

Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体的倾转铸造模拟与试制

汤华平^{1,2} 毕云杰¹ 王渠东² 韩 斌³ 娄俊岭³ 张 磊⁴ 关俊清⁴
(1.季华实验室; 2.上海交通大学材料科学与工程学院; 3.上海汽车制动系统有限公司;
4.上海永茂泰汽车科技股份有限公司)

摘 要 针对 Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体的倾转铸造工艺,利用 ProCAST 软件对铸件充型和凝固过程进行模拟,分析缺陷形成原因。对卡钳壳体结构进行优化,扩大铝液流动和补缩通道,并进行数值模拟和试制验证。结果表明,优化后的铸件实现了顺序凝固,避免形成孤立液相区并消除了缩孔缺陷。采用倾转铸造工艺试制的 Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体铸件表面光洁,内部组织致密均匀,且无缩孔、缩松缺陷。

关键词 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金;倾转铸造;数值模拟

中图分类号 TG146;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Tilting Casting Simulation and Verification of Al-5Mg-3Zn-1Cu Caliper

Tang Huaping^{1,2}, Bi Yunjie¹, Wang Qudong², Han Bin³, Lou Junling³, Zhang Lei⁴, Guan Junqing⁴

(1.Jihua Laboratory; 2.School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University;

3.Shanghai Automotive Brake Systems Co., Ltd.; 4.Shanghai Yongmaotai Automotive Technology Co., Ltd.)

Abstract: Aiming at the tilting casting process of Al-5Mg-3Zn-1Cu caliper, the filling and solidification process of the casting were simulated by the ProCAST software to analyze the causes of defects formation. The structure of caliper shell was optimized to expand the flow and feeding channels of molten aluminum, and the numerical simulation and experimental verification of Al-5Mg-3Zn-1Cu calipers were carried out. The results indicate that sequential solidification is realized after optimization, avoiding the formation of isolated liquid phase zone, thus eliminating shrinkage defects. The surface of castings by tilting casting process is smooth, and the microstructure is uniform and compact without shrinkage defects.

Key Words: Al-5Mg-3Zn-1Cu Alloy, Tilting Casting, Numerical Simulation

Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金是一种性能优异的铸造铝合金,经固溶和时效处理后,其抗拉强度可达到 500 MPa,且伸长率高于 8%^[1],适用于汽车零部件的生产^[2]。制动器卡钳壳体是汽车制动系统的关键零件,通常采用 Al-7.0Si-0.3Mg 合金(A356)经金属型重力铸造制备,但其力学性能较低,其抗拉强度约为 250 MPa,伸长率约为 4%^[3],卡钳壳体轻量化的进程比较缓慢。因此,采用高强韧 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金生产卡钳壳体,铸件力学性能显著提升,有助于实现卡钳壳体减重,助力汽车节能减排。但 Al-5Mg-3Zn-1Cu 作为一种新型的 Al-Mg 系合金,其凝固温度区间较宽,铸造性能不如 Al-Si 系合金,因此,有必要开发合适的铸造成形工艺。

卡钳壳体重力铸造过程中,由于结构复杂,截面变

化大,铝液充型速度较快,导致波动较大、排气困难等,容易形成缩孔、缩松等缺陷^[4]。与重力铸造相比,倾转铸造具有充型过程可控、充型平稳、温度梯度小和补缩效果好等特点^[5-6],有望实现高性能 Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体的制备。结合数值模拟技术,可以快速实现倾转铸造工艺模拟仿真^[7-8],分析铸造过程中缺陷及其形成原因,为卡钳壳体数模结构的工艺优化提供解决方案。

因此,针对 Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体的倾转铸造工艺,利用 ProCAST 软件模拟卡钳壳体的倾转铸造充型和凝固过程,预测铸造缺陷的分布,提出卡钳壳体的数模结构优化方案,消除缩孔铸造缺陷;并采用倾转铸造工艺试制 Al-5Mg-3Zn-1Cu 卡钳壳体,分析材料组

收稿日期:2022-08-16;修改稿收到日期:2022-09-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1902220,51674166);季华实验室自立项目(X190351TM190)
第一作者简介:汤华平,男,1990 年出生,博士,广东佛山(528200),E-mail:tanghp@jihualab.ac.cn
通信作者:王渠东,男,1964 年出生,教授,上海(200240),E-mail:wangqudong@sjtu.edu.cn
引用格式:汤华平,毕云杰,王渠东,等. Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体的倾转铸造模拟与试制[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(5): 690-694.
TANG H P, BI Y J, WANG Q D, et al. Tilting casting simulation and verification of Al-5Mg-3Zn-1Cu caliper[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5): 690-694.

