

文章编号: 1004 - 0609(2005) 12 - 1903 - 07

基于数值模拟的镁合金真空压铸浇注系统设计与优化^①

于彦东^{1, 2}, 雷 黎², 蒋海燕¹, 付彭怀¹, 翟春泉¹, 丁文江¹

(1. 上海交通大学 轻合金精密成型国家工程中心, 上海 200030;

2. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: 设计出两种类型的浇口及浇注系统, 运用有限元模拟软件对两种设计进行模拟, 观察液态金属充型及凝固过程中流场和温度场的分布。根据凝固规律有效预测铸件中可能存在的缩孔及气孔缺陷的分布与尺寸, 找出优化的浇注系统设计。结果表明: 在浇注温度 655 ℃、模具初始温度 200 ℃、冲头压射速度 3 m/s、真空度 30 kPa 情况下, 具有阶梯分型面结构的浇注系统优于平直分型面结构; 同时在优化设计基础上生产出具有致密微观结构的镁合金零件。

关键词: 镁合金; 优化浇注系统; 数值模拟; 真空压铸

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Design and optimization of runner and gating systems for vacuum die casting of magnesium through numerical simulation

YU Yan-dong^{1, 2}, LEI Li², JIANG Hai-yan¹, FU Peng-huai¹,

ZHAI Chun-quan¹, DING Wen-jiang¹

(1. Light Alloy Net Forming National Engineering Research Center,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. School of Materials Science and Engineering,

Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to observe fluid and temperature field of molten metal filling and solidifying process, two pouring systems were designed to simulate the vacuum die casting process with finite element software. According to solidification laws to forecast the distribution and size of macro porosity and gas porosity that may exist in the castings, a better pouring system was found. The result shows under the condition of pouring temperature 655 ℃, mold initial temperature 200 ℃, plunger injection speed 3 m/s, vacuum degree 30 kPa, the structure of ladder parting surface is better than the one of straight parting surface. The magnesium parts that have compact microstructures are produced successfully.

Key words: magnesium alloy; optimizing pouring system; numerical simulation; vacuum die casting

采用电子计算机技术, 可以实现对铸造工艺参数、铸造设备和铸造生产过程进行精确、快速的检测和控制; 利用电子计算机进行铸造工艺的优化设计, 实现电脑试浇, 预测铸造缺陷, 能有效保证铸

件质量、缩短生产周期、降低生产成本, 大大的提高铸造生产的经济效益。因此计算机在铸造中的应用技术已成为生产高质量铸件的必备条件, 也是铸造生产现代化的主要发展方向^[1]。

① 基金项目: 黑龙江省高校骨干教师创新能力资助项目(1055G011)

收稿日期: 2005 - 06 - 14; 修订日期: 2005 - 09 - 12

作者简介: 于彦东(1964 -), 女, 教授, 博士

通讯作者: 于彦东, 教授; 电话: 021 - 62932164; 传真: 021 - 62932113; E-mail: yandongyu@yahoo.com.cn

常规压铸需要在高速下充型, 压室和型腔中的部分气体难以通过排气孔和溢流槽排出, 铸件中含有大量的层状孔穴形的铸态缺陷^[2, 3]。为了减少气体的含量, 可采取真空压铸工艺, 真空压铸通过在压铸过程中抽除型腔(包括压室)内的气体而消除或显著减少铸件内的气孔和溶解气体^[4], 提高压铸件的力学性能和表面质量。

浇注系统的主要作用是把金属液从冷室压铸机的压室导入型腔内, 浇注系统与金属液进入型腔的部位、方向、流动状态、型腔内气体的排出等密切相关, 并能调节充填速度、充填时间、型腔温度等充型条件, 故浇口及浇注系统对获得高质量的压铸件起着非常重要的作用^[3, 5]。

本文作者将对镁合金 AZ91D 铸件进行两种浇注系统的设计, 并运用有限元模拟软件对这两种结构进行真空压铸模拟。旨在通过模拟观察金属液进入型腔后的流动方式和凝固规律, 有效地预测充型时间、凝固时间、产生缺陷的部位与尺寸, 对比和分析两种浇注系统设计对铸件形成产生的影响, 得出更为合理的设计, 以此优化铸造过程。

