

镁合金轮毂低压铸造模具冷却与温度场的模拟

谢敏¹, 王迎春¹, 李大永¹, 彭颖红¹, 曾小勤²

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院知识工程研究所, 上海 200030; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200030)

摘要:在镁合金轮毂低压铸造过程中, 易在轮辋与轮辐连接处产生热节, 对产品的质量造成不良影响。本文运用软件 PAM-CASTTM 对这些部位的模具冷却性能进行研究, 分析不同冷却方式对热节产生的影响。通过对比发现单独设置侧模冷却管道是一种有效的冷却方式, 能够很好地减小镁合金轮毂低压铸造凝固过程中在轮辐与轮辋连接处所产生的合金液体孤岛体积, 使其位置向轮心方向移动, 进而降低这些区域的缩孔缺陷。最后, 对铸造过程的模具温度场进行了循环模拟, 确定稳定生产前的浇注次数。

关键词:镁合金; 轮毂; 模具冷却性能; 温度场的模拟

中图分类号: TG292; TG21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8365(2005)04-0296-04

Investigation of Cooling Capacity and Temperature Field Simulation in Mold during LPDC of Magnesium Wheel

XIE Min¹, WANG Ying-chun¹, LI Da-yong¹, PENG Ying-hong¹, ZENG Xiao-qin²

(1. School of Mechanical Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China; 2. School of Material Science and Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai, 200030, China)

Abstract: The hot spots are easy to form at the rim/spokes junctions during the magnesium alloy wheel low pressure die casting, which have detrimental effect on the products. In the paper, the cooling performance at these key areas of mold was investigated using PAM-CASTTM in the casting process. Through analyzing the shrinkage defects generated in various cooling modes, it was found the cooling pip system set in the side mold alone was a valid way to enhance the cooling capacity at the rim/spoke junctions. The mode not only lowered obviously the volumes of hot spots at the areas, but also transferred the positions of the hot spots towards the center of wheel. Considering the great effect of temperature field in the mold to the quality of the casts, the simulation of the temperature distribution in the mold was implemented at last to ascertain the number of the cycles before the steady production.

Key words: Magnesium alloy; Wheel; Cooling capacity in mold; Temperature field simulation

在现有的镁合金产品中, 80% 为压铸件^[1~3], 汽车轮毂就是如此。在镁合金轮毂铸造中, 轮辐与轮辋连接处易产生热节, 形成缩孔。这些缩孔将影响到铸件的整体承载能力, 使铸件的使用寿命缩短^[4~7], 需严格控制。本研究, 在模具中采用局部冷却, 改善轮辐与轮辋连接处冷却性能, 限制热节的产生, 提高轮毂内部质量。

在压铸生产中, 模具与金属液体之间传热关系密切, 模具温度场的分布与稳定, 直接影响到产品的内部质量。因此, 模具初始温度场的确定对压铸

过程至关重要。铸造软件 PAM-CASTTM 采用有限差分法对浇注工艺进行填充和凝固的 3D 模拟, 并对流体通过的表面与坐标轴不完全一致的地方采用修正因子进行补偿, 更真实地模拟流体在模型中的流动。本文运用 PAM-CASTTM 对铸造过程的模具冷却性能进行模拟研究, 采用水冷对轮辐与轮辋的连接处进行冷却, 分析不同冷却方式的铸造效果。此外还对压铸过程模具温度场进行了循环模拟, 分析模具温度的分布情况, 确定稳定生产前的浇注次数。

1 模型的建立

使用 CAD 软件 UG 进行实体造型, 见图 1。然后经过格式转换导入 PAM-CASTTM 进行几何体和面的识别, 产生表面划分线并自动生成体网格。所用模具分为三部分: 顶模、底模和侧模, 材料为 STEEL-NF-XC38, 见图 2。在模拟中使用的镁合金为 AZ91D, 其

收稿日期: 2004-11-05; 修订日期: 2005-01-18

基金项目: 国家 863 计划重点项目(2002AA331120)资助

作者简介: 谢敏(1980-), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 研究方向: 金属凝固成形数值模拟。

Email: xiemin@sjtu.edu.cn

液相线温度、固相线温度和凝固潜热分别为: $T_L = 595\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_S = 470\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta H = 373\text{ kJ/kg}$, 其热物理性能和模具钢的热物理性能见表1。计算中采用的镁合金液浇注温度为 $690\text{ }^{\circ}\text{C}$, 初始模具温度为 $420\text{ }^{\circ}\text{C}$, 浇注速度为 0.3 m/s 。在填充和凝固过程中, 采用公式(1)来描述模具与合金液之间的换热系数, 并可以通过使用附加边界条件, 例如热阻、空隙、以及脱模剂来降低热传递, 见公式(2)。

