

航空高等院校教材

有色金属锻造

西北工业大学有色金属锻造编写组 编著

448191



国防工业出版社

V261/12

448191

有色金属锻造

西北工业大学有色金属锻造编写组 编著

HK33/13



国防工业出版社



C0246204

内 容 简 介

《有色金属锻造》分为铝合金锻造、镁合金锻造、钛合金锻造和铜合金锻造四章。各章均对合金的材质、锻造性能、锻造工艺和锻件质量控制作了详细分析，对锻件设计和模具设计特点、锻件热处理和其他辅助工序也分别作了介绍。本书可作为高等院校锻压专业的教材，也可作为从事这方面工作的科技人员的参考书。

有 色 金 属 锻 造

西北工业大学有色金属锻造编写组 编著

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张11³/₄ 270千字

1979年12月第一版 1979年12月第一次印刷 印数：0,001—4,000册

统一书号：15034·1954 定价：1.25元

前 言

为了适应我国实现四个现代化形势发展的需要，由西北工业大学编写《有色金属锻造》一书，作为有关高等院校锻压专业的教材，也可作为从事这方面工作的科技人员的参考书。

本书较详细地阐述了航空及其他工业部门中常用的铝合金、镁合金、钛合金、铜合金的锻造问题。全书分铝合金锻造、镁合金锻造、钛合金锻造和铜合金锻造四章。各章均对合金的材质、锻造性能、锻造工艺和锻件质量制作了详细分析，对锻件设计和模具设计特点、锻件热处理和其他辅助工序也分别作了介绍。为了避免重复，有关锻件设计，模具设计和设备选择等共性问题主要在第一章叙述，其他各章只作简略介绍。

限于编者水平，书中缺点、错误在所难免，请读者指正。

本书各章分别由下列同志编写：

第一章铝合金锻造	苏祖武、张志文
第二章镁合金锻造	杨振恒、周义刚
第三章钛合金锻造	陈诗荪、罗子健
第四章铜合金锻造	沈荣华

目 录

第一章 铝合金锻造

§ 1 铝和变形铝合金	1
一、铝	1
二、变形铝合金	4
§ 2 铝合金锻造用的原材料	9
一、铸锭	9
二、轧制毛坯	9
三、挤压毛坯	9
§ 3 锻造热力规范	11
一、锻造温度范围	11
二、变形速度	14
三、设备每一工作行程的变形程度	16
四、总变形程度和机械性能的各向异性	17
五、应力状态（加工方法）	19
§ 4 锻件设计	19
一、分模线位置	19
二、机械加工余量和公差	21
三、模锻斜度	23
四、圆角半径	27
五、冲孔连皮	34
六、肋的厚度与高度	35
七、腹板厚度	37
§ 5 锻模设计	38
一、锻模结构	39
二、毛边槽	40
三、锻模钳口	44
四、终锻型槽和预锻型槽	44
五、锻模表面光洁度	46
六、锻模材料和硬度	46
七、生产实例	46
§ 6 自由锻和模锻设备吨位计算	50
一、自由锻锤和自由锻压力机的吨位计算	50
二、模锻锤和模锻压力机吨位计算	51
§ 7 锻造工艺	52
一、下料	52
二、加热	53

三、自由锻	54
四、模锻	56
五、模具预热	56
六、模锻时的润滑	56
七、切边	57
八、精压	57
九、表面清理	57
§ 8 热处理	58
一、均匀化退火	58
二、退火	59
三、淬火、时效	60
四、回归处理	62
§ 9 铝合金锻件缺陷	62
一、过热	63
二、过烧	63
三、表面裂纹	64
四、内部裂纹	65
五、毛边裂纹	65
六、应力腐蚀裂纹	66
七、涡流	67
八、穿流	68
九、穿肋	69
十、射穿性裂缝	69
十一、折叠	70
十二、粗晶	70
十三、气泡	71
十四、氧化膜	72
十五、残留铸造组织	73

第二章 镁合金锻造

§ 1 镁和变形镁合金	75
一、镁	75
二、变形镁合金	77
§ 2 镁合金锻造用的原材料	81
一、铸锭	81
二、挤压毛坯	83
§ 3 锻造热力规范	83

一、工艺塑性	83	三、圆角半径和模锻斜度	124
二、变形抗力	87	四、毛边槽尺寸和结构	124
三、应力状态与塑性的关系	89	五、局部锻粗规则	125
四、变形程度与机械性能的关系	89	六、型槽壁厚与表面光洁度	127
五、加工再结晶图与晶粒大小的控制	91	七、模具材料及模具寿命	127
六、锻造温度范围	93	§ 4 锻造工艺	128
§ 4 锻造工艺	94	一、下料	128
一、设备的选择及吨位确定	94	二、加热	129
二、下料	95	三、自由锻	131
三、锻前加热	95	四、模锻	131
四、锻造	97	五、模具预热	132
五、模具预热	98	六、润滑剂	132
六、润滑剂	98	七、切边	134
七、冷却	98	八、校正	134
八、切边	99	九、清理	135
九、打磨	100	§ 5 热处理	135
十、防火	100	§ 6 钛合金模锻工艺举例	137
十一、镁合金支架模锻工艺举例	101	一、高速锤挤压钛合金叶片工艺	137
§ 5 锻件热处理	102	二、火箭发动机壳体帽盖的模锻	139
§ 6 锻件的防锈蚀处理 (氧化处理)	104	§ 7 钛合金锻件缺陷	140
一、氧化处理前的表面准备工作	104	一、过热	140
二、氧化处理	105	二、局部粗晶	141
§ 7 镁合金锻件缺陷	106	三、残留铸造组织	142
一、表面点蚀	106	四、亮条	142
二、锻粗开裂	107	五、空洞	144
三、粗晶环锻裂	107	六、裂纹	145
四、射穿性裂缝	108	§ 8 β 锻造及等温模锻	145
五、穿肋	109	一、 β 锻造	145
六、切边裂纹	109	二、等温模锻	146

