

汽车轻量化前沿技术丛书



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版



乘用车轻量化及 微合金化钢板的应用

LIGHTWEIGHT OF PASSENGER CAR AND
NIOBIUM-MICROALLOYING STEEL

李 军 路洪洲 易红亮 郭爱民 著

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

汽车轻量化前沿技术丛书

2



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版



乘用车轻量化及 微合金化钢板的应用

LIGHTWEIGHT OF PASSENGER CAR AND
NIOBIUM-MICROALLOYING STEEL

李 军 路洪洲 易红亮 郭爱民 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 (CIP) 数据

乘用车轻量化及微合金化钢板的应用 / 李军等著. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 9
ISBN 978-7-5682-1072-0

I. ①乘… II. ①李… III. ①汽车轻量化②汽车-微合金化-钢板 IV. ①U462.2
②U469.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 193750 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) 68948351 (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 / 26

字 数 / 603 千字

版 次 / 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价 / 98.00 元

责任编辑 / 钟 博

文案编辑 / 钟 博

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

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

中国汽车工程学会在跟踪分析世界汽车工业的发展趋势之后提出，未来汽车技术的发展方向是“电动化、轻量化、智能化”。与之相呼应，近年来“汽车轻量化”这几个字频频出现在各种媒体中，成为汽车企业在新产品宣传中使用最频繁的词之一。2012年7月，国务院发布了《节能与新能源汽车产业发展规划（2012—2020年）》，提出到2020年乘用车平均燃料消耗量降至5.0 L/100 km，节能型乘用车燃料消耗量降至4.5 L/100 km以下的目标，之后汽车企业纷纷行动起来，加大了在汽车轻量化领域的工作力度。

人们不禁要问“这是为什么”。答案很简单：汽车的重量与行驶阻力表现出强烈的正相关，车辆自重的减轻，无疑可以使行驶阻力减小，并因此减少燃油消耗和污染物排放。但接下来消费者又会问：“轻”是否意味着不安全；工程师们又会问：如何做到“轻”；冶金企业也会问：我们能为“轻”做些什么。

这本书的作者以事实为依据，以实践经验为基础，对汽车轻量化的内涵进行了剖析，分析了世界汽车轻量化技术的发展状况，描述了中国汽车轻量化技术发展的进程，阐述了乘用车轻量化的解决方案，提出了对未来汽车轻量化发展趋势的见解。作者还从整车和车身性能、总成和零部件功能的要求出发，论述了汽车用钢的力学性能和使用性能要求，提出了满足使用要求的高性能钢材的开发、制造及其微合金化技术的解决方案，力图建立汽车性能、总成与零部件的功能、材料性能之间的关系，为汽车产品设计师、工艺师在产品开发、材料开发和工艺选定各个环节提供指导。这对促进乘用车轻量化发展以及新材料、新工艺的开发和应用方面起到了作用。

这本书的作者是一个团队，团队成员来自整车企业、大学和行业研究机构的科研、生产一线。他们经历了中国汽车行业从对汽车轻量化的不理解，到在技术层面有深刻认识，再到整个汽车行业对汽车轻量化达成共识的全过程，跟随中国汽车轻量化技术发展的步伐成长，书中的内容也基本脱胎于这个过程中的实际和轻量化项目的实施。这个过程的推进，得益于中国汽车轻量化技术创新战略联盟的建立，更得益于众多汽车、材料行业的老中青科技工作者的不懈努力。

在这本书的撰写过程中，多位汽车、材料行业的老专家给予了很多无私的帮助和指导，使得这本书并不只是局限于帮助读者理解汽车轻量化及其解决方案和未来的发展趋势，更使这本书具有了对产品开发、技术研究和相关工业布局的指导意义。阅读本书，读者的收益将是多方位的。

因此，我有理由为这本书点一个赞，称赞作者的勤奋和担当，称赞他们为青年工程师的成长所做的一切，相信在大家的共同努力之下，中国汽车工业由大到强的一天会很快到来。

张宁

2015年7月15日

“节能减排、发展低碳经济”已在全球范围内形成高度的共识。汽车行业的节能减排是各国汽车技术发展的原动力，汽车轻量化作为节能减排的重要途径，已成为各国政府发展汽车工业、提高全球竞争力的必然选择，也成为当前和未来汽车技术发展的主要方向之一。

