

基于 ProCAST 的镁合金惯组支架砂型铸造工艺研究

王先飞^{1,2}, 肖 旅^{1,2}, 邹文兵^{1,2}, 李中权^{1,2}, 张小龙^{1,2}, 陈 舸^{1,2}

(1.上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 2.上海金属材料近净成形工程技术研究中心, 上海 201600)

摘要:为实现镁合金惯组支架的高效率、高质量研制,使用 ProCAST 软件仿真优化 ZM5 镁合金惯组支架铸造工艺。通过对充型、凝固过程进行分析,发现铸件内部的 3 条薄壁筋板易出现浇不足、冷隔缺陷,圆弧面内侧厚壁筋条易出现缩孔、缩松等缺陷。经过优化设计,通过采取增加薄壁筋板厚度、调整内浇道位置、改变厚壁筋板上侧冒口结构等措施,较好地避免了上述铸造缺陷的产生,获得了合格的支架铸件。数值模拟仿真技术可应用于绝大多数航天构件的铸造过程分析,实现构件快速研制。

关键词: 支架铸件; 砂型铸造; ProCAST 软件; 铸造缺陷

中图分类号: TG 241 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.02.010

Process Optimization of Sand Casting of Magnesium Alloy Bracket Based on ProCAST Software

WANG Xianfei^{1,2}, XIAO Lü^{1,2}, ZOU Wenbing^{1,2},

LI Zhongquan^{1,2}, ZHANG Xiaolong^{1,2}, CHEN Ge^{1,2}

(1.Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Near-Net-Shape Forming for Metallic Materials, Shanghai 201600, China)

Abstract: In order to gain a high-quality bracket with high efficiency, the ProCAST software is used to optimize the casting process of the bracket made from ZM5 magnesium alloy. For the original casting process, cold shut and shrinkage can occur by observing the distribution of temperature in filling and solidification processes. By adding the thickness of thin-wall stiffened plates, adjusting locations of ingates and changing structures of risers on the top of the thick-wall stiffened plate, these defects can be avoided and a qualified bracket casting is made. The numerical simulation technology can be widely used for the process optimization and the manufacture of castings in aerospace field.

Keywords: bracket casting; sand casting; ProCAST software; casting defects

0 引言

轻量化是航天构件材料的重要发展方向^[1-2]。减小构件质量,能够提高飞行器机动性能,降低飞行器发射成本^[3-4]。惯组支架用于安装飞行器惯性组件,是飞行器导航控制精度的重要结构保障,在满足轻量化的前提下,其变形量在受力条件下需控制在角分级水平,故对材料比刚度的要求较高。

镁合金作为最轻的工程金属材料,具有比强度

及比刚度高、导热性好、电磁屏蔽能力强,以及阻尼性能优异等优点^[5],能满足航空航天、现代武器装备对减重、节能的需求。在航天领域,镁合金已被广泛应用于制造导弹、飞船、卫星上的重要构件,能够满足对惯组支架制备材料的需求。

惯组支架为三角形框架结构,整体薄壁;构件内表面存在大量安装凸台,壁厚突变严重。采用锻造+机加工存在材料利用率低、内表面机加难度大

收稿日期:2018-11-15;修回日期:2019-02-13

基金项目:国家自然科学基金(U1737208)

作者简介:王先飞(1986—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为镁合金材料及成形技术。

通信作者:李中权(1964—),男,研究员,主要研究方向为金属材料近净成形技术与装备。

等问题;而采用分块加工+焊接工艺则存在焊接区域大、精度难以保证等问题。因此,采用整体铸造工艺能够实现惯组支架的近净成形,但由于构件的结构特点,铸件铸造工艺设计难度大,精确成形存在困难。

利用软件模拟仿真铸造过程,对于优化铸造工艺、降低研制周期和费用,具有重要意义^[6]。铸造计算机模拟仿真技术,又称铸造 CAE 技术,是传统铸造与计算数字化高新技术相结合的典范^[7-8]。近 20 年来,全流程制造模拟技术已成为该领域的重要前沿,英国罗罗航空发动机公司、美国通用汽车公司等著名企业均已开展相关研究^[9]。随着计算机技术的发展,商品化软件系统已在很多重要的工矿企业应用,著名的商品化软件有德国的 MAGMASOFT,法国 PROCAST、FLOW-3D 等^[10]。国内的沈阳铸造研究所、哈尔滨工业大学、清华大学、华中科技大学等单位先后开展了卓有成效的研究,取得了可喜的成果^[11]。铸造模拟技术被认为是热加工模拟发展较为成功的领域,为铸造水平的提高发挥了重要作用。

