

原铝及其合金的熔炼与铸造

向凌霄 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2005

前 言

截至2001年底,我国已建成电解铝厂131家;其生产能力约426万t,当年实际产铝量342.7万t,跃居世界第一大原铝生产国。2003年底,电解铝厂已达147家,生产能力已达834万t,当年总产量达556.3万t。令人振奋!

1962年,我毕业于中南矿冶学院(今中南大学),分配到冶金工业部沈阳铝镁设计研究院工作。自此,我参加到我国铝工业建设的行列,亲身经历了当今世界第一产铝大国的发展历程。我因从事工程建设和实验研究工作,长时间工作在生产现场。早在20世纪七八十年代曾有友人向我建议,将原铝熔铸资料整理成册。当时忙于完成工作任务,总是未能如愿。今得空闲,将工作和学习中积累的资料汇集整理,编著成此书。因此,透过本书可以概略地看到我国原铝熔铸生产技术的发展历程。

目前,大部分电解铝厂与铝加工厂截然分开,以重熔用铝锭作为出厂产品供给铝加工厂使用。根据生产实践,用液态原铝直接生产压力加工用坯锭,每吨产品约可节省1%的金属铝、30kW·h电能、1500m³煤气、3kg钢带及封缄、12t生产用水;还可以减少废气污染。铝厂与铝加工厂的生产实行优化组合,可以创造很大的社会效益和企业经济效益,其结合点在熔铸。促进这种优化组合,是编著本书的主要目的。

本书汇集了近50年来国内外有关原铝及其合金的熔铸资料,概括了原铝熔铸的生产特点和液态原铝的特点。使用液态原铝直接生产压力加工用坯锭或铸件,必须针对这些特点采取相应的处理措施,其熔炼工艺是重要的中心环节。近20多年来,国内外许多研究者探索在铝电解槽中生产铝基合金,这使铝冶炼与铝加工实行优化组合更跨进了一步,是一件很有意义的事情。

使用液态原铝直接生产压力加工用坯锭或铝铸件,由于省去了大批量固态炉料的熔化工序,废气污染比重熔铝锭时大为减轻,而且大量省去了重熔用铝锭生产用水。这对于保护生态环境是很有意义的,值得推广。

电解铝厂既是生产铝材的企业,又是大量使用铝材的场所。鉴于铝厂的生产特点,本书较为全面地介绍了铝材的导电性能和力学性能;并试图从铝冶炼和金属材料两个专业角度来叙述原铝及其合金的熔铸生产,目的也是为了促进电解铝厂和铝加工厂生产的优化组合。

一项研究成果是在一定的条件下取得的;应用一项研究成果,必须清楚地了解其产生的条件。为了使读者能全面正确地了解各项研究成果,本书尽可能

详细地介绍其产生的条件。这样对于了解事物的因果关系是有益的，有利于激发读者的创造性思维。

由于个人经历和认识的局限，书中难免有不妥之处，诚望读者多多指教，以便更好地促进铝电解与铝加工生产的优化组合。倘若能为我国这种优化组合尽到些微薄力量，便是最大的安慰！

在编著本书的过程中，得到杨宇、向岳和向铮的大力相助；还得到许多亲友大力支持，在此表示衷心的感谢！本书能顺利出版，冶金工业出版社的编辑做了许多细致的工作，在此一并致谢！

向凌霄
2005年6月

目 录

绪 论	1
参考文献	3
1 熔铸的基本知识	4
1.1 铝及铝合金的性质	4
1.1.1 物态结构	4
1.1.2 密度	5
1.1.3 熔化温度	7
1.1.4 热容及熔解潜热	8
1.1.5 热膨胀	9
1.1.6 铝的化学性质	11
1.1.7 液态铝的表面张力	12
1.1.8 液态铝的黏性	13
1.1.9 液态铝的流动性	14
1.1.10 铝等液态金属的蒸气压力	15
1.2 铝及铝合金的性能	16
1.2.1 导电性能	16
1.2.2 热传导性能	28
1.2.3 磁学性能	30
1.2.4 力学性能	31
1.2.5 工艺性能	36
1.3 铝及铝合金的氧化	38
1.3.1 氧化特点	38
1.3.2 铝与水的作用	40
1.3.3 合金元素对铝合金氧化的影响	42
1.3.4 铝合金在熔铸过程中的金属烧损	46
1.4 铝及铝合金中的气体	47
1.4.1 铝中存在的气体种类及形态	47
1.4.2 铝及铝合金中氢的溶解度	48
1.4.3 影响金属中气体溶解度的因素	50
1.4.4 气体的来源	56
1.5 铸锭的凝固	63

