

丁惠麟 辛智华 编著

实用铝、铜及其合金 金相热处理和失效分析



TG166
D533.1

实用铝、铜及其合金 金相热处理和失效分析

丁惠麟 辛智华 编著

机械工业出版社

铝、铜及其合金是工业生产中应用较早而且常用的金属材料。本书是作者长期从事金相检测、失效分析、科研和生产实践经验积累和收集的相关资料基础上编著而成。全书共 14 章：其中，第一章至第八章为铝及其合金，第九章至第十一章为铜及其合金，分别介绍了铸态、热加工条件下的组织变化与性能的影响，突出了显微组织特征、化学成分、热加工工艺、力学性能之间的关系。此外，对生产中常见的各种缺陷及其危害也进行了分析，并提出了改进措施；第十二章专门针对铝、铜及其合金的质软特点，介绍了其试样的制备方法和浸蚀方法；第十三章和第十四章详细介绍了铝、铜及其合金零件的常见失效形式和影响因素，并列举了八个实例介绍了失效分析方法、失效原因和改进措施及效果等。书末附有与本书内容相关的十个附录，以供读者参考。

本书可供机械、冶金、航空、电力、轻工、汽车等企业和科技部门的金相检测、铸造、热处理和锻造的工程技术人员及失效分析人员使用；也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

实用铝、铜及其合金金相热处理和失效分析/丁惠麟，辛智华编著.
—北京：机械工业出版社，2007.9
ISBN 978 - 7 - 111 - 21966 - 8

I. 实… II. ①丁… ②辛… III. ①铝 - 热处理②铝 - 失效分析
③铜 - 热处理④铜 - 失效分析 IV. TG166

中国版本图书馆 CIP 数据核字=(2007) 第 113746 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：崔世荣 版式设计：冉晓华 责任校对：张莉娟

封面设计：姚毅 责任印制：邓博

北京京丰印刷厂印刷

2008 年 1 月第 1 版 · 第 1 次印刷

148mm × 210mm · 22.625 印张 · 716 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 21966 - 8

定价：60.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379083

封面无防伪标均为盗版

前 言

铝、铜及其合金是工业生产中应用较早而且广泛常用的金属材料,尤其是铝合金随着工业生产的发展,不仅在航空、航天领域占有重要地位,在电力、轻工、汽车等机械制造工业中的应用也日益增多,但至今尚无从铝、铜及其合金的金相检测角度,结合铸造、热处理工艺方面的专著。本书作者长期从事金相检测、失效分析、科研和生产实践,积累和收集了一些相关资料,结合工作中的一些体会,整理编写成此书,以供从事金相检测、失效分析以及铸造和热处理的工程技术人员参考。

全书共分十四章,第一~八章为铝及其合金,第九~十一章为铜及其合金,分别介绍了各种铸造铝合金、变形铝合金和铜合金,在铸造和热加工条件下的组织变化与性能的影响,突出了铝、铜及其合金的显微组织特征、成分、热加工工艺和组织、性能之间的关系,对工业生产中常见的各种缺陷及其危害和改进措施,也作了较深入的分析 and 介绍;第十二章为金相试样的制备和试验方法,针对铝、铜及其合金质软制备试样较困难的特点,对高低倍金相样品的制作方法和失效分析技术作了相应的介绍;第十三章和第十四章对铝、铜及其合金零部件在使用中早期失效类型和特点、形成机制、结合案例进行了较详尽的分析。

本书内容充实,图文并茂,具体实用,适用于机械、冶金、航空、电力、轻工、汽车等企业的金相检测、铸造、热处理和锻造的工程技术人员、失效分析人员以及高等院校师生参考。

本书在编写过程中,得到了南京航空航天大学王介淦教授、南通金通灵风机有限公司高级顾问蔡美良教授级高级工程师、新乡豫新机械厂马宗理高级工程师、江苏省机械研究设计股份有限公司王建怀高级工程师的指导和帮助,在编写过程中引用了许多单位和学者发表的科技资料和技术标准,在此一并表示衷心感谢。

