高等学校教学用书

有色金属材料学

林肇琦 编著

东北工学院出版社

高等学校教学用书

有色金属材料学

林肇琦　编著

东北工学院出版社

前　言

材料科学随着航空、航天、航海、动力、能源和信息技术的发展，得到了迅速的发展。金属材料、高分子和陶瓷材料是现代材料科学的重要组成部分。按材料性质，工程材料可以分为金属材料和非金属材料两大类；按传统习惯，金属材料又可分钢铁材料和有色金属材料两大类；按功能效用，金属材料还可以分为结构材料和功能材料两大类，前者以强度为主，后者以电、磁、热等特殊理化性能为主要使用目的。

当前全世界每年金属材料的总产量约达八亿吨，其中黑色金属约占95%，有色金属只占5%，从产量来看，黑色金属仍是金属材料的主体。有色金属资源的进一步开发和利用，不仅是对钢铁材料的补充，而且可以发挥和开发钢铁材料所不具备的各种特殊性能，以保证最大限度满足现代科学技术对各种材料性能所提出的要求。例如，航空、航天工业所不可缺少的轻金属材料；喷气发动机、火箭、煤炭地下气化、石油化工等现代化工业技术所需要的超耐热合金；电力、电工、电子工业所需要的导体材料、电阻和仪表材料；原子能发电和核技术所需要的核燃料和稀有金属Be、Zr、Nb、V等；以及能源、信息技术所需要的半导体、超导体和贮能材料等。这些都是有色金属材料，其性能是钢铁材料无法代替的。

我国是应用有色金属（Cu-Sn合金——青铜）最早（公元前十七世纪）的国家之一，也是有色金属资源很丰富的国家，例如W、Mo、Ti、Al、Sn、Sb、Pb、Zn，特别是稀土金属资源，都在世界上占有极重要的地位。

本书共分八章，以系统地讲授Al、Mg、Cu、Ni(包括高温合金)、Ti等结构材料的合金化、组织、性能和用途为主，也简单地介绍了Pb、Sn、Zn和贵金属的组织和性能。对于近一二十年

39098

来迅速发展起来的金属基纤维强化复合材料、急冷凝固金属和超塑性合金的基础知识，也作了适当的介绍，讲授时可根据具体情况予以取舍。

近几十年来有色金属合金的理论研究和生产技术的发展极为迅速，笔者虽力图理论联系实际，尽量反映当前的生产和理论成就，但由于水平所限，缺点和错误之处在所难免，希广大读者与同行批评指正。

本书采用了东北轻合金加工厂研究所、沈阳有色金属加工厂理化室和黎明机械公司冶金实验室以及其它兄弟单位提供的金相照片，在复制时还得到东北工学院金相实验室马丽华和王世兰二位工程师的热情帮助。吴庆令、孟庆林和魏海荣老师还协助校阅了原稿，提出了宝贵的修改意见。在此一并表示衷心的感谢。

目　　录

前　言

第一篇　轻金属材料

1　变形用铝合金 …… (1)
1.1　工业纯铝 …… (1)
1.2　铝合金的合金化与时效硬化 …… (4)
1.2.1 铝合金的合金化原理 …… (4)
1.2.2 铝合金的时效与组织结构变化 …… (6)
1.2.2.1 铝合金的时效硬化现象 …… (6)
1.2.2.2 铝合金在时效过程中的结构变化 …… (8)
1.2.3 时效硬化的位错理论 …… (13)
1.2.3.1 时效硬化机理 …… (13)
1.2.3.2 时效对铝合金组织性能的影响 …… (16)
1.3　Al-Cu-Mg 系合金——硬铝 …… (17)
1.3.1 硬铝的组织 …… (17)
1.3.2 硬铝的合金化 …… (19)
1.3.3 硬铝的性能与用途 …… (22)
1.4　Al-Zn-Mg-Cu 系合金——超硬铝 …… (24)
1.4.1 Al-Zn-Mg 系中强可焊铝合金 …… (25)
1.4.1.1 Al-Zn-Mg 系合金的组织 …… (25)
1.4.1.2 工业用 Al-Zn-Mg 系合金的合金化 …… (28)
1.4.1.3 Al-Zn-Mg 系合金的组织、性能与用途 …… (30)
1.4.2 Al-Zn-Mg-Cu 系超硬铝 …… (31)
1.4.2.1 超硬铝的组织 …… (32)
1.4.2.2 超硬铝的合金化 …… (33)
1.4.2.3 超硬铝的性能与用途 …… (36)

