

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.018

# 铝合金活塞铸造工艺数值模拟研究

沈家栋, 张海亮

(浙江工业大学 浙江省特种装备制造与先进加工技术重点实验室, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 针对铝合金活塞铸造成型过程中存在缩松、缩孔、晶粒尺寸不均匀等缺陷问题,利用Procast专业铸造有限元分析软件,进行了ZL108铝合金活塞铸造工艺的数值模拟研究,利用正交试验法考察了浇注温度、浇注速度、模具温度3个工艺参数,对数值模拟结果进行了晶粒尺寸、缩松缩孔分布、充型率等几个方面的综合评分。研究表明:最优的工艺参数组合为700℃的浇注温度、0.3 kg/s的浇注速度和150℃的模具温度。ZL108铝合金活塞铸造工艺数值模拟研究结果为壁厚不均匀的重要复杂零件铸造成型提供了理论指导,节省零件工艺优化设计的成本和时间。

**关键词:** 铝合金活塞; 铸造工艺; Procast; ZL108; 数值模拟

**中图分类号:** U463; TG24; TH16

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2013)03-0322-03

## Numerical simulation research on aluminum alloy piston casting process

SHEN Jia-dong, ZHANG Hai-liang

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming at the shrinkage, grain size inhomogeneity in the casting process of aluminum alloy piston, the professional casting software Procast was used to make numerical simulation research on the piston casting process. Orthogonal experiment method was investigated three process parameters of pouring temperature, casting speed, mold temperature. The numerical simulation results were evaluated from several aspects, such as the grain size, shrinkage porosity distribution and filling rate. The results indicate that the optimal combination of process parameters is 700 °C pouring temperature, 0.3 kg/s casting speed, and 150 °C mold temperature. The numerical simulation of ZL108 aluminum alloy piston casting process provides theoretical guidance for uneven thickness complex parts casting molding, reduces the cost and time of the part design process optimization.

**Key words:** aluminum alloy piston; casting process; Procast; ZL108; numerical simulation

## 0 引言

铝合金活塞主要采用金属型铸造<sup>[1]</sup>,但铸造过程中容易产生缩松、缩孔等缺陷,同时活塞壁厚差距比较大,成型过程中容易造成晶粒尺寸不均匀等缺陷<sup>[2-3]</sup>,这些缺陷影响了铸件的使用寿命。目前,国内外对铝合金活塞工作过程的数值模拟研究已经有一定进展<sup>[4]</sup>,对改善铝合金活塞成型质量的研究也已经开展起来,但涉及具体产品铸造工艺参数组合优化的研究较少<sup>[5-6]</sup>。

为此本研究从铸造工艺参数组合出发,利用正交试验法考察浇注温度、浇注速度、模具温度3个工艺参数,对数值模拟结果进行晶粒尺寸、缩松缩孔分布、充型率等几个方面综合评分,得出最优铸造工艺参数组合。

## 1 工艺参数优化方案设计

铝合金活塞铸造过程中,浇注温度、浇注速度、模具温度3个工艺参数对成型质量的影响很大,研究者需要找出对铝合金活塞成型质量最优的参数组合,本研究以

收稿日期: 2012-11-27

作者简介: 沈家栋(1987-),男,浙江嘉兴人,主要从事机械设计、铸造工艺等方面的研究。E-mail:s\_jd1987@126.com

ZL108铝合金活塞为研究对象,其成分如表1所示。

表1 ZL108铝合金化学成分

化学成分	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Al
质量分数 /(%)	11.0~13.0	1.0~2.0	0.4~1.0	0.3~0.9	≤0.7	余量

本研究根据合作工厂实际经验及活塞浇注工艺的文献<sup>[7-10]</sup>,设置ZL108铝合金浇注温度650℃~750℃,浇注速度0.2 kg/s~0.4 kg/s,模具温度150℃~250℃,具体因素水平设置如表2所示。

表2 数值模拟因素水平表

因素	E 浇注温度 /℃	F 浇注速度 /(kg·s <sup>-1</sup> )	G 模具温度 /℃
1	750	0.2	150
2	600	0.3	200
3	650	0.4	250

