

镁合金在汽车制造业的应用

2016-01-24 材料科学与工程

为了提高汽车的燃油效率和降低其废气排放，减轻汽车的重量至关重要。为了达到这一目的，用镁合金来制造合适的汽车零部件似乎是一种显而易见的明智之举。作为一种最轻的结构金属，镁比钢轻 75%，比铝轻 33%左右。

美国汽车研究理事会的一个社团组织“美国汽车材料合作伙伴”在其研究报告“2020 年镁的应用前景展望：北美汽车业对镁的战略构想”中指出，与铝相比，镁具有更高的比强度、延展性和抗冲击性；与钢相比，镁可以提供更好的缓冲阻尼和耐冲击性；与塑料相比，镁具有更高的强度和刚度，以及更好的热稳定性和导热性。

此外，该报告指出，为了提高燃油经济性和减少废气排放，镁的材料特性还可以提供许多好处，其中包括：

- (1) 通过使汽车重心后移，减轻前部重量，可以提高汽车的加速/减速、操控/转向响应性能。
- (2) 由于镁合金可以铸造出完整的大尺寸部件，而不必像钢件那样需由众多单个零件组合而成（这些零件容易相互摩擦，并引起振动），从而可将汽车噪声减至最小。
- (3) 由于镁铸件可能比同样的钢制零件更廉价（尤其当年产量小于 20 万件时），因此可以降低制造成本。镁铸件的加工成本要低于由多部分构成的钢制冲压件，因为加工冲压件的每个部分都需要相应的模具。例如，加工一件由 30 个部分构成的钢制仪表盘横梁需要 30 套工装，而铸镁件横梁只需要 6 套工装。

然而，在美国汽车制造商生产的汽车中，镁合金零部件的重量平均只有大约 12 磅，仅占一辆汽车全部材料的 0.3%左右。实际上，镁在汽车上的应用并不很普遍，因为它的成本比一些竞争性材料更高。由于企业的竞争本质，它们会更多地使用价格比较低廉的材料。镁合金零部件使用率的下降，部分也是因为北美市场的模铸企业因关闭和合并而不断减少，几年前发生的金融危机和汽车行业遭遇的困境产生了很大的影响。

咨询企业 Ducker Worldwide 公司发表的一份预测平均每辆轻型车所用材料净重量变化（见表 1）的报告时估计，镁合金零部件将从 2008 年的每车 8 磅左右增加到 2025 年的 22 磅。这种用量的增加将全部集中在传动零部件上（主要是进气歧管）。镁合金传动件和传动箱可能最终将会取代铝合金传动件和传动箱，但不会用于制造结构件。

表 1 平均每辆轻型车所用材料净重量的变化趋势（单位：磅）

材料类别	2008 年	2010 年	2012 年	2015 年	2025 年
轻质钢板	999	976	861	650	408
烘烤硬化和高强度低碳钢板	489	496	513	516	240
先进高强度钢板	124	156	194	251	375
所有其他钢种（长线产品）	602	606	596	580	542
轧制铝板	29	31	34	67	156
铝型材	10	12	14	19	30
铸铝结构件	20	20	22	25	60
所有其他铝制件	266	267	273	289	304
铁	307	305	295	290	270
铜	52	52	52	52	52
其他金属（镁、钛、铅、锌、铂金）	101	103	104	105	115
聚合物	340	345	350	356	400
其他非金属材料	494	493	492	490	475

到 2025 年，汽车材料的这种变化，加上制造足迹减少 2%，将使汽车的平均惯性重量和平均整备质量（净重）比 2008 年分别减轻 10%和 10.6%。该公司估计，到 2025 年，镁的用量将增加到每车 22 磅。如果综合考虑混合动力电动汽车 44% 的普及率，以及对发动机尺寸的适当调整，到 2025 年，在不降低安全性能、使用性能、功能性或舒适性的前提下，汽车的燃油经济性将能达到 51 英里/加仑。

