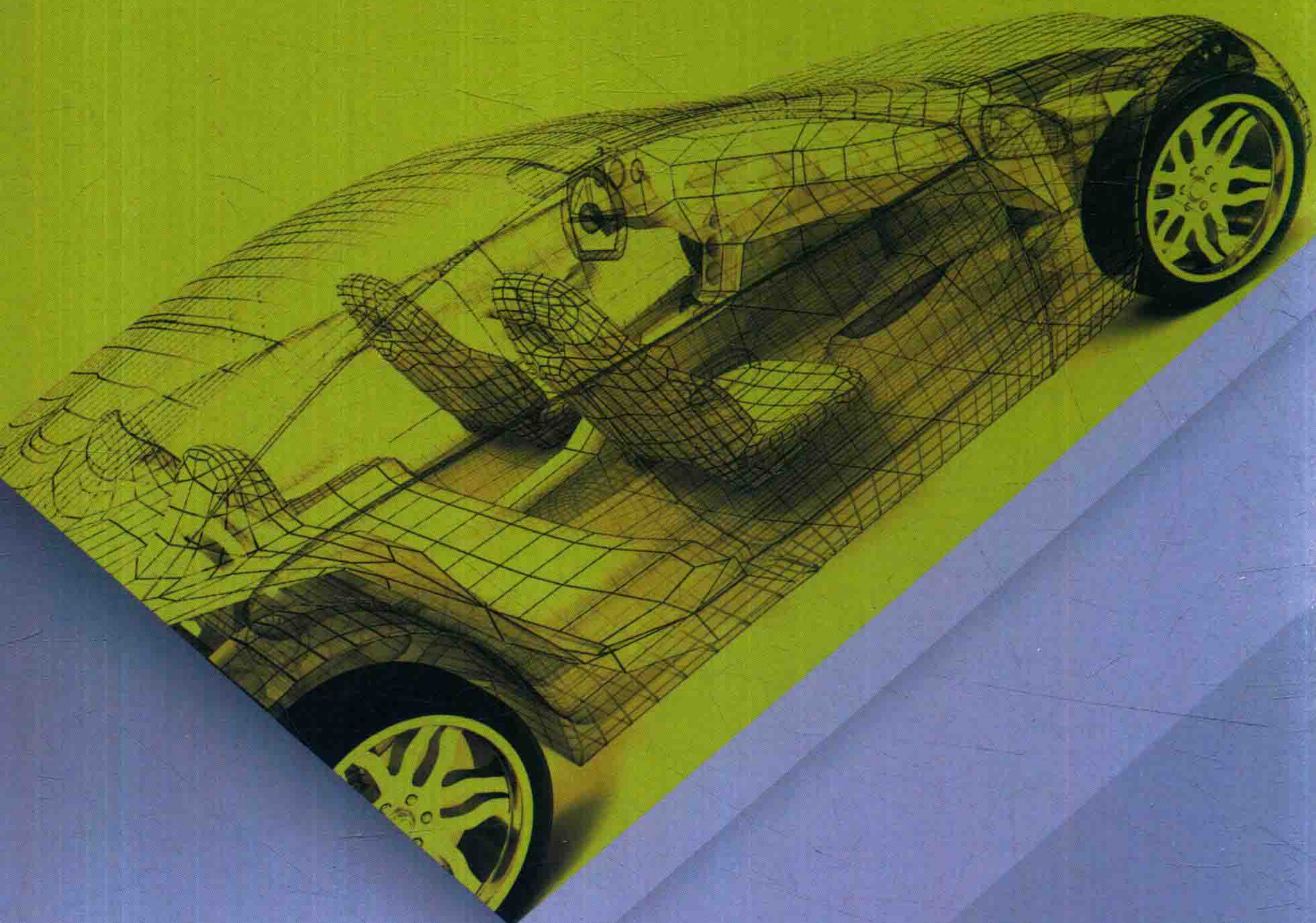


汽车材料及轻量化趋势

韩维建 张瑞杰 郑江 等◎编著
韩维建◎主编



机械工业出版社
China Machine Press

汽车工程专业系列丛书

汽车材料及轻量化趋势

韩维建 张瑞杰 郑江 等◎编著
韩维建◎主编

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车材料及轻量化趋势 / 韩维建等编著; 韩维建主编. —北京: 机械工业出版社, 2017.1

