DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.12.013

压铸过程中压射室内金属液流动状态及其影响因素研究

王廷利[1,2],黄　剑[2],叶　盛[3],程　鹏[3],姚　山[2]

(1.青岛科技大学 机电学院,山东 青岛 266061;2.大连理工大学 宁波研究院,浙江 宁波 315016;3.宁波海天金属成型设备有限公司,浙江 宁波 315821)

摘　要:针对铝合金压铸过程中压射室内金属液的流动状态,基于正交试验方法设计工艺方案,采用 ProCAST 软件进行模拟仿真计算,得到不同工艺条件下的金属液的流动状态、卷气和困气情况。模拟仿真结果表明:不同工艺参数对压射室内金属液的流动状态是不同的,冲头速度影响效果最大,随着冲头运动速度的加快,气体进入金属液的风险明显增大;压射室充满度影响次之,随着压射室充满度的增加,气体风险呈降低趋势;压射室直径、压射室长度及金属液温度的影响作用不明显。

关键词:压铸;压射室;流动状态

中图分类号:TG249.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)12-1055-05

Study on Flow State of Molten Metal in Injection Chamber and Its Influence Factors During Die Casting

WANG Tingli[1,2], HUANG Jian[2], YE Sheng[3], CHENG Peng[3], YAO Shan[2]

(1.School of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Ningbo Research Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China; 3. Ningbo Haitian Die-Casting Equipment Co., Ltd., Ningbo 315821, China)

Abstract: Aiming at the flow state of molten metal in injection chamber during aluminum alloy die casting process, the flow state, gas entrainment and gas-lock in in the injection chamber were simulated with using ProCast software under different process conditions designed based on the orthogonal test. The results show that the flow state of molten metal in injection chamber is different with different process parameters, among them punch velocity has biggest impact on the flow sate. With increasing punch velocity, the risk of gas entrainment increases significantly. The gas entrainment risk decreases with filling degree of injection chamber. The effect of injection chamber diameter, length and the molten metal temperature is not obvious.

Key words: die casting; injection chamber; flow state

卧式冷室压铸机压铸生产时冲头在压射室内的运动过程可以分为 3 个阶段:①压射冲头以较低速运动,使金属液充满压射室前端并堆聚在内浇口前沿;②压射冲头快速运动阶段,使金属液充满整个型腔;③射冲头终压阶段,压射冲头运动基本停止,速度逐渐降为 0。第 1 阶段压射室内金属液的物性特征和运动状态对后续充型状态和凝固进程有着直接而重要的影响,若工艺参数设置不当,金属液会在压射室内形成卷气或困气,气体进入金属液后充入压铸模具型腔,进而在铸件凝固是产生气孔缺陷。因此,选择适合的工艺参数,在冲头慢压射过程中将空气排出压射室,对控制铸件气孔等缺陷具有重要意义[1]。

目前,压铸工艺参数主要依照生产经验或经验公式来设定。随着计算技术的进步,通过模拟仿真方法模拟压铸过程特征,为工艺参数的优化提供依据,越来越收到广泛关注[2-3]。本文作者将基于铸造模拟仿真软件 ProCAST 对冲头慢压射过程进行模拟计算,重点研究压射室内金属液流动特性的影响因素,并基于模拟仿真结果,形成优化的工艺方案。

1　方案设计与建模

1.1　正交试验设计

根据压铸慢压射工艺过程特征,选取压射室直

收稿日期:2021-09-15

基金项目:宁波市"科技创新 2025"重大专项:压铸设备动态参数测试及工艺智能评价技术(2020Z018)

作者简介:王廷利(1980—),满族,辽宁丹东人,博士,副教授.研究方向:数字化成形技术与装备.
电话:17685526026,Email:tinglimail@163.com

