

# 氧化铝专题文集

## 第一册

中国有色金属  
工业总公司

郑州轻金属研究院

## 编 者 的 话

我国氧化铝工业是以烧结法起家的。经过近四十年的努力，使得烧结法——古老的万能的方法得到了新的发展，面目焕然一新。特别是它能够生产出白度较高的氧化铝和氢氧化铝，这就更加巩固了它在我国氧化铝生产中的地位。

由于我国铝土矿多属中等品位，适宜采用联合法，郑州铝厂自1966年采用混联法投产以来，指标先进，经济效益较好。因此，贵州铝厂1989年起由拜尔法改成了混联法，山西铝厂和中州铝厂也将采用混联法。

但是，与混联法相比串联法有很多优点。例如：流程简单、拜尔法部分的比例较高、能耗低、碱耗低、投资少、成本低等。

我国对串联法的向往已四十多年了！早在五十年代中期山东铝厂二期扩建时，就考虑过串联法方案。五十年代末期，郑州铝厂原来设计也是采用串联法。这以后，每当谈到如何提高我国混联法的技术水平和经济效益时，人们也都呼吁采用串联法。特别是进入九十年代，对串联法的呼声更高了！究其原因，除了我国商品经济进一步发展、国内外市场进一步融通、国家要求尽快提高氧化铝工业的经济效益以外，就是苏联巴甫洛达尔铝厂串联法生产氧化铝已经成功地运行了几十年，取得了丰富的经验。

我们编辑“串联法生产氧化铝文集”，目的在于介绍国外串联法研究成果及生产经验，为在我国实现串联法生产，提高氧化铝工业水平作点贡献。

由于水平有限，不足之处彼彼皆是，望批评指正。

编者

1992年

# 目 录

1、用拜耳—烧结联合法生产氧化铝 〔苏联〕Naum S. Malts 等	( 1 )
2、关于拜耳—烧结串联法处理低品位铝土矿的问题 〔苏联〕Н. С. Мальц 等	( 7 )
3、用拜耳—烧结串联法处理富菱铁矿的铝土矿 〔苏联〕I. P. Kraus 等	( 10 )
4、拜耳—烧结法氧化铝生产中拜耳法系统最佳参数的确定 〔苏联〕А. И. Исаев 等	( 13 )
5、拜耳—烧结串联法中烧结系统参数最佳化 〔苏联〕А. И. Исаев 等	( 17 )
6、苏联帕夫洛达尔铝厂技术考察报告 〔考察报告编写〕田兴久 贺云山	( 19 )
7、巴甫洛达尔铝厂氧化铝生产的工业设备工艺流程的掌握 〔苏联〕И. В. Прокопов 等	( 32 )
8、用低品位铝土矿生产氧化铝的新高效设备工艺流程的设计和应用 〔苏联〕В. Я. Чупраков	( 35 )
9、拜耳—烧结联合法氧化铝生产的中间产品中硫积累的预测 〔苏联〕Н. С. Мальц 等	( 38 )
10、拜耳—烧结串联法生产氧化铝时赤泥炉料烧结过程的特性 〔苏联〕Н. С. Мальц 等	( 42 )
11、加热和冷却制度对赤泥炉料烧结时 $Al_2O_3$ 和 $N_2O$ 回收率的影响 〔苏联〕С. С. Нуркеев 等	( 46 )
12、拜耳—烧结串联法铝土矿氧化铝生产中赤泥的处理 〔苏联〕Н. С. Мальц	( 48 )
13、赤泥烧结改良的串联法 〔匈牙利〕К. Шоймар	( 57 )
14、溶出赤泥熟料时氧化铝的提取动力学 〔苏联〕Д. Ж. Ибраев 等	( 63 )
15、巴甫洛达尔铝厂氢氧化铝煅烧工艺的改进 〔苏联〕О. Г. Сосновский	( 65 )
拜耳—烧结串联法流程中用石灰苛化工业水的最佳条件 〔苏联〕Л. П. НИ 等	( 68 )
17、巴甫洛达尔铝厂弃赤泥综合利用的远景 〔苏联〕Р. Г. ЧЕРНОВА 等	( 69 )
18、巴甫洛达尔铝厂铝土矿赤泥的物理化学性质的研究 〔苏联〕К. К. Куатбаев 等	( 74 )
19、串联法铝土矿氧化铝生产自动控制 〔苏联〕А. И. Исаев 等	( 76 )
20、自动控制系统是巴甫洛达尔铝厂技术进步主导方向之一 〔苏联〕	( 81 )

# 用拜耳—烧结联合法生产氧化铝

(苏联) Naum S. Malcs 等

王留柱 译 谭鸿喜 校

## 摘 要

苏联已研究出了一种烧结合氧化铝的混合物、处理低铝高硅原料的方法。这种方法或单独作为一种方法与拜耳法相联合,已在氧化铝的生产中得到了广泛的应用。

通过对各个烧结温度下 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 多元系状态图相互作用和平衡状态的研究,我们得出了工艺参数,求得了各个状态图共晶体的成份和熔点。研究的结果表明以赤泥为其主要成份的混合物最易熔化。本研究给出了熟料的物理性质和有用成份的回收效率随烧结温度的不同而变化的情况。本文还提出了熟料溶出流程的选择方案和串联法处理低品位原料的改进方向。

## 引 言

苏联在工业上用低铝高硅矿石生产氧化铝是用烧结法处理多元炉料为基础的。烧结法处理含氧化铝的物料既可单独作为一种氧化铝的生产方法,也可和拜耳法相联合。在后一种情况里,烧结法不但能提高低品位矿石的处理效率而且也能用碳酸钠补充拜耳法流程中损失的碱。

