

[文章编号] 1004-0609(2002)06-1294-05

氧化铝生产综合能耗的 ϵ - p 分析^①

刘丽孺^{1, 2}, 陆钟武¹, 于庆波¹, 闫书明¹, 姜玉敬³, 吕子剑³

(1. 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2. 沈阳建筑工程学院, 沈阳 110015;
3. 中国长城铝业公司, 郑州 450041)

[摘要] 在推演氧化铝生产综合能耗基本计算式的基础上, 提出了氧化铝生产企业剖析综合能耗的 ϵ - p 分析法。并以某氧化铝厂 1995~2000 年的生产和能源消耗统计数据为依据, 分析了工序能耗变化和折合约变化对综合能耗的影响。认为为了降低氧化铝生产综合能耗, 一是要降低各工序的折合约, 二是要降低各工序能耗。并指出为了降低各工序的折合约, 需要优化生产工艺结构, 加大拜耳法及拜耳法中管道化的比例, 通过选矿法来提高矿石的品位。

[关键词] 氧化铝; ϵ - p 分析法; 综合能耗; 折合约; 工序能耗; 铝土矿

[中图分类号] TF 821

[文献标识码] A

系统节能理论是以“载能体”和“系统”2个概念为基础^[1], 强调节能工作既要考虑节约能源, 又要考虑节约非能源(即物料)。目前, 该理论已广泛应用于钢铁企业, 成功地指导了我国的大中型钢铁企业的节能降耗工作^[2, 3]。作者以该理论为基础, 提出了氧化铝生产综合能耗的 ϵ - p 分析法, 并用该法对某氧化铝厂的综合能耗进行了剖析。

1 氧化铝生产综合能耗的 ϵ - p 分析法

每吨氧化铝综合能耗是由统计期内的氧化铝生产企业消耗的能源总量除以同期内的氧化铝产量而求得。由于每吨氧化铝综合能耗的计算简单, 很多复杂因素没有包括在内, 所以从中不易见到各个环节、各种因素对它的影响。为此, 采用 ϵ - p 计算公式:

$$E = \frac{1}{P} \sum_i P_i e_i \quad (1)$$

式中 E 为每吨氧化铝综合能耗, GJ/t; P 为统计期内氧化铝产量, t; P_i 为统计期内第 i 道工序合格产品产量(液体产品单位为 m^3 , 固体产品单位为 t); e_i 为第 i 道工序工序能耗(合格工序产品), GJ/t 或 GJ/ m^3 。

若令式(1)中的 $P_i/P = p_i$ 并称其为第 i 道工序的折合约, 则每吨氧化铝综合能耗可写成

$$E = \sum_i p_i e_i \quad (2)$$

式中 $(p_i e_i)$ 称作第 i 道工序的每吨氧化铝工序能耗。

由式(2)可知, 影响氧化铝生产综合能耗的直接因素有 2 大类, 即各工序的折合约 p_i 和各工序的工序能耗 e_i 。为了降低氧化铝综合能耗, 一要降低各工序的折合约, 二要降低各工序的工序能耗, 二者缺一不可。

在进行氧化铝生产企业综合能耗的研究时, 同时分析折合约和工序能耗这 2 类因素的方法, 称作氧化铝生产企业综合能耗的 ϵ - p 分析法, 简称氧化铝能耗的 ϵ - p 分析法。

在氧化铝生产中, 每道工序所消耗的, 除主要原料外, 还有其他的材料, 其中许多是氧化铝生产企业内部生产的产品。而这些原料、材料都是花费了一定能源才生产出来的, 都属“载能体”^[1]。所以, 从总体上看, 为了降低综合能耗, 每道工序不仅要注意节约本工序所消耗的能源, 还要注意降低本工序所消耗的各种原材料。只有既节能又降耗, 才能收到良好的节能效果。应纠正以往提到节能, 往往只注重降低工序能耗而忽视各工序折合约这种片面的观点。

2 某氧化铝厂综合能耗剖析

目前我国的氧化铝生产工艺有: 拜耳法、烧结法和拜耳-烧结混联法工艺, 为了使该法具有代表性, 以某拜耳-烧结混联法工艺生产氧化铝的企业

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划项目(G2000026300)
[作者简介] 刘丽孺(1971-), 女, 博士研究生。

