

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.03.009

基于外置式感应加热的注塑缺陷模拟及实验研究

王祖明,于沪平,尹红灵,夏松颖

(上海交通大学塑性成型工程系,上海 200030)

摘要: 针对注塑过程中常见的欠充缺陷,应用感应加热原理,对模腔表层金属进行快速加热,由此改善了因料流冷却过早产生的欠充缺陷。建立了 Moldflow 模型,模拟研究了模具温度对流动填充影响的因素。并通过实验验证了局部加热对注塑件欠充的改善效果,以及温度设置对欠充的影响。

关键词: 感应加热; 注塑件欠充; Moldflow; 模具温度控制

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2012)03-0037-05

Experiment and Numerical Simulation Research for Defect in Injection Molding Based on External Induction Heating Device

Wang Zuming, Yu Huping, Yin Hongling, Xia Songying

(National Die & Mould CAD Engineering Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: According to the usual short shot defect in injection molding, the induction heating resolution was used logically to raise the surface temperature of mold metal rapidly, and the short shot defect induced by the premature cooling of plastic fluid was improved. Moldflow model was built and the influence factors of mold temperature on flowing and filling were simulated. Then the improvement effect of partial induction heating on short shot defect of plastic part and the influence of temperature setting on the defect were tested by experiment.

Keywords: induction heating; short shot defect; Moldflow; mold temperature controlling

注塑件的常见缺陷具体可分为外观问题、工艺问题、性能问题等三大类。欠充是生产中经常出现的缺陷之一。其形成的机理^[1]可理解为: 注塑流体汇合处前端由于流动路径最长, 塑料熔体温度下降固化而形成; 或者因局部狭小模腔部分阻力过大, 且薄壁处冷却快而形成。就流动在型腔同一截面处的熔体而言, 由于贴近型腔壁处的熔体温度低于处于截面中心的熔体温度, 因而会形成温度梯度。通常, 熔体温度越高, 粘滞度就越低(反之亦然), 而粘滞度又决定了熔体的流速。因此, 当熔体温度不同时, 会形成流速梯度, 从而使得熔体由截面中心向型腔壁处卷入滚动前进。而远离浇口的型腔, 其温度损失较大, 温差造成的黏度梯度直接产生了塑料流体首末端的压力损失, 从而引起欠充。

总的来讲, 造成欠充缺陷的原因体现于实际生产中主要可分为温度、压力、时间三类^[2]: ①与温度相关的是模具温度、机筒温度、喷嘴温度、背压引起的温度、螺杆转速引起的温度、进入型腔的熔体在整个模具表面产生的温度、摩擦温度和引起气体产生的温度; ②与压力相关的是注塑压力、保压压力, 以

及流道与模腔阻力产生的压力损失; ③与时间相关的是注射速率、压力的作用时间、模具的闭合时间、材料的塑化时间、制品的冷却时间和螺杆转速。

调整注塑工艺参数如加大注塑压力、提高熔体温度等可避免这一问题, 但在某些情况下, 工艺参数的调整受到限制, 或者单纯提高某工艺参数会引起其它参数的恶化。以轿车前脸进气栅为例, 此注塑件形状狭长, 两侧浇口平衡进浇可使注塑件完成基本的填充, 但是料流行程过长及末端温度过低容易导致注塑件中部区域出现欠充缺陷, 这种情况下整体的工艺已经无法变动, 难以单方面的从改变某个工艺参数达到满注目的而不影响整体注塑效果, 所以急需一种额外的装置进行局部模腔加热, 保证料流在中部区域汇合时能在较高的模腔温度环境下完成满注。所以, 局部模腔温度控制的提出是具有实际意义的。

笔者主要针对此类问题, 在保证其它参数不受影响的前提下改变模具温度, 对塑料熔体的流动情

联系人: 于沪平, 副教授, 主要研究方向为模具技术与工艺

收稿日期: 2011-12-01

况及整体注塑填充情况进行了模拟研究,并由实验验证了模拟结果。

1 模腔局部加热方案的选择与实现

1.1 加热方案的选择

笔者采用外置式感应加热。与传统加热方式(如电阻丝加热方式等)相比,感应加热具有加热速度快、物料内部发热和加热效率高、加热均匀且有选择性、环境污染少、可控性好、安全性好等优点^[3-4]。电磁感应加热具有集肤效应的特点^[5],很适合于金属体(模腔表面)的浅度加热,以利于减少固化冷却时间。根据感应加热原理,感应电流(涡流)在被加热金属上的分布明显地集中于表层很小的范围内,而集肤的深度与电流频率具有密切关系,如下式所示^[6]:

