

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.019

基于FEA-PSO的变模温注塑模具嵌入式感应加热系统优化设计

肖成龙, 胡灿, 曾广胜

(湖南工学院材料科学与工程学院, 湖南衡阳 421002)

摘要:提出了一种线圈嵌入式感应加热辅助变模温注塑方法。通过将感应线圈直接嵌入模具型腔板基体内部,在高频电流激励下激发交变电磁场,使线圈周围金属区域迅速感应出高密度涡流并产生大量焦耳热,从而实现模腔表面的快速加热。针对不同类型注塑制品对变模温工艺技术指标的差异化需求,分别建立了以模腔表面加热效率优先和加热均匀性优先为目标的模具感应加热系统优化模型,并提出一种结合有限元分析(FEA)与粒子群优化(PSO)算法的联合求解策略。优化结果表明:对加热效率优先模型,优化后的模具加热效率提升了41.8%、加热均匀性提高了76.9%;而对加热均匀性优先模型,优化后的模具加热效率和加热均匀性分别提高了34%和91%。基于优化设计参数,构建了用于实际变模温注塑的线圈嵌入式感应加热模具原型,并以某电子产品的塑料面板为研究对象开展实验验证。结果表明:所成型面板的表面无明显色差且呈现均匀的镜面光泽,其平均表面粗糙度仅为26.13 nm,该面板无需打磨、喷涂、抛光等后处理即可直接满足装配要求。这不仅验证了FEA-PSO优化策略的有效性,同时还证明了所提出的变模温注塑方法在实际生产中的应用可行性。

关键词:变模温注塑成型;嵌入式感应加热系统;优化设计;有限元分析;粒子群优化

中图分类号: TQ320.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0138-08

Optimal design of embedded induction heating system for variotherm injection mold based on FEA-PSO

XIAO Chenglong, HU Can, ZENG Guangsheng

(School of Materials Science and Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, China)

Abstract : A coil-embedded induction heating-assisted variotherm injection molding method is proposed. By embedding the induction coil directly into the mold cavity plate, a high-frequency alternating electromagnetic field is generated under current excitation, inducing high-density eddy currents, producing substantial Joule heat in the surrounding metal region, and rapid heating the cavity surface. Considering the varying technical priorities of different injection-molded products, two optimization models for the mold induction heating system were established, focusing respectively on heating efficiency and temperature uniformity. A hybrid solution strategy of combining the finite element analysis (FEA) and particle swarm optimization (PSO) was proposed. The optimization results show that, for the efficiency-priority model, the heating efficiency of the mold was improved by 41.8%, while the temperature uniformity was also enhanced by 76.9%. For the uniformity-priority model, the heating efficiency and uniformity were improved by 34% and 91%, respectively. Based on the optimized parameters, a prototype mold with an embedded induction heating system was constructed for variotherm injection molding, and experimental validation was carried out using a plastic panel from an electronic product as the test case. The results demonstrate that the front surface of the molded panel exhibited no visible color difference and a uniform mirror-like gloss, with an average surface roughness of only 26.13 nm. The panel required no post-processing such as sanding, painting, or polishing to meet assembly requirements. These findings validate not only the effectiveness of the FEA-

基金项目: 湖南省教育厅科学基金重点项目(23A0632), 国家重点研发计划项目(2024YFD2101000), 国家自然科学基金项目(52173034)

通信作者: 肖成龙, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为基于建模仿真的机械与模具创新设计

收稿日期: 2025-09-30

引用格式: 肖成龙, 胡灿, 曾广胜. 基于FEA-PSO的变模温注塑模具嵌入式感应加热系统优化设计[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(11): 138-145.

XIAO Chenglong, HU Can, ZENG Guangsheng. Optimal design of embedded induction heating system for variotherm injection mold based on FEA-PSO[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11): 138-145.

PSO optimization strategy but also the practical feasibility of the proposed variotherm injection molding method.

Keywords : variotherm injection molding ; embedded induction heating system ; optimal design ; finite element analysis ; particle swarm optimization

变模温注塑是一种基于模具在成型周期内交替快速加热与冷却的高分子及其复合材料成型加工技术^[1]。不同于传统注塑工艺中的模温恒定控制方式,变模温注塑在成型周期内依据工艺各阶段的实时需求对模具温度进行动态调节,有效避免了熔体在接触低温模腔壁面时的过早冷凝问题,显著提升了熔体的充模流动能力。因此,变模温注塑技术在超薄壁、高光免喷涂、精密光学等高附加值塑件的制造领域展现出广阔的应用前景^[2-4]。

变模温注塑中,熔体注射前需将模腔表面加热至预定高温。围绕如何快速加热模腔表面,创新模具加热方法一直是变模温注塑领域活跃的研究分支。直至目前,公开发表的国内外文献中报道的模具快速加热方法主要包括高温流体(油^[5]、水^[6]和蒸汽^[7])辅助加热、电加热^[8]、感应加热^[9-10]、红外加热^[11]等几类。其中,感应加热因具有效率高、能耗低等多方面的综合优势逐渐成为近年模具快速加热领域的一个重要发展方向。