在苏联,对配料不同和主要组分比例不同的炉料有效烧结的理论根据是进行的试验。试验的结果与下述物料系统在烧结温度下的相互作用和平衡状态有关(1, 2, 3):

- 1、 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3(\text{NA}) - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2(\text{C}_2\text{S})$
- 2、 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{NF}) - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
- 3、 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{C}_2\text{F})$
- 4、 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  [

在上述各系统中,第一个多元系表现出了用碳酸钠—石灰烧结法从霞石和其它低铁碱性铝硅酸盐,或者从高岭土和其它非碱性铝硅酸盐等生产氧化铝的原始物料的理想配比成份。第二个多元系表现出了用碳酸钠—石灰烧结法处理铝土矿或低 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 赤泥生产氧化铝的各种物料的理想配比成份。第三和第四个多元系所示的是当用烧结赤泥或其它 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量高的原料生产氧化铝时物料的成分。

实际上,在研究各种物料的烧结工艺与原始物料的关系时,只考虑上述其中一个多元系。

对上述各系所进行的研究不仅仅是为了寻求烧结温度下炉料主要成份相互反应和平衡状态的一般规律,而主要的是搞清主要物相比例的变化对炉料熔化温度、动力学和温度分布的影响,以及对有用成份回收率的影响。

在研究和在工业上实现新的最佳的用低铝高硅铝土矿生产氧化铝的联合生产流程时,我们可将一个简单的拜耳法流程与烧结法联合起来。这样与单纯的拜耳法相比可获得较高的氧化铝回收率,而且碱损失和生产成本与之相比也相差不大。

在苏联，有两种拜耳—烧结联合法：一种是并联法，一种是串联法。后一种方法烧结的炉料的主要成分是拜耳法处理铝土矿后剩下的赤泥，而不是直接烧结铝土矿。赤泥炉料比铝土矿炉料和霞石炉料更复杂，它的成份和主要物相比比例变化有更大的波动范围。这些变化的结果是使一部分或一小部分的 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 结合成碱性不同的铁酸钙（ $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 或 $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ），或者在烧结条件下 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 还原成惰性形态的 $\text{FeO}$ 和 $\text{Fe}$ 。烧结 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量高的赤泥所出现的这种情况是由于采用传统的碱—石灰烧结中的炉料的某些组份反应效率低的结果，因为生成的熟料的一些成份进到失去三元特性的 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ — $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ — $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 系区域内并且生成了含 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{O}$ 的三元化合物。同时生成了易熔共晶体。此外，少部分为补偿流程中的减损失而加入的碳酸钠会结合成铝酸钠和铁酸钠，只有一部分 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹带在赤泥中。

### 含氧化铝混合料的烧结

在工业上对含氧化铝炉料实行有效烧结的要素是：编制和选择最佳的熟料窑设计方案。工艺条件：采用成份理想的炉料从而防止过烧结的发生以从熟料中获得最高的有用成份回收率。

目前，烧结合氧化铝的混合料都是采用迴转窑。这种设备的特点是由于物料在其里面混合的非常充分，所以烧结物料的温度分布比较均匀。再者，这种设备的设计比较简单，操作比较方便。

众所周知，在长径比是个常数的情况下，当由2.5增加到3时，迴转窑的表面积与直径的平方成正比，热效率和产能与直径成正比。因此，增大窑的尺寸不仅可以提高劳动生产率而且可以提高单位面积的产能。结果就可降低基建费用和损失在周围的热量。在苏联，烧结用的迴转窑一般为长110~185米，直径为5米。迴转窑的改进不只局限于增大其尺寸，而是同时缩小长径比和降低斜度，沿窑长方向变化窑的直径，提高窑的转速，控制和引进从废气和熟料中提高热量回收率的装置。

要想增加大窑的产能，相应地增大单位热应力，就要提高气流温度。由于改变了这一条件以生产出优质的熟料和防止过烧结发生，就必须加强预热和改善进入烧结区的物料的粒度分布。

保持所需要的温度条件的最重要一环是对燃料燃烧条件的选择。例如燃料的雾化情况、流速以及一次风的消耗量。使气流保持所需要的温度以增加大窑产能的最有效的途径是从废气里回收起来的粉尘返回到烧结区。

烧结形成的快慢不但取决于大窑的操作温度，也取决于设计参数（大窑的物料填充率、转速、斜度和直径），而在很大程度上取决于物料的性质。物料的性质决定了它的熔化温度和产生的液相量。混合料的性质决定过烧结形成趋势的最充分的特征是液相开始出现到混合料完全熔化的温度范围。

烧结法生产氧化铝所用的最容易熔化的混合料是以赤泥为其主要成份的混合料。因为这种物料铝酸钠的含量较少，易于生成熔化共晶体的铁酸钠和铁酸钙的含量比较大。这就决定了它的过烧结趋势比可溶性较小的铝土矿和霞石要大。这就是为什么说对烧结的混合料浆来说，处于限制范围之内的混合料成份的选择和稳定具有特别重要的意义。这里所说的限制范围指的是熔化温度最大的变化范围和混合料的主要组份——赤泥的成

份——发生变化时的熔化温度范围。这样就得到了一个难对付的研究熔度的式子： $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  系，这个多元系表示出了混合料浆的特征。我们用带有温度和熟料块收缩率自动记录装置的膨胀计对此进行了研究。

下表是关于二元系中比较容易熔化的共晶体成份的一些数据。这些共晶体的存在可能是混合料浆烧结时形成液相的原因。

体系名称	其晶体成份 %	熔化温度 °C
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 63$	$1,100 \pm 10$
	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 37$	
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 53$	$1,185 \pm 10$
	$2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 47$	
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 40$	$1,100 \pm 10$
	$\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 50$ 到 $60$	