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

1.5 锻用铝合金 …… (39)
1.5.1 Al-Mg-Si系锻铝合金 …… (39)
1.5.2 Al-Mg-Si-Cu系锻铝合金 …… (42)
1.5.3 Al-Cu-Mg-Fe-Ni系耐热锻铝合金 …… (44)
1.6 耐热铝合金 …… (47)
1.6.1 Al-Cu-Mn 系耐热铝合金 …… (47)
1.6.2 Al-Cu-Li 系耐热铝合金 …… (50)
1.7 防锈铝合金 …… (51)
1.7.1 Al-Mn 系防锈铝合金 …… (51)
1.7.2 Al-Mg 系防锈铝合金 …… (53)
2 铸造用铝合金 …… (59)
2.1 Al-Si 系铸造铝合金 …… (59)
2.1.1 Al-Si 系合金的组织与变质处理 …… (59)
2.1.2 铸造铝合金的热处理 …… (62)
2.1.3 硅铝明的组织、性能和用途 …… (63)
2.1.4 稀土元素对硅铝明组织性能的影响 …… (66)
2.2 Al-Cu 系铸造铝合金 …… (68)
2.2.1 Al-Cu 系铸造铝合金(ZL202,ZL203) …… (69)
2.2.2 Al-Cu-Mn 系铸造铝合金 (ZL201) …… (71)
2.3 Al-Mg 系铸造铝合金 …… (72)
2.4 Al-Zn 系铸造铝合金 …… (73)
3 镁及其合金 …… (75)
3.1 工业纯镁的性能和用途 …… (75)
3.2 镁合金的合金化原理 …… (77)
3.2.1 镁合金的合金化特点 …… (77)
3.2.2 镁合金的沉淀过程与结构变化 …… (78)
3.2.3 镁合金的晶粒细化问题 …… (81)
3.2.4 镁合金的热处理 …… (83)
3.3 高强度铸造镁合金 …… (83)
3.3.1 Mg-Al-Zn 系铸造镁合金(ZM5) …… (85)

3.3.2 Mg-Zn-Zr 系铸造镁合金(ZM1、ZM2、ZM8)…… (87)
3.4 耐热铸造镁合金 …… (91)
3.4.1 Mg-RE-Zn-Zr 系耐热铸造镁合金 (ZM3、ZM4、ZM6) …… (91)
3.4.2 特殊耐热铸造镁合金 …… (95)
3.5 变形用镁合金…… (98)
3.5.1 镁合金的塑性变形与合金化特点 …… (98)
3.5.2 高强度变形镁合金 ……(100)
3.5.2.1 Mg-Mn(Ce) 系变形合金……(100)
3.5.2.2 Mg-Al-Zn 系高强度变形镁合金 ……(102)
3.5.2.3 Mg-Zn-Zr 系高强度变形镁合金 ……(103)
3.5.3 耐热变形镁合金 ……(106)
3.5.4 Mg-Li系超轻镁合金……(108)

第二篇 重有色金属材料

4 铜及其合金 ……(111)
4.1 纯铜的性质和用途 ……(112)
4.1.1 工业纯铜的性质 ……(112)
4.1.1.1 铜的主要物理性质 ……(112)
4.1.1.2 铜的化学性质 ……(113)
4.1.1.3 铜的机械性能 ……(116)
4.1.2 纯铜的塑性加工与杂质的影响 ……(117)
4.1.2.1 纯铜的塑性加工与组织 ……(117)
4.1.2.2 杂质的影响 ……(119)
4.1.2.3 稀土元素的作用 ……(122)
4.1.3 工业纯铜的分类和用途 ……(123)
4.2 普通黄铜 ……(125)
4.2.1 Cu-Zn 系合金的组织 ……(125)
4.2.2 黄铜的性质与杂质的影响 ……(127)
4.2.3 黄铜的牌号与用途 ……(130)
4.3 特殊黄铜……(133)

