

## 镁合金真空低压消失模铸造工艺设计

安钦<sup>1</sup>, 石晋明<sup>2</sup>, 刘震<sup>2</sup>

<sup>1</sup>杭州电子科技大学材料与环境工程学院 浙江杭州

<sup>2</sup>晋西工业集团有限责任公司理化计量中心 山西太原

**【摘要】** 本课题对镁合金真空低压消失模铸造工艺设计, 主要对消失模合金的熔炼工艺设计和浇注工艺设计, 通过实验分析消失模铸造镁合金组织的特点分析, 总结出温度、真空度对镁合金组织的影, 最后对镁合金真空低压消失模铸造工艺过程进行成本分析。

**【关键词】** 镁合金; 浇注系统; 消失模; 模具

### Technological design of magnesium alloy vacuum low pressure Lost-foam casting

Qin An<sup>1</sup>, Jinming Shi<sup>2</sup>, Zhen Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Materials Science and Environmental Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou

<sup>2</sup>Jinxi Industries Group CO,LTD. Physiological Testing, Chemical Analysis and Metrology Center. Taiyuan

**【Abstract】** This topic focuses on the design of magnesium alloy vacuum low pressure EPC process, mainly on the melting process design and pouring process design of EPC alloy. Through the experimental analysis of the characteristics of magnesium alloy microstructure in EPC, the effects of temperature and vacuum degree on magnesium alloy microstructure are summarized. Finally, the cost of magnesium alloy vacuum low pressure EPC process is analyzed.

**【Keywords】** magnesium alloy; Gating system; Lost foam; mould

### 1 绪论

传统砂型铸造工艺是目前国内铸造生产大型零件的主要工艺, 它有着悠久的历史, 技术、工艺各方面均比较成熟, 且成本较为低廉。但是传统砂型铸造存在着诸多不足, 如工序繁多、生产周期长、劳动强度大、生产环境恶劣、产品加工余量大、表面质量不好等, 对于内腔结构复杂的机体铸件, 其缺点尤为明显。消失模铸造技术具有加工余量小、尺寸精度高、表面质量好、生产环境良好等一系列优点, 非常适合于复杂机体铸件的生产。

近年来铸造技术的研究和生产应用取得了很大的发展, 新材料新工艺新装备不断的被开发和应用, 铸件已经不再是过去的“傻、大、粗”, 铸造生产也不再是过去的“脏、乱、差”。“近终形铸造”和“零缺陷铸件”等概念不断被人们所接受, 铸造生产呈现“绿色集约化”、“轻量化”、“精密化”和“复合化”的趋势, 未来世界铸件市场的产品必

将具有“精确”、“柔性”和“快捷”特点<sup>[1]</sup>。镁合金材料的成型技术正在大规模研究开发和应用。消失模铸造技术在铝合金、铸铁、铸钢等合金的应用取得了巨大成功, 自然使人们想到该技术在镁合金成型方面的应用。但是, 作为一项有待进一步研究的新技术, 镁合金消失模铸造涉及的技术问题较多, 包括镁合金材料配方、镁合金熔炼及保护、镁合金消失模铸造模样材料的选用、成形工艺、镁合金的凝固组织、力学性能、零件的表面处理等等。

本文针对镁合金真空低压消失模铸造工艺进行了研究, 该工作对解决消失模铸造工艺中存在的问题, 提高消失模模具设计效率, 提高铸件质量具有较高的理论意义和实用价值。

### 2 真空低压消失模设计

镁合金消失模铸造流动性的影响因素很多, 一是外界条件像振动强度和真空度等; 二是模样材料, 像模样形状和尺寸、泡沫塑料的密度和发气量等;

作者简介: 安钦(2002-)男, 山西大同, 大学, 党员, 汉族, 从事材料科学及纳米自清洁表面和钙钛矿光伏发电等研究领域。

三是造型材料和防护材料如砂子的种类、粒度大小以及涂料的性质等；四是浇注系统工艺因素如金属静压头、浇注温度、浇注速度和浇注类型等。本次设计主要选取浇注温度、模样厚度、金属静压头、真空度及试样形状（包括厚度和开口角度）这五个工艺因素来研究其对 AZ91 镁合金流动性的影响规律。

