

铸造铝硅合金 熔炼与铸锭

赵恒先 编著



東北大學出版社
Northeastern University Press

铸造铝硅合金熔炼与铸锭

赵恒先 编著

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 赵恒先 2006

图书在版编目 (CIP) 数据

铸造铝硅合金熔炼与铸锭 / 赵恒先编著. — 沈阳 : 东北大学出版社, 2006.7

ISBN 7-81102-272-9

I. 铸… II. 赵… III. ①硅-铝基合金-熔炼 ②硅-铝基合金-铸锭 IV. TF821

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 067933 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳市政二公司印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

幅面尺寸: 140mm × 203mm

印 张: 7.25

字 数: 195 千字

出版时间: 2006 年 7 月第 1 版

印刷时间: 2006 年 7 月第 1 次印刷

责任编辑: 孟 颖

责任校对: 吴 艳

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

定 价: 78.00 元

前 言

铸造铝合金分为许多系列，其中铸造铝硅系列合金具有良好的铸造性能和力学性能，在工业领域得到广泛的应用，用量很大，占铸造铝合金工业用量的一半以上。

随着汽车、摩托车制造和航空等工业的不断发展和进步，对铸造铝硅合金的需求量逐渐增加，同时对其质量要求也越来越高。然而，目前关于铸造铝硅合金的技术资料很少，尚没有系统地阐述铸造铝硅合金生产技术的书籍。

《铸造铝硅合金熔炼与铸锭》是在大量查阅国内外文献和作者在铸造铝硅合金厂多年工作经验基础上编著而成的。本书较详细地阐述了铸造铝硅合金熔炼与铸锭的基本理论，介绍了国内外先进的工艺技术。例如，蓄热式燃烧装置可以用炉子烟气 80% 左右的余热预热助燃空气；2004 年底在上海投入使用的第一台大容量永磁搅拌炉，使熔炼温度降低、熔炼速度加快、金属烧损率下降、产品质量提高；由于采用炉外在线除气装置，合金的含气量大大减少；虽然目前我国还没有实现液态铝合金供货，将来一旦采用此技术，由于用户不需重熔，可以降低燃料消耗，避免重熔时金属燃烧损失，

具有很可观的经济效益和社会效益。本书附录对铝合金铸件生产中经常出现的问题，如沉渣、炉结和硬质点等问题进行了简要讨论。

《铸造铝硅合金熔炼与铸锭》旨在抛砖引玉，为热爱铸造铝硅合金生产和应用的广大工程技术人员提供一点线索，帮助他们研究创新，以推动我国铸造铝硅合金生产和应用工业不断向前发展。

在本书的编著过程中，女儿赵越在繁忙的工作之余为本书绘制了部分插图，对初稿进行了文字核对；章碧苗和李文对初稿排版给予了很大帮助，在此表示感谢。

由于编著者才疏学浅，尽管花费了聚沙成塔之工夫，书中也难免有不足和疏漏之处，恳请读者批评指正。

赵恒先

2005年12月18日

目 录

1 概 述	1
1.1 铸造铝合金的发展	1
1.2 铸造铝合金生产工艺流程	2
1.3 铸造铝合金锭分组与国家标准	3
1.4 铸造铝硅合金	9
1.4.1 铸造铝硅合金分类	9
1.4.2 铸造铝硅合金的物理性质	12
1.5 铸造铝铜合金	13
1.6 铸造铝镁合金和铸造铝锌合金	15
1.6.1 铸造铝镁合金	15
1.6.2 铸造铝锌合金	16
1.6.3 铸造铝镁合金和铸造铝锌合金的物理性质	17
2 铸造铝合金中的金属元素	18
2.1 铝	19
2.1.1 铝在地壳中的储量	19
2.1.2 铝的国家标准	20
2.1.3 铝的性质	21
2.2 硅	22

