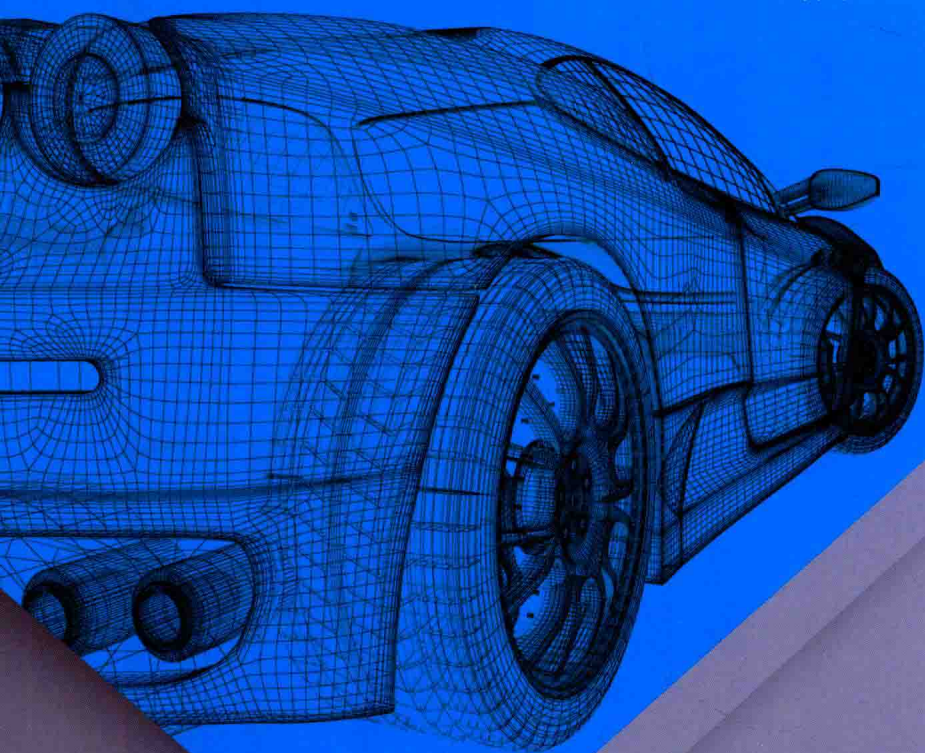


汽车工程专业系列丛书

汽车尾气净化处理技术

郭刚 徐立峰 张少君◎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

汽车尾气净化处理技术

郭刚 徐立峰 张少君◎著
韩维建◎主编



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车尾气净化处理技术 / 郭刚, 徐立峰, 张少君编著. —北京: 机械工业出版社, 2017.11

(汽车工程专业系列丛书)

ISBN 978-7-111-58301-1

I. 汽… II. ①郭… ②徐… ③张… III. 汽车排气污染—废气净化 IV. X734.201

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 260888 号

汽车尾气净化处理技术

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: 袁 银

责任校对: 李秋荣

印 刷: 三河市宏图印务有限公司

版 次: 2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 170mm×242mm 1/16

印 张: 14

书 号: ISBN 978-7-111-58301-1

定 价: 55.00 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

中国的汽车产业发展迅速，已经成为我国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，但诸多的发展给汽车产业带来无限的挑战和机遇。因此，行业的快速变化急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地论证和研讨，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》《汽车尾气净化处理技术》《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化石燃料到其他燃料的多元化发展，《汽车尾气净化处理技术》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。

韩建建

2016年8月5日

推荐序一

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；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。

陈宝康

上海交通大学

推荐序二

作为《中国制造 2025》战略部署的主要支点之一，汽车业的持续、快速、健康发展将为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，立足于重庆地区汽车产业，依托国家“2011 计划”，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。本套丛书由汽车中心特别顾问、福特汽车亚太区技术总监韩维建博士积极推动。丛书主编韩维建博士基于数十年国际一流汽车工程经验以及独到全面的行业技术趋势把握，整合及组建了编著团队进行丛书各个书籍的编著。编著团队的成员主要由具有多年国际汽车公司工作经验，并且在高校及企业科研一线工作的归国人员组成。丛书内容拥有立足成熟技术、紧跟国际前沿、把握领域创新的特点及优势，丛书的成功出版将为国内汽车行业及学科提供全面而翔实的参考材料。

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本科及研究生的教学，同时也可汽车行业工程人员参考。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。



江苏省产业技术研究院

前 言

中国的汽车工业在近 20 年中得到了飞跃式的发展。汽车在中国的保有量从 2000 年年底的约 2000 万辆增加到了 2016 年年底的约 1.94 亿辆。目前，中国已经成为世界上最大的汽车销售市场，汽车已经深入普通民众的生活，极大地方便了群众的日常生活，提高了城乡人民的生活质量。

汽车给生活带来极大便利的同时，也不可避免地带来了一些不利因素。目前，绝大部分汽车仍然使用化石燃料。化石燃料的燃烧产物对环境有着显著的影响，比如燃料燃烧生成的二氧化碳气体带来的温室效应，燃烧副产物一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物和颗粒物等污染物对居住环境及人类健康有着非常不利的影响，必须尽最大可能予以减少。

在 20 世纪中期，汽车在西方已经普及到普通家庭，但是汽车发动机产生的尾气未经过任何处理就直接排入大气，在西方的各个主要都市中造成了严重的空气污染。直到 20 世纪六七十年代，通过对美国洛杉矶地区光雾的研究，人们才意识到汽车尾气对环境的危害。20 世纪 70 年代，美国颁布了《清洁空气法》。汽车尾气净化催化剂开始被广泛使用，尾气中的有害物质显著降低，汽车尾气对环境的影响大大降低。如今尾气催化剂已经作为标配，成为汽车的一个重要成分。以美国为例，从 20 世纪 70 年代起，政府对汽车排放的要求日趋严格，汽车尾气处理的技术也日趋先进。从 20 世纪 70 年代到 90 年代初，由于排放法规的变化，汽车尾气中排放的氮氧化物和碳氢化合物分别减少了 90% 和 95%，而从 20 世纪

90年代初到21世纪初,氮氧化物和碳氢化合物的排放又分别下降了约95%和98%,所以虽然车辆的数量和车辆行驶的里程大幅增加,但是空气质量并没有因此下降。

中国的汽车尾气处理起步较晚。我国从20世纪末开始对在用车加装三元催化剂,以减少有害尾气的排放。由于当时大量的汽车使用化油器,对发动机空燃比的控制不够精确,因而三元催化剂的效率有限。我国在2000年发布了第一个汽车排放的国标(国一),在随后的若干年颁布了越来越严格的标准(国二、国三、国四和国五),目前国五已经进入实施阶段,国六也已经被提上日程。随着燃油电喷装置的使用和发动机控制水平的提高,三元催化剂的效率日益提高。最新的国六标准和欧洲的欧六、美国的LEVⅢ/Tier 3标准非常接近。在短短十几年内,中国排放标准发展的程度相当于欧美国家半个世纪走过的道路。

如果所有车辆的排放都能满足目前的排放标准,那么由车辆尾气造成的污染将大幅度减小,空气质量将有显著提高,蓝天白云将重回中华大地。但是必须意识到,要达到最新的排放标准,需将发动机尾气中绝大多数的有害排放物加以转化。这是一项非常艰巨的任务,需要足够的知识、技术和资源来实现这个目标。汽车尾气排放中的污染物转化主要由位于汽车尾气管处的催化装置来实现。本书旨在介绍有关催化剂和污染排放的一般知识,内容包括汽车催化剂一般知识的介绍、汽油发动机和柴油发动机排放技术的介绍以及有关技术的回顾与现状,还包括污染的形成、排放法规和排放测试的介绍。希望通过学习本书,汽车有关专业的学生可以对汽车后处理的各个方面有基本的了解,而专门从事汽车后处理的专业人员则可以通过每章后面附有的参考文献做进一步的学习和了解。

汽车尾气后处理是一个系统工程,需要发动机、催化剂、传感器和其他部件一起配合,才能达到预期目标。具体来说,既需要合适的催化剂,也需要合适的催化剂工作环境,两者缺一不可。催化剂的工作环境

主要指催化剂中气体的温度、流量和组成，它们主要由发动机的运行条件和发动机的特性决定。在介绍催化剂的知识时，本书尽量从系统的角度进行讨论，还涉及了一些其他方面的知识，比如发动机的控制、传感器的原理和作用、排放法规和排放测试的规定及仪器等。在实际工作中，只有将这些知识结合才有可能发挥催化剂的效力，使车辆达到排放法规的要求。在发动机及车辆的研究和开发过程中，排放是一个关键因素和制约点，必须在研发的早期予以考虑，否则将非常被动。如果相关的工程师都有一定的尾气排放知识，了解排放的要求和实现排放要求的技术手段，知晓各种技术的优缺点、技术和成本的平衡，那么在开发过程中将能做到未雨绸缪、有的放矢、少走弯路，提高开发的效率和降低开发成本。

本书由几位作者共同编著。郭刚博士负责全书的编写协调，并且负责编写第2章、第3章（3.1、3.2、3.3、3.4、3.5、3.8）、第4章（4.1、4.2、4.3、4.6）和第6章（6.1、6.2、6.3、6.5）等内容；徐立峰博士负责编写第3章（3.6、3.7）、第4章（4.4、4.5）和第6章（6.4）等内容；张少君博士负责编写第1章和第5章。感谢韩维建博士的大力支持和指导。由于作者水平有限，错误在所难免，不足之处，恳请有关专家指正。

郭刚

目 录

丛书总序

推荐序一

推荐序二

前言

第1章 汽车尾气污染及排放标准概述 1

1.1 汽车污染物排放来源、类型及影响 1

1.2 洛杉矶光化学烟雾污染 5

1.3 早期汽车尾气排放治理和美国联邦《清洁空气法》 10

1.4 汽车尾气催化器的诞生、发展与普及 13

1.5 世界各国汽车排放法规与标准概述 15

参考文献 19

第2章 汽车催化剂基础 22

2.1 催化剂基础知识 22

2.1.1 化学平衡和反应速度 22

2.1.2 活化能 23

2.1.3 转化率和选择性 24

2.2 汽车催化剂的特点和主要成分 28

2.2.1 汽车催化剂的活性物 29

2.2.2 汽车催化剂活性物载体 31

2.2.3 汽车催化剂涂层	36
2.2.4 汽车催化剂的载体及特性	38
2.3 汽车催化器的封装和布局	44
2.3.1 密距耦合催化剂	45
2.3.2 下游催化剂	46
2.4 汽车催化剂中的传递与反应机理	47
2.5 催化剂的性能测试	50
2.5.1 催化剂的理化性能	50
2.5.2 催化剂的催化反应性能	51
2.5.3 实验室催化剂性能测试	53
2.6 汽车催化剂数学模拟	55
参考文献	56

第3章 汽油发动机车辆尾气后处理技术

3.1 汽油发动机尾气的产生和组成	59
3.2 三元催化剂中的主要化学反应	60
3.3 发动机空燃比和污染物在催化剂中的转化率	61
3.3.1 氧气传感器	64
3.3.2 氧储存材料	67
3.4 三元催化剂的发展历程	68
3.4.1 氧化催化剂	68
3.4.2 三元催化剂	69
3.4.3 高耐久性的三元催化剂	71
3.4.4 只含钯的三元催化剂	73
3.4.5 现代三元催化剂	75
3.5 降低冷启动排放	78
3.6 冷启动排放催化剂	82
3.6.1 碳氢化合物吸附催化剂	83
3.6.2 冷启动氮氧化物吸附催化剂	86

3.7 汽油车颗粒捕集器	87
3.7.1 汽油缸内直喷发动机	87
3.7.2 汽油直喷发动机颗粒	88
3.7.3 汽油发动机产生颗粒物的组分	89
3.7.4 汽油颗粒捕集器	89
3.7.5 汽油颗粒捕集器和柴油颗粒捕集器的比较	90
3.8 三元催化剂的耐久性和车载诊断系统	93
3.8.1 催化剂的高温失活	93
3.8.2 催化剂的中毒	96
3.8.3 催化剂的快速老化	99
3.8.4 车载诊断系统和催化剂的性能监测	104
参考文献	106

第4章 柴油发动机车辆尾气后处理技术

4.1 柴油车尾气排放特征和尾气后处理目标	112
4.2 柴油氧化催化剂	114
4.2.1 早期柴油氧化催化剂	114
4.2.2 现代柴油氧化催化剂	115
4.2.3 一氧化碳和碳氢化合物的氧化	116
4.2.4 DOC 对柴油后处理系统的温度调节	117
4.2.5 二氧化氮的生成	119
4.3 选择性催化还原反应	121
4.3.1 转化率和选择性	122
4.3.2 氨的吸附、解吸和泄漏	123
4.3.3 氨和氮氧化物的比例	125
4.3.4 氨泄漏催化剂	125
4.3.5 SCR 催化剂的种类	127
4.3.6 尿素和氨气	129
4.3.7 混合器	131

4.3.8	尿素的沉淀	131
4.3.9	SCR 催化剂的耐久性	132
4.3.10	SCR 催化剂的发展	133
4.4	柴油稀燃氮氧化物吸附催化剂	134
4.4.1	LNT 简介	134
4.4.2	LNT 工作原理	135
4.4.3	LNT 中氮氧化物的储存材料	138
4.4.4	硫对 LNT 的影响	138
4.4.5	LNT 的转化产物	139
4.4.6	LNT 应用中发动机的控制	139
4.4.7	LNT 的发展和应用	140
4.5	柴油颗粒捕集器	142
4.5.1	柴油颗粒	142
4.5.2	柴油颗粒捕集器简介	142
4.5.3	柴油颗粒捕集器工作原理	143
4.5.4	DPF 颗粒吸附机理	145
4.5.5	柴油颗粒捕集器的再生	146
4.5.6	柴油颗粒捕集器对尾气中颗粒物排放的影响	149
4.6	柴油车尾气后处理系统设计优化	151
4.6.1	氮氧化物的转化, SCR 还是 LNT	152
4.6.2	DPF 和氮氧化物转化催化剂的相对位置	154
4.6.3	SCR 捕集器: 结合 SCR 和 DPF	155
4.6.4	DFF 还是 cDPF	156
4.6.5	几种常用的柴油后处理系统	156
	参考文献	158
第5章 汽车尾气排放的测试规程		164
5.1	美国汽车尾气排放测试规程	165
5.1.1	轻型车台架测试规程	165

5.1.2 重型车发动机测试规程 169

5.1.3 重型车整车测试规程 171

5.2 欧洲汽车尾气排放测试规程 173

5.2.1 轻型车台架测试规程 173

5.2.2 重型车发动机测试规程 174

5.3 中国汽车尾气排放测试规程 179

5.4 其他尾气排放测试规程 180

5.4.1 轻型车测试规程发展（WLTP 循环） 180

5.4.2 重型车测试规程发展（WHSC 和 WHTC 循环） 181

5.4.3 实际道路排放测试 182

参考文献 186

第 6 章 汽车尾气后处理技术的挑战和展望 188

6.1 实际道路排放控制 189

6.2 颗粒物排放的测量 191

6.3 温室气体排放 193

6.4 替代燃料车辆的排放控制 195

6.4.1 生物柴油 196

6.4.2 天然气 197

6.4.3 乙醇 198

6.4.4 液化石油气 199

6.4.5 氢气燃料 201

6.5 其他后处理的发展方向 202

参考文献 204