4.3.1 锌当量系数 ……(133)
4.3.2 加入 Al 和 Ni 的特殊黄铜……(134)
4.3.3 加入 Mn 和 Fe 的特殊黄铜……(135)
4.3.4 锡黄铜 ……(137)
4.3.5 硅黄铜和铅黄铜 ……(138)
4.4 锡青铜 ……(141)
4.4.1 Cu-Sn 系合金的组织 ……(141)
4.4.2 锡青铜的主要性能 ……(144)
4.4.3 工业用锡青铜 ……(145)
4.5 铝青铜 ……(148)
4.5.1 铝青铜的组织和性能 ……(148)
4.5.2 工业用铝青铜 ……(151)
4.6 特殊青铜 ……(155)
4.6.1 铍青铜 ……(155)
4.6.2 锰青铜 ……(159)
4.6.3 硅青铜 ……(160)
4.6.4 钛青铜 ……(163)
4.6.5 电工用特殊青铜 ……(166)
4.6.5.1 电工用青铜的特性与要求 ……(166)
4.6.5.2 镉青铜与镁青铜 ……(168)
4.6.5.3 铬青铜与锆青铜 ……(169)
4.6.5.4 稀土元素对电工合金的影响 ……(173)
4.7 Cu-Ni 合金——白铜 ……(173)
4.7.1 普通白铜与铁白铜 ……(175)
4.7.2 锌白铜 ……(177)
4.7.3 锰白铜 ……(178)
4.7.4 铝白铜 ……(179)
5 镍及其合金 ……(182)
5.1 工业纯镍的性能与用途 ……(182)
5.2 电工用镍合金……(184)
5.2.1 加热电阻用镍合金 ……(185)

5.2.2 高电阻精密合金 ……(186)
5.2.3 热电偶用镍合金 ……(187)
5.2.4 电真空用镍合金 ……(190)
5.3 耐蚀结构用镍合金 ……(192)
5.4 镍基耐热合金 ……(193)
5.4.1 镍基耐热合金的合金化原理 ……(193)
5.4.1.1 合金元素在各合金相中的分布和作用 ……(193)
5.4.1.2 工业用镍基耐热合金的合金化 ……(197)
5.4.2 镍基变形耐热合金的性能与用途 ……(200)
5.4.3 镍基耐热合金的热处理特点 ……(202)
5.4.4 镍基铸造耐热合金 ……(205)
6 锡、铅、锌及其合金 ……(207)
6.1 锡及其合金 ……(207)
6.1.1 锡的性质和用途 ……(207)
6.1.2 Sn-Pb 系焊料合金 ……(208)
6.1.3 锡基巴氏合金 ……(209)
6.2 铅及其合金 ……(212)
6.2.1 铅的性质和用途 ……(212)
6.2.2 铅基合金 ……(214)
6.2.2.1 Pb-Sb 系合金 ……(214)
6.2.2.2 Pb-Ca 系合金 ……(216)
6.2.2.3 Pb-Ag 系合金 ……(216)
6.2.2.4 Pb-Sb-Sn 系活字合金 ……(217)
6.2.3 铅基巴氏合金 ……(217)
6.3 易熔合金 ……(220)
6.4 锌及其合金 ……(222)
6.4.1 锌的性质与用途 ……(222)
6.4.2 锌基合金 ……(224)
6.4.2.1 Zn-Cu 系合金 ……(225)
6.4.2.2 Zn-Al 系合金 ……(225)
6.4.2.3 Zn-Al-Cu 系合金 ……(228)

