



北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Theories and Applications
on Vehicle Structural Design Optimization

汽车结构优化设计 理论及应用

白影春 李超 陈潇凯 ◎ 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

汽车结构优化 设计理论及应用

白影春 李 超 陈潇凯 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (C I P) 数据

汽车结构优化设计理论及应用 / 白影春, 李超, 陈
潇凯编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2022.2
ISBN 978-7-5763-1082-5

I. ①汽… II. ①白… ②李… ③陈… III. ①汽车-
车体结构-结构设计-最优设计 IV. ①U463.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 032544 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮 编 / 100081
电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>
经 销 / 全国各地新华书店
印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司
开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16
印 张 / 16.5
彩 插 / 1
字 数 / 388 千字
版 次 / 2022 年 2 月第 1 版 2022 年 2 月第 1 次印刷
定 价 / 72.00 元

责任编辑 / 封 雪
文案编辑 / 封 雪
责任校对 / 刘亚男
责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

经过多年的快速发展,我国的汽车产业由产销量持续增长向结构调整和转型升级转变,自主品牌汽车产品正向研发深度逐步加深。从技术发展趋势来讲,得益于材料、能源和信息技术的发展,汽车正朝向“动力电动化、功能智能化、出行共享化”方向发展。轻量化作为支撑汽车产业变革的共性关键技术,是通过采用科学的方法在保证综合性能指标的前提下降低产品质量,以达到节能减排的目的。结构优化技术作为重要的结构轻量化技术,是最为直接且成本较低的技术手段。

本书为笔者结合自身在汽车结构优化领域的学术及工业经历,同时参考了大量的国内外文献及最新研究成果编著而成。在编著过程中,紧密结合汽车结构优化行业应用现状,充分吸收与归纳汽车结构优化技术当前在理论和应用本身最新成果,重点突出兼顾理论性与实践性原则。在内容安排上,本书由浅入深,提供了翔实的算法、程序、软件介绍及具体的工程案例,重点遵循一般性与特殊性的原则。注重知识性与逻辑性的原则,引领读者在提升专业水平的同时,通过理论联系实际,来提高解决具体问题和开展汽车产品结构优化设计的能力。

本书主要围绕汽车结构优化设计展开,汽车结构优化技术涵盖拓扑优化、形状优化、尺寸优化、可靠性优化等,汽车结构性能涵盖刚度、强度、NVH、碰撞安全和疲劳耐久等内容。具体内容包括:汽车轻量化背景及关键技术介绍、结构优化基础知识、汽车结构优化设计、汽车典型工况建模与分析、结构拓扑优化设计、结构尺寸优化设计、结构可靠性优化设计、多材料拓扑优化设计等。本书可作为车辆工程及相关专业本科生和研究生的教材或教学参考用书,也可供企业及科研单位相关工程技术人员参考使用。

本书由白影春、李超、陈潇凯编著。全书共分八章,第1、3~7章由白影春编写,第8章由李超编写,第2章由陈潇凯编写。在本书的编写过程中,得到了北京理工大学电动车辆国家工程实验室和北京理工大学研究生院的大力支持。在全书的整理过程中,王普毅、王子祥、黄程翔、苏越、刘康、武勇等研究生参与了大量的编辑与整理工作。在此,一并表示感谢。同时,在本书的编写过程中,参考了大量的文献和网络资料,编者尽量在参考文献中做了说明,但是由于工作量较大,对没有说明的文献作者表示歉意和感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥和错漏之处,恳请读者批评指正。

作者

目 录

CONTENTS

第 1 章 汽车轻量化背景及关键技术介绍	001
1.1 汽车轻量化的必要性	001
1.2 汽车轻量化主要技术手段	002
1.2.1 轻量化材料	002
1.2.2 轻量化工艺	006
1.2.3 结构优化技术	009
1.3 汽车结构优化技术应用现状	011
1.3.1 汽车结构优化一般设计流程与软件平台	011
1.3.2 汽车结构优化工程应用现状	013
参考文献	014
第 2 章 结构优化基础知识	016
2.1 引言	016
2.2 结构分析的有限元方法	016
2.2.1 弹性力学基础	016
2.2.2 有限元法的基本原理	019
2.2.3 有限元法的 MATLAB 实现	024
2.3 数值优化基本方法	024
2.3.1 数值优化数学基础	024
2.3.2 优化基本模型及最优性条件	028
2.3.3 梯度优化方法	033
2.3.4 智能优化方法	038
2.4 基于模拟的结构优化工程实例	041
参考文献	042
第 3 章 结构优化关键技术	043
3.1 引言	043
3.2 结构优化一般流程和方法	043
3.2.1 结构优化问题一般流程	043
3.2.2 灵敏度分析方法	044

