

镁合金坐垫骨架压铸工艺数值仿真与优化

刘国军¹ 孙彦华² 周凤岐¹

(1.吉林大学材料科学与工程学院; 2.昆明冶金研究院有限公司)

摘 要 利用 CATIA 软件对坐垫骨架辅助三维造型、网格划分,并通过仿真模拟软件 ProCAST 对其进行了数值模拟,完成了压铸工艺初步优化。首先设计并优化了浇注系统,然后选取浇注温度,模具温度、压射速度和低压压力 4 个工艺参数作为模拟工艺参数,对充型与凝固过程、温度场和速度场进行了数值模拟计算与分析,并对缺陷及其形成位置进行了预测,最终给出优化的压铸工艺参数:浇注温度为 670 ℃,模具预热温度为 190 ℃,压射速度为 6 m/s 和低压压力为 0.15 MPa。

关键词 镁合金;高压压铸;数值模拟;工艺参数

中图分类号 TG249.2;TP311;TG146.22

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simualtion and Optimization of Die-casting Magnesium Alloy Seat Cushion Frame

Liu Guojun¹, Sun Yanhua², Zhou Fengqi¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Jilin University;

2.Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: The die-cast process parameters of AE44 Mg alloy seat cushion frame were optimized by ProCAST software after three-dimensional modeling and meshment by CATIA software. Firstly, the pouring system was designed and gradually optimized. And the filling and solidification process, temperature field and velocity field, as well as prediction of defects with their positions were numerically simulated and analyzed through controlling the simulation process parameters, including pouring temperature, mold temperature, injection speed and low pressure. Finally, the optimal process parameters of die-casting are presented as follows: pouring temperature of 670 ℃, mold temperature of 190 ℃, injection speed of 6 m/s and low pressure of 0.15 MPa.

Key Words: Magnesium Alloy, High Pressure Die Casting, Numerical Simulation, Processing Parameters

随着能源紧缺和环保问题日益突出,镁合金作为最轻的“绿色”金属结构材料逐渐成为轻量化材料研发的热点之一。镁合金由于具有高的比强度、良好的阻尼性能和可降解等特点,广泛应用于电子产品、交通和生物医学领域^[1]。坐垫骨架作为轿车座椅主要承载结构件,在满足强度的同时还要兼顾轻量化^[2]。AE44 镁合金耐腐蚀性强,减震效果优良,可以提升人体的舒适度。另外,其抗蠕变性能好,能够降低服役时的疲劳损伤,有利于延长座椅使用寿命^[3]。当前,轿车用镁合金零部件以压铸成形为主^[4-6]。但是,压铸模具开发周期长、试验成本高的问题限制了压铸镁合金的应用^[7]。坐垫骨架属于大尺寸、薄壁类结构件,现有压铸工艺对其成形挑战很大^[8-11]。数值模拟技术具有节省试验成本、提高研

发效率的特点。为此,利用 CATIA 软件绘制坐垫骨架的三维实体造型,并进行面网格划分;再利用 ProCAST 软件对坐垫骨架压铸充型与凝固过程进行数值模拟,对骨架浇注系统及关键压铸工艺参数进行优化,旨在为其应用提供参考。

1 数值模拟参数设置

1.1 三维造型设计及网格划分

压铸镁合金坐垫骨架轮廓尺寸为 500 mm×400 mm×100 mm,属于大型薄壁类复杂铸件。采用 CATIA 软件绘制坐垫三维造型(见图 1),然后利用 ProCAST 软件的 ProMesh 模块实现网格划分。坐垫骨架

收稿日期:2022-11-20;修改稿收到日期:2023-01-13

基金项目:吉林省科技厅重点研发资助项目(20220201128GX)

第一作者简介:刘国军,男,1978 年出生,教授,长春(130022),E-mail:liuguojun@jlu.edu.cn

通信作者:孙彦华,男,1977 年出生,高级工程师,昆明(650031),E-mail:syh19771108@163.com

引用格式:刘国军,孙彦华,周凤岐. 镁合金坐垫骨架压铸工艺数值仿真与优化[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(8):1 145-1 149.

