

# 盒形件压铸模具冷却流道排布的研究

张琦<sup>1</sup>, 陈余秋<sup>1</sup>, 方建儒<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 一汽铸造有限公司铸造模具厂, 130062, 长春)

**摘要:** 为了给盒形件压铸模具冷却流道的设计提供依据,提出了一种新的冷却流道排布的优化方法. 采用有限元模拟对盒形件压铸模具的热平衡、温度场、热应力、热疲劳分布和铸件的凝固分数进行了分析,确定出了冷却流道传热系数和流体流速之间的关系,在模具冷却流道横向排布和纵向排布情况下,得到了模具热应力、热疲劳和铸件凝固分数随冷却流道排布间隔变化的规律. 考虑到模具材料的屈服应力随温度变化的特点,提出了采用热应力影响因子来评估模具在热应力作用下的安全程度. 研究表明,在满足生产效率的情况下,为保证工件能够达到一定的凝固分数,应尽可能地增大冷却流道的间距,以减小模具热应力,增加模具的热疲劳寿命. 当冷却流道横向排布间距为 25 mm 时,模具只需 6 次循环即可达到热平衡,模具的热应力和热疲劳区域位于模具型腔下 10 mm 以内的区域,并且热应力影响因子均小于 0.5.

**关键词:** 冷却流道排布;模具热平衡;热疲劳;压铸模具

**中图分类号:** TG249 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)07-0038-07

## Study on Cooling Channel Arrangement of High-Pressure Casting Die for Box-Like Workpieces

ZHANG Qi<sup>1</sup>, CHEN Yuqiu<sup>1</sup>, FANG Jianru<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Mold Factory, FAW Foundry Co. Ltd., Changchun 130062, China)

**Abstract:** To design high-pressure casting die for box-like workpieces, a new optimization strategy for cooling channel arrangement is proposed, solid fraction of a box-like workpiece, and thermal balance, temperature field, thermal stress and thermal fatigue of a high-pressure casting die for workpieces are analysed by FE simulation. The relationship between cooling channel heat-transfer coefficient and flow rate in cooling channels is presented. In the cases of cooling channel arrangement along the cross and longitudinal directions, the die thermal stress, thermal fatigue and workpiece solidification are investigated with the increasing cooling channel intervals. Because the yield stress of die material varies with temperature, a factor related to thermal stress is applied to evaluate the margin of die safety under thermal stress. On the premise of the productivity effect and an appropriate solidification of workpieces, the cooling channel intervals ought to be increased as possible to decrease the mold thermal stress. When the channels are arranged with interval of 25 mm, the mold needs 6 cycles to reach thermal balance; and  $n$  gets less than 0.5, the area of the mold thermal stress and thermal fatigue is located 10 mm below the cavity.

**Keywords:** arrangement of cooling channels; thermal balance of mold; thermal fatigue; high-pressure casting die

压铸工艺被广泛应用于汽车、摩托车、家用电器、电子通讯等行业,尤其是汽车行业.在压铸过程中,压铸模具是成型的关键部件,而压铸模具的温度控制对提高压铸件的表面质量、稳定压铸件的尺寸精度、缩短铸件的生产周期、降低模具的热应力以及延长模具的使用寿命等都具有重要的影响作用.模具温度的调节方法是在模具内部设置冷却水流动,通过调节模具不同部位的冷却水流量和改变冷却流道在压铸模具内的排布形式,来控制压铸模具的温度分布.

目前,研究人员开展了影响压铸模具冷却流道的相关工作. Lin<sup>[1]</sup>分析了流道间距、流道与型腔之间垂直距离对模具变形的影响规律,从而获得了最佳冷却系统的相关参数. Kosec 等人<sup>[2]</sup>用热影像仪测量了压铸模具表面的温度场,并对模具的疲劳失效形式进行了分析. Aloe 等人用 ProCAST 铸造模拟软件对压铸过程进行仿真,结果表明,当模具上设置流道时,沿着流道的热应力较大,但疲劳寿命较短. Srivasrava 等人<sup>[3]</sup>通过有限元和实验的方法,预测了压铸模上热裂纹产生的区域、裂纹分布方向和模具失效前的循环数. Hu 等人<sup>[4]</sup>用实验的方法研究了冷却流道的流速对压铸模局部模温的影响,获得了散热量是关于冷却时间和水流速度的函数,即流速越大,散热越快.因此,水流速度越高,冷却水流道的输出水温到达热平衡的时间越短,则平衡温度就越低.

