



# 电解铝行业



## 前 言

国家节能中心制定能效评价技术依据的主要目的是为全国节能中心系统有关工作提供依据，例如，固定资产投资项目节能评估和审查、“中国能效之星”评价、能源审计等。同时，随着能效评价技术依据的不断修订和完善，希望能为相关行业、企业及机构统一规范地开展能效评价工作提供帮助，并为形成国家标准提供参考。

能效评价技术依据，其核心内容是能效评价指标体系的设置，主要包含能效评价指标和指标值两个部分。其中，指标的设置参考了国家能耗限额标准、地方能耗限额标准（限额文件）、行业能耗限额标准，以及相关行业和企业的统计指标；指标值的确定参考了国家能耗限额标准、行业能耗限额标准、地方能耗限额标准，以及国家节能中心和地方节能中心所掌握的能效数据、行业协会和相关科研机构的统计数据、典型企业的实际运行数据等。此外，能效评价技术依据还对指标体系的具体应用进行了解释。

《电解铝行业能效评价技术依据》由国家节能中心组织制定，在制定过程中还得到了河南、广西、山东、云南、内蒙、青海、山西、新疆、甘肃等地节能中心及相关企业的大力支持和帮助，在此表示感谢。

### 1 适用范围

本技术依据适用于 160kA 以上系列槽型（以设计值为准）的电解铝厂或电解系列（不包括阳极、阴极生产系统，铸造和加工系统）能效评价，包括

新建项目的节能评估和审查，以及既有项目的能效评价等。

## 2 规范性引用文件

本技术依据引用了下列文件的条款。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本技术依据。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本技术依据。

中华人民共和国工业和信息化部 2013 年第 36 号公告 – 铝行业规范条件

GB 50919—2013 有色金属冶炼厂节能设计规范

GB 50850—2013 铝电解厂工艺设计规范

GB 50673—2011 有色金属冶炼厂电力设计规范

GB 21346—2008 电解铝企业单位产品能源消耗限额

GB/T 23331 能源管理体系要求

GB/T 6422—86 企业能耗计量与测试导则

GB/T 15587—1995 工业企业能源管理导则

GB/T 2589 综合能耗计算通则

## 3 能效评价指标

### 3.1 核心指标

铝液综合交流电耗、铝液电解交流电耗。

### 3.2 参考指标

直流电耗、电流效率、整流效率、动力电耗。

## 4 评价指标的定义及计算方法

### 4.1 核心指标

#### 4.1.1 铝液综合交流电耗

定义：铝液综合交流电耗是以单位产量表示的综合交流电消耗量，即考核期内用于电解铝生产的综合交流电量和考核期内产出的铝液质量之比。

统计范围：评价电解铝生产厂的整体能耗水平，包括电解工艺及其他所有辅助工序，其内容包括直流电耗、整流用电、动力电耗（净化用电、空压用电和厂用电）部分，不包含阳极组装、铝锭铸造、型材加工部分用电。

计算方法：

$$W = \frac{Q}{M}$$

式中：

$W$ ——铝液综合交流电耗，单位为千瓦时每吨（ $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ ）；

$Q$ ——考核期总交流电量，单位为千瓦时（ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ）；

$M$ ——考核期总产铝量，单位为吨（ $\text{t}$ ）。

#### 4.1.2 铝液电解交流电耗

定义：铝液电解交流电耗也称工艺交流电耗，是指整流变压器高压端电量与铝液产量之比。在整流效率一定的条件下，铝液电解交流电耗可直接反应电解工艺能效水平。

统计范围：本指标体系统一以铝液来考核电解铝厂的能耗指标。铝液电解交流电耗包含整流自身电能损耗与电解系列电耗。如果以铝锭作为产品，可以按不大于千分之五铸损率折算成铝液。以铝合金或型材作为产品，以企业铝液计量并通过合金纯度和一定铸损核算。同时，可以通过铝锭或铝型材反算验证原铝产量数据。在反算时，铸损应按不低于行业平均水平进行计算。