(汽车工程专业系列丛书)

ISBN 978-7-111-55937-5

I. 汽… II. 韩… III. 汽车—工程材料—研究 IV. U465

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 009383 号

汽车材料及轻量化趋势

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 单秋婷

责任校对: 殷虹

印刷: 三河市宏图印务有限公司

版次: 2017 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 170mm × 242mm 1/16

印张: 17.25

书号: ISBN 978-7-111-55937-5

定价: 50.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 68995261 88361066

投稿热线: (010) 88379007

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjg@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

丛书总序

作为《中国制造 2025》战略部署的主要支点之一，汽车业持续、快速、健康的发展将为实现中国制造业强国目标奠定坚实的基础。面对中国汽车产业大而不强的现状，自主品牌汽车产业的发展壮大时不我待。重庆自主品牌汽车协同创新中心，依托国家“2011 计划”，立足于重庆地区汽车产业的资源和优势，以我国自主品牌汽车发展重大需求为牵引，以体制机制创新为手段，探索我国汽车自主品牌的发展模式。中心面向国内自主品牌汽车产业，重点开展培养高端人才，汇聚优秀团队，研发核心技术，推广产业应用，整合优势资源，搭建交流平台等工作。重庆自主品牌汽车协同创新中心瞄准“节能环保、安全可靠、智能舒适”的国际汽车三大发展趋势，凝练学科发展方向，汇聚创新资源和汽车及相关领域的优势学科群，建立了全面涵盖汽车行业研究领域的创新团队。

为了满足汽车领域人才培养的多学科交叉性、行业化、工程化和国际化需求，重庆自主品牌汽车协同创新中心委托中心特别顾问、福特汽车亚太区技术总监韩维建博士作为本套“汽车工程专业系列丛书”的主编，组织多位具有多年国际知名汽车公司研发工作经验的专家和国内一线汽车领域的专家组成编写团队，立足汽车行业现有先进技术，紧跟国际前沿，把握创新特点，遴选汽车领域最新技术成果及发展方向，编写本套丛书。本套丛书的出版将为中国汽车领域高层次人才培养提供支撑。

书籍是知识传播的介质，也是人才培养及创新意识传承的基础。正如重庆大学建校宣言“人类之文野，国家之理乱，悉以人才为其主要之因”所阐释的，本套丛书秉承重庆自主品牌汽车协同创新中心人才培养方针，主要面向高校汽车相

关学科的本科及研究生教学，同时也可为汽车行业工程人员提供参考。相信本套丛书会对我国汽车领域学科及行业产生积极良好的推动作用。

Handwritten signature in black ink, consisting of two characters: '刘' (Liu) and '彦' (Yan).

重庆自主品牌汽车协同创新中心

自序

我国的汽车产业发展迅速，已经成为国民经济的支柱产业之一。随着家庭平均汽车保有量的迅速增长，汽车给整个社会带来的能源、环境、交通和安全的压力日益加大。尽管汽车在轻量化、电动化、排放控制技术和安全技术方面已经有了长足的进步，尤其是近几年互联网和通信技术在汽车的独立驾驶和智能化方向提供了极大的发展和创新的空间，但诸多的发展也给汽车产业带来无限的挑战和机遇。因此，行业的快速变化亟需培养一大批不仅懂专业技术，更熟悉跨界知识的创新型人才。

重庆大学汽车协同创新中心认识到人才培养的迫切需求，组织我们为新成立的汽车学院编写一套教材。参与这套教材编写的所有作者都身在汽车行业的科研和技术开发的第一线，其中大部分作者是近年海归的年轻博士。教材的选题经过专家在传统学科和新兴学科中反复论证和研讨，遴选了汽车行业面临紧迫挑战性的技术和话题。第一批教材有八本，包括《汽车材料及轻量化趋势》《汽车设计的耐久性分析》《汽车动力总成现代技术》《汽车安全的仿真与优化设计》《汽车尾气排放处理技术》《汽车系统控制及其智能化》《中国汽车二氧化碳减排路径》和《汽车制造系统和质量控制》。

