

ZL205A 合金侧盖壳体铸造工艺 研究与产品试制

马文龙¹, 杨力², 杨小冬¹, 徐远财², 罗辉¹, 樊自田², 唐锦球¹

(1. 江麓机电集团有限公司, 湖南湘潭 411100;

2. 华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北武汉 430000)

摘要: 模拟分析了重力铸造与低压铸造方法下ZL205A合金侧盖壳体铸件的充型、凝固过程及缺陷特征, 进行了侧盖壳体铸件试制及性能对比。采用重力铸造时, 模拟显示铸件充型速度快, 紊流、混流现象严重, 凝固速率慢且过程混乱, 孔隙率高; 铸件表面及内部缩松、偏析等缺陷严重, 基体组织及晶界中微观缩松与成分偏析交织显现。取样部位平均抗拉强度与伸长率为A区: 400 MPa, 3.1%, B区: 444 MPa, 3.4%, 铸件为不合格品。采用低压铸造时, 模拟显示铸件充型平稳, 凝固速率快且自上而下顺序凝固, 孔隙率低, 铸件探伤合格, 组织均匀致密且微观缩松和偏析占比显著降低。取样部位平均抗拉强度与伸长率为A区: 478 MPa, 4.7%, B区: 484 MPa, 4.9%, 铸件合格且性能优异。验证了低压铸造工艺对ZL205A合金侧盖壳体铸件的适应性与优势。

关键词: ZL205A; 铸造; 侧盖壳体; 组织结构; 力学性能

作者简介:

马文龙(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为铝合金铸件铸造工艺设计优化与精密成形技术。E-mail: 1416966520@qq.com

通讯作者:

樊自田, 男, 教授, 博士, 硕士生导师。E-mail: fanzt@hust.edu.cn

中图分类号: TG146.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2024)

06-0865-07

收稿日期:

2023-06-14 收到初稿,

2023-12-18 收到修订稿。

ZL205A合金因其优异的力学性能, 在轻质高性能材料中占有举足轻重的地位, 广泛应用于武器装备与特种车辆关键零部件中。但是ZL205A合金因其较宽的结晶温度, 流动性差, 糊状凝固等特性严重制约了该合金的铸造性能, 尤其在形状复杂、热节较多和大径厚比铸件的铸造过程中, 极易产生偏析、缩松、热裂等铸造缺陷, 严重影响了铸件质量^[1-2]。在消除ZL205A合金铸件缺陷的研究中, 学者们采用了多种研究方法并进行了大量试验验证与理论分析。例如通过铸造工艺优化或组分调控起到细化晶粒、控制金属液流速, 防止紊流, 减小晶粒尺寸, 控制合金凝固速率, 增加合金过冷度, 实现快速和顺序凝固等方法^[3-5]。这一系列研究结果对特定类型及结构的ZL205A合金铸件生产起到了很好的指导作用, 大幅提高了铸件质量, 也为其他类型及结构的ZL205A合金铸件工艺研究及铸造生产提供了很好的理论与技术支持。

对于圆柱类桶型壳体及小型的ZL205A合金铸件已有相当成熟的工艺方法进行生产, 例如砂型低压铸造、金属型重力铸造等。由于产品迭代需求, 现拟采用ZL205A合金替代ZL101A合金, 提高侧盖壳体零件的性能和使用功能。此类结构的ZL205A合金铸件为工厂首次试制, 因此需对铸造工艺进行研究。本文通过铸造工艺设计与仿真模拟, 对比研究了重力铸造与低压铸造工艺对侧盖壳体铸件组织和力学性能的影响, 确定合理的铸造工艺方案, 以生产出满足使用要求的合格侧盖壳体铸件。

1 试验材料及方法

侧盖壳体铸件结构与取样部位见图1(A区: 轴承孔, B区: 油道), 铸件质量为25.5 kg, 轮廓606 mm × 454 mm × 136 mm, 最小壁厚10 mm, 油道、结合面和轴承孔等受力部位壁厚达到35 mm以上, 铸件薄厚不均, 较多热节, 径厚比大。铸件材质为ZL205A铸造铝铜合金, 合金化学成分见表1。

采用Magma铸造仿真模拟软件对侧盖壳体铸造过程进行模拟分析, 生产采用树

表1 ZL205A合金成分
Table 1 Nominal chemical composition of ZL205A alloys

Cu	Mn	Ti	Cd	Zr	B	V	Fe	Si	Mg	Al
4.6~5.3	0.3~0.5	0.15~0.35	0.15~0.25	0.15~0.25	0.005~0.6	0.05~0.3	≤0.15	≤0.06	≤0.05	余量

