

铝合金盖板铸件轻量化设计与铸造工艺优化

李红强, 朱 广, 李沛根, 李文静

(西安西开精密铸造有限责任公司, 陕西西安 712046)

摘要: 应用ANSYS仿真软件辅助铝合金盖板铸件轻量化设计, 并应用AnyCastingg铸造模拟软件辅助铸造工艺优化。ANSYS仿真结果表明, 轻量化设计前, 铸件满足水压破坏试验强度要求; 壁厚减薄3 mm, 铸件内腔两小凸台附近存在水压破坏试验破裂风险; 将凸台根部圆角由R5 mm变为R10 mm, 铸件破裂风险消除; 进一步分析知, 法兰减薄5 mm可行, 减薄10 mm不可行。AnyCasting仿真结果表明, 轻量化设计前, 铸造工艺充型凝固过程良好, 铸件没有缺陷; 轻量化设计后, 充型铝温较低, 凝固出现多处缩孔和疏松缺陷; 将充型速率由880 Pa/s提高至1 100 Pa/s, 问题消除。轻量化盖板铸件进行了生产试制, 通过水压破坏试验验证。

关键词: 铝合金; 盖板铸件; 轻量化设计; 工艺优化

在轻金属材料中, 铝合金具有比强度和比刚度高、塑性好、易于成形和成本较低等优点, 是轻合金中应用最广和用量最多的金属^[1]。低压铸造技术具有少余量成形加工的优点, 同时也是实现汽车铸件精密化、薄壁化、轻量化和节能化的重要措施, 其日益受到铸造界的广泛关注^[2]。低压铸造工艺是金属液在压力作用下充型并凝固的铸造方法, 具有充型平稳、铸件精度高、铸件质量好和金属利用率高等优点, 是生产铝合金铸件的重要工艺之一, 在高压设备领域主要用于生产中小型法兰和盖板类铸件^[3]。ZL101A合金是铝合金铸件的常用材料, 其合金相主要有 α -Al基体、共晶Si、强化相 Mg_2Si 、铁基化合物, 易出现缩孔和疏松和夹杂等缺陷^[4]。与传统铸造工艺方案的确定相比, 铸造CAE技术具有成本低和试制周期短, 可以有效提高铸件质量^[5]。

本文研究的铝合金盖板铸件, 为多年前设计的高压设备零部件。随着金属型低压铸造工艺广泛应用, 铝合金铸件本体力学性能明显提高并具备轻量化设计基础。与此同时, 当前行业竞争加剧, 原材料成本上升, 急需开展铸件减重, 降低企业生产成本。多家铸铝企业已开展轻量化设计^[6-7]。本文对铝合金盖板铸件开展轻量化设计与铸造工艺优化。

1 铸件结构

盖板铸件见图1, 基本尺寸 $\Phi 625$ mm \times 120 mm, 质量15.4 kg, 材质ZL101A, 热处理工艺T6。由图1a知, 零件为“帽子”形状, 法兰“帽沿”厚28 mm, 有16个通孔; “帽顶”有 $\Phi 90$ mm和厚12 mm凸台; “帽沿”与“帽顶”之间壁厚10 mm, 有宽10 mm和高6 mm的加强筋。由图1b知, 法兰面为加工面, 有密封槽; 低于法兰面约10 mm, 法兰内径位置均布6处凸台, 中心打螺纹孔; 零件内腔中心, 有凹坑及两个 $\Phi 30$ mm的凸台。

作者简介:

李红强(1986-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为铝合金铸造工艺设计与仿真分析。E-mail: 631265516@qq.com

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)12-1744-07

收稿日期:

2024-02-01 收到初稿,
2024-05-05 收到修订稿。

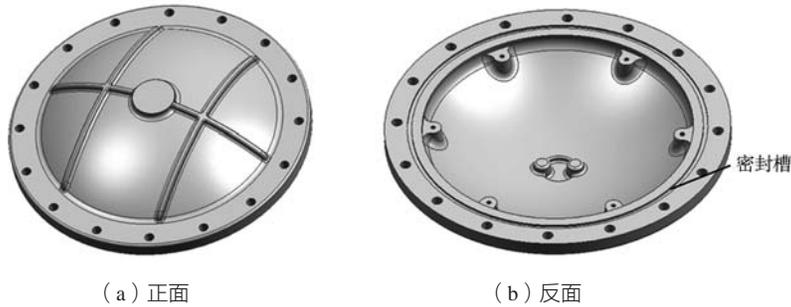


图1 盖板铸件

Fig. 1 The cover plate casting

2 水压破坏有限元建模

耐压铝合金铸件批量生产前,需通过水压破坏试验验证(确认生产工艺制备铸件强度满足要求),由顶部注水口注水加压至破坏压力,未破坏和变形则水压破坏试验通过。本文盖板水压破坏试验模型见图2,铸件法兰端采用40 mm钢板密封。



