

“十一五”国家重点图书出版规划项目

Al

中国有色金属丛书 中国有色金属工业协会组织编写 变形铝合金 热处理工艺

王祝堂 编著

Nonferrous Metals



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



“十一五”国家重点图书出版规划项目



变形铝合金热处理工艺

中国有色金属工业协会组织编写

王祝堂 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

变形铝合金热处理工艺/王祝堂编著. —长沙:中南大学出版社,
2011.12

ISBN 978 - 7 - 5487 - 0392 - 1

I. 变... II. 王... III. 变形合金:铝合金 - 热处理 - 工艺学
IV. TG166.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 186060 号

变形铝合金热处理工艺

王祝堂 编著

☐责任编辑 田荣璋

☐责任印制 文桂武

☐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 长沙瑞和印务有限公司

☐开 本 787 × 1092 1/16 ☐印张 24.75 ☐字数 614 千字 ☐插页

☐版 次 2011 年 12 月第 1 版 ☐2011 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 0392 - 1

☐定 价 82.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

总序



有色金属是重要的基础原材料，广泛应用于电力、交通、建筑、机械、电子信息、航空航天和国防军工等领域，在保障国民经济建设和社会发展等方面发挥了不可或缺的作用。

改革开放以来，特别是新世纪以来，我国有色金属工业持续快速发展，已成为世界最大的有色金属生产国和消费国，产业整体实力显著增强，在国际同行业中的影响力日益提高。主要表现在：总产量和消费量持续快速增长，2008年，十种有色金属总产量2 520万吨，连续七年居世界第一，其中铜产量和消费量分别占世界的20%和24%；电解铝、铅、锌产量和消费量均占世界总量的30%以上。经济效益大幅提高，2008年，规模以上企业实现销售收入预计2.1万亿以上，实现利润预计800亿元以上。产业结构优化升级步伐加快，2005年已全部淘汰了落后的自焙铝电解槽；目前，铜、铅、锌先进冶炼技术产能占总产能的85%以上；铜、铝加工能力有较大改善。自主创新能力显著增强，自主研发的具有自主知识产权的350 kA、400 kA大型预焙电解槽技术处于世界铝工业先进水平，并已输出到国外；高精度内螺纹铜管、高档铝合金建筑型材及时速350 km高速列车用铝材不仅满足了国内需求，已大量出口到发达国家和地区。国内矿山新一轮找矿和境外矿产资源开发取得了突破性进展，现有9大矿区的边部和深部找矿成效显著，一批有实力的大型企业集团在海外资源开发和收购重组境外矿山企业方面迈出了实质性步伐，有效增强了矿产资源的保障能力。

2008年9月份以来，我国有色金属工业受到了国际金融危机的严重冲击，产品价格暴跌，市场需求萎缩，生产增幅大幅回落，企业利润急剧下降，部分行业

已出现亏损。纵观整体形势，我国有色金属工业仍处在重要机遇期，挑战和机遇并存，长期发展向好的趋势没有改变。今后一个时期，我国有色金属工业发展以控制总量、淘汰落后、技术改造、企业重组、充分利用境内外两种资源，提高资源保障能力为重点，推动产业结构调整和优化升级，促进有色金属工业可持续发展。

实现有色金属工业持续发展，必须依靠科技进步，关键在人才。为了提高劳动者素质，培养一大批高水平的科技创新人才和高技能的技术工人，由中国有色金属工业协会牵头，组织中南大学出版社及有关企业、科研院校数百名有经验的专家学者、工程技术人员，编写了《中国有色金属丛书》。《丛书》内容丰富，专业齐全，科学系统，实用性强，是一套好教材，也可作为企业管理人员和相关专业大学生的参考书。经过编写、编辑、出版人员的艰辛努力，《丛书》即将陆续与广大读者见面。相信它一定会为培养我国有色金属行业高素质人才，提高科技水平，实现产业振兴发挥积极作用。

