

差压铸造大型复杂镁合金壳体铸件模拟研究

蔡 森 王晓巍 卢影峰
[沈阳飞机工业(集团)有限公司]

摘 要 采用差压铸造来制备大型复杂 ZM5 镁合金壳体铸件,利用 MAGMA 软件对铸件进行了温度场模拟。为了解决铸件的冶金质量问题,提出通过对差压铸造时升液管上部砂型采用半球设计,可增加从升液管进入的金属液与型腔的接触面积,进而增加受热面积,可减少金属液对型砂的热冲击,进而改善由于长时间热冲击带来的卷砂问题,从而获得优质铸件。

关键词 差压铸造;ZM5 镁合金;温度场

中图分类号 TG146.22;TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.09.023 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Simulation on Large Complicated ZM5 Magnesium Alloy Housing by
Differential Pressure Casting

Cai Sen, Wang Xiaowei, Lu Yingfeng
(Shenyang Aircraft Corporation)

Abstract: The MAGMA software was used to simulate the temperature field of large complex ZM5 magnesium housing preapred by differential pressure casting. In order to solve the problem of casting metallurgical quality, hemisphere design in upper mold of lift pipe was designed to increase contact area between the metal liquid and the cavity during differential casting. Liquid metal can reduce the thermal shock of molding sand, which greatly reduce the volume of rolled sand for a long time, so the high quality castings can be obtained.

Key Words: Differential Pressure Casting, ZM5 Magnesium Alloy, Temperature Field

镁合金由于密度低、比强度高、阻尼性能好、热传导和电磁屏蔽性能好、尺寸稳定、收缩率小及可回收利用等特点而得到了广泛的应用^[1~4]。近些年来,关于镁合金的研究取得了很多有意义的结果。目前,铸造仍是镁合金的主要成形方式之一。其中,重力铸造是较为传统的成形方式,常采用顶注或者从砂型侧面进行浇注,浇注过程中由于熔体的重力作用,浇注速度控制不好极易出现紊流现象,且熔体浇注时和空气接触,容易产生氧化夹杂等缺陷。一般砂型铸造由于其逐步的凝固及其补缩时依靠冒口内熔体的重力而实现,若冒口设计不合理则浇注时容易出现浇不足、缩松、缩孔等缺陷,同时浇注系统较为复杂,冒口的设计也费时费力^[5~7]。

与重力铸造相比,差压铸造时熔体是从模具底端充填型腔,合金液流动平稳且在密闭的容器内进行浇注,氧化夹杂等缺陷较少。另外,差压铸造在熔体充满型腔后会继续保持甚至是增加液面上气体的压力,补缩效果好,铸件的致密度也比砂型铸件要高。另外,差压铸造的浇注系统较为简单,甚至可以不设冒口,从而简化了

工艺过程,金属熔体利用率也高^[8,9]。

LEE W M 等^[10]根据模拟结果,分析缺陷产生原因,对铸件进行了冒口与外冷铁的优化设计,可以有效减少缩孔、缩松缺陷。PENG Y H 等^[11]研究了 AZ91D 低压铸造模拟,发现产生的收缩缺陷在不同冷却条件下,设置侧模具可显著提高其模具冷却能力,从而提高铸件品质量。通过合理设计铸件的浇冒系统,铸件的内部品质得到了大幅度提升。一般来说,数值模拟有助于研究者更好地理解与分析在铸造过程中金属液在模具型腔内的充型和凝固过程,并预测缩孔、缩松等缺陷,对铸件工艺调整 and 品质的控制具有重要的意义^[12,13]。

随着航空航天领域对装备轻量化越来越迫切^[14],计算机仿真技术可以实现对较为复杂铸件铸造过程的模拟仿真,并对铸造工艺方案进行模拟验证,完善铸造工艺,缩短研制周期,降低研制成本。利用铸造模拟仿真软件可对铸件充型和凝固过程中的流场、温度场等进行数值计算,从而得到铸件的模数、热节分布和缩松等缺陷的分布结果,并且可以根据计算结果评估铸造工艺

收稿日期:2020-12-24;修改稿收到日期:2021-01-23
第一作者简介:蔡森,男,1983 年出生,高级工程师,沈阳(110850),E-mail:176864318@qq.com
引用格式:蔡森,王晓巍,卢影峰. 差压铸造大型复杂镁合金壳体铸件模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(9):1 170-1 175.
CAI S, WANG X W, LU Y F. Simulation on large complicated ZM5 magnesium alloy housing by differential pressure casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9):1 170-1 175.

