

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.02.017

一种新型高光注塑模具加热方法的模拟和实验研究^{*}

吴康^{1,2}, 周海¹, 王龙宝^{1,2}, 石代恩¹, 龚凯¹

(1. 江苏大学, 江苏镇江 212013; 2. 盐城工学院, 江苏盐城 224051)

摘要: 采用电加热方式的高光注塑模具可以有效消除传统注塑成型过程中塑料件的熔接痕、浮纤、银纹等缺陷。然而直接将电加热棒插入模具孔中, 由于间隙处的空气, 大大降低了传热速度, 提出一种新型电加热方法, 通过在电加热棒与模具之间填充一种导热液, 改变电加热棒与模具之间的接触状况, 建立三维传热模型, 并通过模拟和实验研究, 证明了这种方法可以提高40%的加热效率, 同时还能降低电加热棒内部40%的温度。

关键词: 新型电加热; 高光注塑模具; 热响应; 模拟; 实验

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)02-0077-05

Numerical Simulations and Experiments of a New Rapid Mold Heating Method for Rapid Heat Cycle Molding

Wu Kang^{1,2}, Zhou Hai¹, Wang Longbao^{1,2}, Shi Daien¹, Gong Kai¹

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: The defects-such as weld bond, floating fibre, sliver veins etc in traditional injection molding could be eliminated by rapid electric heating cycle injection molding technology. The gap between the mounting holes and heaters heavily effect the thermal response efficiency of this cavity surface. A new rapid mold heating method was developed for this problem. By using this method and filling a kind of liquid with good thermal conductive characters, the contacting condition between the mounting holes and heaters was changed. Both numerical simulations and experiments were performed to evaluate the thermal response efficiency of mold surface. The results show that thermal response efficiency of mould surface compared with other conventional rapid mold heating methods could be improved by 40% through this method. At the same time, the temperature of the electric heating rod could be reduced by 40%.

Keywords: new electric heat; rapid heat cycle molding; thermal response; simulation; experiment

高光注塑成型技术(RHCM)是一种基于对模具温度快速动态变化的聚合物注塑成型技术。与常规注塑技术不同的是,该技术通过快速控制温度变化,可消除塑料件表面熔接痕、流痕和银纹等缺陷,可得到一次成型无需后续加工的高品质外观塑料件,并且显著提高生产效率、降低成本且减少环境污染^[1-5]。

电加热变模温是一种有效的高光注塑成型加热技术,以其独特的优势(随着温度的进一步升高,电加热的效率亦明显高于其他类型的加热方式^[6];加热棒的应用使得模具不需要外设热源,而且价格低廉,大大降低了高光模具的生产成本^[7])广泛应用于高品质的塑料件的成型过程中。电热变温是利用电热元件通过导热加热模具的技术。工作原理是在塑料熔体注入模具型腔之前,利用埋设在模具内的电加热棒通过导热将模具型腔和型芯迅速升温至熔体玻璃化转变温度以上,并在充填和保压阶段保持高温,在冷却阶段,通过模具内部的冷却系统将模具

快速冷却至一定温度后,开模取出塑料件。

然而在实际加热过程中,电加热的加热效率与模拟的理想加热效率差距较大,原因是电加热棒与模具孔的制造偏差以及为了方便安装,电加热棒与模具安装间孔之间有一定间隙,当模具孔越长,间隙越大,空气层越厚,加热效率就越低,为了避免间隙过大,电加热棒需紧紧地安装在模具的安装孔中,因此,将安装好的电加热棒从安装孔中拆卸出来也是非常困难的,这给电加热元件损坏时的更换维修带来了极大的困难^[8]。可见,直接将电加热棒插入模具孔中的加热方式不可避免地造成了空气层的存在,阻碍热量向模具方向传递,进而影响塑料件成型品质和生产效率,同时还会影响电加热棒温度场的

