

# WE43 镁合金壳体熔模铸造工艺数值模拟与试验研究

刘清<sup>1,2</sup>, 闫宏<sup>2</sup>, 单智伟<sup>1</sup>, 陈荣石<sup>2</sup>, 韩恩厚<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 陕西西安 710049;  
2. 中国科学院金属研究所镁合金及其应用研究组, 辽宁沈阳 110016)

**摘要:** 通过ProCAST软件对WE43镁合金壳体铸件的充型、凝固过程及缩松、缩孔缺陷分布进行了数值模拟, 优化了铸造工艺, 进行了熔模铸造试验, 并对铸件棱柱和侧壁部位进行了金相组织分析和室温拉伸力学性能测试。结果表明: 铸件充型完整, 无明显缩松、缩孔缺陷。固溶处理后, 合金抗拉强度和伸长率明显提高; 时效态合金屈服强度和抗拉强度显著提高, 伸长率降低。铸件侧壁处合金晶粒尺寸小于棱柱处, 力学性能较高。

**关键词:** WE43镁合金; 数值模拟; 熔模铸造; 金相组织; 力学性能

作者简介:

刘清(1994-), 男, 硕士生, 研究方向为镁合金熔模铸造工艺。E-mail: liuqing\_yx@foxmail.com

通讯作者:

闫宏, 男, 副研究员。

E-mail: hyan@imr.ac.cn

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

11-1273-05

基金项目:

国家重点研发计划(2016YFB0301104); 国家自然科学基金(51601193; 51531002; 51701218)。

收稿日期:

2019-04-12 收到初稿,

2019-06-02 收到修订稿。

WE43是目前发展最为成功的商用高强耐热铸造镁合金之一, 能够在250 °C下长期服役<sup>[1-2]</sup>, 主要应用在航空飞行器发动机齿轮箱、变速器壳体和F1赛车引擎活塞中。随着我国航空飞行器和汽车工业的发展, 其相关部件正向轻量化、薄壁化、复杂化和结构功能一体化方向发展<sup>[3-4]</sup>, 对性能要求也更高, 使得部件的铸造难度大幅增加。熔模铸造能够生产复杂结构件, 同时具有金属利用率高、铸件尺寸精度高、表面粗糙度小、合金材料不受限制等优点, 是航空铸件的主要生产工艺之一<sup>[5-6]</sup>。目前, WE43镁合金铸件基本采用砂型铸造方式生产, 关于其熔模铸造工艺研究甚少。

本研究以航空飞行器中WE43镁合金壳体铸件为研究对象, 通过ProCAST软件对熔模铸造的充型、凝固过程及缩松、缩孔缺陷分布进行了数值模拟, 并进行熔模铸造试验, 解剖、检测了铸件不同部位的显微组织和力学性能。

## 1 铸件结构分析及浇注系统设计

根据零件结构及技术要求, 考虑铸造收缩率和机械加工, 设计了铸件结构如图1, 其外形轮廓类似一个210 mm × 210 mm × 210 mm的桶状体, 内部空腔直径为180 mm。侧壁由三个厚度为6 mm的曲面和一个厚度为16 mm的平面构成。四根侧棱柱的壁厚为32 mm。可以看出, 零件各部位形状、壁厚相差较大, 铸造时各部位充型过程和冷却速度可能存在较大差异。

镁合金金属液热容量小、导热快、易氧化, 浇注时易产生氧化夹杂。并且其凝固温度区间宽、体收缩率大, 容易引起缩孔和缩松缺陷<sup>[7]</sup>。为保证铸件的平稳充型和有效补缩, 设计了如图2所示的底注式开放型浇注系统。为使金属液流程最短, 同时保证流量分配均匀, 将直浇道置于铸件中心, 底部设置4个横浇道及8个内浇道。直浇道设计锥度为2.35/100, 以保证金属液呈充满式流动形态, 其下端直径为30 mm。浇注系统类型为开放式, 直浇道、横浇道和内浇道的截面积比值为1:2:4。在铸件四根侧棱柱顶部设置四个Φ30 mm × 60 mm的冒口, 以保证金属液的充分补缩。

