

6061 及 7075 铝合金复杂薄壁件的铸造与性能研究

张广泰, 陆凯雷, 朱洪宇, 顾杰, 孟佳, 帅伟

(常州博瑞电力自动化设备有限公司, 江苏常州 213025)

摘要: 对某电力智慧化设备的6061和7075高强度变形铝合金复杂薄壁件, 进行铸造成形应用研究。通过在高纯铝中加入合金元素, 并设计“一模两腔”浇注系统, 经铸造仿真软件模拟充型和凝固过程及缩孔缺陷无误后, 采取砂型铸造工艺试制铸件。开展X射线探伤、三维尺寸扫描、成分检测及力学性能测试, 结果显示: 铸件内部致密完整, 无气孔和纹等缺陷; 铸造面尺寸精度小于0.5 mm; 成分中6系材质的合金元素Mn略高, 其余均达到标准对型材的要求。热处理后, 在铸件上取样, 按6系和7系配制的铝合金抗拉强度分别达到276 MPa和531 MPa。成功实现变形铝合金砂型铸造的技术应用, 对高强度铝合金薄壁件的成形工艺具有借鉴意义。

关键词: 高强度; 变形铝合金; 复杂薄壁件; 铸造成形; 力学性能

作者简介:

张广泰(1979-), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为智能电力装备。E-mail: zhuhongy_br@sgepri.sgcc.com.cn

通信作者:

陆凯雷, 男, 副高级工程师。E-mail: lukl_br@sgepri.sgcc.com.cn

中图分类号: TG146.21;
TG242.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)
09-1263-08

收稿日期:

2025-01-09 收到初稿,
2025-03-10 收到修订稿。

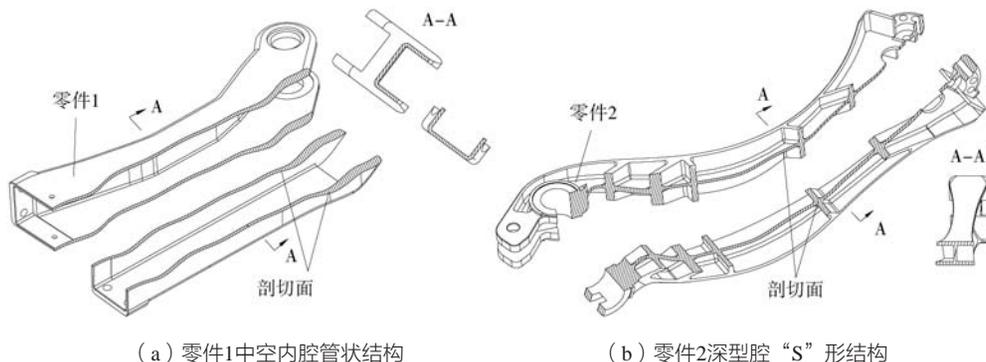
在变形铝合金谱系中, 6061和7075铝合金机械性能优异, 强度处于中和上等水平^[1-4], 是电力运维领域某智慧化设备结构件的首选材料。为满足高承载强度、产品轻量化和复杂工况下机动性要求, 相关核心零件采用紧凑型结构设计, 造成零件加工难度大幅提升。铸造工艺类别多和适用性强, 包含砂铸、重力铸、压铸和特种铸造等工艺, 且适用铸铁、合金钢、铝、镁、铜和锌合金等材料, 适合成形形状复杂零件。但由于合金元素含量高, 直接熔炼和铸造6061或7075铝合金存在组织粗大、偏析和铸件开裂等问题, 因此, 半固态压铸, 液态模锻^[5-6]等一些特种铸造技术应用于6系和7系变形铝合金的铸造成形。

变形铝合金各类型材在轧制、挤压、冲压或拉拔等塑性变形之前, 都经过熔融态冷却成锭。沿此思路, 本文研究在熔融态高纯铝中加入6061和7075的合金元素, 尝试砂型铸造工艺浇注复杂薄壁零件毛坯, 经热处理后, 机加工铸件端面、孔和表面等特征处预留余量, 完成零件净成形。研究变形铝合金砂型铸造技术的应用效果, 对降低高强度铝合金薄壁件的机加工成本和拓展其成形工艺具有重要意义。

1 零件特点与成形工艺分析

某电力智慧化设备核心零件如图1所示。高性能版采用7075-T6, 其他版采用6061-T6。零件1类似带有音叉的“中空”异型方管; 零件2两端异形, 中段类似内部分布着加强筋的“S”形工字梁。两种零件长度和宽度方向尺寸分别为265 mm × 75 mm和394 mm × 92 mm; 大部分壁厚较薄, 在2.5 mm左右。零件间通过销轴连接, 并由连杆传递电机扭矩, 承担设备运维任务中的各种运动载荷, 如弯曲和冲击等。