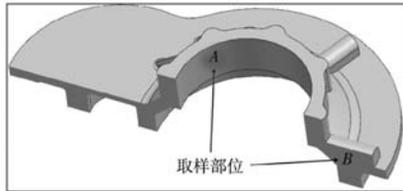
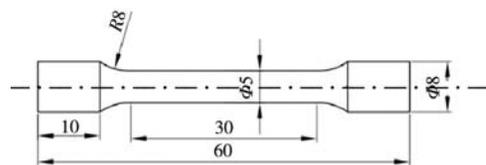


图1 侧盖壳体铸件结构及取样部位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of casting structure and sampling position of side cover shell

脂砂造型，铸造工艺为重力铸造和低压铸造。ZL205A合金材料在GB-150型坩埚电阻炉内进行熔炼，采用精炼（SY-CJ3型精炼剂）+旋转吹气（氩气）的双级熔炼

工艺进行合金液的净化处理，熔炼完成后即刻进行浇注。采用UNI450型X射线数字成像系统对铸件进行探伤检查，按照GB/T 9438—1999中Ⅰ类铸件要求验收，不允许存在超过标准要求的缩松、气孔和裂纹等铸造缺陷。在铸件取样部位制取金相试样经打磨和抛光后用0.5wt% HF溶液进行腐蚀，在DMM-490C型光学显微镜（OM）下观察其组织形貌。在铸件取样部位分别制取4根力学性能拉伸试样，试样经T6热处理后采用C42-104型微机控制电子万能试验机对试样进行拉伸试验，取样部位力学性能应满足：抗拉强度 $R_m \geq 420$ MPa，伸长率 $A \geq 3\%$ ，拉伸试样规格与实物见图2。



(a) 试样规格



(b) 拉伸后的试样实物

图2 力学性能拉伸试样规格及实物

Fig. 2 The tensile specimen specifications and material objects of mechanical properties

2 试验结果与讨论

2.1 侧盖壳体重力铸造工艺仿真模拟

侧盖壳体铸件重力铸造有现成可用的模具，铸造工艺设计如图3所示。浇注系统采用铝合金铸造常用的双向横浇道搭接式工艺设计，开设4处内浇道进行充型；在油道、轴承孔和底部结合面部位放置冷铁进行激冷，冷铁布置尽量远离浇道，冷铁材质为铸铁或者钢制；顶部设计较为厚大的冒口进行补缩^[6]。

对侧盖壳体铸件重力铸造工艺进行模拟分析，浇注温度设置为720 °C，浇注时间15 s，其充型、凝固过程和孔隙率模拟结果见图4。铸件在浇注过程中可能发

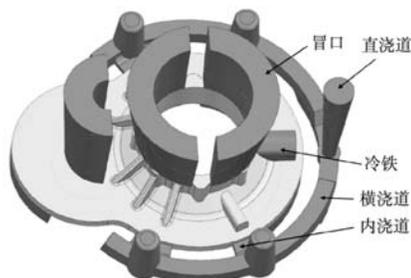


图3 侧盖壳体重力铸造工艺示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gravity casting process of side cover shell casting

生的卷气和夹渣等缺陷，可以通过铸造流场的模拟仿真进行分析。一般来说，控制充型过程中内浇道的金属液流速小于0.5 m/s，可有效避免铸件在充型过程中的卷气和夹渣等缺陷^[7]。充型模拟1.4 s时，铝合金液经内浇道开始对铸件充型，充型速度明显较快，达到0.7 m/s，充型时存在明显的混流和飞溅现象，充型过程不平稳，如图4a-b所示，直至5.4 s时，铸件充型速度才明显降低，充型过程趋于平稳，见图4c。图4d-g为铸件凝固过程液相分数占比模拟结果，白色区代表固相，颜色区代表液相，铸件的凝固顺序呈现出从边缘到中心和自下而上向冒口部位凝固。在凝固末期，铸件内部仍存在着较多的液相区，图4f，凝固过程较为混乱，结合铸件各部位凝固速率模拟结果，见图4g，发现冒口底部轴承孔区域凝固速率最慢，为铸件最后凝固的部位，凝固速率分布不均匀，冒口未能完全对该部位进行补缩，凝固末期的孤立液相在铸件凝固后将形成缩松和缩孔等铸造缺陷，铸件孔隙率较高，如图4h所示。

