



冶金

主编

田荣璋 王祝堂

合金及其加工手册

第二版

中南大学出版社

铝

合金及其 加工手册

主编 王祝堂 田荣璋

中南大学出版社

第二版

铝合金及其加工手册(第二版)

主编 王祝堂 田荣璋

责任编辑 王换田

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:0731-8876770 传真:0731-8829482

电子邮件:csucbs@public.cs.hn.cn

经 销 新华书店总店北京发行所

印 装 中南工业大学出版社印刷厂

开本 787×1092 1/16开 印张 56.75 字数 1410千字 插页 4

版次 2000年10月第2版 2000年10月第1次印刷

印数 10001-14000

书号 ISBN 7-81061-298-0/TG·001

定价 148.00元

图书出现印装问题,请与经销商调换

第 二 版 说 明

1. 最近十年来,我国铝工业发展迅猛。1999年铝产量约250万吨,铝加工厂发展到1500余家,其中有300余家板带加工厂,90余家线材加工厂,其余为型材加工厂。这一年仅建筑铝型材生产就有上百万吨。当年总用铝量达350万吨(包括废铝回收再利用)。由此可见,客观上需要《铝合金及其加工手册》再版。

2. 这本《手册》原定1993年以前再版,因种种原因误了进程,在此向读者致歉。《铝合金及其加工手册》第二版仍按原计划,把篇幅压缩到150万字左右,尽量维持原来的作者队伍不变。有的作者因离退休联系不上或因篇幅压缩这次未能执笔,请谅解。

3. 第一版《铝合金及其加工手册》内容之丰,水平之高,作用之大,已取得社会共识,并于1996年荣获原中国有色金属工业总公司优秀科技图书一等奖,她对出版社和作者都给予了极大的鼓舞和很高的荣誉,也是促进这次能够再版的动力。在此,殷切地希望读者对第二版的《手册》提出宝贵意见,我们准备过几年第三次修订出版。

4. 《手册》这次再版修订是在听取广大读者意见并在第一版的基础上,删去不适用、使用面窄乃至知识陈旧的部分;在国内首次全面使用最新标准;更新近半内容,使其更先进、更实用,语言更精炼、表达更准确、印装更精美,希望成为从事铝合金及其加工工作者,在校学生不可多得的一本工具书。

5. 与这本《手册》再版的同时,正在编写审校其姊妹篇《铜合金及其加工手册》,预计2001年就会与读者见面,特此奉告。

中南大学出版社

2000年8月

编辑出版说明

(第一版)

1. 随着我国社会主义四个现代化建设的发展, 铝加工工业迎来了黄金时代, 生产铝材的企业已达 400 余家。产量超过 50 万吨。为了促进我国铝加工工业的发展与开发铝材应用的新领域; 为了适应铝加工工业有关人员的需求, 本社组织 20 余位教授、专家、高级工程师参加编写这本《铝合金及其加工手册》。

2. 本《手册》荟集了我国材料科学界造诣较深的专家、学者多年潜心研究的成果, 反映了国外的最新科学技术成就, 收集了许多实用性强的资料与数据, 在一定程度上代表了我国与世界工业发达国家在铝合金及其加工业的理论研究和加工工艺水平。

3. 本《手册》内容丰富、先进、实用, 对教学和材料研究部门、加工企业、使用单位及经营管理部門的广大科技工作者、教师和学生、干部与管理人员、技师与中高级技术工人都有相当高的参考价值。

编写这样一部综合性的大型工具书本身就是一项复杂的大工程, 加上编写人员较多, 分布在全国各地, 编写时间短促, 在体例上、编排上以及内容上有不尽完善之处, 甚至出现差错都是可能的, 敬请指正。

4. 我们打算在 1993 年前后对本《手册》进行修订, 出版第二版, 同时把篇幅压缩到 150 万字左右, 因此, 希望各界人士对本书的方方面面提出宝贵意见。

中南工业大学出版社
1988 年 9 月

编委会成员（按姓名笔划为序）

王祝堂 田荣璋 顾景诚 曾苏民

编写人员（按姓名笔划为序）

马宏声	王医冶	王祝堂	白淑文	田荣璋	刘静安
朱锦序	李 湘	李长明	李体彬	李松瑞	陈树金
陈斯杰	苏学常	吴庆龄	辛达夫	张君尧	钟诚道
洪永先	顾景诚	黄贞源	温景林	黎文献	