3.2.3	序列显式凸近似方法	046
3.2.4	汽车结构优化问题建模	048
3.3	结构拓扑优化技术	049
3.3.1	连续体拓扑优化方法简介	049
3.3.2	简单实例	052
3.4	结构尺寸优化设计	054
3.4.1	基本思想	054
3.4.2	简单实例	055
3.5	结构多目标优化设计方法	059
3.5.1	多目标优化一般流程	059
3.5.2	试验设计	059
3.5.3	代理模型	062
3.5.4	基于代理模型的电池包多目标优化实例	065
3.6	本章小结	069
	参考文献	070
第4章	汽车典型工况建模与分析	071
4.1	汽车典型工况及载荷	071
4.1.1	汽车车身在典型工况下的载荷	071
4.1.2	汽车动力总成悬置在典型工况下的载荷	072
4.1.3	电动汽车动力电池包在典型工况下的载荷	074
4.1.4	汽车结构在碰撞工况下的载荷	076
4.2	汽车结构有限元分析建模流程与评价	077
4.2.1	建模流程	077
4.2.2	定义问题	077
4.2.3	建立几何模型	078
4.2.4	选择单元类型	078
4.2.5	划分网格	079
4.2.6	检查模型	080
4.2.7	定义边界条件	080
4.2.8	评价和修正模型	081
4.2.9	设置载荷步	082
4.3	汽车结构静力学建模与分析	082
4.3.1	静力学分析基础理论	083
4.3.2	工程实例——白车身静态刚度及强度分析	083
4.4	汽车结构振动特性建模与分析	088
4.4.1	结构振动理论基础	088
4.4.2	工程实例——动力电池包模态分析	089
4.5	汽车结构碰撞安全建模与分析	092

4.5.1	汽车碰撞仿真分析的有限元理论与方法	092
4.5.2	工程实例——某电动汽车整车正面 100%碰撞分析	094
4.6	汽车结构疲劳耐久建模与分析	098
4.6.1	汽车结构疲劳耐久性分析基础理论	098
4.6.2	工程实例——某电动客车车架疲劳耐久性分析	101
	参考文献	105
第 5 章	汽车结构拓扑优化设计方法	107
5.1	引言	107
5.2	拓扑优化主要方法数学描述	107
5.2.1	连续体结构拓扑优化方法	108
5.2.2	连续体结构拓扑优化材料插值模型	112
5.2.3	连续体结构拓扑优化的优化求解数值算法	115
5.3	面向刚度的拓扑优化设计方法	115
5.3.1	柔度最小化标准拓扑优化设计	115
5.3.2	多工况下刚度性能拓扑优化	117
5.3.3	壳-填充结构柔度的拓扑优化	121
5.4	面向 NVH 的拓扑优化设计方法	123
5.4.1	模态优化	123
5.4.2	频率响应优化	126
5.5	面向碰撞拓扑优化设计方法	128
5.5.1	标准的等效静态载荷拓扑优化方法	128
5.5.2	基于等效静载的拓扑优化方法	128
5.5.3	基于等效静态载荷的拓扑优化流程	128
5.5.4	基于能量准则缩减的等效静态载荷的构造	129
5.5.5	基于能量准则重构的拓扑优化问题及模型更新	130
5.5.6	工程实例：中心侧碰和偏置侧碰拓扑优化	130
5.6	面向疲劳耐久的拓扑优化	134
5.6.1	疲劳耐久性的研究意义	134
5.6.2	结构疲劳寿命	134
5.6.3	横向各向同性高周疲劳模型	135
5.6.4	改善疲劳耐久性的拓扑优化	136
5.7	工程应用实例	138
5.7.1	车身前部结构拓扑优化	138
5.7.2	底盘零部件拓扑优化	143
	参考文献	146
第 6 章	汽车结构尺寸优化方法	148
6.1	汽车结构尺寸优化简介	148