这套教材的一个共同特点就是与国际发展同步、内容新颖。编著者对于比较传统的学科，在编写过程中尽可能地把最新的技术和理念包括进去，比如在编写《汽车材料及轻量化趋势》的过程中，不仅介绍了各种轻量化材料的特点和动向，而且强调了轻量化材料的应用必须系统地考虑材料的性能、部件的加工方法和成本。有些选题针对汽车行业发展的新的技术动向，比如《汽车安全的仿真与优化

设计》主要介绍汽车安全仿真的模型验证和优化，这是汽车产品开发采用电子认证的必经之路；而《汽车系统控制及其智能化》概括了汽车的主要系统及其控制，以及智能化技术在各个系统中的应用，这些都是汽车自动驾驶的基础。

这套教材的另一个突出的特点是实用。比如一般汽车设计要求非磨损件的寿命是24万千米。《汽车设计的耐久性分析》着重介绍了汽车行业用于耐久性分析的主要工具和方法，以及这些方法的理论基础。这是进行汽车整车和零部件寿命耐久性正向设计的基础。随着环境保护的法规日益严格，汽车排放控制技术也在不断发展提高。汽车动力技术已经形成从化石燃料到其他燃料的多元化发展，《汽车尾气排放处理技术》和《中国汽车二氧化碳减排路径》介绍了排放控制技术的进程和法规实施的协调，以及达到法规要求的不同技术路线。汽车质量一直是热门话题，也是一个汽车企业长期生存的关键问题之一。《汽车制造系统和质量控制》介绍了现代汽车制造系统与质量控制的基本概念和实践。

本套丛书不仅对汽车专业的学生大有裨益，也可以作为汽车从业人员和所有对汽车技术感兴趣者的参考读物。由于时间有限，选题的范围还不全面。每本书的内容也会反映出作者的知识和经验的局限性。在此，真诚地希望广大读者提出意见，供我们不断修改和完善。



2016年8月5日

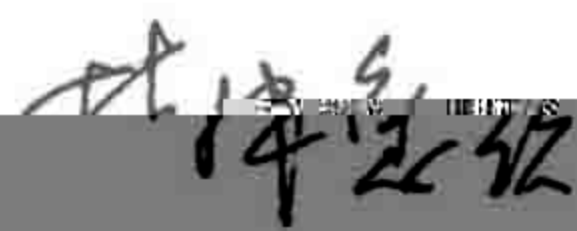
推 荐 序

随着我国汽车工业的快速发展，先进的汽车设计理论和技术在车身开发中越来越受到重视。同时，汽车发展遇到了环保、能源、交通等各个方面的诸多问题，在这种新形势下，从业者掌握和熟练运用核心设计技术显得尤为重要。

汽车的设计与制造是一个非常复杂的系统工程，需要考虑零件、子系统、系统，乃至整车等各个层面，综合运用材料科学、能源科学、信息科学和制造科学的相关知识、理论和方法。本套“汽车工程专业系列丛书”涵盖了汽车制造系统和质量、汽车动力总成、汽车材料及轻量化、车身耐久性、汽车安全仿真与优化、汽车系统控制及其智能化、汽车尾气排放处理与二氧化碳减排等多个方面的内容，涉及汽车轻量化、安全、环保、电子控制等关键技术。

本套丛书的作者既有在汽车相关领域工作多年、有丰富经验的专家，也有学成回国、已崭露头角的后起之秀；丛书内容安排上既有适合初学者学习的大量基础理论知识，也融入了编著者在相关领域多年来的研究体会和经验，从中我们能充分体会到现代汽车技术节能、环保和智能化的发展趋势。丛书结合大量实例，取材丰富、图文并茂。

本套丛书可作为汽车设计的参考工具，也可作为车辆工程、机械工程、环境工程等专业研究生的专门教材及学习参考书。相信该套丛书对于汽车行业相关领域的研究生、企业研发人员和科研工作者会产生重要的启发作用，特作序推荐。



