

# 镁合金真空低压消失模铸造的技术特征与实践

樊自田 吴和保 李继强 张大付 董选普 黄乃瑜

(华中科技大学)

**摘要** 介绍了镁合金在真空低压消失模铸造下的技术特征。研究表明:真空低压消失模铸造的流动性受充型气体的流量与压力、浇注温度、涂层厚度、泡沫密度、真空度等多方面的因素影响;在低充型速度和低真空度的条件下,液态镁合金在真空低压消失模铸造过程中的充型形貌均呈现以内浇道为中心的拱形层状推进流动,如充型速度加快金属液流动前沿拱形形貌更加突出,而真空度增加会出现明显的“附壁效应”;与重力消失模铸造比较,真空低压消失模铸造镁合金铸件凝固更呈现“同时凝固”特征;由于快速充型、压力下凝固,镁合金真空低压消失模铸造零件的铸态抗拉强度( $\sigma_b = 180.8 \text{ MPa}$ )、屈服强度( $\sigma_{0.2} = 113.2 \text{ MPa}$ )、伸长率( $\delta = 4.4\%$ ),高于重力消失模铸造、树脂砂空型铸造的铸态性能,达到了金属型铸造的铸态性能,经热处理达到了压铸镁合金的性能范围。浇注实践表明,真空低压消失模铸造对液态镁合金,具有良好的抗氧化保护能力、优良的浇注充型性能和力学性能,可铸造出高精度的、薄壁复杂的镁合金消失模铸件,是一种极有潜力和优势的镁(铝)合金精密铸造技术。

**关键词** 镁合金;低压铸造;消失模铸造

**中图分类号** TG249.6;TG292

**文献标志码** A **文章编号** 1001-2249(2006)01-0039-04

消失模铸造(简称EPC)是一种近无余量、精确成形的新型铸造技术<sup>[1]</sup>。已进行的试验研究表明,镁合金的特点非常适合消失模铸造工艺。因为镁合金的消失模铸造具有如下独特的优点<sup>[2-6]</sup>:①镁合金在浇注温度下,泡沫模样的分解产物主要是烃类(烷烃、烯烃等)、苯类和苯乙烯等气雾物质,它们对充型成形时极易氧化的液态镁合金具有自然的保护作用;②采用干砂负压造型,避免了镁合金液与型砂中水分的接触和由此而引起的铸件缺陷;③与目前普遍采用的镁合金压铸工艺相比较,其投资成本大为降低,干砂良好的退让性大大减轻了镁合金铸件凝固收缩时的热裂倾向;④金属液较慢和平稳的充型速度避免了气体的卷入,使铸件可经热处理进一步提高其力学性能。这些优点使得镁合金消失模铸造工艺具有很大的优越性和广阔的应用前景。

除液态易氧化燃烧外,镁合金的另一缺点是,液态镁合金的热容量小(同体积熔融镁的热容量仅为铝的70%)、流动性和充型能力较差,在重力下实施普通的消失模铸造,易产生浇不足、冷隔等缺陷。华中科技大学在多年研究消失模铸造技术的基础上,结合镁合金铸造成型的特点,开发出了一种新的“镁(铝)合金真空低压消失模铸造方法及其设备”<sup>[7,8]</sup>。该新的铸造工艺方法,将反重力的低压铸造与真空消失模铸造有机地结合起来,使金属液在真空和气压的双重作用下浇注充型,液态镁合金的充型能力较重力消失模铸造大为提高,可以较好地克服镁合金消失模铸造中常见的浇不足、冷隔等缺陷,且不需太高的浇注温度,它是铸造高精度、薄壁复杂镁(铝)合金铸件的一种好的方法。本课题研究了

镁合金真空低压消失模铸造新技术的流动与充型特征、凝固与组织特征,并成功地进行了浇注实践。

## 1 真空低压消失模铸造的工艺原理

镁合金真空低压消失模铸造工艺原理,见文献[7,8]。经振动紧实后的消失模铸型砂箱,被放入(或推入)可控气压下的“低压铸造”工位。双层砂箱在抽真空的同时,液态镁合金在可控气压下完成浇注充型、冷却凝固工作。

一定浇注温度下的液态镁合金,在真空低压消失模铸造下的充型速度,取决于泡沫模样的受热气化速度、充型气压与流量、真空负压度等因素。根据分析,该充型速度可表示为<sup>[8]</sup>:

$$v = \left( k_p - k_q \frac{dv_q}{dt} \right) \frac{A_1}{(A_1 - A_2) \gamma} \quad (1)$$