## 2 铸造工艺数值模拟

本研究首先用Pro/E三维软件进行实体建模,用Pro/E软件自带的Mechanical模块进行面网格划分,考虑计算机运行的速度,活塞毛坯的面网格控制最大尺寸为5 mm。笔者把面网格模型导入到Procast有限元分析软件中,进行面网格检查、体网格划分、优化处理。

本研究在Procast有限元分析软件的Precast环境下进行前处理,在Procast中针对ZL108铝合金(Al-Si12CuNiMg)材料,可以做流动和传热分析。笔者设置了虚拟铸型,铸型材料为常用的H13钢,设置好虚拟铸型后,用Computer Mold进行虚拟模型计算。模

具与铸件的换热系数采用 $1\ 000\ \omega\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{c}^{-1}$ ,针对浇注速度、模具温度、浇注温度等工艺参数,本研究采用正交试验法设置9组工艺参数组合,模拟结果如表3所示。

## 3 模拟结果分析

通过对各组方案的模拟,方案4、7产生了不合格的情况,主要由于铸造中活塞毛坯的主体出现了浇注不足的情况,如图1所示,铝合金活塞的销座孔处出现了浇注不足和残余气体的情况,这对活塞的使用影响很大。

评判铸件质量建立在型腔充型完全的基础之上,还要检验其铸造缺陷、晶粒尺寸。方案1、2、3、5、6、8、9的缩孔缺陷图如图2所示。

可以看出,方案5、6、9的缺陷较少,其主体毛坯的缩松缩孔明显少于其余试验组,方案5、6、9的缩孔缩松主要出现在主、副冒口上,而其余几组的缩松缩孔比较多,尤其是铝合金活塞的头部等壁厚相对较大的位置容易产生缩松缩孔等缺陷。

方案5、6、9的晶粒尺寸相对较小,其活塞头部的晶粒尺寸在0.066 9 cm~0.074 6 cm之间,而方案1和方案3的晶粒尺寸相对较大,其晶粒尺寸在0.077 9 cm~0.079 1 cm之间;方案5、6、9活塞裙部的晶粒尺寸在0.041 7 cm~0.048 6 cm之间,方案1、3活塞裙部的晶粒尺寸在0.052 7 cm~0.056 7 cm之间,方案1、3、5、6、9的晶粒尺寸如图3所示。

