

# 新能源汽车底盘副车架一体化压铸技术研发与应用

夏天<sup>1</sup>, 吴时雨<sup>2</sup>

(1. 宁波职业技术学院, 浙江宁波 315800; 2. 宁波瑞立机械有限公司, 浙江宁波 315800)

**摘要:** 新能源汽车底盘副车架尺寸大, 结构复杂, 力学性能要求高, 常规一体化压铸工艺无法满足设计要求。采用三级抽真空技术, 提高了模具型腔的真空度, 真空度达到 $\leq 15$  kPa; 采用集群局部挤压技术, 改善了区域组织结构, 有效缩减了缩孔, 减少了气孔。生产实践证明, 两种技术的应用使压铸件的力学性能达到了设计要求, 提升了铸件品质, 提高了生产效率, 产品合格率达到95%以上。

**关键词:** 汽车底盘副车架; 一体化压铸; 三级抽真空; 局部挤压

在“双碳”目标下, 新能源汽车已经成为汽车工业的重要支撑。据统计, 2021年我国新能源汽车全年销量超过350万辆, 市场占有率提升至13.4%; 2022年新能源汽车全年销量达到740万辆, 渗透率提升至30%; 2023年权威机构预测新能源汽车销量将接近1 000万辆。

轻量化是汽车行业发展的趋势, 降本增效的需求进一步驱动汽车减重。对于新能源汽车, 提升续航里程, 降低电池成本是发展方向。新能源汽车电池过重、电耗较高, 且能量密度低于传统的燃油汽车, 影响续航里程, 使得车企对其轻量化的需求更加迫切。因此, 车身轻量化成为新能源汽车提升续航里程、提升耐久性和提高节能效率的必然途径。而一体化压铸的应用有助于轻量化的实现。

特斯拉一体化压铸效应轰动了汽车制造业, 迎来了汽车车身工程工艺的变革, 一体化压铸促进了铝合金材料创新与发展。特斯拉Model Y后地板总成采用一体压铸后重量降低了30%, 制造成本相比原来下降了40%。

但一体化压铸技术存在很多方面的技术壁垒和技术瓶颈。一体化压铸产品的材料属性和力学性能比普通铸件要求更高, 常规压铸工艺无法满足设计, 需要技术积累和技术创新才能保证量产的良品率; 一体化压铸模具结构复杂、制造费用高、准备周期长。

本项目与宁波瑞立机械有限公司紧密合作, 以新能源汽车底盘副车架为载体, 对大型零配件一体化压铸技术进行改进与创新, 并将创新技术推广应用至其他结构复杂、超大型一体化铸件, 提高公司的技术研发能力与市场竞争力。

## 1 新能源汽车底盘副车架结构

图1是新能源汽车底盘副车架正反面。副车架的特点是铸件尺寸大,  $858\text{ mm} \times 507\text{ mm} \times 215\text{ mm}$ , 属于超大型铸件; 壁薄, 最大壁厚为10 mm; 分布很多加强筋, 形成了数量可观的深槽; 型腔配合面多, 加工精度要求 $\leq \pm 0.03\text{ mm}$ 。表1是底盘副车架铸件和模具的主要性能参数和技术指标。

底盘副车架是受力件, 力学性能要求相对较高, 通常采用低压铝合金或铸铁, 缺点是生产效率不高, 合格率偏低, 尤其是采用铸铁材料副车架, 重量太大, 与新

### 作者简介:

夏天(1978-), 男, 副教授, 研究方向为新能源汽车复杂结构一体化压铸技术。  
E-mail: 53449324@qq.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

