

铸造工艺对VW63Z镁合金圆盘铸件的内部质量、显微组织及力学性能的影响

李蒙¹, 古金涛¹, 潘龙¹, 褚杰¹, 陈惠风², 张旭亮¹, 邹文兵¹, 李宝辉²

(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软件仿真模拟, 光学显微镜观察和室温拉伸试验等方法研究了铸造工艺对VW63Z镁合金圆盘铸件的内部质量、显微组织和力学性能的影响。结果显示: 重力铸造的圆盘铸件上存在疏松和夹渣缺陷, 反重力铸造的圆盘铸件上没有夹渣、疏松以及微裂纹等铸造缺陷。显微组织分析结果显示: 重力铸造的圆盘铸件显微组织不均匀, 平均晶粒尺寸达到95 μm ; 反重力铸造的圆盘铸件显微组织比较均匀, 平均晶粒尺寸仅为70 μm 。力学性能测试结果显示: 反重力浇注的圆盘铸件的力学性能更高, 室温条件下的本体平均抗拉强度、平均屈服强度和断后伸长率分别为315.75 MPa、215.50 MPa和6.90%, 160 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的本体平均抗拉强度、平均屈服强度和断后伸长率分别为295.75 MPa、196.75 MPa和9.85%。

关键词: VW63Z; 镁合金; 显微组织; 力学性能; 重力铸造; 反重力铸造

由于镁合金具有密度小、比强度高和易于切削加工等优点, 已经广泛应用于航空航天、汽车、兵器等重点领域以及电子和笔记本电脑等民用领域^[1-4]。稀土镁合金铸件因具有较高的室温及高温力学性能, 能够实现材料和结构双重减重, 在航空航天装备上的应用越来越广泛。圆盘是某装备的重要结构件, 整体轮廓尺寸为 $\Phi 1\ 000\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$, 薄壁位置厚度为6 mm, 加强筋位置厚度为10 mm, 零件轮廓尺寸较大, 壁厚较薄, 加强筋高度较高, 最高位置约为70 mm(图1)。具体要求如下: ①采用VW63Z稀土镁合金材料。②要求为I类铸件, 需100%进行X光检测。③本体室温力学性能要求: $R_m \geq 300\ \text{MPa}$, $R_{p0.2} \geq 200\ \text{MPa}$, $A \geq 4\%$, 本体160 $^{\circ}\text{C}$ 力学性能: $R_m \geq 280\ \text{MPa}$, $R_{p0.2} \geq 190\ \text{MPa}$, $A \geq 5\%$ 。前期采用重力铸造工艺研制的圆盘总是存在疏松及氧化夹杂等铸造缺陷, 导致铸件力学性能不符合要求。基于此, 本文开展了铸造工艺对圆盘铸件的内部质量、显微组织及力学性能影响的研究。

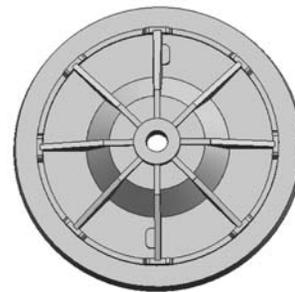


图1 圆盘三维结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the three-dimensional structure of the disk

作者简介:

李蒙(1987-), 男, 工程师, 主要研究方向为航空航天轻合金材料与精密成形技术。电话: 13506204632, E-mail: 13506204632@163.com

中图分类号: TG146.2;

TG113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

06-0768-06

收稿日期:

2023-03-23 收到初稿,

2023-12-12 收到修订稿。

1 试验方法和步骤

VW63Z稀土镁合金圆盘铸件制备工艺流程如下: 砂型制备→熔炼→浇注→后处理→热处理→检测。熔炼、浇注和热处理是比较重要的工序。VW63Z稀土镁合金的熔炼工艺过程如下: ①以纯Mg、Mg-20Y、Mg-20Gd和Mg-30Zr中间合金为原材料; ②首先将纯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, 熔化量为200 kg, 采用四氯化乙烷和氩气混合气体进行保护; ③熔体温度升至750 $^{\circ}\text{C}$, 加入纯Mg-20Y、Mg-20Gd中间合金, 搅拌5 min; ④待熔体升至850 $^{\circ}\text{C}$ 后, 加入Mg-30Zr中