式中, $v$ 为铸型的充型速度, $k_p$ 为升压率( $k_p = dP/dt$ ,取决于充型气体的压力及流量)、 $v_q$ 为泡沫模样的受热气化速度, $dv_q/dt$ 为泡沫模样的气化率, $k_q$ 为气化比例系数, $A_1$ 和 $A_2$ 为坩埚及铸件的截面积, $\gamma$ 为金属液的重力密度。

## 2 镁合金真空低压消失模铸造的技术特征

### 2.1 流动特征

采用 $L_9(3^4)$ 正交试验和条形试样,测试气体流量、浇注温度、涂层厚度和泡沫厚度等因素,对镁合金真空低压消失模铸造充型浇注时的流动性,测试结果见表1

收稿日期:2005-10-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50275058)

第一作者简介:樊自田,男,1962年生,教授,华中科技大学塑性模拟及模具技术国家重点实验室,武汉(430074),电话:027-87543876, E-mail: fanzt@public.wh.hb.cn

和图1<sup>[9-11]</sup>。其他试验条件为:AZ91D镁合金、充型气压0.2MPa、真空度-0.02MPa、自制涂料。

表1 可控气压下镁合金消失模铸造的流动性

| 试验号 | 工艺参数  |            |             |                                 | 流动长度/mm |
|-----|---|------------|-------------|---------------------------------|---------|
|     | 气体流量/<br>(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 浇注温度/<br>℃ | 涂层厚度/<br>mm | 泡沫密度/<br>(mg·cm <sup>-3</sup> ) |         |
| 1   | 1(1)  | 720(1)     | 0.2(1)      | 0.11(1)                         | 225     |
| 2   | 1(1)  | 750(2)     | 0.5(2)      | 0.16(2)                         | 226     |
| 3   | 1(1)  | 780(3)     | 1.0(3)      | 0.21(3)                         | 158     |
| 4   | 3(2)  | 720(1)     | 0.5(2)      | 0.21(3)                         | 286     |
| 5   | 3(2)  | 750(2)     | 1.0(3)      | 0.11(1)                         | 387     |
| 6   | 3(2)  | 780(3)     | 0.2(1)      | 0.16(2)                         | 419     |
| 7   | 5(3)  | 720(1)     | 1.0(3)      | 0.16(2)                         | 279     |
| 8   | 5(3)  | 750(2)     | 0.2(1)      | 0.21(3)                         | 368     |
| 9   | 5(3)  | 780(3)     | 0.5(2)      | 0.11(1)                         | 418     |

注:括号内为正交试验编码

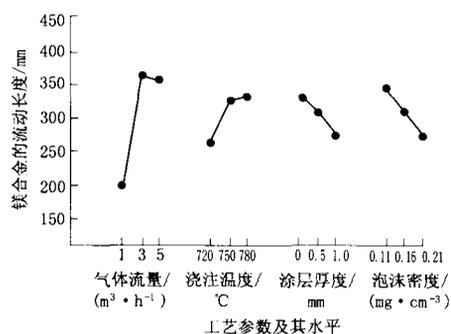


图1 各主要工艺参数对可控气压下镁合金消失模铸造流动性的影响

从测试结果(表1、图1)可以看出,可控气压下镁合金消失模铸造的流动性,受气体流量、浇注温度、涂层厚度和模样密度等因素的影响。随着气体流量的升高、浇注温度的提高,镁合金流动性增加;涂层厚度越厚,模

样密度越大,镁合金的流动性越小。

当气体流量达到3 m<sup>3</sup>/h、浇注温度提高到750℃后,进一步提高充气流量和浇注温度对提高镁合金流动性的作用减小(见图1)。这说明当镁合金液的流动速度达到一定速度后,流动前沿热解产物增加,气化产物通过涂层向铸型中传输的速度有限,金属液流动将遇到更大的阻力,因而限制了镁合金流动速度(或长度)的进一步快速增加;与之相反的是,镁合金的流动长度随着涂层厚度和模样密度的增加而明显减小。

## 2.2 充型特征

采用电极触点法<sup>[10-11]</sup>,测定180 mm×150 mm×5 mm的泡沫塑料板的浇注充型规律,获得不同条件可控气压下镁合金消失模铸造的充型形貌,见图2、图3、图4(其他试验条件为:浇注温度750℃、充型气压0.2 MPa、泡沫密度0.16 mg/cm<sup>3</sup>、自制涂料)。从图2、图3、图4中可以看出,可控气压下镁合金消失模铸造的充型过程中,在低充型速度和低真空度的条件下,液态镁合金的充型形貌均呈现以内浇道为中心的拱形层状推进流动。随着充气流量的加大,充型速度加快,金属液流动前沿拱形形貌更加突出;而真空度增加,出现明显的“附壁效应”。

