

A356 铝合金涡旋盘半固态压铸 工艺研究

林承杉, 王火生, 张 荣, 廖 亮, 陈运铨

(福建理工大学 材料科学与工程学院, 福建福州 350118)

摘要: 研究了A356铝合金涡旋盘的压铸成形工艺, 通过数值模拟对比了液态压铸、半固态压铸工艺的缺陷控制效果。经过优化, 采用半固态真空压铸工艺进行了生产验证, 并对铸件进行了金相分析及性能测试。结果表明, 半固态充填过程铝液流态比液态压铸更平稳, 涡旋盘螺旋齿和底面等关键部位产生的卷气量、氧化夹杂量和缩孔更少, 通过抽真空可进一步降低缺陷数量。涡旋盘半固态真空压铸铸件组织致密, 无明显气孔、缩孔和疏松等缺陷, 其铸态组织为圆整的等轴晶, Si相以共晶团形式分布在Al基体中, 经T6热处理后共晶Si相球化为均匀分布的细小颗粒, 涡旋盘HB硬度由铸态的53.1提升至93.5, 高于同规格低压铸造涡旋盘的硬度。

关键词: A356铝合金; 涡旋盘; 压铸成形; 数值模拟; 缺陷控制

中图分类号: TG146.2; TG306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 04-0419-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0058

Research on the Semi-Solid Die Casting Process of A356 Aluminum Alloy Scroll Plate

LIN Cheng-shan, WANG Huo-sheng, ZHANG Rong, LIAO Liang, CHEN Yun-quan

(College of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, Fujian, China)

Abstract: The die casting process of A356 aluminum alloy scroll plate was investigated. The defect control effects of liquid and semi-solid die casting processes were compared through numerical simulation. After optimization, the semi-solid vacuum die casting process was employed for production verification, and metallographic analysis and performance testing were conducted on the castings. The results show that the semi-solid filling process exhibits a smoother liquid surface compared to the liquid die casting, leading to reduced entrapped gas, oxide inclusions and shrinkage cavities in critical areas such as the spiral teeth and the bottom surface of the scroll plate, and the vacuum pumping can further reduce the defects. The scroll plate prepared by semi-solid vacuum die casting exhibits dense microstructures, with no visible defects such as gas hole, shrinkage cavity, or looseness. The as-cast microstructure of the casting is equiaxed crystal, and the Si phases distribute in the form of eutectic clusters within the Al matrix. After T6 heat treatment, eutectic Si phases spheroidize into uniformly distributed fine particles. The HB hardness of scroll plate increases from 53.1 in the as-cast state to 93.5 in the T6 state, surpassing the hardness of low-pressure die casting scroll plate of the same specification.

Key words: A356 aluminum alloy; scroll plate; die casting forming; numerical simulation; defect control

涡旋式压缩机因运行平稳、噪声低等特点, 广泛应用于空调制冷、热泵及生物医疗设备等领域^[1]。其核心部件包括动静涡旋盘、偏心轴、防自转机构和支架。静涡旋盘固定, 动涡旋盘由电机驱动做偏心转动, 两者啮合形成多个压缩腔, 气体从进气口吸入并逐步压缩, 最终由排气孔排出^[2]。动静涡旋盘的螺旋齿需高精度啮合以形成密封压缩腔, 这对加工工艺提

出严苛要求^[3]。此外, 涡旋盘在高速运行中承受冲击与磨损, 因此材料需兼具高硬度、韧性及耐磨性, 以确保长期可靠运行^[4]。A356铝合金作为当前市场上广泛应用的涡旋盘材料, 其主流铸造成形工艺有低压铸造和挤压铸造^[5]。这两种工艺均采用慢速充填方式, 能有效减少铸件气孔和夹杂物, 提升组织致密性。然而, 低压或慢速充填时铝液流动性不足, 易造成充不

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2023J01346)。

收稿日期: 2025-12-04 收到初稿, 2025-12-18 收到修订稿。

作者简介: 林承杉 (2000-), 男, 硕士, 主要研究方向为铝合金压铸成形。E-mail: 1450778578@qq.com

通信作者: 王火生, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。E-mail: hkyg@163.com

引用格式: 林承杉, 王火生, 张荣, 等. A356 铝合金涡旋盘半固态压铸工艺研究 [J]. 铸造, 2026, 75 (4): 419-425.