序 言

在旧中国，铝加工工业基本上是一片空白，因而也不可能有中国人自己的铝加工的知识生产。那时我们没有自己的科研与设计，没有自己的信息与情报，在大学里也没有学习铝加工的。关于铝加工的书中国人写的一本也没有。

1956年，我国第一个铝加工厂（现在的东北轻合金加工厂）在哈尔滨建成投产。这个工厂是引进的，从此中国有了自己的铝加工工业，也开始有了自己的铝加工人才与知识，不仅生产了铝材，也出了科技成果，自己设计图纸，大学里有了自己的铝加工讲义，有了自己的铝加工管理知识，也有了自己的铝加工方面的书。这个时期知识生产大体上与物质生产协调发展，二者相辅相成，相互促进。

在发达国家封锁情况下，我国能生产国防、民用的一切铝材，当时我国铝加工水平和发达国家的差距不算大。这个时期进步很快，后来“文革”十年，知识受到了严重的摧残，物质生产必然遭到严重破坏，那时因为提倡过写书还遭到了批判。

党的十一届三中全会以来，我国的铝加工工业蓬勃发展，生产量成倍增长，老厂进行了改造，新建了很多工厂，也从国外买进了大批新设备。给我国铝加工工业的现代化奠定了物质基础。从设备能力来讲，我国的铝加工工业的规模已经很大。我们买来了大批七八十年代的新设备。但是，绝不能因此就可以讲，我们已经有了80年代的水平，有了80年代的知识。

我们经常看到一些工厂买了80年代的设备，不能生产80年代的产品；我们的工资比发达国家的低得多，可是我们的产品成本反比外国的高；我们花了大量投资，有的设备数量已达到世界前三名，但开工率很低，停工待料。原因很多，不过这与重视设备忽视知识是有关的。不能讲我们没有知识，就是知识太旧了。

现在是我国比以往任何时期迫切需要新的铝加工知识的时候，国内有志于振兴铝加工事业的学者、专家，利用业务时间，没有花国家的钱，没有开一次会议，用他们的辛勤劳动编出了《铝合金及其加工手册》这本230余万字的大型工具书；而中南工业大学出版社克服种种困难予以及时出版，的确难能可贵。这本书介绍了国内外铝加工方面的新知识，内容广泛而又丰富，是一件很值得庆幸的事，必将有助于补上目前新知识的不足。我们希望今后有更多的著作来丰富我国铝加工新的知识生产，也希望那种不太重视知识的怪现象有所改变。

铝加工工业的现代化，知识的现代化决不在设备现代化之下。

中国有色金属加工工业协会理事长 王 哲

1988年9月1日于北京

目 录

第一篇 铝合金物理冶金基础

第一章 相图基本知识及铝合金中的相	田荣璋(3)
1.1 相图特征	(3)
1.1.1 二元相图特征	(4)
1.1.2 三元相图特征	(4)
1.1.3 非平衡冷却的影响	(6)
1.1.4 相图中的相区分析	(6)
1.1.5 杠杆定律和重心法则	(7)
1.2 铝合金中的相	(8)
1.3 部分工业变形铝合金的相组成.....	(14)
1.3.1 1XXX 系合金	(14)
1.3.2 5XXX 系及 3XXX 系合金	(14)
1.3.3 2XXX 系合金	(14)
1.3.4 6XXX 系合金	(16)
1.3.5 7XXX 系合金	(16)
1.3.6 4XXX 系合金	(17)
参考文献	(19)
第二章 铝合金相图选编	田荣璋(20)
2.1 实用温标.....	(20)
2.2 铝合金二元相图.....	(21)
2.3 铝合金三元相图.....	(47)
参考文献	(63)
第三章 铸锭组织与均匀化	李松瑞(64)
3.1 铸态合金组织和性能特征.....	(64)
3.2 铝合金均匀化退火时组织和性能的变化.....	(65)
3.3 均匀化退火温度及时间.....	(66)
3.3.1 温度.....	(66)
3.3.2 保温时间.....	(66)

