

# 压铸工艺对 AlSi9Cu3 铸件力学性能的影响

杨兴国<sup>1, 2</sup>, 杨 诚<sup>2</sup>, 王茂辉<sup>1</sup>

(1. 重庆工商职业学院, 重庆 401520; 2. 重庆大学机械与运载学院, 重庆 400030)

**摘要:** 某款汽车发动机在耐寒实验时出现冷机启动异响故障, 分析其原因, 是由于气缸体力学性能不足以及气缸体漏气量超标所导致。通过在轴承孔处增加局部挤压技术, 并选择合适的挤压工艺; 采用优化压铸工艺参数, 改进模具浇注系统, 调整喷涂位置等方案, 使铸件力学性能达标, 机油标识孔漏气率由32%降低到0.4%, 使发动机漏气量低于限定值, 有效地解决了发动机冷机启动异响故障。

**关键词:** 气缸体; 漏气; 力学性能; 局部挤压; 工艺

近年来, 随着汽车轻量化进程加快, 铝合金由于密度小、强度高、塑性好, 已经取代铸铁成为生产汽车发动机气缸体的首选材料。其中, 压力铸造因生产效率高, 铸件尺寸精度高, 表面粗糙度值低, 是最常见的一种铝合金铸造工艺。然而, 压力铸造也存在着充填时间短, 排气不充分, 导致铸件气孔、薄壁铸件在熔液凝固时易形成热节导致裂纹、厚壁铸件易出现缩孔、缩松等问题<sup>[1]</sup>。研究表明, 压铸件缩孔、缩松、裂纹缺陷易引起铸件漏气, 影响铸件的力学性能, 为了消除缩孔、缩松缺陷, 在实际生产中广泛采用局部加压工艺<sup>[2]</sup>。对于裂纹缺陷, 一般采用优化模具冷却系统、调整留模时间和把控熔炼过程等方式予以改善或消除。

某款汽车发动机在进行极寒3万公里实验后, 出现冷机启动噪声大问题, 调查发现发动机水压实验漏气率为32%, 漏气量超过漏气限制36.2%, 通过在铸件上取样进行拉伸实验测得铸件抗拉强度为152.8 MPa、屈服强度为104 MPa, 均远低于标准值:  $\geq 200$  MPa和 $\geq 140$  MPa, 故判定为发动机气缸体力学性能不足导致漏气量超标, 从而引起发动机冷机启动异响问题。

## 1 铸件特点及缺陷分析

该铸件为四缸汽车发动机缸体, 毛坯质量为9.7 kg, 采用布勒2800T冷室压铸机压铸, 铝合金牌号为YZAlSi9Cu3, 合金成分见表1。铸件平均壁厚15 mm, 最大壁厚50 mm, 内部具有较多润滑油道、冷却水道、机油标尺通道和安装螺纹孔, 销子因冷却困难而温度较高, 实际压铸过程中, 铸件厚壁处、细长销子附近难以避免出现缩孔、缩松和裂纹等缺陷。另外, 由于气缸体轴承孔需要承受因活塞往复运动的惯性和惯性力矩引起的冲击振动, 工作条件恶劣, 需要较高的结构强度(要求: 抗拉强度 $\geq 200$  MPa、屈服强度 $\geq 140$  MPa), 而常规的压铸工艺保证铸件具有如此高的强度具有一定难度。由于轴承孔是发动机的主要受力点, 附近分布有诸多铸造孔, 结构复杂, 且壁厚较大, 因此气缸体轴承孔区域选取力学实验用拉杆, 具体位置见图1。通过对拉杆进行抗拉强度和屈服强度测试, 结果见表2, 气缸体铸件的力学性能不足。观察拉杆断口截面, 断面含有夹渣, 晶粒度为7.5级, 断面组织疏松, 与铸件力学性能不足结果相符。