康莉

2009年3月

前言

铝具有一系列的优良性能,诸如密度小、塑性大、导热导电性能好、抗蚀性强、资源丰富、对环境友好、可回收再利用,因而自1888年美国匹兹堡冶金公司开铝工业化生产先河以来,在国民经济的各个部门获得了日益广泛的应用。1890年全世界原铝产量180 t;2008年的产量达到40 050 kt,再生铝的产量约19 500 kt。

中国的铝工业是在新中国成立后建设起来的,特别是改革开放以来的30年取得了更加令人瞩目的长足发展。日本在侵占中国东北三省后于1938年6月在抚顺建成一个原铝生产能力近10 kt/a的小铝厂,在1945年战争期间遭到彻底破坏。该厂在1938年6月至1942年2月共生产45.905 kt原铝。1953年中国在该厂原址重建的抚顺铝厂投产,当年生产原铝400 t。2008年中国原铝产量13 200 kt,1979年(原铝产量3 666.0 kt)至2008年的年平均增长率为21.7%。2008年中国原铝的生产能力已达到18 500 kt/a。

解放前中国只有规模很小的铝板、带、箔轧制工业,共有8个小厂,分布在上海等地,其中较大的5个是:1919年建成的上海益泰信记铝器厂,用2辊轧机生产制造日用品的小铝片;1932年华铝钢精厂在上海建成,总投资100万美元,由加拿大铝业公司、瑞士铝业公司、英国铝业公司共同出资组建,是当时远东地区最大的铝平轧产品厂,主要产品为卷烟包装箔,1933年的产量1 400 t;1938年上海永昌钢精厂投产,生产铝板与铝制器皿;1939年沈阳大信洋行开始生产0.33 mm×400 mm×1200 mm的冲制雪花膏瓶盖的铝板;1947年上海交通钢精厂投产,用所产的铝板制造器皿。新中国成立前中国还不能生产铝管、棒、型、线材、锻件与粉膏等产品。

1954年山东铝厂(代号501厂,现名中铝山东铝业分公司)投产,当年生产氧化铝26.611 kt;1953年抚顺铝厂(代号301厂,现名中铝抚顺铝业有限公司)首次生产400 t原铝;1956年11月哈尔滨铝加工厂(代号101厂,现名中铝东北

轻合金有限责任公司)一期工程建成,板、带、管、棒、型、线材生产能力为 26 kt/a,并于 1958 年开始二期工程(模锻件、铝镁粉、反应堆工艺管)建设,它们都是在前苏联的支援下建设的。

2002 年中国成为原铝锭净出口国,净出口量 206.088 kt,不过中国成为原铝锭净出口国并不是一件十分值得庆幸的事,2008 年净进口原铝锭 11.5 kt(不含铝合金锭),如果将铝合金锭进出口量计算在内,则净出口量为 581.5 kt。实际上中国是一个原铝锭、再生铝合金锭、废铝的净进口者。

中国是一个废旧铝净进口大国,2008 年的净进口量 2 150 kt,如果加上拆解废旧设备所获得的废铝,则相当于净进口废铝约 2 650 kt。

从 2005 年中国成为铝材净出口国,当年的净出口量 63.995 kt,而 2008 年的为 1 550 kt。在可预见的时期内,这会是不可逆转的。

中国从 2004 年起成为铝箔净出口国,当年净出口量 10.550 kt,2008 年的净出口量 355 kt,占产量的 21.5%,预测在 2015 年以前这个比例还会逐年增大,中国会成为世界宽幅铝箔生产基地,截止到 2009 年底中国投产的 2 000 mm 级铝箔轧机约达 30 台,其中国产的 8 台,占总数的 26.7%,2010 年底这种宽幅箔轧机的总数可能超过 40 台,它们的双零箔生产能力可达到 250 kt/a。2006 年中国成为世界初级铝箔强国,2008 年的总产量为 1 173 kt,占全球总产量的 27.8%。