近十年是中国汽车工业的快速发展期。自 2009 年开始，中国汽车的产销量便跃居世界第一，并一路领先，中国成为世界上发展最快、最大的汽车市场。快速发展的汽车工业同样给中国的节能减排目标带来了巨大的挑战，轻量化作为汽车节能减排的有效途径之一，近年来在中国也得到了快速的发展，尤其是自 2007 年汽车轻量化技术创新联盟成立以来，轻量化的理念已融入国内汽车企业的产品设计之中，轻量化技术在国内也取得了长足的进步。

高强度钢，尤其是微合金化高强度钢，以较低的成本、成熟的制造工艺，以及高性能成为轻量化的首选材料。高强度钢的大量应用，形成了庞大的产业链，上下游的技术人员需要加强对关键零部件的设计要求、高强度钢材料的开发，以及用材的发展趋势的认识和了解。本书力争从整车和车身性能、总成和零部件功能要求出发，进一步提出汽车用钢的力学性能和使用性能要求，最后论述满足使用要求的高性能钢材的开发、制造及其微合金化技术的解决方案。本书力争建立汽车性能（Performance）、总成和零部件的功能（Function）和钢材的性能（Property）之间的关系，为汽车轻量化设计和开发提供参考，促进自主品牌汽车的正向选材，并让钢厂针对汽车的使用需求来开发钢材。作者试图将汽车的性能要求、部件结构、制造工艺、设计选材、钢材的开发与制造，以及微合金化等耦合起来，构成一个轻量化技术链，并在此基础上，针对汽车行业的节能减排、轻量化、安全、舒适、可靠性等的需求，结合近年来产业链的合作成果、作者的工作和项目经验、国内外的研究成果等，提出一系列解决方案，希望对汽车产品工程师、材料工程师、工艺人员，以及钢厂的钢材研究人员的工作有所帮助，以促进我国汽车轻量化的进程和技术进步。

本书由路洪洲统筹策划，李军和路洪洲牵头撰写，李军进行统稿。本书的第一章、第四章、第五章的结构部分及部分有关轻量化钢种的内容，第六章以及第八章的主要部分由李军撰写，其他作者给予了补充；第二章、第五章的双相钢部分、第七章、第八章的 Q&P 部分，以及第九章由路洪洲撰写，其他作者给予了补充；第五章的 TRIP 钢部分、第八章的 δ -TRIP 钢以及部分钢材相关内容由易红亮撰写，其他作者给予了补充；第三章由郭爱民撰写，其他作者给予了补充；第十章由本书作者联合撰写。

第一章概述了汽车轻量化的目的和意义、技术路径、评价方法和轻量化目标设定方法，并阐述了轻量化与汽车安全、刚度、NVH 等性能的关系，概述了国内外轻量化技术应用开发的最新进展。

第二章概述了汽车轻量化用钢材、钢板、冷轧和镀锌板材、微合金化板材的历年产量和使用量，并给出了计算方法和数据来源，同时简要介绍了国内外典型汽车企业的乘用车车身用材的历史和发展趋势。

第三章概述了铌微合金化技术在汽车用钢中的作用,并阐述了铌微合金化汽车钢的物理冶金原理。

第四章介绍了车身覆盖件轻量化及微合金化钢板的开发与应用,从覆盖件的性能需求引出覆盖件用钢的性能需求,并阐述了覆盖件制造所应用的 IF 钢和 BH 钢的开发和应用情况,以及覆盖件用材的发展趋势。

第五章介绍了车身结构件轻量化及微合金化钢板钢的开发与应用,从车身结构件的性能需求和轻量化需求引出车身结构件用钢的性能需求,并阐述了车身结构件用钢的开发,包括 HSLA、DP 钢和 TRIP 等钢的开发和应用。

第六章介绍了底盘及内饰座椅轻量化及微合金化钢板的开发与应用。首先探讨了底盘及内饰座椅的轻量化需求和综合性能需求,在此基础上提出了副车架、座椅、车轮等用钢的性能需求,阐述了底盘及内外饰用钢的开发,包括高扩孔钢等热轧钢板的开发和应用。

第七章介绍了一个重要的轻量化工艺,即热冲压成形技术,并根据车身安全件的性能要求,阐述了热冲压成形工艺以及高性能的微合金化热成形钢的开发和应用,以及热冲压成形新工艺的发展趋势、国内外资源现状以及应用前景。

第八章介绍了第三代汽车用钢的开发和应用。本章阐述了 Q&P、 δ -TRIP 钢等几种典型第三代汽车钢(未来具有较大潜力的汽车轻量化用钢)的工艺和性能以及微合金化的作用。

