

# 铝合金副车架开发现状及 未来发展趋势

韩星<sup>1,2</sup>, 刘超<sup>1</sup>, 陈武<sup>2</sup>, 樊立军<sup>2</sup>, 吴玉<sup>2</sup>,  
耿卓<sup>2</sup>, 张继明<sup>2</sup>, 莫宇飞<sup>1</sup>, 周卫东<sup>1</sup>

(1. 山东宏桥轻量化科技有限公司, 山东滨州 256200; 2. 山东宏文汽车底盘系统有限公司, 山东滨州 256200)

**摘要:** 作为簧下质量, 副车架轻量化可起到事半功倍的效果, 在众多材料、结构、工艺选择中, 铝合金整体空腔低压铸造副车架具备较强竞争力。本文从结构特征、工艺流程、创新技术等方面, 介绍了整体空腔副车架的优势及面临的挑战, 重点分析了后处理和机加工两个生产节拍瓶颈、低压铸造和热处理两个产品良率瓶颈技术, 并给出解决方案。最后, 预测了未来副车架的发展方向 and 竞争格局。

**关键词:** 副车架; 铝合金; 整体空腔; 瓶颈; 竞争格局

近十年来, 在能源危机和政策法规的驱使下, 新能源汽车蓬勃发展, 据统计, 自2014—2023年, 新能源汽车渗透率由0.3%猛增至31.6%<sup>[1]</sup>。然而, 新能源汽车, 特别是纯电动汽车, 面临充电和续航的巨大挑战, 由此轻量化工作被提到了前所未有的高度。汽车的质量可以分为两大部分, 即簧上质量与簧下质量<sup>[2]</sup>, 簧上质量指由悬架系统及弹性元件所支撑的重量, 包括车架、发动机、变速箱和乘客等; 簧下质量指不由悬架系统弹性元件所支撑的部分, 包括车轮、悬架、避震弹簧和减震器等部件, 作为悬架的核心零部件, 副车架轻量化可起到事半功倍的效果。

副车架是前后车桥的骨架, 作为前后车桥的组成部分, 支承前后车桥和悬挂的支架, 使车桥和悬挂通过它再与“正车架”相连, 所以称为“副架”<sup>[3]</sup>。副车架主要用于多采用承载式车身的乘用车, 可实现左右悬架的连接, 使其成为一个整体, 进而提高悬架系统的连接刚度, 同时阻隔振动和噪声, 减少其直接进入车厢, 改善NVH (即噪声Noise、振动Vibration与声振粗糙度Harshness)<sup>[4]</sup>, 另外, 副车架还可以增加三个承载路径<sup>[5]</sup>: ①防撞梁→前纵梁→纵梁延伸梁; ②纵梁地板延伸→中央通道门槛梁; ③前纵梁→A柱→车顶梁, 如图1所示。

## 作者简介:

韩星 (1987-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为铝合金零部件开发。  
电话: 13889843063, E-mail: hx\_13889843063@163.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025)

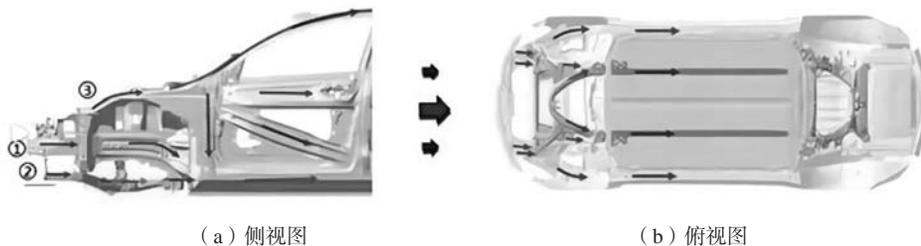
04-0428-07

## 基金项目:

山东省企业技术创新项目  
(2024537160000230)。

## 收稿日期:

2024-12-05 收到初稿,  
2025-01-21 收到修订稿。



(a) 侧视图

(b) 俯视图

图1 副车架所传递的承载路径

Fig. 1 Load path transmitted by the subframe

副车架主要材质为钢铁和铝合金, 随着汽车轻量化逐步推进和新能源汽车的发展, 同时受限于成本因素, 铝合金副车架的应用呈爆发式的增长。铝合金副车架成

形工艺涵盖冲压、液涨、型材焊接、压铸、低压铸造和钢铝连接六种工艺及其组合工艺,铝合金副车架结构又分为分体焊接、整体实心铸造和整体空腔铸造<sup>[6]</sup>。