第三章 钛合金锻造

§ 1 钛和钛合金	110
一、纯钛	110
二、钛合金	112
三、钛合金的污染问题	117
§ 2 锻造热力规范	118
一、锻造温度范围	119
二、变形程度和变形速度	121
三、变形温度和变形程度对钛合金锻件晶粒度的影响	122
§ 3 锻件和模具设计	123
一、收缩率	123
二、锻件结构和加工余量	123

第四章 铜合金锻造

§ 1 铜和铜合金	148
一、铜	148
二、黄铜	151
三、青铜	155
§ 2 铜合金锻造用的原材料	159
一、铸锭	159
二、挤压毛坯	160
§ 3 锻造热力规范	161
一、锻造温度范围	161
二、应力状态、变形程度、变形速度的选择	166
§ 4 锻造工艺	166

一、下料.....	166	二、底盖复合挤压.....	178
二、加热.....	167	三、活门反挤压.....	178
三、锻造.....	168	§ 6 铜合金锻件缺陷	179
四、切边.....	174	一、残余缩孔.....	179
五、清理.....	175	二、应力裂纹.....	179
六、锻件热处理.....	176	三、过烧.....	180
§ 5 锻造工艺举例	177	四、低温锻裂.....	181
一、法兰盘开式模锻.....	177	参考文献	181

第一章 铝合金锻造

§ 1 铝和变形铝合金

一、铝

铝是具有面心立方晶格的金属。在室温下进行塑性变形时，它沿着晶格中原子排列最密的晶面和晶向优先发生滑移。也就是说，沿着晶格中的八面体面和对角线方向发生滑移。图 1-1(a)所示即为面心立方晶格中的八面体面⁽¹⁾。对于一个晶胞来说，这种面共有八个，但因分别为四对互相平行的面，所以实际上只算四个。图 1-1(b)所示为八面体的一个面，面上沿着原子排列最密的方向有六个。但因同一直线上两个相反的方向，实际上只能算一个。因此，一个八面体的面只有三个滑移方向。滑移面数目与滑移方向数目的乘积称为滑移系数目。一种金属的滑移系数目愈多，表示金属塑性愈好，愈容易发生滑移。对于面心立方晶格的铝来说，滑移系应为 $4 \times 3 = 12$ 个⁽²⁾，和密排六方晶格的镁相比，镁的滑移系只有 $1 \times 3 = 3$ 个。由此可见，铝是具有很高的塑性的。

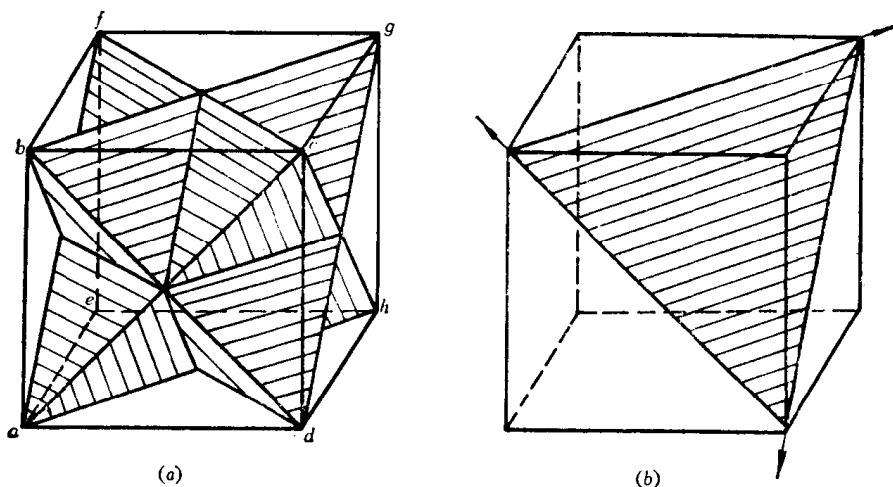


图1-1 面心立方晶胞中的滑移系⁽¹⁾

随着温度升高，铝的塑性不断变化。由图 1-2 可见，在 400℃时，铝拉伸时的延伸率 δ 与 18℃时相比约增大一倍。因为从 400℃开始，在铝的晶格中出现了新的滑移面，如图 1-3 所示。面心立方晶胞中共有六个这样的立方体面，每个面上有两个滑移方向，增加的滑移系便有 $3 \times 2 = 6$ 个。由此不难看出，如果把铝加热到 400℃以上进行塑性变形，那末，它的塑性将大大提高。

纯铝并不是绝对纯的。就是用于科学实验的 99.999% 高纯铝，也仍然有微量杂质存在。工业上用的纯铝叫工业纯铝。一般工业上使用的高纯铝，也含有一定量的杂质，其含铝量为 99.9%。我国工业纯铝及高纯铝的牌号、含铝量及杂质含量列于表 1-1。