6.2 面向刚度性能的尺寸优化	148
6.2.1 刚度分析的意义	148
6.2.2 刚度的评价	149
6.2.3 刚度的灵敏度分析	150
6.2.4 工程实例	151
6.3 面向NVH性能的尺寸优化	155
6.3.1 汽车NVH问题概述	155
6.3.2 NVH问题优化思路	157
6.3.3 模态灵敏度分析	158
6.3.4 工程实例	159
6.4 面向碰撞性能的尺寸优化	161
6.4.1 碰撞性能评价指标	161
6.4.2 碰撞性能设计方法	163
6.4.3 代理模型	164
6.4.4 工程实例	164
6.5 面向疲劳耐久的尺寸优化	171
6.5.1 疲劳寿命	172
6.5.2 疲劳寿命的预测	173
6.5.3 疲劳耐久性优化的思路	174
6.5.4 工程实例	174
6.6 工程应用	180
6.6.1 多材料车身结构	180
6.6.2 构建和验证有限元模型	181
6.6.3 构建和求解优化模型	182
6.6.4 结论	186
6.7 本章小结	187
参考文献	187
第7章 汽车结构可靠性优化设计方法	189
7.1 结构可靠性优化设计模型	189
7.2 结构不确定参数及度量	189
7.2.1 区间模型	190
7.2.2 随机模型	190
7.2.3 模糊模型	191
7.2.4 证据理论	192
7.3 可靠性指标定义	193
7.3.1 极限状态方程	193
7.3.2 可靠性指标	194
7.4 结构可靠性分析方法——可靠性指标法 (RIA)	196

7.4.1 凸模型可靠性指标法	196
7.4.2 概率模型的可靠性指标法	198
7.5 结构可靠性分析方法——功能度量法 (PMA)	202
7.6 结构可靠性分析方法——蒙特卡洛法	204
7.7 结构可靠性优化求解策略	205
7.7.1 嵌套方法	205
7.7.2 单环方法	205
7.7.3 序列方法	208
7.8 工程应用	210
7.8.1 十杆桁架结构	210
7.8.2 基于证据理论的嵌套优化策略与序列优化策略对比数值算例	212
7.8.3 曲柄滑块机构	213
7.8.4 三杆桁架结构	215
7.8.5 汽车侧面碰撞	217
7.9 本章小结	224
参考文献	224
第 8 章 多材料拓扑优化设计	226
8.1 引言	226
8.2 基于变密度法的双材料拓扑优化算法	226
8.2.1 双材料密度插值模型	226
8.2.2 优化模型	227
8.2.3 优化准则法 (OC 法)	228
8.2.4 灵敏度求解	230
8.2.5 工程算例	233
8.3 基于序列的多材料拓扑优化设计方法	246
8.3.1 基于序列的多材料插值模型	247
8.3.2 灵敏度求解	248
8.3.3 优化准则法 (OC 法)	248
8.3.4 数值算例	249
8.4 结论	252
参考文献	252

第 1 章

汽车轻量化背景及关键技术介绍

1.1 汽车轻量化的必要性

汽车轻量化作为汽车产业发展节能减排的重要有效途径之一，既是国内外汽车企业应对能源环境挑战的共同选择，也是汽车产业可持续发展的必经之路。发展汽车轻量化技术，是我国汽车产业节能减排的需要，是我国汽车产业结构调整的需要，更是提升我国汽车产品国际竞争力和建设汽车强国的需要。

解决汽车节能减排问题主要通过以下三条途径：一是大力发展新能源汽车，通过推广使用电能和氢能，来减少对石油资源的依赖；二是大力发展先进发动机，通过一系列新技术，提升发动机效率，改善燃油经济性；三是大力发展汽车轻量化技术，在保证汽车性能的前提下，通过减轻整备质量，达到节能减排的目的。应该说明的是，近年来产业科技革命带来了新能源与智能网联汽车的快速发展。汽车与能源、通信等技术的全面且高度融合，电子信息、网络通信、人工智能、物联互通等技术赋予了汽车更多的功能和驾驶体验，但这些技术的运用也进一步增加了整车整备质量。

为了满足车辆安全性、经济性和智能化水平不断提升的要求，必须采用轻量化设计，有效控制整车整备质量，保持降重与成本增加的综合平衡。同时，轻量化不仅能对车辆节能做出贡献，也能影响车辆的加速性能、制动性能、操纵稳定性、平顺性和噪声振动水平等诸多车辆性能，合理的结构设计和高强度材料的应用将有效提升车辆的各项性能，科学合理的用材策略也将有效控制车辆的生产成本。实验数据表明：在传统燃油车领域，若汽车整车质量降低 10%，燃油效率可提高 6%~8%；汽车整备质量每减少 100 kg，百公里油耗可降低 0.3~0.6 L。随着全球汽车工业技术变革，以纯电动汽车为代表的新能源汽车逐渐成为汽车工业重要发展方向。与传统燃油车相比，纯电动车在取消发动机及部分附件的同时，增加了“三电系统”，按行业统计数据，其质量较传统车增加一般为 15%~40%，同比同类型传统燃油乘用车整备质量增加为 150~300 kg，同比同类型传统燃油大客车增加 2~3 t。其质量明显增加，对车辆电耗、续驶里程、动力性、制动性、被动安全、车辆可靠和耐久性均带来不利影响，而轻量化则是消除这些影响的重要应对手段之一。理论研究表明，电动车轻量化 10%，续航里程可增加 6%~8%，节约相应的电池成本，同时制动负荷下降 10%，且车辆的零部件载荷及疲劳等均有相应降低。相比于传统燃油车，纯电动汽车轻量化显得更为迫切。对于纯电动汽车，通过开展轻量化，一方面可以降低单位质量能耗，另一方面可在同样整备质量的情况下安装更大容量的动力电池，二者均可提升纯电动汽车的续驶里程。相关研究表明：新能源汽车整备质量每减少 100 kg，续航里程可提升 10%~11%。还可以减少 20% 的电池成本以及

