

汽车用铝合金副车架成形工艺及应用现状

陈来^{1,2}, 王占坤¹, 邹纯¹, 钟鼓^{1,2}

(1. 中铝材料应用研究院有限公司苏州分公司, 江苏苏州 215000;

2. 苏州有色金属研究院有限公司, 江苏苏州 215000)

摘要: 汽车轻量化是实现节能减排的重要途径, 零部件的“以铝代钢”仍然是当前汽车行业实现轻量化的主要手段。副车架作为汽车底盘悬挂系统中的重要结构件, 将其铝制化可大大提高汽车轻量化程度。本文中简要介绍了铝合金副车架的成形工艺及其应用现状, 涵盖了铸造成形、液压成形、冲压成形+挤压成形+焊接、铸造成形+挤压成形/冲压成形+焊接和钢铝连接5种主流的成形方式, 并对这些成形工艺的优缺点进行了对比分析。

关键词: 铝合金; 轻量化; 副车架; 成形工艺

作者简介:

陈来(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事汽车底盘轻量化研究。电话: 0512-88856512, E-mail: chen_lai@sinr.cn
通讯作者:
钟鼓, 男, 博士, 高级工程师。电话: 0512-88856530, E-mail: zhong_g@sinr.cn

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)04-0390-06

基金项目:

国家重点研发计划“新能源汽车”专项“轻量化纯电动轿车集成开发技术”项目(2016YFB0101700);
“轻质材料成形工艺及装配技术研究”课题(2016YFB0101704)。

收稿日期:

2019-01-04 收到初稿,
2019-01-28 收到修订稿。

节能减排是目前世界发展的重要主题, 轻量化是实现汽车节能减排的重要途径, 也是当今世界汽车创新工程的技术发展方向。汽车所有能耗的60%来自于自重, 重量每减少10%, 能耗可降低10%~15%, 燃油汽车燃油效率可提升6%~8%, 电动汽车电量可节省4%~5%。相比于传统钢铁材料, 铝合金具有密度小(约为钢的1/3)、重量轻、成形加工性能优良、耐腐蚀性能好、易于回收再利用、在发生碰撞时会比钢铁材料吸收更多的碰撞能量等优点, 在汽车上使用铝合金来替代钢铁材料, 成为实现汽车轻量化的有效途径。副车架是汽车底盘悬挂系统中的关键部件, 单件钢制副车架重量通常为10~25 kg, 采用铝制副车架能减重30%~50%, 轻量化效果显著。如凯迪拉克CTS采用的铝合金副车架, 相比较传统的钢制副车架重量减少约40%^[1]。2015年北美汽车工业协会报告指出, 铝合金在副车架上的应用在未来几年内将会大幅提升^[2]。本文通过大量的调研, 就汽车铝合金副车架的应用现状和成形工艺作简要介绍。

1 汽车副车架简介

副车架是汽车底盘上的一个结构件, 用于连接悬架装置和车身。副车架并非真正的车架, 而是辅助车架, 用来支撑车桥和悬挂的总成支架, 它是汽车上承载发动机和车轴的特殊功能结构件。

副车架的主要作用是减弱路面和车轮传给车身的冲击, 衰减由车轮和车身传递的力和力矩所引起的系统振动, 阻隔震动和噪声进入驾驶室, 提高汽车的操纵稳定性及悬挂系统的连接刚度。在汽车上安装副车架, 可以明显降低来自地面和发动机的震动, 提高汽车的安全性和舒适性^[3]。传统的副车架一般是通过钢板冲压变形后焊接而成, 该工艺由于生产简单方便, 被各大主机厂使用。随着对汽车轻量化要求的提高, 以及追求车重减轻后所带来的能耗效益的最大化, 各大主机厂逐渐开发了铝合金副车架。例如, 宝马5系车身上即使用了铝合金副车架总成, 通过螺栓连接固定在汽车车身上, 如图1所示^[4]。

