

Mg-xSm-0.3Zn 散热镁合金压铸工艺数值模拟

何伟^{1,2} 胡文鑫^{1,2} 李媛³ 刘峰^{1,2}

(1.白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室; 2.包头稀土研究院; 3.包头冶金建筑研究院)

摘要 利用 ProCAST 软件对 Mg-xSm-0.3Zn 系列镁合金进行压铸过程模拟计算, 设置初始压力为 0.2 MPa, 增压比压为 40 MPa, 模具温度为 200~280 °C、浇注温度为 680~740 °C、压射速度为 1.5~6.0 m/s, 研究模具温度、浇注温度、压射速度、合金成分对含稀土镁合金压铸过程的影响。结果表明, 模具温度、浇注温度适当降低可以改善铸件的缩孔、缩松, 且模具温度对合金的充型过程影响更大; 压射速度适当提高可以使铸件更好地进行补缩, 但压射速度太高会降低模具使用寿命; Sm 含量为 0.8% 时, 充型过程最为平稳, 充型及完全凝固所需时间最短, 并且随着 Sm 含量增加, 合金的固、液相温差由 70 °C 降低到 46 °C, 铸件缩孔、缩松缺陷得到改善。

关键词 镁合金; 压铸; 稀土; 数值模拟**中图分类号** TG146.4⁺5; TG146.22**文献标志码** A**DOI**: 10.15980/j.tzzz.2022.04.007**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

Numerical Simulation of Die Casting Process for Mg-xSm-0.3Zn Magnesium Alloys

He Wei^{1,2}, Hu Wenxin^{1,2}, Li Yuan³, Liu Feng^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization;

2.Baotou Research Institute of Rare Earths; 3.Baotou Metallurgical Building Research Institute)

Abstract: The ProCAST software was used to simulate the die-casting process of Mg-xSm-0.3Zn series magnesium alloy. The initial parameters, such as pressure, specific pressure, mold temperature casting temperature and injection rate were set as 0.2 MPa, 40 MPa, 200~280 °C, 680~740 °C and 1.5~6.0 m/s, respectively, to understand the effects of these parameters on the die-casting process of rare earth magnesium alloy. The results indicate that the distribution of shrinkage porosity can be improved when the mold temperature and casting temperature are appropriately low, and the difference of mold temperature has a more obvious effect on the filling process of alloy. Proper increase in injection speed can make the casting better feeding, however should not be too high in order to reduce the service life of the metal mold. When the content of rare earth is 0.8%, the filling process is the most stable, and the time needed for filling and complete solidification reaches the peak. With the increase of rare earth content, the temperature difference between solid and liquid is decreased from 70 °C to 46 °C, and the shrinkage cavity and porosity of the castings are effectively improved.

Key Words: Magnesium Alloy, Die Casting, Rare Earth, Numerical Simulation

随着工业的发展, 零部件散热已经成为制约交通、机械、电子、航天等领域发展的瓶颈问题。据统计, 由于电子元件温度过高而引起的失效高达 55%, 散热已成为电子行业亟待解决的重要难题。目前, 主要的散热合金有铜合金、铝合金和镁合金, 其中纯铜的热导率最高, 为 397 W/(m·K), 纯铝的热导率为 247 W/(m·K), 纯镁的热导率为 158 W/(m·K)^[1]。相较于镁合金, 纯镁的热导率高, 但是其铸态的屈服强度和抗拉强度分别仅有 2.5 MPa 和 11.5 MPa, 变形态的屈服强度和抗拉强度也只有 9.0 MPa 和 20.0 MPa^[2], 因此需通过合

金强化、复合强化等方式来提高其力学性能。但是根据热传导理论可知^[3,4], 在基体中添加合金元素不管是形成固溶体还是第二相都会严重降低材料的热导率。AZ 系镁合金因其具有良好的力学性能和铸造性能等特点, 目前已被广泛使用。常用的合金化元素有 Al 和 Zn, 其中 Zn 可以改善铸件的抗蠕变性能, 同时可以提高铸件的抗应力腐蚀敏感性, 从而提高合金的疲劳极限^[5]。

压铸常被用于镁合金的成形^[6,7], 能大量生产形状复杂的薄壁铸件, 并且具有严格的尺寸公差和良好的表

收稿日期: 2021-06-15; **修改稿收到日期:** 2021-08-01**基金项目:** 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0175)**第一作者简介:** 何伟, 男, 1993 年出生, 工程师, 内蒙古包头(014030), E-mail: he13030462937@126.com**通信作者:** 胡文鑫, 男, 1983 年出生, 正高级工程师, 内蒙古包头(014030), E-mail: hewei@briire.com**引用格式:** 何伟, 胡文鑫, 李媛, 等. Mg-xSm-0.3Zn 散热镁合金压铸工艺数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(4): 428-436.

HE W, HU W X, LI Y, et al. Numerical simulation of die casting process for Mg-xSm-0.3Zn magnesium alloys[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2022, 42(4): 428-436.

面精度^[8]。由于存在压力,产生了对充型速度、温度、型腔中气体以及压铸填充过程的影响,选择合理的压铸工艺可获得性能良好的镁合金压铸件^[9,10]。

制作散热零部件的材料不仅要有良好的散热性能,同时要具备一定的力学性能。本课题选取力学性能好且热导率较高的 Mg-*x*Sm-0.3Zn 系列合金进行压铸充型与凝固过程数值模拟,研究不同合金成分、不同压铸工艺情况下合金的铸造性能,旨在为其应用提供参考。

1 模型建立

1.1 压铸试棒的几何结构

采用 Solidworks 软件对压铸试棒进行三维建模,得到的几何图形见图 1。*a* 区域为铸件的浇注系统,由直浇道、横浇道和内浇道组成。*b* 区域为镁合金压铸试棒的铸件区,在充型过程中尤其要保证该部分充型平稳,减少卷气以及湍流的产生。*c* 区域为铸件的排溢系统,由溢流槽、排气道组成,主要作用是在充型过程中将型腔中的空气及涂料挥发所产生的气体排出,并帮助压铸件完成补缩,保证金属液的正常浇注。

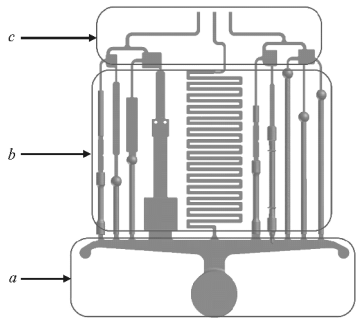


图 1 压铸试棒的三维模型

Fig.1 The 3D model of the die casting specimens

1.2 压铸试棒网格划分

网格生成后的示意图见图 2。网格划分采用 Pro-CAST 自带的 Visual-mesh 模块进行,将几何模型的 X_T 格式的文件导入 Visual-mesh 模块。对三维图形