20%的日常损耗成本。因此，纯电动汽车轻量化作为核心技术，相继被列入《国家中长期科学与技术发展规划纲要（2006—2020年）》《节能与新能源汽车发展规划（2012—2020年）》等国家重大战略规划。

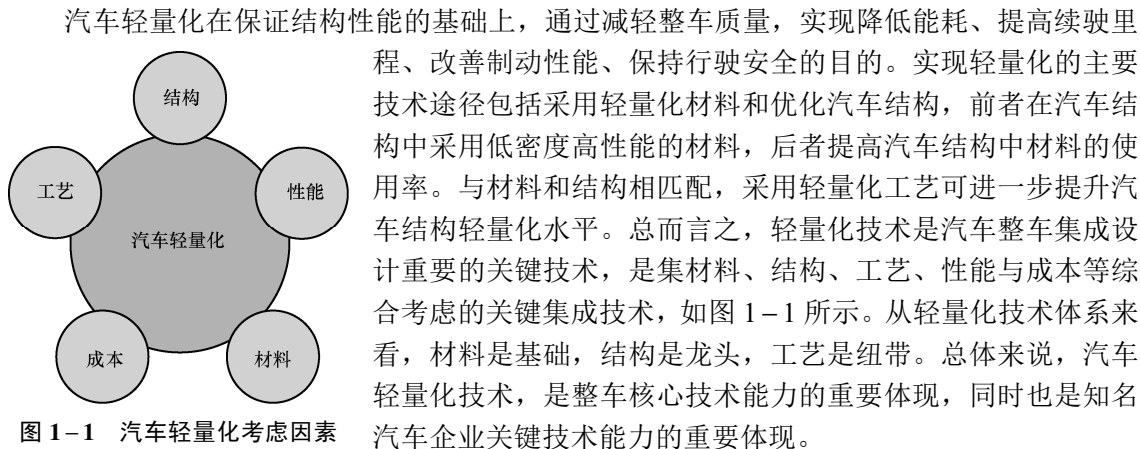


图 1-1 汽车轻量化考虑因素

汽车轻量化在保证结构性能的基础上，通过减轻整车质量，实现降低能耗、提高续航里程、改善制动性能、保持行驶安全的目的。实现轻量化的主要技术途径包括采用轻量化材料和优化汽车结构，前者在汽车结构中采用低密度高性能的材料，后者提高汽车结构中材料的使用率。与材料和结构相匹配，采用轻量化工艺可进一步提升汽车结构轻量化水平。总而言之，轻量化技术是汽车整车集成设计重要的关键技术，是集材料、结构、工艺、性能与成本等综合考虑的关键集成技术，如图 1-1 所示。从轻量化技术体系来看，材料是基础，结构是龙头，工艺是纽带。总体来说，汽车轻量化技术，是整车核心技术能力的重要体现，同时也是知名汽车企业关键技术能力的重要体现。

1.2 汽车轻量化主要技术手段

汽车轻量化的主要技术手段包括：① 应用轻量化材料；② 采用轻量化工艺；③ 开展汽车结构优化。在轻量化设计过程中，通常综合采用这三种技术手段，以实现在保证性能的同时，最大限度地提升轻量化水平。如图 1-2 所示，为某车型车身开发过程中，综合应用多种轻质材料、多种轻质工艺和结构优化技术，满足产品的轻量化和高性能需求。以下将简要介绍轻量化材料、轻量化工艺和结构优化技术。