间合金，待中间合金熔化后进行充分搅拌使得合金成分均匀；⑤浇注试验。当熔体温度降至710 ℃时，进行浇注。从铸件本体上、中、下取样测试化学成分，测试结果见表1。

表1 铸件的化学成分
Table 1 Chemical composition of the casting $w_B/\%$

项目	Gd	Y	Zr	Mg
设计成分	6	3	0.5	余量
上	6.162	3.398	0.42	余量
中	6.168	3.492	0.43	余量
下	6.185	3.592	0.44	余量

VW63Z镁合金圆盘铸件采用砂型重力铸造和反重力铸造两种工艺方案，具体如下：重力铸造方案的浇冒口系统和激冷系统与反重力铸造方案的基本一致，主要区别就是把直浇道改为两侧的重力浇注直浇道，同时每个加强筋上方设置冒口，提高加强筋的补缩效果（图2）。反重力铸造方案将金属盘的大平面朝上，设计“田”字形横浇道，内浇道从金属盘的加强筋引入，保证加强筋位置的补缩。为最大程度发挥浇注系统对铸件的补缩效果，在内浇口间设置20 mm厚冷铁，从而实现从远离内浇道位置到靠近内浇道位置的顺序凝固，提高铸件的内部质量。同时铸件的中心孔



图2 重力铸造工艺方案
Fig. 2 The gravity casting process plan

位置比较厚大，因此在该位置设置30 mm冷铁，保证该部位的内部质量（图3）。



图3 反重力铸造工艺方案
Fig. 3 The anti-gravity casting process plan

采用ProCAST软件对设计的铸造工艺方案进行仿真分析与模拟，对铸造工艺方案进行优化，然后进行浇注工艺试验。采用ProCAST软件仿真模拟时，材料的物性参数设置如下：密度1.82 g/cm³、热扩散率2.856 0 × 10⁻⁵ m²/s，平均线膨胀系数25.3 × 10⁻⁶/℃、弹性模量45 GPa、泊松比0.35，切边模量16.20 GPa、比热容0.98 J/(g·K)、热导率为9.476 W/(m·K)。

采用规格为Φ1 000 mm × 1 500 mm的马弗炉对VW63Z镁合金圆盘铸件进行固溶处理，固溶处理温度为520 ℃，固溶时间30 h，冷却方式为空冷；固溶处理之后，在规格为1 000 mm × 800 mm × 500 mm的鼓风机炉中对圆盘铸件进行时效处理，时效温度为225 ℃，时效时间为30 h，冷却方式为空冷。最后对铸件的内部质量、显微组织和力学性能进行分析。