零件1和2在设备中用量大, 且壁薄、结构复杂。若直接采用机加工成形^[7], 存在原材料利用率低, 加工工序复杂, 周期长, 对加工设备要求高等缺点。如果采用模锻工艺^[8], 零件的“中空”内腔无法实现, 零件加强筋围成的深型腔与“S”形轮廓则至少需要两个出模方向才能成形, 锻造工艺的经济适用性也不佳。铝合金焊接工艺^[9-10]中可焊材料的强度难以达到7系铝要求, 另外焊缝对冲击载荷也比较敏



(a) 零件1中空内腔管状结构

(b) 零件2深型腔“S”形结构

图1 零件1和2剖切图

Fig. 1 Sectional drawing of parts 1 and 2

感。铸造工艺对材料和零件形状敏感度低，加工这两种零件表现出较好的适用性。

2 试验材料及其过程

2.1 铸造材料

在熔融态高纯铝中加入6061和7075变形铝合金对应合金元素配制成铸造材料，合金元素的主成分如表1所示。表中单数值表示该元素含量不大于对应数值，Al元素除外。

2.2 试制方法

图2给出了试制流程，首先对成品零件和铸造坯件进行结构工艺分析，以成品为基础，结合砂型铸造特性，在零件各特征处设置余量，确定铸件结构。然后围绕浇道和冒口等进行浇注系统设计，设计过程借助铸造仿真软件模拟铸件充型、凝固过程和缩孔缺陷^[11-12]，最终优化定型铸件结构和浇注系统。其中，铸造仿真参数如下：铸型网格尺寸1 mm，砂箱网格尺寸

5 mm，网格数量共计150万。仿真过程工艺参数设置：铝合金液温度735 ℃，砂箱呋喃树脂砂，温度25 ℃。铸件与砂箱界面交换系数 $h=600$ ，砂箱设置空气自散热。砂模与砂芯按图加工后组箱，浇注配置的合金液体，冷却凝固完成后，气割出铸件，经热处理后，进行性能检测和机加工。其中，热处理参数为：固溶520 ℃，14 h；时效120 ℃，2.5 h+175 ℃，6.5 h。

2.3 性能检测

采用MAPT-250设备对铸件进行X射线无损探伤^[13]，曝光时间2 s，焦距700 mm，各位置的缺陷都会累计叠投在胶片上，如密集型气孔、大尺寸气孔或裂纹等缺陷。铸件尺寸检测采取SCANTECH复合式三维扫描仪^[14]进行轮廓扫描，然后与三维模型进行比对。成分检测采用布鲁克Q4TASMAN直读光谱仪^[15]，分析铸件材质合金元素情况。最后，在热处理后的铸件本体上直接取样测试抗拉强度、屈服强度和伸长率，并与型材对标。其中，拉伸试样为矩形截面，宽15 mm、

表1 铸件材料合金元素含量配比

Tab. 1 Proportion of alloy element content in casting materials

 $w_B/\%$

材料牌号	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6061	0.40~0.8	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	0.25	0.15	余量
7075	0.40	0.50	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	0.2	余量

