

镁合金副车架压铸过程计算机仿真与工艺优化

付彭怀¹ 丁浩源¹ 李德江¹ 王泽忠² 赵正江² 周 力² 朱胜利³ 丁胜长³ 刘锡林³ 彭立明¹
(1.上海交通大学材料科学与工程学院轻合金精密成型国家工程研究中心;
2.东风汽车公司技术中心; 3.凤阳爱尔思精密成型有限责任公司)

摘 要 基于 AnyCasting 软件,采用正交试验研究了压铸过程中冲头速率、模具温度、浇注温度对镁合金副车架铸件气孔含量、氧化倾向、冷隔和缩松等缺陷的影响,并得到了优化的压铸工艺参数:冲头速率为 7 m/s、模具温度为 250 ℃、浇注温度为 700 ℃。在该工艺参数条件下,获得了表面和内部品质良好的镁合金副车架压铸件,同时验证了通过模拟仿真优化压铸工艺参数方法的有效性。

关键词 镁合金;副车架;压铸;铸造仿真;正交试验

中图分类号 TG249.2;TG146.22;TP311 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Computer Simulation and Process Parameters Optimization of Mg Subframe
Produced by Die Casting Process

Fu Penghuai¹, Ding Haoyuan¹, Li Dejiang¹, Wang Zezhong², Zhao Zhengjiang²,
Zhou Li², Zhu Shengli³, Ding Shengchang³, Liu Xilin³, Peng Liming¹

(1.National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University; 2.Dongfeng Automobile Company Technology Center;
3.Fengyang Light Alloy Net Forming National Engineering Research Center Co., Ltd.)

Abstract: The effects of injection rate, mold temperature and pouring temperature on porosity, oxidation tendency, cold-shut and shrinkage porosity in the Mg subframe castings were investigated by using AnyCasting software and orthogonal test method. The optimized die casting process parameters were presented as follows: injection rate of 7 m/s, mold temperature of 250 ℃, pouring temperature of 700 ℃. Under these process parameters, Mg subframe castings with sound surface and internal quality were produced by die casting process, and the effectiveness of optimizing the casting process parameters by simulation was also verified.

Key Words: Mg Alloy, Subframe, Die Casting, Casting Simulation, Orthogonal Test

近年来,随着汽车产量和保有量的持续增加,我国面临的能耗、安全、环保等问题日益突出,汽车轻量化已成为推动汽车工业可持续发展、提高汽车燃油经济性、减少汽车尾气排放的重要手段。镁合金作为密度最低的金属结构材料,兼具比强度和比刚度高、减振性能好、电磁屏蔽、导热性能优良等特点,已经成为汽车轻量化技术的重要发展方向^[1~4]。研究表明,采用镁合金代替铝合金制备汽车座椅座盆、发动机油底壳、发动机气门室罩、变速器左箱体端盖、变速器左箱体、变速器右箱体等部件,分别可以实现减重 31.8%、33.3%、37.4%、37.1%、37.0%、36.8%,轻量化效果显著^[5]。为了进一步推动镁合金在汽车轻量化技术中的应用,本课题开展

了镁合金副车架铸件的结构设计、模具设计与压铸试验、台架试验等系列测试,以探讨镁合金在汽车大型薄壁结构件上应用的可行性,主要涉及镁合金副车架压铸过程计算机仿真与压铸工艺参数优化。

1 铸件与浇注系统设计

图 1 为压铸镁合金副车架浇注系统设计。副车架铸件轮廓尺寸为 0.92 m×0.51 m×0.17 m,材质为 AE42 镁合金,质量为 7.1 kg,相对于原有钢制结构件减重 52.7%;副车架铸件总体呈工字型,为上下表面加强筋结构,尺寸较大,最大壁厚与最小壁厚之比为 5.5:1,薄壁区域主体壁厚为 5 mm、局部壁厚为 4 mm。浇

收稿日期:2020-09-27;修改稿收到日期:2020-11-05
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301002);国家自然科学基金资助项目(51821001);宁波市科技创新 2025 重大专项资助项目(2019B10102)
第一作者简介:付彭怀,男,1980 年出生,副研究员,上海(200204),E-mail:fph112sjtu@sjtu.edu.cn
引用格式:付彭怀,丁浩源,李德江,等. 镁合金副车架压铸过程计算机仿真与工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 231-235.
FU P H, DING H Y, LI D J, et al. Computer simulation and process parameters optimization of Mg subframe produced by die casting process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2): 231-235.