方案的合理性,进而确定最优的铸造工艺方案。本课题利用 MAGMA 软件对某 ZM5 大型多筋、壁厚差悬殊、复杂曲面壳体铸件差压铸造方案进行模拟计算及分析,研究铸造模拟过程以及实际浇注过程的温度场分布,以明确适合该类大型复杂铸件生产的最佳工艺方案。

1 ZM5 镁合金铸件浇注系统及砂型设计

壳体材质为 ZM5 镁合金,其轮廓尺寸为 620 mm×650 mm×420 mm,见图 1,可见铸件外形复杂,铸件壁厚变化大、筋条多,在凝固过程中厚薄交界处及筋条处易产生“热节”等问题,导致无法保证合金液同时凝固或顺序凝固,补缩不足,故会产生缩松和裂纹等缺陷。为了保证铸件的内部品质,必须根据铸件的结构特点,创造一个有利于实现顺序凝固的有效条件。目前用来估算铸件凝固时间的方法主要有模数法、热节圆法、经验法等。模数法相对考虑了铸件的结构形状对散热条件的影响,因而在估算铸件凝固时间方面比热节圆法

及经验法更为准确。图 2 为模拟铸件模数分布云图。可以看出,铸件的模数大的部位集中在铸件底部大平面位置,所以选择大平面朝下放置利于补缩。由于铸件高度较高,使用常规的浇道无法完整充型,所以在铸件侧面放置 4 条缝隙浇道,以保证充型。根据铸件结构特点及其复杂性,设计浇注系统和砂型见图 3。可以看出,该浇注系统方案比较简单,这样做不仅成形过程简单,