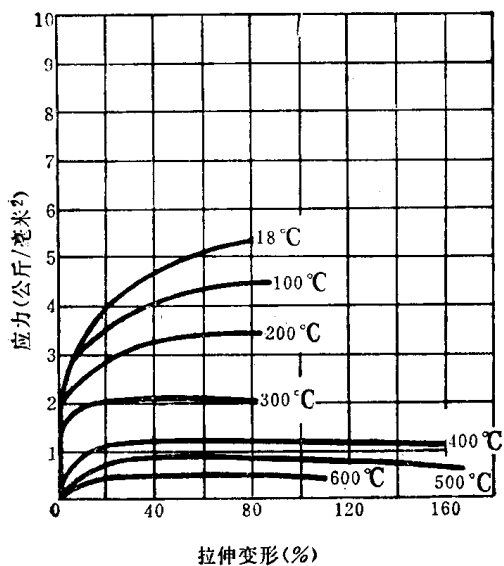


图1-2 铝单晶体在不同温度下的
拉伸曲线⁽³⁾

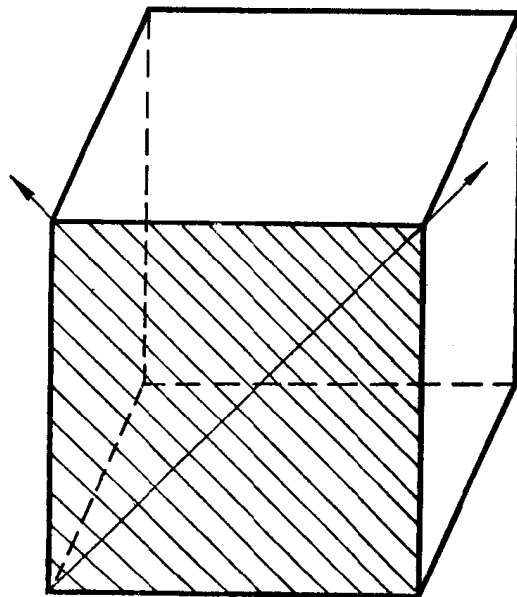


图1-3 铝在400°C以上塑性变形时
新增加的滑移面⁽³⁾

表1-1 铝的牌号及杂质含量

铝的牌号	代 号	含铝量(不小于)%	杂 质 (不 大 于) %					
			铁	硅	铁和硅 的总和	铜	其 它	杂质总和
四号高纯铝	L 04	99.996	0.0016	0.0015	—	0.001		0.004
三号高纯铝	L 03	99.99	0.0030	0.0025	—	0.005		0.010
二号高纯铝	L 02	99.97	0.015	0.015	—	0.005		0.03
一号高纯铝	L 01	99.93	0.04	0.04	—	0.01		0.07
一号工业高纯铝	L 0	99.9	0.06	0.06	0.095	0.005		0.10
二号工业高纯铝	L 00	99.85	0.10	0.08	0.142	0.008		0.15
一号工业纯铝	L 1	99.7	0.16	0.16	0.26	0.01		0.3
二号工业纯铝	L 2	99.6	0.25	0.20	0.36	0.01		0.4
三号工业纯铝	L 3	99.5	0.30	0.30	0.45	0.015		0.5
四号工业纯铝	L 4	99.3	0.30	0.35	0.60	0.05	0.1	0.6
五号工业纯铝	L 5	99	0.50	0.50	0.9	0.02	锌 0.1 锰 0.1 镁 0.1 其它 0.1	1.0
六号工业纯铝	L 6	98.8	0.50	0.55	1.0	0.1	—	1.2
七号工业纯铝	L 7	98	1.1	1.0	1.8	0.05	—	2.0

从表 1-1 可以看出, 铝中的主要杂质是铁和硅。铁溶解在铝中的量很少, 在共晶温度 (655°C) 下, 最大溶解度为 0.05%; 在室温时, 仅溶入 0.002%。杂质铁主要和铝形成了金属化合物 FeAl_3 , 它是硬脆的针状化合物。硅溶解在铝中的量比铁要多一些, 在共晶温度 (577°C) 时, 最大溶解度为 1.65%; 在室温下的溶解度则低到 0.05% 以下。在铝中的杂质硅, 除溶入铝中者外, 多余的硅则单独存在于铝中, 通常称为“游离硅”。在铝中同时存在杂质铁和硅时, 铁、硅和铝便形成复合的化合物。例如, 在含 0.5% 铁和 0.2% 硅的工业

纯铝显微组织中，沿铝的晶界处可以明显地看到针状的化合物 FeAl_3 (图 1-4)；在含 0.3% 铁和 0.5% 硅的工业纯铝显微组织中，沿晶界分布有骨骼状的 $[\text{Al} + \alpha(\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12})]$ 共晶体 (图 1-5)。这些脆性化合物或共晶混合物的大量存在，严重影响铝的塑性。因此，不论是铝还是铝合金，其中铁和硅等杂质含量，都要严格控制，如表 1-1 中规定的数值。

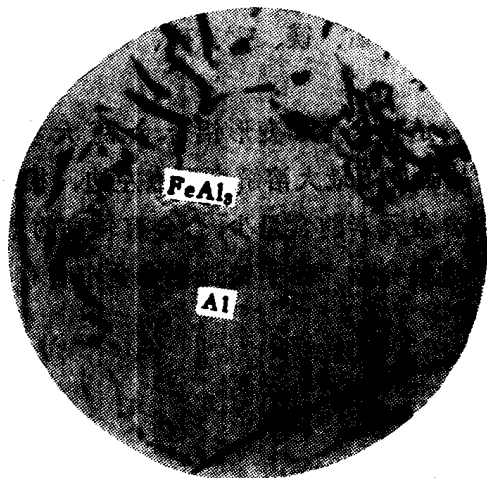


图1-4 含0.5%铁和0.2%硅的
工业纯铝的显微组织〔4〕



图1-5 含0.5%硅和0.3%铁的
工业纯铝的显微组织〔4〕

纯铝或铝合金在结晶时，容易形成粗大晶粒，如图 1-6。晶粒粗大的纯铝或铝合金铸锭，在铸造及热压力加工时容易出现裂纹。因此，一般为了细化晶粒，在纯铝或铝合金中往往加入少量的难熔元素：钛、锆和硼等。由于这些元素和铝形成了非常细小的难熔化合物，在铝结晶时，以其作为结晶核心，因而使晶粒得到了显著细化。图 1-7 便是加有 0.09% 钛的铝锰合金铸锭的宏观组织。