组织和缺陷情况,验证结构优化方案的可行性,为高强韧铝卡钳的研制提供参考。

1 试验材料与方

图 1 为结构优化前卡钳壳体的三维模型。卡钳壳体的轮廓尺寸为 184 mm×175 mm×120 mm,最薄处约为 15 mm,无集中热节。采用 Solidwork 软件建立卡钳壳体的三维模型后导入 Mechcast 进行网格划分,有限元体积网格个数为 649 465 个,节点数为115 258个,划分网格后的数学模型见图 1c。另外,基于宏观缩孔判据,分析了凝固过程形成的缩孔,指导卡钳数模结构的优化。

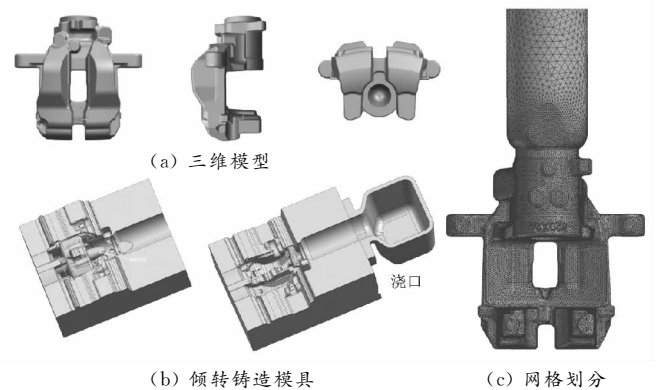


图 1 结构优化前卡钳壳体的三维模型、倾转铸造模具与网格划分

Fig.1 3D model, caliper housing mould and grid meshment before structural optimization

根据结构优化后卡钳铸件的数模结构设计倾转铸造模具,见图 1b。模具材质为 P20 模具钢,分为上、下型;方形浇口通过冒口与铸件连接,并设计了顶杆机构、抽芯机构和排气系统。根据合金成分,采用 Jmat Pro 计算获得 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金的固、液相线的温度区间为 455~624 ℃。综合合金凝固区间和前期铸造经验,优选的倾转铸造工艺(铸造与模拟)参数如下:浇注温度为 700 ℃,模具温度为 300 ℃,模具倾转转速为 9°/s,充型时间为 10 s,留模时长为 240 s。

