

铝合金 的组织 与性能

冶金工业出版社

铝合金的组织与性能

[美] L.F. 蒙多尔福 著

王祝堂 张振录 郑璇 等译



中国有色金属加工工业协会组织翻译

1512/24



内 容 简 介

本书是根据 L.F. Mondolfo 教授著《Aluminum Alloys, Structure and Property》(Butterworths 1976年版)译出的。

原书为当今世界阐述铝合金组织与性能的权威著作,包括纯铝及工业纯铝、二元合金、三元、四元及多元合金,工业铝合金四篇,列出了铝及铝合金组织与性能的文獻两万条。本书可供从事金属材料研制与生产的工程技术人员和大专院校有关专业的师生参考。

本书由中国有色金属加工工业协会组织翻译。

铝合金的组织与性能

〔美〕L.F.蒙多尔福 著

王祝堂 张振录 郑璇 等译

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷88号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 37 字数 990 千字

1988年7月第一版 1988年7月第一次印刷

印数00,001~2,700册

ISBN 7-5024-0345-0

TG·58 定价12.20元

译者的话

已经发表的有关铝及铝合金组织与性能的文献浩如烟海，人们要想了解铝合金某一问题的发展历史和现状，必须先收集文献，而这却常常是一件很花时间的的事。蒙多尔福编写本书的一个目的，就是想为工程技术人员提供一本参考书，使他们可以从了解到有关课题的知识简介，而要深入了解时，又有近两万条参考文献可供参考。

作者L.F.蒙多尔福博士是美国伊利诺斯工业大学冶金系教授，是世界有名的铝合金学者。他四十多年前出版的《铝合金金相学》(Metallography of Aluminum Alloys, Wiley, New York, 1943)是有关这一领域的第一本专著，对铝合金金相学的发展起过相当大的作用，至今仍有一定的参考价值。他1976年出版的这部《铝合金的组织与性能》，重点是讨论有关铝合金的基本理论与具有实用价值的性能和特性，既是一本有关铝合金基础理论书，又是一本有实用价值的工具书，出版后第二年及第三年被相继译成德文及俄文。现在，我们把这部著作译成中文，奉献给国内读者，希望我国从事铝合金研制与发展的科学工作者，铝材、铝铸件、铝制品生产的工程技术人员与铝结构设计人员，大专院校金属材料专业的教师、学生与研究生都能从中受益。

参加本书翻译的有东北轻合金加工厂王祝堂与佟长青、青岛铝加工厂张振录与刘伯祥、西南铝加工厂戴玲宝、上海铝材厂郑璇、成都科学技术大学任滨彦。全书经王祝堂校对。由于水平所限，译文中难免有不够确切甚至错误之处，希望读者批评指正。

译者

一九八四年九月

序 言

现已发表的有关合金元素对铝的组织 and 性能的影响的资料浩如烟海，对于一般工程师或科学家来说文献的收集都已是远非轻而易举的繁重工作。因此，确实需要有一本参考书，从中既可以查到目前积累起来的知识的简介，又有参考文献可供需要更详细的资料时查阅。本书的目的就是为了满足这种需要。它的内容主要是为冶金学家和工程师安排的，而重点是放在铝的有实用价值的性能上。至于仅少数科学家感兴趣的相当深奥的性能，例如电子能级、核子自旋等，未予讨论，最多附加一个参考书目，作为文献研究的起点。书中讨论的许多现象的理论也被全部省略，或仅极简单地提一下。作者认为读者是熟悉那些理论的，或者是有能力查阅有关比较普通的教科书的。

作者仅系统地收集了同铝基合金有关的资料。因此，在多数合金系中，仅标出了能与铝固溶体共存的化合物，还包括只在不平衡状态中出现的化合物，但肯定不包括存在于多数系统之中而与铝基合金无关的中间相的大量资料。由于界限不很清楚，当有疑问时，便把可能是不相关的资料或参考文献也列入。