本书第十三章由辛智华参加编写,其余章由丁惠麟编写。

由于编著者水平有限,书中不足和错误之处难免,敬请读者赐教和指正。

编著者

目 录

前言

第一章 铸造铝合金的一般概述	1
第一节 铸造铝合金的化学成分	1
一、合金中的主要添加元素及其作用	1
二、铁对铸造铝合金的影响	8
第二节 铸造铝合金的组织特点	11
第三节 铸造工艺对铝合金组织和性能的影响	13
一、凝固速度的影响	13
二、凝固压力的影响	14
三、组织的细化与变质处理	17
第二章 铸造铝合金的热处理	25
第一节 铸造铝合金的热处理特点与分类	25
一、热处理特点	25
二、热处理类型	26
第二节 铸造铝合金热处理工艺、组织与性能	27
一、热处理工艺的选择	27
二、热处理后的组织与性能	38
第三节 热处理设备与操作	42
一、加热和冷却设备	42
二、操作技术	42
第三章 铸造铝合金的组织与性能	44
第一节 Al-Si 系铸造铝合金	44
一、Al-Si 二元合金	44
二、Al-Si-Mg 三元合金	51
三、Al-Si-Cu 三元合金	64
四、Al-Si-Mg-Cu 四元合金	69
五、Al-Si-Mg-Cu-Ni 五元合金	80
第二节 Al-Cu 系铸造铝合金	85
一、Al-Cu 二元合金	85

二、Al-Cu-Mn 三元合金	91
三、Al-Cu-Mn-Cd 四元合金和 Al-Cu-Mn-Cd-V 五元合金	100
第三节 Al-Mg 系铸造铝合金	104
一、Al-Mg 二元合金	104
二、Al-Mg-Si 三元合金	108
三、Al-Mg-Zn 三元合金	109
第四节 Al-Zn 系铸造铝合金	111
一、Al-Zn-Si 三元合金	112
二、Al-Zn-Mg 三元合金	113
第四章 其他铸造铝合金	117
第一节 Al-稀土金属合金	117
第二节 过共晶 Al-Si 二元合金	119
第三节 铝基复合材料	128
第四节 Al-Sn 轴承合金	131
第五章 铸造铝合金中常见缺陷	137
一、针孔	137
二、气孔	142
三、缩孔	143
四、疏松和缩松	144
五、偏析	148
六、粗大初生铝固溶相	154
七、高硬度化合物颗粒	154
八、夹杂(渣)	155
九、冷隔	161
十、冷豆	164
十一、裂纹	166
十二、变质缺陷	175
十三、热处理固溶不充分和过烧	180
十四、脆性相	188
第六章 变形铝合金的一般概述	192
第一节 变形铝合金的组织特征	192
一、热变形终了温度的影响	192
二、变形不均匀对组织的影响	194
三、热处理后的组织变化	197
第二节 变形铝合金的分类、用途及状态代号	198

VI 实用铝、铜及其合金金相热处理和失效分析

第三节 变形铝合金的热处理	201
一、退火处理	201
二、淬火与时效处理	208
三、形变热处理	214
四、回归处理	215
第四节 热处理设备与操作	216
第七章 变形铝合金的热处理工艺、组织与性能	219
第一节 工业纯铝	219
一、杂质对组织和性能的影响	219
二、冷变形及退火对组织及性能的影响	220
第二节 防锈铝合金	224
一、Al-Mn 二元合金	224
二、Al-Mg 二元合金	226
第三节 硬铝	239
一、Al-Cu-Mg 三元合金	239
二、Al-Cu-Mn 三元合金	256
第四节 超硬铝	259
一、7A04 (LC4) 合金	261
二、7A09 (LC9) 合金	265
三、7A03 (LC3) 合金	267
第五节 锻造铝合金	268
一、Al-Mg-Si-Cu 四元合金	268
二、Al-Cu-Mg-Fe-Ni 五元合金	283
第八章 变形铝合金中常见缺陷	293
一、粗晶环	293
二、挤压变形程度不良	302
三、非金属夹杂	302
四、金属夹杂	318
五、光亮晶粒	318
六、缩尾	319
七、成层	321
八、板材分层	322
九、锻造缺陷	324
十、成分偏析	336
十一、组织过烧	336

