

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.03.015

基于拓扑优化的二板式注塑机动模板轻量化设计

张哲衍¹, 葛鹏翔¹, 娄军强¹, 傅南红², 李国平¹, 陈星欣², 柳丽¹

(1. 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江宁波 315211; 2. 海天塑机集团有限公司, 浙江宁波 315800)

摘要: 为提升注塑机工作性能及降低制造成本, 根据二板式注塑机动模板的最小加载面工况建立有限元模型, 采用基于变密度法的拓扑优化进行轻量化设计; 为快速获取优化所得模型结构, 对拓扑结果逼近建模, 在动模板的四个侧壁、背面等部位分别采用直线与圆弧组合、环形、半球形等规则形状进行模型重构, 并将关键尺寸参数化; 对优化前、后动模板进行仿真分析对比, 结果显示, 该优化模型的应力、应变有一定程度增加, 但均在工程许用范围内, 质量相较原始模型减轻 29.4%。

关键词: 二板式注塑机; 动模板; 拓扑优化; 逼近建模; 参数化

中图分类号: TQ320.5+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)03-0081-04

Lightweight Design for Moving Template of Two Plate Injection Molding Machine based on Topology Optimization

Zhang Zheyang¹, Ge Pengxiang¹, Lou Junqiang¹, Fu Nanhong², Li Guoping¹, Chen Xingxin², Liu Li¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Haitian Plastics Machinery Group, Ningbo 315800, China)

Abstract: In order to improve the working performance of the injection molding machine and reduce the cost of manufacturing, a finite element model based on the minimum loading surface of moving template of two plate injection molding machine was established, and the topology optimization based on the variable density method was adopted for lightweight design. With the aim of quickly obtaining the optimized model, approximate modeling of the topological results was done, the combination of straight lines and arcs, circular, hemispherical and other regular shapes on the four side walls and the back of the movable template were used to reconstruct the model, and the key dimensions were parameterized. The simulation analysis and comparison of the pre and post optimized moving template shows that the stress and strain of the optimized model increase to a certain extent, but they are all within the engineering allowable range, and the weight is reduced by 29.4% compared with the original model.

Keywords: two plate injection molding machine; moving template; topology optimization; approximate modeling; parameterization

模板是注塑机合模机构的关键部件之一, 其质量约占整机质量的 70%, 主要实现模具的安装、固定和运动导向等功能^[1]。模板的力学性能与其质量和结构有关^[2], 然而质量与其强度、刚度相对立, 故在保证强度、刚度的前提下, 对模板进行轻量化设计具有重要的现实意义。

国内外研究人员使用数值算法对模板结构展开研究。李明辉等^[3]通过参数化方法, 获得加强筋结构与模板应力应变的关系, 并从 what-if 分析中

获得最佳设计参数。S. H. Sun^[4]引入自组织方法对注塑机定模板进行拓扑优化, 认为 V 形是最好的拓扑结构。文献 [5]~ 文献 [8] 采用变密度法对模板进行拓扑优化, 参考伪密度云图重新设计模板结构。Ren Bin 等^[9]对不同体积比下的拓扑优化方案进行了讨论。

上述研究虽获得一定成果, 但对如何根据拓扑后的伪密度云图进行模型重构未作进一步深入讨论。笔者以 JU16000II 型二板式注塑机动模板为研

基金项目: 宁波市“科技创新 2025”重大专项科技攻关项目 (2018B10082)

通信作者: 柳丽, 副教授, 主要从事机构设计及分析 E-mail: liuli@nbu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-23

引用格式: 张哲衍, 葛鹏翔, 娄军强, 等. 基于拓扑优化的二板式注塑机动模板轻量化设计 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(3): 81-84, 96.

Zhang Zheyang, Ge Pengxiang, Lou Junqiang, et al. Lightweight design for moving template of two plate injection molding machine based on topology optimization[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3): 81-84, 96.