图2 水压破坏试验模型

Fig. 2 The model of the hydraulic failure test

盖板水压破坏试验采用ANSYS应力仿真,盖板与钢板接触方式采用“bonded”;网格划分采用相对法,元素尺寸设置为7 mm,水压破坏试验模型网格数约为150 000;应力仿真采用材料参数见表1。设置盖板顶面为固定面,法兰与盖板形成的内腔压力为3.25 MPa,重力向下。

3 铸造工艺与模拟参数

盖板金属型低压铸造工艺见图3。法兰面朝上放

表1 应力仿真材料参数

Table 1 The material parameters of the stress simulation

名称	铸件材料	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/GPa	泊松比	线膨胀系数/ K^{-1}
盖板	铝合金	2 770	71	0.33	2.3×10^{-5}
钢板	结构钢	7 850	200	0.3	1.2×10^{-5}

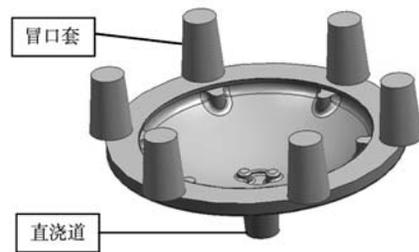


图3 盖板铸造工艺

Fig. 3 The casting process of the cover plate

置,直浇道通顶部凸台充型;法兰内腔6个凸台附近法兰面,均设置带石棉保温套暗冒口。法兰面作为模具分型面。完成工艺建模后,进行网格划分、参数设置及模拟仿真。划分均匀网格数约为500万。铸件、模具、保温套相关热物理性能参数采用Anycasting软件材料数据库默认参数,主要参数设置见表2。

表2 主要模拟参数

Table 2 The main simulation parameters

	铸件材料	模具材料	保温套	浇注温度/ $^{\circ}\text{C}$	模具初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	保温套初始温度/ $^{\circ}\text{C}$
ZL101A	液相线/ $^{\circ}\text{C}$	614	石棉	700	300	80
	固相线/ $^{\circ}\text{C}$	556				