LIN Chengshan, WANG Huosheng, ZHANG Rong, et al. Research on the semi-solid die casting process of A356 aluminum alloy scroll plate [J]. Foundry, 2026, 75 (4): 419-425.

满,需增加铸件壁厚以确保完整充型,这既会增加后续机械加工的余量,不利于产品轻量化设计,还会导致生产效率降低、生产成本上升^[6]。

采用高压铸造能够提高涡旋盘的生产效率,但常规的高速高压工艺会造成铝液严重卷气,达不到涡旋盘的致密度要求。而超低速液态压铸和半固态压铸可以实现铝液的层流控制,降低卷气率。周明等^[7]通过超低速($0.05\sim 0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)液态压铸工艺制备了ADC12铝合金样件,其合金组织中共晶Si颗粒细小、圆整,无疏松缩孔等缺陷。刘春生等^[8]利用超低速液态压铸工艺开发了汽车发动机变速箱支架类零件,当低速压射速度为 $0.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、高速压射速度为 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、内浇道厚度为 5.2 mm 、浇注温度为 $680\sim 690\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,获得的铸件质量最好,内部无明显气孔。胡玲海等^[9]研究了A319铝合金支臂半固态压铸过程,发现金属充型顺畅平稳,没有飞溅,所得铸件外观质量好,没有褶皱,内部无缺陷。Li等^[10]针对6061铝合金支架的半固态压铸工艺进行研究,结果表明,在浇注温度 $645\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、模具温度 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压射速度 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

的工艺条件下,能够制备出内部无明显疏松缩孔、铸件质量较优的铝合金支架。

本课题采用超低速液态压铸和半固态压铸工艺制备铝合金涡旋盘,对比分析铝液充填和凝固阶段可能产生的缺陷及原因,在此基础上优化半固态压铸成形工艺,最终制备出低孔隙、高硬度的涡旋盘铸件^[11-12]。

1 涡旋盘零件及浇排系统分析

1.1 涡旋盘零件分析

图1为国内某生物医疗设备中的涡旋盘零件图,其材料为A356铝合金,化学成分见表1。铸件外形轮廓尺寸约为 $247\text{ mm}\times 270\text{ mm}\times 70\text{ mm}$,形状复杂、壁厚不均匀,其中螺旋齿厚度为 4.50 mm ,底面厚度为 5.87 mm ,这两个区域为关键承载部位,要求进行机械加工,必须确保其致密性。散热齿厚度为 3.03 mm ,该区域虽无需进行机械加工,但要保证在铸造过程中铝液能够完全充满。

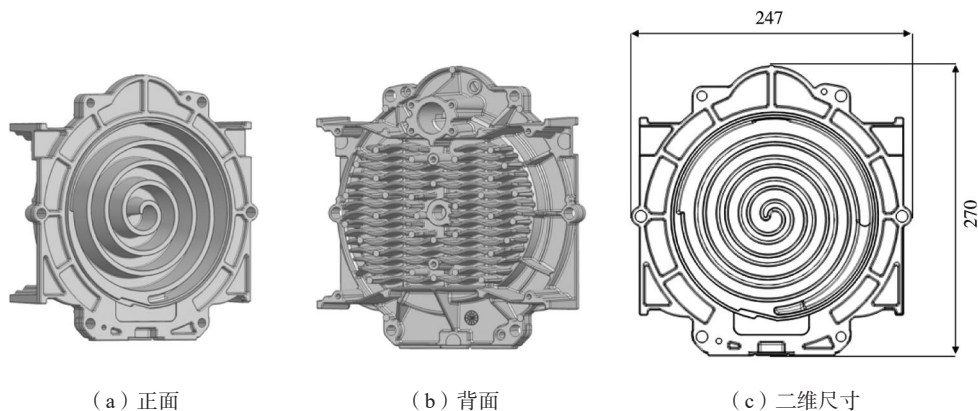


图1 涡旋盘三维结构与尺寸图

Fig. 1 3D structure and dimensional diagram of scroll plate

表1 A356合金化学成分
Tab. 1 Chemical composition of the A356 alloy

项目	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
标准值	6.5~7.5	≤0.2	≤0.2	≤0.1	0.25~0.45	≤0.1	≤0.2	余量
测试值	7.283	0.125	0.052	0.078	0.325	0.029	0.128	余量

