

电解铝行业清洁生产评价指标体系

(征求意见稿)

编制说明

《电解铝行业清洁生产评价指标体系》编制组

二零二二年七月

目 录

| | |
|---------------------|----|
| 1 项目背景..... | 1 |
| 2 电解铝发展现状及发展趋势..... | 2 |
| 3 适用范围..... | 12 |
| 4 编制依据..... | 12 |
| 5 编制方法和技术路线..... | 14 |
| 6 指标确定说明..... | 17 |
| 7 清洁生产企业的评定..... | 25 |
| 8 标准实施的经济可行性分析..... | 26 |

1 项目背景

1.1 任务来源

根据国家发改委、环境保护部和工信部发布《清洁生产评价指标体系制（修）订计划》，（第二批），由中国环境科学研究院、本溪市环境科学研究所和辽宁石油化工大学负责起草《电解铝清洁生产评价指标体系》（以下简称体系）。

1.2 工作安排

体系严格遵循清洁生产的基本指导思想，广泛收集了国内外电解铝行业清洁生产相关的政策、法律法规、技术、标准等文献，选择典型企业开展系统地实地调研，结合电解铝企业清洁生产的现状，针对电解铝企业清洁生产审核过程中存在的重点、难点问题，在进行全面系统研究分析的基础上，完成了电解铝行业清洁生产评价指标体系开题报告和送审稿。体系给出了电解铝企业清洁生产评价指标的通用概念和术语，结合电解铝企业的生产特点，给出了电解铝行业清洁生产评价指标体系的内容框架、工作内容、基本要求以及企业清洁生产参考方案。具体工作安排过程：

（1）2016年4月本溪市环境科学研究所、辽宁石油化工大学和中国环境科学研究院签订项目合同，负责编制《电解铝行业清洁生产评价指标体系》。

（2）2016年8月31日召开课题研讨会，提交《电解铝清洁生产评价指标体系》（开题报告、初稿）及编制说明。

（3）2016年10月31日前，提交《电解铝行业清洁生产评价指标体系》（征求意见稿）及编制说明。

（4）2019年10月15日前，提交《电解铝行业清洁生产评价指标体系》（送审稿）及编制说明。

（5）2019年12月31日前，提交《电解铝行业清洁生产评价指标体系》（报批稿）及编制说明。

1.3 编制原则

（1）依据清洁生产相关法律、法规、标准进行编制；

（2）满足政府主管部门评判企业清洁生产水平，引导和推动电解铝企业实施清洁生产，鼓励先进企业，淘汰落后企业的要求；

（3）满足政府主管部门对电解铝企业新扩改建项目环评审批的要求；

（4）满足政府主管部门对企业实施排污许可证管理的要求；

（5）满足政府主管部门对企业开展自愿与强制清洁生产审核的管理要求；

（6）满足政府主管部门对企业实施市场准入、环境准入管理要求；

（7）反映电解铝企业行业特点；

(8) 促进电解铝行业清洁生产和技术进步；

(9) 促进现有电解铝企业完善清洁生产长效机制，持续提升电解铝企业清洁生产水平的要求。

1.4 指标体系编制的必要性

生态环境是关系党的使命宗旨的重大政治问题，也是关系民生的重大社会问题。清洁生产是实施可持续发展战略的重要组成部分，是实现经济和生态环境协调发展的一项重要措施。它以提高资源能源利用率、减少污染物产生量为目标，从源头抓起，实行生产全过程的污染控制，把污染物最大限度地消灭在生产过程中，既有环境效益，又有经济效益，是工业污染防治的最佳模式。近年来，许多工业企业积极推行、实施清洁生产方面，在节能、降耗、减污、增效等方面取得了很好的效果。

清洁生产是实现循环经济的主要方法，是 21 世纪工业生产的方向，也是我国工业实现可持续发展的重要保证。企业要实现清洁生产，必须有一个努力目标和判断标准。清洁生产标准就是企业努力的目标，也是企业是否实现清洁生产的判断标准。《电解铝行业清洁生产评价指标体系》（以下简称“本标准”）结合电解铝行业的特点，主要是从铝电解生产工艺过程入手，根据氧化铝-金属铝生命周期分析的原理，提出六类指标，即生产工艺与设备要求、资源能源消耗指标、污染物控制指标、产品指标、资源综合利用指标和环境管理要求。考虑我国电解铝行业的整体状况及各类不同企业之间的差别，将六类指标分为三个级别，以利于企业通过对比，了解同行业在清洁生产方面的国际领先水平、国内先进水平及国内一般水平，采取有效措施，改善生产管理，力争达到清洁生产的国际领先水平。标准的制订将进一步推动我国电解铝行业清洁生产工作的全面实施和发展，为企业开展清洁生产提供技术支持和导向，也可以为企业清洁生产绩效公告提供依据，使清洁生产工作更加标准化和规范化。

2 电解铝发展现状及发展趋势

2.1 电解铝产量

铝工业是国民经济发展的重要基础原料产业，同时也是高耗能产业。经过几十年的发展，我国已成为世界铝生产、消费大国。

随着国民经济高速发展，国内外对金属铝的需求扩大，我国电解铝工业发展迅猛，产能不断大幅度扩张，产量不断增长。我国电解铝发展总体进程是高速度发展，高水平建设，我国电解铝工业已跻身于世界电解铝工业先进行列，电解铝产量列世界第一。2018 年全球原铝产量排名前十位的国家分布情况见表 1。

表1 2018年全球原铝产量排名前十位的国家

| 国家 | 产量（万吨） | 排名 | 份额（%） |
|------|--------|----|-------|
| 中国 | 3580 | 1 | 54.05 |
| 俄罗斯 | 377.3 | 2 | 5.70 |
| 印度 | 368.3 | 3 | 5.56 |
| 加拿大 | 292.4 | 4 | 4.41 |
| 阿联酋 | 254.5 | 5 | 3.84 |
| 澳大利亚 | 157.7 | 6 | 2.38 |
| 巴林 | 101.4 | 8 | 1.53 |
| 挪威 | 125.9 | 7 | 1.90 |
| 美国 | 89.4 | 9 | 1.35 |
| 冰岛 | 86.6 | 10 | 1.31 |
| 合计 | 6623.7 | | |

资料来源：中国产量取自中国有色金属工业协会统计值，其它为 CRU

据统计，2018 年我国电解铝产量 3580 万吨，全球电解铝总产量 6623.7 万吨，我国电解铝产量占世界 54.05%。

我国电解铝企业分布广泛，全国 19 个省、自治区分布电解铝企业、近 3 年电解铝产量前十一位的分布情况见表 2。

表2 我国电解铝产量前十一位分布情况一览表 产量单位：万吨

| 省份 | 2016 年产量 | 2017 年产量 | 2018 年产量 |
|----------------|----------|----------|----------|
| 山东 | 831 | 725 | 911 |
| 新疆 | 635 | 646 | 642 |
| 河南 | 315 | 302 | 245 |
| 内蒙古 | 249 | 266 | 451 |
| 甘肃 | 231 | 250 | 253 |
| 青海 | 222 | 229 | 241 |
| 云南 | 128 | 129 | 161 |
| 宁夏 | 105 | 115 | 127 |
| 贵州 | 86 | 102 | 104 |
| 山西 | 87 | 99 | 100 |
| 广西 | / | 121 | 170 |
| 产量 | 2889 | 2984 | 3405 |
| 占全国电解铝总产量比例（%） | 88.48 | 81.75 | 95.11 |
| 全国产量 | 3265 | 3650 | 3580 |

我国是全球最大的原铝生产国，目前国内电解铝稍有盈余，但全球电解铝产销总体不足。我国和世界电解铝供需平衡见表 3。

表3 电解铝供需平衡表

单位：万吨

| 年份 | 2016年产量 | 2017年产量 | 2018年产量 |
|-----------|---------|---------|---------|
| 中国电解铝产量 | 3265 | 3650 | 3623.7 |
| 中国电解铝净进口量 | 18 | 10 | 7 |
| 中国电解铝供应量 | 3283 | 3660 | 3640.7 |
| 中国电解铝消费量 | 3253 | 3540 | 3713 |
| 中国平衡 | 30 | 120 | |
| 全球电解铝产量 | 5817 | 6380 | 6433 |
| 全球电解铝消费量 | 6080 | 6450 | |
| 全球平衡 | -263 | -70 | |

2.2 电解铝生产工艺

电解铝生产采用的是冰晶石—氧化铝熔盐电解法，是目前工业生产电解铝的惟一方法。电解铝主要生产原料是氧化铝、氟化盐（冰晶石、氟化铝等）、炭素阳极。

电解槽导入强大直流电，氧化铝、氟化盐在 950℃ 左右高温条件下熔融（电解质），电解质在电解槽内经过复杂的电化学反应，氧化铝被分解，在槽底阴极析出液态金属铝液，定期用真空抬包抽出并运至铸造部，之后经混合炉除渣，最后由连续铸造机浇铸成铝锭，冷却、打捆后即成品。

电解过程中，炭素阳极与氧反应生成二氧化碳和一氧化碳，从而不断被消耗，需要定期更换阳极块来进行补充。电解槽散发的烟气中含有氟化物、粉尘及二氧化硫等大气污染物，是电解铝企业最主要的大气污染源。

从电解槽上卸下的残极运送至阳极组装车间，经残极清理、残极压脱、磷铁环压脱、导杆矫直、钢爪清刷、涂石墨、导杆清刷、浇铸磷生铁等处理后，组装出新的阳极组。清理下的电解质由破碎系统破碎至 8mm 以下，之后返回电解槽作为阳极覆盖料使用。经残极压脱机压下的残极炭块返回阳极生产厂，用作原料使用。钢爪上磷铁环压脱后再经磷铁环清理滚筒清理掉附着在磷铁环表面的铁锈、氧化铝粉、碳粉、粉尘及电解质等返回中频无芯感应炉循环使用。磷铁环清理滚筒清理掉的附着在磷铁环表面的铁锈、粉尘及电解质块等各种杂质集中收集随时运走。

铝电解生产用的直流电，由毗邻的整流所，通过连接母线导入串联的电解槽。

电解槽产出的液态原铝，通过压缩空气形成的负压吸入出铝抬包内，再由抬包运输车送往铸造车间，由铸造机组铸造成重熔用铝锭。

电解铝生产工艺流程见图 1。

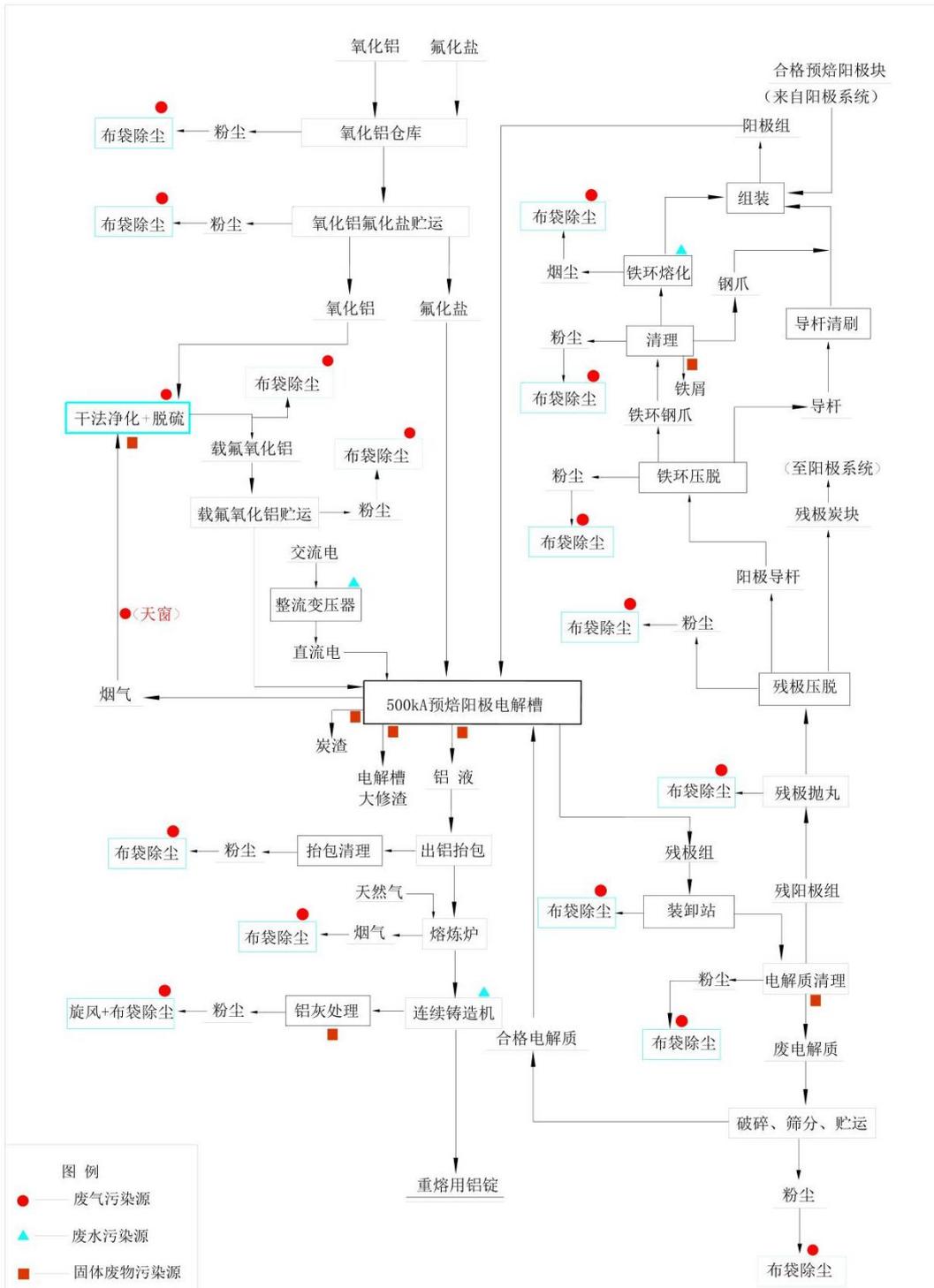


图1 电解铝生产工艺流程及排污节点图

电解铝企业用水单位为空压站空压机、整流所整流机组、阳极组装中（工）频电炉、电解烟气净化系统风机等设备间接冷却水、铸造机组冷却用水，电解铝生产用水主要为设备冷却水，一般设置循环水系统，冷却水可循环使用，循环水达到一定循环倍率后，排放浓盐水，一般为清净下水。典型企业的水量平衡见图2。