一般地,模具感应加热是指将感应线圈置于靠近模腔表面区域,当线圈中通入高频电流时,激发的交变电磁场会在金属模具表层区域感应出高密度涡流从而快速加热模腔表面。这种线圈外置式的模具感应加热方式具有结构简单、操作便捷等优点,但仅能在模具处于开启状态时对模腔表面进行加热,且在加热大型或复杂型腔结构的模具时,整个模腔表面的加热均匀性难以保证^[12]。此外,未屏蔽的电磁辐射可能干扰周边电子设备的正常运行,并对操作人员的健康构成潜在风险。

针对线圈外置式模具感应加热方式存在的上述局限性,笔者将感应线圈整体嵌入注塑模具中,开发一种线圈嵌入式感应加热辅助变模温注塑方法。进一步地,为实现模腔表面快速且均匀加热的目标,建立了电磁-热多物理场耦合的模具感应加热有限元分析(FEA)模型,并结合粒子群优化(PSO)算法对模具感应加热系统进行了优化设计^[13]。最后,以某电子产品的塑料面板件作为研究对象,研制相应的线圈嵌入式感应加热辅助变模温注塑模具,以验证优化策略的有效性及变模温注塑方法的实际可行性。

1 感应线圈嵌入式变模温注塑模具的结构和工作原理

图1为感应线圈嵌入式变模温注塑模具的结构(仅以型腔侧半模为例)。其主要特征为:感应线圈直接嵌入模具型腔板基体的安装孔内,其外表面包覆耐热绝缘材料,以实现与型腔板间的电气隔离并保证线圈安装的稳定性;此外,在模具冷却板与型腔板之间设有弹簧,当模具开启时,两者在弹簧力作用下分离,从而可有效降低型腔板的热容量、提升型腔表面的加热速率。

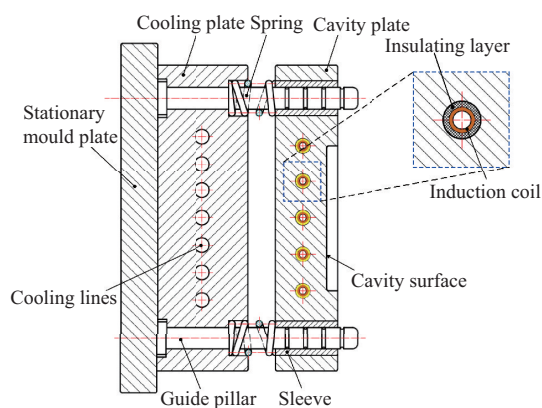


图1 感应线圈嵌入式变模温注塑模具的结构示意图

Fig. 1 Schematic of variotherm mould with embedded induction coil

在模具加热阶段,感应线圈通入高频电流后激发出高频交变电磁场。线圈安装孔内壁的表层金属在交变电磁场的作用下瞬间感应出高密度的涡流并迅速产生大量焦耳热。该热量作为型腔板的局部内热源,可间接地对模具型腔表面进行快速加热。为兼顾模具型腔表面的感应加热效率和模具在热-机械应力耦合作用下的结构强度,型腔板应优先选用具有较高磁导率和较低热膨胀系数的模具钢材。在冷却阶段,注塑机锁模力使模具冷却板和型腔板紧密贴合,处于高温的型腔板在与低温冷却板接触后,由于显著的温度梯度,其热量迅速传递至冷却管道并被冷却介质带走,从而实现模具型腔表面的快速冷却。为确保型腔表面的冷却效率和冷却均匀性,模具制造过程中需对冷却板与型腔板的接触表面进行精密抛光,以降低界面热阻。同时,选用高热导率金属材料(如铝合金、铜合金等)制造冷却板、降低冷却介质的温度、提高冷却介质的

流量,均有助于进一步提高模具型腔表面的冷却速率和冷却均匀性。

综上所述,笔者提出的线圈嵌入式感应加热与水冷相结合的方法,可实现模具型腔表面在较大温度范围内快速交替变化,有效满足变模温注塑对模具温度动态调控的工艺需求。与传统的线圈外置式模具感应加热方式相比,该方法具有模腔表面加热/冷却速率快、温度分布均匀、能耗低等显著优势;此外,感应线圈嵌入模具基体内部,不仅有效屏蔽了电磁辐射对周边电子设备的干扰,还能实现模具在开启与闭合两种状态下的原位加热,进一步拓展了工艺适用范围(如注射-压缩成型)。值得指出的是,该方法特别适用于对外观质量要求严格的平面或曲面塑件(如电子产品外观件、汽车内外装饰件等)的成型制造。对于中等复杂度的三维曲面制品,可将型腔板剖分为两部分,并在剖切面加工出与模具型腔表面随形的线圈安装孔。线圈安装完成后,再将两部分装配或焊接成整体结构,从而能实现对复杂模具的型腔表面进行快速均匀加热。