铝的熔点是 660°C ，再结晶温度约为 100°C 。在加热过程中没有同素异晶转变，因此，铝合金锻件的晶粒度不能靠热处理来细化。在锻造过程中，有和铁素体、奥氏体等单相钢



图1-6 铝锰合金铸锭（半连续浇铸的）
宏观组织〔4〕



图1-7 铝锰合金（加入0.09%钛）铸锭
（半连续浇铸的）宏观组织〔4〕

或合金相同的特点。即锻件的晶粒度及机械性能，有赖于终锻温度、变形程度及其它工艺因素的控制。否则，便会给产品质量带来不利影响。

二、变形铝合金

纯铝的重要弱点是强度低，强度极限仅有 $8\sim 10$ 公斤/毫米²。因此，使它在工业上的应用受到了限制。为了提高铝的强度等使用性能，在铝中加入锰、镁、铜、硅、铁、镍、锌等合金元素，创制了各种不同用途的铝合金。

铝合金根据其成分和生产工艺特点，可以分为铸造铝合金和变形铝合金两大类。图 1-8 是变形铝合金与铸造铝合金概略区分图。在共晶温度下最大溶解度 D 点左边，相应成分的铝合金都属于变形铝合金。这类合金的特点是合金元素的含量少，合金有较高的塑性，适于压力加工。 D 点右边相应成分的合金都属于铸造铝合金。由于铸造铝合金中含有较多的共晶体，塑性低，不适于压力加工，因此仅用于铸造。但是，必须指出，根据状态图来划分合金为铸造合金和变形合金，只能算是大致的划分。因为当合金以较快的速度冷却时，它的显微组织和状态图上相应的组织可能出入很大。例如，接近 D 点成分的变形合金，由于结晶时成分分布的不均匀，往往在显微组织中出现有共晶成分。因此，它既有良好的铸造流动性，又可以进行压力加工。因为在长时间加热时（退火），共晶体实际上完全溶解，使合金基本上成了单相状态。

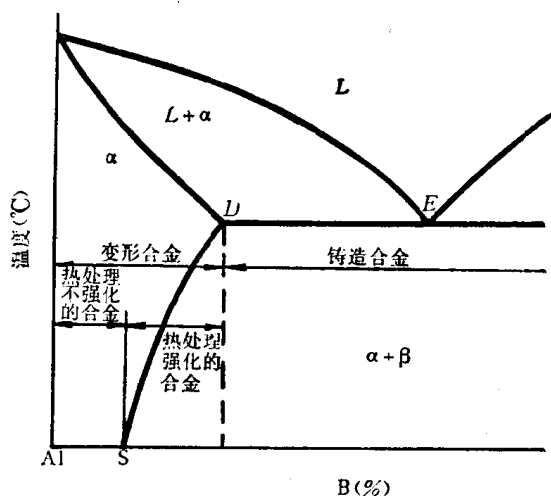


图1-8 铝合金分类图

变形铝合金按其热处理强化的能力可

以分为两组：热处理不强化铝合金和热处理强化铝合金。

根据状态图区分热处理不强化铝合金和热处理强化铝合金的化学成分范围，如图 1-8 所示。实际上，铝合金中有些元素如镁、锰等，在铝中含量即使处于理论上可强化合金成分的范围，热处理强化并不明显，这是与合金元素的本性有关。

工业纯铝、Al-Mn 合金、Al-Mg 合金都属于热处理不强化的铝合金。这组合金不能靠热处理来得到强化，只能靠冷变形的办法使合金强化。而热处理强化的合金则包括：Al-Cu-Mg-Mn 合金；Al-Mg-Si 合金；Al-Mg-Si-Cu 合金；Al-Cu-Mg-Si-Fe-Ni 合金和 Al-Cu-Mg-Fe-Ni 合金；Al-Cu-Mn 合金及 Al-Zn-Mg-Cu 合金等六组。

根据我国冶金工业部颁布的标准（YB604-66），变形铝合金按其使用和工艺性能分为：防锈铝、硬铝、超硬铝、锻铝等四类。用 LF 表示防锈铝，LY 表示硬铝，LC 表示超硬铝，LD 表示锻铝。并以数字编号表示各组不同化学成分的铝合金。例如，LF3 表示 3 号防锈铝，LY12 表示 12 号硬铝，LC4 表示 4 号超硬铝，LD7 表示 7 号锻铝等。

防锈铝主要包括 Al-Mn 和 Al-Mg 两个系的合金。硬铝基本是 Al-Cu-Mg 系合金。超硬铝是 Al-Cu-Mg-Zn 系合金。锻铝基本是 Al-Cu-Mg-Si 系合金和 Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系

合金。常用变形铝合金的化学成分见表 1-2。

表1-2 常用锻造铝合金的化学成分 (YB604-66)

合 金	化 学 成 分(余量为铝)%							
	锌	铜	镁	锰	镍	铁	硅	杂质≤
LF2			2.0~2.8	0.15~0.4				0.8
LF21				1.0~1.6				1.75
LF3			3.2~3.8	0.3~0.6			0.5~0.8	0.85
LF6			5.8~6.8	0.5~0.8				
LY2		2.6~3.2	2.0~2.4	0.45~0.7				0.8
LY11		3.8~4.8	0.4~0.8	0.4~0.8				1.8
LD2		0.2~0.6	0.45~0.9	0.15~0.35			0.5~1.2	0.8
LD7		1.9~2.5	1.4~1.8		1.0~1.5	1.0~1.5	<0.35	0.95
LD5		1.8~2.6	0.4~0.8	0.4~0.8			0.7~1.2	1.1
LD8		1.9~2.5	1.4~1.8		1.0~1.5	1.1~1.6	0.5~1.2	0.6
LD10		3.9~4.8	0.4~0.8	0.4~1.0			0.6~1.2	1.2
LC4	5~7	1.4~2.0	1.8~2.8	0.2~0.6	铬0.1~0.25			1.1

