

文章编号: 1004-0609(2003)02-0490-07

铝电解用炭阳极的综合性能^①

叶绍龙, 肖 劲, 丁凤其, 李 劼, 邹 忠, 刘业翔

(中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 在阐述了炭阳极在铝电解生产中所起的重要作用的基础上, 对我国铝电解用炭阳极的物理化学性能和电化学性能进行了综合评述, 并指出了我国铝电解用炭阳极存在的不足, 最后阐述了目前阳极质量改进的一些途径, 并从阳极添加剂技术的角度对我国铝电解用炭阳极质量的改进提出了系列建议。

关键词: 铝电解; 炭阳极; 添加剂; 性能

中图分类号: TF 821

文献标识码: A

铝乃地壳中含量最多的金属元素, 而在所有的化学元素中位居第三, 仅次于氧和硅。由于金属铝具有优良的物理性能, 使之在当今社会中扮演着越来越重要的角色。铝以及铝合金的使用已渗透到国民经济建设的各个重要领域, 成为继钢铁以后的又一大重要的金属材料。

自 1886 年美国的 Hall 和法国的 Heroult 发明炼铝的基本方法—Hall-Heroult 高温熔盐电解炼铝法以来, 铝电解工业无论在工艺技术水平, 还是在生产规模以及在自动化程度上均取得了突飞猛进的发展。尤其在近 30 年间, 铝电解生产的电流效率由 80% 多提高到现在最高水平的 96%, 电解直流电耗由过去的每吨铝 16 000 多 kW·h 降低到现在的 13 000 kW·h 以下; 在生产规模方面, 铝电解槽由几千安的规模扩大到现在的 320 kA, 甚至 500 kA。一个多世纪以来, 工业铝电解槽经历了由小型预焙阳极电解槽、侧插式自焙阳极电解槽、上插式自焙阳极电解槽到大型预焙阳极电解槽的发展阶段; 在自动化控制程度上, 成功地开发出了控制精度高、系统鲁棒性好、具有明显的增产节能效果的电解过程控制系统。全世界年铝产量由 20 世纪初期的 6 000 t/a 发展到 20 世纪末期的 2×10^7 t/a。这些进展是物理化学、材料科学、工程和自动化技术以及市场需要紧密结合的产物。对 Hall-Heroult 炼铝法的基本原理有了更加深入的认识, 便是人们取得这些进展的基础^[1, 2]。

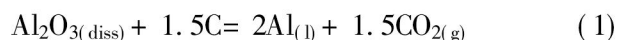
我国铝电解用炭阳极的生产始于 1963 年, 在郑州铝厂(现长城铝业公司)试生产成功。此后我国

铝电解用炭阳极生产迅速发展, 白银铝厂、包头铝厂、青海铝厂、贵州铝厂、平果铝业公司、青海铝厂二期扩建的配套炭阳极生产车间、云南铝厂等阳极生产线的相继建成投产, 使我国目前铝用炭阳极的年产量较 10 a 前成倍增长, 形成了我国铝电解用炭阳极生产的成熟技术和规模, 并相继建立了两个系列的炭阳极质量标准: 振动成型系列的 GB8741-88 和挤压成型系列的 YB2809-78。

Hall-Heroult 炼铝法的典型特点之一是阳极属于消耗性阳极, 阳极的基本设计从整体上划分为两种: 自焙阳极和预焙阳极。随着人们对铝工业规模化、现代化生产认识的提高和对环境保护意识的增强, 预焙阳极铝电解槽取代自焙阳极铝电解槽已成为世界铝工业发展的必然趋势。

1 炭阳极在铝电解中的作用

铝电解生产的基本原理是: 以炭素材料为阳极, 以囿于炭素内衬中的铝液为阴极, 以冰晶石熔体为电解质溶解原料氧化铝, 通过电解反应, 在阴极沉积生产金属铝。其基本反应式为