1 数学模型的建立

由于液态金属的充型过程依然属于带有自由表面、粘性、非稳态、不可压缩的流动, 描述流体的运动状态的连续性方程和动量守恒方程仍然起作用^[6]。

连续性方程

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \nabla^2 v \quad (3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \nabla^2 w \quad (4)$$

式中 u, v, w 分别为速度矢量在 x, y, z 方向上的分量; p 为单位密度的压力; μ 为运动粘度; ∇^2 为拉普拉斯算子。

铸件凝固传热基本规律可通过傅立叶导热微分

方程描述为^[5]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q \quad (5)$$

式中 c_p 为定压比热容; λ 为热导率; Q 为热源项; 温度 T 为坐标系 X, Y, Z 和时间 t 的函数, 在给定位置处温度的瞬时变化导致热量流动, 为了确定温度值, 需加上边界条件和初始条件。

初始条件为

$$T(x, y, z, t=0) = f(x, y, z) \quad (6)$$

式(6)描述了时间 $t=0$ 时的温度, 边界条件提供了在 $t>0$ 时物体表面的温度。

狄利克雷条件为

$$T(u, v, t) = g(u, v, t) \quad (7)$$

式(7)包括实际温度作为位移和时间的函数。

而柯西条件为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(u, v)(T - T^0) = \gamma(u, v, t) \quad (8)$$

式(8)包含温度的空间求解运算来描述表面正交。

一般考虑的换热是假定热量在两相边界进行传递, 与温度的变化成正比:

$$\alpha(T - T^0) = Q \quad (9)$$

这里的系数 α 取决于材料和工艺, 它影响热流。

$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}$ 取决于正交表面的温度梯度的热流, 在与模具接触的地方引入内部边界以获得柯西方程: $Q_1 = Q_2$ ^[6]。

2 实体模型的建立

利用 PRO/ENGINEER 软件对铸件进行三维实体造型。与常规压铸相比, 真空压铸需在结构上增加一个真空阀。真空阀的位置有装在模具上与排气道连接的^[7-9]; 也有装在压室浇道料口上, 通过压室抽出型腔气体的^[10]; 还有在型腔抽气的同时吸入氧气的^[11]等。其中以将真空阀装在模具上的较简便实用, 其最大的优点在于模具的设计和结构基本上与常规压铸相同, 分型面、推杆配合面、型腔镶拼接合面和冲头压室配合面等各处都不必加密封填料。

图 1 所示为对铸件设计的两种浇注系统, 图 2 所示为两种结构内浇口的位置。其一是铸件与直浇道处于定模内, 横浇道与溢流槽位于动模内, 内浇

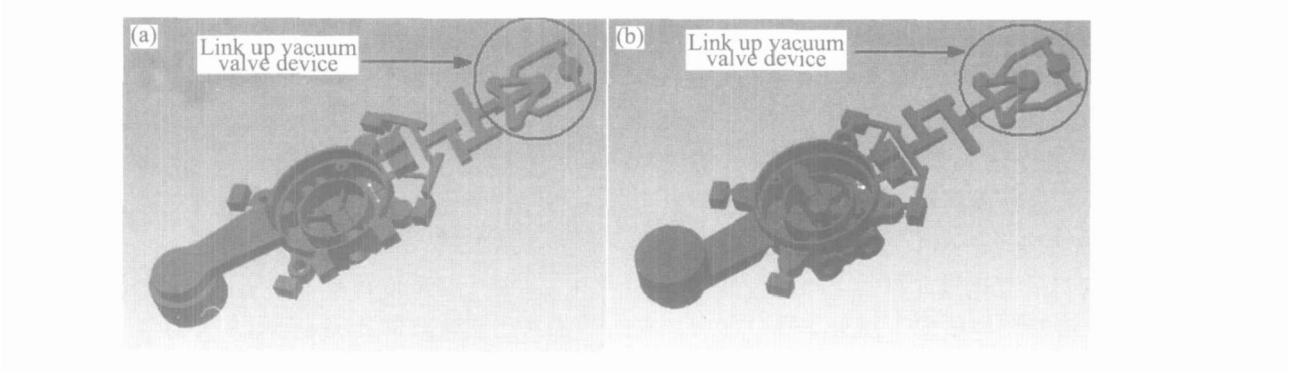


图 1 两种浇注系统的真空压铸铸件

Fig. 1 Entiting of vacuum die casting for two gating systems
(a) —Design of ladder gating systems; (b) —Design of straight gating systems