[收稿日期] 2001-11-18; [修订日期] 2002-01-23

为对象, 用 ϵ_p 分析法, 具体分析该厂自 1995~2000 年的每吨氧化铝能耗的变化及其影响因素。该厂主要有原料制备、石灰煅烧、熟料烧成、管道化溶出、压煮溶出、脱硅、分解、蒸发、焙烧和辅助等 10 道工序组成。所以式(2)中的 e_i , p_i ($i=1\sim 10$) 分别为上述 10 个工序的工序能耗和折舍比。表 1 列出了该厂自 1995~2000 年各工序的工序能耗和折舍比。

2.1 各工序能耗的变化及分析

工序能耗是指氧化铝生产企业各工序生产单位合格产品直接消耗的能源量。在计算过程中, 煤、重油、焦炭、蒸汽、电、循环水、新水等能源介质的消耗量均按规定折算成能量的单位 GJ。

对表 1 的工序能耗数据分析可见, 该氧化铝厂在 1995~2000 年期间, 有的工序能耗上升, 有的下降。工序能耗上升最大的工序是蒸发工序, 上升率为 3.8%; 其他工序按上升率排序为熟料烧成(3.3%)、脱硅(0.7%); 工序能耗下降最大的工序是辅助工序, 下降率为 65.5%, 其他工序按下降率排序为焙烧(32.4%)、原料制备(21.7%)、石灰煅烧(14.2%)、分解(10.0%)、压煮溶出(7.3%)。

由上述分析可见: 该氧化铝厂有的工序能耗不但没有降低, 反而有所升高, 如能耗较高的熟料烧成、蒸发和脱硅工序; 某些能耗高的工序, 工序能耗虽然有所降低, 但降低幅度不是很大, 如焙烧、石灰煅烧和压煮溶出工序。因此, 大力降低工序能耗仍是该氧化铝厂的重要任务。

2.2 各工序折舍比的变化及分析

各工序的折舍比对每吨氧化铝综合能耗有直接影响。一般, 在其他条件一定的情况下, 各工序的折舍比越小, 每吨氧化铝综合能耗越低。

由表 1 可见, 除了焙烧和管道化溶出工序外, 其它工序的折舍比都有所下降。下降最大的工序是蒸发工序, 下降率为 18.3%, 其他工序按下降率排序为: 压煮溶出(15.0%)、熟料烧成(12.1%)、石灰煅烧(9.0%)、脱硅(6.5%)和原料制备(2.2%), 这些都是有利于综合能耗下降的。

尽管管道化精液折舍比有所上升, 从表面上看好像不利于综合能耗下降, 但由于管道化溶出温度高, 可以采用低碱浓度溶出, 且采用间接加热方式无浓度冲淡现象, 从而可大幅度地减少循环母液的蒸发水量, 并且用多级自蒸发回收热能的效果好, 溶出工序本身也比压煮溶出工序节能, 所以从混联法整体来看, 拜耳法产量中还是希望管道化产量越高越好, 这实际上有利于综合能耗的下降。对于蒸发工序来说, 其蒸发水折舍比越低越利于节能, 但从整个氧化铝生产工序来说, 由于蒸发工序的工序能耗要远远低于熟料烧成工序的工序能耗, 所以还是希望蒸发水折舍比高些, 这样才可降低生料浆的水分, 以便减少熟料烧成工序的能耗, 从而有利于降低综合能耗。

2.3 各工序的节能效果分析

为了分析各工序的节能效果, 先应用综合能耗 ϵ_p 计算式算出每吨氧化铝综合能耗的改变量, 再

表 1 某氧化铝厂 1995~2000 年各工序的工序能耗和折舍比

Table 1 Unit process energy intensity and alumina-process product-ratios of an alumina plant from 1995 to 2000 (GJ/t)