应该注意的是易熔化共晶体混合物的共相是  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  的存在。

在二元系  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  中，共晶关系是不存在的。

在含有  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  的多元系中，都知道有以下共晶成份： $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 39\%$ ， $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 61\%$ ，共熔点为  $1,405^\circ\text{C}$ ，此温度大大高于混合料的熔化温度。由于考虑到研究五元系比较复杂，因此就先着重研究  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  系的熔度。

根据所进行的研究可知，此多元系的熔度取决于  $(2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$  与  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  之比，首先取决于  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  的含量 (图 1, 2, 3)。

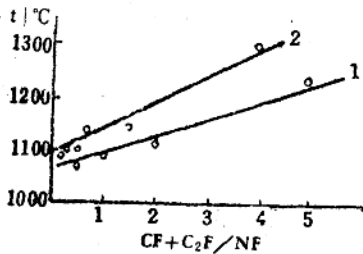
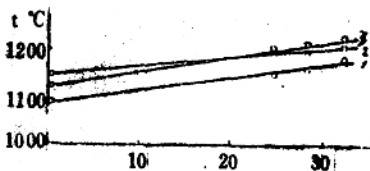


图 1 熔化温度与  $\frac{\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3}$

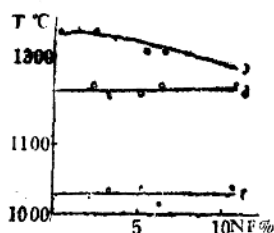
的关系

- 混合料: 1.  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 40\%$ ,  
2.  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 50\%$



1.  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 35\%$   $\frac{\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3} = 1.5$   
2.  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 45\%$   $\frac{\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3} = 0.3$   
3.  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 25\%$   $\frac{\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3} = 0.5$

图 2 混合料熔化温度随铝酸钠含量的变化而变化的情况



- 1、软化温度
- 2、强烈软化温度
- 3、熔化温度

图3 混合料的熔度随铁酸钠的含量的变化而变化的情况

铁酸钠的含量增加20%会使熔化温度降低150°C。若铁酸钠含量进一步增加，那么就会对开始急剧收缩的温度产生明显的影响。随着 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 含量的增加可发现“吃火性”有部分增大(图1、2)。从得到的结果可以看出：铁酸钠含量的增加，在一定程度上会使开始熔化温度提高(提高40~60°C)。但是，如果我们从开始急剧收缩时的温度的变化特点来看(这取决于 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量)，很明显，第一种情况的变化比较迅速。这个结论已为专门进行的试验所证实。试验中，混合料里铁酸钠的含量在工业生产的熟料内的变化是受到限制的(图3)。若熟料中铁酸钠的含量超过8%，熔化温度降低得非常显著。应当注意，开始收缩温度和急剧收缩温度实际上不取决于熟料中铁酸钠的含量，而且熔化温度的降低还会导致软化温度范围变窄。

很自然会想到相成份的性质和混合料浆主要成份(赤泥)的细度会以某种形式影响熟料形成的进程。为了获得需要的熟料形成过程的数据，它的主要阶段和烧结的完成程度以及标准熟料的溶出率，我们采用了膨胀测量技术。对熟料的物理性质如强度(抗碎强度)和孔隙度，我们都进行了测量。孔隙度是用流体静力称重法确定的。

所得的结果由下表示出。

熟料的物理性质和有用成份的回收率随烧结温度的变化而变化的情况

烧结温度 °C	抗碎强度 公斤	孔隙度	回收率		灼减 %
			$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	
800	18	62.4	63.1	72.3	6.2
850	32	62.6	79.5	79.7	5.0
900	35	62.0	82.5	85.0	2.2
950	35	62.0	84.6	89.2	1.5
1000	55	60.0	85.3	91.4	1.2
1050	120	55.0	85.9	91.1	0.7
1080	220	51.5	87.0	91.0	0.7
1120	630	28.4	86.5	91.8	0.6
1150	820	11.7	86.9	91.8	0.6
1180	1030	13.5	87.5	92.8	0.8
1200	1400	12.7	87.7	92.7	0.7

从得到的结果中可以得出下面的结论：

- 1、当烧结混合料浆时，形成熟料的反应实际上在达到收缩温度(1000°C)时才结

束。这就是说当物料变成固相达到要求的情况下才结束。需要指出的是，当温度进一步升高时，有用成份的回收率不会再发生变化。混合料浆的细度及其主要成份——赤泥的再生特性保证了混合料成份之间固相反应的彻底性。由于物料的充分混合和精心配制使固相之间的反应得以顺利进行。

2、在急剧收缩开始出现前的温度范围内（在此范围内，收缩的速度较低），熟料的孔隙度和强度变化很小。这证明形成熟料的固相反应相当完全。因为烧结块孔隙度和强度变化微小说明此时很少有液相存在。

3、从混合料组分的固相反应很充分这一点上可以得出这样的结论：混合料浆的烧结温度应满足水化学处理设备对熟料所要求的物理性质的需要。

4、从所进行的研究中可得出这样的结论：若对铁酸钠含量的要求不那么严格，混合料浆可进行低温烧结，这样就可在此烧结和粉碎的过程中节省许多能量。

5、通过宽阔的烧结范围下得到的熟料的相成份数据证实了熟料形成过程中固相反应的强度。根据X射线分析所得的数据可知，当烧结温度达到900°C时，熟料中所应有的主要物相（ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ； $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ； $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ； $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ； $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ ）在熟料中就已存在。当温度再升高时，可以看到熟料所有的物相会结晶的更好，而这对它们在水化学处理过程中的行为会产生有利的影响。

