

# ZM5 航空用大型复杂镁合金壳体铸造工艺模拟

蔡 森, 王晓巍, 卢影峰

(沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁沈阳 110850)

**摘要:** 通过模拟砂型铸造及差压铸造制备大型复杂ZM5镁合金壳体铸件, 利用MAGMA软件对铸件进行了温度场、流动场等模拟。通过对比普通砂型铸造及差压铸造可知, 差压铸造的温度场及金属流动都比较均匀, 通过模拟铸件凝固过程可发现, 4个竖直浇道的内浇口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, 所以在设计侧面4个浇道时, 尺寸可以适当放大。

**关键词:** 砂型铸造; 差压铸造; ZM5镁合金; 温度场

镁合金因比强度高、减振性能好、电子屏蔽性和可加工性良好, 在航空航天、3C及军工等领域获得了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。镁合金比较常用的铸造方法是重力铸造。但是, 重力铸造的最大问题是难以控制浇注速度, 很容易出现紊流现象<sup>[4-6]</sup>。相对于重力铸造, 差压铸造在模具底部充满型腔, 金属液体在密闭的容器内进行浇注, 且流动平稳, 铸造缺陷较少, 铸件质量远高于重力铸造, 并且差压铸造的浇注系统比较简单<sup>[7-10]</sup>。

近十多年来, 国内外铸造镁合金的发展和应​​用成效明显, 我国铸造镁合金应用大幅度增加, 特别是在国防军工重大装备方面的轻量化应用较为广泛, 减轻重大装备的重量对于扩大作战半径、减少能源消耗、增加有效负载及降低运输费用具有重要意义。而目前具有流动填充性的ZM5镁合金在作为铸件方面应用最为广泛, 但部分铸件因其结构复杂导致金属液体凝固时容易产生气孔、夹杂、裂纹等铸造缺陷, 尤其薄壁多筋大型复杂镁合金铸件更为明显, 极大限制了铸件成材率, 大大增加了制造成本, 甚至无法满足使用要求。

因此, 本研究以上述大型复杂铸件为例, 采用MAGMA软件考察砂型铸造及差压铸造方式对大型复杂铸件的影响, 并进行性能评价, 明确了大型复杂镁合金铸件普通重力铸造及差压铸造过程中存在的问题, 并提出了相应解决方案。

## 1 试验方法

铸件材料选用ZM5镁合金, 铸件与砂之间的换热系数设为 $480 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 浇注温度为 $690 \text{ }^\circ\text{C}$ 。比热容设为 $1.0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 液相线温度设为 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , 固相线温度设为 $480 \text{ }^\circ\text{C}$ , 砂型温度设定为 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。其余采用软件数据库中的默认设置。通过数值模拟对采用常规砂型铸造和差压铸造复杂铸件进行研究。差压铸造模拟时同步压力选为 $500 \text{ kPa}$ , 升液速度和充型速度均选为 $35 \text{ mm/s}$ , 升液压力和充型压力均选为 $30 \text{ kPa}$ , 结壳时间为 $8 \text{ s}$ , 金属液密度为 $1580 \text{ kg/m}^3$ , 阻力系数设为1。

## 2 ZM5镁合金普通砂型铸造模拟

由于模拟参数直接影响模拟仿真的结果, 因此, 根据铸件复杂程度和实际铸造情况, 将型砂和冷铁的温度初始值设置为室温, 铸件各个位置使用网格进行划分, 最终可确定该铸件普通砂型重力铸造的浇注方案, 如图1所示。

作者简介:

蔡森(1983-), 男, 高级工程师, 研究方向为铸造工艺研究和技术开发。电话: 024-86598182, E-mail: 176864318@qq.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2022)

01-0077-07

收稿日期:

2021-01-03 收到初稿,

2021-05-18 收到修订稿。

由于结构件较大,浇注过程也较复杂。因此,在铸件充型过程中,需要控制温度场的分布防止冷隔缺陷形成。图2表示充型过程中的温度场,在图中可以观察到金属液在直浇道温度较高,横浇道金属液温度均匀。金属液刚刚进入内浇道通过内浇口进入型腔底部,温度降低。随着金属液的继续填充,最初金属型腔底部的低温金属液逐渐被推离内浇道和型腔底部,并向型腔远端和远端的冒口移动。随着填充距离的加大,横浇道端部温度降低比较明显。为了保证顺序凝固,按凝固路径来说,距离浇口近端温度较高,远端温度较低。在充型过程中的铸件壁较薄位置温度最低。

另外,铸件的质量也受充型凝固过程的影响,为了预测凝固过程可能会出现缩松、缩孔、热裂、偏析等铸造缺陷,对大型薄壁铸件的凝固过程也进行了数值模拟。但铸件的一些薄壁区域会因散热过快,在充型阶段有可能发生凝固现象。