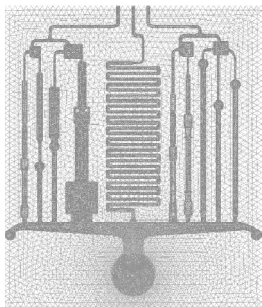


图 2 网格划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of meshment

进行几何体检查。然后将模具部分、铸件部分单元网格尺寸分别设置为 10 mm、2 mm,最终生成的面网格、体网格数分别为 158 480、3 889 919 个。

2 压铸工艺参数设定

2.1 铸件及模具物性参数

此次模拟浇注材料选择 Mg-*x*Sm-0.3Zn(*x* = 0.2, 0.8, 1.5, 3, 5, %, 质量分数)系列合金,编号为 1~5。5 种合金在 650 ℃时的热物性参数见表 1。模具材质为 H13 钢,模具初始温度为 200 ℃时,密度为 7 640 kg/m³;热导率随温度升高而提高,600 ℃时热导率为 27.76 W/(m · K)^[11];比热容随温度升高出现较大幅度的增长,600 ℃时比热容约为 279.77 kJ/kg^[12]。

表 1 Mg-*x*Sm-0.3Zn 合金的热物性参数

Tab.1 Thermal physical property parameters of

Mg- <i>x</i> Sm-0.3Zn alloy						
编号	固相 线温 度/℃	液相 线温 度/℃	密度/ (kg · m ⁻³)	牛顿粘度/ (×10 ⁻³ Pa · s)	热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	比热容/ (kJ · kg ⁻¹)
1	648	578	159 6.32	1.334 87	85.689 2	1 073.41
2	647	589	160 3.70	1.342 95	85.688 2	1 070.50
3	646	592	161 2.39	1.352 50	85.687 4	1 067.05
4	644	594	163 1.33	1.373 44	85.686 3	1 060.07
5	640	594	165 7.29	1.402 39	85.687 0	1 051.25

2.2 模拟参数设置及验证

采用压力铸造向上充型,设置虚拟模具,在保证数值模拟结果精度的情况下,采用虚拟模具可简化模拟软件的操作过程。铸件设置为 0,表示“entity”,浇注时金属液可以注入;虚拟模具设置为 100%,表示实体,无退让性。铸件与模具之间传热系数 $h = 1\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,为恒定值。

对于一般的镁合金压铸件,压射压力(增压比压)的选用范围为 30~50 MPa。固定增压比压为 40 MPa 时 10 种不同工艺制度浇注过程模拟,分析比较浇注温度、模具温度、压射速度等参数对压铸过程的影响,见表 2。

表 2 铸造工艺参数

Tab.2 Casting process parameters

编号	浇注温度/℃	模具温度/℃	压射速度/(m · s ⁻¹)
BD-1	680	200	4.5
BD-2	680	220	4.5
BD-3	680	240	4.5
BD-4	640	220	4.5
BD-5	720	220	4.5
BD-6	680	220	3.0
BD-7	680	220	6.0
BD-8	680	280	4.5
BD-9	740	220	4.5
BD-10	680	220	1.5

为了验证数值模型的准确性,选取 BD-2 铸造工艺制度下的两个充型时间,基于已建立模型计算充型结果与压铸试验结果相比较来验证模型的准确性,见图 3。可以看出,选取的两个充型时间对应的已建立模型计算的流动性测验区充型形状和长度与压铸试验结果基本符合,表明了数值模型的有效性。

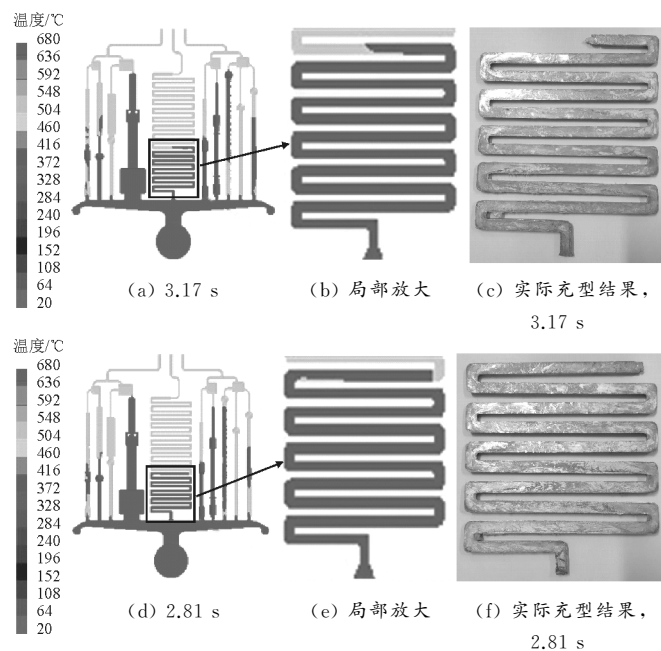


图 3 BD-2 条件下模型计算与压铸实际充型结果的比较
Fig.3 Comparison between model calculation and die casting experiment filling results of BD-2

3 散热镁合金压铸过程模拟分析

3.1 模具温度对压铸过程的影响

选取 BD-1、BD-2、BD-3、BD-8 等 4 组浇注工艺进行模具温度对压铸过程影响的研究。图 4 为采用 BD-2 工艺时压铸件的充型模拟结果,深色区域代表流入型腔的金属液。可以看出,在 0.01 s 内除在内浇口处由于截面积突然变窄易发生紊流飞溅现象外,其他区域充型基本平稳。当金属液浇注试棒后,在 0.013 9、0.018 9、0.021 7 s 等时刻易发生断流,见图 4a~图 4e(圆圈标注处)。尤其需要注意的是,0.023 7、0.025 8 s 时刻右上圆圈标注的浇注过程右侧第二根试棒的充型过程为从上向下逆向充型,可能造成缺陷,见图 4f 和图 4g。最终充型过程无浇不足出现,镁液充满试棒所需时间为 0.028 5 s,充满整个型腔所用时间为 0.029 6 s。

图 5 为采用 BD-3 组参数时的充型模拟。可以看出,2 组条件下整个充型情况基本相似,都可以顺利充满型腔,充满所需时间都为 0.029 6 s。但是在 0.013 9 s 时 BD-2 的充型率为 47.2%,BD-3 的充型率为 47.5%;在 0.020 4、0.021 7 s 时模具的充型率相同,分别为 69.4%、73.6%,BD-3 较 BD-2 模具试棒充型的位置更高且速度更大。这是因为模具温度越高,金属液的流动性能、充型性能越好,可以更好地充型。