2.2.1	工业硅的国家标准	22
2.2.2	Al-Si 二元相图	23
2.2.3	硅对铸造铝硅合金性质的影响	24
2.3	铜	28
2.3.1	铜的国家标准	28
2.3.2	Al-Cu 二元相图	28
2.3.3	铜对铸造铝硅合金性质的影响	29
2.4	镁和锌	30
2.4.1	镁的国家标准	30
2.4.2	Al-Mg ₂ Si 伪二元相图	31
2.4.3	镁对铸造铝硅合金性质的影响	31
2.4.4	锌	33
2.5	铁	34
2.6	锰和镍	35
2.7	其他一些金属	35
3	熔炼铸造铝合金炉	37
3.1	炉子	37
3.1.1	电阻加热反射炉	37
3.1.2	燃油加热反射炉	38
3.1.3	燃气加热反射炉	38
3.1.4	燃煤加热反射炉	39
3.1.5	竖炉	40
3.1.6	炉组	41
3.1.7	带前床的合金炉	43
3.1.8	带有电磁搅拌装置的炉子	43
3.1.9	用电磁泵或机械泵搅拌的炉子	44
3.1.10	带有永磁搅拌装置的炉子	45

3.2 蓄热式燃烧装置	48
3.3 理论能耗和能量利用率	49
3.4 节能的途径	52
3.5 筑炉材料	55
3.6 燃 料	57
4 铸造铝硅系合金熔炼	67
4.1 熔炼前的准备	67
4.1.1 炉料准备	67
4.1.2 精炼剂、变质剂和生产工具准备	74
4.1.3 炉子准备	75
4.2 配 料	76
4.2.1 配料前要明确的条件	77
4.2.2 传统的配料计算	78
4.2.3 电脑配料	79
4.3 装 炉	81
4.4 炉内精炼	82
4.5 细化变质	83
4.6 除 镁	84
5 精炼——除气和除渣	87
5.1 气体和夹渣的来源	87
5.1.1 气体的来源	87
5.1.2 氢在铝中的溶解度	88
5.1.3 夹渣的来源	90
5.2 除气和除渣的方法	91
5.2.1 浮游法	91
5.2.2 熔剂法	98

5.2.3 气体-熔剂联合法	100
5.2.4 真空除气和除渣	101
5.3 炉外精炼——炉外除气和除渣	102
5.3.1 GBF 炉外除气装置	102
5.3.2 ALPUR S1000 炉外除气装置	108
6 细化变质	111
6.1 共晶硅的变质	113
6.1.1 Na	113
6.1.2 Sr	114
6.1.3 稀土元素	115
6.1.4 Sb	116
6.2 初晶硅的细化	116
6.2.1 过共晶铝硅合金的特性	117
6.2.2 过共晶铝硅合金的用途	118
6.2.3 过共晶铝硅合金中初晶硅的细化	118
6.3 共晶硅和初晶硅双细化变质	126
6.3.1 P 和 S 双细化变质	126
6.3.2 P 和 RE 双细化变质	127
6.3.3 P 和 Sr 双细化变质	128
6.3.4 P 和 Na 双细化变质	128
6.3.5 P 和 C 双细化变质	130
6.3.6 P, S 和 RE 双细化变质	130
6.4 α -Al 基体晶粒细化	130
7 铸 锭	133
7.1 液态金属的结构	133
7.2 凝固过程和凝固方式	135

7.2.1 凝固过程	135
7.2.2 凝固方式	136
7.3 晶核的形成和晶粒度控制	138
7.3.1 晶核的形成	138
7.3.2 晶粒度控制	139
7.4 溶质再分布和成分过冷	140
7.4.1 溶质再分布	140
7.4.2 成分过冷	143
7.5 铸锭的缺陷	146
7.5.1 金属的凝固收缩	146
7.5.2 缩孔和缩松	147
7.5.3 裂 纹	148
7.5.4 偏 析	148
7.6 铸造设备和铸造工艺	151
7.6.1 铸造设备	151
7.6.2 铸造工艺	155
7.7 液态铝合金输送	155
8 铸造铝硅合金的质量检测	157
8.1 液态铸造铝硅合金质量的炉前检测	157
8.1.1 液态铸造铝硅合金温度的检测	157
8.1.2 化学成分检测	157
8.1.3 精炼效果检测	158
8.1.4 变质效果检测	162
8.2 铸造铝硅合金锭质量的检测	162
8.2.1 化学成分检测	162
8.2.2 含气量的检测	163
8.2.3 变质效果检测	164