镁合金大型薄壁铸件凝固过程的模拟结果如图3所示,从图中可以发现,凝固时间较短。当充型末期,整个型腔基本处于液态,但在极薄的位置有少量凝固,但也已填充完整。随着凝固的进行,总的来说是铸件型腔内金属液体先行凝固,随后是上冒口,接下来是内浇道和外侧横浇道。但随着凝固的进行,部分位置固相率较高,形成的枝晶会发生阻断补缩通道,这样便出现了孤立高温区,此时就必须在凝固过程中

对其进行补缩。

同时,在铸件壁较厚的区域,冒口的不合理设计,也会导致铸件的补缩受限,此时就可能出现缩孔、缩松等缺陷。随着铸件的凝固,它的薄壁部分会率先凝固完成,只有厚度较大的部位仍会处于液相状态,此部分补缩冒口通畅,不会形成缺陷,内浇口附近仍有少量未凝固区域;在完全凝固末期仅有内浇口部位,和铸件的小部分区域还没有凝固,此部位出现缩孔、缩松的可能性大。从图中的温度场变化也可以找到高温区出现的位置,这对于分析缺陷产生的原因及其常出现的位置具有重要意义,上图对整个凝固过程的温度场进行分析,理想的凝固状态应该是让整个

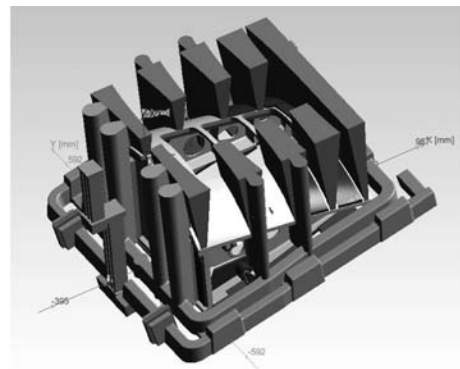


图1 普通砂型重力铸造的浇注方案三维图

Fig. 1 3D drawing of casting scheme for gravity casting of ordinary sand mold

