

汽车轻量化技术：铝 / 镁合金及其成型技术发展动态

付彭怀，彭立明，丁文江

(上海交通大学材料科学与工程学院轻合金精密成型国家工程研究中心，上海 200240)

摘要：为了推动我国汽车工业轻量化进程，文章从新材料、成型新技术、新应用三个方面对铝合金、镁合金两类轻金属材料的国内外研究动态进行了回顾，分析了两类轻金属材料在汽车工业应用的阻力，提出了我国汽车工业铝 / 镁合金可能的发展建议。

关键词：汽车；轻量化；铝合金；镁合金；成型技术；发展动态

中图分类号：TG146.2 **文献标识码：**A

Automobile Lightweight Technology: Development Trends of Aluminum/Magnesium Alloys and Their Forming Technologies

Fu Penghuai, Peng Liming, Ding Wenjiang

(National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This study reviews the development of aluminum and magnesium alloys, including new materials, forming technologies, and application trends; analyzes the obstacles of their application in the automobile industry; and suggests possible solutions to promote the process of making lightweight vehicles in China.

Keywords: automobile; lightweight; aluminum alloy; magnesium alloy; forming technology; development trend

汽车轻量化是降低能源消耗、减少污染物排放最有效的措施之一。近年来，随着汽车产量和保有量的持续增加，我国面临的能耗、安全、环保等问题日益突出，汽车轻量化技术成为推动汽车工业可持续发展、提高汽车燃油经济性、减少汽车尾气排放的重要手段。汽车轻量化，是指在保证汽车功

能与安全性的前提下，尽可能地降低汽车的自身质量，达到节能减排的目的。轻量化设计、轻量化材料与轻量化制造是轻量化技术的三个主要组成部分 [1,2]，一种新的轻量化技术能否在汽车上获得应用主要受其减重收益与成本增加关系的影响：只有当减重收益大于成本增加时，轻量化技术才能够在

收稿日期：2018-01-18；修回日期：2018-02-08

通讯作者：丁文江，上海交通大学，教授，中国工程院，院士，主要从事镁、铝合金新材料及成型工艺研究；E-mail: wjding@sjtu.edu.cn

资助项目：国家重点研发计划 (2016YFB0301000, 2016YFB0701204)；上海青年科技启明星资助项目 (15QB1402700)；自然科学基金资助项目 (51671128, 51771113)；江苏省科技成果转化项目 (BA2016039)；中国工程院咨询项目“汽车强国战略研究”(2015-XZ-36)

本刊网址：www.enginsci.cn

汽车上获得真正应用。本文将综述铝合金、镁合金两类轻金属材料及其成型技术在汽车相关领域的发展动态。

一、铝合金

铝合金的密度大约是钢铁密度的 1/3, 是汽车中应用最广泛的轻质材料。研究表明, 用铝合金代替低碳钢、铸铁或者高强钢, 可以实现 30%~60% 的减重效果, 每千克铝合金的使用可以减少 13~20 kg 温室气体的排放 [3]。以铝代钢是汽车轻量化技术的一个发展趋势, 在豪华车型上的使用更加明显。

汽车用铝合金主要包括变形铝合金和铸造铝合金, 其中铸造铝合金占主导, 约为汽车用铝量的 80%, 主要用于制造发动机缸体、缸盖、离合器壳、保险杠、车轮等, 变形铝合金主要用于车身覆盖件的制造, 如奥迪 A8 全铝车身。此外, 铝基复合材料、泡沫铝、粉末冶金铝合金也在汽车中有所应用。本节从铝合金新材料、成型新技术、新应用等方面介绍国内外相关轻量化技术的研究与应用动态。

