

汽车铝发展及应用浅析

倪炀¹ 董学锋²

(1.大连理工大学工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室,大连 116024;2.浙江合众新能源汽车有限公司,湖州 313000)

摘要:基于铝合金在汽车零件上应用的探究,综述了铝材企业分布、铝合金成分元素及性能、工艺方面基本概况,统计了铝材在汽车上的商品化应用,特别是在车身上的应用现状,证明了铝在汽车上应用的优越性及适用性,并总结了铝质零件与异同种材料连接的常用方法。研究显示,高性能铝的研发相较外企有待加强,汽车用材多样化在轻量化领域不断拓展,但铝材应用仍是主流。

关键词:铝合金 汽车零件 连接 轻量化

中图分类号:U465.2

文献标识码:B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20220211

Brief Analysis on Development and Application of Automotive Aluminum

Ni Yang¹, Dong Xuefeng²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024; 2. Zhejiang Hezhong New Energy Automobile Co., Ltd., Huzhou 313000)

Abstract: Based on the exploration of the application of aluminum alloy in automobile parts, the basic situation of aluminum enterprise distribution, aluminum alloy composition elements, properties and processes are summarized. The commercialized application of aluminum in automobiles, especially in car bodies, is summarized. This paper proves the superiority and applicability of aluminum in automobile application, and summarizes the common methods of connecting aluminum parts with different and same materials. Research shows that the research and development of high-performance aluminum needs to be strengthened compared to foreign companies, and the diversification of automotive materials is constantly expanding in the field of lightweight, but the application of aluminum is still mainstream.

Key words: Aluminum alloy, Automobile part, Connection, Lightweight

1 前言

不论是“节能减排”还是“碳达峰,碳中和”,都是围绕“环保”这一时代主题,汽车轻量化始终是汽车节能减排的有效途径之一,因此汽车轻量化也一直受到汽车行业的重视,汽车不论如何“智能化、网联化”,动力的能源形式如何“改变”,包括使用新能源,它总要有“肢体”的实体部件,如何使得各部件“更轻”是永恒的设计追求,因此

轻质材料在汽车上的应用也一直备受青睐,轻质材料在汽车上的占比也越来越高。铝材作为在汽车上应用较早较广的轻质材料,铝有比钢更轻的质量、比镁更好的耐腐蚀性和比碳纤维更低的成本,铝合金目前仍是汽车轻量化最优选的轻质材料之一。根据美国铝业学会的报告,汽车中每使用1 kg铝,可以获得2.2 kg的减重效果^[1],且服役期内将减少20 kg尾气排放。对汽车而言,若整车整备质量降低10%,燃油经济性可提高6%~8%,

作者简介:倪炀(1994—),男,硕士学位,研究方向为汽车轻量化。

参考文献引用格式:

倪炀,董学锋.汽车铝发展及应用浅析[J].汽车工艺与材料,2023(7):11-16.

NI Y, DONG X F. Brief Analysis on Development and Application of Automotive Aluminum[J]. Automobile Technology & Material, 2023(7): 11-16.

尾气排放将减少5%~6%^[2]。铝合金材料的优势众多,资源丰富,密度相对于钢更小,耐腐蚀性好,成形性能较高,易于回收,且安全性较高,是汽车用材的首选材料^[3]。

由于铝合金材料所具有的优势,使铝合金在汽车上的应用范围越来越广,从铝制散热器、铝制车轮、铝发动机缸体、缸盖、铝制底盘转向节、控制臂,再到铝发动机舱盖、铝车门、铝制车身本体等,实现局部到整体的跨越,铝合金已成目前汽车轻量化主要用材,前景广阔。

2 铝材产业分布及铝材产品

2.1 铝材的产业分布

性能优越的铝合金随着其制铝技术的提高及应用的拓展,铝产品已渗透到人们生产及生活的各个领域,高性能铝合金的研发一直是热点。在当前电池能量密度水平下,受续航里程的压力,电动汽车的整备质量已经超出了传统燃油车的范围,因此电动车的轻量化显得更重要。为深入了解铝材的生产及在汽车上的产品应用,对全球铝材的产业分布进行了调研与梳理。

