

再生铝

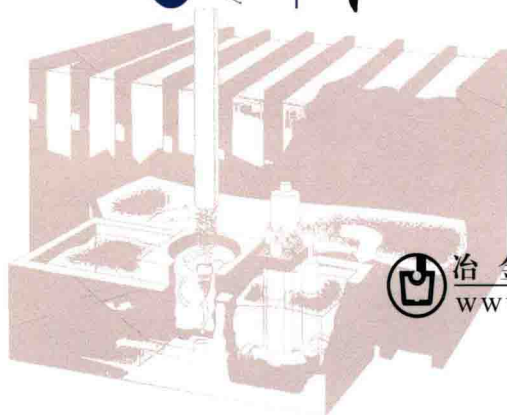
产业研究与生产技术

Secondary aluminium industry
research and production technology

姜玉敬

吴细华

编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

再生铝

产业研究与生产技术

Secondary aluminium industry
research and production technology

姜玉敬

吴细华

编著



北京

冶金工业出版社

2018

内 容 提 要

本书探寻了再生铝的起源、发展和现状,全面系统地总结了我国再生铝生产的状况和工艺技术,介绍了世界再生铝先进的工艺技术和设备,展望了今后再生铝的发展前景和趋势。

本书适合广大科技、工程设计、生产管理人员,大专院校师生,生产技术人员、岗位操作人员学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

再生铝产业研究与生产技术/姜玉敬等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2018. 4

ISBN 978-7-5024-7750-9

I. ①再… II. ①姜… III. ①二次金属—铝—生产工艺
IV. ①TG146. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 069251 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 姜晓辉 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7750-9

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2018 年 4 月第 1 版, 2018 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 17 印张; 330 千字; 263 页

48.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

铝是目前世界上除钢铁外用量最大的金属。在有色金属中,铝无论在储量、产量、用量方面均属前列。2016年,世界铝的生产量和使用量分别达到5912万吨及5816万吨。我国改革开放以来,铝工业得到了飞速发展,产量由改革开放初期1983年的44.5万吨猛增到2016年的3187万吨,年平均以13.8%的高速度增长。

废铝是一种重要的资源,做好其回收、再生与利用有利于资源的有效利用,有利于环境保护,有利于节约能源等。废铝的再生与利用是一项社会效益与经济效益巨大的工作,对经济的持续稳定发展有着重要的现实意义。

废铝的回收与再生利用不仅使资源得到循环利用,而且可大幅度减少温室气体CO₂排放,因为再生铝能耗仅相当于原铝生产能耗的3.5%~5.5%。随着铝工业的发展,再生铝行业将得到更好发展。

中国已成为世界第一再生铝大国,2016年再生铝产量约占世界再生铝总产量的40.1%。我国再生铝工业近16年来发展迅速,再生铝产量已由2001年的130万吨增加到2016年的640万吨,平均年增长率为11.2%。再生铝以其良好的再生利用性成为21世纪铝工业发展中的亮点,是世界铝工业发展必不可少的重要组成部分。目前,全世界每年近2100万吨的各种废杂铝通过加工而成为再生铝合金,2016年全球再生铝及铝合金产量为1596万吨,满足了约全球铝市场总需求量的22%,并且再生铝的产量占铝总

产量的比例还在不断提高。

本书全面系统地总结我国再生铝生产的工艺技术，介绍世界再生铝先进设备与工艺技术，可供广大的科研人员、工程设计人员、生产管理人员、大专院校师生、生产技术人员和生产岗位操作人员参考、学习和培训之用。

在本书的编著过程中，姜华、赵青、姜海漪、水心映及比亚迪中央研究院的姜海阔等同志为此付出了辛勤劳动，在此对他们表示衷心感谢！

由于作者学识所限，书中存在这样或那样的不足，敬请批评指正。

作 者

2017 年 12 月于北京

目 录

1 绪论	1
1.1 发展再生铝的意义	1
1.2 铝和再生铝的发展历史	2
1.3 铝的性质	14
1.4 铝及铝合金的种类和特性	18
1.5 铝的应用领域	28
1.6 全球铝的生产与消费情况	48
2 废铝的分类及流通市场	51
2.1 废铝产生量与净铝回收量	51
2.2 废铝的分类	52
2.3 我国废铝的流通市场	59
2.4 再生铝的产品结构	60
3 世界再生铝行业的发展情况	62
3.1 世界再生铝工业的发展现状及趋势	62
3.2 世界典型再生铝厂	70
3.3 我国再生铝工业的发展情况	87
3.4 中国典型再生铝厂	93
3.5 再生铝厂的建设与设计原则	97
4 废铝的来源与预处理工艺技术	99
4.1 铝的循环使用周期	99
4.2 废铝来源及原材料组成	100
4.3 废铝的预处理工艺技术	102
5 废铝的熔炼工艺技术	118
5.1 废铝熔炼的目的	118