然而,针对模具冷却流道和铸件凝固分数,以及模具热应力、疲劳寿命等因素的系统研究还未见有报道,但这正是压铸生产工艺的制定及模具设计的关键.因此,本文将用于商用轿车的盒形类铝合金压铸件为例,采用有限元的方法,对模具进行热力耦合分析,得出了压铸模具的热平衡曲线和温度场,以及在此基础上得出的模具热应力影响因子、热疲劳寿命和铸件凝固分数随流道间距变化的关系.最后,通过综合分析得出了流道间距的合理选取范围,为模具水流通道的布置提供了设计依据.

# 1 冷却水与压铸模传热系数的计算

具有冷却流道的压铸模具可以通过改变冷却水的流速来调节冷却流道的冷却效果,在有限元模拟中,为了分析水流速对模具温度场的影响,采用设置不同的传热系数来等效水流速.

冷却水和模具之间的传热属于无相变(无汽或液的转变)强迫对流传热,在冷却流道内流体的实际

流动中,旺盛紊流是最常见的流动形式,而最常用的形式<sup>[5]</sup>为

$$Nu_f = 0.023Re_f^{0.8} Pr_f^m \quad (1)$$

其中,  $Re_f$  在  $10^4 \sim 1.2 \times 10^5$  之间,实际流体的  $Pr$  数在  $0.7 \sim 160$ ,  $Pr$  的指数为  $0.4$ .

流道与模具之间的传热系数

$$h_c = \frac{Nu_f \lambda}{d} \quad (2)$$

式中:  $\lambda$  为水的导热系数;  $d$  为流道的管径.文中模具的冷却流道为直径  $10 \text{ mm}$  的圆孔,其流速为  $1 \text{ m/s}$ ,则经计算可知模具与冷却流道直接的传热系数为  $5\,300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

# 2 盒形件有限元模型的建立及参数设置

ProCAST 软件是为评价和优化铸造产品与铸造工艺而开发的专业 CAE 系统,同时可以对压铸模在铸件充型、凝固和冷却过程中的温度场、应力场、热疲劳等进行模拟分析.

在对模型进行有限元分析前,先要建立铸件和动、静模的三维模型及其有限元模型.有限元模拟中网格的剖分质量是影响计算精度的重要因素,因此本文采用专业有限元前处理软件 Hypermesh 来生成高质量网格,然后将网格数据导入 ProCAST 软件中进行边界条件和相关参数的设置,最后利用 ProCAST 软件进行求解并进行后处理.

## 2.1 有限元模型的建立

压铸件主要是薄壁复杂形状的零件,且种类和形状各异,通过对一些压铸件的几何特征分析结果表明,很多零件都包含类似盒形件的结构.图 1a 为带有浇口、浇包和排气口的汽车变速箱上盖压铸件,其两侧都有类似盒形的特征.将该汽车减速器的上盖模型简化为盒形件(见图 1b),其尺寸与原铸件保持相同,长度为  $400 \text{ mm}$ ,宽度为  $260 \text{ mm}$ ,高度为  $60 \text{ mm}$ ,壁厚为  $15 \text{ mm}$ ,是原铸件的平均壁厚且质量与原铸件相当.

除了建立压铸件的简化模型,还需建立压铸模具的动模和静模,如图 2 所示.模具中当某点位置与型腔表面距离大于  $50.8 \text{ mm}$  时,铸件凝固时释放出的热量对模具在该位置温度的影响较小<sup>[6]</sup>.因此,本文将流道与模具型腔表面的垂直距离设为  $50 \text{ mm}$ ,流道的管径为  $10 \text{ mm}$ ,模具长为  $750 \text{ mm}$ ,宽为  $645 \text{ mm}$ ,下模厚度为  $120 \text{ mm}$ ,上模厚度为  $200 \text{ mm}$ .如图 3、图 4 所示,将模具内流道的排布方式分为横向

