

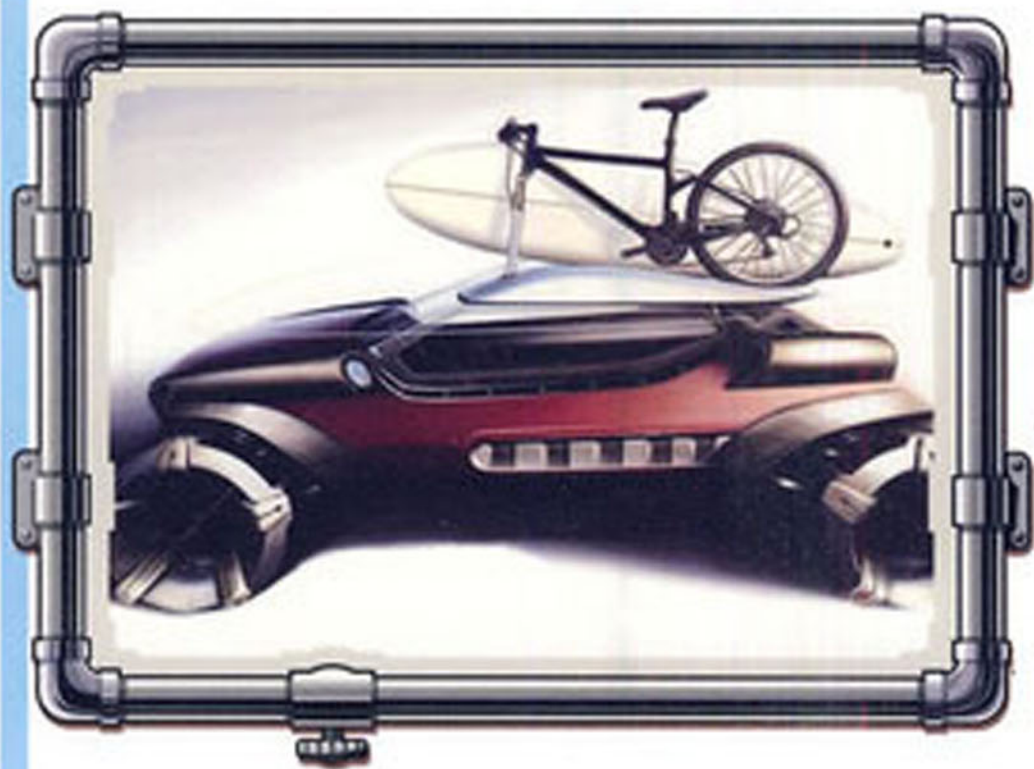


21世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材

汽车车身

轻量化结构与轻质材料

王宏雁 陈君毅 编 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材
同济大学“十一五”规划研究生教材
同济大学教材、学术著作出版基金资助

汽车车身轻量化结构与轻质材料

王宏雁 陈君毅 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书系统讲述了现代汽车基于多种轻质材料进行车身结构设计过程中所涉及的轻质车身结构要求及其设计方法, 轻质材料的基础知识, 以及与结构轻量化和轻质材料相匹配的新型制造工艺。

全书共分6章, 内容包括绪论, 车身用轻质材料, 轻质车身结构的成型工艺, 轻质车身结构的连接工艺, 应用多种材料的轻质车身结构设计和车门的轻量化设计示例。全书简要介绍了汽车车身轻量化的意义, 车身轻量化的技术路线, 结构与材料轻量化的技术难点和研究发展趋势, 以及应用这些轻质结构和材料的技术经济分析; 着重而详细地讲述了目前在汽车上所应用的主要轻质材料高强度钢、铝合金、镁合金和复合材料的特性及汽车制造中所采用的新工艺、新方法。

本书可作为车辆工程专业和机械工程专业的教材, 也可供汽车行业相关从业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车车身轻量化结构与轻质材料/王宏雁, 陈君毅编著. —北京: 北京大学出版社, 2009.9

(21世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-15620-9

I. 汽… II. ①王…②陈… III. ①汽车轻量化—车体结构—高等学校—教材②汽车轻量化—车体—工程材料—高等学校—教材 IV. U463.82

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第132050号

书 名: 汽车车身轻量化结构与轻质材料

著作责任者: 王宏雁 陈君毅 编著

责任编辑: 童君鑫

标准书号: ISBN 978-7-301-15620-9/TH·0151

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>, <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者:

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 12.75印张 297千字

2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷

定 价: 25.00元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

由于人类对汽车的环保与节能有着越来越迫切的要求，汽车轻量化是目前汽车设计领域中的一个新兴的研究热点。本书基于多种轻质材料的车身轻量化设计所涉及的多学科交叉内容和汽车轻量化设计的最新研究成果，具体介绍了车身轻量化设计的基本知识、基本方法和所涉及的材料学、机械工程学、制造工艺学和汽车工程学等基础知识内容及它们在汽车车身上的应用，同时结合研究生教学特点，紧密联系前沿科学研究，突出汽车轻量化设计中结构—工艺—材料的协调与统一。

本书是中德两国的教授多年合作研究的结晶，凝集了世界范围内相关研究的最新成果，并且融入了编者多年来在这个领域里的研究体会和经验，前沿、实用、知识丰富可以说是本书的最大特色。本书力求反映现代汽车轻量化过程中的新理念、新材料、新结构、新技术、新工艺、新方法和新手段，取材丰富，图文并茂，结合大量的实例，深入浅出、循序渐进地指导学生学习有关汽车轻量化的基础知识，本书可作为车辆工程专业和机械工程专业研究生进行汽车轻量化设计学习的教材，同时可供汽车行业的工程技术人员参考。

本书第1、2、3章由陈君毅编写，第4、5、6章由王宏雁编写。王宏雁负责全书的统稿。

本书在编写过程中，参考了有关书籍和资料，在此向其作者表示感谢！尤其向我们的科研合作者德国德累斯顿工业大学轻质材料研究所的胡芬巴赫教授表示感谢和敬意！同时，还要感谢我们的学生，是他们帮助整理这本书的内容。本书在出版过程中，也得到北京大学出版社的大力支持，在此一并表示衷心的感谢！

