

基于田口法的铝合金空心控制臂 低压铸造工艺优化

黄庆, 苏小平

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏南京 211816)

摘要: 为优化低压铸造A356铝合金空心控制臂的工艺参数, 通过田口法, 以凝固时间、疏松、缩孔体积值和二次枝晶臂间距为评价指标, 利用均值与极差分析和方差分析的方法, 分析了温度参数与时间参数对铸件成形质量及力学性能的影响。结果表明: 模具预热温度及充型时间对铸件力学性能、生产效率均有显著影响。

关键词: 低压铸造; A356铝合金; 空心控制臂; 田口法

控制臂广泛应用于汽车底盘, 是悬架系统最重要的受力部件, 传统汽车悬架控制臂多为锻钢或者球墨铸铁通过重力铸造制备, 重量较大且铸件容易出现缺陷。随着轻量化材料和铸造、热处理技术的开发, 在满足使用要求的前提下, 铝合金逐渐被广泛应用于汽车生产中, 以达到汽车轻量化的要求^[1]。低压铸造工艺是一种反重力精密成形技术, 一般用于铸造有色合金, 所形成的铸件组织致密, 容易铸造出大型薄壁复杂的铸件, 易实现自动化^[2]。因此, 本文以铝合金空心控制臂为研究对象, 利用田口法探究低压铸造工艺参数对铸件品质的影响, 以期提高铸件成形质量以及生产效率。

田口法是田口玄一博士基于稳健设计思想在工业产品和工艺质量控制中提出的质量工程方法。其核心分析工具是正交表和信噪比, 正交表具有“均匀分散性, 整齐可比”, 其安排的试验方法可以均衡搭配所有因素水平减少试验次数, 并且能够比较全面地反映各因素、水平对评价指标影响的大致情况。田口法将信噪比作为产品质量特性的评价标准, 分为3种类型的信噪比: ①望目特性信噪比, 即评价指标越靠近目标值越优; ②望小特性信噪比, 即评价指标越小越优; ③望大特性信噪比, 即评价指标越大越优^[3]。

1 初始工艺设置

1.1 模型建立

某汽车铝合金空心控制臂的三维模型如图1所示, 该产品为空心薄壁件, 单件质量为8.124 kg, 外形尺寸为585 mm × 176 mm × 426 mm, 其内部结构复杂, 且壁厚不均, 最厚壁厚为27.2 mm。对于空心铸件, 砂芯主要用于形成铸件的内孔、型腔等部



图1 空心控制臂三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of the hollow control arm

作者简介:

黄庆(1999-), 男, 土家族, 硕士, 主要研究方向为汽车轻量化技术。电话: 17671276343, E-mail: hq42082618@163.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)12-1619-05

收稿日期:

2023-02-23 收到初稿,
2023-10-08 收到修订稿。

分, 其三维模型如图2所示。考虑到铸件的几何结构以及低压铸造成形工艺的特点, 使用CATIA软件建立铸件、砂芯、浇注系统以及冷却系统的三维模型如图3所示(图中1-6为冷却管道)。



图2 砂芯三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of the sand cores

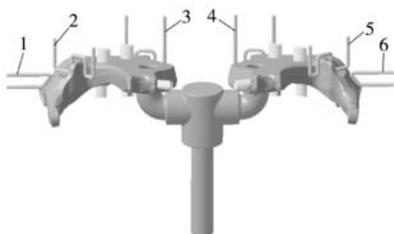


图3 铸件、砂芯、浇注系统以及冷却系统的三维模型

Fig. 3 Three dimensional model of the castings, gating system, sand cores and cooling system

1.2 材料选择及浇注工艺参数设置

空心控制臂的材料为A356铝合金, 其热物性参数如表1所示, 化学成分如表2所示。模具的材料为H13模具钢, 砂芯的材料为呋喃树脂自硬砂。根据实际生产经验, 设定金属液与模具的换热系数为 $2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 金属液与砂芯的换热系数为 $750 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 砂芯与模具的换热系数为 $300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。模具冷却设置为空冷, 换热系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。低压铸造工艺参数如表3所示。冷却介质为水, 冷却工艺参数如表4所示。