1.5.1	液态金属的结构	64
1.5.2	连续铸锭的凝固	65
1.5.3	轮带式连续铸造铝坯的凝固	75
1.5.4	连续铸轧铝板坯的凝固	77
1.5.5	铸坯冷却速度与铸造方法的关系	81
	参考文献	82
2	原铝及其合金的生产	84
2.1	原铝生产	84
2.1.1	生产原理	84
2.1.2	原铝的特点	85
2.1.3	原铝优质生产途径	94
2.2	在铝电解槽中生产铝基合金	98
2.2.1	Al-Si-Ti 合金	98
2.2.2	Al-Ti 合金	101
2.2.3	Al-Ti-B 及 Al-B 合金	105
2.2.4	铝稀土合金	110
2.2.5	铝锶合金	118
2.2.6	铝铬中间合金	119
2.2.7	在铝电解槽中生产铝基合金的实际意义	119
2.3	用原铝对掺法生产铝基合金	122
2.3.1	工业高纯铝和工业纯铝	122
2.3.2	LD30、LD31 合金	124
2.3.3	导电铝及其合金	127
2.3.4	铸造铝合金	130
2.3.5	对掺法生产铝合金的现实意义	131
	参考文献	132
3	熔炼工艺	135
3.1	出铝	135
3.2	化学成分的调整与配料	137
3.3	液态铝的精炼	141
3.3.1	氯化法	143
3.3.2	熔剂与氮氯气体联合法	144
3.3.3	熔剂与 MINT 联合法	148
3.3.4	SNIF 法	152
3.3.5	ALPUR 法	157
3.3.6	真空处理法	160
3.3.7	大气湿度对除气效果的影响	162

3.3.8 熔炼工艺对含氢量的影响	163
3.3.9 过滤净化	165
3.3.10 无介质精炼处理	175
3.3.11 电解原铝的精炼实践	177
3.4 晶粒细化处理	182
3.4.1 中间合金细化剂	183
3.4.2 盐类细化剂	191
3.4.3 电磁搅拌细化处理	193
3.5 铝液静置	196
3.6 铝液测氢工艺操作	197
3.6.1 测氢仪使用要求	197
3.6.2 对测氢工具的要求	197
3.6.3 取样	197
3.6.4 载气	198
3.6.5 氢气	198
3.6.6 测氢操作	198
3.7 混合料的规定	198
3.8 铝液温度的调整与控制	199
3.9 清炉	201
3.10 氮氯混合装置	201
3.11 炉子管理工艺	202
3.12 铝液转运	204
3.13 熔炼设备对铝熔体质量的影响	206
参考文献	210
4 铸造工艺	213
4.1 立式半连续铸锭	213
4.1.1 圆铸锭用结晶器	214
4.1.2 扁锭结晶器	217
4.1.3 金属转注及液流控制	221
4.1.4 铸造制度	221
4.1.5 铸锭缺陷	229
4.1.6 立式连续铸锭技术的发展	238
4.2 连续铸轧	246
4.2.1 连续铸造板坯的发展简况	246
4.2.2 连续铸轧机组的组成	247
4.2.3 连续铸轧生产过程	248
4.2.4 铸轧辊	253
4.2.5 工艺润滑	255

4.2.6	浇注系统的结构形式及供料嘴	258
4.2.7	晶粒细化处理	260
4.2.8	连续铸轧板的缺陷	261
4.2.9	连续铸轧法优缺点	262
4.2.10	连续铸轧法的发展	263
4.3	Properzi 连铸连轧	264
4.3.1	连铸连轧机列组成	265
4.3.2	连铸连轧生产工艺	270
4.3.3	生产工艺对电工铝杆组织性能的影响	273
4.3.4	铸坯及铝杆缺陷	276
4.3.5	连铸连轧的技术发展	276
4.4	水平连续铸造	277
4.4.1	发展简况	277
4.4.2	工作原理	279
4.4.3	设备结构	280
4.4.4	水平连续铸锭工艺	282
4.4.5	水平连续铸造铝杆	286
4.5	双带式连铸法	292
4.5.1	黑兹列特连铸机	292
4.5.2	双履带式连铸机	294
4.6	重熔用铝锭生产	296
4.7	铸锭技术的发展	300
4.7.1	喷射成形法	300
4.7.2	快速凝固法制造金属薄板	300
4.7.3	从内部结晶的连续铸锭法	300
4.7.4	部分凝固状态的连续铸造	301
4.8	泡沫铝	301
4.9	超声波探伤检查铸锭缺陷	302
	参考文献	303
5	生产检验	306
5.1	生产检验的目的	306
5.2	化学成分检验	306
5.3	组织检验	307
5.4	表面检验	309
5.5	性能检验	309
5.5.1	力学性能检验	310
5.5.2	导电性能检验	313
	参考文献	315