十二、腐蚀	353
十三、包铝层铜扩散	357
十四、制品尺寸不稳定	357
十五、防锈铝合金弯曲裂纹	359
第九章 铜及铜合金	362
第一节 铜及铜合金的分类和主要组成相	362
一、铜及铜合金的分类	362
二、铜合金中的主要组成相	364
第二节 铜合金的组织特征	367
一、铸态组织	367
二、压力加工对组织的影响	370
第三节 铜及铜合金的热处理	372
一、退火	372
二、淬火和回火	376
三、热处理设备与操作	377
第十章 铜及铜合金的热处理工艺、组织和性能	380
第一节 纯铜	380
一、纯铜组织形态和杂质的影响	380
二、纯铜的热处理	392
三、含氧铜的热处理	393
四、无氧铜含氧量的金相检查	394
第二节 黄铜	398
一、Cu-Zn 二元合金	398
二、复杂黄铜	408
第三节 青铜	435
一、锡青铜	437
二、铝青铜	445
三、铍青铜	462
四、硅青铜	477
五、铬青铜	479
第十一章 铜及铜合金中常见缺陷	483
一、断口和分层	483
二、裂纹	487
三、非金属夹杂	493
四、锻造折叠	498

五、氢脆	500
六、应力腐蚀开裂(季裂)	500
七、脱锌和脱铝腐蚀	504
八、缝隙腐蚀	507
九、成分偏析	508
十、晶粒粗大和不均匀	513
十一、焊锡脆裂	516
第十二章 试样的制备与试验方法	518
第一节 宏观试样的制备与试验	518
一、试样的切取和制备	518
二、试样的浸蚀	519
三、断口检查	524
四、铜合金的残余应力检验	524
第二节 金相试样的制备	527
一、试样的选取与镶嵌	527
二、试样的磨制与抛光	530
三、显微组织的显示	539
第十三章 铝、铜合金常见的失效形式	555
第一节 常见的失效形式和影响因素	555
第二节 腐蚀失效	556
一、应力腐蚀破断	556
二、点状腐蚀	569
三、晶间腐蚀和剥蚀	576
四、缝隙腐蚀	583
五、黄铜脱锌腐蚀	586
六、腐蚀疲劳	588
七、空泡腐蚀	591
第三节 断裂失效	592
一、材料缺陷引起的失效	593
二、加工缺陷引起的失效	605
第十四章 铝、铜合金失效分析实例	615
第一节 应急泵叶片折断失效分析	615
一、设计要求和工艺参数	616
二、失效件的检查	616
三、失效分析	624

四、失效结论	627
五、改进措施与效果	627
第二节 涡轮冷却器部件的早期失效分析	628
一、涡轮罩、整流窗和涡轮转子之间的关系	628
二、涡轮罩、整流窗和涡轮转子的受损情况	629
三、整流窗叶栅损伤的形态	629
四、失效部件中的粉末分析	631
五、叶栅尖部形状的影响	632
六、失效分析	634
七、失效结论	636
八、改进措施与效果	636
第三节 铜合金闭口销断裂失效分析	637
一、失效件的检查	637
二、失效分析	645
三、失效结论	646
第四节 力矩电动机支承的早期失效分析	646
一、概况	646
二、失效件的检查	647
三、失效分析	654
四、失效结论	655
五、改进措施与效果	655
第五节 水表罩壳断裂失效分析	657
一、失效件的检查	657
二、失效分析	665
三、失效结论	665
第六节 水阀开关断裂失效分析	665
一、失效件的检查	665
二、失效分析	669
三、失效结论	670
第七节 分油盖锻件裂纹分析	670
一、概述	670
二、裂纹件的检查	671
三、裂纹分析	679
四、裂纹结论	681
五、改进措施与效果	681