书中的多数资料来自文献。作者力图指出最可靠的以及明显错误的的数据。可惜能确切地说明问题的资料很少，它们多数至少在某种程度上是可疑的。本书竭力使读者清楚地认识到，多次发表过并且被普遍接受的资料，不一定就是天经地义的。把不同作者的数据列成表格就能看出，虽然有些测定值达到小数点第三或第四位，但同其他作者的数据的差别却比该值所表示的精确度大得多。这种对比不是经常能做到的，如果把发表的几十种铝-锌系相图都刊登出来，将占据过多的篇幅，它们多数被认为是可靠的，然而相互之间的差别却很大。

可得资料常常颇为零碎，特别是三元或四元相图，需要做许多推测工作才能得出比较清晰的图象。本书的基本原则是提供

尽可能多的资料，而不是局限于提出无可辩驳地完整和正确的数据。如果把那些经不起严格论证的数据排除在外，则展现在作者面前的将是极为贫乏和分散的资料。此外，作者觉得还是提出全部能收集到的资料为好，甚至包括那些有明显错误的资料，因为它可以作为进一步研究的起点和向导。

有许多复杂的系统只能找到一项数据。将不为它另立标题，而把它放在有关较为简单的系统内。例如，银对铝-镉-铜系合金时效硬化的影响，将在铝-镉-铜系中讨论，而未另立四元系标题。

有些关于合金元素影响的数据，部分是对高纯合金而言，部分是对工业合金而言。如果这些资料是补充性的，将进行集中讨论，而在其他地方只简单地提一下。究竟在何章何节进行详细讨论，视情况而定，一般把与理论有关的性能放在相图中讨论，而把比较实用的性能放在工业合金中讨论。

为了使本书篇幅保持在合理限度内，只能对可得资料提供简单的摘要。鉴于不可能有两个人会对书中所涉及的全部课题的相对重要性具有完全一致的意见，所以在内容平衡方面并未花多大力气。作者是按照自己最感兴趣的课题就应作最广泛的报道的设想来进行编写的。为了弥补这种随意性，已把参考书目列得尽可能完备些。为了使书目不致过长，对多数参考文献只提供第一位作者的姓名和刊登摘要的期刊。因为，即使列出参考文献的全部内容，需要更多资料的读者还得先查阅摘要，然后再决定该文献是否满足他的要求。因此，用这种办法并不会减少获得参考资料的可能性，却既列出了完整的书目，而又不会使书价过高。书中优先引用的是《金属学会文摘》(Institute of Metals Abstracts)。其他文摘只有在优先引用的文摘中不能找到时，才被列入书目。文摘刊物名称列于附录4。

对于相图，凡已列入汉森(Hansen)及其合作者所著书中的参考文献一般不包括在内，除非采用了上述作者未曾报道过的资料。凡是在99.99%纯铝被普遍应用于研究之前所发表的参考

文献也被省略了，除非是特别重要的。然而，关于工业合金性能方面的早期文献却列入了参考书目，因为它们一般比近年来的资料更为详细和全面。

书中报道了到1974年4月为止在《化学文摘》、《世界铝文摘》和《金属文摘》中的全部著作。读者可以认为，到1972年底为止的资料是尽可能地齐全的，1973年的资料是相当齐全的，而1974年的资料只包括一部分。附录5中列有本书脱稿以后才发表而未被包括在正文内的资料*，这样就把所收集的参考文献延伸到了1975年中期。

为对本书所提供的资料进行校对和复查曾作了一切可能的努力，但作者仍意识到可能还会混进许多错误，希望读者给予谅解，并对指正错误的读者表示感谢。

L.F.M.

