

铝及铝合金 的 熔炼与铸造

馬 龙 翔 編 著

冶金工业出版社

76.81

76.81
463

鋁 及 鋁 合 金 的 熔 炼 与 鑄 錠

馬 龍 翔 編 著

冶 金 工 業 出 版 社

2520/2

本書系著者根据自己的教学讲义，結合国内外当前实际生产資料編写而成。書内闡述了鋁及鋁合金的性質、熔炼与鑄錠的基本理論与实践，並着重討論了連續鑄造的技术及鑄錠缺陷等問題。

本書可作为大专学校有关专业学生的学习参考書，也可供有关技术人員作参考。

鋁及鋁合金的熔炼与鑄錠

馬龙翔 編 著

編輯：李建国

設計：韓晶石

校对：馬泰安

1959年5月第一版

1959年5月北京第一次印刷 7,120 册

850×1168 • 1/32 • 245,000 字 • 印张 $9\frac{26}{32}$ • 插頁4 • 定价 1.30 元

冶金工业出版社印刷厂印

新华書店发行

書号 1160

冶金工业出版社出版（地址：北京市灯市口甲45号）

北京市書刊出版业营业許可証出字第093号

緒 言

自从第二次世界大战以来，鋁及鋁合金的加工制器工业日趋重要，不仅是飞机制造工业方面，即使在一般交通运输工业、建筑工业、机械制造工业、电器工业、以及許多輕工业中，鋁及鋁合金材料的应用，也日见广泛。这是因为不仅鋁的质量輕、外表美观、耐腐性等优良特性，更因为近来新的鋁合金不断出现，以及对于鋁合金的熔鑄及压力加工技术日见进步，因而使昔日不能适应的許多工业用途，现在已完全能够胜任，从而可以代替許多其他金屬。

我国的鋁金屬工业，由于党及政府的重視，近年来进展十分迅速。在过去长时期以来，由于国内自己不能生产鋁，只能依靠少量的进口金屬原料，进行一些民用器具的加工制造，因此一切生产技术知識，十分落后。但自第一个五年計劃以来，鋁工业即开始迅速进展。并且已初步奠定了近代化的鋁及鋁合金的加工工业的基础。在第二个五年計劃中，随我国工业建設之飞跃发展，鋁之生产亦将有更大的跃进。此大量之鋁，其中絕大部份将通过熔炼、鑄造及压力加工而制成各种各样的工业材料或成品。因此，从金屬鋁到加工成品的各个生产过程中，对生产技术的实践与理論的研究，都将成为日益迫切的任务。

就鋁及鋁合金的生产技术的发展，可从两方面来看：首先，是鋁合金本身的发展，特别是自从时效硬化的实践与理論得以闡明及开展后，使鋁合金的研究工作更日见进步。迄至今日，我国已完全掌握了工业上压力加工用鋁合金的生产，目前所用的鋁合金，虽然不过十余种，但由于近代許多新技术的发展，要求有更多的質輕、耐热、耐腐、耐磨及高强度的輕金屬材料，鋁基合金更将有无限的发展前途；其次，与新合金发展相应的加工工艺的进展，也是鋁加工生产技术中的重要环节。从金屬的熔炼、鑄造成型到压力加工制成各种成品或半成品，在全部工艺过程中，又

以熔鑄部分的工艺发展，占有最重要的地位。

生产实践証明，在全部生产过程中，大部分的加工废品，根源于熔炼及鑄錠阶段。无论是板、带、条、管、棒、綫、型材等半成品，或其他造型成品的制造中，如果首先在熔鑄过程中所采用的设备不合理、技术条件运用不当，或操作不好，都能导致废品的产生。譬如：机械性能不合规定，耐蚀性降低，金属内部发生脆裂、气眼、夹杂等缺陷，或其他表面缺陷等，大部分可能根源于熔鑄过程。过去，长时期以来，在生产技术上存在许多难于解决的问题，譬如：铝及铝合金熔融过程的吸气问题，熔炼过程中的排除氧化渣夹杂物问题，鑄造中之化学成分偏析问题，鑄錠之裂缝问题，以及鑄錠之结晶组织问题等等。在生产过程中，这些问题都能导致废品率增高和成品率降低。