作为阳极生产的主要原料——炭素材料, 在铝电解生产过程中, 伴随着金属铝的生成而不断消耗。长期的生产实践表明, 炭阳极质量的优劣, 直接或间接影响着铝电解的各项经济技术指标, 诸如电流效率、电能消耗、阳极炭耗等。因此, 炭阳极在电解铝工业中不可避免地处于举足轻重的地位,

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59971007)

收稿日期: 2002-05-13 修订日期: 2002-09-10

作者简介: 叶绍龙(1960-), 男, 副教授。

通讯联系人: 肖 劲, 副教授, 中南大学冶金科学与工程学院; 电话: +86-731-8876454; E-mail: 13607445108@hnmcc.com

一直被业内人士看成为铝电解槽的“心脏”。

首先, 阳极质量的好坏直接影响着铝电解生产的主要工艺技术指标, 诸如能量效率和电流效率, 同时也直接影响着铝电解的生产成本; 其次, 炭阳极质量优劣与铝电解生产过程的稳定性和工人的劳动强度紧密相关; 再者, 炭阳极在工作中对环境的污染程度已经越来越受到人们的关注, 其中尤其是针对自焙铝槽电解生产技术方面, 国内外均采取了一系列甚至是强制性的措施。随着世界铝电解技术的快速发展和环保意识的增强, 适宜于规模化操作和大型化生产以及环境污染相对较轻的预焙槽电解炼铝技术已经成为世界铝电解技术的主流^[3, 4]。在我国, 从 20 世纪 90 年代后期就明确规定, 要在新世纪初基本停止自焙槽电解炼铝, 这标志着我国的铝电解工业将由过去的自焙槽生产为主体转化为向大型预焙槽方向快速发展。但是, 阳极的“质量问题”仍然是阻碍我国铝工业整体水平向世界先进水平靠拢的主要障碍之一, 进一步提高我国阳极生产工艺技术或者在现有工艺技术条件的基础上改善作为预焙铝电解槽“心脏”的炭阳极的物理化学和电化学性能指标, 可以达到有效地降低铝电解的生产成本、稳定铝电解生产操作和提高铝电解生产效率的目的, 对促进我国铝电解工业的发展, 提高我国铝工业在国际市场上的竞争力有着不可轻视的作用。

作者认为, 铝电解技术对炭阳极质量提出的要求应包括以下几个方面: 1) 要求阳极具有良好的物理化学性能, 减少阳极对空气和二氧化碳反应活性, 以求达到降低炭耗、延长阳极使用寿命、减少电解槽含炭渣量的目的; 2) 要求阳极具有良好的电化学性能, 以求达到提高阳极电化学反应活性, 降低电解过程中电能消耗的目的; 3) 要求阳极质量更均匀、更稳定, 以求达到电解槽稳定操作和进一步降低阳极效应系数的目的。

2 铝电解炭阳极的消耗机理

对于阳极消耗的机理, 不同时期的学者持有不同的观点。20 世纪 60 年代, 法国学者 Scalliet 和 Hollingshead^[5]指出: 阳极的过量消耗是由阳极的空气氧化反应和布达反应引起的。70 年代, 美国的 Jones 等^[6]提出阳极消耗机理的 4 个方面: 铝电解主反应(即所谓的一次反应)、铝电解副反应、空气氧化反应和布达反应。并认为上述机理中的后两个反应能造成阳极的机械损失——导致炭渣的形成。80 年代初挪威学者 Grjotheim 等^[7]和新西兰学者 Welch

等^[8]指出, 阳极的消耗主要发生在 3 个区内: 空气燃烧区, 该区发生阳极氧化反应和布达反应; 粉化区, 电解质冲刷使部分与阳极结合较弱的炭粒进入电解质; 电极界面区, 发生铝电解的主反应和副反应。80 年代中期, Grjotheim 等^[9]又进一步丰富了上述理论。