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu}}$$

式中: δ ——集肤深度, mm;

ρ ——料筒的电阻率, Ω/mm , 一般来说金属材料筒的温度越高, 其值就越大;

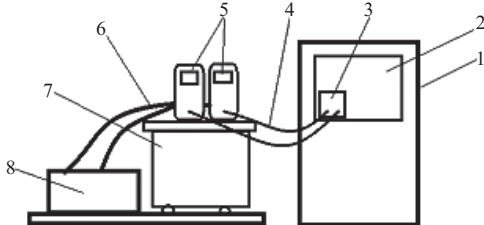
f ——电源频率, Hz;

μ ——料筒的相对磁导率, 真空中的和非铁磁性物质其值取1, 铁磁性物质在居里点以下时远大于1, 居里点以上时接近1。

当使用感应加热方式对模腔表面进行加热时, 要求有加热快、冷却快、加热范围及深度可以控制等特点。而感应加热可以在这些方面满足实验要求, 是较理想的加热方式选择。

1.2 感应加热的实现

结合感应电源, 感应加热线圈及冷却水管, 组建感应加热外设置如图1所示。



1—注塑机床; 2—动模; 3—感应线圈; 4—连接软线; 5—感应电源;
6—冷却水管; 7—滑动工作台; 8—水槽

图1 感应加热外设置图

其感应加热速率图如表1所示。

一般的, 可以通过控制加热时间来调节加热的最终温度。而增大感应电源的输出功率, 则可以加快加热过程, 使金属坯料在更短的时间内达到预期

表1 加热时间对应最终温度数据表

加热时间/s	10	20	40	60	80	100	120	150	180
最终温度/℃	51	61	80	98	119	141	176	248	324

的温度值, 这也体现出感应加热在实际运用中的灵活性与普适性。

2 建模及分析

2.1 模具温度对欠充缺陷的影响分析

所采用的注塑件尺寸为 76 mm × 65 mm, 基本形状为“凸”形; 底板壁厚为 1.00 mm, 存在部分薄壁区域, 厚度仅为 0.50 mm; 两翼与顶端均布置有立柱及加强筋, 山形板顶部存在一处半圆形凸出厚壁设计, 进浇口布置在“凸”形板底部, 保证了两翼的饱满填充效果。注塑件整体效果如图2所示。

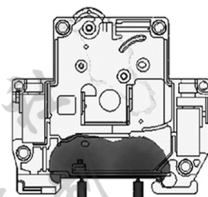
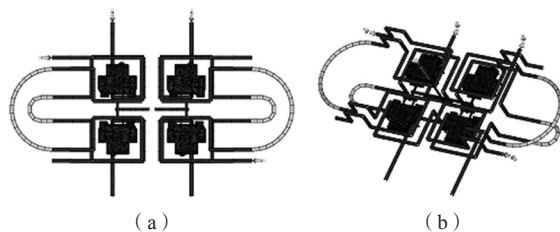


图2 注塑件标准型正反面结构示意图

通过 Moldflow 的三维建模功能^[7-8], 实现了注塑件模型的建模及网格划分, 如图3所示。



a—俯视图; b—等轴测图

图3 注塑件 Moldflow 模型图

根据以往的注塑经验, 初定了一系列注塑工艺参数, 注塑材料为聚丙烯, 模具温度初始值设为 50℃, 熔体温度初始值设为 232℃, 注塑压力 180 MPa, 注射速度 18 mm/s, 注射时间 4 s, V/P 转换设为自动, 保压压力与时间采用默认值。根据 Fill 和 Flow 分析数据, 得出如图4的填充结果(图4中 C-1, C-2, C-3, C-4 分别为模腔编号, 下同)。