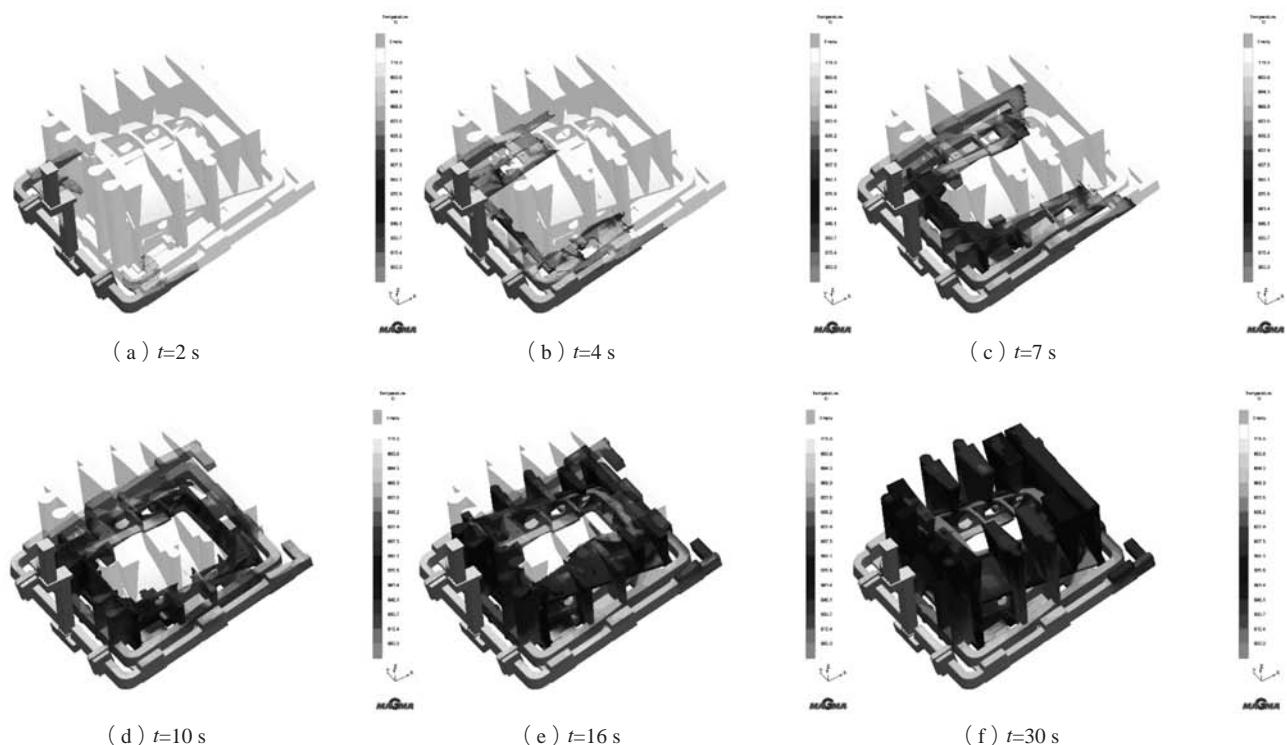


图2 普通砂型铸造时铸件充型过程中的温度场

Fig. 2 Temperature field during mold filling of ordinary sand casting

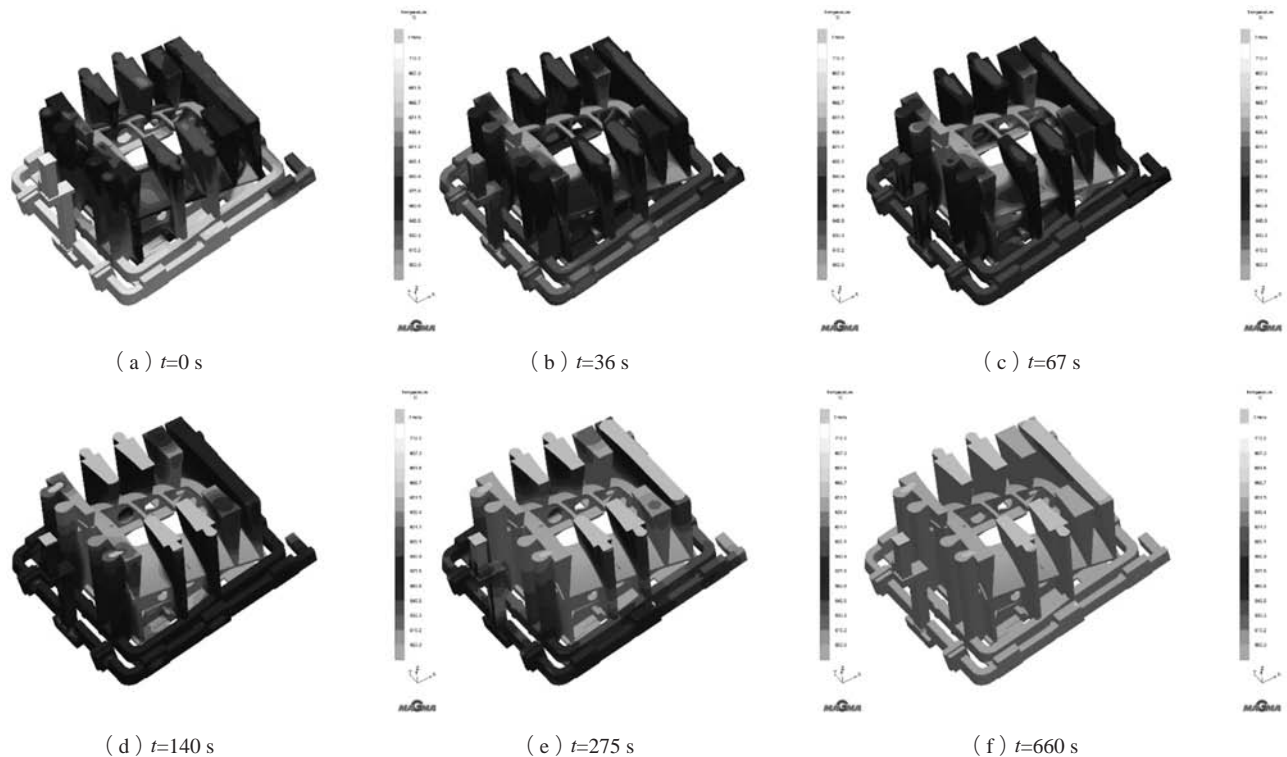


图3 普通砂型铸造时充型后铸件凝固过程中温度场

Fig. 3 Temperature field during casting solidification of ordinary sand casting

件从内到外、从下到上依次凝固形成一个完整的温度梯度, 这样可避免产生局部孤立高温区, 减少在凝固过程中因冒口设置不合理, 导致缩孔、缩松等缺陷的形成。

综上, 对普通重力铸造该铸件来说, 充型相对有一定困难, 图4是充型达到75%时到达铸件最高部位, 但此时由于铸件的温度较低难以充型, 有产生冷隔的风险。所以, 为保证铸件的成形, 在铸件的侧面及顶面薄壁位置使用缝隙浇道及增加浇注温度, 增加了铸件产生疏松的倾向。因此, 为了保证充型及降低疏松倾向, 需采用差压铸造代替重力铸造。