1.2 浇排系统设计

采用双流道双浇口的设计方案,如图2所示。内浇道截面积为 780 mm^2 ,厚度为 12.92 mm 。流道截面形状为梯形,流道面积保持收敛式变化,以提高铝液流动稳定性。同时在压铸件充填末端设计多个溢流槽,以排出型腔中的气体和氧化夹杂^[13]。

2 压铸数值模拟方案

2.1 模型建立

设计的数值模拟模型如图3所示,主要包括带浇排系统的压铸件、料筒及柱塞三部分。其中,料筒直径为 100 mm ,长度为 595 mm 。在Flow-3D软件中,通过

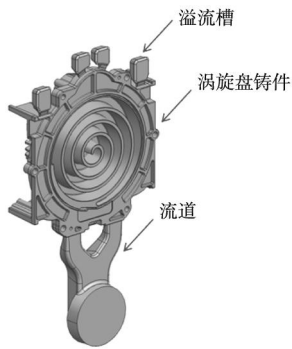


图2 浇排系统三维图

Fig. 2 3D diagram of gating and venting system

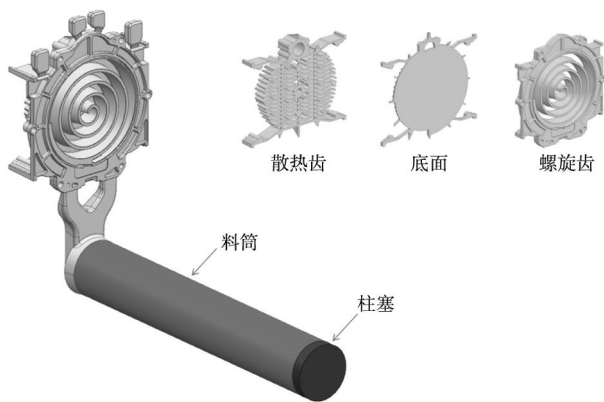


图3 数值模拟模型

Fig. 3 Numerical simulation model

给柱塞设置压射速度并作用于料筒中的铝液，从而模拟实际压铸生产过程^[14]。将铸件剖分为螺旋齿、底面和散热齿，以便对这三个区域的卷气、夹杂和缩孔等

缺陷分布情况进行独立统计，并将统计结果作为工艺评价和优化的主要依据。

2.2 铝液粘度模型设置

Flow-3D软件通过设置材料的密度、粘度等热物性参数属性来定义流体。对于液态金属，通常可将其视为牛顿流体，其粘度在不同剪切速率下基本保持恒定。因此，在液态压铸模拟过程中，将粘度设置为 $0.0019 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。对于半固态压铸模拟过程，通常采用Carreau模型来描述非牛顿流体的流动行为，其表达式为：

$$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{\left[1 + \frac{1}{2}(\lambda_1)^2 e_{ij} e_{ij}\right]^{\frac{1-n}{2}}} \quad (1)$$

式中： μ_0 为零剪切速率粘度； μ_{∞} 为无限剪切速率粘度，设置为 $0.297 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ； λ_1 为时间常数，反映时间对粘度的影响，设置为 0.2985 s ； e_{ij} 为笛卡尔张量符号中的流体切变率； n 为Power-law指数，是试验数据拟合的参数，取 $-0.295^{[15]}$ 。

2.3 参数设置

A356铝合金的热物性参数见表2^[16]。液态压铸方案的浇注温度设定为 $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，半固态压铸方案的浇注温度设定为 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。模具材料选用H13钢，其热物性参数见表3，模具初始温度设定为 $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[17]。压铸过程分为两个阶段：第一阶段压射速度设置为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，以确保液态金属能够平稳充满料筒和流道；第二阶段则提高至 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，直至整个铸件完全成形。

表2 A356合金的热物性参数
Tab. 2 Thermophysical parameters of A356 alloy

材料	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	固相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	液相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热导率/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
A356合金	2.437	552.4	608	1 074	86.9

表3 H13钢的热物性参数
Tab. 3 Thermophysical parameters of H13 steel

材料	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热导率/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
H13钢	7.9	633	23.4

3 数值模拟结果与分析

3.1 液态与半固态压铸模拟结果对比

涡旋盘液态与半固态压铸模拟结果如图4~6所示。从流态来看，液态压铸在充填阶段末期出现铝液湍流、飞溅现象，而半固态压铸在整个充填阶段铝液保持层流状态，无飞溅，见图4。从氧化夹杂分布看，