Process	1995		1996		1997		1998		1999		2000	
	e_i	p_i										
MP	0.067	7.436 1	0.056	7.558 9	0.064	7.543 7	0.061	7.316 2	0.059	7.274 3	0.053	7.272 3
LC	2.911	0.344 2	3.148	0.323 3	2.844	0.383 2	2.367	0.346 8	2.821	0.315 2	2.499	0.313 3
ST	5.352	1.755 1	5.129	1.868 8	5.343	1.822 1	5.726	1.684 8	5.671	1.545 2	5.527	1.543 6
TD									0.427	1.367 1	0.363	1.886 6
HPCD	0.641	9.264 5	0.705	8.954 3	0.626	9.332 9	0.582	9.311 2	0.600	8.156 3	0.594	7.874 3
DS	0.816	4.958 6	0.816	5.321 8	1.086	5.076 4	0.998	4.879 2	0.977	4.559 8	0.822	4.638 6
PC	0.322	1.546 0	0.310	1.546 0	0.301	1.546 0	0.290	1.546 0	0.290	1.546 0	0.290	1.546 0
EP	2.080	5.219 8	2.484	5.049 8	2.432	4.939 2	2.320	4.987 4	2.174	4.543 6	2.159	4.263 2
ATC	5.612	0.870 9	5.688	0.845 2	4.137	0.956 2	4.336	0.956 4	3.868	0.957 0	3.795	0.978 7
AC	3.780	1.000 0	3.257	1.000 0	1.846	1.000 0	1.507	1.000 0	1.320	1.000 0	1.305	1.000 0

MP—Material preparation; LC—Lime calcining; ST—Sintering; TD—Tube digestion; HPCD—High pressure caldron digestion; DS—Desilication; PC—Precipitation; EP—Evaporation; ATC—Aluminium trihydrate calcining; AC—Ancillary process.

根据 1995 年和 2000 年各工序的工序能耗及折合比的差值, 求出因工序能耗和折合比变化对每吨氧化铝综合能耗的影响量, 计算公式为

$$\begin{aligned} \Delta E &= \sum_i (e''_i p''_i - e'_i p'_i) = \\ &= \sum_i (e''_i p''_i - e'_i p''_i + e'_i p''_i - e'_i p'_i) = \\ &= \sum_i p''_i (e''_i - e'_i) + \sum_i e'_i (p''_i - p'_i) = \\ &= \Delta E_1 + \Delta E_2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 e'_i, e''_i 分别为统计期始、末第 i 工序的工序能耗; p'_i, p''_i 分别为统计期始、末第 i 工序的折合比; ΔE_1 是工序能耗变化对每吨氧化铝能耗的影响量(直接节能量); ΔE_2 是折合比变化对每吨氧化铝能耗的影响量(间接节能量)。计算结果列于表 2 中。

由表 2 可见, 从 1995~2000 年的 6 年内, 该氧化铝厂的氧化铝综合能耗共下降 7.36 GJ/t。其中因工序能耗降低节能 4.04 GJ/t, 占总节能量的 54.94%; 因折合比变化节能 3.32 GJ/t, 占总节能量的 45.06%。就是说该厂每吨氧化铝综合能耗的下降, 一半靠直接节能, 一半靠间接节能。在这些工序中, 尽管有的工序由于工序能耗或折合比上升引起综合能耗上升了, 但相应这些工序的折合比或工序能耗下降所取得的节能效果, 抵消并弥补了不利因素所带来的反效果, 所以从总体上来说, 这些工序还是节能的。如熟料烧成和蒸发工序, 尽管这些工序的工序能耗上升了, 但这些工序的折合比下降了, 且折合比下降所取得的效果抵消并弥补了工序能耗上升所带来的不利影响, 总的说来, 这些工序还是节能的。节能量最大的工序是辅助工序, 节

能 2.48 GJ/t; 其次依次是蒸发、压煮溶出、焙烧、熟料烧成、脱硅、石灰煅烧、原料制备和分解工序。

2.4 今后主要的节能方向

通过对该氧化铝厂综合能耗的剖析清楚地表明, 该厂今后的节能方向是要大力降低各工序的工序能耗和折合比, 二者缺一不可。

在工序能耗方面, 重点是要降低熟料烧成、焙烧、石灰煅烧、蒸发、脱硅和压煮溶出等工序的工序能耗。一般企业一提到节能, 主要是指节约各工序的工序能耗, 因此, 各氧化铝生产企业在这方面所做的工作也比较多。如通过引进、开发高效的设备来代替传统的能耗较高的设备, 或对原有的设备进行技术改造, 提高其各项技术指标等等。