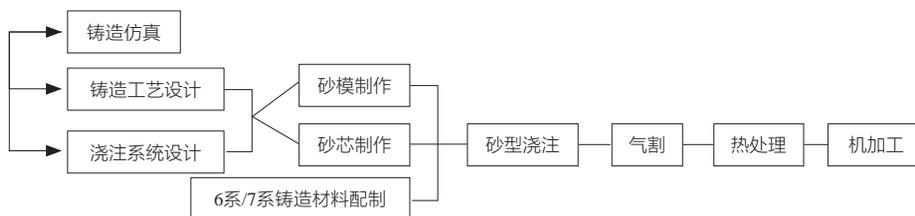


图2 设计和工艺流程图

Fig. 2 Design and process flow chart

厚5 mm、标距45 mm。屈服试验速率0.000 25/s, 抗拉试验速率为24 mm/min。

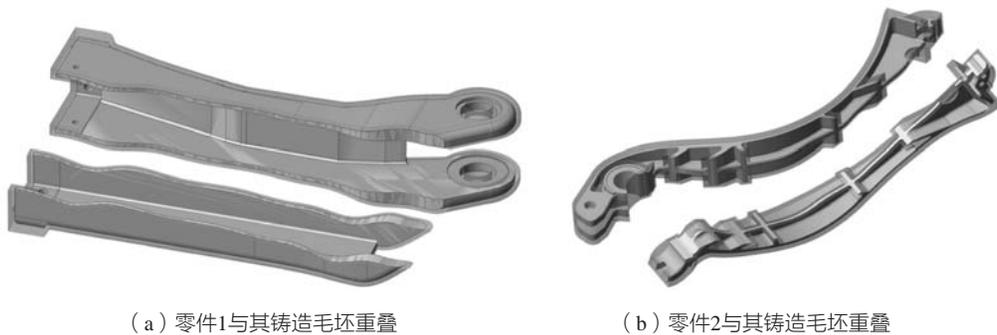
3 铸造工艺设计与仿真

3.1 铸件结构设计

零件1端部矩形口与销轴孔是重要装配位置, 有较高的形位精度要求, 这两处设置2.5 mm加工余量, 满足后道机加工工序。另外, 为防止金属液充型不佳或产生其他缺陷, 砂型铸件的总壁厚要求 ≥ 5 mm, 而零件1成品的最薄壁厚仅2.5 mm, 考虑所有余量偏置于外

表面, 内表面则通过放置砂芯成形, 降低加工难度, 提高整体工艺经济性。

零件2为实心构件, 最薄壁厚也为2.5 mm, 沿中心面对称分布型腔、斜向槽、销轴孔和底部卸能孔等特征。这些孔和槽结构对后续机加工影响较小, 因此除型腔外, 其余特征均考虑填补。将零件2外表面向外偏置2.5 mm, 斜向槽、销轴孔和底部卸能孔位置填补成实心, 形成零件2铸造毛坯。结合上述设计分析, 图3给出了零件1、2的铸造毛坯和成品重叠模型。



(a) 零件1与其铸造毛坯重叠

(b) 零件2与其铸造毛坯重叠

图3 零件的铸造毛坯与成品重叠

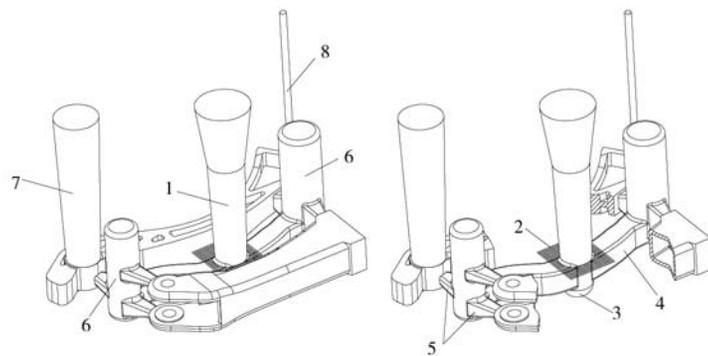
Fig. 3 The casting blank of the part overlaps with the finished product

3.2 铸件浇注系统设计

试制采取简易树脂砂铸型, 砂型内两个铸件各占一个腔体, 即一个浇注系统同时完成两个铸件成形。浇注系统考虑到铝合金活泼性强, 表面易氧化结膜和凝固过程收缩率大等特点, 满足快速、平稳充型, 冒口补缩和挡渣等要求^[16]。

内浇道数量设计为4个, 结构扁平向内收缩, 使金属液入型平稳, 减少氧化与夹渣。内浇道截面共约

12 cm², 浇道比选择 $\sum F_{直} : \sum F_{横} : \sum F_{内} = 1 : 2 : 3$, 直浇道与横浇道面积则分别为4 cm²和8 cm²。直浇道上方的浇口杯形状为漏斗形, 制作方便, 浇道底部有挡渣金属网。下方设计浇口窝缓冲金属液, 改善横浇道内紊流。在横浇道与内浇道交汇处, 设置两个直径为40 mm和高度为120 mm的暗冒口。在零件2的一端设置直径为42 mm明冒口, 另一端为排气孔。整个浇注系统模型如图4所示。



