

前 言

石油、化工战线上的广大革命职工，在毛主席无产阶级革命路线指引下，在无产阶级文化大革命和批林批孔运动的推动下，以阶级斗争为纲，高举鞍钢宪法和工业学大庆光辉旗帜，发扬自力更生、艰苦奋斗的革命精神，抓革命，促生产，使石油化学工业得到了迅速的发展。

石油、化工生产的特殊性要求采用多种多样耐腐蚀、耐高温、耐低温和耐高压的结构材料。铝及铝合金具有优良的耐腐蚀、耐低温和导热性能，是石油、化工生产中不可缺少的材料之一。随着石油化学、化肥以及其他工业的迅速发展，焊接结构的铝及铝合金设备和管道日益获得广泛的应用。

为适应石油、化工基本建设单位和生产企业广大焊工学习和掌握铝及铝合金焊接基础知识和操作技术的需要，我们组织技术人员同工人结合，编写了本书。在编写过程中，我们向有关生产、基建、科研、设计和高等院校学习了解铝及铝合金焊接方面的经验，特别是工人同志的实践经验，得到了他们的热情帮助和大力支持。北京金属结构厂热情地对本书熔化极自动与半自动氩弧焊一节做了修改和补充。在此，我们谨向这些单位和同志致谢。

由于我们学习马克思、列宁主义著作和毛主席著作不够，路线斗争觉悟不高，并受施工技术水平和实践经验的限制，本书难免存在缺点和错误，敬希广大读者批评指正。

兰州化学工业公司化建公司

目 录

第一章 铝及铝合金的种类、性能和用途	1
第一节 铝及铝合金的种类.....	1
第二节 工业纯铝的成分、性能和用途.....	2
1. 成分及组织	2
2. 性能	3
3. 用途	6
第三节 常用热处理不能强化形变铝合金的类型、 性能和用途.....	7
1. 铝锰合金	7
2. 铝镁合金	9
第四节 铸造铝合金的种类、性能和用途.....	10
第二章 铝及铝合金焊接工艺	12
第一节 气焊.....	13
1. 接头形式	13
2. 焊前接口及填充材料表面的清理	17
3. 填充材料	19
4. 焊药	22
5. 焊接工艺	26
6. 焊后表面清洗	38
7. 焊接实例	40
第二节 碳极电弧焊.....	43
1. 碳极电弧的性质	44
2. 接头形式和焊前准备	50
3. 填充材料和焊药	51

4. 焊接工艺	52
5. 焊接实例	54
第三节 手工钨极氩弧焊	56
1. 对氩气的要求	58
2. 钨电极	60
3. 钨极氩弧的性质	63
4. 焊接电源	69
5. 焊枪	77
6. 接头形式	81
7. 焊前工件及填充材料的清理	84
8. 焊接工艺	84
9. 焊后处理	99
10. 焊接实例	100
第四节 熔化极自动与半自动氩弧焊	103
1. 熔化极氩弧的性质	106
2. 电弧调节的原理和焊机特性	106
3. 焊枪	113
4. 工件、焊丝表面的清理和工件的组装	114
5. 焊接工艺	119
第五节 铸造铝合金的焊接	130
1. 焊前准备	130
2. 焊前预热	130
3. 填充材料和焊药	131
4. 焊补	131
5. 焊后处理	133
第三章 焊接缺陷产生的原因及预防方法	134
第一节 气孔产生的原因及预防方法	134
第二节 裂纹产生的原因及预防方法	144
第三节 夹渣、未熔合及未焊透产生的原因及预防方法	154

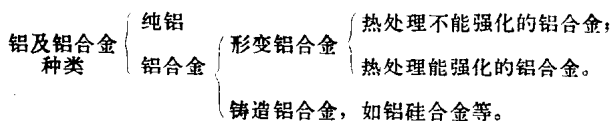
第四节 铝焊接头耐蚀性能降低的原因及提高方法·····	157
第四章 焊接质量及其检验 ·····	166
第一节 常用各种熔化焊质量·····	167
1. 焊缝外观质量比较·····	167
2. 焊接缺陷·····	167
3. 焊接接头的机械性能·····	168
4. 焊接接头的耐腐蚀性能·····	170
第二节 焊接质量检验·····	174
附录 铝及常用铝合金国内外牌号对照表 ·····	180

