

# 基于响应面法的铝合金间接挤压铸造工艺研究

陈利文, 侯 华, 靳玉春, 赵宇宏, 康永生

(中北大学, 山西 太原 030051)

**摘 要:** 为研究间接挤压铸造工艺, 选取 ZL101 铝合金, 以孔隙率为指标, 首先通过单因素实验, 分析了挤压压力、模具温度与比例系数 3 个因素对孔隙率的影响。然后采用 Box-Behnken 实验设计方法来设计响应面实验, 建立了间接挤压铸造工艺参数与孔隙率相互关系的预测模型, 方差分析结果表明, 实验结果和数学模型拟合良好。通过对各个因素交互作用的响应面进行分析, 得知模具温度和挤压压力对孔隙率的影响存在显著的交互作用, 模具温度和比例系数、比例系数和挤压压力对孔隙率的影响不存在显著的交互作用。通过对环形件浇注系统的直浇道边缘部位进行金相检测分析, 得知由于压力的施加, 会使已经凝固的金属壳层发生不均匀的塑性流动。

**关键词:** 间接挤压铸造; 响应面法; 孔隙率; 塑性流动

**中图分类号:** TG146.21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)04-1174-06

液态金属在凝固过程中, 会发生液态收缩、凝固收缩和固态收缩, 由于金属的液态收缩和凝固收缩大于固态收缩, 在最后的凝固部位将会造成缩孔或缩松<sup>[1]</sup>。缩孔和缩松的存在减小了铸件的有效受力面积, 并产生应力集中, 显著地降低了铸件的力学性能<sup>[2,3]</sup>。间接挤压铸造是依靠冲头将液态金属注入模具型腔, 与冲头和模具接触的液态金属会迅速形成一个封闭腔, 将待凝固的过热金属液包围在腔内<sup>[4]</sup>。如果冲头所施加的压力不足以使封闭腔外壳发生塑性变形, 那么外壳在随后的冷却过程中所产生的固态收缩, 无法补偿在腔内包围的过热金属液在随后冷却过程中所产生的液态收缩和凝固收缩造成的体积收缩, 势必将会在铸件内部形成缩孔或缩松<sup>[5]</sup>。因此, 间接挤压铸造的目的就是依靠压力使已经凝固的封闭腔外壳发生塑性变形, 以消除由于内部金属液在冷却过程中产生的体积收缩, 使液态金属在等静压下及时的补缩, 从而消除缩孔和缩松等缺陷。

近些年, 研究人员对挤压铸造工艺参数与合金微观形貌和力学性能的关系进行了研究。结果表明, 随着压力的增加, 合金的平衡凝固温度增加, 将使初始过热的合金处于大的过冷中, 并且压力的施加使合金与模具之间的间隙减小, 增加了合金与模具之间的传热系数, 使晶粒得到细化, 增加铸件密度, 消除气孔、缩孔和缩松等铸造缺陷<sup>[6-12]</sup>。然而值得注意的是, 对

于工艺参数与孔隙率的定量关系研究大多数是直接挤压铸造工艺, 关于间接挤压铸造工艺参数与孔隙率的定量关系研究报道较少, 一些关于该方面的报道都是在不改变浇注系统的情况下进行研究。间接挤压铸造过程中, 冲头所施加的压力需要通过浇道传递给铸件内部。内浇道截面积大小直接影响到了压力对铸件中待凝固的液态金属的补缩作用, 所以要将内浇道截面积作为必要的工艺参数来进行研究。

本研究考虑到了间接挤压铸造工艺参数的交互影响作用, 首先通过单因素实验, 分析了挤压压力、模具温度与比例系数 3 个因素对孔隙率的影响, 然后通过响应面法来建立间接挤压铸造工艺参数与孔隙率相互关系的数学模型, 最后分析了间接挤压铸造过程中的合金的塑性流动。其中比例系数  $K$  为铸件投影面积与内浇道的截面积和的比值, 表达式如下:

$$K = \frac{S_C}{\sum S_R} \quad (1)$$

式中,  $K$  为比例系数,  $S_C$  为铸件在分模面方向的投影面积,  $S_R$  为内浇道的截面积。

## 1 实 验

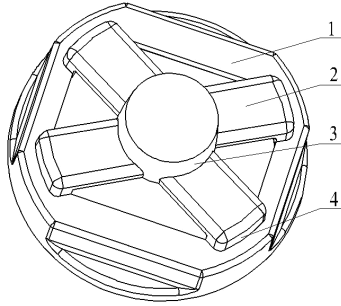
### 1.1 实验的材料及设备

实验采用图 1 所示环形件为试件, 其外形尺寸为  $\Phi 256 \text{ mm} \times 53 \text{ mm}$ , 铸件在分模面方向投影面积为