径、压射室长度(含模具浇口套)、压射室充满度、冲头速度及浇注金属液温度等 5 个因素作为影响因素,每个因素设置 4 个水平(表 1)。将气体进入金属液的方式细分为卷气和困气,为了更好的评价和分析各因素及水平对气体进入金属液的风险,将气体风险等级分为 3 个等级,即 0 级表示风险可忽略,1 级表示卷气或困气风险较明显,2 级表示气体综合风险较高(同时存在卷气和困气风险)。经过正交试验设计后,具体的工艺方案如表 1。

表 1 影响因素及水平设置
Tab.1 Factors and factor levels

水平	因素				
	压射室直径 /mm	压射室长度 /mm	压射室充满度(%)	冲头速度 /(m/s)	金属液温度 /℃
1	40	300	30	0.1	620
2	50	400	45	0.2	640
3	60	500	60	0.3	660
4	70	600	75	0.4	680

1.2 模型建立与网格划分

如图 1 所示,慢压射模拟仿真 3D 模型的组成主要包括料筒(壳体)、压射室型腔(盛装金属液)、冲头及浇口等几部分。在进行网格划分时,根据压铸工艺特征和模拟仿真要求,兼顾计算精度和速度,不同区域的网格尺寸采用不同设置,压射室型腔(盛装金属液)、冲头及浇口区域的网格尺寸 1.0~1.5 mm,料筒(壳体)的网格尺寸为 3~4 mm,进行面网格和体网格的划分。

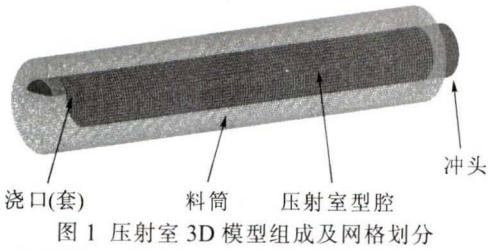

图 1 压射室 3D 模型组成及网格划分
Fig.1 A 3D model of injection chamber and its meshing

1.3 模拟仿真的初始及边界条件

压射室材质为 Steel H13,初始温度为 200 ℃。金属液材质为 AlSi9Cu3,其液相线和固相线温度分别为 578 ℃和 503 ℃,粘度随着温度的降低而增加(图 2),金属液与料筒间的换热系数 h=2 000 W/㎡·K。在压射冲头上设置运动速度,在压射室型腔区域上设置压射室充满度和金属液的初始温度,各边界及初始条件具体的数值详见正交试验表(表 2)。

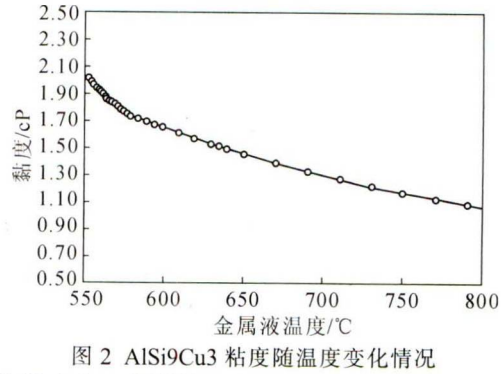

图 2 AlSi9Cu3 粘度随温度变化情况
Fig.2 Variation of AlSi9Cu3 alloy viscosity with temperature

2 模拟仿真结果

2.1 模拟仿真结果的统计分析

根据正交试验设计方案,按照 5 因素 4 水平工艺方案共进行了 16 组模拟仿真计算,得到了不同工

表 2 正交试验方案及模拟仿真结果
Tab.2 The process plan and result of orthogonal experiment

试验编号	压射室直径 A/mm	压射室长度 B/mm	压射室充满度 C(%)	冲头速度 D(m/s)	金属液温度 E/℃	气体总风险	卷气风险	困气风险
1	40	300	30	0.1	620	0	0	0
2	40	400	45	0.2	640	1	0	1
3	40	500	60	0.3	660	1	1	0
4	40	600	75	0.4	680	1	1	0
5	50	300	45	0.3	680	1	0	1
6	50	400	30	0.4	660	2	1	1
7	50	500	75	0.1	640	0	0	0
8	50	600	60	0.2	620	1	0	1
9	60	300	60	0.4	640	1	1	0
10	60	400	75	0.3	620	1	1	0
11	60	500	30	0.2	680	1	0	1
12	60	600	45	0.1	660	0	0	0
13	70	300	75	0.2	660	0	0	0
14	70	400	60	0.1	680	0	0	0
15	70	500	45	0.4	620	2	1	1
16	70	600	30	0.3	640	1	0	1