3.3.3 加热速度及冷却速度·····	(67)
参考文献·····	(67)
第四章 加工硬化及回复、再结晶·····	李松瑞(68)
4.1 变形铝及铝合金的组织与性质·····	(68)
4.1.1 冷变形铝及铝合金的组织特征·····	(68)
4.1.2 冷变形铝及铝合金性能变化·····	(69)
4.1.3 铝及铝合金在高温下变形特征·····	(71)
4.2 回复·····	(72)
4.3 再结晶·····	(72)
4.3.1 再结晶形核与晶核长大·····	(73)
4.3.2 再结晶温度·····	(74)
4.3.3 再结晶晶粒长大及二次再结晶·····	(75)
4.3.4 再结晶晶粒尺寸·····	(76)
4.3.5 再结晶织构·····	(79)
4.4 变形的表面现象·····	(80)
4.4.1 吕德带·····	(80)
4.4.2 橘皮现象·····	(81)
4.4.3 环状线·····	(82)
参考文献·····	(83)
第五章 固溶及脱溶·····	李松瑞(84)
5.1 脱溶序列·····	(85)
5.1.1 脱溶的一般序列及其特征·····	(85)
5.1.2 各种脱溶相结构·····	(88)
5.1.3 主要变形铝合金系的脱溶过程·····	(93)
5.1.4 回归现象·····	(95)
5.2 脱溶相的分布·····	(96)
5.2.1 普遍脱溶·····	(96)
5.2.2 局部脱溶·····	(96)
5.3 时效理论的应用·····	(98)
5.3.1 自然时效·····	(98)
5.3.2 人工时效·····	(99)
5.3.3 回归再时效处理·····	(102)
5.4 形变热处理原理·····	(103)
5.4.1 低温形变热处理·····	(104)
5.4.2 高温形变热处理·····	(107)
5.4.3 预形变热处理·····	(108)
参考文献·····	(110)

第六章 铝及铝合金的化学性能	王祝堂(111)
6.1 铝及铝合金的腐蚀与环境的关系	(112)
6.1.1 大气	(112)
6.1.2 水	(114)
6.1.3 土壤	(115)
6.1.4 食品与化工产品	(115)
6.1.5 建筑材料	(116)
6.1.6 温度、压力等.....	(116)
6.2 铝及铝合金的腐蚀的基本类型	(117)
6.2.1 点腐蚀	(117)
6.2.2 均匀腐蚀	(118)
6.2.3 缝隙腐蚀	(119)
6.2.4 应力腐蚀开裂(SCC)	(121)
6.2.5 晶间腐蚀与剥落腐蚀	(132)
6.2.6 接触腐蚀	(136)
6.2.7 腐蚀疲劳与磨蚀等	(140)
6.2.8 铝及铝合金腐蚀的控制	(142)
参考文献.....	(146)

第二篇 变形铝合金

第一章 纯铝的特性及合金化规律	黎文献(149)
1.1 纯铝的一般特性	(149)
1.2 纯铝的物理性能	(150)
1.2.1 晶体结构	(150)
1.2.2 密度	(151)
1.2.3 热学性能	(151)
1.2.4 电学性能	(153)
1.2.5 磁学性能	(153)
1.2.6 光学性能	(154)
1.3 纯铝的力学性能	(154)
1.4 合金元素及杂质对纯铝性能的影响	(155)
1.4.1 主要合金元素的影响	(156)
1.4.2 微量元素和杂质的影响	(166)
1.4.3 常用元素对铝的物理性能的影响	(169)
参考文献.....	(177)
第二章 1XXX 系合金	王祝堂(179)