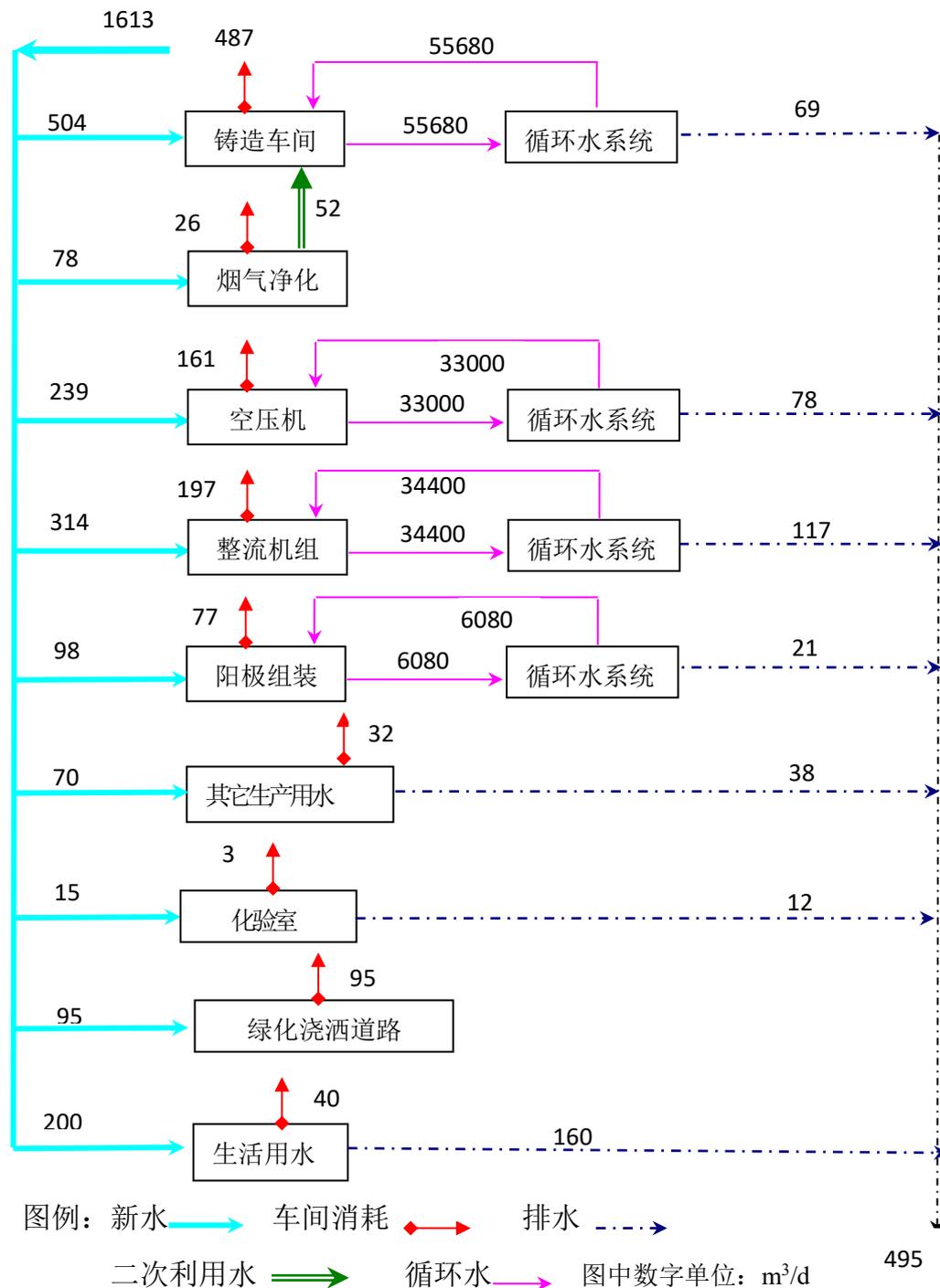


图2 典型电解铝项目水量平衡图

2.3 电解铝行业技术水平及发展趋势

2.3.1 电解槽容量

2000 年全国电解铝产量 30 万吨，其中 70% 的产量为落后自焙槽生产。到 2001 年电解铝产量 342.7 万吨，超过美国、俄罗斯，一跃成为全球第一大电解铝生产国。2004 年底全部淘汰自焙槽，2011 年淘汰 100kA 及以下预焙槽，随着《铝行业规范条件》（2013 本）要求现有电解铝生产线要达到 160kA 及以上预焙槽，目前 160kA 以下电解槽全部淘汰，目前国内 160kA 预焙槽仅有 1 家企业运行。因此，我国电解铝以高速度发展、高水平建设，目前已淘汰 160kA 以下预焙槽。最新《铝行业规范条件》（2020 本）要求“电解铝企业须采用高效低耗、环境友好的大型预焙电解槽技术，不得采用国家明令禁止或淘汰的设备、工艺。”

随着国家对电解铝产能的严格控制，产能置换项目基本采用国际先进的电解槽，200kA 电解槽及以下电解槽型产量逐年减少，大型电解槽型的产量逐年增加。

截至 2018 年底，我国电解铝合规建成产能达到 4070 万吨/年，其中 400kA 及以上的电解槽已成为铝电解生产的主流。2018 年，200kA 及以上占总能力的 98.8%；300kA 及以上占总能力的 84.1%；400kA 及以上占总能力的 68.2%；500kA 及以上占总能力的 31.7%。

至 2018 年底，我国在产电解槽型有 160kA，180/190kA，200kA，230kA，240kA，280kA，300kA，320kA，350kA、400kA、500kA、600kA 等各种容量的预焙阳极电解槽。我国电解铝工业已跻身于世界电解铝工业先进行列。

2.3.2 电解铝集中度

2005 年末，我国电解铝生产企业 95 家，生产能力 1070 万吨，企业平均产量仅 7.4 万吨，产量在 20 万吨以上的企业仅 9 家，10 万吨以上的企业仅占总数的 28.3%。

随着我国电解铝企业不断发展壮大、优胜劣汰，生产技术水平低、产量少的企业不断兼并和淘汰，电解铝行业集中度不断提高。2017 年，全国百万吨产能以上的电解铝企业集团有中国宏桥、中铝、信发集团、国电投、东方希望、酒钢集团、神火集团、曾氏集团、云铝股份、锦江集团、其亚集团等，11 家企业集团合计建成产能约占全国总产能的 70%，2017 年其合计产量约占全国总产量的 74%。因此，我国电解铝行业集中度较高，达到国际平均水平。

2.3.3 电解槽结构

铝电解技术的发展水平与铝用阴极炭块产品的种类质量密切相关。电解槽对阴极炭块的理化性能指标要求低，一般使用由普煨煤、电煨煤添加少量石墨碎生产的普通阴极炭块、半石墨质阴极炭块即可满足电解生产工艺的要求。而国际先进的电解槽采用优质石墨化炭块取代石墨质炭块，其目的之一是为了降低阴极压降，为节能或强化电流创造更大空间；其二是在阴极区域能量基本保证自耗状态下，能减少槽熔体区向四周散出热流的负荷，有利于形成完整的炉帮并维持稳定；其三是增强阴极炭块的抗钠腐蚀，延长阴极使用寿命。

2008 年之前，我国电解槽普遍采用无烟煤基的阴极与侧部碳块，采用老产品阴极糊料，

糊料的收缩率大(1.2%)，比当时国外铝厂应用的半石墨或石墨比阴极底块与侧部采用含氮化硅粘结的碳化硅砖内衬以及优质的阴极糊(收缩率 0.1~0.4%)，电解槽平均槽寿命低 700~1500 天。

近年来,我国新建、改扩建工程积极采用新式节能阴极结构技术,通过石墨化阴极炭块、可湿润阴极、全石墨质阴极碳块、碳化硅砖内衬等先进的阴极材料,改变阴极钢棒与阴极炭块的连接方式及组装形式,优化阴极导电结构。既能够降低并均化铝液中的水平电流,提高电解槽的磁流体稳定性,又能够大幅降低电解槽的阴极电压降,从而降低电解槽生产能耗,提高电流效率,延长内衬寿命。电解槽技术水平达到国际先进水平。

2.3.4 电解铝技术经济指标

据中国有色金属工业统计,2018 年我国电解铝技术经济指标见表 4。

表4 2018年我国电解铝技术经济指标一览表

| 指标名称 | 单位 | 指标 |
|--------------|-----------------------|----------|
| 原铝液直流电耗 | kW·h/t. Al | 12889.64 |
| 电解铝综合交流电耗 | kW·h/t. Al | 13532.68 |
| 原铝液交流电耗 | kW·h/t. Al | 13247.74 |
| 原铝液消耗氧化铝单耗 | kg/t. Al | 1911.81 |
| 原铝液消耗氟化盐单耗 | kg/t. Al | 18.39 |
| 原铝液消耗炭阳极(毛耗) | kg/t. Al | 477.64 |
| 原铝液消耗炭阳极(净耗) | kg/t. Al | 402.76 |
| 铝锭综合能耗(折标煤) | kg/t. Al | 1661.47 |
| 电解铝新水单耗 | m ³ /t. Al | 1.02 |

2.3.5 电解铝技术发展趋势

(1) 电解槽向着大容量、节能降耗发展

铝电解槽是电解铝行业的关键性设备,铝电解槽技术实际上代表着一座铝厂的装备及技术水平。随着国际上能源、原材料、劳务等费用不断上涨,环境保护要求日趋严格,因此,世界铝工业发展的总趋势是采用高产能、高效率、节省投资、节省能源、计算机智能化控制和新的阴、阳极技术的大容量点式下料预焙阳极电解槽。

我国电解槽容量从 160kA 至 600kA,电解槽容量跨度大。随着节能降耗减排的深入,采用高效节能大容量电解槽替代低容量电解槽,低容量电解槽产量比将进一步缩小。

(2) 电解槽控制向着低温、低电压、低分子比发展

在国家科技部和有色金属工业协会强力推动下,低温低电压铝电解新技术在电解铝行业得到广泛应用。电解温度为 930~935℃,电解质中的锂盐含量为电解质质量分数的 2.8%~3.0%,电解质分子比为 2.3~2.5,电解质初晶温度降低了 15~20℃,直流电耗降低了 300~400kW·h/t·Al,电流效率提高了 1.5%~2%。

(3) 优化电解槽,提高电流效率

建立了铝液、阴极碳块、钢棒及组装同步优化组合的稳流模式，创新了电解槽能量平衡设计理念，开发出稳流高导钢棒，解决了铝电解槽低电压下难以获得高电流效率、操作难度大和早期破损机率高、槽寿命短的技术难题，具有显著的创新性。试验槽平均铝液直流电耗达到 $11805\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}\cdot\text{Al}$ ；该系列推广应用两年以来，平均铝液直流电耗长期稳定保持在 $12300\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}\cdot\text{Al}$ 以下，吨铝节电 $700\text{kW}\cdot\text{h}$ ，节能效果显著。该技术大幅提升电解铝企业能源利用效率、经济效益。