## 2 铸造过程模拟与分析

利用UG软件建立铸件三维模型, 之后导入ProCAST软件中进行铸造过程模拟。

通过软件中的Visual-Mesh模块添加厚度为5 mm的熔模型壳,材料为氧化铝,并对三维模型进行2D和3D网格划分。使用Visual-Cast模块,设置合金-铸型传热系数为 $750 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,充型时间为10 s,浇注温度 $770 \text{ }^\circ\text{C}$ ,型壳预热温度 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,型壳表面散热条件为空冷,并运行计算。使用Visual-Viewer模块查看和分析计算模拟结果。

## 2.1 充型过程模拟

图3为铸件充型过程的温度场分布。镁液在重力作用下首先充满直浇道和横浇道,随后通过横浇道上的8个内浇道向上充型。横浇道远端流体流速快于近端流体,在外侧的4个内浇道内金属液上升较快。在2.7 s时,所有内浇道均被镁液充满,开始进入壳体铸件型腔,棱柱和侧壁处液面同时上升,充型平稳。7.8 s时,83%的铸件型腔已被充型,底部及侧壁下部镁液温度开始下降。9.4 s时,整个型壳完全充满,充型完成。计算模拟结果表明,该浇注系统能够保证镁液在型腔内自下而上的平稳充型,同时镁液流动顺畅,铸件充型完整。

