DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.03.008

铝合金摩托车发动机左箱体压铸工艺数值模拟与优化

童帮华[1],明　玥[2],游国强[2,3]

(1. 四川跃镁镁业科技有限公司,四川 南充 637800;2. 重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400000;3. 国家镁合金材料工程技术研究中心,重庆 400000)

摘　要:基于正交试验方法,运用数值模拟软件对铝合金摩托车发动机左箱体压铸工艺的充型凝固过程进行数值模拟。结果表明,快压射速度越大,金属液充满型腔的时间越短,形成的氧化夹杂越少;模具温度越高,金属液凝固时间越长,晶粒尺寸越大;4 个因素对铸件缩孔缩松、空气压力影响程度相近,缩孔缩松主要分布在铸件孔周围等壁厚较大的区域,空气压力分布较为均匀。

关键词:铝合金;压铸;数值模拟;优化

中图分类号:TG247　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)03-0263-06

Numerical Simulation and Optimization of Die Casting Process for Left Motorcycle Engine Box Casting of Aluminum Alloy

TONG Banghua[1], MING Yue[2], YOU Guoqiang[2,3]

(1. Sichuan Yuemei Magnesium Technology Co., Ltd., Nanchong 637800, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400000, China; 3. National Research Center for Magnesium Alloy Materials Engineering, Chongqing 400000, China)

Abstract: Based on the orthogonal test method, numerical simulation software was used to simulate the solidification process of the left box of aluminum alloy motorcycle engine. The results show that the injection velocity is faster, the time for the liquid metal to fill the cavity is shorter, the oxide inclusions are more less. The mold temperature is higher, the solidification time of liquid metal is longer and the grain size is larger. The four factors have similar influence on shrinkage cavity and porosity of casting and air pressure. Shrinkage cavity and porosity are mainly distributed in regions with large wall thickness around casting holes, and the air pressure distribution is relatively uniform.

Key words: aluminum alloy; die casting; numerical simulation; optimization

铝合金作为目前使用率高的商用金属结构材料,具有密度低、比强度高、塑性优良、耐蚀性好和机加工艺性能优良等优点,被认为是当前最具发展前景的轻量化材料之一。采用压铸工艺生产的铸件具有高生产率,尺寸精度高、组织致密度高等特点,促进了其在生产制造行业的应用。生产中,由于薄壁、形状复杂件压铸过程中不但要保证铸件填充的完整性,还需确保铸件具有良好的性能,故其工艺设置具有一定的难度。目前,多采用数值模拟软件对压铸的充型、凝固过程和缺陷进行模拟分析,以达到浇注系统设计和工艺参数设置的最优化。宋政骢[1]等采用 Flow-3D 对铝合金散热片的压铸工艺进行数值模拟,根据模拟结果进行压铸工艺优化,最后进行了生产验证。张银帅[2]等利用 ProCAST 对 ADC12 铝合金汽车转向器的压铸充型过程进行数值模拟,获得优化工艺参数,并进行了生产验证。吴春艳[3]等借助 anycasting 对铝合金曲轴箱左盖的压铸工艺和缺陷进行模拟,分析获得优化工艺,生产验证表明优化的工艺对铸件质量提供了保障。

本课题以生产应用为目的,在对摩托车发动机左箱体进行结构分析的基础上,采用正交试验方法,对压铸充型凝固过程进行模拟,分析压铸件内部缺陷出现的规律及原因,根据正交试验结果分析获得对压铸件质量影响最大的因素,并以此为基础进行工艺优化,在一定程度上改善铸件质量,以期对类似结构件的压铸生产提供参考。

收稿日期:2018-11-08

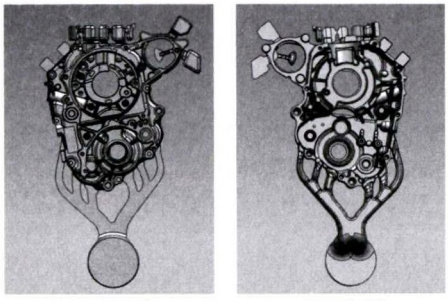
基金项目:四川省科技计划项目(2017GZ0150)

作者简介:童帮华(1972-),重庆人,工程师.主要从事镁铝合金压铸成形工艺研究与管理方面的工作.