由于编者水平所限，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者

2009年6月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.4.2 复合材料在车身轻量化发展 中的地位 and 作用	50
1.1 汽车轻量化的紧迫性	1	2.4.3 复合材料在车身上应用的 示例	50
1.2 汽车轻量化研究的方法	5	2.4.4 复合材料在汽车车身上 应用的出发点	53
1.2.1 新材料的应用	6	2.4.5 车身用复合材料的特征及其 与汽车性能的关联	61
1.2.2 结构优化设计	9		
1.2.3 革新工艺	10		
1.3 车身零件的轻量化对整车 轻量化的贡献	11	第 3 章 轻质车身结构的成型工艺	67
1.4 车身结构轻量化设计发展	11	3.1 车身用高强度钢的成型工艺	67
1.5 我国汽车轻量化现状	14	3.1.1 冲压技术	67
第 2 章 车身用轻质材料	18	3.1.2 激光拼焊板技术	71
2.1 高强度钢	18	3.1.3 液压成型技术	74
2.1.1 高强度钢的发展历史	18	3.2 车身用铝合金的成型工艺	80
2.1.2 高强度钢在车身轻量化发展 中的地位 and 作用	19	3.2.1 挤压成型	80
2.1.3 高强度钢在车身上应用的 示例	20	3.2.2 压铸成型	80
2.1.4 高强度钢在车身上应用的 基础	23	3.2.3 电磁成型	81
2.2 铝合金	34	3.2.4 新型加热吹塑成型	83
2.2.1 铝合金的发展历史	35	3.2.5 其他	83
2.2.2 铝合金在车身轻量化发展 中的地位 and 作用	35	3.3 车身用镁合金的成型工艺	84
2.2.3 铝合金在车身上应用的 示例	36	3.3.1 铸造成型	84
2.2.4 车身用铝合金的特点	38	3.3.2 变形成型	89
2.3 镁合金	44	3.4 复合材料的成型工艺	92
2.3.1 镁合金在车身上应用的 示例	44	3.4.1 热固性复合材料的 成型工艺	92
2.3.2 镁合金在车身上应用的 出发点	45	3.4.2 热塑性复合材料的 成型工艺	98
2.4 复合材料	48	第 4 章 轻质车身结构的连接工艺	100
2.4.1 复合材料的发展历史	49	4.1 传统焊接技术	100
		4.2 点焊	101
		4.3 激光焊接	106
		4.4 胶焊	109
		4.5 电弧焊	112



4.6	胶接	115	5.3.3	结构轻量化的途径	151
4.7	自冲铆接	117	5.3.4	结构轻量化的技术 难点	158
4.8	复合材料的连接工艺	118	5.4	车身结构轻量化技术 经济性分析	159
第5章 应用多种材料的轻质车身结构设计			第6章 车门的轻量化设计示例		
5.1	轿车车身结构	123	6.1	轻质车门方案	162
5.1.1	车身构造	124	6.1.1	一般车门结构	162
5.1.2	车身结构特点	126	6.1.2	轻量化车门结构	163
5.2	车身结构设计要求	130	6.1.3	轻质车门的设计方案	169
5.2.1	结构强度与刚度要求	131	6.2	车门设计评价标准	171
5.2.2	振动与噪声要求	133	6.2.1	车门结构设计要求	171
5.2.3	耐久性要求	135	6.2.2	车门附件设计要求	181
5.2.4	安全性要求	136	6.3	轻质车门结构的有限元分析	183
5.2.5	轻量化要求	139	6.3.1	内外板式车门	184
5.2.6	密封性要求	140	6.3.2	框架式车门	186
5.2.7	通风性要求	143	6.3.3	模块化车门	188
5.2.8	防腐性要求	144	6.4	轻质车门结构强度的试验验证	193
5.3	车身结构轻量化的技术路线	147	参考文献		
5.3.1	车身结构轻量化设计 特点	147	196		
5.3.2	车身结构轻量化设计 方法	148			

第 1 章 绪 论

汽车给人们带来了方便，扩大了人的活动范围，对人类的发展与进步无疑起到了巨大的推动作用。但是随着汽车工业的快速发展，汽车的生产量和保有量急剧增加，其对人类社会的负面作用也越来越显现和严重。

一方面，汽车工业消耗了过多的自然资源，尤其是不可再生资源。有资料表明，在 2010 年前，汽车数量将突破 10 亿大关。在 1990—2020 年期间，预计汽车数量将从 7 亿增加到 14 亿辆。但世界石油储备总量是有限且不可再生的，到 2013 年，石油储备总量的 1/2 将被耗尽。

当然，石油探明储量仍可因继续勘探和提高采收率而有所上升，但也不可不计到人类每年石油耗量也会因生产发展、人口增多、特别是广大发展中国家人民生活水平的提高而有所攀升。因此，石油的供应前景仍是非常脆弱的，仅能保证几代人畅快消费的现实是与可持续发展的伟大理想相距甚远的。

虽然开发替代能源，特别是开发燃料电池汽车，提供了不耗用石油的可能性；但是，迄今任何替代方法都还不如石油燃料经济和方便，燃料电池汽车技术也尚不成熟，成本过高，缺乏燃料供给基础设施，其普及化还得走很长一段路。其他措施如优化交通结构，特别是实行公交优先，也可以较大幅度降低石油总需量，但人们还是挡不住汽车进入家庭的诱惑，全世界私家车的保有量还是在快速增长。

另一方面，汽车排放污染已成为大气污染最主要的来源，给人类社会的生存与发展的环境带来了严重的压力。随着世界汽车总量的增加，汽车油耗、排放总量也不断增加，世界环境正不断恶化，汽车每年向大气中排入的二氧化碳量多达 40 亿吨。如果有关第三世界人口增长相对机动车需求的预测成立的话，这些排放将在今后 30 年里增长至 60 亿吨，形势相当严峻。

