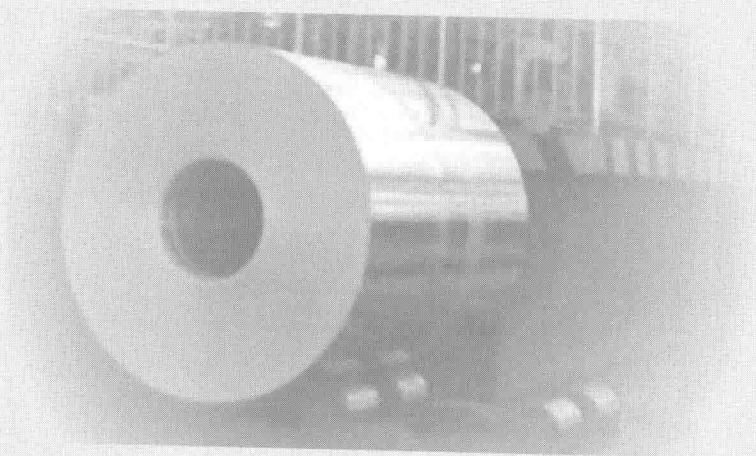


上 篇



1 绪 言

1.1 铝箔分类

铝箔 (aluminum foil) 一般是指厚度小于 0.2mm、断面为长方形的铝轧制产品。但不同国家的厚度划分也有所不同, 如表 1-1 所示, 低于厚度界限的铝箔也越来越多。

表 1-1 不同国家铝箔的厚度界限

国别	厚度/mm	标 准	国别	厚度/mm	标 准
中国	0.006 ~ 0.2	GB 3198—1982	日本	0.007 ~ 0.2	JIS H 4160: 74
美国	0.0064 ~ 0.15	ASTM B479: 73	前苏联	0.005 ~ 0.2	ГОСТ618: 72
法国	0.004 ~ 0.2	NF A 50—171: 1981	德国	0.007 ~ 0.02	DIN 1784

其实, 铝箔的分类有多种方法, 常见的有: 按铝箔的厚度、形状、状态或材质都可以进行分类。

1.1.1 铝箔按厚度分类法

铝箔按厚度差异可分为厚箔、单零铝箔、双零铝箔。

(1) 厚箔 (heavy gauge foil): 厚度为 0.1 ~ 0.2mm 的铝箔;

(2) 单零铝箔 (medium gauge foil): 厚度为 0.01mm 至小于 0.1mm 的铝箔;

(3) 双零铝箔 (light gauge foil): 所谓双零铝箔, 就是在其厚度以毫米 (mm) 为计量单位时小数点后有两个零的铝箔, 通常为厚度小于 0.0075mm 的铝箔。在国外, 有时把厚度小于或等于 40 μ m 的铝箔称为 light gauge foil, 而把厚度大于 40 μ m 的铝箔统称为 heavy gauge foil。

1.1.2 铝箔按形状分类法

铝箔按形状可分为卷状铝箔和片状铝箔, 铝箔深加工毛料大多数呈卷状供应, 只有少数手工业包装场合才用片状铝箔。

1.1.3 铝箔按组织状态分类法

铝箔按状态可分为硬质箔、半硬箔和软质箔。

(1) 硬质箔：轧制后未经软化处理，即未进行成品退火的铝箔。因为不经脱脂处理时，表面上有残油。所以硬质箔在印刷、贴合及涂层之前必须进行脱脂处理，而如果用于成型加工则可以直接应用；

(2) 半硬箔：是指铝箔的硬度（或强度）在硬质箔和软质箔之间，常用于成型加工；

(3) 软质箔：轧制后经过充分退火而变软的铝箔，其材质柔软，表面没有残油。目前大多数铝箔应用领域，如包装、复合、电工材料等都使用软质箔。

1.1.4 铝箔按表面状态分类法

铝箔按表面状态可分为一面光铝箔和两面光铝箔。

(1) 一面光铝箔：双合轧制的铝箔，分卷后一面光亮，一面发乌，这样的铝箔称为一面光铝箔。由于采用双合轧制，其厚度一般不超过 0.025mm；

(2) 两面光铝箔：单张轧制的铝箔，是由于两面都与轧辊接触而两面光滑。这种铝箔的两面因轧辊表面粗糙度不同又可以分为镜面二面光铝箔和普通二面光铝箔。由于单张轧制，一般厚度不小于 0.01mm。

1.1.5 铝箔按加工状态分类法

铝箔按加工状态可分为素箔、压花箔、复合箔、涂层箔、上色铝箔和印刷铝箔。

(1) 素箔：轧制后不经任何其他深加工的铝箔，又称为光箔；

(2) 压花箔：表面压有各种花纹的铝箔；

(3) 复合箔：把铝箔和纸、塑料薄膜、纸板等贴合在一起而形成的复合铝箔；

(4) 涂层箔：表面上涂有各类树脂或漆的铝箔；

(5) 上色铝箔：表面上涂有单一颜色的铝箔；

(6) 印刷铝箔：通过印刷在表面上形成各种花纹、图案、文字或画面的铝箔，可以是一种颜色，目前最多的可以达到 12 种颜色。

1.2 铝箔材料成分

1.2.1 铝箔材料的合金体系和化学成分

铝箔材料和合金体系包括 1×××系、2×××系、3×××系、5×××系、8×××系等合金。目前，铝箔产品的绝大部分是用工业纯铝制成的，如空调散热片用铝箔、精制铝箔，以及用于卷烟、食品、医药及电缆等领域的工业用纯铝箔。而电解电容阳极箔则通常用纯度大于 99.9% 的高纯铝制成，其余为铝合金铝