### 熟料的水化学处理

苏联在工业上用高硅矿石生产氧化铝所采取的工艺几乎都是建立在使 $\text{SiO}_2$ 结合成硅酸二钙的基础之上的。这方法的经济效益在相当大的程度上取决于硅酸二钙和液态铝酸盐的反应程度及反应产物的成份。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{O}$ 在熟料溶出过程中的损失主要取决于 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ )的分解程度及生成含有数量不等 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 的铝硅酸钠 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.7 \sim 1.9 \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (SHS)和水化石榴石 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot X\text{SiO}_2 \cdot (6-2X)\text{H}_2\text{O}$ 的多少。 $\text{C}_2\text{S}$ 的分解度、所生成的各种物相的比例和水化石榴石中硅的饱和度主要是由溶液的浓度和温度决定的。图4表示的是 $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 分解产物与铝酸盐溶液和浓度有关的两个相区。根据I区分析的数据，停留时间为10小时，由 $\beta\text{-}\text{C}_2\text{S}$ 分解而最终生成产物有 $(0.8 \sim 1.2)\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (CSHI)， $\text{CaCO}_3$ ， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ， $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和碳铝酸钙— $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。

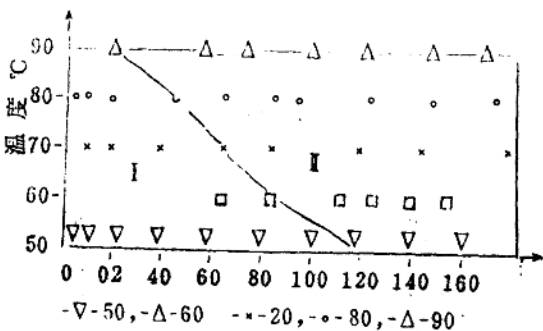


图4 铝酸盐溶液中 $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的溶解产物与溶液浓度和温度°C的关系相区

碳酸铝酸钙相和雪硅钙石样 (CSHI) 相都不是平衡相。它们存在的时间取决于溶



液的温度和浓度。

对于Ⅰ区来说, 新生成的最终产物是 $C_3AS_x \cdot H(6-2X)$ , SHS,  $CaCO_3$ 和 $Al(OH)_3$ 。

图5所示的曲线表明了 $\beta-C_2S$ 的分解率与铝酸盐溶液的浓度和温度的关系。当温度达到我们认为是最高温度时(90°C), 分解度最高。当溶液的温度升高时, 特别是溶液的浓度降低时, 所生成的含有二氧化硅的水化石榴石的饱和度会有明显的增大(图6)。这种情况可以这样来解释: 类质同晶体的 $H_2O$ 被水化铝酸钙 $C_3AH_6$ 中的 $SiO_2$ 替换的程度既取决于水化铝酸钙结构的紊乱程度, 也取决于不稳定的六方晶型转变为稳定的正方晶型的速度以及离子的扩散速度。随着溶液温度和浓度的降低, 碳铝酸钙向水合铝酸钙的转化速度和水合铝酸钙由六方晶型向正方晶型结晶格的转化速度也随之减慢, 而硅离子的扩散速度却随着加快。随着含硅水化石榴石饱和度的提高, 硅结合成水化石榴石与SHS之间的比例也相应地发生变化。

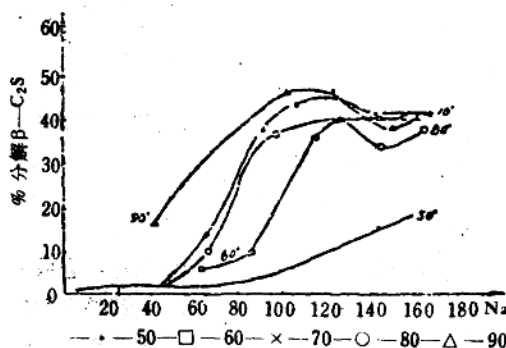


图5  $\beta-2CaO \cdot SiO_2$  分解百分比的变化与铝酸盐溶液的浓度和温度的关系

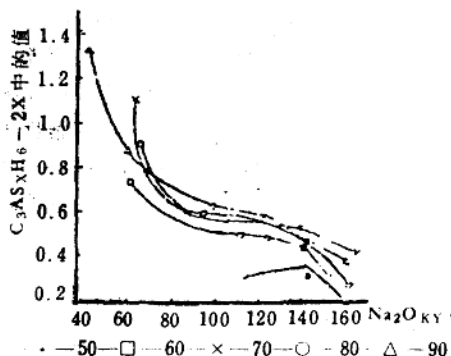


图6  $C_3AS_xH(6-2X)$  中X (克分子) 随铝酸盐溶液的浓度和温度变化的情况

所进行的研究完成了改进拜耳—烧结联合法工艺流程的基础。流程改进后可降低熟料溶出液的浓度, 可以不显著增加分离和洗涤赤泥用水和不显著增加蒸发工序水量并可合理进行脱硅和处理烧结法循环的铝酸盐溶液。除了由于在熟料的水化学处理中减少了氧化铝和碱损失而提高了 $Al_2O_3$ 和 $Na_2O$ 的回收率外, 还避免了烧结法部分中的脱硅和铝酸盐处理分开作业。

### 拜耳——烧结联合法的优点

在氧化铝的生产中, 碱损失在生产成本中占有相当大的比例。将拜耳法和烧结法联

合起来（有并联和串联之分）能有效地解决用铝土矿生产氧化铝时流程中碱损失的补充问题。

拜耳法和烧结法的联合大大简化和改进了烧结和拜耳法循环流程。

拜耳—烧结联合法的主要优点如下：

- 1、可以减少流程中的碱损失并可用并不太贵的苏打粉来补充流程中的碱损失。
- 2、勿需进行循环的碳酸钙的石灰苛化，而苛化可在回转窑里进行的，这样就可清除掉溶液中的有机物杂质。
- 3、勿需进行铝酸盐溶液的碳酸化，从而就可大幅度降低对溶液脱硅效率的要求。
- 4、在苏联，拜耳—烧结联合法（串联）已经发展到通过霞石浆炉料的加入来补充流程中的碱损失的地步。此技术的主要特点是对烧结浆液和拜耳浆液共同脱硅，对碳酸盐和硫酸盐单独回收，同时对铝土矿中的铬、钒、镓进行回收，用赤泥来生产水泥。结果，对工艺的改进使得能对原料进行综合利用而不用从外部再加碱。