2.2 侧盖壳体低压铸造工艺仿真模拟

以低压铸造为代表的反重力铸造技术，最大的特点是充型平稳且能得到组织致密性高的铸件。如图5所

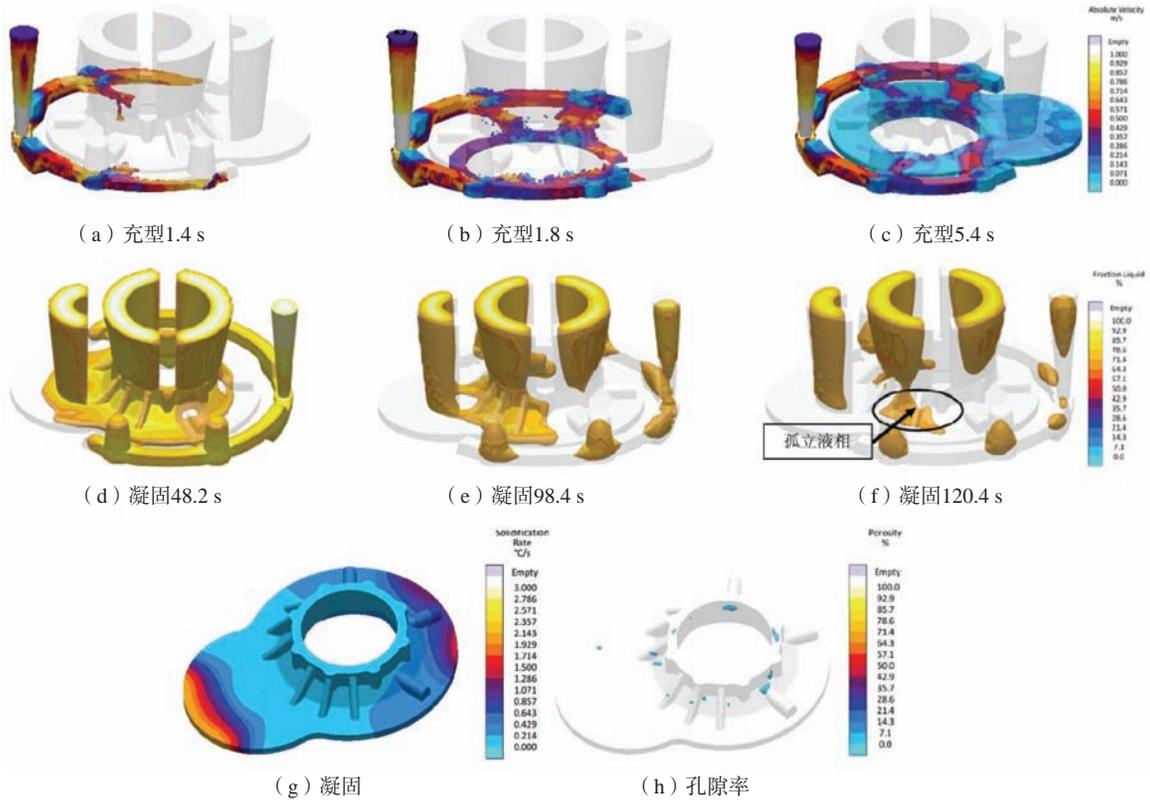


图4 重力铸造工艺充型、凝固和孔隙率Magma模拟结果

Fig. 4 Magma simulation of filling, solidification and porosity of gravity casting process

示，在铸件轴承孔及底部结合面边缘部位设计冷铁，冷铁布置避免与内浇道直接对冲；冒口设计以排气和集渣为主，在铸件结合面的厚大平面处设计内浇道、横浇道和升液口。低压铸造浇注系统设计需充分考虑内浇道的补缩，顺序凝固，结构简单，易于与铸型分离，铸件材质等因素，浇注系统设计为开放式，即 $\sum A_{内} > \sum A_{横} > \sum A_{直}$ （升液口可当作低压浇注系统的直浇道），内浇道截面尺寸及高度设计需大于铸件受补缩部位截面及厚度的1.5~2倍，确保内浇道的凝固时间大于或等于铸件受补缩部位的凝固时间，使内浇道在压力作用下对铸件完全补缩，实现顺序凝固^[8]。

对侧盖壳体低压铸造工艺进行Magma模拟分析，模拟参数见表2，充型、凝固及孔隙率模拟结果如图6所示。充型模拟7.2 s时，铝合金液经内浇道开始对铸

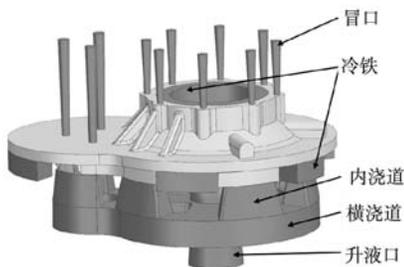


图5 侧盖壳体低压铸造工艺示意图

Fig. 5 Schematic diagram of low pressure casting process for side cover shell

表2 侧盖壳体低压铸造模拟参数
Table 2 The low pressure simulation parameters of side cover shell

