

# 稀土镁合金框架铸造工艺优化研究

潘龙<sup>1</sup>, 武丽丽<sup>2</sup>, 张益锋<sup>1</sup>, 李蒙<sup>1</sup>, 高伟宏<sup>1</sup>, 毛焱<sup>1</sup>, 叶峰<sup>1</sup>

(1. 新江科技(江苏)有限公司, 江苏南通 226100; 2. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

**摘要:** 采用ProCAST软件及试验验证的方法对稀土镁合金框架铸造工艺进行优化研究, 并结合X射线无损检测、光学显微镜等设备对铸件内部质量、显微组织和力学性能进行表征分析。结果表明: 工艺优化前, 由于补缩效果不足等原因, 铸件内部夹渣、气孔以及疏松等缺陷较多; 工艺优化后, 通过调节浇注和补缩系统, 铸件内部缩松和气孔缺陷基本消失, 铸件合格率从68.2%提升到93.5%。显微组织观察表明: 铸态显微组织均由等轴的 $\alpha$ -Mg基体和沿晶界连续网状分布的第二相组成, 工艺优化后铸件晶粒尺寸变得更加细小, 平均达到35.99  $\mu\text{m}$ 。力学性能测试表明: 工艺优化后, 铸件T6态的室温平均抗拉强度和断后伸长率为265.33 MPa和7.17%, 相比于工艺改进前, 分别提高23.03%和26.46%。

**关键词:** 稀土镁合金; 铸造工艺; ProCAST; 内部质量; 显微组织; 力学性能

镁合金因密度小、比强度和比刚度高, 尺寸稳定性、导热性、消震性、电磁屏蔽性好, 综合力学性能、切削加工性能优良等特性而成为材料研究的热点, 其产品国防工业中得到越来越广泛的运用<sup>[1-4]</sup>。稀土镁合金框架是某型号重要的承力结构件, 其结构如图1所示, 主要结构为四周壁板+中心拉筋, 零件最大长度1 050 mm, 最小壁厚2 mm, 最大壁厚22.5 mm, 壁厚差异大。

目前, 稀土镁合金框架采用传统的粘土砂铸造工艺生产, 浇注系统设计如图2所示, 缝隙浇道的高度低于铸件高度, 使合金液在充型过程中从铸件底部进入型腔, 然后慢慢向上充满型腔。稀土镁合金框架铸件各浇注10件, 对铸件进行X射线无损检测, 检测结果表明铸件侧壁处出现多处夹渣、缩松等缺陷, 产品质量差, 力学性能低。王孝国<sup>[5]</sup>等人利用ProCAST对机床悬梁的铸造工艺进行数值模拟分析, 根据铸件充型和凝固的温度场、充型时间及缺陷分布, 对初始铸造工艺进行优化, 有效抑制了铸件缩孔缩松的形成, 提高了铸件质量。因此, 利用ProCAST软件对充型和凝固过程进行数值模拟, 并预测铸件缩孔缩松缺陷, 对于研究铸造工艺对镁合金铸件质量影响具有重要的指导意义<sup>[6-7]</sup>。

## 作者简介:

潘龙(1993-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为轻合金材料。电话: 17717255352, E-mail: 809108080@qq.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2024)

08-1165-06

## 收稿日期:

2023-10-23 收到初稿,  
2023-12-28 收到修订稿。

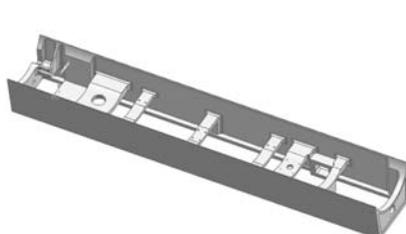


图1 稀土镁合金框架的三维模型图  
Fig. 1 3D model of rare-earth magnesium alloy frame

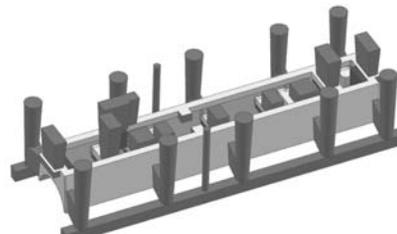


图2 稀土镁合金框架工艺优化前浇注和补缩系统设计示意图  
Fig. 2 Design diagram of gating and feeding system before process optimization of rare-earth magnesium alloy frame