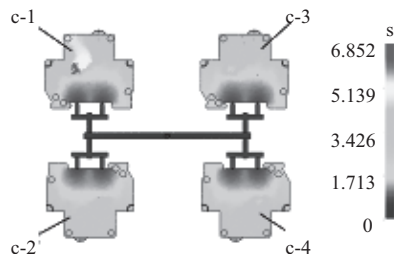


图4 180 MPa 注塑压力下的填充效果

Fill 和 Flow 分析显示此设置下填充体积比为

100%。继续调整工艺参数,主要通过适量降低注塑压力,使模型填充产生欠注效果。经过多次调整与模拟,发现当注塑压力调整为 165 MPa 时,填充结果出现明显欠充,如图 5 所示。

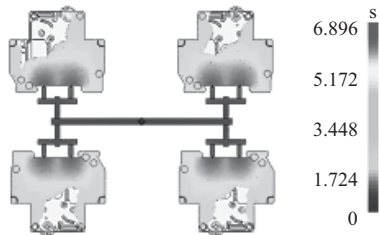
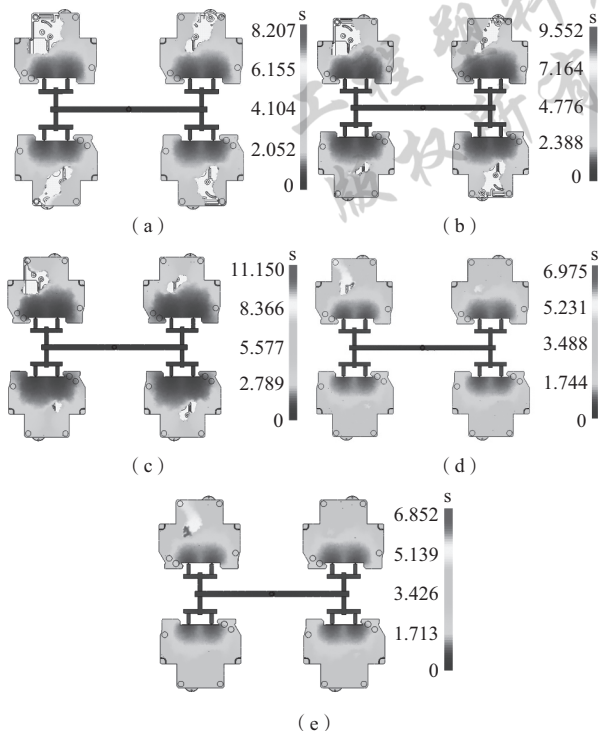


图 5 165 MPa 注塑压力下的填充效果

重新进行 Fill 和 Flow 分析,发现此设置下填充体积为 79.4%。

模具温度作为主要的控制因素,在以上设定中其设定均为 50℃。而在之后的模拟中,在保证其它参数设置不变的情况下,单一调节模具温度数值,记录模具温度上升时填充体积比的变化情况。进行 5 组填充模拟,模具温度分别设为 60,70,80,90,100℃,对应的填充结果图 6 所示。



a—60℃; b—70℃; c—80℃; d—90℃; e—100℃

图 6 不同模具温度下的填充结果

Fill 和 Flow 分析结果显示,60℃模具温度对应填充体积为 86.7%;70℃模具温度对应填充体积为 89.7%;80℃模具温度对应填充体积为 96.2%;90℃模具温度对应填充体积为 99.8%;100℃模具

温度对应填充体积为 100%。由 ORIGIN 拟合“模具温度 - 填充体积比”曲线如图 7 所示。

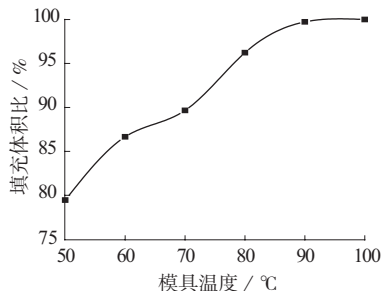


图 7 模具温度 - 填充体积比拟合曲线

从上述模拟结果可得出如下结论:

(1)随着模具温度的逐步提高,注塑件填充体积比有了明显的提高,说明模具温度对填充的影响显著。实际生产中有意识地提高模具温度能够降低欠充缺陷的出现概率或者使原有的缺陷得到改善,但是整体的模具温度提高会消耗能源,并增加模具坯料的冷却周期,从而影响到生产效率。基于此,笔者提出的外设感应加热装置能够实现模具快速加热与冷却,提高模具温度的同时不对生产周期产生明显影响,是解决欠充缺陷的理想方案。

(2)模拟得出的“模具温度 - 填充体积比”曲线显示,两个因素成非线性映射关系,具体的为 50~60℃区间与 70~80℃区间模具温度对提升填充体积比有着较高的效率,而其它模具温度区间内,提升模具温度对于填充体积比的提升效果相对较小。故在选择模具温度时,应根据具体情况考虑,不能简单的以线性原则选取理想模具温度。

(3)此系列填充模拟建立在单变量控制的原则上,除了模具温度的控制,其它工艺参数均保持不变,鉴于此,本“模具温度 - 填充体积比”拟合曲线在不同的工艺参数设置下可能会呈现不同的形状,有待更深入的研究。

2.2 欠充缺陷的形成过程分析

从系列填充模拟过程发现,注塑件欠充缺陷的形成是有一定规律的,为了研究这种形成过程规律,针对 C-3 模腔(见图 4)截取了系列填充过程的细节图片,如图 8 所示。

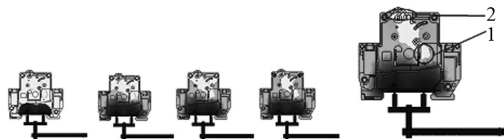


图 8 Moldflow 模拟的 C-3 模腔填充过程

从图 8 的注塑过程容易发现注塑件中心偏右

侧(圆圈所示1处)首先形成欠注;沿此处延伸至注塑件填充末端(椭圆圈所示2处)形成一条欠注带。多次模拟发现此类形状的欠注缺陷为本注塑件缺陷的典型。其形成原因可从浇口位置布置与注塑件设计形状两方面分析。

本注塑件采用同侧双浇口布置,料流从主浇道分流至C-3模腔对应的分浇道,由左右两侧浇口分别注入模腔;此后料流在模腔内沿左右两侧分别填充,最终于填充末端汇合达到填充目的,设计较为合理。然而,本注塑件末端存在一处圆弧形厚壁设计(椭圆圈所示2处),左侧浇口的料流此时已经处于填充末期,注塑压力与料温损失过大,无法支持厚壁部分的填充从而导致欠充。而注塑件中间偏右位置(圆圈所示1处)出现欠充则是由于注塑件薄壁设计所致。经检测,此处的壁厚仅为0.5 mm,而周围环境的底板壁厚均为1.0 mm,根据料流特性,在薄壁的上下表面层迅速冷凝后,给予剩余料流的流动空间急剧减少,或是完全闭塞,由此导致欠充缺陷。

针对这种产品设计与浇口设计已经无法改动的注塑过程,提高模具温度能有效地增强料流的流动性,克服薄壁区域的流动阻力与填充末端的低流动性,使填充趋于完整,有效改善了注塑件的质量与性能,提高了产品合格率。在生产过程中采用优化的局部感应加热方案,更能针对易出现欠充区域的模腔进行局部快速加热,提高能源利用率,降低外设装置对整体注塑方案的影响。

3 填充缺陷改善实验

根据Moldflow的系列模拟,对实验进行如下安排。实验模具为一模四腔,仅对C-3模腔加热,而另外模腔保持原温度。设计了多组以模具温度为唯一注塑环境变量的等条件对比实验。通过加热C-3模腔,维持其它模腔(C-1, C-2, C-4)的温度不变,得到C-3的“模具温度-填充体积比”情况,与之前的Moldflow模拟结果进行对比分析。

实验所用材料为普通聚丙烯颗粒;注塑工艺参数设置为熔料温度232℃、料筒恒温220℃、注塑压力165 MPa、保压时间2 s、保压压力100 MPa、注射速度30 mm/s。