2.1.1 全世界主要的铝产业分布

诺贝丽斯和海德鲁分别为国际变形铝合金板材和型材生产厂的典型代表,两家铝材料制造商在北美、欧洲及亚洲都有建厂,并为多家汽车厂商供货,其中诺贝丽斯在纽约奥斯威戈、德国科布伦茨、德国哥廷根、英国拉契福、巴西乌廷加、中国的常州都有铝板生产厂,可为宝马、奥迪、特斯拉等车企以及在中国的汽车生产企业供货,国际上的主要铝供货商及世界分布情况见表1。中国铝材生产企业也有很多家,也在持续为汽车行业发力,比如忠旺、中铝、云铝、西南铝、南山铝。

2.1.2 中国主要铝材产业分布

相比而言,中国铝业集团有限公司在中国的产业分布最广,加工厂地所在城市有哈尔滨、沈阳、定西、成都、重庆以及福州,可基本实现了全国的全方位供货。另有辽阳的忠旺集团、龙口的南山集团有限公司、重庆的西南铝业(集团)有限责任公司,昆明的云南铝业股份有限公司等,国内的铝业发展呈现一片欣欣向荣的姿态。

表1 铝材产业在世界的分布地点

	北美洲	南美洲	欧洲	亚洲	非洲	大洋洲
诺贝丽斯	√	√	√	√		
海德鲁	√	√	√	√		√
肯联	√		√	√		
HULAMIN					√	
AMAG	√		√			
美铝	√	√	√	√		√
神钢集团	√	√		√		√
中铝				√		
云铝				√		
南山铝				√		
忠旺				√		
西南铝				√		

2.2 铝材分类、成分及性能

2.2.1 铝材分类

材料的成分及其微观组织决定了材料的本质性能,为获得不同的材料性能,通常要控制各元素的占比,依据铝合金各主要元素的占比不同,将铝合金分为1系~8系,并随着添加元素的固有特性改变组织形态,形成性能各异的变形铝。其主要系列、特点及在汽车上的适用范围见表2。

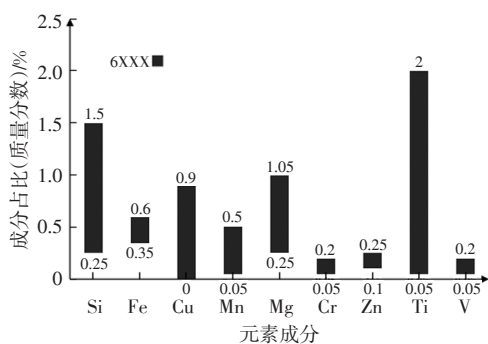
2.2.2 铝合金成分

铝合金指的是在铝中添加其他一定元素,仍保有铝性能特点的合金。为满足汽车轻量化的要求,铝质材料在汽车上的应用率在不断提高,也基本成为汽车减重的首选材料,但随着汽车性能的要求越来越高,以及在汽车上的应用范围越来越广,对铝制汽车零件的高性能要求更加苛刻,在保证汽车性能的前提下,尽量降低汽车的整备质量,因此各大铝材生产商纷纷研发具有高性能的铝合金,也在控制成分、保持一致性及工艺过程的精准性方面进行细致的研究,从而得到理想的微观组织,以获得良好的性能指标和一致性;图1是某著名企业的6系及7系铝合金成分占比范围。其中Si能改善流动性能;Cu能提高强度和硬度,但降低耐蚀性和韧性;Mg能提高屈服极限和耐蚀性,但铸造性能差;Zn能提高铸造性能和机械性能,但增加热脆性,降低耐蚀性。每一种元素都有其优劣势,合理的配置能有效提高合金的性能。

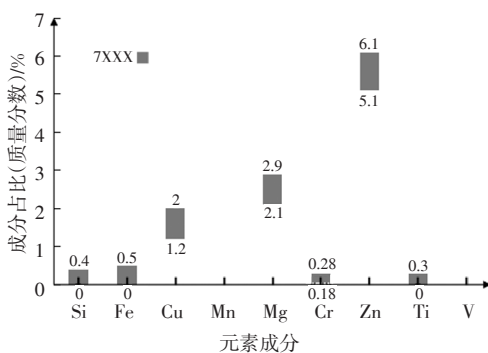
表2 铝合金的分类、特点及适用范围

合金牌号(系)	主要合金元素	主要特点											适用范围
		强度	韧性	塑性	耐腐蚀	抗疲劳	焊接性	深冲性	加工性	热处理	耐热性	导电性	
1xxx	Al	×				√						√	散热器
2xxx	Al-Cu	√						√			√		车身钣金件、车轮、悬架系统零件
3xxx	Al-Mn				√	√							薄板加工件
4xxx	Al-Si					√	√						/
5xxx	Al-Mg					√	√			×			车身钣金件、汽车装饰零部件
6xxx	Al-Mg-Si					√							车身钣金件、挤压型材、散热器
7xxx	Al-Zn-Mn-Cu	√											车身钣金件、挤压型材、桁架、杆件
8xxx	其他							√					散热器