对浇注系统的设计是根据镁合金砂型铸造的设计原则。首先必须考虑到手工造型的吃砂量，因为只有具备一定厚度的吃砂量，在抽真空后才能产生足够的强度，形成坚固的铸型，使其能承受住金属静压力的作用。对于砂箱内框平均尺寸小于 500mm 的模样至砂箱内壁尺寸应在 40~60mm，浇冒口至砂箱内壁尺寸要大于 30mm，模样顶部至砂箱底部的尺寸要大于 15mm。模样之间留有一定的间隙，以保证浇注时模样之间互不影响。采用负压实型铸造造型时，考虑到模型为大平面应垂直放置，实验采用底端浇注的方式。为保证有一定的金属静压力，直浇道的最小高度为 100mm，浇口杯为 50mm。有效压头的高度为直浇道高度加上浇口杯的高度。

对消失模铸造来说，型砂应使铸型具有高的透气性、好的退让性、落砂性和高的强度。常用的造型材料选用干砂。干砂对铸件的质量有重要的影响。因此对干砂有一定的性能要求[R]。首先应当选择适当粒度的干砂，这样不仅透气性好，而且能防止金属液的穿透，使铸件表面减少针刺或粘砂缺陷。其次干砂应有良好的流动性，这样充填性能亦好，则容易得到紧实度高的铸型，可减少型壁在高温金属液的冲击下产生移动。再次干砂还需有高的耐火度，以防铸件表面粘结。对干砂里的石英砂筛号也有选择。干砂必须与涂料一起提供机械支撑金属液。石英砂的颗粒度不同，埋型紧实后铸型的填充密度不同，因而铸型强度和表面强度也不同。填充密度高的，铸型的强度和表面硬度都高。但是，颗粒度同时对铸型的透气性也有明显影响：密度高，透气下降。此次实验用到的是 50/100 目的标准干砂。对消失模而言，采用没有水分的干砂意味着可以减少气化水分所需的大量热量。这对改善泡沫塑料模样的气化条件和确保铸件质量是有益的。理想的干砂是没有水分的，然而，因大气的湿度和凝结作用，不可避免地会有微量水分。因此实验前需对石英砂进

行干燥处理。

### 3 消失模铸造后镁合金的组织分析

#### 3.1 消失模铸造 AZ91 镁合金组织的特点

消失模铸造 AZ91 镁合金的基本特征为：在  $\alpha$ -Mg 基体的晶界上不连续网状分布  $\beta$ (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) 相。 $\beta$  相存在两种形态：白色条块状为离异共晶  $\beta$  相，黑色层片状为合金凝固过程中从  $\alpha$  固溶体中析出  $\beta$  相。在  $\alpha$ -Mg 基体上还分布有呈球状的少量含铁的 Al—Mn 化合物。

随着温度的下降，AZ91 镁合金沿着液相线变化，开始析出  $\alpha$ -Mg 固溶体。刚开始凝固时温度还比较高，铝在  $\alpha$ -Mg 固溶体中的溶解度比较低，随着凝固过程继续进行，温度进一步降低，开始时铝在固相中的扩散速度比较慢，之后扩散速度逐渐加快，铝在  $\alpha$ -Mg 固溶体中含量不断增加。当 AZ91 镁合金温度冷却至固相线时，依然有少量液相存在。当金属液的温度降到 437℃ 时，这时开始发生共晶转变，共晶成分为  $\alpha$ -Mg 和  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>。一部分与共晶成分接近的液相将发生离异共晶转变，离异共晶  $\beta$  相分布在晶界上。