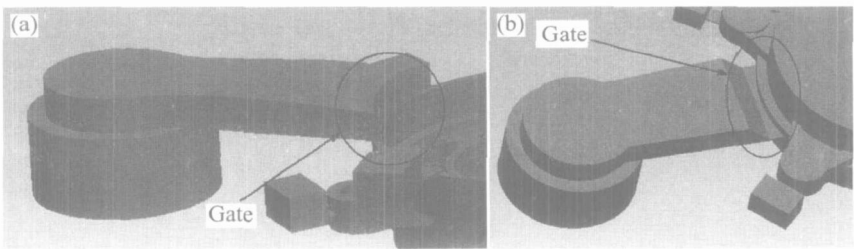


图 2 两种结构的内浇口位置

Fig. 2 Gate positions of two structures
(a) —Design of ladder gating systems; (b) —Design of straight gating systems

口在结合处(图 2(a)), 由于所有的溢流槽不在同一个平面内, 需采用阶梯分型面(图 1(a)), 该结构包括浇注系统在内整个铸件的质量是 1.06 kg, 内浇口面积为 170 mm², 连同模具在内压铸件面网格节点数 11 931, 单元数 23 934; 其二是铸件、横浇道和内浇口均在动模内(图 2(b)), 只有直浇道处于定模内, 可以采用直线分型面(图 1(b)), 这种结构包括浇注在内整个铸件的质量是 1 kg, 内浇口面积为 102.5 mm², 连同模具在内压铸件面网格节点数为 11 735, 单元数 23 522。两种结构选用的压射冲头直径均是 75 mm。

3 模拟过程及分析

在压铸过程中, 压铸的工艺参数有压力和充填速度、金属液充填特性、压型和合金的温度、开型时间及涂料等等, 这些因素影响到铸件光洁度和填充型腔能力, 同时对保证铸件质量有很大影响^[12]。本文选取的压铸工艺参数为: 浇注温度 655 ℃、模具初始温度 200 ℃、冲头压射速度 3 m/s, 真空度保证在 30 kPa。在这种条件下, 分别比较两种设计

的充型过程、凝固时间以及缺陷产生的区域和尺寸, 以此选出较为合理的设计。

模拟中铸件使用的材料是镁合金 AZ91D, 模具使用的材料是 H13 钢, 两种材料的物理参数分别见表 1 和表 2。其中密度、比热容、热传导率、粘度等是温度的函数, 表中只列出了在 650 ℃左右的参数值。

表 1 AZ91D 合金的物理参数

Table 1 Physical parameters of AZ91D alloy				
Density ¹⁾ / (kg · m ⁻³)	Specific heat ¹⁾ / (kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	Liquidus/ ℃	Solidus/ ℃	Latent heat / (kJ · kg ⁻¹)
1 680	1.3	595.00	470.00	373

1) At 650 ℃.

表 2 H13 钢的物理参数

Table 2 Physical parameters of H13 steel				
Density / (kg · cm ⁻³)	Specific heat ¹⁾ / (kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	Liquidus/ ℃	Solidus/ ℃	Conductivity ²⁾ / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
7 367	0.726 2	1 148	1 147	28.07

1) At 600 ℃; 2) At 800 ℃.

3.1 充型过程的模拟分析

首先对两种浇注系统设计的真空压铸件进行充型过程模拟,如图 3 所示。阶梯形的铸件在金属液通过浇口后,从铸件边缘沿着铸件壁向下流进型腔,待金属液平稳进入型腔后,开始沿着铸件散开,充满铸件后进行溢流槽和排气槽的填充,整个压铸件充型时间约为 0.044 5 s;平直形的铸件在金属液通过内浇口后直接进入型腔,此时金属液分为两支,一部分沿着铸件壁向下填充,另一部分填充上沿,之后按着铸件顺序填充,仍是充满铸件后填充溢流槽和排气槽,整个压铸件的充型时间约为 0.042 2 s。两种结构设计的铸件在整个充型过程中金属液未有飞溅,铸件不存在铸造缺陷,铸件在金属液充满型腔前没有凝固出现。