电话:13708306550,E-mail:375731865@qq.com

1 摩托车发动机左箱体结构分析

铸件轮廓尺寸为 272.6 mm×405.9 mm×90.0 mm，如图 1。铸件形状较为复杂，最大壁厚 15.6 mm，最小壁厚 2.0 mm，壁厚尺寸相差较大，对压铸工艺参数的设计提出了更高的要求。



(a)正面　(b)反面

图 1 压铸件三维模型图

Fig.1 The 3D model of die casting

2 数值模拟参数设计

压铸件材料采用 ADC12 铝合金，其化学成分如表 1[4]，模具材料采用 H13 模具钢。本课题主要考虑浇注温度，模具温度，慢压射速度，快压射速度 4 个因素，采用 $L^9(3^4)$ 正交表。采用冷室压铸机，参考压铸工艺手册并结合实际生产经验，正交试验的参数设置如表 2。

表1 ADC12铝合金化学成分 w(%)

Tab.1 Chemical compositions of ADC129

Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Ni	Al
9.6~12.0	1.5~3.5	<1.3	<0.3	<0.5	<1.0	<0.5	余量

3 模拟结果及分析

3.1 正交试验结果

正交试验结果如表 3 所示。

表 2 正交试验方案

Tab. 2 Orthogonal experiment scheme

水平	因素			
	浇注温度 (A)/℃	模具温度 (B)/℃	慢压射速度 (C) /m·s^{-1}	快压射速度 (D) / m·s^{-1}
1	700	180	0.3	5
2	680	220	0.1	6
3	720	200	0.2	4

3.2 充型及凝固过程

将金属液填充完成度相近的充型结果进行比较，如图 2~ 图 4 所示。分析可知，金属液通过压室进入直浇道，到达内浇道时较为平稳。随着压射的进行，金属液充填型腔，但其前端较不平稳，易造成气孔、夹杂等缺陷。最后金属液完成充型，且快压射速度越大，充型时间越短。铸件在金属液充满型腔之前没有凝固现象发生。

各组参数下，铸件的凝固过程相近，选择第一组铸件进行凝固过程分析，如图 5。图 5(a)为 t=3.628 8 s 的铸件凝固图，由于铸件形状复杂且壁厚不均匀，凝固最先发生在壁厚较小的溢流槽和壳体处，此时铸件内部形状复杂且壁厚较厚部位未凝固，易造成该部位补形成孤立液相区，导致缩孔缩松缺陷。图 5(b)为铸件包括浇道在内完全凝固的时间分布图，由图可知，铸件完全凝固时间为 62.175 4 s。

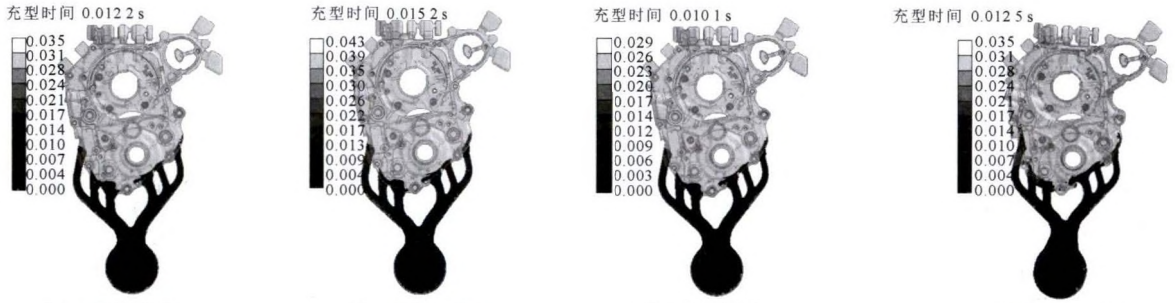
3.3 晶粒尺寸分析

对铸件进行晶粒尺寸分析，结果如图 6 所示。各组铸件晶粒尺寸存在一定差异，其中第 2 组铸件晶粒尺寸最大，第 4 组铸件晶粒尺寸最小。对各组铸件晶粒尺寸分布图进行分析，发现较小的晶粒尺寸主要分布在壁厚较小的溢流槽和壳体区域，而随着壁厚的增加，如铸件孔周围等部位，其晶粒尺寸不断增加，到壁厚最大的料饼部位，其晶粒尺寸到达最大。晶粒尺寸对压铸件的性能影响较大，晶粒尺寸越小，