## 1 整体空腔副车架及工艺特征

### 1.1 整体空腔副车架介绍

基于产品工况、轻量化、碳排放和价格,整体空腔铸造优势明显<sup>[7]</sup>。首先,在产品开发前期,结合受力工况、对手件包络空间、铸造和加工工艺等信息,进行拓扑优化设计,最大程度实现轻量化;其次,截面积不变的情况下,薄壁空腔结构的构件拥有更高的相对刚度和相对强度<sup>[8]</sup>;第三,相对分体焊接副车架,整体铸造副车架无焊缝,避免了焊缝热影响区性能下降问题;第四,整体铸造成形由冲压焊接的几十道工序

和分体焊接的数道工序缩减为单次一体成形,使开发流程大幅度缩短,供应链管控显著简化。

整体空腔副车架一般采用低压铸造工艺一体成形,如图2所示,其中蓝色为机加工表面、红色为浇冒口位置、褐色为产品内表面、灰色为产品外表面,其具备鲜明的产品特征:(1)大尺寸,一般为(1 000~1 200) mm×(800~1 000) mm×(300~500) mm;(2)薄壁,基础壁厚,多为4~5 mm,部分为3.5 mm;(3)空腔,需要大尺寸砂芯,制芯难度提升;(4)复杂截面,壁厚变化较大,热节较多<sup>[9]</sup>;(5)加工特征众多,X、Y、Z三个方向六个面均需加工且带有一定角度,超过20把刀具;(6)底盘件,一类安全件,失效零容忍。六大特征对整个制造流程的各个工序提出了巨大挑战<sup>[10]</sup>。

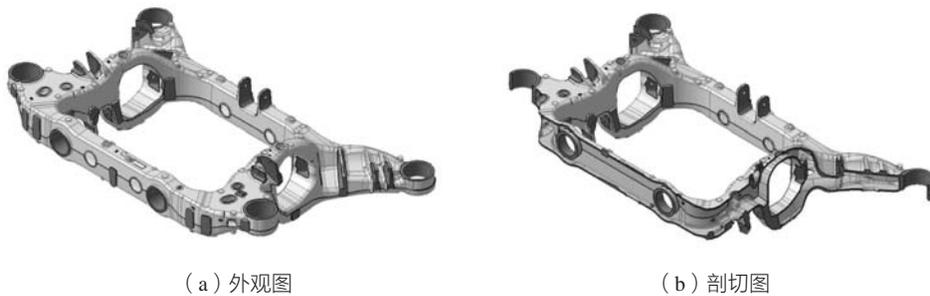


图2 整体空腔副车架产品特征

Fig. 2 Characteristics of the integral cavity subframe

### 1.2 整体空腔副车架制造流程

整体空腔副车架的制造流程主要包含准备、低压

铸造、后清理、热处理和后处理五大工序模块,如图3所示。

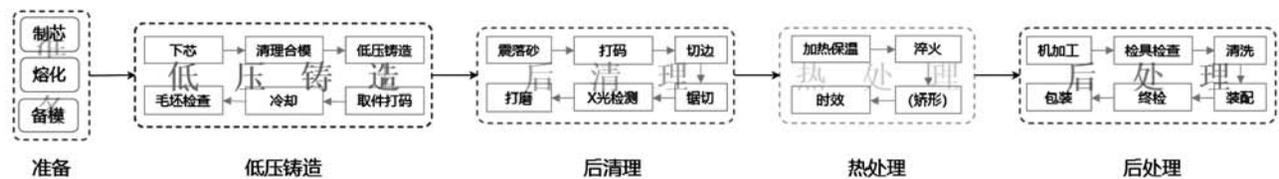


图3 整体空腔副车架制造流程

Fig. 3 Manufacturing process of the integral cavity subframe

(1) 准备: 主要包括制芯、熔化和备模三部分。制芯又分为无机和有机,虽然成本高,但环境友好型的无机砂芯目前逐步成为主流;熔化一般采用铝液直供或集中熔化方式,材料为A356、A356.2、AlSi<sub>7</sub>Mg、ZL101A,回炉料比例一般不超过40%;备模主要涵盖表面喷涂、模具保养和模具维修等工作。

