

基于仿真模拟的稀土镁合金铸造过程裂纹控制研究

姚 斐 刘颖卓 王 堃 王先飞 陈琦铭 张应平 袁 勇  
(上海航天精密机械研究所)

摘 要 针对稀土镁合金铸造过程中的开裂问题,采用 ProCAST 软件对某舱体铸造过程应力场进行仿真模拟。结果表明,在应力较大处改进铸造圆角,可有效降低该部位的应力。通过采取增大过渡圆角、添加工艺拉筋等措施,解决了铸造过程产生裂纹的问题,生产出了合格的铸件。

关键词 舱体铸件;砂型铸造;仿真模拟;裂纹控制

中图分类号 TG245;TG146.22 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.03.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Cracking Control of Rare Earth Magnesium Alloys during Casting Process Based on Numerical Simulation

Yao Fei, Liu Yingzhuo, Wang Kun, Wang Xianfei, Chen Qiming, Zhang Yingping, Yuan Yong  
(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute)

Abstract: Aiming at the crack occurred in the production of rare earth magnesium alloys, the ProCAST software was applied to simulate the stress distribution of the casting process. Numerical simulation results and casting process tests reveal that the stress can be reduced by modifying the fillet size of end frame. By increasing the transitional fillet size and adding reinforcing rib, the crack could be eliminated and the cabin was successfully produced.

Key Words: Cabin Casting, Sand Casting, Numerical Simulation, Crack Control

当前,复杂的军事战略环境对飞行器战技指标提出了更高的要求。同时,飞行器气动外形多呈现异形曲面,飞行过程中热流进一步加大,因此飞行器结构材料的耐热性能和轻量化需求越来越迫切。Mg-Gd-Y 系稀土铸造镁合金具有较高的高温强度和韧性,密度较小,适用于飞行器主承力、大型复杂构件<sup>[1-3]</sup>,但其含有较多的稀土元素,具有较大的热变形抗力,在铸造大型复杂

零件时易产生裂纹等问题。

近几年,铸造过程仿真模拟技术发展迅速,国内在软件开发和工程应用方面开展了大量的研究工作。通过对铸造充型过程进行模拟,预测凝固过程应力、缺陷产生情况,有效指导工艺改进,减少铸造内部缺陷、变形开裂等问题,对于降低研制成本和改进工艺具有积极意义<sup>[4-6]</sup>。本研究借助 ProCAST 软件对某飞行器大尺寸

收稿日期:2022-05-23;修改稿收到日期:2022-06-28

第一作者简介:姚斐,男,1987 年出生,高级工程师,上海(201600),E-mail:412990082@qq.com

引用格式:姚斐,刘颖卓,王堃,等. 基于仿真模拟的稀土镁合金铸造过程裂纹控制研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(3):342-344.

YAO F, LIU Y Z, WANG K, et al. Cracking control of rare earth magnesium alloys during casting process based on numerical simulation [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(3):342-344.

[29] FENG J, XIAO B, WAN C, et al. Electronic structure, mechanical properties and thermal conductivity of  $Ln_2Zr_2O_7$  ( $Ln = La, Pr, Nd, Sm, Eu$  and  $Gd$ ) [J]. Pyrochlore, 2011, 59: 1 742-1 760.

[30] PUGH S F. XCII. relations between the elastic moduli and the plastic properties of polycrystalline pure metals [J]. Philos. Mag., 2009, 45: 823.

[31] 郭亚琼,赵宇宏,侯华,等. 压力下  $AlLi, Al_2Y, Al_2La$  电子结构的第一性原理研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(3): 319-323.

[32] RANGANATHAN S I, OSTOJA-STARZEWSKI M. Universal elastic anisotropy index [J]. Physical Review Letters, 2008, 101(5): 055 504.

[33] TANG P Y, LI J Y, HUANG G H, et al. Uniaxial loading response of one-dimensional long period structures of  $Al_3Ti$  [J]. Comput. Mater. Sci., 2014, 91: 153-158.

[34] SHOU H W, XIE R Y, PENG M J, et al. Stability and electronic structures of the Ti-Zn intermetallic compounds: A DFT calculation [J]. Physica, 2019, B560: 41-45.