^{*} 国家自然科学基金项目(51675457),江苏省产学研前瞻性创新资金项目(BY2016065-55),江苏省“六大人才高峰”项目(2013-ZBZZ-026)

联系人: 周海,教授,主要从事 CAD/CAM 一级超精密加工研究
收稿日期: 2016-12-04

分布,影响电加热棒的寿命。

为了提高加热效率,方便装卸,同时降低电加热棒内部最高温度,延长电加热棒寿命,笔者提出了一种新型电加热方法,并对这种新型电液混合加热方法进行了实验研究和数值模拟,证明了其有效性。

1 模型与方法

1.1 研究的模型

普通加热方法一般直接将加热元件插入模具的安装孔中,模具和加热元件不可避免地存在一定的间隙,间隙大小主要取决于电加热棒和模具安装孔的制造公差大小以及安装孔的长度,而新型加热技术,是把这个间隙适当地扩大,并将导热系数良好的导热液(笔者采用镓锑合金^[9])填充到模具与加热元件的间隙中。笔者对普通的电加热技术和新型电加热技术进行了模拟和实验的对比研究,将新型电加热技术的实验记为实验组,而普通电加热技术的实验记为对照组,为了实验的简便和准确性,所用的模具为一圆筒形简易模具,模具内孔插入加热元件,为了防止充盈物泄露,两端用法兰密封,实验组中的电加热棒与模具之间的间隙取 1 mm,而对照组中的电加热棒与模具之间的间隙根据经验值取为 0.1 mm,模型如图 1 所示。实验组和对照组的各尺寸参数大小如表 1 所示。

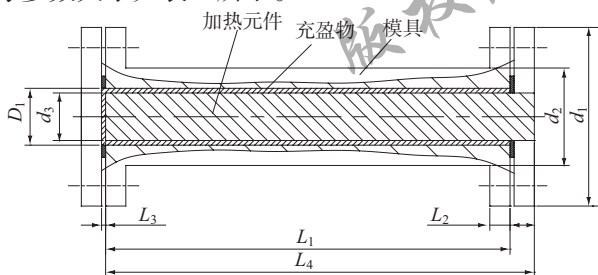


图 1 研究模型

表 1 研究模型的各尺寸大小

组别	d_1	d_2	d_3	D_1	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
对照组	44.0	24.0	11.8	12.0	100.0	5.0	1.0	106.0	100.0	110.0
试验组	44.0	24.0	12.0	14.0	100.0	5.0	1.0	106.0	100.0	110.0

1.2 研究方法

为了验证这种电液混合的新型加热方法的有效性,分别进行了模拟研究和实验验证。对于高光注塑模具的加热,将模具加热到目标温度的时间越短或者加热相同时间模具温度越高,则加热效率就越高,笔者采取将模具加热相同时间 60 s,比较两种方案下模具表面的平均温度。

(1) 模型简化与假设。

加热元件采用市场上模具加热专用的高功率

密度单头电加热棒,此种电加热是在一定直径的氧化镁管上均匀绕上电热丝,然后放在无缝不锈钢内,填充导热性能和绝缘性良好的氧化镁粉后缩管而成。这种电加热棒由内向外可以将其分为四层,分别为氧化镁管、电阻丝、压缩氧化镁粉层、不锈钢管,结构图如图 2 所示。

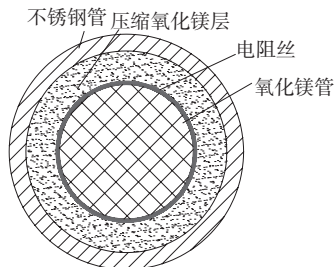


图 2 电加热棒结构图

模型中的各层材料各向同性,且其热物性参数不随温度变化。

忽略电加热棒的冷端作用,认为电加热棒沿长度方向发热均匀,忽略紫铜片厚度,同时将电加热棒长度等效为 110 mm。

电加热棒由 4 层组成,假设压缩后的氧化镁粉层与镍铬丝之间以及与不锈钢管的内壁有接触热阻,且两处接触热阻一样大,而其他处无接触热阻。假设电热丝为 0.2 mm 厚的圆形薄层。为了估计电加热棒内部两处接触的热阻的大小,对电加热棒进行了空烧实验,发现接触热阻的大致范围在 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ k} \cdot \text{m}^2 / \text{W}$ 之间,与固体与固体之间的接触热阻数量级吻合^[10-12]。