### 3 ZM5镁合金铸件差压铸造浇注系统设计

为了保证铸件质量, 需要根据铸件的结构特点, 设计出一个实现顺序凝固的措施。

测定铸件凝固时间的方法主要有模数法、经验法、热模数法、热节圆法等。其中模数法考虑到结构形状对散热条件的影响, 因此更为准确, 应用也更加广泛, 图5为模拟铸件模数分布云图。

从图5中可观察到, 铸件底部大平面位置模数大, 为了有利于补缩, 应选择大平面朝下。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

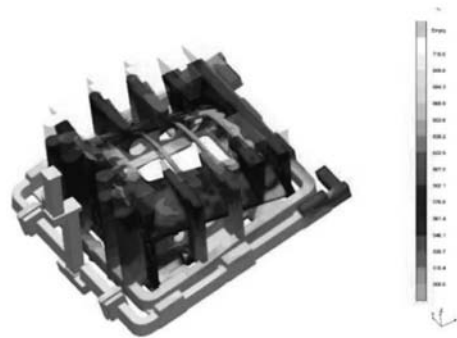


图4 普通砂型铸造时铸件充型75%时的温度场

Fig. 4 Temperature field of 75% mold filling of ordinary sand casting

面放置4条缝隙浇道, 保证充型。根据铸件的结构特点, 设计浇注和砂型如图6所示。从图中可以看出, 该浇注系统方案比较简单, 这样做不仅成形过程简单, 而且不容易出现铸造缺陷。

### 4 ZM5镁合金铸件差压铸造模拟分析

图7为所研究铸件按照图6所示浇注系统进行差压铸造时充型过程的材料示踪进行的数值模拟。从图中可以看出, 金属液从升液管口进入, 从浇注系统下面的四个横浇道分流。在横浇道中流动并进入铸件型腔侧面4个竖直浇道时, 在转角处液体触壁后具有较大的



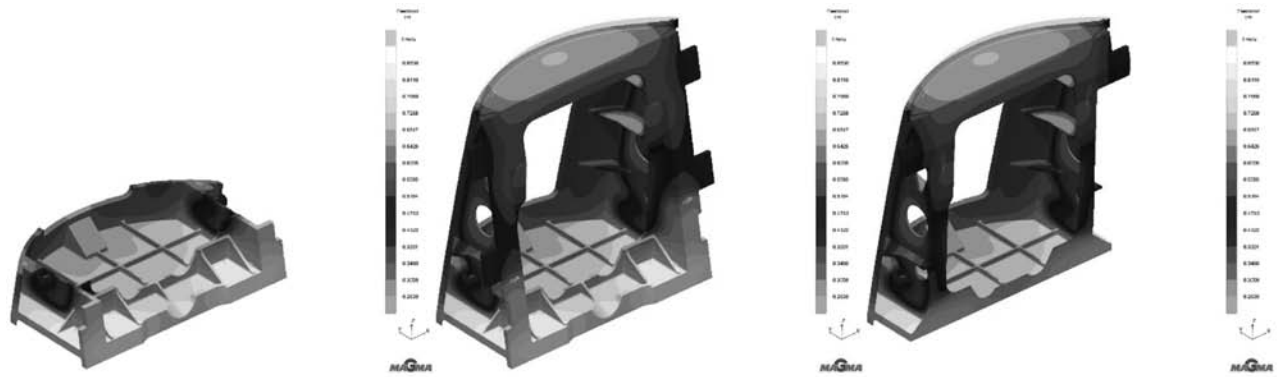


图5 铸件模数云图

Fig. 5 Schematic diagram of casting modulus

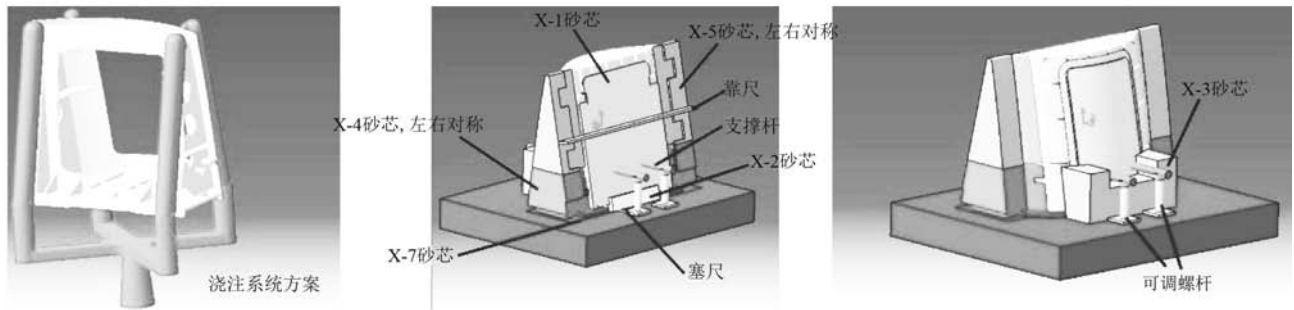


图6 差压铸造时浇注系统及砂型设计和装配

Fig. 6 Gating system, sand mold design and reassembly by differential pressure casting