X 实用铝、铜及其合金金相热处理和失效分析

第八节 电流互感器连接板断裂分析	681
一、概述	681
二、断裂件的检查	682
三、断裂分析	688
四、断裂结论	689
附录	690
附录 A 铸造铝合金牌号与代号对照表	690
附录 B 铸造铝合金状态和代号及铸造方法和代号	690
附录 C 铸造铝合金中主要相的形态特征	691
附录 D 金属间化合物的定性和半定量的测定	694
附录 E 变形铝合金基础状态代号、名称及应用说明	696
附录 F 变形铝合金热处理状态代号及应用说明	697
附录 G 铝合金中主要相浸蚀前后的特征	698
附录 H 铝及铝合金金相检验标准	703
附录 I 铜及铜合金金相检验标准	703
附录 J 铜及铜合金组织显示试剂及应用	704
参考文献	708

第一章 铸造铝合金的一般概述

铸造铝合金的优点是密度小，耐蚀性好，可通过固溶或固溶时效强化获得良好的力学性能和高的比强度 (σ_b/ρ 约为 9 ~ 15)，部分铸造铝合金还有良好的热强性，可在 200 ~ 300℃ 下工作，少数耐热铸造铝合金可在 350 ~ 400℃ 下使用。由于铸造铝合金具有良好的铸造性能，可进行各种成型铸造，浇注复杂的工件。另外，铸造铝合金熔点较低，熔炼工艺和设备比较简单，因此，铸造铝合金在航空、化工、仪表以及一般的机械工业等部门都已得到了广泛应用。

第一节 铸造铝合金的化学成分

一、合金中的主要添加元素及其作用

我国常用铸造铝合金中的主要添加元素有 Si、Cu、Mg、Zn、Ni、Mn 和 RE 等，是提高强度与热强性能的主要成分，有的合金中还添加微量的 Cd、Ag、Be、Ti、Zr、B 和 Sr 等元素来补充强化和细化晶粒。它们在 Al 中的固溶度以 Zn、Mg、Cu 为最大，是热处理强化的主要元素。添加的合金元素在固态铝中的溶解度一般都是有限的（见表 1-1）。因此，铝合金中除了形成 α (Al)[⊖] 外，还有第二相（金属间化合物）出现。铸造铝合金的合金元素数量比较多，合金元素总的质量分数在 8% ~ 25% 范围内。

表 1-1 常用合金元素在 Al 中的溶解度^[1]（质量分数，%）

元素名称	Zn	Mg	Cu	Mn	Si	Cr	Fe	Ni	Ti
在一定温度下的 极限溶解度	380℃ 32.8%	450℃ 14.9%	550℃ 5.65%	660℃ 1.82%	580℃ 1.65%	660℃ 0.77%	650℃ 0.052%	640℃ 0.05%	665℃ 1.00%
室温时的溶解度 (20℃)	2.00%	2.00%	0.20%	<0.1% 0.05%	<0.1% 0.05%	≈0	<0.1%	<0.1%	<0.1%

⊖ α (Al) 表示铝固溶体，下同。

1. Mg

Mg 在 450°C 的 $\alpha(\text{Al})$ 中的溶解度可达 14.9% (质量分数), 而其原子半径比 Al 大 13%, 所以大量 Mg 溶入 $\alpha(\text{Al})$ 后, 使 $\alpha(\text{Al})$ 的晶格产生较大的畸变, 从而使力学性能得到很大的提高, 每增加 1% $w(\text{Mg})$, 抗拉强度大约升高 34MPa, 所以 Mg 对 Al 的强化是明显的。在 Al-Si 系合金中加入 Mg, 组织中出现 Mg_2Si 相, 此相是一种晶格较复杂, 化学成分一定的正常价化合物, 在固溶处理时溶入 $\alpha(\text{Al})$ 中, 在以后其析出和长大都很缓慢, 因此, 在铝固溶体中形成大量弥散分布的 G·P 区和过渡相 β' , 使合金得到强化。但含 Mg 量过多, 淬火前的加热保温不能使 Mg_2Si