2 汽车副车架铝制化现状

欧盟最先开始使用铝合金代替钢来生产汽车副车架, 经过几十年的发展, 欧



图1 宝马5系车身上使用的铝合金前后副车架

Fig. 1 BMW 5 series model with aluminum front and rear axle subframes

盟在铝合金副车架应用方面仍领先于其他国家和地区，欧盟、北美和日本铝合金副车架使用权重比为1.00 : 0.19 : 0.18。铝合金副车架最初主要应用在高档轿车上，随着副车架生产技术的成熟和生产工艺的多样性发展，铝制副车架在中低档轿车上的应用也逐渐增加。表1所示为2016年欧洲不同档次乘用车上的用铝量以及副车架用铝量所占比例^[1]。从表中可以看出，随着乘用车档次的提高，副车架用铝量和副车架用铝量所占百分比显著提高，尤其是在C级、D级、E级车，采用了全铝合金悬架系统，E级车副车架用铝量达到17.8 kg。在A级、B级车中，受限于汽车档次及价格因素，副车架的铝制化水平仍然较低。

与国外铝合金副车架研发和应用情况相比，国内铝合金副车架研发相对落后。铝合金副车架结构设计主要依靠引进国外的研发成果进行适应性改造，自主创新能力较弱。在生产方面，国内的铝合金副车架主要依赖进口以及国外零部件企业在中国的工厂。近年来，随着国内供应商技术及装备水平的进步以及轻量化、新能源汽车市场的蓬勃发展，在铝合金副车架的设计、加工制造方面有了较大进步。广东鸿泰精密铸造有限公司最先在国内开发成功铝合金后副车架。之后，国内的零部件供应商如山东丛林、辽宁忠旺、上海汇众、安阳强基等也相继开发了一些铝合金副车架，其成形方式涵盖了型材焊接、铸件、板材件焊接等形式，但这些产品在市场车型上应用仍相对较少。

3 铝合金副车架成形工艺简介

铝合金副车架的成形工艺可分为铸造成形、冲压成形、液压成形、挤压成形四大类。然而，由于副车架结构复杂，单一工艺往往难以满足成形要求。铝合

表1 2016年欧洲汽车用铝制副车架所占比重
Table 1 The proportion of aluminum subframes in European automotive in 2016^[1]

汽车等级	总用铝量/kg	副车架用铝占比/%	副车架用铝重量/kg
A级车	74.4	0.5	0.372
B级车	97.4	2	1.948
C级车	133.0	7	9.31
D级车	199.2	8	15.936
E级车	356	5	17.8

金副车架的生产通常采用多种工艺成形，如铸造成形+挤压成形/弯曲+焊接工艺、挤压成形/液压成形+板材冲压+焊接工艺、管型材+复杂截面型材+焊接工艺等。

3.1 铸造成形工艺

铸造成形是铝合金副车架生产的主流工艺，相对于挤压成形、冲压成形等工艺，铸造方法可以生产形状更加复杂的薄壁零件，且一次成形，生产效率高，后续机加工和装配工序少，成本低廉，因此，在铝合金副车架生产上被广泛使用。根据副车架铸件生产铸造方式的不同，铸造成形工艺可分为：金属型重力铸造、低压铸造和高真空压铸等。

在汽车零部件铸造结构件中，低压铸件大约占比61%。低压铸造工艺在铝合金副车架的生产中被广泛应用，它是反重力铸造的一种形式，其原理为：对密闭保温炉内金属液表面施加0.1~0.5 MPa的空气压力或惰性气体压力，金属液通过浸放在液面以下的升液管，被压进保温炉上方的模具内，金属液从型腔的下部慢慢开始充填，保持一段时间的压力后凝固。通过该工艺可获得形状复杂的副车架支架结构和整体式副车架。由于金属液在压力作用下凝固，组织相对于普通