充型质量综合考虑上述缩松缩孔和晶粒尺寸两个方面进行评分,针对产生不合格情况的实验组,其

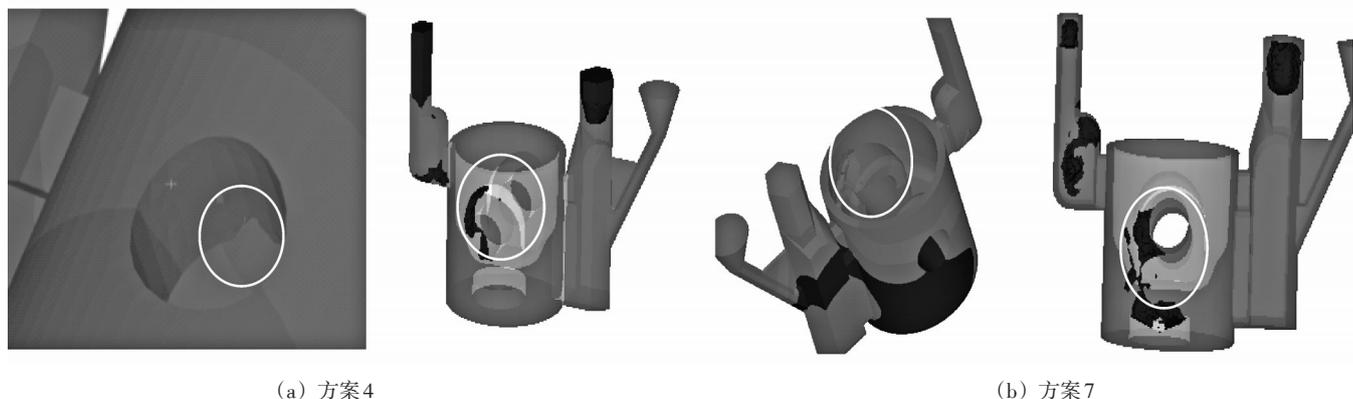


图1 浇注不足及气体夹杂



图2 各方案缩松缩孔分布情况

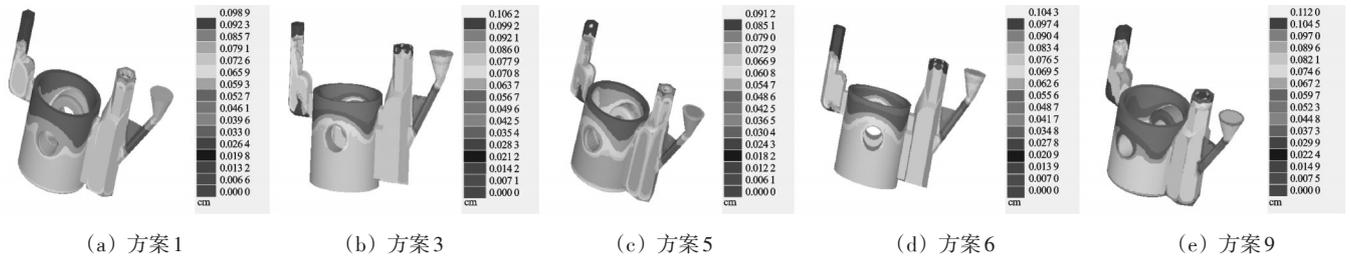


图3 各方案晶粒尺寸模拟结果

充型质量得分为50的不及格分,其余合格的实验组得分从70~100分依次递增,梯度为5分,且分数越高代表其成型质量越好,其结果如表3所示。

表3 模拟结果

试验号	影响因素水平设置			<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	充型结果	充型质量
	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	浇注温度 /°C	浇注速度 /( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	模具温度 /°C		
1	1	1	1	750	0.2	150	合格	70
2	1	2	2	750	0.3	200	合格	85
3	1	3	3	750	0.4	250	合格	75
4	2	1	2	700	0.2	200	不合格	50
5	2	2	3	700	0.3	250	合格	100
6	2	3	1	700	0.4	150	合格	95
7	3	1	3	650	0.2	250	不合格	50
8	3	2	1	650	0.3	150	合格	80
9	3	3	2	650	0.4	200	合格	90

本研究利用正交分析中的极差分析法,对充型结果的评分、极差分析如表4所示。由表2、表3中的因素水平设置可知,  $E_1$  表示影响因素为 *E* (即浇注温度)在水平为1的铸造工艺条件,即  $E_1$  表示浇注温度为750 °C,则各个因素在不同水平下的变化趋势如图4所示。

表4 各因素及水平极差分析表

参数	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
水平结果 $K_1$	230	170	245
水平结果 $K_2$	245	265	225
水平结果 $K_3$	220	260	225
$\Delta K$	25	85	20
结果	$F > E > G$		

由结果可以看出,因素 *F* (即浇注速度)对铝合金活塞的成型质量影响最大,其次是因素 *E* (即浇注温度),对铝合金活塞影响最小的是因素 *G* (即模具温度),根据极差值绘制的因素水平趋势图如图4所示,可以明显看出,因素 *F* 对铝合金活塞的影响质量是最大的。

由因素水平影响趋势图可以分析得出,  $E_2F_2G_1$  组合为最佳的工艺参数组合,分别为700 °C的浇注温度、0.3 kg/s的浇注速度和150 °C的模具温度,且该方案并