箔，主要用3×××系、8×××系、5×××系及少量2×××系和4×××系合金制成。但一般仅限于厚度不少于0.018mm的单张轧制铝箔，主要用于电声器件、蜂窝结构、电暖及装饰等行业。表1-2为常用铝箔材料的合金体系和化学成分；表1-3为不同国家电解电容器铝箔的化学成分。

表1-2 常用铝箔材料的合金体系和化学成分（质量分数/%）

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其他	Al	备注
1A99	0.003	0.003	0.005	—	—	—	—	—	—	99.99	LG5
1A97	0.015	0.015	0.005	—	—	—	—	—	—	99.97	LG4
1A93	0.040	0.040	0.010	—	—	—	—	—	—	99.93	LG3
1199	0.006	0.006	0.006	0.002	0.006	—	0.006	0.002	V 0.005	99.99	—
1188	0.06	0.06	0.005	0.01	0.01	—	0.03	0.01	V 0.05	99.88	—
1350	0.10	0.40	0.05	0.01	—	0.01	0.05	V + Ti 0.02	Ca 0.03 B 0.05	99.50	—
1145	Si + Fe	0.55	0.05	0.05	0.05	—	0.05	0.03	V 0.05	99.45	—
1235	Si + Fe	0.065	0.05	0.05	0.05	—	0.10	0.06	V 0.05	99.35	—
1120	0.10	0.40	0.05 ~ 0.20	0.01	0.20	0.01	0.05	0.02	—	99.20	—
1100	Si + Fe	0.95	0.05 ~ 0.20	0.20	—	—	0.10	—	—	99.00	—
1200	Si + Fe	1.00	0.05	0.05	—	—	0.10	0.05	—	99.00	—
2A11	0.7	0.7	3.8 ~ 4.8	0.4 ~ 0.8	0.4 ~ 0.8	—	0.10	0.15	—	—	LY11
2A12	0.5	0.5	3.8 ~ 4.9	0.3 ~ 0.9	1.2 ~ 1.8	0.10	0.25	0.15	—	—	—
2A70	0.35	0.9 ~ 1.5	1.9 ~ 2.5	0.20	1.4 ~ 1.8	—	0.30	0.02 ~ 0.10	Ni 0.9 ~ 1.5	—	—
2024	0.50	0.50	3.8 ~ 4.9	0.30 ~ 0.9	1.2 ~ 1.8	0.10	0.25	0.15	—	—	—
3A21	0.6	0.7	0.20	1.0 ~ 1.6	0.05	—	0.10	0.15	—	—	LF21
3003	0.6	0.7	0.05 ~ 0.20	1.0 ~ 1.5	—	—	0.10	—	—	—	—
4A13	6.8 ~ 8.2	0.50	Ca 0.1	0.50	0.05	—	—	0.15	—	—	—
5A02	0.40	0.40	0.10	0.15 ~ 0.40	2.0 ~ 2.8	0.15 ~ 0.40	—	0.15	Si + Fe 0.6	—	LF2

续表 1-2

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其他	Al	备注
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2 ~ 2.8	0.15 ~ 0.35	0.10				
5082	0.20	0.35	0.15	0.15	4.0 ~ 5.0	0.15	0.25	0.10			
5083	0.40	0.40	0.10	0.40 ~ 1.0	4.0 ~ 4.9	0.10	0.25	0.15			LF4
5086	0.40	0.50	0.10	0.20 ~ 0.70	3.5 ~ 4.5	0.05 ~ 0.25	0.25	0.15			
5182	0.20	0.35	0.15	0.20 ~ 0.50	4.0 ~ 5.0	0.10	0.25	0.10			
8006	0.40	1.2 ~ 2.0	0.30	0.30 ~ 1.0	0.10		0.10				
8011	0.50 ~ 0.90	0.60 ~ 1.0	0.10	0.20	0.05	0.05	0.10	0.08			
8079	0.05 ~ 0.30	0.7 ~ 1.3					0.10				

表 1-3 不同国家部分电解电容器铝箔的化学成分

序号	国别	$w(\text{Al})/\%$	化学成分及含量/ 10^{-6}												
			Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Ni	Cr	Ca	P	B	其他
1	前苏联	99.995	15	15	10	—	—	10	10	—	—	—	—	—	—
2	日本	99.994	7	10	33	1	0.5	0.65	10	—	—	0.03	—	—	—
3	日本	99.993	8	8	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	日本	99.99	11	10	57	1	1	1	1	—	—	1	1	—	—
5	日本	99.99	51	40	18	2	0.5	35	2	—	—	19	—	—	—
6	日本	99.99	20 ~ 60	20 ~ 60	10 ~ 50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40
7	美国	99.99	27	20	41	3	1	1	1	—	—	2	0.5	—	—
8	法国	99.99	7 ~ 12	10 ~ 30	7 ~ 50					5	2	—	—	5	—
9	中国	99.99	30	25	50					—	—	—	—	—	—
10	中国	99.97	150	150	50					—	—	—	—	—	—