到 2006 年中国一直都是铝板带净进口国,2007 年一举成为净出口国,当年净出口量 37.1 kt,2008 年的净出口量猛增 941%,达到 386 kt,中国已成为世界第二大铝板带生产大国,仅次于美国的。今后二三十年内中国会一直保持铝板带净出口国态势。

2008 年中国铝箔净出口量 355 kt,比上年度增加 31.5%,2006 年中国迈入世界初级铝箔强国行列,再过二三年中国就会登上世界铝箔宝塔的顶尖。

中国从 2001 年开始进入世界铝挤压材净出口国行列,在可预见的时间内,保持净出口国的态势是不会改变的。

从 2007 年开始中国成为各种铝材的净出口国,改革开放 29 年使中国成为所有铝材的净出口国,使中国几代铝加工产业人的梦想成真。不过净出口的铝材应当是用净进口的原铝锭加工的,否则不是在净出口资源与能源,而把污染物留下了吗?

铝及铝合金的热处理是伴随着铝材与铝制品的生产而问世的,19 世纪末铝的工业化生产开始,用铁模铸造铝锭,趁热用 2 辊轧机轧制板材,再用冷轧机轧

薄,但薄到一定厚度后会产生裂边再也轧不下去了。将板材加热到一定温度会变软,这就诞生了铝的退火。冷轧铝板退火处理工艺的采用并不困难,因为那时钢铁工业已具备相当规模,积累了不少有关钢的热处理方面的知识,有些可以移植到铝材生产中。退火成为铝材生产首先采用的热处理工艺。中国对铝材施加退火始于1919年的上海益泰信记铝器厂,而对各种铝材进行全面的各种现代化的退火处理则始于1956年11月中铝东北轻合金有限责任公司的建成投产。

1906年德国科学家维尔姆(Wilm)首先发现铝-铜-镁系合金的时效现象,于是铝合金开始进入真正的淬火-时效的热处理阶段。1956年东北轻合金加工厂的盐浴炉开始运转,从此可对宽1 500 mm、长4 000 mm的铝-铜-镁系及铝-锌-镁-铜系合金板材进行固溶化处理(淬火加热);挤压车间有1台外径2 850 mm、炉膛有效高度17 500 mm、淬火井深18 000 mm的立式淬火炉,可对各种管、棒、型材进行淬火。

人类发展史是与金属材料的应用及其发展紧密相连的,特别是现代航空航天工业的发展,是与铝合金的应用与发展休戚相关的,金属材料在人类文明中占有特别重要的地位。目前铝材在航空航天器中的应用占其自身质量的70%以上,高速轨道车辆自身质量的85%以上由铝贡献的;在中国铝工业是产业关联度高的产业,在现有的124个产业中有113个使用铝产品,占91%。其中在101个物资生产部门中,有96个部门需用铝,占95%;在23个非物资生产部门有17个用铝的,占74%。按投入产出表测算,原材料制造业消耗铝总产品占全部124个产业消耗的32.6%,设备制造产业消耗铝产品占全部124个产业消耗的58.3%,原材料制造业和装备制造业合计消耗占90.9%,可见铝与它们的关系极为密切。制造业包括原材料制造业、消费品制造业和装备制造业,它们是中国经济增长的发动机,其发展对铝工业的发展提供巨大的需求空间,另方面也更增加了铝工业的重要性的快速发展的迫切性。中国铝的消费水平同GDP的相关性相当高,铝的消费量与GDP的线性相关系数均超过0.9(最大为1),达到0.933,而铜则为0.921,同样,中国铝生产量与GDP的线性相关系数也均超过0.9,达到0.980,而铜的为0.968。铝已成为人类使用的第二大金属。

铝是以铝材(板、带、箔、棒、型、线材、锻件、粉膏)与铸件(压铸件与其他铸件)的形式得到应用的,其中铝材占铝消费总量的70%左右,铸造产品占30%左右。不管是铝材还是铸造产品,在其生产过程中大部分都要经过一次或几次热处理,只有不到占总量的0.4%的粉、膏不需要经过热处理。所谓金属热处理是