在这里要重点说明降低各工序折合比的问题。混联法工艺生产氧化铝的主工序能耗中, 熟料烧成、脱硅和压煮溶出等工序的能耗比较高, 因此, 降低这些工序的折合比可带来明显的节能效果。而要降低这些工序的折合比, 这涉及到该氧化铝生产企业内部结构的调整。具体地说, 包括下面几个方面:

1) 调整生产工艺结构 一般情况下, 在氧化铝生产工艺流程中, 拜耳法的每吨氧化铝综合能耗最低, 要远远低于烧结法。因此, 混联法每吨氧化铝综合能耗的高低, 主要取决于拜耳法和烧结法的比例。所以, 对于该氧化铝厂, 在产量一定的情况下, 要尽可能地提高拜耳法的比例、降低烧结法的比例, 从而可直接降低熟料烧成和脱硅工序的折合比(这两道工序都属于烧结法)。在拜耳法中, 要尽可能提高管道化的生产比例, 降低压煮溶出的比

表 2 1995~2000 年某氧化铝厂各工序吨氧化铝能耗的变化分析

Table 2 Analysis of change of unit process energy intensity per ton alumina of an alumina plant from 1995 to 2000

Process	$\Delta E / (\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1})$	Percentage/ %	$\Delta E_1 / (\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1})$	Percentage/ %	$\Delta E_2 / (\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1})$	Percentage/ %
MP	- 0.12	- 1.60	- 0.11	- 1.48	- 0.01	- 0.12
LC	- 0.22	- 2.98	- 0.14	- 1.93	- 0.08	- 1.05
ST	- 0.86	- 11.70	0.31	4.19	- 1.17	- 15.89
TD	0.68	9.30	0	0	0.68	9.30
HPCD	- 1.26	- 17.12	- 0.43	- 5.89	- 0.83	- 11.22
DS	- 0.23	- 3.18	0.03	0.39	- 0.26	- 3.58
PC	- 0.05	- 0.68	- 0.05	- 0.68	0	0
EP	- 1.65	- 22.47	0.41	5.60	- 2.07	- 28.07
ATC	- 1.17	- 15.95	- 1.58	- 21.51	0.41	5.56
AC	- 2.48	- 33.64	- 2.48	- 33.64	0	0
Total	- 7.36	- 100.00	- 4.04	- 54.94	- 3.32	- 45.06

例, 从而可直接降低压煮溶出工序的折合比。

2) 调整资源结构 目前我国已探明的铝土矿铝硅比 A/S 在 9 以上, 可直接用于拜耳法生产的富矿仅能维持 3~5 年^[4, 5], 随着铝土矿品位逐步贫化, 要保证产量不变, 许多工序(如熟料烧成、高压溶出、原料制备)的折合比都要增加; 若投入的原料量一定, 则氧化铝产量就会大幅度下降, 这都会引起综合能耗的大幅度上升。因此, 要想降低的综合能耗, 就要认真研究矿石的经济品位, 以及国产贫矿量和进口富矿量的合理比例等问题, 即采用选矿方法来提高矿石的品位, 或进口一部分三水软铝石型富矿。

3) 推进技术进步 上面提到的以降低各工序能耗为内容的直接节能, 以改变各工序折合比为内容的结构调整, 都是以技术进步为基础的, 需要在技术和装备上达到一定的水平。例如, 为了降低高压溶出、脱硅、分解等工序的折合比, 就必须提高溶出率、脱硅效率、分解率, 以减少进入赤泥、硅渣和循环母液中的氧化铝量; 为了降低熟料烧成工序的工序能耗, 除了对熟料窑进行必要的技术改造外, 对蒸发工序, 还需选择高效的蒸发设备(如采用降膜蒸发来代替效率较低的自然循环蒸发系统), 从而减少入窑生料浆的水分, 另外, 也需要有高效的赤泥沉降洗涤系统, 以减少循环母液中的蒸发水量等等^[6~10]; 为提高矿石的 A/S, 需开发经济高效的选矿技术等等。