1. 直浇道; 2. 挡渣金属网; 3. 浇口窝; 4. 横浇道; 5. 内浇道; 6. 暗冒口; 7. 明冒口; 8. 排气口

(a) 零件1和2与完整浇道

(b) 零件1和2部分被隐藏

图4 铸件浇注系统

Fig. 4 Casting system for castings

3.3 铸造仿真设计

铸造仿真的充型与凝固过程如图5和图6所示。结果显示 $t=20$ s左右完成铸件充型, $t=601$ s左右初步完成凝

固。充型过程中, 金属液沿直浇道和横浇道进入型腔, 填充顺序由铸件底层缓慢向上涌动, 流动平稳无紊流, 明冒口和暗冒口顺利在最后阶段填充。凝固过程, 零件

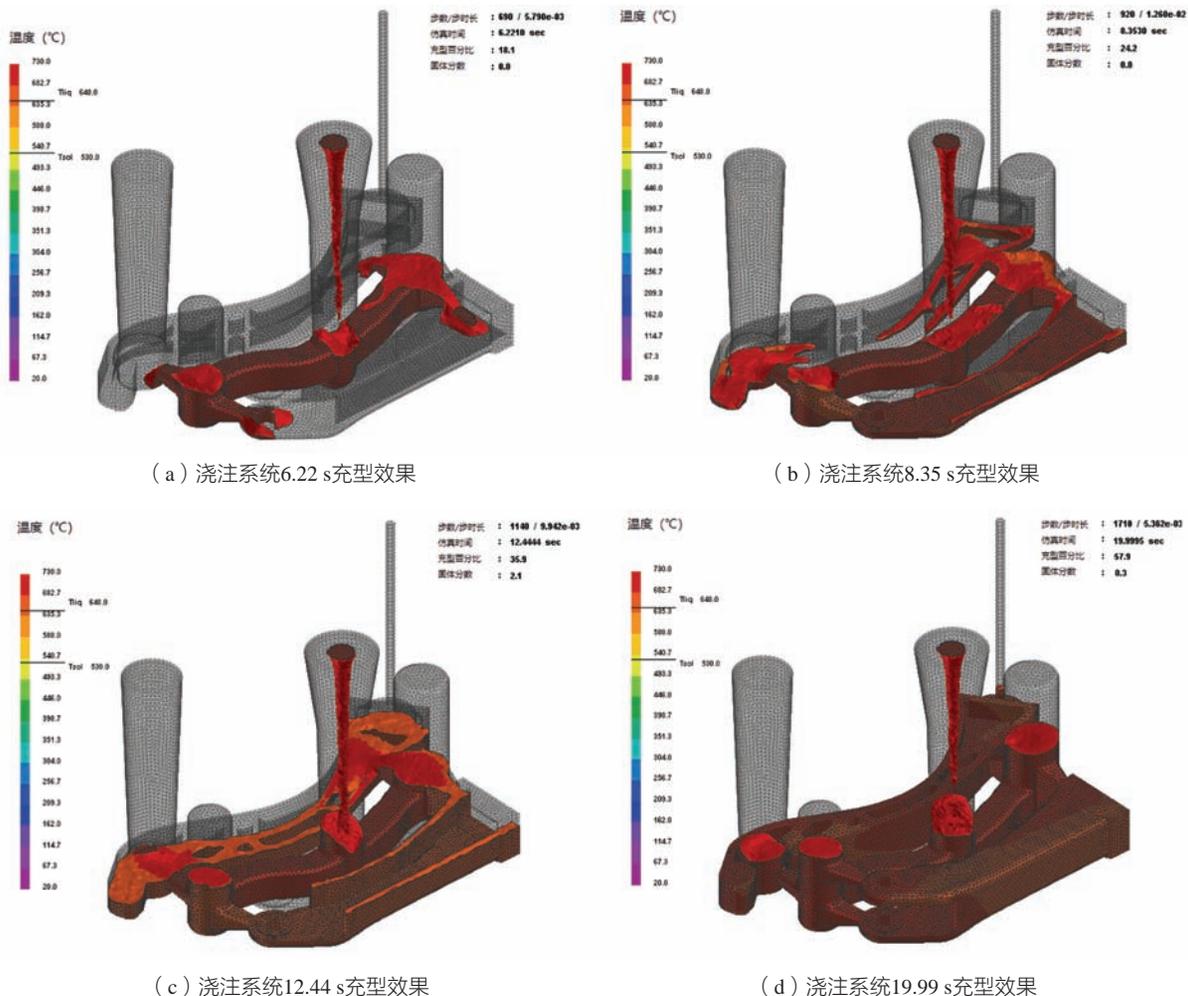


图5 充型过程仿真结果

Fig. 5 Simulation results of filling process

1的薄壁和零件2的加强筋特征先开始凝固，浇道和冒口凝固明显慢于铸件，铸件可以有效得到浇道内金属液补充，避免气孔、缩松等缺陷留在铸件内。图7为铸件缺陷仿真结果。以上仿真结果表明，整体浇注系统的设计可行。