注:√为性能较好;×为性能较差



(a)6系铝合金成分占比



(b)7系铝合金成分占比

图1 某著名企业的铝合金成分元素占比

2.2.3 铝合金的性能

汽车用铝需要“按需选材”,根据不同结构部件所在位置的性能要求不同,选用合适的铝合金材料,以达到安全轻质的效果。就汽车结构部件而言,最受关注的材料性能是强度和延伸率,对所搜集到的相关资料进行整理,得到当前不同系别铝合金的性能范围如图2所示。

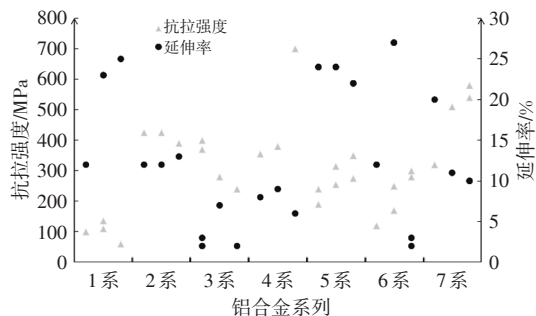


图2 不同系别的铝合金性能

3 铝产品工艺及分类

车用铝的需求随着新能源汽车的发展而加速。与传统的钢制件相比,铝延展性较差,故成形同样复杂零件的良品率不高,所以在研发高性能铝材料同时,还需要选择合适的制造工艺,目前汽车铝合金零部件常用的制造工艺有3种(铸造、挤压、冲压),汽车部件的常用工艺如图3所示。

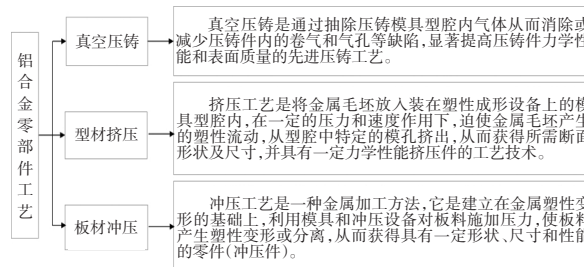
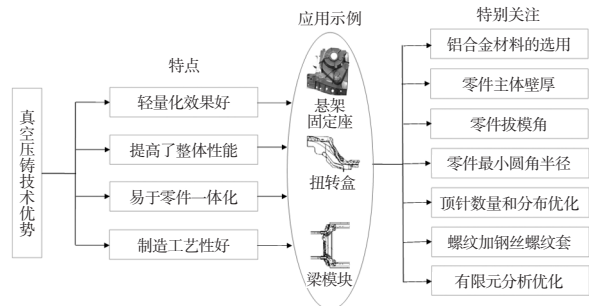


图3 铝合金零件制造工艺

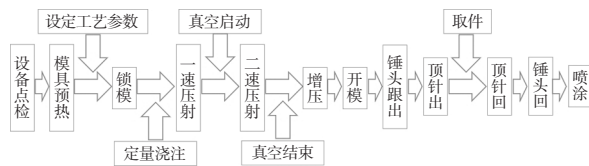
3.1 铸铝

铸铝是一种将纯铝(或铝合金)按标准的成份比例配制后,经过加热将其变成铝合金液体或

熔融状态后再通过专有模具或相应工艺将铝液或熔融状态的铝合金浇注进型腔,经冷却形成所需要形状铝件的一种工艺方法。常用的铸造工艺有多种,如砂铸、压铸、消失模铸造等,适合复杂零件的成形,但铸造存在气孔和缩松缺陷^[4],为消除或减少气孔缺陷,对于要求较高的部件(比如汽车上的部件),通常选择压力铸造;其中真空压铸的优势、应用、特别关注内容及工艺流程见图4。



(a)真空压铸优势、应用及特别关注内容



(b)真空压铸工艺^[5]