根据图 2 Mg-Al 二元合金相图可知：平衡结晶时，437℃ 将  $\alpha$ -Mg 固溶体的最大固溶度为 12.7% Al。AZ91 镁合金中的 Al 含量不超过 10%，虽然在其最大溶解度范围内，但是在凝固过程中由于铝在  $\alpha$ -Mg 固溶体中扩散速度慢，从而导致显著的固溶体晶内偏析和成分偏析，结果形成  $\alpha$ -Mg + Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 共晶网。

#### 3.2 温度对 AZ91 镁合金组织的影响

图 1 为不抽真空 15mm 厚试样在 730℃ 和 670℃ 下浇注的金相组织。可以看出随着温度的降低，b 图的组织稍细于 a 中的，这与一般铸造条件下得出的规律基本相同。因为浇注温度对组织的影响是通过过冷度来实现的。过冷度影响着晶体的形核和长大两个基本过程。晶粒的大小就取决于形核率(N)和长大速度(G)的比例关系。一般情况下，过冷度越大，形核率和长大速度的比值(N/G)也越大，晶粒越细小。

在消失模铸造过程中，泡沫模样气化所需的热量必须从金属液中获得，这势必降低金属液的温度，引起过冷度增大，使形核率和长大速度的比值(N/G)变大，晶粒由此变得更细小。但是在消失模铸

造充型过程中, 过冷度与晶粒细化程度并非呈线性关系, 即过冷度越大, 晶粒细化程度越大。这是因为晶粒的细化程度还受凝固条件制约。在消失模铸造过程中, 铸型的传热是必须通过干砂进行, 若是干砂的传热性差, 会不利于金属液的快速凝固, 原本金属中还比较小的晶核由于干砂这一蓄热作用造成其有了足够的时间长大, 晶粒不再细小反而变得粗大, 这样两方面综合作用下, 晶粒最终的细化程度相差不大 (见图 3a、b)。不过总的说来, 消失模铸造中晶粒度与浇注温度的关系仍然遵循着随着浇注温度的降低, 晶粒逐渐变得细小的规律, 区别之处在于浇注温度下降到某个值后, 晶粒细化程度并不会很大。

### 3.3 铸件壁厚对 AZ91 镁合金组织的影响

图 2 为在不抽真空, 700℃ 浇注的不同壁厚的试样金相组织。从图中可以看出, 消失模铸造 AZ91 镁合金有很强的壁厚效应, 晶粒随壁厚的减小而明显细化。引起消失模铸造镁合金壁厚效应的主要原因在于壁厚较小的试样, 其单位表面积热含量较少, 金属液与铸型之间的传热损失比模样分解吸热大得多, 造成充型前沿温度降低, 因此试样具有较大的冷却速度。

### 3.4 真空度对 AZ91 镁合金组织的影响

图 3 为不同壁厚和真空度下的 AZ91 镁合金组织。与图 1 比较, 可以看出抽真空能明显细化组织。抽真空时, 大量冷空气从浇口杯附近烧掉的塑料薄膜处吸进砂箱, 砂箱中热空气持续被冷空气置换, 造成金属液冷却速度加快, 同时由于泡沫模样热分解吸热会导致金属液的冷却速度进一步变大, 金属

液过冷度将不断增大。由于晶粒的粗细取决于凝固初期的形核率, 而合金液的过冷度又决定了形核率, 因此, AZ91 镁合金的晶粒尺寸在抽真空后能明显变小。真空度的提高除了可以降低凝固期间试样的冷却速度外, 还能减小干砂砂粒间的间隙。间隙的减小对充型过程中的热对流将起到两方面的作用。一方面间隙减小, 干砂的填充密度增加, 铸型的强度和表面硬度都增高, 而铸型的透气性下降, 泡沫模样热分解产生的气体不易排出, 有效热对流通道减小。另一方面, 抽真空加快了内外气体的热交换即有效通道内空气热对流速度的增大。因此, 真空度提高时这两方面的作用相互抵消导致冷却速度变化不大, 从而使合金的显微组织变化不大。