2 试验设计

2.1 试验因素及评价指标

在铝合金低压铸造工艺中, 影响铸件品质的工艺参数众多, 包括模具结构、浇注系统结构、温度、压力、时间、换热系数等参数, 其中时间参数与温度参

表1 A356铝合金的热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of the A356 aluminum alloy

密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	液相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	固相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	潜热/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
2430	614	542	430

表2 A356铝合金的化学成分

Table 2 Chemical composition of the A356 aluminum alloy

Si	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Sn	Ni	Ti	Al	$w_B/\%$
7	0.4	0.5	0.3	0.1	0.03	0.05	0.01	0.1	0.15	余量	

表3 低压铸造工艺参数

Table 3 Process parameters of the low pressure die casting

升液压力/kPa	升液时间/s	最大充型压力/kPa	充型时间/s	保压压力/kPa	保压时间/s	卸压时间/s
13	6	15	5	30	300	2

表4 冷却工艺参数

Table 4 The parameters of the cooling process

冷却管道编号	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	开启时刻/s	关闭时刻/s	冷却水温度/ $^{\circ}\text{C}$
1-6	2.5	11	70	50

数对铸件成形有直接影响, 又因为时间参数与温度参数在低压铸造过程中是可以直接控制的。因此本文选择浇注温度、模具预热温度、充型时间为研究对象, 研究这三个因素对铸件品质的影响。本次试验为3因素4水平, 采用标准正交表 $L_{16}(4^3)$ 进行工艺参数的多目标优化。因素水平表如表5所示。

评价指标为凝固时间、缩松、缩孔体积值、二次枝晶臂间距。凝固时间反映了生产效率, 凝固时间越

表5 因素水平表

Table 5 The table of the factors and levels

水平	因素		
	A浇注温度/ $^{\circ}\text{C}$	B模具预热温度/ $^{\circ}\text{C}$	C充型时间/s
1	680	300	4
2	690	310	5
3	700	320	6
4	710	330	7

短,则生产效率越高。缩松、缩孔缺陷反映铸件成品质量,同时也影响其力学性能,缩松、缩孔体积值越小,铸件质量则越好。二次枝晶臂间距(SDAS)指的是两相邻二次枝晶臂之间的距离。金属液冷却凝固时,导热快的区域结晶时间较早,因为铝的晶格为立方体,沿棱角方向导热最快,沿此方向的枝晶最先生长,称为一次枝晶。在一次枝晶上沿垂直于一次枝晶臂方向后生长的枝晶分叉称为二次枝晶。二次枝晶臂间距作为铸造铝合金一个重要的结构参数,很大程度上影响着铸件力学性能,二次枝晶臂间距值越小,则铸件的强度越大。二次枝晶臂间距的大小受合金成分和局部凝固时间的直接影响。本文采用Furer-Wunderlin二次枝晶臂侧熔模型计算二次枝晶臂间距^[4],计算方程如下式所示:

$$\lambda = (M \cdot t_f)^n \quad (1)$$

式中: λ 为二次枝晶臂间距; M 为晶粒粗化系数,A356.2的 M 值为680; n 为晶粒长大因子,A356铝合金的 n 值取1/3; t_f 为局部凝固时间。

2.2 试验结果与 S/N

田口玄一博士由损失函数引出信号噪声比(signal-to-noise ratio, S/N),其定义为: $S/N = \text{信号能量} / \text{噪声能量}$ ^[5]。从定义看出,S/N的大小表示了铸件在铸造过程中,铸件受噪声因素干扰的程度。因此,S/N值越大,铸件受噪声因素干扰越小,产生的铸件质量就越好。本文是通过对低压铸造工艺参数的优化,得到最小的凝固时间、缩松、缩孔体积值、二次枝晶臂间距。因此,本文用的品质特性为望小特征。望小特征的S/N的计算公式为:

$$S/N = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

式中: y_i 为某因素组合的试验值; n 为该因素组合的试验次数。

利用数值模拟软件得到试验数据如表6所示,并且根据(1)式与(2)式计算出凝固时间、缩松、缩孔体积值、二次枝晶臂间距的信噪比如6、8、10列所示。

表6 试验结果及信噪比
Table 6 Experimental results and signal-to-noise ratio

试验编号	试验因素			凝固时间		缩松缩孔体积值		二次枝晶臂间距	
	A	B	C	试验值/s	信噪比	试验值/mm ³	信噪比	试验值/μm	信噪比
1	680	300	4	284.3	-49.076	100.14	-40.012	40.98	-32.251
2	680	310	5	298.4	-49.496	58.43	-35.333	41.49	-32.359
3	680	320	6	312.6	-49.9	108.1	-40.677	42.69	-32.607
4	680	330	7	328.8	-50.339	89.52	-39.038	43.31	-32.732
5	690	300	5	284.5	-49.082	86.35	-38.725	41.11	-32.279
6	690	310	4	298.3	-49.493	69.91	-36.891	41.44	-32.348
7	690	320	7	311.7	-49.875	90.3	-39.114	42.99	-32.667
8	690	330	6	329	-50.344	106.07	-40.512	43.23	-32.716
9	700	300	6	283.5	-49.051	89.81	-39.066	41.21	-32.3
10	700	310	7	296.6	-49.443	102.93	-40.251	42.05	-32.475
11	700	320	4	313.4	-49.922	97.77	-39.804	42.34	-32.535
12	700	330	5	330	-50.37	84.9	-38.578	42.87	-32.643
13	710	300	7	284.4	-49.079	92.51	-39.324	41.05	-32.266
14	710	310	6	298.4	-49.496	82.86	-38.367	42.05	-32.475
15	710	320	5	313.5	-49.925	60.87	-35.688	42.32	-32.531
16	710	330	4	329.8	-50.365	103.95	-40.336	42.98	-32.665

3 试验结果分析

3.1 均值与极差分析

对三个指标的信噪比进行均值与极差分析,并根据极差大小进行排序,结果如表7所示。由均值与极差分析可知:各因素对凝固时间的影响程度排序为:B>C>A,根据各因素的最优水平,得到使凝固时间达

到最小的工艺组合方案为A3B1C4;各因素对缩松、缩孔缺陷的影响程度排序为:C>B>A,使缩松、缩孔体积值达到最小的工艺组合方案为A4B2C2。各因素对二次枝晶臂间距的影响程度排序为:B>C>A。使二次枝晶臂间距达到最小的工艺组合方案为A4B1C1。

表7 均值与极差分析
Table 7 Analysis of the mean and range values

因素	凝固时间			缩松缩孔体积值			二次枝晶臂间距		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
水平1	-49.702	-49.072	-49.714	-38.765	-39.282	-39.261	-32.487	-32.274	-32.45
水平2	-49.698	-49.482	-49.718	-38.81	-37.71	-37.081	-32.503	-32.414	-32.453
水平3	-49.697	-49.905	-49.698	-39.425	-38.821	-39.655	-32.488	-32.585	-32.524
水平4	-49.716	-50.354	-49.684	-38.429	-39.616	-39.432	-32.484	-32.689	-32.535
极差	0.019	1.283	0.034	0.996	1.906	2.574	0.018	0.415	0.085
优水平	A3	B1	C4	A4	B2	C2	A4	B1	C1
排序	3	1	2	3	2	1	3	1	2

3.2 方差分析

方差分析是通过百分比量化来评估试验因素对评价指标的影响，用于多个样本均数差别的显著性检验。对试验数据进行方差分析的结果如表8所示。表中 F 值为变异比，用于评估试验因素对评价指标影响的显著性， F 值接近1，说明因素水平改变对评价指标的影响在误差范围内，即各水平间无显著性差异； F 值越大，则说明因素水平的改变对评价指标的影响超过了试验误差造成的影响，即条件误差相对试验误差大很多。得到 F 值之后，将 F 值与 F 比的临界值 F_{α} 进行比较，首先选取置信度 α ，然后在 F 分布表中查得临界值 $F_{\alpha}(F_1, F_2)$ ，在 F 分布表上，横行为该因素的自由度，竖行为误差的自由度。在工程实际中， α 的

取值一般为 $\alpha = (0.1 \sim 0.01)$ ，本文选取 $\alpha = 0.05$ 以及 $\alpha = 0.01$ 。当 $\alpha = 0.05$ 时， $F > F_{\alpha}$ ，则说明该因素对评价指标的影响是显著的，记为“*”，当 $\alpha = 0.01$ 时， $F > F_{\alpha}$ ，则说明该因素对评价指标的影响是高度显著的，记为“**”。 P 值表示该因素对实验误差造成的概率^[6-7]。

