周围空气温度为 24 ℃,输入功率为 32.84 W。

使用 SolidWorks Simulation 插件中的热应力算例进行有限元分析。属性定义为稳态分析,当材料、约束和载荷定义完成后,SolidWorks 使用二阶实体四面体单元^[6]对物理实体模型进行标准网格划分,单元大小为 2.542 99 mm,公差为 0.127 125 mm,自动过渡,总共有 58 228 个单元。运行分析结果见图 2—3。

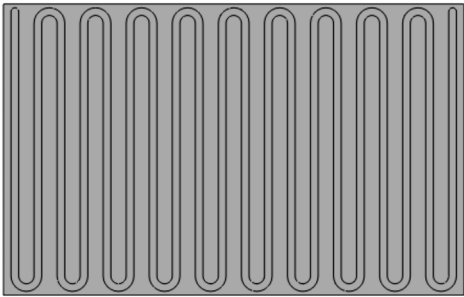


图 2 现行设计的布线
Fig. 2 Present arrangement drawing

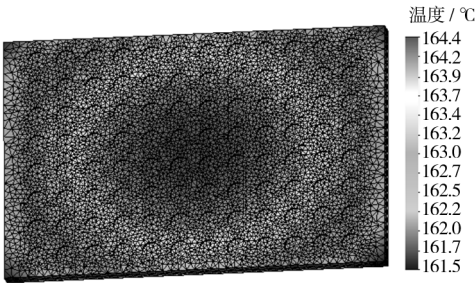


图 3 现行设计的温度场分布
Fig. 3 Present temperature field distribution

由图 3 可见,薄膜热封板最高温度为 164.4 ℃,最低温度出现在热板的 4 个边缘为 161.5 ℃,最大温差为 2.9 ℃,这样的温差没有达到优化的标准。

为了验证基于 SolidWorks 的有限元仿真模拟是否与工程实际相符,采用 JK-XU/XA 多路温度巡检仪对薄膜热封板热封面进行温度测量,实验布置如下:巡检仪一共有 6 路,每路有 8 个测温探头,使用其中 4 路编号为 A,B,C,D 的测温探头与热板通过单组份有机硅灌封胶紧密粘合在一起,粘合位置见图 4,每组都按照 A 组的 8 个探头粘合在圆孔的中心处进行布置。实验时,热板 120 mm×76 mm 面水平向下放置。

由表 1 的实验数据可知:实验结果与模拟仿真基本吻合。

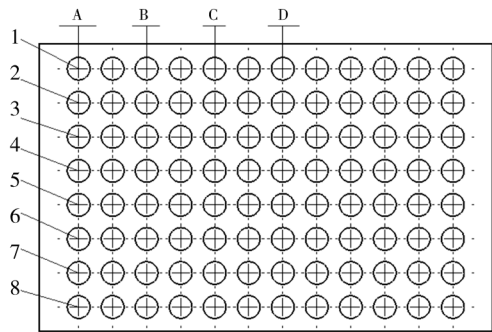


图 4 测量探头的放置

Fig. 4 The probe arrangement drawing

表 1 探头测量所得温度值(剔除不合理温度值)

Tab.1 The probe measured temperature value (exclude unreasonable data) ℃

探头编号	A	B	C	D
1	161.0	163.4	164.4	164.4
2	163.4	162.5	165.0	164.8
3	163.0	162.7	163.6	164.9
4	162.1	162.6	162.6	163.9
5	163.3	163.5	164.6	164.2
6	163.2	162.9	164.8	165.0
7	161.6	162.3	163.9	164.5
8	161.2	162.0	164.6	163.5

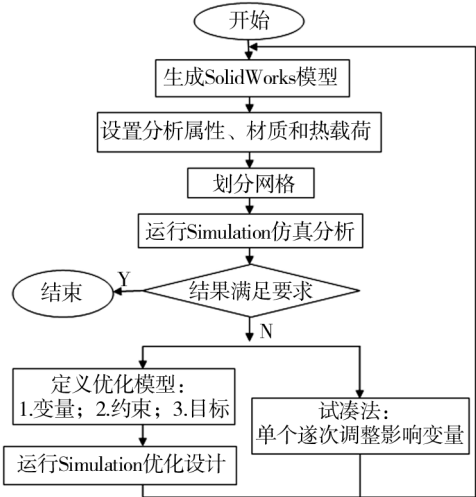


图 5 SolidWorks 优化设计流程

Fig. 5 SolidWorks optimal design flow chart

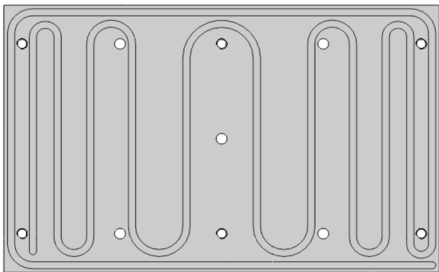


图 6 优化后的布线

Fig. 6 optimized arrangement drawing

2 薄膜热封板优化设计

从 1.2 节模拟仿真温度场分布图 3 和实验数据分析可知,在保证使用整根电热丝的情况下,由于薄膜热封板大面水平放置,故其在竖直平面上与外界空气的对流换热系数较高。为此可从电热丝的绕线排布方式及调整排布方式的间距来优化薄膜热封板的温度场。

基于 SolidWorks 优化设计流程参考文献[7]见图 5。

由于最初仿真薄膜热封板的温度场分布是中心温度高,四周温度低,且考虑到沿厚度方向对流换热系数高,故在优化时将热板的外围放置一圈电热丝,而后由外围向内部绕行排布电热丝。电热丝在内部绕行时的间距为设计变量,热板底面温差为目标函数。因为此优化设计变量较多,目标函数复杂,为降低成本,采用试凑逐步逼近的方法,调出模型调整间距后直接进行 Simulation 仿真,最后结果见图 6—7。