6 辅助生产	316
6.1 中间合金生产	316
6.1.1 中频感应炉熔炼中间合金	316
6.1.2 煤气炉熔炼中间合金	317
6.2 熔剂生产	318
6.2.1 熔剂在熔铸生产中的作用	318
6.2.2 熔剂生产工艺	323
6.3 铝渣处理	325
6.3.1 熔化法	326
6.3.2 冷却筛分法	327
6.3.3 湿法处理	327
6.4 抬包清理	328
参考文献	329
7 熔铸生产的安全与卫生	330
7.1 安全生产技术	330
7.1.1 产生危险事故的原因	330
7.1.2 熔铸生产安全技术	330
7.2 劳动卫生	332
7.3 环境保护技术	334
7.3.1 环境标准	334
7.3.2 大气污染	334
7.3.3 水污染	334
7.3.4 环境噪声	336
参考文献	337
8 车间设计及主要生产设备选择原则	338
8.1 熔铸车间设计基本原则	338
8.2 主要生产设备选择原则	339
8.2.1 铸造设备选择	339
8.2.2 熔炼设备选择	339
参考文献	340

绪 论

铝(Al)是最重要的轻金属。铝在地壳中的含量仅次于氧和硅。自然界的含铝矿物约有250种,最常见的是铝硅酸盐及其风化产物——黏土。我国已探明的铝土矿,除个别地区外都为高铁高铝的一水硬铝石型,杂质主要是高岭石中的 SiO_2 和少量的 Fe_2O_3 、 TiO_2 。铝土矿经化学处理后提炼出氧化铝供原铝生产。

原铝生产属铝冶炼范围,主要是化学过程,其基础理论是物理化学。目前,原铝生产主要是采用熔盐电解法,在铝电解槽内将冰晶石与氧化铝等盐类熔体通以直流电,使氧化铝还原得到液态铝。在铝电解生产过程中,电解质的温度在 $950\sim 965^\circ\text{C}$ 之间,电解槽中液态原铝的温度约低于电解质 $5\sim 7^\circ\text{C}$ 。对于原铝生产而言,冶炼工作者很关注其化学成分,即原铝的纯度。在生产过程中,向电解质中加入某种元素的氧化物或盐类,即可得到含有该元素的液态铝合金;这种合金化的过程,包括电解过程和铝还原合金元素的过程。在铝电解生产过程中,不实施铝熔炼生产的其他操作。因此,原铝及其合金的生产,仅可视为铝熔铸生产中的熔化工序。

熔炼与铸造生产属金属材料加工范围,主要是物理过程,其基础理论是金属物理学。在铝及铝合金的熔铸过程中,其铸造温度为 700°C 左右。对于铝材生产而言,金属材料工作者除了注重其化学成分之外,还关注其纯洁度及内部组织结构,因为金属的化学成分和纯洁度及内部组织都直接影响到铝材的性能。在熔铸生产过程中,对铝液要进行严格的精炼和晶粒细化等处理。

原铝及其合金的熔炼与铸造,是指将电解铝厂生产出来的液态原铝直接经熔炼后铸造成各种压力加工用坯锭;它将铝工业中两个各自独立的生产环节铝冶炼与铝加工生产组合到一起。液态原铝是铝电解厂的中间产品。这种组合的结合点在熔铸。根据生产的具体条件,熔铸生产可以设在电解铝厂,也可以设在铝加工厂。当铝加工厂距电解铝厂较近时,可以将高温液态原铝用保温容器盛装送往铝加工厂,利用其高温余热熔化铝加工过程中产生的废料。当铝加工厂距电解铝厂较远时,熔铸生产可设在电解铝厂,由电解铝厂供给铝加工厂所需的压力加工用坯锭;铝加工生产中产生的废料,可运往电解铝厂利用液态原铝的高温余热进行熔化处理。也可以采取两者兼容的生产方式。由于铝电解属连续生产过程,无论哪种生产格局,电解铝厂必备处理该厂全部液态原铝的生产设施;也因为这种原因,熔铸生产最好以电解铝厂为主。

工业生产在确保国家和社会发展需要的前提下,应致力于良好的经济效益。在铝冶炼与铝加工生产截然分开的情况下,电解铝厂生产出来的液态原铝被铸成重熔用铝锭,即普通铝锭;将普通铝锭运往铝加工厂重熔,再铸成压力加工用坯锭,然后经压力加工成各种铝材。根据生产实践,液态原铝铸成重熔用铝锭时,设计消耗指标每吨铝锭为电能 $30\text{kW}\cdot\text{h}$,生产用水 $9\sim 12\text{t}$,捆扎锭垛用的钢带及封缄 3kg ,原铝损耗 0.5% ^①;在铝加工

