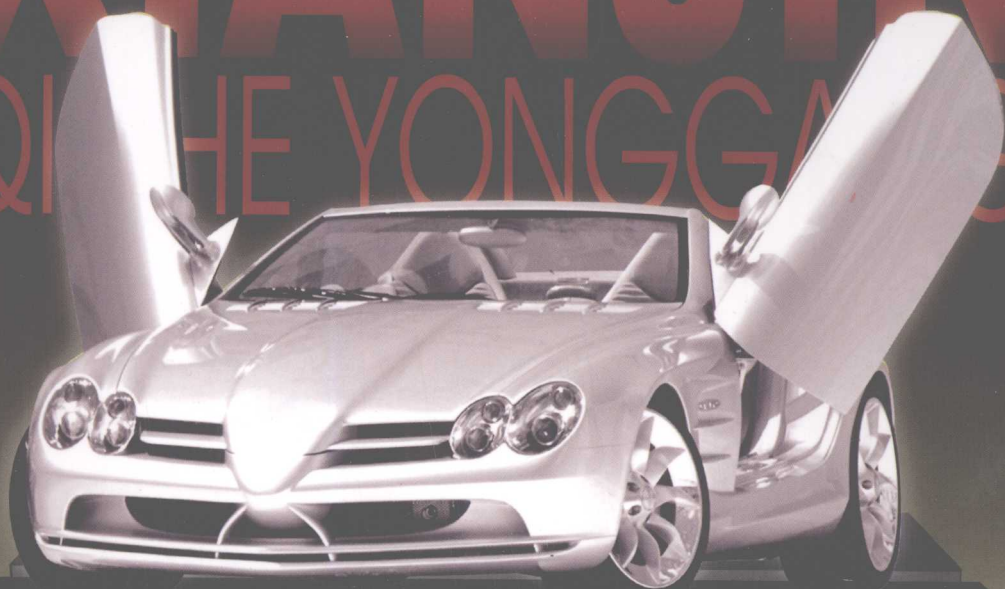


XIANJIN
QI HE YONGGA



先进汽车用钢

马鸣图 主编



化学工业出版社

XIANJIN QICHE YONGGANG



马鸣图 主编

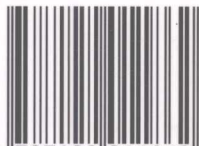
先进汽车用钢



www.cip.com.cn
读科技图书 上化工社网

销售分类建议：冶金

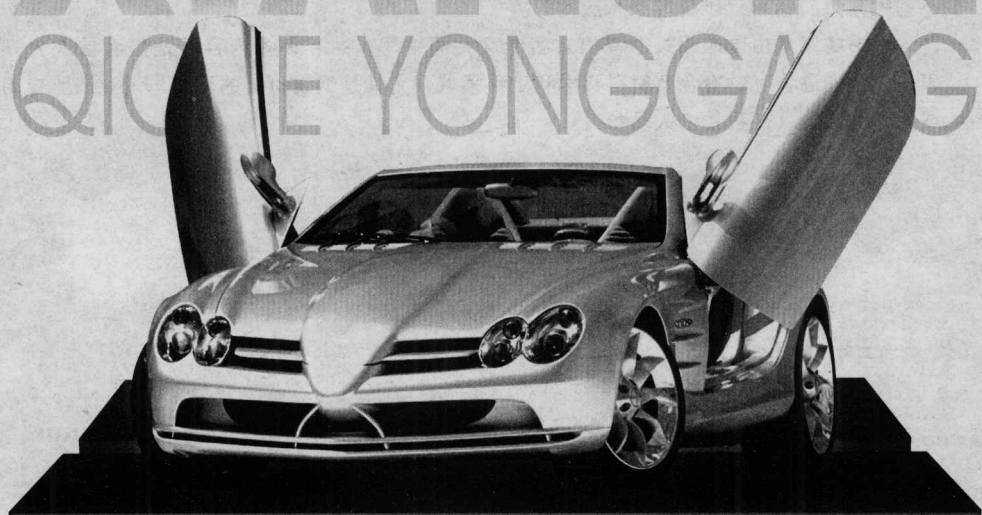
ISBN 978-7-122-01186-2



9 787122 011862 >

定价：68.00元

XIANJIN
QICHE YONGGANG



先进汽车用钢

马鸣图 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

元 00.80 位 5

本书全面介绍了汽车用钢的生产技术及研究进展。第1~7章分别介绍了汽车工业发展和先进汽车用钢的密切关系,汽车中各类薄板、镀层板、高强度钢板和先进高强度钢板、CSP线上生产细晶粒高强度热轧板的工艺原理,汽车板生产的计算机控制和性能预报,以及高强度钢板成形的计算机模拟和回弹补偿;第8~14章为汽车用合金钢,包括汽车用弹簧钢和强韧性,汽车用齿轮钢、非调质钢和晶内非调质钢,铆螺钢和非调质铆螺钢以及汽车用不锈钢与阀门钢新近研究成果和应用等。

本书各章是由国内相关领域的知名专家共同编写,并且许多内容都是作者首次公开发表,技术先进,可供冶金及材料科学和工程领域,尤其是钢铁材料的研发与汽车工业应用领域的研究人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进汽车用钢/马鸣图主编. —北京:化学工业出版社, 2007. 10
ISBN 978-7-122-01186-2

I. 先… II. 马… III. 汽车-工程材料-钢板-研究
IV. U465.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 145616 号

责任编辑:丁尚林
责任校对:凌亚男

文字编辑:陈 喆
装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京云浩印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张36 $\frac{3}{4}$ 字数737千字 2008年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

《材料科学与工程研究进展》编委会

主任委员：

徐祖耀 涂铭旌

副主任委员：

马鸣图 何家雯 敖炳秋 潘复生 谢锡善 沙 维

委 员：

马鸣图 何家雯 沙 维 许洛萍 刘石虹

陈一龙 陈铁群 陆匠心 张开坚 吴人洁

苏世怀 杨 武 俞亚鹏 柏建仁 徐祖耀

涂铭旌 敖炳秋 梁开明 陶春虎 谢锡善

程克猷 程世长 路贵民 韩恩厚 潘复生

潘 峰 蔡 荀 蔡鑫鳌

序

近年来,我国汽车工业快速发展,已进入世界产销大国的行列;钢铁是汽车工业的基本结构材料,其用量占汽车自重的60%~80%;高强度钢和超高强度钢的发展和应⤿用为汽车的轻量化、节能和减排提供了重要通道,合金结构钢的发展为提高汽车动力、传动和悬架系统的可靠性,奠定了良好的基础,不锈钢和阀门钢性能的改进为汽车特殊构件提供了新的材料;涂层板的发展为汽车车身使用寿命的提高和美观给予了保证。目前,我国钢铁材料还不能完全满足汽车工业快速发展的需要,和国外相比尚有差距,基于这种情况,马鸣图教授组织编写了本书。全书共14章,涉及各类汽车用钢的新近研究成果。书中首先论述了汽车工业发展所形成的汽车文明与该文明对人类社会所产生的深远影响,和由此而带来的三大社会问题:能耗、排放和安全,并揭示了这三大问题与汽车轻量化的关系,以及轻量化和先进汽车用钢的密切关系,在探讨各类先进汽车用钢的物理冶金和力学冶金(组织性能关系)的同时,以汽车性能的要求为依据,突出了各钢类的应用研究成果和使用性能特点,使得本书各章内容更具参考价值 and 实际意义。相信本书将使有关读者受益,有利于促进我国钢铁企业生产的汽车用钢的性能改进和汽车工业的发展。在本书即将出版之际,对促进此书出版的作者、主编及出版社编辑表示敬意,并致庆贺。

徐和光

2007年7月30日

前 言

近年来,中国汽车工业有了长足的进步,产量和品种都在迅速增长,统计数据表明,自2001年以来,中国汽车工业都以两位数的速度增长。2006年产销总量已达728万辆,且轿车已达到500多万辆,汽车产量仅次于美国和日本,居世界第三,而新车销售已达720万辆,居世界第二,汽车工业已成为我国的支柱产业。2006年世界汽车年产已超过6000万辆,汽车工业的发展,需要消耗大量的材料,按美国2001年的轿车用材的比例,钢铁材料仍占60%以上,是汽车工业发展的基础,为适应汽车工业的发展,钢铁材料的冶金技术、产量和品种也都在迅速发展,产品性能有很大的提高;同时钢铁材料仍是高性价比的材料,也是保证汽车安全性的材料;全面系统地介绍汽车用钢的最新技术进步,对提高我国的汽车用材水平,尤其是汽车用钢的应用水平,保证汽车工业对汽车用钢的合理选用和汽车性价比的提高,以及汽车用钢的发展都具有重要意义。这正是组织编写本书的初衷和目的。

本书主要内容是由长期从事汽车用钢开发和应用研究多年的专家共同编写而成。目的在于介绍汽车用钢和相关的物理和力学冶金原理的最新进展,突出汽车用钢的使用性能研究成果;有不少是作者和国外进行学术交流的最新资料和部分尚未完全公开发表的研究成果,并突出论述汽车和钢铁两个行业之间的相互关系。

本书第1章为汽车工业发展和先进汽车用钢,简述了从汽车的诞生到汽车工业的发展,从汽车作为一种代步工具到汽车工业如何影响和成为一个国家和地区的经济基本决定因素,从汽车工业作为一个地区或国家的支柱产业到成为一个国家现代化的标志,从汽车工业的各项法规到现代汽车文明,从汽车产量和保有量的增加所带来的三大问题(油耗、安全和排放)到汽车各种先进科学技术的应用,从汽车轻量化和安全技术的发展到先进汽车用合金结构钢、高强度和先进高强度钢的应用,给读者对汽车工业发展一个整体认识,从而使汽车工业发展必须和先进汽车用钢的发展紧密而自然地联系在一起。

第2章论述汽车用高强度钢和先进高强度钢,从汽车工业的发展、汽车车身钢板的作用和特点以及车身的设计要求谈起,论述了汽车钢板的发展,对近年来发展的高强度钢、高成形性钢、IF钢、高强度IF钢、烘烤硬化钢、双相钢、复相钢、相变诱发塑性钢的物理和力学冶金原理和特点以及新近研究进展进行了系统论述;基于汽车零部件的变形模式的分析,介绍了高强度钢和先进高强度钢的工艺性能和使用性能以及各类高强度钢的激光拼焊和液压成形工艺,列举了各类高强度钢在典型

构件上应用的例子和在轻量化并保证汽车安全性中的重要作用。汽车的使用寿命和车身板的抗蚀性关系密切，目前已对汽车防腐性能提出了极为严格的要求，即防腐能力与汽车同寿命，因此镀层板将会大量应用。第3章介绍镀层板的防腐性能、成形性和点焊性及疲劳性能，并介绍了镀层板新近发展趋势——合金镀层板+有机薄膜涂层以及应用前景。

第4章基于CSP线生产的热轧大梁板表面冷弯时微裂纹的成因分析和热模拟组织分析与计算机对轧制过程的模拟，提出了CSP线上生产高强度高成形性细晶粒热轧大梁板的新工艺——深过冷轧制技术，这一工艺技术避免了表面混晶和由混晶引起的变形不均和表层微裂纹的产生，所生产的各类大梁板材具有良好的成形性，低的屈强比，可以成功冲压成重型商用车的形状复杂的发动机横梁；本章介绍了这一工艺的原理和在两个钢厂应用的情况，并对良好的成形性进行了论述。

在新一代钢铁材料重大基础研究的973项目中，细化晶粒的基本原理是形变诱导铁素体相变，将这一原理用于细晶粒热轧汽车板的生产上则是第5章介绍的内容。

计算机技术的发展，使得通过控轧控冷过程、模拟和控制组织转变，从而控制钢材的性能成为可能，这一技术的应用，不仅可以准确地控制工艺过程，从而预测和控制钢材的组织 and 性能，而且为对钢材性能进行预报和据不同的合金成分波动，设计合理的控轧控冷参量和工艺提供了有力手段；第6章所论述的就是关于这一专题的内容；由于轧制过程中的温度场和控冷过程的热传导过程的复杂性，再加上准确得到各种物理和力学数据的困难性，对钢材的轧制过程和性能预报的准确性还有待于提高，但本章的论述，对于该领域的发展无疑将提供一个重要的参考和促进。

高强度钢在汽车工业中的应用所遇到的一个难题，就是成形；强度的升高，必然会发生成形困难并且在成形后可能发生开裂和回弹；用计算机进行成形分析，将对成形过程的变形路径进行优化，以保证成形而避免开裂，对回弹进行模拟分析，回弹预测，进而进行回弹补偿，将可以大大提高和改善高强度钢的成形性，大大节约模具调试时间和修模工作量。第7章对这方面的进展进行了较详细的论述，同时也列举了解决高强度钢零件回弹和开裂的经验和例子，这些无疑会促进高强度钢的应用，并提供成形分析模拟和成形零件性能预测的有力手段和方法。

齿轮是汽车中的重要传动构件，其寿命和汽车的安全运行及可靠性关系密切，而齿轮工作的可靠性主要由齿轮钢性能和工艺所决定；第8章基于汽车齿轮的重要性、失效模式和影响因素的论述，提出了对齿轮钢的性能要求，进而分析各国齿轮的标准，对比了典型汽车厂家对齿轮钢的要求和各国齿轮用钢的特点，以及齿轮钢工艺性能的近期实验结果；从齿轮钢的合金化和冶金、轧制技术的进展，论述了提高齿轮钢质量的方法和技术，这些对于我国齿轮的发展和品质改进无疑具有实用意义和参考价值。

弹簧是汽车上的重要减振件和易损件，它的工作可靠性直接和汽车的安全使用

和舒适性密切相关，并影响到汽车构件的使用寿命，弹簧钢的主要失效模式是疲劳断裂和弹性松弛，第9章首先介绍弹性松弛的基本概念，讨论不同作者提出的松弛抗力测试方法，进一步论述 Baushinger 效应和弹性松弛抗力的物理本质和二者的异同，由此提出了弹簧钢松弛抗力的测试方法，以及相间应力和松弛抗力参量和显微组织的关系，由此给中、低碳高强韧性弹簧钢的开发提供依据；文中又从强韧性和显微组织的关系的一系列实验结果，提出了提高弹簧钢强韧性的方法——增加了淬火组织中的板条马氏体量，进一步论述了降低原中高碳弹簧钢碳含量的合理性，文中许多内容是作者近年来的研究成果，并展示了许多难得的 TEM 照片，一些内容是首次在本章发表，对于新弹簧钢的开发无疑有重要参考价值，提出了新的思路。

微合金非调质钢具有省钱、减少热处理工序等优点，且有利于提高零件的质量，减少变形，避免热处理产生淬火裂纹；自 20 世纪 80 年代，德国蒂森公司开发这类钢以来，近年来已有广泛应用，其中广泛应用的铁素体-珠光体非调质钢的典型牌号 49MnVS3 就是其中一个。如何提高其强韧性，弄清其强化原理至关重要。第10章汽车用非调质钢的新近发展，首先就介绍铁素体-珠光体类非调质钢的组织性能关系，列举了大量的强度性能和合金成分、组织组成之间的关系，进而以固溶度积方程为依据，论述微合金化元素在非调质钢中的作用，从晶内非调质钢的金相组织，结晶学和晶内铁素体的形成过程介绍了不同类型的晶内铁素体非调质钢的组织细化和强韧性的提高，并列举了铁素体-珠光体型非调质钢的典型应用——各类曲轴和涨断连杆；文中还介绍了一些高强韧性非调质钢——贝氏体型非调质钢、马氏体型非调质钢以及高强度非调质钢板，这些对认识非调质钢的强化原理、性能改进、拓展应用都有重要参考价值。

螺钉或紧固件和弹簧、齿轮并称为机械工业的基础件，任何机械都是这三种零件的不同组合。长期以来，中等强度级别的标准件都是采用中碳钢或中碳合金结构钢通过热处理来保证其相应的强度级别的；为了保证其优良的冷镦性能，冷拔后还应经过球化退火，而这一工艺又是费时费工的；第11章介绍的汽车紧固件用钢的研究和发展方向，不仅介绍了传统用钢和工艺的改进：在线球化，在保证性能的基础上如何通过降碳，用低碳马氏体钢代替中碳调质钢，从而改善冷镦性能，提高成品率等钢种和工艺研究进展，并介绍了非调质钢紧固件方面的研究进展和应用前景；这类钢利用 Baushinger 效应，改善了冷拔后的冷镦性能，同时由于高的表面压应力，还改进了成品标准件的疲劳性能；相信不久的将来，将会在汽车上推广应用。

冶炼和轧制技术是改善汽车用特殊钢性能的基本保证，第12章作者结合在兴澄钢厂工作多年的经验和产品开发多年的亲身体会，概述了特钢冶金和轧制技术的进展，书中的一些内容对完善特钢炼、轧工艺具有重要的实用价值。

随着汽车工业的发展，汽车档次的提升，不锈钢在汽车中的用量将会越来越

多,如一些轿车的排气管和消声器,既要求不锈又耐热耐蚀,和耐热铸铁相比,不锈钢还可以大大减轻排气管的重量,实现轻量化,同时提高使用寿命。在许多内、外装饰件上不锈钢也有广泛应用,第13章则较详细介绍了汽车用不锈钢的应用和新近发展,并突出介绍了含Nb不锈钢的发展和应用,对于推广不锈钢的应用和提高汽车使用寿命,都具有特殊的意义和参考价值。

第14章系统介绍了阀门钢和合金,文中不仅介绍了阀门钢和合金的新近进展,还较详细介绍了作者近年来的含铌气阀钢的研究成果,这种气阀钢在汽车中的推广应用无疑会对阀门的寿命延长、改善阀门的工艺性能和失效方式都有重要意义;这一钢种已通过1200h的发动机台架试验,效果令人满意。

本书基本包括了汽车用钢的主要品种和类型,其中第1~7章为汽车车身用各类板材,第8~12章为汽车用合金结构钢,第13、14章为汽车用不锈钢和阀门钢,三大部分各章节互有联系,又自成体系,可独立阅读。

全书采用物理和力学冶金的原理,阐明相应的钢种性能,突出最新成果和进展,并强调了各类钢材的使用性能。长期以来,我们对材料科学和工程领域中的4个要素——材料性能、结构和成分、合成与加工及使用性能之间的关系认识不足,不了解科学与工程的作用以及它们之间的协同关系,只重视材料结构成分和性质,而忽视了对合成加工,尤其是使用性能的研究,这就导致了只重视材料的开发,而忽视了其应用研究,以致产生所谓多种“新材料”而束之高阁的局面。本书中许多地方突出了材料使用性能的研究成果,整体上也突出了材料科学和工程中的四大要素的关系,以期在今后的汽车材料研究中正确认识这四大要素的内涵,突出使用性能研究。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

马鸣图

本书章名和作者一览表

章 号	章 名	作者及单位
第 1 章	汽车工业发展和先进的汽车用钢	马鸣图 重庆汽车研究所
第 2 章	汽车用高强度钢板和先进高强度钢板	马鸣图*、应白桦** 重庆汽车研究所* 上海宝钢技术中心**
第 3 章	汽车涂镀层板的现状和研究进展	马鸣图 重庆汽车研究所
第 4 章	高强度高成形性细晶粒汽车大梁钢板及其应用 ——兼谈深冲冷轧制工艺和在 CSP 线上的应用	马鸣图 李志刚 重庆汽车研究所
第 5 章	形变诱导铁素体相变研究与在超细晶热轧汽车钢 板上的生产应用	孔新军* 翁宇庆** 雍歧龙* 北京钢铁 研究总院* 北京中国金属学会**
第 6 章	先进汽车用钢的控轧和计算机模拟	刘正东 北京钢铁研究总院
第 7 章	高强度钢板成形及其仿真分析	刘克素* 马鸣图** 美国 ETA 公司* 重庆汽车研究所**
第 8 章	汽车用齿轮钢	惠荣* 曹红福* 马鸣图** 兴澄钢铁公 司* 重庆汽车研究所**
第 9 章	汽车用弹簧钢	马鸣图 重庆汽车研究所
第 10 章	汽车应用微合金非调质钢的新近发展	马鸣图 重庆汽车研究所
第 11 章	汽车紧固件及其用钢的研究及发展动向	苏世怀* 于同仁* 惠卫军** 马钢公 司* 钢铁研究总院**
第 12 章	汽车用合金结构钢先进的冶金及轧制技术	惠荣 曹红福 兴澄钢铁公司
第 13 章	汽车用不锈钢	孟繁茂 北京中信金属公司
第 14 章	气阀钢和气阀合金	程世长 北京钢铁研究总院

目 录

第 1 章 汽车工业发展和先进的汽车用钢	001
1.1 概述	001
1.2 世界汽车工业发展	002
1.3 中国汽车工业发展	004
1.4 汽车工业发展和先进汽车用钢	009
1.4.1 汽车工业发展和汽车轻量化	010
1.4.2 汽车轻量化和先进汽车用钢	011
1.5 综述	016
参考文献	017
第 2 章 汽车用高强度钢板和先进高强度钢板	018
2.1 概述	018
2.2 汽车车身用板材及其对钢板的性能要求	026
2.3 现代车身设计功能和汽车板的发展	028
2.4 普通高强度钢	031
2.4.1 超深冲 IF 钢和高强度 IF 钢	031
2.4.2 高强度 IF 钢	035
2.4.3 冷轧各向同性钢	037
2.4.4 烘烤硬化钢	040
2.4.5 冷轧高强度含 P 钢	048
2.4.6 高强度低合金钢	050
2.5 先进高强度钢	052
2.5.1 先进高强度钢的生产与发展	052
2.5.2 双相钢	055
2.5.3 TRIP 钢	057
2.5.4 TWIP 钢	062
2.5.5 马氏体钢和部分马氏体钢	063
2.6 高强度钢和先进高强度钢的性能	063
2.6.1 先进高强度钢的优点和力学性能	063

2.6.2	先进高强度钢的成形性	064
2.6.3	先进高强度钢的延展弯曲成形性	068
2.6.4	高强度钢和先进高强度钢的胀孔性能	071
2.6.5	先进高强度钢的疲劳性能	074
2.6.6	高强度钢和先进高强度钢的应变速率敏感性	078
2.7	高强度钢和先进高强度钢成形构件的性能	085
2.7.1	应变硬化和烘烤硬化性能	085
2.7.2	压痕抗力或抗凹陷性	087
2.7.3	回弹	091
2.7.4	压溃吸能和撞击性能	092
2.8	高强度钢和先进高强度钢的生产	094
2.9	汽车板材的先进深加工技术	103
2.9.1	激光拼焊板	103
2.9.2	板材液压成形	109
2.9.3	减振板的开发及应用	115
2.10	高强度钢和先进高强度钢在汽车工业中的应用	120
2.11	综述	129
	参考文献	130
第3章	汽车涂镀层板的现状和研究进展	136
3.1	概述	136
3.2	汽车工业对涂层板的质量要求	137
3.2.1	镀层与基体的结合力	137
3.2.2	涂层板的成形性	140
3.2.3	涂层板的耐蚀性	151
3.2.4	涂层板的点焊性能	153
3.2.5	涂层板的疲劳性能	158
3.2.6	涂层板的表面处理特性和油漆性能	165
3.3	涂层板的生产工艺过程	168
3.4	涂层板在汽车生产中的应用	170
3.5	不同镀层板的性能评价和未来的发展趋势	172
3.6	综述	173
	参考文献	174
第4章	高强度高成形性细晶粒汽车大梁钢板及其应用	176
	——兼谈深过冷轧制工艺和在 CSP 线上的应用	
4.1	概述	176

4.2	新一代钢铁材料和组织细化	178
4.3	晶粒细化强化与汽车用钢	178
4.4	在 CSP 线上应用形变诱导铁素体相变生产高强度高成形性汽车板的 初步试验	181
4.5	CSP 线细晶粒热轧板的冷弯微裂和成因分析	184
4.6	CSP 线高强度细晶粒热轧板的混晶和变形拉长晶粒的成因	185
4.6.1	板材轧制过程的有限元模拟	185
4.6.2	变形前的冷速、过冷度和变形温度对低碳钢组织形态影响的 热模拟试验	190
4.7	深过冷轧制在高成形性细晶粒 510MPa 级热轧汽车大梁板生产中 的应用	195
4.7.1	合金成分、工艺和力学性能	195
4.7.2	板材的焊接性能	196
4.7.3	高成形性细晶粒钢的冲压成形试验	198
4.7.4	高成形性细晶粒热轧板的应变疲劳特性	201
4.8	综述	204
	参考文献	205

第 5 章 形变诱导铁素体相变研究与在超细晶热轧汽车钢板上的生产应用 207

5.1	形变诱导（强化）铁素体相变	207
5.1.1	形变诱导（强化）铁素体相变的热力学	208
5.1.2	形变诱导（强化）铁素体相变的证实	210
5.1.3	形变诱导（强化）铁素体相变的动力学	210
5.1.4	化学成分对形变诱导（强化）铁素体相变的影响	212
5.1.5	低碳碳素钢产生 DIFT 的必要条件	213
5.1.6	铁素体的动态再结晶	214
5.1.7	形变诱导（强化）铁素体相变的主要特征	215
5.2	热轧流程的超细晶控制理论与技术	216
5.3	超细晶钢热轧汽车钢板的生产应用	217
5.3.1	概况	217
5.3.2	显微组织	217
5.3.3	冲击韧性	217
5.3.4	疲劳性能	218
5.3.5	工业应用情况	219
	参考文献	220

第 6 章 先进汽车用钢的控轧和计算机模拟 221

6.1	概述	221
-----	----------	-----

6.2	先进汽车用钢	221
6.3	汽车用钢生产的控轧控冷技术	228
6.3.1	控轧控冷与先进汽车用钢的组织	228
6.3.2	铁素体区热轧技术	232
6.3.3	双相钢控轧技术	233
6.3.4	TRIP 钢控轧技术	234
6.3.5	细晶粒钢控轧技术	235
6.3.6	非调质钢生产技术	236
6.3.7	热轧棒材的控轧控冷技术	237
6.4	热连轧的计算机模拟技术	238
6.4.1	热连轧过程计算机模拟技术的发展	239
6.4.2	热连轧计算机模拟技术的最新研究进展	239
6.4.3	过程模型的建立	240
6.4.4	过程模型的开发和应用	248
6.4.5	热连轧组织性能预报技术应用与发展前景	254
	参考文献	256
第 7 章	高强度钢板成形及其仿真分析	259
7.1	高强度钢板的种类及特性	259
7.2	高强度钢板成形性能及其成形模拟	264
7.2.1	高强度钢板成形模拟的材料模型	264
7.2.2	薄板成形计算机数值仿真	273
7.2.3	高强度钢计算机数值模拟回弹分析及回弹补偿	275
7.2.4	钣金成形分析常用软件	279
7.3	高强度钢板在车身冲压件设计过程中应注意的问题	280
7.3.1	采用高强度钢板的汽车零件设计	280
7.3.2	高强度钢汽车零件成形工艺应注意的问题	283
7.3.3	模具设计和制造中应注意的问题	287
7.3.4	综述	288
7.4	成形极限图及板材成形时拉裂的预测	289
7.4.1	成形极限图	289
7.4.2	拉裂的预测	298
	参考文献	301
第 8 章	汽车用齿轮钢	303
8.1	概述	303
8.2	齿轮的受力、工况、失效模式和用钢要求	304

8.3	目前不同国家汽车齿轮钢的标准对比与分析	308
8.3.1	各国汽车用齿轮钢的国家标准及质量要求	308
8.3.2	汽车齿轮行业标准及国内外主要齿轮企业标准与质量要求	308
8.3.3	国内外齿轮钢的生产水平比较	315
8.4	一些渗碳齿轮钢的典型性能对比	320
8.4.1	齿轮钢的冲击疲劳	321
8.4.2	齿轮钢的高周疲劳和断裂应力	325
8.5	影响渗碳齿轮钢和渗碳齿轮性能的因素和改进措施	329
8.5.1	影响渗碳齿轮钢和渗碳齿轮性能的因素	329
8.5.2	影响渗碳齿轮质量的相关问题	330
8.5.3	改进齿轮表面强度和齿根强度的方法	333
8.6	齿轮用钢的其他钢类	334
8.7	汽车齿轮钢冶炼、连铸生产工艺	335
8.7.1	汽车齿轮钢的质量和冶金工艺的影响	335
8.7.2	齿轮钢冶炼、连铸生产工艺技术实践	337
8.7.3	冶金成分和夹杂物对齿轮钢性能的影响	340
8.8	综述	342
	参考文献	343

第9章 汽车用弹簧钢 344

9.1	概述	344
9.2	弹簧失效模式及对弹簧钢的性能要求	344
9.3	各国汽车弹簧钢的概况	347
9.3.1	悬架弹簧	347
9.3.2	气阀弹簧	350
9.4	弹簧钢松弛抗力的研究和弹簧钢的新近发展	351
9.4.1	弹簧钢的弹性松弛和松弛抗力	351
9.4.2	松弛抗力的测试方法及其表征参量的物理意义探讨	353
9.4.3	对松弛抗力的微观机理的认识和新弹簧钢的开发	358
9.5	对弹簧钢组织形态的研究和强韧性的提高	360
9.6	弹簧钢中的微合金元素	365
9.7	研究弹簧材料和弹簧松弛抗力的意义	367
9.8	变截面板簧和变截面弹簧钢	367
9.9	弹簧钢的合金化和弹簧的质量改进	370
9.10	弹簧钢标准和德国标准	372
9.11	综述	372

参考文献	372
第 10 章 汽车应用微合金非调质钢的新近发展	375
10.1 概述	375
10.2 铁素体-珠光体型非调质钢的性能、成分、组织之间的关系和应用	376
10.2.1 铁素体-珠光体型非调质钢的强化原理	376
10.2.2 合金成分、微合金元素和固溶度积方程	379
10.2.3 晶内铁素体在复杂沉淀 $MnS+V(C, N)$ 粒子上形成的动力 学和结晶学	383
10.2.4 铁素体-珠光体非调质钢的晶内铁素体形成的其他方式和 影响因素	390
10.2.5 铁素体-珠光体型非调质钢的疲劳和应用	391
10.3 贝氏体型非调质钢	394
10.4 低碳马氏体型非调质钢	395
10.5 非调质高强度钢板	396
参考文献	398
第 11 章 汽车紧固件及其用钢的研究及发展动向	400
11.1 概述	400
11.2 高强度紧固件的主要发展历程	400
11.3 高强度紧固件的制造工艺	402
11.4 高强度紧固件及其用钢的性能要求	403
11.5 高强度螺栓钢的冶炼和轧制特点	404
11.6 高强度螺栓钢的现状和发展动向	405
11.6.1 洁净螺栓钢	405
11.6.2 经济型高强度螺栓钢	406
11.6.3 马钢 8.8 级冷作强化微合金化非调质钢的研究开发	412
11.6.4 马钢 8.8 级高强度紧固件用冷镦钢在线软化技术的研究开发	426
11.6.5 超高强度和耐延迟断裂的高强度螺栓钢	435
参考文献	439
第 12 章 汽车用合金结构钢先进的冶金及轧制技术	442
12.1 汽车用合金结构钢的性能和发展要求	442
12.2 汽车用合金结构钢的先进的熔炼技术	444
12.2.1 炼钢	444
12.2.2 二次精炼技术	445
12.3 汽车用特钢主要的先进轧制技术	449
12.3.1 坯料加热温度控制与低温轧制技术	449