第一章 铝及铝合金的种类、性能和用途

铝是重要的有色金属之一。在工业上应用较晚，至今才有不到一百年的历史。由于铝质轻，导电、导热性能好，具有良好的耐腐蚀性，容易加工，添加某些合金元素制成铝合金后具有很好的机械强度，所以铝在工业、交通运输业以及人民生活中获得广泛的应用。铝和铝合金具有良好的耐腐蚀性能以及在很低温度下能保持良好的机械性能，这些对石油、化学工业有着重要的意义。目前，在石油、化学工业中，越来越多地用铝制造耐腐蚀的设备、管道和深冷分离设备。

第一节 铝及铝合金的种类

工业用纯铝及铝合金的种类大致如下：



纯铝实际上含有一定量的杂质（主要是铁和硅），按其杂质含量的不同把纯铝划分为各种纯度等级的工业纯铝，代号为L。

铝合金按其使用状态的不同可分为形变铝合金和铸造铝合金两种。形变铝合金塑性较高，适于压力加工。铸造铝合金塑性很低，不适于压力加工，但它具有良好的铸造性，所以叫做铸造铝合金。

形变铝合金又可分为热处理不能强化的形变铝合金和热处理能强化的形变铝合金。所谓热处理不能强化的形变铝合金，是指用热处理方法不能提高其强度而只可用压力加工方法来提高其强度的形变铝合金。所谓热处理能强化的形变铝合金，是指用热处理方法能提高其强度的形变铝合金。

目前，在炼油化学工业中应用的铝及铝合金焊接设备、容器、管道及其它焊接件，多半由塑性、导热性、耐蚀性及可焊性良好的纯铝，热处理不能强化的铝锰、铝镁等形变铝合金制成。本章以下各节仅对这些材料作一简介。

第二节 工业纯铝的成分、性能和用途

1. 成分及组织

工业用纯铝的品种和成分如表 1-1 所列。

表 1-1 工业用纯铝的成分

牌 号	代 号	铝的含量不小于 (%)	杂 质
一号高纯度铝	L01	99.93	主要是铁和硅，其次为铜、锰、锌、镁、钙等
二号高纯度铝	L02	99.97	
一号工业纯铝	L1	99.7	
二号工业纯铝	L2	99.6	
三号工业纯铝	L3	99.5	
四号工业纯铝	L4	99.3	
五号工业纯铝	L5	99.0	
六号工业纯铝	L6	98.8	

由表 1-1 可见，工业纯铝实际上含有杂质，主要是铁和硅，其次为铜、锰、锌、镁、钙等。这些杂质的含量和状态的变化对铝的工艺性能有不同的影响。

铝在结晶时常形成粗大的晶粒，在压力加工时容易出现

裂纹。为使晶粒细化，可加一些难熔金属，如钽、钛、锆和硼等。

铁在铝中的溶解度很小，在 655℃ 时仅能溶解 0.05%，并随温度下降而减少，室温时仅溶入 0.002%。因此，当铁在铝中的含量超过铝所能溶解的量时，就会形成一种呈针状晶体的铁铝化合物。由于这种化合物硬度高，性极脆，使铝的塑性变坏。

硅在铝中的溶解度也不大，在 577℃ 时为 0.65%，并随温度下降而逐渐减少，室温时仅为 0.05%。因此，铝中含硅量超过 0.05%，就会形成很脆的纯硅晶体，对铝的性能影响很坏。

铝中铁与硅常是同时存在。这样，当熔化金属凝固时，除能生成基体铝、硅与铝以及铁与铝的化合物外，还可能出现新的铁—硅—铝化合物，使铝的塑性变坏，尤其是其中呈针状的化合物为害更大。