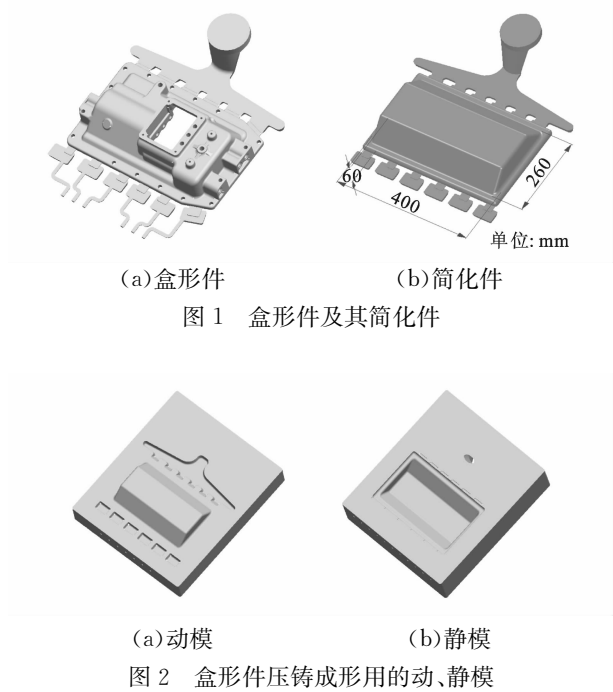


图 1 盒形件及其简化件

图 2 盒形件压铸成形用的动、静模

排布和纵向排布,当流道横向排布时,流道间距  $H$  分别为 25、50、75、100、125、150、175、200 mm(见图 3);当流道纵向排布时, $H$  分别为 25、50、75、100 mm(见图 4). 采用 ProCAST 软件进行分析时,铸件的四面体单元数为  $1 \times 10^5$ ,模具的单元数为  $1 \times 10^6$ .

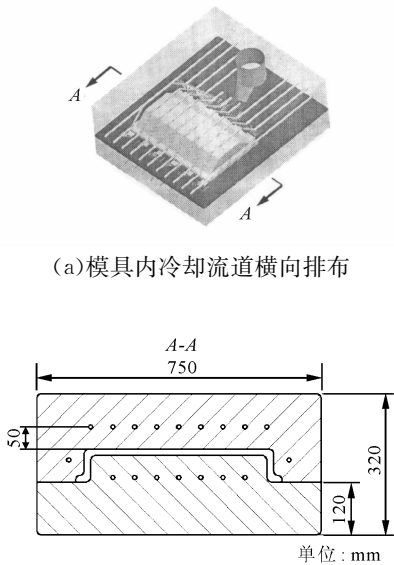


图 3 模具内流道的横向排布

## 2.2 模拟参数设置

压铸模具材料为 H13 钢,铸件材料为  $\text{AlSi}_5\text{Cu}_3$  铝合金,浇铸溶液的温度为  $675\text{ }^\circ\text{C}$ . 模具与铸件之间的传热系数为  $1\,500\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,动、静模之间的

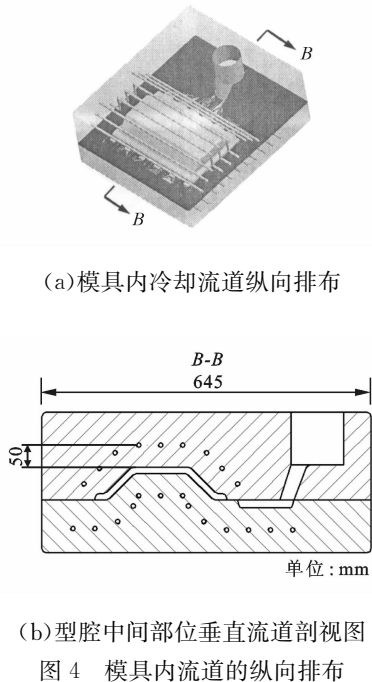


图 4 模具内流道的纵向排布

传热系数为  $1\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,冷却流道和模具间的传热系数为  $5\,300\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,空气与模具之间的传热系数设为  $10\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . 填充过程的时间由慢压射时间(4 s)、快压射时间(0.1 s)和持压时间组成,共 34 s. 开模、关模时间为 10 s,拔模时间为 10 s,一个循环周期时间为 64 s,模拟总共计算了 20 个循环周期,模拟中的室温为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ .

## 2.3 冷却流道横向排布的模拟结果分析

如图 5 所示,首先对模具冷却流道的排布进行设计,然后分析模具系统的热平衡和温度场,在温度场的基础上计算铸件的凝固分数、热应力和热疲劳,再将这 3 者结合起来进行综合分析.

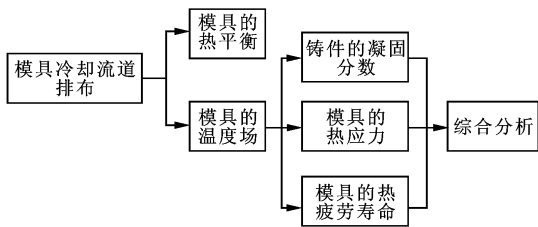


图 5 模具系统的分析流程图

2.3.1 模具的温度场模拟与分析 在进行温度场分析之前,首先要保证模具系统达到热平衡,然后在动模、静模和铸件上分别任取一点绘制热平衡曲线. 由图 6 可知,从第 6 个循环以后,各曲线的顶点和谷底分别处于同一水平线上,表明模具处于热平衡状态. 当流道间距增大时,热平衡所需的循环次数、达

到热平衡所需的时间也将增加,因此从生产角度上,要尽量减少热平衡之前的循环次数,以提高产品生产的合格率。

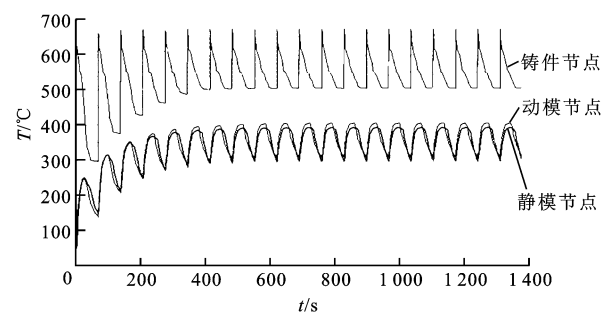


图 6 模具系统的热平衡曲线( $H=25\text{ mm}$ )

对温度场进行分析时,应选取模具达到热平衡时的状态,图 7 所示为热平衡状态下开模时刻的模具温度场的分布情况。由图可知,随着冷却流道排布间距的逐渐增加,动模及其型腔表面的温度也逐渐升高,使得型腔表面的温度分布越来越不均匀。当流道间距超过  $150\text{ mm}$  时,型腔表面温度分布开始呈波浪形状,在型腔中间部位垂直冷却流道的截面图中(见图 8),模具的温度分布由型腔表面向模具内

部形成一个温度梯度,而且主要分布在流道和型腔表面之间。同时,由流道间距增大造成的温度分布不均,会逐渐引起型腔表面温度场的分布不均。

铸件在凝固时,如果凝固分数  $\varphi$  过小,则会引起铸件的强度不够,脱模时就容易变形。当凝固分数过大时,铸件收缩大,抽芯和顶出铸件的阻力也过大,不仅不易拔模,而且也降低了压铸的生产率。因此,在生产中应使铸件的各个部位获得合适的凝固分数。

如图 9 所示,当铸件的流道间距增大时,铸件上会出现  $\varphi$  较低的区域,且越来越大;当开模顶出铸件时,这些区域会发生变形,铸件上  $\varphi$  低的区域最后凝固,而且容易产生缩松缩孔。

从图 10 中可以看出,随着冷却流道的增加,铸件的  $\varphi$  近似线性减小。流道间距越大,则冷却流道的个数越少,型腔表面到模具内部的温度梯度也越小,而模具冷却效果越差,铸件就越不容易凝固。

2.3.2 模具的热应力场和热疲劳分布 模具内的热应力主要产生于铸件与模具之间的温差,以及模具系统内部的温度梯度。在计算热应力时,将热平衡状态下模具的温度场作为初始温度场,假设在开模