① 本书凡未经标注的百分含量均为质量分数。

厂重熔铝锭再铸成压力加工用坯锭时, 每吨产品需用煤气约 1500m^3 , 金属铝烧损 1.5% 。两厂的金属铝损耗合计为 2% 。用液态原铝直接生产压力加工用坯锭时, 省去了重熔用铝锭的熔铸及其重熔的工序, 金属铝损耗约为 1% , 即每吨产品约可节省 1% 的金属铝、 $30\text{kW}\cdot\text{h}$ 电能、 1500m^3 煤气、 3kg 钢带及封碱及 $9\sim 12\text{t}$ 生产用水。按现时物价估算, 每吨产品可节省生产费用 480 元; 节省的生产费用足以支付两厂职工的基本工资。王祝堂先生的调查结果也表明, 在当前的生产条件下, 我国挤压型材生产坯坯的成本为 $650\sim 1100$ 元/t (含均匀化处理), 而铝厂用液态原铝生产挤压坯坯的成本比生产重熔用铝锭的成本约高 250 元/t。2003 年底, 电解铝厂已达 147 家, 生产能力已达 834 万 t, 当年总产量达 556.3 万 t。目前大多数电解铝厂与铝加工厂截然分开, 实行了优化组合。若全部液态原铝直接生产成压力加工用坯锭, 以年产 556.3 万 t 计, 每年可节省约 22.252 亿元以上的生产费用, 而且无须投资, 每年即可增加 5.563 万 t 金属铝供社会使用。足见铝电解与铝加工生产实行优化组合的经济效益显著。

铝电解与铝加工生产实行优化组合, 其意义不仅仅在于经济效益方面, 而且还在于其环境保护的意义。英国气象局的一项新分析表明, 全球变暖使气温升高的现象, 在城市地区要比乡村地区严重得多。这是由于城市里人工热源多, 空气污染严重, 建筑物和公路储存热量的能力强, 城市中的气温明显高于郊区, 形成“城市热岛效应”。英国气象局的一个气候预测中心分析显示, 如果大气中 CO_2 含量增加一倍, 城市热岛效应强度会增加两倍。目前城市地区释放热量的功率为 $20\text{W}/\text{m}^2$, 将来会升至 $60\text{W}/\text{m}^2$ 以上。这一分析结果, 与美国《全国科学院学报》最近发表的一项对中国东南地区的调查结论一致。我国东南地区经济较为繁荣, 城市化程度高, 调查结果这一地区每 10 年气温上升的幅度, 比我国农村地区同期内气温上升幅度高 0.05°C 。从上述已知, 每重熔 1t 铝锭消耗 1500m^3 煤气。全国以年产 556.3 万 t 原铝计, 重熔这些铝锭及生产废料所排放出来的废气, 是一个庞大的数字。而铝加工厂多集中于城区。如果用液态原铝直接生产压力加工用坯锭, 并利用其高温余热熔化生产废料, 可以免除重熔铝锭和生产废料所产生的废气排入大气。还可以减少 1% 金属铝烧损所形成的铝渣, 并可省去因生产重熔用铝锭所需的冷却水。这些对于环境保护都是十分有利的, 可以减弱“城市热岛效应”的强度。因此从保护环境的角度来看, 铝电解与铝加工生产实行优化组合, 是值得推荐的。

由于我国铝土矿资源特点, 使得生产出来的氧化铝中 Fe_2O_3 含量往往低于 SiO_2 含量, 而且使 SiO_2 含量小于 0.04% 的氧化铝产量受到限制。因此, 影响到 Si 含量小于 0.08% 的电工用铝的产量。如山东铝厂 1981 年 Si 含量不大于 0.08% 的铝电解槽数约占 42.2% 。在电工用铝锭重熔过程中, 会增加 Si 含量 0.01% 左右。这是因为液态铝很容易与炉衬材料及铝锭上黏附的灰尘进行化学反应, 炉衬材料和灰尘中含有许多 SiO_2 。液态铝与 SiO_2 反应后, 生成的游离 Si 很容易溶于铝液中。铝液在炉内停留的时间越长, 铝锭上黏附的灰尘越多, 铝液增 Si 的现象越严重。当铝锭上表面有较深的凝固收缩裂缝时, 裂缝中会积存更多的灰尘。全国电线电缆企业 5000 多家。为了解决电工用铝的供需矛盾, 最好的办法是由电解铝厂 (特别是氧化铝电解联合企业) 用液态原铝直接生产铝杆供电线电缆生产用。这样, 可以扩大电工用铝来源, 还可以提高国产原铝的使用价值。

原铝中的杂质主要是 Si 和 Fe 。在电解铝生产过程中, 铝电解槽的液态原铝中杂质含量各不相同。特别是生产时间较长的电解槽, 临近破损停槽之前的一段时间内, 液态原铝