收稿日期: 2017-04-15

基金项目: 国家科技部国际科技合作项目 (2014DFA50320); 国家自然科学基金 (51574207, 51574206, 51204147, 51274175); 山西省国际科技合作项目 (2013081017, 2012081013)

作者简介: 陈利文, 男, 1986 年生, 硕士生, 中北大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030051, E-mail: 547807749@qq.com



1-ring parts casting; 2-runner; 3-sprue; 4-ingate

图 1 环形件结构及浇注系统图

Fig.1 Structure and gating system of ring part

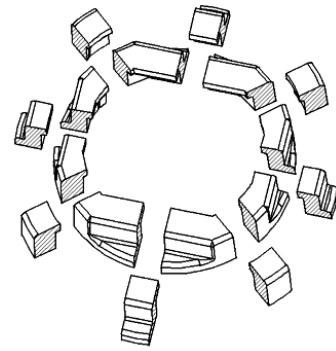


图 3 取样示意图

Fig.3 Sampling schematic

26544 mm<sup>2</sup>, 该铸件浇注系统包括直浇道、横浇道、内浇道三部分, 其中内浇道的截面积与横浇道截面积相同, 直浇道截面积为  $S_D$ ,  $S_D=1.2 \sum S_R$ 。实验所使用的材料为 ZL101 铝合金, 其成分见表 1。所采用的模具结构如图 2 所示, 模具材料为 H13。设备采用 SHP34-500A 型多功能挤压铸造机, 其最大合模压力为 5000 kN, 冲头最大顶出压力为 2000 kN, 熔炼设备采用中频感应炉。

1.2 实验方法

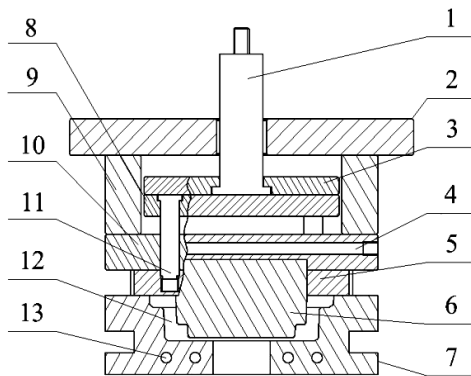
1.2.1 环形件孔隙率的测定

如图 3 所示在环形件上均匀取样进行孔隙率测定, 取样宽度为 30 mm, 分别测定 8 个取样的孔隙率,

表 1 ZL101 合金的成分

Table 1 Chemical composition of ZL101 alloy (wt%)

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
7.5	0.28	0.16	0.2	0.04	0.01	0.03	Bal.



1-tie bar; 2-backboard; 3-eject-up-plate; 4-resistant heating hole; 5-ejector plate; 6-movable die core; 7-fixed die; 8-eject-down-plate; 9-rail; 10-movable die plate; 11-connection guide pin; 12-cavity; 13-resistant heating hole

图 2 模具结构图

Fig.2 Structure of die

然后取平均值作为该铸件的孔隙率。由阿基米德原理测定取样的实际密度  $\rho$ 。实际密度计算公式如下:

$$\rho = \frac{m\rho_0}{m_2 - m_1} \quad (2)$$

式中,  $m$  为取样的质量,  $\rho_0$  为水的密度 (1.0 g/cm<sup>3</sup>),  $m_1$  为容器和水的质量,  $m_2$  为将取样悬没于水中所称得的质量。孔隙率  $\eta$  的计算公式如下:

$$\eta = \frac{\rho_1 - \rho}{\rho_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $\rho_1$  为 ZL101 铝合金的理论密度 (2.66 g/cm<sup>3</sup>)。