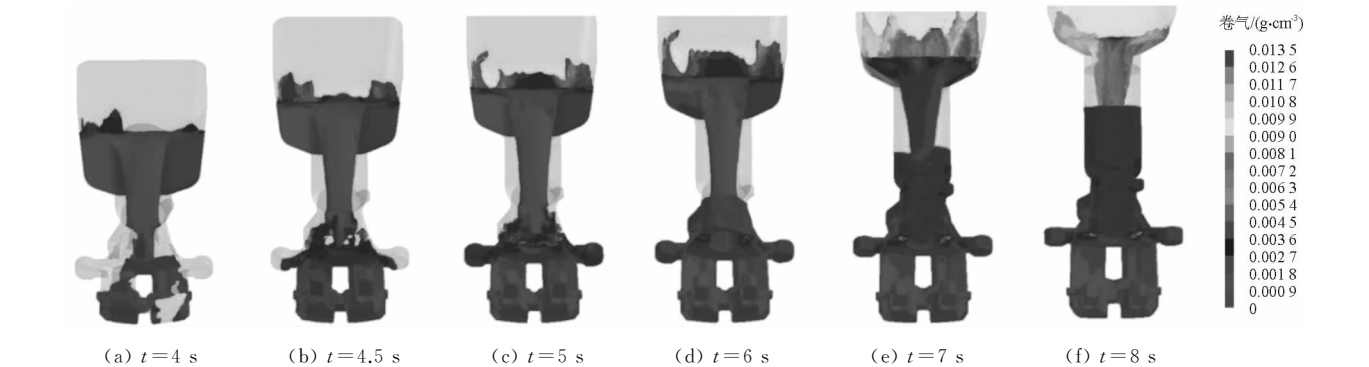


图 3 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金卡钳壳体充型过程流动场模拟

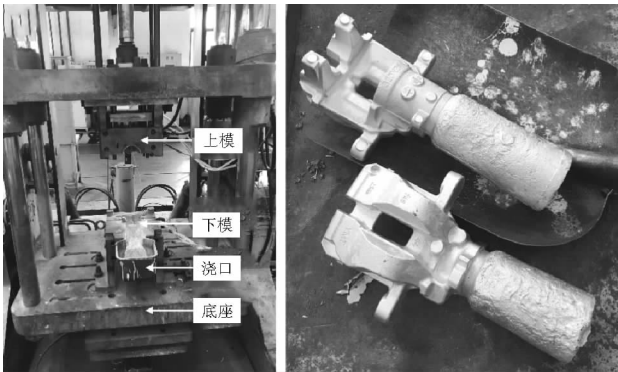
Fig.3 Flow field simulation of Al-5Mg-3Zn-1Cu caliper housing during filling process

Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体的倾转铸造过程如下:①准备:预热模具和原材料准备;②熔炼:先纯铝,后添加纯 Zn、Al-50Cu 中间合金、纯 Mg;③精炼:加入铝合金三合一精炼剂(主要成分为 NaCl、Na₂SO₄ 和 CaF₂)进行精炼;④除气除渣;⑤浇注:静置后浇注,倾转铸造完成;⑥取件。铸造过程中,利用全谱直读 Perkin Elmer Plasma 400 型电偶等离子体发射光谱仪(ICP)进行试样成分测定,合金成分见表 1。对倾转铸造后 Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体进行 X 光探伤和切割解剖,观察内部组织与缺陷情况。倾转铸造设备和生产的 Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体见图 2。

表 1 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of the Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy %

ω _B						
Mg	Zn	Cu	Fe	Si	Ti	Al
4.96	3.05	1.02	0.08	0.15	0.02	余量



(a) 倾转铸造设备 (b) 铝卡钳壳体

图 2 倾转铸造设备及其生产的 Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体

Fig.2 Tilting casting equipment and produced Al-5Mg-3Zn-1Cu caliper housing

2 试验结果与讨论

2.1 优化前卡钳壳体的数值模拟

对优化前卡钳壳体充型过程进行模拟,充型过程流动场见图3。可以看出,随着模具倾转至垂直,铝液流

入模具至充满腔体。充型 4~5 s 时,由于铝液的高度差较大,产生较大速度,发生紊流,此时,卷气较为严重;充型 6~8 s 时,铸件内依然存一定程度的卷气。由此可见,优化前卡钳铸件在充型过程中,铝液发生紊流,并伴随较为严重的卷气。

充型后,卡钳壳体凝固过程温度场见图 4。可以看出,铸件两侧的“双耳”和“双爪”最先开始凝固,之后由表层向心部、由底部向上部的发生凝固。从凝固温度场

模拟结果看,铸件实现了较好的顺序凝固。然而,其心部凝固情况不能从图 4 中得出。因此,进一步分析了凝固过程的孤立液相区分布,见图 5。可以看出,开始凝固阶段(固相率从 30%~60%),按顺序进行凝固;当凝固率达 60%~70%时,卡钳端头出现固液相分离,形成孤立液相区,这将阻碍该区域及其下的区域的补缩,易形成缩孔与缩松;到凝固后期,凝固主要发生在冒口,并形成集中缩孔。