(一) 新材料

1. 非热处理压铸铝合金

针对铝合金薄壁铸件, 上海交通大学开发了 JDA1 (Al-Si-Mn-Mg-RE) [4] 和 JDA2 (Al-Mg-Si-Mn) [5] 铝合金, 两类铝合金的特点是不需要经过高温固溶处理和人工时效, 仅通过自然时效即可达到较高的强度和塑性, 室温拉伸性能如表 1 所示。JDA1 具有优秀的压铸工艺性能和良好的机械加工性能、可焊性、抛光性能、延展性, 常规压铸后自然时效即可达到德国 Silafont36 铝合金 T6 热处理后的力学性能。JDA2 密度比纯 Al 小, 压铸工艺性能良好, 具有优异的抗腐蚀性能和良好的可焊性、抛光性能、延展性, 常规压铸后自然时效即可超过德国 Magsimal59 铝合金 T6 热处理后的性能。两类非热处理压铸铝

表 1 JDA1 和 JDA2 铝合金室温拉伸性能

合金	AlSi9Cu3 (as-cast)	A356 (as-cast)	Silafont36 (T6)	JDA1 (as-cast)	JDA2 (as-cast)
σ_b /MPa	280~285	155~160	250~290	260~340	280~340
$\sigma_{0.2}$ /MPa	150~165	85~90	120~150	160~196	180~220
δ /%	2~3	6~7	5~9	6~10	10~20

合金特别适合生产薄壁类的汽车部件。

JDA1 铝合金目前已经在通用汽车 Cadillac-CT6 上获得了批量应用, 用于制备发动机支架 (底盘系统), 如图 1 所示。

2. 高韧性压铸铝合金

针对压铸铝合金塑性较低的问题, 英国伯明翰大学 Fan Z 团队 [6] 开发了高韧性压铸铝合金, 该合金含有 5.0 wt%~5.5 wt% Mg、1.5 wt%~2.0 wt% Si、0.5 wt%~0.7 wt% Mn、0.15 wt%~0.20 wt% Ti 和 <0.25 wt% Fe, 经过压铸成型后, as-cast 试棒室温力学性能为: 屈服强度为 150 MPa、抗拉强度为 300 MPa、伸长率为 15%, 可以满足车身对高塑性压铸铝合金的需要。

(二) 成型新技术

1. 铝合金大型部件真空压铸技术

针对常规铝合金铸件内部气孔较多的问题, 上海交通大学通过开发高真空压铸系统, 包括模具抽真空系统、真空截流排气阀、密封设计及排气管路布置等, 实现了真空控制系统与压铸机压射控制系统的高效联合, 在凤阳爱尔思轻合金精密成型有限公司 3 550 t 大型精密卧式压铸机上完成了铝合金 V6 发动机缸体 (发动机系统) 的压铸成型, 如图 2 所示。大型铝合金部件的高真空压铸技术将成为未来汽车部件成型技术的主流发展方向。

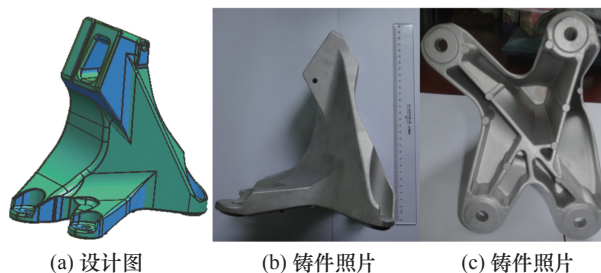


图 1 JDA1 铝合金发动机支架 (底盘系统)

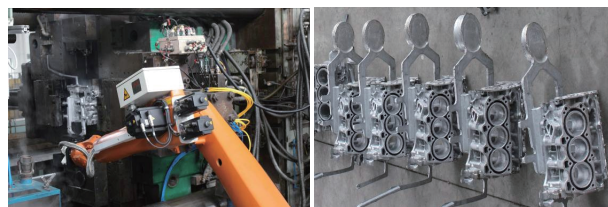


图 2 铝合金 V6 发动机缸体压铸现场照片

2. 铝合金半固态流变压铸技术

半固态金属显微组织均匀，在切应力作用下具有很好的流动性，不易产生缺陷和偏析，可以通过热处理进一步提高铸件力学性能，因此与常规液态压铸成型相比，半固态压铸技术具有显著的优势。为了降低半固态压铸生产成本，充分利用铝合金流变压铸的优势，北京有色金属研究总院设计开发了铝合金半固态浆料在线制备系统，成功地实现了半固态浆料在线制备与零件压铸成型动态匹配，目前已经完成铝合金卡钳、气室支架、抗扭连杆、左中支架等汽车底盘系统部件的试生产，每个部件实现减重 35%~48%。铝合金半固态卡钳及其显微组织如图 3 所示。由于铝合金半固态流变压铸技术的成本仅稍高于常规压铸，其在汽车零部件中的应用前景非常广阔，特别适合 10 kg 以下部件的大批量压铸制备。

