



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

中国战略性新兴产业——新材料

新型合金材料——铝合金

中国材料研究学会组织编写

丛书主编◎黄伯云

编 著◎张新明 邓运来

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

中国战略性新兴产业——新材料

新型合金材料——铝合金

中国材料研究学会组织编写

丛书主编 黄伯云

丛书副主编 韩雅芳

编 著 张新明 邓运来



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书是中国材料研究会组织编写的，被新闻出版广电总局批准为“十二五”国家重点出版物出版规划项目，并获2016年度国家出版基金资助。丛书共16分册，涵盖了新型功能材料、高性能结构材料、高性能纤维复合材料等16种重点发展材料。本分册为《新型合金材料——铝合金》。

本书较为系统地总结了有关高强铝合金发展现状与研究进展、成分—工艺—组织—性能关联机理与方法、制备加工技术、典型铝合金牌号等方面的知识。其中，第1~4章主要论述了高强铝合金的发展现状与研究进展、技术原理与方法；第5~8章根据高强铝合金牌号论述几种铝合金厚板的制备加工技术；第9章作为铝合金材料/结构一体化发展的具体实例，介绍了蠕变时效成形在高强铝合金材料与构件成形方面的研究进展。全书针对关键基础科学和技术难题引用了大量的文献资料，突出了该领域的研究热点和发展趋势。

本书内容系统、先进，可供新材料科研院所、高等院校、新材料产业界、政府相关部门、新材料中介咨询机构等领域的人员参考，尤其适合从事铝合金研发和工程化应用的科技人员参考，也可作为高校材料专业教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中国战略性新兴产业. 新材料. 新型合金材料. 铝合金/张新明, 邓运来
编著. —北京: 中国铁道出版社, 2018. 11

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-113-25227-4

I. ①中… II. ①张… ②邓… III. ①新兴产业—产业发展—研究—中国
②铝合金—有色金属冶金—产业发展—研究—中国 IV. ①F269.24②F426.32

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第270386号

书 名: 中国战略性新兴产业——新材料
新型合金材料——铝合金
作 者: 张新明 邓运来 编著

策 划: 李小军 **读者热线:** (010) 63550836
责任编辑: 李小军 许璐 绳超
封面设计: **MXK** DESIGN STUDIO
责任校对: 张玉华
责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市西城区右安门西街8号)
网 址: <http://www.tdpress.com/51eds/>
印 刷: 中煤(北京)印务有限公司
版 次: 2018年11月第1版 2018年11月第1次印刷
开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 23.25 字数: 515千
书 号: ISBN 978-7-113-25227-4
定 价: 118.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书，如有印制质量问题，请与本社教材图书营销部联系调换。电话：(010) 63550836
打击盗版举报电话：(010) 51873659

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书

编 委 会

- 主 任：**黄伯云（中国工程院院士、中国材料研究学会名誉理事长）
- 副 主 任：**韩雅芳（教授、中国材料研究学会副理事长兼秘书长）
田京芬（中国铁道出版社社长、全国新闻出版行业领军人才）
- 编 委：**李元元（中国工程院院士、中国材料研究学会理事长）
魏炳波（中国科学院院士、中国材料研究学会副理事长）
周 玉（中国工程院院士、中国材料研究学会副理事长）
谢建新（中国工程院院士、中国材料研究学会常务副理事长）
郑有焯（中国科学院院士、南京大学教授）
李 卫（中国工程院院士、北京钢铁研究总院教授级高级工程师）
潘复生（中国工程院院士、中国材料研究学会副理事长）
姚 燕（教授、中国材料研究学会副理事长）
罗宏杰（教授、中国材料研究学会副理事长）
韩高荣（教授、中国材料研究学会副理事长）
唐见茂（教授、中国材料研究学会常务理事、咨询专家）
张新明（教授、俄罗斯工程院院士、俄罗斯宇航科学院院士）
朱美芳（教授、中国材料研究学会常务理事）
张增志（教授、中国材料研究学会常务理事兼副秘书长）
武 英（教授、中国材料研究学会常务理事兼副秘书长）
赵永庆（教授、中国材料研究学会理事）
李贺军（教授、中国材料研究学会理事）
杨桂生（教授、中国材料研究学会理事）
吴晓东（清华大学材料学院副研究员）

吴 玲(教授、国家新材料行业生产力中心主任)

尚成嘉(北京科技大学教授、中国材料研究学会理事)

徐志康(浙江大学教授)

杨 辉(浙江大学教授)

姜希猛(深圳清华大学研究院研究员)

赵 静(中国铁道出版社总编办主任)

责任编辑: 唐见茂

丛书主编: 黄伯云

丛书副主编: 韩雅芳

序

新材料是高技术和现代产业的基础和先导,对培育和发展战略性新兴产业、国家重大工程项目的建设以及可持续发展都具有重要的支撑和保证作用。在我国政府大力支持下,我国新材料在产业规模、技术进步、创新能力、应用水平等方面均取得了重大进展,自主的产业体系初步形成,具备了良好的发展基础。同时,从全球高新技术和新兴产业的发展前景看,新材料的基础地位和先导作用也越来越重要。

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书是为贯彻落实国务院 2010 年颁布的《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》(国发〔2010〕32 号)而组织编著出版的。在国发〔2010〕32 号文中,新材料被列为我国七种重点发展的产业之一,其总体目标定位是:“大力发展稀土功能材料、高性能膜材料、特种玻璃、功能陶瓷、半导体照明材料等新型功能材料。积极发展高品质特殊钢、新型合金材料、工程塑料等先进结构材料。提升碳纤维、芳纶、超高分子量聚乙烯纤维等高性能纤维及其复合材料发展水平。开展纳米、超导、智能等共性基础材料研究。”本丛书由中国材料研究学会负责组织编著、中国铁道出版社出版,并成功入选“‘十二五’国家重点出版物出版规划项目”,获得 2016 年度国家出版基金资助。这是论述我国新材料发展战略的第一部系统性科技系列著作,代表了当代新材料发展的主流,对推动我国战略性新兴产业和可持续发展都具有重要的现实意义和深远的指导意义。

本丛书从发展国家战略性新兴产业的高度出发,重点选择了国发〔2013〕32 号文件鼓励的高性能结构材料、特种功能材料和高性能纤维及其复合材料,全面系统地阐述了发展这些重点新材料的产业背景及战略意义,系统地论述了这些新材料的理论基础和应用技术、我国取得的最新研究成果、应用方向及发展前景,针对性地提出了我国发展这些新材料的主要方向和任务,分析了存在的主要问题,提出了相应的对策和建议,是我国近年来在新材料领域内具有领先水平的科技著作丛

书。丛书最大的特点是体现了一个“新”字：介绍和论述了我国材料领域取得的最新研究成果、开发的最先进材料品种和最新制造技术，所著内容代表当代全球新材料发展方向和主流。丛书既具有较高的学术性和技术先进性，同时对我国新材料产业发展也具有重要的参考价值。

中国材料研究学会是全国一级学术团体，具有资源、信息和人才的综合优势，多年来在促进材料科学进步、开展国内外学术交流、承接政府职能转移、提供新材料产业发展决策咨询、开展社会化服务等方面做了大量的、卓有成效的工作，为推动我国新材料发展发挥了重要作用。参加本丛书编著的作者都是我国从事相关材料研究和开发的一流的科研单位和院校、一流的专家学者，拥有数十年的科研、教学和产业开发经验，并取得了国内领先的科研成果，创作态度严谨，从而保障了本套丛书的内容质量。

本丛书的编著和出版是近年来我国材料研究领域具有足够影响的一件大事。我们希望，本丛书的出版能对我国新材料技术和产业发展产生较大的助推作用，也热切希望广大材料科技人员、产业精英、决策机构积极投身到发展我国新材料研发的行列中来，为推动我国新材料产业又好又快的发展做出更大贡献！

中国材料研究学会名誉理事长

中国工程院院士



2016年6月

前 言

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书由中国材料学会组织编写,被新闻出版广电总局批准为“十二五”国家重点出版物出版规划项目,经国家出版基金管理委员会评审,获2016年度国家出版基金资助。

根据国务院《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》,新材料被列为我国战略性新兴产业之一。本丛书定位为:从战略性新兴产业的高度,着重论述该类新材料在国民经济和国防建设重大工程和项目中的地位 and 作用、技术基础、最新研究成果、应用领域及发展前景。其特点体现一个“新”字,即在遵守国家有关保密规定的前提下论述当代新材料的最先进的工艺和最重要的性能。它代表当代全球新材料发展的主流,对实现可持续发展具有重要的现实意义和深远的指导意义。丛书共16分册,涵盖了新型功能材料、高性能结构材料、高性能纤维复合材料等16种重点发展材料。本分册为《新型合金材料——铝合金》。

从20世纪初至今,铝合金在航空航天、交通运输领域获得了广泛应用。百年以来,高强铝合金从成分、工艺、组织、性能和应用等多个方面不断创新,需求牵引、科技驱动,历经五代发展,满足了不同时代飞机和高端装备的发展要求。在现代装备高效、节能、环保发展趋势下,装备轻量化浪潮正扑面而来,作为高性价比的轻量化材料,铝合金科技与产业获得空前发展机遇。本书编著的目的是为从事铝合金相关材料与应用的科技工作者和高校师生提供一部较为系统的有关高强铝合金发展现状与研究进展、成分-工艺-组织-性能关联机理与方法、制备加工技术(特别是大规格材料均匀性调控原理与工艺创新)、典型铝合金牌号等方面的著作,内容既具学术性、启发性,也兼顾实用性。

全书由中南大学材料科学与工程学院张新明、邓运来编著。

感谢国家重点基础研究发展计划(973计划)项目2005CB623700、2012CB619500,2011协同创新计划轻质高强有色金属材料与制造协同创新中心的支持!在本书撰写过程中,参考了不同时期的文献资料,在此,对本书引用的参考文献的作者表示衷心感谢!书中未注明的研究结果来自于编著者团队师生的研究工作总结(包括几十位研究生的学

位论文),在此,向被书中引用研究结果的师生表示衷心感谢!课题组的张勇、张劲、叶凌英、刘胜胆、唐建国老师为本书编著做了资料收集、整理、校订等工作,在此向他们表示感谢。

限于时间和精力,疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编著者
2018年8月

目 录

第 1 章 高强铝合金的发展	1
1.1 第一代高静强度铝合金	2
1.2 第二、三、四代铝合金	3
1.2.1 第二代高强、耐蚀铝合金	3
1.2.2 第三代高强、高韧、耐热、低密度铝合金	3
1.2.3 第四代高强、高韧、耐蚀、耐损伤铝合金	4
1.3 第五代高综合性能铝合金	4
1.3.1 概述	4
1.3.2 铝-锌系铝合金	6
1.3.3 铝-铜系铝合金	7
1.3.4 铝-锂系铝合金	8
1.4 我国高强铝合金材料的发展	8
参考文献	9
第 2 章 高强铝合金的时效析出微结构	15
2.1 时效析出的热力学原理	15
2.1.1 析出相形核	16
2.1.2 析出相长大	17
2.2 铝-铜系合金的时效微结构	19
2.3 铝-锌系合金的时效微结构	25
2.4 高强铝合金时效微结构的调控方法与原理	27
2.4.1 基本方法与原理	27
2.4.2 回归再时效	30
2.4.3 断续时效	31
2.4.4 微合金化	34
参考文献	38
第 3 章 高强铝合金组织与性能的关系	46
3.1 高强铝合金的组织及其作用机理	46
3.1.1 基体沉淀相	47

3.1.2	晶界析出相及无沉淀析出带	47
3.1.3	弥散粒子的作用	48
3.1.4	粗大金属间化合物的作用	49
3.1.5	晶粒组织和织构	50
3.2	强度及其组织相关性	51
3.2.1	强化机理	51
3.2.2	强度与组织相关性的定量表征	54
3.3	断裂韧性及其组织相关性	55
3.3.1	高强铝合金的基本断裂方式	56
3.3.2	断裂韧性与组织相关性的定量表征	57
3.4	疲劳性能及其组织相关性	59
3.4.1	疲劳裂纹萌生	61
3.4.2	疲劳裂纹扩展	63
3.5	蠕变性能及其组织相关性	65
3.5.1	蠕变第一阶段特征	65
3.5.2	蠕变第二阶段特征	66
3.6	腐蚀性能及其组织相关性	67
3.6.1	电化学腐蚀	67
3.6.2	点蚀	69
3.6.3	晶间腐蚀	71
3.6.4	应力腐蚀	73
3.6.5	剥落腐蚀	78
	参考文献	81
第4章	高强铝合金材料制备加工技术基础	93
4.1	高强铝合金材料的淬火敏感性与残余应力	94
4.1.1	高强铝合金淬火敏感性的评价方法	95
4.1.2	高强铝合金淬火敏感性的影响因素	99
4.1.3	残余应力及其测算方法	107
4.2	高合金化大铸锭的熔炼与铸造	114
4.2.1	熔体在线净化	114
4.2.2	多场调控铸锭	116
4.3	铸锭均匀化	118
4.3.1	均匀化对高强铝合金组织和性能的影响	119
4.3.2	多级均匀化的作用机理	119
4.4	板材的轧辊错位轧制	120

4.4.1	轧辊错位异步轧制	121
4.4.2	非对称轧制板材的宏/微观特征	122
4.5	高强铝合金材料的固溶处理	125
4.5.1	固溶对高强铝合金微观组织和织构的影响	125
4.5.2	逐级升温固溶对性能的影响	130
4.6	高强铝合金厚截面材料的淬火	131
4.6.1	辊底炉淬火	132
4.6.2	淬火工艺数值模拟的原理和方法	133
4.6.3	铝合金厚板的淬火残余应力	138
4.7	铝合金厚板的预拉伸	141
4.7.1	板材预拉伸的变形特点	141
4.7.2	预拉伸消减内应力	143
4.7.3	预拉伸对高强铝合金材料组织与性能的影响	144
4.8	高强铝合金厚截面材料的时效	146
4.8.1	内态变量理论	147
4.8.2	等动力学假设	148
4.8.3	LSW 理论及其等动力学处理	149
4.9	材料/构件的成形/成性一体化制备加工	150
4.10	高强铝合金的热处理状态代号	151
4.10.1	T 类细分状态代号	151
4.10.2	消除应力状态表示法	152
4.10.3	常见铝合金热处理状态代号举例	153
	参考文献	156
第 5 章 7050 铝合金厚板的非均匀性及调控		168
5.1	7050 铝合金厚板组织性能的非均匀性	168
5.1.1	多相组织	168
5.1.2	强度与韧性	172
5.1.3	厚向非均匀性	173
5.1.4	各向异性	174
5.2	铸锭多级均匀化	177
5.2.1	均匀化过程合金组织结构的演变规律	178
5.2.2	均匀化对 Al_3Zr 粒子析出的影响	179
5.2.3	均匀化对性能的影响	180
5.3	热轧工艺	181
5.3.1	热轧温度对固溶后再结晶分数的影响	182

5.3.2	热轧变形量对组织和性能的影响	183
5.3.3	轧制速率对组织和淬火敏感性的影响	185
5.4	逐级固溶	190
5.4.1	固溶工艺对多相组织的影响	191
5.4.2	固溶工艺对强度与韧性的影响	196
	参考文献	198
第 6 章	7055 铝合金厚板的非均匀性及调控	200
6.1	7055 铝合金厚板回归再时效组织性能的非均匀性	200
6.1.1	析出微结构分布特性	201
6.1.2	力学性能与电导率	202
6.1.3	组织性能非均匀性形成的机理	203
6.2	微量元素 Zr 对组织和性能的影响	205
6.2.1	微观组织	205
6.2.2	拉伸力学性能	207
6.2.3	拉伸断裂行为	208
6.2.4	晶间腐蚀性能	211
6.3	晶界析出相的回归动力学行为	213
6.3.1	晶界相非等温回归模型的建立	214
6.3.2	晶界相的预测结果及其准确性	217
6.3.3	以晶界相表征回归程度的简单性和合理性讨论	219
6.3.4	非等温回归模型的意义	221
6.4	“积分时效”对综合性能及其非均匀性的调控	222
6.4.1	研究材料及方法	222
6.4.2	升温温度场的回归效应与非等温回归时间的关系	223
6.4.3	降温温度场的回归效应与非等温回归时间的关系	225
6.4.4	升温、降温温度场的优化匹配	226
6.4.5	“积分时效”对组织和性能及其高向均匀性的影响	227
	参考文献	230
第 7 章	7085 铝合金厚板的非均匀性及调控	232
7.1	合金成分对 7085 铝合金淬火敏感性影响	232
7.1.1	力学性能淬火敏感性	233
7.1.2	剥落腐蚀淬火敏感性	240
7.2	热处理对厚板组织与性能均匀性的影响	244
7.2.1	厚板试样的组织与力学性能	245
7.2.2	厚板试样的剥落腐蚀性能	259
	参考文献	267

第 8 章 2A19 铝合金材料组织与性能的调控	269
8.1 2A19 铝合金的高温预析出固溶处理	270
8.1.1 高温预析出固溶处理原理与方法	270
8.1.2 T6 态合金组织与性能	274
8.1.3 T8 态合金组织与性能	276
8.2 淬火冷却速率	279
8.2.1 微观组织	279
8.2.2 力学性能、硬度及电导率	284
8.2.3 腐蚀性能	284
8.3 预变形	289
8.3.1 微观组织	289
8.3.2 时效硬化行为	296
8.3.3 拉伸力学性能	301
8.4 断续时效	303
8.4.1 断续时效工艺对组织与力学性能的影响	303
8.4.2 合金中原子团簇的特性	307
8.4.3 断续时效过程中原子团簇的形成与作用机理	316
参考文献	319
第 9 章 高强铝合金材料的蠕变时效成形	323
9.1 高强铝合金蠕变时效的基本规律	323
9.1.1 铝合金单级蠕变时效宏/微观特征	324
9.1.2 铝合金双级蠕变时效宏/微观特征	326
9.2 铝合金蠕变时效的应力位向效应	329
9.2.1 应力位向效应的特征	329
9.2.2 坯料预处理对应力位向效应的影响	330
9.3 铝合金蠕变时效形/性演化本构关系	332
9.3.1 单级蠕变时效本构模型	332
9.3.2 双级蠕变时效本构模型	336
9.3.3 模型的验证与应用	339
9.4 高强铝合金壁板的蠕变时效成形实例	344
9.4.1 构件形/性要求	344
9.4.2 模拟件 CAF 试验	345
9.4.3 构件 CAF 仿真	347
9.4.4 构件的 CAF 工艺实例	352
参考文献	354

第 1 章 高强铝合金的发展

高强铝合金一般指含铜 2×××、含锌 7××× 铝合金^[1]，后者依据强度不同，又可细分为中强 7××× 铝合金(主合金元素为锌、镁元素的 7020、7011、7051 等)和高强 7××× 铝合金(主合金元素为锌、镁、铜元素的 7075、7050、7010 等)。迄今为止，被广泛应用于航空工业的铝合金主要涉及 2×××(Al-Cu-Mg 系)和 7×××(Al-Zn-Mg-Cu 系)，其他系列铝合金，如 6×××(Al-Mg-Si 系)、Al-Li 合金^[2,3]等也有一定应用，但总体用量较少。在航天领域，除上述系列外，还包括 3×××、5×××、8××× 铝合金，在铁路、公路与水上交通运输领域大量应用 6×××、5××× 铝合金。

高强铝合金主要以航空需求为背景不断发展，百年铝材百年航空，铝合金满足了不同时代飞机和高端装备的发展要求。随着飞机设计思想的不断创新，先进飞机的构件制造对铝合金性能及规格提出了越来越高的要求，特别是现代飞机的轻量化、宽敞化、舒适化、长寿命、高可靠和低成本的发展需求，推动了高强铝合金的发展^[4]。按照铝合金的成分、工艺、组织—性能特征，可将航空铝合金的发展历程大体划分为五个阶段，即第一代高静强度铝合金，第二代高强耐蚀铝合金，第三代高强、高韧、耐蚀低密度铝合金，第四代高强、高韧、耐蚀、耐损伤铝合金，以及新一代高综合性能铝合金。各阶段铝合金的特征性能、关键技术与特征微结构，以及典型合金见表 1-1。

表 1-1 铝合金发展的特征性能、关键技术与特征微结构

阶段时间	特征性能	关键技术与特征微结构	典型合金
第一代 (20 世纪 30—50 年代)	高静强度	峰值时效；晶内弥散共格、半共格纳米时效相	2024-T4, 2414-T6 7075-T6, 7178-T6
	耐热		2618
第二代 (20 世纪 50—60 年代)	高强、耐蚀	过时效；晶界析出相不连续分布	7075-T74/T76
	高强、高韧、耐蚀	纯净化过时效；减小杂质相数量与尺寸，调控晶界相不连续分布及 PFZ 宽度	7475-T74 7050-T74 2519-T87
第三代 (20 世纪 70—80 年代)	高强、低密度	锂降密度，锂强化；含锂强化相	1420 8090, 8091 2090, 2091
	高强、耐热	快速凝固、喷射沉积；高熔点耐热相、复合增强相	8009/8109 铝基复合材料

续表

阶段时间	特征性能	关键技术与特征微结构	典型合金
第四代 (20 世纪 80—90 年代)	高强、高韧、耐蚀、耐损伤	三级时效;时效析出相晶界不连续及 晶内高密度分布;无沉淀带(PFZ)窄	7150-T77 7055-T77
		形变热处理;胞状组织、原子团簇、 GP 区提高位错运动阻力	2524-T39
	高强、高韧、低密度	锂降密度、锂强化,微合金化;新型含 锂强化相	2095/2195 2098/2198
第五代 (2001 年至今)	高强、高韧、耐蚀、低淬火敏 感性	控制再结晶、控冷淬火;低能相界与 晶界,多尺度微结构-综合性能协调	7085-T76/T74
	高强、高韧、耐蚀、耐损伤、 低密度	铝锂合金、微合金化;新型含锂强 化相	2099/2199 2050/2060
	高强、耐热	微合金化;新型耐热相	2039/2139,2040

1.1 第一代高静强度铝合金

20 世纪 30 年代至 50 年代末,随着铝合金沉淀硬化效应的发现和峰值时效技术的发展产生了第一代高静强度铝合金。1906 年,Wilm 首先发现 Al-Cu 合金的沉淀硬化现象^[4]。Al-Cu(-Mg)系合金通过淬火后形成的过饱和固溶体在随后的停放过程中会析出高密度 $\text{Al}_2\text{Cu}(\theta')$ 和 $\text{Al}_2\text{CuMg}(S')$ 相,使铝合金的强度获得大幅度提升,从而揭开了高强铝合金发展的序幕。1923 年,Sander 和 Meissner 又发现 Al-Zn-Mg 合金通过淬火-人工时效热处理后,形成的主要强化相 $\text{MgZn}_2(\eta')$ 相比 Al-Cu-Mg 系合金中的 θ' 和 S' 相尺寸更小,分布更弥散,沉淀硬化效应更显著^[5]。在时效的初级阶段,GP 区仅仅是一层或两层原子的厚度,但是其密度高达 $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,这种微结构能够为铝合金提供高强度。

此后,研发了人工峰值时效的 7075-T6 和 7178-T6 等高强铝合金材料。2024-T4、7075-T6、7178-T6 铝合金满足了飞机最初阶段提高强度安全系数、减轻结构质量和提高航程为目标替代木材的静强度设计需求,一般将其作为第一代高强铝合金的典型代表^[6]。成立于 1935 年的铝业协会(The Aluminum Association)于 1954 年建立铝合金牌号注册制度,2024、7075 等作为最早注册的铝合金^[7]沿用至今,已广泛应用于航空航天、武器装备和民用高端装备。

值得指出的是,由于超音速飞机的发展,特别是军机的高速/高加速度性能的不不断提升,航空耐热铝合金也一直在发展。代表性的合金是美国铝业公司 20 世纪 50 年代末期发展的 2618(Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系)和 2219 合金。后者在航天领域也大量应用,主要用作燃料储箱和火箭锻环^[8]。2618 铝合金至今在军机上仍在使用,也曾被欧洲协和式超音速客机大量采用,主要用于制造飞机的蒙皮、耐热结构件等,以适应协和式超音速客机马赫数 2($>2 \text{ 450 km/h}$)以上高速飞行时气动加热环境的要求。但随着协和式超音速客机退出航空客运市场,世界各航空制造大国短期内尚无发展新一代超音速客机和运输机的计划,因此民机对 Al-Cu-X 系列

耐热铝合金的需求有所减少,而超音速军机的制造与发展仍将对其有一定的需求量。

1.2 第二、三、四代铝合金

1.2.1 第二代高强、耐蚀铝合金

20世纪五六十年代,基于过时效原理,使晶界相不连续析出的T73、T76时效热处理技术促进了第二代耐蚀高强铝合金材料的发展。铝合金的应力腐蚀失效引起的飞机失事促使飞机设计对高强铝合金提出了耐腐蚀性能的要求。特别是 $7\times\times\times$ 铝合金强度级别比 $2\times\times\times$ 高,其抗应力、耐蚀性能差的矛盾更加突出。提高抗应力、耐蚀性能的关键是通过 $7\times\times\times$ 铝合金中发明的过时效热处理技术,使晶界析出相不连续分布无沉淀析出带(PFZ)变窄,通过降低强度提高抗应力、耐蚀性能,合金状态为T7 \times ,使得 $7\times\times\times$ 合金除满足飞机设计静强度外,还满足耐蚀性能的要求。为减小T73处理带来的较大强度损失,接着又研发出T76热处理工艺^[9],更好地协调了 $7\times\times\times$ 合金的高强度与耐蚀性能,7075-T74/T76等成为第二代耐蚀高强铝合金的典型代表。

1.2.2 第三代高强、高韧、耐热、低密度铝合金

20世纪70年代,合金纯净化和微合金化理论和技术推动了第三代高强、高韧铝合金的发展。飞机安全寿命设计对航空高强铝合金提出了断裂韧性的要求。随着对Fe、Si杂质影响铝合金韧性规律研究的不断深入,20世纪60年代末期,美国首先成功研制了低杂质含量的7475合金。与7075合金相比,该合金的Zn、Mg和Cu主合金成分的含量差别很小,主要区别是大幅降低Fe、Si等杂质含量,使粗大初生相和过剩相数量减少、尺寸细化,使合金具有高强度的同时,也具有优异的断裂韧性^[9]。20世纪70年代初期,随着对Cr、Mn和Zr等微合金化元素作用机理研究的不断深入,在美国海军和空军的支持下,美国铝业公司(Alcoa)研制了低杂质含量并用Zr微合金化的7050合金,欧洲也研制了成分和性能与之相当的7010合金^[9]。这些高强铝合金基本上都采用了过时效热处理技术(如T74和T76),具有高强度、高耐应力、耐蚀性能和断裂韧性。特别值得指出的是,7050合金的淬火敏感性低于7075,当7050-T74板材的厚度提高到150mm时,其强度仍然可达约500MPa,具有比7075-T74更低的淬火敏感性。

经典的2024铝合金,也通过降低Fe、Si杂质含量,提高合金纯度和冶金质量,发展了系列改进牌号,如2124、2224、2324等^[7]。合金纯净化和微合金化理论和技术推动了第三代高强、高韧铝合金的发展。

20世纪80年代中期,2219通过调整Fe和Si杂质总量与Fe/Si比,发展形成2519合金,2219和2519合金被用作超音速飞机的多种构件、紧固件和蒙皮的制造,2519合金还被广泛用作两栖突击车的装甲^[10]。

20世纪70年代末至80年代末,能源危机促使飞机设计向强烈减重方向发展,要求武器