本文采用 ProCAST 软件,模拟某镁合金惯组支架的铸造工艺,通过分析铸件充型和凝固过程,以及预测缩孔、缩松等缺陷的位置,优化工艺,制备出满足要求的合格铸件。

1 仿真模型的建立

1.1 模型结构

惯组支架浇注系统三维模型如图 1 所示。镁合金惯组支架铸件形状为三角框形结构,外部尺寸达 900 mm×500 mm×450 mm,最薄壁厚为 6 mm,铸件内部有 3 条薄壁筋板,圆弧面内侧有 1 条厚壁筋条,要求 II 类铸件,需 100% 进行 X 射线检测。由于该铸件尺寸大,内部存在薄壁筋板,金属液在充型过程中要有足够的充型速度。同时,该铸件存在壁厚较厚的筋条,须保证铸件在凝固时具有流畅的补缩通道。为此,选用底注式浇注系统,在铸件厚壁筋条上侧设置冒口。

1.2 边界条件和热物性参数设置

将上述三维模型导入 ProCAST 软件进行网格划分和边界条件设置。该支架铸件选用 ZM5 镁合金,液相线温度为 595 ℃,固相线温度为 470 ℃,密度为 1 730 kg/m³;采用砂型铸造,砂型材料为树脂

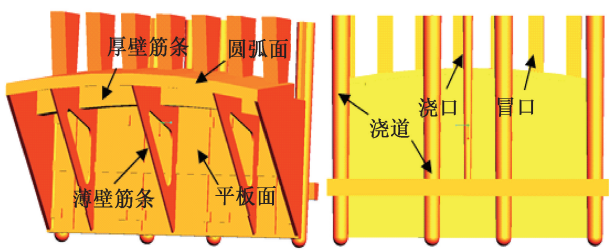


图 1 惯组支架浇注系统三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of pouring system for bracket

砂,密度为 1 520 kg/m³。铸件合金与砂型材料的热物性参数见表 1,2。铸件与砂型之间的传热系数设置为 300 W/(m²·℃),合金浇注温度为 700 ℃,砂型初始温度为 25 ℃,砂型散热条件为外部空冷,充型速度设置为 1.0 m/s(浇口处)。

表 1 ZM5 合金的热物性参数

Tab. 1 Thermophysical parameters of ZM5 magnesium alloy

<i>T</i> /℃	热导率 λ /(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	比热容 <i>c</i> /(J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
100	58.5	1 066
200	68.4	1 111
300	75.8	1 156
400	81.2	1 225
700	90.0	1 300

表 2 砂型的热物性参数

Tab. 2 Thermophysical parameters of mold material

<i>T</i> /℃	热导率 λ /(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	比热容 <i>c</i> /(J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
25	0.73	680
200	0.64	905
400	0.59	1 020
600	0.59	1 098
800	0.64	1 150

2 计算结果与分析

2.1 充型过程分析

镁合金惯组支架铸造充型过程如图 2 所示(图中不同颜色代表铸件不同区域的温度,下同)。金属液通过浇注系统进入铸件底部,见图 2(a)。液面沿筋板和平板面开始平稳上升,内部 3 条薄壁筋板的外侧边在充填约 60% 后停止填充,见图 2(b),其他区域继续填充铸件,并进入厚壁筋条铸件。同时,金

属液从薄壁筋板的内侧填充,并回流至筋板外侧边,见图 2(c),最后充满部位为上部圆弧面,待冒口充满后,充型结束。整个充型过程中,最大问题在于薄壁筋板外侧边的回流填充,见图 2(d),此处极易出现浇不足或冷隔。

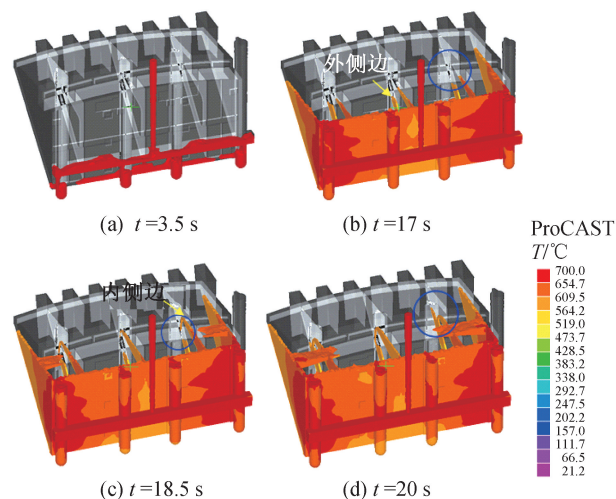


图 2 惯组支架充型过程
Fig. 2 Filling process of bracket

2.2 凝固过程分析

铸件在凝固过程中,由于合金的体积收缩,往往在最后凝固部位出现孔洞,称为缩孔(缩松)。图 3 为镁合金惯组支架凝固过程。由标示区域可知,在凝固前期,3 条薄壁筋板外侧边凝固最快,见图 3(a)。厚壁筋条上侧铸件存在热节区域,易形成孤立液相区,见图 3(b)。凝固过程中,冒口优先凝固,厚壁筋条上侧 2 处铸件为最后凝固区域,无法得到补缩,凝固后易产生缩孔、缩松缺陷,见图 3(c)。采用上述浇注系统进行浇注,实际铸件见图 3(d)。由图可知:内部 3 条薄壁筋板均出现浇不足问题。经 X 射线检测分析,发现厚壁筋条上侧 2 处铸件(图 3(d)中黑色箭头所指),存在超标缩孔缺陷。实际缺陷种类、缺陷位置与模拟结果类似。