1.2.1 轻量化材料

随着汽车技术，特别是车身技术的发展，轻量化材料的应用比例呈上升趋势，以“将合适材料布置在合适位置”为理念的“多材料车身”逐步成为行业的发展趋势，如图 1-3 为 Volvo XC60 多材料轻量化车身。当前，在汽车结构上应用的轻质材料主要包括：高强度钢、铝合金、镁合金和复合材料等。表 1-1 给出 2017—2019 年 ECB 车型轻质材料的应用情况，可以发现近几年大部分车型仍以高强钢为主体，部分车型采用了全铝车身，镁合金和碳纤维的复合材料的应用比例较之前均有一定的提升。汽车结构中常用的轻质材料及其性能简要介绍如下。

1. 高强度钢

高强度钢能够有效兼顾汽车质量和碰撞安全的双重需要，目前从成本和性能角度来看，是满足轻量化和提高碰撞安全性的最佳选择。汽车车身高强度钢按照成型工艺，可分为冷成型钢和热压成型钢。冷成型钢强化机理主要有固溶强化、析出强化、相变强化等，在高强度钢设计过程中可应用一种或多种强化机理实现不同强度级别的目标。热压成型钢是为了适应热压成型工艺开发设计的一类产品，一般具有冷轧退火、镀铝硅等表面状态。汽车车身用高强度钢的常用牌号主要包括：