12-1751-06

### 基金项目:

2022年度北仑区科技创新团队项目(2022BL0008)。

### 收稿日期:

2024-02-26 收到初稿,

2024-04-17 收到修订稿。

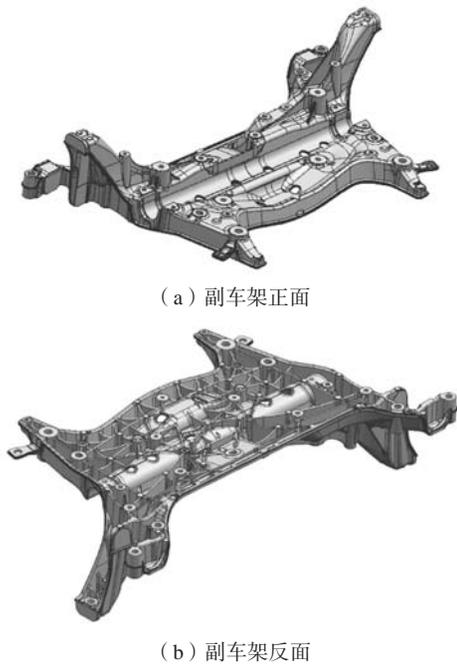


图1 新能源汽车底盘副车架

Fig. 1 New energy vehicle chassis subframe

表1 底盘副车架性能参数和技术指标  
Table 1 Performance parameters and technical indicators of the chassis subframe

项目	内容	要求
铸件主要性能参数	洛氏硬度	≥HRF75
	抗拉强度	≥220 MPa
	屈服强度	≥150 MPa
	断后伸长率	3%以上
	弯曲试验	无裂纹
模具关键技术指标	模框分型面平面度	≤0.1 mm
	型腔成形部位加工精度	≤±0.1
	型腔配合面加工精度	≤±0.03 mm
	模具型腔抽真空时的真空度	≤15 kPa

能源汽车轻量化方向相背离。

经过多次论证与性能对比，最终选取免热处理的铝合金HDX。铝合金高压铸造解决了低压铸造效率低的问题，同时又克服铸铁重量大的缺陷。但是副车架需承受很大的载荷，其抗拉强度、屈服强度、伸长率以及铸件内部质量（气孔、锁孔）要求非常高，采用常规的压铸工艺无法满足设计要求。

本项目将采用三级抽真空压铸技术和集群局部挤压技术，改进创新压铸工艺，提升铸件品质，提高生产效率，降低产品不合格率。通过该项目研发，提高公司一体化压铸技术水准，提升公司一体化压铸的技术积累，增强公司核心技术竞争力。

## 2 三级抽真空压铸技术

压铸是利用高压将金属液高速压入到模具型腔内，金属液在压力作用下冷却凝固成形的一种工艺方法。由于金属液以高速喷射状态充填至模具型腔，型腔中部分气体无法排除而残留在铸件内，可能产生气孔、缩孔等内部缺陷，影响产品品质和力学性能。

为了提高压铸件的力学性能，拓展压铸制品的应用范围，从业人员尝试了多种压铸新工艺与新方法，真空压铸法是目前众多工艺方法中的获得广泛应用并取得良好效果的一种技术。

真空压铸法，填充之前利用真空泵等将型腔内的气体抽出，使金属液在接近真空的环境下充满型腔，降低铸件中残留的气体，从而改善其力学性能。

### 2.1 真空系统数学模型

图2为真空压铸抽真空流程示意图。在任一时刻 $t$ ，真空压铸中真空泵直接对型腔抽真空过程中，型腔真空压力随时间的变化规律可以通过公式(1)进行表述：

$$V_c \frac{dp_c}{dt} = -P_c S_e \quad (1)$$

式中： $V_c$ 为压铸模具型腔体积； $P_c$ 为压铸模具型腔实时压力； $S_e$ 为真空泵对压铸模具型腔的有效抽速。

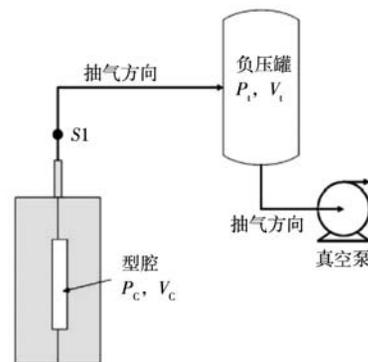


图2 真空压铸抽真空流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vacuum pumping process in casting