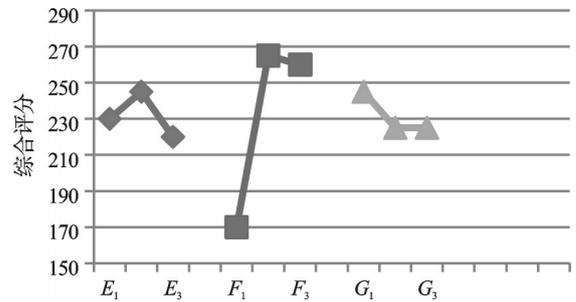


图4 因素水平影响趋势图

不在上述的正交组合之中,所以研究者需要对工艺参数组合进行验证分析,利用Procast 模拟软件对其进行数值模拟,其模拟结果如5所示。

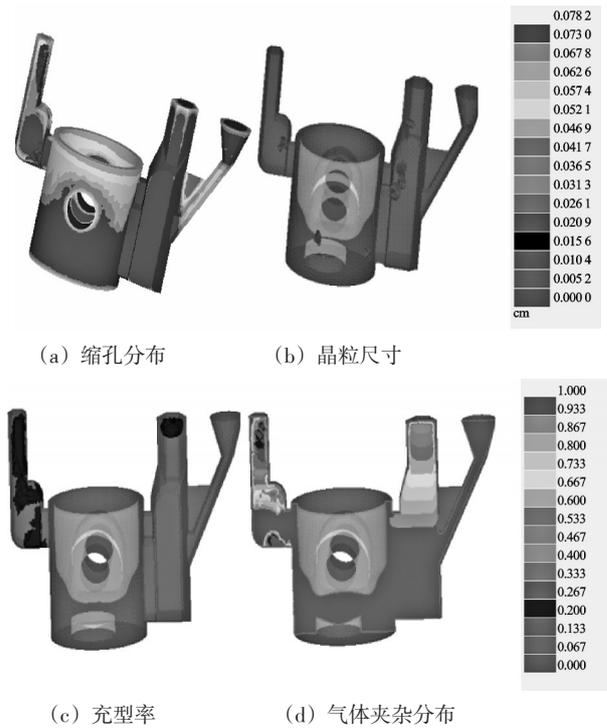


图5 最佳铸造工艺参数组合模拟结果

## 4 结束语

通过模拟的  $E_2F_2G_1$  参数组合结果,研究者可以看出铸件的缩松缩孔较少,其缩松缩孔主要分布在主副冒口上;晶粒尺寸更加均匀,壁厚较小处到壁厚较大处的晶粒尺寸从0.052 1 cm~0.073 cm变化;毛坯主体 (下转第328页)

优化前、后前纵梁峰值弯矩对比表如表1所示。左纵梁后端经过优化后,峰值弯矩由2 002 N·m提高到2 574 N·m,抗弯性能提高28.6%;右纵梁后端经过优化后,峰值弯矩由3 151 N·m提高到3 300 N·m,抗弯性能提高4.7%。本研究分析左、右纵梁结构,左纵梁在中后段有凹陷状区域,右纵梁在中后段没有凹陷状区域,凹陷状区域大大减弱了纵梁此处的抗弯性能,因此在优化之前右纵梁的抗弯性能就优于左纵梁。在经过优化之后,左纵梁抗弯性能提高比例(28.6%)也要明显高于右纵梁抗弯性能提高的比例(4.7%)。

表1 优化前、后前纵梁后端弯矩对比

模型	优化前	优化后	提高百分比/(%)
左纵梁/(N·m)	2 002	2 574	28.6
右纵梁/(N·m)	3 151	3 300	4.7

通过该优化方案,系统在几乎没有增加成本的情况下,达到了良好的优化效果:碰撞吸能增加,碰撞峰值力降低,峰值加速度降低,抗弯性能提高。

## 4 结束语

本研究以某自主品牌电动汽车项目研发为依托,参照法规及C-NCAP要求,建立了全宽正面碰撞有限元模型,并对该结构进行耐撞安全性分析。针对存在的前机舱吸能不足、前纵梁后端抗弯性能薄弱等问题,进行了优化设计。仿真计算结果表明:在几乎没有增加成本的前提下,优化后,该结构碰撞吸能提高3.5%,刚性墙撞击峰值力降低11.73%,峰值加速度降低3.8%,左纵梁后端抗弯能力提高28.6%,右纵梁后端抗弯能力提高4.7%,这不仅提高了前机舱的吸能效