(2) 低压铸造: 核心是铸造工艺和铸造模具。铸造工艺的设定和模具结构设计直接影响产品合格率(疏松、气孔等内部缺陷,变形、冷隔等表面缺

陷),铸造模具的温度平衡设计决定了生产节拍。

(3) 后清理: 包括震落砂、去浇冒口、X光检测和打磨,核心是生产节拍。震落砂一般要求残砂量小于2%,否则会影响热处理和机加工;去浇冒口重点关注效率和浇口残留,效率取决于模具和锯切方案设计,浇口残留一般不超过3 mm;X光检测,可采用自动判定+部分介入的方式,以提高准确率和效率。

(4) 热处理: 包括加热保温、淬火(校形)和时效。重点关注淬火变形问题,需从产品设计、模具设

计和料框设计等多方面解决变形问题，校形治标不治本，且易产生裂纹。

(5) 后处理：主要由机加工、清洗和装配等组成，重点为机加工工艺。基于多种因素考量，在工序数量和机床轴数存在多种组合，主流工艺为：两序新成（卧式摇篮五轴），整体及格节拍为30 min。

## 2 整体空腔副车架面临的困境与挑战

目前，采用铝合金低压铸造工艺制造整体空腔副车架已成为主机厂的重要选择之一，特别对于造车新势力或传统主机厂新车型平台，其已经成为首选<sup>[11]</sup>。然而，整体空腔副车架的制造过程存在由于产品良率和生产效率较低而引起的成本高居不下的困境，同时面临来自多种材料、多种结构和多种工艺的挑战。

### 2.1 整体空腔副车架自身困境

在汽车轻量化过程中，整体空腔副车架的推广与应用遇到最大阻力之一就是成本远高于钢制副车架，产品良率较低、生产节拍较长、材料价格及利用率、产线柔性及订单量等因素均可导致生产成本上升。

#### 2.1.1 产品良率

整体空腔副车架的不良品主要来自内部冶金缺陷和产品变形，分别对应低压铸造工序和热处理工序。由于产品尺寸相对较大，结构较复杂，铸件壁厚不同，铸造过程中易出现气孔、缩松、夹渣及裂纹等缺陷<sup>[12]</sup>，如图4所示，而这些缺陷正是疲劳失效的裂纹源，是底盘结构件（一类安全件）所不允许的<sup>[13]</sup>。一般而言，底盘结构件的缺陷等级要求为关键区域二