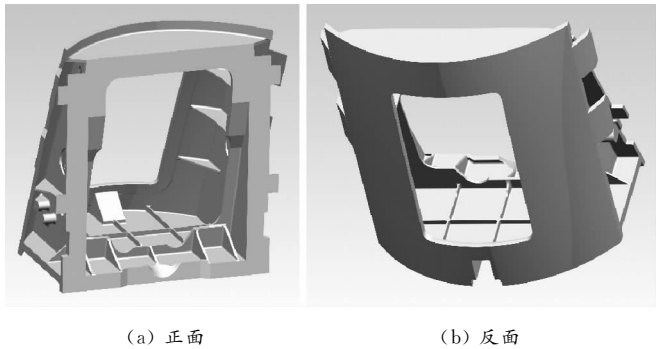


图 1 壳体铸件示意图

Fig.1 Schematic diagram of housing

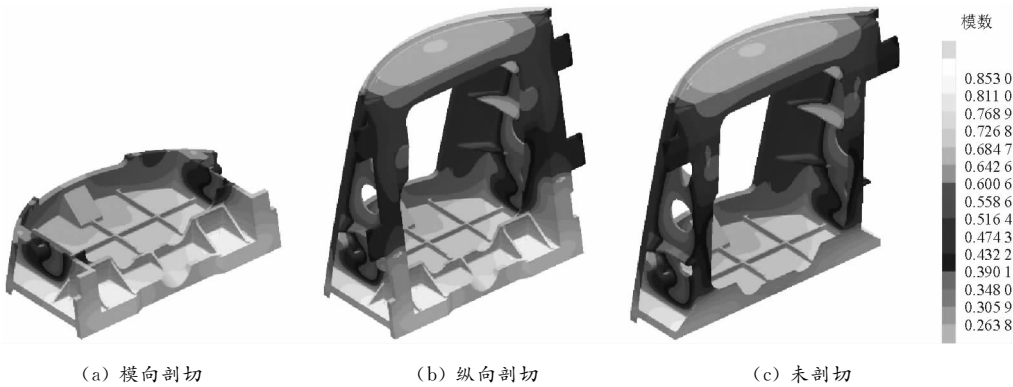


图 2 铸件模数云图

Fig.2 Schematic diagram of casting modulus

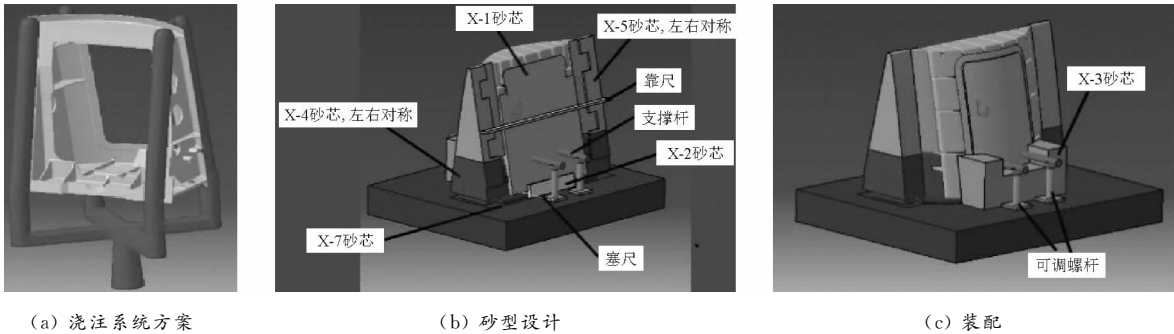


图 3 差压铸造时浇注系统及砂型设计和装配

Fig.3 Gating system, sand mold design and assembly by differential pressure casting

而且不容易出现铸造缺陷。

2 差压铸造 ZM5 镁合金铸件模拟

2.1 铸件的充型过程

图 4 为差压铸造充型过程的材料示踪模拟。可以

看出,合金液先从升液管进入,经过 4 个横浇道分流,在进入铸件型腔侧面 4 个竖直浇道的转角处合金液触壁后具有较大的冲击力,有回流产生,此处也极易卷砂。金属液在 4 个竖直浇道液位升高并经过内浇道进入铸件型腔,首先完成铸件底部大面的充型,随着竖直浇道液位升高,完成铸件侧面的充型,直至铸件顶部型腔完