1.2.2 铝箔材料中的二元化合物

铝箔材料中形成的二元化合物主要包括 Al-Fe、Al-Mn、Al-Mg、Al-Zn、

Al-Cu、Al-Cr、Al-Ti 和 Al-Zr 等二元合金相，表 1-4 是部分二元化合物的汇总。

表 1-4 铝箔材料中的二元化合物及其晶体结构

二元体系	相的代号	相的表达式	相的晶体构造
Al-Cr	β	$\theta\text{-Al}_7\text{Cr}$	底心单斜
	γ	$\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$	复杂斜方
	ε_2	$\gamma\text{-Al}_9\text{Cr}_4$	复杂立方
	ε_3	$\gamma\text{-Al}_9\text{Cr}_4$	复杂立方
	ξ_1	Al_8Cr_5	复杂立方
	ξ_2	Al_8Cr_5 (低温)	菱形六面体
	η	$\text{AlCr} + 2$	体心立方
Al-Cu	β	$\beta\text{-AlCr}_3$	体心立方
	γ		面心立方
	γ_1		面心立方
	γ_2	Al_4Cu_9	立方
	χ		体心立方
	ε_1	Al_4Cu_9	尚未确定
	ε_2	Al_2Cu_3	尚未确定
	ξ_1		六方
	ξ_2		单斜
	η_1	AlCu (高温)	斜方
	η_2	AlCu (低温)	底心斜方
	θ	Al_2Cu	体心正方
Al-Fe	β_1	AlFe_3	面心立方
	β_2	AlFe	体心立方
	ε		复杂体心立方
	ξ	$\xi\text{-Al}_2\text{Fe}$	复杂菱形六面体
	η	$\eta\text{-Al}_5\text{Fe}_2$	底心斜方
	θ	$\theta\text{-Al}_3\text{Fe}$	底心单斜
		Al_9Fe_2	单斜
Al_6Fe		正交	
Al_mFe ($m = 4.0 \sim 4.4$)		体心立方	
Al-Mg	β	$\beta\text{-Al}_3\text{Mg}_2$	复杂面心立方
	β'	$\varepsilon\text{-Al}_{30}\text{Mg}_{23}$	复杂菱形六面体
	γ	$\gamma\text{-Al}_{12}\text{Mg}_{12}$	体心立方
	γ'		尚未确定

续表 1-4

二元体系	相的代号	相的表达式	相的晶体构造
Al-Mn	β	Al_6Mn	斜方
	γ	Al_4Mn	六方
	ε	$\phi\text{-Al}_{10}\text{Mn}_3$	六方
	ξ_1	Al_3Mn	斜方
	ξ_2	$\delta\text{-Al}_{11}\text{Mn}_4$	三斜或立方
	η_1	$\eta\text{-AlMn}$	六方
	η_2	Al_8Mn_5	体心菱形六面体
	θ	$\varepsilon\text{-AlMn}$	六方
Al-Ti	β	Al_3Ti	正方
	γ	AlTi	面心正方
	δ	AlTi_3	六方
Al-Zr	β	Al_3Zr	体心正方
	γ	Al_2Zr	六方
	δ	Al_3Zr_2	斜方
	ε	AlZr	斜方
	ξ	Al_3Zr_4	六方
	η	Al_2Zr_3	正方
	θ	Al_3Zr_5	正方
	L	AlZr_2	六方
	K	AlZr_3	面心立方

在铝箔材料中，最重要的二元化合物之一是 Al-Fe 相。随凝固条件的不同，铝箔材料中可能出现多种二元 Al-Fe 相，如 Al_3Fe 、 Al_6Fe 、 Al_mFe ($m = 4.0 \sim 4.4$)、 Al_xFe (x 接近 5.8) 等。 Al_3Fe 是二元 Al-Fe 相中唯一的平衡相（通常记为 θ ），其余为非平衡相。在铸锭均匀化过程中，非平衡相将转变为平衡相 Al_3Fe （相关内容见后面的均匀化退火章节）。

Al_3Fe 属单斜晶系，单位晶胞中有 100 个原子。 Al_3Fe 颗粒中经常出现孪晶和堆垛层错。一般认为， Al_3Fe 在小于 1K/s 的冷却速度下形成。当冷速增大时，将会生成 Al_6Fe 亚稳相。 Al_6Fe 属正交晶系，单位晶胞中有 28 个原子。冷速大于 10K/s 时，将会形成 Al_mFe 相， m 值为 4.0 ~ 4.4。但 Skjerpe 在对含 $w(\text{Fe}) = 0.25\%$ 、 $w(\text{Si}) = 0.13\%$ 的 Al 合金的研究中，当冷速低至 1K/s 时，亦发现了 Al_mFe 的存在。由此他推断 Al_mFe 可以在较宽的冷速范围内出现。 Al_m 为体心立方，单位晶胞中有 110 ~ 118 个原子。

Westengen 在含 $w(\text{Fe}) = 0.25\%$ 、 $w(\text{Si}) = 0.13\%$ 的 Al 合金的铸锭组织中又发现了另一种 Al/Fe 比的新相-Al₂Fe, 它的电子衍射花样非常不规则, 因此 Westengen 没有给出其晶格常数。他测定的 x 接近 5.8。此外, Skjerpe 也观察到了这种相, 而他测得的 x 值接近 5.7。

Simensen 在薄带铸造含 $w(\text{Fe}) = 0.5\%$ 、 $w(\text{Si}) = 0.2\%$ 的 Al 合金中观察到 Fe₂Fe₉ 共晶化合物其为单斜晶系, $a = 0.89\text{nm}$, $b = 0.635\text{nm}$, $c = 0.632\text{nm}$, $\beta \approx 93.4^\circ$ 。该相的化学式计量式是通过 EDX 测量得到的, 该相生成的凝固条件至今尚不清楚。

