

压气机叶轮低压铸造数值模拟

徐 超¹ 韩雨哲²

(1.滨州学院机电工程学院;2.扬州大学机械工程学院)

摘 要 以某型涡轮增压器压气机叶轮为研究对象,利用 ProCAST 软件对铸件初始低压铸造工艺进行模拟,发现模拟的缺陷与实际铸件缺陷分布情况基本一致,铸件存在缩孔和浇不足缺陷,缩孔总体积约为 1.68 cm³。根据初始铸造工艺的模拟结果,重点分析充型压力对孔隙体积、卷气氧化夹渣等级和二次枝晶臂间距的影响,选择合适的充型压力以改善铸件浇不足以及缩孔缺陷。结果显示,当充型压力为 0.015 MPa 时,铸件的孔隙体积较小,卷气氧化夹渣等级较低,且二次枝晶臂间距较小。另外,将下铸型由金属型替换为石膏型,起到一定的保温作用,使铸件形成由上至下的顺序凝固,且内浇道最后凝固。试铸表明,铸件表面白光检查合格,无影响强度及品质的缺陷,且铸件内部针孔、缩松等级满足标准要求。

关键词 压气机叶轮;低压铸造;数值模拟;顺序凝固

中图分类号 TG249.2;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Low Pressure Casting Compressor Impeller

Xu Chao¹, Hang Yuzhe²

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Binzhou University;

2.College of Mechanical Engineering, Yangzhou University)

Abstract: The initial low-pressure casting process was simulated for impeller of a turbocharger compressor by using numerical simulation software, and the distribution of simulated defects was basically consistent with the actual casting defects. There exists shrinkage cavity and misrun defects in the casting, and the total volume of shrinkage cavity reaches about 1.68 cm³. According to the simulated results of the initial casting process, the effects of the filling pressure on the pore volume and volume gas oxidation slag level and the secondary dendrite arm spacing were analyzed to choose the appropriate filling pressure to improve the misrun and shrinkage cavity defects. The results show that when the filling pressure is 0.015 MPa, porosities are decreased with a lower gas oxidation slag volume level and secondary dendrite arm spacing. At the same time, the down-casting mold is replaced by the gypsum mold, which has a certain thermal insulation effect, so that the castings are solidified from top to bottom, and the inner gate is finally solidified. Finally, the casting test results reveal that the casting surface white light inspection is qualified with absence of defects affecting strength and quality. In addition, the pin-hole and shrinkage grade of the casting can meet the standards.

Key Words: Compressor Impeller, Low Pressure Casting, Numerical Simulation, Directional Solidification

压气机叶轮为涡轮增压器核心工作元件,叶轮高速旋转,且常处于高温、高压、高腐蚀等恶劣工况下,因此叶轮的设计与制造水平,对整个涡轮增压系统的服役性能有着较大影响^[1,2]。压气机叶轮是涡轮增压器中易磨损失效的零件,通过提高叶轮的铸造品质,能够改善其综合力学性能,从而防止涡轮增压器过早失效^[3]。低压铸造常用于生产力学性能要求较高的轻合金铸件^[4]。熔体在密闭炉内加压,通过升液管上升,填充铸型。由

于熔体反重力流动,易于控制充型速度,以避免紊流。此外,在凝固过程中施加于熔体的压力能够避免收缩,减少气孔。因此,采用低压铸造工艺制成的零件具有良好的力学性能和较低的表面粗糙度^[5,6]。随着计算机技术的发展,铸造数值模拟技术得到广泛的应用^[7~9]。本课题利用 ProCAST 软件对压气机叶轮低压铸造工艺进行数值模拟,结合铸件存在的缺陷,对模拟结果进行分析。针对初始铸造工艺的不足进行改进,同时对改

收稿日期:2022-01-20;修改稿收到日期:2022-04-26
第一作者简介:徐超,男,1997 年出生,工程师,山东滨州(256600),E-mail:15952514748@139.com
通信作者:韩雨哲,男,1998 年出生,硕士研究生,江苏扬州(225000),E-mail:1160867239@qq.com
引用格式:徐超,韩雨哲. 压气机叶轮低压铸造数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):122-126.
XU C, HANG Y Z. Numerical simulation of low pressure casting of compressor impeller[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43 (1):122-126.