2 试验结果

2.1 仿真分析与模拟

2.1.1 重力浇注

从充型温度场变化结果（图4）显示：重力浇注过程中，由于铸件直径方向尺寸较大，高度方向尺寸

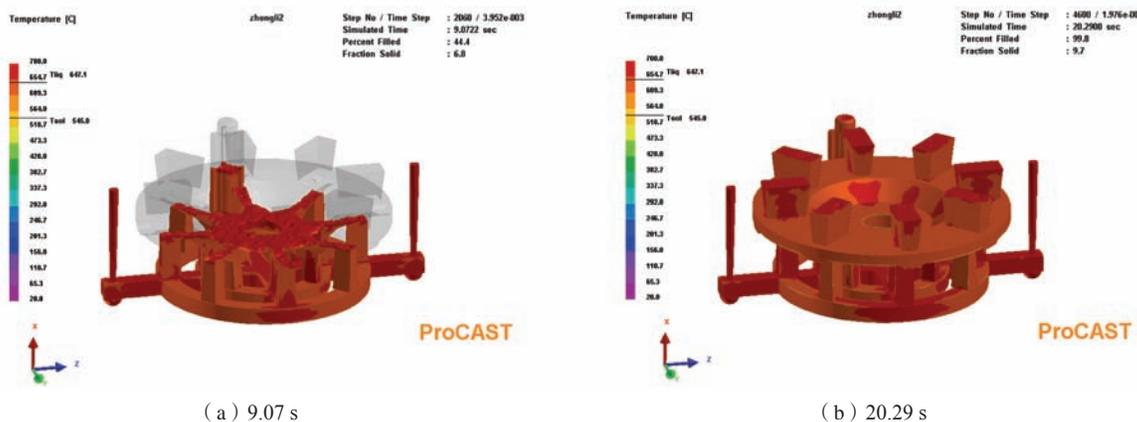


图4 充型温度场
Fig. 4 The filling temperature field

较小, 充型前期熔体从高处落下, 金属液刚进入型腔时, 运动比较激烈, 流动不太平稳; 充型中后期金属液沿着壁面缓慢上升。从凝固温度场变化可知(图5): 铸件从远离内浇道和冒口的部位向靠近内浇道和冒口的部位呈现顺序凝固, 铸件的加强筋部位最后凝固, 凝固时间早于内浇道和冒口的凝固时间, 该部位在凝固后期有来自冒口充足的合金液进行补缩。在内

浇道和冒口附近的温度约为 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加强筋位置温度最高, 达到 $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 远离该区域的温度较低, 在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下将优先快速凝固。对其铸造缺陷预测分析模拟如图6所示, 铸造缺陷以小区域分布于内浇道和冒口处, 加强筋位置也出现不少缺陷。这些区域温度较高, 相对较后凝固, 熔体补缩性下降, 并且最后凝固处往往也是杂质、缺陷等聚集源。

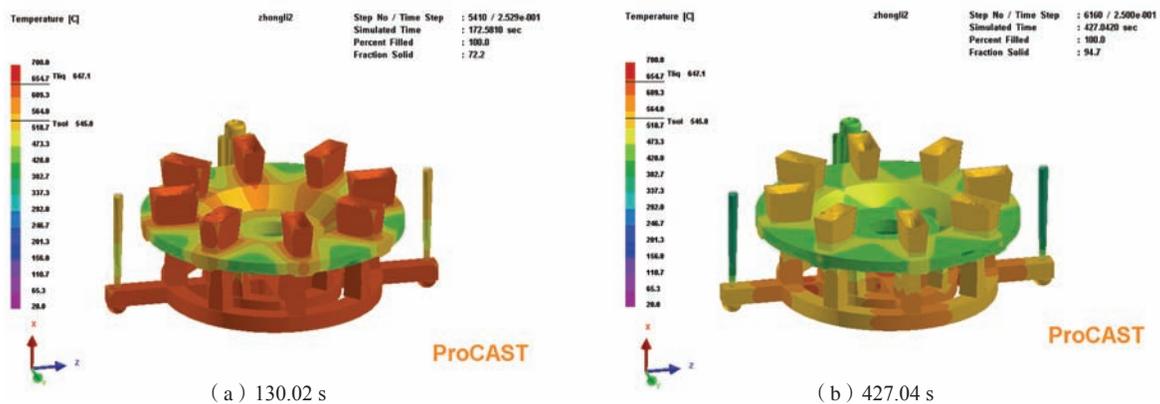


图5 凝固温度场

Fig. 5 The solidification temperature field

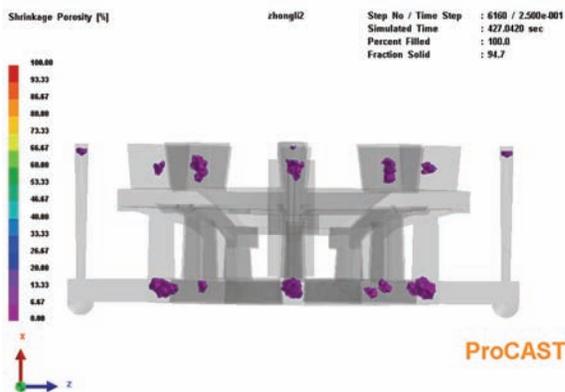


图6 铸造缺陷预测

Fig. 6 Prediction of casting defects

2.1.2 反重力浇注

由于镁合金熔体密度较轻, 夹杂物的密度较重, 采用反重力浇注时熔体从铸型底部自下向上进入型腔充型, 过程平稳, 熔体流动方向和气体排出方向一致, 可以有效减少铸件内部的夹杂物和气孔的形成, 并且熔体在可控压力下充型, 有利于形成形状复杂、轮廓清晰的薄壁铸件, 适合于大型复杂薄壁铸件的生产, 生产效率和金属利用率均得到提高, 所以本文设计了反重力铸造工艺。从充型过程温度场变化可知: 熔体充型速度较慢, 流动平稳, 出现卷气、氧化夹渣等缺陷倾向减小(图7)。从凝固温度场变化和铸件各部位最终的凝固时间看, 铸件的加强筋上方部位最后