此外，随着人们对汽车安全性、舒适性、环保性能要求的提高，汽车安装空调、安全气囊、隔热隔音装置、废气净化装置、卫星导航系统、影音器材、无线电通信等设备越来越普及，这无形中增加了汽车的质量、耗油量和耗材量。

因此，全世界汽车工业界已清楚地认识到，着眼于未来，才能可持续发展，节省资源和减少对环境的污染是其迫切需要解决的两大问题。许多发达国家也都采取了许多措施，如制定严格的汽车排放法规等。而要使汽车更省油、更环保，目前一个可行的重要措施就是汽车轻量化，广泛和更多地使用轻质材料。进入 21 世纪以来，能源危机日趋严重，环保法规日益严格，使现代汽车减重节能的要求不断高涨，轻量化已成为汽车优化设计和选材的主要发展方向。

1.1 汽车轻量化的紧迫性

自从 1886 年汽车诞生后，历经 100 多年的发展，汽车已经成为人类社会的不可缺少



的交通工具之一。社会和经济的发展对现代汽车设计和制造的要求越来越高，集中反映在洁净化、安全化、轻量化、舒适化、信息化等五大方面(图 1.1)，其中对轻量化的要求尤为紧迫。



图 1.1 汽车设计和制造的五大方向

1. 汽车轻量化是节能的需求

汽车是石油的最大用户，目前世界平均有 46% 的石油为汽车所消耗。国际能源机构的统计数据表明，2001 年全球 57% 的石油消费在交通领域，预计到 2020 年交通用油占全球石油总消耗的 62% 以上。专家预计到 2013 年，石油储备总量的 1/2 将被耗尽。美国能源部预测，2020 年以后，全球石油需求与常规石油供给之间将出现净缺口。数据显示，全球石油储量仅够再用约 50 年，能源短缺已成为全球问题。而在能源价格上，1973 年的石油危机触发石油价格上升了 4 倍以上，进入 21 世纪以后国际原油价格持续上涨，节约汽车燃油消耗已是一项长期的任务，也是汽车制造业不可避免的新课题。

汽车的燃油消耗和车重的关系很难用简单的数学关系式来表达，但从理论分析和试验两个方面找到它们之间的关系。汽车行驶必须克服多种阻力做功，汽车行驶阻力 F 可由下式表达：

$$F = \mu_0 W + W \sin\theta + a(1 + \beta)W + \lambda A v^2 \quad (1-1)$$

式中， W ——汽车质量；

μ_0 ——滚动阻力系数；

θ ——倾斜角；

a ——加速度；

β ——等价旋转质量比；

λ ——空气阻力系数；

A ——迎风面积；

v ——车速。

由式(1-1)可知，汽车行驶阻力由 4 部分组成：滚动阻力、爬坡阻力、加速阻力和空气阻力。除了空气阻力主要与车身形状、大小有关外，其他 3 项均与整车的质量成正比。因此，从汽车行驶所受阻力来看，汽车轻量化是节能的一项有效措施。

图 1.2 所示为车重与定速燃料效率的关系，可见减轻车重能显著提高燃油效率。

关于减轻汽车自身质量与燃油消耗下降之间的关系，国内外不少机构和学者对此都作了相应的研究。归纳起来主要有以下 5 种说法。

第 1 种说法：汽车自身质量每减轻 100kg，则 100km 的燃油消耗量可减少 0.2~0.8L，一般为 4.5 % 左右。

第 2 种说法：汽车自身质量每减轻 3%，则可节油 1%~3%。

第 3 种说法：汽车整车质量降低 1%，则油耗可减少 0.7%；汽车质量减轻 330~440kg，可节约燃油费用 20% 左右。

第 4 种说法：汽车自身质量每减轻 50kg，则每升燃油行驶的距离可增加 1km；若自身质量减轻 10%，则燃油经济性可提高 5.5% 左右。

第 5 种说法：轿车自身质量每减轻 10%，则油耗可下降 8%~10%。

总之，减轻汽车自重，是提高汽车的节能性和环保性、降低燃油消耗及减少排放最有效的措施之一，汽车轻量化已成为汽车产业发展中的一项关键性研究课题。

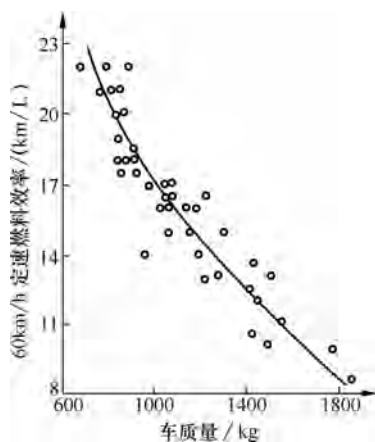


图 1.2 车重与定速燃料效率的关系

2. 汽车轻量化是环保的要求

当今世界，汽车排放污染已成为大气污染最主要的根源，给环境带来了严重的压力。为了解决这一问题，各国都在不断地制定日益严格的汽车排放法规。

目前美国、欧盟(EU)、日本构成世界汽车排放法规的三大体系。

1970 年，美国颁布了《大气净化法案》(又称《马斯基法》)，1990 年进行了修订，制定了世界上最严格的排放法规，即加利福尼亚州的低排放汽车标准(LEV)。目前实施的排放等级及限值 ULEV，SULEV 是削减目标，为现行标准的 1/4，如图 1.3 所示。