因此，本书之目的，即在于通过铝及铝合金之熔炼及鑄錠的工艺叙述，对上述问题的理论与实践方面，加以讨论。除了对一般应用的压力加工用铝及铝合金的各种性质及金相组织作概括的介绍外，并着重对除渣、排气精炼、偏析、裂缝等问题加以阐述。特别对于铝合金的連續鑄錠作了详细的探讨。

铝合金之連續鑄錠在国外已有十多年的历史，过去对我们还比较生疏。近年来随铝金属工业之发展，連續鑄錠技术已开始为我国所掌握。但由于連續鑄錠技术本身之复杂性，对于新牌号合金或有新的技术要求，如缺少足够的理论与实践相结合的指导，就会发生困难。近年来，外国的许多科学工作者，特别是苏联的科学家及工程师，在这方面已作出许多贡献。本书内对这部分知识也作了充分的介绍。

本书除根据国外文献，特别是苏联各种文献外，还引用了一部分中外工厂的生产资料。由于我国尚未公布有自己的工业合金标准，目前都暂使用苏联的标准，故书内合金名称主要都采用苏联牌号。

本书可作为高等学校及中等技术学校各有关专业学生之学习参考，亦可供生产技术人员参考之用。

目 录

緒 言

第一章 鋁的性質	1
§ 1. 鋁的一般特性	1
§ 2. 鋁的物理性質	2
§ 3. 機械性能及其測定	13
§ 4. 強度-重量比值	18
§ 5. 鋁的化學性能—腐蝕性能及其測驗	23
§ 6. 鋁及鋁合金之金相檢驗	28
第二章 壓力加工鋁合金之平衡圖	34
第三章 工業用壓力加工鋁合金	63
§ 1. 工業用普通鋁合金——不可熱處理鋁合金	63
§ 2. 工業用硬鋁合金——可熱處理合金	69
第四章 鋁及鋁合金之熔煉	86
§ 1. 熔煉目的	86
§ 2. 熔煉原料	87
§ 3. 熔煉設備	95
§ 4. 熔煉方法	116
第五章 鋁及鋁合金之精煉	127
§ 1. 鋁及鋁合金之除渣精煉	127
§ 2. 鋁及鋁合金熔煉中之除氣精煉	134
第六章 鋁及鋁合金錠之鑄造法	149
§ 1. 鑄錠之基本要求	149
§ 2. 鋁及鋁合金錠之澆鑄方法	160
§ 3. 鋁及鋁合金鑄錠之連續澆鑄法	172
第七章 連續鑄錠之研究	185
§ 1. 連續鑄錠之一般問題	185
§ 2. 連續鑄錠時之熱交換	187

§ 3. 凝固面（結晶面）深度之理論計算	191
§ 4. 凝固面（結晶面）之實驗測定法	195
§ 5. 連續鑄錠時之結晶速度	200
§ 6. 連續澆鑄時之溫度分布	203
§ 7. 由液相變到固相過渡區域之大小	209
§ 8. 結晶速度與過渡區對於鑄錠機械性能之關係	212
§ 9. 主要鋁合金之連續鑄錠技術	215
第八章 鋁及鋁合金鑄錠之偏析	221
§ 1. 金屬鑄錠偏析之種類	221
§ 2. 連續鑄錠中之逆偏析現象	226
§ 3. 區域偏析與冷卻強度之關係	228
§ 4. 逆偏析之理論	230
§ 5. 偏析結疤	234
第九章 鑄錠之結晶組織	240
§ 1. 鑄錠之結晶形態	240
§ 2. 鑄錠之結晶過程	242
§ 3. 各種因素對結晶組織之影響	246
第十章 鑄錠凝固時之收縮、殘余應力及裂縫	257
§ 1. 鑄錠凝固及冷卻時之綫收縮	257
§ 2. 鑄錠之縮孔及縮管	262
§ 3. 鑄錠內之殘余應力	266
§ 4. 鑄錠之裂縫傾向	270
§ 5. 防止連續鑄錠產生裂縫之方法	278
第十一章 鋁及鋁合金鑄錠之檢查及均勻化	285
§ 1. 鑄錠之檢查	285
§ 2. 鋁錠之刨皮、鋸斷及包鋁準備	288
§ 3. 鑄錠均勻化之目的	290
§ 4. 均勻化之基本理論——擴散作用	291
§ 5. 均勻化過程鑄錠內部之變化	297
§ 6. 均勻化之溫度及加熱時間	299