5.2 废铝熔炼前的准备	120
5.3 废铝的主要熔炼方法	128
5.4 主要熔炼设备与工艺技术	130
5.5 熔炼过程的除杂及精炼技术	162
5.6 熔炼时铝熔体保护技术及熔炼剂	171
5.7 静置与保持技术	176
6 再生铝合金铸造工艺技术	178
6.1 熔配工艺技术与变质处理	179
6.2 铸造主要工艺与设备	185
6.3 铸造其他关键设备与工艺技术	193
6.4 铝合金铸造工艺技术条件	202
7 再生铝生产过程中的环境保护技术	211
7.1 再生铝工业的环保政策及污染物排放标准	211
7.2 再生铝工业污染物的来源及危害	217
7.3 再生铝工业的环境综合治理技术	222
7.4 再生铝工业烟气净化设备与工艺	227
7.5 噪声的污染与控制	242
7.6 生产废水的控制与处理	250
7.7 生产废固的控制与处理	251
8 再生铝产业发展的前景展望	252
8.1 世界再生铝行业发展呈现的新形势	252
8.2 中国再生铝工业发展的新趋势	253
8.3 中国再生铝行业发展存在的问题	254
8.4 再生铝生产技术的发展趋势	256
8.5 我国再生铝工业的发展前景与展望	258
参考文献	262

1 绪 论

铝是一种年轻的、用途极其广泛的新型轻金属。到 2016 年,其工业化生产及应用只有 128 年的历史。铝的工业化生产和应用,给世界带来了深刻的变化,飞机上天、宇宙飞船的太空行驶、高压输送线路的纵横、水上和陆地交通的便捷、安全可靠的食物包装、精美的高楼大厦、优良的机器制造等无不与此有关。毫不夸张地说,是铝在创造一个又一个奇迹的同时也改变着世界。

然而,就在这短暂的 128 年的时间里,世界铝工业经受了 1907 年银行危机、1929~1933 年经济危机、1948~1949 年“马歇尔计划”、1973~1975 年石油危机、1979 年开始的第二次石油危机和 2008~2010 年的次贷危机、2010 年至当下的欧洲主权债务危机的历练,还经受了两次世界大战和多次局部战争的洗礼,这些使得世界铝工业的发展发生了波澜壮阔、令人震撼乃至生死存亡的巨大变化。

当下,我们面临的挑战已不仅仅是保障人类的基本生活需求,而是要如何去提高人们的生活质量。这意味着在取得社会经济发展的同时,我们既要保持自然生态平衡,还要保证留给后代一个同样可以赖以生存的自然环境。

人类智慧的各种结晶,包括像铝这样有着用途广泛的工业产品,都将为实现可持续发展目标发挥重要作用。科学发展再生铝行业就是实现上述目标的有效途径之一。

1.1 发展再生铝的意义

众所周知,从铝土矿的开采、氧化铝的生产、铝的电解冶炼到铝加工成品,需要消耗大量的能源和原材料,生产成本十分昂贵。不仅如此,还污染环境,影响着人类的健康,且随着生产铝的不断进行,铝的矿产资源将逐年减少。但铝的主要优点之一就是有很高的回收再生性,体现在几方面:一是回收再生能耗低,仅相当于从铝土矿开采到电解产出原铝所需全部能耗的 3.5%~5.5%;二是熔炼时的实收率高,每循环一次的损耗为 3.5%~8.5%;三是据有关资料报道,利用废铝生产再生铝 CO₂排放量比用水电生产原铝的 CO₂排放量减少 91%以上,比用火电生产电解铝的 CO₂排放量减少 97%,更可避免沥青、烟尘、含氟气体、粉尘等的污染;四是投资少、成本低,据统计中国生产 1t 氧化铝的费用为原铝生产的 20%~25%,而 1 吨再生铝生产的投资只有原铝投资的 12.5%。因此,铝及铝合金废料、废件的再生利用是一项节省资源和能源,有利于环境保护,有利于铝