进后的工艺进行模拟,以得到优化的工艺,并试铸验证,为同类产品的生产提供参考。

1 数学模型

通常在低压条件下的液态熔体为不可压缩牛顿流体,其充型和凝固过程中需满足的方程如下^[10]:

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \cdot \vec{v} - \mu \nabla \vec{v}) + \Delta P = F_b \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度; P 为压力; $\vec{v}$ 为速度矢量; F_b 为流体质量力。

低压铸造充型过程中,熔体的流动属于自由表面流动,其充型过程能量方程:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (h \nabla T) + L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3)$$

式中, c_p 、 h 为熔融金属的比热容和导热系数; L 为潜热; f_s 为熔体凝固阶段的固相分数。

考虑到充型过程中会出现一定的紊流,采用标准的 k - ϵ 湍流模型来描述湍流条件下的平均流动特性,标准 k - ϵ 模型的基本方程^[11]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + p_k - \rho \epsilon \\ \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &\frac{\epsilon}{k} (c_1 p_k - c_2 \rho \epsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

$$p_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\mu_t = \frac{c_p \rho k^2}{\epsilon}$$

式中, k 为紊流脉动性能; ϵ 为紊流脉动动能的耗散率; p_k 为紊动能生成项; μ 为紊流粘性系数; c_1 、 c_2 、 c_μ 、 σ_k 和 σ_ϵ 为常数,分别为 1.44、1.92、0.09、1.0、1.33。

2 初始铸造工艺设计及模拟

2.1 叶轮结构分析

在涡轮增压器中,压气机叶轮安装位置位于转子上,其结构非常复杂^[12],见图 1。叶轮由轮盘、轮毂以及 11 片均布叶片组成的整体式结构,其整体轮廓尺寸为 95 mm×165 mm×165 mm。叶片形状复杂,厚度不均,由下往上厚度递减,最厚处为 3.5 mm,最薄处厚度

不足 1 mm,薄壁处易出现浇不足缺陷。另外,轮毂通孔直径为 12 mm,轮毂与轮盘过渡部位存在较大的热节,易产生缩孔、缩松。叶轮材质为 5052 合金,铸件质量约为 0.689 kg。铸件公差等级小于 IT5 或满足更高公差等级要求,不能有影响强度及品质的缺陷,内部不应有裂纹、缩孔、冷隔以及穿透性缺陷,且内部品质需要满足 HB963^[13] 中 II 类铸件要求,即铸件内部不允许有裂痕、针孔,缩孔等级均按 2 级验收,检测方法为 X 射线检验。此外,铸件表面不允许有冷隔、裂纹、缩孔和穿透性缩松,且表面需进行渗透检验,检验结果按 2 级针孔验收。

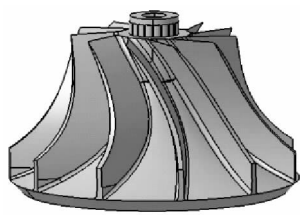


图 1 压气机叶轮三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of compressor impeller

2.2 铸型设计及材料选用

根据叶轮的结构特点以及技术要求,叶轮铸件和铸型三维模型见图 2,分型面设置在轮盘最大截面处。砂芯采用发气量小、强度高的呋喃树脂自硬砂;上模与下模选用导热性好的 H13 模具钢,且在上模设置用于在内浇口分流的分流锥,同时在上模顶部开设 6 条排气通道,用以排出型腔内的气体。

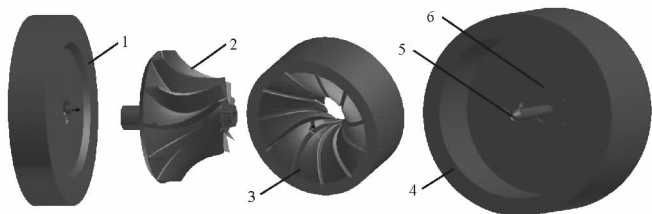


图 2 铸件与铸型三维图

Fig.2 Three-dimensional model of casting and mold

1.下模 2.铸件 3.砂芯 4.上模 5.分流锥 6.排气通道

2.3 工艺参数及边界条件设置

低压铸造的浇注温度选择原则,以保证铸件成形的条件下尽可能选择较低温度,以减少熔体的吸气和凝固收缩,从而减少缩孔、缩松^[14]。其浇注温度比重力铸造低 10~20 °C,选择浇注温度为 690 °C。模具预热温度高,便于铸件充型,但影响铸件的凝固速率。为使铸件实现自上而下的顺序凝固,且内浇道最后凝固,上型预热温度应低于下型 50 °C 左右^[15],故设定上型预热温度为 200 °C,下型预热温度为 240 °C。