4 仿真结果分析

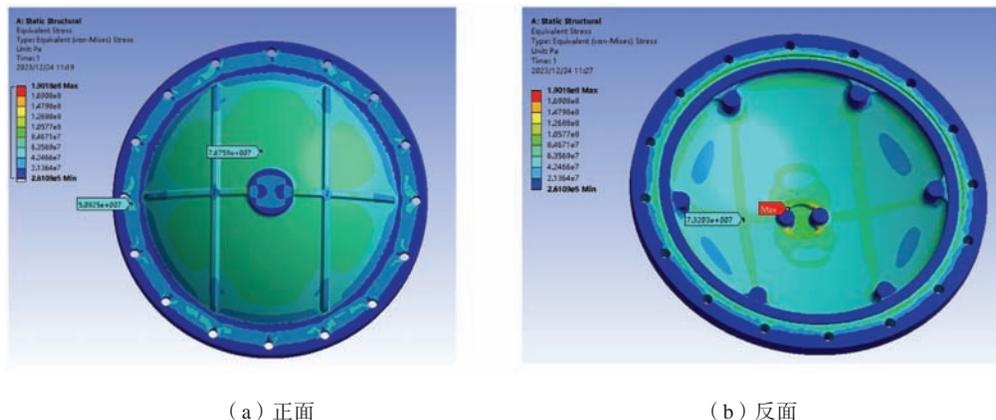
4.1 应力仿真分析

4.1.1 轻量化设计前

轻量化设计前,水压破坏试验模型应力仿真结果

见图4。

由图4a知,盖板承受3.25 MPa压力,法兰背面承受应力相对较小,最大应力约为51 MPa,壁外表面承受应力略大,最大值约为77 MPa。由图4b知,盖板最大



(a) 正面

(b) 反面

图4 轻量化设计前应力仿真结果

Fig. 4 The results of the stress simulation before lightweight design

应力在内腔小凸台附近，应力值约为190 MPa。密封槽内应力较大区域应力值小于148 MPa。

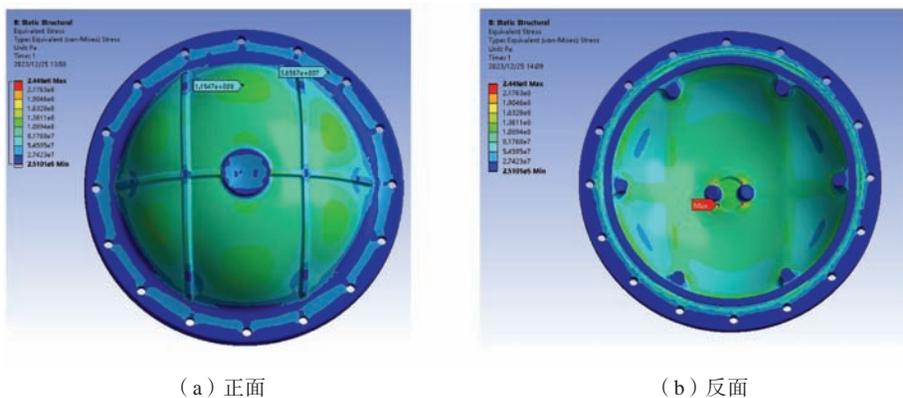
ZL101A-T6铸件，由于自身结构复杂、存在缺陷、硬度较高及较低的伸长率等，通常水压破坏试验过程中，局部出现应力集中，导致裂纹，破坏呈现类似“脆性断裂”，开裂处无明显屈服变形。标准给出ZL101A-T6金属型铸造单铸试棒抗拉强度不低于295 MPa^[8]，铸件本体试棒抗拉强度平均值不低于GB/T 1173规定值的75%^[9]，即ZL101A-T6铸件本体试棒强度应不小于221.3 MPa。仿真显示最大应力小于此值，因

此，轻量化设计前盖板理论上能够通过水压破坏试验且铸件强度具有一定富余量。

4.1.2 壁厚减薄与结构优化

法兰厚度不变，轻量化设计对盖板壁厚减薄3 mm，壁厚变为7 mm (>150 mm × 150 mm通常金属型铝合金铸造最小壁厚5 mm，本文盖板铸件 $\Phi 625$ mm × 120 mm不宜选最小壁厚)。水压破坏试验模型应力仿真结果见图5。

由图5a知，盖板承受3.25 MPa压力，铸件法兰背



(a) 正面

(b) 反面

图5 铸件壁厚减薄3 mm应力仿真结果

Fig. 5 The results of the stress simulation of the wall thickness of the casting reduced by 3 mm

面最大应力约为36.6 MPa，壁外表面最大应力约为115 MPa。由图5b知，铸件最大应力在内腔小凸台附近，应力值约为245 MPa。密封槽内局部应力较大区域应力值小于136 MPa。

相比轻量化设计前应力仿真结果，壁厚减薄3 mm，盖板内腔小凸台附近最大应力大于铸件本体强度最低标准要求。因此，理论上存在水压破坏试验破裂风险，且盖板壁上最大应力明显增大。

将两小凸台根部圆角R5 mm增大为R10 mm，优化

壁厚减薄模型见图6，并进行应力仿真，结果见图7。

由图7知，盖板承受3.25 MPa压力，最大应力同样在内腔小凸台附近，应力值约为194 MPa，小于铸件本体强度最低要求。优化结果可行。

4.1.3 法兰减薄

在盖板壁厚减薄3 mm基础上，开展法兰减薄。盖板法兰厚28 mm，本次对法兰分别减薄5 mm与10 mm，并应力仿真分析，法兰减薄5 mm应力仿真结果见图8，



图6 优化壁厚减薄模型

Fig. 6 Optimizing the model of wall thickness reduction

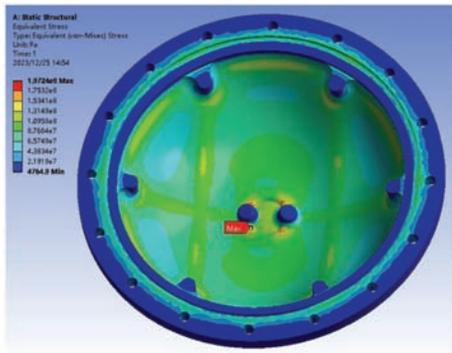


图7 优化壁厚减薄模型应力仿真结果

Fig. 7 The results of the stress simulation of the model wall thickness reduction