第九章从价值链、技术链和产业链构成的角度,阐述了微合金化高强度钢的应用基础,即在满足节能减排、轻量化、提高汽车综合性能的同时,用户、整车厂、零部件厂和钢厂可以取得共赢,并介绍了国内外典型车型的微合金化钢材的应用情况。

第十章论述了乘用车轻量化用材的发展趋势,以期为汽车行业轻量化的设计选材和钢铁行业的钢种开发提供参考。

本书得到了中国汽车轻量化技术创新联盟、中信微合金化技术中心(CITIC-CBMM)以及北京理工大学出版社的领导和专家的大力支持。在撰写之初,张宁秘书长、王智文副秘书长、郭爱民总工程师、樊红亮副社长等领导和专家给出很多富有建设性的建议和意见,在此表示感谢。本书由陈一龙先生和马鸣图博士两位资深专家审稿,他们提出了重要的观点和建议,两位老师严谨的学术态度和深厚的学术功底使学生受益匪浅,在此敬表诚挚的谢意。本书得到了原长城汽车的杨洁副院长、奇瑞汽车的陈云霞部长和孙希庆工程师、武钢的陈宇博士、中信金属的顾问 Hardy 博士和边箭博士、鞍钢的郭金宇博士、钢铁研究总院的董翰副院长、上海交通大学的李伟副教授、中国汽车工程研究院的郭亦辉和宋磊峰工程师、中信金属的王文军博士、长江大学的张施琦、安徽工程大学的王介石和王建彬、北京理工大学出版社的张海丽等的大力支持,本书也得到了宝钢、鞍钢、武钢、首钢和本钢等主要汽车钢板制造商的积极响应,在此一并表示感谢。本书得到了中信微合金化技术中心的经费支持,在此表示感谢。作者主要在工作外的时间完成撰写,历时两年,在此感谢家人的理解和支持。

中国汽车工程学会副秘书长、中国汽车轻量化技术创新联盟秘书长张宁女士在百忙之中为本书作序,就本书的内容和结构提出了重要的建议,并站在行业层面,提出了汽车轻量化发展的路线和方向,让本书的意义更加清晰明确,在此深表谢意。

除作者及工作团队多年的成果外,本书还引用了国内外大量的参考文献和行业专家的研究成果,以及上下游的合作项目成果,一并表示感谢,参考文献如有遗漏之处,请批评指正。

本书的主要受众为汽车行业的材料工程师、工艺工程师、结构工程师和产品工程师，以及钢厂的材料和工艺工程师，本书也可以供大学等研究机构参考。

本书涉及汽车结构设计、成形技术、汽车及构件的性能开发与评价、钢材的开发及制造、微合金化技术等诸多领域和学科，由于作者水平有限，错漏缺点在所难免，希望读者批评指正！

本书献给工作在汽车轻量化及汽车用钢开发战线的业内同行！

作 者

2015 年 7 月

第一章 汽车轻量化概述	1
1.1 汽车轻量化的意义	1
1.2 汽车轻量化的技术路径	4
1.3 汽车轻量化的评价方法	6
1.4 汽车开发的轻量化目标设定方法	8
1.5 汽车轻量化与安全	10
1.5.1 汽车轻量化与被动安全	10
1.5.2 汽车轻量化与主动安全	11
1.5.3 汽车质量与碰撞安全星级的关系	11
1.6 国产乘用车质量现状及轻量化潜力分析	12
1.6.1 国内市场上乘用车的质量变化趋势分析	12
1.6.2 自主品牌与合资品牌车型质量现状分析	13
1.6.3 国产乘用车轻量化潜力分析	13
1.7 国内外汽车轻量化技术研究与应用概况	14
1.7.1 轻量化结构设计	14
1.7.2 轻量化材料	15
1.7.3 轻量化成形与制造技术	23
1.8 本章小结	31
参考文献	32
第二章 汽车轻量化用钢概述	34
2.1 中国汽车工业与汽车用钢现状	34
2.2 汽车用钢消费量分析	36
2.2.1 乘用车用钢的现状与预测	39
2.2.2 商用车用钢的现状与预测	43
2.3 我国汽车专用钢板产量分析	50
2.4 汽车用铌微合金化钢板的应用现状	55
2.5 典型车企乘用车用钢演变	57
2.5.1 福特汽车	57
2.5.2 本田汽车	62
2.5.3 奇瑞汽车	68
2.5.4 长城汽车	72
2.6 本章小结	75
参考文献	76
第三章 微合金化汽车钢的物理冶金基础	78
3.1 铌的物理冶金原理	78
3.1.1 铌的热力学基础	79
3.1.2 铌的固溶	79
3.1.3 铌的析出	82