工业持续发展的系统工程。

目前,废铝的回收再利用已经满足了全世界近 1/3 的铝需求,再生铝的产量占全世界铝及铝合金总产量的比例越来越大。许多产品,例如汽车用铝铸件,就是以再生铝为原料制造的。铝作为一种与众不同的金属已经极大地改变了我们周围的世界。在 20 世纪的几十年里,铝被公认为是一种具有性能持久稳定性和可再次使用的金属。自 1886~2016 年以来,人类所生产的约 12.7 亿吨铝中约有 9.5 亿吨目前仍然在被广泛地使用着,并且在以后仍可被重复利用。因此,铝是一种真正意义上的可长久使用的金属。

回收铝所消耗的能源仅占生产同样重量原铝所耗费能源的 3.5%~5.5%。也就是说,铝的回收避免了约 95% 的能耗,同时减少了原铝生产过程产生的温室气体排放量。回收铝弥补了对原铝需求的同时,每年还至少减少了约 9000 万吨的二氧化碳排放量。按照当前的回收水平,超过 90% 的铝以及从报废车辆中搜集的废铝会被再次利用,这完全是因为铝具有其他金属所不具备的高回收性。为了鼓励人们回收更多的废铝,国际铝业协会已经创建了全球铝回收委员会。当今,每年通过加工废铝得到的约 1700 万吨再生铝合金满足了全球铝市场约 22% 的总需求量。

因此,铝冶炼过程中产生的铝渣、铝及铝合金废料、废件的再生利用是一项节省资源和能源,有利于环境保护的系统工程。为了贯彻国家关于进一步开展资源综合利用和走可持续发展道路,促进我国铝再生利用的产业化发展,节约矿产资源,节能降耗,提高铝渣、铝及铝合金废料、废件的综合利用和科技含量及附加值,带动我国铝行业走可持续发展的新型工业化道路的精神,科学发展铝再生事业具有十分重要的意义。

1.2 铝和再生铝的发展历史

铝的诞生为人类文明的发展与进步起着重要的作用。

1.2.1 铝的发现与炼铝简史

铝(Al)是元素周期表中的第 13 号元素。铝在自然界中分布广泛,地壳中铝的含量约为 8.0%,仅次于氧(O)和硅(Si),居第三位。在所有金属元素中,铝居首位。铝的化学性质十分活泼,自然界中仅发现了极少量游离态的铝,其绝大部分是以化合态并与其他矿物共生。含铝的矿物总计有 250 多种,主要的是铝土矿、高岭土、霞石、明矾石、黏土等。

中国开采和利用含铝矿物有着悠久的历史,古代就开始从明矾石提取明矾(古称矾石),供医药及工业上使用。汉代《本草经》(公元前 1 世纪)一书中记载了 365 种药物,其中有 16 种矿物药物,包括了矾石、铅丹、石灰、朴硝、磁

石。明代宋应星所著《天工开物》（公元 1637 年）一书记载了矾石的制造和用途。

Aluminium（铝）一词从明矾衍生而来，古罗马人称明矾为 Alumen。1746 年 Pott 从明矾中制取了一种金属氧化物。德国化学家 Andreas Marggraf 认为黏土和明矾中含有同一种金属氧化物，1786 年他给铝的氧化物取名为“alumina”。1807 年，英国化学家戴维（Humphry Davy）试图用电解法从氧化铝中分离出金属，但未成功；1808 年，他将此种想象中的金属称为 Aluminium，此名沿用至今。法国人 Berthier 于 1821 年在法国南部的小村庄 Les Baux 附近发现了铝土矿，铝土矿由此而得名为 bauxite，并于 1859 年开始了小规模采矿。

金属铝最早是采用化学法制取。1825 年，丹麦化学家 Hans-Christian Ørsted 把钾汞齐与无水氯化铝进行反应，将生成的铝汞齐在真空条件下蒸馏，分离出汞，最终产物是具有锡的光泽和颜色的金属铝，但当时未能加以鉴定。1827 年，德国化学家维勒（Friedrich Wöhler）加热金属钾和无水氯化铝的混合物，制取了少量银灰色粉状铝，但无法鉴定其性质。直至 1845 年，维勒把氯化铝气体通过熔融的金属钾表面，得到金属铝珠，每颗铝珠的质量为 10~15mg，铝的一些物理性质和化学性质才得到初步测定。

1854 年，法国化学家德维勒（Henri Etienne Saint-Claire Deville）用较便宜的钠代替钾还原 NaCl-AlCl_3 络合盐，制取金属铝。钠和钾同为一价碱金属，但钠的相对原子质量比钾小，制取 1kg 铝所需的金属钠量大约是 3.0~3.4kg，而用钾则大约需要 5.5kg，故用钠比较经济。当时，称铝为“泥土中的银子”。1854 年，在巴黎附近建成了世界上第一座炼铝厂。1855 年，德维勒在巴黎世界博览会上展出了 12 块小铝锭，总量约为 1kg。1865 年，俄国化学家贝克托夫（Николлай Бекетов）提议用镁还原冰晶石来生产铝。这一方案后来在德国 Gmelingen 铝镁工厂被采用。