半固态压铸涡旋盘的氧化夹杂主要分布在铸件左右两侧，中间区域基本无氧化夹杂，而液态压铸件的中心区域有零星氧化夹杂存在，见图5。两种压铸方式下铸件缩孔均较少，见图6，表明流道设计合理，铝液可通过流道充分发挥补缩作用。

涡旋盘各主要区域模拟缺陷统计结果见图7。可以看出，采用液态压铸时，整个涡旋盘的中心到顶部

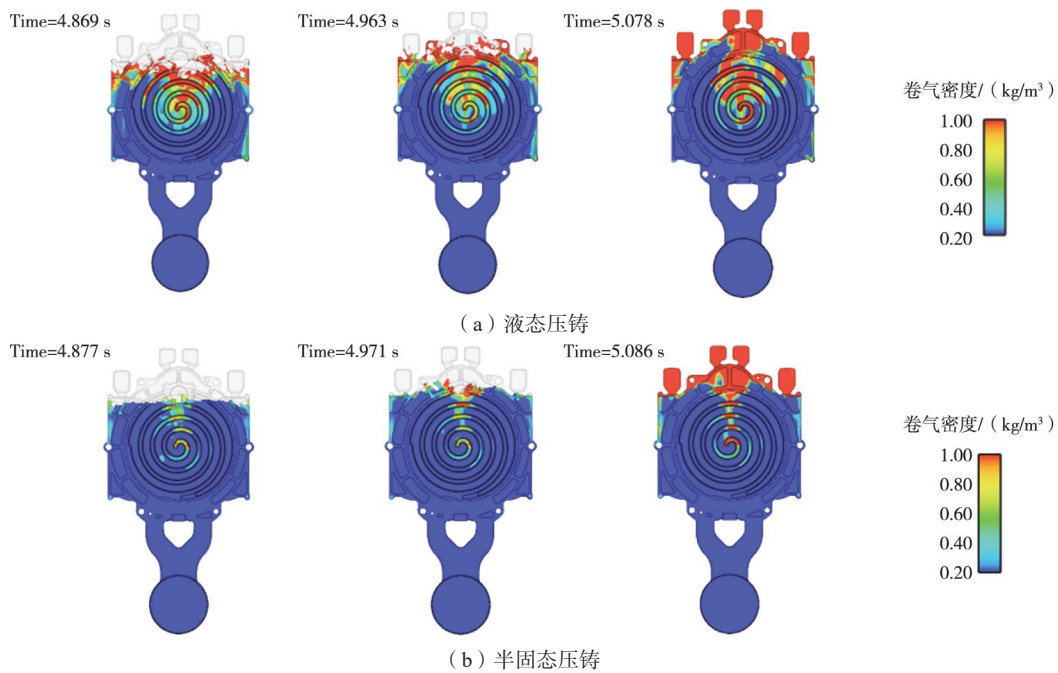


图4 铝液充填过程模拟

Fig. 4 Simulation of aluminum liquid filling process

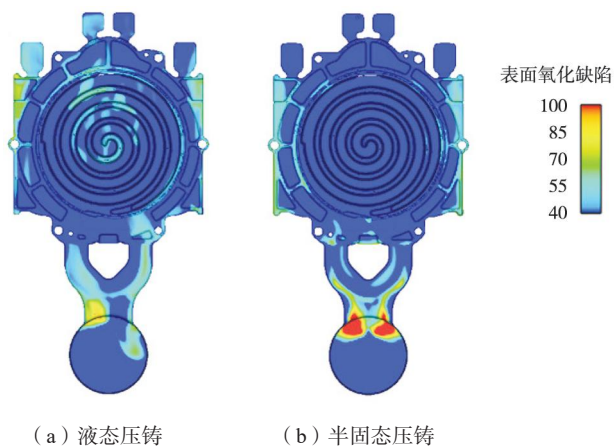


图5 氧化夹杂模拟结果

Fig. 5 Simulation results of oxide inclusions

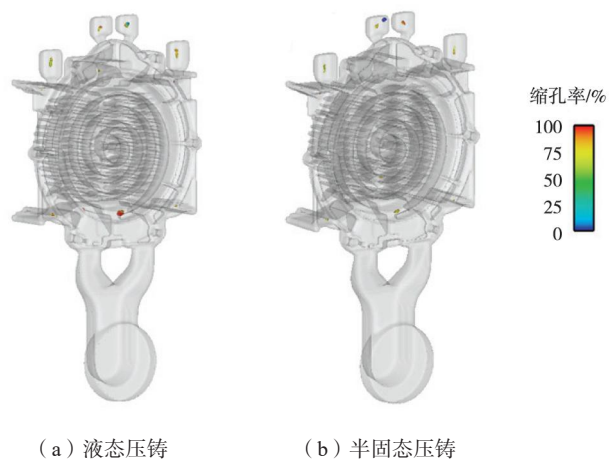


图6 缩孔模拟结果

Fig. 6 Simulation results of the shrinkage cavities

