

汽车轻量化技术现状及展望

□ 中国船舶重工集团公司第725研究所/王明建 夏申琳 潘恒沛

本文阐述了国内外汽车轻量化的研究现状，系统地介绍了汽车轻量化技术的实施途径及先进的加工制造技术，并对汽车轻量化技术的发展进行了展望。



轻量化：绿色制造的必然

截止到目前，全球汽车保有量已接近12亿辆，汽车造成的能源消耗与污染物排放问题日益凸显。低排放、低油耗已成为节约型社会长期发展所不可或缺的需要。汽车轻量化则是实现这一目标的关键技

术，中外车企也争相开发出了一系列轻量化新品。

相关文献数据显示，汽车的整车质量若减少10%，燃油利用效率可在原基础上增加6%~8%；若滚动阻力减少10%，燃油效率可提高3%；若汽车车桥、变速器等机构的传动效率增加10%，燃油利用效率可增加7%。可见，伴随汽车轻量

化而来的突出优势就是降低燃油消耗，减少污染物的排放。

汽车轻量化实现途径

汽车轻量化技术可以分为三个主要方面：结构优化设计、轻量化材料应用和采用先进制造工艺。其中，结构优化设计方面包括汽车结构的尺寸优化、形状优化、拓扑优

化和多学科设计优化；轻量化材料包括高强度钢、铝合金、镁合金、钛合金、碳纤维、塑料和复合材料等；先进制造工艺方面包括，液压成形和激光焊接等。

1.合理的设计

20世纪70年代，得益于计算力学和计算机技术的进步，美国通用汽车等公司率先采用了有限元法，目的是进行汽车设计探索。1990年后，大型计算机辅助工程软件（CAE）渐渐成熟，开始在汽车零部件和整车开发中进行应用，并呈现逐年增加的趋势。经过近十年的发展，CAE已普遍在汽车整车结构设计中得到了应用，同时也在汽车零部件的设计中得到应用。

（1）尺寸优化。结构尺寸优化要有设计参数，一般以汽车零部件的形状尺寸为变量，以满足各种工况下的刚度、振动、强度、吸能等为约束前提。有关汽车设计中的线性静力学问题和线性振动问题，可以使用传统的数值优化算法对轻量化直接进行设计。汽车设计中会面临各种各样的问题，线弹性问题就是设计首先要面对的，因此，以线弹性尺寸优化为基础的设计方法在轻量化设计中得到普遍应用，包括对汽车上使用的零部件进行优化和对汽车进行减重。

汽车设计不仅仅要同时考虑振动、线性静力问题，还需要对非线性问题进行考虑。因为汽车的碰撞过程非常复杂，它涵盖了高速运动与碰撞、大变形以及非线性问题，往往很难得到有关碰撞响应的灵敏度信息，所以没有好的办法将传统优化算法进行直接应用。为了解决这个难题，汽车设计师们以往采用

近似模型法，或是将汽车发生的碰撞看成是一个过程，过程中的每一时间节点的载荷用线性载荷进行等效，随后以线性载荷为基础来对轻量化进行优化设计。

目前比较典型的近似方法有响应面函数法（response surface method, RSM）、径向基函数法（radial basis function, RBF）及Kriging模型法等。以近似模型方法为支撑，对汽车碰撞问题进行分析，可以实现汽车的轻量化、安全性设计。

（2）形状优化。形状优化即适当改变汽车的外形，目的是为了结构更加均匀地受力，具体措施是对汽车结构的整体或者外部局部形状进行优化，从而使材料能够发挥出更大的潜力。形状优化方法对于拥有规则几何外形的形状结构，可以对结构的几何外形进行参数化，这样就可以将形状优化向尺寸优化问题进行转变。但是从汽车本身的结构看，其中很多地方都是不规则的几何外形，对于这样的情况就难以采用参数方法来对汽车几何

外形进行描述，这是无法解决的一个难题。现阶段对于这个问题人们想到了一种解决办法：采用无参形状优化方法，该方法的优点就是不需要对尺寸参数进行考虑。

（3）拓扑优化。拓扑优化要有进行优化的对象，一般是指事先就已经指定好的设计空间的材料分布，然后采用拓扑优化算法进行优化，自动得到最优化的动力传递路径，以达到尽可能多节省材料的目标。拓扑优化被广泛承认是一种最具有应用价值的方法，拓扑优化也有其局限性，主要应用在汽车开发前期的结构概念设计阶段。现在已经出现了很多种拓扑优化方法，Bendsoe等研究人员开发出的变密度法就是其中最主要的拓扑优化方法之一。但是变密度方法也存在着局限性，它的计算结果仅是提供汽车结构主要的材料分布情况，同时还需汽车设计师再次进行设计。所以为了得到效果明显的质量减轻的可行性结构方案，设计人员可谓费劲心思，就是要综合利用拓扑优化、形状优化和尺寸优化等多种优