为消除铁、硅等杂质的针状或片状化合物，改善铝的塑性，一般常将铝（或铝合金）在热状态下锻轧，使它破碎，并进行长时间的扩散退火，以便能部分地收缩成圆粒状。如不经锻轧而只进行扩散退火，则只能收到部分的效果。

2. 性能

(1) 物理性能

熔点（纯度99.5%的铝）	658℃
沸点	2270℃
20℃时的比重	2.7
线膨胀系数：	
20~100℃	23.8×10^{-6} 厘米/厘米·℃
200~300℃	27.5×10^{-6} 厘米/厘米·℃
500~600℃	33.5×10^{-6} 厘米/厘米·℃

熔化时体积膨胀	6.5%
熔化潜热	93卡/克
气化潜热	2227卡/克
导热系数 (20℃)	0.52卡/厘米·秒·℃
20℃时的固态比热	0.222卡/克·℃
20℃时的导电性 (300℃回火)	36~36.5米/欧·毫米 ²
20℃时的电阻系数	0.027~0.03欧·毫米 ² /米

(2) 机械性能 铝的强度很低, 但塑性非常好。工业纯铝某些板、管材料的常温机械性能如表 1-2 所列。

表 1-2 工业纯铝型材的机械性能

牌 号	材 料		規 格 (毫米)	抗 拉 强 度 σ_b (公斤/毫米 ²)	伸 长 率 δ (%)
L1、L2、L3、 L4、L5、L6	板材	退火状态	壁 厚 0.3~1.0	11	20~28
		热轨状态	5~80	6.5~8	10~18
L2、L3、 L4、L6	管材	退火薄壁 热挤压厚壁	外 径 6~120 8~120	≤12	20

注: 纯铝在退火状态下的常温弹性系数约为7200公斤/毫米², 布氏硬度为25公斤/毫米²。

铝的纯度越大, 它的主要特性表现得越明显。铝中铁、硅及其他杂质增加时, 铝的强度和硬度增高, 而塑性降低 (表1-3)。

铝也和其它塑性金属一样, 能用冷作硬化法提高它的强度, 但其塑性下降。铝在高温下的强度严重降低, 而塑性显著提高。但是铝在低温时强度和机械性能仍旧良好, 甚至有所提高。

(3) 工艺性能 铝的浇铸温度是700~750℃。铝不仅

表 1-3 不同纯度铝的机械性能

含铝量 (%)	抗拉强度 σ_b (公斤/毫米 ²)	伸长率 δ (%)	布氏硬度 H_B (公斤/毫米 ²)
99.996	5.0	45	13~15
99.5	7.5	29	20
99.0	8.5	20	25
98.0	9.0	12.5	28

在350~450℃热状态下容易进行轧、压、拉丝等热加工，而且也能在冷状态下进行同样的冷加工。冷加工时，需在350~400℃进行中间退火。铝不易切削加工，宜在高速下进行。铝的焊接性能尚好。

(4) 导电性能 铝具有高的导电性，纯铝的导电率约为铜的60%，在金属中仅次于银、铜、金而居第四位。铝中杂质增多时，其导电性有所下降。降低导电性的杂质首先是锰、铬、钒，其次是钛、镁，铁、硅、镍、锌及铜的影响较小。