第一章

鋁的性質

§ 1. 鋁的一般特性

从鋁工业底发展历史，可以大略地看出，鋁的发展可以分为两个阶段：第一阶段是由稀有金屬成为工业用純鋁；第二阶段由普通工业用純鋁，进而成为可与鋼鉄爭衡的合金鋁。在这两个阶段中的鋁，工业上的地位是截然不同的；在第一阶段中，主要是由于鋁金屬具有数种优越于其他金屬的特性，使鋁金屬能在工业制造上与其他金屬如銅、鉛、鋅等互相竞赛；而在第二阶段中，由于鋁合金的加工技术之进步，使其不仅成为飞机制造之主要原料，而在其他工业部門中，亦逐渐进而代替鋼鉄及其他有色金屬。

为了要充份了解鋁金屬在加工工业中之特点，首先將金屬純鋁之几种特有性質，略加說明：

質輕 純鋁的重量，約为其他普通金屬之三分之一，以同样的体积，鋁的重量較輕，这一特性，使鋁金屬在許多需要搬运或移动的工业制品中，地位日见重要。許多工业制品，宁願采用价格較貴的鋁为原料，即因鋁制品在許多搬运的工作中更为方便。

导电性 鋁的导电率約为銅的60%，在其他一般金屬之上。如以鋁与銅之重量比率按1比3.3計算，則以鋁金屬代替銅为导电材料，無論在性能上及經濟上都是无問題的。

切削性 多数机械制品、器具及結構材料，都要求有最低的切削成本，因为这一加工步骤是十分頻繁的。在这方面，鋁金屬的切削性能毫不逊于其他金屬，不过在切削技术的条件上之要求

稍有不同。

耐蝕性 在各种金屬中，鋁的耐蝕性已証明是最优越的。一般酸类不能侵蝕鋁金屬，硫对鋁的作用亦甚微。碱类则可以侵蝕，鋁合金对海水的抵抗性較差。通常鋁金屬中含杂质愈多，則耐抗蝕性愈低。鋁表面所产生的氧化鋁薄膜，可以抵抗空气之繼續氧化侵蝕。

色泽 鋁金屬的銀白色光澤也是造成鋁在工业制品中占重要地位原因之一。多数裝飾品如器具，建筑物，多喜用具有銀白光澤之鋁金屬为材料。

对食品的安全性 鋁金屬在工业制品中占有地位的初期，最大的应用即是以鋁作为烹調用具。由于鋁的質輕、美丽而光澤、高的传热性，所以鋁是最适于制造食具的材料。但最大的优点，是他对一般食物的安全性，因为如果在食物中即使渗入极少量的鋁是比較无害的，因此鋁制的烹調用具及食品盛具，到现在为止仍占有极重要地位。

焊接性 自从鋁的制品問世以后，鋁的焊接問題，就日见重要。在初期，鋁的焊接是比較困难的。因为鋁的熔点极低，而比鋁熔点更低的一切焊接金屬，与鋁金屬之間，必然发生电解势，一遇湿潮就会使焊接处因电解质的作用而失敗。但迄近期，鋁金屬之焊接鋸接等新技术紛紛发展，就使此种困难完全克服。