另外, Ping 等在直接水冷含 $w(\text{Fe}) = 0.25\% \sim 0.50\%$ 、 $w(\text{Si}) = 0.125\%$ 的 Al 合金中, 观察到了一种新的 Al-Fe 中间化合物生成并将之表达为 Al_pFe, 其中 $p \approx 4.5$, 为体心立方。 $a = 1.03\text{nm}$ 。

Al₆Fe、Al_mFe 与三元立方 α 相相似, 具有不规则、弯曲的形状, 生长速度较快; 而 Al₃Fe 与 β 相相似, 以侧面或平面方式生长, 故生长速度很慢。

1.2.3 铝箔材料中的多元化合物

1.2.3.1 1×××系及 8×××系合金中的多元化合物

1×××系合金的纯度大于 99.0% (质量), 其中 Si、Fe 为主要合金元素; 8×××系合金成分为 Al-Fe-X, 其中 $w(\text{Fe} + \text{X}) > 1.0\%$ 。对铝箔用合金, X 主要是 Si 元素, 并且可能含有比 1×××系合金元素较高含量的 Mn、Cu 等合金元素, 主要合金牌号有 8111、8079。

由于形态上的明显差别, 人们最早发现了两种 Al-Fe-Si 相, 被记为 α 相和 β 相。前者具有明显的汉字外形, 后者则呈长针状或盘片状。 α 相中 Si 含量较低, $w(\text{Fe/Si})/\%$ 比为 5.5~2.75; β 相中 Si 含量较高, $w(\text{Fe/Si})/\%$ 比为 2.25~1.6。目前, α 相的化学计量式通常被表达为 Fe₂SiAl₈、Fe₃Si₂Al₁₂、Fe₅Si₂Al₂₀, 成分组成范围为 $w(\text{Fe}) = 30\% \sim 33\%$ 、 $w(\text{Si}) = 6\% \sim 12\%$; β 相的化学计量式通常被表达为 Fe₂Si₂Al₉、FeSiAl₅, 成分组成范围为 $w(\text{Fe}) = 25\% \sim 30\%$ 、 $w(\text{Si}) = 12\% \sim 15\%$ 。

在平衡态的 Al-Fe-Si 系中, α 相被认为具有六方晶格结构, 晶格常数 $a = 1.23\text{nm}$, $c = 2.63\text{nm}$ 。文献中, 立方相被表达为 α' 或 α_2 。在实际合金相中也存在着具有立方晶系的 α 相, 其单位晶胞里有 138 个原子, 晶格常数 $a = 1.256\text{nm}$ 。文献中常用的表达式为 α 或 α_1 。立方 α 相并不是热力学稳定相, 但是可以被工业纯铝中少量存在的过渡族元素如 Mn、Ni、Cu、Cr、V、Mo、W 等所稳定。这一观点已被多位学者所接受并证实。在 0.75K/min 的冷却速度下, $w(\text{Mn}) = 0.1\%$ 即可使立方 α 相稳定。由于工业纯铝合金中普遍存在上述少量微量元素, 因此立方 α 相成为工业纯铝合金中最为常见的 α 相。快冷条件下有利于立方 α 相的生成。实际上, 快冷和稳定性元素对立方 α 相生成的促进作用很难区分开。

Westengen 在对 AA1050 合金 [$w(\text{Fe}) = 0.25\%$ 、 $w(\text{Si}) = 0.13\%$] DC 铸锭均匀化前后相的形成和转变的研究工作中, 又发现一新的 α 相, Westengen 将之表达为 α'' 相。Westengen 的研究表明, α'' 相属于正方相系, 晶格结构与立方 α 相很接近, 晶格常数 $a = 1.26\text{nm}$, $c = 3.72\text{nm}$, 其长轴是立方 α 相的 3 倍, Westengen 认为这表明 3 个立方 α 相的单位晶胞组成一个 α'' 相的单位晶胞。而且他还指出, α'' 具有比 α 相更低的 Si 含量。

1.2.3.2 $2 \times \times \times$ 系合金中的多元化合物

$2 \times \times \times$ 系合金中, Cu、Mg 是主要的合金元素。在 2024、2A11 等合金中, Mn 也是主要的合金元素之一。我国现行的 Al-Cu-Mg 系硬合金中, $w(\text{Cu}) = 2.2\% \sim 5\%$, 一般含 4% 左右。Mg 含量范围较大, $w(\text{Mg}) = 0.15\% \sim 2.6\%$, 合金中相组成主要取决于 Mg 的含量 (质量分数) 2A10、2A01、2A13、2B11 和 2A11 合金含 Mg 量小于 0.8%, Mg 除溶入 $\alpha(\text{Al})$ 外, 剩余的 Mg 优先与 Si 生成 Mg_2Si 相, 很少有过剩 Mg 生成 S 相。因此这些合金中, 主要是 $\alpha(\text{Al}) + \theta$ 两相共相体, 即使出现 S 相, 数据也较少。中等含 Mg 量的 2B12、2A12 合金 [$w(\text{Mg}) = 1.2\% \sim 1.8\%$] 组织为 $\alpha(\text{Al}) + \theta + \text{S}$ 三相共晶体, 并且随含 Mg 量的增加而增加, 共晶体中的 S 相增多。高含 Mg 量的 2A06、2A04 和 2A02 合金 [$w(\text{Mg}) = 1.7\% \sim 2.6\%$] 的铸态组织中不含有 θ 相, 只有 $\alpha + \text{S}$ 两相共晶体。