基于以上问题, 本研究以稀土镁合金框架为对象, 开展了铸造工艺优化研究, 通过数值模拟、试验验证及内部质量、显微组织和力学性能对比分析, 确定最佳铸

造工艺。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 铸件制备

采用粘土砂铸造工艺制备稀土镁合金框架。以纯Mg、纯Zn、Mg-30Nd中间合金、Mg-20Y中间合金和Mg-30Zr中间合金为原材料。熔炼过程如下：（1）熔化纯Mg。将纯Mg放入规格为 $\Phi 500\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$ 的铁制熔炼坩埚内熔化，熔化质量为250 kg；采用熔剂保护法防止镁液燃烧，熔炼过程中覆盖剂采用JDMF熔剂。（2）添加中间合金，待熔体温度升至730~740℃，加入纯Zn、Mg-30Nd、Mg-Y中间合金，待熔体升温至780℃加入Mg-Zr中间合金；待中间合金熔化后搅拌2 min左右，静置12~15 min。（3）精炼，当镁液温度降至750~760℃左右时对合金进行精炼，精炼剂采用JDMJ熔剂，熔剂使用量为合金总量的2.5%左右，精炼后静置15 min然后降温。（4）重力浇注，当熔体温度降至735℃后，进行重力浇注。熔炼后用电感耦合等离子体发射光谱仪进行化学成分分析，所得结果如表1所示。对所得铸件进行固溶时效处理，热处理制度为490℃×24 h+200℃×18 h，冷却方式均为空冷。

表1 合金理论成分和实际化学成分  
Table 1 Theoretical and practical chemical composition of the alloy  $w_B/\%$

项目	Nd	Zn	Y	Zr
理论成分	2.6	0.5	0.15	0.9
实际成分	2.53	0.52	0.18	0.78

### 1.2 数值模拟参数设置

采用ProCAST软件对优化后的铸造工艺进行数值模拟分析，然后进行浇注工艺试验。数值模拟过程中，材料的物性参数设置如下：密度为1.82 g/cm<sup>3</sup>、热扩散率为 $2.856\ 0 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ ，平均线膨胀系数为 $25.3 \times 10^{-6}/\text{℃}$ 、弹性模量为45 GPa、泊松比为0.35，切边模量为16.20 GPa、比热容为0.98 J/(g·K)、热导率为9.476 W/(m·K)。

### 1.3 X射线无损检测

为了进一步观察铸件产品的内部质量，对产品进行X射线检测并根据拍片结果分析其内部缺陷情况。射线底片的黑度值范围依据标准NB/T 47013.2—2015《承压设备无损检测 第2部分 射线检测》，技术等级为AB级（中灵敏度等级）的底片，黑度值范围要求达到 $D=2.0\sim 4.5$ ；技术等级为B级（高灵敏度等级）的底片，黑度值范围要求达到 $D=2.3\sim 4.5$ 。

### 1.4 显微组织表征

在铸件上取20 mm×20 mm×5 mm的块状试样，取样位置如图3所示，然后用800#、1500#、2000#、3000#的水磨砂纸按照从粗到细依次进行磨样，随后在抛光机上进行酒精抛，待表面光亮成镜面状即可。金相显微组织浸蚀剂选用4%硝酸酒精，采用Zeiss Axiovert 2000MAT型光学显微镜进行金相观察。