第三章	2XXX 系合金	王祝堂(186)
第四章	3XXX 系合金	王祝堂(222)
第五章	4XXX 系合金	王祝堂(229)
第六章	5XXX 系合金	王祝堂(232)
第七章	6XXX 系合金	王祝堂(251)
第八章	7XXX 系合金	王祝堂(262)
第九章	超塑铝合金	吴庆龄(284)
9.1	超塑性的种类及变形的力学特征	(284)
9.1.1	超塑性的种类	(284)
9.1.2	超塑性变形的力学特征	(285)
9.1.3	超塑变形机理	(287)
9.2	晶粒细化及抑制晶粒粗化的方法	(287)
9.2.1	晶粒细化方法	(288)
9.2.2	抑制晶粒粗化的方法	(288)
9.3	超塑铝合金	(289)
9.3.1	纯铝的超塑性	(289)
9.3.2	铝-钙系超塑合金	(289)
9.3.3	Al-Cu 系超塑合金	(292)
9.3.4	Al-Cu-Mg-Zr 超塑合金	(295)
9.3.5	Al-Cu-Mg 系超塑合金	(295)
9.3.6	Al-Mg 系超塑合金	(297)
9.3.7	Al-Mg-Si 系超塑合金	(299)
9.3.8	Al-Zn-Mg-(Zr)系超塑合金	(300)
9.3.9	Al-Zn-Mg-Cu 系超塑合金	(303)
9.3.10	Al-Li 系超塑合金	(303)
9.3.11	Al-Sc 系超塑合金	(306)
	参考文献	(309)
第十章	粉末冶金铝合金	张君尧(311)
10.1	粉末冶金铝合金的生产工艺	(312)
10.1.1	快速凝固-粉末冶金工艺	(312)
10.1.2	喷射沉积工艺	(317)
10.1.3	机械合金化-粉末冶金工艺	(320)

10.2	用快速凝固法生产粉末冶金铝合金材料的优点	(320)
10.2.1	细化晶粒	(321)
10.2.2	增加合金化元素的过饱和固溶度	(321)
10.2.3	细化金属间化合物粒子	(322)
10.2.4	增加合金化学成分的均匀性	(322)
10.3	机械合金化法粉末冶金铝合金材料的优点	(322)
10.4	工业粉末冶金铝合金	(322)
10.4.1	粉末冶金高强度铝合金	(323)
10.4.2	粉末冶金低密度高弹性模量铝合金	(328)
10.4.3	粉末冶金耐热铝合金	(328)
10.5	粉末冶金耐磨铝合金和低膨胀系数铝合金	(333)
	参考文献	(336)
第十一章 铝基复合材料		洪永先(338)
11.1	基体与增强体	(338)
11.1.1	基体	(338)
11.1.2	增强体	(338)
11.2	连续纤维增强铝基复合材料的制造	(340)
11.2.1	复合前的准备工作	(340)
11.2.2	连续纤维增强复合的制备	(341)
11.3	颗粒、晶须增强铝基复合材料制造	(346)
11.3.1	复合前的准备工作	(346)
11.3.2	制造方法	(347)
11.4	铝基功能复合材料	(352)
11.5	铝基复合材料的超塑性变形	(353)
	参考文献	(355)
第十二章 铝-锂系合金		王祝堂(356)
12.1	物理冶金	(356)
12.2	生产工艺	(360)
12.2.1	铸锭冶金法	(360)
12.2.2	粉末冶金法	(362)
12.3	工业铝-锂合金	(363)
12.3.1	2090 合金	(365)
12.3.2	2091 合金	(372)
12.3.3	Weldalite 049 合金	(376)
12.3.4	8090 合金	(378)
12.3.5	BAI23 合金	(385)
12.4	铝-锂合金的应用	(387)
	参考文献	(391)

第三篇 铝材加工工艺

第一章 熔炼与铸锭	马宏声(395)
1.1 铝合金溶炼的基本原理	(395)
1.1.1 合金元素的溶解与蒸发	(395)
1.1.2 铝溶体与炉气的作用	(396)
1.1.3 熔融铝与炉衬耐火材料的作用	(398)
1.2 铝中的气体	(399)
1.2.1 气体在铝中的存在形式	(399)
1.2.2 气体的溶解度	(399)
1.2.3 气体的测量方法	(400)
1.3 铝中的非金属夹杂	(401)
1.3.1 夹杂的种类及形态	(401)
1.3.2 非金属夹杂物的检查方法	(402)
1.4 铝合金熔体净化	(402)
1.4.1 熔体净化目的和要求	(402)
1.4.2 炉内处理	(402)
1.4.3 炉外连续处理	(407)
1.5 中间合金与金属添加剂	(416)
1.5.1 中间合金	(416)
1.5.2 金属添加剂	(416)
1.6 铝合金铸锭组织及控制	(417)
1.6.1 正常组织对铸锭性能的影响	(417)
1.6.2 异常组织对铸锭性能的影响	(417)
1.6.3 铸锭组织的控制途径	(420)
1.6.4 铸锭晶粒细化处理	(420)
1.7 铸锭缺陷	(422)
1.7.1 偏析	(422)
1.7.2 疏松	(423)
1.7.3 裂纹	(423)
1.7.4 气孔	(425)
1.7.5 夹杂	(425)
1.7.6 冷隔	(425)
1.8 铸锭成型方法	(425)
1.8.1 块式铁模铸锭	(425)
1.8.2 半连续铸锭(DC)	(425)
1.8.3 热顶(HT)铸锭	(429)
1.8.4 电磁铸锭(EMC)	(431)

