



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属

理论与技术丛书
SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL PUBLICATIONS OF
NONFERROUS METALS

铝锌镁系合金钪锆复合 微合金化

Sc AND Zr MICROALLOYING IN Al-Zn-Mg SERIES ALLOYS

邓英 尹志民 徐国富 著
Deng Ying Yin Zhimin Xu Guofu



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

铝锌镁系合金 钪锆复合微合金化

Sc and Zr Microalloying in Al – Zn – Mg Series Alloys

邓英 尹志民 徐国富 著

Deng Ying Yin Zhimin Xu Guofu



中南大学出版社

www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

铝锌镁系合金钕锆复合微合金化/邓英,尹志民,徐国富著.
—长沙:中南大学出版社,2015.11
ISBN 978-7-5487-2073-7

I. 铝... II. ①邓... ②尹... ③徐... III. 铝合金-微合金化-研究
IV. TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 296908 号

铝锌镁系合金钕锆复合微合金化

邓 英 尹志民 徐国富 著

☐责任编辑 史海燕 刘小沛

☐责任印制 易建国

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 湖南鑫成印刷有限公司

☐开 本 720×1000 1/16 ☐印张 11.25 ☐字数 216 千字

☐版 次 2015 年 11 月第 1 版 ☐印次 2015 年 11 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2073-7

☐定 价 80.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

本书是一本关于铝锌镁系合金钪锆复合微合金化方面的专著,全书主要内容分为9章。第1章概述了迄今为止钪锆微合金化铝合金及高强铝锌镁系合金的研究成果,指出了有待进一步研究的领域;第2章至第5章研究了不同钪锆含量的铝锌镁系合金铸锭均匀化、合金热轧、冷轧及其随后热处理过程中组织性能演变规律,优化了铝锌镁钪锆合金的制备工艺;第6章至第9章则着重比较研究了铝锌镁钪锆合金板材平面各向异性、腐蚀、焊接和超塑成型等应用性能特点;在此基础上,深入探讨了微量钪锆在铝锌镁系合金制备过程中的存在形式,及其对合金强度、再结晶、各向异性、焊接、腐蚀和超塑变形的作用机理,旨在为钪锆复合微合金化铝锌镁合金的制备和应用提供理论和实验依据。该书涵盖的内容对开发新一代航天用高强高韧、耐蚀、高焊接性和高超塑性铝合金具有重要参考价值和借鉴意义。

该书内容丰富,数据详实,结构严谨,可读性强,可作为材料科学与工程相关专业和材料显微分析测试教学或参考用书,也可供从事铝合金科研、开发和生产的科技人员参考。

作者简介

About the Authors

邓英,女,1986年生,博士,博士后,2012年中南大学十佳博士,毕业留校任中南大学材料科学与工程学院讲师。主要从事高性能铝合金研究与开发、铝合金微合金化强韧化、超塑性、焊接、腐蚀方面的研究,在扫描、透射电子显微分析技术方面有专长。公开发表论文28篇,其中在SCI外刊以第一或通讯作者发表论文15篇,主持中国博士后基金面上项目1项,主持粉末冶金国家重点实验室开放课题1项,2015年获湖南省科技创新人才计划资助。

尹志民,男,1946年生,1987年加拿大Toronto大学留学回国人员,博士,博士生导师,中南大学“材料物理与化学”国家重点学科二级教授,享受政府特殊津贴。主要从事高性能铝合金和高强高导铜合金研制与开发。先后主持完成国家自然科学基金3项、国家“973”项目子课题2项、总装预研1项、国家“863”高技术1项、民口配套2项、科技部创新基金和国家重点新产品各1项、省部级科研项目6项。作为课题第二负责人配合产业单位承担“九五”和“十五”攻关项目各1项、民口配套材料研究项目9项。成功研制了2种用铈和锆微合金化的铝镁基和铝锌镁基合金,产品应用于航天部门;研制开发了用于高速、地铁和轻轨列车大功率变频调速异步牵引电动机的铜合金转子部件,产品被认定为国家重点新产品。获国家科技进步二等奖1项、中国有色金属工业科技进步一等奖2项、二等奖4项、湖南省科技进步二等奖3项,发明专利5项,发表论文236篇、专著2部,指导博士后5人,博士研究生20人,硕士研究生52人。

徐国富,男,1966年生,教授,博导,现任中南大学材料与工程学院副院长,全国高校材料学科实验教学研究会副理事长,湖南省电机工程学会金属焊接专委会副主任委员,湖南省精密仪器测试协会失效分析专委会委员。主要从事新型有色金属材料的设计、加工制备和组织性能与结构表征,以及材料的失效分析和性能测试。先后主持国家支撑计划、装备预研重点基金和军品配套、横