都存在较多卷气，螺旋齿区域卷气质量为0.335 g，底面区域的卷气质量为0.16 g；而半固态压铸方案仅在涡旋盘顶部产生部分卷气，螺旋齿区域的卷气质量为0.267 g，底面区域的卷气质量为0.058 g，两个关键区域的卷气量明显低于液态压铸，但散热齿的卷气量较高。此外，半固态压铸的氧化夹杂和缩孔缺陷也略优于液态压铸，其中底面氧化夹杂质量最小，约为2.7 g，这有利于提高后续底面机加工的表面光洁度。可见，半固态压铸方案在螺旋齿和底面两个关键承载部位产生的铸造缺陷明显低于液态压铸方案。

3.2 半固态压铸工艺改进与数值模拟

为进一步降低涡旋盘铸造缺陷，对半固态压铸方案进行优化。根据上述数值模拟结果，在渣包处增设排气道并添加真空阀门，将排气阀出口的压力调为 1×10^4 Pa，即实现铝液充填过程的实时抽真空工艺，如图8所示。优化后的数值模拟结果见图9，经统计，半固态真空压铸方案在螺旋齿产生的卷气质量为 6.09×10^{-4} g，氧化夹杂质量为9.7 g，缩孔率为1.30%；在底面产生的卷气质量为 2.36×10^{-4} g，氧化夹杂质量为2.4 g，缩孔率为1.37%；在散热齿产生的卷气质量为 4.23×10^{-3} g，氧化夹杂质量为6 g，缩孔率为1.32%。由图7对比结果可知，采用优化方案后螺旋齿和底面的卷气质量大幅降低，氧化夹杂和缩孔也有一定程度减少，说明该方案能够有效解决涡旋盘铸件缺陷问题。

