● 特种铸造 Special Casting ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.010

复杂镁合金精密铸件的熔模铸造工艺

解海涛[1,2],刘金学[2],郝益伟[3],高 华[2],刘志鹏[2]
(1. 郑州大学 材料科学与工程学院,河南 郑州 450001;2. 郑州轻研合金科技有限公司,河南 郑州 450041;3. 常州华创航空科技有限公司,江苏 常州 213159)

摘 要:通过熔模铸造底注式浇注系统设计、浇注过程仿真模拟,并采用 XRD 和 X-Ray 无损探伤仪研究了制备的复杂镁合金精密铸件。结果表明,该浇注系统金属液补缩良好,制备的铸件表面光滑,与型壳之间未发生明显界面反应,且铸件组织致密,无缩松缩孔缺陷,经三坐标检测,铸造尺寸公差达到 CT6 级。

关键词:熔模铸造;浇注系统;镁合金;界面反应
中图分类号:TG249 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)05-0367-04

Investment Casting Process for Complex Magnesium Alloy Precision Castings

XIE Haitao[1,2], LIU Jinxue[2], HAO Yiwei[3], GAO Hua[2], LIU Zhipeng[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Light Alloy Institute Co., Ltd, Zhengzhou 450041, China; 3. Changzhou Huachuang Aviation Technology Co., Ltd., Changzhou 213159, China)

Abstract: The complex magnesium alloy precision castings were studied by the design of the bottom pouring system, the simulation of the pouring process, and the XRD and X-Ray nondestructive flaw detector. The results show that the metal molten feeding of the casting system is good, the surface of the casting is smooth, and there is no obvious interface reaction between the casting shell and the molded shell. The casting structure is compact, and there is no shrinkage porosity and cavity. The dimensional tolerance of the casting can reach CT6 grade by the three-dimensional test.

Key words: investment casting; gating system; magnesium alloy; interfacial reaction

目前,熔模精密铸造已经广泛用于钛合金、铝合金和高温合金的精密铸件生产,但在镁合金中的应用还较少[1]。由于镁合金化学性质极其活泼,高温易氧化、易反应的缺点,镁合金熔模铸造存在的主要问题便是型壳和铸件间的界面反应,这极大的影响了熔模铸件的表面质量,限制了镁合金精密铸件的发展[3-4]。除选择合适的型壳材料外,浇注工艺参数如浇注系统设计、浇注温度、模壳预热温度、铸件壁厚大小等都会对界面反应造成影响。一般来说,降低浇注温度、减小铸件壁厚、降低模壳预热温度都会使铸件的冷却速度加快,充型时间变短,从而降低型壳与铸件的接触温度,缩短接触时间,使界面反应更难进行[5]。同时,浇注工艺参数还会对金属液的流动性、充型性及铸件力学性能有较大影响[3]。因此,研究设计镁合金熔模精密铸造工艺,获得合理的铸造工艺参数对镁合金精密铸件的生产具有指导意义。

本文作者通过对复杂镁合金铸件的浇注系统设计并对熔模铸造过程进行仿真模拟,预测铸件缺陷并优化浇注系统来改善界面反应,最终浇注出质量合格的复杂镁合金熔模铸件。

1 试验材料与方法

所选用的型壳为公司自主开发的新型镁合金专用型壳材料制备,浇注前型壳须放入干燥箱内预热至 250 ℃保温 4 h,以去除型壳内的水分。使用具有气体保护装置的德国熔炼炉进行 ZM5 镁合金的熔炼,保护气氛为 SF_6 和 CO_2 的混合气体,流量比为 1∶99,在浇注前向型壳内充入保护气 60 s 左右,然后浇注,浇注温度为 760 ℃。金属液浇注完成后,在空气中自然冷却 4 h,待铸件充分冷却后使用气枪脱壳取出铸件。采用 XRD-6100 型 X 射线衍射仪对铸件表面的相组成进行分析。具体参数为:Cu-Kα 靶,加速电压 40 kV,加速电流 40 mA,波长 1.540 6 nm,扫

收稿日期:2021-01-30
基金项目:中铝公司 2019 年青年科技人才启明星计划项目(2018MXJH10);"郑州 1125·聚才计划"创业领军团队项目(2015091)
作者简介:解海涛(1987—),河南焦作人,博士生,工程师.主要从事镁合金及成形工艺方面的工作.
电话:15838121215,Email:415257402@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