自从 1887~1888 年电解法炼铝工厂投入生产后，化学法便渐渐停止使用。德维勒的化学法工厂于 1891 年关闭。在此前的 30 多年内采用化学法总共生产约 200t 金属铝。

在采用化学法炼铝期间，德国人本森（Bunsen）和德维勒继戴维之后继续研究电解法炼铝。1854 年，本森发表了试验总结报告，称通过电解 NaCl-AlCl_3 络合盐，可得到金属铝，他在电解时采用炭阳极和炭阴极。同年，德维勒除了电解 NaCl-AlCl_3 络合盐之外，还电解此络合盐和冰晶石的混合物，都获得了金属铝。德维勒也许是认识到氧化铝可溶于熔融氟盐的一个人，他在改进化学法炼铝的过程中，将氟化钙（ CaF_2 ）和冰晶石（ Na_3AlF_6 ）加入 NaAlF_4 熔剂中，首次发现加入的冰晶石具有溶解金属铝表面氧化膜的作用。这一偶然的重大发现孕育着冰晶石—氧化铝熔盐铝电解法的诞生。由于当时用蓄电池作为电源，不能获得较大

的电流，而且电能价格昂贵，因此电解法炼铝尚不能在工业上应用。直到 1866 年西门子（Simens）制成了直流发电机，并于 1875 年加以改进之后，才使电解法炼铝得以用于工业规模生产。

1883 年，美国人布拉德莱（Bradley）提出利用氧化铝可溶于熔融冰晶石的特性来电解冰晶石—氧化铝熔盐的方案，但未获得专利。3 年之后，即 1886 年，美国的霍尔（Charles Martin Hall）和法国的埃鲁（Paul-Louis-Toussaint Héroult）通过实验不约而同地申请了冰晶石—氧化铝熔盐电解法炼铝的专利，并获得批准。这就是所称的 Hall—Héroult（霍尔—埃鲁）法。

霍尔认为氧化铝是炼铝的适当原料，但因为氧化铝的熔点很高，必须要寻找一种适宜的熔剂；所以霍尔系统研究了各种熔剂，并进行试验，直到采用冰晶石试验才找到这种熔剂。而埃鲁则相反，通过电解纯冰晶石熔液得到铝之后，首先将 NaCl-AlCl_3 络合盐作为炼铝原料，但由于 NaCl-AlCl_3 易于水解，故改用氧化铝。可见霍尔和埃鲁在炼铝方法的研究上是殊途同归。他们的发明分别都申请到了专利。

1888 年，霍尔在美国匹兹堡建立电解铝厂，开始用冰晶石—氧化铝熔盐电解法炼铝，该厂就是 1907 年成立的美国铝业公司的前身。瑞士 Neuhausen 冶炼公司也几乎在同时采用埃鲁的专利炼铝。与化学法相比，电解法成本比较低，而且产品质量好，并一直沿用至今。

由于当时铝是一种贵重的金属，在 1884 年美国首都华盛顿的华盛顿纪念塔落成时，在其 555 英尺（1 英尺 = 0.3048 米）的顶尖处安装了一块 15kg 重的铝棱锥体。

冰晶石—氧化铝熔盐电解法炼铝发明后，由于制造成本大幅度下降，有力地促进了铝的工业规模生产。继美国和瑞士之后，其他国家也相继采用电解法炼铝：法国始于 1889 年、英国 1890 年、德国 1898 年、奥地利 1899 年、挪威 1906 年、意大利 1907 年、西班牙 1927 年、苏联 1931 年、中国为 1938 年（日本侵占中国时所建）。

目前，在世界上工业生产铝的方法有两种：一种为霍尔—埃鲁熔盐电解法，另一种为矿冶炉碳还原法；但绝大多数是采用电解法。根据全球炼铝工业的发展状况，炼铝工业的历史大体上可分为四个阶段：