究对象,在满足可靠性的前提下对其拓扑优化,分析拓扑结果并进行逼近建模,为注塑机模板的轻量化设计提供一种高效且实用于工程的方法。

1 动模板拓扑优化

1.1 拓扑优化模型

随着结构拓扑优化理论的完善及其在实际工程中的成功应用,国内外许多 CAE 软件都已开发出拓扑优化模块^[10],笔者在动模板静力学分析的基础上,选择变密度法^[11]对其进行拓扑优化。以动模板的柔度最小(刚度最大)为目标,以其质量保留百分比为约束的拓扑优化数学模型为:

$$\text{find } \rho_i (i=1, 2, \dots, n)$$

$$\min \max_{1 \leq j \leq p} C_j$$

$$\text{s.t. } \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \rho_0 V_{0i}}{m_0} \leq \alpha$$

$$0 \leq \rho_i \leq 1$$

其中 ρ_i 为第 i 个单元的相对密度; C_j 为动模板的总柔顺性,即总应变能; p 为工况总数; ρ_0 为单元原始密度; V_{0i} 为第 i 个单元的体积; m_0 为动模板初始质量; α 为质量保留百分比。

1.2 动模板拓扑优化

在三维软件 Solid Works 中建立动模板几何模型;去除对分析结果力学性能影响不大的局部结构,如:不承力凸台、沟槽、小孔等;模型按文献[12]中方法分割处理,方便约束加载并提高网格划分效率;处理后的模型导入 ANSYS Workbench,定义动模板材料属性:弹性模量 1.69×10^5 MPa,泊松比 0.275,密度 7200 kg/m^3 ;控制网格大小为 20 mm,自动划分网格。

模板在实际使用中需满足不同大小的模具,其所能容纳的最大模具尺寸受拉杆内间距(本研究中为 $1550 \text{ mm} \times 1450 \text{ mm}$)限制,故以比例为 $1 \times 0.7, 0.7 \times 1$ 的内间距加载面模拟大模具,以 0.7×0.7 内间距加载面模拟最小模具。在锁模力作用效果最大的工况(即 0.7×0.7 内间距加载面)下进行拓扑优化。

根据文献[12]中二板式注塑机动模板最小加载面工况的边界条件,设置动模板有限元模型,如图 1 所示。

根据动模板有限元模型设置拓扑优化^[13]:

(1) 定义设计变量。以设计区域内每个单元的相对密度为设计变量。设置拉杆孔、中心孔、拉杆孔周围方形台、自模具安装面起沿 Z 方向 110 mm 厚

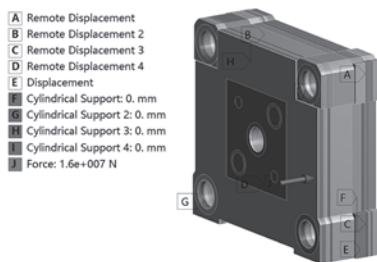


图 1 动模板有限元模型

度为不优化区域,其余部分为优化区域。

(2) 定义响应。为达到设计要求,将保留材料百分比作为响应函数,设定保留原始材料的 70%。

(3) 定义优化目标。在优化目标中,结构分析响应类型为柔度(变形能),目标为动模板结构柔度最小。

(4) 拓扑优化。系统多次迭代直到满足定义参数要求。利用软件后处理功能对拓扑优化后保留的单元进行整体显示,优化结果如图 2 所示。

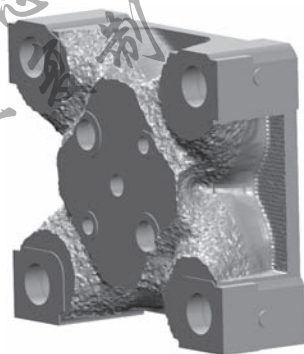


图 2 动模板拓扑优化结果

2 拓扑优化结果分析及逼近建模

由于拓扑结构的边界轮廓复杂、结果未参数化、边界点离散等问题^[14],无法将拓扑结果直接用于工程应用,故在拓扑优化结果的基础上进行分析,采用逼近法重构动模板拓扑后的几何模型。

2.1 拓扑优化结果分析

由图 2 所示的拓扑优化结果可知,动模板拓扑结构上下、左右分别对称,中心保留材料,四个侧壁及拉杆孔附近去除材料。具体分析如下:

(1) 由于动模板中心加载面上承受锁模力,其变形量在中心孔处最大,并向四周线性递减,故在动模板中心附近保留较多的材料以保证该区域的刚度要求。

(2) 拉杆孔及其周围方形台为约束位置,受力情况同样较为复杂,因此四个拉杆孔周围保留较多的材料。

(3) 模板四个侧壁处属于安全部位,受载荷影响

较小,从而可大面积去除材料,且去除量从内至外递增。

(4) 模板背面存在圆环状安全区域,可适当去除材料以满足轻量化要求。

2.2 逼近建模

逼近法使用直线与圆弧的组合来完成拓扑模型的重建,在安全部位减少厚度,危险部位保留材料或者采取加固措施,具有简单、高效、模型制造难度低等特点。根据上述拓扑优化分析结果,主要从四个方面进行动模板的逼近建模,如图3所示。

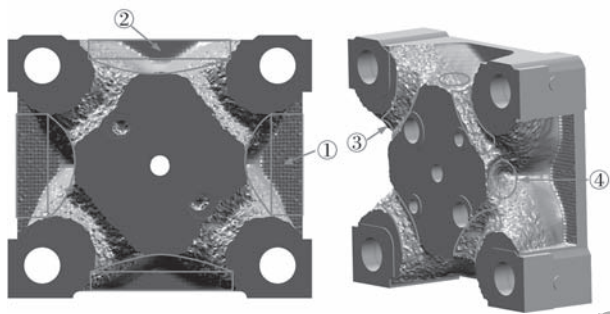


图3 动模板逼近模型

(1) 左右侧壁。

对动模板左右侧壁使用矩形和弧形逼近材料去除部分。用矩形结构逼近侧壁外侧的前段尺寸;考虑实际加工工艺的限制,用弧形结构对内部多个曲面进行规整,如图3中①所示。

(2) 上下侧壁。

上下侧壁材料去除部分轮廓与左右侧壁情况类似,故同样采用矩形与弧形进行逼近建模,见图3中②所示。

(3) 环形凹槽。

动模板背面拉杆孔下方的圆环状凹槽区域用圆弧逼近。由拓扑结果可见,靠近侧壁处凹槽的截面尺寸略大于中间截面尺寸,且为了降低制造工艺难度,将截面统一为尺寸相同的半圆,具体如图3中③所示。