法兰减厚10 mm应力仿真结果见图9。

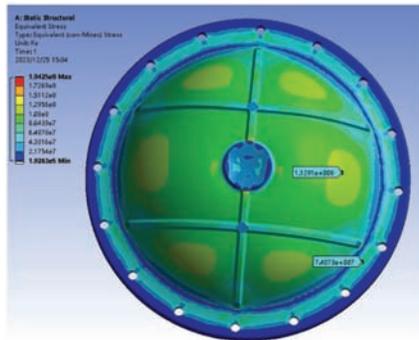
由图8a知，盖板承受3.25 MPa压力，法兰背面最大应力约为74.1 MPa，壁外表面最大应力约为113 MPa。由图8b知，铸件最大应力在内腔小凸台附近，应力值约为194.3 MPa，小于铸件本体强度最低要求。密封槽内应力较大，区域应力小于172.7 MPa。

相比壁厚减壁3 mm仿真结果，壁厚减薄3 mm且法兰减薄5 mm，最大应力都在内腔小凸台附近，都小于铸件本体强度最低要求。因此，壁厚减薄3 mm且法兰减薄5 mm盖板理论上不存在水压破坏试验破裂风险，且法兰背面与密封槽内最大应力明显增大。

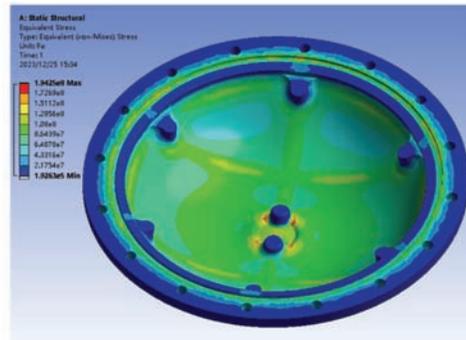
由图9a知，盖板承受3.25 MPa压力，法兰背面最大应力小于156 MPa，壁外表面最大应力小于125 MPa。由图9b知，最大应力值位置变为密封槽局部位置，最大应力值约为281 MPa。

相比壁厚减壁3 mm且法兰减厚5 mm仿真结果，壁厚减薄3 mm且法兰减薄10 mm，最大应力位置，由铸件内腔小凸台附近变为密封槽内，且应力值远大于铸件本体强度最低要求。因此，理论上盖板存在较大水压破坏试验破裂风险。

最终确定，盖板轻量化设计壁厚减薄3 mm，法



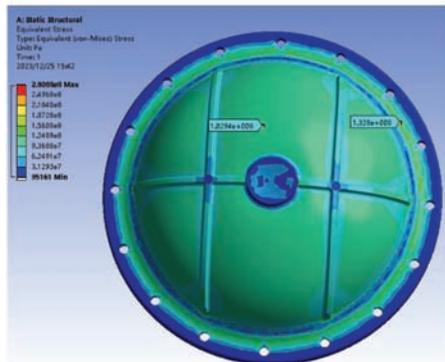
(a) 正面



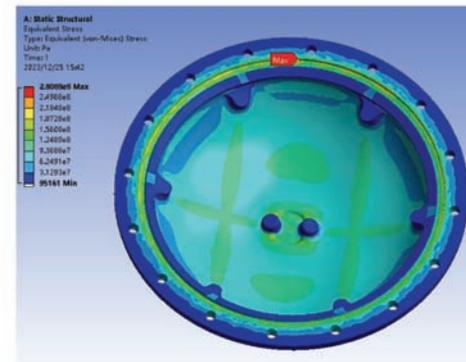
(b) 反面

图8 法兰减薄5 mm应力仿真结果

Fig. 8 The results of the stress simulation of the thickness of the casting flange reduced by 5 mm



(a) 正面



(b) 反面

图9 法兰减薄10 mm应力仿真结果

Fig. 9 The results of the stress simulation of the thickness of the casting flange reduced by 10 mm