图4 真空压铸

技术瓶颈不断突破及早期应用,推进和拓宽了铝合金材料在汽车上应用范围,比如2015年奥迪Q7在车身的角接处应用了大量的的小型铝铸件(如前悬架固定座、后纵梁、后背三角脊、前底梁加强板),而如今特斯拉推出的一体铸造技术,把大型铝铸件成功应用于车身后部,在车身部件应用上颠覆传统设计,基本实现了车身后下骨架半边的一体化铸造。如图5所示。自冲铆连接在汽车铸铝零部件中得到了广泛地应用,需注意的是硬度高、强度高、延展性差的材料放在上层,强度低、硬度低、延展性好的材料放在底层;未经过热处理的底层材料,许用最高强度不高于600 MPa,底层材料伸长率不小于12%;铆接点间距不可过小,至少应大于铆接点半径和铆模半径之和,或大于30 mm。

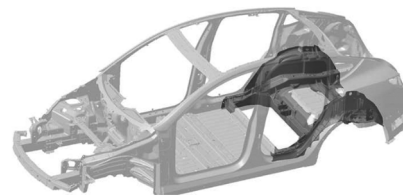
3.2 挤压铝

铝型材是按设计所需的截面形状,有一定长度的铝合金材料成品,铝型材的生产过程是由调好合金成分铝棒材(通常是铸造成形),按挤压盛

锭筒的限定长度锯切成段,作为挤压过程的坯料,通过热熔(在加热炉中变软,铝合金的熔化温度约660 ℃,在挤压过程一般加热到375~500 ℃),液压机通过挤压杆对盛锭筒内的柔软铝坯料进行挤压,受到盛锭筒筒壁的制约,柔软的铝合金只能从模具的成形孔到最终成形端出来,得到所需的形状,为获得良好的性能,后续还要进行热处理、时效处理等工序。铝材料氧化后耐脏,且采用配套铝型材时,减少了焊接,方便运输,挤压铝型材的优势、特别关注内容及工艺见图6。

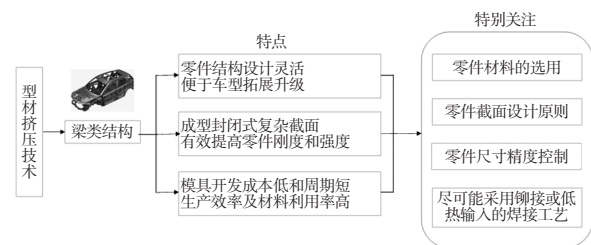


(a)奥迪Q7车身

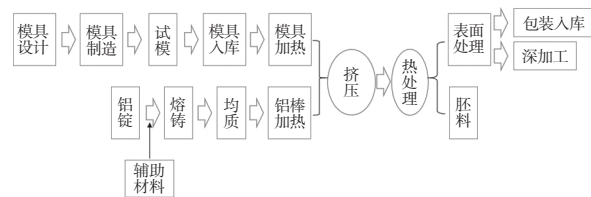


(b)特斯拉车身后部一体铸造应用

图5 大型铸件在车身上的实践



(a)铝型材优势及特别关注内容



(b)铝型材工艺

图6 铝型材

在全铝电动汽车上,铝型材的占比约为10%~11%,故众多大型铝厂投入到新型挤压铝材的研究中,主要包括挪威海德鲁公司HHS合金、肯联铝业

HSA6 合金、奥科宁克公司的 M648 和 6563 合金以及日本的 7003 合金。主要应用于汽车的护栏、电池托盘^[6]及副车架^[7]。

3.3 冲压铝

冲压铝是通过模具冲压成形的,其效率高,适合于较为简单的零件成形。为了保证板材最终性能,可对成品进行退火、固溶处理、淬火、自然时效和人工时效处理,以提升板料强度性能。铝合金冲压件具有可塑性好、加工性好、生产效率高、冲压操作简单、冲压尺寸和精度高的优点,且加工范围大,材料消耗小。但与钢板相比,有一些不足之处,见图 7。

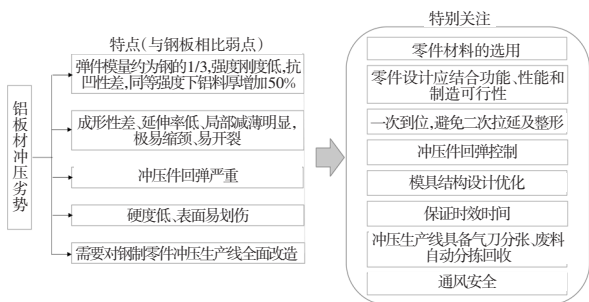


图7 铝板冲压的劣势及特别关注内容

冲压加工的三要素为板料、模具和设备。其按照温度加工分为热冲压和冷冲压。热冲压适合变形抗力高,塑性较差的板料加工;冷冲压则在室温下进行,是薄板常用的冲压方法。其中热成形技术使得材料在高温下流动阻力减小,易于成形较复杂的零件,并且降低了产品的回弹率。其工艺流程图见图 8。