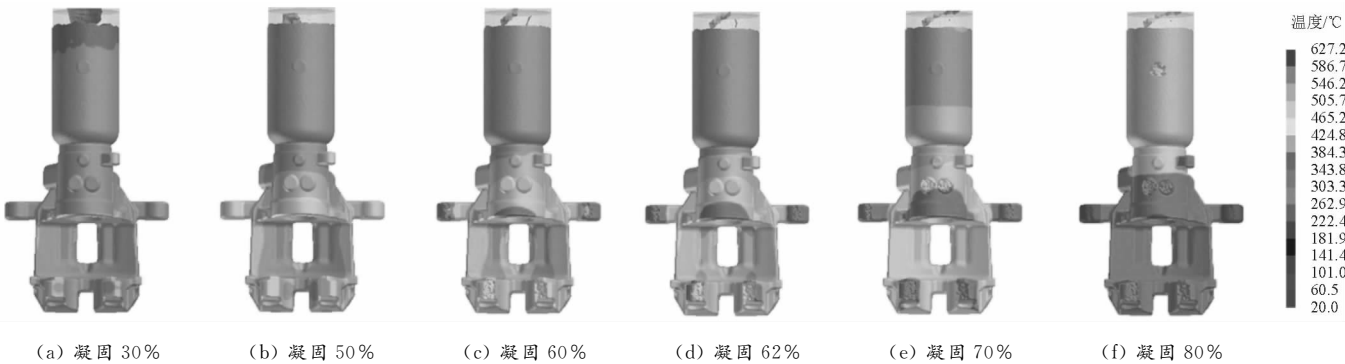


图 4 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金卡钳壳体凝固过程温度场模拟

Fig.4 Temperature field simulation of Al-5Mg-3Zn-1Cu caliper housing during solidification process

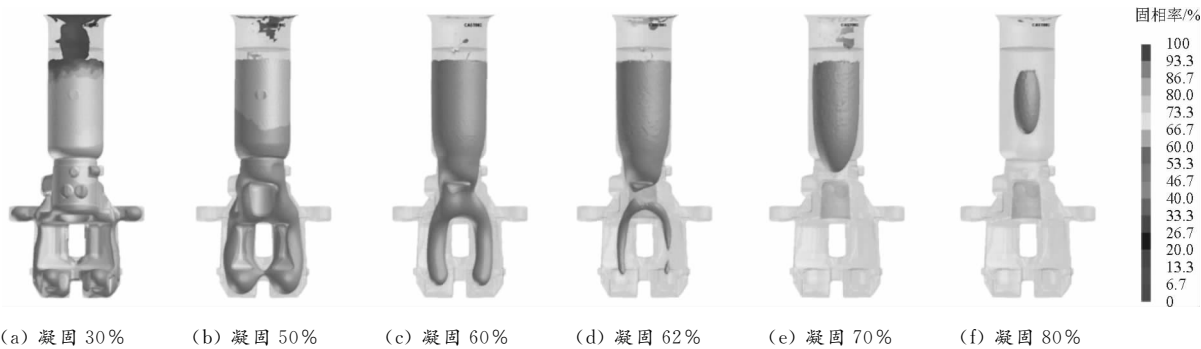


图 5 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金卡钳壳体凝固过程固液相变化

Fig.5 Variation of solid-liquid phase in Al-5Mg-3Zn-1Cu caliper housing during solidification process

图 6 为结构优化前卡钳壳体的铸造缺陷分布图。可以看出,除在冒口处形成集中缩孔外,铸件内形成多处、大小不一的缩孔,而缩松几乎没有。另外,缩孔主要分布在铸件上部,处于凝固后期阶段。通常,缩孔、缩松缺陷是由于液固相变的收缩无法进行补缩造成,这与充

型和凝固过程模拟中形成的孤立液相区对应。缩孔类缺陷的形成,将大大降低铸件品质。

综上所述,优化前的充型过程中,在 4~6 s 之间出现紊流,卷气风险较大;凝固过程中,当固相率在 60%~70%之间,卡钳端头处发生过早凝固,中断顺序凝固,形成孤立液相区,导致形成缩孔缺陷。

2.2 结构优化后卡钳壳体的数值模拟

为避免端头处过早凝固,对卡钳壳体结构进行优化,即对卡钳端头处扩大补缩和流动通道,使该区域的凝固速度减慢,抑制孤立液相区形成,见图 7。主要是对端头进行了结构优化,如中心孔半径减小 5 mm,并加大孔的锥度,见图 7d,从而增大补缩通道,有利于平稳充型,其他位置材料亦有所增加,见图 7e 和图 7f。