表 3 正交试验结果

Tab.3 Orthogonal experiment results

试验号	因素				充型时间 /s	凝固时间 /s	最大晶粒尺寸 /cm	最大氧化夹杂值 /(g/cm^3)
	A	B	C	D				
	水平							
1	1	1	1	1	0.034 7	62.175 4	0.140 3	0.051
2	1	2	2	2	0.029 0	70.609 3	0.188 4	0.058
3	1	3	3	3	0.043 4	64.931 7	0.146 2	0.085
4	2	1	2	3	0.043 4	59.663 3	0.138 0	0.077
5	2	2	3	1	0.034 7	65.024 8	0.152 1	0.060
6	2	3	1	2	0.028 9	62.187 5	0.143 5	0.051
7	3	1	3	2	0.028 9	64.803 2	0.141 9	0.056
8	3	2	1	3	0.043 4	70.718 8	0.154 8	0.083
9	3	3	2	1	0.034 7	67.638 3	0.148 0	0.066



(a)t=0.012 2 s　(b)t=0.015 2 s　(c)t=0.010 1 s　(d)t=0.012 5 s

图 2 进入内浇道的充型过程

Fig.2 Gate entering of filling process



(a)t=0.014 8 s　(b)t=0.017 4 s　(c)t=0.021 7 s

图 3 铸件填充 50%的充型过程

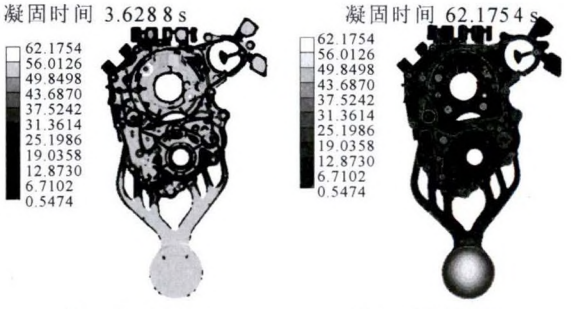
Fig.3 50% of filling process



(a)t=0.027 8 s　(b)t=0.023 2 s　(c)t=0.034 7 s

图 4 铸件充填 80%的充型过程

Fig.4 80% of filling process



(a)t=3.628 8 s　(b)t=62.175 4 s

图 5 第一组铸件凝固过程

Fig.5 Solidification process of NO.1 die casting

性能越好。晶粒尺寸主要受浇注温度、模具温度，导热条件等参数影响。

3.4 铸件缺陷分析

借助软件提供的 Retained Melt Modulus（残余熔体模数）预测铸件缩孔位置及严重程度，结果如图 7 所示。图中左侧条带表示缩孔的孔隙度，比如 0.1 表示该部位体积的 10%为铸件缩孔。如图所示，各组铸件表面皆有一定程度的缩孔缩松缺陷，每组的缺陷部位相近，相比之下，第二组和第三组表面缺陷程度稍轻。分析表明，实验中的 4 个因素对铸件的缩孔缩松缺陷影响程度差异不大。

选择第一组铸件进行内部缩孔缩松缺陷观察，如图 8 所示。缩孔缩松主要分布在铸件孔周围等壁厚较大的区域。压铸过程中，铸件壁厚不均匀，凝固速率不同。壳体处较薄，凝固速率大，先于厚壁区凝固，导致厚壁处难以得到外部合金液补缩，形成液态孤立区，导致铸件缩孔缩松将集中出现在金属液积聚及最后凝固的热节处[5,6]。