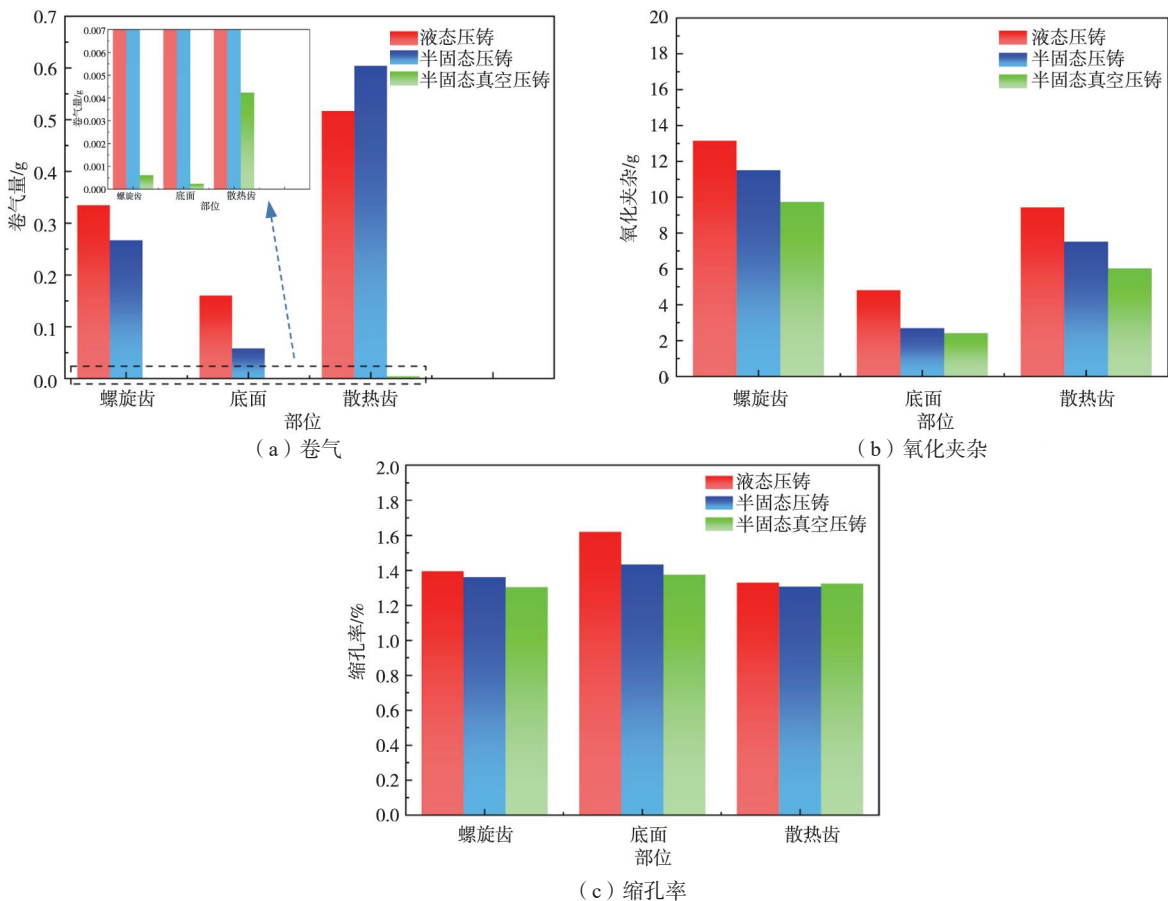


图7 涡旋盘各部位缺陷统计结果

Fig. 7 Statistical results of defects in various parts of the scroll plate

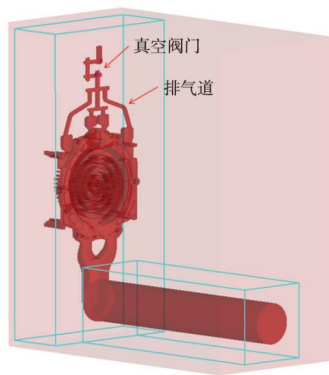


图8 排气道和真空阀门增设处

Fig. 8 Exhaust ducts and vacuum valve installation locations

4 涡旋盘生产验证与分析

结合数值模拟分析结果和企业实际生产条件,通过布勒840 T压铸机进行涡旋盘压铸。采用机械搅拌方式制备半固态浆料。压铸温度为600 ℃,压射速度为0.1~0.2 m·s⁻¹,模具温度为200 ℃。采用保温脱模剂防止慢速压射时铝液降温过快。图10为铸件实物图,可以看出铸件品质良好,无明显表面缺陷。X射线检测结

果显示,铸件中无明显气孔、缩孔和疏松等缺陷,如图11所示。

在图10所示螺旋齿部位取样进行金相分析,对比低压铸造(浇注温度720 ℃,模具温度300 ℃,比压0.12 MPa,保压时间50 s)和半固态真空压铸铸件的铸态和T6态显微组织。T6热处理工艺为先固溶处理535 ℃×6 h,后时效处理180 ℃×3 h。采用华银HB-3000B型布氏硬度计测定试样的硬度,钢球直径10 mm,载荷为1 000 kgf,保载时间30 s,每个试样测定三次并取平均值。

金相分析结果如图12所示,布氏硬度测试结果如图13所示。可以看出,低压铸造涡旋盘铸态组织中存在发达的树枝晶,共晶Si为较粗大的层片状,见图12(a),试样硬度为HB76.3;半固态真空压铸涡旋盘铸态组织为圆整的等轴晶,共晶Si相呈团状聚集,见图12(c),因此硬度较低,为HB53.1。经T6热处理后,低压铸造试样中共晶Si因形态粗大而固溶量较少,故呈较大颗粒状,见图12(b),硬度为HB86.3;半固态真空压铸试样中共晶Si为细小团状,固溶量较多,因此热处理后呈细小颗粒状,见图12(d),其时效析出强化更