利用真空压铸法对模具型腔抽真空，为了达到理想的真空度，压铸模具会设计相应的全密封结构，包括冲头、动定模芯、顶针、镶件、滑块等所有成形零部件。尽管如此，型腔与周围环境存在压力差，导致模具的分型面、顶杆、压射冲头等位置都可以成为气流通道的，因此模具型腔的泄漏 $Q_{\text{泄}}$ 必须考虑，则公式(1)修正为：

$$V_c \frac{dp_c}{dt} = -P_c S_e + Q_{\text{泄}} \quad (2)$$

由于模具型腔的泄漏量与 $t$ 的变化可以忽略，公式

(2) 的解为:

$$P_c = P_0 e^{-\frac{s}{k}t} + \frac{Q_{\text{泄}}}{s_e} \quad (3)$$

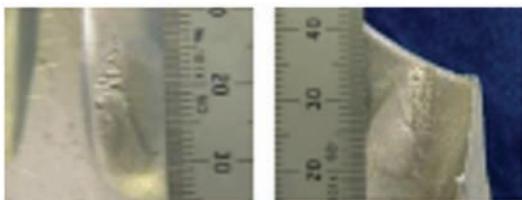
公式(3)的解由两部分组成,第一部分与 $t$ 有关,反映了真空泵抽出模具型腔的真空度压力变化,且其下降形式是指数函数;第二部分与 $t$ 无关,反映了型腔泄漏对于模具真空度的影响。

当时,也就是真空泵对型腔长时间抽取(几小时或更长时间),则公式(3)第一部分趋于0,型腔压力由第二部分决定,型腔真空度能达到 $10^{-5}$  MPa数量级。

但是压铸过程的抽真空时间通常只有几秒钟,而真空泵对压铸模具型腔的有效抽速能达到2 000 L/s甚至更高,因此公式(3)第二部分可以忽略,型腔实时压力由第一部分决定。一般状态下,模具型腔真空度可达 $\leq 91$  kPa。

## 2.2 三级抽真空技术

新能源汽车底盘副车架压铸模具,采用常规抽真空工艺试模,产品合格率维持在70%以下,无法满足压铸件95%以上合格率的要求。压铸件的缺陷主要表现为拉伤痕、热裂纹、气孔、缩孔等,如图3所示。



(a) 拉伤痕



(b) 热裂纹

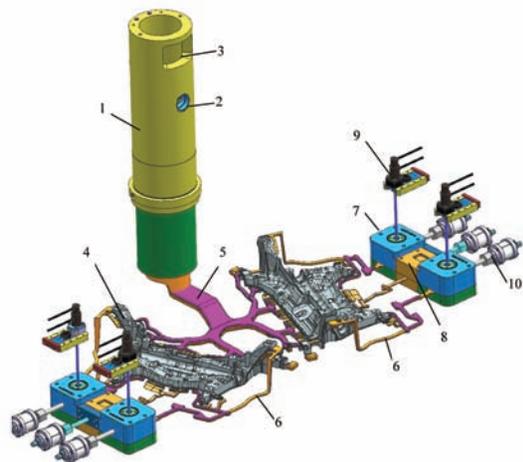
图3 铸造缺陷

Fig. 3 Casting defects

按照底盘副车架产品工艺要求,压铸件表面拉伤痕长度不得大于0.5 mm,加强筋侧面拉伤痕长度不得大于0.3 mm,加强筋底部不得有拉伤痕;压铸件表面包括加强筋的热裂纹凸起长度不得大于1.5 mm。

产生这些缺陷的因素还是因为压铸过程中的气体含量偏多,包括压铸抽真空未排除而残留在型腔的气体以及压铸过程中新增气体,造成模具型腔真空度未达到设计要求。

为此,本项目设计了如图4所示的三级抽真空方案。模具采用一模两腔,图4的料筒最上部矩形孔是铝液倒料口,下面的圆孔是真空抽气孔,真空抽气孔通过管子(图中未画出管子)与真空泵相连接。料筒下面是流道,流道通过内浇道与副车架型腔连接,副车架型腔另一侧分布溢流槽。每个副车架溢流槽连接2个真空阀和1个排气块,真空阀和排气块各连接1个过滤嘴,每个过滤嘴利用软管与真空泵相连接。因为是一模两腔,本副压铸模包括料筒上的抽气口,总共连接7个真空泵。



1. 料筒 2. 倒料口 3. 抽气口 4. 底盘副车架 5. 流道 6. 溢流槽  
7. 真空阀 8. 排气块 9. 驱动油缸 10. 过滤嘴

图4 三级抽真空方案

Fig. 4 Three-stage vacuum scheme

三级抽真空分为以下四个阶段:

第一阶段(图5):铝液倒料结束,压铸机冲头低速通过矩形倒料口,此时倒料口被封住,7个真空泵开始抽真空。

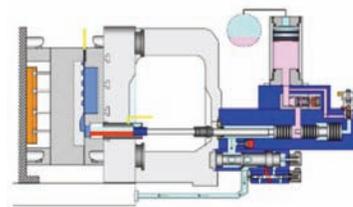


图5 三级抽真空第一阶段

Fig. 5 First step of three-stage vacuum

第二阶段(图6):压铸机冲头低速通过料筒抽气口,此时与料筒抽气口连接的真空泵关闭,与4个真空阀和2个排气块连接的真空泵继续抽气。

第三阶段(图7):压铸机冲头低速转为高速,此时与4个真空阀连接的真空泵关闭停止抽真空,而与2个排气块连接的真空泵继续抽真空。

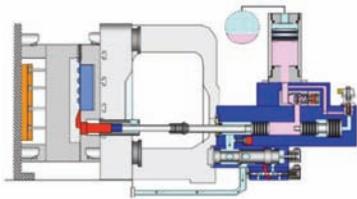


图6 三级抽真空第二阶段

Fig. 6 Second step of three-stage vacuum

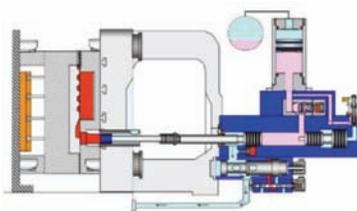


图7 三级抽真空第三阶段

Fig. 7 Third step of three-stage vacuum

第四阶段（图8）：压铸机冲头结束高速运行，与2个排气块连接的真空泵关闭停止抽真空。三级抽真空结束，接着进行增压、保压、冷却，然后开模、冲头跟踪、取件、喷涂、吹气。一个循环结束。

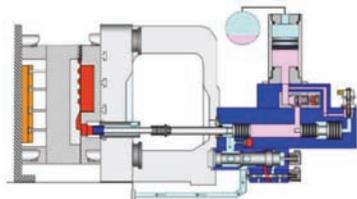


图8 三级抽真空第四阶段

Fig. 8 Fourth step of three-stage vacuum

经过测试，三级抽真空时模具型腔真空度能达到 $\leq 15$  kPa。

### 3 集群局部挤压技术

新能源汽车底盘副车架检验非常严格，除了多项力学性能测试和X光探伤之外，还有一项非常重要的检验，就是对于图9所示位置进行断面切割并抛光，以判断内部组织是否合格。

图9所示的样件断面切割位置，多数结构壁厚较厚，极易产生气孔、缩孔、内部组织不致密等缺陷，即使采用三级抽真空技术也难以避免。

为了解决这个问题，本项目采用集群局部挤压技术。局部挤压的基本原理是在对应位置增加挤压销，通过油缸推动挤压销对铸件缩孔部位加压，强制补缩，从而获得高品质铸件。

图10是局部挤压示意图。与副车架铸件连接的是挤压套，挤压套内部有挤压销，挤压销由液压油缸

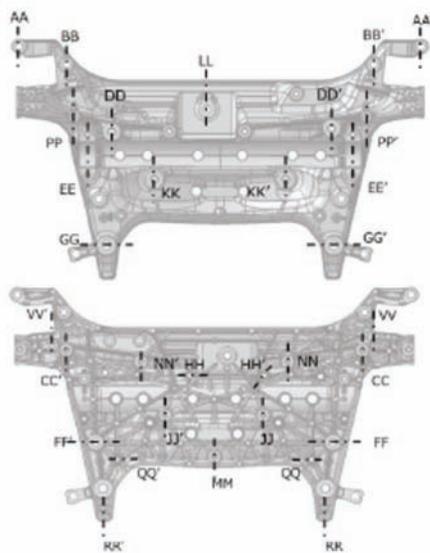


图9 样件断面位置

Fig. 9 Section position of the sample

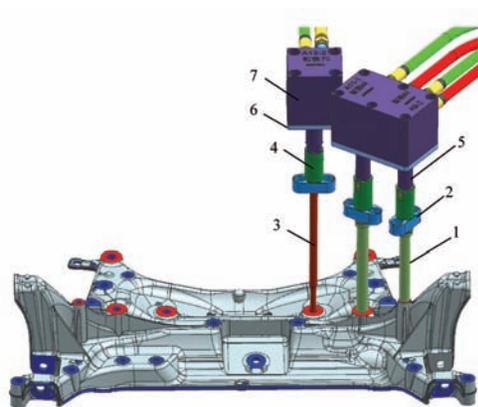
1. 挤压套 2. 压板 3. 挤压销 4. 连接头  
5. 油缸活塞杆 6. 隔热板 7. 液压油缸