3.2 凝固过程的模拟分析

大部分铸造缺陷产生于凝固过程,揭示金属凝固的真实行为和规律是铸件形成过程理论研究的目的

和内容^[7]。图 4 所示为两种设计的铸件真空压铸后的凝固时间。金属液在整个铸件充型完成后开始凝固。图中色温由上至下时间缩短。把铸件的颜色与右侧色温对照,数值即为对应部位的凝固时间。由图看出两种设计铸件的凝固顺序相近,均是厚度均匀的壳体部位和排气槽最先凝固,接着是铸件中心与溢流槽,浇口凝固时间最长。

缩孔即铸件在凝固初期,由于补缩不良而产生的封闭或敞露的孔洞,形状极不规则,孔壁粗糙并带有枝状晶。窄结晶温度范围的液态合金,在型腔内发生垂直于型壁方向的逐层凝固时,如果在冷却和凝固过程中得不到补偿,会在铸件最后凝固的部位出现集中缩孔,这就是铸件产生缩孔的基本原因,合金由表及里逐层凝固是形成集中缩孔的条件^[12]。预测该铸件缩孔将集中出现在金属液最后凝固部位和金属聚集的热节处。对两种设计压铸件出现缩孔的情况进行模拟,模拟结果如图 5 所示。

图中黑色是不存在缩孔的区域,其余不同的亮

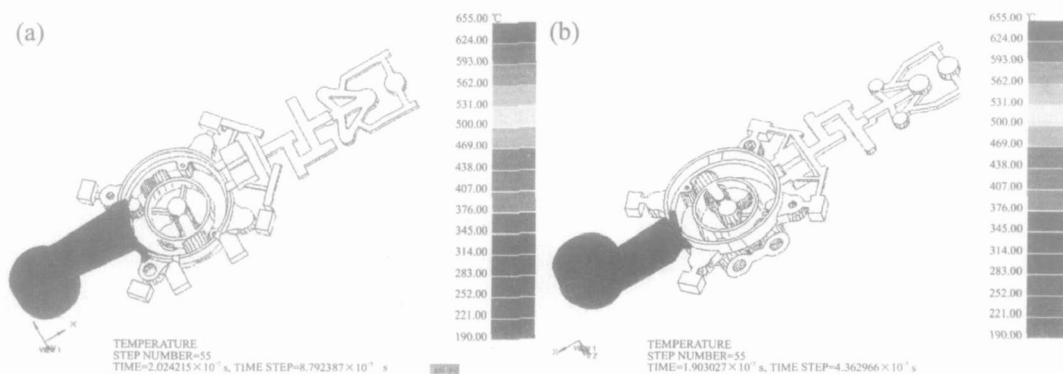


图 3 阶梯形和平直形真空压铸充型过程

Fig. 3 Filling process of vacuum die casting for ladder and straight structure

(a) —Ladder structure at 0.020 2 s; (b) —Straight structure at 0.019 0 s

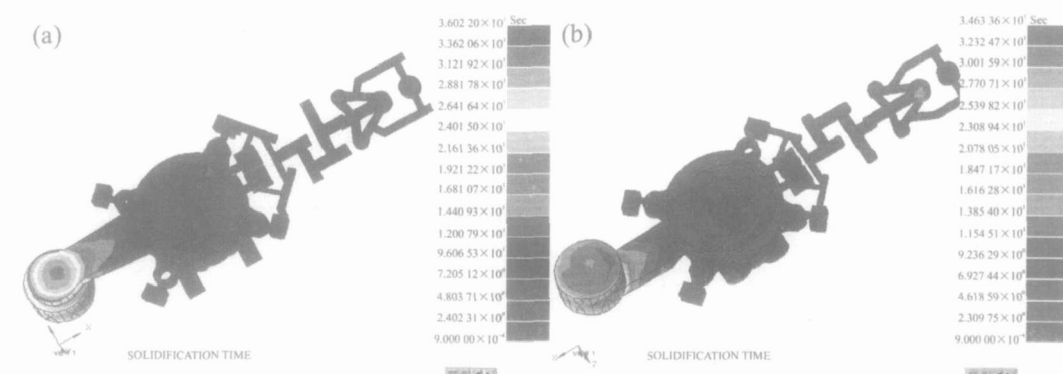


图 4 两种设计铸件的凝固时间

Fig. 4 Solidification time of two structures

(a) —Design of ladder gating systems; (b) —Design of straight gating systems