3 结论

1) 提出了氧化铝生产企业综合能耗的 ϵ_p 分析法, 指出要降低综合能耗, 节能(降低各工序的工序能耗)、降耗(降低各工序的折合比)二者缺一不可。

2) 用 ϵ_p 分析法剖析了某混联法氧化铝生产企业的综合能耗, 分析了工序能耗变化和折合比变化分别对每吨氧化铝综合能耗的影响。

3) 对该混联法氧化铝生产企业来说, 为了降低各工序的折合比, 需要优化生产工艺结构, 加大拜耳法及拜耳法中管道化的比例, 通过选矿法来提高矿石的品位。

[REFERENCES]

- [1] 陆钟武, 蔡九菊. 系统节能基础[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 10 - 30.
LU Zhong-wu, CAI Jiur-ju. Basis of System Energy Saving[M]. Beijing: Science Press, 1993. 10 - 30.
- [2] 陆钟武. 我国钢铁工业吨钢综合能耗的剖析[J]. 冶金能源, 1992, 11(1): 14 - 19.
LU Zhong-wu, Analysis of overall energy intensity per ton steel of Chinese iron and steel industry[J]. Metallurgical Energy, 1992, 11(1): 14 - 19.
- [3] 陆钟武, 谢安国, 周大刚. 我国钢铁工业节能方向的研究[J]. 冶金能源, 1994, 13(6): 3 - 9.
LU Zhong-wu, XIE An-guo, ZHOU Da-gang. Energy saving direction of Chinese iron and steel industry[J]. Metallurgical Energy, 1994, 13(6): 3 - 9.
- [4] CHEN Xiaqing, FANG Car-yun, ZHANG Xir-ying. Simultaneous determination of NaOH, Na₂CO₃ and Al₂O₃ in sodium aluminate solutions by flow injection titration [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2001, 11(4): 599 - 602.
- [5] Alcod of Australia Ltd. An overview of bauxite and alumina operation in western Australia [R]. 1985.
- [6] Kaiser Engineers and Constructors Inc. Feasibility Study for Linden alumina plant [R]. 1989.
- [7] Jamialahmadi M, Steinhagen H M. Numerical model for the prediction of heat transfer and scale profices in bayer process live steam heat exchangers [A]. Light Metals [C]. Warrendale: TMS, 1992. 173 - 177.
- [8] Pawlek F. The leaching behavior of bauxite during mechanical chemical treatment [A]. Light Metals [C]. Warrendale: TMS, 1992. 91 - 95.
- [9] 毕诗文, 杨毅宏, 李殿峰, 等. 铝土矿的拜耳法溶出 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996. 94 - 103.
BI Shi-wen, YANG Yi-hong, LI Dian-feng, et al. Bayer Digestion of Bauxite[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996. 94 - 103.
- [10] 杨重愚. 氧化铝生产工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 95 - 137.
YANG Zhong-yu. Technology of Alumina Production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. 95 - 137.

Analysis of comprehensive energy consumption for producing alumina

LIU Liru^{1, 2}, LU Zhong-wu¹, YU Qing-bo¹, YAN Shu-ming¹, JIANG Yu-jing³, LI Zi-jian³

(1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Shenyang Architecture and Civil Engineering Institute, Shenyang 110015, China;

3. China Great Wall Aluminium Corporation, Zhengzhou 450041, China)

[Abstract] On the basis of analyzing the formula of the comprehensive energy consumption for per ton of alumina, the σ - p method is put forward. The influence of the change of the unit process energy intensity and the alumina-process product-ratios on the comprehensive energy intensity is analyzed, based on the statistical data of an aluminium corporation in the period of 1995~ 2000. The conclusion is that it is necessary to cut down both the unit process energy intensity and the alumina-process product-ratios in order to decrease the comprehensive energy intensity for per ton of alumina, which is to be taken as a future policy for energy saving. In order to decrease the alumina-process product-ratios, it is necessary to optimize the process and enhance the grade of bauxite by ore dressing.

[Key words] alumina; σ - p method; comprehensive energy intensity; alumina-process product-ratios; unit process energy intensity; bauxite

(编辑 陈爱华)