通过水压实验发现, 气缸体机油标识孔压检漏气。切割漏气位置发现机油标识孔(图2)附近有不同程度缩孔、缩松。漏气位置为铸件的厚壁处, 铝液在凝固过程中, 由于离模具型芯表面较远, 温度较高, 周边金属液已经完全凝固, 厚壁中心形

作者简介:

杨兴国(1986-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为铝合金材料成形。电话: 18223592732, E-mail: 790146442@qq.com

中图分类号: TG249.2;

TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

06-0705-04

基金项目:

重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202004005); 重庆工商职业学院重点科研项目(NDZD2020-02)。

收稿日期:

2021-11-18 收到初稿,

2021-12-20 收到修订稿。

表1 YZAlSi9Cu3铝合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of the YZAlSi9Cu3 Aluminum Alloy

项目	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Cr	Pb	其他		Al
												单个	合计	
标准值	8.0~11.0	≤1.3	2.0~4.0	≤0.55	0.15~0.55	≤0.55	≤1.2	≤0.15	≤0.2	≤0.15	≤0.35	≤0.05	≤0.25	余量
实测值	9.285	0.714	3.012	0.181	0.121	0.038	0.702	0.012	0.034	0.02	0.031	-	-	-

表2 铸件力学性能要求  
Table 2 Mechanical performance requirements of the castings

样品名称	检测项目	技术要求	检验结果	判定方法	符合判定
第一批实验	抗拉强度 $R_m$ /MPa	≥200	162, 161, 136, 158	GB/T228.1—2010	不符合
	规定塑性屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	≥140	90, 93, 96, 92		不符合
	断后伸长率 $A$ /%	≥1	1		符合

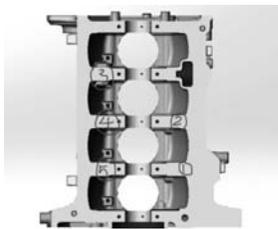


图1 实验用拉杆选取位置  
Fig. 1 The position of the experiment sample

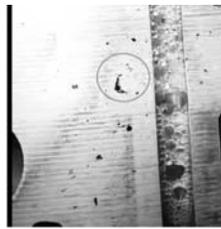


图2 铸件水压实验漏气位置  
Fig. 2 Leakage position of the casting under water pressure test

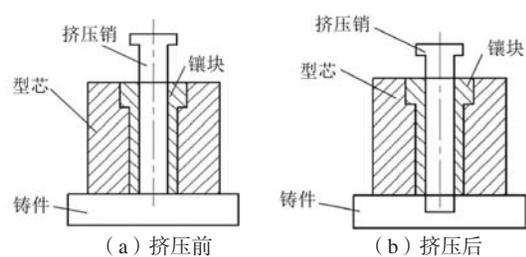


图3 挤压销结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of the extrusion pin

成孤立液相区，不能在铸造增压阶段进行补缩，从而形成铸件缩孔<sup>[3]</sup>，这是气缸体漏气和铸件力学性能不稳定的主要原因。针对铸件力学性能不稳定问题展开调查，主要有四个方面的原因：第一，压铸工艺设计不合理，特别是主控参数有高速速度、高速起点、增压压力及留模时间等设计不合适；第二，模具浇注系统设计不合理，模具冷却系统异常，离型剂喷涂不当等；第三，YZAlSi9Cu3合金成分超差，铝锭熔炼工艺异常，压铸过程中夹有氧化物及活塞润滑油燃烧物等杂质；第四，气缸体铸件壁厚较大，压铸过程容易出现缩孔、缩松缺陷。

## 2 局部加压技术的分析与应用

### 2.1 局部挤压技术的机构及原理

局部挤压机构如图3所示，它主要由工作油缸、挤压销、挤压镶套和其他附属部件组成，挤压机构一般根据实际情况设计在模具的模框或模芯上。传统的局部挤压技术，由于挤压速度不可调，导致挤压动作只存在于某个瞬间，不能在整个铝液凝固阶段持续加压<sup>[4]</sup>，更不能调整加压时间段，使得挤压时机不合适，挤压过早，挤压销变成了固定销，不能起到补缩作用；挤压过迟，铝液已经凝固，挤压销受阻太大，容易折断。因此，传统的挤压技术对于消除或减轻铸件缩孔的效果甚微。