向合作项目 10 余项,公开发表高水平学术论文 40 余篇,指导博士研究生 4 人,硕士研究生 24 人。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委 员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张 懿	中国工程院院士	陈 景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周 廉	中国工程院院士	钟 掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

陈春阳(教授 中南大学党委常委、副校长)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东 王飞跃

委 员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 谭晓萍

陈灿华 胡业民 史海燕 刘 辉 谭 平

张 曦 周 颖 汪宜晔 易建国 唐立红

李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础，是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国，我国在有色金属研究领域，特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速，产量连年来居世界首位，有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时，有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出，对国外资源的依赖程度逐年增加，严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展，已探明的优质矿产资源接近枯竭，不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机，而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后，对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合有色金属科技图书的出版，对于提高我国有色金属工业的自主创新能力，促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用，确保我国有色金属产业的可持续发展，具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目，《有色金属理论与技术前沿丛书》计划出版 100 种图书，涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。《有色金属理论与技术前沿丛书》瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在《有色金属理论与技术前沿丛书》的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、研究院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王淀佐

2010年12月

前言

Foreword

本书是关于高强高韧、耐蚀、高焊接性和高超塑性铝锌镁钕锆合金研究方面的专著,是2008年出版的《钕和含钕合金》专著的延续和发展。铝锌镁钕锆合金由于强度高、韧性好、抗应力腐蚀强,特别是它具有传统高强铝锌镁合金所缺少的高焊接性和超塑成型特性,在航天航空、舟桥和一些军用焊接构件和需要超塑成型的构件中具有显著优势。“十二五”期间,铝锌镁钕锆合金研究被列入国家有关部门研究计划项目,本工作是上述项目研究的一部分,主体内容侧重于材料制备过程显微组织结构演变以及与应用性能特点相关的基础研究。在此基础上,深入探讨了微量钕锆在铝锌镁基合金制备过程中的存在形式和作用机理,研究旨在为这种合金的制备和应用提供理论和实验的依据。

研究过程中,材料制备得到东北轻合金有限责任公司科研部的大力支持,尤其要感谢何振波教授级高工、聂波教授级高工、刘显东高工、路丽英高工、林森高工、王英君高工和丛福官高工的参与和指导,是他们为本工作提供了高质量不同钕锆含量的铝锌镁合金铸锭。本书试验研究得到中南大学材料学院潘清林教授、姜锋教授和物理院彭勇宜副教授的细心指点与帮助;铸锭均匀化、轧制、热处理和组织性能检测在中南大学材料学院新材料工程研究中心和材料实验中心,以及中南大学高等研究中心进行,得到中心老师和课题组研究生的大力协助;氩弧焊和搅拌摩擦焊分别在航天材料与工艺研究所和航空材料与工艺研究所进行,得到雷学锋教授级高工等的大力帮助,作者在此一并表示深深的谢意。

铝钕合金研究发展很快,内容也很丰富,限于时间和作者的水平,书中不妥之处在所难免,希望同行专家、读者批评指正。

作者

2015年9月

目录

Contents

第 1 章 绪论	1
1.1 钕锆微合金化铝合金	1
1.1.1 研究和应用概况	1
1.1.2 钕锆微合金化对铝合金影响	3
1.1.3 钕在铝合金中的添加原则	6
1.1.4 钕锆微合金化铝合金制备过程中的特点	8
1.2 Al-Zn-Mg 合金时效析出及其强化机制	9
1.2.1 时效析出序列	9
1.2.2 时效析出相	9
1.2.3 强化机制	12
1.3 铝合金应用性能	14
1.3.1 腐蚀性能	14
1.3.2 焊接性能	15
1.3.3 超塑性能	15
1.4 当前需要研究的内容	16
参考文献	17
第 2 章 铸锭均匀化处理过程中的组织性能演变	23
2.1 铸态合金显微组织特点	23
2.1.1 扫描电子显微组织	23
2.1.2 DSC 分析	25
2.2 均匀化处理对铸态合金性能组织影响	25
2.2.1 硬度和电导率	25
2.2.2 均匀化处理对铸锭合金组织影响	28
2.3 分析与讨论	34
2.3.1 钕锆添加对 Al-Zn-Mg 合金铸锭的晶粒细化效果	34