1.2.2 间接挤压铸造单因素实验

将 ZL101 铝合金放入预热炉中预热至 200 °C, 保温 15 min 后放入中频感应炉中加热, 当温度升到 720 °C 时进行除渣, 温度降至 700 °C 保温 15 min 后进行浇注, 冲头顶出速度为 0.38 mm/s, 保压时间为 20 s。

(1) 挤压压力对孔隙率的影响: 选取比例系数为 8, 模具温度为 175 °C, 挤压压力分别为 50、85、125、170、200 MPa, 分别测定不同挤压压力下铸件孔隙率。

(2) 模具温度对孔隙率的影响: 选取比例系数为 8, 模具温度分别为 50、120、175、230、300 °C, 挤压压力为 100 MPa, 分别测定不同模具温度下铸件孔隙率。

(3) 比例系数对孔隙率的影响: 比例系数分别为 5、6.5、8、9.5、11, 选取模具温度分别为 175 °C, 挤压压力为 100 MPa, 分别测定不同比例系数下铸件孔隙率。

1.2.3 采用响应面法建立间接挤压铸造工艺参数与孔隙率相互关系的数学模型

采用 Design-Expert 软件处理数据, 根据单因素实验结果, 选取挤压压力、模具温度与比例系数 3 个因素作为实验因素, 以孔隙率为响应量设计实验, 通过 BBD 响应曲面设计方法连续地对实验的各个因素水

平进行分析,其中析因部分试验次数为 12 次,中心点重复试验次数为 3 次,通过对实验结果进行回归拟合,实验方案如表 2 所示。

### 1.2.4 间接挤压铸造过程中的合金的塑性流动

取环形件的直浇道制作金相试样,利用 XJP-2B 型金相显微镜对直浇道边缘处的显微组织进行观察分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验各因素对孔隙率的影响

#### 2.1.1 挤压压力对孔隙率的影响

对环形件不同挤压压力下的孔隙率进行检测,结果见图 4。挤压压力由 50 MPa 提升至 85 MPa 时,孔隙率变化不明显,这是由于压力的提升不足以使浇道处封闭的外壳产生足够的塑性变形,但之后随着压力的增加使封闭的外壳发生了明显的塑性变形,铸件中待凝固金属液在等静压下凝固,孔隙率显著降低,当

压力增大到 170 MPa 时,孔隙率的下降幅度减小,这时要获得低的孔隙率的优良铸件需要继续提高压力,但同时也增加了加工成本,对设备的性能要求进一步提升。

#### 2.1.2 模具温度对孔隙率的影响

对环形件不同模具温度下的孔隙率进行检测,结果见图 5。随着模具温度的升高,金属液充填模具型腔后冷却速度减小,从而在模具侧壁形成的封闭外壳的厚度在减小,冲头施加的压力易于使其发生塑性变形,所以随着模具温度的提高孔隙率显著下降。

#### 2.1.3 比例系数对孔隙率的影响

对不同比例系数下的孔隙率进行检测,结果见图 6。随着比例系数的增加,内浇道的截面积逐渐在减小,凝固初期在浇道中液相所占的比例在减小,补缩通道的体积在减小,随着凝固的进行,截面积越小的内浇道越先凝固,导致补缩通道过早的封闭,若要给铸件内部尚未凝固的液态金属继续施加压力,则需要使整个浇道发生塑性变形,这就需要很大的挤压压力,所

表 2 Box-Behnken 响应曲面设计实验

Table 2 Response surface experiment of Box-Behnken design

Experiment No.	Pressure/MPa	Die temperature/°C	Proportionality factor
1	125	175	8
2	200	300	8
3	125	300	5
4	125	175	8
5	50	300	8
6	125	300	11
7	125	50	5
8	125	175	8
9	50	175	11
10	50	50	8
11	200	175	11
12	50	175	5
13	200	50	8
14	125	50	11
15	200	175	5