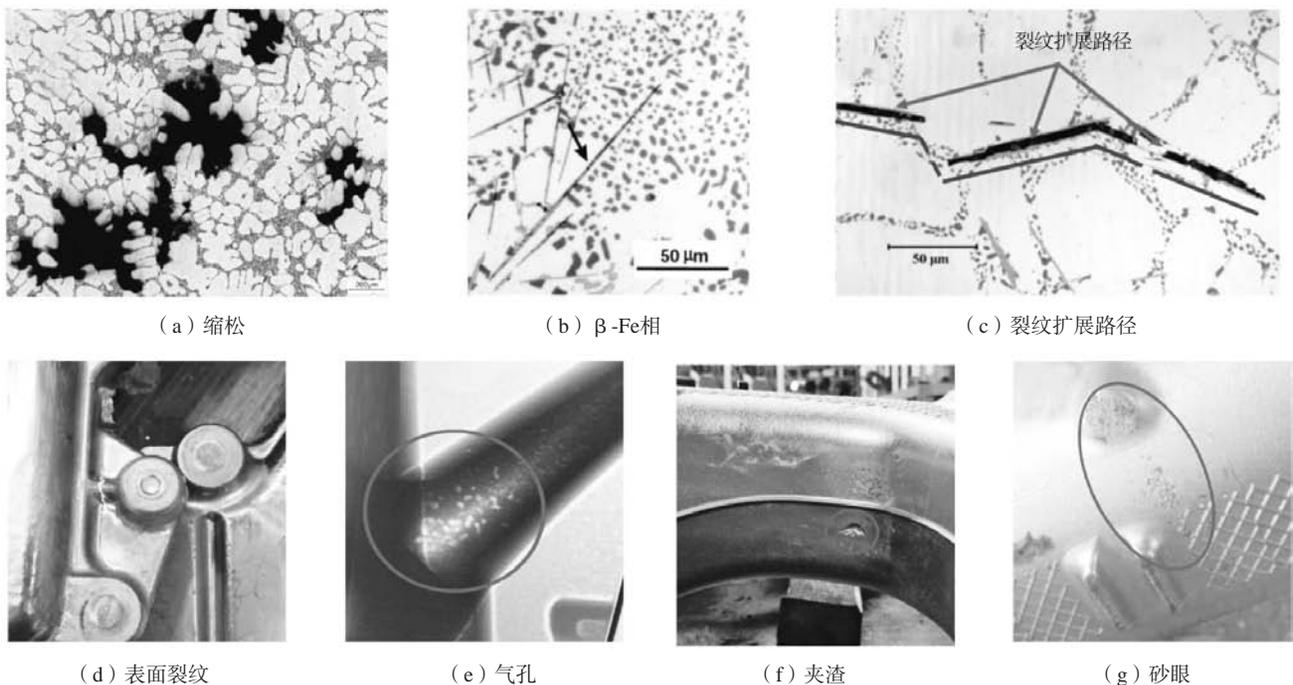


图4 铸造缺陷  
Fig. 4 Casting defects

级、非关键区域四级，铝铸件内部缺陷可通过熔体净化处理、模具温度控制、浇冒口设计及工艺参数优化等手段得到有效改善。

产品变形，如图5所示，包括铸造变形和热处理变形，是整体空腔副车架面临的又一大难题。整体空腔副车架壁厚较大、刚度较高，大变形量，校形困难，易产生裂纹，从而导致产品报废<sup>[14]</sup>。另外，铸件变形及变形量波动，还会影响机加工工艺，例如装夹、撞刀、过切和切不足等。目前行业内主要从两个角度解决变形问题，一是通过模具热平衡设计、料框工装设

计结合淬火入水姿态调整来降低内应力，二是人工或自动机械校形的补救措施。

校形方法治标不治本，解决产品变形问题还需从变形本质出发。铝铸件变形源自两方面，即外界因素和内在原因。外界因素包括开模拉力、顶杆力、起模包紧力、堆叠压力和磕碰等，可通过铸造工艺、模具设计和生产管理途径来消除。内在原因是指内应力，即在某一温度下，铝铸件局部所受应力大于该温度下屈服强度而产生变形，该内应力主要来自凝固过程收缩和热处理过程冷却不均。在铸造过程中，不同

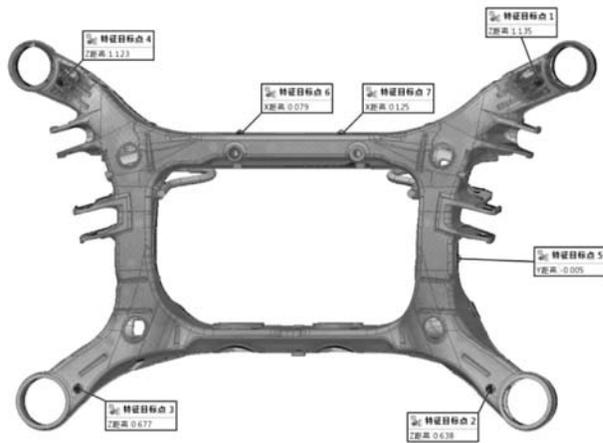


图5 整体空腔副车架变形量校对

Fig. 5 Verification of the deformation of the integral cavity subframe

部位的冷却顺序和冷却速率均存在差异，相应的收缩率也不同，进而产生内应力，当内应力超过材料在此温度下的屈服极限时，产生变形超差的不良品。热处理过程中，铸件铸造凝固产生的内应力会在加热时得到释放，铸件会因此时强度显著降低而产生变形；在保温后，近100 °C/min的淬火工艺会使结构复杂壁厚不均的副车架产生更大的变形，另外空腔铸件内外表面的冷却速度差异明显也会造成变形。