过快的充型流动速度,易使金属液流动前沿失去平衡,出现非稳定流动现象。如果处于流动前沿的泡沫模样的热解产物来不及排出铸型,易形成气孔缺陷<sup>[11,12]</sup>。当充气流量较大,真空度较高时,出现的“附壁效应”会进一步阻碍模样热解产物的排出,可能使未排出的热解产物留在铸件中形成较大的气孔缺陷。因此,真空度与充型速度的合理匹配,对获得高质量铸件非常重要。

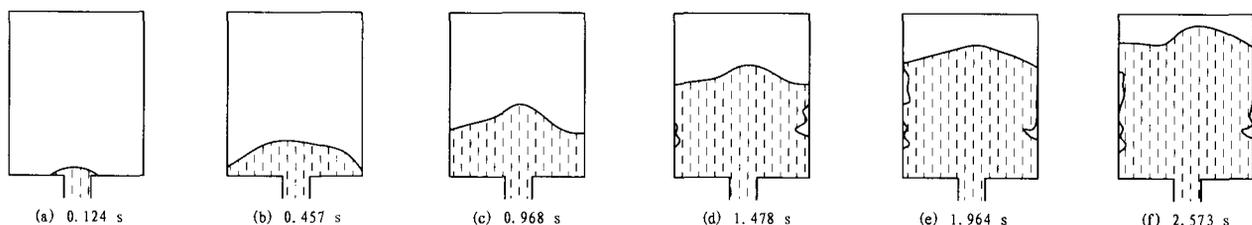


图2 低速充型时长方形薄板镁合金铸件的充型形貌 (工艺条件:充气流量1 m<sup>3</sup>/h;真空度0.02 MPa;金属液速度61.2 mm/s)

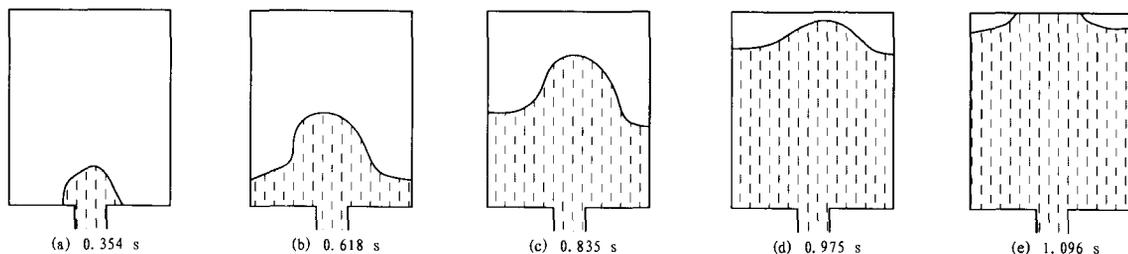


图3 高速充型时长方形薄板镁合金铸件的充型形貌 (工艺条件:充气流量5 m<sup>3</sup>/h;真空度0.02 MPa;平均充型速度:195.8 mm/s)

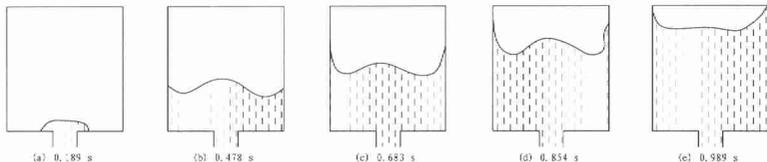


图4 高真空度条件下长方形薄板镁合金铸件的充型形貌

(工艺条件:充气流量 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ;真空度:0.04 MPa;平均充型速度:207.1 mm/s)

### 2.3 凝固特征

通过测定不同厚度的长条形( $10 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 260 \text{ mm}$ ,  $30 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 260 \text{ mm}$ )铸件的凝固时间(见图5)<sup>[11]</sup>,可以发现,真空低压消失模铸造的凝固特征与重力消失模铸造的凝固特征有较大区别。重力消失模铸造沿程凝固时间的变化大于真空低压消失模铸造沿程凝固时间的变化,这也表明,真空低压消失模铸造更呈同时凝固特征,而重力消失模铸造趋于顺序凝固。

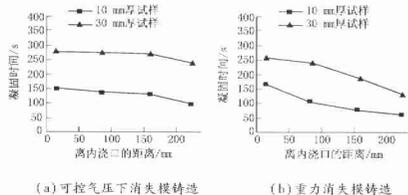


图5 长条形镁合金试样的凝固时间

凝固特征测试的条件为:内浇道面积均为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ,浇注温度 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 、泡沫密度 $0.16 \text{ mg}/\text{cm}^3$ 、自制涂料;重力消失模铸造可采用底注式浇注;真空低压消失模铸造的充型气压为 $0.2 \text{ MPa}$ 、充型气体流量为 $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、真空度为 $0.02 \text{ MPa}$ 。