在美国汽车上，目前主要有以下镁合金零部件：

- （1）底盘（如刹车支架和支架总成、刹车踏板支架、安全气囊机架、离合器踏板支架和总成；
- （2）内部设施（如座椅基座、IP 支撑柱和支架、方向盘骨架、转向柱支架和轮毂）；
- （3）外部设施（如天窗盖总成、外后视镜骨架和顶棚框架）；
- （4）动力传动系统（如交流发电机支架、阀盖、凸轮盖和变速箱）。

欧洲汽车往往使用更多的镁合金零部件，增加的应用包括几个车轮、底盘前端框架、坐垫和靠背，以及动力传动系统的齿轮箱（手动和自动），甚至还包括汽缸体（可以大大降低发动机重量）。由于欧洲山路较多，因此欧洲人对汽车的操纵性能更感兴趣。”

在美国，镁的价格比在欧洲更昂贵，因为美国控制原材料进口的国际贸易委员会对从中国进口的镁征收反补贴关税，而绝大部分镁都产自中国。全世界的镁大约有 85% 都是在中国生产的。征收关税有效地将产自中国的镁挡在美国市场门外。而在北美，只有美国镁业公司一家生产商。美国镁业公司位于盐湖城。由于镁主要来自天然氯化镁，因此，那些拥有高浓度盐水资源的地方（如大盐湖和死海）是生产镁的理想地点。

如果一辆采用直列六缸发动机的汽车用镁代替铝、钢、铁、锌或塑料来制造所有合适的零部件，则镁的总用量将达到 380 磅左右，而该车重量可以减轻 300 磅。汽车制造商通过改进动力总成、变速箱和停止/启动技术，可以实现提高燃效标准目标的 75%，其余 25% 则需要通过汽车轻量化来实现，而镁将在汽车轻量化中发挥作用。

这种作用到底有多大，仍然是一个存在争议的问题。在一项由能源基金会（由一些对可持续能源解决方案感兴趣的重要基金会联合组成）资助的研究中，路特斯工程（美国）公司（Lotus Engineering USA）试图确定对一种选定的基准型汽车——2009 款丰田 Venza（代表 CUV 多用途车）进行减重的可能性。据该公司报告，它已研发出两种该车的基本架构：采用 2014 年计划启用的适用技术和 2017 年投产的“低发展水平”汽车可通过动力总成轻量化实现减重 21%（611 磅），其镁合金材料使用量可达 2%；采用 2017 年计划启用的技术和 2020 年投产的“高发展水平”汽车（图 1）可实现减重 38%（1,093 磅），其镁合金使用量达到 16%。



图 1 “高发展水平” Venza CUV 的车身设计

Lotus 公司分别从技术和商业的角度开展了此项研究，技术方面主要针对汽车的结构完整性和防撞性等，而商业方面则重点关注加工、零部件和装配成本。Lotus

公司从最高的层面（即系统层面）来研究汽车的基本架构，材料的选择是基于其实现技术和商业目标的能力，围绕汽车结构来配置的。为了在合适的部位采用合适的材料，对汽车结构和架构策略进行了优化。

Lotus 公司已将镁合金应用于所有的汽车开闭件，在市售的汽车（如林肯 MKT）上也能发现其身影。据子午线轻量化技术公司（Meridian Lightweight Technologies）估计，用镁合金铸件（与林肯 MKT 掀背式车门所用铸件类似）和铝合金外面板组成的开闭件比 Venza CUV 用钢冲压件制成的相同部件重量减轻了大约 40%（图 2）。



图 2 林肯 MKT 多用途 SUV 掀背式铸镁车门框的重量比相同的冲压钢门框轻 40%

采用镁合金的优点是可以大幅降低结构的复杂性。例如，仪表盘结构通常由许多钢制构件焊接而成，我们可以用一个镁合金铸件来替代整个部件。Lotus 公司一直通过轻量化和优雅、简洁的设计来提高汽车性能。这是自 Colin Chapman 在 1952 年创立 Lotus 公司以来一直秉持的理念，也是该公司在这项特定研究中所采用来降低 Venza 复杂性的主要架构方法之一。