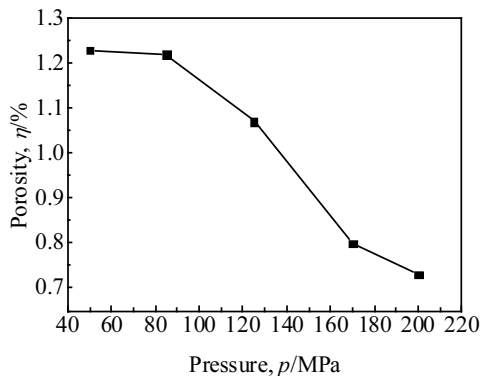


图 4 不同挤压压力对环形件孔隙率的影响

Fig.4 Effect of different pressures on porosity of ring part

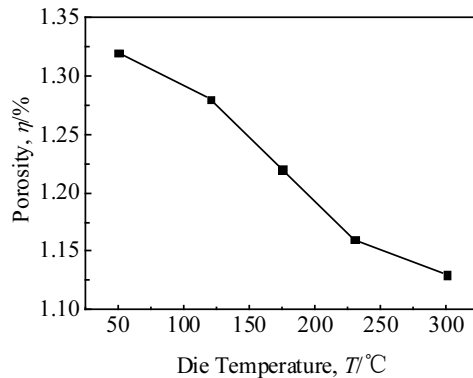


图 5 不同模具温度对环形件孔隙率的影响

Fig.5 Effect of different die temperatures on porosity of ring part

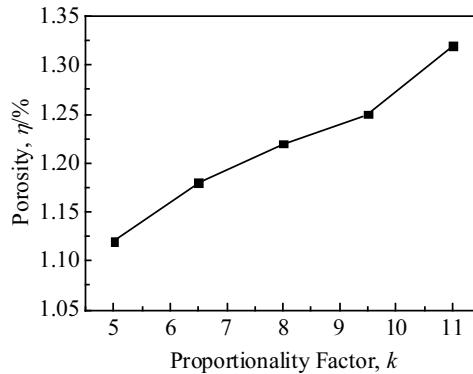


图 6 不同比例系数对环形件孔隙率的影响

Fig.6 Effect of different proportionality factors on porosity of ring part

以随着比例系数的增加孔隙率在显著的增加。

### 2.2 响应面实验结果分析

通过单因素实验可以初步断定挤压压力、模具温度与比例系数 3 个因素对孔隙率有显著的影响。响应面法是一种试验次数少、周期短,求得的回归方程精度高、能研究几种因素间交互作用的回归分析方法<sup>[13]</sup>,通过回归方程的拟合与响应曲面绘制与分析,建立间接挤压铸造工艺参数与孔隙率相互关系的预测模型。

采用响应面分析法分析实验结果,得到以孔隙率为响应值的回归方程:

$$\eta = 1.08 - 0.080 \times A + 0.047 \times B - 0.24 \times C + 0.005 \times A \times B + 0.035 \times A \times C + 0.025 \times B \times C - 0.00667 \times A^2 - 0.00667 \times B^2 - 0.087 \times C^2 \quad (4)$$

式中, A、B、C 分别表示模具温度、比例系数、挤压压力。

方差分析结果取检验的显著性水平  $\alpha=0.05$ ,  $P<0.05$  表示模型或各因素有显著影响。方差分析结果如表 3 所示,模型  $P<0.0001$ ,说明表明该二次方程模型极显著。Lack of Fit 值为 8.13,  $P=0.116>0.1000$ ,表示实验结果和数学模型拟合良好,实验结果可用该数学模型来推测。模型的  $R^2=0.9936$ ,说明这种实验方法是可靠的,真实的三因素三水平使用该方程进行模拟是可行的。从表 3 可以得知, A、B、C、AC、 $C^2$  对响应值的影响显著,而 AB、BC、 $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$  对响应值的影响不显著,其中 C 和  $C^2$  的 P 值都小于 0.05,说明挤压压力与孔隙率的关系不仅仅是简单的线性关系。

图 7~图 9 直观地显示了各因素的交互作用的响应面,由图 8 可知,模具温度和挤压压力对孔隙率的影响存在显著的交互作用,由于当金属液浇入模具型腔后,与模具型腔接触的金属液会迅速凝固,当温度继续下降,凝固的金属外壳所产生的固态收缩使铸件和