计算方法：

$$W_3 = \frac{Q_3}{M}$$

式中：

$W_3$ ——铝液电解交流电耗，单位为千瓦时每吨 ( $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ )；

$Q_3$ ——考核期整流交流电量，单位为千瓦时 ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )；

$M$ ——考核期总产铝量，单位为吨 (t)。

## 4.2 参考指标

### 4.2.1 直流电耗

定义：直流电耗是指统计期内每生产 1000 千克液态金属铝所需耗用的直流电量。

计算方法：

$$W_1 = \frac{V}{0.3355 \times \eta} \times 10^3$$

式中：

$W_1$ ——单位产量直流电耗，单位为千瓦时每吨 ( $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ )；

$V$ ——统计期内电解槽平均工作电压，单位为伏 (V)；

$\eta$ ——统计期内铝液电流效率，单位为百分比 (%)。

### 4.2.2 电流效率

定义：电流效率是指电解铝生产中铝液的实际产量与理论产量的比值。

电流效率的测定通常采用盘存法、回归法和气体分析法。生产过程中，如果统计的时间足够长（1 年以上）时，也可以直接以实际产铝量与理论产铝量相比计算得出电流效率。本评价依据推荐采用盘存法测定电流效率（不少于 6 个月）。

计算方法：盘存期间实际产出的铝量与通过的电解电量按法拉第定律计算理论产量的比值。

$$\eta = \frac{[\sum m + (M_2 - M_1)] \times 10^3}{0.3355 \times It}$$

式中：

- $\eta$ ——电流效率，单位为百分比（%）；
- $\sum m$ ——盘存期内产出的铝量，单位为吨（t）；
- $M_2$ ——第二次测得的槽内铝量，单位为吨（t）；
- $M_1$ ——第一次测得的槽内铝量，单位为吨（t）；
- $I$ ——平均电流强度，单位为安（A）；
- $t$ ——盘存时间，单位为小时（h）。

采用稀释技术对电解槽内的铝进行盘存。通常作为示踪元素的惰性金属为铜和银。

以加铜为例，则槽内的铝量可按下式进行计算：

$$M = \frac{Q(1 - c_1)}{c - c_1}$$

式中：

- $M$ ——槽内铝量，单位为吨（t）；
- $Q$ ——加入示踪元素量，单位为吨（t）；
- $c_1$ ——铝液中铜的本底浓度，单位为千克每千克（kg/kg）；
- $c$ ——加入示踪元素铜后，铜在铝液中的总浓度，单位为千克每千克（kg/kg）；

以上方法适合于对正常生产过程的考核。鉴于本方法和电解铝工艺过程的限制，盘存期要求足够长（6个月以上），才能反映整个系列的电流效率情况。

#### 4.2.3 整流效率

定义：整流效率指整流供电系统的整流器输出的直流电量与输入的交流电量的比值。

对整流供电系统的整流效率进行考核及标定，是考核电解铝生产能效的重要基础条件之一。《有色金属冶炼厂电力设计规范》（GB 50673—2011）中对整流装置的额定整流效率已进行了明确的规定，因此，在考核电解铝生产