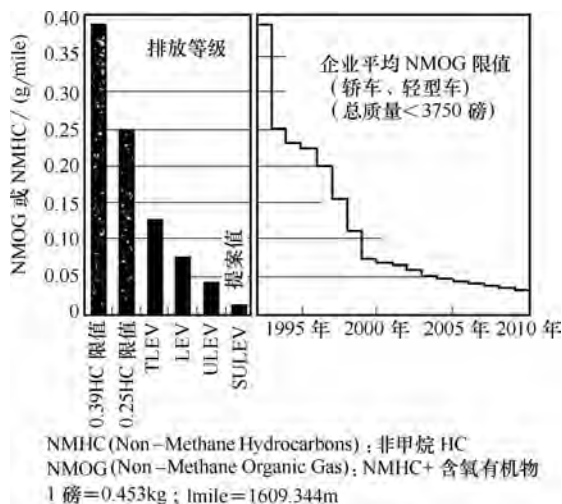


图 1.3 美国加利福尼亚州汽车排放限值



欧盟自 1993 年开始，积极强化汽车排放法规，图 1.4 所示为欧洲排放规定，现行法规为 2005 年强化欧洲 4 号(欧IV)标准。

日本是世界上第二大汽车生产国，从 1966 年起开始控制汽车排放污染，对新车进行四工况检测，规定控制排放 CO 小于 3%，1969 年加严到 2.5%；1971 年规定小型车 CO

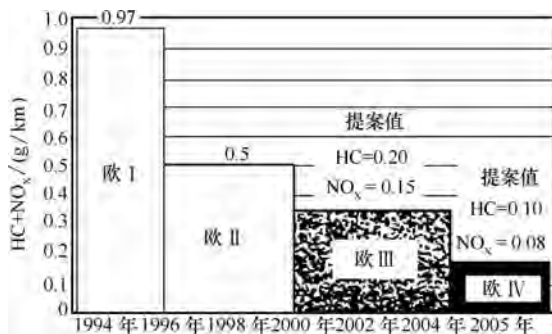


图 1.4 欧洲排放标准限值

小于 1.5%，轻型车 CO 小于 3%；1973 年采用十工况法，增加 HC 和 NO_x 作为排放控制指标；1986 年对柴油轿车限值加严控制，对在用车制定定期车检法规；1991 年起新车采用十五工况法试验，排放法规不变，1993 年对柴油车排放进行控制。1997 年 11 月由日本中央环境保护学会大气专业委员会，为强化新的排放标准，提出了在现行排放标准的基础上再削减 70% 的目标(图 1.5)。

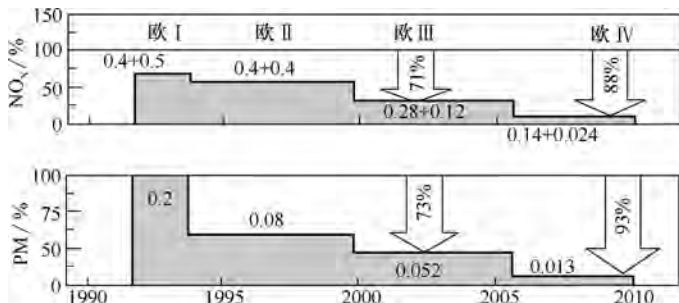


图 1.5 日本现行的排放法规

我国机动车工业近年来不断发展壮大，机动车产量、销售量和保有量都快速增长。最新数据显示，中国已成为世界第三大汽车生产国，年产量超过 500 万辆、保有量近 3300 万辆。中国机动车污染控制工作始于 1979 年《中华人民共和国环境保护法(试行)》颁布以后。由于在美、日、欧这世界三大排放标准体系中，欧洲法规在标准的松严程度、道路交通情况等方面相对较适用于中国的实际情况，因此中国在充分吸收欧美的经验后，于 1999 年，国家环保总局制定了车用汽油有害物质控制标准，和相当于欧洲 I 和欧洲 II 排放法规的国家第一、第二阶段轻型汽车和重型车用压燃式发动机排气污染物排放标准，见表 1-1，使我国的汽车污染物排放标准的控制水平向前推进了 20 年，明显缩短了与国外汽车污染物排放标准的差距。但是欧洲从 2005 年开始实施欧 IV 排放法规，就 NO_x、HC、CO 及微粒物质等 4 种排放限值而言，欧 III 限值分别是欧 II 的 71%、60%、53% 和 67%，欧 IV 限值是欧 III 的 70%、70%、71% 和 20%。对照而言，中国现行的汽车污染物排放标准仍落后欧洲 8~10 年。

表 1-1 中国轻型汽车排放法规限值与欧 III、欧 IV 限值的对比情况 g/kWh

法规	GB 18352.1—2001	GB 18352.2—2001	欧 III	欧 IV
执行日期	2001-04-16	2004-07-01	—	—
NO _x	8.00	7.00	5.000	3.50

(续)

法规	GB 1832.1—2001	GB 18352.2—2001	欧Ⅲ	欧Ⅳ
HC	1.10	1.10	0.66	0.46
CO	4.50	4.00	2.10	1.50
PM	0.36	0.15	0.10	0.02

世界其他国家也都参照美、欧、日的排放标准，结合本国特点，正在加快汽车排放标准的制定、修订和实施工作。

全世界汽车工业界已清楚地认识到，着眼于未来，才能可持续发展，因此节省资源和减少对环境的污染是其迫切需要解决的两大问题。其技术内容是多方面的，如提高发动机效率、改进汽车造型以降低风阻系数、改进汽车轮胎等，而对汽车结构的要求则主要来自轻量化。汽车的油耗主要取决于发动机的排量和汽车的总质量，减小排量受到保证动力性的限制，出路正是轻量化。采用轻量化结构就能在汽车载荷不变的条件下，尽可能降低整车质量，从而显著降低汽车燃油油耗。轻量化已成为汽车优化设计和选材的主要发展方向。

因此，各汽车制造商都在致力于从技术和经济的角度分析和改善现有材料和工艺的使用条件，探索新材料、新结构和新工艺应用的可能性，寻求在保证性能、不增加或少增加成本的前提下降低汽车质量的方法，制定并实施降低汽车质量的计划。实践表明，通过这些计划的实施，汽车的质量可以得到有效的降低。