由于模拟的加热时间较短,模具和电加热棒温度较低,忽略热辐射,只考虑模具与外界的对流换热。

在电加热棒与模具之间存在着有限空间的空气夹层,夹层空气的流动取决于以厚度为特征的 G_r 数: $G_r = (g\beta(T_h - T_c)\delta^3) / \nu^2$, 经估算为 2×10^{-3} , 对于水平夹层, G_r 远小于 2430, 故可以认为夹层空气为纯导热^[13]。

简化假设之后的物理模型如图 3 所示,简化假设后的尺寸如表 1 所示,模型各层材料的热物理参数如表 2 所示。

(2) 边界条件与初始条件。

1) 边界条件的确定。

(a) 氧化镁粉层与电阻丝以及不锈钢管之间。氧化镁粉末经缩管后残留在电阻丝与氧化镁层、氧化镁层与不锈钢之间空气会形成一定的接触热阻,因

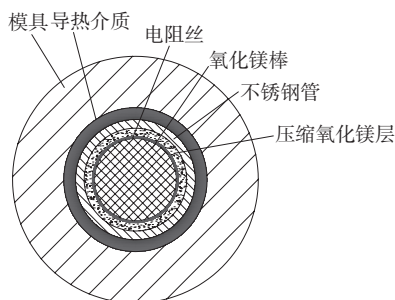
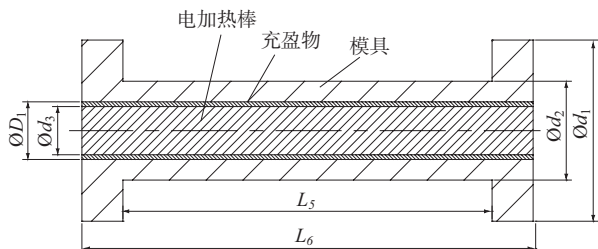


图3 模拟简化模型

表2 各层材料的热物性参数

层名	导热系数 / [W · (m · K) ⁻¹]	比热容 / [J · (kg · °C) ⁻¹]	密度 / (kg · m ⁻³)
氧化镁棒	21	882	3000
电阻丝	12.27	500	900
氧化镁粉	21	3000	3000
不锈钢管	18	7800	7800
空气层	0.03	1009	1
导热液	28	300	6100
模具	38	500	7880

此电阻丝与氧化镁层、氧化镁层与不锈钢之间有接触边界条件,其换热边界条件的表达式分别为:

$$-\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_m = \frac{1}{\xi_1} (T_s - T_m) \quad (1)$$

$$-\lambda_g \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_g = \frac{1}{\xi_2} (T_m - T_g) \quad (2)$$

式中: λ_m , λ_g 分别为氧化镁、不锈钢的导热系数; ξ_1 , ξ_2 为电阻丝与氧化镁层、氧化镁与不锈钢管之间的接触热阻; T_s , T_m , T_g 分别为电阻丝、氧化镁、不锈钢边界处的温度。

(b) 模具与外界环境的对流边界条件。

$$-\lambda_j \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_j = h(T_j - T_w) \quad (3)$$