中的杂质含量大为增加, 尤以硅含量显著, 使原铝的品级大为降低。在新电解槽启动后的一段时间内, 原铝中杂质含量也比较高。按国家标准规定, 一级铝允许含 0.3% Fe 和 0.25% Si, 二级铝允许含 0.5% Fe 和 0.45% Si, 三级铝允许含 1.1% Fe 和 1.0% Si。实际生产中, 我国液态原铝中的 Fe 含量通常低于同品位的 Si 含量。在电解铝生产中, 原铝的质量要求, 设计指标一级品以上为 95%。实际生产中, 为了提高企业的经济效益, 通常将低品位的液态原铝与高品位的液态原铝混匀来提高商品铝锭的品级, 往往使企业的原铝锭一级品率达到 100%; 同时也降低了一部分高品位铝的质量水平。在铝加工生产中, 不同的产品对铝中的杂质含量要求不同。例如建筑铝型材用的 LD30 (6061) 铝合金中允许 Fe 含量不大于 0.7% 和 Si 含量为 0.4% ~ 0.8%, LD31 (6063) 铝合金中允许 Fe 含量不大于 0.35% 和 Si 含量为 0.2% ~ 0.6%。如果直接采用液态原铝来生产上述铝合金, LD30 合金可选用二级原铝, LD31 铝合金也可以选用 Fe 含量低于 0.35% 的二级原铝。这样, 可以合理地利用资源, 同时相对提高了高品位原铝的质量水平, 也就提高了其使用价值。作为工业原料, 既要关注其商业价值, 更要考虑其使用价值, 以适应科技发展的要求。

综上所述, 原铝及其合金的熔炼与铸造是介于铝冶炼与铝加工生产之间的一项边缘技术, 它将铝冶金工业中两个各自独立的生产环节联结起来。铝电解与铝加工生产实行优化组合, 无论从经济效益还是从社会效益来看, 都是很有实际意义的。正因为如此, 目前工业发达国家约有 72% 的挤压锭坯由电解铝厂与熔铸厂生产; 而中国 90% 以上的此类锭坯是挤压厂自己生产的。截止到 2003 年底, 中国约有铝材挤压企业 600 家, 在产的挤压机约 1800 台, 估算其生产能力超过 3800kt/a; 当年熔炼铸造了约 3000kt 挤压锭坯; 还有许多板、带、箔材生产企业。由此可见, 用液态原铝直接生产压力加工用坯锭的前景广阔; 促进铝电解与铝加工生产实现优化组合, 加强原铝及其合金的熔铸技术研究工作, 有待铝冶金工作者共同努力, 使我国的铝工业科技水平不断得到提高。

参 考 文 献

- 1 向凌霄. 轻金属, 2003, (1): 3~6
- 2 王祝堂. 中国铝业, 2004, (2): 44~45
- 3 董春明等. 中国铝业, 2004, (3): 2~13
- 4 晚晴报, 2004 年 8 月 16 日 (第 1691 期) 第五版

1 熔铸的基本知识

铝的化学符号为 Al，在元素周期表中属 III_A 族，原子序数为 13，相对原子质量为 26.98154，原子半径为 1.43×10^{-10} m。

铝之所以能广泛地应用，除了自然界含铝矿资源丰富以外，更重要的是铝有着许多优良的性质和性能。在本章中，对铝及铝合金的性质和性能及其特性作概要的叙述。

1.1 铝及铝合金的性质

1.1.1 物态结构

1.1.1.1 固态结构

铝在固态时属于面心立方的结晶体。在常压下从 4K 至熔点温度范围内，晶体结构是稳定的，无同素异晶转变。

用衍射法测得纯铝液态和固态结构：

液态：配位数 10~11，原子间距 2.96×10^{-10} m；

固态：配位数 12，原子间距 2.86×10^{-10} m。

纯度为 99.99% 的工业纯铝，晶体的点阵常数与温度的关系见表 1-1。

表 1-1 工业纯铝 99.99% 点阵常数与温度的关系

温度/℃	点阵常数/m	温度/℃	点阵常数/m
-262.8	4.03186×10^{-10}	25.5	4.04960×10^{-10}
-204.9	4.03191×10^{-10}	47.0	4.05165×10^{-10}
-228.8	4.03201×10^{-10}	50.0	4.05187×10^{-10}
-218.1	4.03219×10^{-10}	100	4.05668×10^{-10}
207.2	4.03239×10^{-10}	150	4.06159×10^{-10}
-198.2	4.03271×10^{-10}	200	4.06680×10^{-10}
-187.5	4.03314×10^{-10}	300	4.07792×10^{-10}
-167.0	4.03412×10^{-10}	400	4.08984×10^{-10}
-158.0	4.03462×10^{-10}	600	4.11700×10^{-10}
-148.2	4.03528×10^{-10}	650	4.12451×10^{-10}
0	4.04731×10^{-10}		

晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷。点缺陷包括空位、自填隙原子、代位原子和异类填隙原子等。在铝晶体中，存在直径为 0.62×10^{-10} m 的四面体间隙和直径为 1.170×10^{-10} m 的八面体间隙。铝的室温平衡空位浓度很小，自填隙原子形成能是空位形成能的 3~4 倍，其平衡浓度极小。代位原子和异类填隙原子的最大浓度由相图决定。纯铝平衡空位浓度与温度的关系见表 1-2。