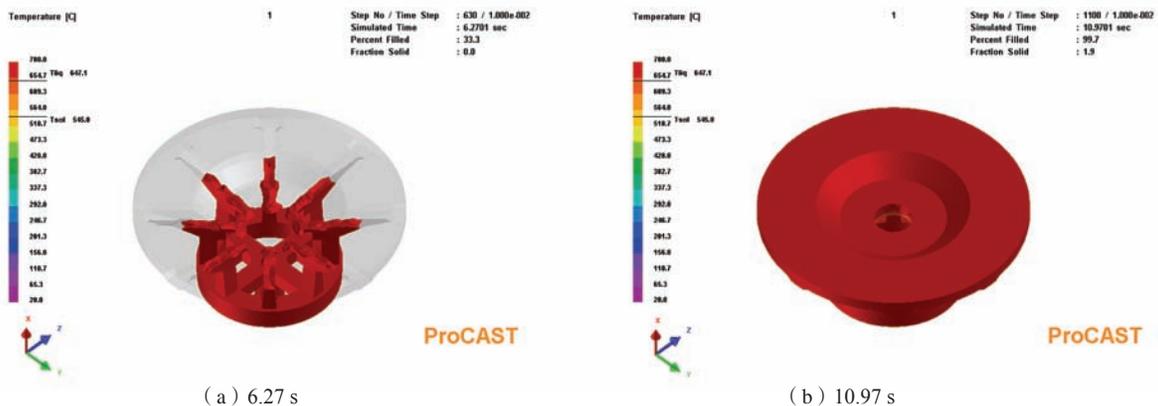


图7 充型温度场

Fig. 7 The filling temperature field

凝固，导致该部位在凝固后期补缩不足，容易形成疏松类缺陷。铸件凝固两分钟后铸型温度整体偏高，在550℃以上，凝固进行到4 min后，铸件整体温度下降到500℃以下，其中以加强筋位置温度最高（图8）。缺陷预测结果也表明：在加强筋部位容易形成疏松缺陷（图9）。通过对铸造工艺进行优化，优化后的工艺方案如下：在径向增加一圈内浇道，增加补缩，在加强筋上方增加冒口，通过冒口将缺陷引入冒口中（图10），模拟结果显示：铸造缺陷主要位于冒口和浇注

系统中（图11），有效提高了铸件的质量。

2.2 试验结果

2.2.1 铸件内部质量

圆盘铸件经过100%机械加工后发现：重力铸造的圆盘铸件表面有肉眼可见的气孔和氧化夹杂缺陷（图12a）；而反重力浇注的圆盘铸件表面没有气孔和氧化夹杂等肉眼可见的铸造缺陷（图12b）。经X光检测，重力浇注的圆盘铸件存在疏松、夹渣缺陷（图13），