1.8.5	连续铸锭	(432)
1.8.6	连续铸轧	(437)
	参考文献	(443)
第二章	板带材轧制	明文良 陈斯杰(444)
2.1	轧制理论简述	(444)
2.1.1	常用轧制参数(见表 3-2-1)	(444)
2.1.2	基本概念	(445)
2.1.3	轧制力计算	(450)
2.2	热轧	(453)
2.2.1	热轧的特点	(453)
2.2.2	热轧前的准备工作	(453)
2.2.3	热轧工艺参数的确定	(454)
2.3	冷轧	(457)
2.3.1	冷轧	(457)
2.3.2	冷轧压下制度	(457)
2.4	铝及铝合金涂层板的生产	(469)
2.4.1	涂层工艺流程	(469)
2.4.2	涂层设备	(469)
2.4.3	涂层预处理	(472)
2.4.4	涂层	(473)
2.4.5	涂层固化	(475)
2.5	精整	(475)
2.5.1	矫直	(476)
2.5.2	纵切机列	(477)
2.6	板带材工艺废品种类及产生原因	(478)
第三章	型、棒材挤压	黄祯源(482)
3.1	挤压方法分类	(482)
3.1.1	正向挤压法	(483)
3.1.2	反向挤压法	(483)
3.1.3	康福姆(CONFORM)连续挤压法	(484)
3.1.4	其他挤压法	(485)
3.2	金属挤压时的应变状态和挤压力计算公式	(487)
3.2.1	挤压时金属的应变状态	(487)
3.2.2	正向挤压时金属的变形过程和特点	(487)
3.2.3	反向挤压时金属的变形过程和特点	(490)
3.2.4	挤压力计算公式	(490)
3.3	挤压制品的组织与性能	(491)
3.3.1	挤压制品的组织与性能的一般特点	(491)

3.3.2 挤压效应	(492)
3.3.3 粗晶环	(493)
3.4 铝及铝合金型、棒材挤压工艺	(495)
3.4.1 一般型、棒材	(495)
3.4.2 民用建筑型材的生产	(506)
3.4.3 反向挤压	(507)
3.4.4 壁板型材挤压	(515)
3.4.5 阶段变断面型材的生产	(518)
3.4.6 变断面型材生产工艺特点	(519)
3.5 型、棒、带材挤压生产中的主要缺陷和消除方法	(522)
参考文献	(524)
第四章 管材生产	刘静安 赵云路(525)
4.1 概 述	(525)
4.1.1 管材的品种,分类及用途	(525)
4.1.2 管材的生产方法	(525)
4.1.3 铝合金管材生产的工艺特点	(525)
4.1.4 管材生产的工艺流程	(528)
4.2 管材热挤压	(530)
4.2.1 无缝管热挤压	(530)
4.2.2 管材的焊合挤压	(537)
4.2.3 管材挤压时的变形特点和力学条件	(537)
4.2.4 管材挤压工艺	(540)
4.2.5 润 滑	(542)
4.2.6 工艺操作规程要点	(543)
4.2.7 挤压管材的质量控制	(545)
4.3 管材冷挤压	(546)
4.3.1 管材冷挤压的工作条件与生产特点	(546)
4.3.2 管材冷挤压的工艺特点	(546)
4.3.3 冷挤压管材的品质控制	(549)
4.4 管材轧制	(549)
4.4.1 管材轧制方法	(549)
4.4.2 管材冷轧工艺	(552)
4.4.3 冷轧管材质量控制	(556)
4.5 管材拉伸(见第三篇第六章)	(557)
4.6 焊管生产	(557)
4.6.1 管材焊接方法	(557)
4.6.2 铝及铝合金高频焊管工艺	(558)
4.6.3 焊接管品质控制	(560)
4.7 管材的连续挤压生产	(560)