2 模具电磁-热耦合分析有限元模型的建立

在变模温注塑工艺的加热阶段,模具处于开启状态,此时型腔板在弹簧力作用下与冷却板保持分离(如图 1 所示),故冷却板不会对型腔板中热量的传递过程造成干扰;此外,感应线圈沿模具型腔表面随形且均匀布置(即各线圈与型腔表面的距离相等,且相邻线圈的中心距一致),这使得加热过程中型腔板的热量主要在相邻感应线圈之间的区域传递。因此,可将模具型腔板的热量传递过程简化为二维传热问题进行分析。图 2 给出了模具型腔板感应加热分析的几何模型。其中,由紫铜管制成的中空管状感应线圈,

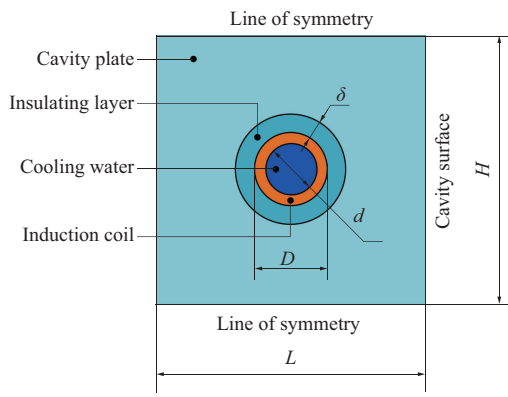


图 2 模具型腔板感应加热分析几何模型

Fig. 2 Geometric model for induction heating analysis of mold cavity plate

其内径(d)、外径(D)分别为 4,6 mm。值得指出的是,为防止感应加热过程中线圈自身过热,期间需持续向线圈中通入冷却水。线圈外包覆厚度(δ)为 2 mm 的耐热陶瓷纤维编织绝缘层。模具型腔板的材质为 45 号钢。各材料的电磁与热物理性能参数详见表 1。

表 1 材料电磁与热物理性能参数

Tab. 1 Electromagnetic and thermophysical properties of materials

Parameters	Materials			
	Mold steel	Copper	Water	Ceramic fiber
Relative permeability	200	1	1	1
Relative permittivity	1	1	80	4
Electrical conductivity $/(\times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})$	6.17	59.98	0	0
Density $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850	8 700	1 000	900
Specific heat $/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	486	385	4 178	1 100
Thermal conductivity $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	49.8	400	0.598	0.08

模具感应加热模拟属于典型的电磁-热多物理场耦合分析问题,通常采用兼具计算效率与精度的“两步法”进行求解。即在每个时间步内,首先计算高频线圈电流激励下的交变电磁场,获得模具的涡流损耗;随后将该损耗作为热源项耦合至导热偏微分方程中,进而求解得到模具感应加热任意时刻的温度场。

图 3 给出了模具型腔板电磁-热耦合分析的有限元模型。考虑到几何模型的结构对称性,有限元分析中仅选取了模型的 1/4 区域作为计算域,以节约计算资源、提高计算效率。此外,为保证计算结果的精度与可靠性,在模具型腔板与感应线圈发生趋肤效应的区域划分了至少 5 层的边界层网格,并对模型网格的独立性进行了检验,确保计算结果不受网格疏密变化的影响。图 3a 示出了模具型腔板电磁场仿真中的初始及边界条件设置:(1)计算域内初始磁矢势(A_0)为 0;(2)在感应线圈区域施加高频电流以激发交变电磁场;(3)模具型腔表面及模型对称边界施加磁矢势(A)切向分量为 0 的边界条件,即 $A \times$

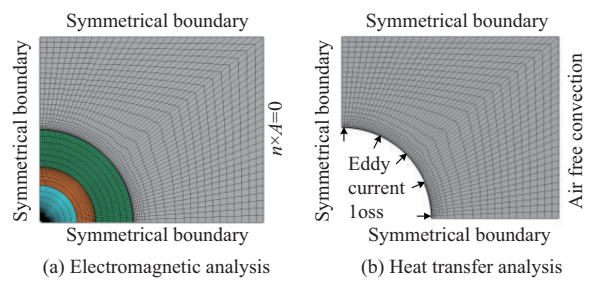


图 3 模具型腔板电磁-热耦合分析有限元模型

Fig. 3 Finite element model for electromagnetic-thermal coupling analysis of mould cavity plate

$n=0$ (n 为法向矢量)。图 3b 示出了模具型腔板在传热分析中的初始及边界条件设置:(1)模具初始温度与周围环境温度一致,设为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$;(2)模型的对称边界施加绝热条件,模具型腔表面与周围环境之间为自由对流换热,其换热系数设为 $15\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})^{[14]}$;(3)将电磁分析中获得的涡流损耗加载于线圈安装孔内壁区域,作为加热模具型腔板的局部内热源。