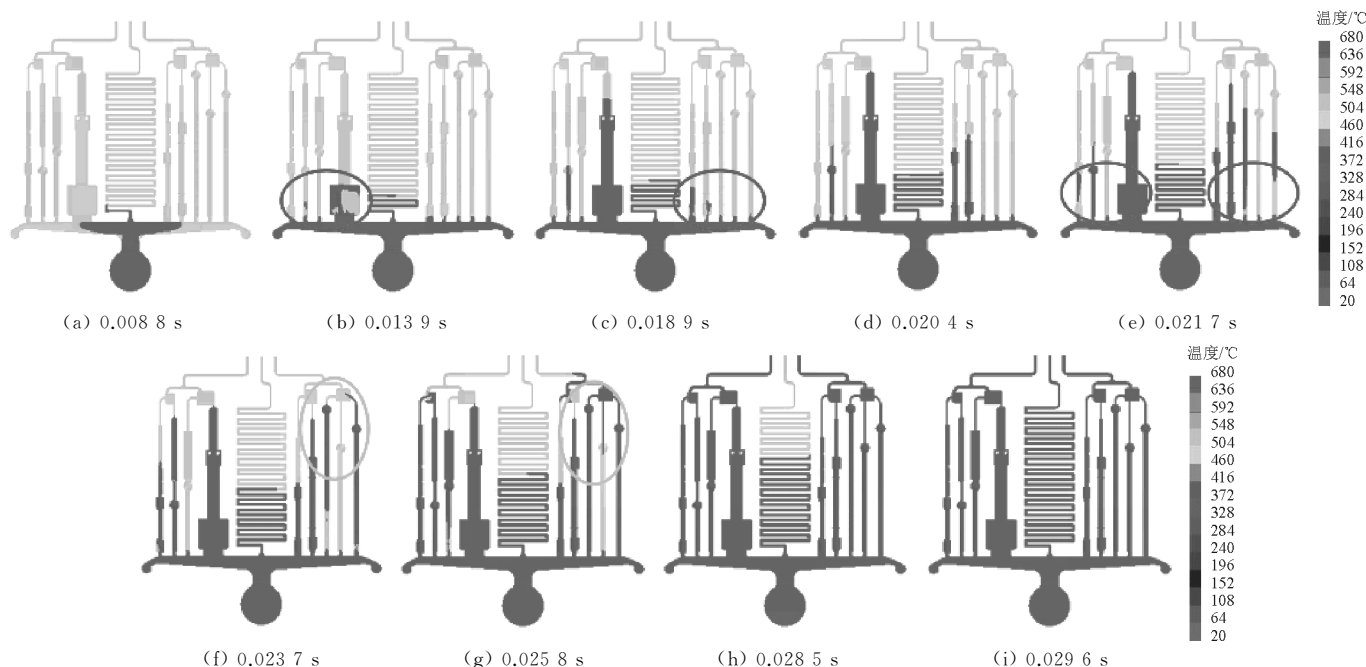


图 4 BD-2 工艺充型过程模拟
Fig.4 The filling process of BD-2 casting process

图 6 为 BD-1、BD-2、BD-3、BD-8 浇注后的结果。由图 6a 可见,各组缩孔、缩松出现位置分布基本一致。主要集中在方形铸块以及上端溢流槽、渣包处。压铸试棒