## 4 镁合金消失模铸造缺陷及防止

### 4.1 浇不足

模样的顶部或薄壁处未被金属液置换, 导致试样局部充型不完整, 这一现象称为浇不足。

(1) 浇不足产生的原因, 主要包含: 镁合金结晶范围宽, 密度、单位容积热含量和结晶潜热都较低; 充型时静压头的作用小; 泡沫模样密度过大, 发气量大, 金属液前沿阻力过大且气化消耗的热量多; 浇注温度过低。

(2) 防止浇不足的措施, 主要包含: 提高真空度, 加快泡沫模样气体的排出; 适当提高浇注温度; 采用合适的浇注方式, 在不产生反喷的情况下, 浇注速度越快越好; 合理设置浇注系统, 减短路线, 减小流动阻力, 可采用空心浇道; 在铸件质量性能允许范围内, 可通过加入合金元素来提高流动性。

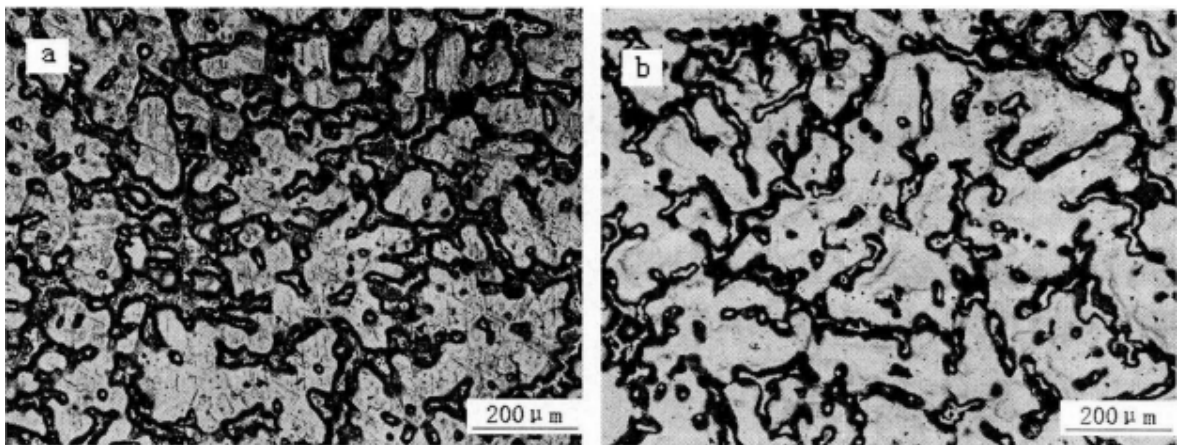


图 1 厚度为 15mm 的试样在不同浇注温度下的 AZ91D 镁合金显微组织(a)730℃; (b)670℃

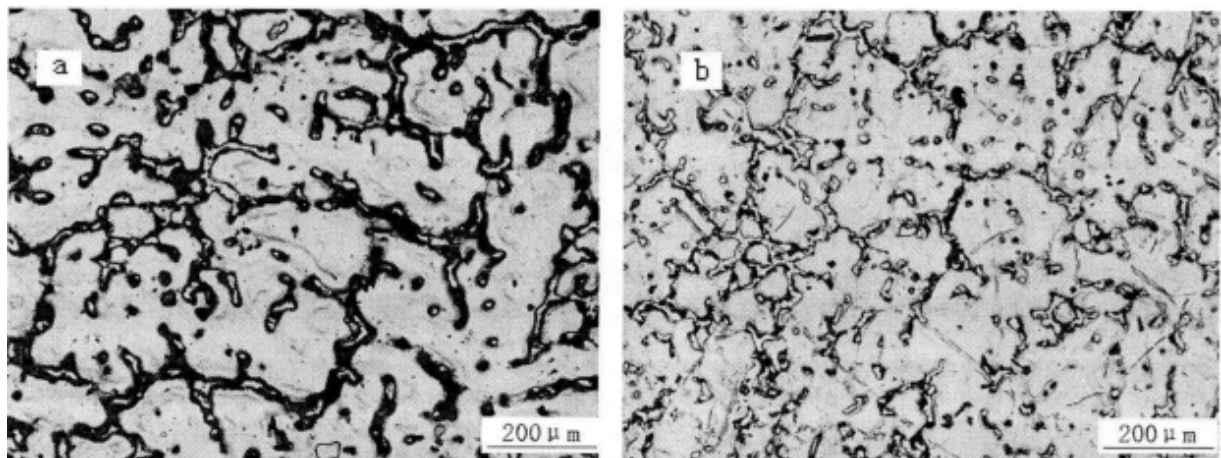


图 2 700°C浇注的不同壁厚的 AZ91D 镁合金金相组织(a) 15mm; (b) 8mm

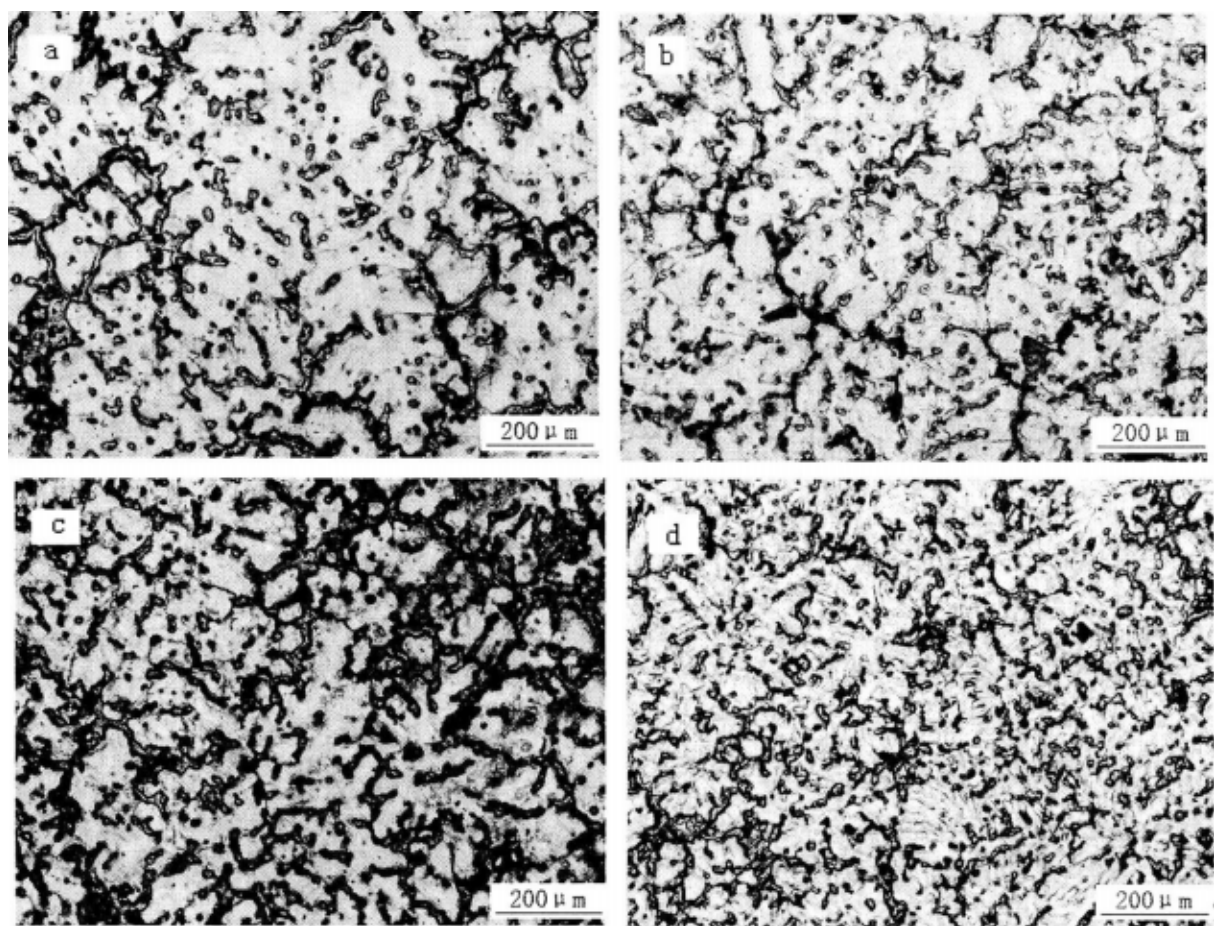