整体空腔副车架的合格率一直是业内难题，需要设计、材料、工艺、设备和管理相互协作，才能达到理想状态，进而降低成本，提高竞争力。

### 2.1.2 生产节拍

整体空腔副车架的生产工艺包括制芯、熔化、铸造、后处理、X光检测、热处理、荧光检测、机加工和装配等十几道工序，其中低压铸造、后处理和机加工耗时较长，往往成为生产过程的瓶颈。

整体空腔副车架低压铸造节拍约为360~420 s/件，节拍较长是由产品结构 and 低压铸造工艺特征决定的，一般均通过增加设备来提高产能。

为了避免和消除卷气、疏松和浇不足等缺陷，低压铸造工艺常采用多浇口和多冒口，如图6所示，后处理内容就是去除砂芯、浇口、冒口以及飞边，具体包括震砂、落砂、切边、带锯切、大/小圆盘锯切和打磨等工序，节拍约为240~300 s/件，由于后处理工序涉及多个设备<sup>[15]</sup>，假如通过增加设备来提高产能，会显著增加设备投资，因此震落一体机代替震砂机 and 落砂机、综合锯站代替多个锯床的方案更具性价比。

副车架机加工会涉及六个面、超过20把刀具，具有加工点位多和加工量大的特征，且残砂影响刀具寿

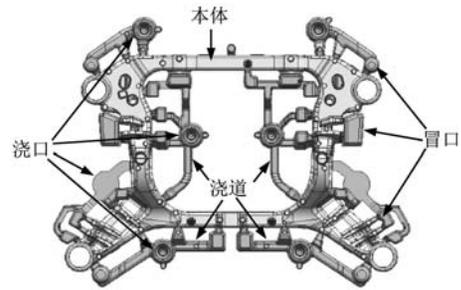


图6 某款整体空腔副车架浇冒口方案

Fig. 6 Casting scheme for a certain integral cavity subframe

命，如图7所示，其中蓝色为机加工点位、红色为浇冒口（需锯切）。另外毛坯尺寸波动较大，对机加工工艺窗口有较高要求。目前行业内主要采用龙门五轴/两序、卧式五轴+旋转工作台/两序、卧式摇篮五轴/两序、卧式摇篮五轴/一序等方案，节拍约为20~60 min，最快可以做到10 min。

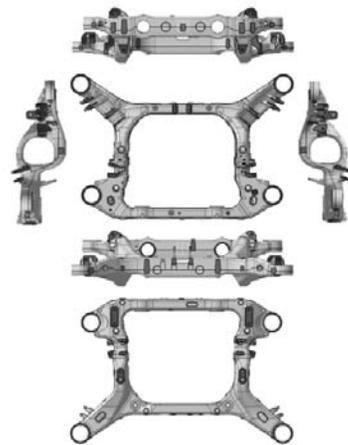


图7 整体空腔副车架机加点位

Fig. 7 Machine positions of the integral cavity subframe

### 2.1.3 其他因素

产品合格率和生产效率是整体空腔副车架生产面临的最棘手问题，前者直接影响生产成本，后者直接影响订单交货期。除此之外，材料利用率和产线兼容性也是不可忽视的重要因素。

相对传统燃油车，新能源汽车的发展呈现出高速迭代更新、差异化配置的特点，反应到副车架等构件上体现为多品种、小批量，这就对产线的兼容性提出较高要求，而产线的兼容性与效率往往是成反比的。

## 2.2 多种技术方案的挑战

在整体空腔副车架主导市场的同时，科研技术人

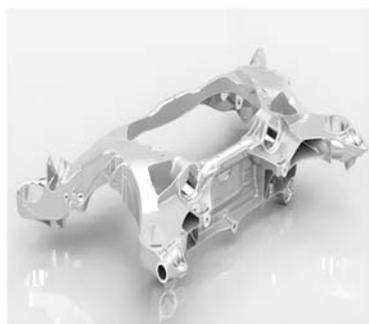
员不断进行研发和产业化工作，将众多新技术、新工艺应用到副车架生产制造中，如图8所示。