- 1) 冷成型钢：HC180P、HC140BH、HC300LA、HC250/450DP 等；
- 2) 热压成型钢：PHS1200、PHS1500 等。

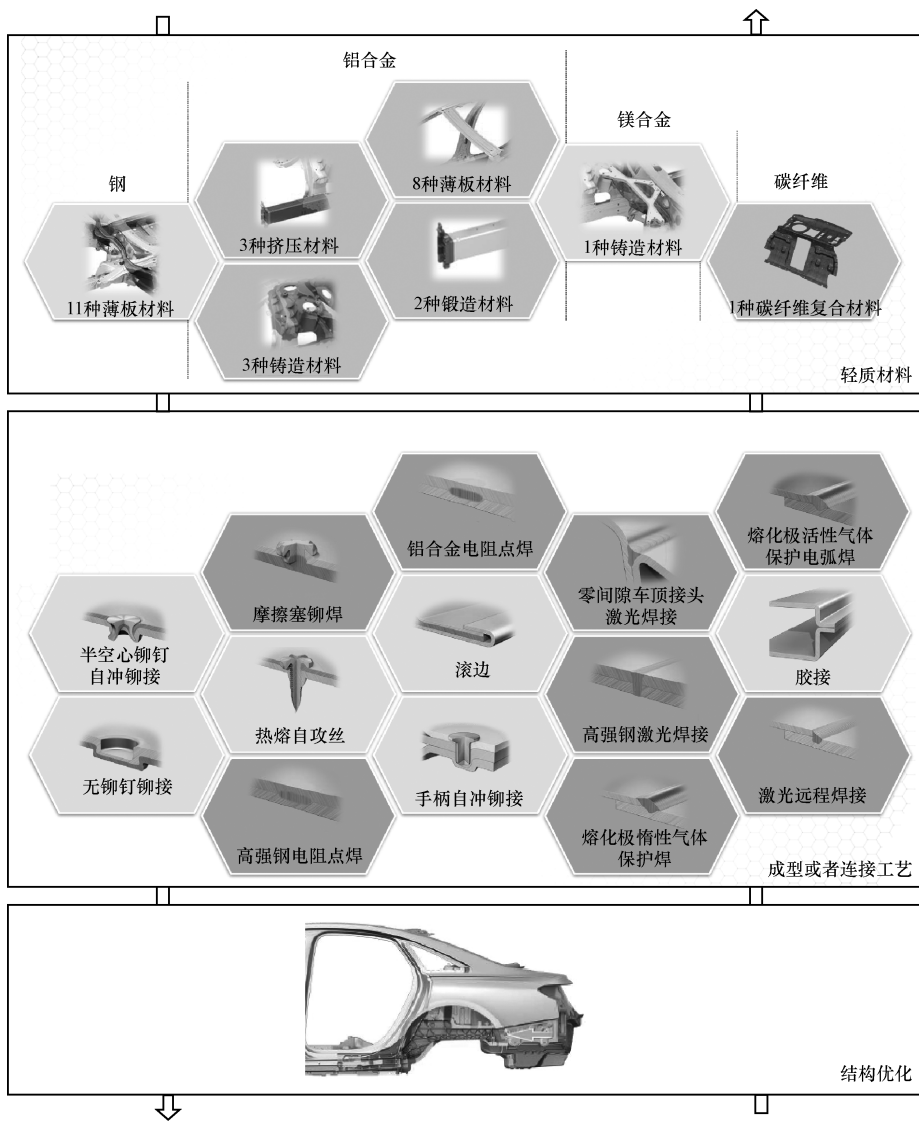


图 1-2 综合利用轻量化技术的某型车身结构开发



图 1-3 Volvo XC60 多材料车身

表 1-1 2017—2019 年 ECB 部分车型轻质材料应用情况

年度	车型	高强度钢占比	铝合金占比	镁合金占比	碳纤维复合材料占比
2017	RENAULT KOLEOS	47.2%	1.7%	—	—
2017	SUBARU IMPREZA	54%	2%	—	—
2017	RANGE ROVER	24.49%	58%	0.37%	3.15%
2017	Volvo XC60	66%	6%	—	—
2017	BMW 6 Series	59%	24%	—	—
2018	Volvo V60	70%	25%	—	—
2018	Jaguar I-Pace	7%	84%	—	9%
2018	Mercedes-Benz A class	71.4%	3.2%	—	—
2019	NIO ES8	—	91%	1%	3%
2019	LYNK	74%	2%	—	—

高强度钢主要应用于前防撞梁，A、B、C 柱加强件，门槛梁，车门防撞梁和车顶横梁等关键部位，欧美部分车身高强度钢应用比例已超过 60%，日系车型高强度钢占比也超过 50%。图 1-4 为雪佛兰 Bolt 的车身用材示意。该车身应用高强度钢比例达到 68%，其中先进高强度钢比例为 23%，超高强钢比例为 9%，热压成型钢比例为 12%，铝合金比例达到 14%。

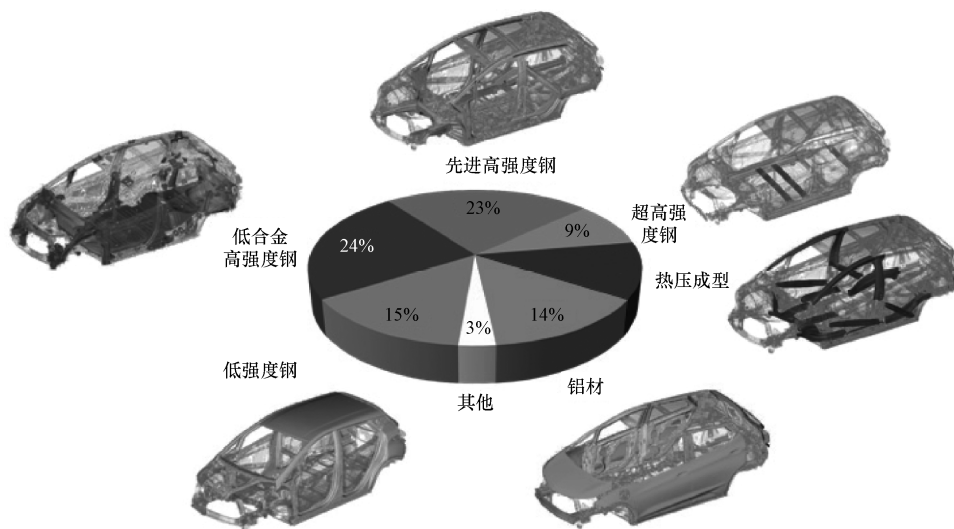


图 1-4 雪佛兰 Bolt 的车身高强度钢使用

2. 铝合金

铝合金主要分为铸造铝合金和变形铝合金。铸造铝合金是以熔融金属充填铸型，获得各种形状零件毛坯的铝合金，具有密度低、比强度较高、抗蚀性和铸造工艺性好、受零件结构设计限制小等优点。变形铝合金是通过冲压、弯曲、轧、挤压等工艺使组织、形状发生变化的铝合金。通过熔融法制锭，再经受金属塑性变形加工，制成各种形态的铝合金。

汽车覆盖件用铝合金，需要具备较高的表面质量、良好的成型性能、高强度及连接性能优异等特点，而结构件用铝合金需要良好的成型性能及足够的强度。在结构件中常用的铝合金通常具有优秀的成型能力，如 1050、3005、5052、5005、5182 等；用于覆盖件的铝合金的牌号主要包括：6016、6111、6181、6022、5182、5754 等。奥迪 A8、捷豹 XJ、特斯拉 MODEL S 等都采用了全铝车身。图 1-5 展示了蔚来 ES8 的全铝车身。



图 1-5 蔚来 ES8 白车身不同材质铝合金的分布

3. 镁合金

镁合金是以镁为基础，加入铝、锌、锰、稀土元素或其他元素而组成的合金，按照成型方法，主要有铸造镁合金和变形镁合金两大类。两者在成分、组织性能上存在很大差异。铸造镁合金主要用于方向盘骨架、仪表盘骨架、座椅骨架、转向支撑、传动系壳体等零部件上；变形镁合金主要用于薄板、挤压件和锻件等。图 1-6 为镁合金在汽车结构上的典型应用。