注系统从多个设计方案中择优筛选获得,筛选的原则包括熔体是否同时达到内浇口、是否顺序填充、卷气量较少等。为了降低试制成本、提高试验效率,首先通过铸造过程计算机仿真对压铸工艺参数进行优化选择。

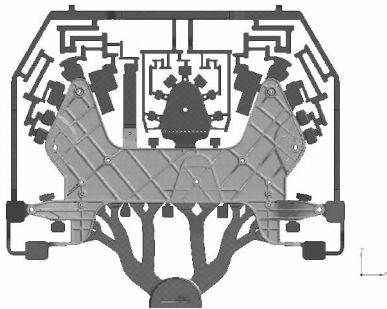


图 1 镁合金副车架浇注系统设计

Fig.1 Gate system design of Mg subframe for die casting process

2 仿真方法

采用 AnyCasting 软件对压铸过程进行模拟,模具材质为 H13 钢,计算时采用虚拟模具,最小壁厚为 30 mm。重点研究冲头速率、模具温度和浇注温度对镁合金副车架铸件内部气孔、氧化倾向、冷隔和缩松等缺陷的影响,最终确定优化的压铸工艺参数。

采用宇部 35 500 kN 卧式压铸机,压铸机冲头速率选择为 3、5、7 m/s。仿真时模具温度设定为 150、200、250 ℃。试验时采用定量泵进行浇注,镁合金高温熔体刚浇注到压室时会发生剧烈的氧化反应,因此压铸时熔体温度不宜过高,浇注温度为 680、700、720 ℃。为了减少仿真计算量,采用正交试验研究冲头速率、模具温度和浇注温度对铸造缺陷影响的显著性,采用 3 因素 3 水平的正交试验法,见表 1^[6~10]。

表 1 3 因素 3 水平正交试验表

序号	模具温度/℃	浇注温度/℃	冲头速率/(m·s ⁻¹)
1	150	680	3
2	150	700	5
3	150	720	7
4	200	680	7
5	200	700	3
6	200	720	5
7	250	680	5
8	250	700	7
9	250	720	3

在铸造仿真软件中,气孔含量通常难以准确计算,一般定量分析采用如下方法:在仿真条件设置时,激活 Back Pressure 选项,设置初始气压值为标准大气压;结果分析时,选取充型完成时刻(100%),通过 Quantitative Analysis 计算压力值为(1~11)×10⁷ Pa 的 A/V,

即为气孔含量,其中,A 为网格体积,V 为铸件体积。但是,该气孔含量与真实气孔含量可能存在较大差异,采用这种方法主要用来定量评估不同压铸工艺参数组合对气孔含量的影响。

计算氧化倾向方法如下:在仿真条件设置时,激活 Oxide/Inclusion 选项,设置氧化曲线 620/0-650/0.1-680/0.3-700/0.6-720/1.0,其中 0、0.1、0.3、0.6、1.0 表示熔体不同温度下的氧化倾向;结果分析时,选取充型完成时刻(100%),通过 Quantitative Analysis 计算氧化值为>0.02 的网格体积 B,B/V,即为氧化倾向值。

冷隔风险计算如下:结果分析时,选取充型完成时刻(100%),通过 Quantitative Analysis 计算温度值为 660~695 ℃的低温熔体的网格体积 C,C/V 即为低温熔体含量。低温熔体含量越高,则铸件形成冷隔的风险越高,因此可以通过低温熔体含量间接评估冷隔风险。

缩松含量计算方法如下:在仿真条件设置时,激活 Shrinkage 选项,AE42 镁合金的凝固收缩率为 4.1%。结果分析时,选择 Probabilistic Defect Parameter 中的 Retained Melt Modulus,然后通过 Quantitative Analysis 计算缺陷可能为 0.2~1.0 的网格体积 D,D/V 即为缩松含量。