随着一体化压铸技术的发展，高真空压铸技术日趋成熟，德国汉特曼金属铸造公司对原有模型进行整体重建和开发、计算和模拟，通过集成到铸造过程中的中空型材创造了一个封闭的空腔，与上壳体的拓扑优化设计相结合，实现了副车架的一体式压铸设计，满足了所有强度、刚度和NVH的要求，并实现了量产<sup>[16]</sup>，如图8（a）所示。与整体空腔低压铸造副车架相比，具有进一步的轻量化和高效生产的优势<sup>[17]</sup>。

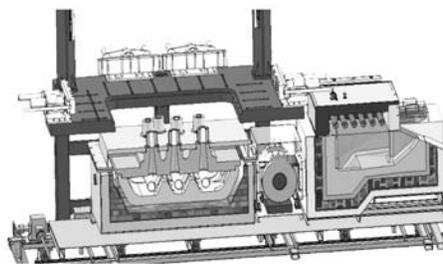
电磁驱动铸造是采用电场与磁场交互作用产生的电磁力（替代低压铸造工艺中气压）驱动铝液定向移动，从而成形铸件的铸造技术<sup>[18]</sup>，如图8（b）所示。电磁驱动铸造技术具有精准的液面控制、材料利用率高（可达70%）、无升液管低耗材等优点，适合超大尺寸铝铸件的制备，目前已在整体空腔副车架和电池框架实现了量产，并对一体式下车体进行了尝试。

宇部兴产机械集团开发了Hybrid Fill Casting（简称HFC技术）<sup>[19]</sup>，采用气体和液压两种加压方式对模具模腔内金属液充填及凝固进行压挤双控铸造成形，如图8（c）所示。HFC技术可以有效抑制熔体温度的下降，通过中心销以及局部挤压销对充填在模具内的熔体进行加压，使其在模具表面持续保持压力下急速凝固，能够得到细微的组织，与低压铸造工艺比较，采用HFC技术可获得具有良好冶金质量（无气孔、疏松等缺陷）和机械特性（拉伸强度、疲劳强度），进而实现最大程度轻量化。HFC技术在铝合金副车架产品上具有广阔的应用空间。

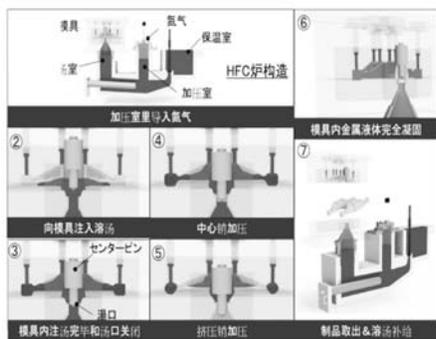
另外，面对多品种、小批量或中小批量的大型铸件产品，采用3D打印砂型和砂芯<sup>[20]</sup>，如图8（d）所示，进行低压铸造，以低成本获得铝铸件，解决了新产品开发阶段的高昂开发费用问题，也能灵活应对产品开发。



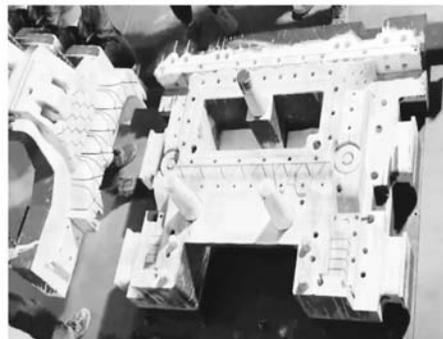
（a）真空铸造



（b）电磁驱动铸造



（c）HFC技术



（d）3D打印砂型/砂芯铸造

图8 整体式副车架创新技术

Fig. 8 Innovative technology of the integral subframe

### 2.3 整体空腔副车架竞争策略

据中国产业信息网数据，2020年铝合金副车架渗透率仅为8%，预计2025年副车架渗透率将会超过30%，其中铝合金整体空腔副车架分别为5%和28%，未来还有较大的市场空间，然而能否抢占广阔的市场