式中: λ_j 为模具的导热系数; T_j , T_w 为模具外表面和环境温度; h 为对流换热系数。

2) 初始条件的确定。

根据实际生产情况,模具的初始温度设为 27℃。为了模拟电加热棒的实际加热作用,在电热丝上施加加热生成密度载荷,其值可根据公式(4)计算。

$$q = \frac{P}{\pi \times (r_1^2 - r_2^2) \times L} \quad (4)$$

式中: q 为电热丝体热生成率; P 为电加热棒功率; r_1 为电热丝薄层外径; r_2 为电热丝薄层内径; L 为电加热棒长度。

将 $P=400$ W, $r_1=0.0042$ m, $r_2=0.004$ m, $L=0.106$ m 代入式(4)得到电热丝体热生成率为 $q=7.06 \times 10^8$ W/m³。

(3) 数值模拟。

基于上述简化的模型,在 ANSYS 软件中建立这两种电加热高光注塑模具的三维传热模型,并设置相应的材料属性。利用四面体单元对模型进行网格划分,并在氧化镁粉层与镍铬丝之间以及与不锈钢管的内壁间设置一定的接触热导,待完成所有加载后,对这两种电加热方法的传热过程的温度场进行求解。

2 实验论证

为了对比这两种电加热方法的效果,笔者还进行了实验验证。为了准确测量温度,在电加热棒镁管的中部插入 K 型热电偶,同时在模具外表面相应位置(模具表面的中部点 A、距离中部 30 mm 的两端点 B、C,并且保证三点在一条直线上)焊接三个 K 型热电偶,热电偶位置如图 4 所示。采用 YUDIANAI-516 型温度显示仪, TEDGZ-20 KVA 型单相调压器。实验前,测量电加热棒的实际电阻,调节电压使得电加热棒的功率为 400 W,实验过程中随着温度的升高,电阻丝电阻不断变化,微调电压,使得电加热棒的功率维持在 400 W。保持室温在 27℃左右,给电加热棒通电 60 s,实验数据每隔 2 s 由智能控制器读取,每组实验重复三次,最终结果取其平均值。

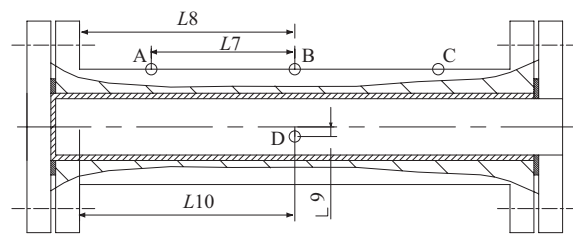


图4 测温点示意图

3 结果与讨论

模拟实验模拟了电加热模具的 60 s 加热过程,在模具表面设置了三个温度追踪点 A, B, C,在电加热棒内部设置一个温度追踪点 D,各点的位置与实验设置一致。模具的表面平均温度可近似认为是

A, B, C 三点温度的平均值。

图 5 为对照组和实验组的电加热棒内部温度和模具表面平均温度的热响应模拟曲线。由图 5 可以看出,实验组的模具表面热响应明显快于对照组的模具表面热响应,实验组加热 60 s 模具表面温度可达 153.61℃,而对照组则为 107.19℃。实验组 60 s 的升温速度为 2.56℃/s,而对照组的升温速度为 1.79℃/s。同时,实验组和对照组在电加热棒内部温度上差异更加显著,加热 60 s 后,实验组的电加热棒内部温度为 263.09℃,而对照组的电加热棒内部温度高达 418.26℃。