第一阶段：1886~1947 年前后，工业生产起步与摸索、铝用途开发创造奇迹阶段；

第二阶段：1948~1960 年，自焙槽炼铝技术成熟、西方国家大规模发展与应用阶段；

第三阶段：1961~1980 年，大型预焙槽炼铝技术开发、节能降耗起重要作用和全球铝业布局发生变化阶段；

第四阶段：1981 年至今，大型预焙槽炼铝技术成熟并推广应用、高度重视环保、发达国家发展至鼎盛和第三世界大力发展阶段。

铝工业的产业链见图 1-1。

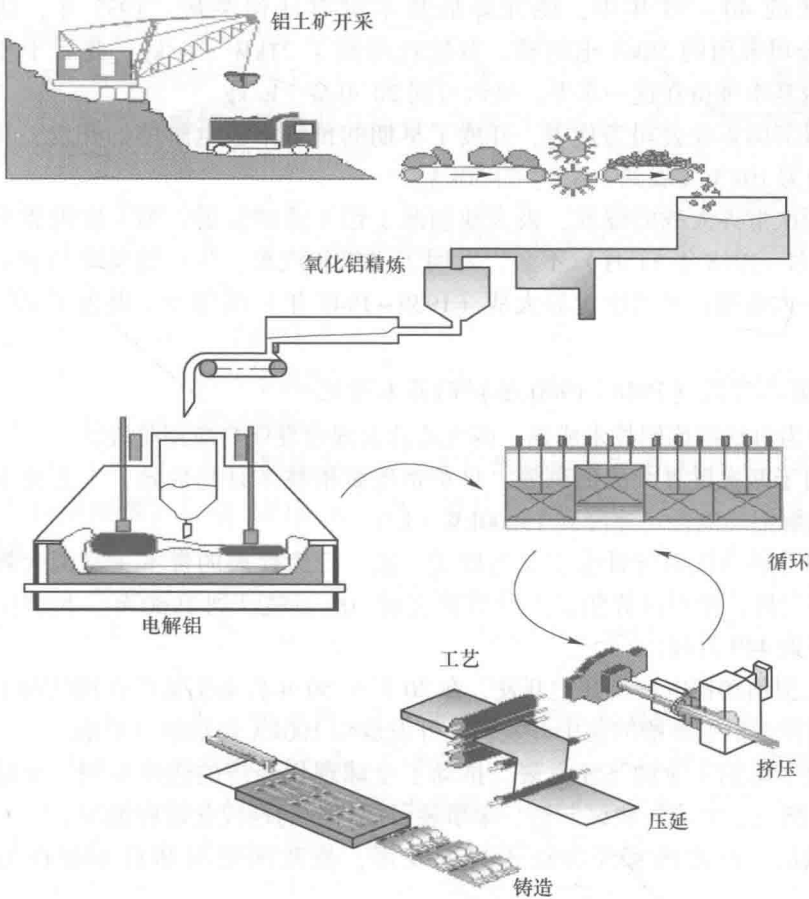


图 1-1 铝工业的产业链

1.2.1.1 第一阶段（1886~1947 年）的基本情况

该阶段为工业生产起步与摸索、铝的用途创造奇迹阶段。

(1) 1886 年，美国的霍尔（Hall）和法国的埃鲁特（Heloult）发明了冰晶石—氧化铝熔盐电解法生产铝，是当今世界铝工业的基础。

(2) 1889 年，法国在 Froges 建造第一台 1000A 的单阳极铝电解槽，吨铝能耗在 10 万千瓦时。

(3) 1888~1989 年，在美国匹兹堡和瑞士的纽豪斯，采用 Hall—Heroult 法建造的世界第一批铝电解槽投产。

(4) 1890 年, 是化学法和电解法的交替时代, 世界铝的年产量在 180t 左右。

(5) 随后, 扩大电解槽尺码、降低电流密度等技术很快得到运用, 到 1893 年铝电解槽能耗已经降低到了 $26\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$, 到 19 世纪末则达到 $25\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 。但在接下来的 40~50 年中, 能耗降低技术没有任何突破。1937 年, 法国 Penchiney 公司采用的 50kA 电解槽, 其能耗降到了 $21\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$, 此后十年至 1947 年, 也基本维持在这一水平, 最低可到 $20.4\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 。

(6) 以美国铝业公司为代表, 开展了早期的预焙阳极电解槽的开发, 开始时的容量约为 10kA 发展到 1935 年的 50kA。

(7) 两次世界大战的爆发, 极大地刺激了铝工业的发展: 第一次世界大战 (1914 年 6 月~1918 年 11 月) 不久, 发明了飞机和汽车, 飞机的发明与发展是 20 世纪的一大奇迹; 第二次世界大战 (1939~1945 年) 的爆发, 促进了铝的生产和消费。

1.2.1.2 第二阶段 (1948~1960 年) 的基本情况

该阶段为自焙槽炼铝技术成熟、两大阵营大规模发展与应用阶段。

(1) 由于两次世界大战的刺激, 自焙铝电解槽技术日趋成熟, 工艺技术更加完善, 电解铝的能耗迅速降到 $15000\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ 。