2.3.2	均匀化处理过程中合金组织性能演变	35
2.3.3	合宜的均匀化工艺选择	38
	参考文献	38
第3章	均匀化铸锭热加工过程中的组织性能演变	40
3.1	均匀化处理后的铸锭热塑性研究	40
3.1.1	真应力 - 真应变曲线	40
3.1.2	高温拉伸力学性能	42
3.1.3	高温拉伸后显微组织	43
3.2	热轧板材组织与性能	46
3.2.1	力学性能	46
3.2.2	显微组织	46
3.3	分析与讨论	48
3.3.1	真应力 - 真应变曲线特征分析	48
3.3.2	铸锭热变形过程中的组织性能演变	49
	参考文献	49
第4章	钪锆微合金化对冷轧板材再结晶作用机理	50
4.1	不同退火温度下研究合金宏观织构演变	50
4.1.1	ODF 图	50
4.1.2	α 线及 β 线	52
4.2	不同退火温度下合金微观织构演变	54
4.3	分析与讨论	60
4.3.1	冷轧合金显微组织及晶内倾斜线	60
4.3.2	Al - Zn - Mg 合金再结晶织构及机制	62
4.3.3	Al - Zn - Mg - Sc - Zr 合金再结晶织构及机制	63
	参考文献	71
第5章	固溶 - 时效工艺优化及钪锆微合金化强化机理	75
5.1	冷轧板材显微组织	75
5.1.1	DSC 分析	75
5.1.2	扫描电子显微组织及能谱分析	76
5.1.3	物相分析	77
5.1.4	透射电子显微组织	78
5.2	固溶处理对合金冷轧板材性能组织的影响	78

5.2.1 力学性能	78
5.2.2 显微组织	80
5.3 时效处理对合金性能组织的影响	83
5.3.1 时效硬化曲线	83
5.3.2 力学性能	84
5.3.3 显微组织	85
5.4 分析与讨论	87
5.4.1 钎锆微合金化对 Al-Zn-Mg 合金时效板材再结晶的影响	87
5.4.2 钎锆微合金化对 Al-Zn-Mg 时效析出的影响	89
5.4.3 钎锆在 Al-Zn-Mg 时效合金中的强化机制	92
参考文献	93
第 6 章 钎锆微合金化对成品板材各向异性作用机理	94
6.1 成品板材平面各向异性	94
6.2 研究合金薄板制备过程中的织构演变	96
6.3 分析与讨论	100
6.3.1 钎锆微合金化在 Al-Zn-Mg 合金板材制备过程中对织构的影响	100
6.3.2 钎锆微合金化对 Al-Zn-Mg 合金成品板材各向异性的影响	101
参考文献	105
第 7 章 钎锆微合金化及时效处理对成品板材腐蚀行为的影响	107
7.1 应力腐蚀研究	107
7.2 晶间腐蚀行为	112
7.3 剥落腐蚀行为	113
7.4 电化学分析	115
7.4.1 极化曲线	115
7.4.2 EIS	116
7.5 分析与讨论	118
7.5.1 微量钎锆对合金腐蚀性能的影响	118
7.5.2 时效制度对合金腐蚀性能的影响	118

参考文献	119
------	-----

第8章 钎钎微合金化对成品板材焊接接头组织性能的

影响	122
8.1 焊接性能	122
8.2 TIG 接头显微组织	125
8.3 FSW 接头显微组织	131
8.4 分析与讨论	136
8.4.1 钎钎微合金化对 Al-Zn-Mg 合金 TIG 接头 显微组织和力学性能影响	136
8.4.2 钎钎微合金化对 Al-Zn-Mg 合金 FSW 接头 显微组织和力学性能影响	138
8.4.3 TIG 和 FSW 焊接接头组织和性能比较	139
参考文献	140

第9章 钎钎微合金化在 Al-Zn-Mg 板材超塑变形中的作用

	142
9.1 热拉伸变形行为	143
9.1.1 断后延伸率	143
9.1.2 真应力-真应变曲线	145
9.1.3 应变速率敏感因子和变形激活能	146
9.2 热变形过程中的显微组织演变	148
9.2.1 初始显微组织	148
9.2.2 断口和空洞特征	149
9.2.3 晶粒、晶界和织构演变	152
9.3 分析与讨论	156
9.3.1 钎钎微合金化对 Al-Zn-Mg 板材热变形机制的 影响	156
9.3.2 实现 Al-Zn-Mg 合金高应变速率超塑性的 钎钎微合金化机理	158
参考文献	161