描速度 2°/min，扫描角度范围 30~80°。对铸件表面层中含有的物相进行分析。

2 试验结果及讨论

2.1 浇注系统设计

选择的镁合金铸件结构复杂，且复杂内腔要求非加工。铸件外形尺寸 ϕ320 mm×128 mm，铸件总质量 1.4 kg，铸件最大壁厚 46 mm，最小 3 mm，主体壁厚 10 mm，壁厚差别较大，铸件尺寸公差等级要求 CT6，且机械加工余量要求 E 级，即 1.4 mm。图 1 为复杂构件的三维结构示意图。根据该铸件的结构特点，并结合镁合金热容量小、结晶潜热小和易氧化等缺点，设计了底注开放式浇注系统。

图 1 镁合金铸件三维结构示意图
Fig.1 Three-dimensional structure diagram of Mg alloy casting

在底注开放式浇注系统中，镁合金液总重量为 5.5 kg，流量损耗系数 μ 值 0.34，平均静压力头高度 $H_p = H_0 - 0.5h_C = 250 - 0.5\times128 = 18.6$（cm），浇注时间 t=4.34 s。根据这些参数计算浇注系统最小截面积 $F_{阻}$=10.84 cm^2。开放式浇注系统中最小截面为直浇道，即 $A_{直}=F_{阻}$=10.84 cm^2，直浇道采用双片结构，单片面积 5.42 cm^2。本实验铸件为小型铸件，截面比选择 $A_{直}:A_{横}:A_{内}$=1:2:3[6]。根据各单元截面比可得到 $A_{横}$=21.68 cm^2，横浇道采用方形截面，截面尺寸 $a=b$=46 mm；$A_{内}$=32.52 cm^2，共设置 6 个内浇道，单个面积 5.42 cm^2。参数确定后，使用三维软件进行造型，绘制初始的浇注系统 I 如图 2。

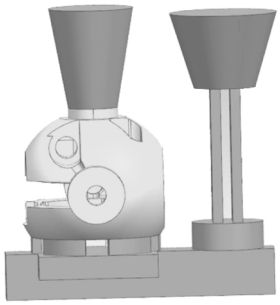


图 2 初始浇注系统设计图 I
Fig.2 Initial design of bottom gating system I

为验证图 2 浇注系统设计的合理性，使用模拟软件对底注式浇注系统进行熔模铸造的充型过程、气体流动过程和凝固温度场的数值模拟，模拟浇注温度 740 ℃，浇注时间 5 s，型壳预热温度 250 ℃。通过对浇注系统的充型过程模拟发现，该系统充型较为平稳，金属液可以自下而上的缓慢填充型壳，但浇注 1.1 s 时由于金属液的流速较快，在直浇道末端容易造成回流，2.1 s 时金属液在左边充型速度较快，右边充型速度较慢，部分熔液出现紊流，可能会造成镁液的氧化加重。对其浇注系统气体流动过程的模拟发现，由于底注式在充型时金属液流动缓慢、平稳，型腔内的大部分气体都可以自下而上的排出，但由于开始充型时金属液的流动速度较快，同时该铸件的壁厚差别较大，使得在充型初期型腔内有少量气体塞积，难以有效排出，造成镁液的氧化倾向加大，预测铸件在拐角处造成氧化夹渣倾向会较大。

因此，为进一步降低金属液的充型速度，避免金属液在横浇道末端的回流现象，对该底注式浇注系统中横浇道末端形状做了修改，并在直浇道底部添加泡沫陶瓷过滤片以减缓金属液的充型速度，修改后的浇注系统如图 3，并将其命名为底注式 II。对底注式 II 浇注系统做模拟仿真结果发现，金属液的充型更加平稳，而且泡沫陶瓷过滤片也能起到缓流的作用，金属液流过过滤片后流速更平缓，熔模铸件产生卷气和氧化夹渣的倾向更小。充型时型腔内的气体可以均匀的自下而上缓慢排出，由于金属液的流动速度慢，浇注时型腔内基本上不会残留气体，预测该浇注系统下获得的铸件产生卷气和氧化夹渣缺陷的倾向更小。

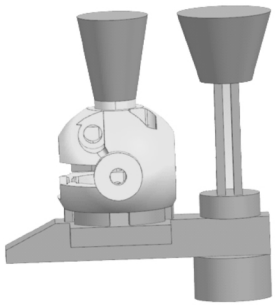


图 3 修改的浇注系统设计图 II
Fig.3 Modified design of bottom gating system II

图 4 和图 5 为底注式 II 浇注系统的凝固过程模拟结果和铸造缺陷预测。结果显示凝固过程中金属液的补缩效果良好，顶部冒口的添加可以实现良好补缩，铸造缺陷预测结果显示铸件内部不会产生缩松缩孔缺陷。因此，实验选择底注式 II 浇注系统来制备熔模型壳，并进行复杂镁合金熔模铸件的铸造成型。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