企业综合能效时，对整流效率的考核将以此为基础。

没有自动稳流控制时，机组额定效率不应低于下列参考值：

UdN = 200VDC ~ 400VDC 时，额定效率为 94% ~ 95% ；

UdN = 400VDC ~ 600VDC 时，额定效率为 95% ~ 96.5% ；

UdN = 600VDC ~ 800VDC 时，额定效率为 96.5% ~ 97.8% ；

UdN = 800VDC ~ 1100VDC 时，额定效率为 97.8% ~ 98.4% ；

UdN ≥ 1100VDC 时，额定效率为 98.5% 。

有自动稳流控制时，机组额定效率不应低于下列参考值：

UdN = 200VDC ~ 400VDC 时，额定效率为 93% ~ 94% ；

UdN = 400VDC ~ 600VDC 时，额定效率为 94% ~ 95% ；

UdN = 600VDC ~ 800VDC 时，额定效率为 95% ~ 96.5% ；

UdN = 800VDC ~ 1100VDC 时，额定效率为 96.5% ~ 97.6% ；

UdN ≥ 1100VDC 时，额定效率为 97.6% ~ 98.2% 。

#### 4.2.4 动力电耗

定义：动力电耗即辅助生产系统电耗，辅助生产系统是指除系列电解槽及整流系统以外的所有系统。

统计范围：辅助生产系统包括电解车间动力设备、原料输送、电解烟气净化系统、压缩空气供给系统及其相应的 10 千伏配电室等（不含阳极组装电耗和整流损耗）。

计算方法：

$$W_2 = \frac{Q_2}{M}$$

式中：

$W_2$ ——动力电耗，单位为千瓦时每吨（kW·h/t）；

$Q_2$ ——考核期总动力电量，单位为千瓦时（kW·h）；



$M$ ——考核期原铝总产量，单位为吨（t）。

## 5 能效评价指标值

能效评价指标值见表 1。

	A	B	C	D
铝液综合交流电耗 (kW · h/t)	13200	13500	13700	14000
铝液电解交流电耗 (kW · h/t)	12750	13100	13300	13600
直流电耗 (kW · h/t)	12500	12800	13000	13300
电流效率 (%)	94	93	92	90
动力电耗 (kW · h/t)	250	300	350	400

注：本评价指标中各指标的计算均采用正常生产期的实际测试数据。正常生产是指电解系列全部启动 6 个月后的生产过程，正常生产期是指电解系列从预热焙烧、启动、过渡期到正常期以后。

其中：A 值为全国同类电解铝企业能效最高水平；B 值为全国同类电解铝企业能效前 5% 水平；C 值为全国同类电解铝企业能效前 20% 水平；D 值为全国同类电解铝企业能效一般水平。

## 6 能效评价指标体系的应用

### 6.1 固定资产投资项目节能评估和审查

新建电解铝项目的固定资产投资项目节能评估报告中，应包含所有核心指标和参考指标的设计值及计算过程。

在固定资产投资项目节能评审中，对新建电解铝项目采用铝液综合交流电耗为判断项目总体能效水平的指标，具体判断方法如下：

铝液综合交流电耗  $\leq$  B 值，国内领先水平；

B 值  $<$  铝液综合交流电耗  $\leq$  C 值，国内先进水平；

C 值  $<$  铝液综合交流电耗  $\leq$  D 值，国内一般水平；

铝液综合交流电耗 > D 值，国内落后水平。

节能评估报告中除铝液综合交流电耗之外的其他评价指标，用于项目评审意见中“项目主要能效指标水平”等部分进行对标分析。

## 6.2 “中国能效之星”评价

“中国能效之星”评价指标体系（工业领域）中的“能效水平状况”指标（3.2）可采用本技术依据。电解铝企业以“铝液综合交流电耗”为特征评价指标，申报“中国能效之星”的电解铝企业应在申报材料中明确列出“铝液综合交流电耗”指标，指标值应采用实际测试数据，测试和监测方法应按有关标准执行，并委托第三方机构进行检测与测算。

根据“中国能效之星”评分规则，在行业平均水平（D 值）与最高水平（A 值）之间划分为 12 个区间，分别给予不同分值。具体标准如表 2 所示。

表 2 电解铝企业“中国能效之星”评价标准

铝液综合交流电耗 X (kW · h/t)	得分	铝液综合交流电耗 X (kW · h/t)	得分
13900 < X ≤ 14000	0	13800 < X ≤ 13900	1
13700 < X ≤ 13800	2	13600 < X ≤ 13700	3
13550 < X ≤ 13600	5	13500 < X ≤ 13550	7
13450 < X ≤ 13500	9	13400 < X ≤ 13450	12
13350 < X ≤ 13400	15	13300 < X ≤ 13350	18
13250 < X ≤ 13300	21	13200 < X ≤ 13250	25