在 Al-Cu-Mg 系合金中除 Cu、Mg 等主要合金元素外, 还有 Mn 和 Ti 等少量添加元素以及 Fe、Si 杂质元素。Fe、Si 分别和主要合金元素形成 Mg_2Si 和 $\text{N}(\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe})$ 相, Ti 由于加量较少, 一般见不到含 Ti 相, 2A13 和 2A01 合金中不含或只含很少量 Mn, 合金组织中, 不出现含 Mn 相, Fe、Si 杂质可能形成 $\alpha(\text{Al}_{12}\text{FeSi})$ 相。其他合金系均含有 0.3%~1.0% Mn, 合金组织中出现 $(\text{MnFe})_3\text{SiAl}_{12}$ 相, 偶尔还可能出现 $(\text{FeMn})\text{Al}_3$ 或 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 相。杂质 Fe 和 Si 在 Al-Cu-Mn 系合金中有时还可能形成 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 相。

工业上主要生产的 Al-Cu-Mn 系合金有 2A16 和 2A12, 2A16 合金中半连续铸造时主要组成相为 $\alpha(\text{Al}) + \theta$ 共晶体, 其次是 $\text{N}(\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe})$ 和 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 相, 还可能有 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 相。该合金同时含有 Ti、Zr, 当两者含量为上限时, 可能出现含 Zr 或 Ti 的化合物初晶。2A17 合金含 0.20%~0.45% Mg, 合金铸造组织中, 除有 θ 、 $\text{N}(\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe})$ 和 $(\text{FeMn})_3\text{SiAl}_{12}$ 相外, 还有 Mg_2Si 以及少量 S 相, 有时也可能出现 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 相。但是由于 2A17 合金中只加入 Ti, 而且加入量在 0.2% 以下, 一般不会出现 TiAl_2 化合物初晶体。

属于 Al-Cu-Mg-Fe-Ni-Si 系的合金有 2A70、2A80、2A90 和 2A11。2A70 合金 Mg 含量较高, 只有 S 不生成 θ 相。Fe:Ni = 1:1, 组织中现出大量 $(\text{FeNi})\text{Al}_9$ 相, 只有当 Fe 或 Ni 稍有剩余时才有可能生成少量 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 或 $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ 相。2A70 合金中不加 Si, 杂质 Si 可能和 Mg 形成少量 Mg_2Si 相。2A80 合金中 Cu、

Mg、Fe 和 Ni 含量与 2A70 合金相同。所不同的是 2A80 合金中加入 0.5%~1.2% Si, 因而组织中出现了较多的 Mg_2Si 相, 还可能生成 W 相。2A90 合金 Mg 含量较少, Cu 含量较多, 组织中 θ 和 S 相同时存在。合金中 Ni 超过 Fe 一倍时, 合金组织中除生成 $(FeNi)Al_9$ 相外, 还出现一定时 Al_6Cu_3Ni 相。该合金中加入 0.5%~1.0% 的 Si, 合金组织中出现 Mg_2Si 相, 有时生成少量 $\alpha(Fe_3SiAl_{12})$ 相。2A11 合金中 Si 大于 12% 时, 生成 $\alpha(Al) + Si$ 共晶体和少量 Si 的初晶。当 Mg 大于 0.2% 时生成 Mg_2Si 相, Fe 含量大于 0.05% 时生成 $\beta(Al_5FeSi)$ 。2A11 合金中还含有近似 1:1 的 Cu 和 Mg 及 Fe 和 Ni, 合金组织中全出现 S 及 $(FeNi)Al_9$ 相, 不会出现 W 相。2A11 合金半连续铸造时的组成是 $\alpha(Al)$ 、Si ($\alpha + Si$ 为共晶体)、S $(FeNi)Al_9$ 、 Mg_2Si 和 $\beta(Al_5FeSi)$, 当 Si 含量为上限时, 还会出现少量初晶 Si。

1.2.3.3 $3 \times \times \times$ 系合金中的多元化合物

$3 \times \times \times$ 系合金的主要合金元素是 Mn。该系合金中的 Mn 含量在 1.0%~1.6%。Fe、Si 是主要杂质元素。Fe、Si 元素含量为对合金相和显微组织有很大影响, 必须严格控制其含量。可以认为 $3 \times \times \times$ 系合金是 Al-Mn-Fe-Si 基金属。

$3 \times \times \times$ 系合金的铸态组织除基体 $\alpha(Al)$ 外, 在枝晶间存在粗大富 Fe 共晶体化合物, 化合物有两种类型: 正交 $Al_6(FeMn)$ 和立方 $Al_{12}(FeMn)_3Si$, 其相对数量取决于合金成分以及冷却速度。半连续铸造的冷速有利于 $Al_6(FeMn)$ 相的生成, 在双辊铸造较高的冷速下 $Al_{12}(FeMn)_3Si$ 为主要共晶体。在铸造快速冷却过程中, Mn 以过饱和的形式存在于铝基体中。在典型铸态 3003 合金中, 约有 0.7%~0.9% 的 Mn 在铝基体中。在铸锭加热过程中, $Al_{12}(FeMn)_3Si$ 和 $Al_6(FeMn)$ (当 $w(Si) < 0.07\%$ 时) 在富 Mn 的枝晶间以细小颗粒状弥散析出。Mn 在 Al 中的扩散很慢。Fe、Si 对 Mn 的析出动力学有显著影响。Si 加速 Mn 的析出, Fe 降低 Mn 在 Al 中的固溶度因而也加快 Mn 的析出速度。这些细小颗粒的尺寸、分布对再结晶过程有很大影响。必须选择合适的铸造均匀化工艺, 控制析出相的尺寸和分布, 从而有效控制板材再结晶后合金的晶粒度。