低压铸造过程压力随时间变化过程见图 3。根据

工艺要求,计算得到:升液压力 $P_1=0.004\text{ MPa}$;充型压力 $P_2=0.01\text{ MPa}$,充型时间为 4 s ;增压压力 $P_3=0.07\text{ MPa}$,增压时间为 10 s ;保压压力 $P_3=0.07\text{ MPa}$,保压时间为 100 s ;泄压压力为 0.004 MPa ,泄压时间为 10 s 。

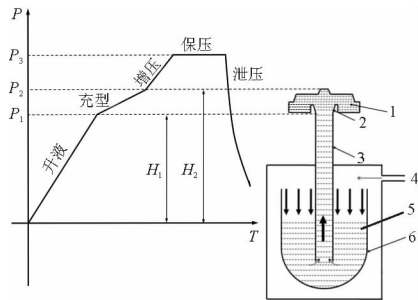


图 3 压力-时间曲线

Fig.3 Pressure-time curve

1.模型型腔 2.内浇道 3.升液管 4.进气口 5.熔体 6.坩埚

将上述参数输入至 ProCAST 中的 CAST 模块进行模拟,其中界面传热系数设定:下模与铸件之间为

$1\,500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;下模外表面设置为空冷;铸件与砂芯之间为 $750\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;铸件与上模之间为 $1\,800\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;砂芯与上下模之间为 $750\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;上模外表面设置为水冷。

2.4 模拟结果及分析

铸件模拟结果与实际缺陷见图 4。可以看出,存在缺陷的部位与实际铸件缺陷基本一致。从图 4a 可见,靠近轮盘的叶片部位均存在浇不足缺陷,且该部位叶片根部存在缩孔,表面品质差,是铸件充型速度较慢,叶片壁薄处冷却凝固导致的。从图 4b 可以看出,由于内浇道凝固较早,轮毂与轮盘过渡部位无法得到有效的补缩,因此在该部位形成缩孔,利用软件测得缩孔体积约为 1.68 cm^3 。从图 4c 可以看出,铸件充型时间为 6.5 s ,相较于设定充型时间,误差较大。待铸件完成顶部轮毂充型后,压力逐渐增大,在压力作用下,原本固相分数较高的固液混合相向浇不足部位流动,即图 4c 显示 A 处

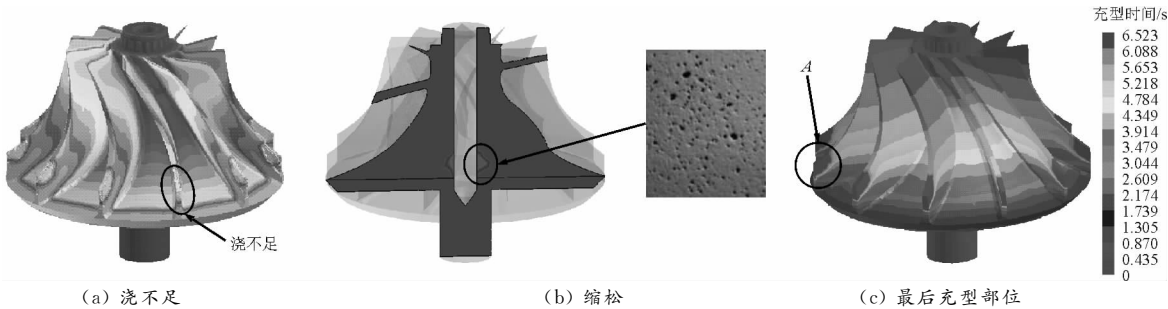


图 4 铸件模拟结果与实际缺陷

Fig.4 Casting simulation results and actual defects

最后充型。

3 工艺改进及模拟分析

3.1 工艺优化

针对铸件出现的浇不足缺陷,改进方案 1:通过提高模具预热温度或提高浇注温度来解决,但模具预热温度或浇注温度提高,铸件的冷却速率下降,使二次枝晶臂间距增大,导致铸件力学性能下降;改进方案 2:通过

提高充型压力,适当加快充型速率,但压力过大会导致夹渣缺陷严重。综合考虑,改进方案以充型压力为研究对象,其他参数与初始工艺相同,探究 0.01 、 0.015 、 0.02 。以及 0.025 MPa 下,铸件孔隙体积、氧化夹渣等级和二次枝晶臂间距的情况,见图 5。综合看来,当充型压力为 0.015 MPa 时,铸件的孔隙体积较小;卷气氧化夹渣等级较低;同时二次枝晶臂间距较小,能获得品质较好的铸件。