浇注温度/℃	升液压力/kPa	充型压力/kPa	充型时间/s	保压压力/kPa
720	10	25	15	50

件充型，充型速度介于0.2~0.3 m/s，流速均匀合理，充型过程平稳，如图6a-b所示。凝固结果见图6c-e，铸件的凝固趋势沿重力方向形成一定梯度，自上而下向内浇道部位凝固，206.8 s时铸件已完全凝固，残余液相集中在内浇道与横浇道，表明在压力作用下浇口和浇道对铸件具有更强的补缩能力，使铸件自上而下顺序凝固。铸件各部位凝固速率模拟结果见图6f，轴承孔部位凝固速率明显提高，铸件整体的凝固速率分布均匀，相比于重力铸造，凝固速率更快，铸件内部形成疏松和缩孔等缺陷的几率明显降低，如图6g所示。经Magma模拟对比分析，低压铸造工艺优于重力铸造。

2.3 产品试制与分析

为进一步验证两种工艺的可靠性，采用重力铸造和低压铸造工艺各生产1件侧盖壳体铸件进行研究对比，通过检测分析从而确定侧盖壳体铸造生产最优工艺。采用重力铸造工艺时，浇注温度为720 ℃，浇注时

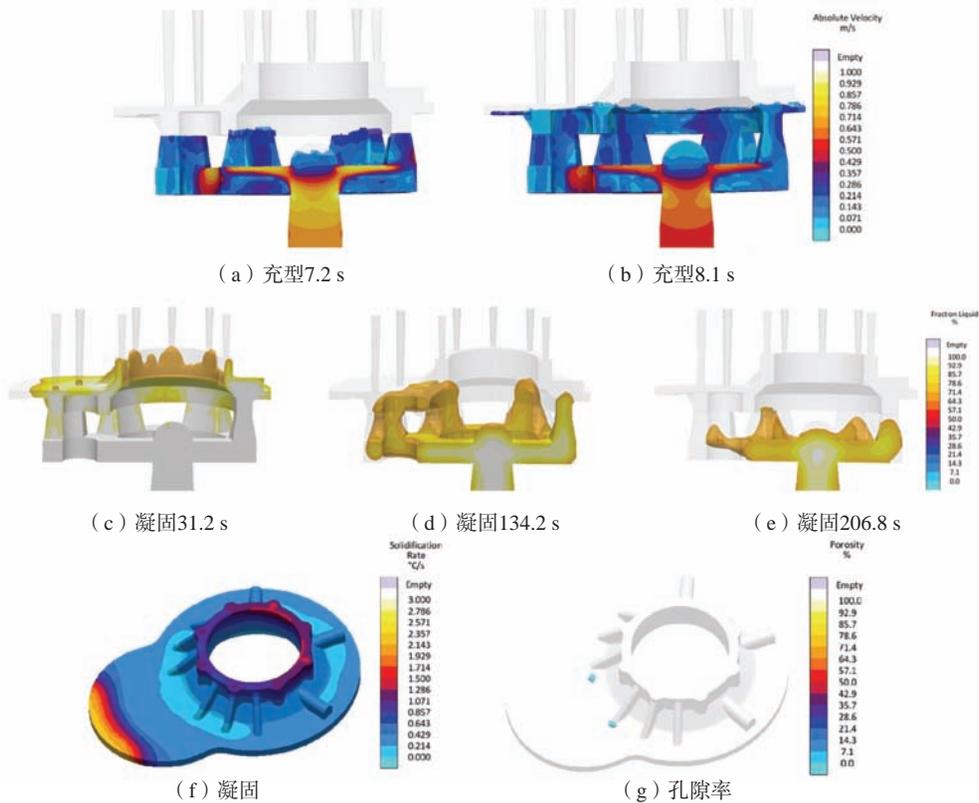


图6 低压铸造工艺充型、凝固和孔隙率Magma模拟结果

Fig. 6 Magma simulation of filling, solidification and porosity of low pressure casting process