图 3 不同壁厚和真空度下的 AZ91D 显微组织

(a) 15mm, 0.01Mpa; (b) 8mm, 0.01Mpa; (c) 15mm, 0.01Mpa; (d)8mm, 0.02mpa

#### 4.2 塌箱

塌箱是指浇注过程中铸型塌陷，金属液不再从直浇道进入型腔，造成浇注失败。一般发生浇注大平面铸件、内腔封闭或半封闭的铸件上。局部塌箱

是指铸型在浇注过程中或凝固过程中局部塌陷，一般发生在铸件厚大部位或拐角处。

(1) 当铸型的抗剪强度小于造型材料自重产生的剪切压力时，浇注时就会产生塌箱。其原因包括

以下几方面: 浇注时金属液喷溅厉害, 导致密封砂箱的塑料薄膜烧失严重, 真空度降低; 浇注速度太慢, 特别是在断流浇注时, 金属液未能密封住直浇道, 造成大量气体被吸进直浇道, 引起砂箱内真空度的急剧下降; 涂料的耐火度、高温强度不够。当金属液置换模样充填型腔后, 干砂就靠涂层支撑, 若涂层强度或耐火度不足, 局部铸型就会溃散坍塌。

(2) 防止塌箱产生的措施, 主要包含: 防止金属液浮力造成的上部铸型溃散、坍塌, 增加顶面的吃砂量或砂箱上面放置压铁; 浇注时尽量避免金属喷溅; 适当控制浇注速度, 浇注时流股必须连续, 禁止停歇、中断; 选用高强度, 高耐火度, 具有良好透气性的涂料。