## 2.2 凝固过程模拟

图4为铸件凝固过程固相分数计算模拟结果。15.4 s时,铸件侧面薄壁处最先凝固,随着时间增加,曲面侧壁中心部位固相分数显著提高,凝固快速进

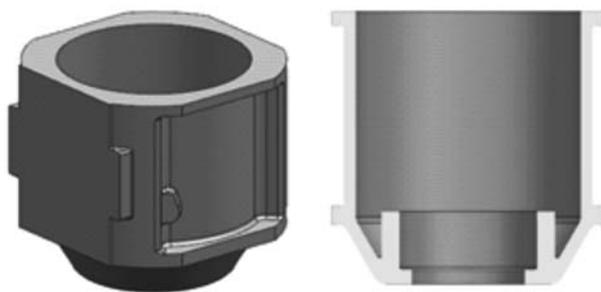


图1 铸件结构三维示意图

Fig. 1 3D schematic diagram of casting

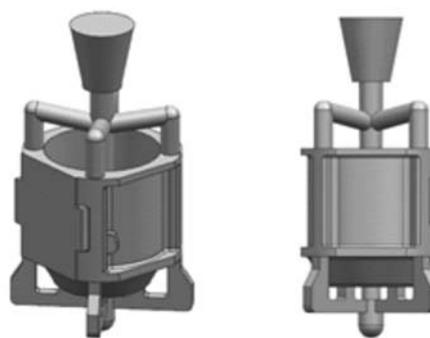


图2 熔模铸造浇注系统三维示意图

Fig. 2 3D schematic diagram of investment casting housing gating system

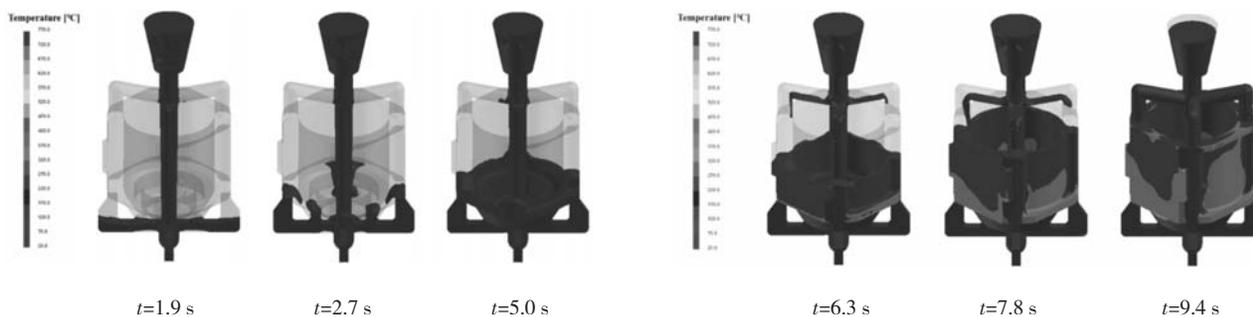


图3 铸件熔模铸造充型过程

Fig. 3 Filling process of investment casting housing

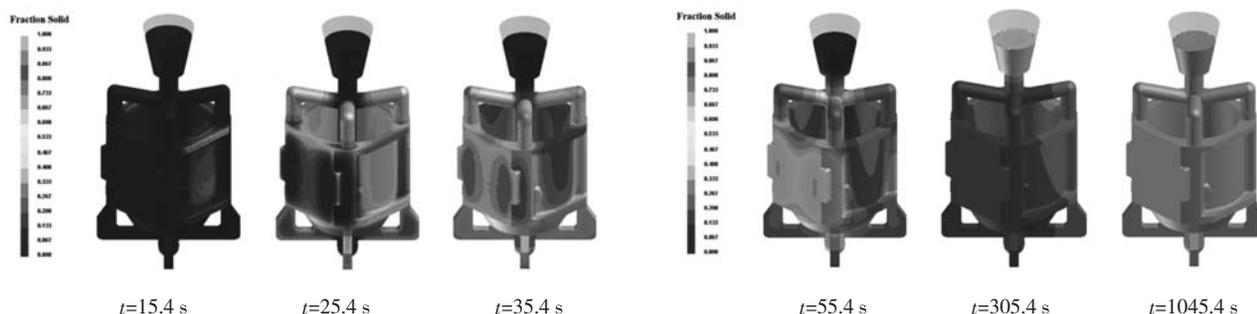


图4 铸件熔模铸造凝固过程

Fig. 4 Solidification process of investment casting housing

行, 25.4 s时侧面薄壁处固相分数已超过50%。由于铸件平面侧壁处厚度为薄壁的两倍以上, 所以冷却速度慢, 固相分数较低。铸件棱柱位置壁厚更大, 凝固缓慢, 可以作为冒口通道对侧壁进行补缩。55.4 s时, 侧面薄壁处固相分数已超过80%, 而厚壁处固相分数仅为50%左右。305.4 s时, 铸件主体各个部位固相分数均已超过80%; 1 045.4 s时, 铸件完全凝固, 固相分数达到100%。模拟结果表明, 铸件侧面薄壁处最先开始凝固, 棱柱和冒口凝固较慢, 保证了对侧壁的充分补缩。但是由于平面侧壁的壁厚大, 其凝固时间长于上方冒口, 可能会造成该壁的补缩困难。

### 2.3 缩松、缩孔缺陷预测

图5为依据ProCAST软件中POROS=1的Porosity模型和Niyama判据分别计算模拟出的缩松、缩孔分布图。两者模拟结果相近, 缩松、缩孔缺陷主要集中在浇口杯顶部、冒口及浇道中。同时, 在铸件平面侧壁内存在较大的缩松、缩孔缺陷, 原因在于该处冷却速度慢, 导致金属液补缩困难, 因此实际铸造时需要对侧壁采取喷水激冷方式加速其冷却凝固。

## 3 熔模铸造试验

采用10 t压蜡机压制蜡模, 组焊浇注系统, 并对组焊后的模组进行检查、矫形、修补, 保证尺寸的精确性。型壳的面层和背层涂料均使用硅溶胶粘结剂+氧化铝粉, 挂砂材料为氧化铝粉, 共涂挂5层。待型壳完全干燥硬化后, 在脱蜡釜中采用蒸汽脱蜡, 随后在1 100 °C的焙烧炉中焙烧30 min。采用井式电阻炉熔炼合金, 所用原材料为: 纯镁锭 ( $Mg > 99.95\%$ )、纯钇 ( $Y > 99\%$ )、纯钆 ( $Gd > 99\%$ )、纯钆 ( $Nd > 99\%$ ) 和Mg-30wt.%Zr中间合金。试验采取的浇注温度为770 °C, 型壳预热温度为300 °C。铸件的化学成分通过全谱直读等离子体发射光谱仪 (ICP-AES) 进行测定, 如表1所示。

通过线切割从铸件的侧壁和棱柱部位切取本体样品, 检测微观组织和力学性能, 铸件实物和取样位置见图6。合金热处理工艺按照美国材料试验协会标准ASTM B 661—2003执行, 即固溶处理工艺为525 °C × 8 h、空冷, 时效处理工艺为250 °C × 16 h。金相组织通过Axio Observer Z1光学显微镜观察, 所用浸蚀剂为4% (vol.%) 的硝酸酒精溶液。通过SANS-CMT5105型万能试验机进行室温拉伸力学性能测试, 应变速率为 $1 \times 10^{-3} s^{-1}$ , 每种样品测试3次。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 X射线无损检测