8.3 铸造铝硅合金含渣量检测	166
8.3.1 断口检查法	166
8.3.2 真空过滤取样法	166
8.4 铸造铝硅合金力学性能检测	167
8.4.1 抗拉强度和伸长率	167
8.4.2 硬 度	169
附录一 熔炼铝合金炉用耐火材料	176
附录二 常用的相图	181
附录三 铸造方法和热处理	206
附录四 铸造铝合金炉内沉渣的产生和预防	210
附录五 保温炉炉结的形成和预防	213
附录六 铝合金铸件中的硬质点	215
附录七 铝合金铸件中“亮皮”夹杂的产生和预防	217
参考文献	218

1 概 述

1.1 铸造铝合金的发展

从20世纪初铝合金用于铸造工业以来,合金的成分有了很大的发展,合金的品种越来越丰富。早期使用的铸造铝合金含13%Zn和3%Cu。这种合金在第一次世界大战前后用量很大,后来由于金属型铸造的发展而被铝铜合金取代。同时,铝硅合金开始得到应用,铝镁合金也随之推出。

1919年,美国生产的铝合金铸件,97%以上由含8%Cu的铝合金铸造。1933年,用这种合金生产的铸件仍占铝合金铸件的50%左右。除了在铸态下使用的合金外,后来又开发出可以热处理的铝铜合金,含大约4%Cu。

随着金属型铸造和压铸工艺的发展,铝硅合金得到广泛应用。近年来,在铸造领域应用的铝合金,除了铝硅系列合金之外,还有铝铜系列、铝镁系列、铝锌系列和其他系列的铝合金。在这些系列的合金中,除了少数的二元合金外,大多数都是添加多种合金元素的多元合金。

概括地说,铸造铝合金中含有的合金元素主要有硅(Si)、铜(Cu)、镁(Mg)、锌(Zn)、锰(Mn)、镍(Ni)、钛(Ti)、锶(Sr)和稀土(RE);杂质元素主要有铁(Fe)、铅(Pb)、锡(Sn)、铬(Cr)和钙(Ca)等。不同系列的合金有不同的特性和用途。

铝硅系列合金具有良好的铸造性能,较小的线胀系数,耐磨性能好,气密性也很好。这种合金被广泛地应用于铸造复杂的铸

件，如汽车发动机铸件等。

铝铜系列合金具有良好的机械切削性能，但是铸造性能较差，耐腐蚀性也不好，主要用于形状不太复杂且需要切削加工的铸件。

铝镁系列合金具有优良的力学性能、较高的耐腐蚀性能和良好的切削加工性能，用于铸造承受高负荷及与腐蚀介质接触机会多的铸件。由于这种合金铸造性能不好、熔炼工艺要求高，所以它的应用受到限制，不如铝硅合金应用得那么普遍。

铝锌系列合金铸件经自然时效可获得较高的力学性能，焊接后对合金性能影响不大，不需要重新进行热处理。由于这种合金密度大，高温性能差，所以它的应用受到很大限制。目前铸造铝合金种类繁多，应用极广。在所有的铸造铝合金中，铝硅合金的用量占一半以上。