上海交通大学

前 言

作为提高汽车燃油经济性的手段之一，轻量化并不是新鲜的技术名词。从 20 世纪 70 年代以来，汽车轻量化已经有了长足的发展。为了满足各国政府的安全法规、排放法规以及消费者对于个性化和舒适性的要求，各种零部件、子系统被逐步安装到汽车上。这导致在过去 40 年，汽车平均质量实际上在缓慢上升。近几年世界各地燃油经济性法规不断加严的趋势，使汽车公司和零部件供应商进一步大力开展汽车轻量化研究，各种新材料、新技术层出不穷。应该注意的是，汽车轻量化不只是单纯的减重，必须同时考虑性能、工艺、成本等因素。单一材料很难同时满足各种汽车零部件的不同要求。因此，汽车轻量化的发展趋势是多种材料的混合使用。为了确保在恰当的部位使用最合适的材料，工程人员有必要了解各种轻量化材料、加工工艺、相关的连接技术以及优化技术。

基于新颖、实用、系统的理念，本书第 1 章回顾了汽车用材料的组成与演变，以及汽车轻量化发展趋势，强调要系统地研发和推进轻量化。第 2~6 章覆盖了常用轻量化材料在汽车中的应用，包括高强钢、铝合金、镁合金、塑料和复合材料。由于这些材料必须连接在一起，因此各种连接技术是保证汽车结构整体性的关键。第 7 章介绍了多种用于汽车轻量化设计的连接技术。第 8 章讨论了优化设计技术在汽车轻量化中的应用。

参与本书编写的是一个比较“新”的博士团队，这一团队在汽车材料和轻量化方面累积了丰富的经验。除了韩维建、张瑞杰、郑江以外，参加编写的还有黄诗尧、马秋、包祖国、石燕栋和石磊。每个人都尽力把自己对轻量化的理解和经验反映在本书的内容里面。将汽车轻量化的一些基础知识介绍给高校相关专业的