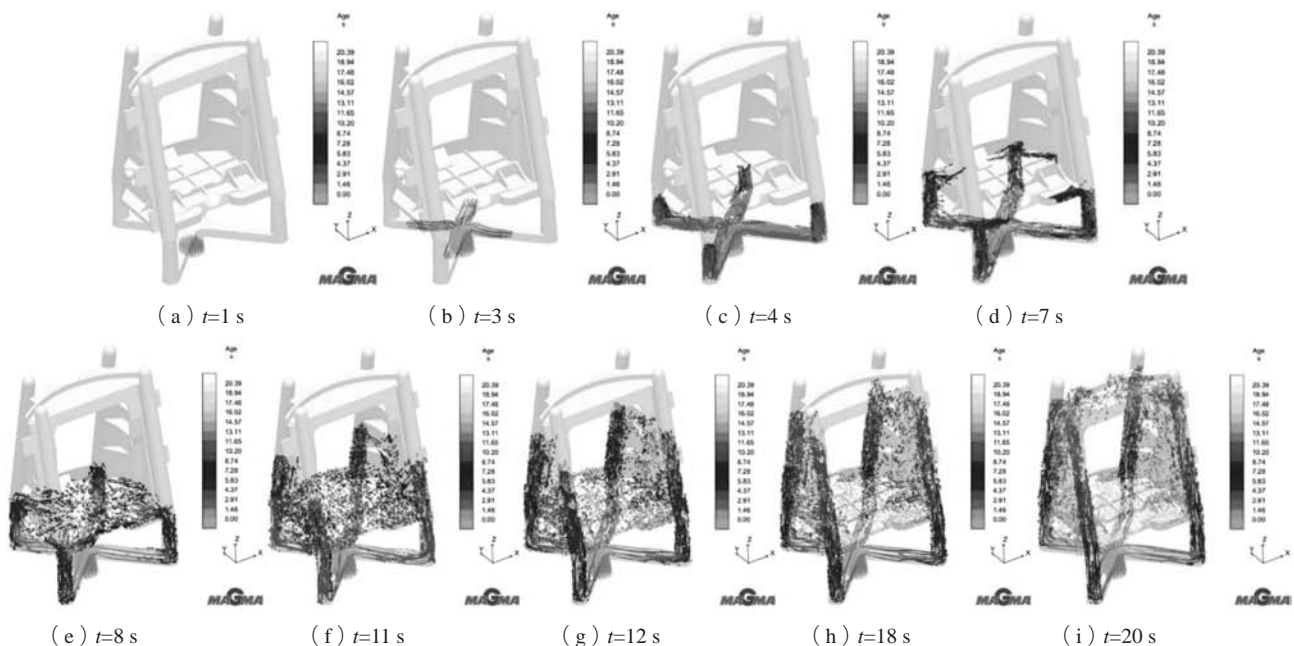


图7 差压铸造时铸件在充型过程的材料示踪

Fig. 7 Material tracer of casting in the mold filling process during differential pressure casting

冲击力，有回流产生，这个位置也极易卷砂。金属液会先从4个竖直浇道液位升高，随后经过内浇口进入铸件型腔，完成铸件底部大面的充型，随之竖直浇道液位升高，完成铸件侧面的充型，直至铸件顶部型腔完

成充型。经观察，图7中采用的差压铸造法充型较为均匀。

图8为充型过程中金属液的流动速度情况，从图中可以观察到，充型初始阶段速度比较小，进入底部四

个分流的横浇道后速度明显增大,当液体触及到竖直的浇道壁时,速度发生了减缓,并有回流产生。当进入竖直浇道时,金属液的速度再次平缓均匀。从竖直浇道内浇口进入型腔大底面速度增加,快速实现大底面的填充,底面充型结束,在内浇口仍存在浇道的流动速度,随即金属液继续沿竖直浇道上升,逐步完成型腔侧壁的填充,仍然是在浇口附近具有较大的流动速度,一直到侧壁填充完成后,当金属液体流到型腔顶端时,在填充筋板时具有较高速,实现快速充填,直至整个型腔和上端冒口的填充。因此,在铸件的整个充型过程中,金属液流动速度较均匀,能够实现平稳填充。