3 计算结果与分析讨论

3.1 充型过程与典型缺陷分布情况

镁合金副车架典型压铸充型过程见图 2。铸件的充型时间为 0.074 8 s,铸件填充总体比较平稳。当熔体达到内浇口时,由于内浇口截面积突然减小,熔体产生喷射,会与型腔中的气体产生混合,将气体卷入铸件当中。此外,由于熔体通过内浇口的速率非常高,可达 150 m/s,将优先填充型腔远端,容易把型腔中的气体封堵在内浇口附近,见图 2e 和图 2f 中箭头所示。因此,压铸充型过程中,熔体与型腔气体的相互混合导致常规压铸件中存在大量气孔。显然,在熔体进入内浇口之前将型腔中的气体排出是解决压铸气孔的有效措施。

图 3 为镁合金副车架压铸充型后的气压分布。可以看出,除了铸件远离内浇口的部位外,内浇口附近也存在着较多气压值较高的区域;此外,不少加强筋位置也存在气压值较高的区域。这些区域都可能存在气孔缺陷。图 4 为镁合金副车架压铸充型完成后氧化情况分布图。氧化倾向风险比较大的区域为溢流槽和铸件距离内浇口较远的位置。另外,内浇口附近的 3 个溢流槽氧化倾向较高(见箭头所示),这是由于压铸中熔体优先填充型腔远端、将型腔中的部分气体封堵在内浇口附近所造成的,同时也说明了该位置设置溢流槽的必要性。图 5 为镁合金副车架压铸充型后铸件中低温熔体



图2 镁合金副车架压铸充型过程(冲头速率为7 m/s、模具温度为250 ℃、浇注温度为700 ℃)

Fig.2 Die casting filling process of Mg subframe under injection rate of 7 m/s, mold temperature of 250 ℃ and pouring temperature of 700 ℃

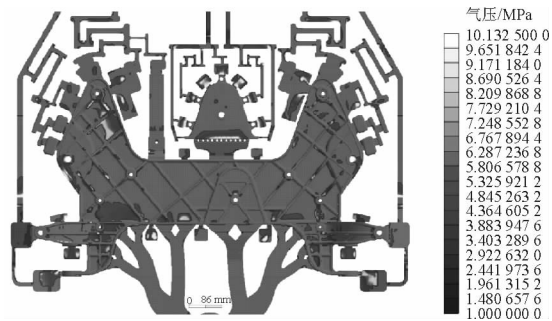


图3 镁合金副车架压铸充型后气压分布图

(深色区域都有产生气孔的风险,

冲头速率为7 m/s、模具温度为250 ℃、浇注温度为700 ℃)

Fig.3 Gas pressure distribution of Mg subframe after the filling process of die-casting. The deep area has the risk of forming gas holes under injection rate of 7 m/s, mold temperature of 250 ℃ and pouring temperature of 700 ℃

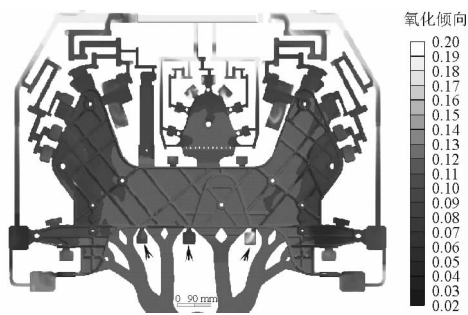


图4 镁合金副车架压铸充型后氧化情况分布图

(深色区域都可能存在氧化夹杂,

冲头速率为3 m/s、模具温度为250 ℃、浇注温度为720 ℃)

Fig.4 Oxidation distribution of Mg subframe after the filling process of die-casting. There may be oxidation inclusions in the deep area under injection rate of 3 m/s, mold temperature of 250 ℃ and pouring temperature of 720 ℃

分布图,采用低温熔体的体积表征冷隔产生的倾向。可见,副车架充型完成后,低温熔体主要分布在溢流槽和铸件远离内浇口的位置,这些位置也是压铸试制过程中容易产生冷隔缺陷的位置。图6为镁合金副车架压铸充型后缩松分布图,可见缩松主要分布在铸件尺寸厚大