间15 s, 低压铸造工艺参数见表3。

2.3.1 X射线探伤分析

重力铸造生产的侧盖壳体铸件实物及X探伤结果见图7。铸件轴承孔和加强筋部位存在明显的宏观缩松和缩孔缺陷, 如图7a-b所示。经X射线探伤检查, 发现在铸件结合面、轴承孔、油道等厚大热节部位存在着密集分布的云雾状、线状偏析和分散分布的白点状偏析缺陷, 如图7c-e框区所示。云雾状偏析与缩松形貌极为

相似, 线性偏析与裂纹形貌极为相似, 只是在探伤照片上显示颜色不同, 缩松和裂纹在探伤照片上显示黑色, 而偏析显示白色^[9], 铸件探伤不合格。

低压铸造工艺生产的侧盖壳体铸件实物见图8a, 其表面无明显可见的宏观缩松和缩孔缺陷。经X射线探伤检查, 铸件油道、轴承孔和结合面等部位均未发现明显的缩松和偏析等铸造缺陷, 铸件内部质量良好, 探伤结果合格, 如图8b-c所示。

表3 侧盖壳体铸件低压铸造参数

Table 3 The low pressure casting parameters of side cover shell casting

浇注温度/°C	升液压力/kPa	充型压力/kPa	充型时间/s	结晶增压压力/kPa	保压压力/kPa	保压时间/s
720	8	25	15	40	50	600

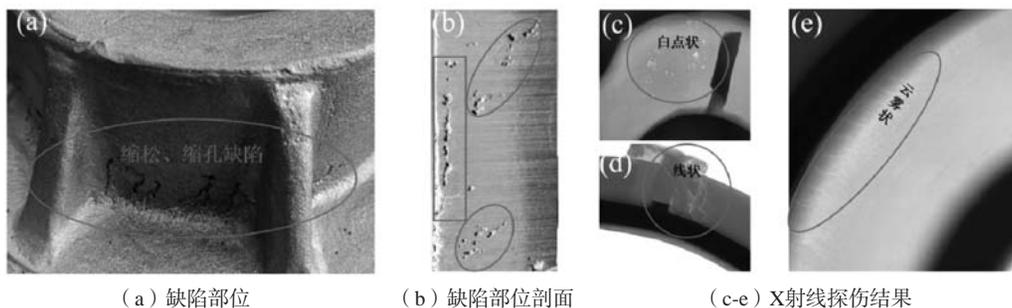


图7 重力铸造侧盖壳体铸件缺陷部位图

Fig. 7 The defect part of gravity casting for side cover shell

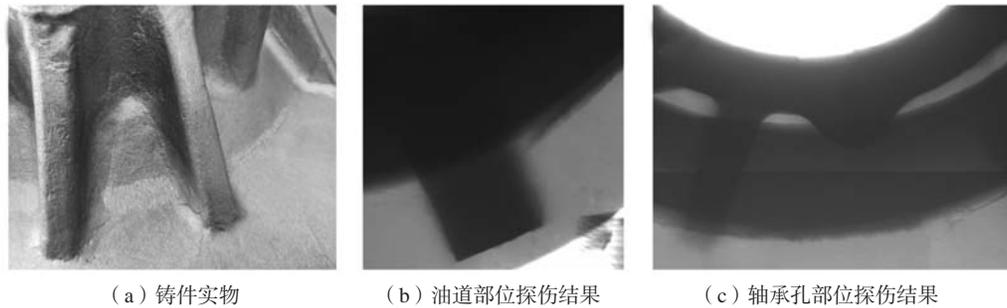


图8 低压铸造侧盖壳体铸件与X射线探伤结果

Fig. 8 The side cover shell of low pressure casting and X-ray flaw detection results

2.3.2 组织分析

图9和图10分别为重力铸造和低压铸造侧盖壳体铸件取样部位(A区、B区)的金相组织形貌。图9所示,重力铸造侧盖壳体基体组织中存在较多偏析和微观缩松缺陷,基体组织中呈现的线状或点状白色团聚物为偏析,黑色孔洞形貌为显微缩松,其尺寸介于20~100 μm之间,晶粒尺寸大,组织不均匀,如图9a和图9c所示。图9b为图9a的局部放大,图9d为图9c的局部放大,从中可看出偏析形貌在晶界上聚集、延展,贯穿了整个晶

界,属于典型的晶界偏析。由于凝固顺序和凝固条件的差异,偏析与显微缩松产生的占比也大不相同,A区产生的偏析与显微缩松占比明显高于B区,这种微观组织上的差异将直接影响铸件的力学性能。