以 Venza 的车身结构为例，Lotus 公司已将其零部件数量从 400 多个减少到 221 个。零部件的削减也减少了相关的加工量。Lotus 公司通过优化车身结构系统的零部件，也附带减少了其他系统（如悬挂系统和内饰系统）的零部件数量。

与钢制冲压件相比，镁合金铸件除了能将多个构件整合为一体外，还使零件设计

师可以减小零件的尺寸（如厚度）。镁合金铸件还能最大限度地减少加工时废弃的材料。当冲裁大尺寸构件（如车门框架或车体侧面窗框）时，约有 20%—30% 的材料变成废料。而镁合金铸件可以最大限度地减少废料。

当然，通过使用镁等材料，汽车重量的减轻也会降低燃油消耗。根据美国能源部的估算，汽车重量减轻 10%，可以节省 7% 的燃油。Lotus 公司表示，其 2020 年投产的“高发展水平” Venza CUV 实现总重量（包括动力总成）减轻 38% 的目标后，将使油耗降低 23%。

镁合金零部件除了比其他竞争性轻质材料的原材料成本更高以外，通常还需要进行表面涂层以避免电化学腐蚀，从而会增加其制造成本。据轻量化战略咨询公司的 Cole 博士介绍，电化学腐蚀是限制镁合金用于汽车零部件的关键问题之一。当镁与其他金属接触并存在电解质（如盐水）时，就会遭受电化学腐蚀。

电化学腐蚀的另一种形式是由某种其他金属的细小颗粒引起的表面污染，它会造成严重的点蚀。含有二硫化钼和碳的模具润滑剂、存在于喷砂清理介质中的重金属颗粒以及在铸造、锻造、挤压、轧制和冲压加工时从模具中转移出来的铁粒子都有可能造成这种腐蚀，必须确保用多种材料制造的汽车不会出现腐蚀问题。

在紧固件（尤其是钢制紧固件）上最容易发生电化学腐蚀。最有效的补救方法是选择具有兼容性的连接件材料和减小阴极表面积。不过，有时汽车制造商还必须发明一些独具特色的设计方案。例如，福特 F-150 卡车的前端装配支架和通用 Corvette 跑车的发动机托盘都需要对连接件及垫圈、垫片和螺栓材料进行大量现场设计工作。他还指出，由于欧洲汽车允许使用铝合金紧固件，因此较少出现此类问题。

据子午线轻量化技术公司介绍，AZ91D 镁合金具有非常好的耐腐蚀性。这种最常见的高压模铸镁合金通常用于制造动力总成和其韧性比变形能力更重要的机械零部件。

在被装配到汽车上之前，即使是近净成形的镁合金铸件也需要进行切削加工。虽然人们并不认为镁是一种难加工金属材料，但镁合金零件的切屑却具有易燃性，而且在精加工时产生的切屑可能比粗加工切屑更容易着火，因为这些切屑更薄，具有更大的表面体积比。此外，镁在不含抑制剂的水溶性切削液中可能会生成易燃的氢气，而过长的停机时间和低进给率也会增加发生火灾的可能性。

切削加工镁合金零件时，可能需要配备专用灭火器材，因为切削时存在产生火花的可能性（尤其在工件没有接地的情况下）。企业可采用一种光学装置来监测镁屑燃烧发出的亮光，并在着火的小切屑掉进切屑堆使火灾蔓延之前对其进行处理。

由于镁可溶于水（生成氢气）和容易氧化，从而增大了易燃性，因此最好采用干式切削，或使用添加有氢抑制剂或抗氧化剂的冷却液。此外，必须对过滤器进行精心维护，防止冷却液中镁微粒越积越多。必须持续监测冷却液中氢抑制剂的浓度。所有机床隔离罩内都需要安装氢浓度监测仪。只要正确进行维护管理，镁合金的切削加工就并不困难。