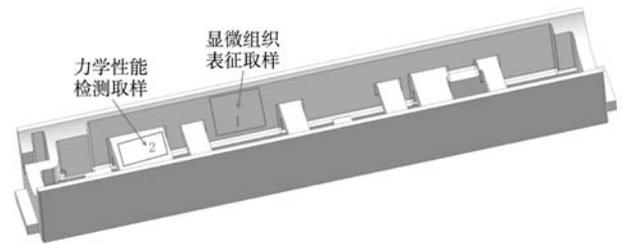


图3 稀土镁合金框架取样位置示意图

Fig. 3 Sampling position diagram of rare-earth magnesium alloy frame

### 1.5 力学性能测试

力学性能检测取样位置如图3所示，从铸件本体筋板横梁位置处取样加工拉伸试样用于室温力学性能测试。根据GB/T 228.1—2010制取镁合金的拉伸试样，每个拉伸试样取3个平行试样，拉伸试样的标距长度为25 mm，标距直径为5 mm，拉伸速率为1 mm/min，拉伸试样尺寸如图4所示（单位mm）。选用中科科仪KYKY-EM8000场发射扫描电子显微镜对镁合金拉伸断口形貌进行观察，根据断口形貌特征对合金进行失效分析。

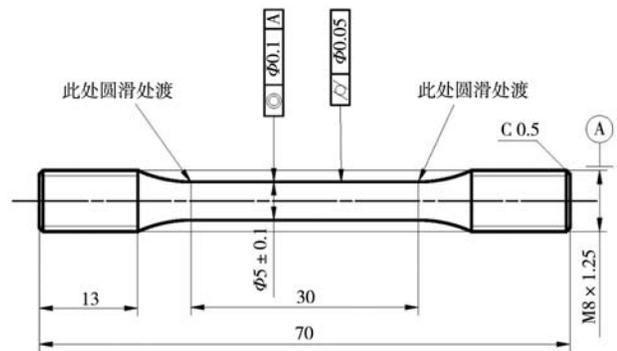


图4 拉伸试样尺寸

Fig. 4 Tensile specimen sizes

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 工艺优化

针对原有铸造工艺进行分析，稀土镁合金框架铸件产生夹渣、缩松等缺陷的主要原因如下：一是立筒间距较远，补缩距离不足；二是缝隙浇道高度较小，立筒的补缩效果变弱，而铸件侧壁较厚位置凝固后期缺乏补缩来源，容易产生缩松缺陷。对稀土镁合金框

架进行铸造工艺优化：首先，浇注系统改进，将缝隙浇道恢复至与立筒一样的高度，缝隙浇道对应的铸件顶部设置冒口，用于排气、浮渣及补缩；其次，冷铁的布置，两个大侧壁立筒之间设置15 mm厚冷铁调节凝固顺序，强化立筒对铸件侧壁的补缩效果（图5）。

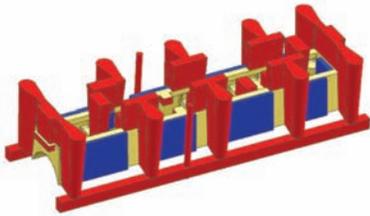


图5 稀土镁合金框架工艺优化后浇注和补缩系统示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of gating and feeding system after rare-earth magnesium alloy frame process optimization

## 2.2 数值模拟分析

采用ProCAST软件对稀土镁合金框架充型过程进行了数值模拟，充型过程如图6所示。结果表明稀土镁合金框架的充型过程相对比较短，充型时间只有9 s左右，存在卷气倾向，容易出现气孔和氧化夹渣等缺陷。因此，实际浇注时需要控制浇注速度，最终选定工艺设计稀土镁合金框架浇注时间控制在13~15 s范围内。

从稀土镁合金框架的凝固过程分析（图7），通过浇注系统和冷铁分布的优化改进，铸件整体的凝固顺序总体呈现出从远离浇冒口部位到靠近浇冒口部位的顺序凝固。铸件各个部分在整个凝固过程中都有补缩来源，铸件两厚大侧壁由于冷铁的激冷效果，温度下降较工艺优化前加快，侧壁过热现象消失，铸件出现缩松的倾向大幅降低。