结合仿真模拟结果分析,铸件在充型初期金属液流速较快,伴随着混流和飞溅现象,造成金属液卷气严重,滋生大量二次氧化夹杂,增大了缩松和夹杂等缺陷产生的几率;同时,铸件的凝固顺序趋于冒口方向,冒口补缩能力不足,使铸件轴承孔部位(A

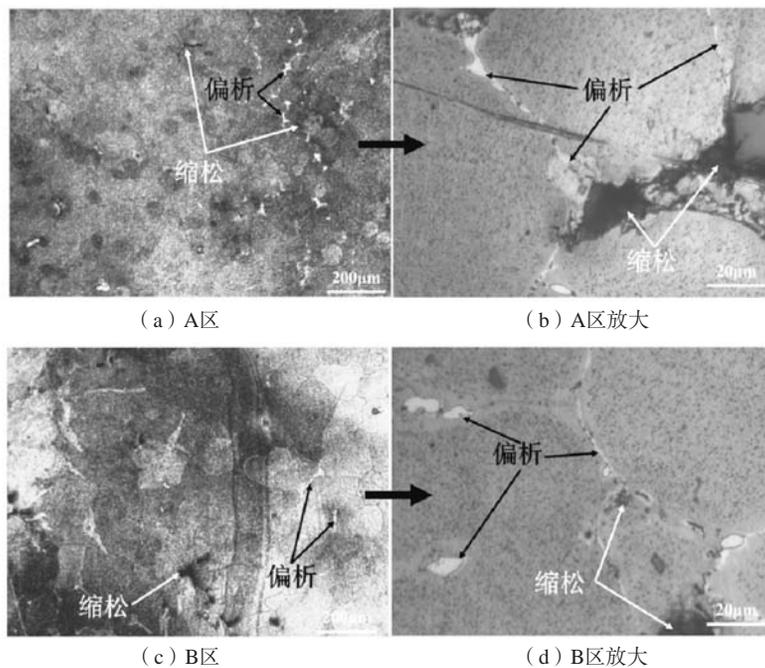


图9 重力铸造侧盖壳体铸件取样部位金相腐蚀形貌

Fig. 9 Metallographic corrosion morphology of the sampling part for gravity casting process side cover shell

区)孤立液相无法顺利向冒口部位凝固,铸件凝固后该部位产生大量缩松、缩孔缺陷。此外,铸件材质为ZL205A,在合金凝固末期,若铸件内部仍存在较多液相溶液,富Cu液体对周围固相在补缩压力的作用下将填充该区域,并最终在该部位形成偏析,即铸件热节若无法有效消除,孤立液相区越多,富Cu液体的体积分数越大,成分偏析将大量出现^[10]。

低压铸造侧盖壳体铸件取样部位组织均匀、致密,基体中的微观缩松、缩孔和偏析等缺陷明显减少,如图10所示。图10b为图10a的局部放大,图10d为图10c的局部放大,可见微观缩松与偏析尺寸明显减小,晶界组织中未出现贯穿性的晶界偏析,预示着铸件具有良好的力学性能。两处取样部位的组织结构差异小,标志着铸件的力学性能不会存在较大差别。液