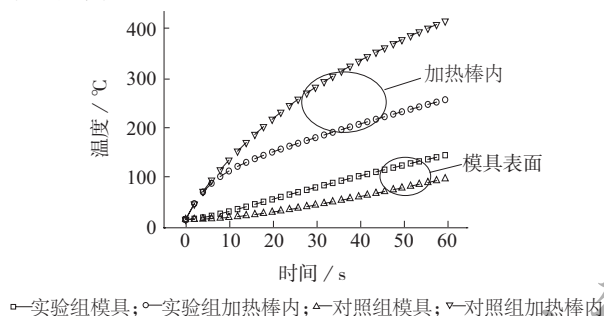


图 5 模拟的热响应曲线

图 6 为试验组模拟和实验的电加热棒内部和模具表面平均温度的响应图。图 7 为对照组模拟和实验的电加热棒内部和模具表面平均温度的响应图。

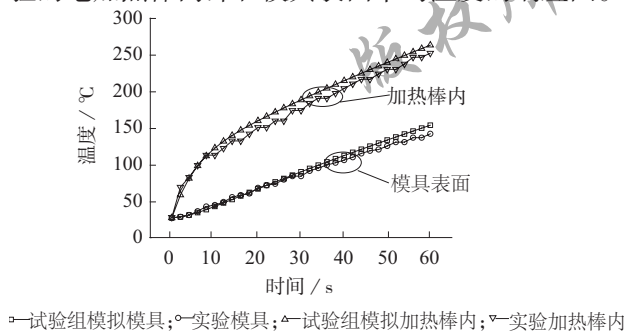


图 6 试验组模拟和实验的温度响应图

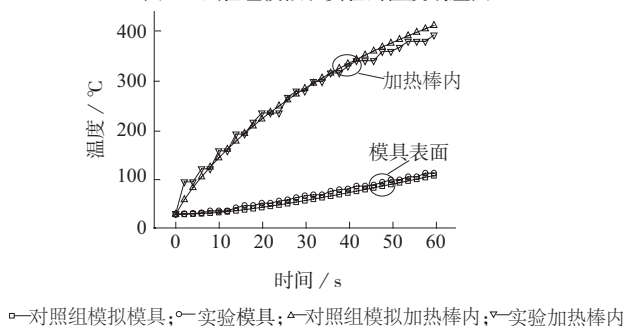


图 7 对照组模拟和实验的温度响应图

从图 6、图 7 可以看出,模拟和实验基本吻合。对照组的模拟与实验的电加热棒内部温度在前 6 s 时有较大误差,是由于实验时通电瞬间,电压过高造

成的,其他处误差均小于百分之十。实验的对照组的模具表面平均温度较模拟的偏高,可能是由于模拟时没有考虑电加热棒与模具之间的热辐射传热,而实际传热过程中,热辐射可以减小热量在空气处的传递阻碍。模拟的实验组电加热棒内部温度较实验的偏高,可能是由于导热液在温度升高后,导热系数逐渐增大,有利于温度向外传递,而模拟时假设导热系数处于一个恒定值。

4 结论

提出了一种新型的电加热高光注塑模具加热技术,构建了基于这种加热方法的模具加热三维热响应分析模型,利用有限元分析软件 ANSYS 进行了瞬态传热分析,通过对照模拟,分别得到了常规电加热高光注塑模具和加入导热液新型高光注塑模具的热响应曲线。同时,通过实验,验证了模拟的准确性。结果显示,采用这种新型电加热方法,经过 60 s 加热,模具表面平均温度可由传统加热方法的 107.19℃ 增加到 153.61℃,模具表面平均温度速率可由原来的 1.79℃/s 增加为 2.56℃/s,因此可以提高 40% 的加热效率,同时还可以降低电加热棒内部百分之四十的温度,有效提高电加热棒的寿命。