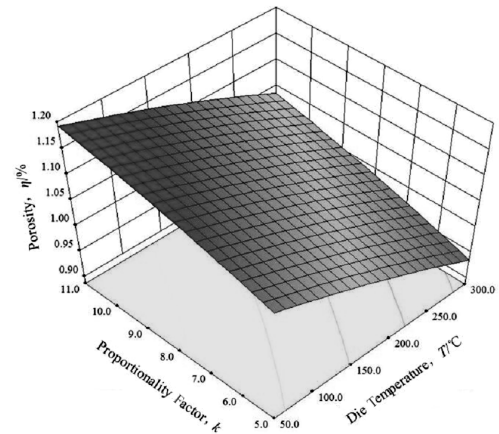


图 7 模具温度和比例系数对环形件孔隙率的响应面  
Fig.7 Response surface of effect of die temperature and proportionality factor on porosity of ring part

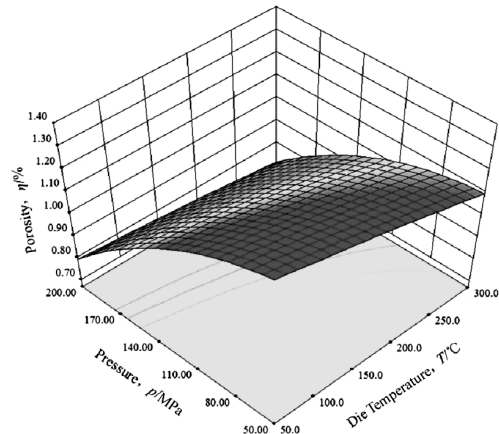


图 8 模具温度和挤压压力对环形件孔隙率的响应面  
Fig.8 Response surface of effect of die temperature and pressure on porosity of ring part

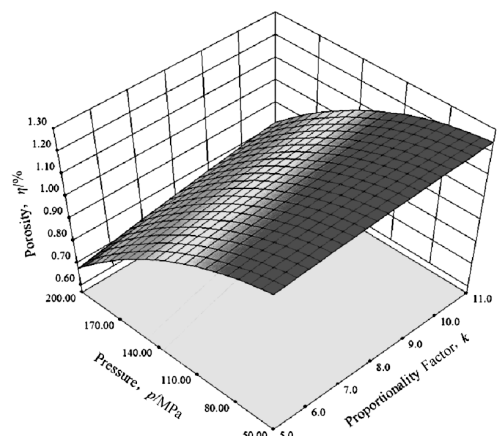


图 9 比例系数和挤压压力对环形件孔隙率的响应面  
Fig.9 Response surface of effect of proportionality factor and pressure on porosity of ring part

表 3 响应面 ANOVA 分析结果

Table 3 ANOVA result of response surface methodology					
Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value
Model	0.55	9	0.061	86.30	<0.0001
A	0.051	1	0.051	72.80	0.0004
B	0.018	1	0.018	25.66	0.0039
C	0.44	1	0.44	628.15	<0.0001
AB	$1.000 \times 10^{-4}$	1	$1.000 \times 10^{-4}$	0.14	0.7216
AC	$4.900 \times 10^{-3}$	1	$4.900 \times 10^{-3}$	6.97	0.0460
BC	$2.500 \times 10^{-3}$	1	$2.500 \times 10^{-3}$	3.55	0.1181
$A^2$	$1.641 \times 10^{-4}$	1	$1.641 \times 10^{-4}$	0.23	0.6495
$B^2$	$1.641 \times 10^{-4}$	1	$1.641 \times 10^{-4}$	0.23	0.6495
$C^2$	0.028	1	0.028	39.43	0.0015
Residual	$3.517 \times 10^{-3}$	5	$7.033 \times 10^{-4}$		
Lack of fit	$3.250 \times 10^{-3}$	3	$1.083 \times 10^{-3}$	8.13	0.1116
Pure error	$2.667 \times 10^{-4}$	2	$1.333 \times 10^{-4}$		
Cor total	0.55	14			

模具侧壁之间存在一定的间隙，从而铸件向模具的传热减小。紧接着挤压压力的施加，使液态金属承受来自冲头处壳层传递上来的压力，并通过液态金属传递到凝固的金属外壳，使其做径向的塑性流动并与模具的间隙消失，因此，挤压压力的提高能够增加模具和铸件间的传热系数。图 7 和图 9 显示，模具温度和比例系数、比例系数和挤压压力对孔隙率的影响不存在显著的交互作用。随着模具温度的提升，孔隙率呈显著的线性下降趋势，同时随着比例系数的增加，孔隙率呈显著的升高趋势。而随着挤压压力的提高，孔隙率呈显著的非线性下降的趋势。