1988 年, 挪威的 Housbon 和 Øye 把工业阳极消耗分为电化学消耗、化学消耗和机械消耗 3 种形式^[10]。当然, 除了上述 3 种消耗形式外, 还有其它的一些形式如操作不当引起的炭损耗以及残极回收的炭损耗等等。炭阳极消耗的分配比例如表 1 所示。

表 1 铝电解阳极炭耗分配

Table 1 Distribution of carbon consumption in aluminium electrolysis

Mechanism	Carbon consumption/ %	
	Pre baked	Self baked
Electrochemical consumption (basic consumption)	66~ 76	58~ 66
Chemical consumption		19~ 23
(1) Oxidation of carbon	8~ 15	
(2) Reducing CO ₂ to CO	5~ 10	
Mechanical consumption	0. 3	3~ 4
Other consumption	3. 5~ 4. 5	12~ 15
Net consumption of anode ($w(C)/w(Al)$)	0. 40~ 0. 45	0. 5~ 0. 55

3 铝电解炭阳极的物理化学性质

阳极在电解过程中工作行为的优劣, 在很大程度上取决于阳极原料的质量和阳极生产工艺技术条件的控制。国际上公认的炭阳极质量标准见表 2^[11]。我国现行的阳极质量标准见表 3^[12]。比较表 2 和表 3 可以发现, 国外各铝业公司对炭阳极的各项指标不仅要求严格, 而且早就把炭阳极与空气及 CO₂ 反应活性作为炭阳极的质量指标之一。我国的阳极质量在指标要求的标准上就与国际标准有一定的差距, 且我们的标准明显偏重于阳极的物理性能, 对阳极的化学性能指标强调不够, 文献[5]将阳极额外消耗总体归纳为: 1) 热阳极表面在空气中的氧化; 2) 阳极反应能力的差别造成化学剥落引起掉粒; 3) 气体侵入多孔的炭阳极时发生 CO₂ 与 C 之间的反应; 4) 在炭阳极的侧面上增加了电化学生成的 CO 份额。

上述 4 项因素中的 1), 2) 和 3) 项均与阳极的化学性能有关, 这些因素就是衡量阳极对空气及

表 2 第 4 届澳大利亚铝电解学术研讨会公认的标准炭阳极性能

Table 2 Standard carbon anode publicized at Australia 4th conference of aluminium electrolysis

Item	Range	Annotation
Bulk density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.53~1.58	The higher the better
Specific resistance rate/($\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$)	52~60	Specific resistance rate should low be controlled
Intensity of resisting pressure/MPa	40~48	Could endure being impacted and keep perfection
Intensity of resisting bend/MPa	5~12	Should be ensured
Expansion coefficient/ 10^{-6}K^{-1}	3.5~4.0	
Thermal conductivity/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	3.5~4.5	Air oxidation could be reduced if the lower limit is kept, but heat impact resistance would enhance
Air filter	0.5~1.5	The lower the better
Remains of CO_2 reaction/%	84~92	The more the better
Remains of air reaction/%	70~85	The more the better
$w(\text{S})/\%$	1.2~2.4	The lower the better
$w(\text{V})/\%$	$8.0\times 10^{-3}\sim 3.4\times 10^{-2}$	The lower the better
$w(\text{Si})/\%$	$1.0\times 10^{-2}\sim 3.0\times 10^{-2}$	The lower the better
$w(\text{Fe})/\%$	$1.0\times 10^{-2}\sim 5.0\times 10^{-2}$	The lower the better
$w(\text{Na})/\%$	$2.5\times 10^{-2}\sim 6.0\times 10^{-2}$	The lower the better
Structure		Without distinct crack and disrepair

表 3 我国现行的电解铝用(预焙)炭阳极性能指标

Table 3 Performance standard of pre-baked anode of aluminium electrolysis used in national plant at present

Brand	Dust content/%	Specific resistance rate/ ($\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$)	Intensity of enduring pressure/ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	Bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Real density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
TY-1	≤ 0.5	≤ 55	≥ 29	≥ 1.5	≥ 2.0
TY-2	≤ 1.2	≤ 63	≥ 29	≥ 1.5	≥ 2.0