兰减薄5 mm。相比轻量化设计前，铸件重量减轻2 kg（约13%）。

4.2 铸造工艺仿真分析与工艺优化

4.2.1 轻量化设计前后铸造工艺仿真分析

轻量化设计前，盖板壁厚10 mm，法兰厚28 mm。

轻量化设计后，盖板壁厚7 mm，法兰厚23 mm。对轻量化设计前后盖板铸造工艺仿真，轻量化设计前仿真结果见图10，轻量化设计后仿真结果见图11。充型速率为880 Pa/s。

由图10a、10b和10c知，轻量化设计前，盖板充型至5.2 s、5.5 s和8.1 s时，液体前沿最低铝液温度分别为

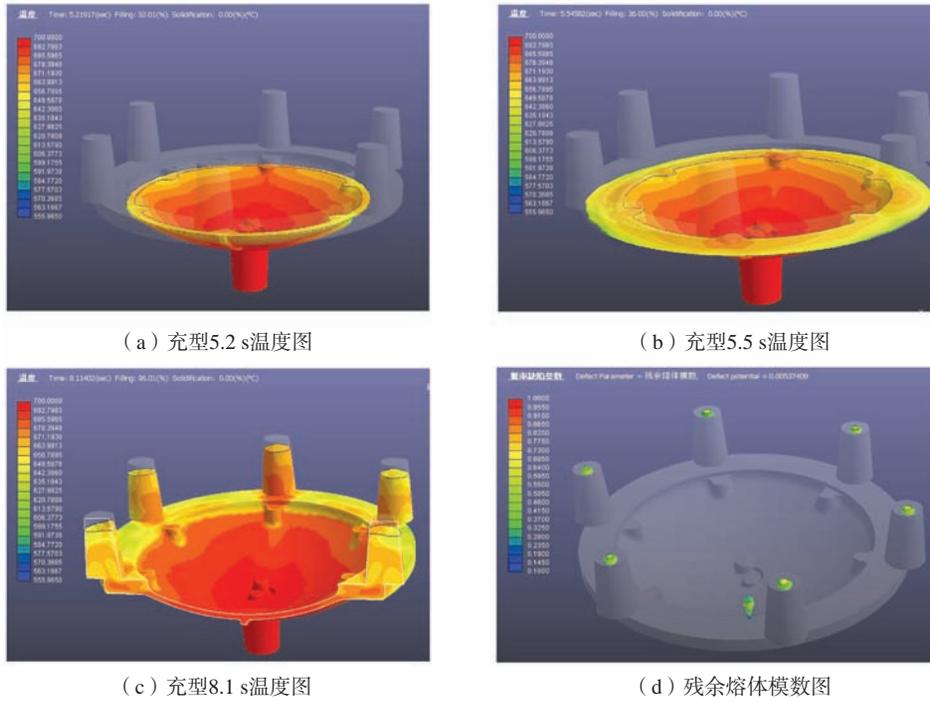


图10 轻量化设计前铸造工艺仿真结果

Fig. 10 The simulation results of the casting process before lightweight design

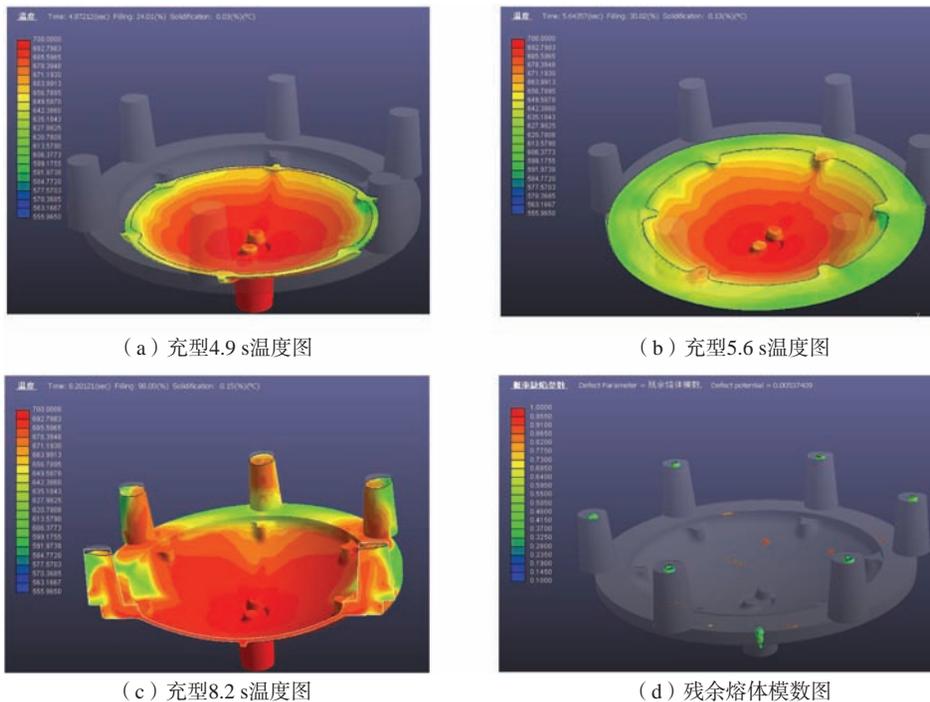


图11 轻量化设计后铸造工艺仿真结果

Fig. 11 The simulation results of the casting process after lightweight design

642 ℃、627 ℃和642 ℃以上，都高于液相线温度，不存在因浇注铝液造成铸造缺陷，铝液充型法兰流平过程降温超过20 ℃。由图10d残余熔体模数图知，缺陷都在直浇道与冒口内，铸件本体没有铸造缺陷。

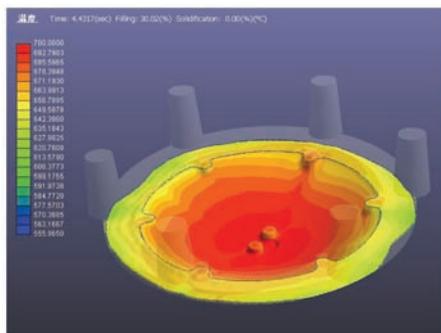
由图11a、11b和11c知，轻量化设计后，按照原工艺参数仿真，盖板充型至4.9 s、5.6 s和8.2 s时，液体前沿的最低铝液温度分别为620 ℃、613 ℃和613 ℃以上，局部铝液温度低于液相线温度（导致缩松、夹渣等缺陷）；铝液充型法兰流平过程降温超过20 ℃；将充满时，冒口中存在一定比例铝液已开始凝固。由图11d残余熔体模数图知，缺陷除了在直浇道与冒口内，