态金属在充型和凝固过程中由于压力的存在，改善了金属与铸型的热交换，进而增大了金属液的凝固速度，提高金属液体的补缩动力，使铸型与铸件之间热传导更

容易进行，初生枝晶强度不高，易在压力下粉碎形成新的晶核，使晶粒尺寸减小，连带缩松及偏析等缺陷的尺寸一并减小，基体组织趋于均匀，致密度提高^[11]。

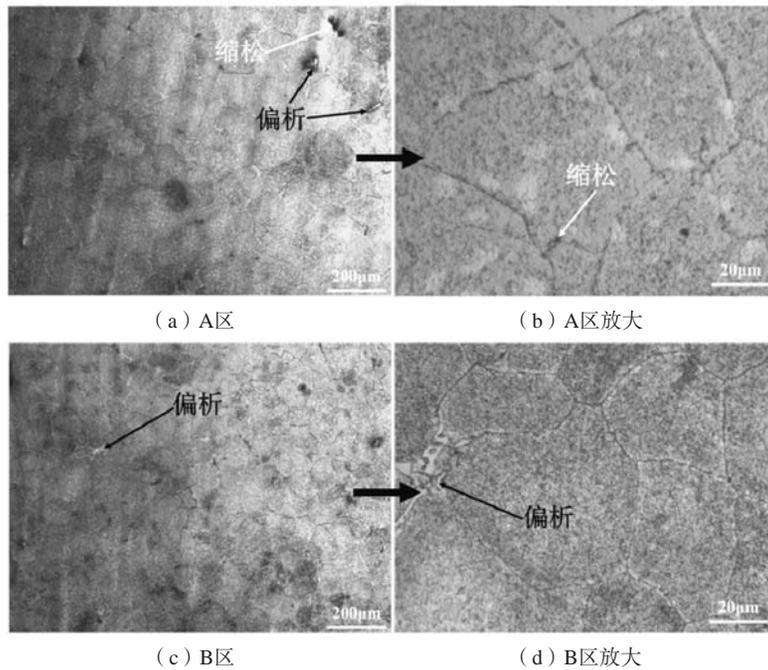


图10 低压铸造侧盖壳体铸件取样部位金相腐蚀形貌

Fig. 10 Metallographic corrosion morphology of the sampling part for low-pressure side cover shell casting

2.3.3 力学性能分析

侧盖壳体铸件本体取样部位的力学性能结果如图11所示。重力铸造下侧盖壳体A区的最大抗拉强度为418 MPa，伸长率为3.3%，平均抗拉强度仅400 MPa，平均伸长率为3.1%；B区的最大抗拉强度为462 MPa，伸长率为3.8%，平均抗拉强度为444 MPa，平均伸长率为3.4%，见图11a。侧盖壳体铸件在B区的力学性能明显高于A区，这也证实侧盖壳体铸件在A、B两区的微观组织存在差异，使铸件在这两处的力学性能呈现不均衡状态，严重影响铸件的使用功能，并且侧盖壳体在A

区的抗拉强度不满足铸件技术要求 ($R_m \geq 420$ MPa)，铸件作报废处理。低压铸造下条件下，侧盖壳体A区的最大抗拉强度为490 MPa，伸长率为5.0%，平均抗拉强度478 MPa，平均伸长率为4.7%。B区的最大抗拉强度为495 MPa，伸长率为5.2%，平均抗拉强度为484 MPa，平均伸长率为4.9%见图11b，力学性能提升明显，并且侧盖壳体铸件取样部位的力学性能变化差异不大，铸件整体的力学性能优异，满足并高于铸件技术要求。经结果分析与讨论，决定后续试制ZL205A合金侧盖壳体铸件采用低压铸造工艺。

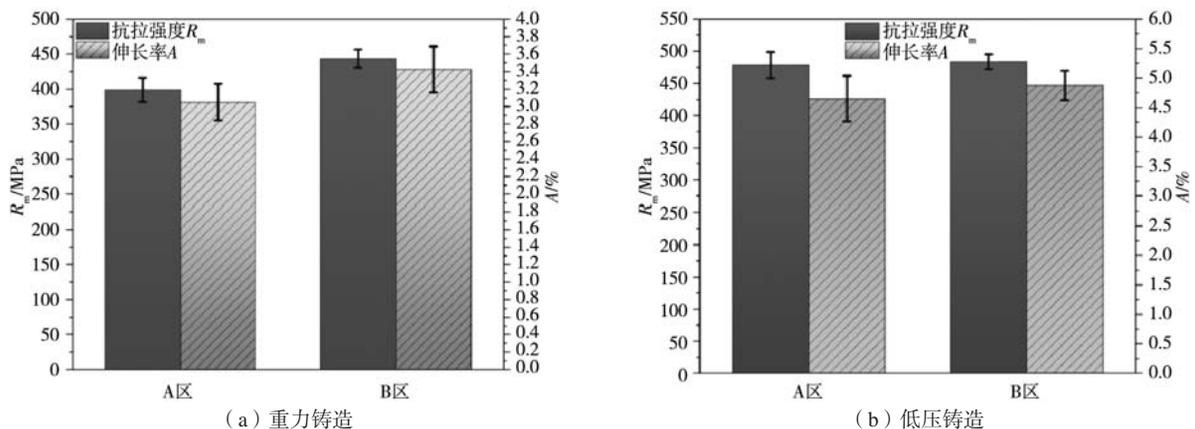


图11 侧盖壳体取样部位力学性能结果

Fig. 11 Mechanical property results of sampling parts of side cover shell

3 结论

本文对比分析了重力铸造与低压铸造条件下, ZL205A合金侧盖壳体铸件的充型和凝固过程及缺陷特征, 进行了侧盖壳体铸件的试制及性能对比, 验证了低压铸造工艺对ZL205A合金侧盖壳体铸件的适应性与优势。