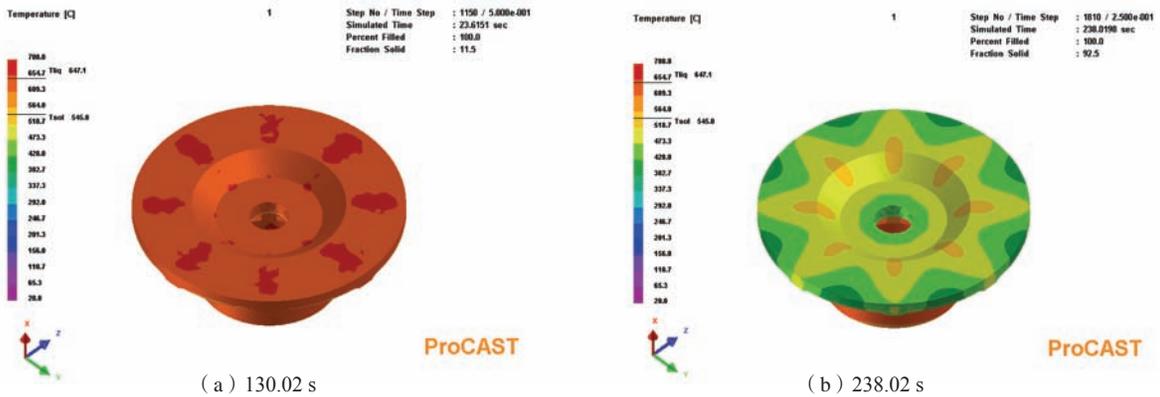


图8 凝固温度场

Fig. 8 The solidification temperature field

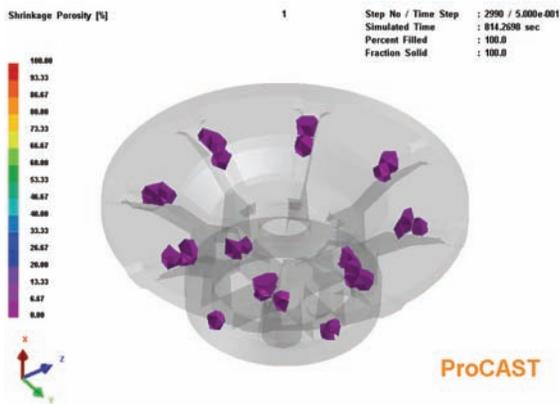


图9 铸造缺陷预测

Fig. 9 Prediction of casting defects

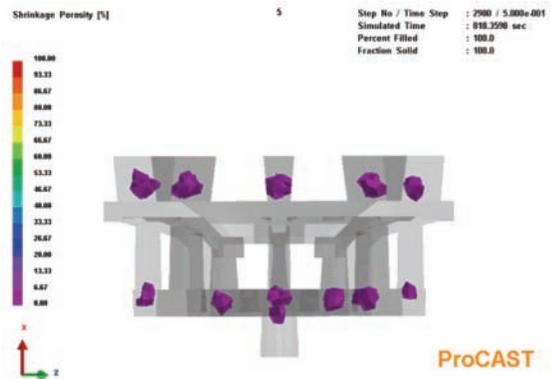


图11 优化工艺方案的缺陷预测

Fig. 11 Defect prediction for optimizing process plans

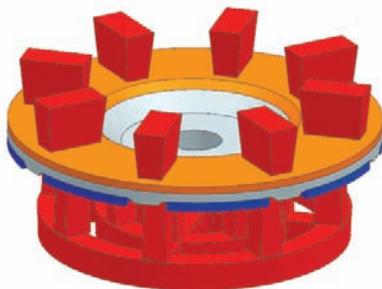
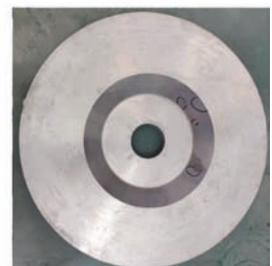


图10 优化后的反重力铸造工艺方案

Fig. 10 The optimized Counter gravity Casting Process Plans



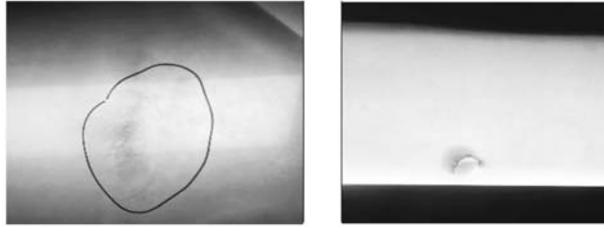
(a) 重力铸造



(b) 反重力铸造

图12 铸件实物

Fig. 12 Physical object of casting



(a) 疏松缺陷 (b) 夹渣缺陷

图13 重力铸造的圆盘铸件X射线检测结果

Fig. 13 X-ray inspection results of the disc casting by gravity casting

而反重力铸造的圆盘铸件内部没有疏松、夹渣和微裂纹等铸造缺陷(图14)。这主要是因为采用重力浇注时,液态金属进入型腔后,从高处落下,对铸型冲击大,容易导致液态金属的飞溅、氧化和卷入气体,形成氧化夹渣和气孔缺陷;然而采用反重力浇注时,液态金属从下部平稳的充型型腔,不易产生冲击,从而有效避免了飞溅、氧化和卷入气体,具有良好的挡渣作用与排除型腔里的气体,铸造缺陷明显减少。