§ 2. 鋁的物理性質

由于鋁金屬在被发现后，具有上述几种显著的特性，于是鋁之应用在工业中逐渐扩展。

其后，由于科学研究之进步，关于鋁的性質之知識也日见增加。科学家在充分获得有关鋁性質的各种知識以后，才能在金屬的加工技术方面有所进展，因而愈加促使鋁金屬应用范围之扩展。

所謂工业純鋁，其含鋁成份通常在99.5%左右。仅在實驗室

中，或經過特殊的精炼以后，鋁的純度才能达到 99.99% 以上。所以一般所謂普通工业純鋁是指 99.5% 左右之成份而言。

純鋁之物理性質可分別簡述如下：

鋁金屬之結晶体

鋁是屬於面心立方体的結晶，所以是富于延展性之金屬。此立方結晶体之每边之长，为 $4.046 \pm 0.004 \times 10^{-8}$ 公厘，这数值是用 X 光綫在純度为 99.97% 之鋁金屬上測定的。面心体之排列是球体密集排列的一种。每一原子为其他六个对称的原子所包围，这种排列法使金屬最富有延展性。

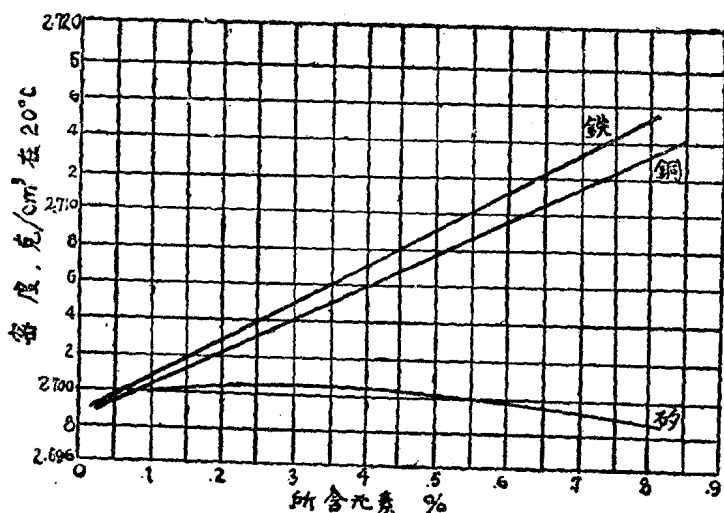
密度或比重

在一切现有工业上較多量使用的金屬中，除了鎂（密度为 1.74）以外，鋁几乎是最輕即密度最小的金屬。99.971% 純度的鋁經冷作压延后，其密度为每立方公分 2.6989 克（在 20°C 时）。經退火后其密度为每立方公分 2.6996 克。凡是金屬經過冷作以后，其密度必然減小。鋁金屬中如加入少量之鉄及銅，則密度增加。矽之密度比鋁为小（矽密度为 1.4），因此矽加入鋁中可使鋁金屬密度減低，但在最初之某数量时，密度反而增加，如第 1 图所示。第 1 图表示通常一般工业杂质对于鋁金屬密度之影响。