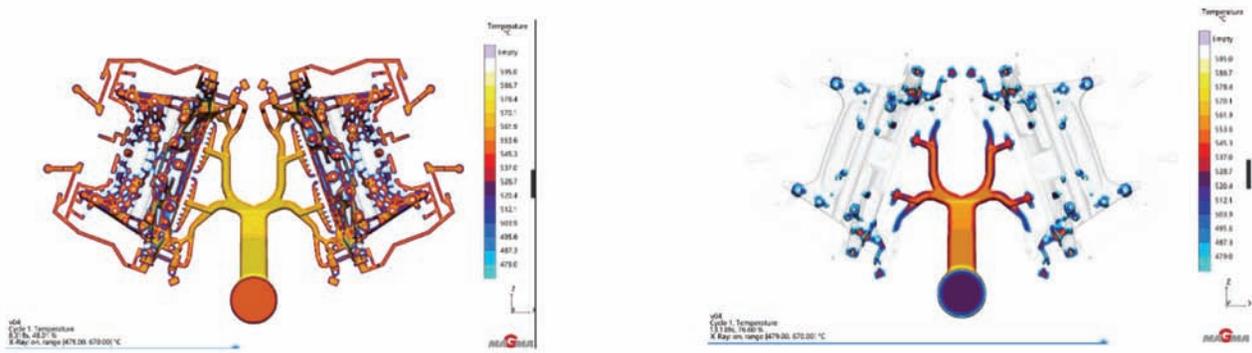
图10 局部挤压示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the local extrusion

驱动，挤压套通过压板固定在模板上。挤压套内部的挤压销通过连接头与液压油缸的活塞杆相连接，活塞杆另一端与液压油缸连接，活塞杆与液压油缸中间设置了隔热板。

每个底盘副车架有8个位置设计了局部挤压装置，这些挤压装置并不是同时启动同时停止，而是根据每个位置与内浇道距离、壁厚以及CAE模拟结果查看铝液的凝固时间确定挤压装置启动时间。图11是凝固时间分别为8.318 s和13.139 s的凝固分析结果。

图12是局部挤压具体位置，表2是每个位置装置启动时间列表。当挤压装置启动时，液压油缸推动活塞杆，活塞杆在连接头内部滑动，同时推动连接头内部的挤压销，挤压销在挤压套内部运动，以达到增压目的。



(1) 8.318 s凝固状态

(2) 13.139 s凝固状态

图11 凝固分析  
Fig. 11 Solidification analysis

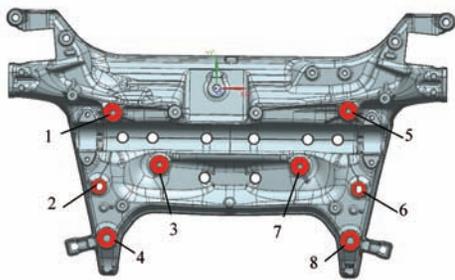


图12 挤压位置  
Fig. 12 Squeeze positions

### 4 试验测试结果

新能源汽车底盘副车架压铸工艺采用了三级抽真空和集群局部挤压等多项一体化压铸新技术，根据产品设计要求对铸件进行洛氏硬度、抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、弯曲试验和内部品质X光探伤等多种试验测试。表3显示了抽样压铸件力学性能测试结果。

X光探伤主要是检验内部组织有无铸孔和夹渣。一般平板部位（最大5 mm），缺陷部位面积最大不得超过0.8 mm<sup>2</sup>；凸台、厚壁部位、加强筋底部和加强筋侧面，缺陷部位面积最大不得超过7 mm<sup>2</sup>。图13是重要位

表2 挤压启动时间  
Table 2 Start times of the squeeze

位置	1	2	3	4	5	6	7	8
启动时间/s	19.125	15.223	14.635	22.550	20.173	18.143	14.684	22.550