借助于热作用(有时也施以机械作用或其他作用)来人为改变金属合金内部的组织和结构,从而获得所需要性能的工艺操作。在金属材料和制品的生产过程中,热处理是不可或缺的重要环节之一,有些材料的生产如板、带材轧制没有热处理工序就无法进行。

铝合金铸件通常要进行消除内应力的低温退火或完全退火,有的还要进行固溶处理(淬火)与时效,如低压铸造轮毂等。

铝材整个生产中的热处理包括铸锭的均匀化退火、压力加工过程中中间退火和成品的退火、固溶处理(淬火)、时效,以及形变热处理,等等。

铝材与铸件生产过程中之所以必须热处理,其主要作用和目的是:改善和提高工艺性能,不但能保证后续工序的顺利进行,如均匀化退火不但可以改善铸锭的热加工性能、成品性能和材料的抗蚀性;中间退火与预退火可提高材料的塑性,改善其冷加工性能;为了提高材料使用性能,充分发挥材料潜力,如2XXX系、6XXX系、7XXX系合金以及铝-锂合金、铝-钪合金等经固溶处理与时效或形变热处理后,不但力学性能可大幅度提高,而且各项性能可得到最佳搭配,有良好的综合使用性能,对延长工件使用期限与节约资源起了巨大的作用。

在铝材与铝制品实际生产中采用的热处理工艺,尽管其形式和工艺参数各式各样,但就其热处理的基本过程即热作用过程来说,无论哪种热处理工艺,基本上都是由加热、保温和冷却三个阶段组成,而且整个工艺过程都可以用加热速度、加热温度、保温时间、冷却速度及总处理时间即热处理周期等工艺参数来描述。当然,具体的热处理过程相当复杂,工艺参数有时也不少,特别是当热处理同时还有机械作用或其他作用等时。不过根据热处理外界对金属材料施加的基本作用——热与机械作用等,以及材料内部组织、结构与状态变化特点,常用的铝合金热处理形式可分为基本热处理与形变热处理。

所谓基本热处理(有时也称为常规热处理)是以热作用为主要过程的热处理,即只有热作用对铝材的内部组织、结构、状态和性能起决定性的影响,材料的化学成分、形状和尺寸在热处理前后并不变化或仅发生小的变化,有时形状会发生大的变化,但通过随后的机械作用如矫正可得到复原。基本热处理的形式有:铸锭均匀化退化,基于回复、再结晶的退火,基于固溶度变化的退火,固溶处理(淬火),时效,形变热处理。

铸锭均匀化退火(扩散退火)。均匀化退火是一种用于消除或减少铸态合金非平衡状态的热处理,其基本过程和主要目的是通过高温时合金内部(固溶体)

原子的扩散消除铸锭组织的晶内偏析,使晶内化学成分均匀,组织达到或接近平衡状态,改善多相合金中第二相的形状和分布特征,提高合金塑性,改善加工性能和产品使用性能。

基于回复与再结晶的退火。经冷加工后的铝材组织处于亚稳定状态,内能升高,强度与硬度增加,组织发生变化形成纤维状,有时还会出现织构。若将其加热到一定的温度,会发生回复与再结晶,变形结构也会发生变化,从而在一定程度上或完全消除了冷变形造成的亚稳定状态,使铝材获得所需的组织、结构与性能。消除内应力的退火也归于此类。

基于固溶度变化的退火。2XXX系、6XXX系、7XXX系合金的合金元素在 α 铝固溶体的溶解度均随着温度的升降而增减,因此适当地控制冷加工材料的加热和冷却工艺,可以获得不同浓度的基体相,同时改变第二相的大小、形状和分布,从而赋予材料不同的性能。属于这类退火的有完全退火与不完全退火两类,高镁合金(镁含量 $\geq 25\%$)材料经多相化退火后再冷加工, β 相几乎均匀地分布于铝基 α 固溶体晶粒之内,可提高其抗晶间腐蚀及抗应力腐蚀开裂抗力。