4 铸件成形结果与测试

4.1 铸件试制成形

图8为试制铸件成形后脱模的整体图，可见铸件本体表面无缩孔和缩松缺陷，零件1内型腔因放置砂芯成形良好，无夹砂问题。零件2深型腔成形完整，达到设计要求；浇道填充完整，无死区，无紊流痕；冒口发挥了作用，其上表面有许多缩孔缩松缺陷。

4.2 铸件质量监测

4.2.1 X光射线探伤

X射线分别透过铸件1和2正平面和侧平面，如图9所示。探伤观察清晰度良好，观察到两铸件内部影像

形态均匀，无任何聚集或离散的气孔，无任何细微裂纹。其中，铸件2因长度超出反射板范围，其一端未能反射。

4.2.2 尺寸检测

如图10所示，铸件扫描后生成的云点图与理论的三维模型进行重叠，测量内部未留余量的铸造面与要求值相差约0.5 mm，满足标准GB/T 6414—2017的规定。

4.2.3 成分检测

铸件的成分检测结果如表2所示。对照表1发现，按6061成分配制铝合金液成形的铸件，除了Mn元素超标（0.297%>0.15%），其它所有元素，包括作为主要的合金元素Mg和Si，都在标准范围内。按7075成分配制铝合金液成形的铸件，其所有元素都达到标准要求。由此可知，后续再经一定优化，通过配比成分结合铸造工艺制成的铸件，从成分定义材料的角度而言，它们与型材的差异可以很小。