尽管目前镁在汽车制造业的使用量还远远少于铝和钢，但镁材料业正跃跃欲试，准备大举进入该行业。这是因为与其他含镁的商品相比，汽车的生产批量巨大，材料用量可观。汽车行业其产品性质决定了镁合金使用量迅猛增长的潜力最大。

最终，市场将会决定有助于满足未来汽车废气排放和燃油效率标准（如前不久奥巴马政府提出的到 2025 年，将在美国销售的轿车和轻型卡车的“企业平均燃油经济性”标准提高到 54.5 英里/加仑）的适当材料组合。

Lotus 公司的目标是采用最合适的材料来制造汽车零部件，不在乎它是钢、铝、镁或其他什么材料，只要它确实有效并具有商业可行性。解决这个问题的真正诀窍是设计出成本效益更好、重量更轻的汽车，并确保对零部件进行一体化设计，同时设计所有的系统。如果采用零敲碎打的方式，就不可能实现整体优化设计，例如，由于减轻了汽车的重量，就可以改变悬挂系统的设计。

德国夫琅和费汽车生产联盟正在帮助汽车制造商生产重量更轻、经济性更好的零部件。例如，夫琅和费机床和成形技术研究所（IWU）开发的镁合金车门（图 3）重量仅为 4.7 公斤，而同样的钢制车门重量为 10.7 公斤。



图 3 夫琅和费 IWU 开发的镁合金车门

虽然镁比钢和铝更轻，但其成形加工的难度也更大。夫琅和费 IWU 的研究团队目前还没有成熟的镁合金成形技术。生产这种车门表明其可以对镁合金进行成形加工。不过，虽然作为一种示范，该研究所能对 AZ31 镁合金车门进行成形加工，但还没有找到该工艺的正确润滑方法。

由于需要对成形工具表面进行加热，因此该工艺耗能很高。为了使镁合金成型，要求工具温度达到 250°C，该研究所的目标是将温度降低到 200°C。另一个困难是缺少宽度大于 700mm 的镁合金板（700mm 宽的板材用于加工车门时太窄）。为此，该所开发了一种镁合金激光焊接新工艺。镁合金的表面涂覆也具有一定挑战性，与铝合金相比，需要增加一道工艺步骤。

尽管存在各种挑战，但将镁合金应用于汽车行业可以获得各种好处。世界上的镁资源十分丰富。镁制零部件可以进行铸模加工。例如，镁制车门具有与钢制车门几乎相同的性能，比如说，它们的刚性就不相上下。

除了镁合金以外，一些非金属材料也对汽车的轻量化发挥了重要作用。Lotus 公司在关于丰田 Venza CUV（多用途车）减重可能性的研究报告中指出，复合材料已被用在大批量生产的多种车型上（如土星汽车和通用汽车早期的小型货车），而这种应用正被拓展到利基车型和专用车辆的结构领域。这些材料包括复合板材、在发泡芯板的正面或背面采用叠层材料（如铝或玻璃纤维）的多层复合材料和碳纤维复合材料。



图 4 阿斯顿·马丁 Vanquish 跑车的前部缓冲结构主要采用碳纤维复合材料制成

其他可能的应用还包括用长纤维增强聚丙烯材料制造行李厢地板和用长纤维增强聚氨酯材料制造货厢地板，以减少零件数量、缩短装配时间，同时保持结构刚度。Lotus 公司在此项研究中主要使用了玻璃纤维增强复合材料。

Lotus 公司设计的复合材料零件形状比较简单，但包括了一些弯曲的结构特征，如模塑成型的后排座椅弯曲形状。并采用了轻质结构材料，并去掉了一些在后排座位常见的、非常重的零部件，如座椅升降装置和座椅支架。