6.4.2.4 Zn-Ti 系合金……(230)

第三篇　钛合金及特种金属材料

7　钛及其合金……(232)
7.1　工业纯钛……(232)
7.1.1 钛的物理性质……(233)
7.1.2 钛的化学性质……(233)
7.1.3 钛的组织和机械性能……(234)
7.2　钛合金的合金化原理……(237)
7.2.1 钛的合金化……(237)
7.2.2 钛合金的相变特点……(239)
7.2.2.1 马氏体转变……(240)
7.2.2.2 ω 相的形成……(242)
7.2.2.3 亚稳定相的分解……(242)
7.2.3 钛合金的分类……(244)
7.3　α 钛合金……(244)
7.3.1 α 钛合金的组织与性能……(244)
7.3.2 类 α 钛合金……(249)
7.3.3 时效硬化型 Ti-Cu 合金……(252)
7.4　α+β 钛合金……(252)
7.4.1 α+β 钛合金的合金化特点……(252)
7.4.2 Ti-Al-V 系合金(TC3、TC4、TC10)……(254)
7.4.3 Ti-Al-Mn 系合金 (TC1、TC2)……(262)
7.4.4 含 Cr 或 Mo 的α+β 钛合金……(263)
7.5　β 钛合金……(266)
7.5.1 β 钛合金的合金化特点……(266)
7.5.2 β 钛合金的组织和性能……(267)
7.5.3 高强度 β 钛合金的发展……(270)
8　特种金属材料……(271)
8.1　贵金属及其合金……(271)
8.1.1 贵金属的性质……(271)

8.1.2 银基合金 ……(274)
8.1.3 金基合金 ……(276)
8.1.4 铂及钯基合金 ……(282)
8.2 金属基纤维强化复合材料……(284)
8.2.1 纤维强化原理 ……(285)
8.2.2 纤维强化金属复合材料（FRMC） ……(288)
8.2.3 自生纤维强化复合材料（定向凝固） ……(290)
8.2.4 弥散硬化型复合材料 ……(291)
8.3 超急冷凝固金属材料 ……(294)
8.3.1 超急冷凝固理论与应用 ……(295)
8.3.1.1 超急冷凝固原理 ……(295)
8.3.1.2 超急冷凝固对组织性能的影响 ……(298)
8.3.1.3 急冷凝固方法 ……(299)
8.3.2 非晶态合金 ……(301)
8.3.3 急冷凝固晶态合金 ……(305)
8.3.4 超急冷凝固合金（P/M 法） ……(307)
8.4 超塑性合金……(312)
8.4.1 合金的超塑性理论 ……(313)
8.4.1.1 超塑性变形的力学特性 ……(313)
8.4.1.2 超塑性合金的变形机理 ……(316)
8.4.1.3 超塑性合金的组成和性能 ……(318)
8.4.2 细晶粒超塑性合金 ……(320)
8.4.2.1 共晶和共析型合金的超塑性化 ……(320)
8.4.2.2 双相合金的超塑性化 ……(321)
8.4.2.3 粉末烧结合金的超塑性 ……(324)
8.4.3 相变超塑性合金 ……(324)
8.4.3.1 相变超塑性现象 ……(324)
8.4.3.2 感生相变超塑性现象 ……(325)
8.4.4 超塑性合金的强度和应用 ……(326)
8.4.4.1 超塑性合金的应用 ……(326)
8.4.4.2 超塑性合金的机械性能 ……(327)
主要参考书 ……(329)

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第一篇　轻金属材料

密度≤3.5×10^3kg/cm^3 的 Al、Mg、Be、Li 等称之为轻金属，有的参考书把密度为 4.5 的 Ti 也划入轻金属。以轻金属为基的合金称为轻合金。本篇只讨论 Al、Mg 及其合金的组织、性能和用途，Ti 及其合金将在第 7 章中讨论。