CO_2 反应活性的尺度。虽然近年来,许多研究机构甚至阳极工厂和电解用户均已增强了对该项指标的认识,甚至也有部分国内生产厂家已将它们作为考察阳极质量的指标,但由于受传统生产工艺条件、技术条件的限制,加上目前还没有一个统一的考察方式和测定方法,对阳极化学性能的关注程度没有被提到应有的位置。另外,我国现有的阳极生产原料来源不够理想、阳极生产技术相对落后等因素也是导致我国的阳极炭块质量难以和国际质量标准接轨的原因。

首先,从原料质量来讲,自 20 世纪 70 年代开始,我国块大、挥发低的釜式石油焦产量明显减少,而相应的碎料多(< 25 mm 的占 40% 以上)、挥发分波动范围广(10%~18%)的延迟石油焦的产量迅速增加,用这些焦生产出来的炭阳极,其质量必然不稳定。其次,用于制备阳极的粘接剂——沥青质量不稳也是造成阳极质量波动的主要原因之一。一般而言,改质沥青是生产大颗粒阳极的最佳选

择,但我国改质沥青产量太少,生产阳极多用软化点相近的高温沥青代替。实践证明,仅仅是软化点相近是不够的,其他指标如焦化值、 β -树脂和喹啉不溶物(QI)含量的不同也会影响阳极质量,其中尤以 QI 的影响最为突出,Steward 和 Halley 认为^[13],QI 的含量、颗粒的大小对沥青的炭化程度、阳极的强度甚至阳极在电解过程中的布达反应速率均有直接的影响,同时,QI 也会对环境造成很大的污染。

从阳极制备工艺技术条件来分析,我国现行的阳极制备工艺本来就存在许多不足。首先从配方的角度来看,在生产过程中,工艺配料方是一个很重要的环节,因为配方的科学和准确与否将直接影响产品的物理化学性能指标,科学的配方要与阳极原料(包括骨料、粘结剂、残极、生碎料等)的种类和质量指标以及后续工艺条件的变化相结合,定期跟踪对原料进行评价,对生产的阳极成品进行抽检,并以此为依据优化阳极配方。目前,阳极工厂的工艺配料方多数是定下来就基本不变,并没有在对原

料质量不稳的现状进行针对性研究的基础上采取相应的改进调整措施, 因而生产出来的阳极炭块物化性能指标(尤其是化学性能指标)质量难以稳定, 导致阳极炭耗指标明显偏高; 此外, 影响阳极物理化学性能的另一重要方面是阳极的焙烧工艺。Hardin 和 Ellis 等^[14]通过对不同的焙烧工艺制度曲线下的阳极炭块的结构与性能进行分析, 指出阳极焙烧工艺技术是控制阳极物化质量指标的关键因素, Coste 和 Schneider^[15]研究了进一步优化阳极焙烧工艺, 以提高阳极的体积密度, 从而达到改善阳极化学性能的目的, Kuang 和 Thonstad 等^[16]研究了在其他因素基本不变的前提下阳极焙烧温度和阳极电流密度对阳极炭耗的影响程度。另外, 还有学者^[17]通过对我国现行预焙阳极的高度进行了评价, 认为目前工厂使用的阳极普遍太低, 这也是导致阳极在生产中消耗增加的原因之一。

4 铝电解炭阳极电化学性能的研究进展

铝电解的实际分解电压(或称反电动势)要高于理论分解电压 0.4~0.6 V, 而其中阴极过电位只占 0.04~0.08 V, 即炭阳极在电解过程中存在较高的阳极过电位。多年以来, 在本行业中, 如何设法降低铝电解炭阳极过电位, 也就是如何改善炭阳极的电化学性能, 从而达到降低铝电解能耗, 是铝冶金工作者希望的目标, 要达到该目标, 其中一个重要的手段就是通过阳极改性(或称阳极掺杂)的手段来改善阳极在工作过程中的电化学行为, 赋予阳极电催化功能, 从而达到降低阳极工作过程中的过电位。