3.2 铌对奥氏体的调控	85
3.2.1 铌对奥氏体晶粒尺寸的调控	86
3.2.2 铌对晶粒尺寸进行调控的途径	87
3.2.3 铌对奥氏体再结晶的影响	89
3.2.4 铌对奥氏体相变的影响	91
3.3 铌与稳定化	92
3.3.1 铌在 IF 钢中的作用	93
3.3.2 铌在铁素体不锈钢中的作用	94
3.4 本章小结	96
参考文献	96
第四章 车身覆盖件轻量化及其用钢的开发与应用	108
4.1 车身覆盖件概述	108
4.2 车身覆盖件的性能要求	109
4.2.1 抗凹性能	109
4.2.2 耐腐蚀性能	111
4.3 车身覆盖件对材料的要求	114
4.3.1 表面质量	114
4.3.2 冷冲压成形性能	115
4.3.3 焊接性能	119
4.3.4 涂装性能	119
4.4 车身覆盖件用钢现状	120
4.4.1 车身覆盖件用钢	120
4.4.2 覆盖件的设计选材	122
4.5 车身覆盖件轻量化用钢的开发	130
4.5.1 IF 钢	130
4.5.2 BH 钢	143
4.6 车身覆盖件轻量化用钢的发展趋势	152
4.7 本章小结	153
参考文献	154
第五章 车身结构件轻量化及其用钢的开发与应用	157
5.1 车身结构件概述	157
5.2 轻量化车身结构件及其性能要求	159
5.3 车身结构件对材料的要求	160
5.4 车身结构件用钢的现状	161
5.4.1 车身安全吸能构件	162
5.4.2 车身结构加强件	174
5.4.3 其他结构件	174
5.5 车身结构件用钢的开发	175
5.5.1 HSLA 钢	176

5.5.2 DP 钢	181
5.5.3 TRIP 钢	203
5.5.4 CP 钢	213
5.5.5 MS 钢	215
5.5.6 TWIP 钢	216
5.6 轻量化车身结构件用钢的发展趋势	223
5.7 本章小结	224
参考文献	224
第六章 底盘及座椅系统轻量化用钢的开发与应用	229
6.1 乘用车底盘轻量化用钢的应用	229
6.1.1 乘用车底盘系统结构轻量化及其对材料的要求	229
6.1.2 乘用车副车架及其选材	231
6.1.3 后悬架系统及其选材	233
6.1.4 车轮及其选材	237
6.2 乘用车座椅轻量化用钢的应用	241
6.2.1 座椅骨架及其选材	241
6.2.2 座椅滑轨选材	243
6.2.3 座椅系统用材的趋势	245
6.3 铁素体贝氏体 (FB) 高扩孔钢	245
6.3.1 FB 钢的开发现状	245
6.3.2 FB 钢的生产工艺	247
6.3.3 FB 钢的强化机理及微合金化的作用	248
6.4 本章小结	250
参考文献	250
第七章 热冲压成形技术与热成形钢	252
7.1 概述	252
7.2 热成形钢的开发现状	255
7.2.1 微合金化热成形钢的研发基础	258
7.2.2 典型的微合金化热成形钢及其发展	264
7.2.3 热成形钢氢致延迟开裂特性及改善方法	282
7.3 热冲压成形技术	285
7.3.1 典型工艺过程	285
7.3.2 成形工艺仿真	288
7.3.3 热冲压模具	299
7.3.4 生产线及工艺装备	303
7.4 先进热冲压成形技术	307
7.4.1 补丁板热冲压	308
7.4.2 拼焊板热冲压	308
7.4.3 差厚板热冲压	310