1.2.3.4 $5 \times \times \times$ 系合金中的多元化合物

Mg 是 $5 \times \times \times$ 系合金中的主要合金元素。Mg 在铝中溶解度很大, 在共晶温度 451℃ 时 Mg 的溶解度高达 $w(Mg) = 14.9\%$, 随着温度降低, 溶解度很快下降, 在室温时 $w(Mg)$ 约为 1.7%。但是含 Mg 的过饱和固溶体分解速度非常慢, 通常的商用 $5 \times \times \times$ 系合金不需特别的淬火处理 Mg 即能基本上全部固溶在铝中。

商用 $5 \times \times \times$ 系合金的 $w(Mg) = 0.5\% \sim 6.0\%$, 可能存在的相随具体成分的不同而不同。由于 Mg_2Si 在铝中的固溶度极小, Mg_2Si 是该系合金中的主要存在相。 $5 \times \times \times$ 系合金中通常含有一定量的 Mn, Mn 可以提高合金强度和耐蚀性,

但是当 Mn 含量过高时,会使合金塑性明显降低,尤其是在有微量 Na 存在的情况下,热轧时会产生 Na 脆。因此合金中的 Mn 含量均小于 1%。Mn 以及杂质元素 Fe、Si 的存在使合金中形成含 Fe、Mn、Si 的相,如 $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Si}$ 。因此在铸锭均匀化加热过程中, Mn 倾向于以 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 化合物,而不是 $\text{Al}_{12}(\text{FeMn})_3\text{Si}$ 化合物的形式析出。 $5 \times \times \times$ 系合金中的 Mg 通常处于过饱和状态,这种过饱和固溶体在室温下相当稳定。如果将合金进行一定的变形加工并在一定温度下加热,则固溶体中将析出 $\beta(\text{Al}_8\text{Mg}_5)$ (即 Al_8Mg_5) 平衡相或 $\beta'(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$ 亚稳相。在较低温度下, β' 相相当稳定,较长时间的时效也不会发生向平衡 β 相的转变。 β 相或 β' 相的时效强化效果不大,而且易于沿晶界或剪切带析出,恶化合金的抗腐蚀性能。在 $5 \times \times \times$ 系合金中添加微量 Cr 可以提高合金的耐蚀性, Cr 在铝中的溶解度极小,在含有 Cr、Mn 的合金中,在铸造和铸锭均匀化加热过程中还会形成 Al、Mn、Cr 三元相。在压力加工的板材产品中, Cr 经常以细小分散的 $\text{E}(\text{Al}_{12}\text{Mg}_2\text{Cr})$ 相存在,能抵制晶核形成和晶粒长大。

1.3 铝箔的性能

1.3.1 铝箔的防潮性能

铝箔具有良好的防潮性能,虽然当铝箔厚度小于 0.025mm 时不可避免地会出现针孔,但是具有针孔的铝箔的防潮性能比没有针孔的塑料薄膜的要强得多。这是因为塑料的高分子链相互间距较大,不能防止水气渗透。不同厚度的铝箔和塑料薄膜的透湿度见表 1-5。

表 1-5 铝箔和塑料薄膜的透湿度

材料种类	透湿度/ $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot 24\text{h})^{-1}$	材料种类	透湿度/ $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot 24\text{h})^{-1}$
0.009mm 素箔	1.08 ~ 10.70	0.09mm 聚乙烯	7
0.013mm 素箔	0.60 ~ 4.80	0.01mm 聚乙烯	4.8
0.018mm 素箔	0 ~ 1.24	0.02mm 聚氯乙烯	157
0.025mm 素箔	0 ~ 0.46	0.065mm 聚氯乙烯	28.4
0.03 ~ 0.15mm	0	0.095mm 聚氯乙烯	41.2
素箔玻璃纸	50 ~ 70		

铝箔厚度小到一定的程度不可避免地要出现针孔,出现针孔的最小厚度,一般认为是 0.038mm。由于轧制技术和材质的提高,这一厚度已降低到 0.025mm。通过试验还证明透气孔直径是临界的。当直径小于 $5\mu\text{m}$ 时,在可测量到的范围不传递氧气和水蒸气。

1.3.2 铝箔的绝热性能

铝箔是良好的绝热材料，它的绝热性能可以表现在它的两面热辐射性能上。铝是一种温度辐射性能极差而对太阳光反射能力很强的金属材料。铝箔对辐射能的吸收和发射率特别小。这是由于铝箔的发射率与吸收率十分相近，因此在热功计算时把铝箔视为灰体。

铝箔的发射率仅取决于它的表面状态，与厚度无关，不同表面状态的铝箔的发射率差异是很大的。当表面状态从粗糙变为光平时，发射率从 0.3 变为 0.08。

铝箔表面允许的最高温度是 350℃，在最高温度下它的表面将变黑，推动绝热性能。

铝的纯度对铝箔的反射率有明显影响。铝箔中有杂质时，会发生杂质散射而使其辐射吸收增加。要获得高的反射率的铝箔，纯度应不小于 99.6%。由于铝箔轧辊表面光洁度不同，铝箔的光反射率也有所不同。当铝箔表面比较粗糙时，反射率受照射光线波长的影响明显，总的趋势是随波长的增加，反射率提高。当光线波长为 650μm 时，反射率最高。但是，一面光的铝箔，暗面的反射率随着光线的波长的增加反而降低。