对铸件进行氧化夹杂分析，如图 9 分析。图 9 中左侧条带表示单位体积(cm^3)最大氧化夹杂含量(g)，



(a)第1组 (b)第2组 (c)第3组 (d)第4组 (e)第5组

图 6 铸件晶粒尺寸分布

Fig.6 Distribution of grain size



(a)第1组 (b)第2组 (c)第3组 (d)第4组 (e)第5组

图 7 铸件缩孔缩松分布

Fig.7 Shrinkage cavity and porosity distribution of casting



(a)第一截面 (b)第二截面

图 8 第一组铸件内部缩孔缩松分布

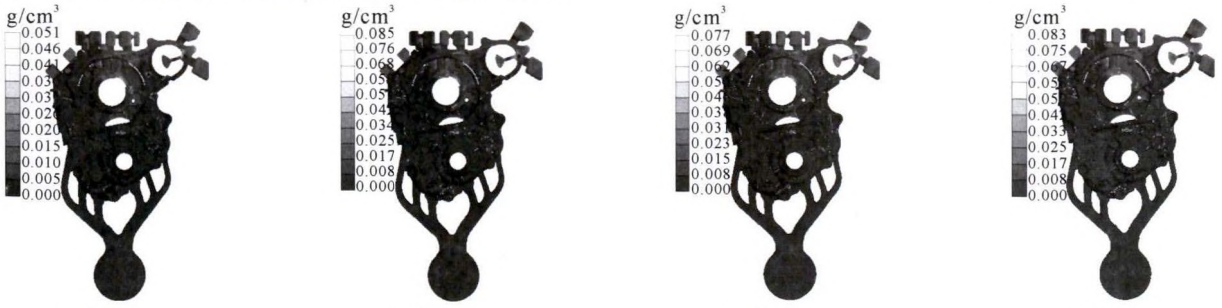
Fig.8 Shrinkage cavity and porosity distribution of NO.1 interior

每组压铸件均有一定程度的氧化夹杂存在，主要分布在最先充型部位。根据图左侧的氧化夹杂分布条及其数值分析可知，各组的氧化夹杂值差异较小，第 2、3、4 组氧化夹杂较为严重，其单位体积(cm^3)最大氧化夹杂含量分别为 0.085、0.077 和 0.083 g。氧化夹杂的存在将会对压铸件的质量和性能产生不利影响。

对压铸件进行空气压力分析，以预测压铸件中的气孔情况，结果如图 10 所示。气孔在各组铸件分布较为均匀，严重部位主要集中在溢流槽。对比分析可知，各组气孔分布情况相差不大，严重程度相近，但第 2、3、5 组气孔较为严重。压铸工艺的气孔缺陷影响因素较多，与金属液含气量，脱模剂含气量，以及金属液充型速度等因素相关。本课题中，主要考虑由于充型过程造成的金属液卷气行为导致的气孔缺陷，而压铸过程的卷气行为几乎无可避免。

3.5 正交试验结果分析

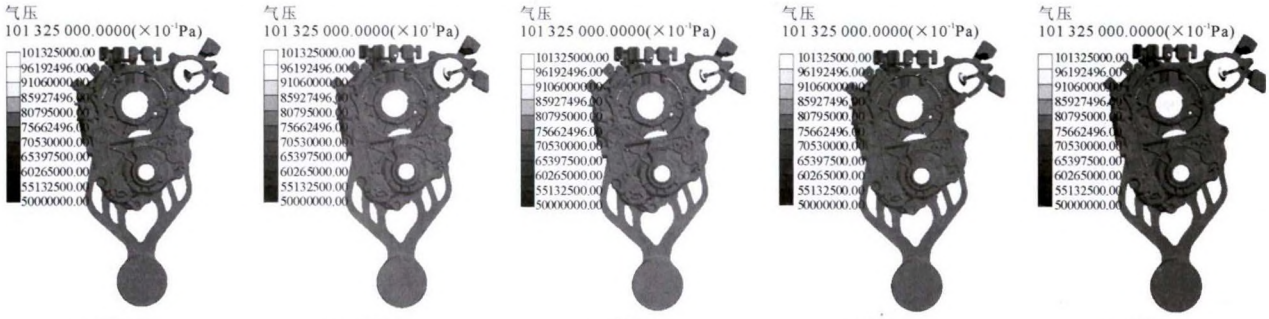
正交试验结果直观分析见表 4。由表可知：快压射速度对充型时间影响最显著，快压射速度越大，充型时间越小；模具温度对凝固时间影响最显著，模具温度越高，凝固时间越长；模具温度对最大晶粒尺寸影响最大，模具温度越高，最大晶粒尺寸越大；快压