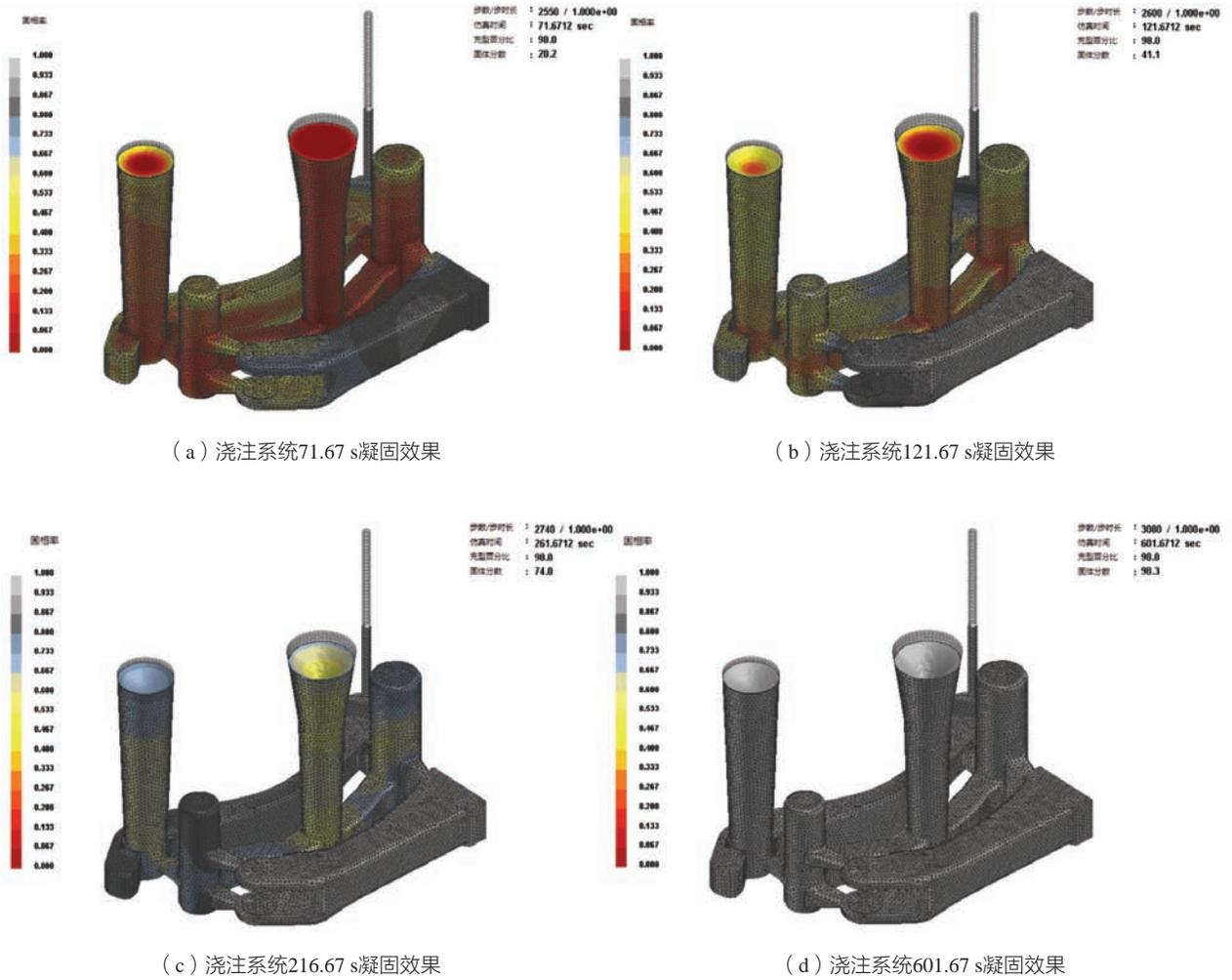


图6 凝固过程仿真结果

Fig. 6 Simulation results of solidification process

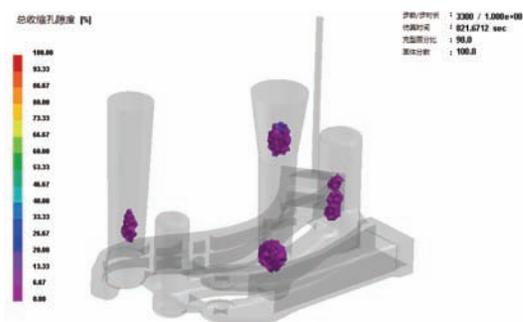


图7 缩孔分布

Fig. 7 Distribution of shrinkage defects



图8 试制成形铸件

Fig. 8 Trial production of formed castings

4.2.4 力学性能测试

力学性能测试的取样位置和性能曲线如图11和图12所示,表3为力学性能结果。其中,性能曲线在引伸计变形量约0.4 mm(真应变约2%)之后,切换成位移控制,伸长率在试样断后进行手工测量。由图表可知,按6061、7075变形铝合金成分配制的铝合金铸

液,通过砂型铸造工艺并进行热处理,力学性能与型材相差小于5%。结果与成分检测相互印证,表明相比以型材为原材料直接机加工的工艺方案,砂型铸造工艺生产的零件也能满足产品对高强度铝合金的性能要求。