* 附录5补充文献不是与正文严格呼应的，中译本未列入，读者如需参考，请查原书。——译者

目 录

第一篇 纯铝及工业纯铝	(1)
第一章 成分	(1)
第一节 纯度	(1)
第二节 区域熔炼	(9)
第二章 结构	(11)
第一节 原子结构、原子价、费密面	(11)
第二节 液体、晶体结构、晶格常数、密度	(14)
第三节 点缺陷、扩散	(17)
第四节 位错、堆垛层错	(37)
第五节 亚晶粒、晶胞、晶界	(42)
第六节 界面能	(45)
第七节 显微组织	(47)
第三章 热力学性能	(50)
第一节 熔点、沸点、熔解热、升华	(50)
第二节 比热	(52)
第三节 热导率	(54)
第四节 粘度	(55)
第五节 热膨胀、熔化时体积的变化	(57)
第四章 机械性能	(61)
第一节 硬度、强度、塑性	(61)
第二节 弹性常数	(73)
第三节 疲劳	(75)
第四节 蠕变	(78)
第五节 摩擦与磨损	(80)
第五章 电磁特性	(82)
第一节 电阻率	(82)
第二节 磁特性、霍尔系数	(87)
第三节 热电、光电、电容	(89)
第六章 辐照	(90)

第一节	声音、超声、振动波	(90)
第二节	光学性能	(90)
第三节	X射线、γ射线	(92)
第四节	电子、正电子	(93)
第五节	重粒子	(94)
第六节	辐照损伤	(96)
第七章	化学性能	(98)
第一节	电极电位	(98)
第二节	腐蚀	(99)
第八章	工艺性能	(162)
第一节	结晶	(162)
第二节	塑性变形、织构	(170)
第三节	恢复、再结晶	(177)
第二篇	二元合金	(188)
第三篇	三元和四元等多元合金	(354)
第一章	三元合金	(354)
第二章	四元相图	(561)
第三章	五元及六元合金	(629)
第四篇	工业合金	(637)
第一章	铝-铜合金	(637)
第二章	铝-硅及铝-硅化镁合金	(684)
第一节	铝-硅合金	(684)
第二节	铝-硅化镁合金	(710)
第三章	铝-镁、铝-锰合金	(728)
第一节	铝-镁合金	(728)
第二节	铝-锰合金	(748)
第四章	铝-锌合金	(756)
第一节	铝-锌-铜合金	(756)
第二节	铝-锌-镁合金	(759)
第五章	其他合金	(792)
第一节	烧结铝粉 (SAP)	(792)

第二节 轴承合金	(801)
第三节 铝-高熔点金属合金	(804)
第四节 保护阳极合金	(806)
第五节 复合材料	(807)
附录1 米制单位与其他单位的换算	(809)
附录2 温度换算 (全部数值都修约到最近的整数)	(814)
附录3 铝合金的原子百分数与重量百分数的换算	(820)
附录4 本书参考文献的缩写	(828)
参考文献	(829)

第一篇 纯铝及工业纯铝

第一章 成 分

第一节 纯 度

原铝有各种等级^{*}，其纯度一般从99%至99.999%以上。根据不同的生产方法，可区分为三种类型：

1. 工业纯铝是在电解槽中还原 Al_2O_3 所得到的金属，占工业生产的大部分。它可含有达1%的杂质，其纯度很少超过99.9%。

2. 精铝是以工业纯金属在三层电解槽中经过电解提纯制得的。它的纯度从99.9%至99.99+ %。

3. 区域熔提纯铝是采用适当的起始材料和工艺技术，经过区域熔炼制得的。它可以生产杂质含量小于1 ppm的金属。以有机电解液电解析出的铝作为原料，经区域熔炼已达到了这个纯度^[1~4]。

凝固提纯法 (freeze refining methods) ^[5,6]也是根据部分结晶原理设计的工业生产方法。所用原料是工业材料而不是已经提纯的；并且不象区域熔炼那样需要反复提纯。因此，用这种工艺制得的铝在纯度方面与电解提纯的及区域熔炼提纯的相比，则更接近于前者。

由加工废料或废旧设备重新熔化所得的铝称为二次铝，常常以合金形式回收。即使由优质废料例如电缆或汇流排重新熔化所得的“二次纯铝”，由于不可避免地受到其他材料污染，其纯度