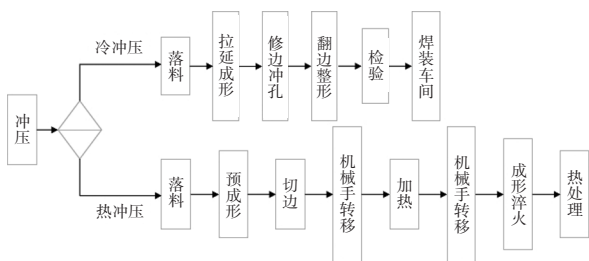


图8 冲压工艺流程

激光拼焊冲压技术是将不同厚度、不同材料的板件整体制造,实现一体化成形,提高生产效率,降低成本,同时减少了加强板,实现轻量化^[8]。

4 铝合金在车身上的应用

铝合金因其质量轻、比强度高、耐腐蚀、易回

收利用等特点被广泛应用于汽车结构件中。通过对历年铝合金在车身上的应用情况看,为了实现更轻更安全,高性能的铝合金板材也在不断推陈出新。

根据车身不同部位的不同要求,选用不同系列的铝合金,统计结果如表 3。汽车的四门两盖主要选用的是 5、6 系铝板;前后保险杠横梁选用铝型材较多,悬架固定座主要选用压铸铝等。

出于热膨冷缩基本相同的考量,总成的内外板通常都选用同一种材料,而且选用同一种材料有利于材料的回收利用,比如铝制四门两盖的内外板都是铝板,表 3 中内外件数的差异是有单件和内外板是两种材料的特例,若用不同的材质,设计结构上要考虑温度变化下如何消除热胀冷缩的不同。欧洲车身年会展示的特例有:阿斯顿·马丁 DB11 的机舱盖无内板;讴歌 NSX 的行李箱盖外板是热固性塑料,内板是铝合金板;奔驰 S-Class 的外板是铝合金板,而内板是高强钢板,雷克萨斯及 LC Convertible 的外板都是铝合金板,内板都是热固性塑料。从表 3 中也可以看出采用 6 系铝合金比 5 系多些,从多年的展示产品看,在轻质材料的应用中,铝合金当属最多,其它轻质材料较少。从这可以观察到目前阶段汽车轻量化用材发展是仍以铝合金为主,其他材料为辅的多材料优势互补的应用。

5 连接技术

为适应轻量化的需求,铝合金及更轻质的镁合金、碳纤维复合材料等在车身上的应用越来越多。即合适的材料用在合适的地方,而多种材料在车身上的应用所引发的异种材料连接也是多样的,比如机械连接中的自冲铆(SPR)、流钻螺钉、高速射钉、无铆连接等;焊接中的搅拌摩擦焊、还有胶接等在车身异种材料的连接中的都很常见,根据相关资料的内容,整理铝材与其它材料的常用连接方式如表 4 所示。

连接方式的选择是依据材料本身的性质的,同种材料之间的连接因热膨胀系数相同,可选择的连接方式较多,而异种材料之间的连接,如焊接时,会因热膨胀系数不同,材料收缩率不一样,从而产生焊缝及残余应力,且若是复合材料这种对温度比较敏感的,不适宜热连接。

表3 不同铝合金在车身部件中的应用频次

车身铝件 部件分类	铝材分类	铝板冲压			挤压铝型材			铸铝		
		7xxx	6xxx	5xxx	e	e ₇	e ₆	c	c _h	c _l
4门2盖	机舱盖	外板	64	2						
		内板	50	15						
	行李箱盖	外板	12	2						
		内板	11	4						
	车门	外板	31	1						
		内板	14	14				1		
	防撞梁				2					
前后保险杠横梁		3	3	4	21	7	9		1	
悬架固定座								16	17	2
外覆盖件	侧围		12	2						
	顶盖		18							
	翼子板		31							
梁类件	前纵梁		7		9	3	6	1	1	2
	后纵梁				1		1			
	前横梁				1					
	地板梁				2		1			
板类件	地板		12	2						
	前围		2	5				1		