3. 铝合金卡车轮毂旋压成型技术

铝合金轮毂（底盘系统）替代商用车钢轮毂具有重要的节能减排效果，在乘用车领域已经成为主流。2016 年，国内铝合金卡车轮毂呈现爆发式增长。铝合金卡车轮毂目前主要采用锻造 + 旋压（锻旋）技术制造，图 4 为山东镁卡车轮有限公司生产的锻旋铝合金卡车轮毂。除了锻旋技术之外，上海交通大学针对卡车轮毂还研发了厚板旋压成型技术：选用 35 mm 铝合金中厚板材为

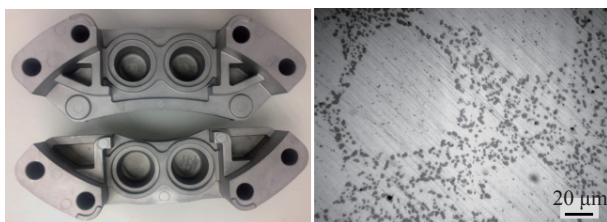


图 3 铝合金半固态流变压铸卡钳（底盘系统）及其内部显微组织（T6 处理后共晶硅呈细小弥散分布）



图 4 山东镁卡车轮有限公司生产的锻旋铝合金卡车轮毂

初始坯料，采用强力弯曲旋压将铝合金板材中部材料成形轮辐，将铝合金板材边部材料预成形轮辋，采用劈开旋压将预成形轮辋劈开为轮辋前片坯料和后片坯料，采用强力变薄旋压将前片坯料和后片坯料分别成形轮辋前片和轮辋后片。与锻旋技术相比，厚板旋压成型技术无需预制锻造毛坯，设备和工艺简单、材料利用率高、加工成本低、生产效率高，节约成本可达 60%，有望成为铝合金卡车轮毂的另一主流成型技术。

（三）新应用

1. 铝基复合材料制动盘

随着轻量化技术的发展，铝合金复合材料逐步开始在汽车制动盘（底盘系统）上应用。2014 年苏黎世联邦理工学院和卢塞恩应用科学与艺术大学打造的电动赛车 Grimsel 实现了百公里加速 1.785 s 的方程式赛车记录，该电动汽车制动盘即采用了 SiC 颗粒增强铝基复合材料。相对于常用的灰铸铁，SiC 颗粒与铝基复合材料具有低密度和高导热性优点，制动盘减重高达 50%~60%。

2. 全铝车身逐渐普及

自从奥迪 A8 采用全铝车身之后，全铝车身在乘用车上的应用正逐渐普及。2016 年 1 月，北京新能源汽车股份有限公司生产的 EX 微型纯电动汽车（量产版）采用了轻量化的全铝车身设计。2016 年 2 月，奇瑞新能源汽车技术有限公司年产 6 万辆铝合金骨架车身纯电动乘用车项目在安徽省芜湖市弋江区高新技术开发区开工建设，主要生产 S51EV、S61EV、A0-SUV EV 纯电动乘用车型。2016 年 4 月，奇瑞捷豹路虎汽车有限公司常熟工厂全铝车身车间竣工投产，其制造的全新捷豹 XFL 长轴距版全铝车身轿车铝化率高达 75%，其车身为铝合金板，车身架构为铝合金挤压型材，以压铸件、铸件作为节点连接件，车身质量仅 297 kg。上海通用汽车有限公司凯迪拉克工厂制造出高铝化率 CT6 车型：采用轻量化车身设计的凯迪拉克 CT6 车型轿车车身，其铝材占比达到 57.72%。2016 年 1 月，广西源正新能源汽车有限公司的 18 辆全铝车身新能源公交客车整车集中下线并投放到南宁市公交线路，目前该公司的全铝车身轻量化技术已成功应用于 6~18 m 全系列城市新能源公交客车。