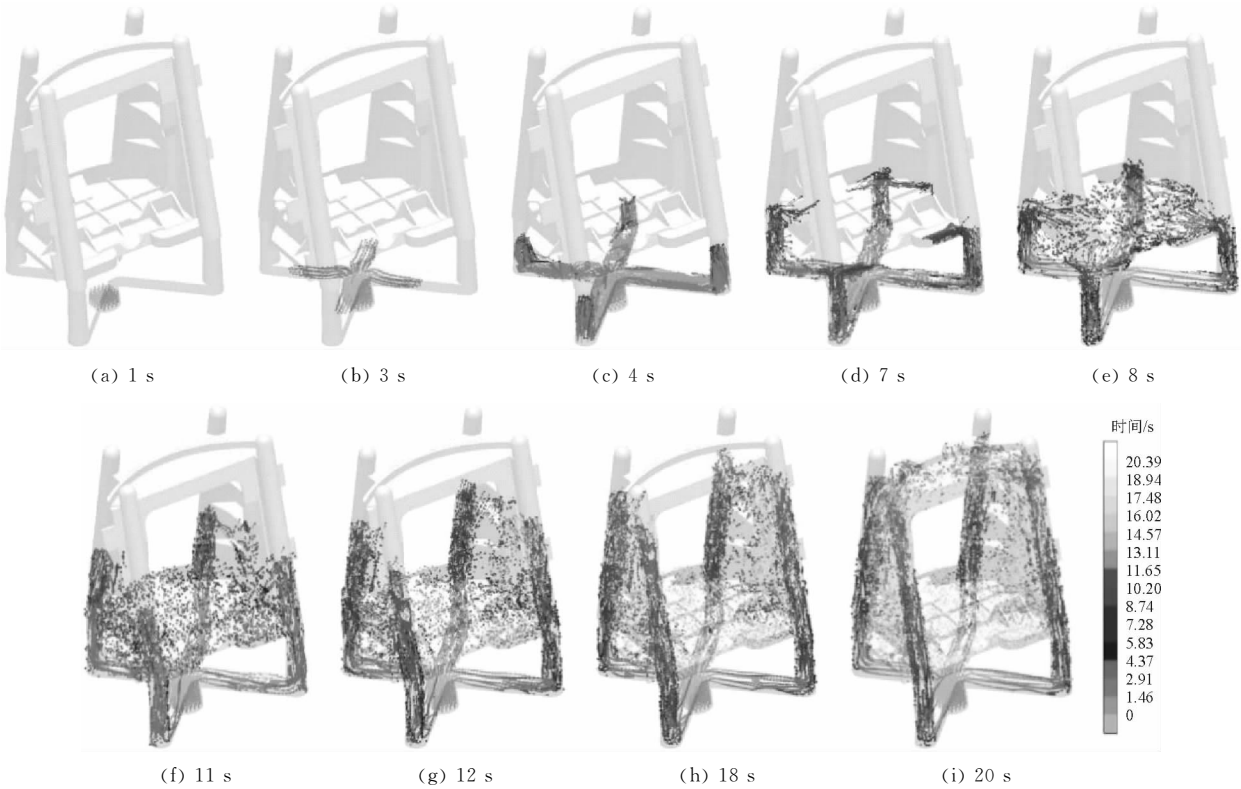


图 4 差压铸造时铸件在充型过程的材料示踪

Fig.4 The material tracer of the casting in the mold filling process during differential pressure casting

成充型,整个充型过程比较均匀。

2.2 铸件的温度场分析

图 5 为镁合金大型薄壁铸件凝固过程的温度分布

的模拟结果。可以看出,当充型末期,整个型腔基本处
本处于液态,但在极薄的位置有少量凝固,但也已填充
完整。随着凝固进行,总的来说是铸件型腔内金属液先

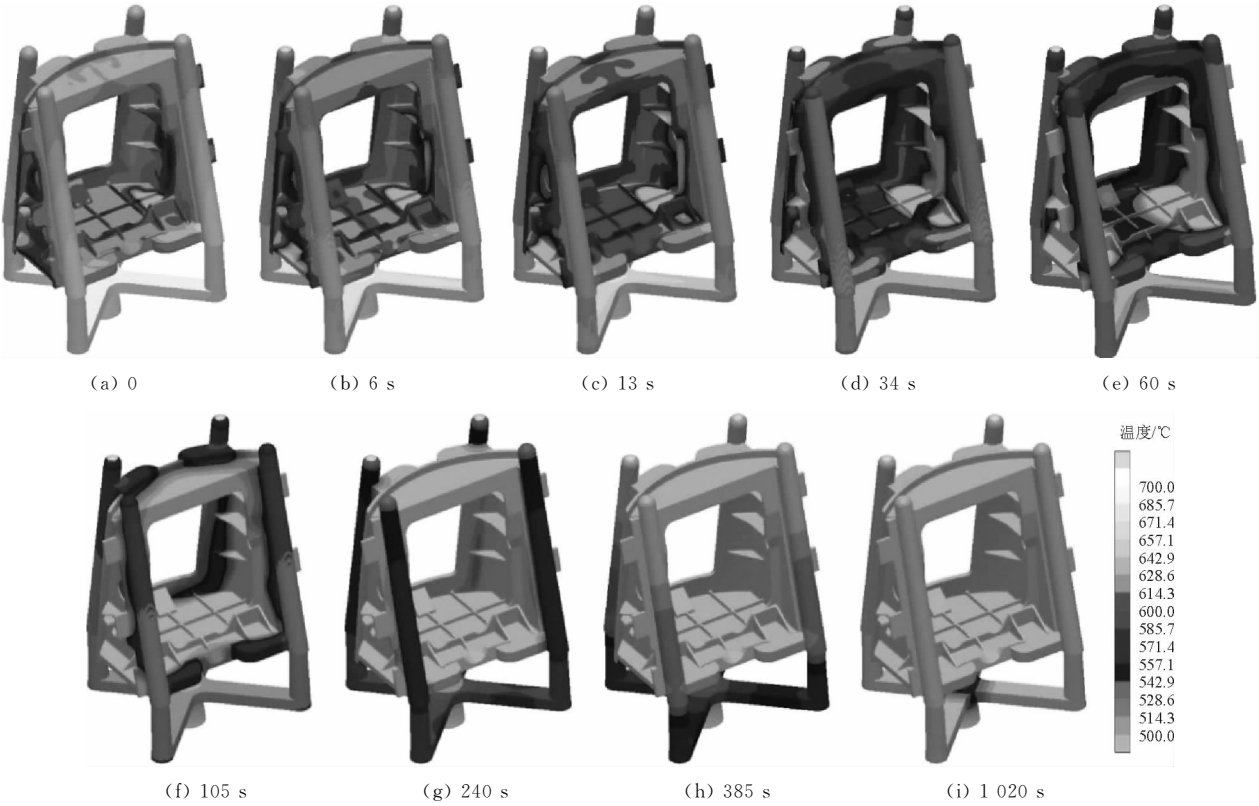


图 5 差压铸造时铸件凝固过程中温度场分布

Fig.5 Temperature field distribution during solidification process in differential pressure casting