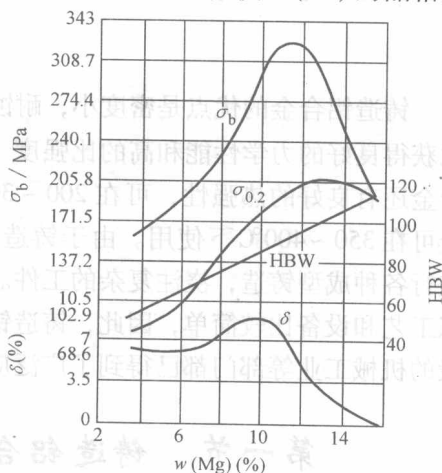


图 1-1 Mg 对 Al-Mg 铝合金力学性能的影响 (T4 状态)^[2]

脆性相全部溶入 $\alpha(\text{Al})$ 中, 残留的较粗大的 Mg_2Si 脆性相不但不能起强化作用, 反而会使合金的塑性迅速下降。生产实践中的热处理保温时间又不可能很长, 所以 Mg_2Si 脆性相的实际溶解度要低些, 故在 Al-Si 系铝合金中含镁量只能控制在 0.25% ~ 1.30% (质量分数) 范围内; 而在 Al-Mg 系铝合金中含镁量一般限制在 4.5% ~ 11.0% (质量分数), 大于 12% 时组织中 $\beta(\text{Mg}_5\text{Al}_8)$ 相不能完全溶入 $\alpha(\text{Al})$ 中, 不仅使力学性能下降 (见图 1-1), 而且由于 $\beta(\text{Mg}_5\text{Al}_8)$ 相的电极电位 (-1.24V) 与 $\alpha(\text{Al})$ (-0.87V) 相差较大, 也使铝合金的耐蚀性迅速下降。当 $\beta(\text{Mg}_5\text{Al}_8)$ 相沿 $\alpha(\text{Al})$ 晶界呈网状分布时 (见图 1-2), 易引起晶界腐蚀。

在 Al-Cu 系铝合金中镁为有害杂质, 当其含量超过 0.05% (质量分数) 时, 就可使铝合金中形成 $\alpha(\text{Al}) + \text{Al}_2\text{Cu} + \text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ 三元低熔点共晶体, 这不仅增加了铸件的热裂倾向, 还增加了固溶处理时过烧的危险性, 所以在 Al-Cu 系合金中含镁量需要严格控制在 0.05% (质量分数) 以下。

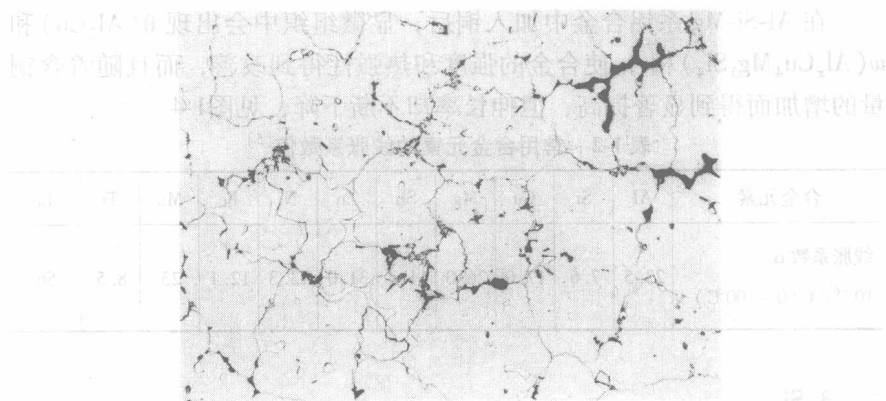


图 1-2 ZA1Mg10 (ZL301) 铝合金 $S^\ominus$, 沿晶不定形白色为 β (Mg_2Al_3) 相, 黑色为 Mg_2Si 相, 灰色为 Al_3Fe 相, 体积分数为 0.5% HF 水溶液浸蚀, 100 $\times$