针对铸件轮毂与轮盘过渡部位的缩孔缺陷,下铸型

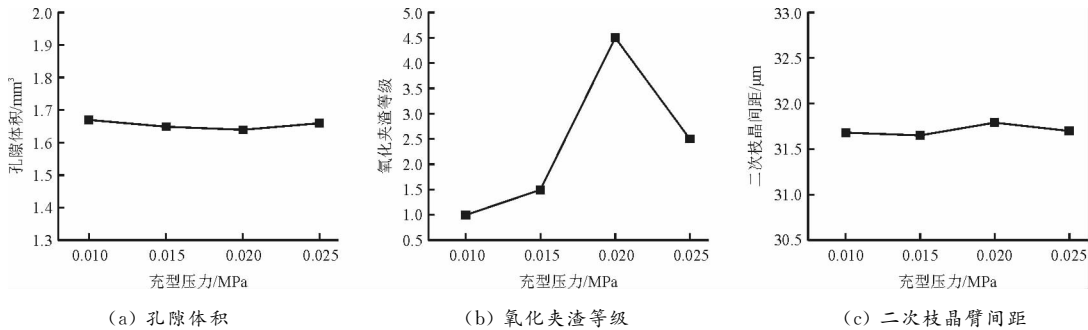


图 5 铸件充型压力对孔隙体积、氧化夹渣等级和二次枝晶臂间距的影响

Fig.5 Influence of casting filling pressure on pore volume, slag inclusion grade of oxidation and secondary dendrite arm spacing

选用石膏型替换 H13 钢,有一定的保温作用,使铸件形成由上至下的顺序凝固,且内浇道最后凝固。传热系数设置:铸件与下模之间为 $750\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;上模与下模之间为 $800\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;下模与砂芯之间为 $300\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,其他参数与初始工艺相同。

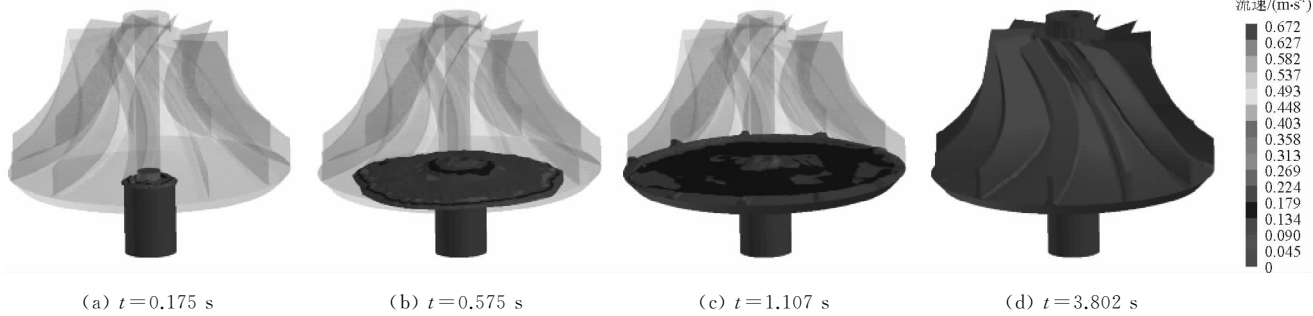


图 6 充型压力调整后铸件充型过程
Fig.6 Casting filling process after mold filling pressure adjustment

平波动较小,平稳上升;当 $t = 3.802\text{ s}$ 时,铸件充型完成,没有出现浇不足部位,且几乎与设定充型时间相同。

图 7 为铸件充型时间和凝固时间的分布云图。从图 7a 可见,铸件充型过程平稳,无明显卷气;从图 7b 可见,铸件形成由上至下的顺序凝固,内浇道最后凝固,有利于铸件补缩,以及形成致密组织。

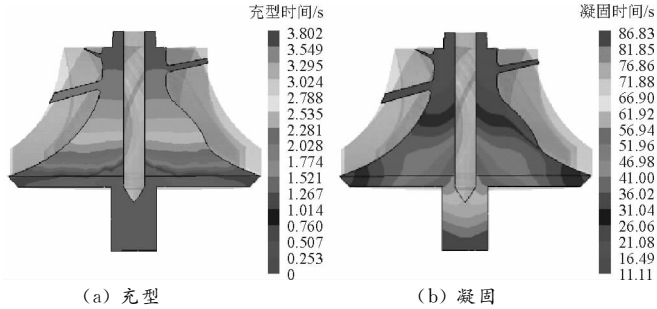


图 7 铸件充型时间与凝固时间分布云图
Fig.7 Distribution mephogram of casting filling time and solidification time