(4) 其它新技术应用

“铝电解槽智能打壳管控系统”开发出铝电解槽智能打壳管控系统，解决了无法直接检测下料口状态，无法智能打壳通孔的难题，提升了槽况稳定性，降低能耗及工人劳动强度，减少温室气体排放等，整体技术达到国家先进水平。

“铝冶炼吨铝直流电耗低于 $12000\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电解铝关键工艺”：使直流电耗降至 $11840\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}\cdot\text{铝}$ ，吨铝直流电耗指标达到国际先进水平。

“电解槽自控先进技术的开发应用”：结合国内氧化铝质量，操作管理特点的基础上，开发了智能控制的先进技术：铝电解槽的电流效率提高到 $90\%\sim 95\%$ （中国铝业.2013）

“异性阳极铝电解槽结构”：槽平均电压 $3.75\sim 3.78\text{V}$ 直流电耗 $12281\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ （实验 160kA ）（东北大学）

“导流结构铝电解槽节能技术”：槽压平均为 3.74V 直流电耗 $11912\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ （ 160kA ）（中铝郑州研究院）氟化铝、冰晶石等溶剂的 $20\sim 28\text{kg}/\text{t}$ 。在生产过程中，加入槽内的氟化物分解后，部分进入槽内衬成为固体污染物，部分随电解烟气以氟化氢、四氟甲烷等含氟气体排气，进入干法净化系统。

“新概念母线技术”：铝液和电解质流速降低 30% ，减小铝液-电解质界面变形，大幅提高电解槽的稳定性，实现电解槽节能、降耗。简化母线配置，可缩短槽间距 0.3m 。

“网络化自均衡母线技术”：降低了电解槽非常规状态下（包括停槽期间、效应期间、换极初期等）阴、阳极电流分布不均衡性在电解系列中的传导，降低了非常态槽及其上、下游槽的电流分布及磁场波动，进一步提高了电解槽的磁流体稳定性和可操作性。

“数字化电解槽技术”：阳极电流在线监测、电解质温度在线测量、两水平测量、槽壳温度测量等，实现对电解槽的实时在线监测，做到对电解槽“透明化管理”和长期稳定运行。

2.4 环保治理水平及发展趋势

2.4.1 大气污染治理

对电解槽烟气的治理，国内外均采用的是氧化铝吸附干法净化技术，这是一种成熟、高效的净化技术。对氟的净化效率在 99% 以上，氟排放浓度小于 $3\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，粉尘排放浓度小于 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，可稳定达标排放。

电解烟气二氧化硫治理技术：二氧化硫排放主要取决于阳极的硫含量，通过采用中低硫阳极，二氧化硫可达标排放。随着阳极生产的原料中低石油焦的供应日趋紧张，尤其是重点

地区电解铝企业超标状况显出。目前，重点区域电解铝企业、内蒙古和新疆等地区电解铝企业设置了电解烟气脱硫设施，采用石灰石-石膏湿法、半干法等脱硫设施，二氧化硫排放浓度小于 35mg/Nm³，氟排放浓度小于 1mg/Nm³。

国内外电解铝企业污染物排放对照见表 5。目前，我国先进电解铝企业电解烟气排放指标已达到国际先进水平。

表5 国内外电解铝污染物排放标准对照表

| 国家或组织 控制项目 | | 美国 标准 | 欧盟 标准 | 世行 标准 | 中国控制要求 | | 我国先 进企业 指标 |
|---------------|-------------------------|----------|----------|----------|--------|-----|------------------|
| | | | | | 一般 | 重点 | |
| 氟化物 | 排放量 kg/t-Al | 0.6 | — | — | 0.6 | | 0.2 |
| | 排气筒浓度 mg/m ³ | — | 1.5 | 0.8 | 3 | 3 | 0.5 |
| 氟化氢 | 排放量 kg/t-Al | 0.6 | — | — | — | — | <0.2 |
| | 排气筒浓度 mg/m ³ | — | 1 | 0.5 | — | — | <0.5 |
| 粉尘 | 排气筒浓度 mg/m ³ | — | 2~5 | 1~5 | 20 | 10 | 5 |
| 二氧化硫 | 排气筒浓度 mg/m ³ | — | — | 50~200 | 200 | 100 | ≤35 |

2.4.2 废水治理

电解铝生产废水主要是铸造冷却、空压机、阳极组装、风机等设备循环冷却系统排水、含化验废水及软水制备废水等辅助生产废水。铝冶炼生产废水一般采用混凝沉淀法净化处理，可满足排放标准的要求排放或回用。

2.4.3 废渣处置

(1) 电解槽大修渣

电解槽约 5~6 年大修一次。电解槽大修时，排出阴极炭块、耐火材料、扎糊、保温砖、耐火粉、沉积物等。对照《国家危险废物名录》（2016 年版）电解槽大修渣为危险固体废物（危废代码为 HW48 有色金属冶炼废物 321-023-48 电解铝过程中电解槽维修及废弃产生的废渣）。

电解铝企业电解槽大修渣主要外委有资质单位处置，主要处置方式：

A.设置危险废物填埋场：将电解槽大修渣填埋安全处置。

B.依托水泥窑协同处置：阴极炭块作为水泥窑燃料使用，含氟物质作为水泥有益元素进入产品。

C.无害化处理：电解槽大修渣无害化处置，主要方法有湿法处理方案、火法处理方案。

(2) 捞炭渣

电解槽生产过程中产生含炭渣，需定期清理。生产过程中一般采用机械捞炭作业，捞炭渣主要含氧化铝、氟化盐及少量炭渣。捞炭渣因吸附氟化物属危险废物（危废代码为 HW48 有色金属冶炼废物 321-025-48 电解铝过程中产生的盐渣、浮渣）。

捞炭渣主要采取综合回收措施回收电解质、炭粉，电解质返回电解槽作为配料使用，炭

粉可作为燃料综合利用。

(3) 残极

预焙阳极炭块在铝电解槽上使用一个周期后，更换下来的残阳极炭块。残阳极是预焙阳极炭块生产的原料，预焙阳极炭块生产过程中，其原始配料由原料煅后石油焦、生料和熟料（残极）组成，铝用炭素预焙阳极炭块配料工序中将残极作为配料使用，实际生产中残极的配比在 22~25%之间，熟料的使用可保证铝用炭素预焙阳极炭块的理化性质。电解铝企业设置残极处理工序，将残极电解质回收利用，表面处理干净的残极作为预焙阳极配料利用。

(4) 铝灰渣

混合炉在生产过程中产生铝熔渣，主要含铝、氧化铝、氯化钾、氯化钠。铝灰渣一般外委处置。

(5) 收尘灰

氧化铝贮运散发氧化铝粉尘，阳极组装及残极系统残极抛丸清理、残极破碎、残极压脱、电解质破碎、电解质清理、钢爪抛丸清理、磷铁环压脱、导杆清理、残极处理等系统产生氧化铝粉尘、电解质粉尘及其它粉尘。设置布袋除尘系统净化处理，绝大多数的除尘灰含电解槽生产原料返回电解槽利用，不能利用炭尘外委处置。

(6) 磷铁环滚筒清理机及钢爪抛丸磁选含铁杂质

磷铁环在滚筒清理机清理时产生杂质，钢爪抛丸时产生杂质，杂质主要含铁、铝和碳 a，杂质经磁选出铁，磁选后其他粉料与破碎的电解质一起加入电解槽中。磁选得到的铁外售给钢铁厂综合利用。

(7) 废矿物油

厂内生产及公辅系统等各类机械设备在工作过程中产生废矿物油，为危险废物（HW08 废矿物油与含矿物油废物 900-217-08 使用工业齿轮油进行机械设备润滑过程中产生的废润滑油）。废矿物油一般在危险废物暂存库临时堆存，最终委托有资质单位进行安全处置。

(8) 污泥

电解铝生产用水主要为设备冷却水，与工艺用水不接触。生产废水主要以循环冷却水排污水为主，主要污染物为悬浮物和盐类，废水中氟主要来源于初期雨水。循环水系统、生产废水处理站污泥属于一般固体废物。

(9) 废弃膜组件

生产废水处理站反渗透装置需要定期更换反渗透装置的膜元件，膜元件中可能含有微量氟化物。一般固体废物由膜元件厂家回收。

(10) 烟气脱硫系统的固体废物

电解烟气设置脱硫系统，烟气脱硫吸收剂与二氧化硫产生固体废物。当采用石灰石/石灰作为吸收剂时，产生脱硫石膏，脱硫石膏为一般工业固体废物。

2.4.4 无组织排放控制

电解铝工业大气污染主要是电解车间的无组织排放，以及物料破碎、转运、装载、贮存

等过程中的产生的扬尘导致。目前部分电解铝企业的电解槽密闭罩存在破损现象，部分电解铝企业的阳极组装及残极处理的残极处理设备机械化水平低，电解质清理为人工操作，难以集气，无组织排放量较大。电解铝企业无组织管控应从以下入手：

(1) 加强管理，及时修复破损的电解罩集气罩，保证电解槽集气效率；

(2) 对电解槽的集气方式、残极冷却箱及烟气治理等方面研究，提高电解槽集气效率，降低无组织排放；

(3) 残极处理单元实现机械化作业，全面提高装备水平，各产点配置收尘器，尽可能将无组织排放转有组织排放，从而降低无组织排放量；

(4) 加强对厂区内道路扬尘治理，道路应进行全硬化并及时清扫，定期洒水抑尘。

3 适用范围

本标准适用于电解铝行业的清洁生产审核、清洁生产潜力与机会的判断、清洁生产绩效评定和清洁生产绩效公告制度，也适用于环境影响评价和排污许可证等环境管理制度。

电解铝行业包括现有、新建、扩建、改建的电解铝生产企业。

4 编制依据

4.1 制订标准的依据

(1) 中华人民共和国清洁生产促进法（中华人民共和国主席令第 54 号）。

(2) 发改委、环保总局、科技部等，“关于加快推行清洁生产的意见”（2003 年 10 月 20 日）。

(3) 国家环境保护总局，“清洁生产审核暂行办法”（环发〔2004〕16 号）。

(4) 2005 年环境保护标准计划：“清洁生产标准 25 项”。

(5) 《铝行业规范条件》等相关产业政策。

(6) 《清洁生产标准 制订技术导则》。

(7) 《清洁生产指标体系编制通则》（试行稿）。

4.2 相关法律法规及行业产业政策具体要求

《中华人民共和国大气污染防治法》第七条规定，“企业事业单位和其他生产经营者应当采取有效措施，防止、减少大气污染，对所造成的损害依法承担责任。”第十八条规定，“企业事业单位和其他生产经营者建设对大气环境有影响的项目，应当依法进行环境影响评价、公开环境影响评价文件；向大气排放污染物的，应当符合大气污染物排放标准，遵守重点大气污染物排放总量控制要求”。第四十八条规定，“钢铁、建材、有色金属、石油、化工、制药、矿产开采等企业，应当加强精细化管理，采取集中收集处理等措施，严格控制粉尘和气态污染物的排放”。第四十三条规定，“钢铁、建材、有色金属、石油、化工等企业生产过程中排放粉尘、硫化物和氮氧化物的，应当采用清洁生产工艺，配套建设除尘、脱

硫、脱硝等装置，或者采取技术改造等其他控制大气污染物排放的措施”。根据法律规定，电解槽及其他生产装置产生的含颗粒物、二氧化硫、氟以及其他有毒有害物质的废气均须进行防治污染处理。

《中华人民共和国水污染防治法》第四十三条规定，“企业应当采用原材料利用率高、污染物排放量少的清洁生产工艺，并加强管理，减少水污染物的产生”。

《中华人民共和国清洁生产促进法》第二十六条规定，“企业应当在经济技术可行的条件下对生产和服务过程中产生的废物、余热等自行回收利用或者转让给有条件的其他企业和个人利用”。第二十八条规定，“企业应当对生产和服务过程中的资源消耗以及废物的产生情况进行监测，并根据需要对生产和服务实施清洁生产审核。污染物排放超过国家和地方规定的排放标准或者超过经有关地方人民政府核定的污染物排放总量控制指标的企业，应当实施清洁生产审核。使用有毒、有害原料进行生产或者在生产中排放有毒、有害物质的企业，应当定期实施清洁生产审核，并将审核结果报告所在地的县级以上地方人民政府环境保护行政主管部门和经济贸易行政主管部门。”

《有色金属工业环境保护工程设计规范》（GB 50988-2014）规定：“有色金属工业环境保护设计必须坚持清洁生产、以防为主、防治结合、以新带老、综合治理、达标排放、总量控制的原则。”规范设置了“清洁生产”专章，从原材料、生产工艺、技术和装备、余热利用、废物回收、清洁生产审计等方面作出了规定，要求新建冶炼项目生产用水重复利用率宜在90%以上。