艺条件下压射室内气体进入金属液的风险程度，对模拟仿真结果进行汇总统计，如表 2 所示的统计结果。

将模拟得到结果再进行均差和极差分析，得到表 3 所示的分析结果。各工艺参数对卷气和困气风险的影响是不同的，5 个因素的均值极差值分别是：冲头速度 1.50、压射室充满度 0.50、压射室长度 0.50、压射室直径 0.25、金属液初始温度 0.25。上述结果表明：冲头速度的影响作用最为显著，压射室充满度的影响作用次之，而压射室直径、压射室长度和金属液温度的影响作用效果不明显。具体而言，随着冲头运动速度的加快，气体进入金属液的风险明显增大；随着压射室充满度的增加，气体风险呈降低趋势；随着压射室直径的增大，气体风险呈显先增加后降低趋势；随着压射室长度的增加，气体风险先增加后降低趋势；随着金属液温度的提高，气体风险呈一定的降低趋势。当冲头速度为 0.1 m/s 时，一般不会出现卷气或困气现象，气体风险可以忽略。当冲头速度为 0.2 m/s 且压射室充满度低于 60%时，容易发生困气现象。当冲头速度为 0.3 m/s 且压射室充满度大于 60%时，容易发生卷气现象。当冲头速度达到 0.4 m/s 且压射室充满度低于 45%时，容易同时发生卷气和困气现象，出现气体风险较明显。

从上述结果及分析可知，为了避免压射室内金属液卷气及困气的出现，控制气体风险程度，主要需要满足较低的冲头速度及较高的压射室充满度等条件。

2.2　典型过程的模拟仿真结果

从表 2 及表 3 可知，3#、4#、6#、9#、10# 及 15# 等 6 组实验在慢压射过程中具有比较明显的卷气风险，而 2#、5#、6#、8#、11#、15# 及 16# 等七组实验在慢压射过程中具有比较明显的困气风险，其中 6# 及 15# 这两组在慢压射过程中同时具有较高的卷气和困气风险。其余的 1#、10#、12#、13#、14# 五组试验在慢压射过程中金属液流动状态平稳，气体风险可以忽略。分别以 9#、5#、6# 及 14# 这 4 种工艺的模拟仿真为例，分别对应卷气风险较高、困气风险较高、气体综合风险较高（卷气及困气风险均较高）及气体风险可以忽略 4 种情况。

表 3 均差和极差分析结果

Tab.3 The analysis table of mean and range values

因素	压射室直径 A/mm	压射室长度 B/mm	压射室充满度 C(%)	冲头速度 D/(m/s)	金属液温度 E/℃
k1	3.00	2.00	4.00	0.00	4.00
k2	4.00	4.00	4.00	3.00	3.00
k3	3.00	4.00	3.00	4.00	3.00
k4	3.00	3.00	2.00	6.00	3.00
k1	0.75	0.50	1.00	0.00	1.00
k2	1.00	1.00	1.00	0.75	0.75
k3	0.75	1.00	0.75	1.00	0.75
k4	0.75	0.75	0.50	1.50	0.75
极差 R	0.25	0.50	0.50	1.50	0.25
主次顺序	D>C>B>A>E				
优水平	A1	B1	C4	D1	E4
优组合	A1 B1 C4 D1 E4				