二、镁合金

作为最轻的金属结构材料，镁合金在汽车上的应用备受期待，镁合金结构件可以在铝合金结构件的基础上实现 30% 左右的减重效果。尽管 20 世纪 30 年代镁合金即开始应用在汽车上，但到目前为止其在汽车上的应用仍十分有限，主要原因是镁合金易氧化燃烧、成型较困难，强度与塑性、耐腐蚀性能较差，难以满足汽车的应用要求。本节从镁合金新材料、成型新技术、新应用等方面介绍国内外相关轻量化技术的研究与应用动态。

(一) 新材料

1. 高性能镁稀土合金开发

针对汽车等领域对轻量化结构件的需要，解决镁合金强度、塑性、耐热性能、耐腐蚀性能较差的核心问题，上海交通大学开发了 JDM1—JDM4 系列镁稀土合金 [7~11]，其典型拉伸力学性能如表 2 所示。

JDM1 镁合金 [7,8] 是 Mg-Nd-Zn-Zr 系合金，采用弥散 Zr 化合物和垂直基面的 β'' (Mg_3Nd) 亚稳态析出相的协同强化，利用微量锌、铅元素促进室温非基面位错滑移的钝化机制，合金典型的室温力学性能为屈服强度为 140 MPa、抗拉强度为 300 MPa、伸长率为 10%。

JDM2 镁合金 [9] 是 Mg-Gd-Y-Zr 系合金，采用镁-重稀土系合金共格时效析出相为主要强化方式，合金典型的室温力学性能为屈服强度为 230 MPa，抗拉强度为 340 MPa，伸长率为 3%。JDM2 变形镁合金在引入织构强化机制以后，获得了室温抗拉强度超过 500 MPa，屈服强度超过 450 MPa、伸长

率大于 10% 的优异力学性能。

JDM3 镁合金 [10] 是 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 系合金，在 JDM2 基础上，引入适量小原子 Zn，使得部分稀土元素与 Zn 原子形成高温稳定的长周期堆垛有序 (LPSO) 结构，由于 LPSO 具有良好的高温稳定性和抗扭折能力，与析出相的惯习面垂直，形成“LPSO+析出相”共存强化单元。JDM3 镁合金 300 °C 实验室试棒抗拉强度 >250 MPa。

JDM4 镁合金 [11] 是 Mg-Gd-Y-Ag-Zr 系合金，在高强度 JDM2 合金基础上，通过 Ag 元素微合金化调控镁稀土合金中沉淀析出相形态，形成“棱柱面析出相+基面析出相”复合强化。JDM4 镁合金的室温屈服强度超过 300 MPa，抗拉强度可以达到 420 MPa。

2. 高导热压铸镁合金

针对轻量化散热部件的需要，上海交通大学开发了一种具备较高强度、良好导热性能的压铸镁合金 [12]，其导热系数 >100 W/m·K，屈服强度 >120 MPa，中性盐雾腐蚀性能与商业 AZ91D 相当。目前，高导热压铸镁合金已经完成小规模压铸生产，可用于生产有散热要求的汽车零部件。

3. 高韧性压铸镁合金

针对现有压铸镁合金塑性较差的问题，中国科学院长春应用化学研究所孟建课题组 [13] 采用稀土元素 Sm 代替 AE44 中的 LaCe 混合稀土，通过压铸制备了 Mg-4Al-4Sm-0.3Mn (wt%) 镁合金，室温下该合金的伸长率可达 21%，屈服强度为 157 MPa，抗拉强度为 245 MPa，相对于传统的 AE44 伸长率提高了近一倍。伸长率显著提升主要得益于材料中第二相形态的改变，如图 5 所示。