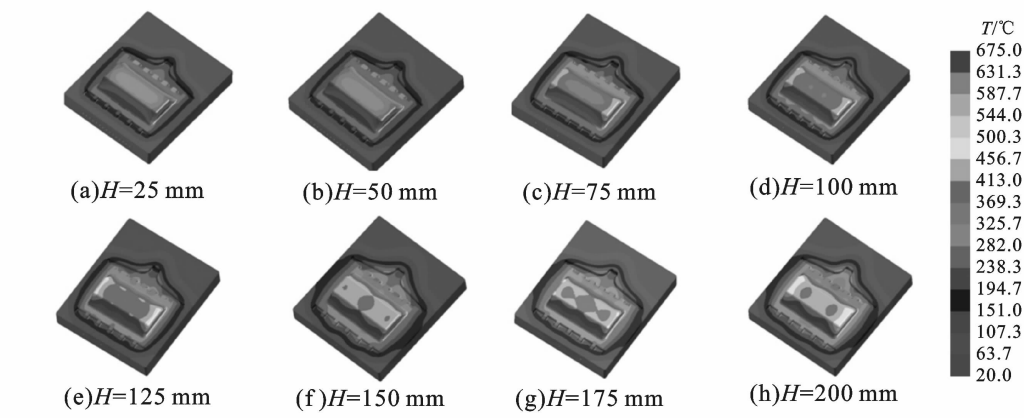


图 7 动模型腔表面的温度场分布

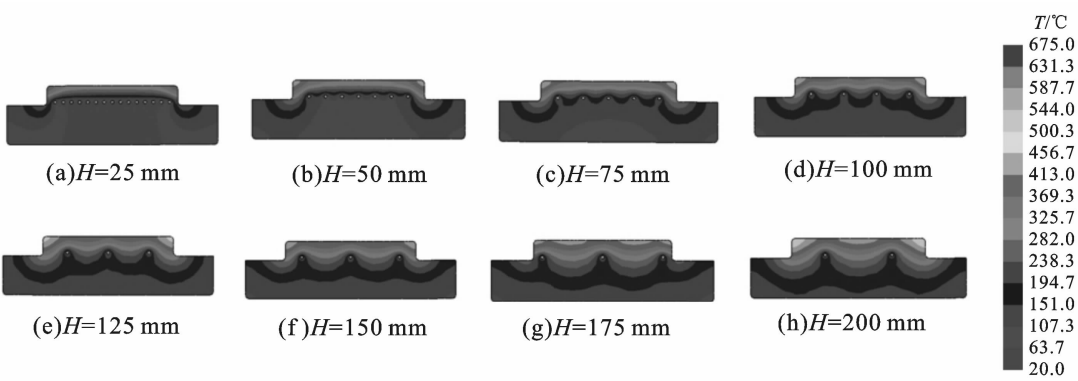


图 8 垂直流道截面的温度场分布

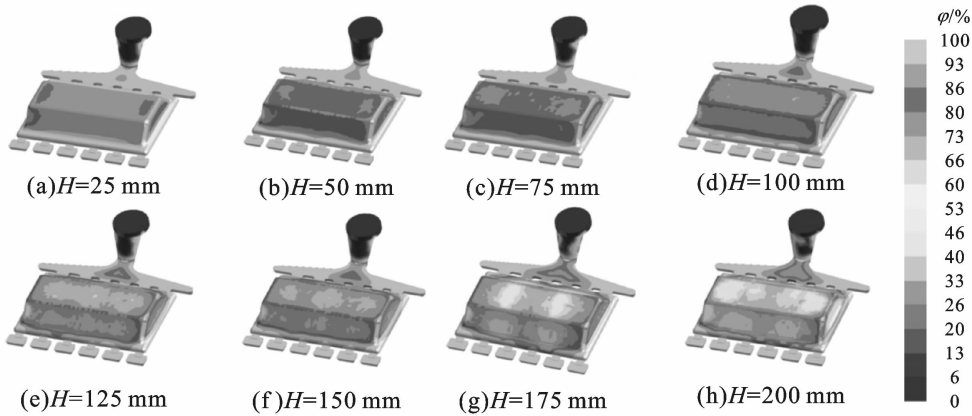


图 9 铸件凝固分数的分布

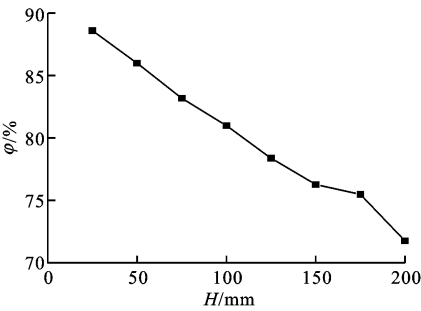


图 10 流道间距-凝固分数的趋势图

时刻,铸件和模具开始分离.在模具内部,热应力在一个循环周期内先由型腔表面向模具内部扩散、增大,在接近开模时刻达到最大,然后逐渐消退.开模时取不同流道间距下的热应力进行对比,发现热应力主要分布在型腔部位,分布深度在 10 mm 以内,在与铸件直接接触的部位可以看到,型腔表面热应力分布的整体数值随流道间距的增大呈下降的趋势(见图 11).

当流道间距发生变化时,模具型腔表面的温度和热应力的大小会随之变化,而且 H13 模具钢的屈服应力会随着温度的上升而下降.在正常情况下,热应力应小于屈服应力,否则模具则发生塑性变形.为了更准确地评估模具的热应力,应将热应力和屈服应力结合起来考虑,给出新的归一化参数热应力影响因子  $n$ ,即热应力与屈服应力的比值. $n$  越小,说明模具在承受热应力时越安全.