目前，大多数企业采用新的挤压技术，它是在压

铸模具上增设内置油缸将工作油缸控制信号与压铸机压射信号连锁，在压铸机控制面板上设置挤压时刻，挤压延时、保压压力和保压时间等参数，可以调整挤压销挤压和抽拔动作，可以使挤压时机更合适。在铸件凝固过程中，通过挤压销对半凝固液相施加压力，改变铝液补缩顺序，对铸件壁厚方向的中心区域起到良好的补缩效果，可有效消除铸件缩孔，提高铸件组织致密性，增强铸件力学性能。

### 2.2 局部挤压技术的应用及效果

结合以往铸造发动机气缸体经验和对标EA211气缸体数据，在气缸体轴承座附近采用挤压销方案时，铸件组织更加致密，拉杆断口没有气缩孔，力学性能显著提升。由于该款发动机漏气点位于机油标识孔附近，靠近第1缸、第2缸轴承孔，加上每个轴承孔设计有润滑油孔，也有漏气、漏油风险，因此在每个轴承孔上都采用局部加压技术，加压后的铸件毛坯如图4所示。然而，选择合适的挤压工艺对铸件品质至关重要，为了快速获得最优的挤压工艺，采用了正交试验，选取挤压工艺三个关键参数：挤压压力、挤压延时和保压时间作为试验因素，每个因素分别选取三个水平，采用标准的正交试验L9(3<sup>3</sup>)表。试验设计如表3所示，试验目标函数为抗拉强度、屈服强度和缩孔良品率。每组试验压铸5件，在第1-3缸轴承孔处各取1个拉杆试样，在第4-5缸轴承孔处各取1个切片，这样每组实验由15个实验用拉杆和10个切片构成，取每组试验

表3 正交试验方案表  
Table 3 Orthogonal test scheme

试验编号	因素A	因素B	因素C	抗拉强度 $R_m$ /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	缩孔良品率/%
	挤压压力/bar	挤压延时/s	保压时间/s			
1	1 (140)	1 (3)	1 (10)	241	175	100
2	1 (140)	2 (1.5)	2 (7.5)	225	159	97
3	1 (140)	3 (0)	3 (5)	215	149	93
4	2 (120)	1 (3)	2 (7.5)	221	155	96
5	2 (120)	2 (1.5)	3 (5)	208	139	87
6	2 (120)	3 (0)	1 (10)	237	171	100
7	3 (100)	1 (3)	3 (5)	223	157	85
8	3 (100)	2 (1.5)	1 (10)	219	153	95
9	3 (100)	3 (0)	2 (7.5)	213	147	93
K1	227/161	228.3/162.3	232.3/163.3			
K2	222/155	217.3/150.3	219.7/153.7			
K3	218.3/152	221.7/155.6	215.3/148.3			
极差	8.7/9.0	11.0/12.0	17/15			

的平均值作为该组的试验结果。其中，缩孔良品率考虑了X光探伤数据。

表3是正交试验的结果，因素A（挤压压力）、因素B（挤压延时）和因素C（保压时间）的极差分别为8.7/9.0、11.0/12.0和17/15，因素C对试验结果影响最大，是引起力学性能不稳定的主要因素；因素A的极差为8.7/9.0排第二，是第二主要因素；因素B的极差最小，是次要因素。按照极差分析方法确定出影响铸件合格率的因素主次顺序为C（保压时间）、A（挤压压力）和B（挤压延时）。为了获取最优的挤压工艺方案，需要进一步根据目标函数值确定各因素的水平。从表3中的K值可以看出，抗拉强度与屈服强度呈相似的变化规律，因此这里仅考虑抗拉强度，因素A（挤压压力）的水平1最大为227，其次为水平2，水平3最差；因素B（挤压延时）的水平由高到低依次为123，因素C（保压时间）的水平也为123。因此，可以初步确定最佳工艺参数组合为A1B1C1，即挤压压力为140 bar、挤压延时为3 s和保压时间为10 s。除此之外，这组挤压工艺铸件缩孔良品率也很高。