4. 高速挤压变形镁合金

日本国立物质材料研究所 (NIMS) 与国立长

表 2 JDM1—JDM4 镁稀土合金典型力学性能

合金	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	温度 /°C
JDM1-cast T6	140	280~300	6~10	室温
	130	200	15	200
JDM2-cast T6	230	320~340	3	室温
	200	250	6	250
JDM3-cast T6	230	250~280	2	室温
	210	250~300	5	300
JDM4-cast T6	300	380~420	2	室温
	230	250	6	300

注：cast T6 是指金属型铸造后 T6 处理。

冈技术科学大学共同发明了新型高强度变形镁合金 (Mg-1.1Al-0.3Ca-0.2Mn-0.3Zn, wt%, AXMZ1000) [14]。AXMZ1000 镁合金对挤压速率敏感性较低, 可以采用高速挤压, 其常温下成型性能可与中等强度的铝合金媲美。高速挤压 AXMZ1000 变形镁合金有望在汽车座椅 (车身系统) 等部件上获得应用。

(二) 成型新技术

1. 镁合金汽车轮毂成型技术

镁合金汽车轮毂 (底盘系统) 质量较小, 具有能耗低、操控性好、安全性高等优点, 一经提出即受到汽车厂商的关注, 但由于成品率和产品稳定性较低、价格较高等因素, 镁合金汽车轮毂一直未能进行大批量销售。随着林州市鼎鑫镁业科技有限公司和河南德威科技股份有限公司两家正反挤压成型生产线的建设与投产, 镁合金汽车轮毂有望进入商业化生产阶段。镁合金汽车轮毂正反挤压成型技术流程如图 6 所示 (图片源于鼎鑫镁业科技有限公司), 包括连铸坯料的切割、均质化处理后的正反挤压一次性成型、机加工及表面涂装。目前 AZ80 正反挤压镁合金汽车轮毂已经开始了小批量销售。

与此同时, 上海交通大学在前期镁合金汽车轮毂低压铸造成型技术的基础上, 进一步开发出铸造 + 旋压复合成型 (铸旋) 技术。铸旋成型技术与早期低压铸造成型技术相比, 能够显著提高镁合金汽车轮毂铸坯成品率, 轮辋部分通过旋压变形后显

微组织显著细小, 室温力学性能得到明显的提高。图 7(a) 为采用铸旋成型技术制备的 20 寸镁合金汽车轮毂; 轮辋旋压前后的显微组织如图 7(b)、(c) 所示, 旋压变形显著细化了轮辋处的显微组织。

2. 大型复杂薄壁镁合金部件真空压铸技术

与铝合金相比, 镁合金的高速充型能力更佳, 特别适合制备大尺寸薄壁部件。2016 年, 由 Meridian 公司生产的 AM60B 镁合金薄壁压铸车门获得美国铸造协会颁发的年度铸造大奖, 成为大型复杂薄壁镁合金压铸部件的代表作。该车门之前由 7 个钢制冲压件焊接而成, 重新采用镁合金设计之后, 质量减少 50% 左右, 工艺连接点 (焊点和铆钉) 也由 62 个减少到 10 个, 显示出了镁合金在车身部件上的应用潜力。

在国家重点研发计划的支持下, 上海交通大学联合东风汽车股份有限公司等正在针对汽车用减震台和副车架展开结构设计, 以期待镁合金在减震塔和副车架两类大型复杂薄壁部件的成型技术与应用上获得突破。

(三) 新应用

1. 镁合金发动机缸盖

发动机缸体 / 缸盖工作在一个热力耦合的苛刻条件下, 对材料要求较高。在与通用汽车公司完成 JDM1 镁合金缸体低压铸造技术之后, 上海交通大学与浙江凯吉汽车零部件制造有限公司合作开展了 JDM1 镁合金发动机缸盖的铸造成型与装车路况实验。在凯吉现有的铝合金缸盖模具的基础上, 通过铸造工艺的调整, 采用倾转浇注成功制备了 JDM1 镁合金发动机缸盖 (图 8(a))。缸盖完成 T6 热处理和机加工后进行了装车实验: 汽车行驶了