(a)第1组 (b)第2组 (c)第3组 (d)第4组

图 9 铸件氧化夹杂分布

Fig.9 Oxidation inclusion distribution of casting



(a)第1组　(B)第2组　(c)第3组　(d)第4组　(e)第5组

图 10 铸件空气压力分布

Fig.10 Casting air pressure distribution

表 4 正交试验结果直观分析表

Tab.4 Intuitive analysis of experimental results

指标		A	B	C	D
充型时间	*K*1	0.107 1	0.107 0	0.107 0	0.104 1
	*K*2	0.107 0	0.107 1	0.107 1	0.086 8
	*K*3	0.107 0	0.107 0	0.107 0	0.130 2
	极差 *R*	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.043 4
	影响因素	D>A=B=C			
凝固时间	*K*1	197.716 4	186.641 9	195.081 7	194.838 5
	*K*2	186.875 6	206.352 9	197.910 9	197.600 0
	*K*3	203.160 3	194.757 5	194.759 7	195.313 8
	极差 *R*	16.284 7	19.711 0	3.151 2	2.761 5
	影响因素	B>A>C>D			
最大晶粒尺寸	*K*1	0.474 9	0.420 2	0.438 6	0.440 4
	*K*2	0.433 6	0.495 3	0.474 4	0.473 8
	*K*3	0.444 7	0.437 7	0.440 2	0.439 0
	极差 *R*	0.041 3	0.075 1	0.035 8	0.034 8
	影响因素	B>A> C>D			
最大氧化夹杂值	*K*1	0.194	0.184	0.185	0.177
	*K*2	0.188	0.201	0.201	0.165
	*K*3	0.205	0.202	0.201	0.245
	极差 *R*	0.017	0.018	0.016	0.080
	影响因素	D > B > A > C			

注：K_i 为该列因素条件下第 i 水平实验结果之和，R 表示极差。

射速度对最大氧化夹杂值影响最显著，快压射速度越大，最大氧化夹杂值越小。

快压射速度越大，金属液充满型腔的时间越短，有利于金属液充满型腔，但易造成金属液充填不平稳，导致卷气、夹杂等缺陷。模具温度越高，与金属液之间的温差越小，金属液凝固时间越长，较长的凝固时间有助于金属液的补缩；同时模具温度越高，凝固时间越长，晶粒越容易长大。快压射速度越大，金属液越能迅速充满型腔，金属液暴露在空气中的时间越短，形成的氧化夹杂越少。

4 优化方案及样件生产

根据以上分析，快压射速度越大，充型时间越短，金属液充型较不平稳，但程度较轻，且氧化夹杂越少。模具温度越高，有助于金属液的补缩，但晶粒尺寸较大，对压铸件性能不利。浇注温度和慢压射速度对压铸过程影响较小，但是浇注温度较高，金属液氧化严重，浇注温度较低，压铸件表面质量受影响；慢压射速度较大，金属液在压室流动不平稳，慢压射速度较低，金属液温度下降较大，不利于充型。由此得出优化工艺参数：浇注温度 700 ℃，模具温度 200 ℃，慢压射速度 0.2 m/s，快压射速度 6 m/s。

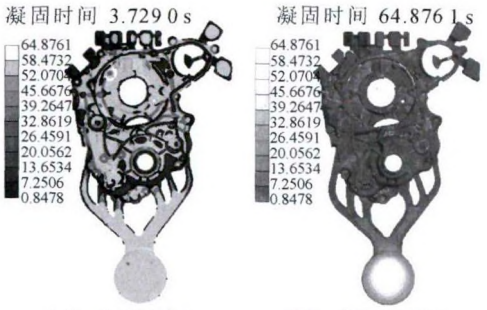
模拟结果表明，充型时间为 0.028 9 s，凝固时间为 64.876 1 s，最大晶粒尺寸 0.146 1 cm，最大氧化夹杂值为 0.005 2 g/cm³。结果符合上述分析。铸件充型过程、凝固过程和缺陷分布分别见图 11~图 16。