当  $n$  小于 1 时,H13 模具钢发生弹性变形;当  $n$  大于 1 时,H13 模具钢发生塑性变形.在开模时刻,模具动模型腔表面与铸件接触中间部位的小区域内分别取平均温度值和热应力值,找出对应于这一温度值的屈服应力,将数值代入热应力/屈服应力计算式中,计算出  $n$  值.从图 12 可以看到, $n$  均小于 0.5,而且随着流道间距的增加, $n$  呈下降趋势,但模具则比较安全.

由于模具的循环次数低于  $10^4 \sim 10^5$ ,因此模具热疲劳的计算模型等效于低循环疲劳指标.在不同流道间距下,动模具的热疲劳预测如图 13 所示.在

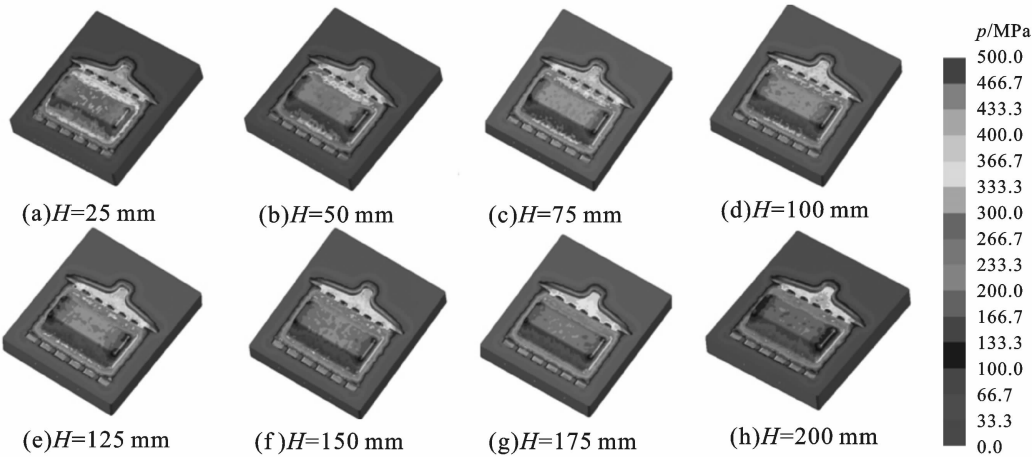


图 11 动模具的应力场分布

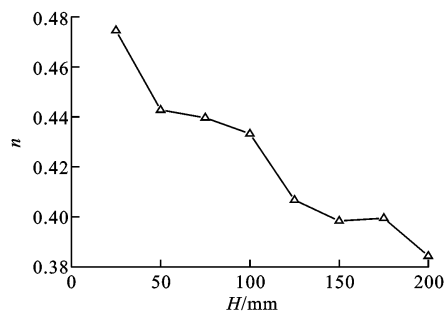


图 12  $n$  随流道间距变化的曲线

ProCAST 软件中,采用热疲劳指标  $\tau$  表示模具寿命的长短,该指标越高,模具的寿命越长,说明模具失效的可能性越小.从整体分布来看,当冷却流道间距增大时,模具与铸件接触部位的  $\tau$  也随之增加,并且  $\tau$  较小的区域主要分布在型腔表面下 10 mm 以内的区域,也是最容易发生疲劳破坏的区域.