9# 工艺条件：压射室直径 60 mm，压射室长度 300 mm，压射室充满度 60%，冲头速度 0.4 m/s，金属液初始温度 640 ℃。9# 模拟仿真结果：从图 3 及图 4 可知，当冲头以较高速度向前运动时，金属液涌浪的浪高较高且速度较大，涌浪浪头速度超过 1.4 m/s，流场分布比较紊乱，从而导致压射室内的空气被包裹，发生卷气风险较大。

5# 工艺条件：压射室直径 50 mm，压射室长度 300 mm，压射室充满度 45%，冲头速度 0.3 m/s，金属液初始温度 680 ℃。5# 模拟仿真结果：从图 5 及图 6 可知，由于压射室充满度较低，对应的压射室内空腔区域较大。当冲头以 0.3 m/s 的速度向前运动时，金属液涌浪波动较大但是不足以将气体卷入金属液，浪头运动距离较远，流场分布比较紊乱，从而导致压射室内部分空气被封闭在压射室内，发生困气风险较大。

6# 工艺条件：压射室直径 50 mm，压射室长度

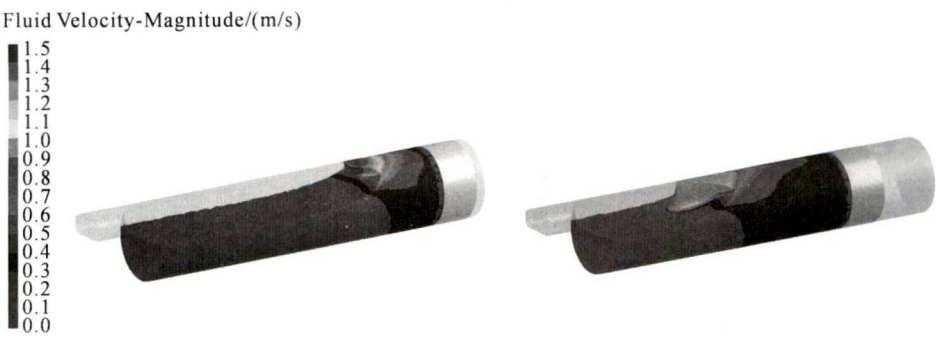

图 3 正交试验表中 9# 工艺条件下压射室内金属液速度及液面波动情况

Fig.3 Flow velocity and surface fluctuation of molten metal in the injection chamber under No. 9 orthogonal test

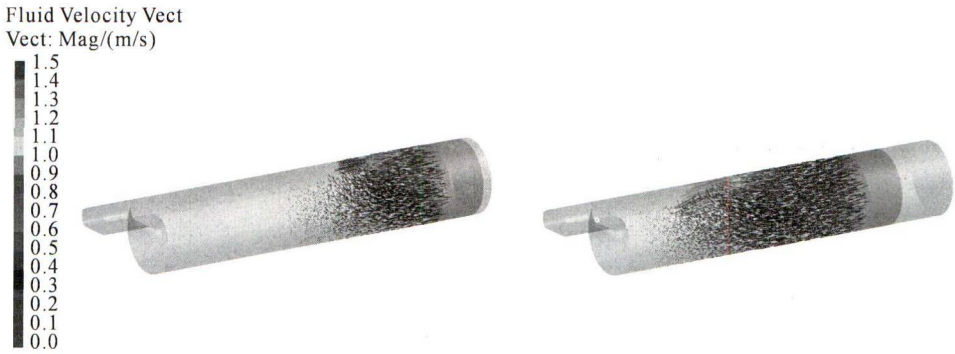

图 4 正交试验表中 9# 工艺条件下压射室内金属液流场分布状态

Fig.4 Flow field of molten metal in the injection chamber under No. 9 orthogonal test