学生和从事汽车轻量化工作的工程师，以及所有对汽车轻量化感兴趣的人。由于时间仓促和作者们的阅历局限，本书的不足之处在所难免，欢迎读者提出批评和修改意见。

韩维建

目 录

丛书总序

自序

推荐序

前言

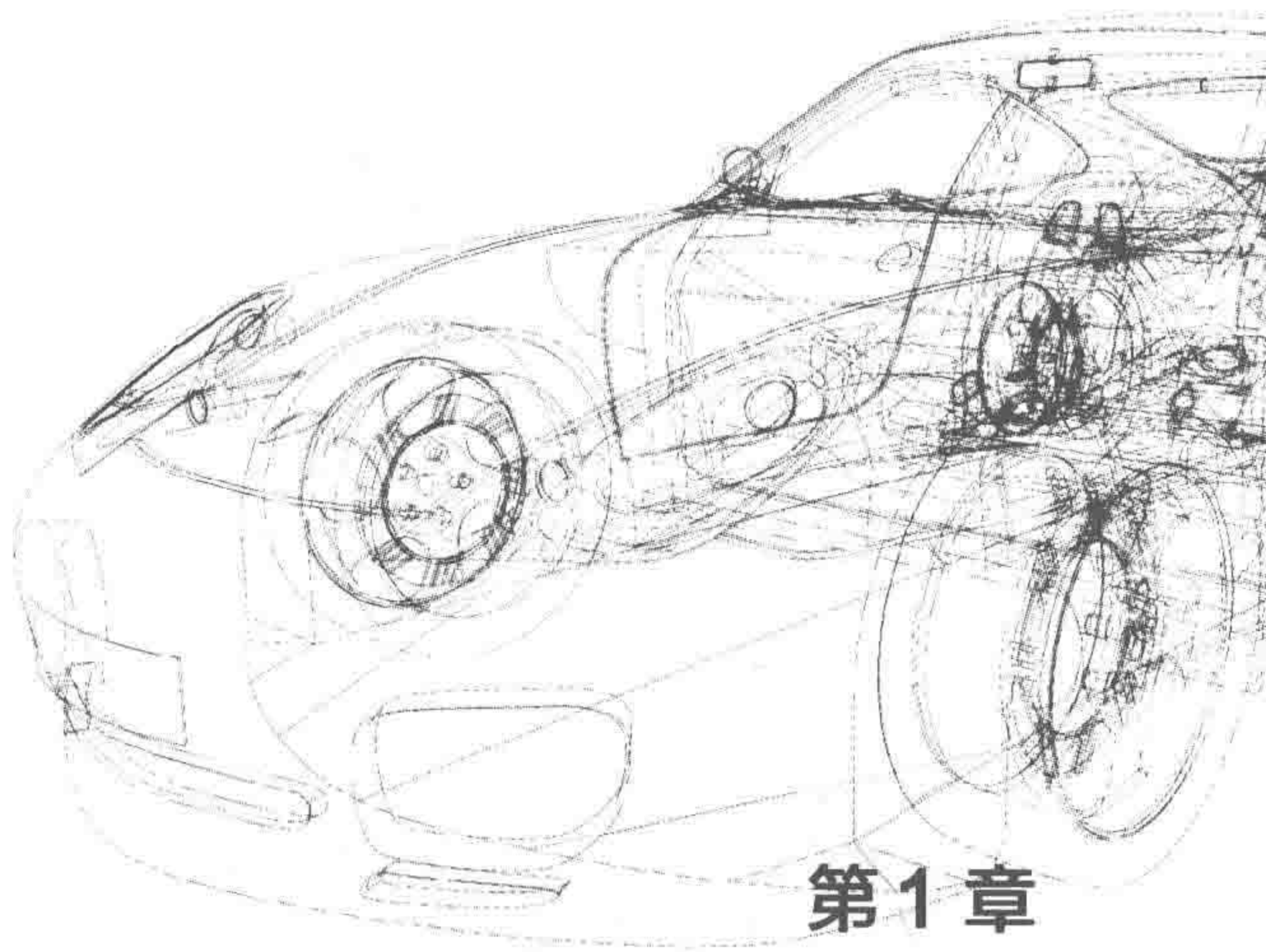
第1章 绪论	1
1.1 汽车材料的发展历程	1
1.2 汽车轻量化的驱动力及影响因素	5
1.2.1 石油危机和油价	5
1.2.2 燃油经济性法规	7
1.3 汽车轻量化趋势	10
1.3.1 轻量化材料	10
1.3.2 汽车轻量化系统工程	12
参考文献	14
第2章 先进高强钢在汽车上的应用	17
2.1 概述	17
2.2 先进高强钢的发展	20
2.3 发展先进高强钢的驱动力	25
2.3.1 成本	26

2.3.2	安全	26
2.3.3	温室气体排放	27
2.3.4	力学性能	27
2.4	先进高强钢	29
2.4.1	双相钢	32
2.4.2	复相钢	40
2.4.3	TRIP 钢	44
2.4.4	马氏体钢	50
2.4.5	TWIP 钢	55
2.4.6	奥氏体不锈钢	62
2.5	先进高强钢的应用	66
2.5.1	先进加工工艺	66
2.5.2	先进高强钢面临的挑战	74
2.6	发展趋势	79
2.6.1	第三代先进高强钢	79
2.6.2	组织设计	80
2.6.3	新工艺	83
	参考文献	88
第3章 铝合金在汽车中的应用		92
3.1	引言与概况	92
3.2	铝合金的命名系统	97
3.3	铝合金在汽车中的应用情况	101
3.3.1	按照应用部位分类	101
3.3.2	按照加工类型分类	104
3.4	铝合金应用后的轻量化效果	108
3.5	铝合金在汽车应用中的前景展望	111
	参考文献	112

第4章 镁合金在汽车中的应用	115
4.1 引言	115
4.1.1 镁合金概述	115
4.1.2 镁合金对汽车轻量化的意义	118
4.2 镁合金在汽车工业中的应用	118
4.2.1 应用历史	118
4.2.2 应用介绍	120
4.3 镁合金在汽车应用上的局限性	124
4.4 汽车用镁合金的发展趋势	126
参考文献	127
第5章 塑料	131
5.1 车用塑料材料发展概述	131
5.1.1 塑料材料的制备	132
5.1.2 塑料的分类	134
5.1.3 塑料的特性及应用	143
5.1.4 塑料成型工艺	153
5.2 塑料材料在汽车轻量化上应用的典型案例	156
5.2.1 材料研究	156
5.2.2 结构设计	158
5.2.3 制造可行性分析	161
5.3 汽车用塑料发展趋势	164
参考文献	166
第6章 复合材料	170
6.1 复合材料在汽车中的应用	170
6.1.1 复合材料的种类及特点	170
6.1.2 复合材料在汽车中应用的历史和现状	173
6.2 汽车用复合材料的主要种类	175