2. Cu

在 Al-Cu 系铝合金中, 铜是主要添加元素, 随着含铜量的增加强度不断升高, 而塑性则下降。含铜量在 4.5% ~ 5.5% (质量分数) 时, 铝合金有最好的综合力学性能和高温强度。当含铜量超过 5.5% (质量分数) 时, 由于热处理后的合金组织中有未溶的 θ (Al_2Cu) 脆性相存在, 使其室温力学性能显著下降, 见图 1-3。随着含 Cu 量的增加, 合金的凝固间隔变宽, 易出现各种铸造缺陷。

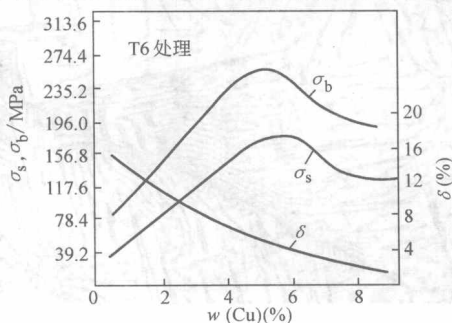


图 1-3 Al-Cu 二元铝合金中含 Cu 量对力学性能的影响^[3]

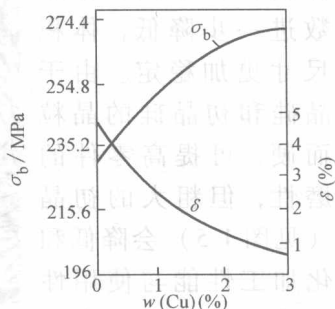


图 1-4 在 Al-5%w(Si)-0.5%w(Mg) 铝合金中加入 Cu 对力学性能的影响 (T5 状态)^[4]

$\ominus$ S 为砂型铸造。其余铸造方法代号详见附表。

在 Al-Si-Mg 系铝合金中加入铜后,显微组织中会出现 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 和 $w(\text{Al}_x\text{Cu}_4\text{Mg}_5\text{Si}_4)$ 相,使合金的强度和热强性得到改善,而且随着含铜量的增加而得到显著提高,但伸长率却不断下降,见图1-4。

表 1-2 常用合金元素的线胀系数值^[5]

合金元素	Al	Si	Cu	Mg	Sb	Zn	Ni	Fe	Mn	Ti	Li
线胀系数 α_l $10^{-6}/^\circ\text{C}$ ($0 \sim 100^\circ\text{C}$)	23.5	7.6	17.0	26.0	11.4	31.0	13.3	12.1	23	8.5	56

3. Si

Si 的密度和线胀系数比 Al 小 (见表 1-2), 熔化潜热大, 加入 Al 基体中形成二元或多元共晶组织, 可提高合金的流动性, 降低铝合金的收缩量和热裂倾向, 减少疏松、缩孔、热裂和变形等缺陷, 并可提高气密性, 从而可获得致密的优质铸件。所以, 对要求铸造性能好、气密性高的零件, Si 是铝合金的主要添加元素。Si 能和 Mg 形成 Mg_2Si 相, 是 Al-Si 系、Al-Mg-Si 系和 Al-Zn-Si 系铝合金的主要强化相。随着含 Si 量的增加, 铝合金强度提高, 密度减小, 线胀系数大大减小。当铝合金中含硅量提高至 15% (质量分数) 以上时, 线胀系数进一步降低, 体积和尺寸更加稳定。由于共晶硅和初晶硅的晶粒脆而硬, 可提高零件的耐磨性, 但粗大的初晶硅 (见图 1-5) 会降低和恶化加工性能与使用性能。采用特殊工艺能使过量硅 20% (质量分数左右) 形成均匀、细小的颗粒状的初晶硅 (见图 1-6), 可提高零件的耐磨性, 应用于摩托车活塞, 能大大提高活塞的使用寿命。