惯组支架铸件内部 3 条薄壁筋板的初始设计厚度均为 6 mm,且内浇道位置没有正对薄壁筋板,镁合金液流入筋板所需时间较长,温度下降较多,导致合金液在填充内部筋板初期即发生凝固,阻碍了其进一步填充,最终出现浇不足问题。在现有冒口设计条件下,模拟结果显示厚壁筋条为最后凝固区域,冒口没有起到有效的补缩作用,使得厚壁筋条形成了超标缩孔缺陷。因此,支架铸件的结构、浇道与冒口等铸造工艺设计对铸件精确成形至关重要,而模

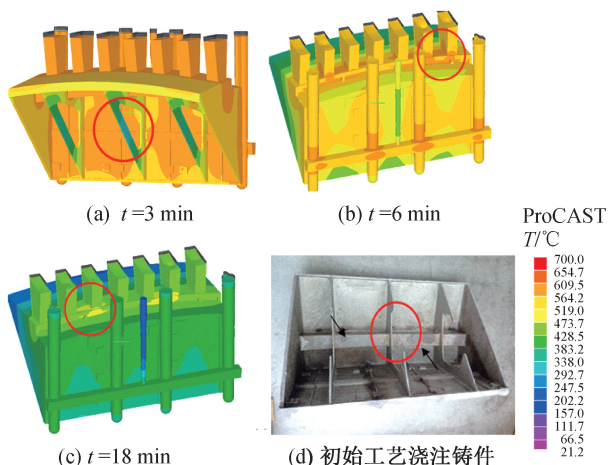


图 3 惯组支架凝固过程与实际铸件
Fig. 3 Solidification process of bracket and casting

拟仿真技术能够充分展示上述特征对铸件最终质量的影响,有效指导工艺优化。

3 改进方案

通过上述充型和凝固过程模拟研究,以及实际铸件缺陷分析,进行镁合金惯组支架浇注工艺优化,支架改进浇注系统三维模型如图 4 所示。针对铸件内部薄壁筋板出现的浇不足问题,将筋板厚度由 6 mm 增加至 12 mm,见图 4(a),以延长此处的凝固时间。同时,增加 1 个内浇道,并将其中 3 个内浇道的位置调整至与薄壁筋板对齐位置,以提高筋板充型能力,见图 4(b)。针对厚壁筋条易形成孤立液相区的问题,将冒口上侧宽度由 50 mm 增加至 80 mm,以提高冒口蓄热和最终补缩能力,降低缩孔、缩松等缺陷的形成。

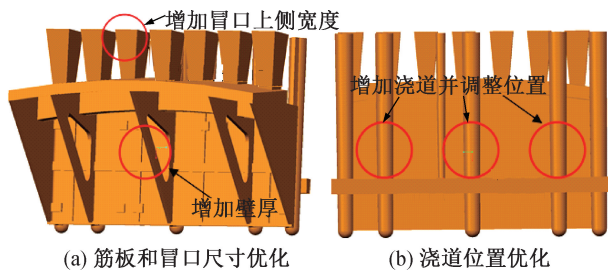


图 4 支架改进浇注系统三维模型
Fig. 4 Three-dimensional model of modified pouring system for bracket

对改进后的浇注系统进行模拟计算,支架充型过程如图 5 所示。由图可知,支架初期充型过程与原浇注系统类似,金属液通过浇注系统进入支架铸

件底部,液面沿筋板和平板面开始平稳上升,见图 5(a)。但在改进工艺条件下,内部 3 条薄壁筋板的外侧边未出现填充停止现象,见图 5(b)。金属液沿筋板两侧平稳上升、顺序填充,见图 5(c)。随后进入厚壁筋条铸件,见图 5(d)。最后充满部位为上部圆弧面,待冒口充满后,充型结束。因此,3 条薄壁筋板未出现金属液回流,消除了可能出现的浇不足现象。