(2) 以苏联为代表的社会主义与以美、法、日为代表的资本主义两大阵营电解铝迅速发展, 使得世界铝总产量首次突破 100 万吨, 到 1960 年, 世界的铝总产量发展到 449 万吨。

(3) 大型预焙铝电解槽开始开发, 在 20 世纪 50 年代美铝集中在田纳西工厂进行了大型预焙铝电解槽的集中开发, 并开发成功 100kA 预焙铝电解槽。

(4) 由于炼铝工业的飞速发展, 推动了全球现代经济的快速发展。全球汽车、航天、航空、电力、机械制造、军事装备等行业的现代化进程加快。

(5) 战后, 西方国家经济进入快速发展, 战败国德国和日本也在迅速崛起。

1.2.1.3 第三阶段 (1961~1980 年) 的基本情况

该阶段: 大型预焙槽炼铝技术开发、节能降耗起重要作用和全球铝业布局发生变化阶段。

(1) 1960 年之前, 人们在采用霍尔—埃鲁法生产铝时, 并不会过多考虑铝电解槽的能耗问题, 因为当时有大量的需求和廉价的电能。进入 20 世纪 60 年代, 大多数国家的铝工业都面临高电价和能源短缺的难题。所以, 如何节约能源便成了提高铝工业效益的关键所在。

(2) 由于对工作条件与环境保护的严格要求, 20 世纪六七十年代, 是全球大型预焙槽开发阶段, 以法国彼施涅铝业公司为代表, 相继开发了 130kA、180kA 预焙铝电解槽。

(3) 20 世纪 60 年代, 以美国铝业为代表开发了 P-155 槽, 电解槽容量达到 155kA, 70 年代开发了 P-225 型和系列 A-697 型电解槽, 电解槽容量达到 200kA 左右及 230kA, 并于 70 年代末投产。

(4) 由于 20 世纪 70 年代两次国际石油危机, 日本电解铝工业被迫倒下, 当时号称世界第三产铝大国的日本, 铝产量从 118 万吨降到 30 万吨。

(5) 美国的铝产量到 1980 年达到历史最高峰值, 为年产 465 万吨。

(6) 全球电解铝开始向电力充足、价低的加拿大、委内瑞拉等国转移。

(7) 中国正值改革开放初期, 急需发展经济; 当时也正是国际石油危机的末期, 发达国家也在不遗余力地寻求新的发展, 希望将经济尽快恢复, 日本将因危机倒下的设备卖给中国, 将固定资产尽快转化为现金资本, 为寻求新的发展奠定经济基础。

1.2.1.4 第四阶段 (1981 年至今) 的基本情况

大型预焙槽炼铝技术成熟并推广应用、高度重视环保、发达国家已发展至鼎盛和第三世界大力发展阶段。

(1) 1987 年, 法国彼施涅铝业公司已成功地开发出 AP18 (180kA) 中间点式下料电解槽, 目前 AP18 电解槽已建成投产的有 3412 台, 年产量达到 170 万吨。

(2) 彼施涅从 1981 年开始开发研究 AP30 (300kA) 电解槽, 1986 年采用 AP30 技术建设了一个 G 系列, 目前, 采用 AP30 电解槽技术的有 2472 台 (槽), 年产量达到 210 万吨。

(3) 进入 20 世纪 90 年代, 处于世界各种铝电解槽技术发展的挑战及自身发展利益驱动, 彼施涅铝业公司一直不断开发更大容量的预焙电解槽技术。1995 年, 开发了 400kA (AP40) 槽, 由于公司没有新上铝电解厂的计划, 使 AP40 槽没有建设生产线, 但他们并没有停止进一步开发大容量电解槽的研究工作, 开展了 AP30 电解槽进一步技术优化、强化电流的研究工作, 将 AP30 电解槽 300kA 的电流强度强化到 350kA 下运行, 取得了非常好的效果。

(4) 彼施涅在总结 AP18、AP30、AP40 等技术的基础上, 进一步采用先进技术, 2001 年开发了世界最大容量的 AP50 (500kA) 电解槽技术, 电流效率达到 95%。

(5) 全球高度重视环境保护, 联合国为此专门发表《人类发展报告》, 呼吁国际社会加强环保, 减少温室气体排放。1997 年的京都议定书规定工业化国家要减少温室气体的排放, 减少全球气候变暖和海平面上升的危险, 发展中国家没有减排义务。