1.3.3 铝箔的热学性能

1×××系、3×××系和5×××系铝箔材料的典型热学性能，如表 1-6 ~ 表 1-8 所示。

表 1-6 1×××系合金的热学性能

合金	液相线温度/℃	固相线温度/℃	线膨胀系数		体膨胀系数 /m ³ · (m ³ ·K) ⁻¹	比热容 /J·(kg·K) ⁻¹	热导率 /W·(m·K) ⁻¹	
			温度/℃	平均值/μm· (m·K) ⁻¹			0 状态	H18 状态
1050	657	646	-50~20	21.8	68.1×10 ⁻⁶ (20℃)	900 (20℃)	231 (20℃)	—
			20~100	23.6				
			20~200	24.5				
			20~300	25.5				
1060	657	646	-50~20	21.8	68×10 ⁻⁶ (20℃)	900 (20℃)	234 (25℃)	—
			20~100	23.6				
			20~200	24.5				
			20~300	25.5				
1100	657	643	-50~20	21.8	68×10 ⁻⁶ (20℃)	904 (20℃)	222 (20℃)	218 (20℃)
			20~100	23.6				
			20~200	24.5				
			20~300	25.5				

续表 1-6

合金	液相线 温度/℃	固相线 温度/℃	线膨胀系数		体膨胀系数 /m ³ · (m ³ ·K) ⁻¹	比热容 /J·(kg·K) ⁻¹	热导率 /W·(m·K) ⁻¹	
			温度/℃	平均值/μm· (m·K) ⁻¹			O 状态	H18 状态
1145	657	646	-50~20	21.8	68 × 10 ⁻⁶ (20℃)	904 (20℃)	230 (20℃)	227 (20℃)
			20~100	23.6				
			20~200	24.5				
			20~300	25.5				
1199	660	646	-50~20	21.8	—	900 (20℃)	243 (20℃)	—
			20~100	23.6				
			20~200	24.5				
			20~300	25.5				

表 1-7 3 × × × 系合金的热学性能

合金	液相线 温度/℃	固相线 温度/℃	线膨胀系数		体膨胀系数 /m ³ · (m ³ ·K) ⁻¹	比热容 /J·(kg·K) ⁻¹	热导率 /W·(m·K) ⁻¹	
			温度/℃	平均值/μm· (m·K) ⁻¹			O 状态	H1 × 状态
3003	654	643	-50~20	21.5	67 × 10 ⁻⁶ (20℃)	893 (20℃)	193 (20℃)	H12:163 H14:159 H18:155 (20℃)
			20~100	23.2				
			20~200	24.1				
			20~300	25.1				
3004	654	629	-50~20	21.5	67 × 10 ⁻⁶ (20℃)	893 (20℃)	162 (20℃)	—
			20~100	23.2				
			20~200	24.1				
			20~300	25.1				
3A21	654	643	-50~20	21.6	—	1092 (100℃)	181 (25℃)	H14:164 H18:156 (25℃) H18:189 (400℃)
			20~100	23.2		1176 (200℃)		
			20~200	24.3		1302 (300℃)		
			20~300	25.0		1302 (400℃)		

表 1-8 5 × × × 系合金的热学性能

合金	液相线 温度/℃	固相线 温度/℃	线膨胀系数		体膨胀系数 /m ³ · (m ³ ·K) ⁻¹	比热容 /J·(kg·K) ⁻¹	热导率 /W·(m·K) ⁻¹	
			温度/℃	平均值/μm· (m·K) ⁻¹			O 状态	H18 状态
5052	649	607	-50~20	22.1	69 × 10 ⁻⁶ (20℃)	—	—	—
			20~100	23.8				
			20~200	24.8				
			20~300	25.7				

续表 1-8

合金	液相线 温度/℃	固相线 温度/℃	线膨胀系数		体膨胀系数 /m ³ · (m ³ ·K) ⁻¹	比热容 /J·(kg·K) ⁻¹	热导率 /W·(m·K) ⁻¹	
			温度/℃	平均值/ $\mu\text{m}\cdot$ (m·K) ⁻¹			O 状态	H18 状态
5056	638	568	-50~20	22.5	70×10 ⁻⁶ (20℃)	904 (20℃)	120 (20℃)	112 (20℃)
			20~100	24.1				
			20~200	25.2				
			20~300	26.1				
5083	638	574	-50~20	22.3	70×10 ⁻⁶ (20℃)	900 (20℃)	120 (20℃)	—
			20~100	24.2				
			20~200	25.0				
			20~300	26.0				
5A02	650	620	-50~20	22.2	—	947 (20℃)	156 (20℃)	—
			20~100	23.8				
			20~200	24.9				
			20~300	25.8				

1.3.4 铝箔的电学性能

铝是仅次于金、银、铜的电的良导体，铝的体积电导率为 57%~62% IACS，但当把铝箔绕成线圈或绕组时，因表面积增大，所以铝箔的电导率可达到 60%~80%。1×××系、3×××系和 5×××系铝箔材料的电学性能如表 1-9~表 1-11 所示。