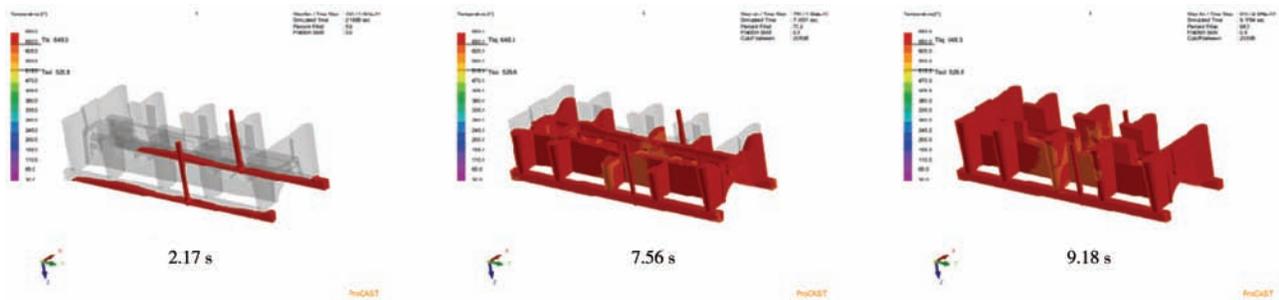


图6 稀土镁合金框架铸造工艺优化后的充型过程  
Fig. 6 Mold filling process of rare-earth magnesium alloy frame after optimization of casting process

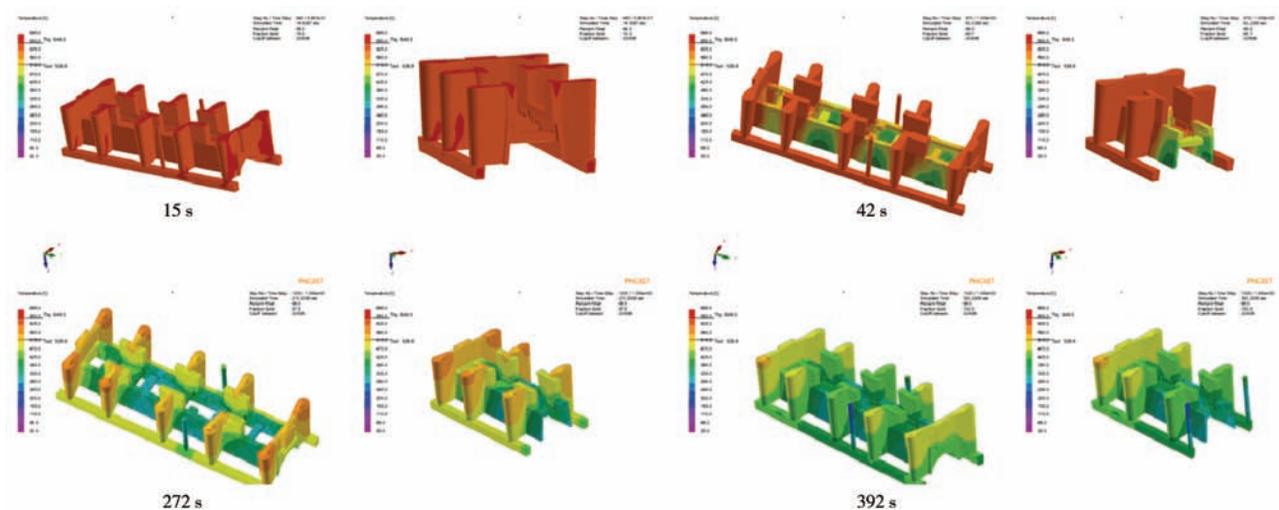


图7 稀土镁合金框架铸造工艺优化后的凝固过程  
Fig. 7 Solidification process of rare-earth magnesium alloy frame after optimization of casting process