凝固,随后是上部冒口,接下来是侧壁 4 个浇道上部凝固,最后凝固的是浇道下部。充型后随着凝固进行,侧壁及侧壁与底部交界处温度快速下降,该部位最先凝固,形成的枝晶会阻断补缩通道,这样底部大面中心区域补缩受阻,很有可能出现缺陷。另外,4 个竖直浇道的内浇道附近随着凝固的进行发生收缩,也是较容易产生缺陷的地方,因此在设计侧面 4 个浇道时尺寸可以适当放大。

2.3 铸件的凝固过程分析

图 6 为差压铸造型腔内合金液从液相转变为固相的时间。可以看出,型腔侧面 4 个竖直浇道与型腔接触处从液相转变成固相需要更长的时间,长时间在高温下导致该处组织粗大,进而导致凝固时形成缩松,严重时会产生微裂纹。

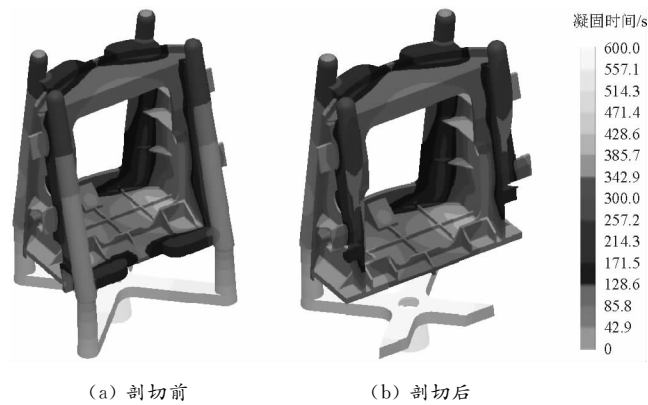


图 6 差压铸造型腔内金属液从液相转变为固相的时间

Fig.6 Duration from liquid phase to solid phase in differential pressure casting

图 7 为差压铸造时铸件热节处凝固补缩所需要的时间。可以看出,热节处凝固补缩时间比较长的位置均出现在侧面竖直浇道和型腔接触的位置,这也是实际生产过程中此处极易出现缺陷的原因。

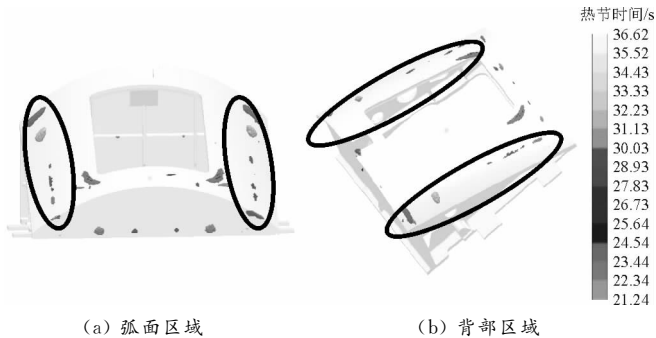


图 7 差压铸造时铸件热节处补缩凝固时间

Fig.7 Solidification feeding time in hot spot of casting by differential pressure casting

图 8 为差压铸造时合金液进入浇注系统底部的横浇道时温度分布。可以看出,升液管中的合金液温度增加,在升液充型过程中,会长时间冲击升液管上部的型

砂,极易导致型砂脱落,随液体进入铸件的型腔中。另外,也可以看出,合金液在底部横浇道流动,触碰到竖直的 4 个浇道时,有回流的合金液,极易形成卷气缺陷,同时,合金液长期冲击竖直浇道侧壁也易引起卷砂。

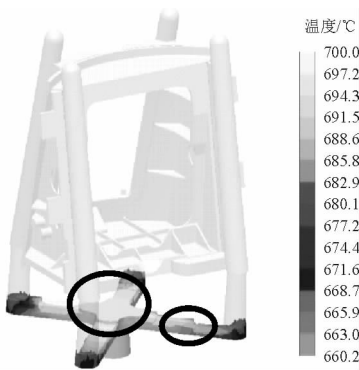


图 8 差压铸造时金属液进入浇注系统底部的横浇道时温度场

Fig.8 Temperature field in runner system with pouring by differential pressure casting