外观目测, 铸件充型完整, 表面光洁, 无浇不

足、冷隔等缺陷。铸件各个部位X射线无损检测结果表明, 铸件内部质量优良, 未发现明显缩松、缩孔缺陷, 说明该浇注系统和工艺参数的设计较为合理。

### 4.2 金相组织

图7为铸件中较薄的侧壁和较厚的棱柱部位不同热处理状态下的金相组织。铸态合金中晶粒均为等轴晶, 在晶界处分布着不连续的网状共晶相, 该相化学组成为 $Mg_{24}Y_5$ 和 $Mg_{41}Nd_5$ <sup>[8]</sup>。通过截线法测得侧壁和棱柱处晶粒尺寸分别为40 μm和48 μm, 与WE43砂型铸件晶粒尺寸相当<sup>[9]</sup>。棱柱处由于冷却速度慢, 过冷度小, 形核率低, 导致合金晶粒尺寸偏大<sup>[10]</sup>。固溶处理后, 晶界处的共晶相基本溶解到 $\alpha$ -Mg基体中, 同时, 侧壁和棱柱处的晶粒分别长大至68 μm和72 μm。时效处理后, 晶粒内析出大量细小的第二相, 出现明显的黑色衬度, 据报道250 °C下WE43合金峰值时效态主要析出相为 $\beta'$ 和 $\beta$ 相<sup>[11]</sup>。与固溶态相比, 晶粒无明显长大, 测得侧壁和棱柱处的晶粒尺寸分别为69 μm和72 μm。

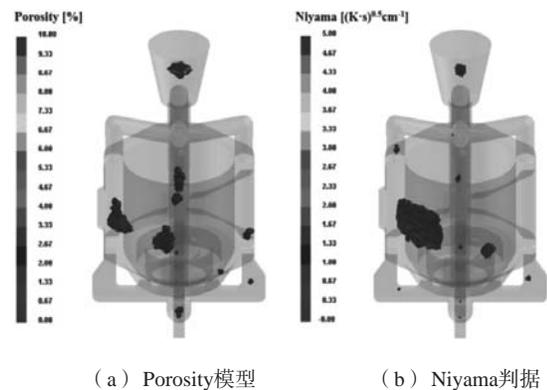
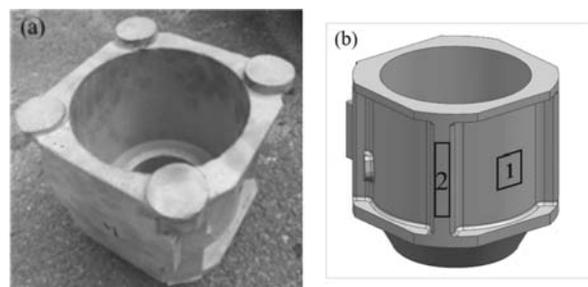


图5 铸件缩松、缩孔缺陷分布  
Fig. 5 Distribution of shrinkage porosity and cavity defects

表1 铸件化学成分

Table 1 Chemical composition of casting					$w_B / \%$
Y	Nd	Gd	Zr	Mg	
3.67	2.17	1.12	0.50	余量	



(a) 实物图 (b) 取样位置

图6 铸件实物图和取样位置

Fig. 6 Casting and sampling position

### 4.3 力学性能

铸件不同部位样品铸态、T4态和T6态的室温拉伸力学性能如表2所示。对于同一部位，铸态时由于合金中存在大量不规则的晶界共晶相，成为微裂纹的起源，导致塑性和强度较低。固溶处理后，晶界共晶相溶解到基体中，起固溶强化作用，同时由于共晶相的消失，晶粒之间得以更好地协调变形，裂纹不易萌生，使得合金抗拉强度提高约25 MPa，伸长率约为铸态时的3倍。但是固溶态合金晶粒有所长大，晶界对位