此外，退火作用通常可增加密度。但如金屬中之杂质由固溶体中发生析出作用时，則密度反会降低。下表为各种鋁之加工制品材料的密度比較：

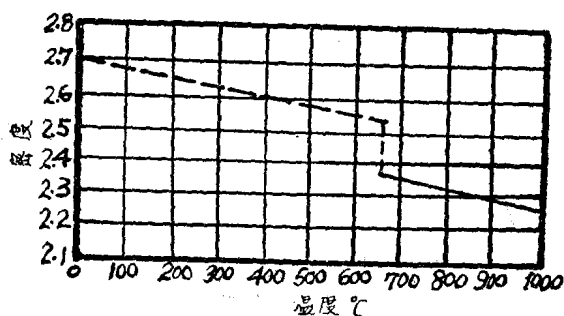
第 1 表 工业用鋁之密度比較表

鋁 材 种 类	純 度 %	密 度 克/公分 ³ (20°C)		
		鑄造状态	冷作状态	退火状态
鋁棒	99.97		2.6989	2.6996
鋁块 (冷鑄) 及片	99.95	2.7003	2.7001	
鋁錠 (有孔隙) 及片	99.75	2.686	2.7031	2.7030
鋁線	99.5		2.7046	2.7055
鋁片	99.2		2.7078	2.7069
鋁块 (冷鑄)	98.2	2.7279		



第1图 少量之铁、铜、矽元素对冷作铝棒密度之影响

铝金属之密度，亦随其温度而变化，第2图表示由0°C至1000°C温度间铝密度变化的曲线。



第2图 99.95%纯度之铝金属在0°到1000°C温度之密度（虚线是由计算而得）

由上图可知，铝在熔点时其密度变化甚大，其体积之收缩率约为6.6%。下表说明数种不同纯度之铝，在不同温度状态下其密度之变化。

第 2 表 鋁 之 密 度

溫 度 °C	金 屬 之 狀 態	密 度 克/公分 ³		
		99.75%純度鋁	99.4%純度鋁	98.25%純度鋁
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

(括弧中之数值, 是由膨胀公式計算而得)

与密度有关者, 为固体綫收縮率。固体綫收縮率在鑄造中甚为重要。在鋁合金中, 純鋁之固体收縮率为1.7—1.9%, 鋁矽合金(矽鋁盟 Al—12 Si) 为1.15%。与其他金屬相較, 則生鉄为1.04—2.4%, 黃銅为1.5%, 鑄鋼为2.0%, 高純度鋁为2%, 鎂合金由1到1.6%(见第52表)。由于鑄造时鋁金屬之过份收縮, 易引起裂开, 因此在压模鑄造中鋁之收縮問題尤为重要。

热膨胀系数

科学家曾測定品位为99.952%之高純度电解精炼鋁在20°C至610°C溫度間之热綫膨胀率如下: L_0 为原来长度, L_t 为在溫度 $t^\circ\text{C}$ 时之长度, 則:

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

当鋁之品位較低时 (99.74%), 此公式写为:

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

第3表为各种純度不同之鋁的平均热膨胀系数之比較。在液体状态时, 鋁 (99.75%純度) 的体积膨胀系数, 可用下列式表示, 其中 V_t 为溫度 $t^\circ\text{C}$ 时之体积:

$$V_t = V_{658.7} [1 + 0.000114(t - 658^\circ)]$$

在低溫度下之膨脹係數，繼續降低。

一般言之，如與其他金屬相比較，則鋁之熱膨脹較其他重金屬為大，因此在組合鋁材時必需預留較大之膨脹空隙，以免在溫度變化時，因熱膨脹而使材料發生應力。第3表為鋁之平均膨脹係數，第4表為鋁金屬與其他金屬之熱膨脹係數之比較：

第3表 鋁之平均膨脹係數

溫度範圍 °C	每攝氏溫度1度平均膨脹係數		
	鑄 鋁 (99.95%) $\times 10^{-6}$	鑄 鋁 (99.74%) $\times 10^{-6}$	壓延鋁 (99.15%) $\times 10^{-6}$
20到100	23.8	23.8	24.0
20到200	24.7		25.9
20到300	25.7	25.6	26.7
20到400	26.7		27.2
20到500	27.7		27.9
20到600	28.5	29.4	28.6
100到200	25.5		
200到300	27.5		
300到400	29.5		
400到500	31.5		
500到600	33.5		
300到600	31.5		