图 9 为差压铸造凝固过程某一时刻铸件两侧凸台位置的液相分数。可以看出,随着凝固进行,在凝固过程中某一时刻,铸件两侧凸台位置存在孤立的高温液相区,这样极易在凝固收缩过程中由于不能得到补缩,易形成缩孔或缩松缺陷。

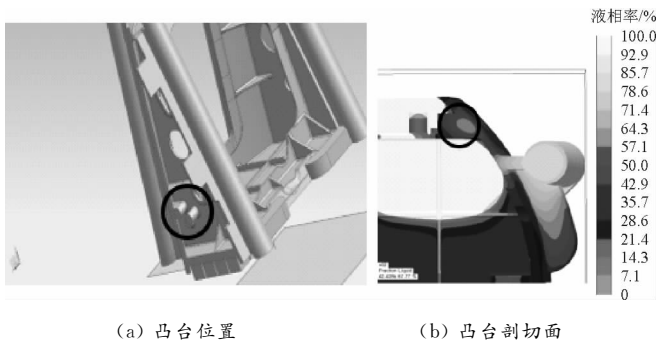


图 9 差压铸造时凝固过程中某一时刻铸件两侧凸台位置液相率

Fig.9 The liquid phase fraction of umbilicus positions on both sides of the housing, at a certain point during the solidification process of differential pressure casting

图 10 为差压铸造凝固过程某一时刻铸件底面的液相分数。可以看出,随着凝固进行,在凝固过程中某一时刻,铸件底面位置存在孤立的高温液相区,可见此处也不能得到有效补缩,易形成缩孔或缩松缺陷。

图 11 为差压铸造充型结束后不同区域凝固时间分布。可以看出,凝固时间较长的区域主要集中在竖直浇道缝隙与型腔相交的位置,如黑框标记位置。这也进一步说明了区域的合金液长时间处于过热状态,枝晶生长粗大,极易形成缩松缺陷。这和图 8 所模拟的热节补缩凝固时间有同样的变化规律。

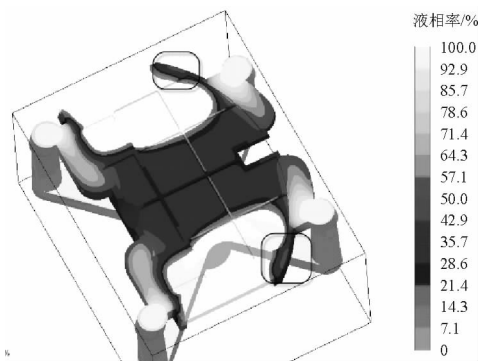


图 10 差压铸造时凝固过程中某一时刻铸件底面位置液相率
Fig.10 The liquid phase fraction of the bottom surface of the housing, at a certain point during the solidification process of differential pressure casting,

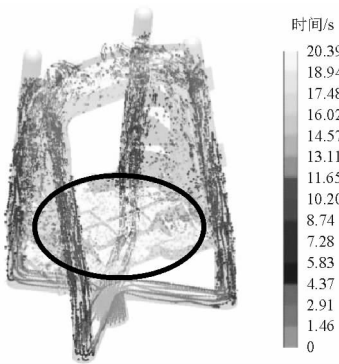
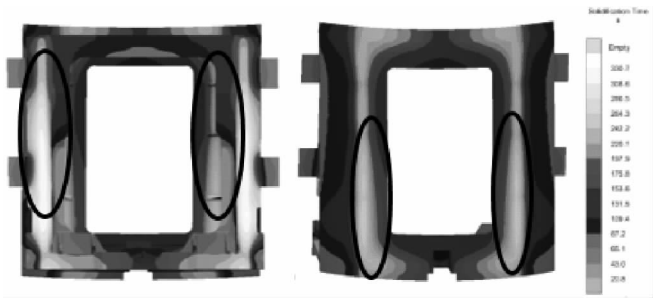


图 13 差压铸造时铸件在充型结束时的合金示踪
Fig.13 Material tracer at the end of mold filling in differential pressure casting