1　变形用铝合金

Al 是地壳中储量最多的一种金属元素，约占地壳总重量的 8.2%，居四大金属元素Al、Fe(5.1%)、Mg(2.1%)、Ti(0.6%)之首。Al 作为化学元素是在1825年发现的，但经过半个多世纪直到 Hall-Héroult 发明了电解法制 Al 以后，在 1888 年才能进行工业规模的生产。到1980年全世界有色金属的总年产量约为 3500 万吨，其中 Al 的产量约为 1600 万吨，占 42%，居有色金属产量之冠，在金属材料产量中仅次于钢铁而占第二位。同年我国原 Al 产量约为 48 万吨，铝加工材（不包括 Al 导线）约为 26 万吨。预计 1990 年原Al产量可达 80 万吨，2000年可达180万吨，Al 材产量可达原Al的 70%。由此可见，在本世纪内 Al 及其合金是我国优先发展的重要有色金属，作为轻质节能材料将逐渐扩大到民用工业的各个领域。

1.1　工业纯铝

纯Al的原子序数为 13，原子量为 26.9815（近似于 27.0），具有面心立方晶格（$a=0.4049\ 6$nm），原子直径为 0.286nm，密度为 2.7×10^3 kg/m^3（25℃），熔点为 660.24 ℃，沸点为

2467℃。

纯 Al 的主要特点是有优秀的电（60～65%IACS）、热传导性（227W/(m·K)，0～100℃）和塑性变形性能，可代替 Cu 作导电线，也可轧成极薄的箔和拉成极细的丝，是以纯金属状态应用最多的一种金属。

Al 与 O_2 有极高的化学亲和力，在室温即能形成致密而又坚固的 Al_2O_3 保护膜(厚约 5～10nm)，甚至在熔融状态也能形成，阻止 Al 继续氧化。氧化膜一旦破坏，还能形成新膜，恢复其保护性，即所谓有“自疗性”。因此，Al 的标准电极电位虽然很低(－1.67V)，但在潮湿多变的气候中仍有足够高的抗蚀性。

Al_2O_3 膜是具有酸、碱两重性的氧化物，因此，纯 Al 除了在氧化性的浓硝酸(80～98%)中有极高的稳定性外(优于 NiCr 系不锈钢)，在大多数的硫酸、盐酸、碱、盐和海水中均不稳定。

纯 Al 的强度很低，不适于作结构材料。退火的 Al 板，σ_b = 80～100MPa，$\sigma_{0.2}$ = 30～50MPa，δ = 35～40%，HB = 25～30。纯Al进行60～80%冷变形，σ_b 虽能提高到 150～180MPa，但 δ 值却降低到 1～1.5%，已开始变脆。

纯度对 Al 的性能有明显的影响。Al 的主要杂质是 Fe 和 Si，是在冶炼时由矿石遗传下来的。增加 Fe 和 Si，虽能提高强度，但却能降低塑性、导电性、抗蚀性和破坏氧化膜。

Fe 在纯 Al 中的溶解度极小，在共晶温度只有 0.052%，室温只能溶解0.002%（图 1-1）。杂质Fe在Al中成针状 $FeAl_3$ 化合物存在，是硬而且脆的化合物。Si 在 Al 中的溶解度比 Fe 大，在共晶温度的极限溶解度为 1.65%，但在室温只能溶解 0.05%（图 1-2）。Si 同 Al 不形成化合物，除溶解部分外，过剩的杂质 Si 均呈游离状态存在。但应指出，Fe和 Si 经常是同时存在的，因此，在 Al-Fe-Si 三元合金中除了 $FeAl_3$ 和 Si 质点以外，还能形成两种三元化合物 α 和 β。即当 Fe 含量大于 Si 时形成富 Fe 化合物 α ($Al_{12}Fe_3Si$)，Si＞Fe 时形成富 Si 相

$\beta(Al_9Fe_2Si_2)$。二者都是脆性化合物，但 α 相呈骨架状或团块状，β相是粗大的针状，故后者对塑性的危害更大些。Fe 和 Si 在工业纯 Al 中多半成三元化合物存在，出现 $FeAl_3$ 或游离 Si 的机会很少。