同样,在模具型腔表面中间部位的小区域内获取平均疲劳指标值,绘制冷却流道与热疲劳寿命之间的关系图,如图 14 所示.模具热疲劳寿命随冷却

流道间距的变大而逐渐增大,由于热疲劳寿命由压铸过程中交替的冷热循环产生,因此与之对应的模具热应力和温度梯度也越大.

2.3.3 综合分析 综合  $\varphi$  和  $\tau$  随  $H$  增大的变化趋势,发现  $\tau$  逐渐上升, $\varphi$  则逐渐下降,两条曲线相交,如图 15 所示.因此,在满足生产效率的情况下,要保证工件能够达到一定的凝固分数,应尽可能地增大冷却流道的间距,以提高模具的热疲劳寿命.

从  $n$  和  $\varphi$  的角度,也可以综合  $\varphi$  和  $\tau$  随  $H$  增大的变化趋势.从图 16 中可以看出,随着  $H$  的增大, $n$  和  $\varphi$  都减小,且两者均近似呈现线性规律.

2.4 冷却流道纵向排布的模拟结果分析

本文对冷却流道呈纵向排布的情况进行了分析,其计算过程与冷却流道横向排布相同.纵向排布时冷却流道的间距分别为 25、50、75、100 mm.

图 17 所示为流道间距与热应力和热疲劳寿命之间的关系曲线.由图可知,随着冷却流道间距的增大, $n$  呈下降趋势,但模具热疲劳寿命则逐渐增大,其基本规律与流道横向排布是一致的.