世界各国在开发大型预焙铝电解槽的进程见表 1-1。

表 1-1 世界各国在开发大型预焙铝电解槽的进程

公司	槽容量 /kA	阳极电流密度 /A · cm ⁻²	电流效率 /%	槽电压 /V	能耗 /kW · h · kg ⁻¹	备注
Tanji et al.	132	0.70	90.4	4.00	13.2	系列槽 (1981)
	132	0.70	91.3	3.74	12.2	1 台试验槽 (1982)
Fujishima et al.	150	0.80	92.0	3.89	12.6	9 台槽 (1981)
Matsumoto and Murakami	150	0.79	92.5	4.19	13.5	4 台试验槽
	200	0.76	93	4.18	13.4	4 台试验槽
Holmes et al.	170.6	0.68	94.6	4.13	12.96	2 台试验槽
	180.2	0.72	94.1	4.17	13.20	2 台试验槽
	189.7	0.76	91.6	4.20	13.62	2 台试验槽
Keinborg and Cuny	182	0.80	94.2	4.17	13.2	60 台槽系列
	182	0.80	95.1	4.21	13.2	4 台试验槽
Langon and Peyneau	180		96.3			4 台试验槽 2 个月 (1980)
	175		95.9	4.06	12.67	系列 2。5 年 1987~1989
Bosshaid et al.	180~185	0.74	94.5~95.5	4.14	12.9~13.1	4 台试验槽
Langon and Varin	281.7	0.74	95.8	4.13	12.84	1 台试验槽
Langon and Peyneau	280	0.74	95.3			4 台试验槽 1983/84
	280	0.74	95.5			4 台试验槽 1988
	280	0.74	94.6	4.20	13.24	120 台系列 1988
China	280	0.72	93.44	4.155	13.25	4 台试验槽 1997
Pechnia	500	0.74	95			2001 年
China	500	0.804 (48 组) 1750×740× 650 (620)	94	3.95	12522	2011 年连城铝
RioTinto (ALCAN)	600	0.822 1810×720×680	94.5	3.96	12488	2013 年 36 台
China	600	0.875 (56 组) 1750×700×650	94	3.94	12490	372 台魏桥 2 个 系列 2014 年
China	660	0.86 (56 组) 1850×740×610				2016 年山东信发

1) 表 1-1 中展示大部分的最佳纪录都是在 $12.5 \sim 13.2 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$ 这一范围内, 这是目前电解铝槽能耗的最佳水平段。其中, 有些非常好的能耗记录是在试验中完成的, 大部分生产线上的能耗记录还是维持在 $25.5 \sim 13.0 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$ 这一水平上。

中国开发的 500kA、600kA 级铝电解槽生产系列见图 1-2。

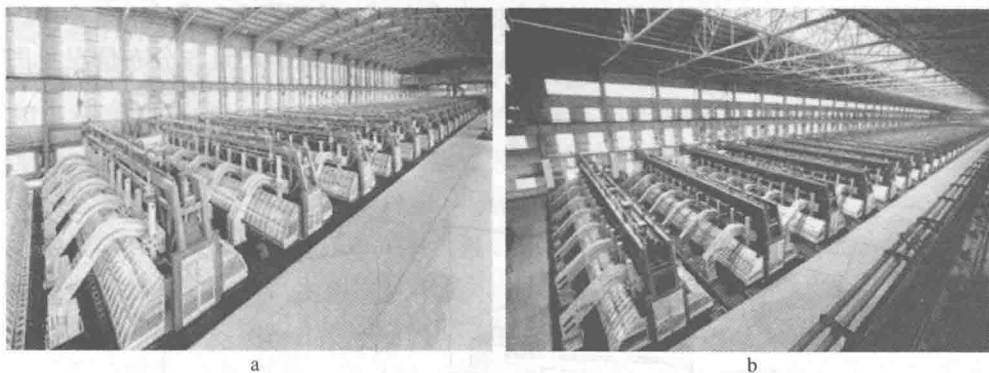


图 1-2 中国的 500kA、600kA 级铝电解槽生产系列

a—500kA 系列电解槽; b—600kA 系列电解槽

2) 目前为止自焙铝电解槽的最佳能耗记录是由 Okada 公司在 1982 年上半年创造的, 97kA120 电解槽, 能耗 $13.4 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$ 。自焙铝电解槽的一些测试最佳纪录达到了 $12.7 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$, 电流 100kA, 但由于“石油危机”这些都无法被运用。