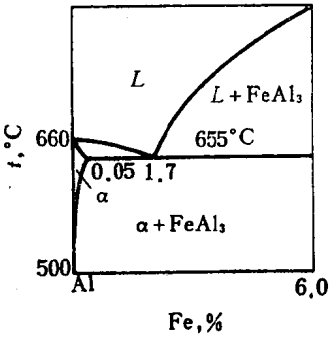

图 1-1 Al-Fe 系二元平衡图（部分）

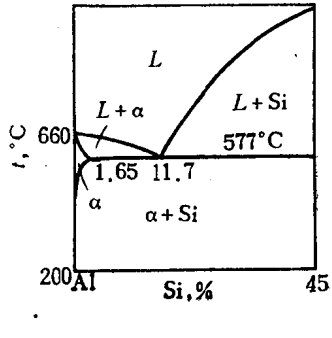

图 1-2 Al-Si 系二元平衡图（部分）

Fe 和 Si 的含量比对纯 Al 的工艺塑性有明显的影响，只当 Fe/Si≥2～3 时才能得到有利于冲压加工质量的细晶 Al 板材。

高纯 Al 的纯度可达99.999%，工业用高纯 Al可达 99.9%，一般工业纯 Al 为 98～99.7%（表 1-1）。高纯 Al(L05～L01) 主要用于科学研究、化学工业及其它特殊用途。这种高纯 Al 的工艺性能与工业纯 Al 截然不同，当杂质 Cu 含量少于或等于 0.0001～0.001%，Fe 含量少于 0.0015%，纯度提高到 99.99% 或更高时，再结晶温度即降低到 16℃ 左右，在冷轧或室温存放过程中即能完全再结晶；纯度提高到 99.999～99.9992%，再结晶温度已降低到－35～－60℃，而工业纯 Al 的再结晶温度则高达 200℃。高纯 Al 的这种特点能引起晶粒的极端粗大化，给铸锭、轧制、退火或成型加工带来许多困难，而且极容易受杂质的污染。工业高纯 Al(L0, L00) 主要用于高纯 Al 合金的生产制造；工业纯 Al(L1～L7) 则用于铝合金、电线、电缆和日用器皿生产方面。

表 1-1　　纯铝的纯度和杂质含量

牌号	Al，%（≥）	杂质，%（≤）					
		Fe	Si	Fe+Si	Cu	其它	总和
L05	99.999	—	—	—	—	—	0.001
L04	99.996	0.0015	0.0015	—	0.001	—	0.004
L03	99.99	0.0030	0.0025	—	0.005	—	0.010
L02	99.97	0.015	0.015	—	0.005	—	0.03
L01	99.93	0.04	0.04	—	0.01	—	0.07
L0	99.90	0.06	0.06	0.095	0.005	—	0.10
L00	99.85	0.10	0.08	0.142	0.008	—	0.15
L1	99.7	0.16	0.16	0.26	0.01	—	0.30
L2	99.6	0.25	0.20	0.36	0.01	—	0.4
L3	99.5	0.30	0.30	0.45	0.015	—	0.5
L4	99.3	0.30	0.35	0.60	0.05	0.1	0.7
L5	99.0	0.50	0.50	0.90	0.02	—	1.0
L6	98.8	0.50	0.55	1.0	0.1	Zn0.1，Mn0.1，Mg0.1，其它0.1	1.2
L7	98	1.1	1.0	1.8	0.05	—	2.0

1.2　铝合金的合金化与时效硬化

1.2.1　铝合金的合金化原理

Al 合金的强化是以 Al 与合金元素间形成的金属间化合物在 α 固溶体中的溶解度变化为基础的。因此，Al 虽能同许多金属形成合金，但有高的溶解度和能起显著强化作用的元素却只有 Zn、Mg、Cu、Si 四种（表 1-2），Ag、Ge、Li 的极限溶解度虽很大，但由于它们是稀贵金属，作 Al 合金的主要合金元素而大量加入是有困难的。这四种主要合金元素与 Al 组成的二元（$CuAl_2$、Mg_2Si、$MgZn_2$）和三元化合物（Al_2CuMg、$Al_2Mg_3Zn_3$），在 Al 中的溶解度能随温度的降低而强烈地减小，故可通过热处理的办法来提高强度。能形成这种化合物或强化相的合金有 Al-Cu、Al-Cu-Mg、Al-Mg-Si、Al-Zn-Mg 和