LIU G J, SUN Y H, ZHOU F Q. Numerical simulation and optimization of die-casting magnesium alloy seat cushion frame[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8):1 145-1 149.

的最小壁厚为 3 mm, 兼顾考虑计算效率与网格数量^[12], 用 3 mm 网格进行划分, 再利用 MeshCAST 模块进行精细网格划分和网格修补, 最终面网格数为 115 168 个, 体网格数为 2 197 614 个。

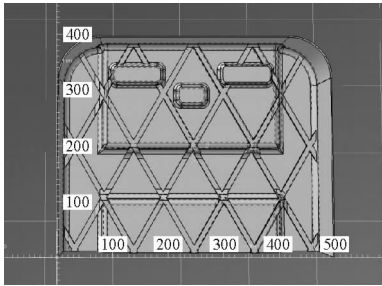


图 1 汽车座椅坐垫骨架三维图

Fig.1 3D diagram of seat cushion frame for automobile

1.2 压铸工艺参数设置

压铸镁合金的研究表明^[13], 在压铸机、合金成分和铸型确定的情况下, 获得高品质铸件的关键是控制压铸工艺参数, 其中浇注温度、模具温度、低压压力和压射速度是关键因素。根据有关研究, 压铸镁合金的浇注温度通常在 630~700 ℃^[13], 压铸模具温度通常控制在 180~280 ℃^[14]。由于高压压铸过程有低速阶段和增压阶段, 为此, 在 0~0.1 s 内以 0.15~0.20 MPa 作为低压压力, 随后升高至 50 MPa 作为模拟试验的增压压力^[15]。另外, 压射速度通常为 2~7 m/s^[16]。表 1 为 6 组典型的模拟工艺参数, 其中, A 组、B 组和 C 组侧重考查压射速度的影响, D 组考查低压压力的影响, 而 E 组和 F 组侧重考查温度的影响。模拟时, 选择压铸模材质为 H13 钢, 铸件材质为 AE44 镁合金。根据对流传热系数公式^[17], 通过计算可得金属液与模具之间的传热系数为 1 000 W/(m²·K), 并将金属型外表面冷却方式设置为空冷。

表 1 模拟压铸工艺参数

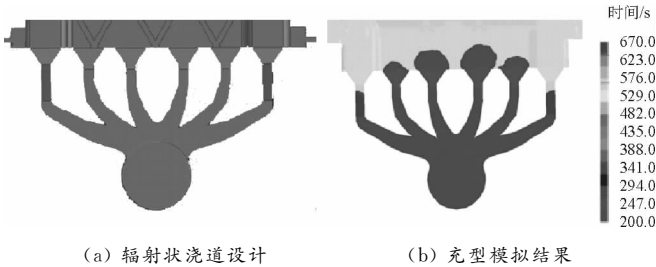
Tab.1 Simulated die casting parameters

组别	浇注温度/℃	模具温度/℃	压射速度/(m·s ⁻¹)	低压压力/MPa
A	670	190	2	0.15
B	670	190	6	0.15
C	670	190	7	0.15
D	670	190	6	0.20
E	690	210	6	0.15
F	640	170	6	0.15

2 浇注和排气系统设计与优化

根据同时到达原则、截面面积递减原则和流道散热原则, 优化坐垫骨架的浇注系统。坐垫骨架壁厚较薄, 导致金属液流动变慢, 将先充满型腔的中心区域, 再向四周流动, 最后至边缘部位。为此, 考虑在铸件边缘位置设置排溢系统和补缩系统, 有利于熔体中的残余气体