1.2 铸造铝合金生产工艺流程

铸造铝合金生产的一般工艺流程如图 1.1 所示。

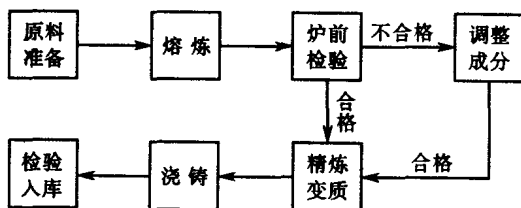


图 1.1 铸造铝合金生产工艺流程

原料准备：包括原料外观检查，化学成分分析，配料和按配料计算结果称量各种原料。另外，还包括精炼剂、变质剂的烘干和称量。

熔炼：按一定的加料顺序把原料加入炉内，将其熔化成化学

成分均匀的合金。

炉前化验：合金熔化均匀后，取样化验，检查各种化学成分是否符合技术标准要求。

调整成分：经化验，如果发现合金中某种或几种化学成分超出技术标准的规定，则要进行调整，使化学成分达到技术标准。

精炼：化学成分符合要求后，要用精炼剂清除合金中溶解的气体 and 夹带的固体颗粒。

细化变质：向铝合金液中添加适量的细化剂和变质剂，改善合金力学性能和机械切削加工性能等。

浇铸：将化学成分合格、变质效果好，含气量和含渣量均达到要求的铝合金铸成锭，打成包捆。

检查入库：经过检验，化学成分、含气量、夹杂物、变质效果、力学性能和外观都合格的铝合金锭作为合格产品入库。

1.3 铸造铝合金锭分组与国家标准

根据铸造铝合金所含的基本合金元素，可以将其分为四组：铸造铝硅合金、铸造铝铜合金、铸造铝镁合金和铸造铝锌合金。

铸造铝合金的代号和化学成分等必须符合国家标准《中华人民共和国国家标准铸造铝合金锭 GB/T 8733—2000》。

在国家标准中，铸造铝合金锭以三个拼音字母“ZLD”和三位数字表示合金系列。其中1表示铝硅系列合金；2表示铝铜系列合金；3表示铝镁系列合金；4表示铝锌系列合金。如ZLD101是铸造铝硅合金锭；ZLD201是铸造铝铜合金锭，以此类推。

表1.1是GB/T 8733—2000砂型、金属型和熔模铸造铝合金锭化学成分。表1.2是GB/T 8733—2000压铸用铝合金锭化学成分。

表 1.1 砂型、金属型和熔模铸造铝合金化学成分(质量分数)(GB/T 8733-2000)

序 号	合金锭牌号	合金锭 代 号	合 金 元 素							
			Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	其他	Al
1	ZAlSi7MgD	ZLD101	6.5~7.5	—	0.30~0.50	—	—	—	—	余量
2	ZAlSi7MgDA	ZLD101A	6.5~7.5	—	0.30~0.50	—	—	0.08~0.20	—	余量
3	ZAlSi12D	ZLD102	10.0~13.0	—	—	—	—	—	—	余量
4	ZAlSi9MgD	ZLD104	8.0~10.5	—	0.2~0.4	—	0.2~0.5	—	—	余量
5	ZAlSi5Cu1MgD	ZLD105	4.5~5.5	1.0~1.5	0.45~0.65	—	—	—	—	余量
6	ZAlSi5Cu1MgDA	ZLD105A	4.5~5.5	1.0~1.5	0.50~0.65	—	—	—	—	余量
7	ZAlSi8Cu1MgD	ZLD106	7.5~8.5	1.0~1.5	0.35~0.55	—	0.3~0.5	0.10~0.25	—	余量
8	ZAlSi7Cu4D	ZLD107	6.5~7.5	3.5~4.5	—	—	—	—	—	余量
9	ZAlSi12Cu2Mg1D	ZLD108	11.0~13.0	1.0~2.0	0.5~1.0	—	0.3~0.9	—	—	余量
10	ZAlSi12Cu1Mg1Ni1D	ZLD109	11.0~13.0	0.5~1.5	0.9~1.4	—	—	—	—	余量
11	ZAlSi5Cu6MgD	ZLD110	4.0~6.0	5.0~8.0	0.3~0.55	—	—	—	—	余量
12	ZAlSi9Cu2MgD	ZLD111	8.0~10.0	1.3~1.8	0.45~0.65	—	0.10~0.35	0.10~0.35	—	余量
13	ZAlSi7MgDA	ZLD114A	6.5~7.5	—	0.50~0.65	—	—	0.10~0.20	—	余量
14	ZAlSi5Zn1MgD	ZLD115	4.8~6.2	—	0.45~0.7	1.2~1.8	—	—	Sn0.1~0.25	余量
15	ZAlSi8MgBeD	ZLD116	6.5~8.5	—	0.4~0.6	—	—	0.10~0.30	Be0.15~0.40	余量