错滑移的阻碍作用降低，导致屈服强度无明显提高。时效态合金由于晶内析出细小弥散分布的第二相，表现出明显的析出强化效果，屈服强度和抗拉强度均提高约60 MPa。但第二相阻碍了位错运动，导致应力集中从而萌生微裂纹，使得合金伸长率下降，仅为1%左右。棱柱和侧壁处合金时效态的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为198.3 MPa、224.8 MPa、0.6%和215.5 MPa、254.7 MPa和0.8%。

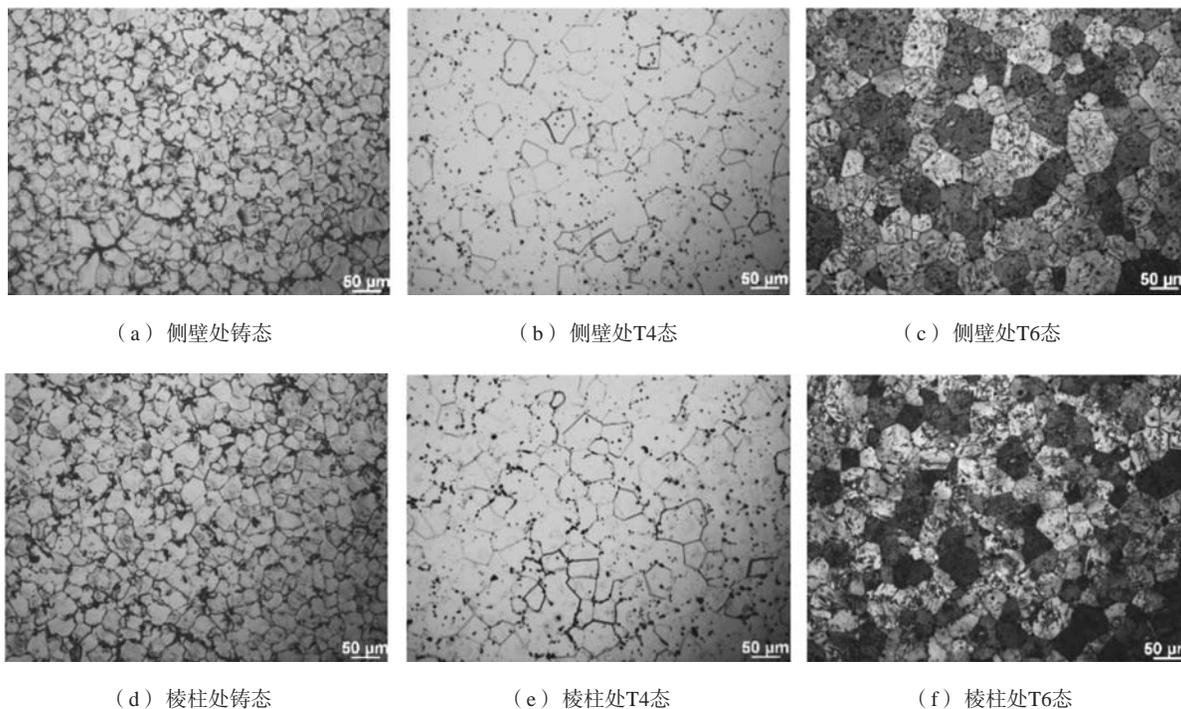


图7 铸件金相组织

Fig. 7 Metallographic structure of casting

铸件不同部位力学性能存在差异，棱柱处合金屈服强度和抗拉强度分别比侧壁处低约10 MPa和25 MPa，伸长率仅为侧壁处的一半。这一方面是由于棱柱处晶粒尺寸较大，晶界的强化作用减弱，使得力学性能降低。另一方面，棱柱部位凝固速度相对较慢，温度梯度小，产生缩松、缩孔缺陷的倾向大<sup>[12]</sup>，所以内部可能存在不明显的缩松、缩孔缺陷，受力时产生应力集中，成为裂纹源，使合金强度和塑性均降低<sup>[13]</sup>。

## 5 结论

(1) 通过ProCAST软件对WE43镁合金壳体铸件熔模铸造的充型、凝固过程及缩松、缩孔缺陷分布进行了模拟，表明采用浇注温度770℃、型壳预热温度300℃、充型时间10 s时铸件充型平稳，实现了顺序凝固。