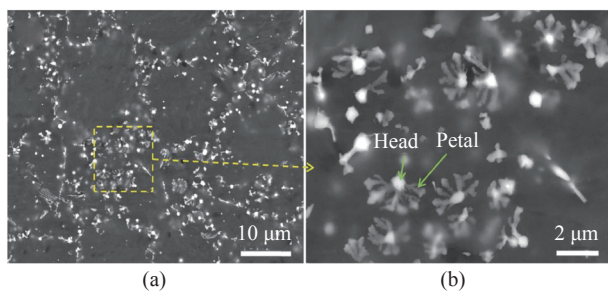


图 5 压铸 Mg-4Al-4Sm-0.3Mn 合金 as-cast 下的显微组织: 第二相呈块状分布 [13]

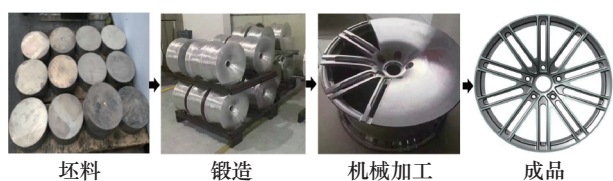


图 6 镁合金汽车轮毂的正反挤压成型流程图

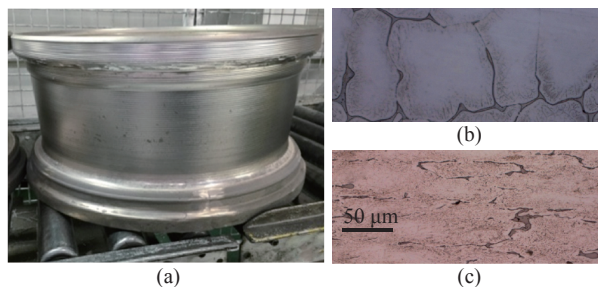


图 7 JDM1 镁合金铸旋成型汽车轮毂 (a); (b) 旋压前显微组织 (as-cast), 屈服强度、抗拉强度、延伸率分别为 85 MPa、138 MPa、4.8%; (c) 旋压后显微组织 (as-flow formed), 屈服强度、抗拉强度、伸长率分别为 278 MPa、317 MPa、8.4%

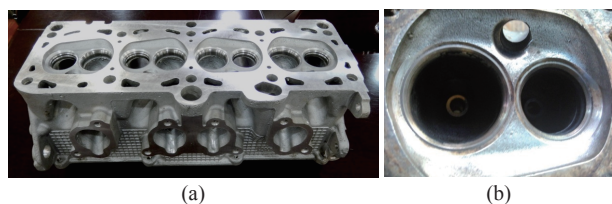


图 8 JDM1 镁合金发动机缸盖 (a) 和 (b) 经过 9 000 多千米路况实验后燃烧室的表面形貌

9 000 多千米后将镁合金发动机缸盖拆除测量, 燃烧室和排气道清洗后发现, 镁合金缸盖温度最高部位的燃烧室和排气道尺寸上没有变化, 表面整洁光滑, 如图 8(b) 所示。对凸轮轴孔和挺杆孔尺寸进行了测量, 前后数据对比表明凸轮轴和挺杆在使用过程中无磨损, 即 JDM1 镁合金发动机缸盖能够长期胜任汽车发动机热力耦合的复杂工况使用要求。

2. 全镁车身

2016 年 9 月, 山东沂星电动汽车有限公司开发制造出镁合金轻量化电动客车, 车身高 8.3 m, 车身骨架全部采用镁合金材料, 车身蒙皮为铝合金板, 镁合金用量为 226 kg, 与钢制车身骨架相比减重达 70%, 展示了镁合金在车身部件上的减重优势。

三、铝 / 镁合金汽车部件应用阻力与发展建议

尽管铝合金、镁合金在汽车上的应用已经成为一种必然趋势, 但目前大批量应用仍然阻力重重。

1. 原材料成本升高

钢制件采用铝合金、镁合金制备后, 构件采购成本显著提高。以车身用的铝合金板材为例, 6011 和 6016 铝合金汽车覆盖板材的市场价格为每吨 38 000 元, 而汽车钢板的市场价格仅为每吨 8 000 元, 去除密度差异, 铝材的材料成本仍比钢材要高出许多。这也是为什么目前全铝车身主要用于高端汽车的主要原因, 中低端汽车的售价很难承受轻量化所带来的制造成本的上涨。