### 2.3 间接挤压铸造过程中的合金的塑性流动

由于压力的施加，会使已经凝固的金属壳层发生不均匀的塑性流动。如图 10 所示为环形件的剖面图，在图示直浇道边缘 o 点部位取试样做金相检测分析，图 11 为该位置不同放大倍数下的金相显微组织。

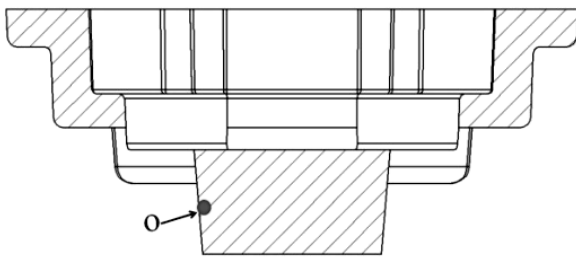


图 10 环形件的剖面图

Fig.10 Sectional view of ring part

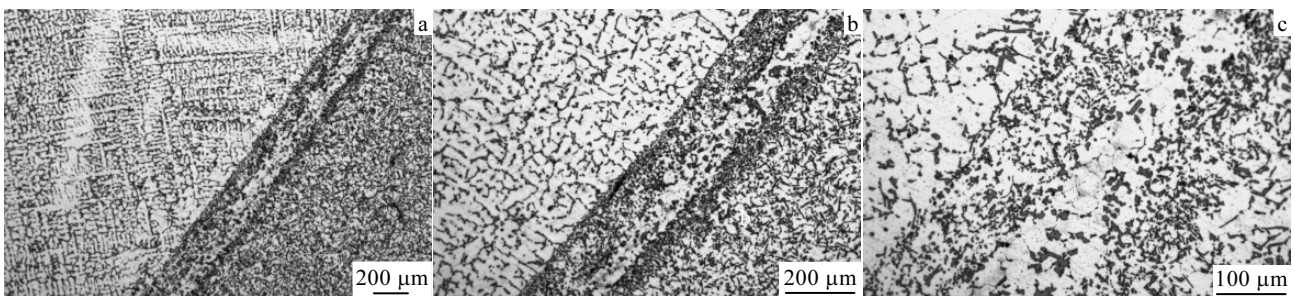


图 11 直浇道 o 点的金相组织

Fig.11 Microstructures of sprue

从图 11 中可以很明显地观察到内部基体组织与表层组织被两条细晶区分开(图 11a、11b 所示)，在两条细晶区之间存在一条中间层，中间层的  $\beta(\text{Si})$  相较于粗大(图 11c 所示)，表层晶区比内部基体的晶粒要细小，但是要比细晶区的晶粒要粗大。

两条细晶区组织为  $(\alpha+\beta)$  共晶组织，当金属液注入料缸后，与料缸接触的金属液立即过冷至共晶温度线以下，并且在金属液中形成了大量的晶核，从而形成细小的共晶组织的壳层，同时增加了过冷，促进硅分支，阻碍其生长，片状共晶硅消失，出现了极细小的纤维状共晶硅(图 11c 所示)，当冲头继续向上运动，在压力下使已经凝固的壳层发生塑性变形，使其被卷入进入到熔体当中，有一部分会出现重熔现象，有一部分保留下来，形成了图中的形貌特征。

细晶区发生共晶反应时，结晶出来的  $\alpha$  相成分为含质量分数为 1.65%Si 固溶体(平衡凝固情况)，则其向液相中排出大量的溶质 Si，由于短时间内液相中溶质 Si 不可能时时刻刻都混合均匀，就造成了局部溶质 Si 的含量增高，甚至高于共晶点的 Si 含量，此时液相当于过共晶合金，就造成了从液相中结晶出较为粗大的初晶  $\beta(\text{Si})$  相。