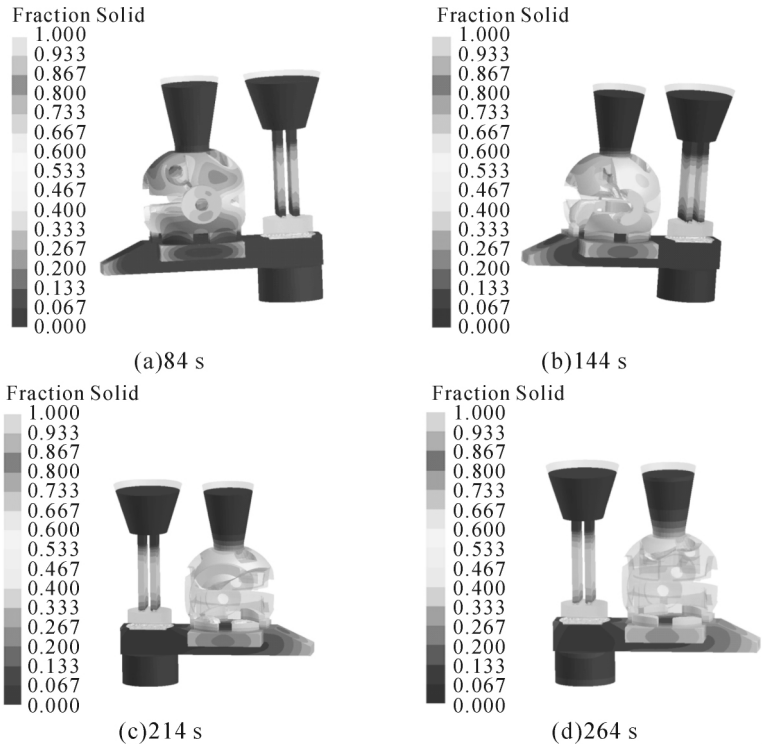


图 4　底注式Ⅱ凝固过程模拟结果

Fig.4　10 Solidification process simulation of bottom gating system Ⅱ

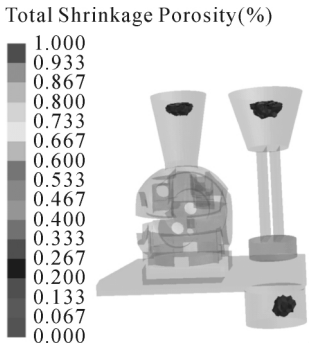


图 5　底注式Ⅱ铸造缺陷预测

Fig.5　Casting defects prediction of bottom gating system Ⅱ

(a)模壳　　(b)精铸件

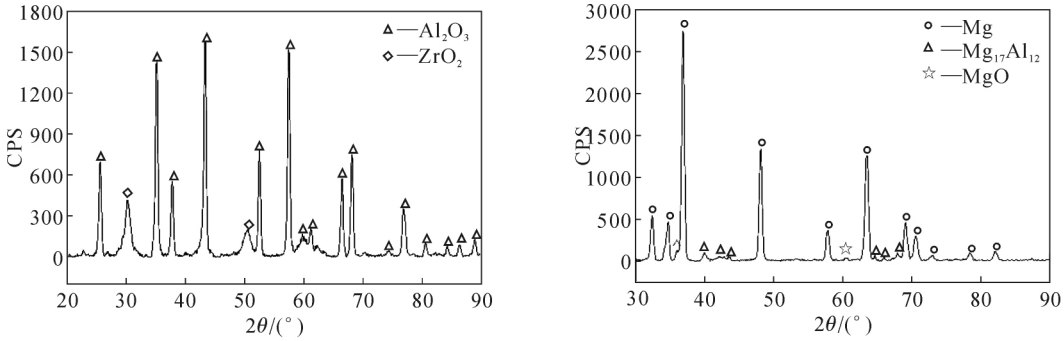
图 6　复杂镁合金构件的型壳与熔模铸造件

Fig.6　Mold shell and investment casting of complex magnesium alloy part

2.2　复杂镁合金铸件质量验证

如图 6，采用底注式Ⅱ浇注系统制备出了复杂结构件的熔模型壳并采用保护气氛熔铸工艺浇注出 ZM5 镁合金复杂镁合金熔模铸件。该铸件表面光滑，宏观形貌观察未有反应迹象。通过三坐标对铸件进行尺寸检验，铸造尺寸公差达到了 CT6 级。