在苏联，为了溶出熟料，已经研究出了各种各样的工艺流程并在工业上得到了应用。其中有：

——利用熟料颗粒有限的相互运动，用渗滤器、带式溶出器、立式溶出器溶出粗粒熟料的开路流程；

——带有预分离和细粒熟料用浓度很低的洗水进行搅拌溶出的开路—搅拌联合溶出流程；

——含有粗粒熟料开路溶出（第一段）和磨后料浆的最后溶出（第二段）的两段溶出流程；

——熟料搅拌溶出流程。在此流程中由于省掉了脱硅工序以及磨细的熟料同浓溶液接触时间不长，溶出及料浆的分离都是在拜耳循环稀液中进行，生成的浓溶液与拜耳溶液一起进行处理。

根据各种生产方法（包括拜耳法及拜耳—烧结联合法）之间的内在关系，原料成份广泛的变化范围和制订的主要工艺设备参数研制特定的生产数学模型以满足各种目的需要（用于最佳设计和过程控制）。用联合法从铝土矿中提取氧化铝已在苏联得到广泛的运用。这种方法解决了矿物组成和化学成份不同的铝土矿的有效利用问题。

参考文献略

译自《Bauxite》1984, 775~787.

转载自《氧化铝生产文集》1986年No. 1.

## 关于拜耳—烧结串联法 处理低品位铝土矿的问题

〔苏联〕 Н. С. Мальц 等

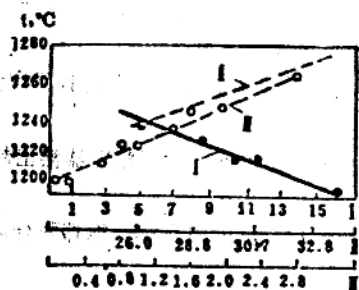
毛学恒 译

根据低品位铝土矿的化学组成和矿物组成特点，无论是为了实现原则上新的赤泥烧

结和赤泥熟料溶出工序，还是在确定传统拜耳法系统的工艺时，都要求解决一系列设备工艺问题。

高铁铝土矿赤泥烧结的特点是不可能采用一般的生料主要组份配方，因为熟料的组成在 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 系的范围内已失去三组份的性质。由于补偿碱损失而加入流程的循环碱和新碱的数量是有限的，赤泥中的氧化铁只有一部份结合成亚铁酸钠。

根据以前做过的试验可以确定出熟料熔点与其相组成的关系（见图），并能根据计算确定出熟料中有固定数量亚铁酸钠的适宜生料配碱量<sup>(3)</sup>。根据计算找到了适宜的石灰石配入量，使全部二氧化硅结合成二钙硅酸，而没有结合成亚铁酸钠的剩余氧化铁结合成亚铁酸钙。



I—熟料中NF的含量，%；  
 II—熟料中NA的含量，%；  
 III—熟料中 $\text{CaO}$ 与 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的分子比。  
 纵座标系熟料的熔点。

熟料熔点与其相组成的关系

这种适宜的赤泥生料组成保证了使熟料中 useful 组份的回收率提高1.5~2%，烧成窑的运转周期延长了30%。

生料熔点低（1150~1170°C）和烧成温度范围比较窄（~50°C），要求创造一些特殊的料浆喷雾条件和特殊的燃料燃烧条件。料浆通过螺旋喷雾器结构的一个喷枪喷入窑内，从而保证了喷雾料柱适当地延长和料浆在窑内得以均匀地分布。

合理地安排窑灰返回窑内，对顺利地掌握这一过程起了很大的作用，即：

在冷竖管中捕集的窑灰，从窑的冷端返回窑内，旨在喷雾料柱区内形成窑灰垫层以减轻干燥带的结圈程度；

在旋风除尘器和电收尘器中捕集的窑灰，从窑的热端返回窑内送到燃烧带，以降低火焰温度和保护窑内衬不致过热，这对减轻烧成带的结圈强度起到了良好的作用。

窑和冷却机的连接部位，在结构上做了新的处置，从而能够利用鼓风机将冷却机中加热的空气送到燃料燃烧带，而不必以专用鼓风机通过冷却机强制抽空气。采用这样的设备工艺方案在短期内不仅达到了，而且还超过了烧成窑的设计产能。

为了熟料处理，设计和采用了在沉降槽中反向洗涤赤泥并利用水力旋流器分离赤泥的两段溶出系统。

根据试验研究结果，已确定出适宜的熟料水化学处理条件和新的反向洗涤赤泥的温度制度，结果是在保证必须的赤泥沉降性能情况下，氧化铝和碱的回收率提高了1.5~2%<sup>(2)</sup>。

北奥涅加矿床的铝土矿属于三水铝石—水软铝石型铝土矿，其特点是氧化铁含量低，铝硅比低，因此，赤泥烧结时可以保持符合生料饱和配方的各组份比例（即仅石灰石按

形成  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  配入)。

因此，对于北奥涅加铝土矿来说，串联联合法有许多特点，这主要涉及到拜耳法系统并决定于铝土矿的矿物特性和化学组成<sup>[3]</sup>。

铝土矿中有一水软铝石，需要压煮溶出，而溶出前首先应对铝土矿矿浆进行脱硅处理，以防预热器加热表面大量结垢。

通过试验研究确定，溶出前铝土矿矿浆的制备，包括湿磨和矿浆脱硅，对赤泥的沉降性能有决定性的影响，因为赤泥的沉降性能决定于含水铝硅酸钠在其形成初期的结晶条件，而预热和溶出时高温的作用并不能改变早已形成的赤泥性质。