1.2 汽车轻量化研究的方法

目前国际上对汽车的开发研究正向高效能、低能耗、低排放发展，而这3个指标是与汽车自身质量息息相关的，减轻汽车自重也是世界各大汽车厂家提高产品竞争力的重要措施。目前，汽车轻量化发展主要有3个方向：一是在制造上采用轻质材料；二是优化结构；三是进行工艺革新。第一种方法在目前看来具有更巨大的潜力，是汽车轻量化的主流。汽车行业普遍注重于开发轻量化材料来解决这一难题。现在已经有很多种轻质材料应用于汽车制造业，这些材料可分为两大类：一类是低密度材料，如铝合金、镁合金、钛合金、塑料和复合材料等；另一类是高强度材料，如高强度钢和高强度不锈钢。第二种方法的主要途径是利用有限元法和优化设计方法进行结构分析和结构优化设计，以减小零部件的质量和数量。第三种方法是为了应对材料和结构的变更，而提出的新的工艺。

轻质材料为汽车轻量化提供了巨大潜力，但轻质材料需要有新的结构和工艺作支持；结构优化使汽车质量在使用轻质材料之后得以进一步降低，但结构优化的同时必须考虑材料性能及其工艺；新工艺的开发又给轻质材料及其相应新结构的使用提供了可能性。

与汽车自身质量下降相对应，汽车轻量化技术不断发展，主要表现在：

(1) 轻质材料应用的比重不断攀升，铝合金、镁合金、钛合金、高强度钢、塑料、粉末冶金、生态复合材料及陶瓷等的应用越来越多。

(2) 结构优化和零部件的模块化设计水平不断提高，如采用前轮驱动、高刚性结构和





超轻悬架结构等来达到轻量化的目的, 计算机辅助集成技术(CAX)(包括 CAD、CAE、CAM 等)和结构分析等技术也有所发展。

(3) 汽车轻量化促使汽车制造业在成型方法和连接技术上不断创新。

作为轻量化的代价, 车辆的安全与成本是人们无法忽视的客观现实。对大量碰撞事故的统计数据进行研究表明, 在两车正面相撞的条件下, 乘员死亡的比例 R (车 1 的死亡人数/车 2 的死亡人数)与车辆的自身质量存在如下经验关系:

$$R = (m_2/m_1)^{3.58} \quad (1-2)$$

式中, m_1 ——车 1 的质量;

m_2 ——车 2 的质量。

由上式不难看出, 两车碰撞, 对质量小于对方 10% 和 20% 的一方来说, 其死亡人数将分别高于对方 45.8% 和 122%, 由此可知轻量化确实会使车辆的安全性能大大下降。在世界各国日益严格的安全法规推动下, 汽车行业正在致力解决轻量化与车辆安全的矛盾。要解决好这个问题, 一方面可以从新材料开发与应用方面着手, 具有安全意义的新材料的开发与应用将发挥重要作用。理论分析与实验结果表明, 应用诸如动静态屈服强度比高的高强度钢、冲击能量吸收率高的轻合金以及结构泡沫等新材料, 可以提高车辆的安全性。另一方面, 则可以从合理选择轻量化对象方面着手。基于上述理由, 汽车不需要无限的轻量化, 合理的做法是“一定限度内”的轻量化, 因此, 也就不应要求汽车的每个部件都轻量化, 合理的做法应当是选择“适合轻量化”的对象。

汽车轻量化不仅是减轻质量, 它还有以下基本要求:

(1) 在保证汽车可靠性和功能不受影响的前提下, 最大限度地减轻各零部件的质量, 降低油耗, 减少排放污染。

(2) 在使汽车减轻质量的同时, 努力谋求它的良好操纵性、高可靠性、高安全性和高舒适性等。

(3) 在汽车轻量化的同时, 汽车的价格应当下降或保持在合理水平, 具有商业竞争能力, 即汽车的轻量化技术必须是兼顾质量—性能—价格综合效益的技术。

随着人们对汽车安全性、舒适性、环保性能要求的提高, 汽车上也增加了许多装备, 空调、卫星导航系统、安全气囊和废弃净化装置等设备越来越普及, 汽车的质量也在持续增加, 导致汽车轻量化的任务随之加重。

1.2.1 新材料的应用

不同的汽车零件, 将经历不同特征的变形过程, 因而要求使用不同类型的材料。德国 Paderborn 大学 O. Habn 等人提到“多材料轻量化结构”(lightweight construction by multimaterial)及“合适的材料用在合适的部位”(The right material in the right place)两概念, 认为多材料结构设计代表了今后汽车车身结构的发展趋势。通过对多材料结构进行优化, 既能改进汽车性能, 又能显著减小其质量。当前材料的组合仍以高强度钢、铝、镁和塑料为主。要实现多材料轻量化结构设计, 必须强调“合适的材料用在合适的部位”。

汽车轻量化可以从汽车本身的结构和制造所采用的材料着手, 使用轻质材料是目前减少汽车总质量的主要途径。

汽车制造业中采用高强度钢板代替普通钢板, 能使构件板厚减薄, 又能保证其使用性能, 从而减轻了汽车的质量。例如, 广泛使用高强度钢板代替普通钢板制造车身板件和结

构构件大大降低了车身的质量。但是，高强度钢板的成型性和点焊工艺较差，限制了它在汽车上的大量应用。

铝合金也是一种理想的轻质金属材料，用于汽车上的铝合金可分为铸铝合金和形变铝合金，国外汽车的铝合金材料主要用于活塞、气缸盖、离合器壳、保险杠、支架、车身车轮、散热器、空调系统的热交换器和冷凝器等。德国奥迪 A8 轿车采用铝质车身后，质量减少了 15%，油耗随之降低 5%~8%，大大改善了轿车的加速性、燃油经济性。此外，铝基复合材料还在汽车连杆、摇臂、凸轮座、悬架等零件上获得广泛的应用。目前世界各国正致力研究用铝合金代替更多的汽车构件来减轻整车质量。铝合金在汽车上的应用有着广泛的前景。