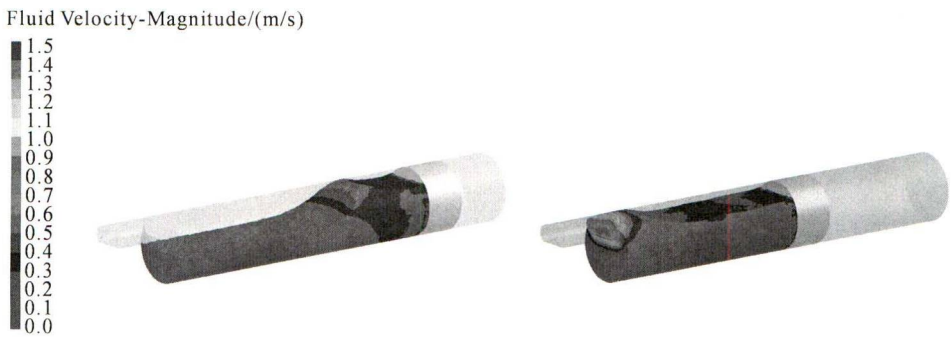

图 5 正交试验表中 5# 工艺条件下压射室内金属液速度及液面波动情况

Fig.5 Flow velocity and surface fluctuation of molten metal in the injection chamber under No.5 orthogonal test

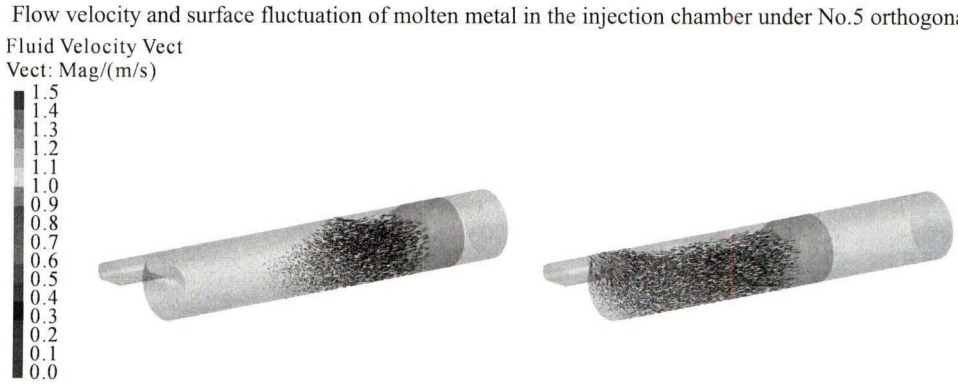

图 6 正交试验表中 5# 工艺条件下压射室内金属液流场分布状态

Fig.6 Flow field of molten metal in the injection chamber under No. 5 orthogonal test

400 mm，压射室充满度 30%，冲头速度 0.4 m/s，金属液初始温度 660 ℃。6# 模拟仿真结果：从图 7 和图 8 可知，由于压射室充满度较小，压射室内空腔区域较大，当冲头以较大速度向前运动时，涌浪的浪高较高且速度较快，在涌浪向前运动过程中发生卷气现象。当涌浪到达压射室端部进入浇口后将浇口封住，此时压射室内还有部分气体未排出，剩余气体被困在压射室内，将形成比较明显的困气现象。

14# 工艺条件：压射室直径 70 mm，压射室长度 400 mm，压射室充满度 60%，冲头速度 0.1 m/s，金属液初始温度 680 ℃。14# 模拟仿真结果：如图 9 及图 10，当冲头以 0.1 m/s 的速度向前运动时，涌浪的浪