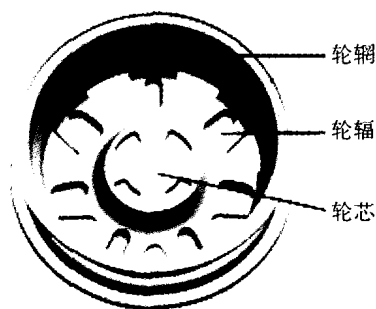


图1 镁合金轮毂几何模型

Fig.1 Geometry of the magnesium alloy wheel



图2 镁合金轮毂模具

Fig.2 Mold of magnesium alloy wheel

表1 热物理性能参数

Tab.1 Physical property data of materials

温度 / $^{\circ}\text{C}$	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$		$C/(\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K})$		$\lambda/(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	
	A	S	A	S	A	S
20	—	7 840	1 030	470	—	52
100	1 802	7 830	1 066	495	58.5	50
200	1 787	7 795	1 111	525	68.4	48
300	1 772	7 770	1 156	570	75.8	45
400	1 775	7 730	1 225	610	81.2	42
500	1 680	7 700	1 300	—	90.0	38.5
600	—	7 660	1 300	—	—	34.5

注: ρ —密度; C —比热; λ —导热系数;

A—AZ91D; S—STEEL-NF-XC38

$$\frac{1}{h_{eq}} = \frac{d_{alloy}}{\lambda_{alloy}} + \frac{d_{mold}}{\lambda_{mold}} + R_{th} \quad (1)$$

式中 h_{eq} ——有效换热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

λ_{alloy} ——合金液热传导系数 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

λ_{mold} ——模具热传导系数 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

d_{alloy} ——1/2 合金单元尺寸 m ;

d_{mold} ——1/2 模具单元尺寸 m ;

R_{th} ——附加热边界条件, $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ (热阻、空隙、脱模剂)。

$$R_{th} = R_{th1} + \frac{e}{\lambda} \quad (2)$$

其中: $R_{th1} = 2.59\text{E}-5 (\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$ 附加热阻; $\lambda = 0.706\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 脱模剂热传导系数; $e = 0.2 (\text{mm})$ 脱模剂厚度。

模具与外部环境的热交换通过对流和辐射来完成, 见公式(3):

$$\Phi = h_0 (T - T_{ext})^{1.25} + \sigma \epsilon (T^4 - T_{ext}^4) \quad (3)$$

式中 Φ ——热流 W/m^2 ;

h_0 ——传热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

T ——模具表面温度, K ;

T_{ext} ——环境温度, K ;

ϵ ——物体黑度, 在 $0 \sim 1$ 之间取值;

σ ——斯蒂芬-波尔兹曼常数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

对于模具与冷却水之间的换热系数见公式(4):

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (4)$$

式中 h ——换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

Nu ——努珊数;

λ ——导热系数 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

D ——液力直径。

$$D = 4 \cdot \frac{\text{截面积}}{\text{浸湿圆周}} \quad (5)$$

当雷诺数 $Re \leq 2000$, 根据 Loison 公式

$$Nu = 2.34 \left(\frac{F}{Re \cdot Pr} \right)^{-0.33} \quad (6)$$

式中 $F = L/D$, 管道几何因子;

Re ——雷诺数;

Pr ——普朗特数。

压铸过程中, 在轮辐与轮辋连接处易产生热节, 并于凝固后期形成缩孔, 需改善模具在这些关键区域的冷却性能。运用局部水循环冷却方式, 在顶模和侧模分别设置冷却管道。采用三种冷却管道设置方式: 单独设置顶模管道、单独设置侧模管道和顶模与侧模同时设置复合管道。三种方式采用不同水流速和不同管道直径, 初始设定标准冷却管道内径为 15 mm , 循环冷却水流速为 10 m/s 。各方案具体参数设置见表2所示。

表 2 各方案冷却管道设置参数

Tab. 2 Parameters setting of cooling pip system

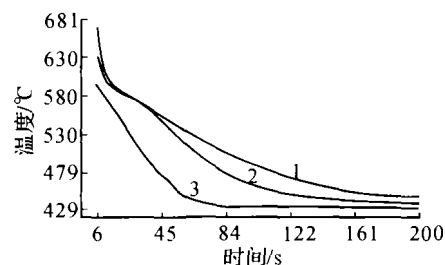
方 式	小方案	管道孔径/(mm)	冷却水流速/(m/s)
单独设置 顶模管道	1	15	10
	2	15	0.7
	3	20	10
	4	15	10
单独设置 侧模管道	5	15	5
	6	15	0.7
	7	20	10
	8	侧模 15	侧模 10
复合设置 管道		顶模 15	顶模 10
	9	侧模 15	侧模 10
		顶模 15	顶模 0.7