因此，处理高硅低铁铝土矿时，铝土矿矿浆的制备也是重要的一环——获得需要的质量赤泥。

为此必须使铝土矿中二氧化硅的溶解和含水铝硅酸钠的结晶在加种子的情况下进行<sup>[4]</sup>。否则，当铝土矿同循环溶液相互作用时，循环溶液很快（在 $100^\circ\text{C}$ 下10~15分钟）会为二氧化硅所过饱和，这就可能导致形成结晶不良的含水铝硅酸钠，而获得沉降性能低的赤泥。

有种子参加时，溶液的过饱和并不严重，而重新析出的含水铝硅酸钠主要是被反应过程中已有的种子颗粒的长大而消耗掉。

作为种子，可以使用已脱硅的铝土矿矿浆或是赤泥。若用连续脱硅，可采用第一脱硅机矿浆中的含水铝硅酸钠作种子。

应当指出，处理北奥涅加铝土矿所得赤泥，近85%是由含水铝硅酸钠组成。北奥涅加铝土矿的缺点是含硫量（0.3~0.5%）和含铬量（0.5~0.8%）都比较高。

铝土矿中的硫以石膏形式存在，在溶出时石膏被分解，而生成硫酸钠。根据试验结果，结合成含水铝硅酸钠的硫酸钠的数量超过其随铝土矿带入的数量，因此硫全部都残留在赤泥中，而在以后，在熟料溶出时有硫转入溶液中。

北奥涅加铝土矿中存在的三价铬化合物，在碱溶液中不溶解，残留在赤泥中，而在烧结过程中被氧化，生成易溶于水的六价铬碱式盐。如在窑内创造还原气氛，例如往生料中加还原剂，即可防止烧结时铬被氧化。

通过铬还原和变成三价氢氧化铬沉淀，可从溶液中分离出铬。最好用硫化钠作还原剂。

全苏化学研究所（斯维尔德洛夫市）所做的试验研究表明，可以将分离出来的氢氧化铬沉淀物加工成有很大经济效益的各种商品。由于氧化铁含量不多，以北奥涅加铝土矿的赤泥配制的饱和生料，苛化能力较差，因此，为提高其苛化能力，可向生料中加铝土矿；或用石灰单独苛化一部分纯碱。

为补偿碱损失，最好是向赤泥生料中加霞石精矿代替苛化了的纯碱。

该方案具有如下主要优点：

1、向赤泥生料里添加霞石可改善赤泥的性质，并能有把握地将赤泥用于生产水泥，无论是作原料的一个组份，还是作水泥熟料的活性矿物添加剂均可。

2、随霞石带入的钾碱，通过对溶液的两段蒸发，能以顺利地由拜耳和烧结混合溶液中相继分离出硫酸盐和碳酸盐。第一段蒸发后，分离出不含碳酸盐的硫酸钾，可廉价地将其加工成肥料；第二段蒸发，分离出含少量硫酸盐的循环纯碱。

用此种分离盐的方法,同目前工业生产中使用的的方法比较,能大幅度降低纯碱随硫酸盐带走的损失,并可另建独立的烧结法铝酸钠溶液压煮脱硅工段,因为烧结法溶液同铝土矿溶出后的矿浆相汇合,利用赤泥的脱硅作用即可对烧结法溶液进行脱硅处理。

为溶出 $Al_2O_3$ 含量低的霞石和赤泥熟料,在工业生产中可采用下列两种设备流程:

1、搅拌溶出即在沉降过滤器中连续分离和洗涤赤泥的流程。

2、两段溶出流程,即在第一阶段用筒型溶出器顺流溶出块状熟料,而在第二阶段再将熟料块粉碎成弃泥的流程。

流程1禁用处理高铁熟料,因为析出的氢氧化铁堵塞滤布孔,妨碍赤泥过滤。这种流程对于处理低铁霞石熟料,具有良好的生产指标。流程2适于处理北哈萨克斯坦铝土矿的高铁赤泥熟料。

北奥涅加铝土矿的赤泥熟料,就铁含量(5.5~7%)而言,界于北哈萨克斯坦铝土矿的赤泥熟料(15~16% $Fe_2O_3$ )和霞石熟料(~2% $Fe_2O_3$ )两者之间,并接近于后者。因而,为处理这种熟料,设计了两段磨搅拌溶出流程。

正如半工业试验所表明的,两段磨搅拌溶出流程能有效地处理高铁赤泥熟料。

应该指出,为这种处理低品位铝土矿的有效流程而采取的各项措施,已在工业生产中经过长期验证。

参考文献(略)

译自《Цветные металлы》1981, № 6,

56~59(俄文)

转载自《轻金属》1982年№ 9。

## 用拜耳—烧结串联法处理 富菱铁矿的铝土矿

(苏联) I. P. Kraus 等

柯淑琴 译 顾松青 校

苏联许多矿床中的三水铝石型铝土矿含有大量的菱铁矿( $FeCO_3$ 达7%)。铝土矿中这种矿物的存在对于处理过程和经济性是非常不利的。

对菱铁矿型原料的矿相和化学组成的研究,及在氧化铝厂中试图利用这种铝土矿的工艺方法的开发工作,在苏联已经进行很长时间了,其主要目的是开发出采用拜耳烧结工艺转变这种铝土矿的方法。

根据实验室和半工业试验的研究,有两个可供选择的方案:在常压下溶出,采用絮凝剂用于赤泥沉降工序;溶出前对铝土矿进行预焙烧(简单焙烧或磁性焙烧)。这两个可行方案要解决的基本问题之一就是如何能创造出使赤泥从溶液中分离出来的满意条件。