从缩松缺陷预测结果（图8）也可以看出，通过在铸件顶部设置冒口，使缩松缺陷主要位于冒口和浇注

系统中，铸件内部出现缩松和夹渣的倾向比较小，大幅度提升铸件质量。

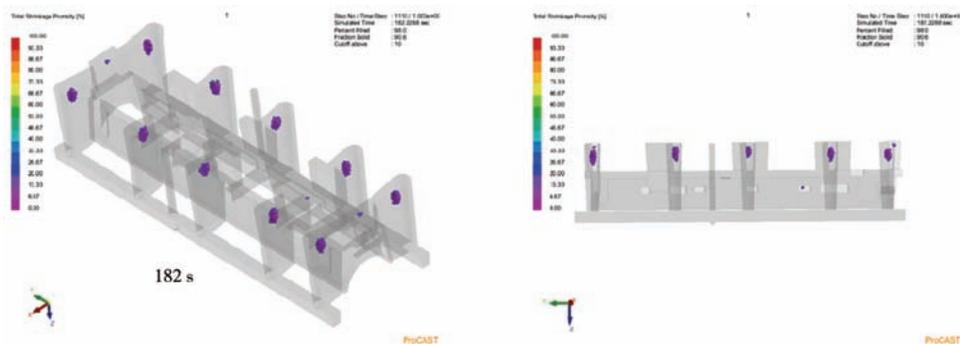


图8 稀土镁合金框架铸造工艺优化后的缺陷预测

Fig. 8 The shrinkage porosity defect prediction of rare-earth magnesium alloy frame casting process optimization

### 2.3 内部质量

对工艺优化前后的稀土镁合金框架铸件进行了X射线无损检测，无损检测照片如图9所示。工艺优化前从稀土镁合金框架拍片结果可知铸件内部出现大面积典型的树枝状的疏松缺陷；工艺优化后，稀土镁合金框架拍片未观察到明显的大面积缺陷，表明工艺优化后铸件内部质量大幅提高。工艺优化前后稀土镁合金

框架铸件缺陷位置实物图如图10所示。工艺优化前铸件主要为夹渣和缩松缺陷，且缩松主要出现在铸件侧壁厚大部分，该部分热节严重，存在过热现象，金属液凝固收缩大，导致缺陷出现。工艺优化后通过在侧壁加冷铁，调节侧壁凝固顺序，侧壁过热现象得以消除，在铸件底部观察到少量夹渣缺陷。

工艺改进前，稀土镁合金框架共浇注22件，为保



图9 工艺优化前后铸件X射线检测结果

Fig. 9 The X-ray detection results of castings before and after process optimization



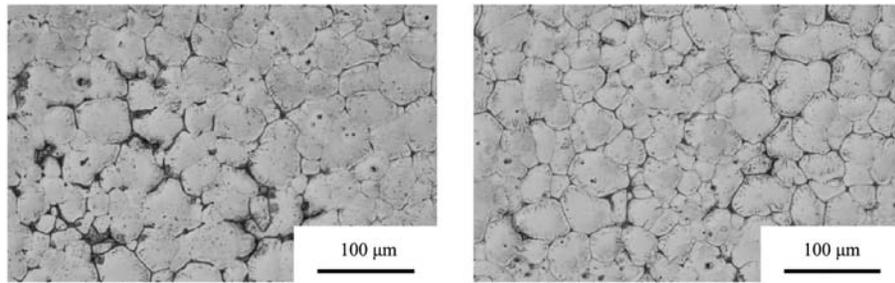
图10 工艺优化前后铸件缺陷位置实物图

Fig. 10 Physical pictures of casting defect positions before and after process optimization

证铸件内部质量，除了指定拍片部位外，对铸件的两个大侧壁也进行了X光检测，有15件后舱一次拍片合格，一次拍片合格率为68.2%；工艺优化后，稀土镁合金框架共浇注154件，其中合格件为144件，合格率为93.5%。工艺优化后，铸件产品合格率的提升具有巨大的经济效益，给企业扩大产业化规模提供技术支撑。

### 2.4 显微组织

稀土镁合金框架铸件铸造工艺优化前后的铸态金相显微组织如图11所示，结果表明显微组织主要是由等轴的 $\alpha$ -Mg基体和沿晶界连续网状分布的第二相组成。利用Image-Pro Plus 6.0软件分析得到工艺优化前后的平均晶粒尺寸大小分别为47.34  $\mu\text{m}$ 和35.99  $\mu\text{m}$ ；可