2. 研发与生产成本提高

铝合金、镁合金代替钢材时, 需要根据新材料的特性进行产品结构再设计, 产品试制与检测, 设备、模具与生产线更新等, 这些研发摊销, 显著提高了新产品的制造成本, 也显著增加了企业的研发风险。研发成本较高和研发收益的不确定性是汽车

企业不愿意主动进行铝 / 镁合金轻量化尝试的主要原因。

3. 维修成本增加

铝 / 镁合金材质较软, 在使用过程中容易发生变形损坏, 而这些损坏通常很难采用钣金这类比较简单的工艺进行修补, 往往需要专业化技能和装备进行维修, 甚至更换新配件, 显著提高了用户的使用成本。

4. 镁合金防腐与连接技术不成熟

镁合金由于自身氧化膜层不致密, 耐腐蚀性能较差, 科研机构虽然开发了多种防护涂层, 但技术缺少实际应用检验, 多停留在实验室阶段。由于在汽车上应用较少, 镁合金与铝、钢制件的连接问题尚未充分暴露, 这方面的研究也比较少。

从上述铝 / 镁合金部件在汽车上应用的阻力可以看出, 铝 / 镁合金轻量化技术尚处于一个发展阶段, 从原材料、研发生产到售后维修, 甚至在某些关键技术仍处于一个有待完善的阶段, 在这样一个发展阶段抓住机遇提高我国汽车工业的铝 / 镁合金轻量化技术能力是每一个材料和汽车科技工作者共同面临的难题。笔者提出以下几点发展建议供参考。

(1) 提高中国汽车企业新材料的应用能力。中国汽车工业经过三十多年的高速发展, 制造能力和工业规模得到了显著提升, 但新材料的应用能力较低, 原创性的设计多来自于国外。因此, 只有提升汽车工业的原创设计能力才能从根本上释放我国铝 / 镁合金部件的轻量化需求。

(2) 完善产业链和产业基地, 降低铝 / 镁合金部件轻量化成本。目前铝 / 镁合金部件产业链尚未形成, 相关厂商缺乏, 原材料价格居高不下。如车身用铝合金板目前只有少数几家跨国公司能够批量稳定生产, 市场竞争不充分, 原材料价格较高。因此, 我国汽车工业可以有针对性地布局相关产业链, 形成产业基地, 通过市场充分竞争和规模效应降低铝 / 镁合金部件产品的价格, 降低轻量化成本。

(3) 深入开展个性化基础研究, 攻克瓶颈问题。针对铝 / 镁合金部件轻量化技术难题, 如镁合金的耐腐蚀问题, 可以变换思路, 从应用中的防腐处理入手, 解决镁合金耐腐蚀性能较差的难题。

(4) 以压铸工艺的应用为突破口。汽车工业对零部件的价格非常敏感, 铝 / 镁合金部件的大批量

应用须建立在较低的生产成本上。压铸工艺生产效率高、大批量生产后单件摊销成本较低。因此，汽车厂商可以采用铝 / 镁合金标准部件的方式降低零部件的生产成本。

(5) 以镁合金汽车轮毂应用为突破点。新能源汽车已经成为汽车工业的发展方向，新能源汽车取代传统汽油车的一个关键点在于新能源车的续航能力获得突破。除了与电池参数有关外，续航能力还与汽车的轻量化相关。路况试验表明，出租车铝合金轮毂更换成同尺寸的镁合金轮毂后，续航能力提高 >8%。因此，可以以镁合金轮毂在电动汽车上的应用为突破点，推动镁合金在汽车上的更多应用。