* 当考虑等级或纯度时，必须记住纯度是从100中减去所分析的杂质总和计算得来的。虽然可信赖的实验室要分析大约15~25种最普通的和含量最多的杂质，但是还有未达到下限（0.005%或至少0.001%）的杂质没有包括在内。这些微量杂质，连同未经分析的杂质，有可能大到降低铝的等级，特别是对纯度高的。

2 第一篇 纯铝及工业纯铝

表 1-1

批次不同但来源相同或

等级	来 源	成							
		Cu	Fe	Si	Mg	Na	Cd	Zn	Ag
电解精铝	A 1	1	1	<3	100	2	<1	5	<1
	A 2	1	4	4	3	1	<1	5	<1
电解精铝	B 1	3	5	10	10	1	2	<5	<1
	B 2	22	4	6	4	1	<1	<5	<1
	B 3	21	10	30	5	2	3	<5	<1
电解精铝	C 1	40	80					36	
	C 2	1	50					9	
	C 3	4	6					40	
	C 4	35	29					57	
工业纯铝	D 1	120	500					150	
	D 2	260	1700					220	
	D 3	650	2800					340	
	D 4	900	6900					230	
	D 5	450	2900					430	
	D 6	170	1700					670	
	D 7	80	840					900	
	D 8	20	240					1400	
电解精铝	加拿大	189	25	14				3	
	匈牙利	8~12	84	22				2	
	波 兰	5	26	17				1	

不同的铝的成分变化

分, ppm										参 考 文 献
Mn	V	Ti	Co	Cr	Ga	Sb	As	Sc	Sm	
										(7)
<1										(7)
<1										
<1										
		40 3 1 5								(8)
	50 8 210 900 510 120 50 10	160 220 300 550 170 120 70 30								(8)
0.25			0.3	7	1.8	<0.1	<0.5	0.3	0.5	(9)
0.2			3	7~13	1.6	<0.1	0.5~9	0.2~0.5	0.3	
0.3			0.5	3	0.5	<0.1	<0.5	0.17	0.05	

表 1-2 各种等级的铝的分析数据范围和各种元素的理论及实验分配系数 (K)
符号 < 表示该元素的含量低于所用分析方法的检测极限值

元素	含 量, ppm					分配系数	
	工业纯铝 99.8~99.8	凝 固 提纯铝	电解精铝	从有机电解液沉 积的精铝	区域熔炼精铝	理论值	实验值
Ag	0.1~1		0.001~0.1	0.0005~0.002	0.001~<0.1	0.2~0.9	≤1
As	0.008~0.5		0.008~0.3	0.003~0.04	0.00001~0.03		0.2
Au	0.001~0.5		0.0001~0.001	<0.00004~0.0001	0.0001~0.03		
B	0.1~2	<10	0.001~0.1		<0.01		≤1
Ba	0.1~10		0.05~2	<0.005	0.001~0.03	0.5	
Be	0.01~1	<1~<10	<0.1			0.1~0.27	0.1~0.2
Bi	<10	<10	0.01~0.2	<0.1	<0.003~0.1	<0.001~0.06	0.45
Br	<0.1		<0.04		<0.01~<0.02		
C	0.1~100		1~2		0.2~2		
Ca	0.1~50	<1~<10	0.1~0.2	<0.05~0.3	0.02~2	0.07~0.08	0.08
Cd	0.01~5	<10	0.005~3	<0.005~0.01	0.0002~0.2	<0.001~0.065	0.0667
Ce	0.01~1		0.01~0.3		<0.003~<0.01	<0.01	0.005
Cl	0.1~10		0.01~3		0.2~100		
Co	0.1~5	<10	0.004~0.4	<0.01	<0.0001~0.01	0.02	0.014
Cr	2~50	<2~10	0.01~0.4	0.004	0.01~0.5	1.75~2	0.5~2