据统计，1978 年一辆中级轿车的铝材料世界平均使用量约为 32kg，1998 年增加到 85kg，在 20 年内增长了 1.7 倍。1998 年，德国汽车工业铝用量约占该国铝业总产量的 38%，即达到 256 万吨，其中，商用车部门铝用量为 10.6 万吨。据预测，至 2010 年，德国商用车制造业的年用铝量将升至 15 万吨，即增长 42%。

奔驰公司新一代 S 系列轿车有好几种行驶系部件都是使用铝制造的。例如其前桥拉杆和横向导臂等就是用铝合金材料通过触变铸造法(thixocasting)制成，前桥整体支承结构也是铝铸造合金材料，其工艺为真空压力铸造，这种部件的质量只有 10.5kg，与钢件相比轻 35%。S 系列轿车的后桥支承结构也使用铝制造，原材料为铝板，通过相应的工艺成型，需要连接的部件则通过焊接而实现。拉杆、推杆、斜拉杆等之类的零件通过铝型材锻造工艺制造。奥迪公司 A8 型高级轿车的整个车身均用铝材料制造，覆盖件为铝板冲压而成。这种铝车身与钢车身相比，轻 30%~50%。

镁的密度为 1.74g/cm³，是铝的 2/3，作为轻量化材料应该更合适。镁合金与铝合金、钢铁和塑料物理机械特性的比较见表 1-2。但镁的制造技术、再生技术都不如铝，因此目前它在汽车上的利用价值远不如铝，但镁合金作为轻质材料在汽车上的应用也存在着较大的潜力。

表 1-2 镁合金与铝合金、钢铁和塑料物理机械特性的比较

材料		密度 /(g/cm ³)	熔点 /°C	热导率 [W/(cm·k)]	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	比强度 /(σ/ρ)	弹性模量 /GPa
镁合金	AZ91D	1.81	598	54	250	160	7	138	45
	AM60B	1.80	615	61	240	130	13	133	45
铝合金	A380	2.70	595	100	315	260	3	116	71
钢铁	碳素钢	7.86	1520	42	517	400	22	80	200
塑料	ABS	1.03	—	0.9	96	—	60	93	—
	PC	1.23	—	—	118	—	2.7	95	—

现在，大众公司的帕萨特轿车变速器壳体、奥迪公司的 A8 型轿车仪表盘外壳、奔驰公司的 SLK 系列轿车燃油箱盖和保时捷公司的高速轿车车轮都改用镁制造。大众公司的 Lupe 3L 车行李箱盖，其内板材为高纯度镁合金，外板材为铝合金。采用真空压力铸造法制造的镁合金薄壁铸件，其壁厚可以比铝质的更薄些，这意味着质量可更轻些。不过，因为镁的弹性模量比铝小，因此，有时镁部件需要附加更多的加强筋结构。





现代汽车为了节省资源、满足轻量、防腐蚀、低成本和美观等要求，正在大量采用非金属材料。汽车上采用的非金属材料主要有塑料、复合材料和陶瓷。

塑料具有密度小、成型性好、耐腐蚀、防振、隔音和隔热的性能，同时又具有金属钢板所不具备的外观(颜色、光泽)和触感，在汽车上应用较快，如车身的内、外饰件，车身附件的壳体、罩盖、支架和手柄，前、后保险杠，挡泥板、车门外板、行李舱盖、座椅支架等。据资料介绍，美国克莱斯勒汽车公司研制的新型塑料车身，可以采用废旧塑料为原料，这种车身不用油漆，使汽车的总质量减轻，起到节能、降低公害的作用。汽车用塑料主要有PP、PE、PVC、ABS、PA等。还有，尼龙6和尼龙66这两种新型材料，具有很好抗热性能，已被应用到进气管、排气管上，其中采用这种进气管能使零件质量减轻65%，而且内壁更光滑，并能使进气与发动机热量隔离，大大提高了发动机的充气效率，改善了发动机的动力性和经济性。只是因为尼龙制造成本较高，限制了它在汽车上的大量应用。

复合材料在汽车上的用量近几年来逐年增加。复合材料主要用于摩擦片、车身、悬架、车架等汽车结构件，如高强度有机纤维增强复合材料具有很高的机械强度，能代替钢板材料，从而减轻了车身的质量，在汽车车身上得到了广泛的应用。碳纤维增强复合材料具有很好的刚度特性，能代替钢板弹簧，在汽车悬架系统得到应用。随着人们对新型复合材料的不断研究，复合材料不久将大量应用于汽车上，未来的“复合材料汽车”将备受人们的青睐。

复合材料基本上由增强体和基体组成，具有质量轻、高强度的特点。汽车上常用的玻璃纤维增强树脂基复合材料的密度为 $1.5\sim 2.0\text{g/cm}^3$ ，只有普通碳钢的 $1/4\sim 1/5$ ，比铝合金还要轻 $1/3$ 左右，而机械强度却能超过普通碳钢的水平。若按比强度计算，玻璃纤维增强的树脂基复合材料不仅大大超过碳钢，而且可超过某些特殊的合金钢。碳纤维复合材料、有机纤维复合材料具有比玻璃纤维复合材料更低的密度和更高的强度，因此具有更高的比强度。

戴姆勒-克莱斯勒汽车公司一直致力于复合材料的开发和应用，除了CCV(Composite Concept Vehicle)之外，戴姆勒-克莱斯勒公司已在一些车辆上使用塑料翼子板、后举门，并将塑料整体结构用在奔驰A型车和超微型车“Smart”上；跑车SLR的车身也将使用碳纤维复合材料。目前该公司正在研究吉普车顶盖的生产方法，工程负责人认为，“可以用注塑的方法制造汽车内的各种零件”。