在铸造过程中,温度场的分布至关重要,温度的分布可以判断是否有冷隔缺陷形成。图9为差压铸件的金属液体在充型过程中温度场的变化情况,可观察到金属液在直浇道温度较高,随着金属液的流动,流动

前端的金属液温度略有降低,但降低不明显,仍具有较好的流动性,充满后型腔底部大平面由于比较薄温度迅速降低,尤其是该面中心温度降低得更为明显,但在内浇口附近金属液仍然具有较高的温度,这有利于中心区域补缩。当金属液继续注入时,型腔侧壁金属液具有较高的温度,这有利于侧壁充填。侧壁充填过程中,底部大面温度进一步降低,侧壁与底面交界处,温度降低尤为明显,这个区域易出现疏松,严重时会出现裂纹。金属液继续充型时,金属液在顶部充型时温度比较均匀,利于充型顺利完成。

图10为模拟镁合金大型薄壁铸件凝固过程的温度分布结果,发现在充型末期,整个型腔基本处于液态,在极薄的位置有少量凝固,但也已填充完整。随着凝固的进行,总的来说是铸件型腔内金属液体先行凝固,随后是上部冒口,接下来是侧壁四个浇道上部凝固,最后凝固的是浇道下部,充型后随着凝固的进

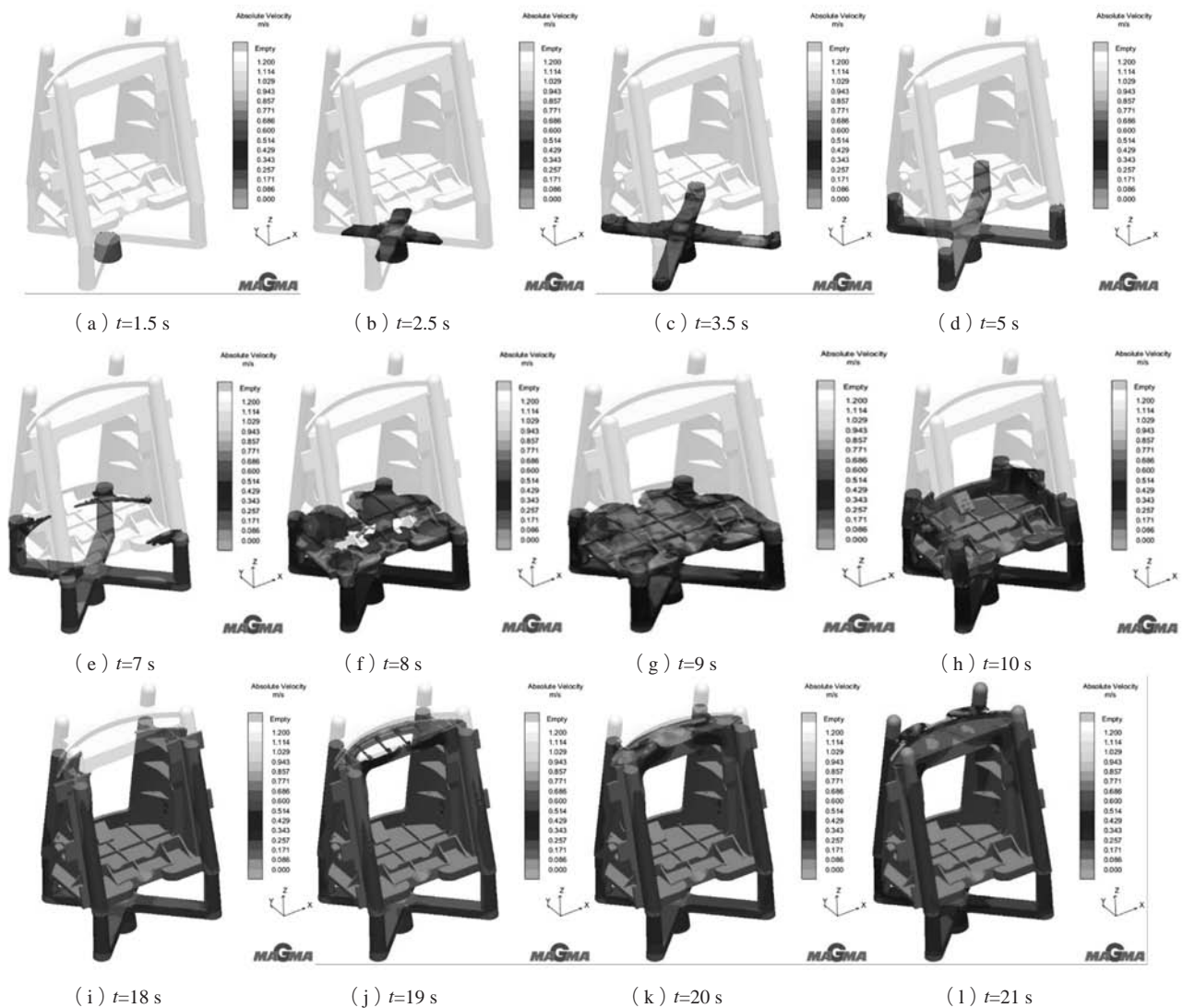


图8 差压铸时铸件充型过程中流动速度场

Fig. 8 Flow field during mold filling of differential pressure casting

行,侧壁及侧壁与底部交界处温度降低得非常迅速,该部位会率先凝固,其固相率较高,形成的枝晶阻断补缩通道,这样底部大面中心区域补缩受阻,预测很有可能在此区域出现缺陷。另外,4个竖直浇道的内浇口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。

对比ZM5镁合金普通砂型铸造及差压铸造模拟结果可知,对于此大型复杂铸件,差压铸造的温度场及金属流动都比较均匀,通过模拟铸件凝固过程可发现,4个竖直浇道的内浇口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,所以在设计侧面4个浇道时,尺寸可以适当放大。此外,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,根据实际铸件的冶金情况进行调整。

## 5 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材料示踪模拟,发现对于大型复杂铸件来说,差压铸造的温度场及金属流动都比较均匀,通过模拟铸件凝固过程可发现,4个竖直浇道的内浇口附近随着凝固的进行发生收缩,也是较容易产生缺陷的位置,所以在设计侧面4个浇道时,尺寸可以适当放大。