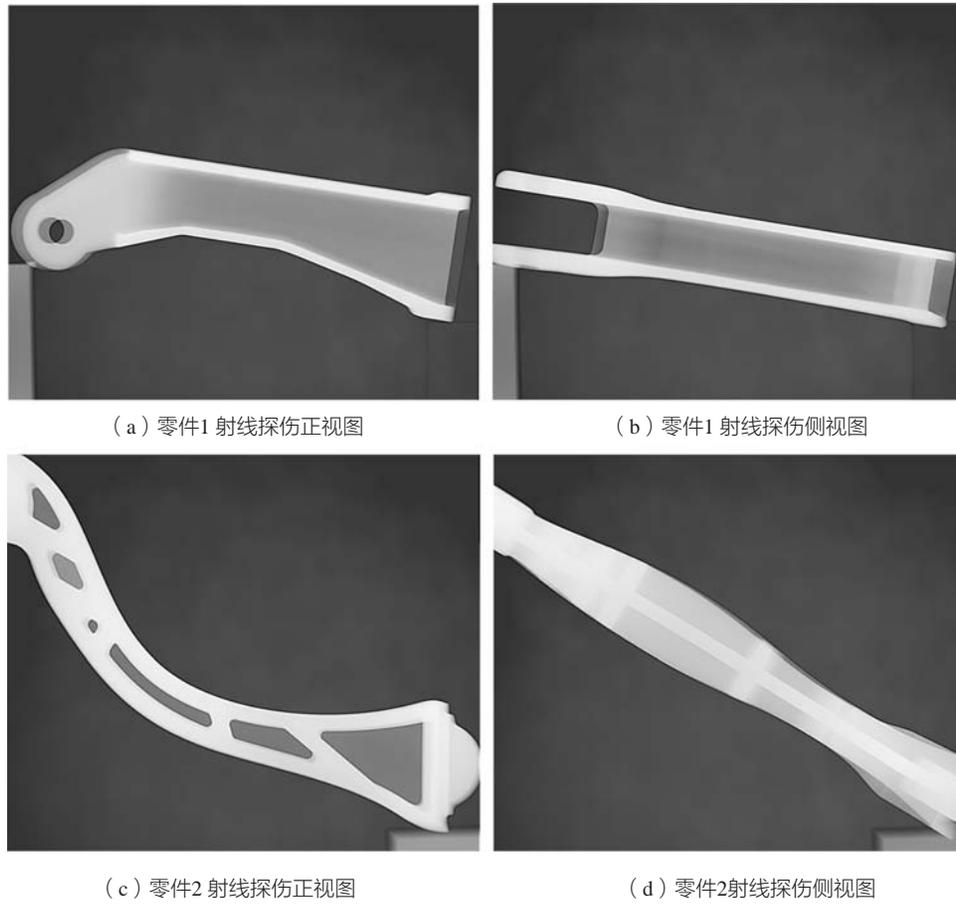


图9 铸件X射线探伤

Fig. 9 X-ray inspection of castings

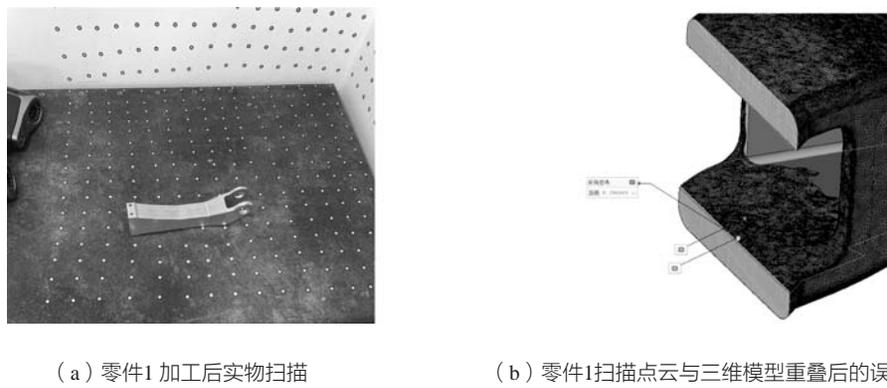


图10 铸件的三维尺寸扫描

Fig. 10 Three dimensional scanning of castings

表2 铸件材料合金元素含量检测
Tab. 2 Testing of alloy element content in casting materials

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
铝合金 (按6系配制)	0.718	0.478	0.231	0.297	0.866	0.042	0.100	0.034	余量
铝合金 (按7系配制)	0.117	0.285	1.516	0.132	2.563	0.200	5.838	0.035	余量

w_B /%

表3 试样与标准型材力学性能
Tab. 3 Mechanical properties of specimens and standard profiles

材料	试样	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	w_B /%
铝合金 (按6系配制+热处理)	1	276	228	7.6	
	2	270	223	7.0	
	3	281	232	7.2	
	均值	276	228	7.3	
6061-T6板材 (GB/T 3880.2)	/	290	240	10	
铝合金 (按7系配制+热处理)	1	539	486	9.0	
	2	508	453	5.0	
	3	547	478	7.5	
	均值	531	472	7.3	
7075-T6板材 (GB/T 3880.2)	/	545	475	8	



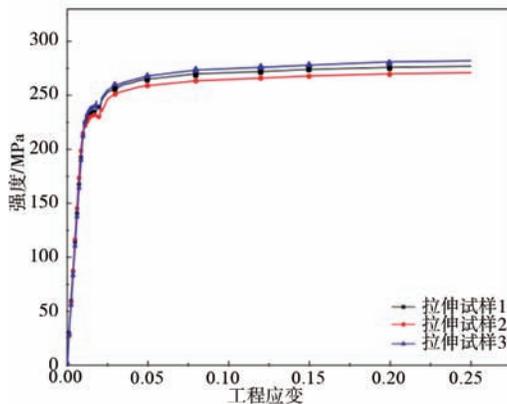
图11 铸件的力学性能取样

Fig. 11 Sampling of mechanical properties of castings

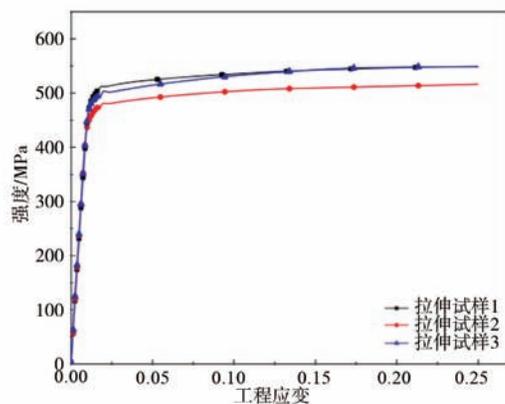
5 结论

从制件在工况中的性能要求出发, 在高纯度铝中加入合金元素, 采取砂型铸造工艺成功浇注复杂薄壁零件, 对标了变形铝合金板料型材直接机加工的工艺方案。

(1) 基于复杂薄壁件结构和砂铸工艺要求, 通过合理布置浇道, 设置明冒口、暗冒口和排气孔, 设计出“一型两件”的浇注系统。经铸造仿真, 充型和凝固, 效果良好; 铸造缺陷集中于浇道和冒口中, 浇注