(2) 熔模铸造试验结果表明，铸件外部充型完整，表面光洁，无浇不足、冷隔等缺陷，内部无明显

缩松、缩孔缺陷。

(3) 固溶处理后，合金抗拉强度和伸长率明显提高，屈服强度无明显变化；时效处理后，合金屈服强度和抗拉强度显著提高，伸长率降低；铸件侧壁处冷却速度快于棱柱处，晶粒尺寸较小，力学性能高于棱柱处。

表2 铸件本体室温拉伸力学性能  
Table 2 Tensile mechanical properties at room temperature of casting

取样位置	状态	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
棱柱	铸态	136.5	172.6	2.1
	T4	137.2	197.7	5.9
	T6	198.3	224.8	0.6
侧壁	铸态	148.4	196.8	4.2
	T4	147.1	221.8	11.5
	T6	215.5	254.7	0.8

**参考文献:**

- [1] 胡文鑫, 杨正华, 陈国华, 等. 稀土元素对镁合金组织结构与性能影响的研究进展 [J]. 稀土, 2014, 35 (5): 89-95.
- [2] 邢清源, 孟令刚, 杨守杰, 等. 新型稀土镁合金的研究进展 [J]. 铸造, 2018, 67 (4): 317-322, 326.
- [3] 樊振中, 徐秀丽, 王玉灵, 等. 熔模精密铸造技术在航空工业的应用及发展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (3): 285-289.
- [4] 樊振中, 齐向军, 施晓雪, 等. ZL114A支架凝固成形曲面结构控制工艺研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (9): 919-923.
- [5] PATTNAIK S, KARUNAKAR D B, JHA P K. Developments in investment casting process: a review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (11): 2332-2348.
- [6] CHEN Y F, XIAO S L, TIAN J, et al. Improvement in collapsibility of ZrO<sub>2</sub> ceramic mould for investment casting of TiAl alloys [J]. China Foundry, 2011, 8 (1): 9-13.
- [7] 吴国华, 张亮, 丁文江. 镁合金液态精密成型研究进展 [J]. 上海电力学院学报, 2015, 31 (4): 299-316.
- [8] LI H Z, LV F, LIANG X P, et al. Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of a cast Mg-Y-Nd-Zr alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 667: 409-416.
- [9] 刘志杰, 吴国华, 刘文才, 等. 固溶处理对Mg-4Y-2Nd-1Gd-0.4Zr镁合金组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34 (3): 60-66.
- [10] 杨亚琴, 王金娥. 铸造冷却速度对AZ91镁合金凝固组织与性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (3): 116-118.
- [11] KANG Y H, YAN H, CHEN R S. Effects of heat treatment on the precipitates and mechanical properties of sand-cast Mg-4Y-2.3Nd-1Gd-0.6Zr magnesium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 645: 361-368.
- [12] 祖方道. 铸件成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 305-307.
- [13] 王狂飞, 张锦志, 李早, 等. 显微缩松缺陷对ZL114A热处理合金力学性能的影响 [J]. 铸造, 2018, 67 (8): 719-723.

---

## Numerical Simulation and Experimental Research on Investment Casting of WE43 Magnesium Alloy Housing Casting

LIU Qing<sup>1</sup>, YAN Hong<sup>2</sup>, SHAN Zhi-wei<sup>1</sup>, CHEN Rong-shi<sup>2</sup>, HAN En-hou<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;  
2. The Group of Magnesium Alloys and Their Applications, Institute of Metal Research Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

**Abstract:**

The filling process, solidification process, dispersed shrinkage and shrinkage defects distribution of WE43 magnesium alloy housing casting were numerically simulated by ProCAST software. The casting process was optimized and the investment casting experiment was conducted. The metallographic structure analysis and tensile mechanical properties testing at room temperature of the prism and side wall parts of the casting were carried out. The results show that the casting was completely filled and had no obvious shrinkage defects; After the solution treatment, ultimate tensile strength and elongation of alloy were increased. After aging treatment, the yield tensile strength and ultimate tensile strength of alloy were significantly improved, while the elongation was sharply decreased. The grain size of the alloy at the sidewall was smaller and the mechanical properties were higher than that at the prism.

**Key words:**

WE43 magnesium alloy; numerical simulation; investment casting; metallographic structure; mechanical properties