3 模具电磁感应加热系统优化

3.1 优化变量及目标函数

在变模温注塑中,模腔表面的加热效率与加热均匀性分别对成型效率和制品质量起决定性作用,是实现高效高质生产的关键技术指标。因此,模具感应加热系统的优化设计应以实现模腔表面的快速且均匀加热为核心目标。因此将整个模腔表面从初始的 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热至目标温度 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所需的加热时间(t_h)作为表征加热效率的目标函数,并以 t_h 时刻型腔表面最高温度($T_{\max}$)作为表征加热均匀性的目标函数。显然, t_h 越长表明加热效率越低, $T_{\max}$ 越低则说明型腔表面温差越小、加热越均匀。

针对线圈嵌入式模具的感应加热方式,通过分析可知:影响上述两个目标函数的主要因素包括感应线圈在型腔板中的几何布局参数、感应加热工艺参数等。因此,选取模具型腔板厚度(L)、相邻感应线圈中心距(H)(如图 2 所示)、感应线圈电流幅值(i)和频率(f)作为优化设计变量。各变量的取值范围结合模具设计准则、工程经验、高频感应电源的实际性能参数等进行综合确定,详见表 2。

表 2 优化设计变量的取值范围

Tab. 2 Range of values for optimal design variables

Design variables	Level	
	Lower limit	Upper limit
L/mm	20	40
H/mm	15	30
i/A	400	800
f/kHz	20	60

Notes: L denotes the thickness of cavity plate; H represents the center distance between adjacent induction coils; i and f are the magnitude and frequency of induction coil current, respectively.

3.2 优化模型的建立

同时对上述两目标函数(即 t_h 和 $T_{\max}$)进行寻优属于多目标优化问题。但由于两者在优化变量上的要求相互制约,因此无法在可行域内同时将两者最小化。在实际应用中,不同类型注塑制品对变模温注塑工艺技术指标的关注重点不尽相同。例如,常

规注塑件更侧重于模腔表面的加热效率,以提升生产效率;而对于导光板、光学透镜等高精度制品,则更关注加热均匀性,以确保产品成型质量和良品率。针对上述差异化需求,建立了两种优化模型,即模具型腔表面加热效率优先模型和加热均匀性优先模型,旨在实现针对性的模具感应加热系统设计。

对模具型腔表面加热效率优先模型,选取 t_h 作为目标函数,在满足加热均匀性前提下实现其最小化。将 $T_{\max}$ 作为约束条件,约束范围可依据制品的成型质量要求设定。例如,假设模具加热阶段结束时模腔表面的最大温差不超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,则该优化模型可表述为式(1)。

$$\begin{aligned} \min t_h(L, H, i, f) \\ \text{s.t. } T_{\max}(L, H, i, f) - T_{\text{target}} \leq 5\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 20\text{ mm} \leq L \leq 40\text{ mm} \\ 15\text{ mm} \leq H \leq 30\text{ mm} \\ 400\text{ A} \leq i \leq 800\text{ A} \\ 20\text{ kHz} \leq f \leq 60\text{ kHz} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: T_{target} 代表模腔表面加热的目标温度,此处设为 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

而对于模具型腔表面加热均匀性优先模型,则选取 $T_{\max}$ 作为目标函数,在满足加热效率前提下实现其最小化。考虑到变模温注塑模具的加热阶段通常与注塑开模、取件、合模等工序并行进行,因此只要 t_h 不超过这些工序所需时间的总和,即可保证变模温注塑的生产周期与常规注塑的基本相当。根据前期注塑实验研究, t_h 不超过 18 s 即可满足变模温注塑高效生产的要求。基于上述分析,该优化模型可表述为式(2)。

$$\begin{aligned} \min T_{\max}(L, H, i, f) \\ \text{s.t. } t_h(L, H, i, f) \leq 18\text{ s} \\ 20\text{ mm} \leq L \leq 40\text{ mm} \\ 15\text{ mm} \leq H \leq 30\text{ mm} \\ 400\text{ A} \leq i \leq 800\text{ A} \\ 20\text{ kHz} \leq f \leq 60\text{ kHz} \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 基于有限元和粒子群算法的优化模型求解策略

求解如式(1)和(2)所示的优化模型,通常需首先建立目标函数(t_h 和 $T_{\max}$)与优化变量(L, H, i 和 f)之间的定量映射关系,再利用优化算法进行求解。然而,由于上述目标函数具有高度非线性和多物理场耦合特性,难以获得其显式解析表达式。尽管可借助响应面法^[15]、人工神经网络^[16]等近似建模技术构建替代模型,但此类方法往往依赖大量高质量训练

样本,且其预测精度有限,难以满足工程优化对模型精确性和稳健性的要求^[16]。为避免显式构建目标函数与优化变量间的复杂数学模型,笔者结合FEA和PSO对上述优化模型进行求解。其中,FEA负责目标函数值的计算,PSO则对计算结果的优劣进行评估并更新优化参数^[13]。该FEA-PSO迭代过程持续进行,直至满足终止条件,最终得到模具感应加热系统的最优设计参数组合。