第4表 各種金屬之平均線膨脹係數比較

金 屬	20至100°C 每度°C	20至200°C 每度°C
純 鋁	23.8×10^{-6}	24.7×10^{-6}
杜拉鋁合金(硬鋁)	22.9	24.4
Al—Mg—Si 合金(防銹)	22.7	23.3
Al—Cu—Ni (τ 合金)	22.5	23.9
Al—Si (砂鋁型)	19.0	21.0
鉄	12.5	12.7
銅	16.5	16.7
錫	31.0	38.0
純 銀	25.9	28.5

鋁之熔點 (或凝固點)

鋁之凝固點一般列為658.7°C，這數值是指純度99.60%之鋁

而高。純度愈大，則凝固点愈高，如最純之鋁（99.97%），其凝固点为659.8°C。一般工业用純鋁，其凝固点多在660°C上下，純度愈低，則凝固点必然下降。品位为99.2%之工业用鋁其凝固点为657°C，鋁之共晶合金之熔点最低，如鋁矽合金，其共晶点温度为577°C。

鋁 之 比 热

鋁之比热及热含量，可参考下表：

第 5 表 鋁之比热及热含量

温 度 (t)	热 含 量	比 热	
°C	每公斤卡路里	平 均 0° 至 t°	在 t° 时
0			0.2220
100	22.59	0.2259	0.2297
200	45.94	0.2297	0.2374
300	70.07	0.2336	0.2451
400	94.97	0.2374	0.2529
500	120.64	0.2413	0.2606
600	147.09	0.2452	0.2683
657 (凝固点)	162.50	0.2473	0.2727
657 (液 体)	256.46	0.3904	0.2502
700	267.27	0.3818	0.2523
800	292.74	0.3659	0.2571
900	318.70	0.3541	0.2619
1000	345.14	0.3451	0.2667

在固体状态时，鋁之热含量为162.50卡/公斤，但亦有人測定为160.2卡/公斤。在液体状态时，热含量为256.46卡/公斤。

温度愈低，比热續降。在零下185°C时，比热降至0.0967，至零下241°C时降至0.0009。

鋁之熔解潛热

鋁之熔解潛热，經測定为每克93.96卡，亦有測定为92.4卡。

鋁之热传导率

鋁之热传导率的測定，出入甚大，尤其在高温时，相差尤巨。一般認為比較可靠之数值见下表：

第 6 表 鋁的热传导率

純 度 %	热 传 导 率					
	0°C	室 溫	100°C	200°C	300°C	400°C
99.7	0.520	—	0.525	0.531	0.537	0.543
99.48	—	—	0.51	0.51	0.51	—

(鋁合金之热传导率见第 45 表)

一般言之，純度愈減，則热传导性亦愈低。在熔点时，热传导率尤其大減，平均相当于固体之69%左右。

科学家劳伦士試将热传导率与电传导率相比，再除以绝对温度，而得所謂劳伦士系数，即：

$$\text{劳伦士系数} = \frac{K}{\lambda T}$$

此处 K 为热传导率；

λ 为电传导率；

T 为绝对温度。

所有一切純金屬之劳伦士系数，几乎完全相同。根据此式計算，純度为99.6%的鋁之劳倫士系数应为 5.46×10^{-9} 。一般普通鋁合金之劳伦士系数亦与純鋁相近，第 7 表为21种合金之平均劳伦士系数：

第 7 表 鋁之平均劳倫士系数

溫 度°C	劳 伦 士 系 数 $\times 10^{-9}$
80°C	5.3
150°C	5.3
200°C	5.4

劳伦士系数在材料学上很有用，因为可从已測定任何鋁合金之电传导率，以求得其热传导系数之近似值。

鋁之流动性

下列表为鋁之流动性指数。取在 300°C 时錫之流动性为标准，再用旋轉圓筒法，以比較出各种金屬之流动性。第 8 表为两种不同純度之鋁的流动性指数。大凡鋁金屬含其他物質愈多則其流动性愈大。鋁中加入鉄、矽、銅、鋅及錫等元素物質后，均可促进其流动性。