图5是采用局部挤压工艺的铸件切片，对比图2，发现铸件的机油标识孔附近的缩孔问题明显改善。由表3试验数据及工程经验表明，通过改善压铸机周边设备及调整挤压工艺不仅可以有效消除铸件缩孔、缩松问题，还可以提高铸件的力学性能。但是，实际生产中应考虑挤压销安装位置、挤压压力过大导致铸件变形或裂纹、液压力太大使油管或接头漏油等问题。

理论研究表明，受铝液充填顺序的影响，模具温度呈上低下高的梯度分布，导致铝液由表及里、从高模温到低模温顺序凝固，最后凝固区域如果得不到铝液补缩，就会因补缩不足而形成缩孔。因此，排除异

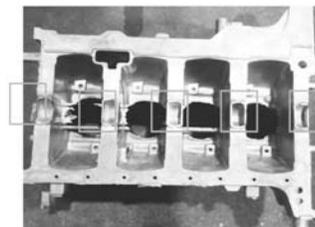


图4 采用局部挤压技术的铸件毛坯

Fig. 4 Casting blanks using local extrusion technology

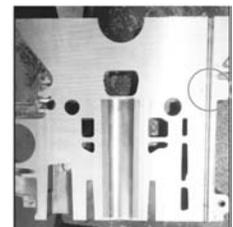


图5 采用局部挤压工艺的铸件切片

Fig. 5 Casting slices using local extrusion process

常因素，铝合金压铸件缩孔的主要原因为铝液补缩不足<sup>[5-7]</sup>。然而铝液的凝固顺序受诸多因素影响，例如：铸件结构、浇注系统、排气系统、冷却系统和工艺参数等。结合实际工程经验，主要采用了3种方案来进一步改善铸件的缩孔问题，即调整压铸工艺、优化模具浇注系统和调整喷涂工艺。

调整工艺参数。铝液从料筒进入型腔一般要经过慢速、高速和增压三个阶段，除此之外，高速起点也是一个重要参数，理论上高速切换点应位于铝液到达内浇道附近，这样可以保证铝液更好地充填型腔。研究表明，低速过高会导致加速时铝液震荡，形成卷气，铸件容易形成气缩孔；低速太低，铝液温度在充填之前下降较快，铸件易形成冷硬层<sup>[8]</sup>。通过试验发现，将低速设定为0.28 m/s，高速起点为710 mm，高速为6.2 m/s，增压压力为1 050 bar，同时将增压压力转换调节由速度转换改为压力转换，铸件品质更好。

优化浇注系统。铝液补缩不足除了与模温分布有关之外，还与铝液充填方向及流量有关。调查发现，之前为了改善轴承孔位置度公差，取消了轴承孔的支浇道，这有可能是导致铸件缩孔的部分原因，因此恢

复该轴承孔的内浇道。同时，将内浇道厚度减小至5.5 mm，使内浇道总面积大约为1 800 mm<sup>2</sup>，采用 $\Phi 150$  mm压射活塞，活塞与内浇道面积之比约为9.81（之前为6.9，即使高速达到压铸机极限速度7.2 m/s，内浇道速度也只有49 m/s），设定速度6 m/s，内浇道速度可达到60 m/s，增加了铝液的高速充填能力。通过凝固模拟分析发现，机油标注孔附近的厚壁区域由于增加了支浇道和提高了内浇道速度而得到了很好地补缩，缩孔问题基本消除。

调整喷涂工艺。合理的喷涂时间和喷涂位置可以有效保持模温，防止铸件冷隔、缩孔或裂纹缺陷。该铸件漏气位置靠近机油标识孔，销子细长，温度较高，增加了外置水冷装置，利用热成像仪测得喷涂后模温为209 ℃，属于正常状态。