图4给出了FEA-PSO联合优化过程的流程示意图,主要步骤如下。

(a) 初始化。设置PSO算法参数,包括种群规模(N)、惯性权重(ω)、个体认知因子(C_1)、群体社会因子(C_2)等。同时,在可行域内随机生成 N 个初代粒子,每个粒子代表一组模具感应加热系统的设计参数,即一个候选解。

(b) 粒子适应度值计算。将目标函数 t_h 和 $T_{\max}$ 作为粒子适应度评价指标,采用FEA对每个粒子对应的模具感应加热系统设计方案进行电磁-热耦合仿真,计算给定设计参数下的 t_h 和 $T_{\max}$ 值(即粒子的适应度值),作为粒子当前解优劣的量化依据。

(c) 粒子速度与位置更新。根据各粒子的历史最优位置(即个体极值)和整个种群的最优位置(即群体极值),按式(3)更新粒子的速度和位置。

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= \omega v_i^k + C_1 r_1 (p_i^k - x_i^k) + C_2 r_2 (g^k - x_i^k) \\ x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^{k+1} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: v_i^k 和 x_i^k 分别为第 k 次迭代时第 i 个粒子的速度和位置; r_1 和 r_2 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数; p_i^k 表示第 i 个粒子的历史最优位置, g^k 表示当前种群的全局最优位置。

(d) 终止条件判定与迭代输出。当满足预设的终止条件[如算法达到最大迭代次数($G_{\max}$)或适应度值不随迭代步变化时],终止迭代过程,输出当前种群中的最优粒子,其对应的设计参数即为模具感应加热系统的优化设计解。否则,返回步骤2继续搜索。

3.4 优化结果与讨论

结合建立的模具电磁-热耦合FEA模型和PSO算法,分别对式(1)和(2)所描述的优化模型进行求解。其中PSO算法参数 N , ω , C_1 , C_2 和 $G_{\max}$ 的值分别设为50,0.9,2,2和100。图5给出了两种优化模型在迭代求解过程中的适应度值变化。可见,适应度值随迭代步迅速下降并逐渐趋向稳定,经过约100次迭代后,适应度值不再发生变化,表明优化过程收敛。表3列出了优化获得的模具感应加热系统设计参数及对应的优化结果,同时也给出了模具感应加热系统

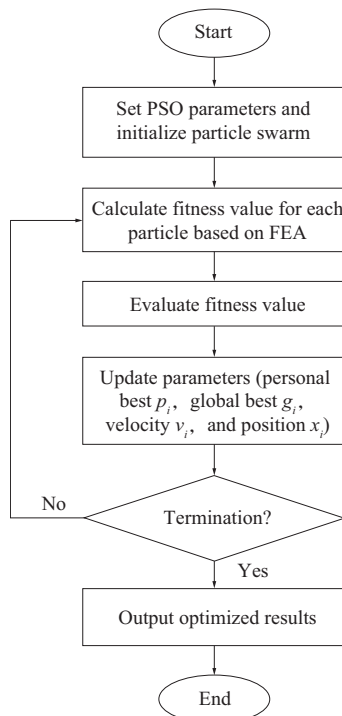


图4 FEA-PSO联合优化过程的流程示意图

Fig. 4 Flow chart of FEA-PSO optimization

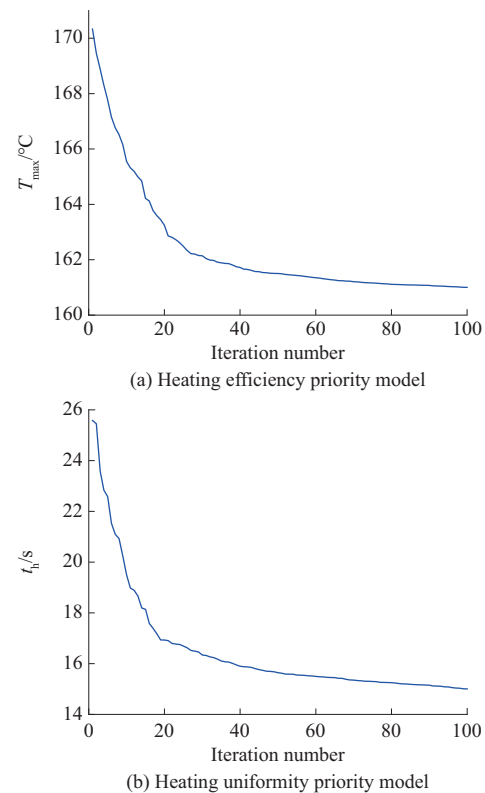


图5 适应度值随优化迭代步的变化曲线

Fig. 5 Variation of fitness values with iteration number

表3 优化前后结果对比

Tab. 3 Comparison of results before and after optimization

Design variables	Initial design	Optimal design	
		Heating efficiency priority	Heating uniformity priority
L/mm	20	27	32
H/mm	24	18.5	18
f/kHz	60	38.5	50
i/A	450	696	678
t_h/s	25.58	14.87	16.90
$T_{\max}/^\circ\text{C}$	170.33	162.39	160.92

Notes: t_h is the required heating time for the entire mold cavity surface to be heated from the initial temperature of 20°C to the target temperature of 160°C ; $T_{\max}$ is the maximum cavity surface temperature at time t_h .