7.4.4 分段强化热冲压	311
7.5 热冲压成形技术的应用现状及发展趋势	313
7.6 本章小结	317
参考文献	317
第八章 第三代先进高强度钢	323
8.1 第三代先进高强度钢的研发背景与技术路线	323
8.1.1 研发背景	323
8.1.2 技术路线	324
8.2 Q&P 钢	325
8.2.1 Q&P 钢的发展与工艺	325
8.2.2 Q&P 钢的成分与微合金化	331
8.3 δ -TRIP 钢	332
8.3.1 δ -TRIP 钢的发展及概述	332
8.3.2 δ -TRIP 钢工艺过程的组织演化	334
8.3.3 δ -TRIP 钢的强韧性机理	338
8.3.4 δ -TRIP 钢的电阻点焊性能	340
8.4 纳米贝氏体钢	341
8.4.1 纳米贝氏体钢的开发	341
8.4.2 纳米贝氏体钢的生产工艺	346
8.5 M^3 型中锰钢	349
8.5.1 M^3 型中锰钢的组织控制思路	349
8.5.2 M^3 型中锰钢的典型组织与性能	350
8.5.3 M^3 型中锰钢的工业化生产	354
8.6 本章小结	355
参考文献	355
第九章 乘用车微合金化钢板的应用及其价值链分析	359
9.1 微合金化钢分析对标车型介绍	359
9.1.1 大众 POLO	360
9.1.2 丰田普拉多	360
9.1.3 丰田 RAV4	361
9.1.4 欧宝 Insignia	362
9.1.5 现代伊兰特	362
9.2 车身钣金件材料 Benchmarking 分析技术	363
9.2.1 车身 Benchmarking 分析流程	363
9.2.2 车身钣金件材料 Benchmarking 分析	364
9.3 典型车型 Benchmarking 分析结果	368
9.3.1 车型一车身零件微合金化钢板的应用情况	368
9.3.2 车型二车身微合金化钢板的应用情况	372
9.3.3 车型三车身微合金化钢板的应用情况	374

9.3.4 车型四车身微合金化钢板的应用情况	375
9.3.5 车型五的微合金化钢板的应用情况	377
9.4 乘用车车身应用微合金化钢材的价值链分析	380
9.4.1 模型的建立	380
9.4.2 结果分析和讨论	388
9.5 本章小结	388
参考文献	389
第十章 乘用车轻量化用材的发展趋势	391
10.1 引言	391
10.2 各种轻量化材料的对比	392
10.2.1 基本性能	392
10.2.2 轻量化潜力	392
10.2.3 原材料成本	395
10.2.4 节能减排效果	396
10.3 乘用车轻量化材料的应用趋势	396
10.3.1 国外典型车型车身材料构成	396
10.3.2 轻量化材料的应用发展趋势	397
10.4 乘用车轻量化发展建议	399
10.5 本章小结	401
参考文献	401

1.1 汽车轻量化的意义

近年来，汽车保有量的持续高速增长，给社会能源供给、环境保护和交通安全带来日益巨大的影响。中国的车用燃油约占石油总消耗量的 50%，高速增长的原油消耗量必将给中国的石油安全和环境保护带来巨大的挑战。图 1-1 所示为 2002—2013 年中国石油生产量、消耗量及与对外依存度变化的趋势。由图 1-1 可知，2013 年中国石油对外依存度已经达到近 60%。

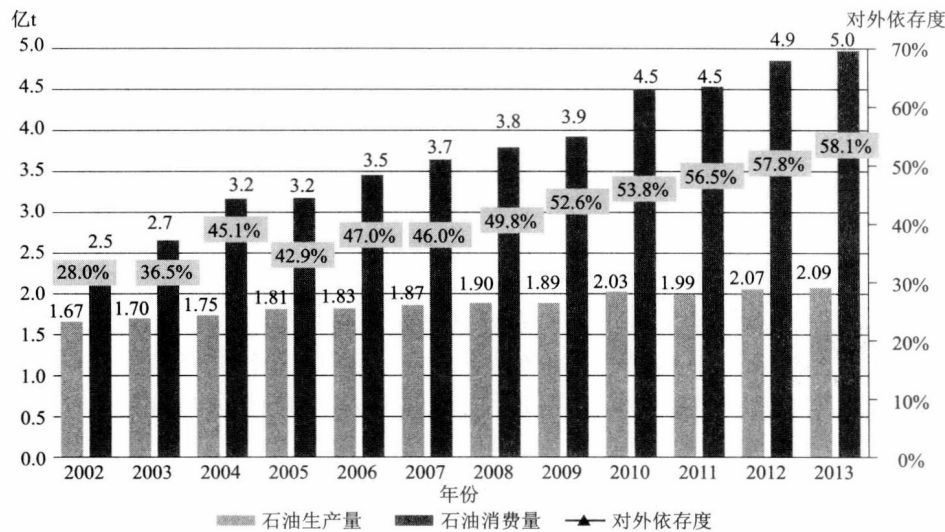


图 1-1 2002—2013 年中国石油生产量、消耗量及与对外依存度变化的趋势^[1-2]

图 1-2 所示为近年来全球范围内大气中 CO₂（二氧化碳）的平均浓度（单位：ppm）的变化。由图 1-2 可知，随着工业化的发展，空气中 CO₂ 含量快速增加，全球温室效应日益