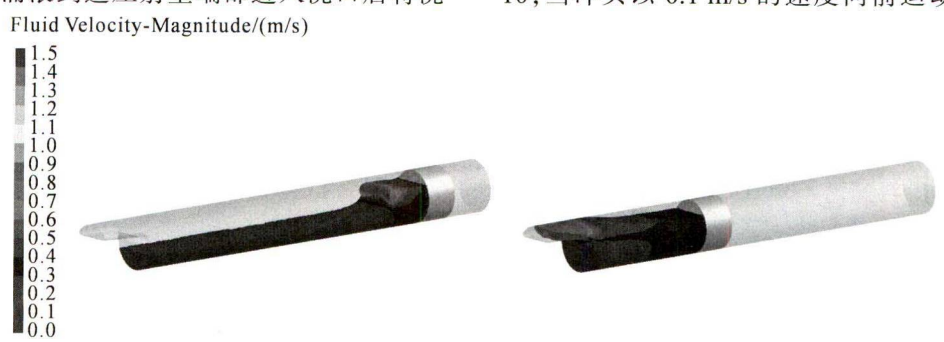

图 7 正交试验表中 6# 工艺条件下压射室内金属液速度及液面波动情况

Fig.7 Flow velocity and surface fluctuation of molten metal in the injection chamber under No.6 orthogonal test

图 8 正交试验表中 6# 工艺条件下压射室内金属液流场分布状态

Fig.8 Flow field of molten metal in the injection chamber under No. 6 orthogonal test

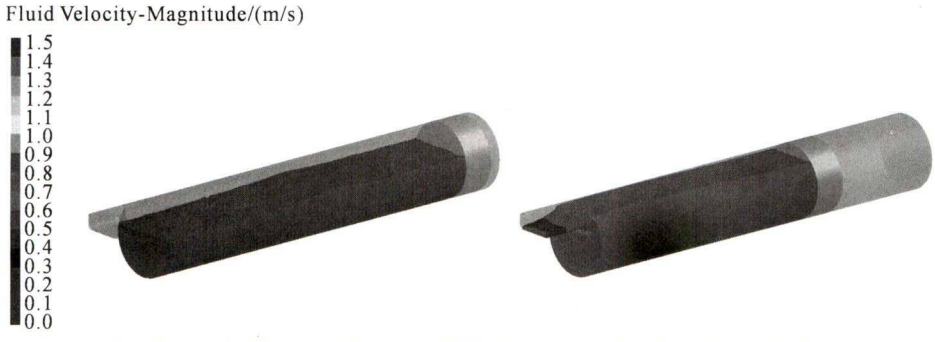

图 9 正交试验表中 14# 工艺条件下压射室内金属液速度及液面波动情况

Fig.9 Flow velocity and surface fluctuation of molten metal in the injection chamber under No.14 orthogonal test

图 10 正交试验表中 14# 工艺条件下压射室内金属液流场分布状态

Fig.10 Flow field of molten metal in the injection chamber under No. 14 orthogonal test

高很低且速度很小，金属液流场在冲头的推动下平稳运动，当金属液进入浇口时，压射室内空气均已被排出压射室，整个过程没有发生卷气现象，也没有发生困气现象。

3 结论

(1)根据压铸慢压射工艺特点，进行了正交试验方案设计和建模，采用 ProCAST 软件进行模拟仿真。对模拟仿真结果进行统计分析，从分析结果得知，冲头速度对压射室内金属液状态影响效果最大，压射室充满度影响效果次之，压射室直径、压射室长度及金属液温度的影响效果不明显。

(2)对慢压射过程形成卷气和困气的典型过程进行了重点分析，通过模拟仿真结果分析了在形成卷气和困气时金属液速度大小和流场状态特征。在冲头速度大于 0.3 m/s 时，金属液涌浪明显容易发生卷气现象，在冲头速度大于 0.2 m/s 且压射室充满度的较低时，容易出现金属液将浇口封闭而气体没有被排出的现象，产生困气的风险较高。

(3)根据正交试验统计结果及对典型慢压射过程模拟仿真分析结果，为了控制压射室内金属液的卷气和困气风险，需要尽可能低的冲头速度及较高的压射室充满度等条件。

参考文献：

[1] 潘宪曾. 正确选择慢压射速度 [J]. 铸造技术，2005，26 (5)：397-400.

[2] 童帮华，明玥，游国强. 铝合金摩托车发动机左箱体压铸工艺数值模拟与优化[J]. 铸造技术，2019，40 (3)：263-268.

[3] 朱洪军. 基于正交试验及数值模拟的下缸体压铸工艺优化[J]. 铸造，2021，70(6)：670-674.