### 3 压铸工艺参数优化

采用局部挤压工艺后，铸件的力学性能显著提升，抗拉强度和屈服强度均达标，组织更加致密，缩孔、缩松缺陷明显减少。然而，如图5所示，铸件厚壁处仍然存在缩孔、缩松缺陷。为了彻底消除气缸体漏气隐患，需要进一步改进压铸工艺。

#### 参考文献：

- [1] 陈国恩, 黄志垣, 常移迁, 等. 虚拟实验设计在局部加压工艺改善中的应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (11): 1163-1165.
- [2] 徐飞跃, 余亮, 汪学阳, 等. 铝合金压铸离合器壳体的泄漏缺陷分析与对策 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (7): 715-718.
- [3] 黄志恒, 张玉龙, 赵玉红, 等. 局部加压技术在解决压铸件漏气问题上的应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (7): 742-744.
- [4] 杨新强, 万晓萌, 郝鹏磊, 等. 局部挤压工艺在铝合金重型变速箱后盖压铸上的应用 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (9): 797-800.
- [5] 杨兴国. 铝合金压铸件内部缩孔分析及对策 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (10): 1079-1081.
- [6] 驾雄伟, 揭小平, 闫洪. 汽车齿轮室凝固过程数值模拟及缩孔、缩松预测 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (7): 27-29.
- [7] 杨宏里. 铝合金压铸件常见缩孔、气孔与改进 [J]. 模具制造, 2002, 7 (7): 40-42.
- [8] 杨兴国. 高锌压铸ADC12ZS合金性能的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (1): 38-41.

## 4 工艺验证

通过增加轴承座局部挤压技术、调整压铸工艺参数、优化模具浇注方案、改善喷涂工艺，压铸验证500件，全部进行气密性检查，结果有2件漏气超标，漏气率为0.4%；抽样100件进行拉伸实验检测，平均抗拉强度为248.68 MPa，平均屈服强度为182.83 MPa，合格率为100%，解决了发动机气缸体因铸件力学性能不稳定导致的漏气及噪声问题。

## 5 结论

(1) 汽车发动机气缸体铸件壁厚较大，结构复杂，压铸过程中容易出现缩孔、缩松和裂纹等缺陷，影响产品的力学性能。采用局部加压技术后，铸件的抗拉强度和屈服强度分别提升了62.7%和75.4%，因此采用局部加压技术可以有效改善或消除铸件缩孔、缩松缺陷，显著提高铸件力学性能。

(2) 合理的压铸工艺和模具设计方案对铸件综合性能影响较大，但在实际的压铸过程中，选择合适的工艺参数是一项复杂而耗时的工作，采用正交试验可以综合考虑各工艺参数的影响因素，缩短寻找最优工艺时间，是一种科学的最优工艺选择法。

## Influence of Die Casting Process on Mechanical Properties of AlSi9Cu3 Die Castings

YANG Xing-guo<sup>1,2</sup>, YANG Cheng<sup>2</sup>, WANG Mao-hui<sup>1</sup>

(1. Chongqing Technology and Business Institute Intelligent Manufacturing and Automotive Institute, Chongqing, 401520, China; 2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

#### Abstract:

During the cold resistance test of a certain automobile engine, there was a problem of large cold engine starting noise. It was analyzed that the reason was caused by insufficient mechanical properties of the cylinder block die casting and air leakage near the oil identification hole. By adding local extrusion technology at the bearing hole, and selecting a suitable extrusion process; using optimized die-casting process parameters, improving the mold pouring program, adjusting the spraying position, etc., the mechanical properties of the castings reached the standard, and the air leakage rate of the oil marked hole was reduced from 32% to 0.4%. The air leakage rate of oil identification hole of the engine air leakage was less than the limit value, which effectively solved the problem of the engine cold start noise.

#### Key words:

cylinder block; air leakage; mechanical properties; local squeeze; process