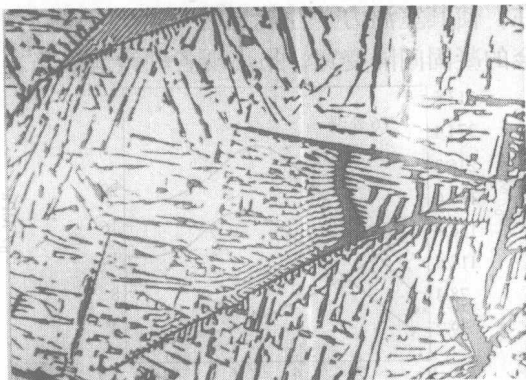


图 1-5 ZAlSi12 (ZL102) 铝合金, J, 鱼骨状和骨骼状初晶硅 + 针状共晶硅, 体积分数为 0.5% 的 HF 水溶液浸蚀, $100\times$

采用特殊工艺能使过量硅 20% (质量分数左右) 形成均匀、细小的颗粒状的初晶硅 (见图 1-6), 可提高零件的耐磨性, 应用于摩托车活塞, 能大大提高活塞的使用寿命。

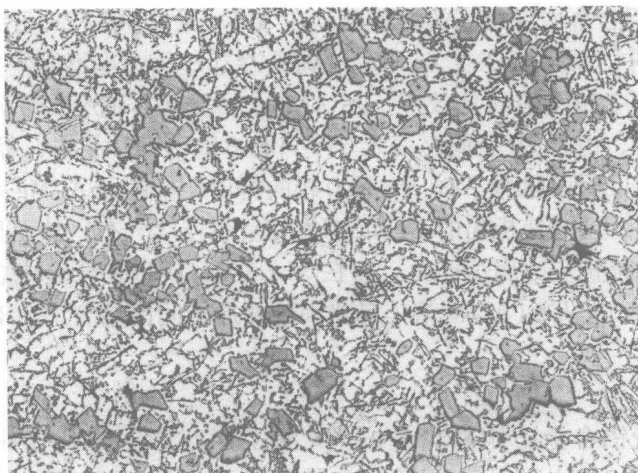


图 1-6 Al-19% ~ 22% $w(\text{Si})$ 铝合金颗粒状初晶硅 +

细小针状共晶硅 + 小粒状共晶硅, 体积分数

为 0.5% HF 水溶液浸蚀, $100\times$

Si 在 Al-Cu 系和 Al-Mg 系 (ZAlMg10) 铝合金中往往是有害的。Al-Cu 系铝合金中 Si 会降低 Cu 在 $\alpha(\text{Al})$ 中的溶解度, 组织中还会出现低熔点 ($\approx 525^\circ\text{C}$) 的三元共晶体 ($\alpha + \text{Al}_2\text{Cu} + \text{Al}_{10}\text{Mn}_2\text{Si}$)。为防止过烧必须降低淬火固溶温度, 因而减少了溶入 $\alpha(\text{Al})$ 中的含 Cu 量。另外, 形成不溶的粗大脆性 $\text{Al}_{10}\text{Mn}_2\text{Si}$ 相, 减少了溶入 $\alpha(\text{Al})$ 中的 Mn, 使铝合金的室温和高温力学性能均剧烈下降 (见图 1-7)。在 Al-Mg 系铝合金中含有少量的 Si, 使组织中形成粗大骨骼状 Mg_2Si 相, 在热处理时不能溶解而保持原来形态, 同时消耗了合金中的 Mg, 所以铝合金中的 Si 不能起强化作用, 而且显著降低合金的力学性能, 所以一般在 Al-Mg 铝合金中 Si 的质量分数应控制在 0.3% 以下。