的尺寸较上端渣包细小,在金属型的强烈激冷作用下,该部分率先凝固,使得凝固后期即使在高压作用也无法从浇口处得到足够的金属液,只能依靠上部的溢流槽对

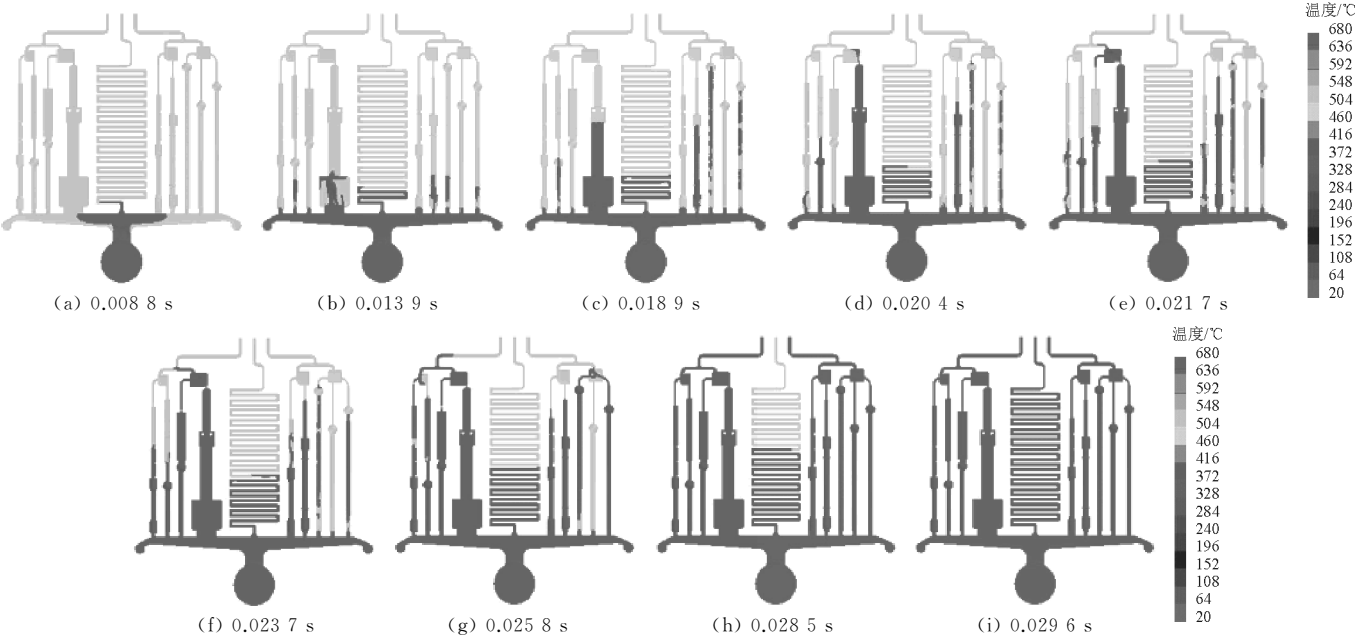


图 5 BD-3 充型过程模拟

Fig.5 The filling process of BD-3 casting process

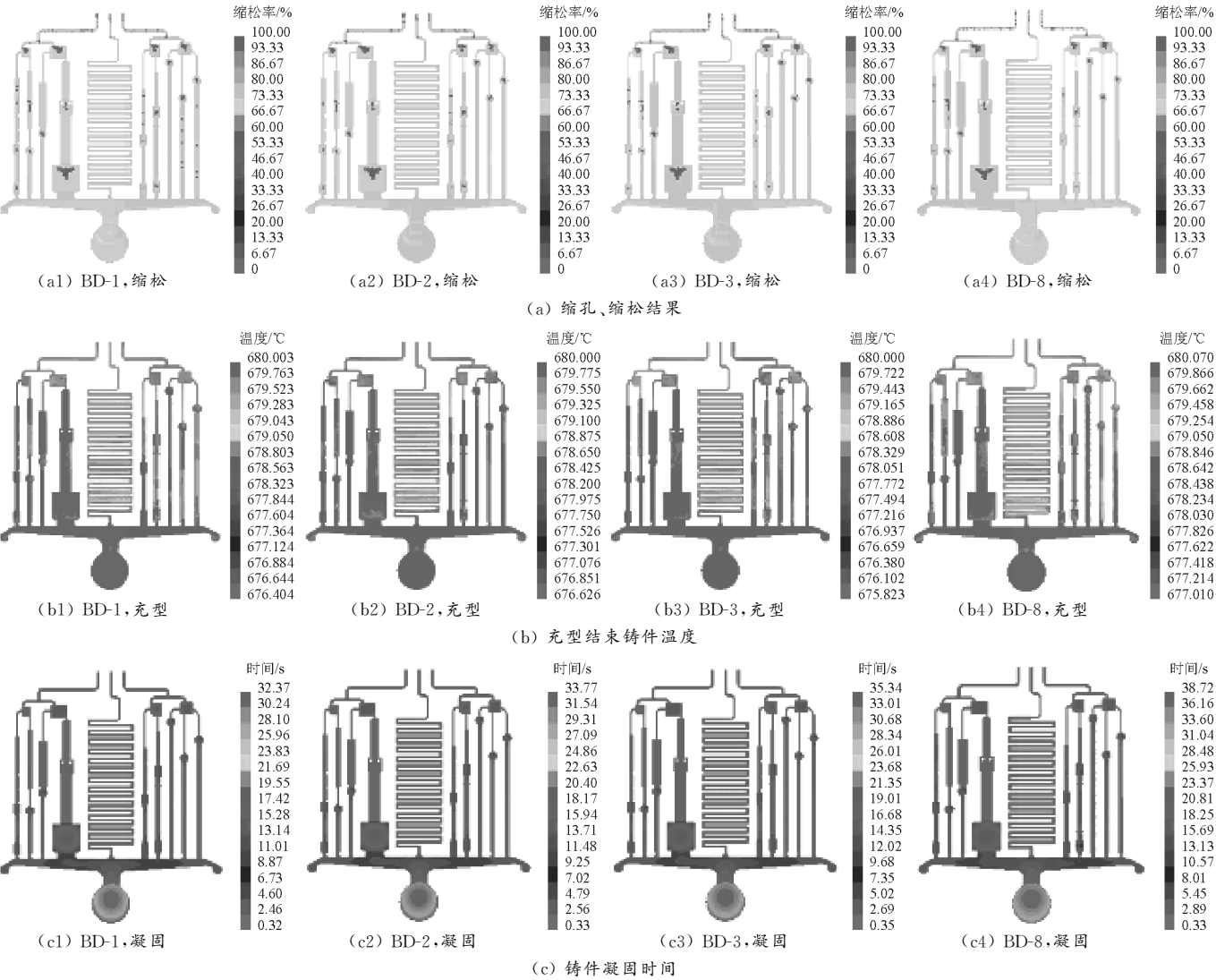


图 6 BD-1、BD-2、BD-3、BD-8 浇注后处理结果

Fig.6 Post-processing of BD-1、BD-2、BD-3、BD-8 casting process

压铸试棒进行补缩,因此铸件在溢流槽及渣包心部容易出现缩孔、缩松缺陷。比较 4 种模具温度的缩孔、缩松分布情况,可知 BD-3(模具温度为 240 ℃)缩孔、缩松结果最优,这是因为 BD-3 充型结束时的温度最高,凝固过程中可以更好地进行补缩,故而缩孔、缩松较少。

图 6c 为 4 组铸件的凝固情况。除去溢流槽、方形铸块、上方渣包,试棒的位置最先凝固,不同模具温度的铸件凝固顺序基本一致。BD-1 凝固所需时间为 32.37 s,比 BD-8 凝固所需时间缩短 19.6%,这是因为 BD-1 的模具温度低,更有利于金属液的凝固。

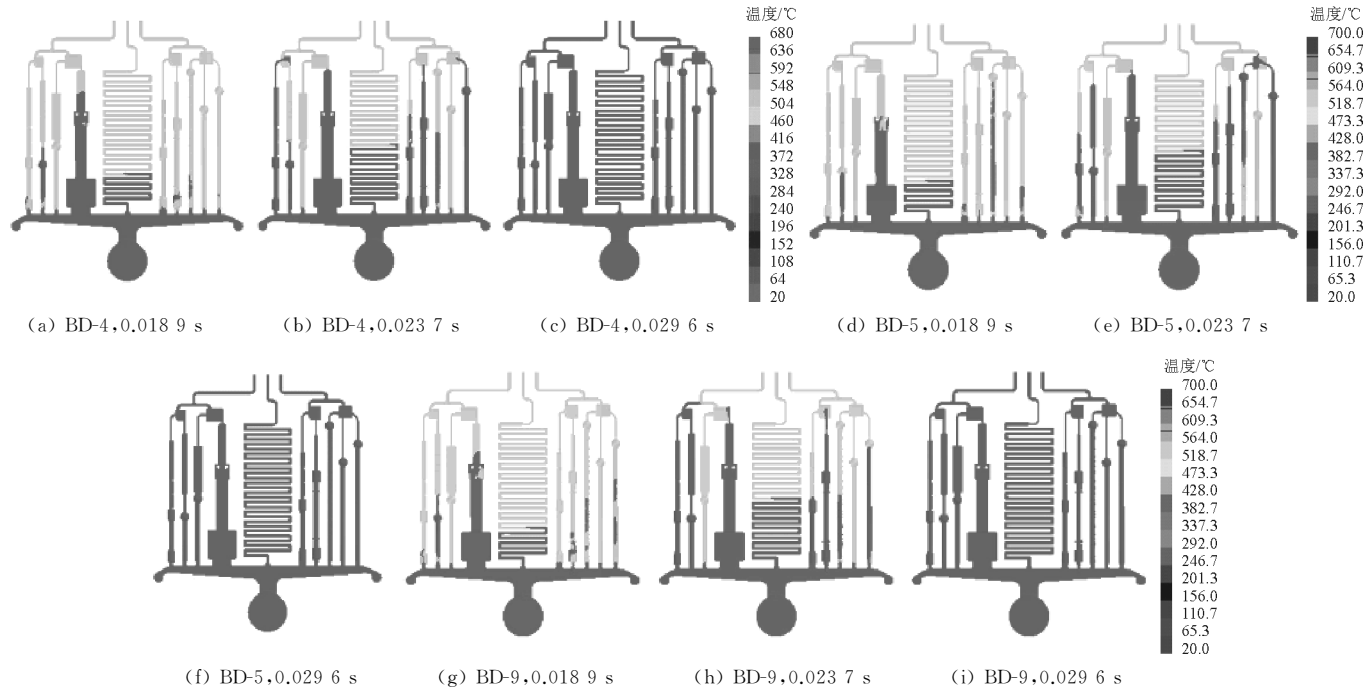


图 7 BD-4、BD-5、BD-9 浇注充型过程

Fig.7 The filling process of BD-4、BD-5、BD-9 casting processes

模具温度来改善模具的充型效果。

不同浇注温度的后处理结果见图 8。从图 8a 可知,铸件的缩孔、缩松依然主要集中在方形试样块、上端溢流槽以及渣包位置。同时,可以发现随着浇注温度提高,BD-2、BD-5 两组的缩孔、缩松结果优于 BD-4。但是,浇注温度继续升高会增加铸件的缩孔、缩松缺陷。这是因为浇注温度低,可以降低凝固过程中产生的体积收缩,因此浇注温度不宜太低。由图 8b、图 8c 可知,浇注温度的差异不会造成铸件凝固顺序的明显差异,只会造成铸件完全凝固所需时间上的差异,这可能会造成铸件不同程度上的补缩行为。