(2) 为了减少或避免缩松和缩孔可以适当增加砂

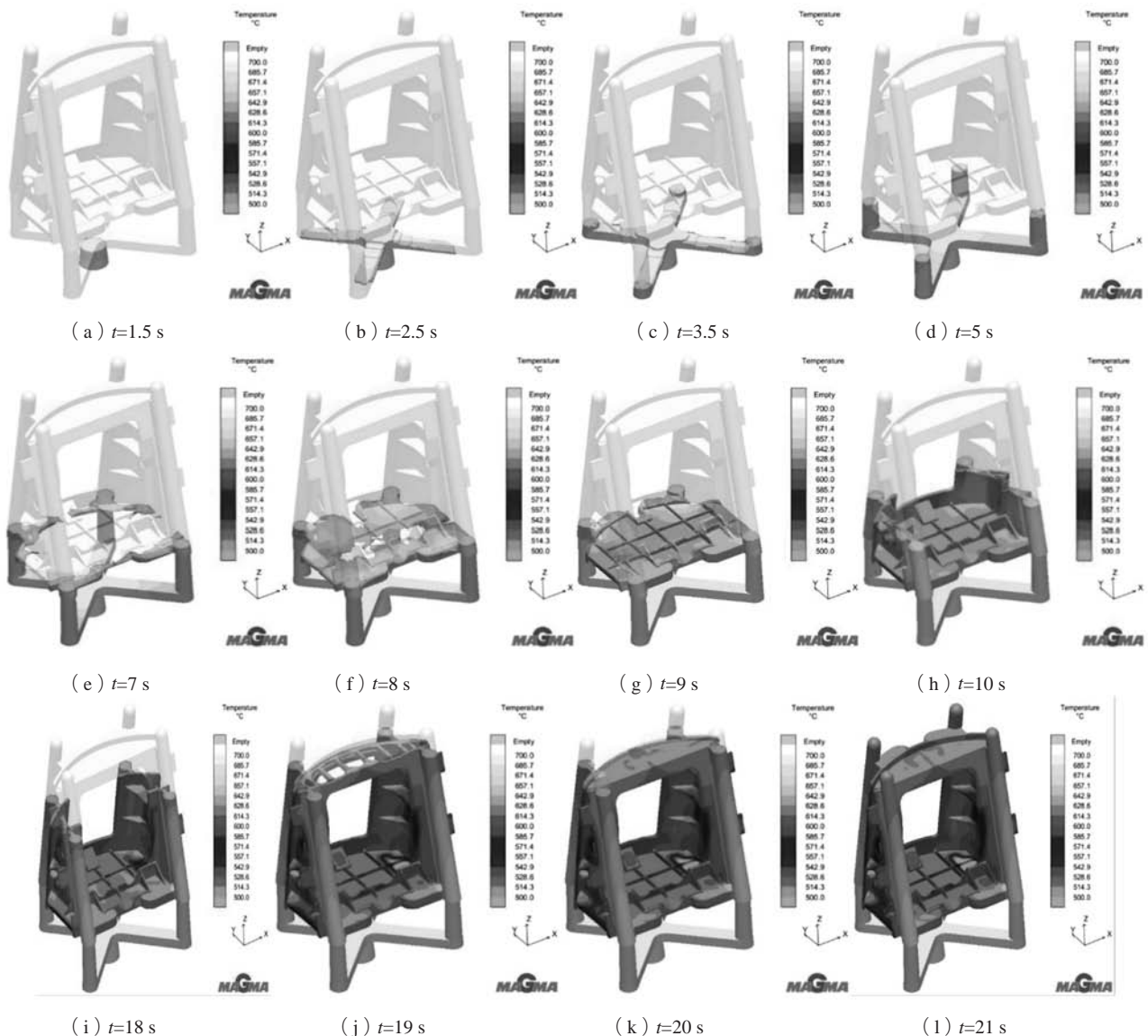


图9 差压铸造时铸件充型过程中温度场

Fig. 9 Temperature field during mold filling of differential pressure casting



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，根据实际铸件的冶金情况进行调整。

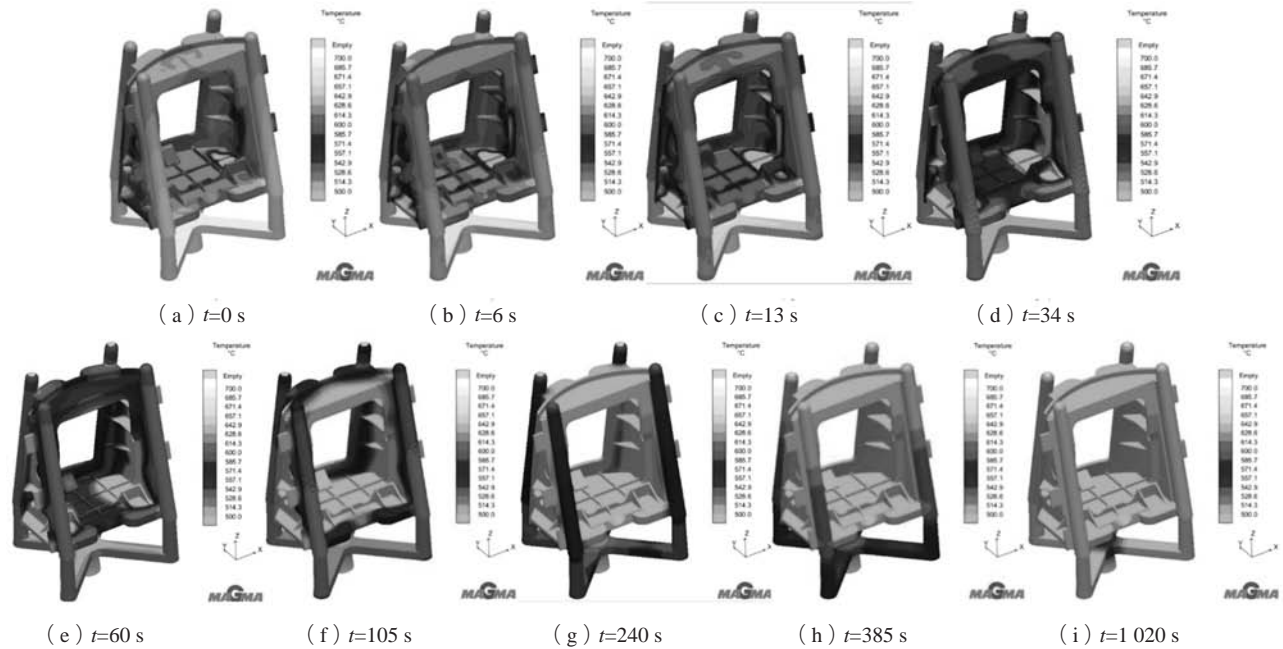


图10 差压铸造时充型后铸件凝固过程中温度场

Fig. 10 Temperature field during solidification process of differential pressure casting

#### 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]. 哈尔滨理工大学, 2012.
- [10] 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.

## Casting Process Simulation of Large Complicated ZM5 Magnesium Alloy Aerial Shell Castings

CAI Sen, WANG Xiao-wei, LU Ying-feng  
(Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, Liaoning, China)

#### Abstract:

The MAGMA software was used to simulate temperature field of large complex ZM5 magnesium shell castings. By comparing the sand mold casting and differential pressure casting, the metal flow and temperature field of the differential pressure casting were uniform. By the simulation of the casting solidification process, it can be found that four vertical sprue gate shrank with the solidification, which is more prone to generate defect. Therefore, in the design of the side four runners, the size can be appropriately enlarged.

#### Key words:

sand mold casting; differential pressure casting; ZM5 magnesium alloy; temperature field