(5) 导热性能 铝具有高的导热性，比20号钢约高三倍。铝中杂质能使导热性降低。铝的导热性随温度的增高而下降，如图 1-1 所示。

(6) 耐腐蚀性能

铝与空气中的氧接触很容易被氧化，在铝的表面上形成致密的、钝化的三氧化二铝薄膜，保护内部的铝不继续氧化，使铝能够抵抗大气的腐蚀。在氧化性介质中，铝的表面生

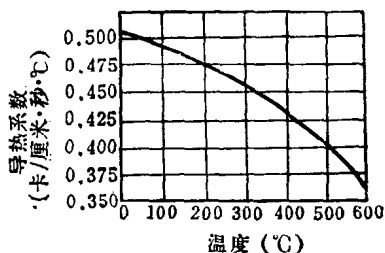


图 1-1 铝的导热性能随温度的变化

成氧化膜，所以具有很好的耐蚀性。在能破坏氧化膜的介质中，则不耐蚀。铝的耐蚀性主要决定于氧化膜在介质中的稳定性。

工业纯铝均不同程度地含有一些杂质，这些杂质能形成新的组成物，破坏氧化膜的连续性，因而加速铝的腐蚀，故杂质含量越少，铝越纯，则其耐蚀性越强。

铝在大气中是非常耐蚀的。在工业区中，空气含有二氧化硫、二氧化碳、硫化氢、氨和其它气体对铝的腐蚀速度没有明显的影响。附着在铝表面的污物，可能因氧的不足而产生点腐蚀现象。在此情况下，如还有一定的透气能力，则氧化膜可以逐渐形成而自行修补，因此点腐蚀速度也会随着时间的增长而减缓。

铝在碱性溶液中极不耐蚀，当氢氧化钾或氢氧化钠的溶液浓度大于0.01%时，铝表面的氧化膜即被溶解，使铝失去了耐蚀能力。

盐酸能很快地溶解铝，只有在浓度很低（小于0.1%）的情况下，铝的腐蚀才会很慢。增高温度可加速铝的腐蚀。

硫酸也能很快地溶解铝，只有在浓度极低或是达到发烟硫酸时，铝才有耐蚀性。增高温度也可加速铝的腐蚀。

硝酸当浓度较低时能迅速地溶解铝，当浓度超过80%时，铝有很好的耐蚀性，比奥氏体不锈钢更为耐蚀，如图1-2所示。

在室温下，铝对醋酸、甲酸有很好的耐腐蚀性。

氢氟酸和氢溴酸对铝的作用与盐酸相近。稀磷酸（小于1%）、铬酸（达10%）、各种浓度的硼酸溶液及有机酸对铝的作用甚微。

3. 用途

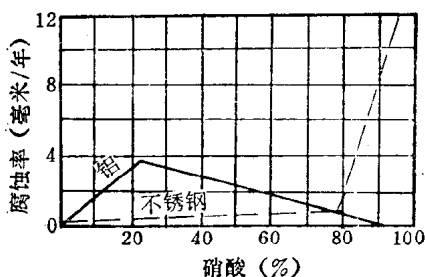


图 1-2 铝及 1 铬 18 镍 9 不锈钢的腐蚀率与硝酸浓度的关系

由于铝和铝合金具有前述各种特性，所以广泛地用于航空工业、电气工业、交通运输业、炼油、化学工业、建筑业以及轻工业等部门。在炼油、化学工业中，铝主要用于制造换热设备、深冷设备、浓硝酸、醋酸设备，以及不允许有铁离子污染介质的设备、容器、管子等。

第三节 常用热处理不能强化形变

铝合金的类型、性能和用途

由于纯铝强度很低，切削加工性能不良，限制了它的大量应用。因此，在铝中常加入铜、镁、锰、锌、硅、铬等合金元素，使具有相当高的机械性能，从而使这些铝合金在近代工业中获得了广泛地应用。

在炼油化学工业中较广泛应用的铝合金是热处理不能强化的形变铝合金。工业纯铝实质上也属于这一类。常用的这类铝合金主要为铝锰合金及铝镁合金。

1. 铝锰合金

工业中应用的铝锰合金，其含锰量为 1~1.6% (表 1-4)。

表 1-4 工业用铝锰合金大致的化学成分

锰	铜	镁	铁	硅	锌	其他杂质
	不大于(%)					
1.0~1.6	0.2	0.05	0.7	0.6	0.1	0.1

大于 1.6% 时塑性降低。所以，通常只有这一种铝锰合金。锰在铝中起提高强度的作用(硬度也随之增高)。它在铝中的溶解度，当温度为 657℃ 时可达 1.82%；但随温度下降其溶解度也随之减小，在 500℃ 时为 0.36%，而在室温时仅为 0.05%。在固态，锰溶入铝中所形成的均一结构的物质称为固溶体。超过溶解度而多余的锰与铝能形成化合物(MnAl₆)。铝锰合金有形成粗晶粒的倾向。