表3 力学性能测试结果  
Table 3 Test results of mechanical performances

测试项目	技术要求	样品状态	试验方法	设备型号	单位	检测结果	结论
洛氏硬度	≥HRFW 75	试片（两组）	HES D 3211	HRS-150		78, 79	合格
抗拉强度	≥220	试片（三组）	JIS Z 2241	PDA-5000 CMT5205	MPa	355, 348, 350	合格
屈服强度	≥150	试片（三组）	JIS Z 2241	PDA-5000 CMT5205	MPa	155, 158, 160	合格
断后伸长率	3%以上	试片（三组）	JIS Z 2241	PDA-5000 CMT5205	%	8, 8, 8	合格
弯曲试验	无裂纹	试片（三组）	JIS Z 2343	HRS-150		无裂纹	合格

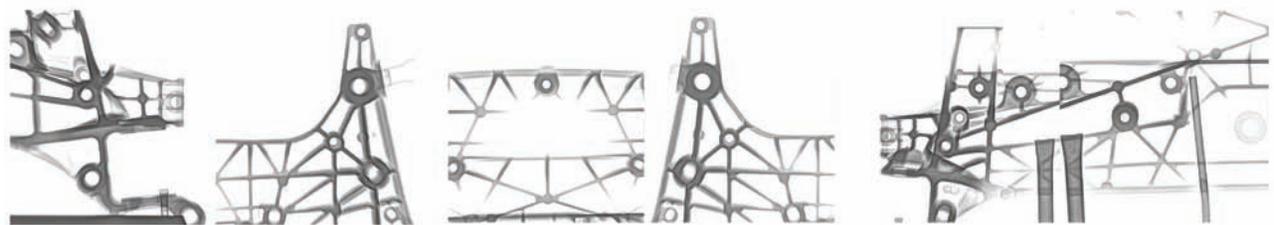


图13 X光探伤结果  
Fig. 13 The results of X-ray inspection

置X光探伤图,结果显示压铸件品质合格。

## 5 结论

(1) 三级抽真空技术有效解决了压铸过程中真空度偏高的问题,真空度能达到 $\leq 15$  kPa。

(2) 集群局部挤压技术利用液压油缸驱动挤压

销,实现了壁厚区域铝液挤压的效果,改善了区域组织结构,有效缩减了缩孔,减少了气孔。

(3) 新能源汽车底盘副车架一体化压铸应用三级抽真空技术和集群局部挤压技术,提升了压铸件品质,提高了生产效率,降低了产品不合格率,产品合格率达到95%以上。

### 参考文献:

- [1] 梁军,周杰,吴亮,等.某汽车铝合金减震塔真空压铸工艺设计与优化[J].中国铸造装备与技术.2023,58(4):69-77.
- [2] 桑卓越,周志明,陈建伟,等.真空压铸铝合金减震塔数值模拟工艺优化及应用[J].特种铸造及有色合金.2022,42(9):1185-1188.
- [3] 黎建养,叶志文,齐劲风.高真空技术在压铸壳体上的研究及应用[J].特种铸造及有色合金.2022,42(2):243-245.
- [4] 罗柏奎.高真空压铸在汽车结构件模具开发中的应用[J].轻工科技.2019,35(5):73-74.
- [5] 崔少朋,李朝兴,苏文平.局部挤压在压铸铝合金变速器壳体上的应用[J].特种铸造及有色合金.2022,42(10):1312-1314.
- [6] 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.
- [7] 朱洪军,侯丽彬.局部挤压技术在MQ200变速器壳体上的应用[J].铸造.2020,69(6):602-605.

---

# Research and Application of Integrated Die-Casting Technology for New Energy Vehicle Chassis Subframe

XIA Tian<sup>1</sup>, WU Shi-yu<sup>2</sup>

(1. Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, Zhejiang, China; 2. Ningbo Ruili Machinery Co., Ltd., Ningbo 315800, Zhejiang, China)

### Abstract:

The chassis subframe of new energy vehicles has a large size, complex structure and high mechanical performance requirements. The conventional integrated die-casting process cannot meet the design requirements. Three stage vacuum pumping technology improved the vacuum degree of the mold cavity. The use of cluster local extrusion technology has improved the regional organizational structure, effectively reduced shrinkage and porosity. Production practice certificated that the application of two technologies has improved the quality of the die castings, improved production efficiency, and achieved a product qualification rate of over 95%.

### Key words:

vehicle chassis subframe; integrated die casting; three stage vacuum pumping; local extrusion

---