图 1-6 镁合金在汽车结构上的典型应用

4. 非金属材料

在汽车产品的发展历程中，非金属材料以其低密度、高比强度的优势在轻量化材料中占有非常重要的地位。非金属材料的分类方式很多，其中比较常见的是按化学组分划分，可分为有机材料和无机材料两大类。有机材料包含塑料、弹性体、复合材料等。复合材料根据增强体和基体材料不同分为多种类型增强基复合材料，如玻璃纤维增强复合材料、碳纤维增强复合材料等。复合材料具有的优势体现在：密度低、比强度高、比模量高；材料性能具有可设计性；

制品结构设计自由度大，易实现集成化、模块化设计；抗腐蚀性好、耐久性能好，隔声降噪；可采用多种成型工艺，模具成本低；A级表面，可免喷涂等工序；投资少，生产周期短。

玻璃纤维增强复合材料应用较为广泛，主要分布在乘用车车身空气导流板、前翼子板和前挡泥板延伸部件、发动机罩、装饰条、尾板等，以及商用车保险杠、翼子板、脚踏板、面罩等。碳纤维复合材料已由跑车、豪华车向中高端车和电动车应用扩展。近年来，碳纤维增强复合材料在汽车车身结构应用比例逐步增加，代表车型如宝马 i3。图 1-7 为宝马 i3 的车身结构示意图。

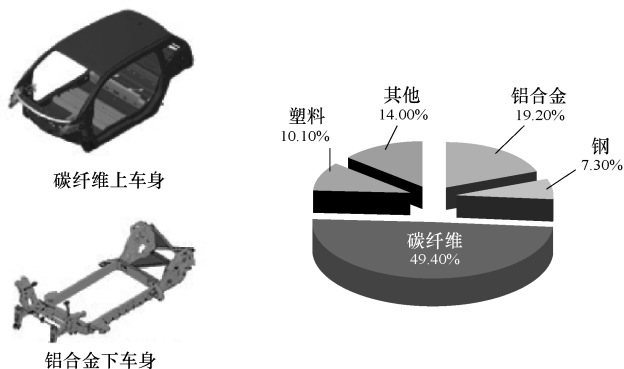


图 1-7 宝马 i3 车身结构示意图

1.2.2 轻量化工艺

轻量化工艺与结构优化、轻质材料的使用，在实现汽车轻量化设计方面具有相辅相成的作用，主要表现在：在结构优化设计以使零部件轻量化时，通常旧的制造工艺已不能满足新设计的零部件的制造要求，而需要新工艺；同样，使用新材料制造零部件可能需要特殊的成型方式或者连接条件。反过来，新的轻质工艺也能为结构优化设计和轻质材料选用提供更大的平台。如果在产品的设计初期就考虑轻质工艺，不仅可以有更好的结构优化和轻质材料的选择余地，而且能够使结构优化和轻质材料的应用具有更好的可行性。汽车车身轻量化工艺主要包括轻量化材料成型工艺及轻量化材料连接工艺两方面。

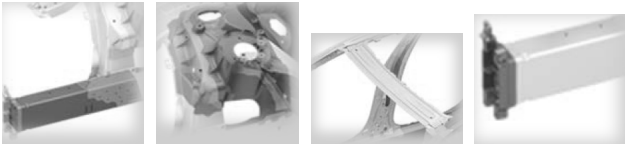

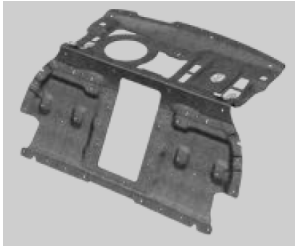
1. 轻量化材料成型工艺

轻量化材料成型工艺主要包括高强度钢、铝合金、镁合金和复合材料的成型工艺。具体如下如表 1-2 所示。

表 1-2 轻量化材料成型工艺

汽车用材	成型工艺	汽车结构示意图
高强度钢成型工艺	<ol style="list-style-type: none"> 1. 冲压成型 2. 激光拼焊成型 3. 液压成型技术 	