果,还提高了前纵梁的抗弯特性,提高了该车的耐撞安全性,达到了良好的优化效果。

## 参考文献(References):

- [1] 崔胜民,韩家军. 新能源汽车概论[M]. 北京:北京大学出版社,2011.
- [2] 欧阳惠芳. 促进广东节能与新能源汽车健康发展[J]. 机电工程技术,2011,40(10):8-12.
- [3] 李晓华. 新能源汽车技术发展的挑战、机遇和展望[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [4] HODKINSON R, FENTON J. Lightweight Electric/Hybrid Vehicle Design [M]. Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 2001.
- [5] WANG Da-zhi, YU Cheng-xiang. Frontal crashworthiness structure design of mini electric passenger cars[J]. **Automotive Safety and Energy**, 2010, 1(1): 49-52.
- [6] YILDIZ A R, SOLANKI K N. Multi-objective optimization of vehicle crashworthiness using a new particle swarm based approach[J]. **Manufacturer Technology**, 2012, 59(1-4): 367-376.
- [7] SUDWORTH J L. Zebra batteries [J]. **Journal of Power Sources**, 1994, 51(8): 105-114.
- [8] MOTEVALLI V, MOHD M. New approach for performing failure analysis of fuel cell-powered vehicle [J]. **International Journal of Automotive Technology**, 2009, 10(6): 743-752.
- [9] DUSTMANN C H. Zebra battery meets USABC goals [J]. **Journal of Power Sources**, 1998, 72(1): 27-31.
- [10] 黄伟科,万党水,凌天钧. 燃料电池轿车碰撞高压电安全的设计与评价[J]. 汽车工程, 2011, 34(6): 491-495.
- [11] 黄伟科,何健. 燃料电池轿车碰撞结构安全设计的研究[J]. 汽车工程, 2012, 34(1): 62-66.

[编辑:李辉]

(上接第324页)

的充型率100%,气体夹杂也出现在主、副冒口上。综合考虑验证实验和上述正交试验, $E_2F_2G_1$ 的工艺参数组合(700℃的浇注温度、0.3 kg/s的浇注速度和150℃的模具温度)达到的充型质量最佳。本研究结果为壁厚不均重要零件的铸造工艺数值模拟优化提供了一定的借鉴与指导。

## 参考文献(References):

- [1] 张志强,胡仙园. 铝活塞的机械铸造[J]. 内燃机与配件, 2010(2): 23-24.
- [2] 朱利民. 汽车铝活塞铸造机械化生产[J]. 铸造技术, 2008, 29(1): 92-94.
- [3] 刘伏梅. 活塞铸造工艺综述[J]. 内燃机配件, 2002(1): 13-15.
- [4] 钱湘群,沈晓雯. 基于参数化的活塞三维有限元分析系统

[J]. 机电工程, 2000, 17(4): 19-20.

- [5] 曹文昊,周照耀,李元元,等. 船用柴油机活塞铸造顺序凝固工艺设计及数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(1): 36-38.
- [6] 李日,王友序,杨根仓,等. 铝合金活塞铸件的温度场数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2001(5): 22-24.
- [7] 汪小霞,纵荣荣,时建松,等. 发动机用铝活塞的铸造数值模拟[J]. 精密成形工程, 2010, 2(5): 78-82.
- [8] 纵荣荣. 金属型重力铸造铝活塞流场和温度场的数值模拟[D]. 合肥:合肥工业大学材料学院, 2010.
- [9] 贾泮江,陈邦峰. 浇注温度对ZL210A铸造铝合金铸态力学性能和微观组织的影响[J]. 材料工程, 2009(6): 43-45.
- [10] 严青松,余欢. 浇注工艺对金属型铸造ZL114合金力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2009, 30(2): 265-268.

[编辑:李辉]