精细陶瓷材料具有耐热性、耐磨性和抗腐蚀性等优点，在汽车上已局部得到应用，如氧传感器、PZT爆震传感器、NET热敏电阻水温传感器、密封垫、火花塞、隔热板、摩擦片等。金属陶瓷和陶瓷摩擦片与目前使用的石棉基材料的摩擦片相比，具有稳定的摩擦因数，在传递转矩相同的条件下，可以减少对离合器压盘的压紧力，从而允许离合器踏板上的作用力减少，另外采用陶瓷材料还可以消除石棉基摩擦材料产生的粉末对人类的有害影响。有的发动机上，为减轻活塞顶部的热负荷，在活塞顶部喷镀陶瓷，镀层厚度为 $0.2\sim 0.3\text{mm}$ ，能起到耐高温、耐腐蚀和减少吸热的作用。但陶瓷和铝结合性欠佳，高温运动后，陶瓷层易于龟裂剥落，目前在汽车发动机上还应用较少，尚有待进一步研究。1982年日本五十铃发动机厂率先试制陶瓷发动机，其燃烧温度达到 1200°C ，热效率高达48%，油耗减少34%，其动力性、经济性明显高于现有的发动机。但陶瓷发动机还存在一些亟须解决的问题，限制了它的广泛应用。目前，日本、美国、德国、法国等都致力于陶

瓷发动机的研究,取得了一些可喜成果。据预测,2020年将研制出陶瓷发动机,并尽快投入使用,陶瓷发动机的研制成功将是汽车发动机史上的技术性革命。

1.2.2 结构优化设计

汽车轻量化手段之一就是对汽车总体结构进行分析和优化,实现对汽车零部件的精简、整体化和集成化。因而,在考虑轻量化时,要协调总成与整车、总成与总成之间可能出现的各种矛盾。以车身轻量化设计为例,当选用轻量化铝合金材料制造车身时,可使轿车车身质量减轻40%左右,同时能保证车身的节点有最佳的刚度,满足车身耐撞性要求,提高碰撞安全性,减少油耗。利用CAE技术,可准确地实现车身实体结构设计和布局设计,对各构件的形状、配置、板材厚度的变化进行分析,并可从数据库中提取由系统直接生成该车的相关数据进行工程分析和强度、刚度计算,使轻量化材料能满足车身设计的各项要求。

利用结构解析技术和CAD、CAE等技术进行结构优化设计,在确保性能和功能的前提下,削除无用材,寻求零部件壁厚的减薄、数量的精简和结构的整体化、合理化。例如,仅用两个活塞环(一个气环、一个油环)的技术,采用齿形带驱动顶置凸轮轴(DOHC)的技术,整体式加固保险杠(即将以往的钢板组装结构改为用铝合金挤压的整体结构)(图1.6)的技术等,都是轻量化的有效措施。

结构优化设计从马克斯威尔理论(Maxwell, 1980)和米歇尔(Michell, 1905)桁架出现起已有百年,从史密特(Schmit)用数学规划来解决结构优化设计算起也有40年历史,特别是在过去30年内,在理论、算法和应用方面都取得了长足的发展。

结构优化的任务是设计轻质结构形状和尺寸,力图按实际工况来优化零件的设计。结构优化包括尺寸优化和形状优化。

尺寸优化往往根据质量、强度等优化目标对板壳厚度、梁截面以及平面惯性矩等尺寸进行优化,以使应力分布均匀化。

形状优化法能够达到既减小零件的质量又延长零件寿命的目的。这种方法采用了一种建立在生物学增长规律基础上的数值计算方法,它的基础是模拟一种凭借经验确定的生物学增长规律,用有限元法研究生物增长载体(如骨骼、树木等)的力学特性。研究发现,生物力载体避免应力集中,并始终试图增长为在一种标准载荷作用下表现为均匀表面应力的形状。这就给设计师以启发,可借助于形状的变异来降低峰值或是使应力分布均匀化。具体做法是向承受高负荷的部位储存材料,而将承受低负荷的部位去除材料。零件的形状将按照避免出现应力高峰并使应力分布均匀来设计。这种结构设计方法已经用于汽车后轴差速器壳体、半轴等零件的设计上。这种基于生物学增长规律的形状优化方法,可收到既能减小零件质量,又能避免局部应力高峰的效果。

优化设计是寻求最好或最合理的设计方案,而优化方法便是达到这一目的的手段。虽然对大多数现实问题而言,由于耗费资源(时间、费用)过于巨大,“最好”的不一定能实现,但它提供了一种指导思想与标准,形成了概念框架(问题识别、定义、模型化,求解与评价)和运作手段。优化方法还能被应用于处理其他问题上,只要该问题存在有多种解决方案,就可以采用优化方法作为求解问题和帮助决策的手段与工具。

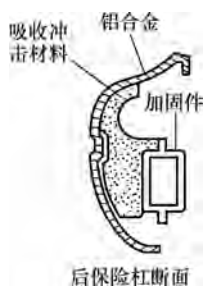


图 1.6 铝合金挤压保险杠及加固体



目前, 优化应用的范围与实际成效远落后于优化理论的发展, 与其他相关学科(如有限元分析)的应用相比也是相形见绌, 显得较为薄弱与局限。应用与理论差距较大的原因是多方面的, 诸如优化本身的性质、理论研究存在的不足、实际应用中的问题各异且过于复杂等, 实际结构涉及多种因素(环境、荷载、几何特征、材料、施工、费用等), 受多方面的制约, 因此必须抓住问题的主要方面和主要矛盾, 删繁就简、进行抽象, 形成数学模型, 才能实施优化。优化设计的有效性取决于所用的数学模型和相应的寻优算法, 尤其与所选用的设计变量, 所考虑的约束条件和规定的目标或评价函数有密切关系。优化提供的最优解或最优设计只是一个相对的最优结构, 它仅仅是在所选用的约束与评价函数下才是最优的。