的金属型铸件和砂型铸件更加致密，力学性能更高，且成本低廉，被国内外各汽车企业所认可。低压铸造常用的铝合金为AlSi7Mg合金，该合金具有流动性好、无热裂倾向、线收缩小、气密性好等优点，其低压铸件抗拉强度可达到290 MPa以上，伸长率可达到8%以上。图2给出了部分低压铸造工艺成形的副车架。现在采用低压铸造工艺成形的铝合金副车架的车型有凯迪拉克CTS、特斯拉MODELS、大众途观、奥迪Q3、路虎揽胜和广汽传祺等。

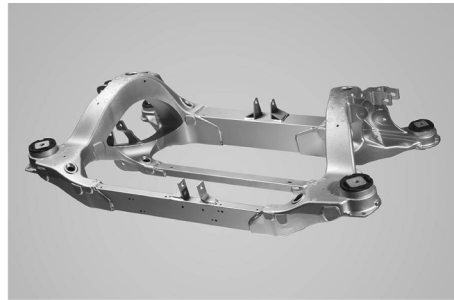
与低压铸造相对应的是高压铸造，通常简称为压铸，其原理是将金属液倒入压室，然后压射杆将压室中的金属液高速推入浇道和型腔，并使其在高压下凝固，形成铸件。高压、高速是高压铸造的主要特点，填充时金属液的流动速度通常在10~50 m/s，有的可以达到80 m/s；金属液凝固时承受的压力高达40~120 MPa，金属液填充型腔的时间极短，直接成形的薄壁结构件具有表面光洁度好、尺寸稳定等优点。但由于高压铸造时金属液高速充填型腔的过程中容易卷入气体，使得生产的铸件内部气孔多，无法进行热处理，产品伸长率很低，在应用上受到限制。高真空压铸是在普通压铸的基础上，采用辅助的高真空控制系统、真空泵、真空截止阀等装置，在金属液填充模具型腔之前，将型腔中的气体抽出，使模具型腔中形成

较高的真空度（ < 100 mbar），并保持至填充结束。华中科技大学与广东鸿泰合作，开发了国内第一款高真空压铸铝合金副车架，其抗拉强度可达240 MPa，屈服强度140 MPa，被广汽传祺批量应用^[5]。高真空压铸工艺可有效避免充型卷气，得到的铸件致密度高，可进行热处理和焊接，铸件力学性能好，伸长率高，受到各大主机厂重视。菲亚特、保时捷卡宴、宝马4/5/6系车型上都安装有高真空压铸铝合金副车架。图3所示为部分高真空压铸铝合金副车架实例^[6]。

金属型重力铸造也是生产副车架的一种常用铸造工艺。它是在重力的作用下，金属液通过浇道系统进入金属模并凝固成形的工艺方法。该工艺具有对设备要求低、前期投资小（约为低压铸造的50%）、较低压铸造产品价格低、可通过设计砂芯结构生产形状十分复杂的零件等优点。常见的重力铸造铝合金材料为Al-Si系，尤其以AlSi7Mg合金应用居多。目前该工艺的重点研究方向为：以实现顺序凝固为目标的工艺设计及仿真技术、铸造/型材间焊接的质量控制及变形控制、合金及焊缝区组织性能控制、质量控制标准制定等。图4a为国内某车型所采用的铝合金副车架，其左右两端支架为AlSi11合金的重力铸件，图4b为上海汇众依托上汽某车型开发的尺寸为800 mm × 500 mm × 200 mm的汽车前副车架。



