汽车轻量化用铝合金汽车板：理论与工艺

Aluminum Alloy Sheets for Automotive Lightweight: Theory and Technics

路洪洲 著

中国工信出版集团
北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

ISBN 978-7-5682-8076-1



定价：118.00元

分类建议：科技/汽车
北京理工大学出版社网址：www.bitpress.com.cn



国之重器出版工程

制造强国建设

汽车轻量化用铝合金汽车板：理论与工艺

Aluminum Alloy Sheets for Automotive Lightweight: Theory and Technics

路洪洲 著



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

内 容 简 介

本书系统介绍了铝合金汽车板开发和应用的相关技术，主要包括：汽车轻量化，铝合金汽车板合金成分设计、轧制技术、毛化技术、热处理技术、表面处理技术、储存及运输、下料控制技术，铝合金零部件的冲压及模具设计、连接技术、涂装技术，以案例的形式介绍了铝合金零部件结构设计及评价、维修技术、回收再制造技术等，并阐述了行人保护理论、相形成及强化机制、时效机制、弯曲失效机制等理论。

本书可供从事铝合金汽车板研发和制造、汽车轻量化工程开发、汽车车身设计开发和制造工艺开发等的研究人员以及专业工程技术人员参考和使用。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

汽车轻量化用铝合金汽车板：理论与工艺 / 路洪洲著. —北京：北京理工大学出版社，2020.1
国之重器出版工程
ISBN 978-7-5682-8076-1

Ⅰ. ①汽…　Ⅱ. ①路…　Ⅲ. ①汽车-铝合金-板件　Ⅳ. ①U465.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2020）第 004765 号

出　　版 / 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 / 固安县铭成印刷有限公司
开　　本 / 710 毫米 × 1000 毫米　1/16
印　　张 / 27.75
彩　　插 / 6
字　　数 / 496 千字
版　　次 / 2020 年 1 月第 1 版　2020 年 1 月第 1 次印刷
定　　价 / 118.00 元

责任编辑 / 张海丽
文案编辑 / 张海丽
责任校对 / 周瑞红
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

《国之重器出版工程》
编辑委员会

编辑委员会主任：苗　圩

编辑委员会副主任：刘利华　辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈　因	郑立新	马向晖	高云虎	金　鑫
李　巍	高延敏	何　琼	刁石京	谢少锋
闻　库	韩　夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘　多	尹丽波	赵　波	卢　山
徐惠彬	赵长禄	周　玉	姚　郁	张　炜
聂　宏	付梦印	季仲华		

需要全本请访问 www.ertongbook.com



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

于　全　中国工程院院士

王少萍　“长江学者奖励计划”特聘教授

王建民　清华大学软件学院院长

王哲荣　中国工程院院士

王　越　中国科学院院士、中国工程院院士

尤肖虎　“长江学者奖励计划”特聘教授

邓宗全　中国工程院院士

甘晓华　中国工程院院士

叶培建　中国科学院院士

朱英富　中国工程院院士

朵英贤　中国工程院院士

邬贺铨　中国工程院院士

刘大响　中国工程院院士

刘怡昕　中国工程院院士

刘韵洁　中国工程院院士

孙逢春　中国工程院院士

苏彦庆　“长江学者奖励计划”特聘教授



苏哲子　中国工程院院士

李伯虎　中国工程院院士

李应红　中国科学院院士

李新亚　国家制造强国建设战略咨询委员会委员、中国机械工业联合会副会长

杨德森　中国工程院院士

张宏科　北京交通大学下一代互联网互联设备国家工程实验室主任

陆建勋　中国工程院院士

陆燕荪　国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原机械工业部副部长

陈一坚　中国工程院院士

陈懋章　中国工程院院士

金东寒　中国工程院院士

周立伟　中国工程院院士

郑纬民　中国计算机学会原理事长

郑建华　中国科学院院士



屈贤明　国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任

项昌乐　“长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长

柳百成　中国工程院院士

闻雪友　中国工程院院士

徐德民　中国工程院院士

唐长红　中国工程院院士

黄卫东　“长江学者奖励计划”特聘教授

黄先祥　中国工程院院士

黄　维　中国科学院院士、西北工业大学常务副校长

董景辰　工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员

焦宗夏　“长江学者奖励计划”特聘教授



前　言

自奥迪 A2 这样一辆车身以铝合金为主要材料的汽车量产以来，铝合金汽车板走入了在汽车工业批量应用的舞台。过去的几十年间，铝合金汽车板先在 C 级车和豪华汽车车身上应用，而后在经济型汽车上开始广泛应用，完成了从“小资小调”向“大众情人”的华丽转身。然而，纵然如此，以铝合金汽车板为主的全铝车身和混合材料车身对于我国多数汽车工程师、工艺工程师、材料工程师而言，仍然是只可远观、不可近玩的存在。查阅国内外的文献资料，竟然没有一本系统阐述铝合金汽车板开发和应用的专著，深感会影响我国汽车工业和铝合金工业的发展，这也是撰写本书的初衷。