空间取决于其竞争策略。可以从三个维度对铝合金整体空腔副车架进行分析，制定竞争策略，即材料、工艺和结构。

材料端，在汽车行业应用中，铝合金最突出的两大优势是良好成形性和极高回收率。铝合金几乎可以

实现任意复杂结构的精密制造,包括铸造、挤压、锻造和轧制等多种成形工艺,同时可以保持较小壁厚;铝合金全生命周期回收率可达95%以上,其中重熔过程烧损可以做到1%以下,这就极大拉动了铝合金的循环再生,而再生铝的批量应用会显著降低成本和碳排放<sup>[21]</sup>。

工艺端,采用低压铸造工艺,可以保证铝液平稳填充,内部冶金质量较高,可获得较为均匀温度的力学性能(抗拉强度近280~320 MPa,屈服强度220~250 MPa,伸长率6%~8%),同时保持底盘安全件较高的疲劳性能。

结构端,整体空腔结构有利于实现短流程制造和提供产品高度,传统副车架往往包含冲压/挤压、机加工、焊接和二次机加工等多个工序,整体铸造方案可缩短为铸造和机加工两个工序,显著减少工序数量,降低风险管控点和生产成本。而空腔结构则有高刚度和高强度优点,如图9所示,截面面积不变,设计实心棒、工字形、厚壁圆管、薄壁圆管、厚壁方管和薄壁方管六种不同截面形状,并以实心棒为基准计算其他截面形状的相对刚度和相对强度,计算结果表明,薄壁方管具有最高的相对刚度和相对强度,即整体空腔副车架的结构优势。

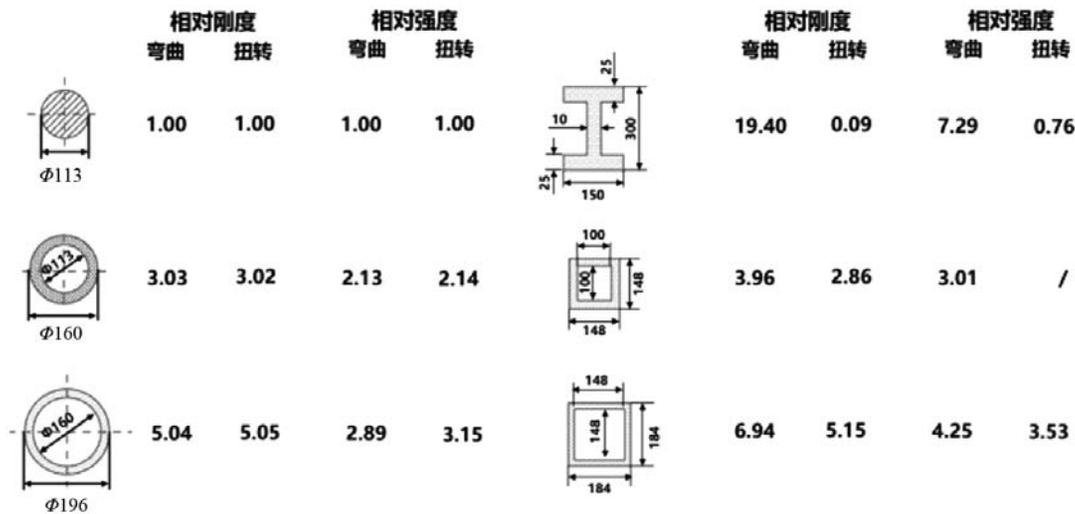


图9 相同截面积时不同截面形状的相对刚度和相对强度

Fig. 9 Relative stiffness and relative strength of different cross-sectional shapes with the same cross-sectional area