度对照色温可查出相应缩孔体积分数值, 其中色温由上至下缩孔体积值减小。由图 5 可知缩孔集中分布在溢流槽和排气槽(最后充型处)、铸件中心圆柱(热节处)、浇口(最后凝固处)以及铸件的拐角部位, 这与上面由充型和凝固规律预测的部位相符。同时对照右侧色温, 可以得到缩孔的尺寸值: 阶梯形设计铸件缩孔最大体积分数约为 1.90% , 平直形设计铸件缩孔最大体积分数约为 1.98% 。故从铸件产生的缩孔缺陷分析, 阶梯形设计优于平直形设计。

除此以外, 气孔也是铸件中常见的缺陷之一。气孔是铸件表面和内部由于气体而产生的各种形状和大小的孔洞, 孔壁表面一般较光滑并带有金属光泽^[12-15]。根据气体的来源和形成机理可分为析出气孔、侵入气孔和反应气孔。气孔的存在不仅减少了铸件的有效承载面积, 而且在气孔周围形成应力集中, 增加了缺口敏感性, 降低了铸件的机械性能, 尤其是冲击韧性和疲劳强度。此外气孔使组织疏松, 降低铸件的致密性。这是铸造生产中需要认真

解决的问题。图 6 所示为用截面显示的两种设计铸件气孔的分布区域与尺寸。

黑色区是不含有气孔的区域, 其余不同的亮度对照右侧标识找出相应数值, 色温由上至下数值减小。图中圈起区域是存在气孔的部位, 由于采用的真空压铸是在熔融液体进入型腔的瞬间, 将型腔中的气体抽出, 使得压铸充型过程中不受气流干扰, 压铸件中的气体含量与常规压铸相比明显减少, 凝固后铸件上不存在气孔, 气孔主要分布在浇口处。其中阶梯形设计铸件气孔的最大体积分数为 1.92×10^{-6} ; 平直形设计铸件气孔最大体积分数为 2.56×10^{-6} 。故从铸件产生的气孔缺陷来看, 阶梯形设计优于平直形设计。

综上所述, 阶梯分型面结构设计具有较少的缩孔、气体夹杂倾向。在优化设计的基础上, 选择阶梯分型面结构设计进行一系列真空压铸实验, 从图 7 可以得到该工艺参数下的铸件屈服强度为 130 MPa , 抗拉强度为 225 MPa , 延伸率为 4.0% 。图 8 表明可以生产出致密微观结构的高质量的部件, 也