[35] PENG M, SHOU H, CAO Y. First-principles calculations of structural, elastic and thermodynamic properties of (h, r)- $TiAl_2$  [J]. Physica, 2019, B561: 29-36.

[36] 徐珂浩,傅高升,宋莉莉,等.  $Al-Ce$  二元金属间化合物的第一性原理研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(1): 40-45.

(编辑:栗万仲)

异形舱体的铸造工艺方案进行模拟,预测凝固过程中的铸件应力分布情况,降低因应力过大而产生裂纹的概率,提高铸件的合格率。

1 产品结构及铸造工艺分析

某飞行器舱体为空间异型结构,其三维模型见图1,轮廓尺寸约为1 200 mm×1 100 mm×800 mm,舱体中间存在U形槽,槽宽约为220 mm,主体壁厚为2~3 mm。舱体整体呈非回转体,型面复杂,要求为Ⅰ类铸件。在铸造成形过程中极易发生变形,严重时会导致铸件开裂。

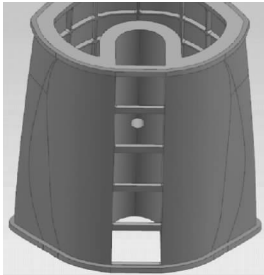


图1 舱体铸件三维模型图

Fig.1 Three-dimensional model of cabin casting

2 仿真模型的建立

2.1 铸造模型

由于稀土镁合金表面容易产生微裂纹,因此采用粘土砂造型,低压浇注工艺,保证平稳充型,减少铸造缺陷。为防止铸件变形,在铸件两端设置上、下法兰,并在U形槽结构处增加拉筋,浇注系统三维模型见图2。

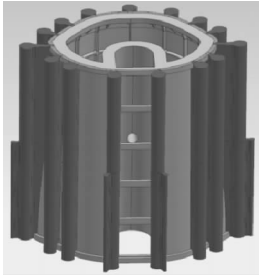


图2 舱体浇注系统三维模型

Fig.2 Three-dimensional model of gating system for cabin

2.2 边界条件和热物性参数设置

将舱体铸件三维模型导入 ProCAST 软件进行网格划分并设置边界条件。舱体铸件材质选用 Mg-Gd-Y 系稀土镁合金,液相线温度为 625 ℃,固相线温度为 580 ℃,密度为 1.880 g/cm<sup>3</sup>,泊松比为 0.274,杨氏模量为 46 GPa;采用砂型铸造,使用树脂砂。铸件与砂型之间的传热系数为 300 W/(m<sup>2</sup>·℃),合金液浇注温度为

710 ℃,充型速率为 1 kPa/s。

3 仿真模拟结果与验证

对铸件的应力模拟显示,上部端框宽度方向的 R75 转角处、R7 转角处、U 型结构和拉筋围成的封闭结构,应力均较大,明显高于其附近位置,见图 3 和图 4。

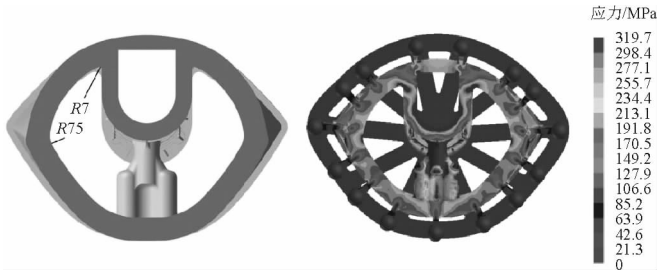


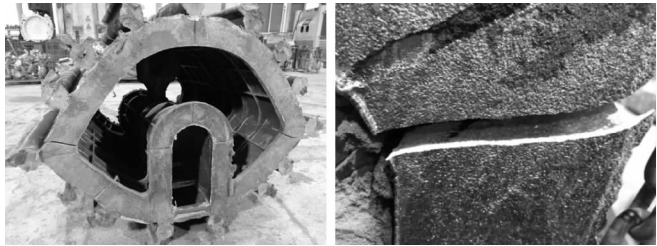
图3 端框圆角尺寸

图4 应力分布图

Fig.3 Fillet size of end frame

Fig.4 Stress distribution

按浇注工艺浇注了舱体铸件,见图 5,在铸造开箱后发现在 R75 圆角处出现了冷裂纹,裂纹出现的位置与模拟结果一致。



(a) 整体

(b) 局部

图5 舱体结构图

Fig.5 Cabin structure

对舱体浇注过程中出现的裂纹进行分析,结合仿真模拟结果,认为 Mg-Gd 系铸造合金中稀土含量高、热膨胀系数大,凝固过程相变应力大,在受阻收缩时,容易形成显微裂纹甚至是宏观应力裂纹。在舱体铸件冷却过程中,发生了较大的收缩,铸造应力逐渐增大,在应力超过合金的强度时产生了断裂。