表 1-2　　各种元素在 Al 中的极限溶解度

元　素	t，℃	极限溶解度	
		$wt\%$	$at\%$
Zn	443	70	28.8
Ag	566	56.6	13.8
Mg	450	17.4	18.5
Ge	424	7.2	2.7
Cu	548	5.65	2.4
Li	600	4.2	16.3
Mn	658	1.82	0.9
Si	577	1.65	1.59
Ti	665	~1.3	0.74
Cr	661	0.77	0.40
Cd	649	0.4	0.09
V	661	~0.4	0.21
Zr	660.5	0.28	0.08
Sn	228	~0.06	~0.01
Fe	655	0.05	0.025
Ni	640	0.04	0.02
Co	657	<0.02	<0.01

Al-Zn-Mg-Cu 系，可称之为“热处理强化型 Al 合金”。还有些合金如 Al-Mg、Al-Si 和 Al-Mn 等，加入的合金元素虽然也有明显的溶解度变化，但热处理强化效果不大，只能以退火或冷作硬化状态应用，故称之为“非热处理强化型”或“热处理不强化型”Al 合金。

值得说明的是，有些合金元素如 Cr、Mn、Zr 等在 Al 中的溶解度虽然很小（表 1-2），但对合金强度和抗蚀性的改善作用却很明显。因为这些过渡元素能明显地抑制再结晶和细化晶粒，有再结晶抑制剂或晶粒细化剂之称。还有些元素，它们的极限溶解度虽很低，但加入极微量（0.005～0.15%）也能显著改变

Al 合金的形核和沉淀过程，因而能显著地提高时效硬化效应。这类元素的作用主要表现在：

(1) 优先与空位发生交互作用，改变 GP 区的形核速度；

(2) 提高 GP 区的溶解极限温度 (T_c)，改变或提高沉淀相稳定存在的温度范围；

(3) 降低沉淀相与基体间的界面能，改善沉淀相的形核过程；

(4) 可能促进某些沉淀相的形成过程。

Al-Cu 合金加入微量的 Cd、Sn、In 就有(1)和(3)项的作用；Al-Zn-Mg 和 Al-Cu-Mg 合金中加入微量 Ag，即可起(2)和(4)项的作用。这类元素对 Al 合金组织和性能的影响，将在各合金系中讨论。

在气体夹杂 (N_2、O_2、H_2) 中只有 H_2 在液态或固态 Al 中有较大的溶解度，可能引起氢脆或加重应力腐蚀开裂 (SCC)过程。

1.2.2 铝合金的时效与组织结构变化

1.2.2.1 铝合金的时效硬化现象

Al-Cu 系的 Al 端状态图如图 1-3 所示，Cu 在室温的溶解度只有 0.5%，但在共晶温度的溶解度为 5.65%。Cu 含量位于 0.5～5.65% 间的 Al-Cu 合金于 500℃ 的 α 相区进行固溶处理和淬火，则会得到均匀的过饱和 α 固溶体。这种热力学不稳定的固溶体在某一温度加热，则会发生分解和析出 $CuAl_2$(θ 相)，而引起强度的明显升高。这种现象就叫做时效硬化现象。这种现象如发生在室温则称之为自然时效，如发生在较高温度(>120℃)则称之为人工时效。

Al-4Cu 合金退火状态的强度很低，σ_b 只有 200 MPa，刚淬火状态的强度也不高，σ_b 约有250MPa，但自然时效 7 天后，σ_b 可提高到 400 MPa。

Al 合金的时效硬化能力与 α 固溶体的浓度和时效温度有关。在理论上，α 固溶体的浓度愈高，时效效果也愈高，以接近极限溶解度的合金，强化效果最大。反之，愈低。时效温度的影

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com