《铝行业规范条件》（2020年本）对电解铝工业行业新建和现有项目的规模、工艺与有关技术指标作出了明确规定，具体如下：

（1）电解铝企业须采用高效低耗、环境友好的大型预焙电解槽技术，不得采用国家明令禁止或淘汰的设备、工艺。

（2）电解铝企业铝液综合交流电耗应不大于13500千瓦时/吨（不含脱硫脱硝）。

（3）电解铝企业氧化铝单耗原则上应低于1920千克/吨铝，原铝液消耗氟化盐应低于18千克/吨铝，炭阳极净耗应低于410千克/吨铝，电解铝生产单位产品取水量定额应满足《取水定额 第16部分：电解铝生产》（GB/T18916.16）中规定的新建企业取水定额标准。鼓励电解铝企业大修渣、铝灰渣等综合利用以及电解槽余热回收利用。

（4）电解铝企业污染物排放应符合国家或地方相关排放标准要求，

（5）电解铝企业应按《排污单位自行监测技术指南 有色金属冶炼》（HJ 989）等相关标准规范开展自行监测。其中，应安装、使用自动监测设备的，须依法安装配套的污染物在线监测设施，与生态环境主管部门的监控设备联网，保障监测设备正常运行，鼓励开展厂内降尘监测。物料储存、转移输送、卸载和工艺过程等环节的无组织排放须加强控制管理，制定相应的环境管理措施，满足有关环保标准要求。应推行清洁生产，降低产污强度，氧化铝、电解铝企业应依法定期实施清洁生产审核，并通过评估验收。

（6）企业须依法取得排污许可证后，方可排放污染物，并在生产经营中严格落实排污

许可证规定的环境管理要求。固体废物贮存、利用、处置应当符合国家有关标准规范的要求，严格执行危险废物管理计划、申报登记、转移联单、经营许可等管理制度，并应通过全国固体废物管理信息系统如实填报固体废物产生、贮存、转移、利用、处置的相关信息，防止二次污染。

(7) 企业两年内未发生重大或者特别重大环境污染事件和生态破坏事件。

十九大报告提出，形成绿色发展方式和生活方式，坚定走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路，建设美丽中国，为人民创造良好生产生活环境，电解铝行业也应走绿色发展道路，目前大部分电解铝企业对有组织排放控制较严，但是无组织排放如物料运输、自动化、各种中间料厂内装运管理相对较松散，因此本体系将提出相关管理要求。

5 编制方法和技术路线

5.1 制定清洁生产标准的基本原则

“清洁生产标准”要符合国家对电解铝行业现行的各项产业政策、法律、法规，按照产品生命周期分析理论的要求，体现全过程污染预防思想，并覆盖从原材料的选取到生产过程和产品的处理处置等各个环节。具体原则如下：

- (1) 符合清洁生产思路，体现预防为主的原则；
- (2) 符合电解铝行业的技术标准和规定；在某种程度上严于本行业的技术标准和规定；
- (3) 促进电解铝行业向产能集中化、设备大型化、工艺先进化、生产清洁型、技术先进型方向发展；
- (4) 从工艺装备、资源能源消耗、资源综合利用、污染物产生与排放、清洁生产管理等几个方面定性或定量地设定清洁生产基准值；
- (5) 基准值设定时综合考虑国内外电解铝工业现有技术水准和管理水平，并要有一定的激励作用；
- (6) 对难以量化、不宜设定基准值的指标，给出明确的限定或说明；
- (7) 力求实用和可操作，尽量选取电解铝行业 and 环境保护部门常用的指标，以易于企业和审核人员的理解和掌握。

5.2 指标的分级

按照《清洁生产评价指标体系编制通则》的要求，根据行业特点，对一级指标和二级指标在评价方法中的权重做出具体规定，并说明权重，将二级指标的基准值分为三个等级：

- (1) I级为清洁生产先进（标杆）水平
此级指标可作为清洁生产审核时的参考，以通过比较发现差距，从而寻找清洁生产机会。国际清洁生产先进水平指标采用公开报道的国际先进水平数据。

- (2) II级为清洁生产准入水平
此级指标可作为国内企业清洁生产绩效公告的依据。国内清洁生产先进水平指标采用

公开报道的国内先进水平数据，并参考有关的统计数据。

(3) III级为清洁生产一般水平

该级指标是根据我国电解铝行业实际情况及有关的统计数据，按清洁生产对生产全过程采取污染预防措施要求所应达到的水平指标而形成的。

5.3 标准编制技术路线

本标准的制订严格按照清洁生产的定义，遵循生命周期分析的方法确定九个方面的指标，即：生产工艺与装备要求、能源消耗、水资源消耗、原/辅料消耗、资源综合利用、污染物排放、温室气体排放、产品特征和清洁生产管理。立足行业特征和企业实际，根据国家颁布的清洁生产促进法，以及一系列有关清洁生产、环境保护方面的法规、标准和规范，参照国内外先进经验，将行业发展和清洁生产法规有机地结合，通过对企业生产环节提出要求，实现企业生产的可持续发展。

标准编制技术路线如图 3。

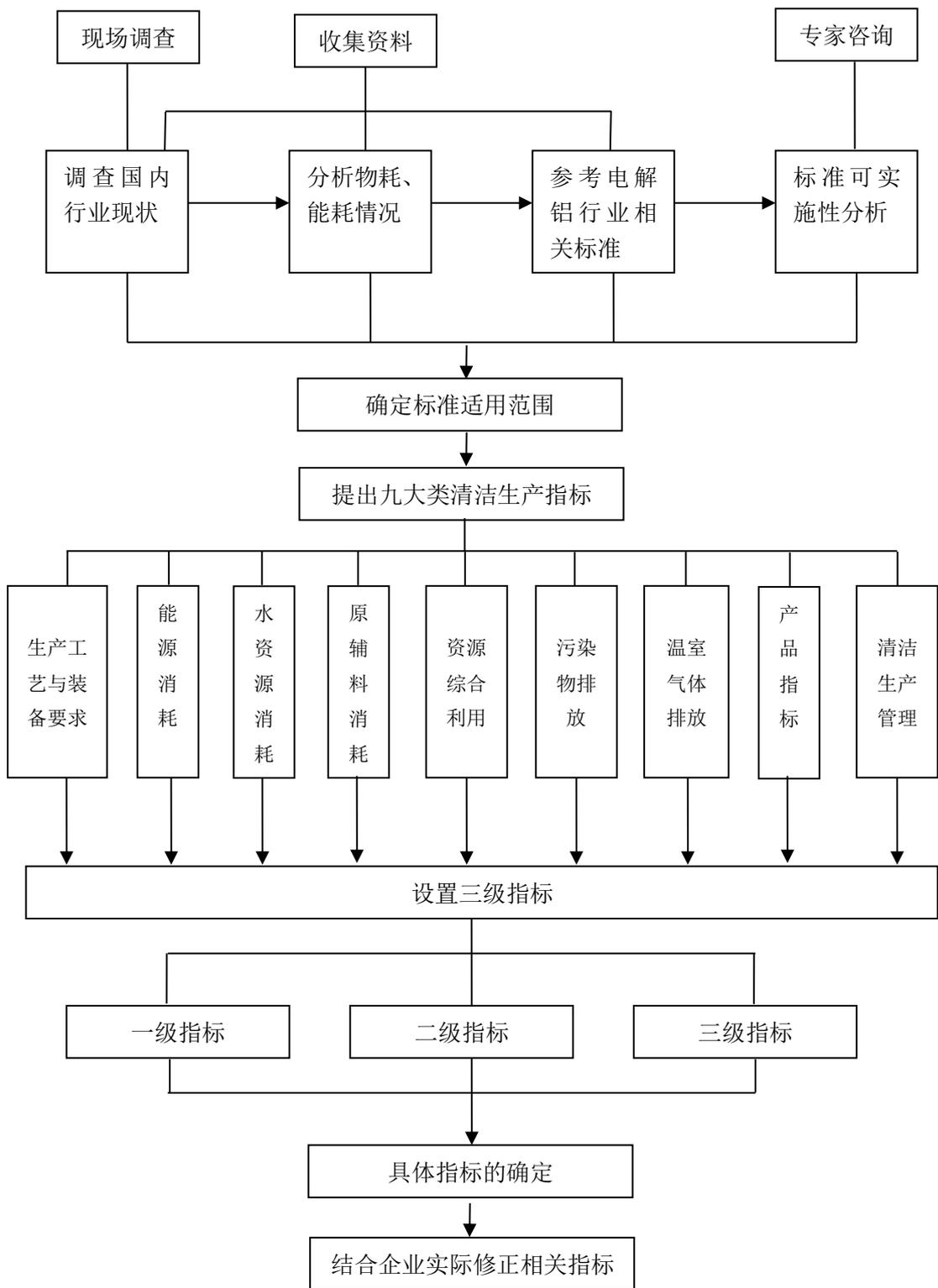


图3 标准编制技术路线

6 指标确定说明

6.1 指标选取说明

本标准在对国内电解铝工业现行数据统计分析的基础上，最终确定分产品从六个方面提出指标体系作为一级指标。包括：生产工艺与装备要求、能源消耗、水资源消耗、原/辅料消耗、资源综合利用、污染物排放、温室气体排放、产品特征和清洁生产管理等九类指标。

6.2 生产工艺与装备要求的确定

6.2.1 氧化铝、氟化盐贮存

电解铝企业的袋装氧化铝、氟化盐应贮存在封闭仓库内，散装氧化铝应贮存在封闭料仓，避免物料散发和流失，因此，原料贮存采用密闭贮库（仓）。

6.2.2 氧化铝输送

根据《铝电解厂工艺设计规范》（GB50850-2013）：

- （1）稀相气力输送距离不宜超过 400m，可用于槽管车至氧化铝中间储仓的粉料输送。
- （2）浓相气力输送距离不宜超过 1200m，可用于氧化铝中间储仓或袋装料仓库至电解车间日用贮仓的远距离物料输送。
- （3）超浓相气力宜采用短距离输送，可用于向电解槽输送新鲜氧化铝或载氟氧化铝。
- （4）风动溜槽宜采用短距离输送。
- （5）气力提升机宜采用短距离提升物料。
- （6）气垫带式输送方式宜采用短距离输送。

氧化铝输送方式根据氧化铝输送距离及要求选择不同输送方式，宜降低破损铝、减少能耗、避免物料散发和流失，因此，氧化铝输送要求为浓相输送或其它封闭输送方式。

6.2.3 氟化盐输送

氟化盐一般为袋装、仓库贮存，袋装料仓库至电解车间日用贮仓的距离约 1000m，最佳输送方式为浓相气力输送，因此，氟化盐输送要求为浓相输送。

6.2.4 氧化铝上料段

新鲜氧化铝或电解烟气净化系统返回的载氟氧化铝向电解槽加料的氧化铝上料段最佳采用超浓相输送方式，因此，氧化铝上料段输送方式要求超浓相输送。

6.2.5 氟化铝上料段

氟化铝上料段采用的方式有浓相输送上槽、汽车罐车运输、天车加料或专用地面氟化铝加料车的供配料方式，其中浓相输送、专用地面氟化铝加料车的上槽加料均在封闭方式进行，可避免物料散发，将浓相输送或加料车等封闭加料方式确定为 I 级基准值、II 级基准值。天车加料或其它机械加料方式在电解铝企业比较普遍，将天车加料或其它机械加料方式确定为

III级基准值，以满足清洁生产基本要求。

6.2.6 电解电流强度

电解电流强度是电解铝生产的重要指标，体现了电解槽容量，电解电流强度大小代表着铝厂的装备及技术水平。目前，我国在产运行的系列电解槽最大电解电流强度为 600kA，500kA 及以上电解槽的生产能力为 31.7%，400kA 及以上电解槽的生产能力为 68.2%，将电解电流强度 I 级基准值确定为 500kA，II 级基准值确定为 400kA。《产业结构调整指导目录（2011 年本）》明确现有电解铝生产线要达到 160kA 及以上预焙槽，因此将III级基准值确定为 160kA，符合清洁生产基本要求。

6.2.7 电解槽平均电压

电解铝直流电耗与电解槽平均电压成正比，电解槽平均电压越低，电解铝直流电耗就越低，《铝行业规范条件（征求意见稿）》中要求“不断优化降低槽电压”。2008 年前，我国电解槽平均电压约 4.2V，国外先进的电解槽平均电压 4.1V，国外先进的电解槽平均电压比国内约低 100mv，国内吨铝电耗比国外先进指标高出 300kW·h/t.A1。近年来我国积极推广应用低温低电压工艺运行技术，我国电解槽平均电压基本在 4.1V 内，试验槽最佳达到 3.74V，正常运行可稳定控制在 3.9V 内，节能降耗十分明显。根据国内电解槽平均电压的实际情况，将电解槽平均电压 I 级基准值确定为 3.9V，II 级基准值确定为 4.0V，III级基准值确定为 4.1V。