(a) 凯迪拉克CTS副车架



(b) 特斯拉副车架

图2 低压铸造工艺生产的铝合金副车架

Fig. 2 Some automotive subframes produced by low pressure die casting process



(a) 广汽传祺



(b) 宝马



(c) Alcoa

图3 部分高真空压铸工艺生产的铝合金副车架

Fig. 3 Some automotive subframes produced by high vacuum die casting process

3.2 液压成形工艺

液压成形与传统成形工艺不同，它采用水或者油取代凸模或凹模作为传力介质，通过对传力介质施加压力使得待加工工件发生适当的塑性变形，从而达到设计要求^[7]。液压成形技术最早广泛应用于航空航天领域，可以生产形状复杂的薄壁件，重量轻、刚度高、精度高，在生产过程中可减少零部件种类、焊缝长度、机械加工工序、产品组装工序等，有降低生产成本、缩短加工周期等优点^[8]，自20世纪90年代起，受到汽车界的极大瞩目而蓬勃发展。对于生产像汽车副车架这样形状复杂的零件，液压成型的主要工序包括：弯曲、预成形、液压成形和后处理等^[9]。李武泉等采用液压成形管件与钣金冲压件拼焊成的后副车架，将原后副车架由18.2 kg降低到14.6 kg，实现减重3.6 kg（19.7%），性能保持不变^[8]。图5展示了采用液压生产技术生产的宝马5系车副车架及预弯成形后的管件制品和梅赛德斯S系列车的副车架^[3]。

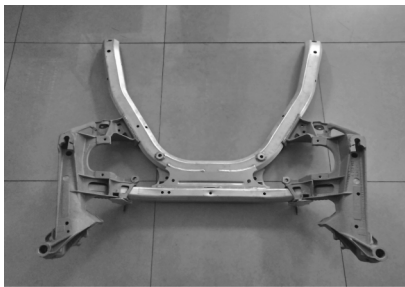
3.3 冲压成形 + 挤压成形 + 焊接工艺

板材冲压成形工艺一般采用非热处理强化的中高强度Al-Mg-Mn系合金，最常用的合金为AlMg3Mn和AlMg3.5Mn。这类合金具有较高的强度、良好的成形性、焊接性，不需要固溶时效硬化，具有良好的热轧和冷轧性能。板材冲压成形可以制备主梁、安装支

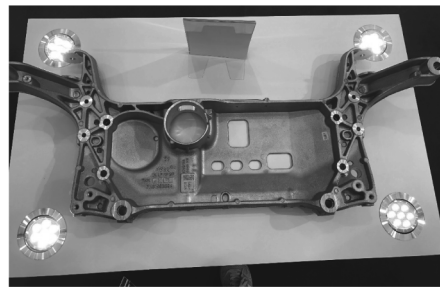
架以及加强筋等，最后通过焊接的方法工艺将这些部件焊接成为整体副车架。板材冲压成形可以生产不同形状的结构件，制备相对复杂的、外形轮廓大的副车架。但由于铝合金板材深冲性能差，冲压回弹量大，冲压回弹精准控制难度较大，同时焊接变形也会对各冲压部件尺寸产生一定的影响，因此，该工序对工艺设计人员提出了较高要求。挤压成形可生产截面复杂、壁薄等特点的零件，零件尺寸精度高、表面质量好、强度高。副车架上的挤压成形件一般用作主梁，通过焊接成形技术实现与其他部件如冲压件之间的连接。这些挤压型材通常采用以6061、6063和6082铝合金为代表的Al-Mg-Si系合金。该系列铝合金具有良好的挤压成形性、耐腐蚀性、焊接性、机加工性能和成形性能，产品表面质量优异，在车架及副车架中应用广泛。如图6a所示为奔驰S级后副车架，其板材冲压件厚2.5~3.5 mm，使用AlMg3.5Mn合金，挤压结构件使用6060合金，整个副车架减重可达到40%。图6b所示为宝马某车型的前副车架，采用板材冲压件及挤压件焊接而成^[3]。

3.4 铸造成形 + 挤压成形 / 冲压成形 + 焊接工艺

挤压成形的型材和板材冲压成形的板材一般具有强度高、尺寸精度高、表面质量好等优点，用来生产副车架的支架或主梁，可以满足副车架的强度和刚度要求。在车身连接处，副车架结构变化复杂，采用