## 6.3 能源审计

能源审计的最终指标是铝液综合交流电耗，而对其中间主要环节进行审计分析，则能找出节能潜力及整改措施。铝液综合交流电耗主要包括直流电耗、整流用电、动力电耗，具体细节要从这三个环节的影响因素进行分析。

### 6.3.1 直流电耗影响因素及改进措施

#### 6.3.1.1 电流效率的影响因素与整改措施

(1) 电流效率。

在电解槽平均电压一定时，电流效率越高，直流电耗越低。对铝液综合交流电耗的影响也是如此。因此，生产过程中希望在不改变槽平均电压下取得更高的电流效率。

①槽型选择。选择设计成熟、运行稳定的槽型是提高电流效率的首要保证。铝电解槽“三场”的优化设计是提高电流效率的前提条件，合理的磁流体稳定性设计能保证铝液相对平静，减少铝液的二次反应损，从而提高电流效率。合理的热场设计能保证规整炉膛的形成，减少铝液区水平电流，进而提高电流效率。

②电解质的过热度。电流效率会随着电解质的过热度升高而降低，过热度每增加 10℃，电流效率降低 1% ~ 1.5%。在保证热平衡下保持较低的过热度，可以提高电流效率。

③电解质的分子比。分子比对电流效率也有一定影响，在一定区间内分子比的升高会造成电流效率下降。因此，建议采取低分子比管理，但不应低于 2.3。

④氧化铝质量。氧化铝的粒度（还有活度）与其中含有的微量元素对电流效率有影响。使用优质氧化铝（如低温拜耳法生产的砂状化铝）较使用质量较差的氧化铝（如富含锂钾粉状氧化铝）的电流效率高 1.5% ~ 2.5%，这一点在行业内有一定共识。主要原因是质量较差的氧化铝的粒度比优质氧化铝的粒度小，溶解性能差，造成电流效率低。氧化铝中富含锂、钾元素，会使电解质温度大幅下降，从而进一步使氧化铝的溶解性变差，最终也会使电流效率降低。

⑤阳极质量。阳极炭块的掉渣和阳极破损对电解生产有较大的负面影响。阳极掉渣过多，电解质中含渣量增加，电解质的电阻率升高，从而压缩有效极距，最终导致电流效率降低并使电耗上升。同时，如果阳极在使用过程中出现破损，电解生产的稳定性受到破坏，也会降低电解槽的电流效率和增大电耗。

⑥铝水平。铝水平在电解生产过程中可起到调节电解槽热平衡和减弱磁场影响的作用。适当提高铝水平，可以减少电流的水平分量，减弱铝水的波动，使电解槽更加稳定；另外，通过调节铝水平高度，还可以起到稳定电解槽热平衡的作用。两者对电流效率都有直接的影响。

(2) 整改措施。

①选择设计成熟、运行稳定的槽型，尤其要求磁流体稳定性较好的槽型。

②在工艺控制方面尽可能将电解质的过热度控制在 10℃ 左右。

③在保证电解槽稳定运行的前提下采用相对低分子比的技术条件。

④在综合成本控制合理的条件下，尽可能采用砂状氧化铝及锂、钾含量较低的氧化铝。

⑤选择高质量的阳极炭块，尤其是二氧化碳反应性指标要严格控制，减少掉渣量对电解质电阻率的影响。

⑥选择适合槽型的铝水平高度进行控制，以保证电解槽运行电压稳定和热平衡稳定。

### 6.3.1.2 平均电压的影响因素与改进措施

电流效率一定时，平均电压与直流电耗成正比关系，即平均电压越高，直流电耗越高。对铝液综合电耗的影响亦是如此。因此，生产过程中在保持电流效率较高的条件下，尽可能降低平均电压。

(1) 影响因素。

平均电压主要由一类导体电压与二类导体电压组成，运行中由工作电压和分摊电压组成。要降低平均电压，可以从主要组成部分进行控制。

①阳极效应分摊电压。电解槽在氧化铝浓度低状态下会发生阳极效应，阳极效应发生时由于阳极表面产生气膜电阻会使电解槽电压急剧上升，一般为 35 伏并持续 5 分钟左右。从管理角度分析，阳极效应的发生分为受控效应和不受控效应。受控效应是人为按电解槽技术条件的需要来设定阳极效应的