续表

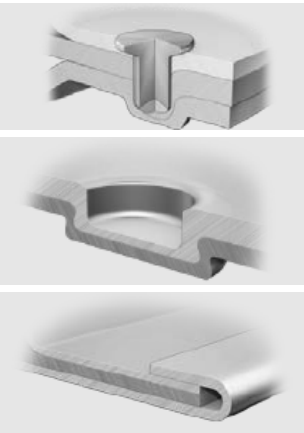
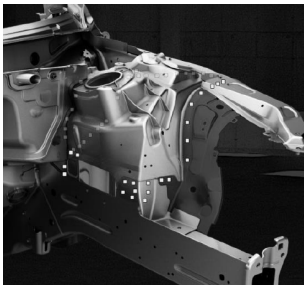
汽车用材	成型工艺	汽车结构示意图
铝合金成型工艺	1. 挤压成型 2. 压铸成型 3. 电磁成型 4. 新型吹塑成型 5. 其他	
镁合金成型工艺	1. 铸造成型 2. 变形成型	
复合材料成型工艺	1 热固性复合材料 1.1 喷射成型 1.2 层压成型 1.3 模压成型 1.4 拉挤成型 1.5 RTM 成型 1.6 反应注射成型 2 热塑性复合材料 2.1 冲压成型 2.2 拉挤成型 2.3 模压成型	

此外，目前在金属材料方面，液压成型、发泡铝成型、零件轧制、半固态金属加工、喷射成型等新技术将推动汽车轻量化发展；在塑料和复合材料方面，推广塑料/金属复合材料、低压反应注射成型、气体辅助注射成型等技术以满足汽车轻量化。其中，液压成型及泡沫铝工艺在汽车轻量化中越来越得到广泛应用。

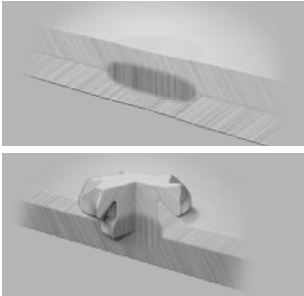

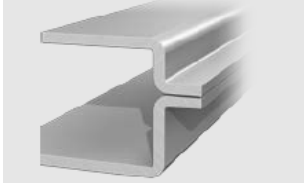
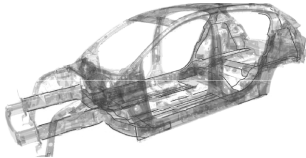
2. 轻量化材料连接工艺

汽车结构连接工艺主要包括机械连接、热连接、胶黏连接及复合连接等。主要的轻量化连接工艺如表 1-3 所示。

表 1-3 主要的连接工艺

连接类型	主要类型	部分示意图	具体应用示意
机械连接	栓接、铆接、翻边等		

续表

连接类型	主要类型	部分示意图	具体应用示意
热连接	焊接、钎焊		
胶接	胶接		

机械连接指利用紧固件将零件连接起来的过程和方法。通常在不同的连接工况，不同的连接强度、刚度、耐久可靠性、耐腐蚀性、工艺性和经济性等方面有较高要求时采用。热连接是将两块金属的连接接口处的金属熔化后以再凝固的方法连在一起的工艺。常见的焊接方法有弧焊、搅拌摩擦焊、激光焊接等。胶黏连接是利用胶黏剂在连接面上产生的机械结合力、物理吸附力和化学键合力而使两个胶接件连接起来的工艺方法，主要有非结构型和结构型两种形式。非结构胶接主要是指表面粘涂、密封和功能性粘接，而结构型胶接是将结构单元用胶黏剂牢固地固定在一起的粘接工艺，结构胶黏剂及其粘接点能够有效地传递结构应力，且在设计范围内不影响其结构的完整性及对环境的适应性。胶铆复合连接是指胶接与铆接的复合连接技术。采用胶铆连接一般是出于破损和安全的考虑，获得只有机械连接或只有胶接时更好的连接安全性和完整性。针对近年来汽车轻量化的需求以及复合材料的应用推广，胶铆复合连接技术因其较适合于非金属与金属以及非金属与非金属间的连接，可能会在未来展现出广阔的应用前景。

在汽车轻量化的趋势下，多材料车身或全铝车身市场比例越来越高，这种车身类型不仅涉及同种材质之间的连接，而且涉及异种轻质材料之间的连接，这对车身结构连接工艺提出了巨大的挑战。表 1-4 则列举了不同品牌的汽车车身采用的先进轻质连接工艺。

表 1-4 不同品牌汽车车身采用的先进轻质连接工艺

连接技术	奥迪 A8	凯迪拉克 CT6	特斯拉 MODEL S	奇瑞捷豹路虎 XFL	蔚来 ES8
电阻点焊	√	√	√		√
冷金属过渡焊	√	√	√		√
激光焊	√	√	√		√
MIG 焊	√				
自冲铆	√	√	√	√	√