(a) 直浇道与铸件背部相交区域 (b) 直浇道与铸件弧面相交区域

图 11 差压铸造不同区域凝固时间分布

Fig.11 Distribution of solidification time in different areas after filling in differential pressure housing

2.4 铸件的夹杂物分析

图 12 为差压铸造时金属液进入型腔底部区域时的温度场。可以看出,当金属液填充型腔底面大面区域时,前端合金液大部分都进入铸件的底部平板区域,该部分合金液含有大量杂质,易形成夹杂缺陷。



图 12 差压铸造时金属液进入型腔底部区域时温度场

Fig.12 Temperature field when melt was poured at the bottom of the cavity by differential pressure casting

图 13 为差压铸造时铸件在冲型结束时的合金示踪分布图。可以看出,合金示踪进入型腔后,底部平板区域示踪粒子停留的时间比较长。也就是说,合金液在浇注过程中,刚刚进入型腔的金属液大部分都进入到型腔

的底部,由于前端合金液会生成或存在大量的杂质,因此在此铸件中极易在此位置形成夹杂等缺陷。

3 差压铸造工艺方案的优化

3.1 卷砂、夹杂和疏松问题进行的工艺方案优化

针对上述铸件模拟过程中存在问题,对浇注方案进行了优化设计,见图 14 和图 15。

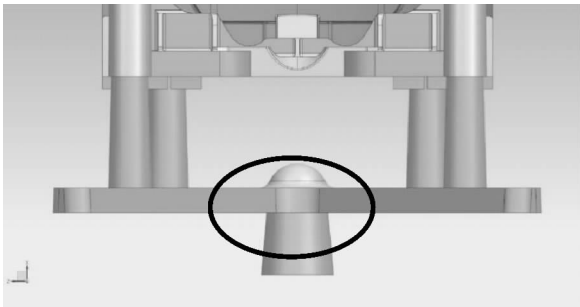


图 14 差压铸造升液管上部砂型采用半球设计示意图

Fig.14 Schematic diagram of upper sand mold of differential pressure casting lift pipe with hemispheric design

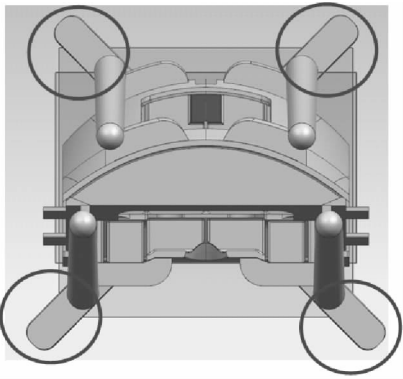
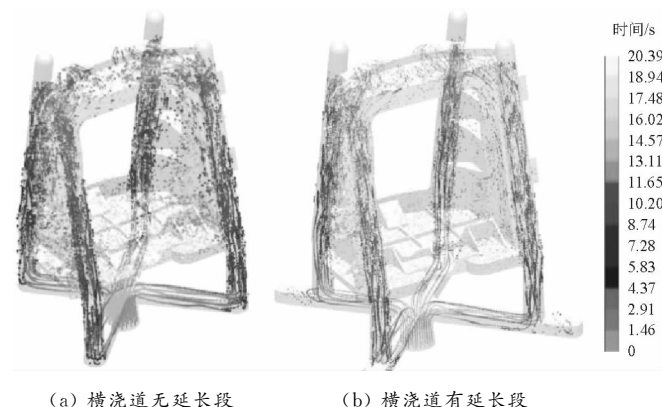


图 15 差压铸造时下部分流用横浇道采用延长设计示意图

Fig.15 Schematic diagram of extension of runner for lower part shunt in differential casting

图 14 为差压铸造时升液管上部砂型采用半球设计示意图。采用该设计,可以增加从升液管进入的合金液与型腔的接触面积,进而增加受热面积,减少合金液对

型砂的热冲击,从而大大降低由于长时间热冲击带来的卷砂问题。从图 15 看出,采用延长设计如下优点:首先合金液通过升液管进入横浇道,在进入竖直浇道之前起缓冲作用,避免急速的热冲击,引起卷砂缺陷;其次,该延长设计也可以是升液管中最初存在或生成的具有夹杂缺陷的金属液先行进入延长段,这样可以大大减少不洁净合金液进入型腔,进而避免铸件缺陷。图 16 为差压铸造时底部横浇道无延长段和有延长段合金示踪粒子分布情况。可以看出,具有底部横浇道的浇注系统材料示踪分布比无延长段的要均匀。这进一步说明采用此优化设计可以改善流动和温度分布的均匀性。