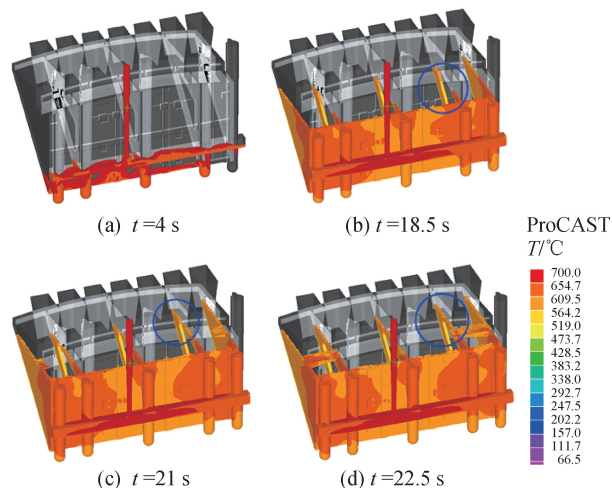


图 5 支架改进浇注系统的充型过程

Fig. 5 Filling process of modified pouring system for bracket

支架改进浇注系统的凝固过程如图 6 所示。内部 3 个薄壁筋板的凝固时间明显增加,相对原工艺提高约 80%,降低了浇不足的可能性,见图 6(a)。在整个凝固过程中,热量主要集中于冒口处,冒口为最后凝固区域,见图 6(c),能够实现对铸件的有效补缩,解决厚壁筋条缩孔等缺陷问题。采用改进的

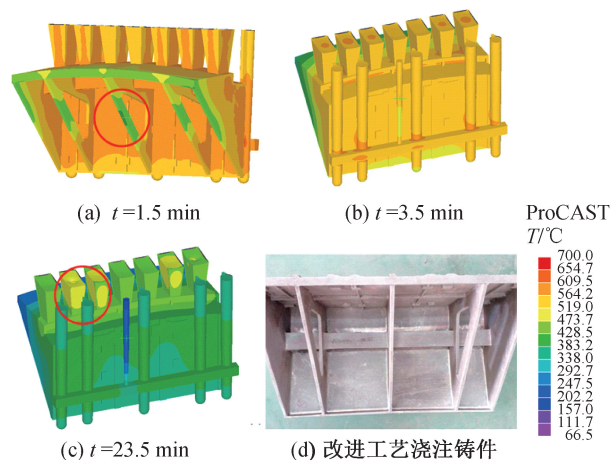


图 6 支架改进浇注系统的凝固过程与实际铸件

Fig. 6 Solidification process of modified pouring system for bracket and casting

浇注系统进行浇注,获得了致密度较高的铸件,见图 6(d)。最后进行 X 射线检测分析,未发现超标气孔、缩孔等缺陷,达到 II 类铸件要求。

4 结论

数值模拟分析能够有效指导镁合金惯组支架铸造工艺设计与铸件研制。对于初始工艺,铸件内部 3 条薄壁筋板出现浇不足缺陷,圆弧面内侧厚壁筋条出现超标缩孔缺陷;通过工艺优化,铸件内部薄壁筋板充型完整,圆弧面内侧厚壁筋条未出现超标缺陷。

现阶段,针对大型复杂薄壁构件的铸造收缩类缺陷模拟准确性还略低,下一步工作需准确测量合金热物性参数、合金与砂型界面换热行为,并对冷铁及涂层对铸件凝固过程的影响等开展深入研究。

参考文献

- [1] 陈巧旺, 汤爱涛, 许婷熠, 等. 高性能铸造稀土镁合金的发展[J]. 材料导报: A 综述篇, 2016, 30(9): 1-9.
- [2] 周林, 曾捷, 李钰, 等. 空间环境铝合金板结构热属性光纤监测技术研究[J]. 上海航天, 2017, 34(3): 108-115.
- [3] 吴国华, 陈玉狮, 丁文江. 镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J]. 载人航天, 2016, 22(3): 281-292.
- [4] 苏再军, 黄艳香, 刘楚明, 等. 铸造稀土镁合金的研究现状及发展趋势[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(10): 1047-1051.
- [5] 丁文江. 镁合金科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 365-371.
- [6] 于彦东, 崔林林, 李超, 等. ZM6 镁合金大型薄壁铸件数值模拟[J]. 铸造, 2012, 61(4): 400-403.
- [7] 熊守美, 许庆彦, 康进武. 铸造过程模拟仿真技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 58-69.
- [8] 许庆彦, 熊守美, 周建新, 等. 铸造技术路线图: 数字化、网络化、智能化铸造[J]. 铸造, 2017, 66(12): 1243-1249.
- [9] BACKMAN D G, WEI D Y, WHITIS D D, et al. IC-ME at GE: accelerating the insertion of new materials and processes[J]. JOM, 2006, 58(11): 36-41.
- [10] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势[J]. 铸造, 2012, 61(10): 1105-1115.
- [11] 柳百成. 建模与仿真在装备制造中的作用与前景[J]. 航空制造技术, 2008(3): 26-27.

(本文编辑: 姚麒伟)