注:e为挤压铝;e₇为7系挤压铝;e₆为6系挤压铝;c为铸铝;c_h为高压铸铝;c_l为低压铸铝,参照欧洲车身年会2016年前挤压铝和铸铝未细分铝系别。

表4 车身零部件连接

材质	工艺方法	机械连接									焊接					胶接	混合连接	
		自冲铆接	流钻螺钉	高速射钉	无铆连接	拉铆	螺栓连接	卷边	Flow Push	激光焊接	搅拌摩擦焊	电阻点焊	摩擦塞铆焊	TIG焊	MIG焊			CMT焊
钢/铝	钢板/铝板	○	○	○	○	○		○		○	○	○					○	○
	钢板/铝型材/铸件																	
铝/镁	铝板/镁板																	
铝/复合材料	铝板/铝板				○		○			○							○	
铝/铝	铝板/铝型材								○									
	铝板/铝铸件	○	○															
	铝薄板/铝薄板																	

□ 中国汽车材料网 ○ 欧洲车身年会会议资料

注:图中的灰色及圆图形分别表示从中国汽车材料网及欧洲车身年会会议资料中总结的同异种材料的应用类型

(下转第21页)

理材料开发、压铸成型工艺、压铸单元能力和大型模具设计都需要技术创新。尤其是模具设计与制造除了要考虑铸造材料的流动性、热平衡、模具寿命、零件成形工艺性与质量保证,还要考虑零件后续加工工艺优化等。“一体化压铸成型工艺与装备”已列入国家重点研发计划。随着新能源汽车行业不断发展,将极大带动铝合金一体化压铸技术发展,铝合金一体化压铸将成为新能源车企标

配的制造工艺。

参考文献:

- [1] 段宏强, 韩志勇, 王斌. 汽车结构件用非热处理压铸铝合金研究进展[J]. 汽车工艺与材料, 2022(5): 1-6.
- [2] 康运江, 付爽宁. 压铸铝合金液一体化制备工艺及装备研究[J]. 冶金设备, 2016(5): 33-35.

A
&M

(上接第 16 页)

6 结论

以节能减排为目标的汽车轻量化进程不断加快,也促使铝合金应用越来越广泛,通过调研与分析得出结论如下:

a. 汽车用铝量会进一步提升,中国铝业能够较好地满足需求,但在高性能铝的研发上较外企仍有一定差距;

b. 高性能铝研发已成为热点,伴随而来的制备工艺也得到了进一步改进与发展,主要体现在新技术引入传统工艺中;

c. 在车身应用方面,四门两盖主要用的是 5、6 系铝板材,悬架固定座通常采用铝铸件,保险杠横梁、纵梁等梁类件采用挤压铝型材较多;

d. 传统的钢制车身基本是用点焊,有轻质材料加入后,出现了异种材料连接的多种方法,比如钢铝有铆接,搅拌摩擦焊接和粘接等多种方式;

e. 未来车辆全生命周期碳排放政策要求下,碳排放因子相对钢更高的铝材料应用将迎来新的挑战与约束,低碳排放铝合金材料研发与应用将是

重要发展趋势。

参考文献:

- [1] 李龙, 夏承东, 宋友宝, 等. 铝合金在新能源汽车工业的应用现状及展望[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(9): 18-25.
- [2] 郑晖, 赵曦雅. 汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用[J]. 锻压技术, 2016, 41(2): 1-6.
- [3] 王涛. 车身铝合金零件关键制造技术和应用现状[J]. 汽车实用技术, 2020(7): 187-189+202.
- [4] 钱东伶, 芦富敏, 余忠土, 等. 汽车底盘用铸造铝合金的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(10): 1077-1082.
- [5] 林海, 万里, 刘后尧, 等. 高真空压铸铝合金轿车底盘部件的压射工艺试验及优化[J]. 铸造, 2011, 60(1): 42-46.
- [6] 余东梅. 电动汽车挤压铝合金新进展[J]. 铝加工, 2020(1): 4-7.
- [7] 王立忠. 高性能挤压型材的汽车铝合金副车架[J]. 汽车工艺与材料, 2021(6): 18-23.
- [8] 王登峰, 蔡珂芳, 张帅, 等. 基于激光拼焊技术的汽车 B 柱结构优化设计[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(7): 691-697+708.

A
&M