表 1-9 1×××系合金的电学性能

合金	20℃ 体积电导率 /% IACS		20℃ 电阻率 /nΩ·m		20℃ 电阻温度系数 /nΩ·m·K ⁻¹		电极电位 /V ^①
	O 状态	H18 状态	O 状态	H18 状态	O 状态	H18 状态	
1050	61.3	—	28.1	—	0.1	—	—
1060	62	61	27.8	28.3	0.1	0.1	-0.84
1100	59	57	29.2	30.2	0.1	0.1	-0.83
1145	61	60	28.3	28.7	0.1	0.1	—
1199	64.5	—	26.7	—	0.1	—	—

① 测定条件：25℃ 在 NaCl 53g/L + H₂O₂ 3g/L 溶液中，以 0.1N 甘汞电极作为标准电极。

表 1-10 3×××系合金的电学性能

合金	20℃ 电导率		20℃ 电阻率		20℃ 时各种状态的 电阻温度系数 /nΩ·m·K ⁻¹	电极电位/V ^①
	状态	% IACS	状态	nΩ·m		
3003	O	50	O	34	— 0.1	3003 合金及包铝合金 芯层：-0.83；7072 合 金包铝层：-0.96
	H12	42	H12	41		
	H14	41	H14	42		
	H18	40	H18	43		

续表 1-10

合金	20℃电导率		20℃电阻率		20℃时各种状态的 电阻温度系数 $/n\Omega \cdot m \cdot K^{-1}$	电极电位/ $V^{①}$
	状态	/% IACS	状态	$/n\Omega \cdot m$		
3004	O	42	O	41	0.1	未包铝的及包铝合金 芯层: -0.84; 7072 合金 包铝层: -0.96, -0.85
3A21	O	50		34	0.1	
	H14	41				
	H18	40				

① 测定条件: 25℃在 NaCl 53g/L + H₂O₂3g/L 溶液中, 以 0.1N 甘汞电极作为标准电极。

表 1-11 5 × × × 系合金的电学性能

合金	20℃体积电导率 $/\% \text{ IACS}$		20℃电阻率 $/n\Omega \cdot m$		20℃电阻温度系数 $/n\Omega \cdot m \cdot K^{-1}$		电极 电位 $/V^{①}$
	O 状态	H38 状态	O 状态	H38 状态	O 状态	H38 状态	
5052	35	35	49.3	49.3	0.1	0.1	-0.85
5056 ^②	29	27	59	64	0.1	0.1	-0.87
5083	29	29	59.5	59.5	0.1	0.1	-0.91
5A02	40	40	47.6	47.6	0.1	0.1	—

① 测定条件: 25℃在 NaCl 53g/L + H₂O₂3g/L 溶液中, 以 0.1N 甘汞电极作为标准电极;

② 含有包覆层的合金。

1.3.5 铝箔的针孔限制

铝箔表面允许有对光目测可见的针孔, 但在任意某一面积内, 针孔数不能超过规定的数量。医药包装用铝箔的针孔直径最大不得超过 0.3mm, 且不能超过 5 个/ m^2 。其他工业用铝箔针孔直径最大不得超过 0.3mm, 针孔的评级标准见表 1-12。

表 1-12 铝箔针孔数的评级标准

公称厚度 $/mm$	针孔数/个· m^{-2} (\leq)		
	A 级	B 级	C 级
0.0060	500	800	1500
>0.0060 ~ 0.0065	300	500	1000
>0.0065 ~ 0.0080	200	400	600
>0.0080 ~ 0.010	50	100	200
>0.010 ~ 0.020	10	20	30
>0.020 ~ 0.050	0	10	20
>0.050	0	0	0

1.3.6 铝箔的尺寸要求

铝箔局部厚度偏差应符合表 1-13 的规定，铝箔的平均厚度偏差应符合表 1-14 的规定，铝箔的宽度允许偏差应符合表 1-15 的规定。

表 1-13 铝箔局部厚度偏差

厚度/mm	厚度允许偏差/%	
	高精度	普通级
0.006 ~ 0.010	名义厚度的 ± 8	名义厚度的 ± 10
>0.010 ~ 0.100	名义厚度的 ± 6	名义厚度的 ± 8
>0.100 ~ 0.200	名义厚度的 ± 5	名义厚度的 ± 7

注：测量置信度为 90%。

表 1-14 铝箔平均厚度偏差

卷批量/t	平均厚度允许偏差/%	
	单张轧制铝箔	双张轧制铝箔
≤ 3	名义厚度的 ± 6	名义厚度的 ± 8
> 3 ~ 10	名义厚度的 ± 5	名义厚度的 ± 6
> 10	名义厚度的 ± 4	名义厚度的 ± 4

注：厚度单位为 mm。

表 1-15 铝箔平均厚度偏差

宽度/mm	宽度允许偏差/%
≤ 1000.0	± 1.0
> 1000.0	± 1.5

注：如同规定为单项偏差时，允许偏差为表中数值的两倍。

1.3.7 铝箔的力学性能

铝箔的力学性能一般是指抗拉强度、伸长率、破裂强度和撕裂强度。不同材料和不同状态下铝箔用材料的力学性能见表 1-16 ~ 表 1-28。我国在这方面也有国标规定。对于厚度小于 0.012mm 的软质铝箔，抗拉强度不到 50MPa，伸长率小于 3%，破裂强度不足 3N/cm² 时，用于机械化包装或高速开卷都很容易拉断，所以只适于手工包装。

表 1-16 部分 1 × × × 系合金的典型室温力学性能

合金	状态	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	硬度 (HB ^①)	抗剪强度/MPa	疲劳强度/MPa ^②
1050	O	28	76	39	—	62	—
	H14	103	110	10	—	69	—
	H16	124	131	8	—	76	—
	H18	145	159	7	—	83	—