实验所用设备为感应电源2台(15 kW功率输出型号)、感应线圈(附连接软管)2组、针形探头测温仪器1台。

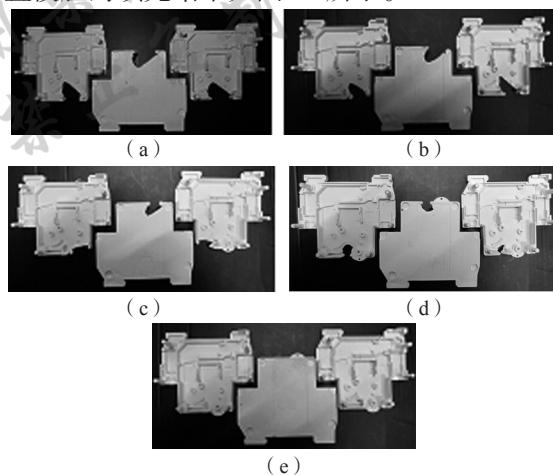
实验步骤以Moldflow模拟参数设置为指导,控制注塑机的模具温度处于50℃,以料流注射速度为

主要调节参数,调节至稳定填充状况,并持续出现注塑件部分欠充缺陷,得到C-3位置模腔3组成品效果如图9所示。



图9 50℃恒定模具温度时注塑出现的明显欠充

与模拟类似,维持此时的注射速度与其它参数不变,通过外设感应加热装置快速加热模腔后合模注塑。以图2为指导,分别控制模腔加热后瞬态温度为60,70,80,90,100℃,每组不同模具温度分别有3次重复实验以保证实验结果的合理性与可重复性(同等级温度条件下的重复试验中,注射时瞬时模具温度允许有 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的误差出现)。分别得到C-3位置模腔的填充结果如图10所示。



a—60℃; b—70℃; c—80℃; d—90℃; e—100℃

图10 不同模具温度下的实验填充结果

从图10可以看出,在保持其它注塑参数不变的情况下,逐步提高模具温度,对欠充注塑件的修复效果是明显的。由图10 a~e展示的填充结果表明,塑料熔体填充程度在模具温度100℃时已经能完全充满。事实表明,满充临界模具温度并非正好位于100℃,从90℃往上以1℃为单位,进行多次实验发现,94℃的模具温度可以使注塑件达到满注效果。

4 结论

(1) 模具温度作为一个较重要的因素影响了注塑填充的完成程度。“模具温度-填充体积比”在近似工艺参数设置下对实际生产具有一定的指导作用。

(2) 在注塑工艺参数正常情况下的欠充主要由

浇口布置与产品设计有关,在不改动浇口布置与产品设计情况下,提高模具温度可使欠充问题得到较好的解决。外置式局部加热装置可以解决实际生产中局部欠充的问题。

(3)以模拟的工艺参数指导了实验,并从实验结果验证了模拟的合理性。

参考文献

- [1] Rhee B O, Kim C S, Lee K. Evaluation of momentary-mold-surface heating (MMSH) Process [C]//Annual technical conference-ANTEC, conference proceedings. Boston, MA, United states : Society of Plastics Engineers, 2005 : 35-38.
- [2] Kim D H, Kan M H, Chun Y H. Wonder injection molding with momentary mold surface heating process (MMSH process) [C]//Annual technical conference-ANTEC, conference proceedings. Boston, MA, United states : Society of Plastics Engineers, 2000 : 3 841-3 844.
- [3] 李兆东,袁文生,王忠雷.微结构塑件模具温度控制探讨[J].模具工业,2006,32(6):55-58.
- [4] 王光才.电磁感应加热技术在塑料加工工业的应用[J].电力需求侧管理,2007,9(6):44-45.
- [5] 陆宝山.注塑缺陷原因分析及改善对策[J].机械制造与自动化,2009,38(4):84-87.
- [6] 马明兴.快速热循环注塑模具设计方法与优化研究[D].山东:山东大学,2008.
- [7] 乔立鹏.基于Moldflow注塑模具CAE技术研究[J].黑龙江科技信息,2004(5):14-15.
- [8] 王庆利.基于Moldflow的注塑制品收缩规律模拟实验研究[D].大连:大连理工大学,2005.