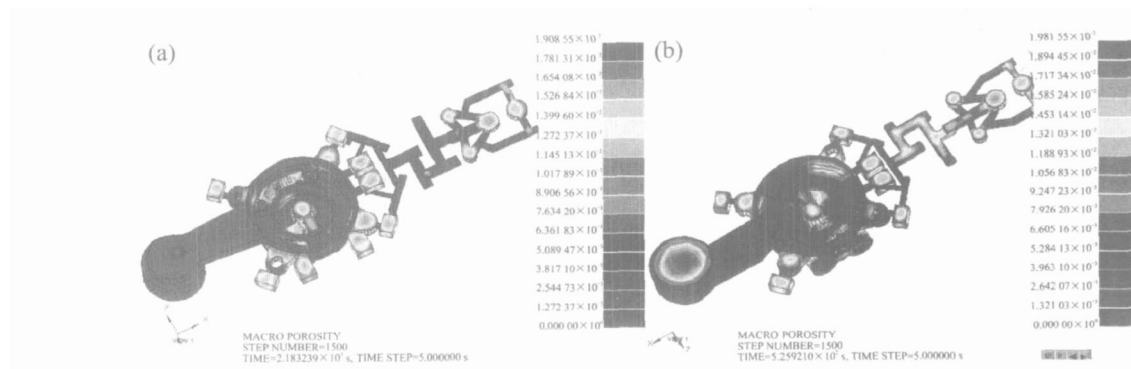


图 5 两种设计铸件缩孔的分布

Fig. 5 Distributions of macroporosity for two structures

(a) —Design of ladder gating systems; (b) —Design of straight gating systems

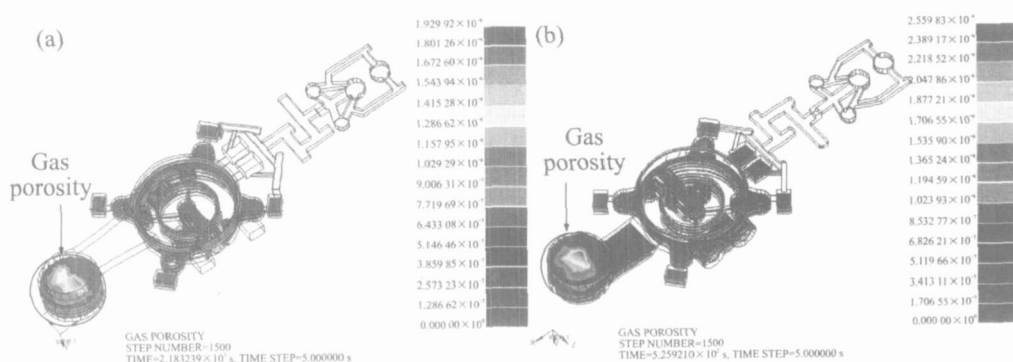


图 6 两种设计铸件气孔的分布

Fig. 6 Distributions of gas porosity for two structures

(a) —Design of ladder gating systems; (b) —Design of straight gating systems

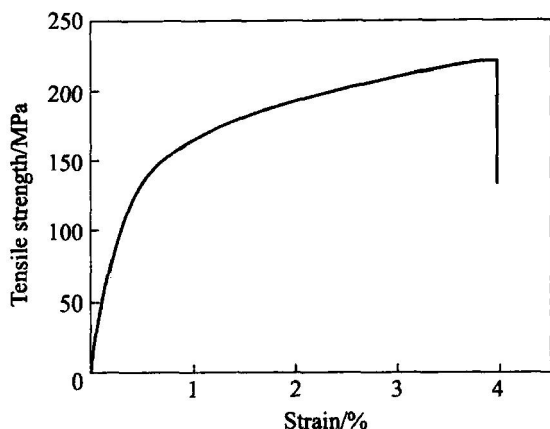


图 7 铸件的应力—应变曲线

Fig. 7 Stress—strain curve of casting

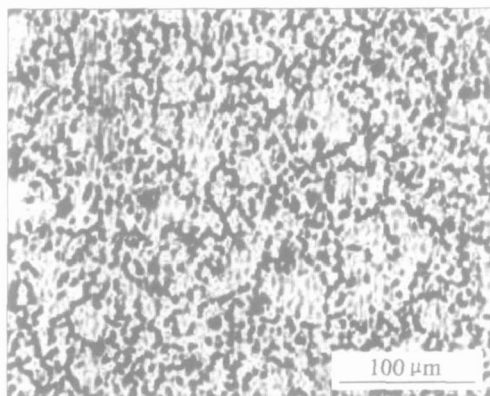


图 8 压铸件的微观组织

Fig. 8 Microstructure of casting

说明选择阶梯形分型面结构设计的浇注系统, 可以获得优质铸件。

4 结论

1) 两种结构铸件的充型规律相近, 液态金属通过浇口填充模具型腔后, 均按顺序平稳充填型腔, 铸件充型完成后填充溢流槽和排气槽, 整个充型过程中金属液没有飞溅, 铸件不存在铸造缺陷, 充型结束前不出现凝固。

2) 两种结构铸件的凝固顺序相近, 首先是厚度均匀的铸件壳体部位和上部排气槽, 接着是溢流槽和铸件中心增厚处, 最后是浇口。

3) 两种结构铸件的缩孔缺陷均主要集中在铸件最后凝固部位、金属液易聚集的热节处及浇口部位, 实际生产中要注意对这些易出现缩孔的部位建立良好的补缩条件。从缩孔的尺寸看, 第一种阶梯