(1) 重力铸造工艺下, 模拟结果显示铸件充型速度快, 充型不平稳, 紊流, 混流现象严重, 铸件凝固速率慢、凝固过程混乱、补缩受阻, 铸件缩松、缩孔率高。生产的样件表面存在大量宏观可见的缩松、缩孔缺陷, 探伤显现出大量偏析缺陷, 其基体组织及晶界中微观缩松与成分偏析交织显现, 且铸件A、B两区取样部位组织结构与力学性能存在较大差异。A区平均

抗拉强度仅为400 MPa, 平均伸长率为3.1%, B区平均抗拉强度为444 MPa, 平均伸长率为3.4%, 铸件为不合格品。

(2) 低压铸造工艺下, 模拟结果显示铸件充型过程平稳, 凝固速率快且自上而下顺序凝固, 铸件内部缩松和缩孔率低。生产的样件表面质量良好, 探伤结果合格, 组织均匀致密且微观缩松和偏析占比及尺寸显著减小, 铸件A、B两区取样部位组织结构与力学性能差异不大。A区平均抗拉强度为478 MPa, 平均伸长率4.7%, B区平均抗拉强度为484 MPa, 平均伸长率4.9%, 铸件合格且性能优异, 满足产品使用要求, 相比于重力铸造, 铸件质量显著提升。

参考文献:

- [1] WANG Y, WU S, XUE X, et al. Formation mechanism and criterion of linear segregation in ZL205A alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (11): 3632-3638.
- [2] 李玉胜, 翟虎, 闫卫平, 等. ZL205A合金壳体铸件线性偏析缺陷形成机理研究 [J]. 铸造, 2006 (11): 1170-1173.
- [3] 周永江, 左强, 范学焱, 等. ZL205A合金铸件中偏析的形成机理与预防措施 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (2): 125-127.
- [4] 王建军, 丁方政, 郑卫东, 等. ZL205A合金大型筒体类铸件偏析缺陷控制技术研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (4): 396-401.
- [5] LI Daoxiu, YAN Xirui, FAN Yong, et al. An anti Si/Zr-poisoning strategy of Al grain refinement by the evolving effect of doped complex [J]. Acta Materialia, 2023, 118812.
- [6] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册: 铸造工艺 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] EDWARDS K. Castings practice: the 10 rules of casting [J]. Materials & Design, 2005, 26 (7): 1-4.
- [8] 廖海洪, 梁敏洁, 程军. 铝合金低压铸造浇注系统的CAD设计 [J]. 稀有金属, 2006 (S1): 43-48.
- [9] 史晓平, 李玉胜. ZL205A合金偏析缺陷研究 [J]. 铸造, 2011, 60 (10): 1022-1026.
- [10] HU Wu, ZHU Ke, WANG Meng, et al. Study on linear segregation of ZL205A alloy [J]. Materials Science Forum, 2021, 1020 (2): 8-12.
- [11] 李少楠. 低压铸造凝固条件对ZL205A合金件组织及力学性能影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

Research of Casting Technology and Trial-Production of ZL205A Alloy Side Cover Shell

MA Wen-long¹, YANG Li², YANG Xiao-dong¹, XU Yuan-cai², LUO Hui¹, FAN Zi-tian², TANG Jin-qi¹

(1. Electromechanical Group Co. of Jiang Lu, Xiangtan 411100, Hunan, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Wuhan 030024, Hubei, China)

Abstract:

In this paper, the filling, solidification process and defect characteristics of ZL205A alloy side cover shell castings under gravity casting and low pressure casting are simulated and analyzed, and the trial production and performance comparison of side cover shell castings are also conducted. When gravity casting is adopted, the simulation shows that the casting filling speed is fast, the phenomenon of turbulence and mixed flow is serious, the solidification rate is slow and the process is chaotic, and the porosity is high. The defects of shrinkage and segregation on the surface and inside of the sample are serious, and the micro-shrinkage and composition segregation are interwoven in the matrix and grain boundaries. The average tensile strength and elongation of the sampling site are 400 MPa, 3.1% in zone A and 444 MPa, 3.4% in zone B, indicating that the casting is unqualified. When using low pressure casting, the simulation shows that the mold filling is stable, the solidification rate is fast and the porosity is low. The sample is qualified in inspection, the microstructure is uniform and dense, and the proportion of micro-shrinkage and segregation is significantly reduced. The average tensile strength and elongation of the sampling site are 478 MPa, 4.7% in zone A and 484 MPa, 4.9% in zone B. The casting is qualified and has excellent performance. The adaptability and advantages of low pressure casting process to ZL205A alloy side cover shell casting are verified.

Key words:

ZL205A; cast; side cover shell; microstructure; mechanical properties