本简要报告讨论采用该两种不同方法处理富菱铁矿型铝土矿的实验室和半工业试验的主要结果。

研究表明,在现行拜耳烧结法中铝土矿原料中菱铁矿含量的不同,表现出它自己的

赤泥沉降速度的不同。如果采用面粉做絮凝剂，含菱铁矿量高的铝土矿（5~7%），产生的赤泥沉降性能很差。为此，采用低温溶出和聚丙烯酰胺做絮凝剂试图改善这种性质。因为在串联法中碱转入到赤泥中的危险不大，因此也研究了在90和100°C溶出后料浆的沉降性质。试验结果汇总于表1。

由此可以看到聚丙烯酰胺的使用导致在溶出温度80~100°C范围内时以高速沉降。但是溶出温度影响最终的赤泥压缩，温度提高，赤泥压缩性变差。试验也指出铝土矿中菱铁矿对赤铁矿之比与赤泥沉降性质之间也存在一定的关系：菱铁矿占整个 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量的比例越高，在有面粉存在的情况下，赤泥沉降性质越差。进一步研究表明：赤泥沉降和铝土矿中游离氧化铁（以赤铁矿形式）对二氧化硅之比之间存在正比关系。这可以假设，当采用黑麦作絮凝剂时，由于赤泥中要絮凝的主要矿物是赤铁矿，因此赤铁矿量的减少将导致系统中碳酸铁比例的增加，而这种碳酸铁是破坏絮凝的主要因素。在有合成絮凝剂时没有观察到这种现象。

这种方法的基本缺点是必须提供用于铝酸钠溶液脱硅的专门设备。另一个缺点是由于菱铁矿完全分解使循环溶液中的碳酸钠含量将增加，这个事实反过来要求相应地提高碱分离和赤泥烧结设备的性能。

第二个选择方案，即铝土矿预焙烧就没有这些缺点了。铝土矿预焙烧的实验室试验指出：

- 1、铝土矿中所含的有机物将完全被氧化；
- 2、吸附的水分将全部赶走；
- 3、结构水将除掉80%；
- 4、约50%的方解石和实际上为全部的菱铁矿被热分解；
- 5、预焙烧铝土矿的赤泥具有令人满意的沉降性质。

用于试验中的铝土矿具有下列成分： $\text{Al}_2\text{O}_3$ —41.5%， $\text{SiO}_2$ —8.6%， $\text{Fe}_2\text{O}_3$ —19.1， $\text{FeO}$ —7.3%， $\text{CO}_2$ —4.0%，灼减26.1%。在550°C下焙烧15分钟后，在200°C下，含270 g / l  $\text{Na}_2\text{O}$  总碱和苛性比3.5的溶液中溶出3小时所得到的赤泥很容易沉降，氧化铝溶出率接近于理论值。

在这方面必须进一步研究开发新的工艺方法。我们研究了拜耳烧结串联法中磁性焙烧的可行性，压煮器中高压溶出后的赤泥采用磁性分离。

我们是首次在氧化铝工业中进行了对富铁原料磁性焙烧的半工业规模试验的。我们采用1.6×22M的管状窑用于焙烧。铝土矿的成份是 $\text{Al}_2\text{O}_3$ —40.3%， $\text{Fe}_2\text{O}_3$ —20.5%， $\text{FeO}$ —4.2%，灼减24.0%。将其破碎为40mm，并在有褐煤存在的情况下，在650~700°C下焙烧20~30分钟。当达到最佳焙烧参数时，60~70%的氧化铁被转变成磁铁矿形态。实际上所有的菱铁矿都被分解了。在焙烧铝土矿中 $\text{FeO}$  7~9%，采用磁分离的铁精矿回收率相对于焙烧物料重量达20~25%，氧化铁回收率高达50~55%。重复净化操作，分离开的带磁性的部分为铁含量56~58%的高品位铁精矿。

铝土矿磁性焙烧过程进行平稳，没有任何问题，且容易控制。溶出后得到的料浆的磁性分离也被证明是令人满意的。

能够得出这样的结论：简单或磁性预焙烧铝土矿可以解决与采用拜耳烧结串联法处理富菱铁矿型铝土矿有关的所有基本问题。

表 1 铝土矿的湿法化学处理

编 号	温 度 / °C		溶 出 时 间	溶 液 量 / l	固 体 浓 度 / l		沉 降 速 度 / m / 时	溶 液 组 成						铝 土 矿 组 成				
	溶 出	沉 降			初 期	3 小 时 后		总 $\text{Na}_2\text{O}$ / g / l	以 $\text{NaOH}$ 计 $\text{Na}_2\text{O}$ / g / l	$\text{Al}_2\text{O}_3$ / g / l	苛 性 比	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	灼 减 $\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	总 铁	$\text{FeO}$	$\text{CO}_2$	
1	89	80	250	44.5	340.0	1.74	151.3	126.2	111.1	2.30	1.87	48	27.9	9.55	44.03	16.16	9.5	5.3
2	90	90	250	45.0	183.0	1.36	158.0	131.0	117.3	2.85	1.84	42	27.9	9.55	44.03	16.16	9.5	5.3
3	100	90	250	45.5	189.0	1.14	156.2	130.0	111.0	2.00	1.95	55	27.9	9.55	44.03	16.16	9.5	5.3

本报告中讨论的富菱铁矿的三水铝石型铝土矿的三种可供选择的处理方法，无论在工艺上还是在设备上，目前正处在不同的发展阶段，我们的目的是要尽快地达到工业化，因此将马上进行工艺和经济的计算，对最有希望的可供选择的方法进行半工业化试验。

