

绪 论

0.1 铝加工产业总论

铝是工业生产中的重要原材料，铝及其合金广泛地应用于航空、机械制造、国防、交通、电器和无线电、原子能、化学、建材、食品和日用品工业等方面。铝加工产业包括氧化铝制备，原铝的电解生产，铝合金的熔炼与铸造，铝及铝合金板、带、条、箔材，管、棒、型、线材，锻件和模锻件，粉材及深加工产品的生产与经营。它是一个涉及面很广，对国防军工现代化、国民经济发展和人民生活水平提高有重大影响的行业，是一个技术含量和附加值很高的产业。发展铝加工产业不仅有巨大的社会效益，而且有明显的经济效益。

近年来，铝加工产业发展十分迅猛，成为很多国家和地区的支柱产业之一。世界铝及铝加工产业发展很快，已具有相当规模，中国已成为铝业大国，但还不是铝业强国，而且产品的比例仍不够协调，需要加大产业与产品结构调整。中国的年增长速度已经连续多年大大高于世界各国平均水平，在不久的将来很快会赶上世界先进水平。

0.2 氧化铝生产技术

氧化铝生产是铝产业生产的第一道工序，氧化铝是从铝矿石中提炼出来的，采用的生产方法很多，这些方法大致可归纳成三类：碱法、酸法、酸碱联合法。目前工业生产大都采用碱法从铝矿石中制取氧化铝，根据矿石中氧化铝转入铝酸钠溶液方法的不同，可分为烧结法、拜耳法和拜耳烧结联合法。

1887—1892 年奥地利化学家 K. J. 拜耳发明了生产氧化铝的拜耳法，用拜耳法处理高品位铝土矿，特别是处理三水铝石型矿石时，流程简单，作业方便，产品质量好，经济效果极佳。目前，全世界 90% 以上的氧化铝是用拜耳法生产的。

法国人勒·萨特里于 1858 年就提出了碳酸钠烧结法，烧结碳酸钠和铝土矿组成的炉料得到固体铝酸钠的熟料，将其用稀碱溶液溶出便可得到铝酸钠溶液，再往溶液中通入 CO_2 气体，促使铝酸钠分解析出氢氧化铝，氢氧化铝经脱水燃烧后便得产品氧化铝。

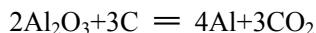
1880 年，米尤列尔提出了往碳酸钠、铝土矿炉料中添加石灰（石灰石）再进行烧结，把

碳酸钠烧结法发展为碱石灰烧结法的建议。加入石灰具有重大意义，由于它可以在很大程度上减弱 SiO_2 的危害，使 Al_2O_3 和 NaO 的损失大为减少，因而使烧结法对处理高硅铝土矿和各种铝硅酸盐有了实际应用价值。

尽管烧结法生产和拜耳法生产有区别，但都是利用化学反应的方法进行化工单元操作。所以归结到一点，氧化铝生产是利用化学反应的方法，通过各种类型的化工单元操作将铝矿石中的氧化铝提炼出来。

0.3 原铝电解生产技术

原铝的工业生产中一直采用冰晶石—氧化铝熔盐电解法。铝矿石在专门的氧化铝厂生产出高纯度的氧化铝作为电解生产原料。白色的氧化铝粉末熔点很高（2050℃），若采用直接熔化生产铝困难很多。但固体氧化铝可以部分地溶解在熔点较低的冰晶石熔融液体中形成均匀熔体，并且此熔体具有良好的导电性，这就可以使铝的电解生产在低于氧化铝熔点很多的情况下进行。铝电解的原理是使直流电通过以氧化铝为原料、冰晶石为溶剂组成的电解质，在 950 ~ 970℃ 下使电解质溶液中的氧化铝分解为铝和氧。可用下式表示：



由于比重的差别在阴极上析出的铝液汇集于电解槽槽底，而在阳极上析出二氧化碳和一氧化碳气体，铝液从电解槽中析出，经过净化去除氢气、非金属和金属杂质并澄清后，铸成各种铝锭。

0.4 铝合金熔铸生产技术

熔铸是变形铝加工的第一道工序，为轧制、锻造、挤压等生产提供合格的锭坯，铸锭质量的高低直接与各种铝材的最终质量密切相关。熔铸分为熔炼和铸造两个环节，熔炼的基本目的是熔炼出化学成分符合要求，并且获得纯洁度高的铝合金熔体，为铸造成各种形状的铸锭创造有利条件。铸造是将符合铸造要求的液体金属通过一系列浇注工具浇入具有一定形状的铸模中，冷却后得到一定形状和尺寸的铸锭的过程。要求所铸出的铸锭化学成分和组织均匀、内外质量好、尺寸符合技术标准。

合金材料的组织和性能，除了工艺条件的影响外，还要靠化学成分来保证。如果某一成分或杂质一旦超出标准，就要按废品处理，造成很大的损失。同时，在合金成分范围内对一些元素含量进行调整，可提高铸锭成形性，减少裂纹废品的产生，获得化学成分均匀并且符合要求、纯洁度高的铝合金熔体。