续表 1.1

序 号	合金锭牌号	合金锭 代 号	杂质含量,不大于														其他	杂质总和
			Fe	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Zr	Ti+Zr	Be	Ni	Sn	Pb			
1	ZAIS7MgD	ZLD101	0.45	—	0.2	—	0.2	0.35	0.20	—	0.25	0.1	—	0.01	0.05	—	1.1	
2	ZAIS7MgDA	ZLD101A	0.12	—	0.10	—	0.05	0.05	—	—	—	—	0.05	0.01	0.05	—	0.6	
3	ZAIS12D	ZLD102	0.6	—	0.30	0.10	0.1	0.5	0.20	—	—	—	—	—	—	—	1.6	
4	ZAIS9MgD	ZLD104	0.45	—	0.1	—	0.25	—	—	—	0.15	—	—	0.01	0.05	—	1.2	
5	ZAIS5Cu1MgD	ZLD105	0.45	—	—	—	0.2	0.5	—	—	0.15	0.1	—	0.01	0.05	—	1.3	
6	ZAIS5Cu1MgDA	ZLD105A	0.15	—	—	—	0.1	0.1	—	—	—	—	—	0.01	0.05	—	0.4	
7	ZAIS8Cu1MgD	ZLD106	0.5	—	—	—	0.2	—	—	—	—	—	—	0.01	0.05	—	1.1	
8	ZAIS7Cu4D	ZLD107	0.4	—	—	0.1	0.2	0.3	—	—	—	—	—	0.01	0.05	—	0.9	
9	ZAIS12Cu2Mg1D	ZLD108	0.4	—	—	—	0.2	—	0.20	—	—	—	0.3	0.01	0.05	—	0.8	
10	ZAIS12Cu1Mg1Ni1D	ZLD109	0.4	—	—	—	0.2	0.20	0.20	—	—	—	—	0.01	0.05	—	0.8	
11	ZAIS5Cu6MgD	ZLD110	0.5	—	—	—	0.5	0.5	—	—	—	—	0.3	0.01	0.05	—	1.5	
12	ZAIS9Cu2MgD	ZLD111	0.35	—	—	—	0.1	—	—	—	—	—	—	0.01	0.05	—	1.0	
13	ZAIS7Mg1DA	ZLD114A	0.15	—	—	0.1	—	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	0.6	
14	ZAIS5Zn1MgD	ZLD115	0.25	—	0.1	—	—	0.1	—	—	—	—	—	0.01	0.05	—	1.0	
15	ZAIS8MgBeD	ZLD116	0.5	—	0.3	—	0.3	0.1	—	0.2	—	—	—	0.01	0.05	0.1	1.0	

续表 1.1

序号	合金牌号	合金锭代号	合金元素						
			Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	其他
16	ZAIS20Cu2RE1 MgMnD	ZLD118	19~22	1.0~2.0	0.5~0.8	—	0.3~0.5	—	RE0.6~1.5
17	ZAICu5MnD	ZLD201	—	4.5~5.3	—	—	0.6~1.0	0.15~0.35	—
18	ZAICu5MnDA	ZLD201A	—	4.8~5.3	—	—	0.6~1.0	0.15~0.35	—
19	ZAICu4D	ZLD203	—	4.0~5.0	—	—	—	—	—
20	ZAICu5MnCdDA	ZLD204A	—	4.6~5.3	—	—	0.6~0.9	0.15~0.35	Cd0.15~0.25
21	ZAICu5MnCdVDA	ZLD205A	—	4.6~5.3	—	—	0.3~0.5	0.15~0.35	Zr0.05~0.20 Cd0.15~0.25 B0.01~0.06 V0.05~0.30
22	ZAICu3RES32D	ZLD207	1.6~2.0	3.0~3.4	0.2~0.3	—	0.9~1.2	—	Ni0.2~0.3 Zr0.15~0.25 RE4.5~5.0
23	ZAIMg10D	ZLD301	—	—	9.8~11.0	—	—	—	—
24	ZAIMg5Si1D	ZLD303	0.8~1.3	—	4.6~5.6	—	0.1~0.4	—	—
25	ZAIMg8Zn1D	ZLD305	—	—	7.6~9.0	1.0~1.5	—	0.1~0.2	Be0.03~0.1
26	ZAIZn11Sr7D	ZLD401	6.0~8.0	—	0.15~0.35	9.2~13.0	—	—	—
27	ZAIZn6MgD	ZLD402	—	—	0.55~0.70	5.2~6.5	—	0.15~0.25	Cu0.4~0.6
28	ZAIMn1D	ZLD501	—	—	—	—	1.50~1.70	—	—