续表 1-2

元素	含 量, ppm					分配系数	
	工业纯铝 99.8~99.8	凝 固 提纯铝	电解精铝	从有机电解液沉 积的精铝	区域熔炼精铝	理论值	实验值
Cs	<0.01		0.0001~0.01	<0.0003	0.0003~<0.1	0.14~0.17	0.14~0.17
Cu	5~100	5~10	0.4~5	0.25~0.35	0.0006~0.4		
Dy	<1		0.01~0.6		<0.004~<0.01		
Er			<0.01		<0.01		
Eu			<0.01		<0.0006~<0.001		
F	3~5		<0.1		<0.1		
Fe	400~2000	<10~40	1.5~30	0.5~3	0.01~0.6	0.02~0.03	0.02~1
Ga	10~200	10~30	0.005~2	0.1~40	0.0001~0.05	0.22	0.002
Gd			0.01~0.04		<0.0001~<0.01		
Ge	<1		<0.03		<0.01~<0.03	0.06~0.13	0.13
Hf	<0.001		0.0004~0.07	0.0008~0.001	0.0001~0.02	1.3	2.5
Hg	<0.001		0.0004~<0.07	<0.001	0.00001~<0.01		
Ho			0.0005~0.01		0.0001~0.003		
I			<0.003		<0.003~0.01		
In			<0.003~<0.1		<0.003~0.01	<0.001	0.01

续表 1-2

元素	含 量, ppm					分配系数	
	工业纯铝 99.6~99.8	凝固 提纯铝	电解精铝	从有机电解液沉 积的精铝	区域熔炼精铝	理论值	实验值
Ir			<0.005		<0.005	<0.001	0.01
K	<0.01		0.002~0.7	<0.15~0.8	<0.01~1	<0.001	
La	0.01~10		0.01~10		<0.001~0.1	<0.01	≤1
Li	1~10		0.003~0.02			0.45	0.73
Lu			0.002		≤0.0001~<0.003		
Mg	5~50	2~<10	1~20		0.1~0.3	0.45~0.5	>0.5
Mn	5~50	<10	0.01~1	0.0008~0.03	0.008~0.6	0.7~0.9	0.5
Mo	0.1~1		0.005~0.4	<0.01	0.0025~0.2	2~2.5	2
N	1~7	<1~10	<2~20		≤0.1~0.2		
Na	0.1~500		0.01~10		0.01~1	<0.0001	0.00014~0.03
Nb			<0.01	3	<0.01	1.5	1.57
Nd	0.1~1		0.1~0.2		<0.01		
Ni	1~20	<10	0.02~3	<0.03	<0.001~0.3	0.008~0.01	<0.03~0.9
O	1~100		1~10		0.5		
Os			0.008		<0.008		

续表 1-2

元素	含 量, ppm					分配系数	
	工业纯铝 99.6~99.8	凝 固 提纯铝	电解精铝	从有机电解液沉 积的精铝	区域熔炼精铝	理论值	实验值
P	1~30		0.1~10		0.04		0.134
Pb	1~50	10	0.01~10		0.004~0.25	0.01~0.12	
Pd			<0.001~<0.01		<0.001~<0.01	<0.04	<1
Pr	0.01~0.1		0.02~0.1		<0.001~<0.003	<0.001	
Pt			0.5		<0.5		
Rb	<0.1		<0.003~0.05	<0.004~0.05	<0.005~<0.01		
Re			<0.005		<0.005		
Rh			<0.01		<0.01		
Ru			<0.03		<0.03		
S	0.2~20		0.2~15		0.08~1.1		
Sb	0.01~2		0.02~1.5	0.05~0.3	0.00002~0.3	0.01~0.1	0.01~0.09
Sc	0.01~1		<0.01~1.5	0.003~0.004	0.008~0.5		0.75~0.8
Se	<0.1		0.003~<0.02	<0.001	<0.0002~<0.02		0.75
Si	200~1000	20~40	1~30		0.1~0.8	0.13	0.08~0.5
Sm	0.4		0.005~0.4		<<0.0001~0.03		