的初始设计参数与相应的目标函数值作为对比。从表3中可以看出:对加热效率优先模型,优化后模具加热效率提升了41.8%、加热均匀性提高了76.9%;而对加热均匀性优先模型,优化后模具加热效率和加热均匀性分别提升了34%和91%。因此,上述结果验证了FEA-PSO联合优化方法的有效性。

4 实验验证

笔者以某电子产品的塑料面板作为研究对象,基于前述获得的优化设计参数,构建线圈嵌入式感应加热辅助变模温注塑面板模具的原型,并开展变模温注塑成型实验。旨在对优化结果的有效性进行验证,并初步评估所提出感应加热变模温注塑方法在实际应用中的可行性。

图6给出了感应线圈嵌入式变模温注塑面板模具的结构示意图。面板的长、宽分别为140 mm和80 mm,平均壁厚约为3 mm。鉴于实际应用中仅面板外表面需满足镜面高光的严苛要求,因此只在模具的型腔侧设置了变模温系统以提升制品的表观质量;而模具型芯侧仍采用传统的恒温控制方式,

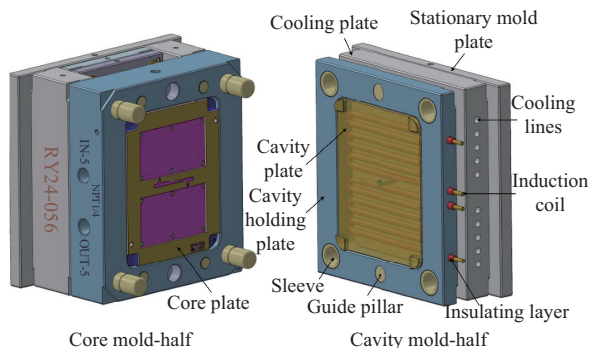


图6 感应线圈嵌入式变模温注塑面板模具的结构示意图

Fig. 6 Schematic of variotherm injection panel mold with embedded induction coil

以降低模具制造成本。此外,为确保面板塑件在大批量生产中具有较高的成品率,模具型腔侧的感应加热系统采用基于求解加热均匀性优先模型获得的优化设计参数(见表3)进行构建,即模具型腔板的厚度为32 mm,相邻感应线圈之间中心距为18 mm。

变模温注塑面板所用原料为广州金发科技有限公司提供的阻燃级玻璃纤维增强聚碳酸酯(牌号:JH710 G20),其热变形温度约为 150°C 。注塑前,原料在 110°C 条件下真空干燥10 h以去除水分。高频感应加热电源(型号:LH-HZ-GP35)由常州力华宏展工业设备有限公司提供。模具加热过程中,设定高频电源输出线圈电流的幅值和频率分别为678 A和50 kHz,并采用恒流模式进行控制以确保加热过程中电流输出稳定。对每个变模温注塑周期,当监测到模具型腔表面区域被加热至 160°C 时,立即切断感应线圈电流,同时模具闭合并开始熔体注射;待模具型腔表面区域冷却至 95°C 时,模具开启并顶出制品。其余主要注射工艺参数设置如下:注射速度90 mm/s、注射压力100 MPa、保压时间8 s、保压压力80 MPa、熔体温度 290°C 。变模温注塑成型系统如图7所示。

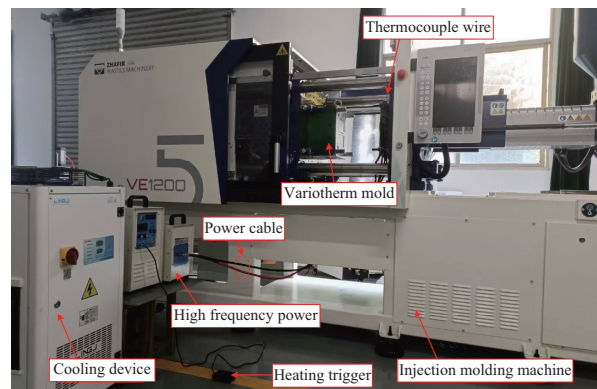


图7 变模温注塑系统照片

Fig. 7 Photo of variotherm injection molding system

图8给出了变模温注塑面板正面和背面表观质量的对比。可以看出,面板背面的表观质量较差,表面较为粗糙、光泽度低,且存在明显的银纹、流痕和浮纤等缺陷;相比之下,面板的正面则色泽均匀,无明显色差,且整体呈现出镜面高光效果,表观质量显著优于背面。为进一步定量表征面板的表观质量,采用超精密三维形貌检测仪(SuperView WM100,深圳市中图仪器股份有限公司)对面板正面和背面的表观形貌进行了测量,对比结果如图9所示。从图9中可以看出,面板正面的表观纹理更