### 2.4 组织性能特征

比较不同工艺条件和状态下,AZ91镁合金标准试样在铸态、T4和T6条件下的抗拉强度、屈服强度和伸长率,试验结果见表2<sup>[11]</sup>。

试验结果表明:真空低压消失模铸造铸态镁合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率,高于重力消失模铸造、树脂砂壳型铸造和金属型铸造,抗拉强度接近压铸镁合金。经热处理后,真空低压消失模铸造镁合金的力学性能更高。

热处理后,真空低压消失模铸造铸件伸长率的变化最为明显<sup>[11]</sup>(T4处理后 $\delta$ 为10.3%)。这是因为,固溶处理后粗大的 $\beta$ (Mg $_{17}$ Al $_{12}$ )相已经溶解,割裂基体而造成的合金脆性得到改善,因而合金的拉伸强度和伸长率都有了大的提高。时效处理之前,经过固溶处理后, $\beta$

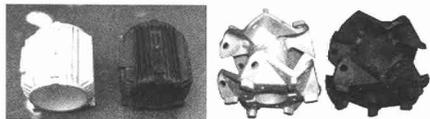
相溶解于基体之中,时效处理后,过饱和合金元素以非连续沉淀形式或连续沉淀方式析出了二次强化 $\beta$ 相,以非连续沉淀形式析出的 $\beta$ 相呈层片状由晶界向晶粒内部生长,其层片状结构容易被撕裂,所以降低了合金的力学性能。而以连续沉淀形式析出的 $\beta$ 相,则在晶粒内部呈细小颗粒形式弥散析出,起到了弥散强化的作用,钉扎了位错,同时提高了合金的强度。

表2 不同工艺条件下AZ91镁合金的力学性能

| 铸造工艺方法                | 热处理状态 | 抗拉强度/<br>MPa | 屈服强度/<br>MPa | 伸长率/<br>% |
|-----------------------|-------|--------------|--------------|-----------|
| 真空低压<br>消失模铸造         | 铸态    | 180.08       | 113.2        | 4.4       |
|                       | T4    | 258.70       | 143.63       | 10.3      |
|                       | T6    | 244.12       | 161.21       | 4.8       |
| 重力<br>消失模铸造           | 铸态    | 141.08       | 112.56       | 1.3       |
|                       | T4    | 223.63       | 114.72       | 7.2       |
|                       | T6    | 211.21       | 134.40       | 2.2       |
| 树脂砂壳型<br>铸造           | 铸态    | 144.97       | 111.80       | 1.6       |
|                       | T4    | 227.54       | 126.35       | 6.8       |
|                       | T6    | 199.60       | 141.50       | 1.5       |
| 金属型铸造 <sup>[11]</sup> | 铸态    | >160         | >70          | >2        |
|                       | T4    | >240         | >70          | >7        |
|                       | T6    | >240         | >110         | >3        |
| 压铸 <sup>[13]</sup>    | F     | 196~256      | 147~167      | 3~6       |

## 3 浇注实践

采用华中科技大学开发的真空低压消失模铸造方法及装备,浇注成形了多种复杂的镁合金铸件,其中的电机壳体及飞机行李架传送链轮(见图6),尺寸精度



(a) 电机壳体模样及其铸件 (b) 飞机行李架传送链轮模样及其铸件

图6 采用真空差压消失模铸造工艺生产的镁合金零件实例

高,表面粗糙度小。这些零件采用压铸、普通低压铸造等工艺很难实现,用砂型铸造工艺其精度不高,表面粗糙度大,用普通的消失模铸造易产生铸件浇不足等缺陷。浇注条件为:AZ91D镁合金、浇注温度 $780 \text{ }^\circ\text{C}$ 、充型气压 $0.3 \text{ MPa}$ 、充气流量 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 、真空度 $-0.03 \text{ MPa}$ 、

泡沫密度  $0.16 \text{ mg/cm}^3$ , 自制涂料。

#### 4 真空低压消失模铸造的技术优势

(1) 真空低压消失模铸造, 具有低压铸造与真空消失模铸造的综合技术优势, 使得镁合金消失模铸造在可控的气压下完成充型过程, 大大提高了镁合金的铸造充型能力; 整个充型冷却过程中, 液态镁合金不与空气接触, 且泡沫模样的热解产物对镁合金铸件成形时的自然保护作用, 消除了液态镁合金浇注成形时的氧化燃烧现象, 可铸造出光整、优质、复杂的镁合金铸件。