四、结语

2016 年，我国发布的《节能与新能源汽车技术路线图》指出，到 2020 年，乘用车新车平均油耗要求达到 5.0 L/100 km；到 2025 年，乘用车新车平均油耗达到 4.0 L/100 km；到 2030 年，乘用车新车平均油耗达到 3.2 L/100 km。为了达到这样一个目标，2030 年单车用铝量将超过 350 kg，单车用镁量将达到 45 kg，因此在未来的 10~15 年，铝合金、镁合金在汽车上的应用将呈现爆发式的增长。作为中国铝合金、镁合金新材料与成型技术主要研发机构之一，上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心愿与国内外同行、上下游企业共同应对这一历史性挑战，抓住机遇，推动我国汽车轻量化的进程。

参考文献

[1] 郭玉琴, 朱新峰, 杨艳, 等. 汽车轻量化材料及制造工艺研究现状 [J]. 锻压技术, 2015, 40(3): 1-6.
Guo Y Q, Zhu X F, Yang Y, et al. Research state of lightweight material and manufacture processes in automotive industry [J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(3): 1-6.

[2] 宫永玉, 王翌, 张志鹏. 新能源汽车轻量化途径及其评价 [J]. 汽车实用技术, 2017 (1): 5-6.
Gong Y Y, Wang Z, Zhang Z P. New energy vehicles lightweight

approach and its evaluation [J]. Automobile Applied Technology, 2017 (1): 5-6.

[3] Ingarao G, Gagliardi F, Anghinelli O, et al. Sustainability issues in sheet metal forming processes: An overview [J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(4): 337-347.

[4] Zhang P, Li Z M, Liu B L, et al. Effect of chemical compositions on tensile behaviors of high pressure die-casting alloys Al-10Si-yCu-xMn-zFe [J]. Materials Science and Engineering A, 2016 (661): 198-210.

[5] Zhang P, Li Z M, Liu B L, et al. Improved tensile properties of a new aluminum alloy for high pressure die casting [J]. Materials Science and Engineering A, 2016 (651): 376-390.

[6] Ji S, Watson D, Fan Z, et al. Development of a super ductile die cast Al-Mg-Si alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2012 (556): 824-833.

[7] Fu P H, Peng L M, Jiang H Y, et al. Effects of heat treatments on the microstructures and mechanical properties of Mg-3Nd-0.2Zn-0.4Zr (wt. %) alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2008 (486): 183-192.

[8] 付彭怀. Mg-Nd-Zn-Zr 合金微观组织、力学性能和强化机制的研究 [D]. 上海: 上海交通大学(博士学位论文), 2009.
Fu P H. Study on the microstructure, mechanical properties and strengthen mechanism of Mg-Nd-Zn-Zr alloys [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (Doctoral dissertation), 2009.

[9] 何上明. Mg-Gd-Y-Zr(-Ca) 合金的微观组织演变、性能和断裂行为研究 [D]. 上海: 上海交通大学(博士学位论文), 2007.
He S M. Study on the microstructural evolution, properties and fracture behavior of Mg-Gd-Y-Zr(-Ca) alloys [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (Doctoral dissertation), 2007.

[10] 高岩. Mg-Y-Gd-Zn-Zr 镁合金组织、性能及其蠕变行为研究 [D]. 上海: 上海交通大学(博士学位论文), 2009.
Gao Y. Microstructure, properties and creep behavior of Mg-Y-Gd-Zn-Zr alloys [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (Doctoral dissertation), 2009.

[11] Zhang Y, Wu Y J, Peng L M, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of an ultra-high strength casting Mg-15.6Gd-1.8Ag-0.4Zr alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014 (615): 703-711.

[12] Su C Y, Li D J, Ying T, et al. Effect of Nd content and heat treatment on the thermal conductivity of MgNd alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016 (685): 114-121.

[13] Yang Q, Guan K, Qiu X, et al. Structures of Al₂Sm phase in a high-pressure die-cast Mg-4Al-4Sm-0.3Mn alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2016(675): 396-402.

[14] Bian M Z, Sasaki T T, Suh B C, et al. A heat-treatable Mg-Al-Ca-Mn-Zn sheet alloy with good room temperature formability [J]. Scripta Materialia, 2017 (138): 151-155.