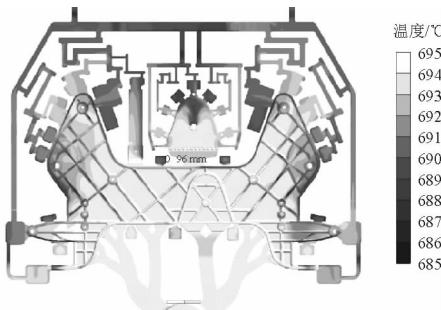


图5 镁合金副车架压铸充型后低温熔体分布图

(冲头速率为3 m/s、模具温度为200 ℃、浇注温度为700 ℃)

Fig.5 Low temperature melt distribution of Mg subframe after the filling process of die-casting under injection rate of 3 m/s, mold temperature of 200 ℃ and pouring temperature of 700 ℃

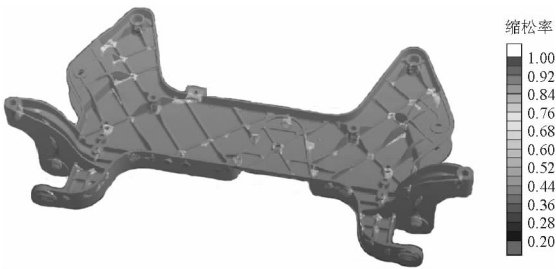


图6 镁合金副车架凝固后缩松分布

(冲头速率为3 m/s、模具温度为200 ℃、浇注温度为700 ℃)

Fig.6 Shrinkage porosity distribution of Mg subframe after solidification under injection rate of 3 m/s, mold temperature of 200 ℃ and pouring temperature of 700 ℃

部位。

3.2 正交试验结果

(1)气孔含量 正交试验气孔含量统计数据见表 2。可以看出,冲头速率的极差(13.91%)>模具温度的极差(10.36%)>浇注温度的极差(7.44%),表明对于铸件中的气孔含量而言,冲头速率的影响>模具温度>浇注温度。

表 2 正交试验气孔含量统计分析表

Tab.2 Statistical analysis of gas content in orthogonal test				
序号	模具温度/ ℃	浇注温度/ ℃	冲头速率/ (m·s ⁻¹)	气孔含量/ %
1	150	680	3	18.91
2	150	700	5	28.53
3	150	720	7	1.27
4	200	680	7	2.29
5	200	700	3	4.12
6	200	720	5	11.21
7	250	680	5	11.63
8	250	700	7	6.08
9	250	720	3	3.92
均值 1	16.24	10.95	8.99	—
均值 2	5.87	12.91	17.12	—
均值 3	7.21	5.47	3.21	—
极差	10.36	7.44	13.91	—
影响因素大小 冲头速率>模具温度>浇注温度				

随着冲头速率增加,气孔含量先增加后减少;随着模具温度升高,气孔含量先减少后增加;随着浇注温度提高,气孔含量先增加后减少。气孔含量最低值(3.21)与 7 m/s 冲头速率相对应。

(2)氧化倾向 正交试验氧化倾向含量统计分析见表 3。可以看出,冲头速率、模具温度、浇注温度的极差分别为 22.68%、2.99% 和 36.58%,即浇注温度对氧化的影响最大,冲头速率次之,模具温度的影响最小。随着浇注温度升高,镁合金熔体的氧化程度显著增加;

表 3 正交试验氧化夹杂含量统计分析表

Tab.3 Statistical analysis of oxidation content in orthogonal test				
序号	模具温度/ ℃	浇注温度/ ℃	冲头速率/ (m·s ⁻¹)	氧化物 含量/%
1	150	680	3	16.08
2	150	700	5	29.01
3	150	720	7	29.21
4	200	680	7	0.20
5	200	700	3	30.03
6	200	20	5	53.05
7	250	680	5	14.77
8	250	700	7	7.19
9	250	720	3	58.54
均值 1	24.77	10.35	34.88	—
均值 2	27.76	22.07	32.28	—
均值 3	26.83	46.94	12.20	—
极差	2.99	36.58	22.68	—
影响因子大小 浇注温度>冲头速率>模具温度				