对结构优化后卡钳壳体的充型和凝固过程进行模拟,结果见图 8。结果表明,铝液充型平稳,避免紊流发

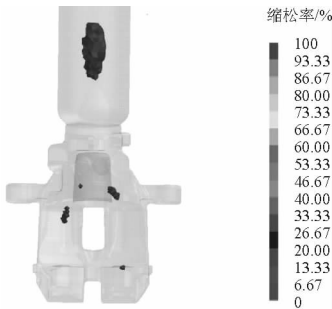


图 6 卡钳铸件的缩孔、缩松分布

Fig.6 Distribution of shrinkage cavities and porosities in caliper casting

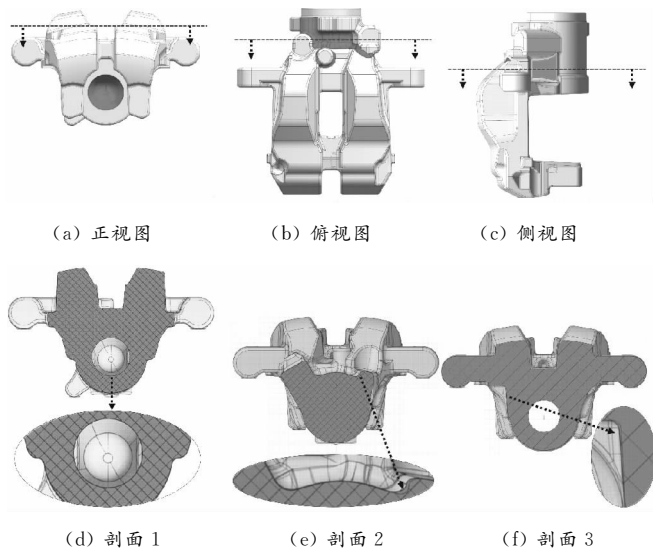


图 7 卡钳壳体结构优化示意图

Fig.7 Schematic diagram of structural optimization of caliper housing

生,卷气程度轻微。由此可见,通过对卡钳铸件的结构优化,即扩大补缩通道和流动通道后,使充型过程平稳,卷气倾向大大降低,有利于制备高品质铸件。凝固过程固液相变化见图 9。可以看出,铸件在凝固开始阶段,固相率在 10%~50%之间,较好地实现了顺序凝固;在凝固中期阶段,固相率从 50%~65%,均没有发生液相分离;至凝固后期,固相率从 65%~80%,冒口与铸件始终没有断开,冒口补缩效果良好。

图 10 为结构优化后卡钳壳体的缺陷分布。可以看出,除在冒口处形成集中缩孔外,铸件内无缩孔缺陷。模拟结果表明,优化后卡钳壳体充型过程平稳,卷气倾向较小;凝固过程实现顺序凝固,冒口补缩效果良好,可以获得质量较好的卡钳壳体。由此可见,通过优化卡钳壳体的结构,扩大铝液的流动和补缩通道,可使充型过程平稳,实现顺序凝固,避免形成孤立液相区,消除缩孔类缺陷,有望获得较高品质的卡钳壳体。