(a) 按6061配制的铸件材料应力-应变曲线



(b) 按7075配制的铸件材料应力-应变曲线

图12 铸件的力学性能曲线

Fig. 12 Mechanical performance curve of castings

系统满足铸件试制, 并顺利开展生产。

(2) X射线探伤铸件, 透射图显示, 零件1和2的铸件各面致密完整, 内部无气孔、裂纹等缺陷; 三维扫描后, 无余量的内部铸造面尺寸与成品相差约0.5 mm, 满足标准要求。

(3) 进行了铸件成分和力学性能检测, 除了按6系配制的合金Mn元素超标, 其余所有元素都在标准范围内; 经热处理后, 铸件的力学性能也表现优异, 6系和7系配制的抗拉强度分别达到276 MPa和531 MPa, 略低于对应牌号的变形铝合金型材, 相差小于5%。

参考文献:

- [1] 徐正. 7005/7075中高强度铝合金的应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [2] 李红强, 朱广, 李沛根, 等. 铝合金盖板铸件轻量化设计与铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2024, 73 (12): 1744-1750.
- [3] 于成涛, 张静漪, 吴英彪. 机器人轻量化材料应用的研究进展 [J]. 新材料产业, 2019 (12): 41-45.
- [4] 方曼婷, 金林奎, 吴正环, 等. ZL101A铸造铝合金机器人手臂断裂失效分析 [J]. 金属加工 (热加工), 2023 (2): 89-92.
- [5] 李春林, 张志峰, 樊建中. 高强铝合金半固态精密成型技术应用研究 [J]. 电子机械工程, 2016, 32 (3): 49-51.
- [6] 谭建波, 刘雪萍, 李立新. 合金温度对7075半固态模锻液相偏析的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (6): 538-541.
- [7] 张新成. 薄壁零件数控车工加工技术的应用研究 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52 (9): 56-58.
- [8] 刘君. 铝合金复杂杯形薄壁件冷镦挤成型工艺研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [9] 陈大江. 7A52高强度铝合金线性变厚板激光焊接工艺研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [10] 吕程. 铝合金焊接接头组织及疲劳损伤行为研究 [J]. 中国金属通报, 2021 (5): 96-97.
- [11] 李红强, 朱广, 李沛根, 等. 铝合金盖板铸件轻量化设计与铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2024, 73 (12): 1744-1750.
- [12] 李春玲. 基于ProCast分析的汽车轮毂成形工艺及模具设计 [J]. 模具技术, 2020 (4): 19-27.
- [13] 王琳锐, 王开, 何乃军, 等. X射线数字成像技术在铸件产品及材料质量检测中的应用 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (10): 891-894.
- [14] 赵小龙. 基于特征识别的复杂零件自动测量技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [15] 雷泳麟, 陆科呈, 莫肇月, 等. 直读光谱仪在铝合金化学成分分析中的应用 [J]. 山西冶金, 2023, 46 (12): 211-213.
- [16] 余欢. 铸造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

Research on Casting and Performance of Complex Thin-Walled Parts Made of 6061 and 7075 Aluminum Alloys

ZHANG Guang-tai, LU Kai-lei, ZHU Hong-yu, GU Jie, MENG Jia, SHUAI Wei
(NR Electric Power Electronics Co., Ltd., Chang Zhou 213025, Jiangsu, China)

Abstract:

The application of casting to complex thin-walled parts was studied. These parts serve as accessories in intelligent power equipment and are fabricated from high-strength wrought aluminum alloys (6061 and 7075). By adding alloy elements to high-purity aluminium and designing the casting system of one mold with two cavities, we simulated the mold filling, solidification process, and shrinkage defects using simulation software; finally, sand casting was adopted for trial production of the castings. X-ray inspection, 3D dimensional scanning, composition analysis, and mechanical property testing were carried out, and the results showed that the interior of the castings was fine and intergrated, without defects such as pores and cracks. The dimensional accuracy of the castings surface was less than 0.5 mm. The alloy element Mn in the 6-series aluminium alloy was slightly higher in composition, and the rest met the standard requirements for profiles. After heat treatment, samples were taken from the castings, and the tensile strength of prepared aluminium alloy according to 6061 and 7075 reached 276 MPa and 531 MPa respectively. The application of direct casting technology for deformed aluminum alloys has reference value for the forming of high-strength aluminum alloy thin-walled parts.

Key words:

high strength; deformable aluminum alloys; complex thin-walled parts; casting forming; mechanical properties