随着冲头速率增加,镁合金熔体氧化倾向减小;随着模具温度增加,镁合金熔体氧化程度变化较小。氧化倾向均值的较低值(10.35% 和 12.20%)分别对应较低的浇注温度(680 ℃)和较高的冲头速率(7 m/s),即为了降低镁合金熔体的氧化倾向,应当采用较低的浇注温度和较高的冲头速率。

(3)低温熔体(冷隔类缺陷)正交试验统计分析数据见表 4。低温熔体含量越高,表明铸件产生的冷隔倾向越大。浇注温度、模具温度和冲头速率的极差分别为 100%、18.5%、18.5%,即浇注温度对冷隔类缺陷的影响最大,模具温度和冲头速率的影响较低且相当。随着浇注温度增加,副车架中低温熔体含量迅速减小,当浇注温度为 720 ℃时,低温熔体含量为 0;随着冲头速率增加,副车架中低温熔体含量逐渐减小,7 m/s 时最低为 33.53%;随着模具温度升高加,低温熔体含量先增加后减小,在 250℃时最低为33.53%。因此,为了消除冷隔类缺陷,优先考虑提高浇注温度,而提高冲头速率和模具温度对消除冷隔有一定的作用,但影响相对较小。

表 4 正交试验低温熔体含量统计分析表

Tab.4 Statistical analysis of low temperature melt content in orthogonal test				
序号	模具温度/ ℃	浇注温度/ ℃	冲头速率/ (m·s ⁻¹)	低温熔体 含量/%
1	150	680	3	100.00
2	150	700	5	17.94
3	150	720	7	0
4	200	680	7	100.00
5	200	700	3	56.09
6	200	720	5	0
7	250	680	5	100.00
8	250	700	7	0.58
9	250	720	3	0
均值 1	39.31	24.87	52.03	—
均值 2	52.03	100.00	39.31	—
均值 3	33.53	0	33.53	—
极差	18.50	100.00	18.50	—
影响顺序 浇注温度>冲头速率=模具温度				

(4)缩松含量 正交试验缩松含量统计分析见表 5。可以看出,浇注温度、模具温度和冲头速率的极差分别为 0.02%、0.01%、0,即浇注温度对缩松含量影响最大,其次是模具温度和冲头速率。不同压铸工艺下,铸件内部的缩松含量在 6.51%~6.54% 范围内,变化较小。

从表 2~表 5 可知,提高冲头速率有利于降低气孔含量、减少镁合金熔体氧化倾向、减少冷隔类缺陷,对缩松含量影响很小;即较高的冲头速率有利于减少铸造缺陷,因此冲头速率选择 7 m/s。

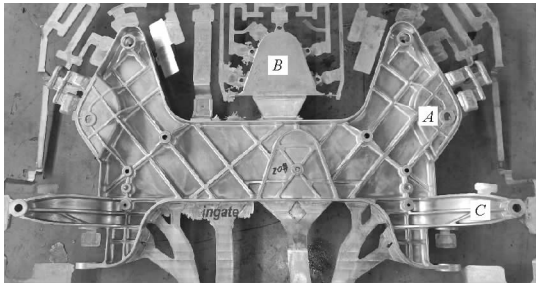
提高模具温度可以总体上减少气孔含量、减少冷隔类缺陷,但对于氧化倾向和缩松含量影响较小;即较高

表 5 正交试验缩松含量统计表
Tab.5 Statistical analysis of shrinkage volume in orthogonal test

序号	浇注温度/ ℃	注射速度/ (m·s ⁻¹)	模具温度/ ℃	缩松率/ %
1	150	680	3	6.54
2	150	700	5	6.54
3	150	720	7	6.53
4	200	680	7	6.54
5	200	700	3	6.53
6	200	720	5	6.52
7	250	680	5	6.53
8	250	700	7	6.52
9	250	720	3	6.51
均值 1	6.54	6.54	6.53	—
均值 2	6.53	6.53	6.53	—
均值 3	6.52	6.52	6.53	—
极差	0.02	0.01	0	—
影响顺序 浇注温度>模具温度>冲头速率				