(a) 工艺优化前 (b) 工艺优化后

图11 稀土镁合金框架铸态金相显微组织

Fig. 11 As-cast microstructures of rare-earth magnesium alloy frames

知工艺优化后通过浇注系统缝隙浇道的调整和添加冒口、冷铁,使铸造缺陷集中在冒口处,铸件内部质量高;并且由于冷铁的添加,铸件凝固速度快,晶粒长大时间缩短,晶粒来不及长大;通过显微组织观察,晶界处小尺寸的晶粒较多,晶粒尺寸相对较小。

## 2.5 力学性能

经T6热处理后,铸件的力学性能变化如图12所示。从图可知,稀土镁合金框架铸件经铸造工艺优化后,其力学性能整体呈现上升的趋势。这是因为经过工艺优化,铸件内部质量得以改善,气孔、夹渣等缺

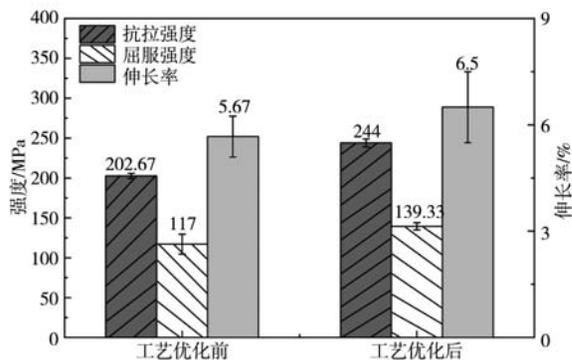


图12 稀土镁合金框架铸件T6热处理后的力学性能

Fig. 12 Mechanical properties of rare-earth magnesium alloy frame castings after T6 heat treatment

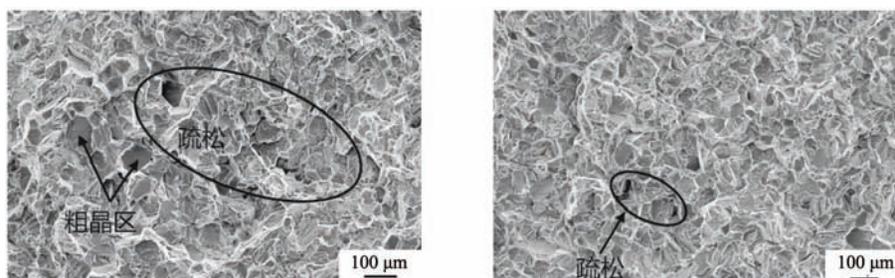
陷大幅减少,合金的强韧性提高。铸件经铸造工艺优化后其抗拉强度、屈服强度和伸长率由工艺改进前的215.67 MPa、130.33 MPa和5.67%提升到265.33 MPa、169.33 MPa和7.17%,提升幅度分别为23.03%、29.92%和26.46%。

图13为铸造工艺优化前后的镁合金拉伸断口形貌图。从图可知,工艺优化前的稀土镁合金框架断口形貌出现大范围的疏松缺陷,并且在断口观察到大量的粗晶区,呈现典型的脆性断裂特征;工艺优化后,稀土镁合金框架铸件的疏松面积明显减少,在断口处依旧观察到大量的粗晶区,但尺寸相较于工艺优化前有所减小。断口处的疏松区域在拉伸过程中很容易导致应力集中,成为试样发生断裂的裂纹源,对合金的力学性能不利,本研究通过工艺优化使铸件的缺陷大幅降低,提高铸件的综合力学性能。

## 3 结论

(1) 优化稀土镁合金框架铸造工艺设计。浇注系统设计为缝隙浇道与立筒同高度,并在缝隙浇道对应的铸件顶部设置冒口用于排气和集渣,两个大侧壁立筒之间放置冷铁调节凝固顺序,强化立筒对铸件侧壁的补缩效果。