盖板本体存在多处缩孔、缩松缺陷。

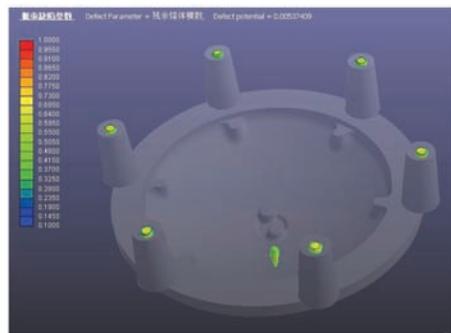
4.2.2 铸造工艺优化

通常提升充型速率能够减少铝液充型温度损失，针对轻量化盖板铸件充型温度明显偏低，本次工艺优化将充型速率由原来的880 Pa/s提高至1 100 Pa/s，仿真结果见图12。

由图12a知，充型至4.4 s时，液体前沿最低铝液温度约为627 ℃以上，高于液相线温度。由图12b知，铸件残余熔体模数图显示盖板本体没有缺陷。



(a) 充型4.4 s温度图



(b) 残余熔体模数图

图12 轻量化设计后铸造工艺优化仿真结果

Fig. 12 The simulation results of the casting process optimization after lightweight design

5 水压破坏试验验证

按照轻量化盖板优化工艺生产试制10件。铸造过程中，未发现明显变形。T6热处理后加工前，划线合格，未发生明显变形。若盖板铸件因壁厚或法兰减薄，在铸造与热处理过程中出现了批量变形，则需考

虑恢复部分壁厚。

盖板加工、检漏全部合格。选取一件进行水压破坏试验，见图13。水压加至3.8 MPa，盖板未裂、未变形，水压破坏试验通过。



(a) 水压破坏试验装置



(b) 水压破坏试验压力示数

图13 轻量化盖板铸件水压试验

Fig. 13 The validation of the hydraulic failure test of the lightweight cover plate casting