表 1-2 纯铝平衡空位浓度与温度的关系

温度/°C	平衡空位浓度 /个·原子 ⁻¹	温度/°C	平衡空位浓度 /个·原子 ⁻¹	温度/°C	平衡空位浓度 /个·原子 ⁻¹
660	$10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$	527	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	327	$10^{-9} \sim 10^{-8}$
627	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	427	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	27	$10^{-12} \sim 10^{-11}$

位错是晶体线缺陷。纯铝各种状态的位错密度见表 1-3。

表 1-3 各种状态的纯铝中位错密度

状 态	位错密度 /cm·cm ⁻³	状 态	位错密度 /cm·cm ⁻³
单晶体或多晶体最完善部位	$10^4 \sim 10^8$	多晶体淬火或冷加工	$10^{16} \sim 10^{18}$
多晶体退火	$10^{10} \sim 10^{14}$	多晶体零摄氏度以下冷加工	$10^{18} \sim 10^{20}$
单晶体冷加工	$10^{12} \sim 10^{14}$	冷加工后经辐照	$10^{20} \sim 10^{22}$

堆垛层错、孪晶界及晶粒间界等属于晶体面缺陷。纯铝的层错能约为 $2 \times 10^{-5} \text{J/cm}^2$ 。由于层错能高，铝中一般看不到层错。纯铝的晶界能约为 $5 \times 10^{-5} \text{J/cm}^2$ 。

1.1.1.2 液态结构

现代可以利用计算机对理想的液体模型进行大量的计算，求分布函数和物理化学性质。李基永等人采用分子动力学方法对液态金属铝及其凝固过程中的微观结构转变特性进行了模拟研究，发现在 1800 ~ 350K 内对金属结构起重要作用的 HA 键型组态有 1551、1541、1431、1311、1321 和 1422 等。其中以 1551 键型组态最为显著，由 1800K 时占总成键数的 7.3% 上升到 350K 时的 30.4%，净增 23%。1541 键型次之，仅由 10.3% 上升到 15%，净增 5%。由此可见，对于液态金属铝由液态转变到固态的过程中，微观结构的变化是由 1551 键型起着主导作用。

根据液体准结晶模型的原理，金属熔体的结构也类似多晶体。它可以分为两部分，即由类晶体的微观团块部分 ψ_{kn} 和填充在这些团块之间、杂乱分布且类似气体行为的微粒 ψ_{pab} 所组成。 ψ_{kn} 和 ψ_{pab} 的数量与金属种类和温度有关。温度升高， ψ_{kn} 减少，到完全熔化温度 T_{pab} 时 ψ_{kn} 等于零，而 $\psi_{\text{pab}} \approx 1$ 。П. П. Арсентьев 等人对纯度 99.99% 的铝和 AM_r 铝合金进行研究，在 1150°C 温度以内，以 3.75°C/min、5°C/min 和 20°C/min 的升温速度加热熔体，在所做的差热分析曲线上都未能证实有热效应的最大值和最小值，即未能证实有关液体铝中多晶现象的假设。

研究金属液体的结构、性质及其对固体的作用，对于发展新材料，如半导体材料、快冷微晶合金、非晶态金属等，有着重要的意义。

1.1.2 密度

在已发现的 107 种元素里，有 85 种是金属元素。人们通常按照密度大小来把金属分类，把密度小于 4.5g/cm^3 的叫做轻金属，把密度大于 4.5g/cm^3 的叫做重金属。铝属于轻金属。铝在室温时的理论密度为 2698.72kg/m^3 ，工业纯铝的密度为 2705kg/m^3 。凡是金属经过冷作以后，其密度必然减小；而退火作用通常可增加密度，但如果金属中的杂质由固体中发生析出作用时，则密度反而会降低。各种加工状态对铝的密度影响情况见表 1-4。

表 1-4 加工状态对工业用铝的密度影响

铝材种类	纯度/%	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (20℃)		
		铸造状态	冷作状态	退火状态
铝棒	99.97		2.6989	2.6996
铝块(冷铸)及片	99.95	2.7003	2.7001	
铝锭(有孔隙)及片	99.75	2.686	2.7031	2.7030
铝线	99.5		2.7046	2.7055
铝片	99.2		2.7078	2.7069
铝块(冷铸)	98.2	2.7279		

铝的密度随温度变化而变化,工业纯铝的密度随温度变化的情况如图 1-1 和表 1-5 所示。

表 1-5 铝的密度与温度的关系

温度/℃	金属的状态	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$		
		99.75% 纯度铝	99.4% 纯度铝	98.25% 纯度铝
20	固体	2.703	2.706	2.727
100	固体	(2.69)		
200	固体	(2.67)		
400	固体	(2.62)		
658.7	固体	(2.55)		
658.7	液体	2.382	2.384	2.405
700	液体	2.371	2.373	2.394
800	液体	2.343	2.345	2.366
900	液体	2.316	2.318	2.339
1000	液体	2.289	2.291	2.311
1100	液体	2.262	2.264	2.285