选取 BD-2、BD-7 两组研究压铸速度对压铸过程的影响,图 9 为 BD-7 工艺下合金的充型过程。对比 BD-2 和 BD-7 的充型过程可知不同压铸速度下模具的充型顺序保持一致,但是在充型率为 64.2% (分别对应 BD-2、BD-7 充型过程的 0.0142 s、0.0189 s) 时压铸速度大

3.2 浇注温度和压铸速度对压铸过程的影响

选取 BD-2、BD-4、BD-5、BD-9 等 4 组工艺制度研究浇注温度对压铸过程的影响,图 7 为 BD-4、BD-5、BD-9 浇注工艺下合金的充型过程。可以看出,不同浇注温度下模具的充型顺序保持一致,整个充型速度相当,都在金属液由横浇道进入到试棒位置时发生卷气断流,并且随着浇注温度升高,镁液的卷气现象更加明显。比较模具温度、浇注温度对充型过程的影响,发现模具温度的差异造成的断流现象更加明显,故而对合金的充型过程影响更为显著。在实际操作过程中可以通过适当调节

的 BD-7 镁液产生的断流现象更加明显,模具右侧试棒的镁液充型到更高的位置。充满整个型腔,BD-7 工艺下所需时间为 0.0222 s,较压铸速度小的工艺制度 BD-2 缩短了 0.0074 s。同时,在横浇道以及拉伸试棒都充型结束时,二者的充型率分别为 96.6%、96.0%,压铸速度提高,充型率下降了 0.6%。这是因为压铸速度提高使得除去流动性测试区,其他区域在更短时间内得到充满,流动性测试区充型率下降造成整个模具充型率下降。

对比 BD-2、BD-7 两组工艺的后处理结果,见图 6 和图 10。从图 10a 可以发现 BD-7 铸件的缩孔、缩松结果明显优于 BD-2 的,这是因为压铸速度提高可以在金属凝固的过程进行更好地补缩。并且在充型结束时,压射速度高时模具充满时刻的铸件温度较高,更加适合补缩。因此,在实际操作中可以通过适当增加压射速度来降低铸件的缩孔、缩松情况。同时,压射速度过高,金属