化方法。

(4) 多学科设计优化。汽车轻量化不是简单的问题，它涉及到多门学科综合设计优化的问题。举例来说，对车身进行轻量化设计时就不能单单考虑一个方面，需要对如强度、刚度、碰撞安全性、舒适性、疲劳等多个学科性能进行同时考虑。但因为目前存在的种种问题，还不能够在一次优化中对它们进行全面综合的考虑。在轻量化设计中开发人员找到了一种可行方法，即采用“分解—协调”的方案，这是一种多学科优化方法。这种方法称为多级优化方法，目前典型的方法有并行子空间方法（concurrent subspace optimization, CSSO）、协同优化方法（collaborative optimization, CO）、解析目标递传法（analytical target cascading, ATC）等。

2. 新材料应用

对汽车车身减重是车企进行轻量化的一大途径，具体有以下多种方案：

(1) 采用高强度钢。相比于其他的材料，高强度钢可以在同密度、同弹性模量而且工艺性能好的情况下，达到截面厚度减薄的效果。由于铝、镁合金等轻量化材料本身的局限性，在现阶段汽车制造中钢的使用量还是占主要地位，将来汽车材料中使用最多的仍是高强度钢。高强度钢因为其自身的优点，可以实现汽车结构的薄壁化，适当采用高强度钢可以降低整车质量。

据JDDR统计，1980年高强度钢板采用的比例是8.7%，时隔12年后的1992年就已经上升到23.3%，

如今ULSABVC项目研制的概念车中高强度钢材料的使用量已经占到了97%。瑞典SSAB公司已经研制出材料屈服强度达到700MPa的超高强度冷轧薄钢板；韩国浦项钢铁公司也成功研制了成形很好的轻量化汽车钢板；我国在开发超细晶粒钢方面也取得了一些成绩，宝钢、攀钢、珠钢和武钢都开发出了一系列新型细晶化低碳高强度钢板。但目前我国在这方面还比较落后于国际先进水平。

(2) 采用铝合金。国际铝协统计数据表明，2006年铝合金在单个轿车中的平均用量为121kg，2015年为150kg，预计2020年会达到180kg。现阶段汽车用铝合金中，占主要部分的是铸铝，在汽车用铝量中约占80%。锻造铝的力学性能更好，在汽车上也得到了应用，如横向转向叉、锻造铝车轮已在Audi A8、A4等车型上进行应用。

变形铝合金中的铝型材、铝板从20世纪80年代在前翼子板、车身发罩外板、顶盖开始进行应用，后来在行李箱盖板、车门、车厢底板结构件、保险杠、热交换器甚至全铝车身等也得到了应用。此外，铝合金泡沫是一种超轻多孔隙结构材料，是铝合金经发泡后得到的，具有很好的隔振、吸能、吸声等特性，同样可以作为轻量化材料应用于汽车上。

(3) 镁合金。在汽车轻量化材料中，镁合金目前被公认为最有发展前景的材料。最早能够追溯到80年前，大众生产的甲壳虫上就采用了镁合金材料构件。1982年，随着镁合金价格的下降和防腐性能的

提高，福特汽车公司再次将镁合金应用于变速器、离合器、制动系统和转向柱等各类壳体零件上。我国“十五规划”中对镁合金进行重大专项攻关，在部分车型上已开始采用进行应用，例如课题立项取得的成果中可以采用镁合金制造的变速器、方向盘的心部骨架等部件。轿车上镁铸件的应用现在已经比较广泛，在汽车上合金零部件的应用已有近70种，如变速器箱体、转向盘骨架等。

(4) 钛合金。随着90年代跑车、豪华汽车、赛车市场规模的逐年扩大，钛合金制零部件得到了快速发展。钛合金零部件目前主要有以下应用：发动机连杆、气门弹簧座、发动机气门、钛合金弹簧、排气系统及消音器、涡轮增压器、车体框架等。但其高成本制约了钛合金在汽车上的应用，同时钛合金的成形及焊接问题也未得到解决。

(5) 碳纤维复合材料。早在1992年美国通用汽车公司就研制了超轻概念车，该车身使用了碳纤维复合材料，车身的整体质量仅为191kg。福特汽车公司为了进一步降低汽车质量，2008年为燃料电池汽车研制出一款碳纤维复合材料行李箱盖。欧盟开发新能源汽车与一家德国大丝束碳纤维厂家及日本三大碳纤维厂家合作开发全CFRP汽车。国内车企也已经开始在碳纤维复合材料方面开展研究，如上汽集团技术中心与同济大学合作，探索了碳纤维复合材料在汽车上应用的可行性，尤其是在车身外覆盖件上。