从图 7 模拟实验中得出热板热封面的最高温度

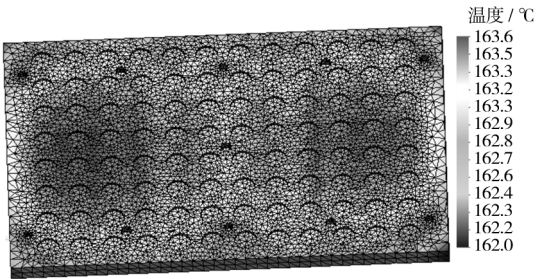


图 7 优化后的温度场分布

Fig. 7 optimized temperature field distribution

为 163.6 ℃,最低温度为 162.0 ℃,稳态温差为 1.6 ℃,满足优化设计要求。

3 结语

针对生化分析领域 96 孔样品池薄膜热封的 120 mm ×76 mm×6 mm 热封板温度场分布问题展开了讨论。

(下转第 32 页)

- 2004, 25(2): 28-32.
- HE Jing. Plastic Packaging Film Properties and Application Prospects[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(2): 28-32.
- [3] 刘娅. 包装薄膜的研制[D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.
- LIU Ya. The Development of the Packaging Film[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2004.
- [4] 聂柳慧. 共混薄膜的制备与研究[J]. 包装工程, 2005, 26(6): 148-150.
- NIE Liu-hui. Preparation and Research of Blend Membranes[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(6): 148-150.
- [5] 廖琳, 赵滩, 张路, 等. 不同添加剂对阴离子表面活性剂与多价阳离子沉淀行为的影响[J]. 石油勘探与开发, 2004(11): 13-16.
- LIAO Ling, ZHAO Tan, ZHANG Lu. Effects of Different Additives on Anionic Surfactant and Multivalent Cation Precipitation Behavior[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004(11): 13-16.
- [6] 陈晓勇. 塑料薄膜雾度及其控制的研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2010(8): 27-30.
- CHEN Xiao-yong. The Research Progress of Plastic Film the Fog Degree and Its Control[J]. Chemical Propellant and High Polymer Material, 2010(8): 27-30.
- [7] 张恒光, 杨福馨, 卢叶. 热能触发式变色薄膜的研制及其性能的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(11): 35-38.
- ZHANG Heng-guang, YANG Fu-xin, LU Ye. Research on the Preparation and Properties of the Heat Trigger Type Color Film[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 35-38.
- [8] 杨伟, 单桂芳, 唐雪刚, 等. LLDPE 吹塑薄膜的结构与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2006(4): 114-117.
- YANG Wei, SHAN Gui-fang, TANG Xue-gang. Structure and Properties of LLDPE Blown Film[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2006(4): 114-117.
- [9] 张彦奇, 华幼卿. LLDPE/纳米 SiO₂ 复合材料的力学性能和光学性能研究[J]. 高分子学报, 2003(5): 683-687.
- ZHANG Yan-qi, HUA You-qin. Research on the Mechanical Properties and the Optical Properties of LLDPE/Nano-SiO₂ Composite Materials[J]. Acta Polymerica Sinica, 2003(5): 683-687.
- [10] 徐栋, 陈宏书, 王结良, 等. 变色材料的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2011(3): 87-90.
- XU Dong, CHEN Hong-shu, WANG Jie-liang. Research Progress in Chromic Materials[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011(3): 87-90.

(上接第 11 页)

为了降低热板热封面的稳态温差, 首先对热封板进行了基于 SolidWorks 的有限元分析, 并展开实验对其可靠性进行验证; 其次基于分析结果, 对影响稳态温差的因素作出分析, 并提出改进方法; 最后结合 SolidWorks Simulation 的优化流程及目前热管和热电偶排布的局限性, 提出了通过电热丝不同绕线方式及排布间距来优化 96 孔样品池薄膜热封板, 以达到热封表面稳态温差为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的目标。

参考文献:

- [1] 花丹红. 注射机热板温度场数值分析及优化设计[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- HUA Dan-hong. The Numerical Simulation and Optimum Design on Temperature Field in the Hot Plate of Injection Machine[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.
- [2] 李爽, 董林福, 李旭日, 等. 电热平板硫化机热板温度场优化设计[J]. 橡胶工业, 2006, 53(12): 747-749.
- LI Shuang, DONG Lin-fu, LI Xu-ri. The Optimum Design on Hot Plate Temperature Field in Electric Heating Plate Vulcanizing Machine[J]. Rubber Industry, 2006, 53(12): 747-749.
- [3] 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(9): 18-21.
- LIU Hong, RUAN Ling-wei, JIANG Lan-fang. Hot Plate Temperature Field Simulation and Optimization Design Based on ANSYS[J]. Die Industry, 2010, 36(9): 18-21.
- [4] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- TAO Wen-quan. Heat Transfer Theory[M]. Xi'an: Xi'an Technological University Press, 2008.
- [5] DS SolidWorks@ Corporation. SolidWorks Simulation Advanced Tutorial (2011 Version)[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011.
- [6] DS SolidWorks@ Corporation. SolidWorks Simulation Basic Tutorial (2011 Version)[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011.
- [7] 李杨, 李光. 基于 SolidWorks 的托盘结构有限元分析及优化设计[J]. 包装工程, 2011, 32(19): 1-3.
- LI Yang, LI Guang. Structural Finite Element Analysis and Optimum Design of Pallet Via SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 1-3.