无论是冶炼厂供应的金属或回炉的废料，往往含有杂质、气体、氧化物或其他夹杂物，必须通过熔炼过程，借助物理或化学的精炼作用，排除这些杂质、气体、氧化物等来提高熔体金属的纯洁度。多年来，铝合金制品对铸锭的内部质量尤其是清洁度的要求不断提高，而熔体净

化是提高铝熔体纯洁度的主要手段。熔体净化可分为炉内处理和在线净化两种方式。

1. 炉内处理

炉内熔体处理主要有气体精炼、溶剂精炼和喷粉精炼等方式。炉内处理技术的发展较慢，国内只有 20 世纪 90 年代中期出现的喷粉精炼相对较新，其除气除渣效果较气体精炼和溶剂精炼稍好，但因精炼杆靠人工移动，精炼效果波动较大。

国外先进的炉内净化处理都采用了自动控制，较有代表性的有两种，一种是从炉顶或炉墙向炉内熔体中插入多根喷枪进行喷粉或气体精炼，但由于该技术存在喷枪易碎和密封困难的缺点并未广泛应用。另一种是在炉底均匀安装多个可更换的透气塞，由计算机控制精炼气流和精炼时间，该方法是比较有效的炉内处理方法。

2. 在线净化

炉内处理对铝合金熔体的净化效果是有限的，要进一步提高熔体纯洁度，尤其是进一步降低氢含量和去除非金属夹杂物，必须采用高效的在线净化技术。

(1) 在线除气

在线除气装置是各大铝熔铸厂重点研究和发展的对象，种类繁多，典型的有 MINT 等采用固定喷嘴的装置和 SNIF、Alpur 等采用旋转喷头的设备。我国从 20 世纪 80 年代末起不少厂家先后从国外购买了 MINT、SNIF、Alpur 等装置，此后，在引进装备的基础上，也自行开发了多种除气设备，这些除气设备都采用 N_2 或 Ar 作为精炼气体，能有效去除铝熔体中的氢。

(2) 熔体过滤

过滤是去除铝熔体中非金属夹杂物最有效和最可靠的手段，从原理上讲有滤饼过滤和深层过滤之分。过滤方式有多种，效果最好的有过滤管和泡沫陶瓷过滤板。床式过滤器体积大，安装和更换过滤介质费时费力，仅适用于大批量单一合金的生产，因而使用的厂家较少。在我国目前很少应用，其最新的进展是挪威科技大学等正研制的紧凑深床过滤器。该装置中，铝液向下流动，装置底部中央有一透气塞加入惰性气体，与透气塞上方的铝液上升管形成一个气体提升泵，可调节出口金属水平，目的是在提高过滤效率的同时，更有效地利用过滤球，此装置小巧紧凑，易于装填、清空和移动。刚玉管过滤器过滤效率高，但价格较昂贵、使用不方便，在日本使用较多。相反，泡沫陶瓷过滤板因使用方便、过滤效果好、价格低，在全世界广泛应用。

(3) 晶粒细化

众所周知，在铝液中加入晶粒细化剂，可以明显改善铸锭的组织，晶粒细化的方法有多种，使用最广泛的是二元合金 Al-Ti 和三元合金 Al-Ti-B，产品主要有 Al-4Ti 和 Al-5Ti-1B 块状或棒状细化剂，块状在调整好铝熔体成分后加入，而棒状在铸造流槽中加入，细化效果显著提高，产品有 Al-5Ti-1B、Al-5Ti-0.2B、Al-3Ti-1B、Al-6Ti 等，国内很多厂家在生产高质量产品时，一般采用进口的棒状细化剂。

20 世纪 90 年代以来，特别是 21 世纪初，国内熔铸技术得到了迅速的发展和提高，不断追求“提质（提高质量）、降耗（降低能耗）和减损（减少烧损）”，某些方面甚至达到了国际先进水平。但从整体上看，我国的熔铸技术水平同国际先进水平相比，还存在一定的差距。

铸锭质量的好坏不仅取决于液体金属的质量，还与铸造方法和工艺有关。目前国内应用较多的是不连续铸造（锭模铸造）、连续铸造及半连续铸造。半连续铸造是世界上应用最普遍、历史最悠久的铝合金铸造技术，对于铝合金铸造，除达到铸锭成形的基本目的之外，各铝加工

企业和研究机构，一直致力于提高铸锭表面质量，即使铸锭表面尽可能平整光滑，减少或消除粗晶层偏析瘤等表面缺陷，减少铸锭厚差及底部翘曲和膨胀等，使铸锭在热轧前尽可能少铣边或铣面，提高成材率。