3) 发达国家的电解铝技术已发展到鼎盛, 体现在近 37 年中, 电子计算机控制技术、干法烟气净化技术、点式下料技术、氧化铝超浓相输送技术、新阴极材料和高质量阳极的生产技术、大功率高效率的整流装置技术、配套工艺操作装备(如出铝、更换阳极、提升母线等装备)的生产技术等完善与集成应用, 世界铝电解工业发生了巨大变化; 近 37 年中, 世界铝产量年平均约以 4.0% 的速度递增, 工业电解槽的容量已发展到 660kA, 最好电流效率达到 96.2% 的水平, 直流电耗达到 $12600 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$, 烟气集气率和烟气、粉尘总净化率达到 98.5% 和 98%。

4) 以中国为代表的第三世界, 电解铝工业迅猛发展。当我国的国门打开之时, 就开始向着大型预焙铝电解槽技术的迈进。当时, 由于国力较弱、十年浩劫、国外对技术的封锁等, 使我国在开发大型预焙槽炼铝技术的道路上是非常之艰难、经验缺乏、技术难度大和危险性高等, 但这些没有压垮我国炼铝人, 经过几代人的艰辛努力, 经过引进与消化, 再经过国家集中全国优秀人才团队集中自主攻关, 终于使我国的电解铝工业迈入世界先进水平, 不仅打破国外对技术的封锁与垄断, 而且也使我国铝工业已连续 15 年铝产量世界第一, 炼铝能耗列世界各国最先进水平, 2015 年全国电解铝平均能耗较世界平均能耗低 $677 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ 。

冰晶石—氧化铝熔盐电解法自发明以来一直沿用至今。130 年来,世界的原铝产量迅速增长,从 1888 年到 1895 年,世界总共生产铝 1000t 左右,其中 1890 年世界铝产量为 180t;1900 年增加到 8000t,1925 年 18 万吨,1940 年 81 万吨,1950 年 150 万吨,1960 年 454 万吨,1970 年 1025 万吨,1980 年 1560 万吨,1990 年 1810 万吨,2000 年 2406 万吨,2010 年 4235 万吨,2015 年达到 5789 万吨。2015 年世界上生产原铝最多的国家依次为中国、俄罗斯和加拿大,其中中国产铝 3141 万吨,占全球总产量的 54.3%。世界各国电解铝产量与分布情况见图 1-3。

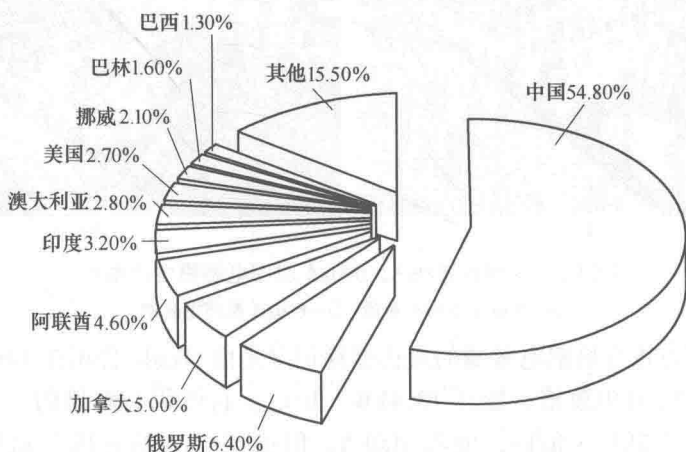


图 1-3 2015 年世界电解铝产量与分布情况

世界电解铝发展出现的新情况是：

1) 到 2016 年,铝工业化生产及应用已有 128 年历史。截止到 2016 年底,世界上累计原铝产量约 12.8 亿吨,中国累计原铝产量约 2.8 亿吨,占全球累计原铝产量的 21.9%;2016 年中国原铝产量约占世界当年铝总产量的 55%;今后相当长历史时期内,中国铝产量列世界各国之首已成定局。

2) 美国电解铝产量从 20 世纪的 1980 年达到峰值之后,铝产量一路下滑。从 20 世纪第一产铝大国下滑到 2016 年的铝产量仅列世界第 7 位。

3) 印度和中东地区原铝产量地位在上升。

4) 俄罗斯以其丰富的西伯利亚水电资源和深厚的理论基础,正在开展现代化大容量预焙铝电解槽的升级换代和扩建工作。

用氧化铝熔盐电解而获得的铝称为原铝。铝具有良好的可回收性,各种废铝经回收生产的铝称为再生铝。生产再生铝所用的能量只是原铝生产的 4%~5%,因此再生铝使用的比例越来越大。2015 年全世界的再生铝产量(含铝加工厂利用的量)已达到 1340 万吨,可满足市场总需求的 22%。2015 年中国使用国内回