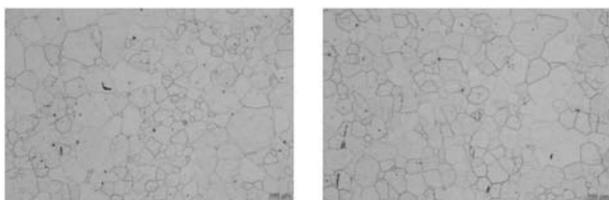


图14 反重力铸造的圆盘铸件X射线检测结果

Fig. 14 X-ray inspection results of the disc casting by anti-gravity casting

2.2.2 显微组织

显微组织分析结果见图15。重力浇注后的圆盘铸件组织均匀性差,平均晶粒尺寸达到95 μm ,反重力浇注后的圆盘铸件的显微组织比较,平均晶粒尺寸仅为70 μm 。



(a) 重力浇注 (b) 反重力浇注

图15 显微组织

Fig. 15 Microstructure

2.3 力学性能

铸件本体力学性能测试结果见表2和表3。从表2可知,重力浇注的圆盘铸件在室温条件下的本体平均抗拉强度、平均屈服强度和断后伸长率分别为239.50 MPa、183 MPa和2.88%;在160 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的本体平均抗拉强度、平均屈服强度和断后伸长率分别为220.5 MPa、178.75 MPa和3.25%。从表3可知:反重力浇注的圆盘铸件在室温条件下的本体平均抗拉强度、平均屈服强度和断后伸长率分别为315.75 MPa、215.50 MPa和6.90%;在160 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的本体平均抗拉强度、平均屈服强度和断后伸长率分别为295.75 MPa、196.75 MPa和9.85%。通过以上对比可知:反重力浇注的圆盘铸件本体力学性能显著高于重力浇注的圆盘铸件本体室温力学性能,主要原因反重力浇注的铸件内部不存在铸造缺陷,同时平均晶粒尺寸较为细小均匀。图16重力浇注的圆盘铸件本体取样拉伸后的断口表面,断口表面主要是氧化夹杂、疏松和溶剂夹杂。

表2 重力浇注的铸件本体室温力学性能

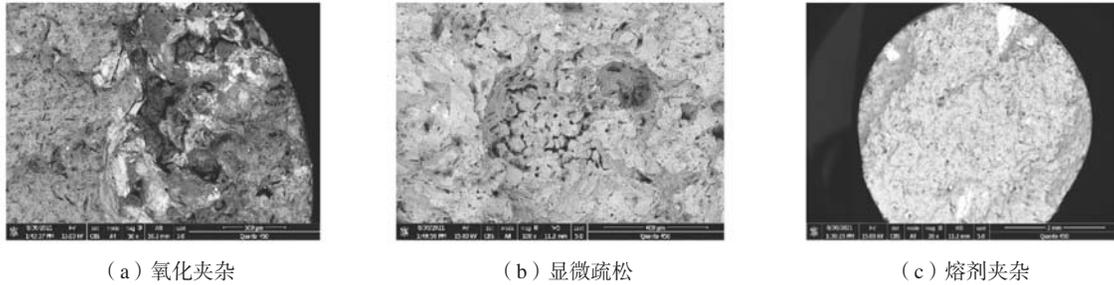
Table 2 Mechanical properties at room temperature of casting body by gravity cast

温度	试样编号	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$
室温	1	240	182	1.0
	2	210	165	5.5
	3	242	186	2.0
	4	266	199	3.0
	平均值	239.50 ± 19.87	183 ± 12.14	2.88 ± 1.67
160 $^{\circ}\text{C}$	1	225	174	4.0
	2	217	180	4.5
	3	232	192	2.0
	4	208	169	2.5
	平均值	220.5 ± 8.96	178.75 ± 8.58	3.25 ± 1.03