及夹杂物排出。经多次优化, 浇道系统设计成辐射状(见图 2)。

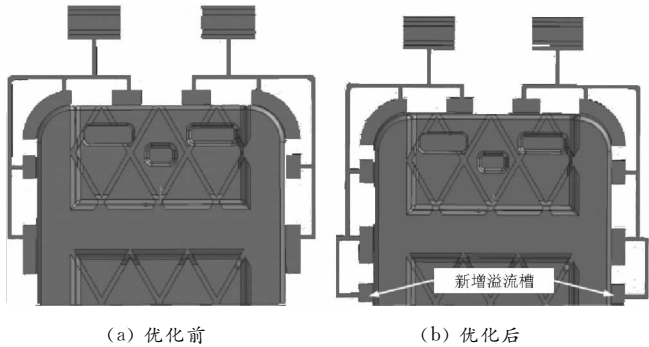


(a) 辐射状浇道设计 (b) 充型模拟结果

图 2 辐射状浇道设计及其充型模拟结果

Fig.2 Radiator shape gate design and filling simulation results

通过初步分析, 将溢流槽设在铸件最后充型的位置。但是, 模拟发现铸件边角处充型困难并伴有残存的气体和夹杂物, 易形成夹杂等缺陷。为此, 增加 1 组溢流槽以利于减少缺陷。溢流槽的截面积一般为内浇道截面积的 20%~50%, 通过计算, 溢流槽的截面积为 40~100 mm², 这里采用 10 mm×10 mm 作为排气槽尺寸。优化前后的溢流槽见图 3。



(a) 优化前 (b) 优化后

图 3 溢流槽的优化前、后对比

Fig.3 Comparison of overflow slot before and after optimization

3 模拟充型结果与分析

图 4 是 A~F 组的模拟压铸充型结果。当压射速度为 2 m/s 时, A 组在 0.022 3 s, 金属液充满浇道, 无明显卷气现象(见图 4a)。但是, 在 0.025 6 s, 在填充区域内部出现了灰色闭合区域(见图 4b), 这可能是压射速度过低, 致使有限的金属液进入型腔中, 金属液横向流动困难所导致的。当压射速度为 6 m/s 时, B 组合金液充型过程平稳, 无“卷气”现象, 横向充型顺序较好, 金属液前沿界面相对平稳(见图 4e~图 4g), 这有利于夹杂物排出; 完全充型用时为 0.022 1 s(图 4h), 也在压铸镁合金的推荐范围之内^[13]。当压射速度增加到 7 m/s 时, C 组在 0.017 6 s, 浇道内无卷气现象(见图 4i), 金属液同步性优于 A 组。在 0.019 8 s、0.027 1 s(图 4j、图 4k), 有局部灰色未充型的空隙, 这可能是压射速度过高, 导致金属液充型速度太快, 进而加剧了充型的波动性。对于压铸充型过程而言, 应保证充型顺序以减少铸