6.2.8 电解槽集气效率

铝电解槽由排烟道、水平罩板、可移动开启的侧部槽罩板组成，电解槽集气效率表征进入电解烟气净化系统治理的电解烟气量与总烟气量的比率，电解槽集气效率越高，电解烟气治理率越高，相应回收物料越多，无组织排放量越低，对环境的影响越小。电解槽集气效率是电解铝企业重要指标。

《铝电解废气氟化物和粉尘治理工程技术规范》（HJ 2033-2013）、《铝电解厂通风除尘与烟气净化设计规程》（GB 51020-2014）要求电解槽集气效率 $\geq 98.5\%$ 。近年随着我国电解槽积极采用上烟道多段式集气、双烟管排烟系统、残极冷却箱等先进集气技术，电解槽集气效率可达 99.3%及以上。根据国内电解槽集气效率的实际情况，将电解槽集气效率 I 级基准值确定为 99.3%，II 级基准值确定为 99.0%，III级基准值确定为 98.5%。

6.2.9 电解烟气净化系统

国内外电解铝厂均采用氧化铝吸附干法净化技术，干法净化技术使用电解原料氧化铝作吸附剂，吸附氟化氢成为载氟氧化铝，经高效布袋除尘器分离回收载氟氧化铝返回电解槽利用，实现闭路循环，不存在二次污染问题。氧化铝吸附干法净化设施是电解铝生产工艺和环境治理二元紧密结合的生产设施。国外先进的电解铝企业基本仅采用氧化铝吸附干法净化技术治理电解烟气。通过氧化铝吸附干法净化措施排放口污染物可达标排放。

近年来，随着我国环境压力逐步提升，我国电解烟气净化设施在氧化铝吸附干法净化技

术基础上,增加了脱硫设施,脱硫设施吸附剂对二氧化硫和氟化氢均有吸收净化效果,因此,进一步降低了电解烟气的污染物排放量。

因此,电解烟气净化系统的 I 级基准值、II 级基准值确定为全密闭集气,机械排烟,氧化铝吸附干法回收净化系统加脱硫净化措施,III 级基准值确定为全密闭集气,机械排烟,氧化铝吸附干法回收净化系统。

6.3 能源消耗指标的确定

6.3.1 电流效率

电流效率即实际铝产量与理论铝产量之比的百分数,电流效率是电解铝生产重要的技术经济指标,可反应电解铝企业装备水平、操作管理水平的高低。

国际先进的电解铝企业的电流效率在 94%以上,《铝行业规范条件》(2013 本)中规定:新建和改造电解铝企业电流效率原则上不应低于 93%,现有电解铝企业电流效率原则上不应低于 92%。将电流效率 92%作为 III 级基准值,II 级基准值 93%,I 级基准值 94%。

6.3.2 铝液交流电耗

铝液交流电耗是电解铝生产耗电指标。《铝行业规范条件》(2020 本)中规定:电解铝企业铝液综合交流电耗应不大于 13500kW·h/t。

《电解铝企业单位产品能源消耗限额》(GB 21346-2013)要求:现有电解铝企业铝液交流电耗 $\leq 13700\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$,新建电解铝企业铝液交流电耗 $\leq 12750\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$,电解铝企业先进值为铝液交流电耗 $\leq 12650\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

2018 年我国电解铝企业平均铝液交流电耗 13247.74kW·h/t。结合我国电解铝实际、标准和规范条件的要求,铝液交流电耗 I 级基准值确定为 12650kW·h/t,II 级基准值为 12750kW·h/t,III 级基准值为 13350kW·h/t。

6.3.3 氧化铝单耗

理论计算氧化铝单耗为 1907kg/t·Al。《铝行业规范条件》(2020 本)中规定:电解铝企业氧化铝单耗原则上应低于 1920kg/t·Al。2018 年我国电解铝企业平均氧化铝单耗 1911.81kg/t·Al。结合我国电解铝企业运行实际情况,氧化铝单耗 I 级基准值确定为 1910kg/t,II 级基准值为 1915kg/t,III 级基准值为 1920kg/t。

6.3.4 炭阳极单耗(净)

《铝行业规范条件》(2020 本)中规定:炭阳极净耗应低于 410kg/t。

2018 年我国电解铝企业炭阳极净耗 402.76kg/t,先进的电解铝企业炭阳极净耗 400kg/t。炭阳极单耗(净) I 级基准值确定为 400kg/t,II 级基准值为 405kg/t,III 级基准值为 410kg/t。

6.3.5 氟化铝单耗

《铝行业规范条件》(2020 本)中规定:原铝液消耗氟化盐应低于 18kg/t·Al。

电解铝生产过程中，以氟化盐为熔剂。在我国先进的电解槽低分子控制生产过程，氧化铝中微量钠在电解槽内自我合成冰晶石即可满足生产要求，仅在分子比发生变化时加入冰晶石，调整分子比。因此，日常加到电解槽的氟化盐以氟化铝为主。

国际先进的电解铝企业的氟化铝消耗为 $12\sim 14\text{kg/t}\cdot\text{Al}$ 。我国大型电解槽氟化铝单耗先进的设计指标为 $12\text{kg/t}\cdot\text{Al}$ 。

氟化铝单耗 I 级基准值确定为 13kg/t ，II 级基准值为 15kg/t ，III 级基准值为 16kg/t 。

6.3.6 冰晶石单耗

目前，我国先进的电解槽日常生产基本不加冰晶石，仅在电解槽启动时、电解槽运行时槽内分子比低时少量加入。冰晶石单耗 I 级基准值确定为 0.5kg/t ，II 级基准值为 1.0kg/t ，III 级基准值为 1.5kg/t 。

6.4 水资源消耗指标的确定

6.4.1 生产水重复利用率

电解铝企业生产系统用水主要是冷却水为主，基本均设置循环水系统，冷却水循环使用。电解铝企业一般设置二次利用水系统，生产废水经生产废水处理系统净化后综合利用。

根据我国生产用水实际情况，生产水重复利用率 I 级基准值确定为 99.5% ，II 级基准值为 99.0% ，III 级基准值为 98.5% 。

6.5 原/辅材料消耗指标的确定

6.5.1 原辅材料合格率

电解铝生产的原辅料主要有氧化铝、氟化铝、冰晶石和碳素阳极。电解铝企业使用的原料应符合国家或行业产品标准的要求，因此，原辅材料合格率 I 级基准值、II 级基准值、III 级基准值均为 100% 。

6.6 资源综合利用指标的确定

6.6.1 粉尘综合利用率

电解铝企业对各扬尘点均设置集气罩集气、机械排烟、布袋除尘器除尘设施，除阳极组装的磷铁系统等除尘器等回收含铁粉尘、炭粉等难以返回生产系统使用，其它粉尘可返回生产系统利用。

根据我国通风除尘系统除尘器回收粉尘利用情况，粉尘综合利用率 I 级基准值确定为 99.5% ，II 级基准值为 99.0% ，III 级基准值为 98.5% 。

6.6.2 废电解质回收加工利用率

从残极表面清理下来的废电解质只是被残极带出电解槽，与电解槽内电解质成分相同，废电解质经破碎加工后可返回电解槽使用。因此，废电解质 I 级基准值、II 级基准值、III 级基准值均确定为 100% 回收加工利用。

6.6.3 残极回收并加工利用率

残极内主要成分为炭阳极相同，可作为炭阳极生产原料利用。电解铝企业设置残极处理工序，残极经清理干净后，经破碎机破碎，贮存残极仓库内，最终返回阳极生产企业配料使用（配套阳极生产系统的电解铝企业直接送阳极生产系统，无配套阳极生产系统的电解铝企业返回阳极供应生产厂或外委综合利用）。因此，残极 I 级基准值、II 级基准值、III 级基准值均确定为 100%回收并加工利用（包含外委综合利用）。

6.7 污染物排放控制指标的确定

6.7.1 全氟排放量

全氟排放量包括电解烟气净化系统排放口和电解槽未被集气系统捕集烟气进入电解车间的无组织排放的氟化物（以氟计）量。

《铝行业规范条件》（2013 本）中规定：电解铝项目氟排放量必须低于 0.6kg/t。

国际先进的全氟排放量为 0.3kg/t。我国电解铝企业对电解槽密闭及集气采取先进的集气技术，对电解烟气增加了脱硫系统，因此，我国先进电解铝企业全氟排放量可控制在 0.2kg/t。

全氟排放量 I 级基准值确定为 0.2kg/t，II 级基准值为 0.3kg/t，III 级基准值为 0.6kg/t。

6.7.2 电解烟气净化系统排放口全氟排放浓度

电解烟气净化系统采用氧化铝吸附干法净化设施，氟化物排放浓度可控制在 $3\text{mg}/\text{Nm}^3$ 内。增设脱硫系统后，氟化物排放浓度可控制在 $1\text{mg}/\text{Nm}^3$ 内，采用高效湿式石灰石石膏法脱硫设施时氟化物排放浓度可控制在 $0.5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 内。

美国排放标准对排放口全氟排放浓度控制指标为 $0.6\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，其中氟化氢排放浓度控制指标为 $0.6\text{mg}/\text{Nm}^3$ ；欧盟氟排放浓度控制指标为 $1.5\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，其中氟化氢排放浓度控制指标为 $1.0\text{mg}/\text{Nm}^3$ ；世界银行排放浓度控制指标为 $0.8\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，其中氟化氢排放浓度控制指标为 $0.8\text{mg}/\text{Nm}^3$ ；我国排放标准为 $3.0\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

根据我国电解烟气净化系统实际运行效果，电解烟气净化系统全氟排放浓度 I 级基准值确定为 $0.5\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，II 级基准值为 $1.0\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，III 级基准值为 $3.0\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

6.7.3 电解烟气净化系统排放口颗粒物排放浓度

目前，我国电解铝企业氧化铝吸附干法净化设施排放口颗粒物排放浓度可控制在 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 内，可满足一般区域排放标准的要求。特别区域的电解铝企业提高布袋除尘器除尘效率或增加脱硫系统，颗粒物排放浓度可控制在 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 内，设置高效湿式石灰石石膏法脱硫设施颗粒物排放浓度可控制在 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

根据我国电解烟气净化系统实际运行效果，电解烟气净化系统颗粒物排放浓度 I 级基准值确定为 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，II 级基准值为 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，III 级基准值为 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

6.7.4 电解烟气净化系统排放口二氧化硫排放浓度

电解烟气二氧化硫产生浓度取决于炭阳极含硫量，使用低硫焦的炭阳极生产时，电解烟

气净化系统排放口二氧化硫排放浓度可控制在 200mg/Nm³ 内，可满足一般区域排放标准的要求。

特别区域的电解铝企业设置脱硫系统，二氧化硫排放浓度可控制在 100mg/Nm³ 内，可满足一般区域排放标准的要求。为满足国家超低排放要求时，电解烟气净化系统排放口二氧化硫排放浓度可控制在 35mg/Nm³ 内。

根据我国电解烟气净化系统实际运行效果，电解烟气净化系统二氧化硫排放浓度 I 级基准值确定为 35mg/Nm³，II 级基准值为 100mg/Nm³，III 级基准值为 200mg/Nm³。

6.7.5 单位产品排水量

《铝工业污染物排放标准》（GB25465-2010）规定：电解铝企业排水控制指标 1.5m³/t，特别排放限值控制指标 1.0m³/t。

2018 年我国电解铝企业新水用量 1.02m³/t，预计全行业废水排放量低于 1.0m³/t。目前，先进的电解铝企业废水全部综合利用，不排放。

根据我国生产用水和排放实际情况，单位产品排水量 I 级基准值确定为 0.5m³/t，II 级基准值为 0.8m³/t，III 级基准值为 1.0m³/t。

6.8 温室气体排放指标的确定

6.8.1 燃料燃烧排放

电解铝企业所涉及的燃料燃烧排放是混合炉燃气，目前国内绝大多数混合炉仅在运行初期采用天然气燃烧或电加热，正常运行时无燃烧使用，因此，电解铝企业燃料燃烧排放温室气体可忽略不计。

6.8.2 阳极消耗排放

电解铝生产以炭素阳极为导体，预焙阳极电解槽通过预焙阳极导入直流电，在高温条件下发生电化学反应生产电解铝过程。在电化学反应过程中，炭素阳极与氧反应生成二氧化碳和一氧化碳，绝大部分一氧化碳与氧反应再生成二氧化碳。此外炭素阳极电解槽内发生掉渣而产生碳渣，经捞炭渣操作得到主要含碳、电解质等物质的炭渣，炭渣产生量与阳极质量关系较大，炭渣中碳在总阳极的 95% 以上。根据《铝用预焙阳极炭块理化指标要求》（YS/T285-2012），预焙阳极炭块的二氧化碳反应性残余率 ≥ 83%。