(4) 球形凹槽。

观察拓扑结果,在侧壁内侧深处还可继续去除类似半球状的部分材料,故在第(1)步圆弧面逼近的基础上,使用半球面来逼近该球状结构,如图3中④所示。

上述步骤逼近建模获得的几何模型如图4所示。

2.3 模型参数化

为方便模型制造及后续结构尺寸的改进,根据

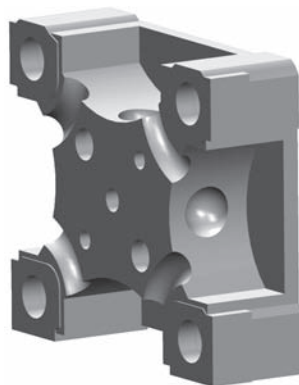


图4 逼近建模的动模板模型

逼近结果,将各个材料去除部分的关键尺寸进行参数化,如图5所示。

(1) 左右侧壁。

如图5a所示,固定圆弧的圆心及矩形的长,此时矩形的宽度与圆弧的半径成一定的线性关系,故只需将其中任意一个参数进行参数化,此处选择圆弧半径 $R1$ 。

(2) 上下侧壁。

由于上下两侧的材料去除部分与左右两侧类似,故采用相同的参数化方案,将如图5a所示圆弧半径 $R2$ 参数化。

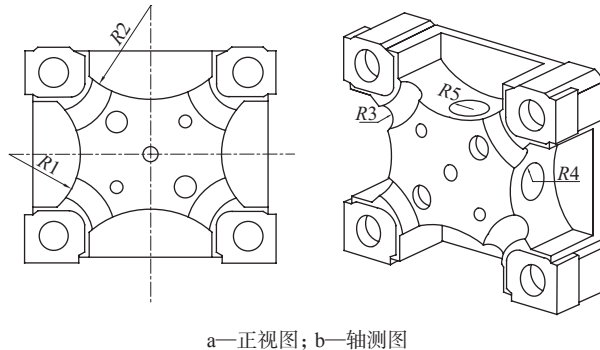
(3) 环形凹槽。

环形凹槽的截面是半圆形,将图5b中的半径 $R3$ 参数化。

(4) 球形凹槽。

左右侧球形凹槽尺寸与上下侧球形凹槽尺寸不同,故参数取图5b所示的两类球形凹槽半径 $R4$ 和 $R5$ 。

材料去除部分各参数 $R1, R2, R3, R4, R5$ 的具体数值见表1。



a—正视图; b—轴测图

图5 优化后动模板的参数化模型

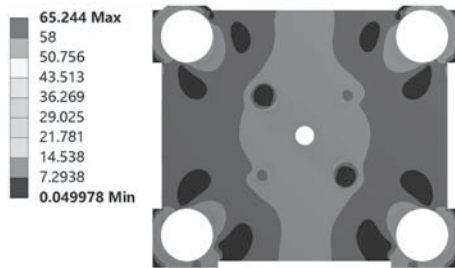
表1 材料去除部分参数

项 目	参 数				
	$R1$	$R2$	$R3$	$R4$	$R5$
取值	795	625	100	150	160

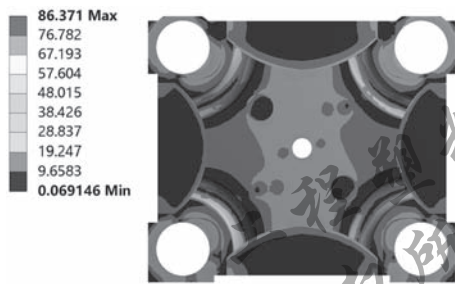
3 优化结果有限元分析

将优化重建后的动模板模型导入 ANSYS Workbench 中,其有限元模型的前处理过程同前文动模板原型的处理方法。模型优化前、后有限元仿真得到的等效应力结果及整体位移结果分别如图 6、图 7 所示,具体数值见表 2。

由表 2 可知,优化后的动模板最大等效应力与最大整体位移皆有一定程度增加,但均在工程许用



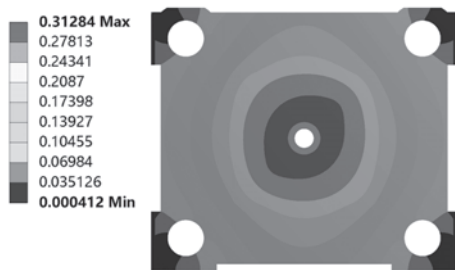
(a)



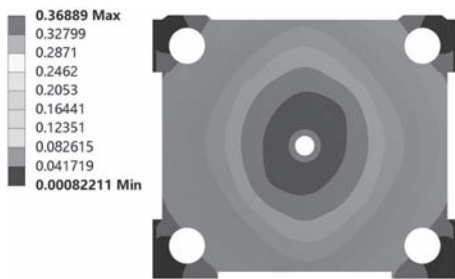
(b)

a—优化前; b—优化后

图 6 优化前后等效应力



(a)



(b)

a—优化前; b—优化后

图 7 优化前后整体位移

表 2 动模板优化前后分析结果

项 目	最大等效应力 / MPa	最大位移 / mm	动模板质量 / kg	减重幅度 / %
原型	65.24	0.313	20 492	—
优化后	86.37	0.369	14 459	29.4