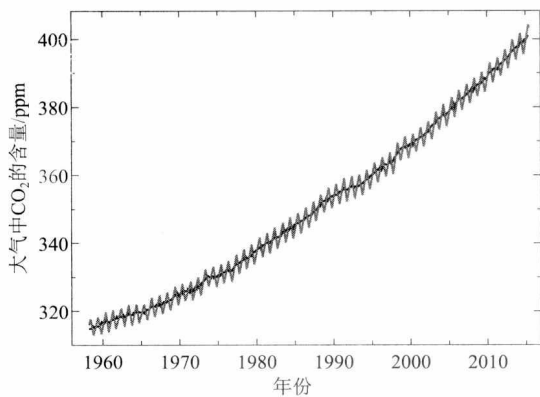


图 1-2 近年来全球范围内大气中 CO₂ 的平均浓度（单位：ppm）的变化^[3]

严重。美国国家海洋和大气管理局下属的全球温室气体参考网络（Global Greenhouse Gas Reference Network）监测到的数据表明，全球范围内大气中 CO₂ 浓度在 2015 年 3 月已经突破 400 ppm。

汽车工业是温室气体排放大户，汽车生产制造、使用和回收的各个环节都会产生大量的温室气体。为了减少汽车工业对环境的影响，发达国家都相继出台了汽车产品的排放标准。图 1-3 所示为各国和地区汽车行业 CO₂ 减排目标^[3]。中国政府在哥本哈根气候大会做出了公开承诺：到 2020 年中国单位国内生产总值

CO₂ 比 2005 年下降 40%~45%。届时，乘用车的燃油经济性指标将达到 5 L/100 km，CO₂ 排放量将达到 115 g/km。

	节能目标	CO ₂ 减排目标
美国	✓ 每年将汽车燃料经济性标准提高4%； ✓ 2012—2016年，美国轿车和轻型载货汽车燃油经济性达到6.6 L/100 km； ✓ 2012年前实现美国联邦政府购买车量中50%是PHEV或EV； ✓ 到2015年，将有100万辆PHEV投入使用	2016年： 155 g/km
欧洲	→ 机动车平均油耗：2008年为5.8 L/100 km，2015年达到5.48 L/100 km，2020年达到4.28 L/100 km； → 生物燃料使用率：2010年达到5.75%，2020年达到10%，2040年达到25%	2020年： 95 g/km
日本	→ 2020年轿车燃油经济性达到5.0 L/100 km； → 2030年运输领域能源效率比现在提高30%	2020年： 115 g/km
中国	→ 中国乘用车第三阶段油耗标准； → 2020年汽车工业排放相对2005年降低40%~45%	2020年 预测115 g/km

图 1-3 各国汽车行业 CO₂ 减排目标

对于汽车来说，整備质量消耗了动力系统输出能量的约 70% 以上。因此，汽车轻量化是降低汽车燃油消耗和实现节能减排的有效途径之一。目前关于汽车轻量化对节油的说法多种多样，总体上可分为两大类^[4~7]：一类是绝对量的说法，如汽车质量每减小 100 kg，油耗可减少 0.2~0.8 L/100 km，因为不同车型在减去相同质量后，对油耗的影响不可能完全一致。另外，将这样的结论用于单一车型的累积减重方案，也是不合适的，因此不宜采用质量变化的绝对量来评价轻量化对降低油耗的贡献。

另外一类是相对量的说法，主要有以下几种：

- (1) 汽车质量每减小 100 kg，油耗可减少 0.2~0.8 L/100 km。
- (2) 汽车质量减小 330~440 kg，可节约燃油费用 20% 左右。
- (3) 汽车质量每减小 50 kg，则每 L 燃油行驶的距离可增加 1 km。

(4) 对于 16~20 t 级载货汽车, 每减小质量 1 000 kg, 则油耗可降低 6%~7%。

相对量的说法还有以下几种:

(1) 汽车质量每减小 10%, 可降低 6%~8% 的油耗。

(2) 汽车质量每减小 10%, 油耗可降低 5.5% 左右。

(3) 汽车质量每减小 10%, 油耗可下降 8%~10%。

(4) 德国亚琛汽车工程技术有限公司通过模拟研究得到, 若整备质量降低 10%, 则油耗降低 4.5%~6%。

(5) 博世公司研究发现: 汽车质量降低 10%, 油耗可降低约 6%。

世界铝业协会、欧洲铝业协会、美国铝业协会联合委托德国海德堡责任有限公司能源与环境研究所对轻量化对各种车型降低油耗的效果进行调查和研究, 结果见表 1-1^[5]。