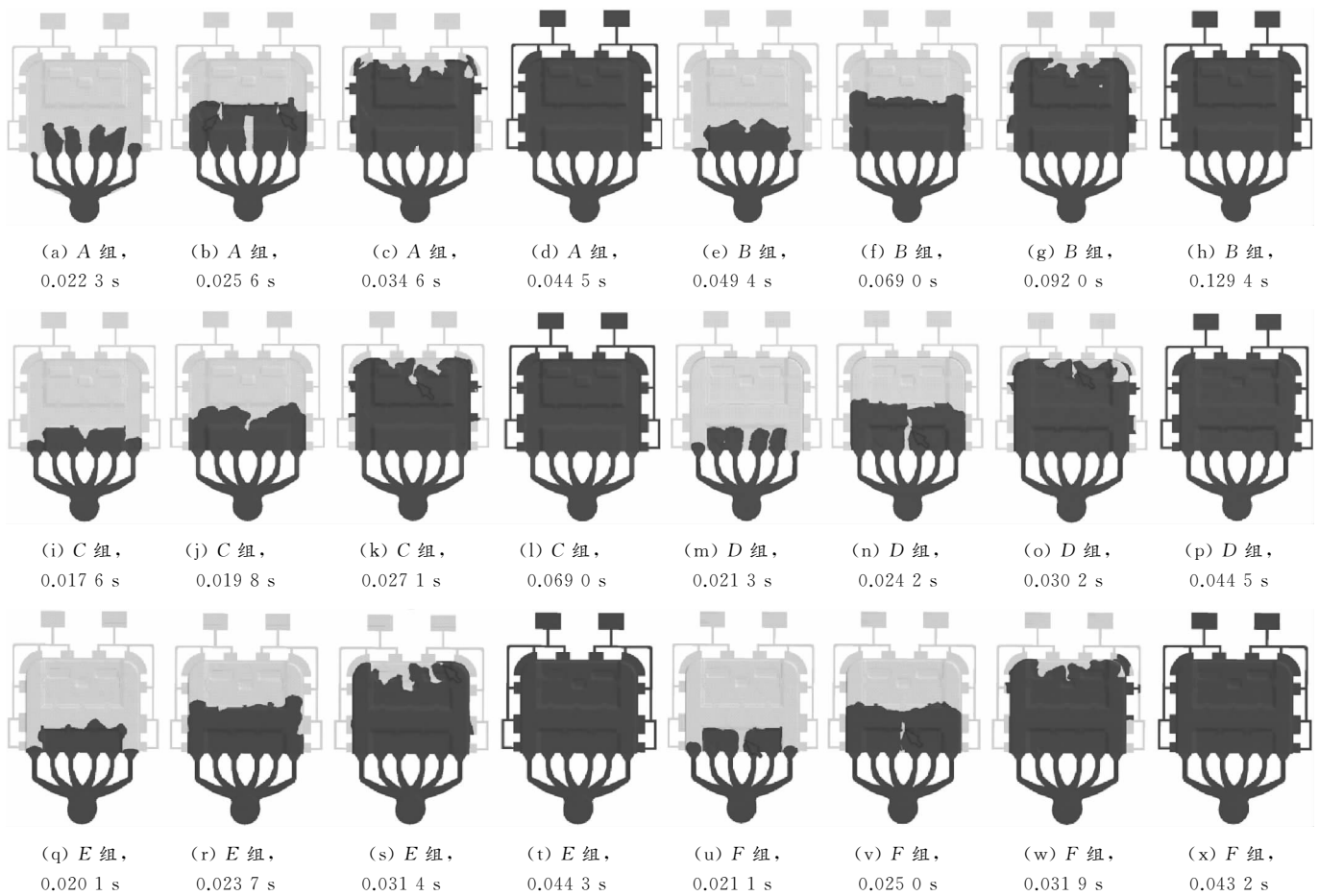


图 4 A~F 组模拟充型结果

Fig.4 A~F group filling simulation results

件位置的熔体气体含量。在模拟结果上体现为未填充区域(灰色)应该保持联通而不是被熔体包裹起来,以及在此基础上的液面平稳为佳。这样,对比 A、B 和 C 组的模拟结果,发现 B 组参数下的充型顺序较好。将低压压力由 0.15 MPa 提高到 0.20 MPa,D 组在 0.021 3 s~0.044 3 s 时(图 4m~图 4o),铸件中出现灰色闭合区域,有“卷气”现象发生,充型顺序不如 B 组,这可能与低压压力偏高时,金属液的流动速度过快出现紊流有关。

为进一步考查温度对充型顺序的影响,在 B 组参数的基础上,通过调整浇注温度和模具温度,设置了 E 和 F 组。E 组在 0.020 1 s 平稳(见图 4q),在 0.031 4 s 时,结构复杂部位附近有少量的闭合区域,显示该区域内气体难以排出,易形成缺陷(见图 4s)。F 组在 E 组基础上适当降低了浇注和模具温度,由液面前沿来看,充型顺序(图 4u~图 4x)略优于 E 组。但是,在仍能观察到局部灰色未充型的空隙(图 4v)。

图 5 是 E 组和 F 组的凝固时间。可以看出,E 组铸件凝固时间为 143.76 s(见图 5a),而 F 组为 116.98 s(见图 5b)。这表明较低温度下,凝固时间较短,但易产生“卷气”缺陷。综上,根据液面前沿的平整度及充型内