范围内(最大等效应力不超过 100 MPa,最大整体位移不超过 0.622 5 mm)。而动模板质量减重明显,与原型相比质量减轻 29.4%。

4 结论

(1) 采用有限元方法建立二板式注塑机动模板有限元模型,对最小加载面工况下的动模板进行了拓扑优化。

(2) 分析拓扑优化结果,考虑设计效率、加工工艺等方面,使用逼近建模重构动模板模型,并将关键部位参数化。

(3) 优化重建后的动模板模型质量减轻 29.4%,应力应变等性能满足工程使用要求。

参考文献

- [1] 凌征琦. 二板式注塑机前模板结构优化及系列化设计研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
Ling Zhengqi. Research on structural optimization and serial design of mold platens on two-platen injection molding machines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [2] 马玉山,金涛,宫建国,等. 注塑机模板的应力与疲劳分析及优化[J]. 塑料工业,2010,38(9):40-44.
Ma Yushan, Jin Tao, Gong Jianguo, et al. Stress and fatigue analysis and optimization of platen for injection molding machine[J]. China Plastics Industry, 2010, 38(9):40-44.
- [3] 李明辉,李波. 基于 Ansys 的注塑机前模板结构参数优化设计[J]. 包装工程,2016,37(3):116-120.
Li Minghui, Li Bo. Structural parameter optimization design on front mold plate of injection molding machine based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3):116-120.
- [4] Sun S H. Optimum topology design for the stationary platen of a plastic injection machine[J]. Computers in Industry, 2004, 55(2):147-158.
- [5] 李霞,张迪迪,王婷婷,等. 超声微注塑机合模-锁模-顶出机构的设计与分析[J]. 中国塑料,2016,30(9):88-92.
Li Xia, Zhang Didi, Wang Tingting, et al. Design and analysis of clamping-locking-ejecting units for ultrasonic micro-injection molding machines[J]. China Plastics, 2016, 30(9):88-92.
- [6] 杨安. 基于 ANSYS 的注塑机前模板拓扑优化[J]. 机电工程, 2012,29(5):521-524.
Yang An. Topology optimization of platen for injection molding machine based on ANSYS[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(5):521-524.

(下转第 96 页)

- intellectualized design system for ejection mechanism of injection mold[J]. Machinery Design & Manufacture, 2004(2):72-75.
- [11] 杨安,董扬德,胡宏伟,等. 法兰盖滑块脱模机构及注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(10):82-86.
- Yang An, Dong Yangde, Hu Hongwei, et al. Design of slider demoulding mechanism and injection mold for flange cover[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(10):82-86.
- [12] 石海水. 双向卡扣脱模设计分析和创新[J]. 模具制造, 2012(4):55-57.
- Shi Haishui. Two-way undercut release structure innovation design in plastic injection product[J]. Die & Mould Manufacture, 2012(4):55-57.
- [13] 何柏海,何骏. 一种带推管侧顶脱模机构的注塑模设计[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(2):92-95.
- He Baihai, He Jun. Design of injection mould with pushing tube side ejection demoulding mechanism[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):92-95.
- [14] 朱海旭,王金莲. 基于CAE技术的餐盒盖叠层热流道注射模具设计[J]. 装备制造技术, 2016(8):241-243, 246.
- Zhu Haixu, Wang Jinlian. Design of hot runner stack injection mould for meal cover based on CAE[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(8):241-243, 246.

(上接第84页)

- [7] 李竞,李尚平,蒲明辉,等. 注塑机模板的有限元—拓扑优化设计[J]. 机械设计与制造工程, 2002(6):47-48.
- Li Jing, Li Shangping, Pu Minghui, et al. Topological optimal design of the platen of injection molding machine by FEM[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2002(6):47-48.
- [8] 刘旭红,尹辉峻. 注塑机模板的有限元—拓扑优化设计研究[J]. 塑料工业, 2008, 36(1):32-34, 48.
- Liu Xuhong, Yin Huijun. Study of finite element-topological optimal design for platen of injection machine[J]. China Plastics Industry, 2008, 36(1):32-34, 48.
- [9] Ren Bin, Zhang Shuyou, Tan Jianrong. Structural scheme optimization design for the stationary platen of a precision plastic injection molding machine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4):714-721.
- [10] 梅帅,陈飙松,张盛,等. 开放式结构拓扑优化软件设计与研发[J]. 机械工程学报, 2015, 51(9):144-152.
- Mei Shuai, Chen Biaosong, Zhang Sheng, et al. Design and development of open style software system for structural topology optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(9):144-152.
- [11] Bendsoe M P, Sigmund O. Topology optimization: Theory, methods and applications[M]. Berlin: Springer, 2003: 1-69.
- [12] 张哲衍,董凌波,李国平,等. 二板式注塑机动模板有限元仿真的关键技术问题分析[J]. 塑料工业, 2020, 48(7):51-55.
- Zhang Zheyuan, Dong Lingbo, Li Guoping, et al. Analysis of key technical problems in finite element simulation of the two plate injection molding machine moving template[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(7):51-55.
- [13] 王平,张国玉,刘家燕,等. 机载光电平台内框架拓扑优化设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(13):135-141.
- Wang Ping, Zhang Guoyu, Liu Jiayan, et al. Topology optimization design for inner frame of airborne electro-optical platform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(13):135-141.
- [14] 张少星. 拓扑优化结构刚度性能精确制造中的精度设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- Zhang Shaoxing. Tolerance design of topology-optimized structures for precise manufacturing of stiffness performance[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.