铝合金汽车板开发和应用涉及领域过多，例如，汽车轻量化、合金成分设计、轧制技术、毛化技术、热处理技术、表面处理技术、储存及运输、下料控制技术、冲压及模具设计、连接技术、涂装技术、零部件设计、材料评价及零部件评价、维修技术、回收再制造技术等。另外，还涉及行人保护、合金相的形成及强化机制、时效机制、弯曲失效机制等理论。由此可见，铝合金汽车板开发和应用的产业链长、技术链节点多、学科领域交叉复杂，这也是铝合金汽车板应用和全铝车身及混合材料车身开发难度大的原因。凭借一己之力实在难以窥透所有环节的技术内容，这也是本书多次动笔、又多次放弃的原因。考虑到人的一生总要为行业做些工作、为业界做点贡献，几经周折终于完成了本书的撰写工作。

自 2007 年开始，本人从事铝合金汽车板的开发和应用研究，先后承担了国家“863”项目、重庆市火炬计划项目、国家支撑计划项目等铝合金汽车板开发和应用的国家、省（市）课题；同时先后与西南铝业集团有限责任公司（简称西南铝业）、财发铝业股份有限公司等开展铝合金汽车板开发和应用的横向项

目。同时，在华东理工大学路贵民教授和中国汽车工程研究院股份有限公司马鸣图教授的指导下进行循环再制造铝合金汽车板的研究，这十余年间积累了一些经验和数据，获得了一点成果。在此期间，我们到爱励铝业比利时达菲尔铝合金汽车板工厂，与神户制钢、诺贝丽斯、西南铝业、南山铝业股份有限公司、中铝科学技术研究院等单位的研发人员进行学术交流和探讨，颇有收获，为本书的完成奠定了基础。在合作期间，中国汽车工程研究院，以及合作伙伴奇瑞汽车、长安汽车、西南铝业、东北大学等单位给予了大力的支持，在此对相关单位以及业内好友表示感谢。本书最后的统稿由我的博士生、现任首钢技术研究院工程师的梁江涛博士协助完成。还要感谢北京理工大学出版社的支持，如果没有他们的鼓励和理解，此书难以正式出版。

本书由 7 章组成，第 1 章介绍了汽车轻量化的背景、意义和实现手段，以及在汽车轻量化工程需求背景下铝合金汽车板的应用情况。第 2 章介绍了铝合金汽车板的开发和制造工艺的相关技术，包括铝合金汽车板以及铝合金冲压零部件的制造流程、铝合金汽车板的热轧及冷轧、表面毛化处理、表面 Roping 线（漆刷线）控制、热处理及气垫炉、表面钝化处理及涂油、包装运输及储存以及铝合金汽车板供应商情况和国内外的相关标准规范。第 3 章介绍了铝合金汽车冲压成型零部件的设计，包括铝合金覆盖件结构设计以及模具设计、零部件 CAE 工程分析及台架试验、铝合金发动机罩行人保护理论及行人保护设计、汽车覆盖件的抗凹痕设计等内容。第 4 章介绍了铝合金汽车冲压成型零部件成型工艺，包括铝合金汽车板冲裁下料遇到的问题的相关研究，以及目前铝合金汽车冲压件常用的成型工艺，如应用最为普遍的冷冲压成型工艺以及近年较为热点的铝合金温热成型、液压成型等。第 5 章介绍了铝合金汽车冲压成型零部件连接及涂装工艺、铝合金冲压件机械连接工艺和焊接工艺。第 6 章论述了铝合金汽车板的基本原理，如铝合金相的形成及电子结构、铝合金汽车板的时效机制和弯曲失效机制。第 7 章论述了铝合金汽车冲压成型零部件的修复技术及原级循环再制造技术。

由于作者水平有限，书中的疏漏和不足之处在所难免，敬请读者批评指正。希望本书可供业界参考、借鉴之用，如果能对自主品牌的铝合金车身性能开发、轻量化开发、我国铝合金汽车板的开发和应用提供一些帮助，就非常欣慰了。