铁是铝锰合金中最有害的杂质，它能使锰在铝中提高强度的作用减弱，且能降低铝锰合金的塑性。

硅不会剧烈地影响铝锰合金的强度和塑性。铜的含量如大于 0.05%，会降低铝锰合金的耐蚀性。

铝锰合金多在退火(350~410℃)状态下使用。退火能改善组织。在铁与硅的比值近于 1 时，退火的铝锰合金可具有较细的晶粒。铝锰合金某些加工产品的机械性能如表 1-5 所列。

表 1-5 铝锰合金型材的机械性能

牌 号	材 料		規 格	抗 拉 强 度	伸 长 率
			(毫米)	σ_b (公斤/毫米 ²)	
LF21	板材	退火状态	0.3~10	10~15	20~22
		热轧状态	5~50	11~12	12~15
	管材	退火薄壁	6~120	≤14	
		热挤压厚壁	8~120	≤17	

由于热处理对于铝锰合金的强度提高极少，故常用冷加工方法提高强度。80%冷作变形后，可使抗拉强度提高到22公斤/毫米²，但塑性下降。

铝锰合金具有高塑性、良好焊接性、较高耐蚀性以及较纯铝为高的强度，故在工业上常用来制造纯铝强度不能满足要求的各种冷冲压件、焊接件及耐蚀件等。

2. 铝镁合金

工业上用的铝镁合金，一般含镁量不超过12%。常用的形变铝镁合金，其含镁量多为2~6%，此外还含有0.15~0.8%的锰，以及其他杂质。常用的铝镁合金牌号有：LF2（含镁2.0~2.8%）、LF3（含镁3.2~3.8%）、LF5（含镁4.0~5.5%）、LF6（含镁5.8~6.8%）、LF11（含镁4.8~5.5%）。镁在铝中的溶解度在温度为449℃时可达17.4%，但随温度下降其溶解度也随之减小，室温时仅为1.4%。超过溶解度而多余的镁，与铝能形成化合物（Mg₅Al₈）。铝镁合金在退火时有形成粗晶粒的倾向。

锰（0.2~0.6%）、铬（0.1~0.2%）或钒在铝镁合金中可减少粗晶粒倾向，提高强度，但塑性略有降低。钛（0.1%）可使合金获得更细的晶粒组织。铁与硅均使合金强度及塑性降低，故应限制其含量。

常用的形变铝镁合金型材的常温机械性能如表1-6所列，低温时的强度和伸长率一般均比常温高。热处理对提高常用铝镁合金的强度效果不大，故一般用冷加工方法提高强度。

常用热处理不能强化的形变铝镁合金具有较纯铝为高的强度、常温和低温下的高塑性、良好焊接性及较高的耐蚀性。同时，能减轻合金的比重（镁比铝轻）、具有高的耐振性和良好的磨光性。在石油、化学工业中，主要用于制造容器、

表 1-6 常用铝镁合金型材的常温机械性能

牌号	材 料		规 格	抗拉强度 σ_b (公斤/毫米 ²)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (公斤/毫米 ²)	伸长率 δ (%)
LF2	管材	冷作硬化薄壁	外径250 壁厚<5.0	22		
		热挤压厚壁		≤23		
LF3	板材	退火	0.5~4.5	20	10	15
		热轧	5~50	19~17	8~6	15~11
	管材	退火薄壁		18	8	15
		热挤压厚壁		18	7	15
LF5	板材	退火	0.5~4.5	28	15	15
热轧		5~50	28~26	13~11	15~12	
LF11		退火薄壁管		22	9	15

管道以及深冷设备。

第四节 铸造铝合金的种类、性能和用途

铸造铝合金除应具有一定的强度、优良的抗腐蚀性能和其他工作性能外，还应具有良好的铸造工艺性能。它一般含有较大量的合金元素，以提高铸造时的流动性、铸件的致密性以及铸造时对收缩应力的抵抗能力，从而改善了合金的铸造性。