固溶处理也称淬火。将铝材或铝件加热到尽可能高的温度,使诸多的强化相尽可能多地溶解,形成均匀的高温固溶体,这种过程称为固溶化,将这种高温状态以过冷或过饱和形式固定到室温的工艺称为淬火,在淬火过程中铝的晶体结构不发生变化。淬火目的是为了获得过饱和固溶体,给随后的时效作好组织准备,2XXX系、6XXX系、7XXX系合金、铝-锂及铝-铈合金一般都要经过固溶处理(淬火)。

时效。时效是淬火的后续工序,没有淬火就没有时效。可热处理强化铝合金在淬火后得到的过饱和固溶体都处于高能量的亚稳定状态,只要可能(加热到一定温度或在室温保持较长时间)就会向较低能量的稳定状态转化,这种转化是通过过饱和固溶体的分解来实现的,把这种在室温保持或加热使过饱和固溶体分解的热处理称为时效。在室温保持的称为自然时效,须加热到一定温度才能实现的称为人工时效。

形变热处理。这是一种将塑性变形和热作用相结合的热处理,不过只有将那些能提高金属材料内部缺陷密度的塑性加工与能发生固态相变的热作用结合起来,才能显著改变材料的组织和结构,并明显地提高材料性能的工艺才是形变热处理,总之形变热处理是塑性变形的加工强化与热处理固溶体的析出(脱溶)强化二合一的综合热处理形式。

在铝材生产中如果有关热处理的工艺得到精心完善的执行,那么材料的性能与冶金组织达到目标值就有了70%以上的保证。

笔者试图对改革开放以来中国的科技工作者在变形铝合金热处理方面所取得的成就尽量纳入书内,当然国外的重大成就也力求简述,实因能力与篇幅所限,难免挂一漏万。

笔者试图对不同成分铝合金行之有效的热处理工艺一一加以介绍,以期对工程技术人员在开发新产品与制定新工艺时有指引性参考价值。

笔者试图对铝合金热处理理论作深入浅出的阐述,希望对企业的实际工作者理解有关热处理方方面面的问题有所帮助,对热处理的一些疑问都能在本书中找到答案或有所裨益与启迪。

在编写本书过程中得到许多人士与朋友的帮助,在此谨致谢意,需特别感谢是:中南大学的李松瑞与周善初教授,引用了他们编写的《金属热处理》一书中的诸多资料;清华大学材料系李建国教授及其研究生们,在查找与复印文献方面作了许多工作,安泰科信息开发公司的王伟东高级分析师在这方面也给了不少帮助;著名工模具专家赵云路先生得知笔者在写此书,特将他的一位德国朋友送给他的《Aluminium Handbook: Fundamentals and Materials》一书相赠。还有在书稿落成以后,我的老朋友田荣璋教授任主审,他提出不少宝贵意见,并逐字逐句给予认真修改。没有他们的热情帮助,本书能顺利完稿和出版实难想象。

王 祝 堂

2009年3月

目 录



第 1 章 变形铝合金热处理工艺基础知识	1
1.1 铝及铝合金的分类	(2)
1.2 铝材生产工艺及状态代号	(4)
1.2.1 铝材生产工艺	(4)
1.2.2 状态代号说明	(8)
1.3 变形铝合金热处理原理	(16)
1.3.1 铸锭均匀化退火	(16)
1.3.2 回复及再结晶退火	(26)
1.3.3 淬火及时效	(39)
1.3.4 回归现象	(61)
1.3.5 形变热处理	(63)
1.3.6 挤压效应及组织强化效应	(65)
1.4 热处理工艺基础及设备	(66)
1.4.1 加热方法	(66)
1.4.2 热处理加热气氛	(67)
1.4.3 冷却介质	(67)
1.4.4 热处理时的缺陷	(68)
1.4.5 铸锭均匀化退火炉	(71)
1.4.6 退火炉	(71)
1.4.7 固溶处理炉(淬火炉)	(73)
1.4.8 时效炉	(77)
1.5 铝材的典型热处理规范	(78)
第 2 章 1XXX 系及部分 8XXX 系合金的热处理工艺	93
2.1 1050 合金	(94)
2.2 1060 合金	(99)
2.3 1070 合金	(99)
2.4 1235 合金	(100)