6 结论

(1) ANSYS进行水压破坏试验应力仿真分析结果表明：轻量化设计前，盖板最大应力在内腔小凸台附

近，应力值约为190 MPa，理论上能够通过水压破坏试验；壁厚减薄3 mm，盖板最大应力约为245 MPa，存在水压破坏试验破裂风险，将小凸台根部圆角R5 mm增大至R10 mm，最大应力值约为194 MPa，风险消除。当

盖板法兰减薄5 mm, 最大应力仍在内腔小凸台附近, 应力约为194.3 MPa, 不存在水压破坏试验破裂风险, 法兰背面与密封槽内局部应力明显增大; 当盖板法兰减薄10 mm, 最大应力在密封槽内, 应力约为281 MPa, 存在较大的水压破坏试验破裂风险。最终, 盖板轻量化设计对壁厚减薄3 mm, 法兰减薄5 mm, 相比轻量化设计前, 重量减轻2 kg。

(2) 采用AnyCasting对盖板轻量化设计前后铸造

工艺进行仿真分析, 结果表明: 轻量化设计前, 铝液充型良好, 铸件凝固本体没有铸造缺陷; 轻量化设计后, 充型过程存在铝液温度低于液相线温度, 铸件凝固本体存在多处缩孔和疏松缺陷; 工艺优化将充型速率由880 Pa/s提高至1 100 Pa/s, 充型凝固过程良好, 缺陷消除。

(3) 生产试制10件轻量化盖板, 加工、检漏全部合格。通过了水压破坏试验验证。

参考文献:

- [1] 陈延伟, 刘佳琳, 赵亚鹏. 铸造铝合金在舰船装备应用中存在的问题及发展趋势 [J]. 铸造, 2020, 69 (4): 329-334.
- [2] 郑小秋, 谢世坤, 易荣喜, 等. 低压铸造技术研究现状及发展趋势 [J]. 材料导报A (综述篇), 2016, 30 (4): 74-85.
- [3] 鄯宇, 王业基, 王峰, 等. 低压铸铝件缩孔缺陷数值模拟与工艺改进 [J]. 精密成型工程, 2022, 14 (4): 139-145.
- [4] 马广辉, 李润霞, 段林. 铸造缺陷对 ZL101 合金断裂行为的影响 [J]. 铸造, 2018, 67 (2): 162-166.
- [5] 游寿松, 张吉祥, 张科峰, 等. 铸造 CAE 模拟分析低压铸造泵轮缩松缺陷 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 183-186.
- [6] 张殿杰, 刘建芳, 王星, 等. 轻量化枝杈轮辐铝合金轮毂低压铸造成形有限元模拟及试验分析 [J]. 铸造, 2020, 69 (10): 1098-1103.
- [7] 高睿恒, 李贞, 王雪强, 等. 高速铁路轻量化设计棘轮的铸造工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (21): 128-136.
- [8] 全国铸造标准化技术委员会. GB/T 1173—2013 铸造铝合金 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [9] 全国铸造标准化技术委员会. GB/T 9438—2013 铝合金铸件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

Lightweight Design and Casting Process Optimization of the Aluminum Alloy Cover Plate Casting

LI Hong-qiang, ZHU Guang, LI Pei-gen, LI Wen-jing
(Xi'an Xikai Precision Foundry Co., Ltd., Xi'an 712046, Shaanxi, China)

Abstract:

In this paper, ANSYS simulation software was used to assist in lightweight design of the aluminum alloy cover plate casting, and AnyCasting simulation software was used to assist in optimization casting process. The ANSYS simulation results showed that the strength of the casting met the requirement of the hydraulic failure test before lightweight design. When the thickness of the casting wall was reduced by 3 mm, and there was a rupture risk of hydraulic failure test near the two small boss of the inner cavity. By changing the rounded corner $R5$ mm to $R10$ mm at the base of the boss, the casting rupture risk was eliminated. Further analysis showed that it was feasible to reduce the flange thickness by 5 mm, but it was not feasible to reduce the flange thickness by 10 mm. The AnyCasting simulation results showed that the filling and solidification processes were good and the casting had no defect before lightweight design. After lightweight design, the aluminum liquid temperature was relatively low during the filling process, multiple shrinkage and porosity defects appeared in the casting solidification process. The filling rate was increased from 880 Pa/s to 1 100 Pa/s, and the problems were eliminated. The trial production of the lightweight cover plate castings has been carried out and it has passed the validation of the hydraulic failure test.

Key words:

aluminum alloy; cover plate casting; lightweight design; process optimizing