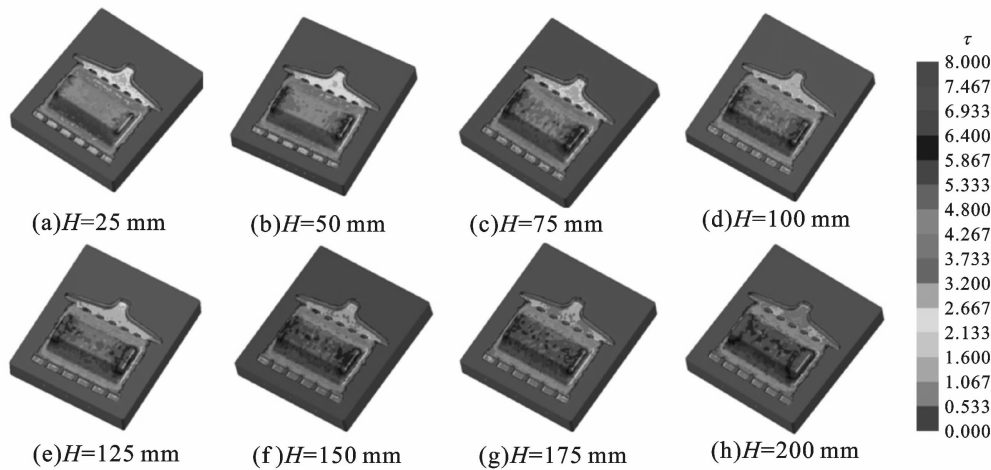


图 13 动模具的热疲劳指标值分布

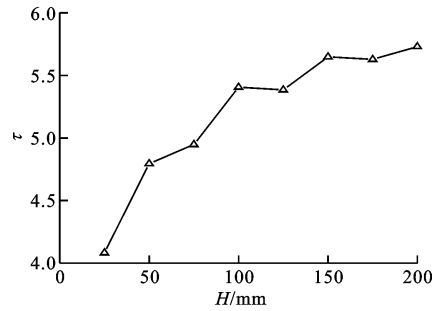


图 14 热疲劳寿命随流道间距变化的曲线

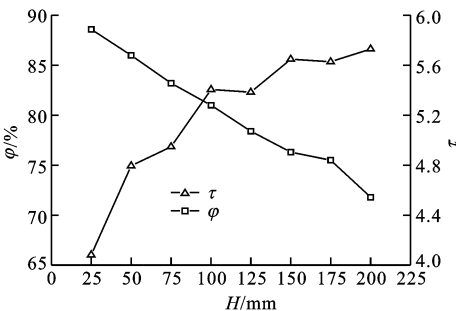
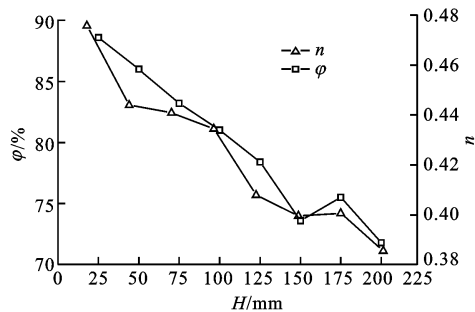
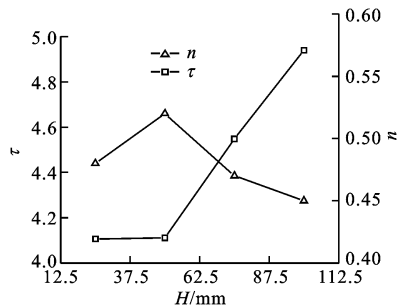


图 15  $\varphi$  和  $\tau$  随  $H$  变化的综合趋势

图 16  $\varphi$  和  $n$  随  $H$  的变化趋势图 17  $H$  与  $n$  和  $\tau$  之间的关系

### 3 结 论

本文采用有限元模拟的方法,系统地分析了盒形件压铸模具的冷却流道间距对模具热平衡、温度场、热应力影响因子和热疲劳寿命,以及对铸件凝固分数的影响规律,得到的结论如下。

(1)当模具的内流道间距增大时,其热平衡所需的循环数越多,达到热平衡所需的时间就越长;当冷却流道呈横向排布,流道间距为 25 mm 时,模具只需 6 次循环即可达到热平衡。

(2)随着冷却流道间距的增加,模具整体温度逐渐升高,模具中间部位与冷却流道垂直的横截面温度场呈波浪状,且模具型腔表面的温度分布也越不均匀。随着冷却流道间距的增大,模具的热应力影响因子减小,则热疲劳寿命增大、铸件的凝固分数减小,并且盒形件压铸模具的热应力影响因子均小于 0.5。

(3)在冷却流道纵向排布与横向排布的情况下,其模具温度、应力随流道间隔变化的规律相同,模具

的热疲劳寿命和热应力区域位于模具型腔下 10 mm 以内的区域。

### 参考文献:

- [1] LIN J C. The optimal design of a cooling system for a die-casting die with a free form surface [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Springer-Verlag London Limited, 2003,21(8):612-619.
- [2] KOSEC B, KOSEC A, SOKOVIC M, et al. Temperature field and failure analysis of die-casting die [J]. Archives of Materials Science and Engineering, 2007, 28(3): 182-187.
- [3] SRIVASRAVA A, JOSHI V, SHIVPURI R, et al. Computer modeling and prediction of thermal fatigue cracking in die-casting tooling [J]. Science Direct America, 2004, 256(1/2): 38-43.
- [4] HU H, CHEN Fang, CHEN Xiang, et al. Effect of cooling water flow rates on local temperatures and heat transfer of casting dies [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(1):57-67.
- [5] 苏亚欣. 传热学 [M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2009:120-142.
- [6] PADIYAR G. A study of die deformations in die casting [D]. Columbus, USA: Ohio State University, 1994.

### [本刊相关文献链接]

- 脉管制冷机的整机数值模拟. 西安交通大学学报, 2009, 43 (3):1-9.
- 等离子活化烧结过程的温度分布研究. 西安交通大学学报, 2011, 45(1):122-126.
- 板料成形回弹三维光学测量技术研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(9):51-55.
- 软紫外光压印光刻的模具制造研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(7):880-884.
- 基于层次分析法的模具网络化制造企业匹配技术. 西安交通大学学报, 2008, 42(3):291-294.
- 压印光刻中模具空间位姿的识别及仿真. 西安交通大学学报, 2007, 41(1):55-58.

(编辑 管咏梅)