6.2.1	热固性树脂基复合材料	175
6.2.2	热塑性树脂基复合材料	183
6.2.3	金属基复合材料	188
6.2.4	其他复合材料	194
6.3	汽车用复合材料面临的挑战及未来的发展方向	197
6.3.1	汽车用复合材料面临的挑战	197
6.3.2	汽车用复合材料未来的发展方向	203
	参考文献	204
第7章 现代车身连接技术		206
7.1	概述	206
7.2	熔化焊接	207
7.2.1	电阻点焊	207
7.2.2	激光焊接	212
7.2.3	气体保护焊	216
7.3	固相连接	218
7.4	机械连接	221
7.4.1	自穿刺铆接	221
7.4.2	无铆钉铆接	223
7.4.3	自攻螺纹连接	226
7.5	结构胶粘接	228
7.6	金属/非金属材料连接方法简介	230
7.7	小结	233
	参考文献	235
第8章 轻量化优化设计技术		237
8.1	概述	237
8.1.1	优化设计技术	237
8.1.2	轻量化优化设计分类	238

8.2 结构拓扑优化	238
8.2.1 结构优化分类	238
8.2.2 结构拓扑优化原理	239
8.2.3 轻量化拓扑优化应用案例	241
8.3 汽车用材优化	243
8.3.1 汽车用材背景	243
8.3.2 汽车用材趋势	244
8.3.3 汽车用材与性能间的关系	245
8.4 工艺设计优化	249
8.4.1 轻量化工艺设计概述	249
8.4.2 典型轻量化工艺	250
8.4.3 轻量化工艺优化应用案例	254
8.5 小结	261
参考文献	261



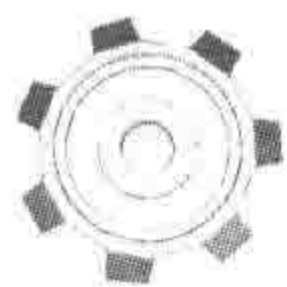
第1章

绪论

1.1 汽车材料的发展历程

汽车自诞生 100 多年以来，其设计、制造工艺得到了巨大的发展。随着新材料开发、制造及加工水平的不断提高，现代汽车材料与 100 年前相比发生了巨大的变化。

早期的汽车是从马车演变来的。20 世纪初期基于马车的制造经验，最初的车身是简单的木制“箱形”结构。随着金属制备技术的发展，金属在汽车上的用量逐渐增加。福特 T 型车（Model T，见图 1-1）是汽车历史上非常著名同时也是获得了巨大成功的一款汽车。在亨利·福特改进了汽车生产工艺之后，T 型车的生产、组装时间由 12.5h 降到了 93min，当时市面上 50% 的汽车由福特汽车公司生产。^[1,2]表 1-1 及图 1-2 是 1915 年款福特 T 型车所用材料及其用量。由表 1-1 可见，该车整备质量仅为 545kg，远远低于现代汽车的平均质量。其中，铸铁和钢材是最主要的材料，其用量接近 60%；木材的用量约为 76.3kg，用于轮毂及某些骨架结构（如座椅



骨架)等,其虽用量远不及钢铁,但大大超过了其他材料;铝合金在1915年款T型车上也得到了应用,主要用于车顶篷、变速器盖等部位,然而1916年款T型车顶篷又改用了钢材,铝合金的应用在当时较为有限。^[3]