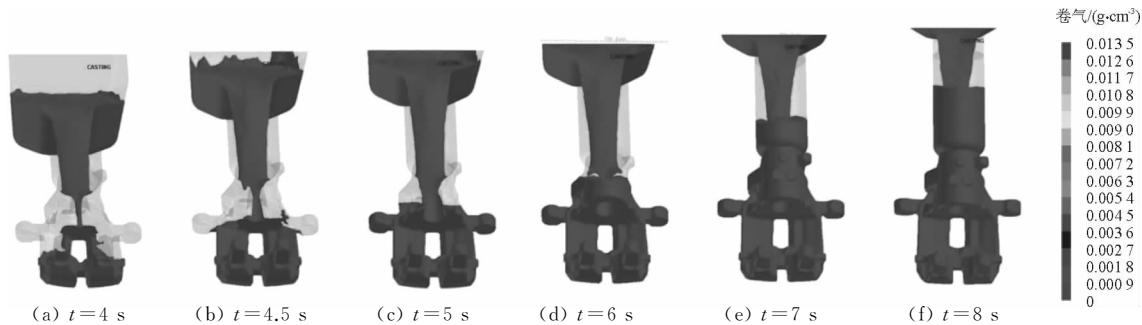


图 8 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金卡钳壳体充型过程流动场

Fig.8 Flow field of Al-5Mg-3Zn-1Cu caliper housing during filling process

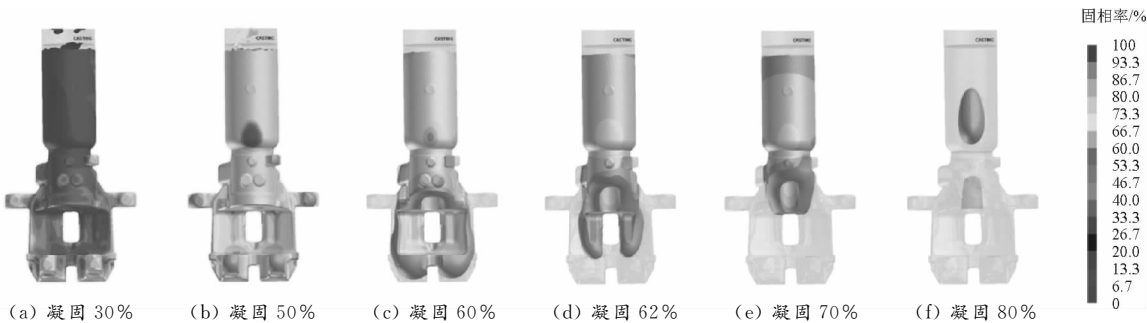


图 9 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金卡钳壳体凝固过程固液相变化

Fig.9 Variation of solid-liquid phase in Al-5Mg-3Zn-1Cu caliper housing during solidification

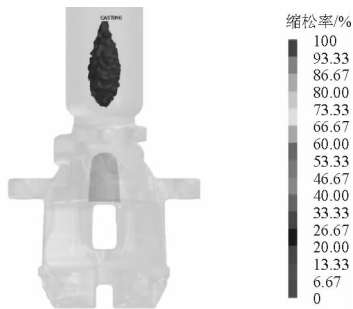


图 10 结构优化后卡钳壳体的缺陷分布

Fig.10 Distribution of shrinkage cavities and porosities in caliper casting after structure optimization

2.3 Al-5Mg-3Zn-1Cu 卡钳壳体的试制验证

根据结构优化后卡钳壳体的数模结构,完成了卡钳壳体模具的设计,并根据优选的工艺参数,进行了倾转铸造,试制了小批量的卡钳壳体。选取中间生产阶段浇注的卡钳铸件做 X 射线探伤及切割解剖。图 11 为卡钳铸件及 X 射线探伤结果。可以看出,卡钳外观光洁,弓背和双耳位置均成像均匀,没有发现缩孔等缺陷。由于卡钳端头部位比较厚,X 射线很难穿透,形成灰白相间衬度像,见图 11e 和图 11f。因此,需要进一步对该端头部位进行解剖。图 12 为卡钳铸件端头的剖面及相应

显微组织。对剖面磨光后,发现在整个剖面没有发现缩孔缺陷,见图 12b。进一步对剖面的不同位置进行金相

观察,发现卡钳壳体这些部位的显微组织致密均匀,无缩松等缺陷,见图 12c~图 12f。

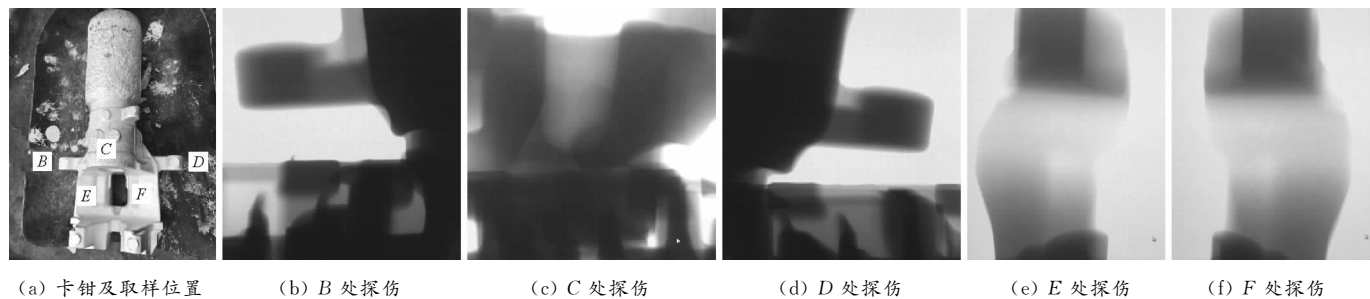


图 11 倾转铸造 Al-5Mg-3Zn-1Cu 卡钳及相应 X 射线探伤

Fig.11 Tilt casting Al-5Mg-3Zn-1Cu calipers and corresponding defect detection by X-ray inspections