(a)t=0.010 0 s　(b)t=0.014 6 s　(c)t=0.023 1 s

图 11 优化方案铸件充型过程

Fig.11 Filling process of die casting after optimization



(a)t=3.729 0 s (b)t=64.876 1 s

图 12 优化方案铸件凝固过程

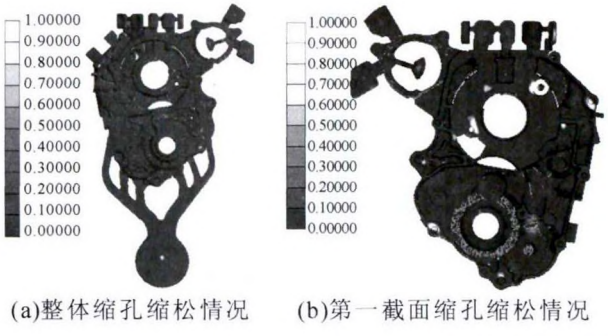
Fig.12 Solidification process of die casting after optimization

根据优化方案进行样件生产。获得的样件充型完整,外观质量良好,无明显表面质量缺陷,如图 17 所示。

5 结论

(1)金属液充型过程,快压射速度越大,金属液充满型腔的时间越短,有利于金属液充满型腔,但易造成金属液充填不平稳,导致卷气、夹杂等缺陷。

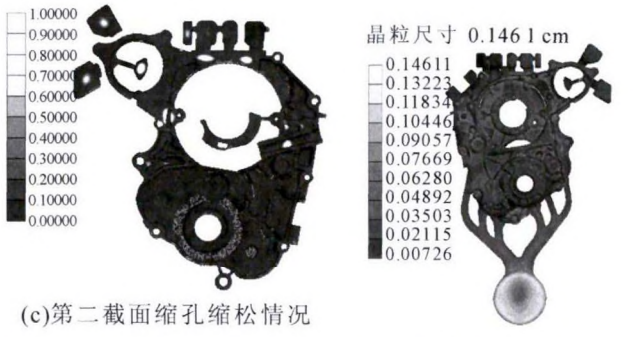
(2)金属液凝固过程,模具温度越高,与金属液之间的温差越小,金属液凝固时间越长,较长的凝固时间有助于金属液的补缩;同时模具温度越高,凝固时间越长,晶粒尺寸越大。



(a)整体缩孔缩松情况 (b)第一截面缩孔缩松情况

图 13 铸件缩孔缩松情况

Fig.13 Shrinkage of optimization scheme



(c)第二截面缩孔缩松情况

图 14 铸件晶粒尺寸分布

Fig.14 Distribution of grain size

(3)对铸件氧化夹杂缺陷分析表明,快压射速度越大,充填时间越短,金属液暴露在空气中的时间越短,形成的氧化夹杂越少。对铸件的缩孔缩松、空气压力缺陷分析表明,4 个因素对铸件缺陷影响程度相近,缩孔缩松主要分布在铸件孔周围等壁厚较大的区域,氧化夹杂主要分布在金属液最先充型部位。



图 15 铸件氧化夹杂分布

Fig.15 Distribution of oxide inclusion



图 16 铸件空气压力分布

Fig.16 Distribution of air pressure

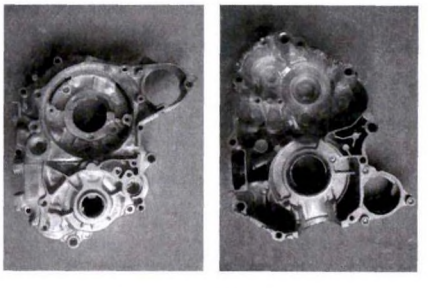


图 17 优化方案样件

Fig.17 Sample of optimization scheme

参考文献:

[1] 宋政骢,米国发,周志杰,等. 铝合金散热片压铸工艺设计与数值模拟优化[J]. 特种铸造及有色合金,2018, 38(1): 45-48.

[2] 张银帅,黄正华,宋东福,等. 铝合金汽车转向器压铸过程的数值模拟与产品组织分析[J]. 铸造,2017, 66(6): 572-576.

[3] 吴春艳, 明玥. 铝曲轴箱左盖压铸工艺及缺陷研究 [J]. 铸造技术, 2018, 39(1): 73-78.

[4] 白香鸽,董燕飞. 压铸工艺对 ADC12 铝合金建筑脚手架扣件力学性能和腐蚀性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(1): 127-130.

[5] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 机械工业出版社,2000.

[6] 明玥,游国强,陈磊,等. 镁合金摩托车曲轴箱右盖的压铸工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2015, 35(3): 277-281.