(6) 塑料。塑料是汽车上采用最多的非金属材料。世界汽车

在2000年塑料平均用量每辆就已达105kg，在汽车总质量中约占8%~12%。最近几年，我国汽车塑料件占整车质量的比例达到12%~18%。近年来塑料在发动机周围和车身板的零部件上的使用量在持续增加，占车身总质量的10%~15%，尤以美欧和德国的车企采用为多。例如奔驰Smart汽车、莲花Elise汽车和雷诺Espace均采用了塑料车身；1998年戴一克公司开发的CCV概念车采用了四块热塑车身板，算上板材连接件，白车身板总质量仅为95kg，在全热塑车身方面开创了里程碑，前大灯和尾灯的玻璃也将摒弃传统的天然材料，转而使用一般性热固性塑料。

(7) 其他轻量化材料。精细陶瓷材料是继金属、塑料之后发展起来的第3大类材料，其发展历史仅有短短的20年。陶瓷材料不仅直接起到减重的效果，更因其杰出的耐腐蚀性、耐热性和耐磨性，用于汽车发动机热交换器及燃烧室等零部件，增大功率，极大降低燃油消耗。蜂窝夹层材料在飞机上是早已普遍采用的新型材料，其最大特点是比强度高、刚性高、密度低。目前在汽车上应用的实例还较少，但在不断进行应用研究，相信将来会得到较多应用。

3.轻量化制造工艺

除了采用以上所述轻量化材料和结构来达到汽车轻量化，与之相应的制造工艺也获得了应用，如用于车身结构连接的胶接和胶焊工艺等，还有其他一些新型成形和连接工艺，如激光焊接、液压成形和激光拼焊等。

(1) 液压成形。德国奔驰与宝马是最早在汽车上采用液压成形零件的车企，奔驰在1993年成立了管材液压成形加工车间，“ULSAB计划”于1994年启动，促进了液压成形技术的发展。美国相关的机构与车企强强联合组成了“液压成形技术研究开发协会”，加快该技术的应用与开发。2000年，中国一汽集团和哈尔滨工业大学强强联合开发成功国内首台液压成形设备，该设备不能生产大型零件，只能用于生产形状不大的零件，如Audi A6轿车后轴纵臂。中国一汽2001年探索应用液压成形技术生产M6轿车副车架。目前，液压成形产品已经广泛的在汽车上进行应用，已在超过50%的汽车底盘上进行装配应用。

(2) 激光焊接。激光焊接可以将不同材质、不同厚度、不同冲压性能、不同强度和不同表面处理状况的板坯往一起拼焊，用来进行大型覆盖件压制。这种拼接板坯的使用不但可使冲压件强度合理又可使质量减轻，并能使零件和模具数量减少，使尺寸精度提高，提高结构强度和刚度；进而提高设计和开发的效率，缩短周期，避免材料浪费，达到成本降低的目的。最早于1985年德国大众将激光拼焊在Audi车型的底盘上应用。目前，几乎全部车企都应用了激光拼焊技术。在汽车制造中激光焊接的另一个重要应用是激光焊接车身框架。激光焊接属于连续连接，可以使得车身的强度和刚度提高；同时，采用激光焊接技术可以减少钢板使用量，达到降低车身质量的目的。例如，德国大众2004年的第5代Golf车身，激



光焊达到了70m。

汽车轻量化技术展望

未来汽车轻量化应主要着眼于发展以下几方面的技术：

(1) 结构优化设计技术。应进一步研究和完善汽车结构的多学科、多目标优化设计方法，以及拓扑优化方法，并将拓扑优化、形状优化和尺寸优化等多种优化方法结合起来应用，希望获得可行性的结构优化方案，以达到汽车明显减重的效果。

(2) 轻量化材料应用。大力扩大变形镁合金、钛合金、新型塑料和纤维增强复合材料在汽车上的应用；进行多种材料混合结构的设计理论、方法和相应工艺研究，在汽车的各个部位采用合适的相应材料，充分发挥各种材料的优势，以多材料一体化的设计理论和方法实现选材与零部件功能的最优组合。

(3) 先进制造工艺：推广液压成形、激光焊接在汽车制造中的应用，并进一步开发热成形工艺和变厚度板的应用技术。

此外，汽车所有零部件质量总和约占整车质量的3/4，汽车零部件轻量化技术研究必须得到重视。总之，应充分发挥不同轻量化技术的优势，实现汽车轻量化技术的系统化和集成化。 **AUTO1950**