#### 4.3 粘砂

粘砂是一种铸件表面缺陷, 表现为铸件表面粘附着难以清除的砂粒或型砂与金属氧化物形成的化合物。分为机械粘砂和化学粘砂两种。

(1) 产生粘砂的原因, 主要包含: 型砂紧实不够或紧实不均匀, 形成裂缝而粘砂; 选用的造型材料粒度太粗; 涂层太薄或刷涂不均匀; 真空度太高造成金属液透过涂层渗入型砂而粘砂。

(2) 防止粘砂的措施, 主要包含: 合理调整涂料组分, 提高涂料强度和抗激热开裂的性能; 增强涂料的涂刷性, 增加涂层厚度; 选用合适的真空度和浇注温度; 为减少型砂或干砂的空隙应选择较细的原砂。

#### 4.4 节瘤

节瘤形似金属脊峰, 在试样表面上出现的形状不规则的凸出部分, 肉眼便可观察到。

(1) 产生节瘤的原因, 主要包含: 振动或抽真空小引起紧实不够以致铸型的紧实度太低; 涂料层太薄。拐角处涂料易产生裂纹, 导致浇注后金属液与型砂直接接触; 振动振幅太大造成涂料层振裂或脱落; 试样结构设计不合理, 存在造型材料充填不到的死角。

(2) 防止节瘤的措施, 主要包含: 修改铸件结构, 消除型砂填不到的死角, 或先对死角进行预埋; 合理选用振幅或真空度, 充分紧实干砂, 使其能紧密包覆在模样周围; 均匀涂刷模样且增加涂层厚度, 干燥后检查模样是否有涂料层破裂或脱落的情况, 及时进行修补, 埋模操作要小心, 避免涂料层破裂