由于细晶区被卷入到熔体当中，在压力的作用下其原来的位置迅速被液相所充满，在模具的冷却作用下，使得该区域的晶粒细小，比内部基体的晶粒要细小，但是要比细晶区的晶粒要粗大，该区域组织为  $\alpha(\text{Al})$ +共晶组织。

## 3 结 论

1) 采用 Box-Behnken 实验设计方法来建立响应面实验，建立了间接挤压铸造工艺参数与孔隙率相互关系的数学模型。方差分析结果表明，实验结果和数学模型拟合良好，模型方程能够较好地反应真实的实

验值，可用此模型分析响应值的变化。

2) 模具温度和挤压压力对孔隙率的影响存在显著的交互作用，模具温度和比例系数、比例系数和挤压压力对孔隙率的影响不存在显著的交互作用。随着模具温度的提升，孔隙率呈显著的线性下降趋势，同时随着比例系数的增加，孔隙率呈显著的线性升高趋

势。而随着挤压压力的提高, 孔隙率呈显著的非线性下降的趋势。

3) 挤压压力的施加会使已经凝固的金属壳层发生不均匀的塑性流动, 可以很明显地观察到内部基体组织与表层组织被两条细晶区分开, 在两条细晶区之间存在一条中间层, 中间层的 $\beta(\text{Si})$ 相较于粗大, 表层晶区比内部基体的晶粒要细小, 但是要比细晶区的晶粒要粗大。

#### 参考文献 References

- [1] Zhang Jinshan(张金山). *Liquid Metal Forming Theory*(金属液态成型原理)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 207
- [2] Gan Y, Zhang D, Zhang W *et al.* *International Journal of Cast Metals Research*[J], 2015, 28(1): 50
- [3] Hardin R A, Beckermann C. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*[J], 2013, 44(12): 5316
- [4] Tu Q, Yang F B, Xu J *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2011, 40(S3): 82
- [5] Luo Shoujing(罗守靖), Chen Bingguang(陈炳光), Qi Pixiang(齐丕骧) *et al.* *Liquid Forging and Squeeze Casting Technology*(液态模锻与挤压铸造技术)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 66
- [6] Zhang M, Zhang W W, Zhao H D *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2007, 17(3): 496
- [7] Boschetto A, Costanza G, Quadrini F *et al.* *Materials Letters* [J], 2007, 61(14-15): 2969
- [8] Chang Q M, Chen C J, Zhang S C *et al.* *International Journal of Cast Metals Research*[J], 2010, 23(1): 30
- [9] Zhang Congyang(张从阳), Feng Rongyu(冯荣宇), Li Wenzhen(李文珍). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(2): 463
- [10] Liu T, Wang Q D, Sui Y D *et al.* *Materials & Design*[J], 2016, 89: 1137
- [11] Jin C K, Kang C G. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*[J], 2015, 16(7): 1233
- [12] Dong Taishang(董太尚), Bai Pucun(白朴存), Hou Xiaohu(侯小虎) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(4): 689
- [13] Patel G C M, Krishna P, Parappagoudar M B. *International Journal of Cast Metals Research*[J], 2015, 28(3): 167

## Indirect Squeeze Casting Process of Aluminum Alloy Based on Response Surface Method

Chen Liwen, Hou Hua, Jin Yuchun, Zhao Yuhong, Kang Yongsheng  
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to study indirect squeeze casting process, ZL101 aluminum alloy was selected with porosity as indicators and the effects of process parameters of pressure, die temperature and proportionality factor on porosity were analyzed. Box-Behnken design of the experiment was developed to design response surface experiment and regression model of the relationship between the indirect squeeze casting process parameters and porosity was established. ANOVA result shows that the fitting effect between the experimental results and the mathematical model is good. The effect of die temperature and pressure on porosity has certain interaction; however, there is not significant interaction for the effect of die temperature and proportionality factor or the effect of proportionality factor and pressure on porosity by analyzing response surface of interaction of various factors. Due to the applied pressure, uneven plastic flow happens in the congealed metal shell by metallographic testing of the edge of sprue in gating system parts.

**Key words:** indirect squeeze casting; response surface methodology; porosity; plastic flow

Corresponding author: Zhao Yuhong, Ph. D., Professor, College of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, P. R. China, Tel: 0086-351-3557006, E-mail: zyh388@sina.com