予以此书献给我的家人。

路洪洲

2019 年 9 月于廊坊凤凰城



目　录

第 1 章　汽车轻量化及铝合金汽车板 …… 001

1.1　汽车轻量化 …… 002
1.1.1　汽车轻量化的意义 …… 002
1.1.2　汽车轻量化的实现 …… 005
1.2　铝合金汽车板在汽车上的应用 …… 007
1.2.1　铝合金在汽车上的应用 …… 007
1.2.2　铝合金汽车板在汽车上的应用现状 …… 008
1.2.3　铝合金汽车板在新能源汽车上的应用 …… 017
1.3　常用的铝合金汽车板牌号及性能 …… 018
1.3.1　常用的铝合金汽车板牌号、成分 …… 018
1.3.2　铝合金汽车板性能要求 …… 020
1.3.3　合金元素的影响 …… 021
1.4　小结 …… 025
参考文献 …… 026

第 2 章　铝合金汽车板的开发和制造工艺 …… 029

2.1　铝合金汽车板的制造流程 …… 030
2.2　铝合金汽车板的热轧及冷轧 …… 032
2.2.1　铝合金汽车板的热变形行为 …… 032
2.2.2　热轧工艺 …… 042
2.2.3　冷轧工艺 …… 044

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2.2.4 表面毛化处理 …… 046
2.2.5 表面 Roping 线（漆刷线）控制 …… 050
2.3 热处理及气垫炉 …… 052
2.3.1 热处理炉 …… 052
2.3.2 固溶淬火 …… 054
2.3.3 预时效及烘烤硬化 …… 066
2.4 表面钝化处理及涂油 …… 080
2.5 包装运输及储存 …… 082
2.6 铝合金汽车板供应商情况 …… 087
2.6.1 神户制钢 …… 087
2.6.2 爱励铝业 …… 088
2.6.3 诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司 …… 088
2.6.4 中国忠旺控股有限公司 …… 089
2.6.5 南山铝业 …… 090
2.6.6 中国铝业及西南铝业 …… 091
2.6.7 美铝公司 …… 091
2.7 行业标准及企业标准 …… 091
2.7.1 产品的分类 …… 092
2.7.2 尺寸偏差 …… 092
2.7.3 力学性能 …… 093
2.7.4 外观质量 …… 094
2.7.5 试验方法 …… 094
2.7.6 检验结果的判定 …… 095
2.7.7 标志、包装、运输、储存 …… 095
2.7.8 质量证明书 …… 096
2.7.9 企业标准 …… 096
2.8 小结 …… 097
参考文献 …… 098

第 3 章 铝合金汽车冲压成型零部件的设计 …… 103

3.1 铝合金覆盖件结构设计以及模具设计 …… 104
3.1.1 轻量化计算设计 …… 104
3.1.2 发动机罩结构设计 …… 105
3.1.3 发动机罩内、外板模具设计规范 …… 108

3.2 零部件 CAE 工程分析及台架试验……113
3.2.1 铝合金汽车覆盖件的刚度分析……113
3.2.2 铝合金前罩 SLAM 疲劳耐久分析……118
3.3 铝合金发动机罩及行人保护理论……122
3.3.1 行人保护理论及法规……123
3.3.2 基于行人保护的铝合金发动机罩……132
3.4 抗凹痕设计及选材……149
3.4.1 定义和测量……149
3.4.2 覆盖件抗凹性能的影响因素……152
3.4.3 覆盖件的抗凹性设计……160
3.4.4 抗凹痕测试方法及标准……163
3.4.5 铝合金汽车板的选择……170
3.5 小结……171
参考文献……172

第 4 章 铝合金汽车冲压成型零部件成型工艺……177

4.1 剪裁下料……178
4.1.1 剪裁下料工艺存在的问题……178
4.1.2 铝合金汽车车身外板的修整技术国内外研究现状……180
4.2 冷冲压成型……184
4.2.1 冷冲压成型特点……184
4.2.2 材料性能对冷冲压成型的影响……186
4.2.3 冷冲压回弹的影响……191
4.2.4 发动机罩内、外板加工工艺研究……202
4.2.5 冲压取料……206
4.2.6 冲压润滑剂……206
4.2.7 冲压生产废料线……207
4.3 温热成型……208
4.3.1 铝合金温热冲压成型技术……208
4.3.2 温热成型的研究进展……213
4.3.3 温成型性能的影响因素……220
4.3.4 温热成型性能的工艺控制……223
4.4 电磁复合冲压成型……226
4.5 液压成型工艺……230

4.5.1 液压成型技术 …… 230
4.5.2 国内外充液拉深成型技术现状 …… 233
4.5.3 板材液压成型技术的发展趋势 …… 240
4.6 其他新的制造工艺 …… 241
4.7 小结 …… 242
参考文献 …… 243

第 5 章 铝合金汽车冲压成型零部件连接及涂装工艺 …… 257

5.1 铝合金冲压件机械连接工艺 …… 258
5.1.1 锁铆连接 …… 259
5.1.2 无铆连接 …… 261
5.1.3 热融自攻丝铆接 …… 262
5.1.4 塞铆焊工艺 …… 262
5.1.5 搅拌摩擦塞铆焊 …… 264
5.1.6 搅拌摩擦盲铆工艺 …… 265
5.1.7 胶接工艺及复合胶铆复合工艺 …… 266
5.1.8 卷边工艺 …… 270
5.2 铝合金冲压件焊接工艺 …… 272
5.2.1 铝合金汽车冲压件电阻点焊 …… 273
5.2.2 铝合金汽车冲压件 MIG 焊和 TIG 填丝焊 …… 289
5.2.3 铝合金汽车冲压件激光焊 …… 289
5.2.4 铝合金汽车冲压件激光–电弧复合焊 …… 292
5.2.5 铝合金汽车冲压件搅拌摩擦焊和搅拌摩擦点焊 …… 294
5.2.6 冷金属过渡焊接工艺 …… 298
5.3 铝合金冲压件涂装 …… 300
5.3.1 涂装工艺流程 …… 300
5.3.2 脱脂 …… 301
5.3.3 表面调整 …… 301
5.3.4 磷化 …… 302
5.3.5 电泳涂装 …… 304
5.3.6 试验验证 …… 305
5.4 小结 …… 311
参考文献 …… 312



第 6 章 铝合金汽车板的基本原理 …… 319

6.1 铝合金相的形成及电子结构 …… 320
6.1.1 Al–Mg–Si 合金的析出相及相结构 …… 322
6.1.2 Pre–β″相、β″相、β′相的界面能、结合能的计算研究 …… 325
6.1.3 三个沉淀相的结合能和界面能与性能的关系 …… 335
6.2 时效机制 …… 339
6.3 弯曲失效机制 …… 348
6.4 小结 …… 370
参考文献 …… 371

第 7 章 铝合金汽车冲压成型零部件的修复及原级循环再制造 …… 379

7.1 铝合金冲压件的修复 …… 380
7.1.1 铝合金面板的修复及连接 …… 381
7.1.2 板件的更换 …… 389
7.2 铝合金冲压件的原级循环再制造 …… 390
7.2.1 铝合金汽车构件回收再制造的意义 …… 390
7.2.2 Fe 杂质对再制造铝合金的热变形行为影响 …… 393
7.2.3 不同 Fe 杂质含量对 6022 再制造铝合金汽车板组织及力学性能的影响 …… 403
7.2.4 不同 Fe 杂质含量对 6022 铝合金汽车板弯曲性能的影响 …… 420
7.3 小结 …… 424
参考文献 …… 425



第1章

汽车轻量化及铝合金汽车板

汽车轻量化是全铝车身以及铝合金覆盖件应用的主要驱动力。本章将介绍汽车轻量化工程的意义以及实施方式，列举采用全铝车身或铝合金覆盖件的车型及应用情况，并简述常用的铝合金汽车板材料及使用要求。

| 1.1 汽车轻量化 |

1.1.1 汽车轻量化的意义

1.1.1.1 对工业发展的意义

“中国制造 2025”是我国政府实施制造强国战略第一个 10 年的行动纲领。2015 年 3 月 5 日，李克强总理在全国“两会”上作《政府工作报告》时首次提出“中国制造 2025”的宏伟计划。“中国制造 2025”提出，坚持“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”的基本方针，坚持“市场主导、政府引导，立足当前、着眼长远，整体推进、重点突破，自主发展、开放合作”的基本原则，通过“三步走”实现制造强国的战略目标：第一步，到 2025 年迈入制造强国行列；第二步，到 2035 年中国制造业整体达到世界制造强国阵营中等水平；第三步，到新中国成立 100 年时，综合实力进入世界制造强国前列。

在“中国制造 2025”对汽车轻量化的需求中，强调汽车轻量化重点工作领域包括推广应用高强度钢、铝合金、镁合金、塑料及非金属复合材料等整车轻量化材料和车身轻量化、底盘轻量化、动力系统以及核心部件的轻量化设计。在“中国制造 2025”有关“先进基础工艺、关键基础材料”的“四基”（核心

需要全本请访问 www.ertongbook.com