部的未充满区域程度来看(图 4),在 A~F 组中,B 组表现出最佳的充型顺序。

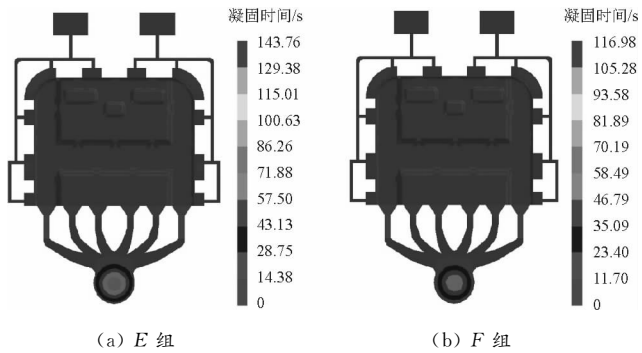


图 5 E 和 F 组的凝固时间比较

Fig.5 Solidification time of E and F group

图 6 为 A、B、D 和 E 组的充型时间图。可见,A 组的中轴线附近区域不满足顺序凝固(见图 6a),局部加强筋位置充型效果差,可能产生浇不足缺陷;B 组铸件部位实现顺序充型,排气系统部位最后充型(见图 6b);D 组顺序充型情况差,充型液面不平整,中轴线部位充型滞后(见图 6c);E 组液面相对平稳,但充型后期出现紊流现象。由比色卡不同颜色来看,B 组和 E 组具有较平稳的充型顺序。

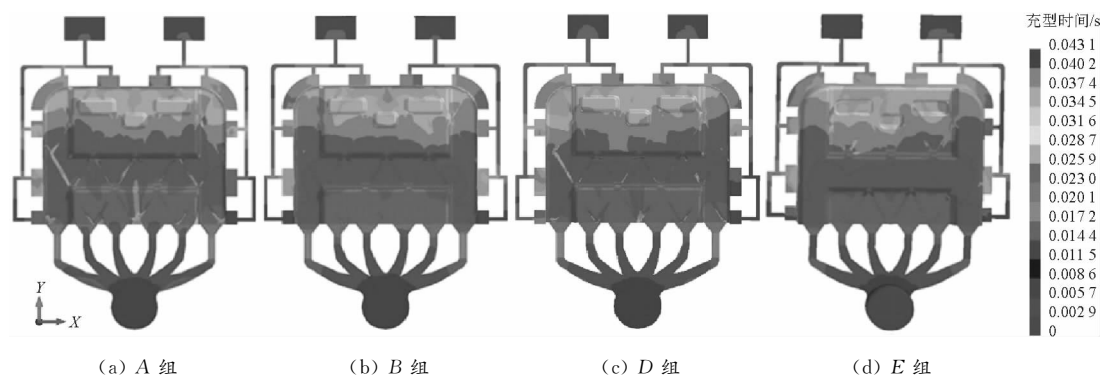


图 6 A、B、D 和 E 组的充型时间

Fig.6 Filling time of different groups

图 7 为 B 组和 E 组缩孔、缩松分布。可以看出，两组参数下的缺陷分布位置相似。B 组缩松总体积为 8.6 cm³，平均缩松率为 28.3%，经统计，铸件总体积为 1 041.5 cm³，因此产生缩松的区域占总体积的 0.83%；而 E 组缩松体积为 11.1 cm³，平均缩松比例为 32.2%。这表明 B 组条件下的铸件具有较少的缺陷。

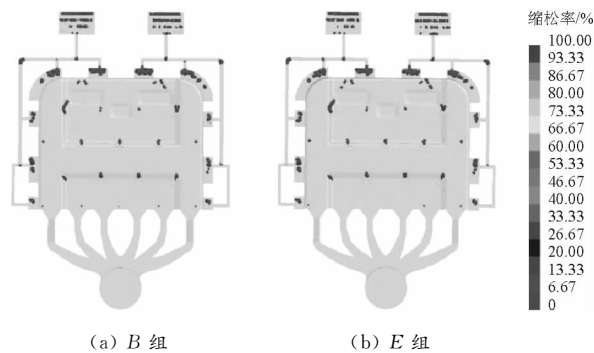


图 7 B 组和 E 组缩孔、缩松分布图

Fig.7 Shrinkage porosities and cavities in group B and E

图 8 为 B 组铸件 Y 轴和 X 轴任一截面的充型时间。可以看出，在任意 Y 方向截面，金属液按照与浇口的距离远近顺序充型（见图 8a）；对于任意 X 方向截面，相同平面的充型时间基本保持一致（见图 8b）。这主要是 B 组的各个模拟参数相对合理，协同作用下^[18]，最终获得了较好的充型顺序及较少缺陷组织。