(a) 横浇道无延长段 (b) 横浇道有延长段

图 16 差压铸造时底部横浇道改进前后合金示踪

Fig.16 Material tracer before and after improvement of bottom runner in differential casting

另外,为了减少或避免缩松和缩孔,可以适当增加砂型的排气,减少憋气发生。在具有独立高温区或液相区的对应位置增加冷铁。在竖直浇道缝隙与铸件相交位置的部分区域增加薄冷铁,根据实际铸件的铸造过程进行调整。

3.2 复杂镁合金铸件制备

根据模拟改善后的结构进行相关试验,确定了复杂铸件的工艺窗口,并采用如下工艺制度:镁合金浇注温度为 $670\sim 680\text{ }^{\circ}\text{C}$;同步压力为 500 kPa ;升液速度为 50 mm/s ;升液压力为 28 kPa ,凝固时间约为 500 s ,获得性能稳定的复杂镁合金铸件,见图 17,测试后合格率达

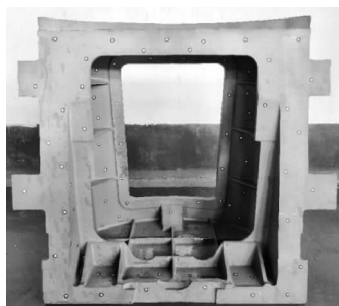


图 17 铸件实物图

Fig.17 Housing product

80% ,经过 20 余次试验,铸件抗拉强度约为 260 MPa ,伸长率约为 10% 。

4 结 论

(1)通过对 ZM5 镁合金进行差压铸造温度场、流动场及充型过程中合金示踪模拟,发现对于大型复杂铸件来说,竖直浇道与铸件相交位置的合金液长时间处于过热状态,枝晶生长粗大,极易形成缩松缺陷。

(2)通过对差压铸造时升液管上部砂型采用半球设计,可增加从升液管进入的金属液与型腔的接触面积,进而增加受热面积,可减少金属液对型砂的热冲击,从而显著改善由于长时间热冲击带来的卷砂问题。

参 考 文 献

- [1] 赵正任,贾征,王彤,等. 氩气处理对 AZ91 镁合金高温力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(4): 445-448.
- [2] 张志强,乐启焱,崔建忠. 外场下镁合金凝固及锭坯制备[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [3] 任伟杰,林金保. 大塑性变形技术在工业领域的应用研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(7): 89-94.
- [4] 黄海军,韩秋华. 镁及镁合金的特性与应用[J]. 热处理技术与装备, 2011, 31(3): 6-13.
- [5] 王君卿,孙逊,关洋,等. 大型铸件成形过程数值模拟及工艺优化[J]. 铸造, 2006, 55(9): 916-921.
- [6] 蔡森,董宇,张晓东,等. 差压铸造大型复杂航空用 ZM5 镁合金壳体铸件研究[J]. 铸造, 2016, 65(9): 847-854.
- [7] 王松涛,魏国华,王士一. 航空镁合金铸件常见铸造缺陷的分析及克服[J]. 黑龙江冶金, 2006(3): 4-9.
- [8] 陶盼. 基于 ANSYS 的铸件充型过程的数值模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [9] 崔林林. ZM6 镁合金大型薄壁砂型铸件数值模拟及缺陷分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
- [10] LEE W M, ZIKRY M A. Modeling the interfacial plastic strain incompatibilities associated with dispersed particles in high strength-aluminum alloys[J]. Acta Materialia, 2012, 60(4): 1 669-1 679.
- [11] PENG Y H, LI D Y, WANG Y C, et al. Numerical study on the low pressure die casting of AZ91D wheel hub[J]. Materials Science Forum, 2005, 488-489: 393-396.
- [12] SHEN J N, LAI L L, LI Y P. Study of pre-processing technology for zinc alloy die-casting numerical simulation on flow-3D[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 184: 1 232-1 235.
- [13] CAMPBELL J. Casting[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991.
- [14] 丁文江,付彭怀,彭立明,等. 先进镁合金材料及其在航空航天领域中的应用[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2): 103-109.

(编辑:张正贺)