的模具温度有利于减少铸造缺陷,因此模具温度选择 250 ℃。

提高浇注温度,一方面能够显著减少冷隔类缺陷,另一方面能够显著增加镁合金熔体的氧化倾向,在不显



(a) 整体形貌



(b) A 位置放大图



(c) B 位置放大图



(d) C 位置背面放大图

图 7 AE44 镁合金副车架铸件外观照片

Fig.7 Images of die cast AE44Mg subframe

4 结 论

(1)AE44 镁合金副车架压铸时,冲头速率对气孔的影响最大、模具温度次之、浇注温度影响最小;浇注温度对氧化倾向的影响最大、充型速率次之、模具温度影响最小;浇注温度对冷隔缺陷影响最大,模具温度和冲头速率影响相当且较小;三者对收缩类影响都比较小,其中模具温度影响最大。优选的压铸工艺参数:冲头速率为 7 m/s、模具温度为 250 ℃、浇注温度为 700 ℃。

(2)采用计算机仿真优化的工艺参数能够压铸出外观品质良好的 AE44 镁合金副车架铸件,其中远离内浇口部位铸件表面纹理比较明显,而距离内浇口较近部位铸件表面比较光亮,铸件内部品质良好,未发现大于 500 μm 的铸造缺陷。

参 考 文 献

[1] 范叶,杨沿平,孟先春,等. 汽车轻量化技术及其实施途径[J]. 汽

著增加镁合金熔体氧化的情况下,尽可能的消除冷隔类缺陷,因此,浇注温度选择 700 ℃。

综上,为了降低镁合金副车架中气孔含量、氧化倾向、冷隔类缺陷和缩松含量,优化的压铸工艺参数:冲头速率为 7 m/s、模具温度为 250 ℃、浇注温度为 700 ℃。

3.3 试验验证

在宇部 35 500 kN 卧式压铸机上进行了 AE44 镁合金副车架的压铸试制,工艺参数见表 6,压铸件见图 7。从图可见远离内浇口的铸件表面纹理良好,见图 7b 和图 7c,而距离内浇口较近的位置,铸件表面比较光亮,见图 7d。表面纹理应当是镁合金熔体交汇时融合不充分造成的。X 射线分析表明,AE44 镁合金副车架铸件内部品质总体良好,未发现 500 μm 以上的缩松、缩孔类铸造缺陷。

表 6 AE44 镁合金副车架压铸工艺参数

Tab.6 Die casting process parameters of AE44 Mg subframe				
模具温度/ ℃	浇注温度/ ℃	冲头速率/ (m·s ⁻¹)	增压压力/ MPa	是否真空
250	695~705	7	50	是

车工业研究, 2006(7): 40-42.

[2] 潘复生,王敬丰,章宗和,等. 中国镁工业发展的机遇、挑战和责任[J]. 中国金属通报,2008(2): 6-14.
[3] 付彭怀,彭立明,丁文江. 汽车轻量化技术:铝/镁合金及其成型技术发展动态[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 84-90.
[4] 郭径,叶兵,吴玉娟,等. 高强韧压铸镁合金的研究现状和发展趋势[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(3): 254-260.
[5] 刘波,黎予生,李晓青,等. 长安汽车镁合金技术研究与应用进展[J]. 汽车工艺与材料,2012(1): 17-21.
[6] 方少林,程文超,吴兵. 基于正交试验的上壳体真空压铸工艺参数优化[J]. 中国设备工程, 2020(3): 111-112.
[7] 魏显坤. 汽车用铝合金压铸件的慢压射工艺参数研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(1): 53-55.
[8] 李彬. 基于 Magma 软件的支架压铸数值模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(9): 952-955.
[9] 赵旭,王平,常东旭,等. 薄壁 AlSi10MnMg 结构件压铸工艺数值模拟与优化[J]. 铸造,2019, 68(6): 952-955.
[10] 周波,张立强,高进伟. 基于 Anycasting 软件的壳体仿真分析及工艺优化[J]. 软件, 2020, 41(7): 210-215.

(编辑:张正贺)