从表8可知：模具预热温度对凝固时间的影响是高度显著的，充型时间对凝固时间有显著的影响，贡献程度排名为BCA；对于缩松、缩孔缺陷，充型时间是主要影响因素，但模具预热温度的影响也不可忽略，贡献程度排名为CBA；对于二次枝晶臂间距，模具预热温度的影响为高度显著，充型时间的影响为显著，贡献程度排名为BCA。

表8 方差分析
Table 8 Analysis of variance

评价指标	方差来源	自由度	离差平方和	平均离差平方和	F 值	P 值	显著性
凝固时间	A	3	0.000 93	0.000 31	1.80	0.247	-
	B	3	3.650 61	1.216 87	7 085.32	<0.001	**
	C	3	0.002 97	0.000 99	5.77	0.034	*
	误差	6	0.001 03	0.000 17			-
	总和	15	3.655 54				-
缩松缩孔体积值	A	3	2.066	0.688 7	0.35	0.794	-
	B	3	8.293	2.764 3	1.39	0.334	-
	C	3	17.14	5.713 2	2.87	0.126	-
	误差	6	11.938	1.989 7			-
	总和	15	39.437				-
二次枝晶臂间距	A	3	0.000 795	0.000 265	0.19	0.901	-
	B	3	0.403 542	0.134 514	95.46	<0.001	**
	C	3	0.024 766	0.008 255	5.86	0.032	*
	误差	6	0.008 454	0.001 409			-
	总和	15	0.437557				-

注：本例中 F_1 为3， F_2 为6，在 F 分布表中查得 $F_{0.05}(3, 6) = 4.76$ ， $F_{0.01}(3, 6) = 9.78$ 。

4 结束语

本文通过田口法研究温度参数以及时间参数对低压铸造A356铝合金空心控制臂件凝固时间、缩松、缩孔体积值、二次枝晶臂间距的影响规律。通过均值与极差分析,得到使凝固时间达到最小的工艺参数组合为A3B1C4,缩松、缩孔体积值达到最小的工艺参数组

合为A4B2C2,二次枝晶臂间距达到最小值的工艺参数组合为A4B1C1。通过方差分析,得到模具预热温度对铸件生产效率及铸件力学性能有着高度显著的影响,充型时间对铸件生产效率及力学性能有显著的影响。因此,在实际铸造过程中,需要严格调控模具预热温度及充型时间的范围。

参考文献:

- [1] 杨闯, 苏小平, 周大双, 等. 铝合金悬架摆臂低压铸造数值模拟与工艺优化 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (5): 371-374, 382.
- [2] 陈胜娜, 余欢, 徐志锋, 等. 镁合金低压铸造的研究进展 [J]. 铸造, 2012, 61 (12): 1405-1409.
- [3] 张响, 董水光, 朱训明. 基于Taguchi方法的低压铸造铝合金车轮工艺优化 [J]. 铸造技术, 2007, 183 (9): 1235-1237.
- [4] 李晨希, 郭大明, 李荣德, 等. 二次枝晶臂间距的研究 [J]. 铸造, 2004 (12): 1011-1014.
- [5] 都金光. SiC_p增强铝基复合材料高效铣磨工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] 张春飞, 张宇, 李忠科, 等. 基于田口法的高速切削参数优化研究与应用 [J]. 现代制造工程, 2006 (8): 78-80.
- [7] 吴贵生. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.

Optimization of Low Pressure Die Casting Process for Aluminum Alloy Hollow Control Arm Based on Taguchi Method

HUANG Qing, SU Xiao-ping

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract:

In order to optimize the process parameters of hollow control arm of A356 aluminum alloy in low pressure diecasting, the solidification time, shrinkage pore volume and secondary dendrite arm spacing were used as evaluation indexes by Taguchi method. The effects of temperature parameters and time parameters on the forming quality and mechanical properties of the castings were analyzed by means of mean and range analysis and variance analysis. The results showed that the preheating temperature and filling time had significant effects on the mechanical properties and production efficiency of the castings.

Key words:

low pressure die casting; A356 aluminum alloy; hollow control arm; taguchi method