注: 括号中的数值, 是由膨胀公式计算而得。

铝的密度受添加元素的影响, 主要决定于加入元素的密度以及对铝的晶格常数的影响程度。加入元素在铝中的固溶度、是否生成化合物、加工条件等的影响是次要的。铝中加入少量的铁、铜和锌等元素, 则密度增加。如在铝中加入 4% 的锌, 其密度增加 2.6%。铝中加入锂 ($0.534\text{g}/\text{cm}^3$) 和镁 ($1.74\text{g}/\text{cm}^3$), 可降低其密度。如铝中加入 4% 的镁, 其密度为 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$; 加入 10% 的镁, 其密度为 $2.58\text{g}/\text{cm}^3$ 。在铝中加入 1% 的锂, 其密度降低约 3%。硅的密度 ($2.329\text{g}/\text{cm}^3$) 比铝小, 铝中加入硅时随加入量的增加, 在一定范围其密度反而略有增加, 而后使其密度降低。铁、

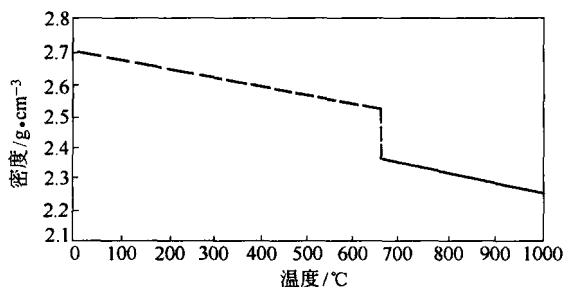


图 1-1 99.95% 纯度的铝金属在 0 ~ 1000℃ 之间的密度变化 (虚线是由计算而得)

铜和硅元素对铝的密度影响如图 1-2 所示。

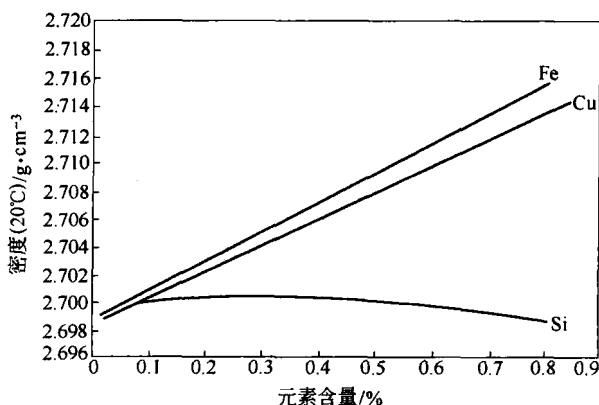


图 1-2 少量铁、铜、硅对冷作铝棒密度的影响

不同纯度的铝固态和熔融态的密度列于表 1-6 中。

表 1-6 不同纯度铝的密度

纯度/%	密度/kg·cm ⁻³		纯度/%	密度/kg·cm ⁻³	
	退火固态 (20°C)	熔融态 (1000°C)		退火固态 (20°C)	熔融态 (1000°C)
99.25	2727	2310	99.971	2699	—
99.40	2706	2291	99.996	2698.9	—
99.75	2703	2289	99.9998	2698.08	—

1.1.3 熔化温度

纯金属在恒温下熔化（或凝固），但大多数合金则在一个温度范围内进行熔化（或凝固）。铝的熔点对纯度十分敏感，纯度愈高，则熔点愈高。一般工业纯铝，其熔点在 660°C 上下，纯度降低，则熔点下降。常压下纯度为 99.996% 铝的熔点为 660.37°C。不同纯度的工业纯铝的熔点如下：

纯度/%	99.20	99.50	99.60	99.97	99.996
熔点/°C	657	658	658.7	659.8	660.24

合金的熔化温度范围，依具体合金系统以及合金元素的含量而定。在合金系统中溶媒元素的原子价愈高，溶媒与溶质元素的原子价相差愈大，则固相线与液相线的坡度愈陡，并由于对固相线的坡度影响更大些，致使凝固范围增大。溶媒与溶质元素的原子体积相差愈大，则合金的凝固也愈宽。如铝中加入 4% 的镁，熔化温度范围为 579 ~ 641°C；铝中加入 5% 硅，熔化温度范围为 577 ~ 629°C；加入 12% 硅，熔化温度范围为 574 ~ 584°C。铝中加入 5% 硅、1.25% 铜和 0.5% 镁，熔化温度范围为 579 ~ 627°C。铝中加入 4% 铜、2% 镍、1.5% 镁、0.4% 铁和 0.4% 硅，熔化温度范围为 535 ~ 629°C。