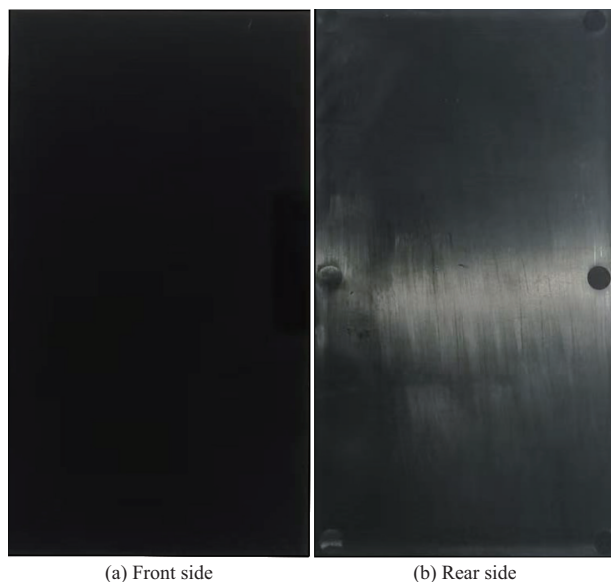
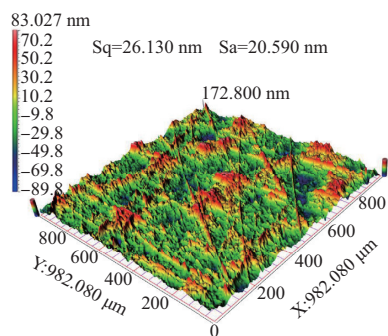
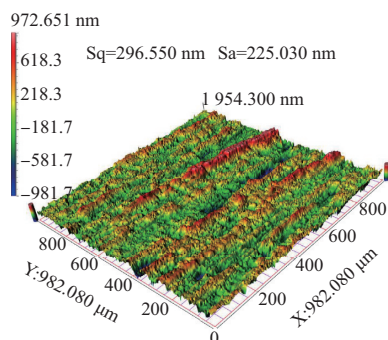


图8 变模温注塑面板产品正面和背面的外观质量对比

Fig. 8 Surface appearance comparison of the front and rear sides of panel molded via variotherm injection molding



(a) Front side



(b) Rear side

图9 变模温注塑面板产品正面和背面的表面纹理对比

Fig. 9 Surface texture comparison of the front and rear sides of panel molded via variotherm injection molding

为光滑平整,其平均表面粗糙度仅为26.13 nm,远低于背面的296.55 nm,表明所提出的变模温注塑工艺可显著提升制品表面的成型质量。因此,利用感应加热辅助变模温注塑技术,可有效消除传统注塑过程中常见的制品表面缺陷,显著提高制品表面光泽

度,使成型产品无需打磨、喷涂、抛光等后续处理,即可直接进入装配环节。这一改善主要得益于变模温注塑过程中较高的模腔表面温度:一方面,可有效抑制熔体在接触模腔壁面后形成冷凝层,使熔体表层温度在注射阶段始终高于材料的热变形温度,从而显著改善了熔体的流动能力;另一方面,使注射与保压阶段的压力能够更加有效且均匀地在模具型腔中传递,有助于熔体沿模腔壁面发生滑移或延展流动,准确复制光洁模具型腔表面的微观纹理,从而抑制银纹、流痕和浮纤等表面缺陷的产生,最终实现制品高光无痕的成型效果。

值得指出的是,尽管嵌入式感应加热变模温注塑工艺在模具、设备等的成本投入及复杂模具结构设计方面存在一定挑战,但相较传统注塑工艺,其可大幅缩短高光免喷涂塑件的生产流程和显著降低综合成本,在大规模生产中具有明显优势。因此,从这些方面综合考虑,可认为所提出的变模温注塑方法在实际应用中具有可行性。

5 结论

(1)所提出的线圈嵌入式感应加热辅助变模温注塑方法有效克服了传统线圈外置结构在加热效率、温度均匀性和电磁干扰方面的不足,具备良好的工程适应性。通过将感应线圈嵌入模具型腔板,并结合热冷分离式的模具结构设计,实现了模腔表面温度在较大范围内的快速调控,契合变模温注塑工艺对模具高效加热和冷却的实时需求。

(2)建立了模具型腔表面快速且均匀加热的多目标优化模型,并基于FEA结合PSO算法对模型进行求解。优化结果表明:采用该FEA-PSO方法可快速地获得模具感应加热系统的优化设计参数。对加热效率优先模型,优化后的模具加热时间由25.58 s降低至14.87 s,加热效率提升了41.8%;对加热均匀性优先模型,优化后的模腔表面最大温差由10.33 °C降低至0.92 °C,均匀性提升了91%。