图 8 为改进后工艺铸件内部的缩孔、缩松分布情况。可以看出,铸件内部孔隙度大于 1% 的缺陷分布在叶片边缘,铸件没有孔隙度大于 3% 的缺陷,整体缺陷孔隙度水平较低,组织较为致密,内部品质较好。

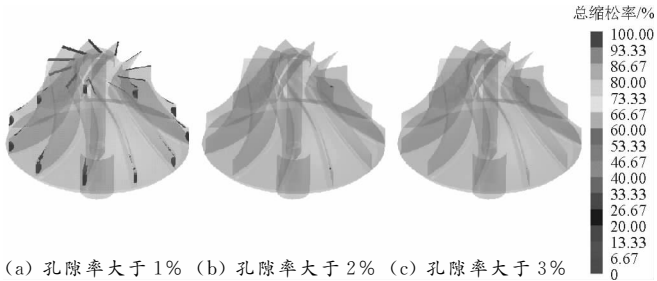


图 8 铸件缩孔缩松缺陷分布
Fig.8 Distribution of shrinkage cavity and porosity defects in casting

3.2 模拟分析

图 6 是充型压力为 0.015 MPa 的铸件充型过程。可以看出,合金熔体通过升液管进入内浇道,经过 0.175 s 填满内浇道。在分流锥的分流作用下,合金熔体均匀向轮盘外围流动,流动平稳;合金熔体充满轮盘,液面水

4 试铸验证

根据优化后的工艺参数,进行小批量的试铸,结果见图 9。可以看出,实际结果与数值模拟基本相同,铸件表面在荧光渗透检验下未观测到连续以及不连续的细长亮线,即表面无裂痕和冷隔类缺陷,同时 2 级针孔验收通过;无影响强度及品质的缺陷;铸件内部针孔、缩松等级能满足 HB963 中 II 类铸件标准。

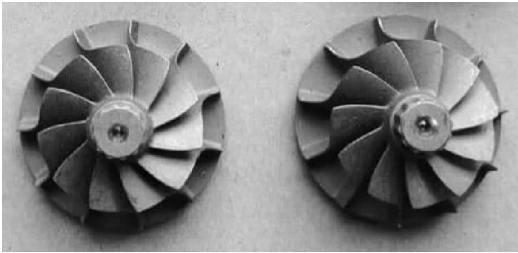


图 9 压气机叶轮毛坯件
Fig.9 Blank of compressor impeller

5 结 论

压气机叶轮铸造工艺改进前后数值模拟的缺陷预测情况,基本与实际铸件相同。改进前,靠近轮盘的叶片部位均存在浇不足缺陷,以及轮毂与轮盘过渡部位存在超出标准的缩孔;改进后,铸件形成由上至下的顺序凝固,内浇道最后凝固,同时铸件整体缺陷孔隙率水平较低,组织较为致密,内部品质较好。最终,小批量试铸毛坯件,检测结果合格。

参 考 文 献

[1] LI H B, GU M Y, TANG M. Modal simulation of turbocharger impeller with considering fluid-solid interaction[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(1): 485-495.
[2] 张仁斌,唐青春,张健,等.某涡轮增压器叶轮的加工工艺分析[J]. 机床与液压, 2013, 41(22): 51-53.

Ag 对精密铸造 Be-Al 合金组织的强化作用

黄旭刚 刘兆刚 张健康 李军义 李春生

(西北稀有金属材料研究院宁夏有限公司稀有金属特种材料国家重点实验室)

摘 要 采用添加微量元素 Ag 的方式强化精密铸造高铍 Be-Al 合金的铸造性能。通过研究高 Be 铸造 Be-Al 合金的制备、腐蚀方法和 SEM、EDS 分析,从微观层面分析 Ag 在 Be-Al 合金中的分布与强化组织。开发出能够显示 Ag 强化组织的腐蚀方法,发现在高 Be 铸造 Be-Al 合金中,Ag 在 Be-Al 界面和 Al 相中,局部富集形成了强化组织。