为验证复杂镁合金熔模铸件的界面反应情况，复杂镁合金熔模铸件浇注完成后，分别对型壳内表面和铸件表面取样进行 XRD 物相分析，如图 7 所示。从图中可以看到，型壳内表面只存在 Al_2O_3 和



(a)模壳内表面　　(b)铸件表面

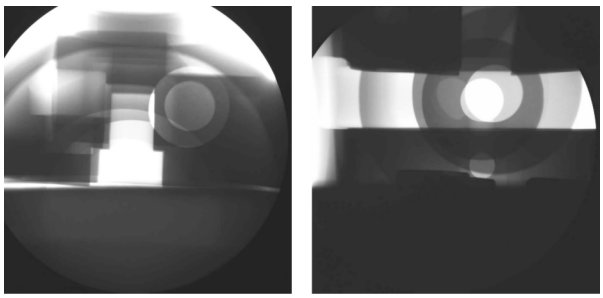
图 7　型壳内表面与铸件表面的 XRD 物相分析结果

Fig.7　XRD phase analysis results

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ZrO_2 两种物相，无 MgO 或其他界面反应产物；铸件表面 MgO 的峰值较低，表明铸件表面氧化轻微，型壳与铸件间未发生明显界面反应。

为检测镁合金复杂铸件的内部质量，对该铸件的不同面进行了 X-射线无损检测，检测结果如图 8。从图中可看出该铸件组织致密，无缩松缩孔缺陷，内部质量优良。



(a)前视图　　(b)左视图

图 8 X- 射线检测结果显示铸件无缩孔缩松缺陷

Fig.8 X-ray test shows the casting no shrinkage porosity defects

3 结论

(1)对 ZM5 镁合金复杂铸件进行了底注式熔模铸造浇注系统设计、浇注过程仿真模拟，设计出了金属液补缩良好、铸件内部不易产生缩松缩孔缺陷的型壳浇注系统。

(2)采用自主开发的新型镁合金专用型壳材料制壳，通过保护气氛熔铸工艺浇注出 ZM5 镁合金复杂镁合金熔模铸件。该铸件表面光滑，与型壳之间未发生明显界面反应，且铸件组织致密，无缩松缩孔缺陷，内部质量优良，通过三坐标对铸件进行尺寸检验，铸造尺寸公差达到了 CT6 级。

参考文献：

[1] 沈昀，郑功，冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2019(1):54-62.

[2] 孔佑顺，王建军，李飞，等. 某薄壁镁合金构件熔模铸造工艺研究[J]. 铸造技术，2018, 39 (6)：1278-1281.

[3] 林志埙. 镁合金熔模铸造成型工艺与组织性能研究[D]. 上海：上海交通大学, 2008.

[4] 陈咏华. 镁合金熔模精密铸造技术研究现状 [J]. 铸造设备与工艺, 2010,6:47-50.

[5] JAFARI H, IDRIS M H, OURDJINI A. An alternative approach in ceramic shell investment casting of AZ91D magnesium alloy: In situ melting technique[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014，214(4):988-997.

[6] 胡忠，张启勋，高以熹. 铝镁合金铸造工艺及质量控制[M]. 北京：航空工业出版社，1990.

2021 年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，中文核心期刊，月刊，1979 年创刊，中国铸造协会会刊，被 20 余家数据库收录。中国标准连续出版物号：ISSN1000-8365/CN 61-1134/TG，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、实用工艺技术、生产管理经验以及铸造行业发展动态。内容涵盖铸造成型工艺和铸造材料研究，并兼顾其他金属材料成型方法。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、装备技术、特种铸造、实用成型技术、材料改性、应力控制与理化测试技术、今日铸造、企业精英人物专访等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造设备、熔炼设备、环保设备、铸造原辅材料、检测仪器以及铸件生产、热处理设备、科研成果转让等相关信息。

订阅方式及价格：请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年 12 期，每期定价 25 元，平寄全年 300 元（含邮费），挂号全年 336 元，快递全年 420 元。

欢迎订阅、欢迎投稿、欢迎刊登广告

邮购地址：陕西省西安市金花南路 5 号 西安理工大学 608 信箱

联系人：李巧凤　029-83222071　电话/传真：13991824906　网址：www.zhuzaojishu.net　E-mail：zzjs@263.net.cn

银行汇款：户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net