2.5	1145 合金	(101)
2.6	高压阳极箔	(102)
2.7	1100 合金	(103)
2.8	8011 合金	(103)
2.9	8011A 合金	(107)
2.10	管、棒、线材与型材	(108)
2.11	铝箔退火的一般原则	(108)
2.11.1	保温温度	(109)
2.11.2	保温时间	(109)
2.11.3	加热速度	(110)
2.11.4	冷却速度	(111)

第3章 2XXX 系合金的热处理工艺

112

3.1	2017(2A11)合金	(113)
3.1.1	成分与相组成	(113)
3.1.2	热处理工艺	(113)
3.1.3	低温对时效进程的影响	(114)
3.2	2024 型合金	(115)
3.2.1	成分与相组成	(115)
3.2.2	热处理工艺	(116)
3.2.3	2124 - T851 合金	(121)
3.2.4	2224 合金	(123)
3.3.5	2324 合金的预时效处理	(125)
3.3	2A12 合金	(126)
3.3.1	均匀化退火	(126)
3.3.2	2A12 - T81 板材的热处理工艺	(129)
3.3.3	厚壁管的热处理	(131)
3.3.4	2A12 - O 状态型材及 T42 状态板材	(131)
3.3.5	2A12 铝合金的最终形变热处理	(134)
3.3.6	2A12 - T4 棒材粗晶环的消除	(135)
3.3.7	电导率与热处理	(135)
3.4	2011 合金	(136)
3.5	2014 型合金	(137)
3.5.1	2014 - T651 合金板材	(138)

3.5.2	2A14 - T652 锻环	(139)
3.5.3	2A14 合金锻件的热处理新工艺	(141)
3.6	2019 型合金	(141)
3.6.1	2519 合金	(141)
3.6.2	2219 合金	(144)
3.7	2A10 合金	(146)
3.8	2A02 合金	(147)
3.9	2A70 型合金	(148)
3.9.1	2A90 合金	(149)
3.9.2	2A70 及 2B70 合金	(149)
3.10	2A16 型及 2A17 合金	(154)
3.11	2A50 型合金	(158)
3.11.1	合金的相组成	(158)
3.11.2	合金的热处理	(159)
3.11.3	2A50 合金厚板的热处理	(159)
3.12	2007 合金	(160)
3.13	2117 合金	(161)
3.14	2A10 合金	(162)
第 4 章	3XXX 系合金的热处理工艺	165
4.1	合金的相组成与性能	(166)
4.2	合金热处理工艺	(168)
4.2.1	板、带材	(168)
4.2.2	挤压材	(172)
4.2.3	管材	(173)
4.2.4	锻件	(173)
4.2.5	3003 型合金	(174)
4.2.6	3004 型合金	(182)
第 5 章	4XXX 系合金的热处理工艺	190
5.1	钎焊复合板	(191)
5.2	4Y32 铝合金管材	(192)
5.3	464 - H16 复合板	(193)
5.4	喷射成形过共晶合金	(194)

- 5.5 4043 - H24 板材 (196)
- 5.6 Al - Si - La 共晶合金 (196)
- 5.7 4004 合金热轧板 (197)
- 5.8 4A11 合金活塞锻件 (198)
- 5.9 汽车内燃机零件 (199)