2 冷却性能结果分析

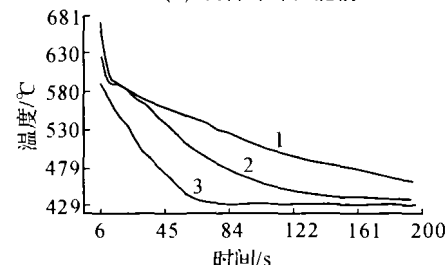
在顶模单独设置冷却管道,采用方案 1。发现在凝固过程中形成液体孤岛的起始时间因增加冷却而提前到 24.036 s,比没有采取冷却管道提前了大约 4 s,并提前 4 s 消失,但合金液孤岛并没有增加冷却而发生很大程度上的减小,产生的位置也没有发生改变。见图 3(b)所示。原因是在连接处合金液体受到冷却的同时也冷却了轮辐中部的合金液。在方案 2 中,当冷却水流速降到 0.7 m/s 时,液体孤岛的形成与消失大约提前了 2 s,位置与大小变化不大。如果把模具顶模的冷却管道直径增加到 20 mm 时(方案 3),液体孤岛形成与消失时间提前了大约 7 s,位置与大小也几乎没有发生改变。可见在铸造镁合金轮毂时,顶模设置

冷却管道并不能很好的改善轮辐与轮辋连接处的冷却性能,对减小热节的产生起到的作用很小。

采用方案 4~7 分别进行计算。从方案 4 的显示结果发现:液体孤岛的形成时间为 27.93 s,同没有采用冷却时相比,基本上没有发生改变,而消失的时间却提前 4 s。但形成的孤岛体积缩小了很多,而且位置发生了改变,沿着轮辐方向向轮心的位置移动了大约 11 mm 左右,见图 3(c)所示。从凝固温度曲线看出:在改善冷却后,产生热节的 25~35 s 内连接处与轮辐处的合金液温度差异变小,见图 4 所示。采用其他流速或者增加冷却管道直径(方案 5、6)能起到同样的效果,但与方案 4 的结果没有多大的改变,而且增加孔径起的作用并不明显,不能成比例地增加冷却效果。



(a) 改善冷却性能前



(b) 改善冷却性能后

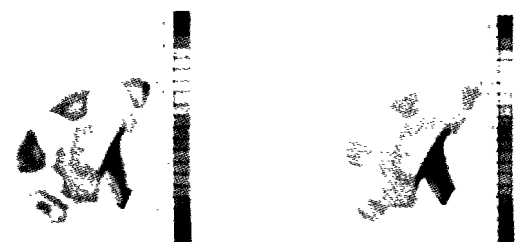
1. 轮辐中部 2. 轮辐与轮辋连接处 3. 轮辋上缘

图 4 填充过程温度曲线

Fig. 4 Temperature curve during the filling process

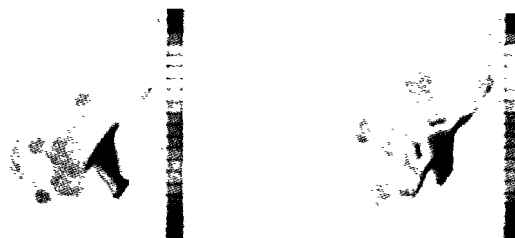
在方案 8 与 9 中,采用在顶模和侧模同时设置冷却管道的复合冷却方式。轮毂凝固过程液体孤岛的形成和消失时间都提前了大约 9 s,孤岛的大小有所缩小,但缩小的程度不大,位置的前移也不是很明显,见图 3(d)所示。

综上所述,通过模拟采用各种冷却方式都很难将轮辐与轮辋连接处的缩孔缺陷彻底消除,这是符合实际情况的。冷却管道的采用只能在一定程度上减小此处的热节,进而减少缩孔。在模具不同位置设置冷却管道得到的效果有明显的差异。单独在侧模设置冷却管道效果最明显,在缩小液体孤岛的同时也使其位置发生变化。采用单独顶模设置和复合设置只能使孤岛形成和消失的时间提前,对其体积和位置没有大的



(a) 改善冷却性能前

(b) 在顶模设置冷却管道



(c) 在侧模设置冷却管道

(d) 复合设置

图 3 各种情况下的合金液孤岛初始成形

Fig. 3 The initial generation of liquid island in various modes

影响。

3 模具温度场模拟

在稳定生产前必须先预热模具,但此时模具的温度并没有达到稳定状态,在浇注前后模具的温度场分布波动很大,对模具和产品都有很大的影响,所以要经过浇注一定数量的轮毂之后才能够使模具的温度调整到稳定生产的状态。本文对镁合金轮毂低压铸造过程进行了循环模拟,取模具上的几个关键部位作为温度的测试点,分布在轮辋顶部、中部与底部附件。从图 5 看出,整体上曲线的趋势是一致的,经放大观测在第六次浇铸后各个测试点温度基本上达到平衡。其中轮辋底部与中部附件因吸收高温液体的热量,温度逐渐升高到平衡位置。合金液最后到达轮毂顶部,而镁合金的导热率高、凝固速度快,此处的模具温度在第一次浇铸后有所降低而到达平衡。从图 6 中看出第 1 次循环始末模具的温度场差别很大;而在第六次浇铸始末的模具温度场波动很小,已经基本达到恒定的稳态,见图 7,说明可以开始稳定生产。