参考文献

- [1] 赵国群,王桂龙,李辉平,等.快速热循环注塑技术的研究与应用[J].塑性工程学报,2009(1):190-195.
Zhao Guoqun, Wang Guilong, Li Huiping, et al. Research and application of rapid heating cycle molding technology[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009(1):190-195.
- [2] 王桂龙,赵国群,李辉平,等.变模温注塑技术的研究与应用分析[J].现代化工,2009(2):24-27.
Wang Guilong, Zhao Guoqun, Li Huiping, et al. Study of variotherm injection molding technology and analysis on its application[J]. Modern Chemical Industry, 2009(2):24-27.
- [3] 张明磊,于昕世,王小新,等.蒸汽高光无熔痕成型技术研究与应用[J].模具技术,2009(3):27-29,53.
Zhang Minglei, Yu Xinshi, Wang Xiaoxin, et al. Study and application of high-gloss & no-weldline steam injection molding technology[J]. Die and Mould Technology, 2009(3):27-29, 53.
- [4] Yao Donggang, Chen S C, Kim B H. Rapid thermal cycling of injection molds:an overview on technical approaches and applications[J]. Advances in Polymer Technology, 2008, 27(4):233-255.
- [5] Wang Xiaoxin, Zhao Guoqun, Wang Guilong. Research on the reduction of sink mark and warpage of the molded part in rapid heat cycle molding process[J]. Materials & Design, 2013, 47: 779-792.
- [6] Wang Guilong, Zhao Guoqun, Li Huiping, et al. Research of

- thermal response simulation and mold structure optimization for rapid heat cycle molding processes, respectively, with steam heating and electric heating[J]. Materials & Design, 2010, 31(1):382-395.
- [7] 刘斌,赵春振,吴明星. 模具加热与温控方法剖析[J]. 模具工业, 2009(5):1-6.
- Liu Bin, Zhao Chunzhen, Wu Mingxing. Analysis of heating and temperature control technique for injection mould[J]. Die & Mould Industry, 2009(5):1-6.
- [8] Wang Guilong, Zhao Guoqun, Wang Xiaoxing. Development and evaluation of a new rapid mold heating and cooling method for rapid heat cycle molding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78:99-111.
- [9] 谢开旺. 计算机热管理中的液体金属散热方法研究[D]. 中国科学院研究生院(理化技术研究所), 2009.
- Xie Kaiwang. Study on the liquid metal cooling method for thermal management of computer[D]. Technical Institute of Physics and Chemistry Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [10] 徐烈,杨军,徐佳梅,等. 低温下固体表面接触热阻的研究[J]. 低温与超导, 1996(1):53-58.
- Xu Lie, Yang Jun, Xu Jiamei, et al. The research of contact thermal resistance of solid surface at low temperature[J]. Cryogenics & Superconductivity, 1996(1):53-58.
- [11] 李志伟,徐烈,孙恒,等. 低温真空下固体界面间接触热导实验分析[J]. 低温与超导, 2004(1):55-58.
- Li Zhiwei, Xu Lie, Sun Heng, et al. Experimental research on thermal contact resistance under vacuum and low temperature[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2004(1):55-58.
- [12] 毕冬梅,陈焕新,王丽萍,等. 低温下接触界面热阻的实验与模拟研究[J]. 低温工程, 2011(5):46-49, 55.
- Bi Dongmei, Chen Huanxin, Wang Liping, et al. Simulation study on thermal boundary resistance between different metals at low temperature[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2011(5):46-49, 55.
- [13] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京:高等教育出版社, 2006.
- Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer theory[M]. The fourth version. Beijing: Higher Education Press, 2006.

欢迎订阅 2017 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘,请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物,月刊,大 16 开本,每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊,是中国合成树脂供销协会会刊,荣获首届、第二届、第三届国家期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2017 年定价 15 元/期,全年 180 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物,双月刊,大 16 开本,单月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊,荣获多项省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2017 年定价 15 元/期,全年 90 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号(1973 年)至 2016 年底共 44 卷 326 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售;同时也将《化学分析计量》自创刊号(1992 年)至 2016 年底

共 25 卷 115 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售。合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文,又可根据读者自定义的关键词进行全文检索,非常方便、实用。《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 550 元;《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 250 元。

邮局汇款:

收款地址:济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位:《工程塑料应用》杂志社

邮编:250031

电话:(0531)85878223 85878057 85878278

传真:(0531)85947355

银行汇款:

户 名:山东非金属材料研究所

开户银行:济南市工商银行经十一路支行

账 号:1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>