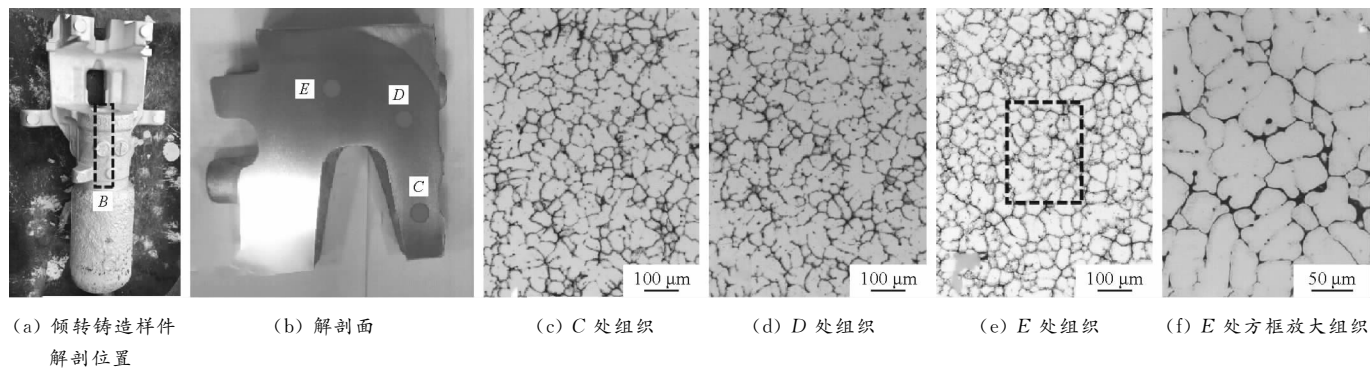


图 12 倾转铸造 Al-5Mg-3Zn-1Cu 卡钳的显微组织

Fig.12 Microstructure of tilt casting Al-5Mg-3Zn-1Cu calipers

3 结 论

(1)结构优化前,Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体充型过程中形成一定紊流,并产生憋气;凝固过程中,铸件的顺序凝固因为形成了孤立液相区被中断,导致形成缩孔类缺陷,严重影响了卡钳壳体品质。

(2)对卡钳壳体的结构进行优化,即扩大铝液的流动和补缩通道,模拟结果表明,卡钳铸件的充型平稳,凝固过程实现顺序凝固,避免形成孤立液相区,消除了缩孔缺陷。

(3)基于结构优化后卡钳壳体的结构,采用倾转铸造工艺试制了 Al-5Mg-3Zn-1Cu 铝卡钳壳体,结果表明铸件表面光洁,内部组织致密均匀,且无缩孔、缩松等缺陷。

参 考 文 献

- [1] TANG H, WANG Q, LEI C, et al. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of an Al-5.0Mg-3.0Zn-1.0Cu cast alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 801: 596-608.
- [2] ZHANG N N, LEI C, LIU T W, et al. Parameter optimization of Al-5Mg-3Zn-1Cu basin-shaped centrifugal casting: Simulation and experimental verification[J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17(2): 900-909.
- [3] 葛素静,刘永昌,叶珍,等.再生 A356 铝合金生产工艺及性能研

究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(4): 450-454.

- [4] 秦红斌,黄攀,高晓灵,等.基于数值模拟的卡钳铸造工艺优化设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(5): 505-508.
- [5] 王群,谢宝奎,温铁丽,等.制动器卡钳体倾斜铸造过程数值模拟及其优化设计[J]. 铸造技术, 2017, 38(8): 2 020-2 024.
- [6] 张章,段月星,辛小刚.铝合金进气管倾转铸造工艺数值模拟及优化[J]. 装备制造技术, 2016(6): 170-172.
- [7] 吴士平,王晔,陈立亮,等.汽车铝合金排水管倾转铸造数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(6): 514-516.
- [8] 王伟,崔晓明,石博,等.铝合金轮毂重力铸造过程数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 1 298-1 301.

(编辑:栗万仲)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |