



铝锂合金： 工艺、性能和应用

Aluminum-Lithium Alloys:
Processing, Properties, and Applications

[印] N. 伊斯瓦拉·普拉萨德 (N.Eswara Prasad)

[印] 阿莫尔·A.哥克哈勒 (Amol A.Gokhale) 主编

[荷] R.J.H.汪尼尔 (R.J.H. Wanhill)

戴圣龙 吴学仁 韩克岑 等 译

航空工业出版社

铝锂合金：工艺、 性能和应用

[印] N. 伊斯瓦拉·普拉萨德 (N. Eswara Prasad)

[印] 阿莫尔·A. 哥克哈勒 (Amol A. Gokhale) 主编

[荷] R. J. H. 汪尼尔 (R. J. H. Wanhill)

戴圣龙 吴学仁 韩克岑 等 译



航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书全面系统地论述了铝锂合金的知识和发展状况,其内容聚焦于第二代和第三代铝锂合金。全书分为5个部分,介绍了铝锂合金发展历史、物理冶金技术、制备工艺、力学行为和铝锂合金的应用等,为铝锂合金提供了大量信息,并对第三代铝锂合金及新型铝锂合金的发展进行了展望。

本书可供航空航天相关设计人员、材料领域的科研人员参考,也可作为相关专业本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

铝锂合金:工艺、性能和应用/(印)N. 伊斯瓦拉·普拉萨德(N. Eswara Prasad),(印)阿莫尔·A. 哥克哈勒(Amol A. Gokhale),(荷)R. J. H. 汪尼尔(R. J. H. Wanhill)编;戴圣龙等译.--北京:航空工业出版社,2016.11

书名原文:Aluminum - Lithium Alloys: Processing, Properties, and Applications

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1136 - 7

I. ①铝… II. ①N… ②阿… ③R… ④戴… III. ①铝合金—锂合金—热成型—研究 IV. ①TG166.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第302146号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2014-6582

This edition of *Aluminum - Lithium Alloys: Processing, Properties, and Applications* by N. Eswara Prasad, Amol Gokhale, R. J. H. Wanhill is published by arrangement with ELSEVIER INC., a delaware corporation having its principal place of business at 360 Park Avenue South, New York, NY 10010, USA.

由N. 伊斯瓦拉·普拉萨德、阿莫尔·A. 哥克哈勒和R. J. H. 汪尼尔主编的《铝锂合金:工艺、性能和应用》原版书由爱思唯尔有限公司出版。

铝锂合金:工艺、性能和应用
Lǔlǐhèjīn: Gongyì, Xíngnéng hé Yìngyòng

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016年11月第1版

2016年11月第1次印刷

开本:710×1000 1/16

印张:30.75

字数:635千字

印数:1—1600

定价:180.00元

原 版 序

对轻质结构件的需求是长期存在的，特别是在航空航天应用中。锂是最轻的金属元素，因此作为铝合金中的一个合金化元素，为航空航天主要轻合金结构材料的铝合金提供了重要优势。每加入一个单位的锂，就能使得铝合金的密度降低约3%，弹性模量则提高约6%。它不但能改进铝合金的高周疲劳性能和疲劳裂纹扩展抗力，对拉伸强度的提高也有贡献。铝锂合金在低温下的强度-断裂韧性综合性能也具有优势。然而在实际中要使得上述优势成为现实，则面临着诸多挑战。作为一种碱金属，锂是高度活性的，并且会损害与其接触的任何表面，所以铝锂合金制品的制造必须采用创新的熔炼和铸造技术。而且铝锂合金需要严格的成分控制，且获得最佳性能的工艺窗口狭窄。

在过去的二十多年中，通过强有力的国际研发，有关铝锂合金的制造、成形和处理的一系列问题已经得到解决。由于这些努力，在以下几个方面已经取得突破：①具有最佳化学成分的大规格铝锂合金锭的熔铸技术；②基于过程模拟的先进工艺；③热和热机械处理以实现所需要的微观结构-力学性能（强度、断裂韧性，以及疲劳和疲劳裂纹扩展抗力）组合；④包括超塑性成形和搅拌摩擦焊在内的制造技术。于是，许多专利铝锂合金的各种制品已经实现了商业化生产。与传统的 $2 \times \times \times$ 和 $7 \times \times \times$ 系铝合金比较，这些（铝锂）合金具有更高的弹性模量（15%~25%）和更高的比强度（8%~15%），因此为航空航天设计人员提供了一个能够显著降低航空航天结构的重量以实现更高的燃油效率和更高的有效载荷的机会。

本书系统地记录了在诸多技术领域取得的显著进步，即大量各式各样的问题是如何解决的，从而使得铝锂合金的生产和发展成为现实。所有作者在这个相对困难的铝合金类别的研究方面都有长期的经验，并取得了值得称道的原创性成果。本书的概论部分（前两章）以一个关于历史发展过程的极好的概述作为开始，总结了铝锂合金的现状，并以铝锂合金的应用为背景阐述了航空结构设计的诸多方面。在后续4个部分中，分别论述了关于铝锂合金的以下各方面：物理冶金（共3章）、工艺技术（共4章）、力学行为（共5章）和应用（共两章）。我特别高兴地看到，为本书做出贡献的多位作者和三位主编中的两位均来自印度国防冶金研究实验室，而我本人30年前曾在那里工作。也正巧是在那时，铝锂合金开始引起国际关注。

这本精心编辑的、为铝锂合金提供了大量信息的书，对于在科学上很有意义并在技术上具有挑战性的合金来说，很显然将是最为宝贵的参考文献之一。

P. 拉姆·拉奥 (P. Rama Rao)

FNAE, FNA, FASc., FNASc, FREng., 美国工程院外籍院士, FTWAS, FUAS

现任 ARCI 董事会主席, 海得拉巴, 印度
原国防冶金研究实验室主任, 印度国防研究与发展组织,

海得拉巴, 印度

原印度政府科学技术部 (DST) 秘书长, 新德里, 印度

原印度原子能监管委员会主席

原海得拉巴大学副校长

原 IIM、ISCA、IAS、INAE、MRSI、ICF、IUMS 主席, 印度核学会现任理事长

引 言

铝锂 (Al-Li) 合金的历史可以追溯到 20 世纪 20 年代, 但只是到了 90 年代, 对于这些合金的基础性理解才趋于成熟, 并使得具有优异的工程性能组合的铝锂合金家族 (系列) 得到了发展。这些就是所说的第三代铝锂合金。为了与业已在航空航天结构“高技术”领域已经成熟应用的传统铝合金和碳纤维复合材料竞争, 这些铝锂合金需要具有优异的综合性能。

本书全面阐述了关于铝锂合金的知识和发展状况, 其内容聚焦于第二代和第三代 (铝锂) 合金。从工程性能的角度看, 第二代铝锂合金基本上是失败的, 但是从 20 世纪 70—80 年代对它们的研发中所得到的经验, 对于第三代铝锂合金方向的确定和成功研制则是非常重要的。

本书分为以下几个主要部分:

第 1 部分: 铝锂合金概论 (第 1、第 2 章)

第 2 部分: 物理冶金 (第 3~5 章)

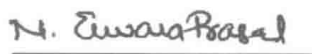
第 3 部分: 工艺技术 (第 6~9 章)

第 4 部分: 力学行为 (第 10~14 章)

第 5 部分: 应用 (第 15、第 16 章)

每一章讨论一个特定专题并在该章的最后一节进行总结。参考文献列在每一章中, 而不是集中于全书之末。鉴于本书范围很广, 所以需要有许多作者, 通常每一章的作者都多于一位, 他们的贡献得到了主编们的承认和鸣谢。

铝锂合金当前的商业化发展是如此之快, 以至于本书在未来的几年中肯定会过时。尽管如此, 我们仍然希望它能够在可以预见的将来为铝锂合金研究提供一个有价值的参考。


N Eswara Prasad


Amol A Gokhale


R.J.H Wanhill

N. 伊斯瓦拉·普拉萨德 (N. Eswara Prasad)

阿莫尔·A. 哥克哈勒 (Amol A. Gokhale)

R. J. H. 汪尼尔 (R. J. H. Wanhill)

2013 年 9 月

关于主编

伊斯瓦拉·普拉萨德 (N. Eswara Prasad) 在印度理工学院 (BHU) 获得工学学士 (1985 年) 和博士 (1993 年) 学位, 1985 年进入印度国防研究与发展组织 (DRDO) 工作。自那时起, 普拉萨德博士就从事各种航空材料的设计、研发、寿命预测, 以及直至生产的适航审定, 包括: 铝和铝锂合金; 钼和钛金属间化合物; 航空用钢; 钛基和镍基高温合金; 单体陶瓷如结构氧化铝、石墨、碳化硅; 碳、二氧化硅和碳化硅基连续纤维增强陶瓷基复合材料 (CF-CC)。他的研究贡献主要是在变形行为、疲劳幂定律关系、蠕变-疲劳交互作用 (CFI)、疲劳与断裂的微观机制等方面。普拉萨德博士发表了 140 篇经同行评审的期刊论文、近 200 篇内部报告以及审定文件。普拉萨德博士获得了多个奖励和承认, 包括 1991 年印度科学协会的“青年科学家奖”、1994 年印度金属研究所的“青年冶金家奖”、德国波恩亚历山大洪堡基金会“洪堡研究学术奖学金” (1998—1999)。印度金属研究所的“Binani 金奖” (2006)、印度政府钢铁部“年度冶金家奖” (2010)。普拉萨德博士是工程师协会会员 (FIE-2009), 印度金属学会会员 (FIIM-2011), 以及 Andhra Pradesh 科学院的院士 (FAPASc-2011)。普拉萨德博士目前担任位于印度海得拉巴的 CEMILAC 的地区性军用适航性 (材料) 中心主任。

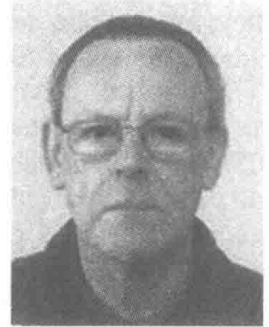


阿莫尔·哥克哈勒 (Amol A. Gokhale) 1978 年在位于孟买的印度理工学院获得冶金工程学士学位, 并分别于 1980 年和 1985 年获得美国匹兹堡大学的冶金学工程硕士和博士学位。自 1985 年加入 (印度) 国防冶金研究实验室 (DMRL) 以来, 阿莫尔·哥克哈勒博士在大约 20 年的时间里领导了为印度国防服务的第二代铝锂合金研发工作, 包括与俄罗斯的全俄航空材料研究院 (VIAM) 和库姆兹 (KUMZ), 以及印度航空发展局 (ADA) 和斯坦航空公司 (HAL) 的合作, 制造深冲成形的包铝薄板制品。他还领导了用于鱼雷的铝合金铸件研究, 以及用于吸收冲击的铝合金泡沫材料。他最新的贡献是在高超声速飞行器的热结构材料和组件的研发方面。目前他正在与白俄罗斯的粉末冶金实验室合



作研发镍基泡沫材料。哥克哈勒博士获得的主要奖项包括：国家研究发展公司“技术创新奖”（1994）、印度政府钢铁部“年度冶金家奖”（2000）、DRDO“年度科学家奖”（2008）以及印度金属研究所的“GD Birla 金奖”。他于2011年当选印度国家工程院院士。发表了约80篇技术论文，拥有一项专利。哥克哈勒博士现任印度海得拉巴国防冶金研究实验室主任。

罗赛尔·汪尼尔（R. J. H. Wanhill）拥有英国曼切斯特大学理工学院的冶金学博士学位（1968），也是荷兰代尔夫特理工大学的技术科学博士（1995）。他于1970年加入荷兰航空航天研究院（NLR），从那时起一直从事各种航空航天用合金的疲劳和断裂研究，包括许多服役失效（分析）。1978—1996年，罗赛尔任NLR材料部部长，1979—1980年期间他还是荷兰代尔夫特理工大学材料专业的兼职教授。他是《断裂力学》（1984）一书的共同作者，该书现在出版了第2版。他撰写了320篇报告和公开发表的文章。2009年11月至2010年5月，罗赛尔在澳大利亚墨尔本的国防科技研究院（DSTO）做“访问学者”。他与DSTO的同事们合作发表了多篇期刊论文、撰写了书的4章（包括本书中的一章）、一部专著，以及一个失效分析教程（用于一天的教学）。1994年起，罗赛尔研究了古代银制品的脆化问题，并且对这个看似难解却又重要的问题发表了数篇论文。2002年，荷兰航空航天研究院董事会授予罗赛尔第一个“Dr. ir. B. M. Spee 奖”，以表彰他在航空航天领域中做出的杰出贡献。罗赛尔现在是NLR的航空航天飞行器分部的首席研究科学家。



主编的致谢

本专著论述了在近几十年来出现的在航空航天应用中具有巨大潜力的最为激动人心的合金之一，即铝锂合金的过去、现在和将来，重点论述了合金的制备工艺、力学行为、性能以及航空应用。如果没有所有作者和位于印度海得拉巴和纽约爱思唯尔的编写办公室成员们的全力支持和全身心投入，要完成如此艰巨的任务谈何容易！我们要向他们中的每一位表达深切的感谢，他们是：Edgar A. Starke, Jr 教授、T. R. Ramachandran 教授、K. Satya Prasad 博士、Kumar V. Jata 博士、Vijaya Singh 博士、G. Jagan Reddy 博士、S. B. Prabu 博士、K. A. Padmanabhan 教授、G. Madhusudhan Reddy 博士、T. S. Srivatsan 教授、Enrique J. Lavernia 教授、V. V. Kutumbarao 教授、G. Malakondaiah 博士、S. P. Lynch 教授、Gary H. Bray 博士、N. J. Henry Holroyd 博士、Roger C. Newman 教授、A. K. Vasudevan 博士、B. Saha 先生、G. Gouda 先生、Dr. K. Tamilmani 博士，以及海得拉巴本书秘书处的成员 Y. Balaji 和 Ch. V. A. Narasayya 先生、M. Swarna Bai 和 C. Poornia 女士，还有 P. Varsha 小姐。我们衷心感谢著名科学家、印度铝锂合金研发计划的领导者 Palle Rama Rao 教授为本书所做的精彩的序言。本书的大多数作者曾经在铝锂合金方面做过或者指导过博士论文，这类论文包含着数年的研究、发展、生产和（适航）取证。他们中的有些人还精心审阅了本书的一些章节。这方面特别应该提及的是：Ed Starke 教授审阅了航空结构设计那一章，Kota Harinarayana 博士和 P. S. Subramanyam 先生审阅了航空结构与适航，David Laughlin 教授审阅了相图和相反应，T. R. Ramachandran 教授审阅了微观结构演化/熔炼和铸造，Vikas Kumar 博士审阅了疲劳裂纹扩展，S. V. Kamat 审阅了断裂韧性。我们对所有这些审阅者深表感谢。

多位作者已经把关于铝锂合金，特别是那些有关第三代铝锂合金的科学、技术和设计数据无私地共享。实际上，在本书的编写过程中曾经有过这样一个阶段，即如果没有第三代铝锂合金的加入就不可能取得任何进展。在这个决定性时刻，Ed Starke 教授和 Gary H. Bray 博士所提供的支持是非常关键的，这个支持本身就把本书的进程推向完成。关于这一点，我们还要感谢本书所引用文献的所有作者们，他们慷慨地允许我们在本书中把他们的数据和图表纳入。

最后，很高兴地感谢爱思唯尔团队的专业性支持，特别是采编 Stephen P. Merken 先生、销售副总裁 Amorette Padersen 小姐，以及由编辑项目经理 Jeffrey M. Freeland 先生领导的本书设计团队的全体成员。



N Eswara Prasad



Amol A Gokhale



RJH Wanhill

N. 伊斯瓦拉·普拉萨德 (N. Eswara Prasad)

阿莫尔·A. 哥克哈勒 (Amol A. Gokhale)

R. J. H. 汪尼尔 (R. J. H. Wanhill)

2013 年 9 月

译者序

锂是最轻的金属元素。铝锂合金是指添加了锂元素 (Li) 的一类铝合金, 自世界上第一种铝锂合金于 1924 年问世以来, 已经历了近百年的漫长发展过程。铝锂合金研发和应用的主要驱动力是通过在铝合金中添加锂元素来降低密度并提高模量, 从而提升合金的比强度和比刚度, 以实现减重的目的, 因而对航空航天飞行器结构的设计和选材具有很大的吸引力。

铝锂合金的发展已经历了三代。第二代铝锂合金的研发始于 20 世纪 80 年代前后, 但由于较高的锂含量 ($>2\text{wt}\%$) 所导致的诸多缺点, 包括力学性能的强烈各向异性、较低的短横向韧性和断裂韧性以及热不稳定性, 第二代铝锂合金基本上未获得成功。自 20 世纪 90 年代起, 通过降低锂含量 ($0.75\text{wt}\% \sim 1.8\text{wt}\%$) 并添加其他合金元素, 第二代合金的诸多弊端得以克服。随后出现的一系列第三代铝锂合金具有优异的综合性能, 在航空航天飞行器结构上应用的优势凸显。进入 21 世纪以来, 铝锂合金与长期在航空航天领域占据主导地位的传统铝合金和新兴的碳纤维复合材料竞争渐趋激烈。由于铝锂合金的材料制备及零部件制造工艺都与传统铝合金基本相同, 因而可沿用很多现有的技术和设备, 在成形、连接、维修和成本方面也都比复合材料具有明显优势。第三代铝锂合金已经用于洛克希德-马丁公司 F-16 战斗机、空客公司 A380 巨型客机和庞巴迪公司支线飞机、美国 NASA “战神” 运载火箭和航天发射系统, 以及太空探索技术公司的 “猎鹰” 运载火箭; 中国商用飞机有限责任公司的 C919 客机的机身蒙皮也选用了第三代铝锂合金。2014 年该书英文版刚出版, 其主编之一的荷兰航空航天研究院 (NLR) 结构与材料部 Wanhill 博士就向译者推荐该专著。考虑到铝锂合金的国际最新发展和对于我国军民用航空航天工业的重要性, 我们决定将该书译为中文出版。

本书英文版 “Aluminum – Lithium Alloys, Processing, Properties, and Applications” 2014 年由著名的爱思唯尔有限公司 (ELSEVIER) 出版。它是在 N. Eswara Prasad、Amol A. Gokhale 和 R. J. H. Wanhill 三位主编的精心组织下, 由来自美国、印度、澳大利亚、加拿大、英国和荷兰的二十多位在铝锂合金的研发与应用方面造诣高深的专家学者共同撰写的。该书由 5 个部分组成: 铝锂合金概论、物理冶金、工艺技术、力学行为和应用 (含适航认证)。它从现代材料科学与工程的四要素 (结构与成分、合成与加工、性质、使用性能) 全方位地提供了关于铝锂合金, 特别是第三代铝锂合金的国际最新研究成果。该书是迄今国际上有关铝锂合金的

最为系统齐全的技术资料，为铝锂合金的研发及其在航空航天领域的应用提供了十分宝贵的信息，对于从事该领域科研生产与应用的技术和管理人员，具有非常重要的参考价值。书中对从结构选材—指标确定，到材料制备—工艺技术—性能评价—应用验证—适航审定的每个环节研究工作的考虑，具有普适性，对于我国航空航天关键材料的研制应用，具有重要的指导意义。

本书由北京航空材料研究院戴圣龙、吴学仁和中国商飞上海飞机设计研究院韩克岑共同主持翻译。参加翻译和校对的人员还有：杨守杰、李国爱、谢优华、陈军洲、李超、冯朝辉、郭绍庆、王旭东、胡本润、陈勃、骆晨、李红萍、寇飞行。各部分的译校人员见附表。全书译文由戴圣龙、吴学仁、韩克岑、张坤、杨守杰审校定稿。

由于本书涉及面很广，译校人员较多，因此译文风格难以统一。限于译者水平，译文错误在所难免，敬请读者批评指正。

译 者

中航工业北京航空材料研究院
中国商飞上海飞机设计研究院
中航工业第一飞机设计研究院

2016年3月

译审委员会

主 任：戴圣龙 吴学仁 韩克岑
委 员：谢优华 章 骏 程普强 张庆玲 张 坤
杨守杰 陈军洲

翻译和审校人员

章节	翻译人员	审校人员	审校定稿人员
第 1 章	戴圣龙，杨守杰	李国爱	戴圣龙 吴学仁 韩克岑 张 坤 杨守杰
第 2 章	吴学仁，李红萍	吴学仁	
第 3 章	李国爱	杨守杰	
第 4 章	谢优华	杨守杰	
第 5 章	陈军洲	李国爱	
第 6 章	杨守杰	陈军洲	
第 7 章	李 超	李国爱	
第 8 章	冯朝辉	王旭东	
第 9 章	郭绍庆	冯朝辉	
第 10 章	王旭东	陈军洲	
第 11 章	胡本润	吴学仁	
第 12 章	吴学仁	陈 勃	
第 13 章	陈 勃	吴学仁	
第 14 章	骆 晨	王旭东	
第 15 章	寇飞行，吴学仁	吴学仁	
第 16 章	李红萍，吴学仁	吴学仁	
前后辅文、附录	吴学仁	杨守杰	

目 录

第 1 部分 铝锂合金概论

第 1 章 铝锂合金的历史发展与现状	(3)
1.1 简介	(3)
1.2 锂元素添加到铝合金中：初期	(3)
1.2.1 第一代现代铝锂合金的发展历史	(4)
1.2.2 美铝公司的 2020 合金发展	(4)
1.2.3 2020 合金的塑性问题	(5)
1.2.4 铝锂合金在苏联的发展	(6)
1.3 现代铝锂合金的发展	(7)
1.3.1 第二代铝锂合金	(8)
1.3.2 生产制造问题	(9)
1.3.3 Al-Li-x 合金中析出相的结构	(9)
1.3.4 预先变形对时效过程中析出相的影响	(11)
1.3.5 时效后 Al-Li-x 合金的变形行为	(13)
1.3.6 Al-Li-x 合金中应变局域化预测	(15)
1.3.7 第二代铝锂合金的应用及问题	(16)
1.3.8 第三代铝锂合金	(16)
1.3.9 导致 Al-Li-x 系合金性能改善的基本信息	(17)
1.4 结束语	(18)
致谢	(19)
参考文献	(19)
第 2 章 飞机结构与铝锂合金应用	(24)
2.1 引言	(24)
2.2 飞机结构的性能要求	(24)
2.2.1 机身/压力舱	(25)
2.2.2 机翼	(25)
2.2.3 尾翼 (尾部)	(26)

2.3 飞机结构对铝锂合金工程性能的要求	(26)
2.3.1 锂含量的关键作用：密度和刚度	(26)
2.3.2 强度和韧性	(29)
2.3.3 损伤容限	(30)
2.4 铝锂合金家族	(34)
2.4.1 第二代铝锂合金	(34)
2.4.2 第三代铝锂合金	(36)
2.5 第三代铝锂合金的性能研发和综合权衡举例	(38)
2.5.1 机身/压力舱	(38)
2.5.2 上机翼	(40)
2.5.3 下机翼	(43)
2.5.4 翼梁、肋和其他内部结构	(45)
2.6 服役资格鉴定程序	(46)
2.7 总结和结论	(47)
参考文献	(48)

第 2 部分 物理冶金

第 3 章 铝锂合金的相图及相反应	(53)
3.1 引言	(53)
3.1.1 合金发展历程	(53)
3.1.2 合金化元素和成分的影响	(54)
3.2 相的特征	(56)
3.3 Al - Li 二元合金体系	(57)
3.4 三元体系	(61)
3.4.1 Al - Li - Mg 体系	(61)
3.4.2 Al - Li - Cu 体系	(63)
3.4.3 Al - Cu - Mg 体系	(65)
3.4.4 Al - Li - Zr 三元体系	(67)
3.5 四元 Al - Li - Cu - Mg 体系	(67)
3.5.1 相平衡	(67)
3.5.2 商业化 Al - Li 合金中析出相的回顾	(68)
3.6 Al - Li 合金中的微合金化元素	(72)
3.6.1 用于晶粒细化的微合金化元素	(72)

3.6.2 用于强化的微合金化添加元素	(73)
3.7 杂质相和晶粒边界析出相	(74)
3.7.1 杂质	(74)
3.7.2 析出相和 PFZ	(74)
3.8 本章小结	(75)
致谢	(77)
参考文献	(77)
第 4 章 铝锂合金的显微组织与析出物特征	(85)
4.1 简介	(85)
4.2 固溶热处理状态下的显微组织	(87)
4.3 时效硬化行为	(87)
4.3.1 时效硬化曲线	(88)
4.3.2 时效不同阶段的显微组织	(89)
4.3.3 高温曝露后的显微组织	(91)
4.4 析出物特征	(92)
4.4.1 Al_3Li (δ') 相	(92)
4.4.2 Al_2Cu (θ') 相	(94)
4.4.3 三元 $\text{Al}-\text{Li}-\text{Cu}$ 合金中的 Al_2CuLi (T_1) 相	(94)
4.4.4 四元 $\text{Al}-\text{Li}-\text{Cu}-\text{Mg}$ 合金中的 Al_2CuLi (T_1) 相	(97)
4.4.5 Al_2CuMg (S') 相和平衡 S 相	(98)
4.4.6 Al_3Zr (β') 相	(102)
4.4.7 AlLi (δ) 相	(105)
4.4.8 Al_6CuLi_3 (T_2) 相	(106)
4.5 小结	(109)
致谢	(110)
参考文献	(110)
第 5 章 铝锂合金中的织构及其对性能的影响	(118)
5.1 引言	(118)
5.2 $\text{Al}-\text{Li}$ 合金的织构	(121)
5.3 一级加工过程中织构演变	(123)
5.3.1 二元、三元 $\text{Al}-\text{Li}$ 合金中 β 丝织构组分 (B_s 、S 和 Cu)	(123)
5.3.2 α 丝织构组分 (高斯和立方/旋转立方)	(125)
5.3.3 冷热成形过程中析出相和滑移特性的作用	(127)
5.3.4 非八面体滑移的影响	(127)