表 1-1 轻量化对各种车型降低油耗的效果

车型类别	减重 10% 的对应节油效果/%
乘用车	5.7
轻型商用车	5.7
中型货车	5.7
汽车列车	4
城市客车	5.6
长途客车	2.4

作者根据国内在售的近 4 000 款乘用车车型数据分析得到, 整备质量降低 10% 时, 整备质量与油耗降低率的关系如图 1-4 所示。由图 1-4 可知, 在整备质量为 750~2 500 kg 时, 油耗降低 7.5%~9%。该数据是基于统计学方法进行分析得到的, 是国内市场乘用车的总体情况, 不区分动力总成类别等。

上述各种轻量化对节油贡献的数据均是基于不同的研究方法 (CAE 仿真、测试方法和路况差异等) 而得到的结果, 因此, 也不必去深究哪种结论是绝对

正确的。但从上述的各种结论可以得到两点启示: ① 汽车轻量化对降低燃油消耗量是有贡献的; ② 对于不同类型、不同地区、不同国家的汽车, 轻量化对其降低燃油消耗量的贡献也是有差异的。作为汽车产品设计来说, 尽可能降低汽车的整备质量是非常必要的, 只有做到汽车上任何一个零部件的质量最小化, 才能最终实现整车的轻量化。

轻量化不仅可以带来汽车油耗的降低, 也可实现节能减排, 同时以设计为主导的轻量化也可以给汽车企业和消费者带来一定的经济效益。作者根据相关统计数据^[8], 以一款整备质量为 1 600 kg, 综合油耗为 10 L/100 km 的乘用车, 按照整车轻量化 10%, 油耗降低 7% 为基准, 对该车型轻量化带来的节能、减排和相关效益进行详细的分析, 如下所述。

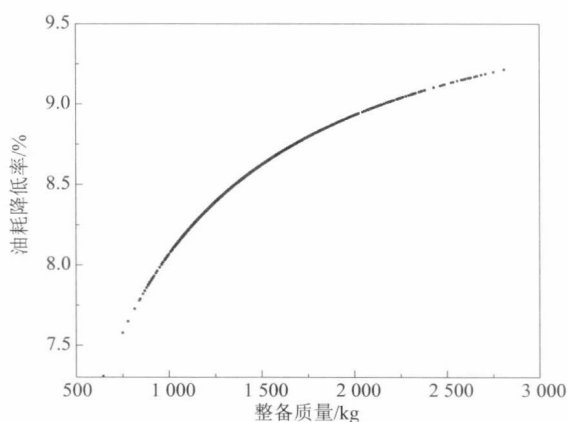


图 1-4 整备质量与油耗降低率的关系

1. 轻量化节能效果分析

轻量化对节能的贡献主要体现在两个方面：一是汽车使用过程中燃油消耗量降低，即燃油消耗能源的节省；二是轻量化实施带来的原材料使用量的降低，因而原材料生产的能耗也会相应地降低。

(1) 单车全寿命周期使用的节油量为^[8] $0.7\text{ L}/100\text{ km}\times0.74\text{ kg/L}\times50\text{ 万 km}=2.590\text{ t}$ 汽油，将节省的汽油转换成能耗： $2.590\text{ t}\times1.474\text{ t 标煤/t}$ （汽油与标煤的转化关系） $\approx3.8\text{ t}$ 标煤。

(2) 节省的原材料。整车减重 10%，即可节约 0.16 t 原材料。由于钢材用量在汽车中的比例占 70%以上，假定减少的 0.16 t 原材料均为钢材（未考虑材料的利用率，以及高强度钢相对传统钢生产过程的能耗增加等因素），则节省的原材料生产所需的能耗为： $0.16\text{ t 钢材}\times1.17\text{ t 标煤/t}$ （吨钢全寿命周期综合能耗，测算方法详见文献 [8]） $=0.1872\text{ t}$ 标煤。

因此，单车全寿命周期可以实现节能量为 3.99 t 标煤，若按照单一车型销售 50 万辆，则可以实现节能 199.5 万 t 标煤。

2. 轻量化减排效果分析

轻量化对减排的贡献主要指能源消耗减少所带来的废气和粉尘排放的减少。根据相关资料^[8]，减少 1 t 标煤的能源消耗，可以实现减排 CO_2 约 2.3 t，减排 SO_2 约 0.02 t，减排 NO_x 约 0.009 t，减排粉煤灰等固体废物约 0.275 t。