关键词 精密铸造;高 Be-Al 合金;银;强化组织

中图分类号 TG249.5;TG146.24 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Strengthening Effects of Silver on High Beryllium Aluminum by Investment Casting

Huang Xugang, Liu Zhaogang, Zhang Jiankang, Li Junyi, Li Chunsheng

(State Key Laboratory of Special Rare Metal Material, Northwest Rare Metal Materials Institute)

Abstract: The casting properties of high beryllium Be-Al alloy by investment casting were strengthened by adding trace element Ag. The distribution and strengthening structure of Ag in Be-Al alloy were analyzed from microscopic level by investigating the preparation and corrosion method as well as SEM and EDS analysis. A corrosion method was developed to display the enhanced microstructure of Ag. The results indicate that Ag is locally enriched at the Be-Al interface and in the Al phase in high beryllium cast beryllium aluminum.

Key Words: Investment Casting, High Beryllium-aluminum Alloy, Silver, Strengthening Structure

铸造 Be-Al 合金力学性能优异,具有低密度、高比强度、热稳定性好等特点,在航空、航天及军事领域得到重视。近年来,随着技术发展,铸造 Be-Al 合金的应用越来越广泛,对其性能的要求也越来越高^[1~5]。在 Be-Al 合金中加入微量元素可以强化合金的韧性、强度、流动性^[2],也可添加微量元素制备洛克合金(Al-Be)^[2,3]。

收稿日期:2022-01-23;**修改稿收到日期:**2022-03-19
基金项目:中央引导地方科技发展专项基金资助项目(2020);中国有色集团科技计划资助项目(2018KJJH05);宁夏回族自治区产业创新揭榜资助项目(20200108)
第一作者简介:黄旭刚,男,1979 年出生,工程师,宁夏石嘴山(753000),E-mail:huangxg2050@163.com
引用格式:黄旭刚,刘兆刚,张健康,等. Ag 对精密铸造 Be-Al 合金组织的强化作用[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):126-128.
HUANG X G, LIU Z G, ZHANG J K, et al. Strengthening effects of silver on high beryllium aluminum by investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):126-128.

[3] 董帅, 赵忠兴, 符和锋, 等. 涡轮增压器叶轮低压铸造工艺设计及优化[J]. 沈阳理工大学学报, 2014, 33(3): 55-58.

[4] LIU S G, CAO F Y, ZHAO X Y, et al. Characteristics of mold filling and entrainment of oxide film in low pressure casting of A356 alloy[J]. Mater. Sci. Eng., 2015, A626: 159-164.

[5] LUO A A. Magnesium casting technology for structural applications [J]. J. Mag. Aly., 2013(1): 2-22.

[6] SRINIVASANA, PILLAIU T S, SWAMINATHANJ, et al. Enhanced high temperature properties of low pressure cast AZ91 Mg alloy[J]. Inter. J. Cast Met. Res., 2006, 19:265-268.

[7] 徐岳. 基于 CAD/CAE/CAM 技术的砂型铸造工艺研发[D]. 石家庄: 河北工程大学, 2014.

[8] CHOUDHARI C M, NARKHEDE B E, MAHAJAN S K. Casting design and simulation of cover plate using Auto CAST-X software for defect minimization with experimental validation[J]. Procedia Materials Science, 2014(6): 786-797.

[9] 李云帅, 朱小倩, 林文华, 等. 基于 ProCAST 的汽车轮毂铸造模拟[J]. 铸造, 2020, 69(5): 547-551.

[10] KERMANPUR A, MAHMOUDI S H, HAJIPOUR A. Numerical simulation of metal flow and solidification in the multi-cavity casting moulds of automotive components[J]. J. Mater. Proc. Tech., 2008, 206: 62-68.

[11] SHIVA R, MOHAMMAD M, HAMZE E. Three-dimensional simulation of flow over sharp-crested weirs using volume of fluid method [J]. Journal of Applied Engineering Sciences, 2020, 10(1): 75-82.

[12] 于斐, 蒋玲玲. 基于 VERICUT 的整体叶轮五轴联动数控加工仿真[J]. 机械设计与制造, 2010(7): 159-160.

[13] HB963-2005. 铝合金铸件规范[S].

[14] 张清, 陈玉平. 铝合金石膏型低压铸造工艺规程的研究与应用[J]. 热加工工艺, 2007, 36(17): 27-29.

[15] 田磊. 水龙头本体低压铸造数值模拟与工艺优化[D]. 福建厦门: 集美大学, 2012.

(编辑:张正贺)