(a) 国内某车型副车架



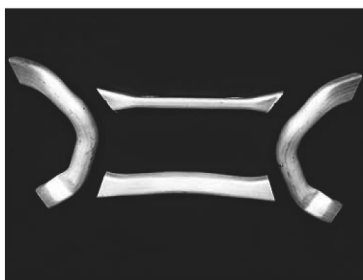
(b) 上汽

图4 部分重力铸造生产的铝合金副车架

Fig. 4 Some automotive subframes produced by gravity die casting process



(a) 宝马5系车副车架



(b) 宝马5系车副车架预弯管件



(c) 梅赛德斯S系车副车架

图5 采用液压技术生产的铝合金副车架及其部件

Fig. 5 Aluminum subframes produced by hydroforming process

挤压或者冲压工艺不易成形，部分主机厂往往会采用铸造成形方法生产车身连接用结构件，由于可以一次成形，能够减少后续的装配安装工序，提高了生产效率，挤压成形件和铸件通过焊接工艺连接在一起，组成汽车副车架。图7给出了部分铸造成形+挤压成形/冲压成形+焊接成的汽车副车架实例，图7a所示副车架主梁为挤压件，采用6061合金，并经T6热处理，两边的铸件部分采用AlSi7Mg0.6合金，最终通过MIG焊接工艺焊接在一起，相比较于传统钢制副车架，质量减少约35%。图7b所示副车架由两个铸件和一个挤压空心型材焊接而成，质量仅为5.8 kg，减重约30%。图7c所示副车架尺寸为1130 mm×675 mm×268 mm，由铸件及冲压件焊接而成，质量仅为13 kg，应用于某款高级轿车。

3.5 钢铝连接

由于铝合金成本相对钢制产品加工成本较高，有许多主机厂并未完全将汽车副车架进行铝合金化，而是采用钢铝连接的方法实现副车架部分部件的铝化，在一定程度上节约了加工成本，同时实现了副车架的轻量化。钢铝连接一般通过IW（钢钉冲铆铝板和钢钉与钢板点焊）、SPR（自冲铆连接）和FDS（自攻螺纹连接）技术实现钢制结构件和铝制结构件的连接^[6]。图8a所示为广汽本田雅阁用钢铝连接后副车架，由于主机厂对轻量化需求较强，钢铝连接副车架轻量化程度不如铝制副车架，现在已经逐步被铝制副车架所代替，其铝制副车架如图8b所示。

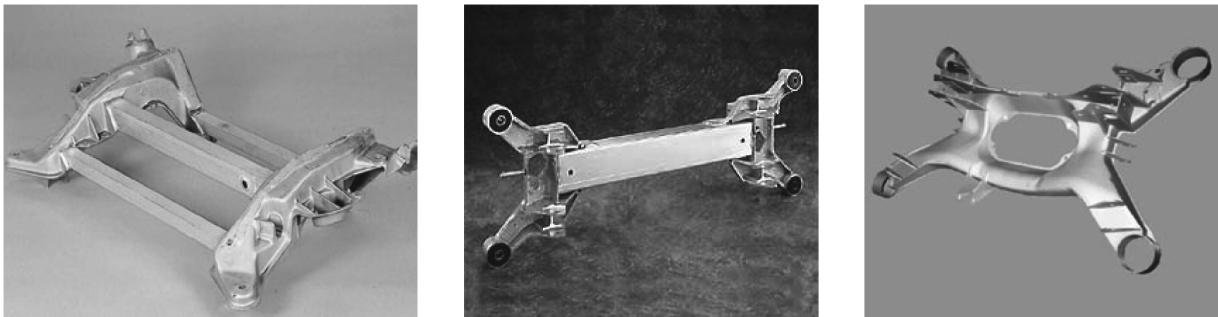


(a) 奔驰S级后副车架

(b) 宝马前副车架

图6 采用冲压成形+挤压成形+焊接工艺生产的铝合金副车架

Fig. 6 Welded subframes with aluminum in both punching and extruding states



(a) 铸件+挤压件+焊接工艺生产的副车架

(b) 铸件+挤压件+焊接工艺生产的副车架

(c) 铸件+冲压件+焊接工艺生产的副车架

图7 采用铸造成形+挤压成形/冲压成形+焊接工艺生产的铝合金副车架

Fig. 7 Welded subframes with aluminum in both casting and extruding or stamping states