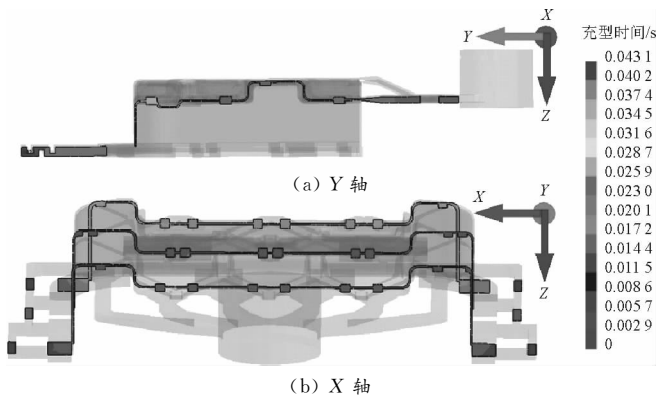


图 8 B 组铸件 Y 轴和 X 轴任一截面的充型时间图

Fig.8 Filling time at section of Y and X axis of group B

4 结 论

(1)设计并优化了镁合金坐垫骨架浇注和排溢系统，将溢流槽设置在边缘和死角部位，排气孔尺寸设置为 10 mm×10 mm，改进了浇道的形状及尺寸，解决了模拟过程中易产生的卷气、浇不足等缺陷，实现了顺序凝固。

(2)工艺参数改进及模拟结果表明，AE44 镁合金坐垫骨架的最佳压铸工艺参数：浇注温度为 670 ℃，模具温度为 190 ℃，压射速度为 6 m/s 和低压压力为 0.15 MPa。在该工艺参数下，金属液流动平稳，铸件充型完整，铸造缺陷较少。

参 考 文 献

- [1] 曾小勤,陈义文,王静雅,等.高性能稀土镁合金研究新进展[J].中国有色金属学报, 2021, 31(11): 2 963-2 975.
- [2] 战磊,孙军,何金光,等.汽车座椅骨架轻量化的研究概况[J].汽车零部件. 2015, 7(11): 68-73.
- [3] ZHU S, ABBOTT T, NIE J, et al. Re-evaluation of the mechanical properties and creep resistance of commercial magnesium die-casting alloy AE44[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9 (5): 1 537-1 545.
- [4] 王雪杨,李子昕,胡波,等.真空压铸镁合金减震塔的组织性能[J].特种铸造及有色合金, 2022, 42(4): 467-472.
- [5] 郁鑫,王国红,白扬,等.压铸耐热镁合金的研究现状和发展趋势[J].特种铸造及有色合金, 2022, 42(2): 144-151.
- [6] 韩鹏飞.基于 ProCAST 的底盘支架压铸成型数值模拟及工艺优化[D].上海:上海工程技术大学, 2020.
- [7] 樊晓泽,王瑞,马骏,等.高性能压铸稀土镁合金材料研究现状[J].铸造技术, 2022, 43(2): 208 -211.
- [8] 徐鹏辉.流量计主体压铸工艺数值模拟与优化[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(9): 1 176-1 181.
- [9] 李峰珠,吴倩倩.转接座压铸数值模拟与工艺优化[J].铸造, 2022, 71(3): 291-295.
- [10] 闫俊,石帅,范卫忠,等.浇注温度对压铸 Al-10Si-0.3Mg 铝合金组织演变及性能影响[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1 446-1 449.
- [11] 侯丽彬,白明月,王琳琳.浅析大型压铸模零件设计的结构优化[J].铸造, 2022, 71(6): 689-693.