在低温和水溶液体系降低“析氢”、“析氧”、“析氯”等过电位的研究中, 电催化技术显示出了其巨大的工业应用前景。然而, 在铝电解领域高温氟化物熔盐体系中, 由于体系的复杂性和特殊性, 许多水溶液体系常用的电化学研究方法与实验技术无法在此类体系中应用, 这就使得在低温和水溶液领域中早已广泛展开的电催化研究学科迟迟未能进入能耗更加巨大的高温铝电解研究领域。

早在 20 世纪 60 年代, 挪威的 Thonstad 和 Hove 在研究铝电解阳极过电位时, 曾将 Fe_2O_3 、 Na_2CO_3 和 H_3BO_3 作为添加剂分别加入到焦炭中, 经 1 000 °C 焙烧后制备成炭阳极, 电化学测量结果表明, 与空白阳极(未添加任何添加剂的阳极)相比, 添加有 Fe_2O_3 和 Na_2CO_3 的炭阳极过电位降低了几毫伏, 但他们

未提到“电催化”一词。对整个高温熔盐体系电催化技术的研究起始于 80 年代初期, 我国的刘业翔等^[18]率先在国际上开展了这方面的研究, 并选定铝电解生产中炭阳极上存在的高过电位为突破口, 研究了多种物质对铝电解炭阳极电化学反应的电催化作用。他们首先选用浸渍的方法, 将 Cr, Mn, Co, Ni, Ru, Na 等的氯化物以及 Li_2CO_3 掺杂到石墨阳极中, 用电化学方法测量电极上的阳极过电位, 并与不掺杂的石墨阳极进行比较, 结果发现 CrCl_3 、 Li_2CO_3 、 RuCl_3 等掺杂电极对降低阳极反应的过电位具有明显的电催化作用, 可较大幅度地降低铝电解炭阳极过电位。后来, 他们又比较了机械混合法掺杂以及浸渍机械相结合的掺杂方法, 结果认为^[19], 机械混合掺杂法较浸渍法有易于工业应用的优势, 但其电催化效果受到了一定的限制。邱竹贤、姚广春等人在实验中也发现了 Li_2CO_3 对炭阳极的电催化作用^[20]并对此进行了深入的研究^[21]。刘业翔、邱竹贤等发明的锂盐阳极糊专利技术为我国自焙槽电解铝厂带来了巨大的经济效益。此后, 刘业翔科研课题组一直在进行这方面的研究, 他们在电催化剂的选择、催化电极的制备及其在自焙铝电解槽上的工业应用均取得了一系列成绩^[22-26], 达到了降低自焙阳极电解过电位、从而减少电能消耗的目的。另外, 挪威的 Thonstad、郑州轻金属研究院的王平甫、刘凤琴等^[27]进行过预焙阳极添加剂的研究, 并针对降低预焙阳极炭耗开展过短期小规模工业试验。

5 改进阳极质量的途径

如前所述, 阳极是铝电解槽的心脏, 它的质量和工作状况不仅影响电解生产的正常进行, 而且对电流效率、电能消耗、甚至产品质量等技术经济指标都有极大的影响。尽管我们在阳极的物理化学及电化学性能方面开展了许多应用研究, 但由于受原料和现行生产工艺等客观条件的限制, 我国的阳极质量还是不能很好地满足生产的要求。要改变目前铝电解用炭阳极的不良工作状况, 应从如下几个方面着手。

首先, 是从根本上对铝电解用阳极进行“革命”, 那就是采用“惰性阳极技术”^[28]。长期的生产实践表明, 传统的炭阳极最大的缺陷就在于它是属于消耗性电极, 由此导致其必须进行周期性的更换, 这样必然会带来多方面的问题: 其一是大量的优质炭素原材料被消耗, 这是原料的浪费; 其二是由于需要定期更换, 导致电解槽电流分布和电解槽