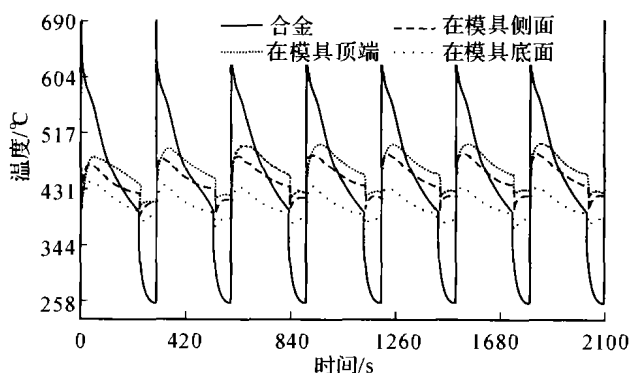


图 5 循环模拟过程中模具各测试点温度曲线

Fig. 5 Temperature curve during the cycle simulation

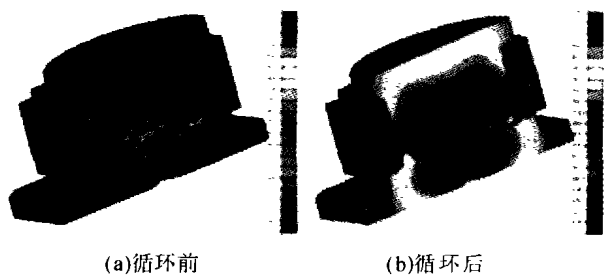


图 6 第 1 次循环始末模具温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of mold during the first cycle

4 结论

(1) 改善轮辐与轮辋连接处的冷却性能,分别采用单独侧模冷却、单独顶模冷却和复合冷却方式对镁合金轮毂铸造过程进行计算。采用单独侧模设置管道

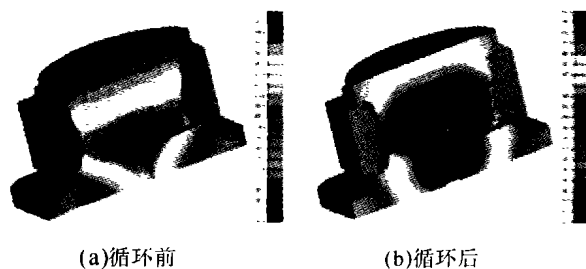


图 7 第 6 次循环始末模具温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of mold during the sixth cycle

冷却方式效果最好。

(2) 通过改变各种冷却方式中的冷却水管道直径和水流速,分别模拟镁合金轮毂的低压铸造过程。发现增加冷却管道,改善关键部位的冷却性能只能在一定程度上抑止缺陷的产生,很难彻底消除在凝固阶段形成的缩孔缺陷。

(3) 对镁合金轮毂低压铸造模具温度场进行循环模拟,确定出在预热后连续浇注 6 个轮毂后模具温度基本上达到稳定状态,可以开始稳定生产。

参考文献

- [1] Schumann S, Friedrich H. Current and future use of magnesium in the automobile industry [J]. Materials Science Forum, 2003, 419-422 (I) : 51-56.
- [2] Kaneko, Tadataka, Suzuki, et al. Automotive applications of magnesium alloys [J]. Materials Science Forum, 2003, 419-422 (I) : 67-72.
- [3] Otsuka, Yukio. Optimal casting design by application of mold filling and solidification simulation [J]. Public Transport International, 1994, 43(2) : 897-905.
- [4] Avalle M, Belingardi G, Cavatorta M P, Doglione R. Casting defects and fatigue strength of a die cast aluminium alloy: a comparison between standard specimens and production components [J]. International journal of Fatigue, 2002, 24 (1) : 1-9.
- [5] Dahle A K, Sannes S, John D H, et al. Formation of defect bands in high pressure die cast magnesium alloys [J]. Journal of Light Metals. 2001, 1 (2) : 99-103.
- [6] Wang Q G, Apelian D, Lados D A. Fatigue behavior of A356-T6 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects [J]. Journal of Light Metals. 2001 1(1):73-84.
- [7] Hausild P, Berdin, Clotilde, Bompard, Philippe, et al. Ductile fracture of duplex stainless steel with casting defects [J]. The International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2001, 79 (9) : 607-616.