第 8 表 鋁之流动性指数

温 度 $^{\circ}\text{C}$	流动性指数 (假定錫在 300°C 为 1.00)	
	鋁 純度=99.26%	鋁 純度 98.32%
680	0.51	0.67
700	0.70	0.75
750	0.84	0.88
800	0.98	0.97
850	0.97	1.02
900	1.00	1.05
950	1.02	1.09
1000	1.05	1.15

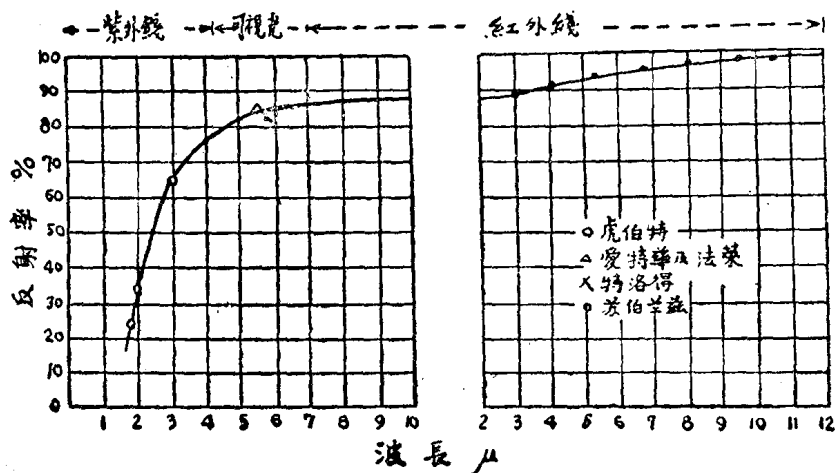
鋁之光学性

鋁的光学性在很早就被測定，其数值为：曲折率为 5.32，其中假定光之波长 $\lambda = 0.589$ ，相当于日光之波长，其反射率为 83%。

其中以鋁之反射性在鋁的应用上較為重要。除了金屬矽以外，在 28 种金屬及合金試驗之結果，以鋁制之薄膜对紫外綫之反射率为最高。波长为 0.18μ 时，反射率为 24%；波长为 0.20μ 时，反射率为 34%；波长 0.30μ 时反射率为 65%。因此鋁为热波的良好反射物。第 3 图为鋁对各种不同波长之反射率。

由第 3 图可知，最大的反射率約为 86% 左右。用鋁箔，輾片，或蝕刻后之鋁片，都可获得反射率。在制造鋁的片板制品时，無論是純鋁或硬鋁，如压延机之輾筒充分磨光，經過輾筒压延后再經磨擦加工，可获得最高的反射率。鋁制品經酸洗后，反射

率可更增高。通常为了获得铝之反射性，多将铝品在2.5%之浓硝酸及5%之氟氢酸溶液内浸约1—2%分钟，可获得银白色的表面。



第3图 波长与反射率之关系

铝之电阻率

铝在导电材料制造工业中应用甚广，因此电阻率在一切物理性质中占有重要地位。铝之电阻率，与其他金属一样，含杂质愈多则愈高。第9表内之数字为高纯度铝电气性能摘要。

纯度在99.968%之电解精炼铝的线制品，在20°C温度时，曾被测定其电阻率如下：硬拉制品为2.688毫欧/公分² 退火软制品为2.674毫欧/公分²，其时之密度为2.698，电阻之温度系数为每摄氏1度硬拉线0.00421，退火软线0.00423。

不仅杂质对铝之传导性有影响，即金属之机械加工处理及热处理对导电性都有影响。通常铝之杂质为铁，砷，及铜；每种杂质对电导性之影响均不同，而杂质在金属所成之状态尤其可使导电性发生变化。一般言之，在固溶体状态中，杂质对导电性之影响最大。在300°C温度时，约有0.1%之砷元素可溶解，约有0.7%之铜元素成为CuAl₂化合物而溶解。铁与铝及砷之化合物均难溶解，而当温度增加时，砷及铜之溶解度均增大。加热温度愈