热平衡经常遭到破坏, 建立新的平衡需要补充热量, 这是能源的浪费; 其三是炭阳极在工作过程中具有很高的过电位, 导致电解槽工作电压提高, 也就增加了电解过程的能耗; 其四是由于炭阳极在使用过程中不均匀氧化和炭粒脱落, 使电解质中积累炭渣, 导致电解电流效率降低; 另外, 阳极的经常更换也增加了工人的劳动强度和工时。

铝电解采用惰性阳极, 早在 19 世纪末, 铝电解工业的发明者之一, Hall 就曾提出过这样的设想。20 世纪 40 年代研究较热, 后来时断时续, 到 80 年代, 该研究领域又逐渐受到重视, 尤其是近几年, 有关该领域的研究报道甚多, 并且取得了非凡的研究进展。成功的惰性阳极可以克服传统炭阳极的所有缺陷, 当然它也有不利之处, 那就是可逆分解电压较传统的炭阳极高, 但是可以通过其它方面诸如降低阳极过电位、稳定电解操作等优势足以弥补。Jarrelt 指出^[29], 在使用惰性阳极的情况下, 若不改变电解槽的极距, 电解过程尚可比使用炭阳极节能 5%, 如果与惰性阴极配合使用, 进而可以大幅度降低电解槽极距, 则可以节能 20% 以上。

迄今为止已有不少于 60 种惰性阳极材料申请了专利, 目前研究较多的是以金属氧化物陶瓷材料作惰性阳极, 还有研究合金材料的, 不管研究哪种类型的, 其物理化学性质和电化学性质必须满足下列基本要求: 1) 良好的化学惰性, 即不溶于含有熔融铝的氟化物熔体中, 能抵抗氧化作用; 2) 优良的电化学性能, 能经受电化学氧化和抵抗阳极析出新生态氧的作用; 3) 电阻率低, 具有良好的高温电子导电性; 4) 具有良好的抗热震性能; 5) 对含氧离子反应及其放电的过电位低, 对含氟离子放电的过电位高, 并具有加速阳极反应的电催化活性。

在惰性阳极还不能立即投入工业应用之前, 围绕传统的炭阳极进行改性成为了广大科技工作者努力的方向。阳极改性的目的就是要改善阳极的化学性能和电化学性能, 以期达到降低阳极炭耗和电耗、维护电解操作的稳定和提高铝电解电流效率的目的。阳极改性的方法主要有两种: 首先是原料的选择(如选择块大、挥发分低的釜式石油焦和优质沥青)和生产工艺制度(如阳极配料比、阳极焙烧工艺等)的优化, 以此来改善阳极的物理化学性能; 另一种重要的方法就是向阳极中添加某种物质(也称阳极掺杂), 该种物质的加入, 能使得阳极在工作过程中减缓阳极与空气和 CO_2 的反应, 达到降低阳极炭耗的目的, 或者能改善阳极的电化学性能, 达到降低阳极在生产中的过电位的效果。在原料来

源和生产工艺制度均难以作较大调整的情况下, 采用后者对阳极进行改性, 不失为一种理想的节能降耗的方法。

工业应用比较成功的铝电解阳极改性技术是 80 年代中期在我国开始工业试验的锂盐阳极糊技术, 该技术是针对当时占主导优势的自焙阳极铝电解工业而研究开发的, 工业试验结果表明, 采用该技术可降低平均槽电压 50~ 60 mV, 电流效率可提高 0.54%, 每吨铝综合节能 150~ 250 kW·h。随着自焙槽向预焙槽转化, 人们对预焙阳极改性技术的认识与研究也越来越深入, 在这方面的研究报道也逐渐增多, 如何有效地借鉴自焙阳极改性技术的研究和应用经验, 进一步改善预焙阳极的物理化学及电化学性能, 从而达到降低预焙阳极铝电解工业的电耗及炭耗的目的, 值得人们思考。作者认为, 在研究预焙阳极改性技术的过程中, 以下几点不容忽视: 1) 添加剂原料的来源要广, 价格要相对低廉; 2) 添加剂合成要简单, 易于工业生产; 3) 添加剂的合成应尽量与阳极生产工艺相结合, 可以节省人力和设备的投入; 4) 添加剂的加入不对电解产品构成污染。