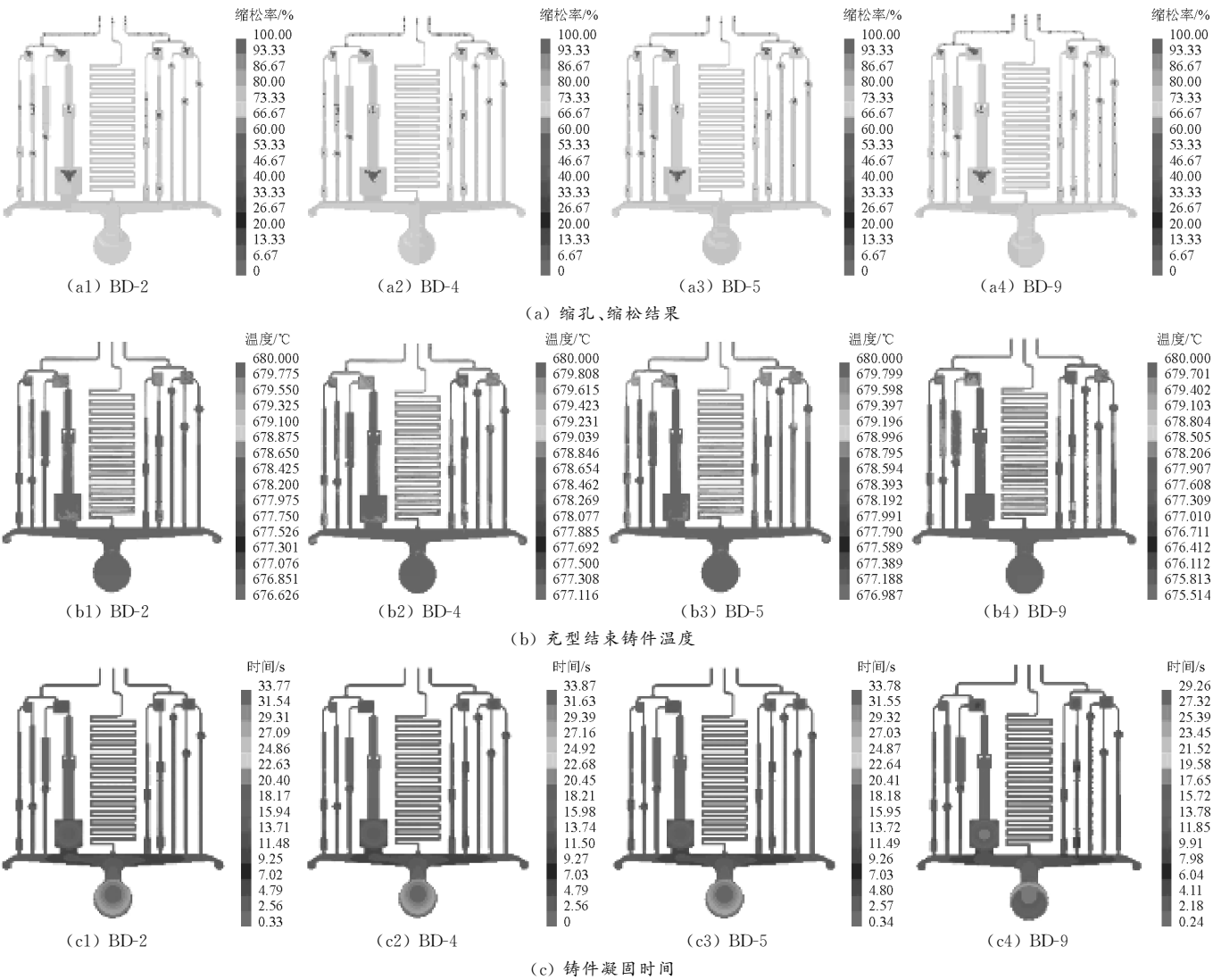


图 8 BD-2、BD-4、BD-5、BD-9 浇注后处理结果

Fig.8 Post-processing of BD-2、BD-4、BD-5、BD-9 casting process

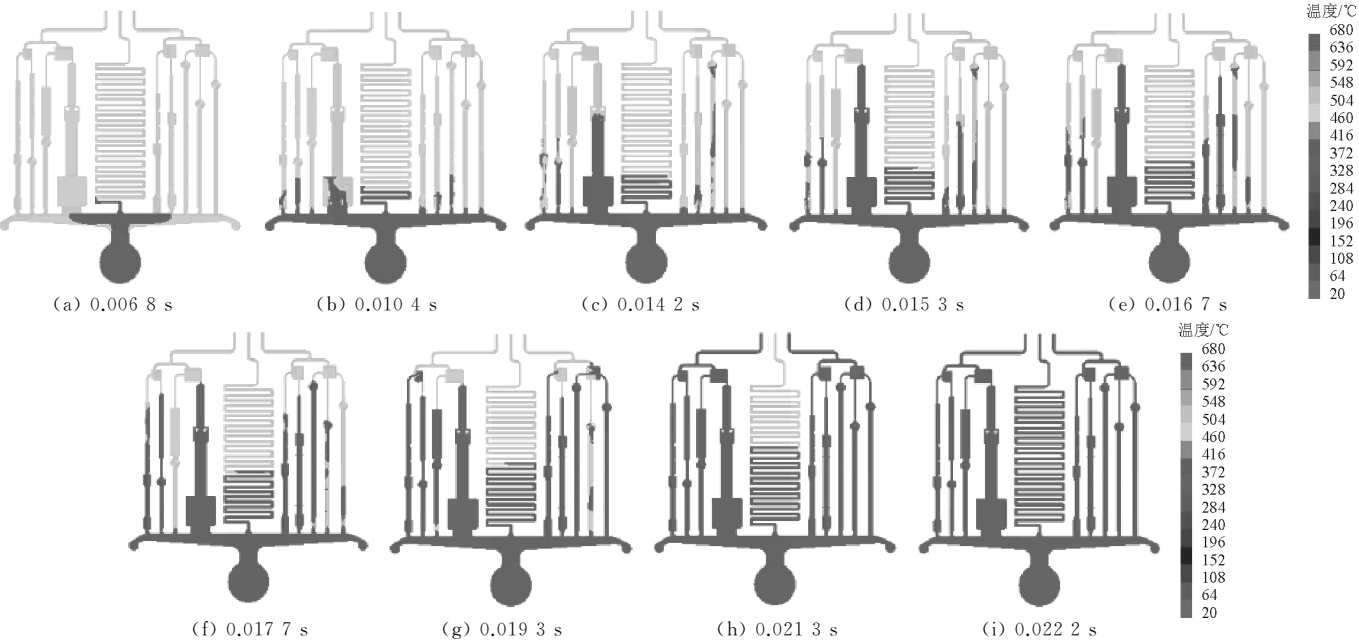


图 9 BD-7 浇注工艺充型过程

Fig.9 The filling process of BD-7 casting process

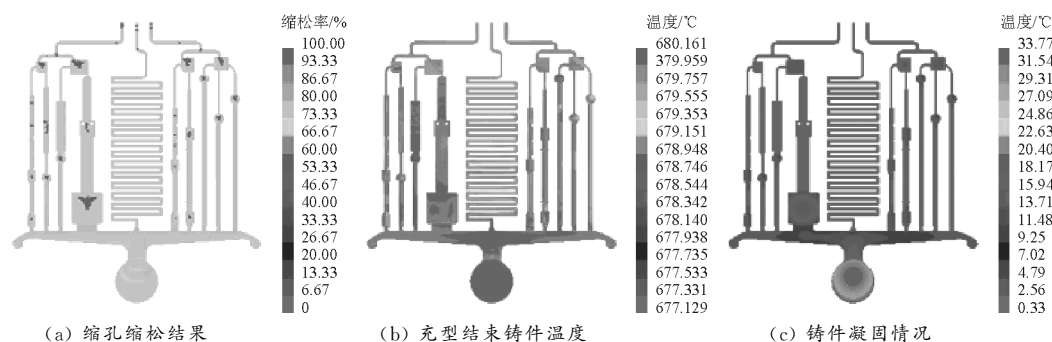


图 10 BD-7 浇注工艺后处理结果

Fig.10 Post-processing of BD-7 casting process

液对型壁的冲击增加,会缩短金属型模具的使用寿命。并且过高的压射速度会使得浇注过程中出现大量紊流和卷气现象,不利于保证铸件品质。

3.3 合金成分对压铸过程的影响

图 11 为不同 $Mg-xSm-0.3Zn$ 合金铸件在 BD-2 条件下的缩孔、缩松分布。可以看出,随着 Sm 含量的增加,铸件的缩孔、缩松情况得到有效改善。这是因为随着 Sm 含量升高,合金的固液相温差由 $70^{\circ}C$ 降低到 $46^{\circ}C$ 。凝固温度范围宽的合金在具有较小的温度梯度条件下凝固时,由于在结晶前沿的液体中形成较宽的成分过冷区,故而枝晶发达,在凝固期间存在着较大范围的固液共存的糊状区,糊状区内枝晶会阻碍金属液补缩,故而容易造成缩孔缺陷。图 12 为不同成分合金铸件在 BD-2 条件下的凝固时间。图 13 为不同合金成分镁熔

体在相同铸造工艺(浇注温度为 $680^{\circ}C$ 、模具温度为 $220^{\circ}C$ 、压铸速度为 4.5 m/s 、压射比压为 40 MPa)下的充型过程。选取两个相同时刻以及充满模具时刻的充型状态,可以发现不同合金成分的充型效果基本相似。同时,铸件的凝固时间也随着 Sm 含量的增加呈现先升高后降低的趋势,并且在 Sm 含量为 1.5% 时达到顶点。另外,当各种成分合金的压铸充型率为 64.2% 时,Sm 含量为 0.8% 时在铸件右侧试棒根部位置卷气现象最弱,充型过程平稳。压铸充型率为 80.3% 时,不同合金成分压铸充型时间相同,都为 0.0237 s ,合金成分对压铸充型速率影响很弱。合金充满整个型腔所需时间随着稀土含量的增加呈现先降低后上升再下降的趋势,见图 14,充满整个型腔需要计算的步数呈现先降低后升高的趋势,最后在 Sm 含量为 0.8% 时达到顶点,需要计算 $9\ 970$ 步。