由表 1-2 可见, 变形铝合金的主要合金元素是铜、镁、硅、锰、镍、锌、铬、钛等。随着合金成分的复杂化, 合金的塑性一般都要降低。

铜是铝合金中主要的强化元素。它和铝形成 CuAl_2 化合物。合金中的铜含量一般不超过 5%。随着铜含量的增加, 铝合金的塑性相应下降, 当其含量超过 5% 时, 合金则成为低塑性的合金, 而且抗腐蚀性能也低。

镁也是铝合金中的一种强化元素。它和硅形成 Mg_2Si 化合物, 变形铝合金中镁的含量一般限制在 2.5%, 因为更多的含量将降低合金的塑性。

硅也是铝合金中的一种合金元素, 它和镁形成化合物。变形铝合金中硅含量一般达到 0.5~1.2%。当合金中硅的含量更多时, 合金的机械性能并无显著提高, 然而却显著降低了合金的塑性。

锌是高强度铝合金中的主要强化元素之一。它和铝形成 Al_2Zn_3 化合物。合金中锌含量一般为 6~8%^[5], 因为更多的含量, 将明显降低合金的工艺塑性和抗腐蚀性能, 甚至使合金压力加工都发生困难。

镍在铝合金中的添加量在 2.5% 以下。它的加入可以改善合金的抗腐蚀性能和提高热强性。所以, 含镍的铝合金一般都用来制造在摩擦及高温条件下工作的零件, 例如活塞式发动机的活塞等。

铝合金中锰、铬和钛的作用是提高合金的再结晶温度, 减弱合金晶粒长大的倾向性。所以, 这几种合金元素往往叫做抗再结晶的元素。它们的含量一般都在 0.1~1.0% 范围内。

铁、硅、钠、钾等其它元素则都属于铝合金中的杂质元素。

无论是铝合金中的合金元素还是杂质(铁和硅等)所形成的化合物, 随其本身的机械性能、析出的形状、弥散程度、分布特点(分布于晶界上还是晶内; 均匀还是不均匀)及熔化温度的不同, 对合金的塑性有不同程度的影响。

一般说来, 当合金具有单相均匀的组织状态时, 其塑性最高。因为在此情况下进行塑性变形, 各个晶粒几乎具有承受变形的同样条件。所以, 凡是具有单相均匀固溶体组织的

合金, 由于其晶粒性质的一致, 一般都具有高的塑性。如果合金的组织呈多相混杂状态, 则因不同相的性能各异, 塑性变形时表现出变形的不均匀, 因而降低了合金的塑性。

各组铝合金中的过剩相或强化相的类型见表 1-3 所示。

表1-3 铝合金中的过剩相和强化相类型

合金类别		过剩相和强化相
防锈铝	Al-Mn系合金 Al-Mg系合金	(MnFe)Al ₆ , Al ₁₀ Mn ₃ Si(T相), α 相(AlFeSi), FeSiAl ₃ , MnAl ₆ , Mg ₅ Al ₈ (β)相, (AlFeSiMn)相及Mg ₂ Si
硬铝	Al-Cu-Mg系合金	CuAl ₂ (θ 相), Al ₂ CuMg(S相), (AlFeCuMn)
超硬铝	Al-Cu-Mg-Zn系合金	MgZn ₂ , Al ₂ CuMg(S相), Al ₂ Zn ₃ Mg ₃ (T相)
锻铝	Al-Mg-Si系合金 Al-Mg-Si-Cu系合金 Al-Mg-Cu-Si-Fe-Ni系合金	Mg ₂ Si, 少量CuAl ₂ , 少量MnAl ₆ , Mg ₂ Si, CuAl, 少量Al ₂ CuMg(S相), CuAl ₂ , Mg ₂ Si, Al ₂ CuMg(S相), FeNiAl ₆ , AlNiCu, Al ₂ Cu ₂ Fe

图 1-9、1-10、1-11 和 1-12 分别为防锈铝 LF 21, 锻铝 LD2, 硬铝 LY12 和超硬铝 LC4 的铸态显微组织。从这四个图中可见, 变形铝合金铸态组织的共同特点是, 化合物相均呈断续或连续的网状物分布于 α 晶粒的晶界上。由于这些化合物相又硬又脆, 且呈网状分布, 便成了合金晶粒塑性变形时的障碍。它破坏了晶粒塑性变形的均匀性与规则性, 加深了塑性变形分布的不均匀性。因而, 促成晶间及晶内弹性应力的增大。在增大的弹性应力的作用下, 可能导致这些脆性相产生微裂纹, 然后导致合金发生脆性破坏。所以, 铝合金铸锭的塑性相对来说是低的。但是, 随着铝合金中所含合金元素的种类和数量的不同, 铸锭的塑性亦有所不同。铝合金中所含的合金元素及各种杂质, 一般都形成化合物。因此, 合金元素及杂质含量愈多, 脆性化合物相的量也愈多, 形成的化合物的成分也愈复杂, 脆性也愈大。这样, 合金的塑性也就愈低。防锈铝 LF21, 由于仅含合金元素锰, 因此, 从图 1-9 可见, 其中只有 MnAl₆ 相呈薄的断续网状分布于 α 晶粒的晶界上。这些脆性相对合金塑性的影响, 应该比图 1-12 所示的超硬铝 LC4 要小得多。LC4 铸态显微组织中 S