表3 反重力铸造的铸件本体室温力学性能

Table 3 Mechanical properties at room temperature of casting body fabricated by counter gravity cast

温度	试样编号	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$
室温	1	315	210	7.2
	2	320	207	7.2
	3	316	200	6.8
	4	312	245	6.4
	平均值	315.75 ± 2.86	215.50 ± 17.41	6.9 ± 0.33
160 $^{\circ}\text{C}$	1	303	203	9.5
	2	294	195	10.2
	3	289	192	8.4
	4	297	197	11.3
	平均值	295.75 ± 5.07	196.75 ± 4.02	9.85 ± 1.05



(a) 氧化夹杂

(b) 显微疏松

(c) 熔剂夹杂

图16 断口分析

Fig. 16 The fracture analysis

3 结束语

(1) 重力铸造的圆盘铸件上存在疏松和夹渣缺陷,反重力铸造的圆盘铸件上没有夹渣、疏松以及微裂纹等铸造缺陷。

(2) 重力铸造的圆盘铸件显微组织不均匀,平均晶粒尺寸达到90 μm ,反重力铸造的圆盘铸件显微组织更加均匀,平均晶粒尺寸达到70 μm 。

(3) 重力浇注的圆盘铸件在室温条件下的本体平均抗拉强度、平均屈服强度和断后伸长率分别为

239.50 MPa、183 MPa和2.88%;在160 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的本体平均抗拉强度、平均屈服强度和断后伸长率分别为220.5 MPa、178.75 MPa和3.25%;反重力浇注的圆盘铸件在室温条件下的本体平均抗拉强度、平均屈服强度和断后伸长率分别为315.75 MPa、215.50 MPa和6.90%;在160 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的本体平均抗拉强度、平均屈服强度和断后伸长率分别为295.75 MPa、196.75 MPa和9.85%。

参考文献:

- [1] LI J L, CHEN R S, WEI K E. Microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy cast by metal mould and lost foam casting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21 (4): 761-766.
- [2] LI J, HE Z, FU P, et al. Heat treatment and mechanical properties of a high-strength cast Mg-Gd-Zn alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 651 (1): 745-752.
- [3] 汤伊金, 章桢彦, 靳丽, 等. Mg-Gd系合金时效析出研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2014, 24 (1): 9-24.
- [4] 丁文江, 吴国华, 李中权, 等. 轻质高性能镁合金开发及其在航天航空领域的应用 [J]. 上海航天, 2019, 36 (2): 1-8.

The Effect of Casting Technology on the Internal Quality, Microstructure, and Mechanical Properties of VW63Z Magnesium Alloy Disk Castings

LI Meng¹, GU Jin-tao¹, PAN Long¹, CHU Jie¹, CHEN Hui-feng², ZHANG Xu-liang¹, ZOU Wen-bing¹, LI Bao-hui²
(1. Xinjiang Technology (Jiangsu) Co., Ltd., Nantong 226100, Jiangsu, China; 2. Shanghai Aerospace Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600, China)

Abstract:

The ProCAST software simulation, optical microscope observation, and room temperature tensile experiments were used to study the effect of casting process on the internal quality, microstructure, and mechanical properties of VW63Z magnesium alloy disk castings. The results showed that there were looseness and slag inclusion defects on the disc casting of gravity casting, while the slag inclusion, looseness, micro-crack and other casting defect were not found on the disc casting of anti-gravity casting. The microstructure analysis results showed that the microstructure of the gravity cast disc casting was uneven, and the average grain size was 95 μm . The microstructure of the disc cast by anti-gravity casting was more uniform, and the average grain size was only 70 μm . The mechanical properties test results indicated that the mechanical properties of the disc casting cast by anti-gravity casting were the highest, and the average tensile strength, average yield strength and elongation at room temperature were 315.75 MPa, 215.50 MPa and 6.90%, respectively; the average tensile strength, average yield strength, and elongation after at 160 $^{\circ}\text{C}$ were 295.75 MPa, 196.75 MPa, and 9.85%, respectively.

Key words:

VW63Z; magnesium alloy; microstructure; mechanical properties; gravity casting; anti-gravity casting