按炭阳极单耗（净）I 级基准值 400kg/t，II 级基准值 405kg/t，III 级基准值 410kg/t，按阳极含碳量 83%、碳渣占阳极消耗量按 5% 取值。经计算，对应二氧化碳排放量 I 级基准值确定为 1157kg/t，II 级基准值为 1171kg/t，III 级基准值为 1186kg/t。

6.8.3 阳极效应排放

电解铝企业所涉及的工业生产过程排放主要是阳极效应所导致的全氟化碳排放。阳极效应的排放因子与电解槽的技术类型密切相关，降低阳极效应及效应延续时间，可降低四氟甲烷、四氟乙烯等温室气体的生成量。为了减少碳排放和节能降耗，电解铝行业向着低效应、

甚至零效应发展，国际先进的电解槽阳极效应可控制在 0.01 次/槽·日内，国内先进的电解槽阳极效应可以达到 0.03 次/槽·日，国内现有电解槽阳极效应可控制在 0.05 次/槽·日。每次处理效应时间可控制在 10 分钟内。将阳极效应 I 级基准值确定为 0.01 次/槽·日，II 级基准值为 0.03 次/槽·日，III 级基准值为 0.05 次/槽·日。

采用国际通用的斜率法经验公式计算阳极效应排放因子。

$$EFCF_4 = 0.143 \times AEM \quad (6-1)$$

$$EFC_2F_6 = 0.1 \times EFCF_4 \quad (6-2)$$

式中：EFCF₄ 为阳极效应的 CF₄ 排放因子，单位：kgCF₄/t-Al；EFC₂F₆ 为阳极效应的 C₂F₆ 排放因子，单位：kgC₂F₆/t-Al；AEM 为平均每天每槽阳极效应持续时间。

阳极效应温室气体排放量的计算公式：

$$EPFC_s = 7390 \times BFCF_4 + 9200 \times BFC_2F_6 \quad (6-3)$$

式中：EPFC_s 为阳极效应二氧化碳排放量，单位：kgCO₂/t-Al；7390 为 CF₄ 的 GWP 值；EFCF₄ 为阳极效应的 CF₄ 排放因子，单位：kgCF₄/t-Al；9200 为 C₂F₆ 的 GWP 值；EFC₂F₆ 为阳极效应的 C₂F₆ 排放因子，单位：kgC₂F₆/t-Al。

经计算，对应二氧化碳排放量 I 级基准值确定为 119kg/t，II 级基准值为 238kg/t，III 级基准值为 595kg/t。

6.8.4 外购电排放

电解铝企业外购电力隐含的二氧化碳排放，该部分排放实际发生在电力企业，但由电解铝企业消费活动引起，依照约定计入电解铝企业。

电解铝企业生产能源以电力为主，单位产品外购电力产生二氧化碳排放量的计算公式：

$$E_{\text{外购电}} = W_j \times 0.6101 \quad (6-4)$$

式中：E_{外购电} 为单位产品外购电力产生二氧化碳排放量，单位：kgCO₂/t-Al；W_j 为电解铝液交流电耗，kW·h/t-Al；0.6101 为电网购入电力和自备电厂供电对应的排放因子采用 2015 年全国电力平均排放因子，单位：kgCO₂/MWh。

本研究的铝液交流电耗 I 级基准值确定为 12650kW·h/t-Al，II 级基准值为 12750kW·h/t-Al，III 级基准值为 13350kW·h/t-A，对应的二氧化碳排放量 I 级基准值确定为 7718kg/t，II 级基准值为 7779kg/t，III 级基准值为 8145kg/t。

6.8.5 温室气体排放量

电解铝企业的温室气体排放总量等于阳极消耗排放量、阳极效应排放量、外购电排放量之和，计算公式：

$$E = E_{\text{阳极}} + EPFC_s + E_{\text{外购电}} \quad (6-5)$$

根据以上数据计算，电解铝企业温室气体二氧化碳排放量 I 级基准值确定为 8994kg/t，

II级基准值为 9188kg/t, III级基准值为 9926kg/t。

6.9 产品特征指标的确定

铝液产品技术条件按照有色金属行业标准《熔融态铝及铝合金》(YS/T 1001-2014)要求,铝锭执行《重熔用铝锭》(GB/T 1196-2002)要求。

《铝行业规范条件》要求产品合格率为 100%,因此,将原铝合格率 100%定为清洁生产条件。

6.10 清洁生产管理指标的确定

在环境管理要求这个指标中无论是达到一级、二级还是三级基准值水平,首先企业在生产活动中必须遵守国家 and 地方有关环境法律、法规,设置专门的环境管理机构,配备专职管理人员,并且按照清洁生产审核指南的要求进行了审核。生产规模应符合国家和地方相关产业政策,不采用国家明令禁止和淘汰的生产工艺、装备,未生产国家明令禁止的产品。对一般工业固体废物按照《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》进行妥善处理,对危险废物按照《危险废物贮存污染控制标准》、《危险废物填埋污染控制标准》有关要求进行无害化处置。制定并向所在地县级以上地方人民政府环境行政主管部门备案危险废物管理计划(包括减少危险废物产生量和危害性的措施以及危险废物贮存、利用、处置措施),向所在地县级以上地方人民政府环境保护行政主管部门申报危险废物产生种类、产生量、流向、贮存、处置等有关资料。针对危险废物的产生、收集、贮存、运输、利用、处置,制定意外事故的防范措施和应急预案,并向所在地县级以上地方人民政府环境保护行政主管部门备案。

6.11 评价方法

6.11.1 权重分值的确定

当电解铝行业企业实际生产过程中某类一级指标项下二级指标项数少于表中相同一级指标项下二级指标项数时,需对该类一级指标项下各二级指标分权重值进行调整,调整后的二级指标分权重值计算公式为:

$$\omega'_{ij} = \omega_{ij} / \sum_{j=1}^{n_i} \omega'_{ij} \quad (6-6)$$

式中: ω'_{ij} —为调整后的二级指标项分权重值; ω_{ij} —为原二级指标分权重值; ω_i —为第*i*项一级指标的权重值; ω'_{ij} 为实际参与考核的属于该一级指标项下的二级指标得分权重值;*i*—为一级指标项数, $i=1, \dots, m$; *j*—为二级指标项数, $j=1, \dots, n_i$ 。

6.11.2 考核周期的确定

为使行业清洁生产工作持续有效地向前发展,使之不断深入,企业清洁生产工作的考核应当定期进行,一般宜以一个生产年度为一个考核周期,并与生产年度同步,这样有利于企业不断总结经验,也利于考核工作的顺利进行。

评价清洁生产水平的数据可取自统计数据或进行实测。企业的原材料和新鲜水的消耗量、

重复用水量、产品产量、能耗及各种资源的综合利用量等，以年报或考核周期报表为准。如果统计数据严重短缺，资源综合利用特征指标也可以在考核周期内用实测方法取得，考核周期一般不少于一个月。

6.11.3 综合评价指数的计算

综合评价指数的计算方法主要参考《清洁生产评价指标体系编制通则》（试行稿）。

(1) 指标无量纲化

不同清洁生产指标由于量纲不同，不能直接比较，需要建立原始指标的函数。

$$Y_{g_k}(x_{ij}) = \begin{cases} 100, x_{ij} \in g_k \\ 0, x_{ij} \notin g_k \end{cases} \quad (6-7)$$

式中， x_{ij} 表示第*i*个一级指标下的第*j*个二级指标； g_k 表示二级指标基准值，其中 g_1 为I级水平， g_2 为II级水平， g_3 为III级水平； $Y_{g_k}(x_{ij})$ 为二级指标 x_{ij} 对于级别 g_k 的函数。

如公式 6-7 所示，若指标 x_{ij} 属于级别 g_k ，则函数的值为 100，否则为 0。

(2) 综合评价指数计算

通过加权平均、逐层收敛可得到评价对象在不同级别 g_k 的得分 Y_{g_k} ，如公式 6-8 所示。

$$Y_{g_k} = \sum_{i=1}^m (w_i \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij} Y_{g_k}(x_{ij})) \quad (6-8)$$

式中， w_i 为第*i*个一级指标的权重， ω_{ij} 为第*i*个一级指标下的第*j*个二级指标的权重，

其中 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ ， $\sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij} = 1$ ， m 为一级指标的个数； n_i 为第*i*个一级指标下二级指标的个数。

另外， Y_{g_1} 等同于 Y_I ， Y_{g_2} 等同于 Y_{II} ， Y_{g_3} 等同于 Y_{III} 。

7 清洁生产企业的评定

对电解铝企业清洁生产水平的评定，是以其清洁生产综合评价指数为依据的，参考《清洁生产评价指标体系编制通则》（试行稿），对达到一定综合评价指数的企业，分别评定为清洁生产领先企业、清洁生产先进企业或清洁生产一般企业。企业清洁生产综合评价指数、清洁生产水平对应关系如表 6 所示。

表 6 清洁生产指标总体评价分值水平

| 清洁生产综合评价指数 | 清洁生产水平 | 清洁生产企业等级 |
|---|--------------|----------|
| $Y_{g_1} \geq 85$ 限定性指标全部满足 I 级基准值要求 | 清洁生产先进（标杆）水平 | 清洁生产领先企业 |
| $Y_{g_2} \geq 85$ 限定性指标全部满足 II 级基准值要求及以上 | 清洁生产准入水平 | 清洁生产先进企业 |
| $Y_{g_3} = 100$ | 清洁生产一般水平 | 清洁生产一般企业 |

考虑到清洁生产最终目的和现行环境保护政策法规要求，凡参评企业被地方环保主管部门认定为“主要污染物排放未“达标”（指总量未达到控制指标或污染源排放超标）的，则该企业不能被评定为“清洁生产领先企业”、“清洁生产先进企业”或“清洁生产一般企业”。

8 标准实施的经济可行性分析

本标准的提出，是根据清洁生产的基本要求，考虑了我国电解铝行业的生产特点与现实状况，从当前与未来环境保护形势对行业发展趋势的影响角度出发而制订。标准中各项指标数值的确定主要以目前国内电解铝行业的实际技术经济指标为依据，并参考了国外先进水平。

生产工艺与装备指标三级指标以国内企业现有水平为主要依据，一般企业只需进行适当技术改造、加强管理即可达到。一、二级基准值指标则以先进的国内大型电解槽企业为标准确定，尤其一级基准值更参照了国内外先进电解铝企业技术水平，对国内新建企业的设计和施工提出了更严格的标准和更高的要求，现有企业通过逐步的技术改造或整体改造也是可以达到的。

资源能源利用指标和产品指标选择了电解铝行业最常用、重要的技术经济指标，参考了国内电解铝行业的实际技术水平，达到清洁生产二级水平在技术上难度不大。约 15%的电解铝的指标上可以达到一级水平。

污染物产生与排放指标针对电解铝行业的排污特点，选择了行业特征污染物氟化物、二氧化硫排放作为考核依据，同时对企业的废水排放量进行了考核，其指标值也以国内企业的实测数据作为确定依据，企业在对工艺、设备进行适当改造并加强生产期管理的前提下，达到 II 级标准在技术上的难度不大。

国内电解铝企业已淘汰了 160kA 以下的电解槽，电解铝企业实现机械化、自动控制等，电解铝企业只要严格生产管理，基本可以达到 III 级基准值要求。65%的电解铝生产企业实现 II 级基准值指标在技术上难度不大，但需要一定技术改造和加强管理才能达到。约 15%的特大型电解铝企业通过精细化管理，可以达到 I 级基准值要求。这与我国先进的电解铝生产水平和环保治理水平已达到国际先进水平相一致。故本指标体系的实施在技术上是可行的。