(2) 与压铸工艺相比, 真空低压消失模铸造具有设备投资小、铸件成本低、铸件内在质量好(铸件可进行热处理强化)等优点; 而与砂型铸造相比, 它又有铸件的精度高、表面粗糙度好、生产率高的优势, 同时可以较好地解决液态镁合金成形时易氧化燃烧的问题。

(3) 采用真空低压消失模铸造时, 直浇道即为补缩短通道, 液态镁合金在可控的压力下进行补缩凝固, 镁合金铸件的浇注系统小、成品率高、组织性能优良。

(4) 金属液从坩埚内至直浇道的温度降低很小, 因此, 一些采用重力消失模铸造不能成形的薄壁铸件, 采用反重力的真空低压消失模铸造可以很好地成形。图7所示为同等浇注温度下( $780^\circ\text{C}$ )采用重力下浇注的镁合金零件, 从中可以看出, 重力下浇注产生了严重的浇不足现象。



(a) 重力下浇注方案



(b) 重力下浇注零件

图7 采用重力下浇注的镁合金零件

将反重力的低压铸造与真空消失模铸造结合起来, 形成的“镁合金真空低压消失模铸造方法及其设备”新技术, 综合了低压铸造与真空消失模铸造的技术优势, 是一种极有潜力和优势的镁合金精密铸造工艺。该方法也适用于铝合金的消失模铸造, 生产出高质量的薄壁复杂铝合金消失模精密铸件。这些优点使得镁(铝)合金消失模铸造工艺具有广阔的应用前景。

#### 参 考 文 献

- 1 黄乃瑜, 叶升平, 樊自田. 消失模铸造原理及质量控制. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- 2 刘子利, 吴国华, 丁文江, 等. 镁合金负压消失模铸造充型过程的研究. 铸造, 2002, 51(4): 209~213

- 3 Liu Z L, Hu J Y, Ding W J, et al. Evaluation of the Effect of Vacuum on Mold Filling in the Magnesium EPC Process. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120: 94~100
- 4 董选普, 樊自田, 黄乃瑜, 等. 镁合金消失模铸造的优势及关键. 特种铸造及有色合金, 2003(4): 30~33
- 5 AFS Magnesium Lost Foam Casting Committee(6-E). Genesis of a New Process: Magnesium Lost Foam Casting. Modern Casting, 2003(4): 26~28
- 6 Michael M, David W, John H. Development in Lost Foam Casting of Magnesium. AFS Transaction, 2003(3): 112~114
- 7 樊自田, 董选普, 黄乃瑜, 等. 镁(铝)合金反重力真空消失模铸造方法及设备. 中国发明专利, ZL02 1 15638. 7, 2002.
- 8 樊自田, 吴和保, 张大付, 等. 镁合金真空低压消失模铸造新技术. 中国机械工程, 2004, 15(16): 1 493~1 496
- 9 Wu H B, Fan Z T, Huang N Y, et al. Mold Filling Characteristics of AZ91 Mg-alloy in the Low-Pressure EPC Process. Journal of Material Engineering and Performance, 2005, 14(1): 132~135
- 10 张大付, 樊自田, 吴和保. 镁合金真空低压消失模铸造充型能力的研究. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(3): 115~117
- 11 吴和保. 可控气压下镁合金消失模铸造充型凝固特征的基础研究. [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- 12 张大付. 镁合金低压消失模铸造典型缺陷试验研究. [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- 13 马图哈 KH. 非铁合金的结构和性能. 丁道云译. 北京: 科学出版社, 1999.

(编辑: 袁振国)

#### · 企业介绍 ·

### 滦县星火莫来石砂厂

由于唐山市星火莫来石砂厂产品供不应求, 为此在滦县又建一新厂(名称: 滦县星火莫来石砂厂)。

本厂特聘地质专家指导, 选择性地开采地下资源; 特聘有50年煅烧经验的退休工程师指导莫来石的焙烧。除尘设备和分析仪器从日本引进; 同时工厂引进了新型的上海产4R摆式雷蒙磨。先进的技术和装备, 保证了莫来石砂粉产品质量能满足精铸制壳的全面要求。

我厂产品已销售到全国300多家精铸企业, 年产量4万t以上, 并出口到日本、韩国、英国等国家。

本厂和唐山市星火莫来石砂厂

法人代表: 余胜

厂址: 河北省唐山市滦县西晒甲屯

邮编: 063705

电话: 0315-7420288 传真: 0315-7420537

联系人: 白瑞岩 13832875789

许铁军 13832875790