或剥落; 严格按照浇注原则和方法进行。

### 5 经济性分析

为了正确计算成本, 对于各种财产物资的计价和价值的结转, 应严格执行国家统一的会计制度。各种方法一经确定, 应保持相对稳定, 不能随意改变, 以保证成本信息的可比性。真空低压消失模设计的经济性评估如下: 金属材料价格 500 元, 泡沫材料价格 220 元, 造型材料价格 235 元, 胶合剂价格 380 元。

### 参考文献

- [1] 蒋文明, 樊自田. 镁合金消失模铸造新技术研究[J]. 铸造, 2021, 70(1): 28-37.
- [2] 谭香玲, 胡新华, 伊向文, 等. 镁合金消失模铸造涂料的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(11): 79-82.
- [3] 刘天平, 王爱丽, 李泽同, 等. 消失模铸造新工艺的试验研究[J]. 现代铸铁, 2021(1): 56-59.
- [4] 杨明, 李静生, 张凯, 等. 消失模铸造工艺的研究[J]. 中国机械, 2014, (19): 29-29.
- [5] 刘喆, 孟凡荣. 消失模铸造工艺的研究[J]. 军民两用技术与产品, 2017, (18): 189.
- [6] 陈刚. 消失模铸造工艺技术研究[J]. 装备制造技术, 2013, (10): 29-31.
- [7] 高勇宏. 消失模铸造工艺技术探讨[J]. 内燃机与配件, 2020, (19): 110-111.
- [8] 宋安安. 新环保形势下对消失模铸造的再思考[J]. 铸造技术, 2021, 42(5): 383-387.
- [9] 陈冬梅. 镁合金铸造工艺方法研究[J]. 科学与财富, 2016, (12): 851-851.
- [10] Caulk D A. A foam melting model for lost foam casting of aluminum[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(13-14): 2124-2136.
- [11] Barone M R, Caulk D A. A foam ablation model for lost foam casting of aluminum[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(19-20): 4132-4149.
- [12] Stroom. P. Roots. Our Lost Foam Legacy, AFS International Lost Foam Casting Conference[J], 2004, 8: 19-21.
- [13] ZILI LIU, JINGYU HU, QUDONG WANG. Evaluation of the effect of vacuum on mold filling in the mag

- nesium EPC process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120(1/3): 94-100.
- [14] WU HEBAO, FAN ZITIAN, HUANG NAIYU. Process Optimization for AZ91 Mg-alloy Low-pressure EPC Process[J]. Journal of Wuhan University of Technology. Materials Science edition, 2005, 20(2): 42-44.
- [15] 杨少锋, 王再友. 压铸镁合金的研究进展及发展趋势[J]. 材料工程, 2013, (11): 81-88.
- [16] 赵忠, 樊自田, 成平等. 机械振动对 A356 和 AZ91D 消失模充型的影响[J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2009, 37(11): 82-85.
- [17] 姜不居, 南密英, 郭建政等. REPLICAST CS 法用超薄高强度型壳的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 1992, (6): 5-7, 15.
- [18] 袁子洲, 张劲松, 陈秀娟. 消失模精密铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2003(4): 46-47.
- [19] 彭勇, 王顺成, 郑开宏等. 高性能镁合金铸造技术研究进展[J]. 铸造技术, 2013, 34(2): 203-207.
- [20] 郭径, 叶兵, 吴玉娟等. 高强韧压铸镁合金的研究现状和发展趋势[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(3): 254-260.

**收稿日期:** 2022 年 8 月 19 日

**出刊日期:** 2022 年 9 月 25 日

**引用本文:** 安钦, 石晋明, 刘震, 镁合金真空低压消失模铸造工艺设计[J]. 国际材料科学通报, 2022, 4(2): 16-21  
DOI: 10.12208/j. ijms. 20220008

**检索信息:** 中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

**版权声明:** ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**