1.1.4 热容及熔解潜热

热容和熔解（或凝固）潜热是决定金属在熔化时需要吸收的热量或在凝固时需要散发的热量。1mol 的热容称为金属的原子热容，它等于热容与相对原子质量的乘积。按照杜隆-彼蒂定律，相对分子质量与热容的乘积大致为一常数。若温度相当于室温或更高的温度，则杜隆-彼蒂定律也适用于金属。因为金属的分子是单原子的，故可以说纯金属的原子热容是常数：在 0℃ 时绝大多数金属的热容是 24.2 ~ 25.9J/(℃·mol)。杜隆-彼蒂定律对低温是不适用的，在温度低于 0℃ 时热容急剧地减小，在绝对零度时为零。在高温下原子热容比较慢地增加。铝的真实原子热容随温度变化的情况见表 1-7。

表 1-7 铝的真实原子热容(J/(℃·mol))

熔点/℃	在下列温度(℃)下热容 C_p 的数值									
	-253	-223	-173	-123	-73	-0	+27	+127	+300	+600
660	0.25	3.8	12.75	17.56	20.48	—	23.83	25.12	27.63	32.35

一般来说，在固态时热容随温度升高而缓慢地增加。铝的热容及热含量随温度变化的情况见表 1-8。

表 1-8 铝的热容及热含量

温度/℃	热含量/J·kg ⁻¹	热容/J·(g·℃) ⁻¹	
		0~t 的平均数	t 时数
0			0.9280
100	94.42	0.9442	0.9601
200	190.03	0.9601	0.9923
300	292.89	0.9765	1.0245
400	396.97	0.9923	1.0571
500	504.28	1.0086	1.0893
600	614.84	1.0249	1.1215
657 (凝固点)	679.25	1.0337	1.1399
657 (液体)	1072.00	1.6319	1.0458
700	1117.19	1.5959	1.0546
800	1223.65	1.5295	1.0747
900	1332.17	1.4801	1.0947
1000	1442.69	1.4421	1.1148

随着温度降低，铝的热容继续降低。在 -185℃ 时，热容降至 0.4042J/(g·℃)；至 -241℃ 时，降至 0.0038J/(g·℃)。

铝的熔解潜热，经测定为 392.75J/g，也有人测定为 386.23J/g。

根据奈曼-考普定律合金的热容可由组成金属的热容与质量分数加权平均求得。这个规律可用下式表示：

$$C_p = C_1p + C_2q$$

式中, p 及 q 为该合金中各组元的质量浓度; C_1 及 C_2 为组元的热容。

奈曼-考普定律可应用于金属间化合物、金属与非金属的化合物, 并且还可十分准确地用于固溶体、中间相及它们在多相合金的混合体上。经检验结果表明, 实验所得数值与按公式计算所得数值相差不大于4%。但是在低于特征温度 (θ) 下, 奈曼-考普定律不再适用。

具有高的液态热容的金属, 在流经浇注系统时, 激冷较少, 因此即使用低的浇注温度也可以使金属完全充满型腔。反之, 热容与潜热愈低的金属, 则铸件中所产生的温度差就愈大, 因而也就需要较大程度的补缩。

1.1.5 热膨胀

热膨胀与密度的变化紧密相联。线膨胀系数随温度升高而缓慢地增加。平均线膨胀系数可由下式计算:

$$L_2 = L_1 [1 + \bar{\alpha}(t_2 - t_1)]$$

式中 L_2 及 L_1 ——在 t_2 及 t_1 温度下试棒的长度;

$\bar{\alpha}$ ——平均线膨胀系数。

真实膨胀系数 (α_t) 可由下式计算:

$$\alpha_t = \frac{dL}{dt} \times \frac{1}{L_t}$$

式中 L_t ——在温度 t 时的长度。

体膨胀系数 (β) 近似等于线膨胀系数 (α) 的3倍数值, 即 $\beta \approx 3\alpha$ 。线膨胀系数的单位为 $\text{cm}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$; 体膨胀系数的单位为 $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

纯度为99.952%的精铝, 在20~610°C温度之间的线膨胀率可由下式表示:

$$L_t = L_0 [1 + (22.58t + 0.00989t^2) \times 10^{-6}]$$

当铝的品位较低时 (99.74%), 可由下式表示:

$$L_t = L_0 [1 + (21.90t + 0.0121t^2) \times 10^{-6}]$$

金属在液态时的体膨胀系数值比固态时的相应值为大。纯度为99.75%的铝, 在液态时其体膨胀关系可用下式表示:

$$V_t = V_{658} [1 + 0.000114(t - 658)]$$

式中, V_t 及 V_{658} 为在温度为 t 及 658°C 时的体积。在 660~1100°C 温度之间, 铝的体膨胀系数为 $122 \times 10^{-6} \text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

合金的膨胀系数的第一近似值可借纯金属的系数按比例求得。在没有相变时, 膨胀系数随着温度升高连续增大。在加热过程中发生多型性转变, 形成新相及类似情况下, 膨胀系数急剧变化。

工业生产中常用百分率表示, 铝在熔点时其密度发生突变, 凝固时其体积收缩率约为