发生，而不受控效应是由于原料或工艺条件管理控制的原因引发的突发效应。电解槽发生阳极效应时，电解槽既不产铝又消耗大量的电能，控制阳极效应是控制能耗的主要途径。阳极效应系数每升高 0.1，阳极效应分摊电压就会上升 10 毫伏左右，折合吨铝电耗上升约 30 千瓦时。

②异常分摊电压。电解槽的异常运行电压包括电解槽出现电压波动引起的电压上升。

③正常附加电压。出铝、换极等操作后的补偿电压。这一部分的电压均是在电解槽正常运行时电压值的基础上附加的一部分电压，这部分电压被认为是不经济电压，因此其值越低越好。

④电解质电压。电解质电压主要由极距高度、电解质电阻率和阳极电流密度决定。极距的减少会降低电流效率，故可以通过降低电解质电阻率能降低槽电压。造成电解质电阻率升高的原因有电解质的粘度、分子比、氧化铝浓度、碳渣含量等。

⑤炉底压降。炉底压降属于无功电压，会随着电解槽的槽龄增加而升高。这主要是由于电解质向阴极炭素的渗透以及阴极表面沉淀物生产引起的。而阴极表面沉淀物的产生是生产过程中可控的因素。

⑥碳钢压降。阳极组装碳钢压降与磷生铁配比及浇铸质量有关，这部分的浇注质量导致 200 毫伏以上的压降差异，可通过优化配比与熔炼工艺来降低这部分压降。

⑦卡具压降。卡具压降是阳极导杆与阳极横梁母线之间压接连接造成的，因此其压降的大小与压接表面处理及压接质量有关。压接表面光滑平整无杂质，其压降会较低，压接表面接触面越大，压降越小。

⑧阳极碳块压降。阳极碳块压降的大小与阳极碳块的本身质量有关，与阳极碳块的高度也有关系，阳极炭块越高，压降越大。

⑨母线空耗。在铝液工艺交流电耗中，除电解槽本身的直流电耗与整流

损耗之外，电解系列的过桥母线及停槽短路电压也是不小的空耗。过桥母线越长、停槽数量越多，空耗分摊就越大，即吨铝电耗越高。

(2) 改进措施。

①采用优质的原材料，选用先进的计算机控制系统，以确保电解槽可以实施较低的阳极效应管理模式。

②提高电解槽的磁流体稳定性及控制合理的技术条件，减少电压波动等异常现象。

③加强出铝、换极等操作的质量控制，减少这些操作过后的补偿电压。

④通过技术调整提高电解质的流动性，及时打捞炭渣，以降低电解质的电阻率。

⑤电解槽的氧化铝浓度控制在 2% 左右，减少电解槽过冷现象的发生，从而减少电解槽炉底沉淀的产生。对已经产生过多炉底沉淀的电解槽，可以通过合理利用阳极效应及保持较低铝水平高度来消耗炉底沉淀，从而达到避免炉底压降过高的目的。

⑥控制好磷、生铁等五大元素的配比，提高增碳和脱硫效果，可以有效降低碳钢压降。

⑦更换阳极时，要对阳极导杆和阳极大母线的表面进行平整和清洁处理，并定期对压接面进行电压降检测处理。

⑧要选用电阻率低的阳极炭块，并通过经济性分析选择合理的阳极高度。

⑨单工段的槽数越多，电解槽的过桥母线压降分摊会越小。因此，要在考虑综合因素的前提下选择相对多的单工段槽数设计。满足综合要求的条件下尽可能缩短过桥母线长度，可以减少分摊电压。缩短电解槽大修周期，可以减少电解槽短路空耗电的分摊。