1.2.3 革新工艺

在优化设计和更换材料实现汽车减重时, 常常需要革新制造工艺, 而新工艺的开发也为优化设计和更换材料开辟了新的天地。最佳产品设计是将选择材料、确定核心工艺(多为成型工艺)等综合起来考虑, 即在产品结构设计中, 事先就把新选定的材料与减小质量的工艺集成到设计中去, 从而收到既能缩短制造过程工艺链, 又能显著减小质量, 并降低生产成本的效果。

例如, 铝合金的加工方法有铸造、压铸、轧制、挤压、冲压等。其中 80%~90% 由压铸法生产。普通压铸法(Ordinary Diecast, OD 法)的一个重大弊病是当金属液在高压下以 5~50m/s 的高速注入型腔时, 型腔内的气体很难排出, 必然被压缩并卷入制品内部, 形成小气孔, 致使制品强度散差波动大, 可靠性差, 在热处理加热或高温下使用时, 因气体膨胀常使制品表面不平或变形, 所以制品不能进行热处理, 不能用在温度较高的部位。这些缺点严重限制了铝合金在汽车生产中的应用。

近几年开发的一系列铝合金压铸新工艺, 如冲压压铸法(MP 法)、真空压铸法(GF 法)、无孔性压铸法(Pore Free Diecasting, PFD 法)等, 已使上述问题获得解决, 如目前最受欢迎的 PFD 法, 是以氧气充满型腔, 压铸时, 注入型腔的金属液与氧气发生化学反应, 在金属型腔内瞬间出现的真空状态下, 实现成型, 得到无气孔且可热处理的高质量压铸件。目前, 用 PFD 法生产的铝合金已大量应用于汽车车轮、进气歧管、动力转向器壳体等零部件, 获得了显著轻量化效果。例如, 用 PFD 法制造的进气歧管, 平均壁厚仅 2.5mm, 比以前减轻 30%。同时, 入口内表面光滑, 对空气流及液体燃料流的阻力小, 可改善汽车的加速响应性, 降低油耗。

再如, 镁合金以前用作汽车零部件一直不多, 主要是因为镁合金存在耐蚀性差、蠕变强度不足、废旧料的循环利用困难等问题。近年来, 关于镁合金的几项重大工艺革新取得了成功: 降低不纯物元素(Fe、Ni、Co、Cu 等)含量的技术, 保证了高纯度耐蚀镁合金的制取; 利用 SF₆ 气体的助熔剂熔化技术, 防止了熔化时镁合金耐蚀性的恶化; 利用热室系统的薄壁精密无孔性压铸技术, 消除了镁合金内部的气孔等缺陷, 再经热处理得到高强度、高屈服极限、高延伸率和高疲劳强度; 应用虹吸原理的自动补缩装置, 可以自动定量补缩, 精度维持在 1%; 高品位镁再生技术(Fluxless 法), 消除了传统再生法含氯量极易超标(镁合金制品中氯容许量为 10~20mg/kg)的问题, 保证了再生品的纯净度和高品位, 使镁合金汽车零部件能经济而高质量地回收利用。

在继续推进汽车轻量化的进程中, 采用轻结构设计与创新制造工艺是相辅相成的, 应

努力开发新的制造方法,对传统的工艺进行变革。管件液压胀形工艺、激光焊接工艺、定制板材技术、金属半固态成型等都是目前轻量化领域中主要的革新工艺,拓宽了汽车轻量化的可能性。

1.3 车身零件的轻量化对整车轻量化的贡献

随着经济全球化进程的加快,汽车工业的竞争日益加剧,汽车企业都在加紧新车型的设计开发。由于发动机、底盘设计制造技术基本成熟,新车型便主要体现在电子设备和车身造型的更新上。目前,在一种新车型的开发项目中,40%的设计师和工程师是在从事与车身相关的开发工作。车身开发与汽车电子一起已经成为目前汽车整车产品中最活跃的因素。我国的轿车工业同发达国家相比总体上仍然比较落后,其中车身技术的相对落后也是一个重要方面,因此,大力发展车身技术的研究工作对我国轿车工业技术水平的提高具有重要意义。

在汽车构成中,车身、底盘、发动机和电子设备被称为汽车的四大部件,其中车身部分越来越受到人们的重视。其原因在于:在质量分析上来看,轿车车身占整车的40%~60%,载重车车身(又称驾驶室)占整车的20%~30%。对汽车本身来说,约70%的油耗是用在车身质量上的;从制造成本上来看,轿车车身占整车的15%~30%,且档次越高的汽车,车身成本占的比例越大;从汽车的发展趋势来看,人们对汽车的安全性、舒适性、新颖性以及豪华档次等特色要求越来越高,而这些特色很多要通过汽车车身来体现。

汽车车身是一个形状复杂的空间薄壁壳体。传统车身的主要零件均由钢板冲压焊接而成。为增加美观和防蚀性,车身表面还涂有漆膜。此外,还有各种金属和非金属的装饰件。

时至今日,现代轿车中占自重90%的6类主要材料各自所占质量份额大体为钢55%~60%,铸铁5%~12%,塑料8%~12%,铝6%~10%,橡胶4%,玻璃3%。除此之外,其他材料共占车重的10%,它们是各种重有色金属、液体和诸如油漆等杂项材料。汽车车身主要由钢、铸铁、铝等材料组成,轻量化潜力巨大,所以车身是轻量化设计的关键部件。车身轻量化可使发动机负荷相应减轻,底盘部件的受力也会减轻,整车性能将表现更好,整车燃料经济性能进一步提高。在为数众多的轻量化材料中,以高强度钢、铝合金、镁合金与复合材料最具代表性,这些材料的使用将使车身质量在现有基础上可以减少40%~60%。

1.4 车身结构轻量化设计发展

20世纪初,轻量化在汽车制造领域还显得无足轻重。当时,人们选择汽车制造材料首先考虑的是什么材料容易获取并用于生产发动机、底盘和车身,因此,铁、钢、木材和皮革成为主要的汽车用材料。而当时汽车的整个车身就是基于一个完全刚性的、笨重的底盘框架上的,没有过多承载要求的壳体结构。