塑料精密成型技术与装备的研发及产业化

北京化工大学、海天塑机集团、浙江大学三家单位联手,在我国一纸空白的精密成型技术与装备领域,用8年时间达到或超过了世界先进水平。其生产的精密挤出成型装备制品性能与国际领先公司水平相当;精密注射成型装备制品质量重复精度比国际领先水平提高近一倍,产品畅销瑞士、德国和日本等数十个国家和地区,让海天塑机集团2010年销售收入跃居世界第一,为此,美国《塑料新闻》发表主编评论文章《海天超越全球列强》。项目成果也由此获得了2011年度国家科学技术进步二等奖。

据该项目第一完成人、北京化工大学教授杨卫民介绍,精密塑料制品是指具有严格尺寸与形位公差和表面质量精度要求的高端塑料制品,如手机零部件、液晶显示屏、光学塑料透镜、精密医用导管等,必须采用精密成型技术与装备来加工制造。精密塑料制品主要采用高效率的模型成型方法,不同于金属切削成型中通过“加工、测量、再加工”的“尺寸逐步逼近”来满足精度要求,而是一步到位直接成型制品,在20 m/min以上的连续高速挤出和不足1 s的瞬间注射成型中,要满足高精度的尺寸偏差和重复精度要求,难度极大。

在本项目实施前,这类技术和装备完全被国外公司所垄断,特别是在2004年,德国Arburg公司制造出了重复精度达0.07%的精密注塑机,在业内引起轰动,并快速占领了高端国际市场。而当时国产塑料注射成型装备制品重复精度在1%左右,只能用于普通塑料制品生产,无法满足精密成型最低标准0.1%的精度要求,更达不到Arburg公司的精度。由于国产装备精度低,我国现代制造业发展所急需的塑料精密成型装备不得不大量进口。我国进口精密注塑机的数量从2001年的近1.4万台增长至2004年的近2万台。这种依赖进口的不利局面,直到2006年前后,本项目取得突破并大规模应用时才被彻底扭转。

塑料精密成型核心是对制品比容稳定性(挤出成型)或重复性(注射成型)的精确控制。杨卫民指出,在所有塑

料成型过程中都存在一种规律,那就是压力和温度会对比容产生一定影响,而比容的变化则会引起成型制品质量和形状尺寸变化,这就是塑料的PVT特性。只有掌握了塑料加工过程中的这种特性,并研制精密成型装备对工艺参数进行有效控制,才能获得精密制品。

塑料PVT特性关系测试的核心技术在我国长期处于空白,全球也仅有德国、日本和美国的三家公司掌握。针对这个问题,项目完成单位潜心攻关,终于发明了塑料PVT特性的在线测试方法及装置,攻下了精密成型技术与装备国产化路上的第一关。新技术一改国外技术只能进行离线测试的缺点,率先实现了在线测试。利用这个技术,项目完成单位建立了我国第一个工程塑料PVT特性关系数据库,包含五大系列60多个品种近2000个牌号的工程塑料,为塑料精密成型装备PVT在线控制奠定了基础。

在此基础上,针对精密成型的主要影响因素,项目完成单位经过8年攻关,通过工艺装备创新和系统集成,突破了塑料均匀塑化与稳定输送、伺服驱动与液压控制优化、模板结构及精密成型工艺优化、塑料注射充模成型过程可视化方法和装置等关键技术,成功研制出了具有国际领先水平的精密注射成型和精密挤出成型装备,并实现了大规模产业化。

这些技术的开发大都是从零开始,但多数成果却填补了国内空白,有些成果甚至领先国际。注射成型可视系统就属于国内首创,比肩国际。该技术研究了注射成型中20余种典型缺陷的产生机理及解决措施,并编制了《注射成型工艺指南》,为精密塑料制品生产制订合理成型工艺提供了保障。

经权威机构检测,本项目研发的精密注射成型装备主要性能指标优于国外同类先进技术,精密挤出成型装备主要性能指标达到国际先进水平。目前已建成精密挤出成型生产线达34条,28种机型的精密注塑机已大规模生产并已售出6万余台,畅销瑞士、德国和日本等全球数十个国家和地区。2008~2010年累计销售收入107.3亿元,利润16.15亿元,税收8.13亿元,创汇2.17亿美元。(工程塑料网)