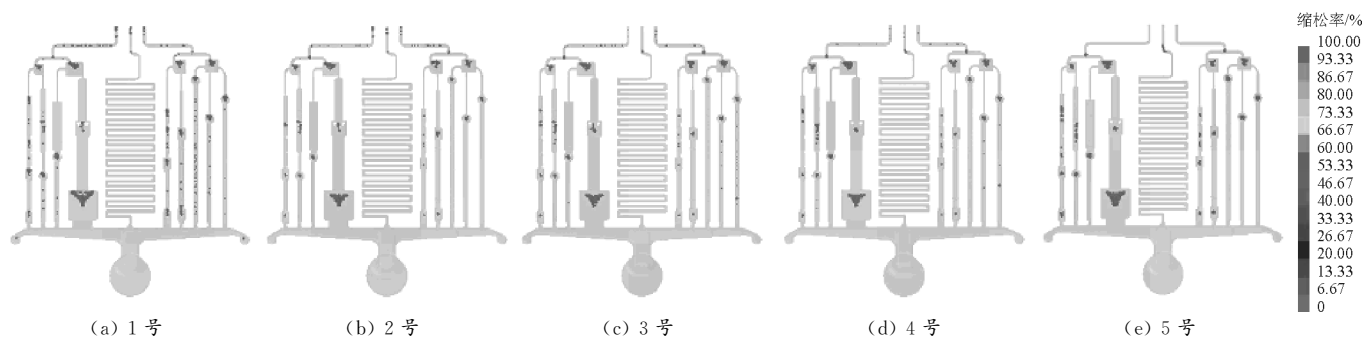


图 11 不同成分合金铸件在 BD-2 条件时的缩孔、缩松

Fig.11 Shrinkage porosity of castings with different alloy composition at BD-2 parameters

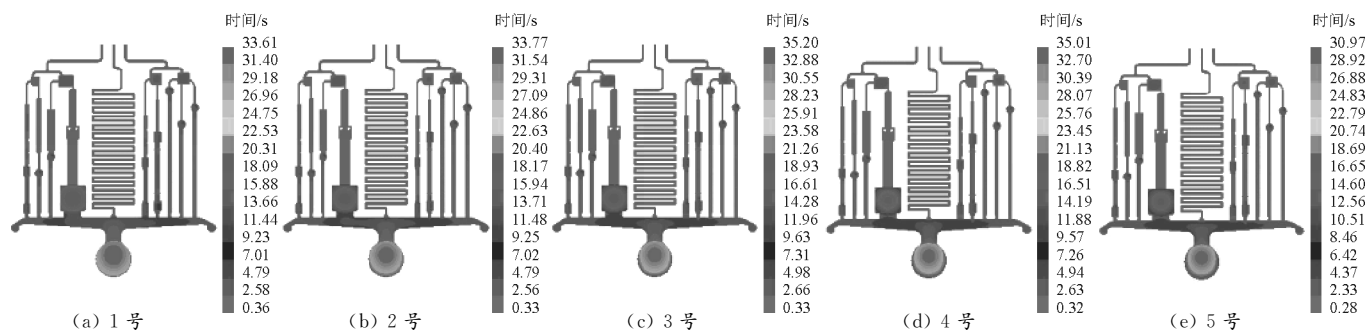


图 12 不同成分合金铸件在 BD-2 条件下的凝固时间

Fig.12 Solidification conditions of castings with different alloy composition at BD-2 parameters

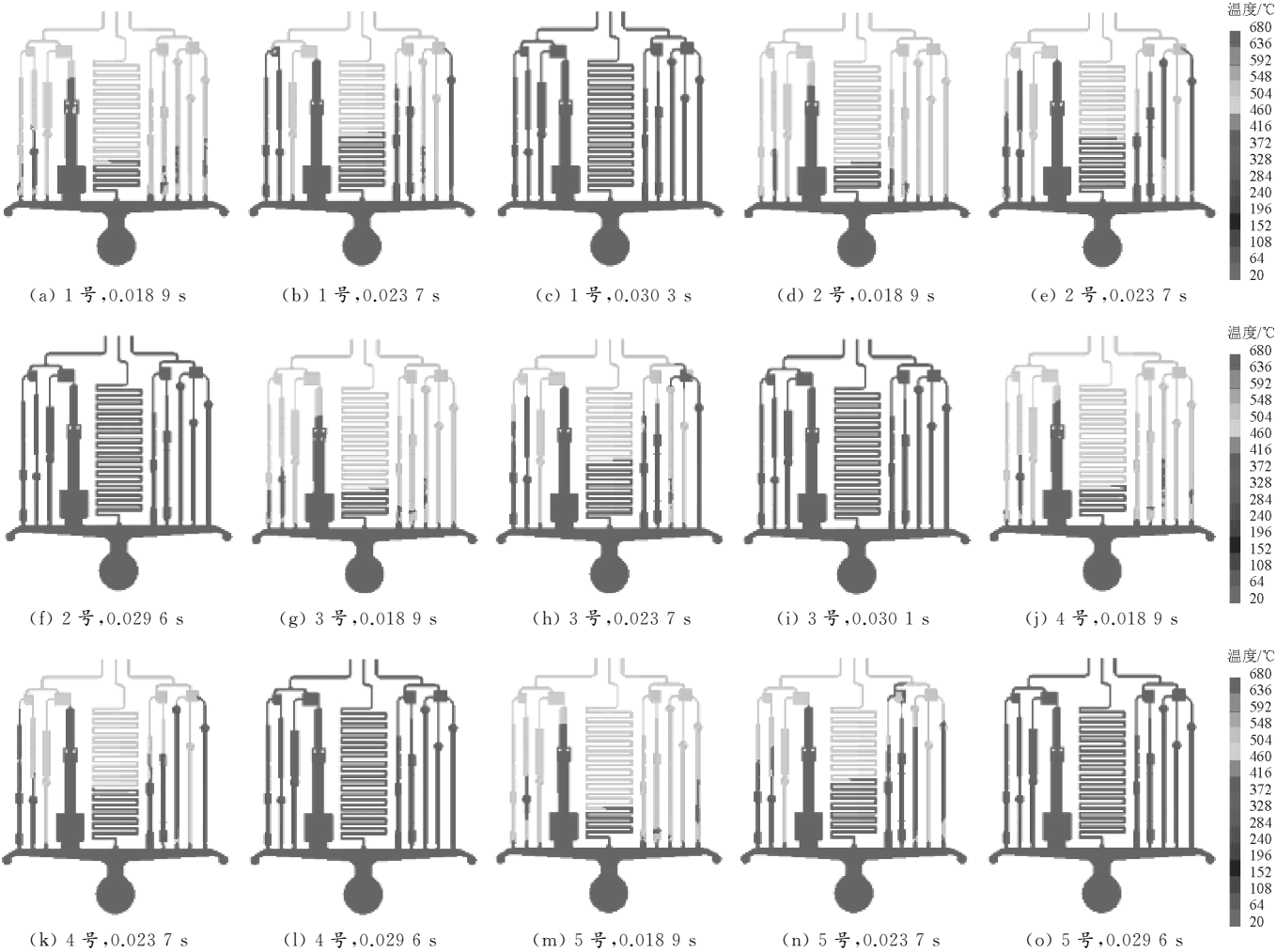


图 13 不同成分合金液充型过程

Fig.13 Metal filling process with different alloy composition

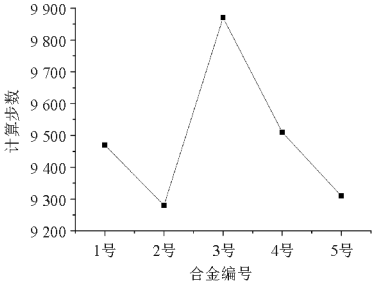


图 14 不同成分合金充满整个模具需要计算步数

Fig.14 The number of steps needed to fill the entire mold with different alloy composition