REFERENCES

- [1] 邱竹贤. Hall-Heroult 炼铝法在最近五十年内的重要进展[J]. 轻金属, 1995(11): 23-26.
QIU Zhu-xian. The important advance of aluminium metallurgy with Hall-Heroult way in recently 50 years[J]. Light Metals, 1995(11): 23-26.
- [2] 邱竹贤. 中国铝电解工业与技术的发展[J]. 有色金属, 1995(5): 23-27.
QIU Zhu-xian. The development of aluminum electrolysis industry and technology of China[J]. Non-ferrous Metals, 1995(5): 23-27.
- [3] YIN Er-sheng, LIU Yong-gang, XI Carrmin, et al. Developing the GP-320 cell technology in China[J]. Light Metals, 2001: 213-218.
- [4] Vanvoren C, Homsy P, Basquin J L, et al. AP 50: The pechiney 500 kA cell[J]. Light Metals, 2001: 221-226.
- [5] Hollingshead A, Scalliet R. The consumption mechanism of carbon in aluminum electrolysis[J]. Extractive Metallurgy of Aluminum, 1963(2): 142-147.
- [6] Jones S S, Hildebrand K. Carbon consumption in the process of aluminum electrolysis[J]. Light Metals 1981: 423-440.
- [7] Grjotheim K, Krohn C, Malinovsky M, et al. Aluminium Electrolysis-Fundamentals of the Hall-Heroult Process, 2nd Ed[M]. Aluminium-Verlag, Dusseldorf, Germany, 1982:

- 443 - 449.
- [8] Wharton K F, Welch B J, Hannah R C, et al. Chemical and electrochemical oxidation of heterogeneous carbon anodes[J]. *Electrochem Acta*, 1980 (25): 217 - 223.
- [9] Grjotheim K, Krohn C, Malinovsky M, et al. *Aluminium Electrolysis: Fundamentals of the Hall-Heroult Process*, 2th Ed[M]. Aluminium-Verlag, Dusseldorf, 1982.
- [10] Houston G J, Oye H A. Consumption of anode carbon during aluminium electrolysis[J]. *Aluminium*, 1985 (61): 251, 346.
- [11] 姚世焕. 质量传递、阳极质量、氧化铝性能对电解生产的影响[J]. 铝镁信息, 1994(9): 12 - 16.
YAO Shi-huan. The influence of mass transfer, anode quantity and performance of Al_2O_3 on aluminium production [J]. *Information of Al & Mg*, 1994(9): 12 - 16.
- [12] GB8742-1988. 铝电解用预焙炭阳极[S].
GB8742 - 1988. The pre-baked carbon anode for aluminum electrolysis[S].
- [13] Steward N I, Halley P H. The effect of pitch type and QI content on the processing and performance of carbon anodes—the conversion of a smelter to a medium QI, vacuum distilled pitch source[J]. *Light Metals*, 1994: 517 - 523.
- [14] Hardin E E, Ellis P J, Beilharz C L, et al. A comprehensive review of the effects of calcination at various temperatures on coke structure and properties—part II[J]. *Light Metals*, 1994: 571 - 581.
- [15] Coste B, Schneider J P. Influence of coke real density on anode reactivity consequence on anode baking[J]. *Light Metals*, 1994: 583 - 591.
- [16] Kuang Z-L, Thonstad J, Sorlie M. Effect of baking temperature and anode current density on anode carbon consumption[J]. *Light Metals*, 1994: 667 - 675.
- [17] 蔡祺凤. 论预焙阳极炭块加高的可行性[J]. 有色金属(冶炼部分), 1992(1): 42 - 46.
CAI Qi-feng. The feasibility of heightening pre-baked carbon anode[J]. *Nonferrous Metals*, 1992(1), 42 - 46.
- [18] LIU Ye-Xiang, Thonstad J. The study of electrocatalysis on molten salts in the process of aluminium electrolysis[J]. *Electrochem Acta*, 1983(28): 113 - 118.
- [19] 肖 劲, 杨建红, 刘业翔. 机械混合法制备掺杂炭阳极[J]. 中南工业大学学报, 1998(4): 341 - 343.
- XIAO Jin, YANG Jian-hong, LIU Ye-xiang. Preparation of doped carbon anodes by mechanical mixing method[J]. *Journal of Central South University of technology*, 1998(4): 341 - 343.
- [20] FENG Nai-xiang, ZHANG Ming-jie, Grjotheim K, et al. Influence of lithium carbonate addition on carbon anodes in a laboratory aluminium electrolysis cell[J]. *Carbon*, 1991, 29(1): 39 - 41.
- [21] 姚广春, 邱竹贤. 添加锂盐活化预焙阳极的研究[J]. 轻金属: 1998(12), 22 - 26.
YAO Guang-chun, QIU Zhu-xian. Study of activating pre-baked anodes by appending Li compound[J]. *Light Metals*, 1998(12): 22 - 26.
- [22] LIU Ye-xiang, WANG Xiang-min. New type electrocatalysts for energy saving in aluminium electrolysis[J]. *Light Metals*, 1995: 247 - 251.
- [23] LIU Ye-xiang, WANG Xiang-min. Progress in studies of electrocatalysis and doped carbon anodes in aluminium electrolysis cells[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 1994, 4 (2): 92 - 94.
- [24] YANG Jian-hong, LIU Ye-xiang, Thonstad J, et al. On electrocatalysis of doped carbon anodes in aluminium electrolysis, part I [J]. *Aluminium*, 1998(6): 112 - 116.
- [25] YANG Jian-hong, LIU Ye-xiang, Thonstad J, et al. On electrocatalysis of doped carbon anodes in aluminium electrolysis, part II[J]. *Aluminium*, 1998(7): 104 - 108.
- [26] YANG Jian-hong, LIU Ye-xiang. Factors affecting anodic overpotential of carbon anodes in cryolite-alumina melts[J]. *Aluminum Transactions*, 1999, 1(1): 171 - 178.
- [27] 刘凤琴, 王平甫. 铝电解炭阳极添加氟化铝的研究与应用[J]. 有色金属, 1997(5), 17 - 19.
LIU Feng-qing, WANG Ping-pu. Study and application of AlF_3 additive in carbon anode of aluminium electrolysis[J]. *Nonferrous Metals*, 1997(5): 17 - 19.
- [28] Kvande H. Inert electrodes in aluminium electrolysis cells [J]. *Light Metals*, 1999. 369 - 376.
- [29] 刘业翔. 功能电极材料[M]. 长沙: 中南工业大学出版社. 1996. 139 - 165.
LIU Ye-xiang. *Functional Electrode Materials*[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1996. 139 - 165.

Comprehension properties of carbon anode for aluminium electrolysis

YE Shao-long, XIAO Jin, DING Feng-qi, LI Jie, ZOU Zhong, LIU Ye-xiang

(College of Metallurgical Science and Engineering,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: On the base of expatiating the importance of carbon anodes used in aluminium electrolysis, the physical, chemical, and electro-chemical performance of carbon anodes used in national aluminium electrolysis were reviewed synthetically. Then the shortages of carbon anode for aluminium electrolysis were pointed out. At last, some advices about improving the quality of carbon anodes were put forward.

key words: aluminium electrolysis; carbon anode; additive; performance

(编辑 吴家泉)