根据以上的计算，该单车全寿命周期实现节能 3.99 t。减排效果见表 1-2。

表 1-2 汽车轻量化的减排效果

污染物类型	吨标煤排放量/t	单车全寿命周期排放总量/t	单一车型 50 万辆全寿命减排总量/万 t
CO ₂	2.3	9.18	458.85
SO ₂	0.02	0.08	3.99
NO _x	0.009	0.04	1.80
固体废物	0.275	1.10	54.86

注：由于不同研究机构公布吨标煤污染物排放数据有所差异，表中数据以文献 [8] 的数据为准

3. 轻量化经济效益分析

轻量化的经济效益主要体现在两个方面：一是汽车制造原材料用量的减少所带来的经济效益，这里主要是指通过结构的优化设计和合理的性能设计而实现相同性能下汽车用材的减少。因为汽车轻量化不是简单的材料替换，而是个系统的工程，单纯采用轻量化材料的替换往往会增加成本，如碳纤维复合材料等新型轻量化材料。另一方面是轻量化汽车用户的汽油用量减少，给客户节约了燃油消耗的费用。在本书的第九章，作者将通过价值链的模型，详细分析汽车轻量化给汽车企业、汽车用户等轻量化产业链主体所带来的价值。

通过以上分析可知，汽车轻量化是节能、减排和增加企业与客户效益的有效途径，汽车行业应该大力倡导汽车轻量化技术的应用与推广。

1.2 汽车轻量化的技术路径

汽车轻量化是指汽车在保持原有的安全性、可靠性、耐久性以及舒适性等整车性能不降

低,且汽车本身造价不被大幅提高或增幅在可接受范围内的前提下,有目标地减轻汽车自身的质量。汽车轻量化技术的实施首先是设定工程目标,包括汽车的最小质量、汽车的轴荷分布以及动态和静态刚度,声学特性和舒适性,被动安全性和法规目标,使用寿命和寿命周期等。基于这些目标,汽车轻量化的主要技术路径如图 1-5 所示^[9]。



图 1-5 汽车轻量化的主要技术路径

1. 结构优化设计

结构优化设计是汽车轻量化的重要途径之一,是轻量化汽车产品开发的基础和前提,通过轻量化设计使材料、最优的结构形状和尺寸用在汽车结构的合适位置,使每部分材料都能发挥其最大的承载或吸能作用,可提高材料利用率、降低车重,实现节能、减排和降低材料成本的目的。

从汽车零部件概念设计、初始结构设计、产品工程设计和样车制造过程来分析结构轻量化的设计,可以抽象出结构设计和分析的基本理论和方法,研究这些理论和方法并加以恰当的综合,是实现结构轻量化的重要途径。轻量化结构设计涉及整车各系统的布置、各系统的零件的分布与装配关系、零部件的模块化、零件或系统性能优化等方面,实现相同功能零件的数量或质量的最小化,以达到轻量化的目的。

整车布置对轻量化也有很大影响,比如在满足车内空间的条件下应尽可能缩小外形尺寸,整车质量自然会降低。汽车的线束或管路的布置、发动机的前置或后置、悬架的结构形式等都会影响汽车的质量。因此,轻量化的理念应该贯彻于汽车开发的各个阶段和环节。

对部件的优化设计主要包括最优的承载路径、均匀化的结构和优化的几何形状。采用优化设计除去零部件的冗余部分(使零部件薄壁化、中空化),使零件模块化、复合化以减少零件数量。连续体结构优化按照设计变量的类型和求解问题的难易程度可分为尺寸优化(尺寸变量)、形状优化(形状变量)和拓扑优化(拓扑变量)三个层次,分别对应于三个不同的产品设计阶段,即概念设计、基本设计及详细设计三个阶段,如图 1-6 所示^[10]。

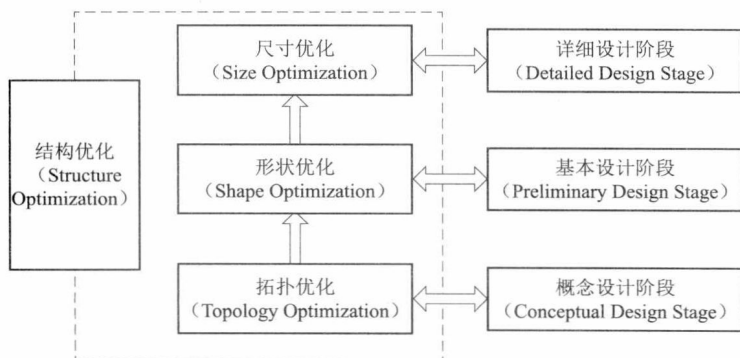


图 1-6 结构设计优化的不同阶段