附件三 标准报批审议会专家征求意见汇总

表 1 审议会专家意见汇总

| 名称 | | 电解铝行业清洁生产评价指标体系 | | |
|------|--------|-------------------------------|-------------|---|
| 主编单位 | | 中国环境科学研究院、本溪市环境科学研究所、辽宁石油化工大学 | | |
| 序号 | 标准条款编号 | 意见内容 | 提出单位 | 处理意见及理由 |
| | 1 | 进一步规范 and 明确指标的定义和范围 | 标准报批审议会专家意见 | <p>按专家意见修改。</p> <p>适用范围：本指标体系规定了电解铝行业生产企业清洁生产的一般要求。本指标体系将清洁生产标准指标分为六类，即生产工艺及装备指标、资源能源消耗指标、资源综合利用指标、污染物排放控制指标、产品特征指标和清洁生产管理指标。</p> <p>3.1 电解铝企业 利用氧化铝为原料生产电解铝的企业。</p> <p>3.2 限定性指标 指对清洁生产有重大影响或者法律法规明确规定必须严格执行、在对电解铝生产企业进行清洁生产水平评定时必须首先满足的先决指标。本指标体系将限定性指标确定为：电解槽电流强度、电流效率、铝液交流电耗、电解烟气净化系统排放口（全氟排放浓度、颗粒物排放浓度、二氧化硫排放浓度）、产业政策符合性、危险化学品管理。</p> <p>3.3 污染物排放控制指标 指单位电解铝产品生产过程中污染物排放限量或 HJ863.2 规定的主要排放口排放浓度。</p> <p>3.4 生产水重复利用率 指在一定的计量时间内，生产过程中使用的重复利用水量与用水量百分比。</p> <p>3.5 残极 指预焙阳极炭块在铝电解槽上使用一个周期后，更换下来的残阳极炭块。</p> |
| | 4.3 | 进一步校核、完善指标体系和指标参数 | 标准报批审议会专家意见 | <p>按专家意见修改。</p> <p>1 生产工艺装备及技术要求</p> <p>1.1 氧化铝、氟化盐贮存：I、II、III级基准值：原料贮存采用密闭贮库（仓）</p> <p>1.2 氧化铝输送：I、II、III级基准值：浓相输送或其它封闭输送方式</p> <p>1.3 氟化盐输送：I、II、III级基准值：浓相输送</p> <p>1.4 氧化铝上料段：I、II、III级基准值：浓相输送</p> <p>15 氟化盐上料段：I、II基准值：浓相输送或加料车等封闭加料方式，III级基准值：天车加料或其它机械加料方式</p> <p>1.6 电解电流强度（kA）：I级基准值≥500，II级基准值≥400，III级基准值≥160</p> <p>1.7 电解槽平均电压（V）：I级基准值≤3.9，II级基准值≤4.0，III级基准值≤4.1</p> <p>1.8 电解槽集气效率（%）：</p> <p>19 电解烟气净化系统：I、II基准值：全密闭集气，机械排烟，氧化铝吸附干法回收净化系统加脱硫净化</p> |

| | | | | <p>措施, III级基准值: 全密闭集气, 机械排烟, 氧化铝吸附干法回收净化系统</p> <p>2 资源与能源消耗指标</p> <p>2.1 电流效率 (/%) : I级基准值\geq94, II级基准值\geq93, III级基准值\geq92</p> <p>2.2 铝液交流电耗 (kw·h/t) : I级基准值\leq12650, II级基准值\leq12750, III级基准值\leq13350</p> <p>2.3 氧化铝单耗 (kg/t) : I级基准值\leq1910, II级基准值\leq1915, III级基准值\leq1920</p> <p>2.4 炭阳极单耗(净) (kg/t) : I级基准值\leq410, II级基准值\leq420, III级基准值\leq430</p> <p>2.5 氟化铝单耗 (kg/t) : I级基准值\leq13, II级基准值\leq16, III级基准值\leq18</p> <p>2.6 冰晶石单耗 (kg/t) : I、II级基准值\leq1, III级基准值\leq2</p> <p>3 污染物排放控制指标</p> <p>3.1 全氟排放量 (kg/t) : I级基准值\leq0.2, II级基准值\leq0.3, III级基准值\leq0.6</p> <p>3.2 电解烟气净化系统排放口全氟排放浓度 (mg/Nm³) : I级基准值\leq0.5, II级基准值\leq1.0, III级基准值\leq3.0</p> <p>3.3 电解烟气净化系统排放口颗粒物排放浓度 (mg/Nm³) : I级基准值\leq5, II级基准值\leq10, III级基准值\leq20</p> <p>3.4 电解烟气净化系统排放口二氧化硫排放浓度 (mg/Nm³) : I级基准值\leq35, II级基准值\leq100, III级基准值\leq200</p> <p>3.5 单位产品排水量 (m³/t) : I级基准值\leq0.5, II级基准值\leq0.8, III级基准值\leq1.0</p> <p>4 资源综合利用指标</p> <p>4.1 生产水重复利用率 (%) : I级基准值\geq99.5, II级基准值\geq99.0, III级基准值\geq98.5</p> <p>4.2 粉尘综合利用率 (%) : I级基准值\geq99.5, II级基准值\geq99.0, III级基准值\geq98.5</p> <p>4.3 废电解质: I、II、III级基准值: 100%回收加工利用</p> <p>4.4 残极: 100%回收并加工利用(包含外委综合利用)</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------------------|--------------------------|-------------|--|-------|--------|--------|-----|------------------|------------|-------------------------|------------|-----|------------------------|--------|--------------------------|--------|----------------------|---------|------|---------------------|---------|------------------------|---------|
| | 4.3 | 明确污染物产生指标到底是产生量还是排放量 | 标准报批审议会专家意见 | 按专家意见修改。 明确: 一级指标为污染物排放控制指标 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4.3 | 细化固体废物处理处置, 细化到一般废物和危险废物 | | 按专家意见修改。 6 清洁生产管理指标, 6.3 固体废物处理处置: 根据固体废物性质鉴别的结果, 一般工业固体废物按照 GB18599 的要求进行处置, 危险废物按照 GB18597, GB18598 等的要求进行处置 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4.3 | 核查污染物项目测定方法标准是否有更新 | | 按专家意见修改。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>污染物项目</th> <th>方法标准名称</th> <th>方法标准编号</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">颗粒物</td> <td>环境空气总悬浮颗粒物的测定重量法</td> <td>GB/T 15432</td> </tr> <tr> <td>固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法</td> <td>GB/T 16157</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">氟化物</td> <td>环境空气氟化物的测定滤膜采样氟离子选择电极法</td> <td>HJ 480</td> </tr> <tr> <td>环境空气氟化物的测定石灰滤纸采样氟离子选择电极法</td> <td>HJ 481</td> </tr> <tr> <td>大气固定污染源氟化物的测定离子选择电极法</td> <td>HJ/T 67</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">二氧化硫</td> <td>固定污染源排气中二氧化硫的测定 碘量法</td> <td>HJ/T 56</td> </tr> <tr> <td>固定污染源废气 二氧化硫的测定 定电位电解法</td> <td>HJ/T 57</td> </tr> </tbody> </table> | 污染物项目 | 方法标准名称 | 方法标准编号 | 颗粒物 | 环境空气总悬浮颗粒物的测定重量法 | GB/T 15432 | 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法 | GB/T 16157 | 氟化物 | 环境空气氟化物的测定滤膜采样氟离子选择电极法 | HJ 480 | 环境空气氟化物的测定石灰滤纸采样氟离子选择电极法 | HJ 481 | 大气固定污染源氟化物的测定离子选择电极法 | HJ/T 67 | 二氧化硫 | 固定污染源排气中二氧化硫的测定 碘量法 | HJ/T 56 | 固定污染源废气 二氧化硫的测定 定电位电解法 | HJ/T 57 |
| 污染物项目 | 方法标准名称 | 方法标准编号 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 颗粒物 | 环境空气总悬浮颗粒物的测定重量法 | GB/T 15432 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法 | GB/T 16157 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 氟化物 | 环境空气氟化物的测定滤膜采样氟离子选择电极法 | HJ 480 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 环境空气氟化物的测定石灰滤纸采样氟离子选择电极法 | HJ 481 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 大气固定污染源氟化物的测定离子选择电极法 | HJ/T 67 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 二氧化硫 | 固定污染源排气中二氧化硫的测定 碘量法 | HJ/T 56 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 固定污染源废气 二氧化硫的测定 定电位电解法 | HJ/T 57 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

表 2 指标二次修改情况

| 序号 | 指标项目 | 一次修改情况 | 二次修改情况 |
|----|--------------------------------|---|--|
| 1 | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.1 氧化铝、氟化盐贮存 | 袋装料进室内库, 罐装料进贮仓 | 原料贮存采用密闭贮库 (仓) |
| 2 | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.2 氧化铝输送 | I、II级基准值: 浓相输送, III级基准值: 浓相输送或气垫皮带输送 | 浓相输送或其它封闭输送方式 |
| 3 | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.4 氧化铝、氟化盐上料段 | I、II级基准值: 氧化铝: 超浓相输送、计算机控制, 氟化盐: 加料车 III级基准值: 氧化铝: 超浓相输送、计算机控制, 氟化盐: 料斗或浓相 | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.4 氧化铝上料段: I、II、III级基准值: 浓相输送 |
| 4 | | | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.5 氟化盐上料段: I、II级基准值: 浓相输送或加料车等封闭加料方式, III级基准值: 天车加料或其它机械加料方式 |
| 5 | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.5 工艺 | 电解铝大型电解槽预焙工艺 | 取消, 因为《铝行业规范条件》中规定了电解槽型及容量要求 |
| 6 | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.6 电解电流强度/KA | I级基准值 ≥ 400 , II级基准值 ≥ 300 , III级基准值 ≥ 160 | I级基准值 ≥ 500 , II级基准值 ≥ 400 , III级基准值 ≥ 160 |
| 7 | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.7 电解槽平均电压 (V) | 无 | 新增: I级基准值 ≤ 3.9 , II级基准值 ≤ 4.0 , III级基准值 ≤ 4.1 |
| 8 | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.8 电解槽集气效率 (%) | 5 资源综合利用指标, 5.3 电解槽集气效率 (%): I级基准值 ≥ 99.3 , II级基准值 ≥ 99.0 , III级基准值 ≥ 99.0 | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.8 电解槽集气效率 (%): I级基准值 ≥ 99.3 , II级基准值 ≥ 99.0 , III级基准值 ≥ 98.5 |
| 9 | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.9 电解烟气净化系统 | 全密闭集气, 机械排烟, 氧化铝吸附干法回收净化系统加脱硫净化措施 | 1 生产工艺装备及技术要求, 1.9 电解烟气净化系统: I、II级基准值: 密闭集气, 机械排烟, 氧化铝吸附干法回收净化系统加脱硫净化措施, III级基准值: 全密闭集气, 机械排烟, 氧化铝吸附干法回收净化系统 |

| 序号 | 指标项目 | 一次修改情况 | 二次修改情况 |
|----|--|--|---|
| 10 | 2 资源与能源消耗指标, 2.3 铝液交流电耗 (kw·h/t) | 2 资源与能源消耗指标, 2.4 电解铝直流电耗 (kw·h/t): I 级基准值≤12500, II 级基准值≤13000, III 级基准值≤13300 | 2 资源与能源消耗指标, 2.3 铝液交流电耗 (kw·h/t): I 级基准值≤12650, II 级基准值≤12750, III 级基准值≤13350 |
| 11 | 2 资源与能源消耗指标, 2.4 氧化铝单耗 (kg/t) | I 级基准值≤1910, II 级基准值≤1920, III 级基准值≤1920 | I 级基准值≤1910, II 级基准值≤1915, III 级基准值≤1920 |
| 12 | 2 资源与能源消耗指标, 2.5 氟化铝单耗 (kg/t) | 2 资源与能源消耗指标, 氟化盐单耗: I 级基准值≤18, II 级基准值≤18, III 级基准值≤20 | I 级基准值≤13, II 级基准值≤16, III 级基准值≤18 |
| 13 | 2 资源与能源消耗指标, 2.6 冰晶石单耗 (kg/t) | ≤2 | I、II 级基准值≤1, III 级基准值≤2 |
| 14 | 4 污染物排放控制指标, 4.1 全氟排放量 (kg/t) | I 级基准值≤0.2, II 级基准值≤0.3, III 级基准值≤0.3 | I 级基准值≤0.2, II 级基准值≤0.3, III 级基准值≤0.6 |
| 15 | 4 污染物排放控制指标, 4.2 电解烟气净化系统排放口全氟排放浓度 (mg/Nm ³) | 无 | I 级基准值≤0.5, II 级基准值≤1.0, III 级基准值≤3.0 |
| 16 | 4 污染物排放控制指标, 4.3 电解烟气净化系统排放口颗粒物排放浓度 (mg/Nm ³) | 无 | I 级基准值≤5, II 级基准值≤10, III 级基准值≤20 |
| 17 | 4 污染物排放控制指标, 4.4 电解烟气净化系统排放口二氧化硫排放浓度 (mg/Nm ³) | 无 | I 级基准值≤35, II 级基准值≤100, III 级基准值≤200 |
| 18 | 4 污染物排放控制指标, 4.5 单位产品排水量 (m ³ /t) | I 级基准值≤1.0, II 级基准值≤1.5, III 级基准值≤1.5 | I 级基准值≤0.5, II 级基准值≤0.8, III 级基准值≤1.0 |
| 19 | 4 污染物排放控制指标, 粉尘排放量 (kg/t) | I 级基准值≤1.6, II 级基准值≤2.4, III 级基准值≤3.0 | 取消 |
| 20 | 4 污染物排放控制指标, 单位产品二氧化硫排放量 (kg/t) 排 | I 级基准值≤20, II 级基准值≤30, III 级基准值≤40 | 取消 |
| 21 | 5 资源综合利用指标, 5.1 生产水重复利用率 (%) | 无 | I 级基准值≥99.5, II 级基准值≥99.0, III 级基准值≥98.5 |
| 22 | 5 资源综合利用指标, 5.2 粉尘综合利用率 (%) | 无 | I 级基准值≥99.5, II 级基准值≥99.0, III 级基准值≥98.5 |