形浇注系统缩孔体积分数为 1.90%, 第二种平直形浇注系统缩孔体积分数为 1.98%。

4) 由于采用真空压铸有效减少了型腔内的气体, 故在两种结构铸件上均不存在气孔, 只有少量气孔分布在浇口处, 从气孔的尺寸看, 第一种阶梯形浇注系统气孔体积分数为 1.92×10^{-6} , 第二种平直形浇注系统气孔体积分数为 2.56×10^{-6} 。

5) 综合比较铸件成型后产生的缩孔和气孔缺陷, 得出阶梯分型面结构采用的浇注系统优于平直分型面结构采用的浇注系统。

6) 一系列的真空压铸实验表明, 在优化设计的基础上, 可生产出具有致密微观结构的镁合金零件。

REFERENCES

- [1] 程 军. 计算机在铸造中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 53 - 135.
CHENG Ju. Computer Applications in Foundry[M]. Beijing: Machine Publishing Company, 1993. 53 - 135.
- [2] 刘 正, 张 奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 210.
LIU Zheng, ZHANG Kui, ZENG Xiaoqin. The Theoretical Basis and Applications of Magnesium Alloy[M]. Beijing: China Machine Industry Press, 2002. 210.
- [3] 潘宪曾. 压铸模设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 89.
PAN Zeng-xian. Die Casting Design Handbook[M]. Beijing: China Machine Industry Press, 1998. 89.
- [4] Hu B H, Tong K K, Niu X P, et al. Design and optimisation of runner and gating systems for the die casting of thin-walled magnesium telecommunication parts through numerical simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105: 128 - 133.
- [5] 熊守美, 苏仕方. 镁合金成形技术研究进展[J]. 铸造, 2005, 154(11): 20 - 23.
XIONG Shoumei, SU Shifang. Research progress on processing technology of magnesium alloys[J]. Foundry, 2005, 154(11): 20 - 23.
- [6] Sin S L, Dubé D. Influence of process parameters on fluidity of investment-cast AZ91D magnesium alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2004, A386(1-2): 34 - 42.
- [7] 张 毅. 铸造工艺 CAD 及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 1 - 4.
ZHANG Yi. Foundry Technology CAD and Its Application[M]. Beijing: China Machine Industry Press,

- 1994, 1 - 4.
- [8] Wolodowicz A. Vacuum die casting pioneer continues to innovate [J]. Die Casting Engineering, 1991, 35 (4): 56.
- [9] 美国瑞源国际公司. OPT IVAC 压铸真空系统 [J]. 特种铸造及有色合金, 1993, (2 - 3): 44.
- International Company in USA of Ruiyuan. Vacuum diecasting system of OPT IVAC [J]. Special Casting and Coloured Alloy, 1993, (2 - 3): 44.
- [10] Liu Z L, Hu J Y, Wang Q D, et al. Evaluation of the effect of vacuum on mold filling in the magnesium EPC process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120(1 - 3): 94 - 100.
- [11] Kim E S, Lee K H, Moon Y H. A feasibility study of the partial squeeze and vacuum die casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105(1 - 2): 42 - 48.
- [12] Niu X P, Hu B H, Pinwill I, et al. Vacuum assisted high pressure die casting of aluminium alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105: 119 - 127.
- [13] Chung S, Im Y, Jeong H, et al. Rapid fabrication of aluminum shoe mold using vacuum sealed casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 326 - 333.
- [14] 刘文辉, 刘艳改, 熊守美, 等. 减速减压工艺对镁合金压铸件质量与性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(7): 1162 - 1167.
- LIU Weir hui, LIU Yarr gai, XIONG Shour mei, et al. Influence of decreasing speed technology and decreasing pressure technology on quality and properties of magnesium alloy die castings [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(7): 1162 - 1167.
- [15] 吴士平, 于彦东, 王丽萍, 等. 提高充型过程数值模拟运算速度的动态超松弛迭代算法 [J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1219 - 1222.
- WU Shì ping, YU Yarr dong, WANG Lì ping, et al. Dynamic over-relaxation iteration algorithm to increase operational speed of numerical simulation during filling mold [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(5): 1219 - 1222.

(编辑 陈爱华)