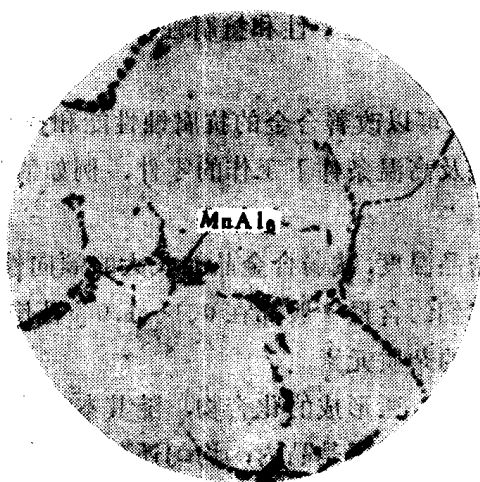


图1-9 防锈铝LF21铸态显微组织250×(4)
白色— α 固溶体, 暗色—MnAl₆。

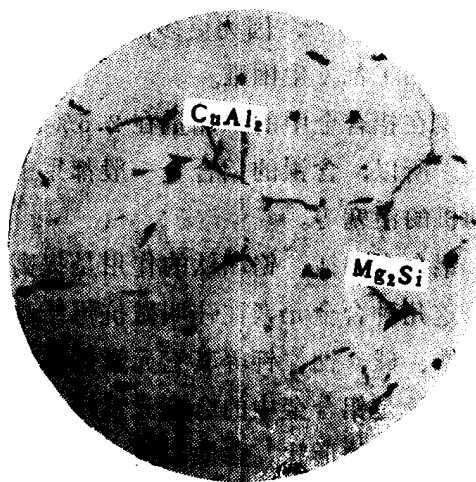


图1-10 锻铝LD2铸态显微组织250×(4)
白色— α 固溶体, 暗色—Mg₂Si相,
灰色—CuAl₂相。

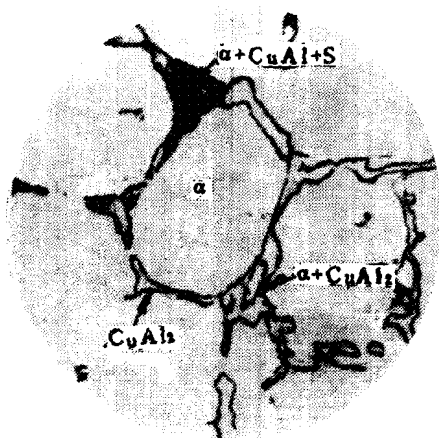


图1-11 硬铝LY12铸态显微组织 $500\times(4)$
白色— α 固溶体, 其余为 $(\alpha + \text{CuAl}_2)$ 二元共晶体和 $(\alpha + \text{CuAl}_2 + \text{S})$ 三元共晶体。



图1-12 超硬铝LC4铸态显微组织 $250\times(4)$
白色— α 固溶体, 灰色—S相 (Al_2CuMg), 暗色— MgZn_2 和T相 ($\text{Al}_2\text{Zn}_3\text{Mg}_3$)。

相和 MgZn_2 相呈封闭网状分布, 而且量很多, 这就造成了 LC4 比 LF21 具有低得多的塑性。另外, 从图 1-11 还可以看到, 硬铝 LY12 的铸态显微组织中, 除了化合物相 CuAl_2 外, 还有 $(\alpha + \text{CuAl}_2)$ 二元共晶混合物及 $(\alpha + \text{CuAl}_2 + \text{S})$ 三元共晶混合物存在于 α 晶粒的晶界上。论化学成分, 在变形铝合金中不应有共晶出现 (见图 1-8), 共晶是铸造合金的特点。那末, 为什么现在变形铝合金中有了共晶混合物呢? 这一点, 主要是由于铸锭在浇铸后的冷却速度较快, 引起了铸锭从表面到中心冷却速度的不一致, 造成了合金元素偏析。在铸锭中合金元素偏析严重的部位, 其中某些部分合金元素含量就可能超过变形合金的平均含量而与铸造合金的成分相当, 即出现了共晶成分。图 1-13 是铝铜合金状态图的铝端部分放大图。由此图可见, 含 4% 铜的铝铜合金在浇铸之后, 若冷却速度大于状态图制作时的缓慢冷却速度时, 铝铜合金铸锭靠中心部位的含铜量就可能因偏析而超过 4%, 并且多于 5.65% 铜。这样, 组织中就必然会出现 $(\alpha + \text{CuAl}_2)$ 二元共晶混合物。共晶混合物不仅在合金化程度高的铝合金, 例如 LY12 中出现, 而且在合金化程度低的铝合金中, 例如, 防锈铝中的 Al-Mg 系合金, 当其含镁量比较多 (5~6%) 时, 铸锭中也可能出现 $(\alpha + \text{Mg}_2\text{Al}_3)$ 共晶混合物。铸锭中这种脆硬共晶混合物的存在, 一方面, 严重地降低了合金的塑性; 另一方面, 由于共晶混合物的熔点低, 限制了合金锻前的加热温度, 使合金的锻造温度范围变得很狭窄, 给锻造及其它热压力加工带来了很大困难。

在锻造之前, 为了提高铝合金铸锭的塑性, 一般铸锭都要经过均匀化退火。在退火的长时间加热下, 促使铸锭中共晶体溶解, 使合金的化学成分和组织变得更加均匀, 从而达到提高塑性的目的。图 1-14 是 LY12 铸锭经均匀化后的显微组织。由图中可见, 经均匀化退火后, LY12 显微组织中, 除了 α 固溶体和不溶解的化合物相之外, 晶界上仅留有部分未溶解的二元及三元共晶体。因此, 这种组织和图 1-11 相比, 显然得到了改善, 因而也就提高了塑性。