砂型和表面涂层对 ZL702A 合金组织和力学性能的影响

毛郭灵¹ 杨晨帆¹ 李宇飞² 李泽华² 王根全¹ 周海涛¹
[1.中国北方发动机研究所(天津); 2.沈阳铸造研究所有限公司]

摘 要 利用金相显微镜和室温拉伸试验研究了砂型和表面涂层对 ZL702A 合金组织和力学性能的影响。结果表明,金属型铸型的综合力学性能最好,派普树脂砂铸型的综合力学性能最差,呋喃树脂砂铸型的综合力学性能与铬铁矿砂型的相差不大。考虑到工业化成本,采用呋喃树脂砂。醇基刚玉粉涂料涂层砂铸型的表面粗糙度最高,存在一些夹渣缺陷,醇基锆英粉涂料和醇基石英粉-石墨粉涂料涂层铸型的表面光洁度差别不大,3 种涂层合金的显微组织差异较小。醇基石英粉-石墨粉涂料涂层铸型的综合力学性能最高,醇基刚玉粉涂料涂层铸型的综合力学性能最低。

关键词 ZL702A;砂型;表面涂层;铸造;综合力学性能

中图分类号 TG166.3;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.027 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Sand Molds and Coatings on Microstructure and Mechanical Properties of ZL702A Alloy

Mao Guoling¹, Yang Chenfan¹, Li Yufei², Li Zehua², Wang Genquan¹, Zhou Haitao¹
[1.China North Engine Research Institute (Tianjin); 2.Shenyang Foundry Research Institute Co., Ltd.]

Abstract: Effects of sand molds and coatings on microstructure and mechanical properties of ZL702A alloy were investigated by metallographic microscope and tensile test at room temperature. The results indicate that the comprehensive mechanical properties of metal mold casting are desirable, while those of the piper resin sand mold casting are the worst, and the comprehensive mechanical properties of the furan resin sand mold casting are similar to those of the chromite sand mold. Therefore, furan resin sand was adopted considering the industrial cost. The surface roughness of sand mold casting with alcohol based corundum powder coating is the worst with slag inclusion defects, and surface roughness of casting with alcohol based zircon powder coating has little difference to those of that with alkyl stone power graphite powder coating. The difference between three kinds of coating alloys can be ignored. The comprehensive mechanical properties of casting with alkyl stone power graphite powder coating are desirable, while those of that with alcohol based corundum powder coating are the lowest.

Key Words: ZL702A, Sand Mold, Coatings, Casting, Comprehensive Mechanical Properties

ZL702A 合金具有优异的铸造性能、高的比强度、低的线膨胀系数等,被广泛应用于汽车制造领域,如内燃机机体、气缸盖等^[1-3]。砂型和涂料是保证铸件合格率的关键因素之一,一直以来受到研究者密切关注^[4-6]。

余洛生等^[7]研究了呋喃树脂加入量和固化剂含量对其收缩性的影响。李健^[8]研究表明,选用铬铁矿砂可解决很多铸造质量问题。张林等^[9]研究了醇基白刚玉/锆英粉复合涂料的高温性能。姜常鸣^[10]研究表明,石墨-石

收稿日期:2022-11-02;**修改稿收到日期:**2023-04-12
第一作者简介:毛郭灵,男,1994 年出生,助理研究员,天津(300400),E-mail:maoguoling@ 163.com
引用格式:毛郭灵,杨晨帆,李宇飞,等. 砂型和表面涂层对 ZL702A 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(8):1 149-1 152.
MAO G L, YANG C F, LI Y F, et al. Effects of sand molds and coatings on microstructure and mechanical properties of ZL702A alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8):1 149-1 152.

[12] 夏盛来.基于工程应用的有限元网格划分研究[J].飞机设计, 2008, 28(4): 10-13.

[13] 潘宪曾.压铸模设计手册[M].北京:机械工业出版社, 1998.

[14] 周友松,李远超,熊英.镁合金压铸工艺改善[J].金属加工(热加工), 2015, 19(11): 56-58.

[15] BHASKAR M, ANAND G, NALLUSWAMY T, et al. Die life in aluminium high-pressure die casting industries[J]. Journal of The Institution of Engineers, 2022, D103(1): 1-7.

[16] 马文超.压铸模数学模型及测温试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.

[17] 王伟,周研,屈晓阳,等.基于 ProCAST 的 40CrNiMo 金属型铸造微观组织分析[J].铸造, 2019, 68(5): 449-455.

[18] 姜博,姜巍,刘利萍,等.基于数学形态学方法的镁合金 AM50 压铸组织的定量金相分析[J].中国体视学与图像分析, 2016, 21(3): 292-297.