| 序号 | 指标项目 | 一次修改情况 | 二次修改情况 |
|----|----------------------------|--|--|
| 23 | 5 资源综合利用指标, 5.3 废电解质 | 送到有资质的单位或企业自用 | 100%回收加工利用 |
| 24 | 5 资源综合利用指标, 5.4 残极 | 送到有资质的单位或企业自用 | 100%回收并加工利用(包含外委综合利用) |
| 25 | 5 资源综合利用指标, 集气效率(%) | I 级基准值 ≥ 99.3 , II 级基准值 ≥ 99.0 , III 级基准值 ≥ 99.0 | 属于工艺装备, 列于 1 生产工艺装备及技术要求, 1.8 电解槽集气效率(%) |
| 26 | 5 资源综合利用指标, 氟净化效率(%) | I 级基准值 ≥ 99.3 , II 级基准值 ≥ 99.1 , III 级基准值 ≥ 99 | 取消 |
| 27 | 5 资源综合利用指标, 除尘效率(%) | I 级基准值 ≥ 99.90 , II 级基准值 ≥ 99.70 , III 级基准值 ≥ 99.50 | 取消 |
| 28 | 5 资源综合利用指标, 电解碳渣、废阴极 | 送到有资质的单位或企业自用 | 取消 |
| 29 | 5 资源综合利用指标, 冷却水(kg/t) | 全部循环使用 | 取消 |
| 30 | 6 清洁生产管理指标, 6.1 环境法律法规执行情况 | 符合国家和地方有关环境法律、法规, 企业污染物排放总量及能源消耗总量满足国家及地方政府相关标准, 满足环评批复、环保“三同时”制度、总量控制和排污许可证管理要求 | 符合国家和地方有关环境法律、法制; 污染物排放达到国家和地方排放标准; 满足环境影响评价、环保“三同时”制度、总量控制和排污许可证管理要求; 符合国家和地方相关产业政策, 不适用国家和地方明令淘汰或禁止的落后工艺和装备。 |
| 31 | 6 清洁生产管理指标, 6.2 产业政策符合性 | | 生产规模符合国家和地方相关产业政策, 不采用国家明令禁止和淘汰的生产工艺、装备, 未生产国家明令禁止的产品 |
| 32 | 6 清洁生产管理指标, 6.3 固体废物处理处置 | 电解槽大修渣属危险废物, 其堆场建设应满足 GB 18597 要求。 | 根据固体废物性质鉴别的结果, 一般工业固体废物按照 GB18599 的要求进行处置, 危险废物按照 GB18597, GB18598 等的要求进行处置 |
| 33 | 6 清洁生产管理指标, 6.5 危险化学品管理 | 无 | 符合《危险化学品安全管理条例》相关要求 |
| 34 | 6 清洁生产管理指标, 6.6 突发环境事件预防 | 无 | 按照国家相关规定要求, 建立健全环境管理制度及污染事故防范措施, 无重大环境污染事故发生 |
| 35 | 6 清洁生产管理指标, 生产工艺用水管理 | 安装计量仪表, 主要用水点位制定定量考核制度。 | 取消 |

表 3 审议会专家意见（编制说明修改）汇总

| 专家意见 | 修改内容 |
|---|--|
| 给出近 3-5 年行业的发展国内外发展概况 | 按专家意见修改，补充 2016-2018 年铝工业发展现状，补充行业产能、产量、经济贡献、主要污染物产排量、能源消耗总量等数据。 |
| 结合工艺流程图，给出行业主要资源能源消耗和污染物类型和产排污节点，并附文字说明 | 按专家意见修改。补充电解铝生产工艺说明及工艺流程及排污节点图。 |
| 依据行业特征给出水平衡图 | 按专家意见修改。补充电解铝行业用水用户及排水节点，分析排水情况。 |

表 4 报批版专家意见汇总

| 名称 | | 电解铝行业清洁生产评价指标体系 | | |
|------|--------|--|------|--|
| 主编单位 | | 中国环境科学研究院、本溪市环境科学研究所、辽宁石油化工大学 | | |
| 序号 | 标准条款编号 | 意见内容 | 提出单位 | 处理意见及理由 |
| | 1 | 进一步规范和明确指标的定义和范围 | 专家意见 | 按专家意见修改。 适用范围：本指标体系适用于电解铝企业的清洁生产审核、清洁生产潜力与机会的判断以及清洁生产绩效评定和清洁生产绩效公告制度，也适用于环境影响评价、排污许可证管理、环保领跑者等环境管理制度。 3.1 电解铝企业 3.1 电解铝企业 利用氧化铝为原料生产电解铝的冶炼企业或生产设施，产品为原铝，包括铝液、铝锭。 |
| | 6.1.1 | 进一步校核、完善指标体系和指标参数 1 电解槽集气效率指标计算没写清楚 2 炭阳极单耗(净)指标：按铝行业规范条件，现有企业应低于 420，是否应以 420 为？ 3 应补充水耗指标 | 专家意见 | 1 按专家意见修改 电解槽集气效率指标为工艺指标，引用《铝电解厂工艺设计规范》（GB+50850-2013）4.1.9 款的定义。 6.1.1 电解槽集气效率 电解槽集气效率(%)单位时间内系列电解槽密闭集气烟气的数量与该系列电解槽产生的全部烟气数量的百分比。 |

| | | | |
|--|--|---|--|
| | | <p>4 原铝合格率：建议此处改为按产品质量标准衡量，可参考铝行业规范条件</p> | <p>(1) 当单槽排烟量与净化系统设计烟气量一致时，计算公式：</p> $\eta_{\text{集气}} = \frac{C_f}{C_F} \times 100\% \quad (6-1)$ <p>式中：</p> <p>$\eta_{\text{集气}}$—电解槽密闭槽罩的集气效率（%）；</p> <p>C_f—实际烟气（未净化前）含氟浓度（mg/m^3）；</p> <p>C_F—集气效率为 100%时的烟气含氟浓度（mg/m^3）。</p> <p>(2) 当实际单槽排烟量与净化系统设计烟气量不同时，计算公式：</p> $\eta_{\text{集气}} = \frac{C_f \cdot n \cdot Q_i \cdot 24}{N \cdot A_d \cdot F_y \cdot 10^6} \quad (6-2)$ <p>式中：</p> <p>$\eta_{\text{集气}}$—实际烟气（未净化前）含氟浓度（mg/m^3）；</p> <p>n—净化系统集气的实际槽数，（台）；</p> <p>Q_i—单槽实际排烟量，（Nm^3/h）；</p> <p>N—净化系统集气的设计槽数，（台）；</p> <p>A_d—电解槽日产铝量，（t/d）；</p> <p>F_y—吨铝排氟量，（kg/t）。</p> <p>2 按专家意见修改 按最新的《铝行业规范条件》（2020 本）修改为：炭阳极单耗（净）I 级基准值确定为 400kg/t，II 级基准值为 405kg/t，III 级基准值为 410kg/t。</p> <p>3 未采纳 理由： （1）电解铝生产用水为循环冷却水，电解铝生产工艺系统无用水，电解铝企业用水以设备冷却水为主，南北方企业的设备冷却循环水系统蒸发量相差大。 处于铝加工密集地区的电解铝企业直接将铝液作为产品外供铝加工企业，外供（2）铝液的电解铝企业无需设置铝锭铸造工序，直接外供铝液的电解铝企业与生产铝锭的新水消耗指标相差。 鉴于电解铝企业新水消耗量不大，不同产品、不同地区的企业新水消耗指标无可比性，因此，新水消耗不本指标体系控制指标。</p> <p>4 采纳</p> |
|--|--|---|--|

| | | | | |
|--|-----|-----------------------------|------|---|
| | | | | <p>按《铝行业规范条件》（2020 本）要求，合格率按 100%要求。</p> <p>5 按《铝行业规范条件》（2020 本）要求，其它指标体系和指标参数如下： (1) 氟化铝单耗 (kg/t)：I 级基准值≤13，II 级基准值≤15，III 级基准值≤16 (2) 冰晶石单耗 (kg/t)：I 级基准值≤0.5，II 级基准值≤1.0，III 级基准值≤1.5</p> |
| | 4.3 | 明确污染物产生指标到底是产生量还是排放量？ | 专家意见 | <p>按专家意见修改。</p> <p>明确：一级指标为污染物排放控制指标</p> |
| | 4.3 | 这应该为污染物产生指标，不能是排放量，可用处理效率折算 | 专家意见 | <p>未采纳</p> <p>理由：铝电解烟气治理采用的氧化铝吸附回收净化工艺，将原料氧化铝作为吸附剂与电解烟气中氟产生吸附反应，生成载氟氧化铝，载氟氧化铝返回电解槽作为原料使用，由于吸附的氟越多，氟化盐消耗量越少，而烟气中氟含量就越大。而且烟气中加入大量新鲜氧化铝和返回载氟氧化铝以吸附烟气中氟，进到布袋除尘器的颗粒物含量巨大，电解烟气净化效果好的电解烟气净化系统，其颗粒物含量就高。环保效果越好的企业，烟气中氟、粉尘浓度就高。因此，将污染物控制指标作为本体系的指标。</p> <p>目前，钢铁冶炼系列的清洁生产评价指标体系均将污染物排放作为控制指标，说明金属冶炼企业均具有相同性。</p> |
| | 4.3 | 细化固体废物处理处置，细化到一般废物和危险废物 | | <p>按专家意见修改。</p> <p>6 清洁生产管理指标，6.3 固体废物处理处置：根据固体废物性质鉴别的结果，一般工业固体废物按照 GB18599 的要求进行处置，危险废物按照 GB18597，GB18598 等的要求进行处置。</p> <p>编制说明中补充固体废物产生、处理处置，包括所有一般废物和危险废物。</p> |
| | 4.3 | 核查污染物项目测定方法标准是否有更新 | | <p>按专家意见修改。</p> <p>污染物产生指标是指污染物进入末端处理设施前污染物的浓度或总量指标，其采样点应设在末端处理设施进口处。本指标体系污染物产生指标的采样和监测按照相关技术规范执行，并采用国家或行业标准测定分析方法。</p> |

表 5 报批专家意见（编制说明修改）汇总

| 序号 | 专家意见 | 修改内容 |
|----|---|---|
| 1 | 给出近 3-5 年行业的发展国内外发展概况（主要包括行业产能、产量、经济贡献、主要污染物排放量、能源消耗总量等）； | 按专家意见修改。 补充 2016-2018 年铝工业发展现状，补充行业产量（国家对电解铝严格控制，电解铝企业产量必须低于配额）。 鉴于国家相关部门无经济贡献、主要污染物排放量数据，因此，无能力收集。若收集需求助相关部门。 中国有色金属工业协会只能提供 2018 年能源指标，无法提供消耗总量指标，因此，无能力收集。若收集需求助相关部门。 |
| 2 | 结合工艺流程图，给出行业主要资源能源消耗和污染物类型和产排污节点，并附文字说明 | 按专家意见修改。补充电解铝生产工艺说明及工艺流程及排污节点图。 |
| 3 | 依据行业特征给出水平衡图。 | 按专家意见修改。补充典型行业水平衡图，分析电解铝行业用水用户及排水节点，分析排水情况。 |

表 6 部委征求意见情况汇总处理表

| 名称 | | 电解铝行业清洁生产评价指标体系 | | |
|------|-------|--|-------------|--|
| 主编单位 | | 中国环境科学研究院、本溪市环境科学研究所、辽宁石油化工大学 | | |
| 序号 | 条款编号 | 意见内容 | 提出单位 | 处理意见及理由 |
| 一、意见 | | | | |
| 1 | 4.3 | “清洁生产管理指标”中增加二级指标“土壤污染隐患排查”，其基准值为“参照国家有关技术规范，建立土壤污染隐患排查制度，保证持续有效防止有毒有害物质渗漏、流失、扬散”。 | 生态环境部科技与财务司 | 已采纳。原因：《中华人民共和国土壤污染防治法》第 21 条规定，土壤污染重点监管单位应当建立土壤污染隐患排查制度，保证持续有效防止有毒有害物质渗漏、流失、扬散。 |
| 2 | 6.2.2 | 建议统一 16 个行业评价指标体系中“采样和监测”章节的表述方式，采用相应排放标准指定的监测方标准。 | 生态环境部科技与财务司 | 已采纳。本指标体系污染物产生指标的采样和监测按照相关技术规范执行，并采用国家或行业标准指定分析方法。 |