第6章 5XXX 系合金的热处理工艺

201

- 6.1 5A05、5A06 合金 (204)
- 6.2 5A06 - H34 合金厚板 (207)
- 6.3 5052 合金 (210)
 - 6.3.1 5052 - O 深冲板 (210)
 - 6.3.2 5052 - H22 等离子电视机 LED 背板 (211)
 - 6.3.3 5052 - H32 板材 (211)
 - 6.3.4 5052 - H34 板材 (211)
- 6.4 5754 型合金 (213)
 - 6.4.1 5754 - H2n 合金 (213)
 - 6.4.2 5754 - H34 合金 (214)
 - 6.4.3 5454 - O 板材 (215)
- 6.5 5056 型合金 (217)
- 6.6 5082 型合金 (219)
 - 6.6.1 5182 合金 (219)
 - 6.6.2 KS5030 及 KS5032 合金 (221)
- 6.7 5083 型合金 (222)
 - 6.7.1 5083 - O 合金的热轧板 (223)
 - 6.7.2 5083 - H321 合金厚板 (223)
 - 6.7.3 5083 合金板的抗蚀性 (225)
 - 6.7.4 5083 - H19 百叶箔带 (226)
- 6.8 磁盘基片铝 - 镁合金 (227)

第7章 6XXX 系合金的热处理工艺

229

- 7.1 6A02 合金 (233)
 - 7.1.1 6A02 合金型材 (233)
 - 7.1.2 6A02 合金管材 (234)
 - 7.1.3 6A02 - T6 合金型材的挤压机在线淬火 (234)

7.2	6A51 合金	(235)
7.2.1	6A51 合金铸锭的均匀化	(235)
7.2.2	6A51 - H112 挤压带材	(237)
7.2.3	6351 合金	(240)
7.3	半固态连续挤压的 6201 合金	(240)
7.4	6005A 合金	(242)
7.5	6XXX 系轿车板铝合金	(246)
7.6	6061 型合金	(249)
7.6.1	6061 合金挤压制品	(250)
7.6.2	6061 合金冷拉棒材	(251)
7.6.3	HE20 合金工业型材	(251)
7.6.4	6061 合金计算机型材	(252)
7.6.5	6061 - T6 合金模锻轮毂	(253)
7.7	6063 型合金	(253)
7.7.1	均匀化退火	(254)
7.7.2	挤压机在线淬火	(256)
7.7.3	停放效应	(256)
7.7.4	人工时效	(256)
7.7.5	6063 - T6 棒材的晶粒度	(258)
7.8	6066 - T6 合金弹体管材	(258)
7.9	6082 合金	(259)
7.9.1	6082 - T6 合金挤压材	(259)
7.9.2	6082 合金的电导率与热处理的关系	(260)
7.10	大型材的挤压机在线淬火	(262)

第 8 章 7XXX 系合金的热处理工艺

264

8.1	Al - Zn - Mg 系合金	(265)
8.1.1	7A19 合金铸锭的均匀化退火	(271)
8.1.2	7003 - T5 合金	(271)
8.1.3	7005 合金	(272)
8.1.4	7020 合金	(274)
8.2	Al - Zn - Mg - Cu 系合金	(275)
8.2.1	铸锭均匀化退火	(276)
8.2.2	双级时效工艺	(277)

8.2.3	7A04 合金	(278)
8.2.4	7A52 合金	(284)
8.2.5	7A09 合金	(285)
8.2.6	7022 合金	(286)
8.2.7	7032 燃料罐合金	(287)
8.2.8	7049A 合金	(288)
8.2.9	7050 合金	(288)
8.2.10	7055 合金	(294)
8.2.11	7075 型合金	(302)

第9章 铝-锂及铝-钪合金的热处理

329

9.1	变形铝-锂合金	(329)
9.1.1	铝-锂合金的性能及物理冶金	(330)
9.1.2	铝-锂合金的热处理	(334)
9.2	变形铝-钪合金	(360)
9.2.1	01570 合金	(361)
9.2.2	01970 合金及 01975 合金	(363)
9.2.3	01421 及 01464 合金	(364)
9.2.4	Al-9.0Zn-2.5Mg-1.2Cu-0.12Sc-0.15Zr 合金	(365)

参考文献

367