图 1-15 是 LY12 退火的挤压棒材的显微组织。由此图可以看出, 合金铸锭中原来呈

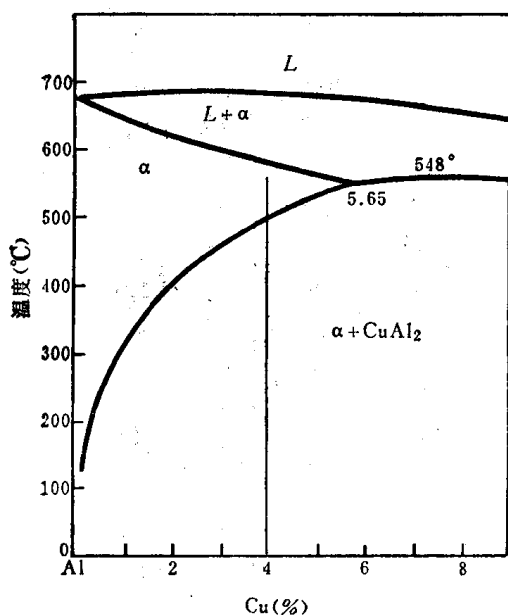


图1-13 铝铜合金状态图的铝端部分的放大图



图1-14 硬铝LY12铸锭均匀化后的显微组织〔4〕

网状分布的 CuAl_2 、 $(\alpha + \text{CuAl}_2)$ 及 $(\alpha + \text{CuAl}_2 + S)$ 相，经挤压变形后，显微组织发生了很大变化。其中化合物相呈短条状及粒状均匀分布于 α 晶粒中。正是由于这些硬脆的化合物相呈短条状及粒状均匀分布的特点，一方面，在锻造前进行加热时，可溶解的化合物相便易于溶入 α 固溶体，使合金尽量趋于单相状态；另一方面，即使在锻造温度下还有部分未溶解的或不溶解的化合物相，也因其分布比较均匀而且细小，在热压力加工时也能在塑性高的 α 固溶体内自由移动，这就保证了塑性变形能沿合金的整体均匀分布，而不致引起加工硬化的局部集中，所以挤压棒材的塑性比铸锭的高。但是，如果在锻造温度下未溶解的或溶解的化合物相的量较多，那末，这种硬脆化合物粒子，在塑性高的晶粒中便要起阻碍滑移变形的作用（因分布在滑移面上，增大了内摩擦）。这样，便要提高合金的变形抗力。 α 基体与分散其中的硬脆化合物间的接触面愈大，即化合物愈细小、数量愈多，则这种内摩擦也就愈大，塑性变形抗力也就愈大。因为在化合物相与 α 基体之间存在有界面层。它的面积随化合物粒子的细化而加大，而界面层便是所谓的难变形区。所以，化合物愈细小、量愈多、分布愈分散，则难变形区也就愈大。这样，弥散硬化效果愈显著，塑性变形抗力也就愈大。由于铝合金中的化合物相种类多，而且在锻造温度下一般都不可能完全溶入 α 基体中。锻造时，一般都处于多相状态。因此，和钢相比，除了某些防锈铝外，一些铝合金，尤其是超硬铝，往往具有比一般碳钢为高的变形抗力。

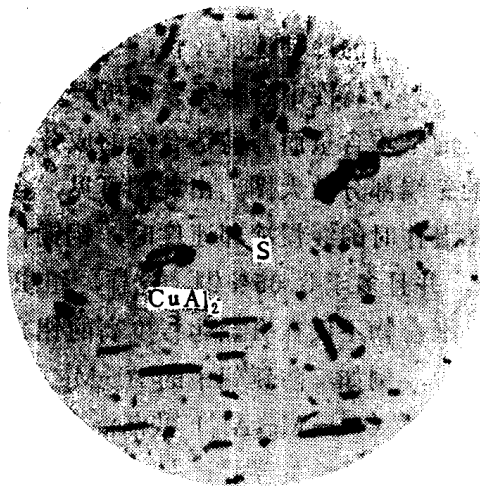


图1-15 硬铝LY12退火挤压棒材的显微组织〔4〕

§ 2 铝合金锻造用的原材料

铝合金锻造用的原材料有三种形式：铸锭、轧制毛坯和挤压毛坯（轧材和挤压棒材上切下的毛坯）。选用何种形式的原材料，则取决于锻件的尺寸、形状、批量以及经济效果等因素。然而，大多数铝合金锻件都是以挤压毛坯作为原材料。

一、铸锭

现代铝合金铸锭一般都是连续浇铸的，它给铝合金锻件提供晶粒细致均匀、宏观密实的原材料。一般作为长、宽、高三向尺寸相差不悬殊的大型铝合金锻件使用。

正如前一节中提及的，铝合金中所含的合金元素及杂质，因其大多数都形成硬脆的化合物（如 CuAl_2 ， Mg_2Si 等）存在于合金中，而且，由于铸造时的冷却条件，造成了这些化合物相在铸锭的整个截面上分布不均匀（区域偏析），在枝晶之间分布不均匀（枝晶偏析），晶粒与晶粒之间分布不均匀（晶间偏析），因而严重地降低了铝合金铸锭的塑性。如果由铸锭直接进行模锻，那末，将由于模锻时毛坯内部变形分布的不均匀，不仅引起合金模锻时塑性的降低，而且导致合金再结晶的不均匀发展，使模锻件的内部组织呈不均匀状态：变形程度大的地方，铸造组织消除比较充分，再结晶进行得比较完善，晶粒大小也较为均匀；变形程度小的地方，还残留有铸造组织或未完全再结晶组织。在锻件内难变形区的界面周围也容易产生裂纹。所以铝合金铸锭进行模锻之前，都必须预先经过自由锻，以便使模锻用的毛坯最低限度要基本消除铸造组织。