(3)基于优化参设计参数构建了线圈嵌入式感应加热辅助变模温注塑面板模具的原型,并开展了相应的变模温注塑成型实验。结果表明:所提出的变模温注塑工艺可显著提高制品的表面质量,成型面板的表面无明显色差且呈现均匀的镜面光泽,其平均表面粗糙度仅为26.13 nm,无需打磨、喷涂、抛光等后续处理即可直接进入装配环节。相较于常规注塑工艺,所提出的变模温注塑方法在高光免喷

涂产品的大规模生产中具有明显优势,从而证明了其在实际生产中的应用可行性。

参考文献

- [1] 史展林,张磊,侯俊吉,等.快速热循环注塑成型技术发展综述[J].精密成形工程,2017,9(5):1-18.
SHI Zhanlin, ZHANG Lei, HOU Junji, et al. Review of rapid heat cycle molding technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(5):1-18.
- [2] DO T T, UYEN T M T, MINH P S. The feasibility of an internal gas-assisted heating method for improving the melt filling ability of Polyamide 6 thermoplastic composites in a thin wall injection molding process[J]. Polymers, 2021, 13(7). DOI: 10.3390/polym13071004.
- [3] 肖成龙,黄慧婷,文胜.电热式变模温注塑模具热响应评估实验研究[J].塑料工业,2023,51(8):92-97,111.
XIAO Chenglong, HUANG Huiting, WEN Sheng. Experimental study on thermal response evaluation of variotherm injection mold with electric heating[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(8): 92-97,111.
- [4] 殷素峰,阮育煌,阮锋.变模温注塑成型对超薄导光板品质的探讨与实践[J].工程塑料应用,2020,48(1):56-62.
YIN Sufeng, RUAN Yuhuang, RUAN Feng. Analysis and practice on quality of ultra-thin light guide plate by dynamic mold temperature injection compression molding[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):56-62.
- [5] KUO C C, TASI Q Z, HUNAG S H, et al. Development of an injection mold with high energy efficiency of vulcanization for liquid silicone rubber injection molding of the fisheye optical lens[J]. Polymers, 2023, 15 (13). DOI:10.3390/polym15132869.
- [6] MACEDO C, BRITO A M, FARIA L, et al. The potential of RHCM technology in injection molding using a simple convention heating and cooling system[J]. Results in Engineering, 2023, 19. DOI:10.1016/j.rineng.2023.101349.
- [7] SUGIO D, OKAZAKI S, KANEKO M. Application of Rapid Heat and Cool Molding to High Strength Outer Parts without Painting Treatment[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2017, 10(1):52-71.
- [8] LEE H M, KO Y B, CHOI W C. Development of a modular mold with a carbon nanotube web film heater for rapid-heating cycle molding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(1):633-646.
- [9] DESHMUKH S S, GOSWAMI A. Microlens array through induction-aided hot embossing: Fabrication, optimization, and characterization[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2022, 37 (13):1 540-1 554.
- [10] GUO Z C, XIE J, YANG J H, et al. Rapid mold temperature rising method for PEEK microcellular injection molding based on induction heating[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26:3 285-3 300.
- [11] SIMOES R, MACEDO C, LARANJEIRA J, et al. Development of a rapid heat cycle injection molding system using infrared radiation and convection heating and influence on morphology and mechanical properties[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 130(1):283-295.
- [12] XIAO C L, KAHVE C, FU C M. Multi-objective optimization of heating system for rapid thermal cycling molding mold with internal induction heating[J]. SN Applied Sciences, 2021, 3(6). DOI: 10.1007/s42452-021-04673-7.
- [13] 肖成龙,黄汉雄,曾盛渠.基于 PSO 的变模温吹塑模具电加热系统设计优化[J].塑料工业,2022,50(11):95-100.
XIAO Chenglong, HUANG Hanxiong, ZENG Shengqu. Optimal design of electric heating system in variotherm blow mold by particle swarm optimization[J]. China Plastic Industry, 2022, 50 (11):95-100.
- [14] XIAO C L, HOPMANN C, KAHVE C E. Development of variotherm extrusion blow molding technology to produce high-gloss automotive spoilers[J]. Journal of Polymer Engineering, 2023, 43 (5):465-474.
- [15] CERVANTES-VALLEJO F J, HERNÁNDEZ-NAVARRO C, CAMARILLO-GÓMEZ K A, et al. Thermal-structural optimization of a rapid thermal response mold: Comprehensive simulation of a heating rod system and a fluid cooling system implemented MSR-PSO-FEM[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 47. DOI:10.1016/j.tsep.2023.102279.
- [16] XIAO C L, HUANG H X. Multiobjective optimization design of heating system in electric heating rapid thermal cycling mold for yielding high gloss parts[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(6). DOI:10.1002/app.39976.
- [17] KITAYAMA S. Process parameters optimization in plastic injection molding using metamodel-based optimization: a comprehensive review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(11):7 117-7 145.