0.5 铝合金挤压生产技术

挤压就是对放在容器（挤压筒）中的锭坯一端施加压力，使之通过模孔成型的一种压力加工方法。挤压最基本的方法是正挤压和反挤压。正挤压是金属的流动方向和挤压杆的运动方向相同。反挤压是金属的流动方向和挤压杆的运动方向相反。挤压加工在铝合金工业体系中具有特殊的地位。这是因为近些年来随着科学技术的不断进步和国民经济的飞速发展，使用部门对铝合金产品的精度、形状、表面粗糙度和组织性能等各种质量指标提出了新的要求。而向用户保证供应符合各种质量要求的铝合金产品，采用挤压加工技术生产比用其他压力加工方法（如轧制、锻造等）有更大的优越性和可靠性。铝合金挤压生产具有如下优点：

- (1) 有强烈的三向压应力状态图，金属可以发挥其最大的塑性。
- (2) 可以生产断面极其复杂及变断面的型材。
- (3) 具有极大的生产灵活性，在一台设备上能够生产很多的产品品种和规格。
- (4) 产品尺寸精确，表面质量高。
- (5) 实现生产过程自动化和封闭化比较容易。

0.6 铝合金轧制生产技术

铝及其合金，通常要加工成各种规格的板材、带材，这些板材、带材往往都要进行轧制加工。所谓轧制即指旋转的两个轧辊，被轧制的铝及其合金坯料被拽入两辊之间，借助轧辊的压力，使其发生塑性变形的过程。按轧制时的温度不同，轧制分为冷轧和热轧。在金属再结晶温度以下进行轧制称冷轧，在金属再结晶温度以上轧制称热轧。显然轧制产品质量的好与坏，与轧制工艺先进与否有着极大的关系。

从轧制坯料的供应方式上可以分为铸锭轧制法、连续铸轧法及连铸连轧法。

铸锭轧制是传统的生产板带材的方案，规模可大可小，既有年产数百吨的小工厂，也有年产几十万吨的大型企业。生产的品种、规格易于调整，最终制品的组织、性能易于控制。

铝及铝合金的连续铸轧和连铸连轧生产方案，省去了铸锭方法的热轧工序，从节约能源来看是有利的。由于板坯连铸厚度的限制，产品的规格受到一定限制，可调控最终制品组织、性能的工艺环节少，从物理冶金的角度来看，在控制产品组织状态方面存在一定的缺陷，产品品种受到限制。目前连铸连轧生产方案主要用于纯铝及防锈铝板带材的生产。

从轧制过程对坯料的处理方式上可分为块式法和带式法两种方式。

块式法是经热轧或冷轧粗轧后剪切成一定长度的板坯，再采用冷轧等工序，直到成品。这种

方法,设备及操作简单,投资少,生产的品种、规格灵活性较大,一般适用于小型工厂。但是,块式法是一种古老的生产方法,生产率和成品率低,劳动强度大,生产条件差,周期长,产品受限,尤其是生产薄板。

带式法即成卷轧制,最后才横剪成板或纵剪分卷。这种方法生产板材或带材。可采用大铸锭、高速度轧制,生产率和成品率高。容易实现生产过程的连续化、自动化和计算机控制,达到高质量、高效率且劳动强度小。但是设备较复杂,投资大,建设周期较长,适用于产品大,技术力量较强,品种较单一的大中型工厂。

0.7 铝合金表面处理技术

铝合金型材表面处理的目的是要解决或提高材料防腐性、装饰性和功能性三方面的问题。铝的腐蚀电位较低,腐蚀比较严重,特别是在与其他金属接触时,铝的电偶腐蚀问题极其突出。因此,防护性主要是防止铝腐蚀和保护金属,阳极氧化膜和涂覆有机聚合物涂层等是常用的表面处理手段。装饰性主要从美观出发,提高材料的外观品质。功能性是指赋予金属表面的某些化学或物理特性,如增加硬度,提高耐磨损性、电绝缘性、亲水性或赋予材料新的功能(电磁功能、光电功能等),形成了具有广泛潜在用途的崭新领域。在实际应用中,单独解决某一方面的情况比较少见,往往需要综合考虑。对于建筑用铝合金型材来说,由于要求其具有耐蚀、耐候、耐磨、外观装饰好和使用寿命长等综合性能,必须进行后续的表面处理以使其有表面保护层和装饰层,同时要求其具有能批量工业生产而且成本低、控制容易和生产稳定等特点,因此,建筑铝型材的表面处理必须兼顾使用和生产两方面的要求。

铝型材的表面处理方法很多,但目前仍普遍采用阳极氧化着色技术。阳极氧化的种类很多,氧化效果也比较好。较常用的有硫酸法,此外还有硝酸、铬酸、硬质、瓷质法等。为提高表面性能及耐蚀性能,常用的着色方法有电解着色法、化学着色法、自然着色法等。采用阳极氧化着色处理的铝制品,最后工序是封孔处理。封孔处理方法有沸水封孔、低温水合反应封孔(25~40℃)、中温封孔和涂层封孔等。为了使铝制品更加美观耐用,表面处理前的预处理显得越来越重要,目前比较先进的预处理方法,除必要的除油、脱酸和酸、碱洗外,还增加了机械抛光、磨光或哑光、砂面工序等。此外,化学抛光和电化学抛光技术也得到了广泛应用。