译自《Characterization and processing of bauxites》

VAMU—ALUTERV—FKI 3.1979, Budapest

## 拜耳—烧结法氧化铝生产中 拜耳法系统最佳参数的确定

〔苏〕 A. И. Иаев等

田兴久 译 向华 校

巴甫洛达尔铝厂拜耳—烧结串联法生产氧化铝中，拜耳法系统当前所用的设备工艺指标，与传统的拜耳法工厂或与拜耳—烧结并联法工厂相比，并无本质上的区别。

同时可以认为，由于烧结赤泥引起的某些设备工艺上的变化，拜耳—烧结串联法中拜耳法系统的工艺制度与设备组成应有自己的特点。

利用编制出的氧化铝生产数学模型确定了最佳参数。数学模型把选择的生产效率准数与工艺制度的主要参数结合在一起。

所说的数学模型不外乎是一组各生产工艺阶段的主要的物料和能量平衡方程式。在许多情况下，模型中包括与生产参数关联的统计学方程式和能够确定物料随时间转化程度的动力学关系式。

例如，烧结法系统以每个工序生料各组份的物料平衡模拟出来。氧化铝和总碱的回收率与熟料组成之间具有统计学关系。按液体和固体产物的体积平衡和质量平衡、氧化铝和碱的物料平衡，模拟出熟料的溶出过程和铝酸钠溶液的脱硅过程。

拜耳法系统可以通过铝土矿和循环溶液配料的基本方程式、各种产物中液相和固相的平衡以及氧化铝和碱的分配模拟出来。

从补偿随弃渣、硫酸盐、最终产品和机械损失造成的碱损耗的角度，定出过程中加入的苛性碱总量。同时还要考虑在产品中碱贮存量的变化。

利用模拟溶液分解过程的动力学关系式，根据溶液初始浓度、晶种比、分解时间和分解槽的温度分布，可计算出母液的组成和苛性比。

数学模型的特点是，表示材料、原料和能量（烧结和焙烧时的燃料，用于溶出、脱硅和蒸发的热能）费用的所有生产参数，均按加入拜耳法系统的单位矿石量选取。

但是在计算的最后阶段，则转化为计算氧化铝的总成本。

由于存在循环物料（循环溶液、硅渣、循环纯碱等），按模型所做的计算是按迭代收敛循环进行的。

对生产拟出的数学描述与企业全年活动结果一致。

在评价工艺制度和设备的参数时，选取由原料和能量费用决定的氧化铝可变成本，作为最佳自然准数。



最佳化的步骤是，按所研究的参数变化范围中选定的间隔，依次解不同值最佳化参数的数学模型。同时将数学描述中包括的所有其它设备和生产工艺参数，按实际标定的水平固定下来。

能保证可变成本最小的参数值，视为最佳值。

选择工艺参数的分析方法，在颇大程度上克服了通常的设计勘察计算中的缺点。常规计算中的原始数据系取自生产实际经验，而过程条件的变化范围受到限制，一般是根据研究、设计和工业实践直观规定的。

利用编制的模型可以确定出各种变化对氧化铝可变成本某些项目的影响，如拜耳法和烧结法系统中浓度制度的变化。列出的数据可以证明在接近标准制度条件下这种影响的程度：

氧化铝生产中蒸汽 ( $S^*_n$ )、苛性碱 ( $S^*_k$ ) 和铝土矿 ( $S^*_g$ ) 的费用降低值，卢布/吨

浓度降低:	$S^*_n$	$S^*_k$	$S^*_g$	$S^*$
循环溶液中N降低10克/升	-0.24	0.09	0.03	-0.13
拜耳法系统: Na降低10克/升	0.29	-0.26	-0.34	-0.40
$\alpha$ 降低0.1	-0.71	0.20	-0.03	-0.49
烧结法系统: Na降低10克/升	0.22	0.10	-0.17	0.06
$\alpha$ 降低0.1	-0.26	-0.03	-0.22	-0.63

注:  $S^*$ —总成本

所列数据表明，工艺制度最佳化的方向，可以是降低拜耳法系统循环溶液的苛性碱浓度 (N) 和铝酸钠溶液的苛性碱浓度 (Na)，以及降低两个系统铝酸钠溶液的苛性比。

为了全面地分析氧化铝生产，在按照最佳化计算结果绘制的图1~5上，示出了氧化铝整个成本中可变成本的变化特性和成本中各项目的主要变化。计算系以拜耳法系统所产生的赤泥全部处理为条件。

弄清循环溶液和铝酸钠溶液浓度最佳化的可能性有着极为重要的意义，因为拜耳—烧结串联法中的赤泥不是送往堆场而是送去烧结，所以改变和放宽了对赤泥洗涤程度的要求。

图1示出了可变成本及其组成项目的变化与拜耳法系统循环溶液浓度N和铝酸钠溶液浓度Na间的关系。

可以看出，当循环溶液的苛性碱浓度从230~240克/升（现在采用的浓度）改变到100克/升（工艺上完全可以接受的水平），单位产品的成本可降低1.2卢布。

应该指出，用于溶出铝土矿的循环溶液调配组织得十分完善时，存在着循环溶液的浓度降低到180~190克/升Na<sub>2</sub>O<sub>苛</sub>而不改变铝酸钠溶液苛性比的现实可能性。

例如，在温度100°C和溶液浓度190克/升Na<sub>2</sub>O<sub>苛</sub>条件下，溶解三水铝石时的平衡苛性比为1.53。

根据实验室与工厂实际数据，溶出后溶液的苛性比应当比平衡苛性比高0.1~0.2，这是因为必须创造在工业生产中以比较短的时间稳定地使氧化铝从铝土矿中充分溶出的条件。

除此以外，溶出后溶液的组成应该为以后的泥浆稀释和赤泥分离工序创造最佳化的