第1章 绪论

1.1 钪锆微合金化铝合金

将微量元素($w \leq 0.5\%$)^①添加或者复合添加到合金中,从而大幅度提高合金性能的技术称为微合金化技术。在所有微合金化元素中,钪可最大程度强化铝合金^[1-5]。在添加微量钪的同时复合添加微量锆,不但能够降低钪的有效添加量,节约成本,还能进一步提高铝合金综合性能。与商业铝合金相比,钪锆复合微合金化铝合金具有比强度高、韧塑性好、耐蚀性能和焊接性能优异等特点,是新一代航天航空、舰船、兵器用高性能轻质结构材料^[6-14]。

1.1.1 研究和应用概况

20世纪70年代以后,俄罗斯科学院巴依科夫冶金研究院和全俄轻合金研究院相继对Sc在铝合金中的存在形式和作用机制进行了系统的研究,开发了Al-Mg-Sc、Al-Zn-Mg-Sc、Al-Zn-Mg-Cu-Sc、Al-Mg-Li-Sc和Al-Cu-Li-Sc 5个系列17个牌号的Al-Sc合金,产品主要瞄准航天、航空、舰船的焊接荷重结构件以及碱性腐蚀介质环境用的铝合金管材、铁路油罐、高速列车关键结构件等^[4, 15]。

除苏联外,美国、日本、德国、加拿大等发达国家自20世纪70年代以来,对含钪铝合金也进行了大量研究^[9],且取得了较大进展。目前,俄罗斯宇航局已将Al-Mg-Sc-Zr和Al-Zn-Mg-Sc-Zr合金用作航天飞行器储箱结构和导弹导向尾翼等,美国航天局兰利研究中心开发了牌号为C557的Al-Mg-Sc-Zr合金,该合金可在深冷条件下使用,进一步拓宽了钪锆微合金化铝合金在飞船结构和空间站上的应用范围。

在国内,自1995年起,在国家自然科学基金、863高技术项目和民品配套项目等支持下,先后对Al-Mg-Sc-Zr系和Al-Zn-Mg-Sc-Zr系进行了基础研究和材料研制,取得了一系列成果。“十一五”期间,中国铝业所属东北轻合金有限公司和西南铝业集团与中南大学一道通过产学研结合搭建起了Al-Mg-Sc-

① 本书如无特别交待,默认百分含量为质量分数。

Zr 合金研究开发平台。目前,已经能够为航天提供大规格 Al - Mg - Sc - Zr 合金板材、配用焊丝和锻件,基本上满足了航天、舰船新型号研制的需要。与此同时,在 973 项目的支持下,国内还开展了 Al - Zn - Mg - Sc 和 Al - Cu - Mg - Sc 系的基础研究,在实验室条件下制备出了小规格的板材,性能达到了国外报道水平^[16-18],但是其工程化研究才刚刚开始。

非热处理强化可焊 Al - Mg 合金添加微量钪后,焊接接头强度及基材强度均显著提高,如表 1 - 1 所示。

表 1 - 1 Al - Mg 合金添加微量钪后基材及焊接接头力学性能^[19]

合金/%	基材			焊接接头
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	σ_b /MPa
Al - 6.0Mg - 0.6Mn	340	170	20	320
Al - 6.0Mg - 0.3Sc	420	320	15	390
Al - 4.3Mg - 0.6Mn	270	120	20	250
Al - 4.3Mg - 0.3Sc	380	280	15	330
Al - 2.3Mg - 0.4Mn	190	80	23	180
Al - 2.1Mg - 0.3Sc	310	250	13	270
Al - 1.2Mg - 0.4Mn	140	50	25	80
Al - 1.2Mg - 0.3Sc	260	220	12	230

在高强可热处理强化的 Al - Zn - Mg 系合金基础上,添加微量钪锆的同时添加少量的铜(0.3% ~ 0.5%),可显著提高基材和焊接接头的腐蚀抗力,降低裂纹扩展速率。此外,添加钪锆元素后将使由铜引起的焊接裂纹倾向完全消失,提高可焊性。俄罗斯通过复合添加微量钪锆和少量铜,在 Al - Zn - Mg 系合金的基础上开发了 01970 和 01975 合金。这两种合金基材的抗拉强度高于 500 MPa,未经热处理焊接接头强度高于 450 MPa,此外,该类合金还具有较高的腐蚀抗力。

我国钪资源丰富,是氧化钪主要出口国,通过对钪锆微合金化铝合金的应用和开发,不仅可以帮助我国摆脱目前钪资源应用的局限性,还可以推动我国国民经济发展,促进军事科学技术进步^[16-20]。