(a) 广汽本田雅阁用钢铝连接后副车架

(b) 广汽本田雅阁用铝合金副车架

图8 钢铝连接副车架及其铝制副车架替代品

Fig. 8 Aluminum-steel joining subframe and aluminum subframe for Honda cars

4 结束语

随着国家对节能减排提出越来越严苛的要求,以及新能源汽车的不断发展,乘用车轻量化进程已越来越紧迫。副车架作为一款重要的安保部件,其零件重量大,铝制化后可最大程度地降低重量,提高乘用车的操控性和舒适性。目前,国外在铝合金副车架的应用方面处于领先地位,国内由于技术储备、设备条件、生产加工能力及最终的采购成本等因素的限制,在自主研发品牌车型上应用的铝合金副车架较少,国内相关企业应加大铝合金副车架技术研发投入,特别是要加强管型材液压成形技术、等温挤压技术、高精度型材三维弯曲控制技术以及基于定向凝固理论的结构设计等领域的研发,逐步提升铝合金副车架研发设计能力和生产工艺水平,增强市场竞争力。

参考文献:

- [1] LUO Alan A. Advanced casting technologies for lightweight automotive applications [J]. China Foundry, 2010, 7 (4): 463-469.
- [2] Ducker. Aluminum content in North American Light Vehicle 2016 to 2028 [R]. Ducker Report, 2015, 1-42.
- [3] 商全. 铝合金副车架对于汽车轻量化的重要作用 [J]. 科技经济导刊, 2018, 26 (14): 71.
- [4] European Aluminum Association. The Aluminum Automotive Manual [EB/OL]. <http://www.eaa.net/an>. 2011: 1-16.
- [5] 林海. 轿车底盘铝合金后副车架的高真空压铸技术开发与研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [6] 赵一鸣, 陈虹, 王镐, 等. 一种新型钢铝连接技术的静力学及防腐性能研究 [J]. 上海汽车, 2018 (5): 51-57.
- [7] 李武泉. 液压成形轻量化技术在副车架的应用 [J]. 装备制造技术, 2018 (1): 215-218.
- [8] 张立玲, 黄黎, 叶子青, 等. 轿车副车架轻量化技术研究及应用 [J]. 塑性工程学报, 2012, 17 (5): 71-75.
- [9] 杨勇. 管件液压成形技术及其在副车架上的应用 [J]. 上海汽车, 2010 (3): 57-60.

Forming Process and Application of Aluminum Alloy Automotive Subframe

CHEN Lai^{1,2}, WANG Zhan-kun¹, ZOU Chun¹, ZHONG Gu^{1,2}

(1. Chinalco Materials Application Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215000, Jiangsu, China; 2. Suzhou Nonferrous Metals Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215000, Jiangsu, China)

Abstract:

Lightweight automotive application is an important way to achieve energy saving and emission reduction. Instead of the steels, aluminum alloys used as structural materials for lightweight components become more and more popular in the automotive industry. Subframe is an important structural part in automotive chassis suspension system, and application of aluminum alloy subframes exhibit considerable weight saving. This paper provides an overview of major forming processes of aluminum alloy subframes and their applications, which includes casting, hydroforming, punching+extruding+welding, casting+extruding/stamping+welding, and joining of steel with aluminum. Furthermore, the advantages and disadvantages of those forming processes are also discussed.

Key words:

aluminum alloy; lightweight; subframe; forming process