4.7.1	Conform 连续挤压法	(560)
4.7.2	Castex 连续铸挤法	(561)
4.8	管材的热处理和精整、矫直与成品检验包装	(562)
4.8.1	热处理(见本书有关章节)	(562)
4.8.2	管材的矫直	(562)
4.8.3	管材的精整	(562)
4.8.4	管材的检验包装与交货	(562)
4.9	经济断面管材的发展趋向	(562)
	参考文献	(565)
第五章 铝箔轧制与二次加工 辛达夫(566)		
5.1	我国铝箔工业的发展	(567)
5.2	铝箔的规格和品种	(568)
5.2.1	铝箔的定义	(568)
5.2.2	铝箔的品种	(568)
5.3	铝箔的性质	(569)
5.3.1	铝箔的一般性质	(569)
5.3.2	铝箔的防潮性能	(569)
5.3.3	铝箔的绝热性能	(569)
5.3.4	铝箔的电学性能	(571)
5.3.5	铝箔的力学性能	(571)
5.3.6	铝箔的化学性能	(574)
5.4	铝箔生产工艺	(577)
5.4.1	影响铝箔生产工艺的因素	(577)
5.4.2	铝箔毛料	(577)
5.4.3	铝箔生产的工艺流程	(579)
5.4.4	轧制工艺参数的选定	(580)
5.4.5	轧 辊	(589)
5.4.6	轧制油	(590)
5.4.7	铝箔的双合和分卷	(596)
5.4.8	铝箔的软化退火	(597)
5.4.9	脱 脂	(598)
5.4.10	铝箔的分切	(598)
5.4.11	铝箔质量的评定	(600)
5.5	铝箔的深加工	(601)
5.5.1	重 卷	(601)
5.5.2	压 花	(601)
5.5.3	切 块	(603)
5.5.4	复 合	(603)
5.5.5	涂 层	(607)

5.5.6 多色印刷	(608)
5.5.7 多种精加工的组合	(608)
5.6 铝箔的应用	(611)
参考文献	(612)
第六章 拉制生产	白淑文 马怀宪(613)
6.1 拉制法的变形特点及应用	(613)
6.1.1 实心材拉制	(613)
6.1.2 空心材拉制	(615)
6.1.3 特种拉制法	(617)
6.2 拉制力	(618)
6.2.1 实现拉制的力学条件	(618)
6.2.2 拉制力和安全系数的变化	(620)
6.2.3 拉制力的确定	(622)
6.3 拉制工艺	(623)
6.3.1 拉制的主要工艺因素	(623)
6.3.2 拉制的辅助工序	(628)
6.3.3 铝合金拉制配模	(629)
6.4 拉制品品质控制和经济效益	(633)
6.4.1 实心材质量问题及控制	(633)
6.4.2 空心材品质的特殊问题及控制	(634)
6.4.3 提高拉制经济效益的途径	(634)
参考文献	(636)
第七章 锻件生产	钟诚道 王祝堂(637)
7.1 水压机锻造方法	(637)
7.1.1 水压机的特性	(637)
7.1.2 水压机锻造方法	(637)
7.2 锻造和模锻热力学参数	(639)
7.2.1 锻造温度范围	(639)
7.2.2 变形速度(ω)	(641)
7.2.3 变形程度	(641)
7.2.4 应力状态(加工方法)	(642)
7.3 自由锻和模锻水压机能力计算	(642)
7.3.1 自由锻水压机能力计算	(642)
7.3.2 模锻水压机能力计算	(644)
7.4 自由锻造基本工序及其工艺过程	(645)
7.4.1 自由锻造基本工序	(645)
7.4.2 锻件图设计	(648)
7.4.3 自由锻工艺过程	(648)