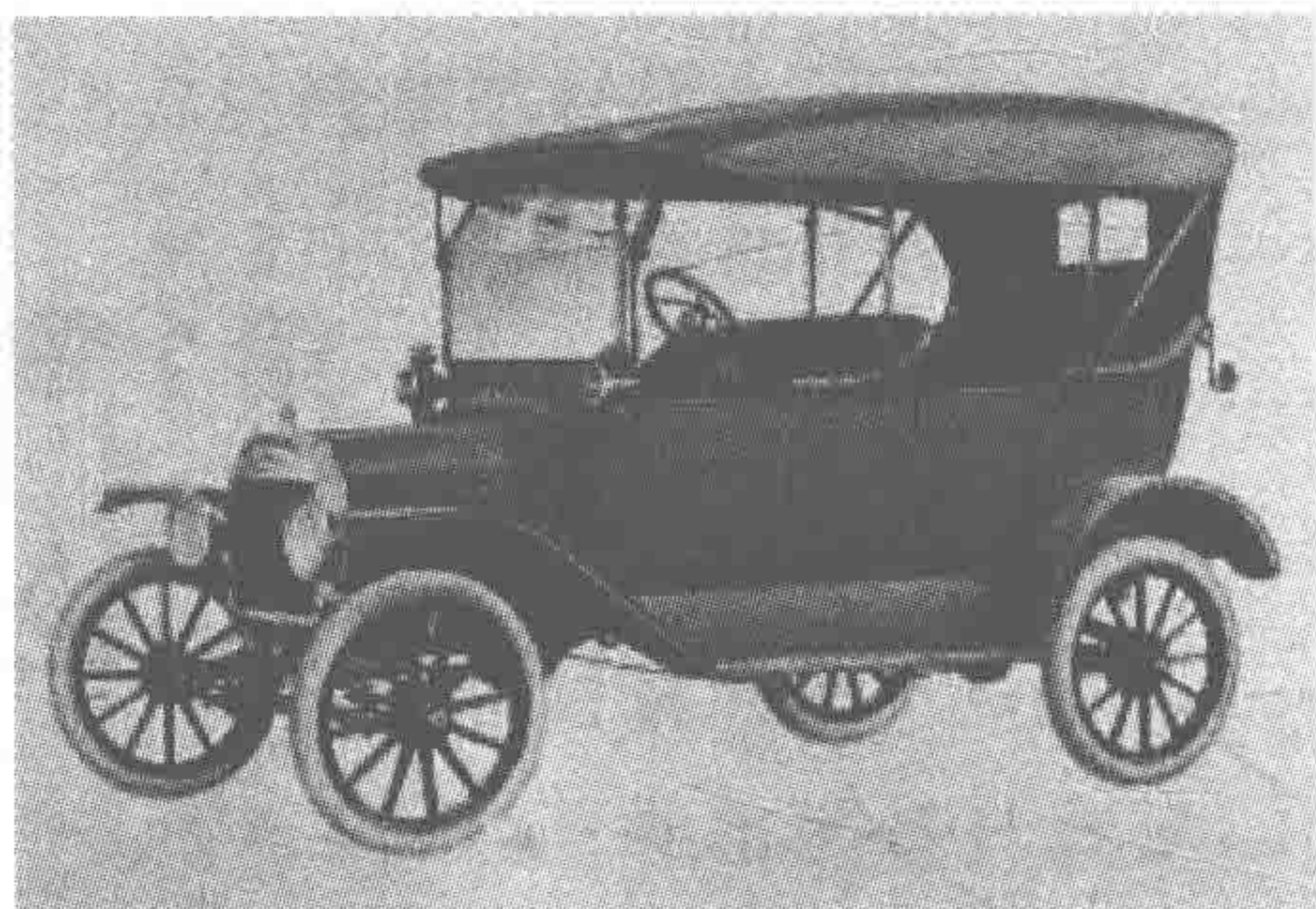


图 1-1 福特 T 型车

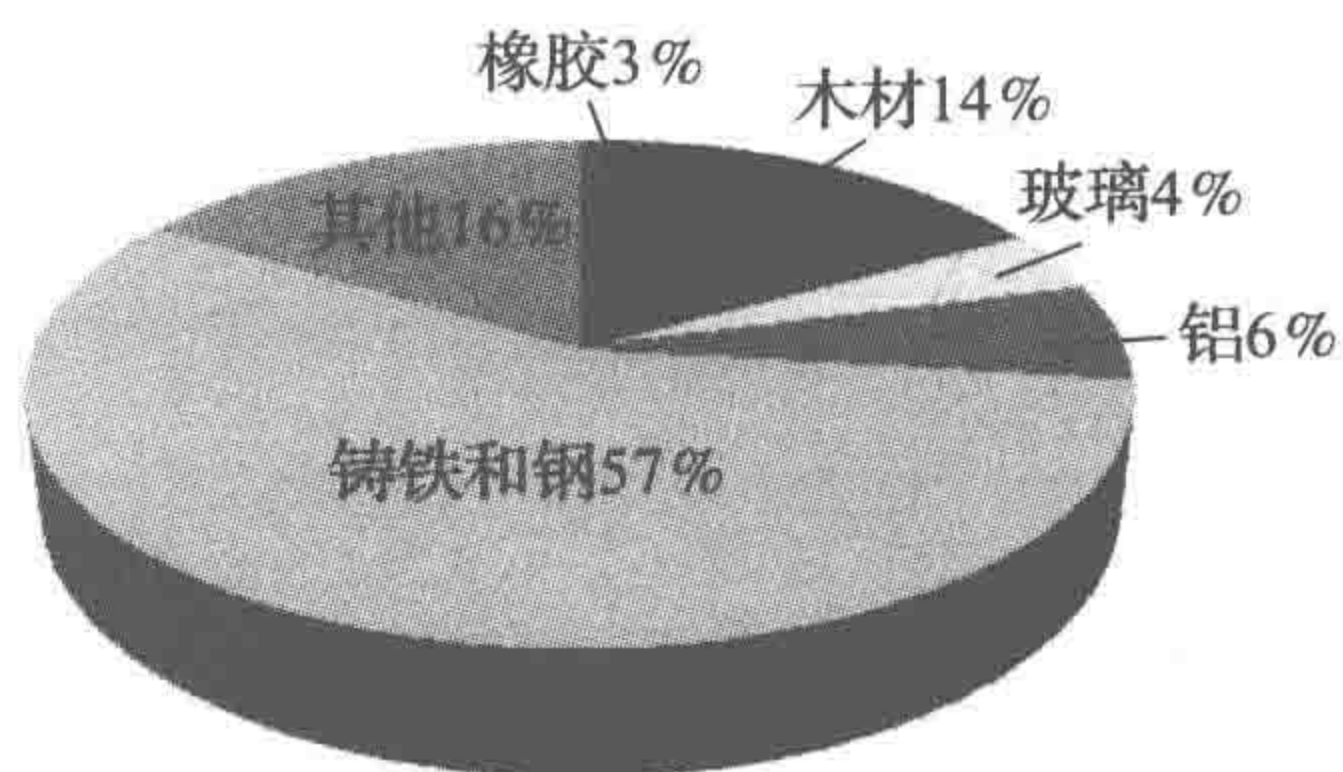


图 1-2 1915 年款 T 型车所用材料及其用量

表 1-1 1915 年款福特 T 型车所用材料及其用量

材料	质量/kg	比例 (%)
橡胶	16.35	3
木材	76.30	14
玻璃	21.80	4
铝	32.70	6
铸铁和钢	310.65	57
其他	87.20	16
总计	545.00	100

随着汽车制造技术的不断发展,特别是第二次世界大战以后,用户对舒适性需求的提高和汽车安全法规的不断完善,使得20世纪中后期汽车质量与汽车诞生初期相比大大增加。到了1975年,乘用车平均整备质量达到了1700kg以上,约为1915年款福特T型车的3倍。经过几十年的发展,更多的新材料被开发、应用到汽车制造中,表1-2所列为1975年汽车制造中用到的材料及其平均用量。^[3]由表1-2可见,钢铁仍然是最主要的汽车材料,其总用量占汽车总质量的比例甚至比T型车还要高;而作为T型车主要材料之一的木材,因其易燃性较高,在20世纪70年代的汽车中已经消失不见;很多密度小的材料在汽车上得到了应用,如塑料、橡胶等。