(2) 稀土镁合金框架铸件铸造工艺优化后,其显微组织平均晶粒大小有所下降,平均晶粒尺寸从优化



(a) 工艺优化前 (b) 工艺优化后

图13 工艺优化前后稀土镁合金铸件拉伸断口形貌

Fig. 13 Tensile fracture morphologies of rare-earth magnesium alloy castings before and after process optimization

前的47.34  $\mu\text{m}$ 下降到35.99  $\mu\text{m}$ 。

(3) 工艺优化后设置的冒口对铸件具有良好的排气、集渣效果,使铸件内部缺陷减轻,合金力学性能提高。稀土镁合金框架铸件经过工艺优化后综合力学性能提高明显,其平均抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到265.33 MPa、169.33 MPa和7.17%。工艺优化后通过断口形貌观察可知,铸件内部疏松缺陷面积大

幅减小,粗晶区的平均尺寸也有所下降,断裂形式为脆性断裂。

(4) 工艺优化后铸件的内部质量大幅度提高,铸件内部疏松、气孔缺陷消失,在铸件底部观察到少量的夹渣缺陷,铸件合格率从工艺优化前的68.2%提高至93.5%,带来非常可观的经济效益。

#### 参考文献:

- [1] ZHAO Y, ZHANG D, FENG J, et al. Effect of Gd addition on the age hardening response of Mg-6Zn-1Mn alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (4): 8834-8841.
- [2] FERRAGUT R, MOIA F, FIORI F, et al. Small-angle X-ray scattering study of the early stages of precipitation in a Mg-Nd-Gd (EV31) alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 495 (2): 408-411.
- [3] SANKARAN K K, MISHRA R S. Magnesium alloys, metallurgy and design of alloys with hierarchical microstructures [M]. Netherlands: Elsevier, 2017.
- [4] GU K, ZENG X Q, CHEN B, et al. Effect of double aging on mechanical properties and microstructure of EV31A alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (9): 2606-2614.
- [5] 王孝国, 刘挺, 吴煜, 等. 基于ProCAST的悬梁铸造模拟及工艺优化 [J]. 农业技术与装备, 2023 (1): 12-15.
- [6] 孔维兵, 胡心平, 王洪飞, 等. 铝镁合金金属型拉伸试样铸造工艺的优化 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (1): 83-86.
- [7] 郑宗文, 吴海龙, 张志坤, 等. 镁合金铸造技术及其应用 [J]. 中国金属学报, 2022 (3): 76-79.

## Research on Optimization of Rare-Earth Magnesium Alloy Frame Casting Process

PAN Long<sup>1</sup>, WU Li-li<sup>2</sup>, ZHANG Yi-feng<sup>1</sup>, LI Meng<sup>1</sup>, GAO Wei-hong<sup>1</sup>, MAO Yi<sup>1</sup>, YE Feng<sup>1</sup>

(1. Xinjiang Technology (Jiangsu) Co., Ltd., Nantong City, Nantong 226100, Jiangsu, China; 2. Shanghai Aerospace Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600, China)

#### Abstract:

The ProCAST software and test verification method were used to optimize the casting process of rare-earth magnesium alloy frame, and the X-ray non-destructive testing, optical microscopy and other equipments were used to characterize the internal quality, microstructures and mechanical properties of the castings. The results showed that there were many defects such as slag inclusions, blowholes and porosities in castings due to insufficient feeding effect before process optimization. After the process optimization, by adjusting the gating and feeding system, the internal dispersed shrinkage and blowhole defects of castings basically disappeared, and the pass rate of castings increased from 68.2% to 93.5%. The microstructure observation showed that the as-cast microstructure was composed of  $\alpha$ -Mg matrix and the second phase distributed in a continuous network along the grain boundary. The grain sizes of the castings become smaller after the process optimization, reaching 35.99  $\mu\text{m}$  averagely. The mechanical property tests showed that after the process optimization, the average tensile strength and post-break elongation of the casting at room temperature in T6 state were 265.33 MPa and 7.17%, compared with the process before improvement, increasing by 23.03% and 26.46%, respectively.

#### Key words:

rare-earth magnesium alloy; casting process; ProCAST; internal quality; microstructure; mechanical property