断裂位于端框转角处,在铸件冷却时,铸件向中心收缩。端框宽度方向尺寸从凝固时的 1 059 mm 收缩到室温的 1 044 mm,收缩量为 15 mm。高度方向尺寸从凝固时的 770 mm 收缩到室温的 760 mm,收缩量为 10 mm。两个方向收缩值不一致,导致收缩较大处产生应力集中。模拟表明,端框宽度方向的 R75 转角处,应力明显高于其附近位置,该位置仅有圆弧方向的不完全约束,故在较大拉应力状态下发生开裂。U 型结构和拉筋围成的封闭结构,应力虽然较大,但是较规则的封闭结构保证了 U 型区域整体的结构强度。

## 4 工艺改进及验证

根据分析,把对端框转角产生裂纹部位  $R75$  圆角尺寸修改为  $R200$ 。一方面可以将应力分散在远离转角的两个立筒浇注系统之间,将应力足够分散,另一方面可以将端框圆角处增加约  $1/2$ ,约  $40\text{ mm}$  宽,提高该处的结构强度,减小拉裂风险。同时,虽然  $R7$  圆角有较高的强度,但由于此处应力较集中,为了防止该处发生开裂,将此处圆角增大为  $R50$ 。对优化后的浇注方案进行模拟,发现原裂纹处的应力得到有效降低,见图 6。

采用改进工艺后试制了舱体铸件,未发现裂纹,见图 7。

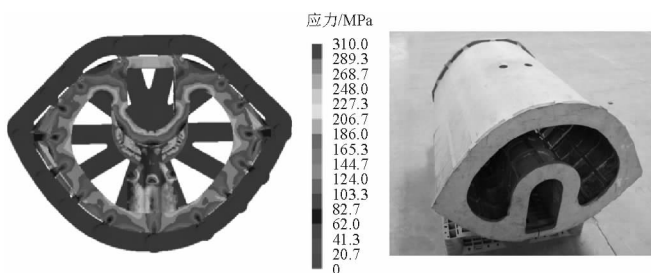


图 6 改进圆角的应力分布图

Fig.6 Stress distribution of modified fillet



图 7 改进圆角后的铸件

Fig.7 Cabin produced after fillet modification

## 5 结 语

通过 ProCAST 软件对 Mg-Gd-Y 舱体铸造过程应力分布进行模拟并根据结果调整裂纹处的圆角尺寸,成功制备无裂纹的舱体铸件。在进行大尺寸异形舱体铸造时,应特别关注铸件在不同尺寸方向的收缩量,通过计算应力分布,在工艺设计环节增强该区域的结构强度(如增加圆角、工艺拉筋),优化铸件结构的应力分布,可以显著减少因应力过大产生的裂纹。

### 参 考 文 献

- [1] 丁文江,付彭怀,彭立明,等.先进镁合金材料及其在航空航天领域中的应用[J].航天器环境工程,2011,28(2): 103-109.
- [2] 杨力祥,肖旅,周海涛,等.高强耐热稀土镁合金研究进展[J].上海航天,2019,36(2): 38-44.
- [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] 王先飞,肖旅,邹文兵,等.基于 ProCAST 的镁合金惯组支架砂型铸造工艺研究[J].上海航天,2019,36(2): 74-77.
- [5] 崔恩强,刘颖卓,孙浩,等.大型耐热镁合金壳体低压铸造工艺模拟[J].特种铸造及有色合金,2020,40(10): 1 103-1 106.
- [6] 张守银,余欢,严青松,等.反重力铸造数值模拟研究进展[J].铸造技术,2010,31(12): 1 163-1 666.

(编辑:张正贺)

## 《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和科技信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司



地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