铸造铝合金的基本合金元素是硅、铜、镁和锌。为了改善铝合金的耐热等性能也常加入少量其他的合金元素，如镍、铬及钛等。

铸造铝合金的种类按照化学成分及合金元素对合金性能的影响，可分为：铝硅系、铝硅铜系、铝铜系、铝镁系、铝

锌硅系和铝铜镁镍系合金。除简单的铝硅系合金之外，一般可用热处理来不同程度地提高强度。

铸造铝合金主要用于制造内燃机车的零部件如汽缸、活塞、油泵、变速箱、电动机外壳等，在石油、化学工业生产应用较少，这里不作详细介绍。

第二章 铝及铝合金焊接工艺

大家知道，铝及铝合金的焊接比钢要困难得多，焊接特点和钢也不一样。这是由铝及铝合金本身的一些特性所决定的。例如从熔点来看，铝为 657°C ，铝合金约 $600\sim 650^{\circ}\text{C}$ ，比钢的熔点（达 1500°C ）为低，似乎可以用小热源来焊接铝及铝合金，但实际上由于铝的比热比钢约大两倍，导热性约大三倍，即升高同样的温度需要的热量较多，而散失热量较快，所以熔化时几乎还是需要与熔点约达 1500°C 的钢一样多的热量，而且需要用热量集中的热源。铝极易氧化产生难熔的三氧化二铝薄膜，它的熔点高达 2050°C ，焊接时所供给的热能不易使它熔化掉，常包覆着填充金属的熔滴和熔池金属而妨碍熔合，或在焊缝中产生夹杂物，从而破坏金属的连续性和均匀性，降低机械性能及耐蚀性。铝及铝合金焊接时受到热膨胀的影响比钢大得多，其线膨胀系数约为钢的两倍，故易产生严重的变形或在刚性结构中产生较大的内应力，甚至引起裂纹。铝及铝合金高温强度很低，例如纯铝在 370°C 左右时的强度不超过 1 公斤/毫米²，常不能在高温下支持住熔化金属的重量而破坏焊缝的成型，故常需采用垫板或夹具。铝及铝合金在熔化时无颜色变化，焊工难于判断是否熔化，使焊接操作较难掌握。铝合金中的低沸点元素，如镁、锌、锰等在焊接时会发生蒸发，降低其含量或需采取预防措施等。

在炼油化工部门中，较为普遍焊接的铝及铝合金主要有纯铝和属于热处理不能强化的铝锰、铝镁等形变铝合金，以

下我们讨论纯铝和这些合金的一般焊接工艺，包括气焊、碳极电弧焊、钨极氩弧焊和熔化电极氩弧焊等。

第一节 气 焊

铝的焊接最早采用的方法是气焊。气焊就是用可燃气体在氧气或空气中燃烧所产生的高温火焰熔化金属，进行焊接。铝及铝合金气焊用的可燃气体通常采用乙炔气，它和其它可燃气体（如氢）相比，发热量较大，在氧气中燃烧时火焰温度较高。所以，氧-乙炔焰较适用于比热较大、导热性较高的铝及铝合金的焊接。

铝及铝合金的氧-乙炔焰气焊有以下优点和缺点：

（1）气焊用的可燃气体和氧气容易获得，而且经济，所以能普遍采用；

（2）气焊设备和工具简便，易于移动；

（3）气焊焊接接头质量较差，如焊缝金属组织粗大和疏松，耐腐蚀性能不好，接头机械性能也较差，焊接变形较大等；

（4）气焊实际施焊技术较难掌握，生产效率也不高。

铝及铝合金的气焊，主要适用于焊接质量要求、尤其是耐腐蚀性能要求不高的、壁厚较小的设备、管道及其他焊件等的焊接和焊补（包括铸铝的焊补）。铝及铝合金的气焊，目前在生产中尤其是在小厂和炼油化工部门中，仍在不同程度地被采用。

1. 接头形式

铝焊缝接头形式如图 2-1 所示。大家知道，铝及铝合金的气焊是要用焊药的，而焊药对铝及铝合金能产生腐蚀。因此，焊接后一定要把焊缝接头上残留的焊药彻底清除。要做