### 6.3.2 整流效率

整流效率的大小体现的是整流部分设备损耗的大小，整流效率越高，即

损耗越小，相对应的吨铝电耗就会越小。降低此部分的自身损耗，即可提高整流效率。

#### 6.3.2.1 影响因素

(1) 系列电压对整流效率有影响。在系列安全电压范围内负荷电压越高，整流效率越高。

(2) 整流系统设计时，整流变压器与整流柜之间距离过远，会造成阀侧母线长，增加损耗。

(3) 半导体元件的选择决定了元件自身的功耗，大半导体元件的自身损耗更小，如 5 英寸元件较 4 英寸元件功耗低 10% ~ 20%。

#### 6.3.2.2 改进措施

(1) 电解系列电压在安全范围内应保持更高的电压，在建设时电解槽的槽台数不应过少。

(2) 设计时，考虑综合因素后尽量缩短阀侧母线长度，增大阀侧母线截面，减小该段母线电阻，从而最大限度降低损耗。

(3) 在条件允许的情况下选择更大的半导体元件，降低元件损耗。

(4) 有条件改造饱和电抗器稳流系统为半导体稳流系统，减少运行损耗。

#### 6.3.3 动力电耗

动力电耗在电解厂属于辅助部分，是配合电解生产所提供的供风、供料等工序产生的电耗。

##### 6.3.3.1 影响因素

(1) 净化电耗。净化主要是大功率风机用电，与净化系统的设计和日常操作有直接关系。净化系统设计先进合理时，也可以使用较小功率的风机，即达到净化效果，从而降低能耗。日常操作中，减少电解槽罩板的打开数量和时间，也可以改善净化效果，从而减少风机风量的使用，达到降低电耗的目的。

(2) 空压机电耗。电解铝厂所用的压缩空气由空压站提供。空压站的电耗主要与空压站的安装位置、空压机的选型及生产用气量有关。空压站的位置离用气单位越近，其衰减量就越小，损耗也越小。空压机的选型主要是与出力效率有关。用气量与生产过程中的管理有关，减少用气过程中的泄漏损耗，即可减少损耗。

(3) 厂用电耗。厂用电耗包括多功能天车运行、设备检修等需用的电器设备运行消耗电量。工序安排科学合理，可以减少这些设备的运行时间，从而降低电耗。

#### **6.3.3.2 改进措施**

(1) 选择合理的系统设置，可以使用更小的风量达到净化效果；选择合理的风机型号，可以有更高的出力效率；加装变频器，以达到可以按需调节风量，从而降低电耗。

(2) 设计时，空压站要尽可能离用风单位近一些；选择出力效率高的压缩空气机；加强生产过程控制，减少压缩空气泄漏。

(3) 合理安排工序，减少多功能车的工作时间；加强设备管理，减少检修时大功率电器的使用。

#### **6.3.4 适当选择新的节能技术**

##### **6.3.4.1 低电阻率钢材**

近两年新出现的低电阻率钢材，其电阻率比传统电解铝用的钢材低 40% 以上。将这种钢材合理地用在电解槽的阴极钢棒和阳极钢爪上，可以取得较好的节能效果。

##### **6.3.4.2 双钢棒技术**

双钢棒技术主要是通过降低电解槽的水平电流而达到提高电解槽的稳定性目的，从而使电解槽更易实施低电压工艺并提高电流效率，最终达到降低电耗的效果。



#### 6.3.4.3 异型阴极

异型阴极是通过阻流及近似湿润阴极的原理达到稳定电解槽内铝水波动的效果。使电解槽更容易实现低电压生产工艺并提高电流效率，最终降低电耗。

#### 6.3.4.4 低电压生产工艺

电解槽低电压运行时，虽然会降低电流效率，但降低综合电耗的效果较明显。通过综合经济性分析，适当采用低电压，即可达到节能效果，又可以保证综合效益。

#### 6.3.4.5 新的计算机控制系统

随着计算技术和电解铝技术的发展，电解槽的计算机控制技术也在不断进步。新的计算机控制系统可以控制更低的阳极效应系数、提高电解槽稳定性和电流效率，从而达到降低电耗的目的。