此外，在选用铸锭规格时，应尽可能选用规格较小的铸锭。因为规格较小的铸锭的晶粒较小，其它冶金方面的缺陷也较少。由于铸锭晶粒大小给予锻件的晶粒大小以一定的“遗传性”，所以，在锻造条件相同的情况下，晶粒较大的铸锭在锻造后所得的锻件晶粒度也较大，同时，锻件的机械性能也有相应的区别：大晶粒铸锭锻成的锻件的机械性能要比小晶粒铸锭所得锻件的机械性能为低。

由于自由锻时金属变形不均匀的特点，决定了毛坯中再结晶组织的不均匀，而且在锻制长轴类毛坯时，毛坯端部往往尺寸不齐，切去这部分就要损耗金属，则生产率低，废品率高。所以，除了大型锻件外，铸锭很少采用。

二、轧制毛坯

铝合金的轧制毛坯，与钢的轧制毛坯一样，具有纤维状的宏观组织。常用轧制厚板制造壁板类锻件和大批生产的小型薄锻件。与挤压毛坯的宏观组织相比，轧制毛坯的宏观组织比较均匀，纵向和横向的机械性能差异较小。一般铝合金锻造多用挤压毛坯，很少用轧制毛坯，其主要原因在于轧制厚板下料困难，下料过程中金属损耗大。

三、挤压毛坯

由卧式水压机用正挤压法挤出的铝合金棒材，由于挤压时变形的特点，造成了挤压棒材沿截面晶粒大小和形状的不均匀。在棒材的外层，晶粒被充分破碎，在制品的最终淬火加热时容易再结晶成等轴粗晶组织，即所谓粗晶环（图 1-16），内层晶粒则在挤压时沿最

大主变形方向被拉长，晶界上存在的化合物及杂质等同样也被破碎而沿着最大主变形方向分布，因此，内层具有纤维状组织。

挤压棒材上出现粗晶环的原因是：某些合金（不含锰或少含锰）在挤压过程中外层金属受到剧烈变形，造成晶粒破碎、潜在能量高、容易再结晶；另一方面，锰在挤压过程中以第二相形式从固溶体中析出，从而降低了合金的再结晶温度，因此，在随后的加热过程中发生聚集再结晶。



图1-16 铝合金棒材上的粗晶环

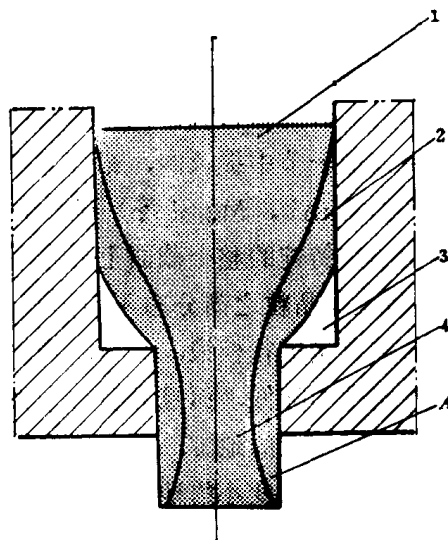


图1-17 挤压时金属中的变形分布

铝合金挤压（无润滑时）变形不均匀分布情况如图 1-17 所示。由此图可见，金属在挤压时存在着两个难变形区：一个是死区 3；一个是直接与挤压垫接触区 1。另外还有两个变形区：挤压筒壁的摩擦引起的强烈变形区 2 和均匀变形区 4。两个难变形区内的金属，由于变形程度小，挤压后仍保留有铸造组织。2 区因变形强烈，铸造枝晶受到破碎。4 区变形均匀得到细小晶粒。挤压出的棒材的表面区 A 就是强烈变形区 2 的延续。A 区有过强烈变形，铸造枝晶受到充分破碎，锰从固溶体中较多地析出，从而降低了 A 区合金的再结晶温度。因而，在淬火加热时，发生二次再结晶，晶粒迅速长大，便形成棒材表面层的粗晶环。而棒材中心部位，变形均匀，锰析出很少，在挤压后往往留下没有再结晶的组织。在淬火加热时，由于合金成分中有的有锰元素存在，有的则无锰元素存在，因此有的合金（LD8，LD9）可能变成细小均匀的再结晶晶粒；有的合金（LY11，LY12，LY14，LD4，LD5，LD10 及 LC4）则不发生再结晶，仍然保留有变形的纤维组织。

粗晶环严重影响合金的机械性能，特别是强度极限和疲劳极限，同一根棒材粗晶区和细晶区强度差值，最大可达十几公斤（每平方毫米），可见下面的试验数据。

LY12 棒材粗晶区和细晶区的性能：

细晶区 $\sigma_b = 51.8 \text{ 公斤/毫米}^2$ ， $\sigma_{0.2} = 37.6 \text{ 公斤/毫米}^2$ ， $\delta = 19.1\%$ 。

粗晶区 $\sigma_b = 34.8 \text{ 公斤/毫米}^2$ ， $\sigma_{0.2} = 23.4 \text{ 公斤/毫米}^2$ ， $\delta = 10.4\%$ 。

此外，锻造用的毛坯中若带有粗晶环，则在锻粗时往往沿毛坯的侧表面形成开裂。在拔长时，毛坯上也容易出现裂纹。如果带有粗晶环的毛坯用于模锻，则将在模锻件表面上留下粗晶层，这种粗晶层将使成品的延伸率、断面收缩率、冲击韧性等机械性能有所降低。