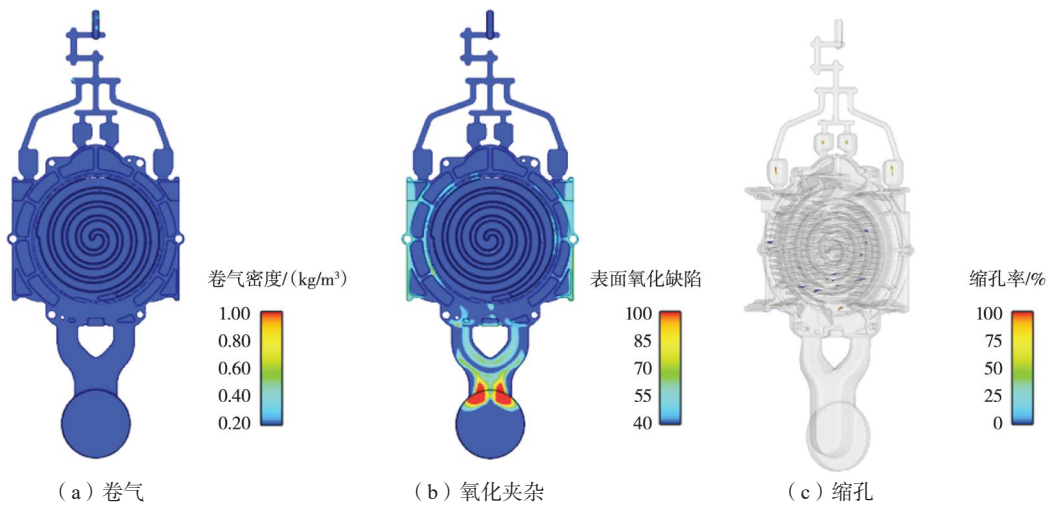


图9 半固态真空压铸模拟结果

Fig. 9 Simulation results of semi-solid vacuum die casting



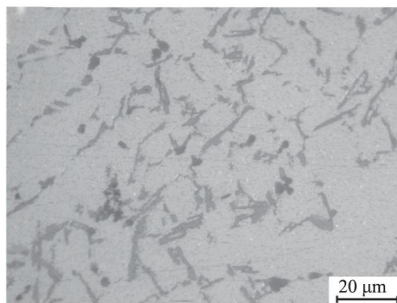
图10 涡旋盘铸件实物图

Fig. 10 Physical photo of scroll plate casting

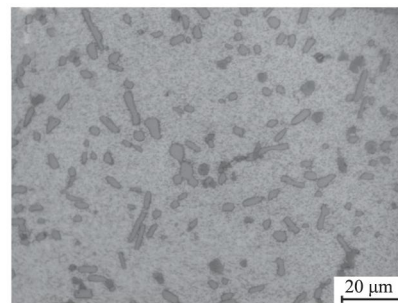


图11 涡旋盘铸件X射线无损检测结果

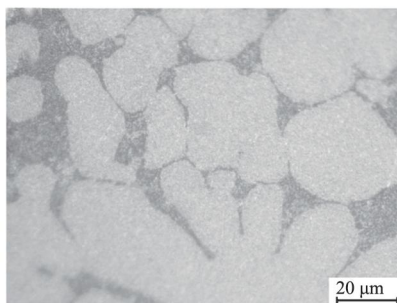
Fig. 11 X-ray inspection result of the scroll plate casting



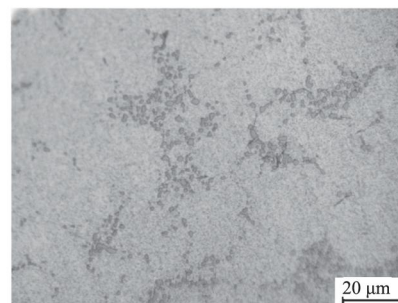
(a) 低压铸造, 铸态



(b) 低压铸造, T6态



(c) 半固态真空压铸, 铸态



(d) 半固态真空压铸, T6态

图12 涡旋盘金相组织

Fig. 12 Metallographic structure of scroll plate

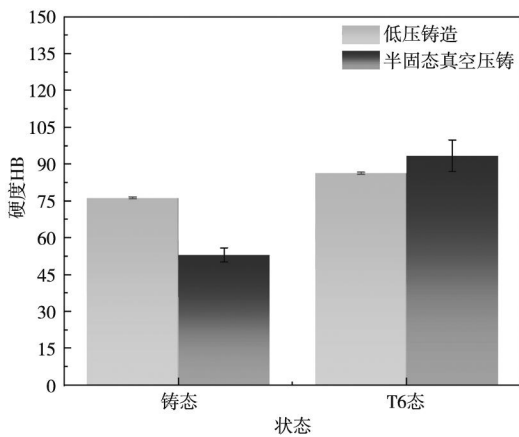


图13 涡旋盘布氏硬度

Fig. 13 Brinell hardness of scroll plate

显著，硬度达到HB93.5，产品具有更高的耐磨性。

5 结论

(1) 采用半固态压铸成形工艺时铝液流态更平

参考文献:

- [1] 胡继孙, 何亚峰, 张秀平, 等. 涡旋式制冷压缩机应用和技术现状及发展趋势 [J]. 制冷与空调, 2016, 16 (4): 1-7.
- [2] 姜鼎. 变壁厚静涡旋盘背压成形工艺优化研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [3] 董义, 孔令军, 李海超. 新型铝合金涡旋盘背压成形的数值模拟研究 [J]. 上海金属, 2025, 47 (5): 57-62.
- [4] 朱玉麒, 袁伟, 张立国, 等. 考虑运动副间隙的动涡旋盘运动学特征及磨损研究 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (8): 8-14.
- [5] CHEN C, WANG Y, SUN Y. Foundry of 4032 aluminum alloy scrolls using squeeze casting process [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2025, 40 (9): 1143-1156.
- [6] 张弓, 苏小平. A356铝合金后副车架低压铸造工艺参数的设计与优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (7): 988-994.
- [7] 周明, 魏绍生, 韦刚, 等. 超低速压铸ADC12合金的铸态和热处理态组织和性能研究 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (12): 2574-2578.
- [8] 刘春生, 苏建强, 罗金祺. 汽车发动机变速箱支架类零件的超低速压铸工艺 [J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33 (3): 246-248.
- [9] 胡玲海, 修坤, 戴俊良, 等. 铝合金左悬置支臂半固态压铸技术研究 [J]. 铸造, 2024, 73 (2): 234-238.
- [10] LI S J, ZHAO S D, LI F, et al. Mold-filling behavior and microstructure evolution of semi-solid 6061 aluminum alloy slurry in die-casting of bracket parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 141: 5417-5428.
- [11] 刘晓龙, 龚海军, 卢红林, 等. 汽车机油泵体压铸工艺数值模拟与优化 [J]. 铸造, 2024, 73 (2): 208-215.
- [12] 宋政晓, 米国发, 王有超, 等. ES6ZCA上盖压铸工艺设计与数值模拟优化 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (21): 67-71.
- [13] 宋鹏, 龚海军, 彭军, 等. 铝合金机油泵盖压铸模浇注及溢流系统仿真优化设计 [J]. 铸造, 2023, 72 (2): 196-202.
- [14] 杨宇平. 基于FLOW3D的浊流数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [15] KHAN M, SARDAR H, GULZAR M M, et al. On multiple solutions of non-Newtonian Carreau fluid flow over an inclined shrinking sheet [J]. Results in Physics 2018, 8: 926-932.
- [16] 张东生, 李世德, 徐佐, 等. A356铝合金轮毂低压铸造数值模拟以及组织与力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2023, 33 (6): 1720-1731.
- [17] 孙郑康, 刘小芳, 高明强, 等. 铝合金水冷板压铸过程数值模拟研究及工艺优化 [J]. 铸造, 2025, 74 (4): 522-528.

稳，在螺旋齿和底面两个关键部位产生的卷气质量、氧化夹杂质量和缩孔率均低于液态压铸。其中，半固态压铸在螺旋齿产生的卷气质量为0.267 g，明显低于液态压铸产生的0.335 g，半固态真空压铸下进一步大幅降低为 6.09×10^{-4} g；半固态压铸在底面产生的卷气质量为0.058 g，明显低于液态压铸产生的0.16 g，半固态真空压铸下进一步大幅降低为 2.36×10^{-4} g。半固态压铸成形工艺可有效确保涡旋盘关键区域的冶金质量，为后续机械加工奠定基础。

(2) 采用浇注温度600℃、压射速度0.1-0.2 m·s⁻¹、模具温度200℃的半固态真空压铸工艺进行实际生产验证，所制备的涡旋盘铸件无明显表面缺陷，内部无明显气孔、缩孔和疏松等缺陷。铸件铸态组织为圆整的等轴晶，共晶Si团分布在Al基体中，硬度为HB53.1，经T6热处理后共晶Si团球化为均匀分布的细小颗粒，硬度提升至HB93.5，高于低压铸造铸件硬度，具备更好的耐磨性能。