4 结 论

(1)提高模具温度,Mg-xSm-0.3Zn 镁合金液的流动性能、充型性能增加。模具温度为 240 ℃充型结束时的温度最高,凝固过程中可以更好地进行补缩,故而缩孔、缩松较少。比较模具温度、浇注温度对充型过程的影响,发现模具温度对充型过程有更为显著的影响,在压铸过程中可以通过适当调节模具温度来改善模具的充型效果。

(2)不同压铸速度下充型顺序保持一致,但是,提高压铸速度时镁合金熔体产生的断流现象更加明显,充型时间降低 33.3%。压铸速度的提高可以使铸件得以更好地补缩,减少缩孔、缩松。但是,压射速度过高,镁合金液对型壁的冲击太大,会降低金属型模具的使用寿命。并且过高的压射速度会使得浇注过程中出现大量紊流和卷气现象,不利于保证铸件质量。

(3)不同成分合金的充型效果基本相似,压铸充型率为 64.2%,Sm 含量为 0.8%时铸件充型过程最为平稳。同时,充满整个型腔所需时间以及铸件完全凝固的时间随着 Sm 含量的增加呈现先降低后上升再下降的趋势,并且在 Sm 含量为 1.5%时达到顶点。随着 Sm 含量增加,合金的固液相温差由 70 ℃降低到 46 ℃,铸件的缩孔、缩松得到改善。

参 考 文 献

[1] 应韬. 纯镁和二元镁合金的导热行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
[2] 彭毅. 微量元素对 Mg-2Zn-Mn 镁合金组织和性能的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

激光成形工艺对 TB18 钛合金微观组织的影响

张颖¹ 李明祥¹ 胡生双¹ 赵虎¹ 胡广² 欧阳德来³

(1.中航西安飞机工业集团股份有限公司; 2.西安铂力特增材技术股份有限公司;
3.南昌航空大学材料科学与工程学院)

摘要 采用 BLT-C1000 型 SLM 增材制造设备进行了 TB18 钛合金激光立体成形,通过 3 因素 3 水平正交试验法研究了激光功率、扫描速度、送粉率对单道沉积层和块体微观组织、形貌特征的影响,并优化了成形工艺参数。结果表明,单道沉积层柱状晶组织特征,随扫描速度和激光功率增大、送粉率降低,单道沉积层宽高比增大,对宽高比影响程度依次为扫描速度>激光功率>送粉率。块体微观组织均为双态组织,提高扫描速度,合金组织由 $\alpha+\beta$ 相分明的双态组织向次生 α 相均匀分布在 β 基体的组织特征转变。从获得良好组织考虑,成形工艺参数应采取扫描速度为 800~1 000 mm/min、激光功率为 3.0~3.5 kW、送粉率为 25~30 g/min 适宜。

关键词 激光立体成形;TB18 钛合金;显微组织;工艺参数

中图分类号 TG146.23;TG115.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Laser Forming on Microstructure of TB18 Titanium Alloy

Zhang Ying¹, Li Mingxiang¹, Hu Shengshuang¹, Zhao Hu¹, Hu Guang², Ouyang Delai³

(1.Avic Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd.; 2.Xi'an Blite Additive Technology Co., Ltd.;
3.School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: Laser solid forming of TB18 titanium alloy was carried out by BLT-C1000 SLM additive manufacturing equipment. The effects of laser power, scanning speed and powder feeding amounts on the microstructure and morphology characteristics of single channel deposition layer and block were investigated by three-factor and three-level orthogonal test method, and the forming parameters were optimized. The results indicate that the single channel deposition layer is characterized by columnar grain, and the width to height ratio is increased with the increase of scanning speed and laser power and the decrease of powder feeding amount, of which the influence degree is in the sequence of scanning speed>laser power>powder feeding amounts. The microstructure of the block is characterized by two-state. With the increase of scanning speed, the microstructure of the alloy is transformed from the two-state microstructure with distinct $\alpha+\beta$ phase to that with uniform distribution of secondary α phase in the β matrix. In order to obtain desirable microstructure, the optimal parameters of forming process is scanning speed of 800~1 000 mm/min, laser power of 3.0~3.5 kW and powder feeding rate of 25~30 g/min.

Key Words: Laser Solid Forming, TB18 Titanium Alloy, Microstructure, Process Parameters

收稿日期:2021-10-20;修改稿收到日期:2022-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51761029,51864035)

第一作者简介:张颖,女,1974 年出生,高级工程师,西安(710089),E-mail:3124405664@qq.com

通信作者:胡生双,男,1989 年出生,工程师,西安(710089),E-mail:hushengshuang2000@163.com

引用格式:张颖,李明祥,胡生双,等.激光成形工艺对 TB18 钛合金微观组织的影响[J].特种铸造及有色合金,2022,42(4):436-440.

ZHANG Y, LI M X, HU S S, et al. Effects of laser forming on microstructure of TB18 titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):436-440.

[3] 钟丽萍. 稀土镁合金导热性能及高导热镁合金研究[D].重庆:重庆大学,2016.

[4] PAN H, PAN F, YANG R, et al. Thermal and electrical conductivity of binary magnesium alloys[J]. J. Mater. Sci., 2014, 49(8): 3 107-3 124.

[5] 习张津,张宗和.镁合金及应用[M].北京:化学工业出版社,2004.

[6] OTARAWANNA S, LAUKLI H I, GOURLAY C M, et al. Feeding mechanisms in high-pressure die castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2010, A41(7): 1 836-1 846.

[7] VINARCIK E J. Understanding Defects in High Integrity Die Cast-

ings[R]. SAE Technical Paper, 2003.

[8] 赖华清.压铸工艺及模具[M].北京:机械工业出版社,2004.

[9] 厄普顿.压力铸造[M].北京:机械工业出版社,1988.

[10] 骆相生,许琳.金属压铸工艺与模具设计[M].北京:清华大学出版社,2006.

[11] 黄勇,黄尧.压铸模具设计[M].北京:化学工业出版社,2011.

[12] 董丽娇.镁合金压铸工艺数值模拟及缺陷带形成探讨[D].长春:吉林大学,2015.

(编辑:张正贺)