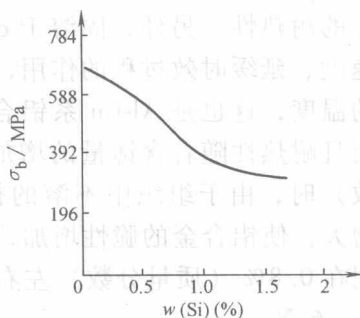


图 1-7 Si 对 ZAlCu5Mn (ZL201)

铝合金在 300°C 、100h 的

持久强度的影响

4. Zn

Zn 在铝合金中有很高的溶解度, 在 Al-Zn 系合金中 Zn 可完全固溶于 Al 基体中, 而不存在含 Zn 相, 在铸造冷却过程中也不发生分解, 具有自淬火效应和固溶强化效应。在 Al-Mg 系合金中加入质量分数大于 1% 的 Zn 后, 由于 Zn 能同时溶入 $\alpha(\text{Al})$ 和 $\beta(\text{Mg}_5\text{Al}_8)$ 相中, 降低了 Mg 的扩散能力, 因而阻滞了 $\beta(\text{Mg}_5\text{Al}_8)$ 相的析出, 抑制了 Al-Mg 系铝合金的自然时效, 同时使析出的 $\beta(\text{Mg}_5\text{Al}_8)$ 相呈不连续分布, 从而显著地提高了合金的抵抗应力腐蚀能力。而在 Al-Cu-Mn-Ti 系铝合金中含有少量的 Zn 时, Zn 进入 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体晶格而削弱原子间的结合力, 有害于热强性。

5. Mn

在铸造铝合金中添加少量的 Mn 除了能起固溶强化作用外, 还可使粗针状 $\beta(\text{Al}_9\text{Si}_2\text{Fe}_2)$ 相转化为骨骼状的 AlMnFeSi 相, 从而可减轻杂质 Fe 的有害影响。有的资料^[4]认为 Mn/Fe 比值在 0.7 ~ 0.8 时效效果最好, 过高易在熔炼时产生偏析, 形成 $\alpha(\text{Al}) + \text{Si} + \alpha(\text{AlMnSi})$ 三元共晶, 而粗大的 $\alpha(\text{AlMnSi})$ 相较脆, 会显著降低力学性能。在 Al-Cu 系铝合金中 Mn 作为主要元素加入, Mn 和 Cu、Al 形成 $\text{T}(\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu})$ 相, 有很高的热稳定性, 使 Al-Cu 系铝合金具有良好的耐热性。另外, 固溶于 $\alpha(\text{Al})$ 中的 Mn 还有降低基体原子扩散速度、延缓时效过程的作用, 使合金的沉淀硬化效果能保持到更高的温度, 这也是 Al-Cu 系铝合金中加入锰改善耐热性的原因之一。而且耐热性随着含锰量的增加而提高, 当含锰量大于 1% (质量分数) 时, 由于组织中不溶的初生 $\text{T}(\text{Al}_{12}\text{CuMn}_2)$ 相的增多和尺寸的增大, 使铝合金的脆性增加, 室温强度降低, 所以含锰量一般应控制在 0.8% (质量分数) 左右。

6. Ni

Ni 在 Al 中的溶解度极小, 570℃ 时为 0.018% (质量分数); 505℃ 时为 0.006% (质量分数)。在 Al-Si 系合金中加入少量 Ni, 可消除 Fe 的不利影响。如 Al-Si-Cu-Mg 系铝合金中加入少量 Ni, 可形成 AlMgSiFeNi 相, 还可使针状 $\beta(\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2)$ 相转变为岛屿状的 Al-Mn-Fe-Ni-Cu、Al-Si-Mn-Fe-Ni-Cu 和 Al-Si-Fe-Ni-Cu-Mg 等富 Fe 相, 它们在热处理过程中极易断裂、球化和使棱角变钝, 从而降低铝合金脆性, 改善力学性