### 3 结束语

在新能源汽车不断发力与渗透下,铝合金副车架未来会有更广阔的市场。相对而言,整体空腔结构副

车架优势明显,更具竞争力,但需要持续优化结构、工艺,解决良率和节拍瓶颈,以提升产品合格率和生产节拍,进而降低成本。

#### 参考文献:

- [1] 姜佳辰,梅语欣,潘姚瑶,等.新能源汽车的发展评估与销量预测[J].台州学院学报,2024,46(3):9-15.
- [2] 王洪佳.簧下质量对车辆性能的影响[D].太原:中北大学,2015.
- [3] 王勇.汽车前副车架轻量化设计的研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [4] 王华杰.汽车底盘焊缝设计技术研究[D].镇江:江苏科技大学,2013.
- [5] 苏辰,霍俊焱,刘鹏,等.柔接后副车架NVH特性研究与管控方法[J].智能制造,2023(S1):150-154.
- [6] 陈来,王占坤,邹纯,等.汽车用铝合金副车架成形工艺及应用现状[J].铸造,2019,68(4):390-395.
- [7] 孟祥超,孙有平,何江美,等.铸造铝合金汽车副车架的显微组织与力学性能[J].兵器材料科学与工程,2023,46(3):22-27.
- [8] 华睿,李铁柱,谢元福.断面结构刚度性能参数化应用[J].汽车实用技术,2022,47(3):104-108.
- [9] 马小军,邹书云,刘海滨,等.铝合金副车架铸造工艺分析及结构优化[J].铸造,2024,73(11):1597-1605.
- [10] 孙志远,刘蕴博,籍龙慧,等.铝合金副车架的轻量化结构设计及试验验证[J].汽车零部件,2022(10):11-16.

- [11] 孙超. 铝合金副车架在电动汽车中应用的必然性 [J]. 科学技术创新, 2018 (11): 170-171.
- [12] 韩伟, 李冬冬, 杨安, 等. 电动汽车铝合金副车架低压铸造凝固质量优化研究 [J]. 铸造, 2023, 72 (6): 731-736.
- [13] 张云峰, 丛培军, 张鹏, 等. 重力倾转铸造工艺在铝合金底盘结构件上的应用 [J]. 铸造, 2021, 70 (8): 980-985.
- [14] 孙亮. 基于精密铸造技术的一体化副车架轻量化设计 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- [15] 章旭霞. 副车架低压铸造及后处理生产线 [C]// 2020中国铸造活动周论文集, 合肥, 2020: 347.
- [16] 新能源汽车结构件迎来新创举, 汉特曼铝合金一体式后副车架受追捧 [EB/OL]. (2021-06-11) <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1702257242592578683&wfr=spider&for=pc>.
- [17] 夏天, 吴时雨. 新能源汽车底盘副车架一体化压铸技术研发与应用 [J]. 铸造, 2024, 73 (12): 1751-1756.
- [18] 中国铸造协会. 大型中空铝合金汽车车身构件电磁泵反重力铸造技术填补国内空白 [J]. 铸造工程, 2022, 46 (3): 66.
- [19] 三吉博晃, 魏啟金, 袁海波, 等. 高强韧铝合金挤压双控铸造工艺及装备开发 [J]. 铸造工程, 2024, 48 (2): 14-19.
- [20] 李泽华, 冯志军, 苏鑫, 等. 一体式空心副车架快速试制工艺 [J]. 铸造, 2019, 68 (5): 470-474.
- [21] 葛青, 任孝旻, 李志刚, 等. 零碳铝、低碳铝、绿色铝、绿电铝概念辨析 [J]. 世界有色金属, 2023 (2): 193-195.

---

## Development Status and Future Trends of Aluminum Alloy Subframe

HAN Xing<sup>1,2</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>, CHEN Wu<sup>2</sup>, FAN Li-jun<sup>2</sup>, WU Yu<sup>2</sup>, GENG Zhuo<sup>2</sup>, ZHANG Ji-ming<sup>2</sup>, MO Yu-fei<sup>1</sup>, ZHOU Wei-dong<sup>1</sup>

(1. Shandong Hongqiao Lightweight Technology Co., Ltd., Binzhou 256200, Shandong, China; 2. Shandong Hongwen Automotive Chassis System Co., Ltd., Binzhou 256200, Shandong, China)

### Abstract:

As an unsprung mass, lightweight subframe can achieve twice the result with half the effort. Among numerous choices of material, structure, and process, aluminum alloy integral cavity low-pressure casting has strong competitiveness for the subframe. This paper introduced the advantages and challenges of the integral cavity subframe from the aspects of structural characteristics, process flow, and innovative technology. It focused on analyzing the production cycle bottlenecks of post-processing and machining, as well as the qualification rate bottlenecks of low-pressure casting and heat treatment technologies, and provided solutions. Finally, the future development direction and competitive landscape of the subframe were predicted.

### Key words:

subframe; aluminium alloy; integral cavity; bottleneck; competitive landscape

---