

[文章编号] 1004-0609(2001)05-0890-05

氧化铝生产中的两段磨—水力旋流器 磨矿分级新工艺的开发^①

汤世泰

(平果铝业公司, 平果 531400)

[摘 要] 针对平果铝矿石的特性、矿石的可磨性及溶出性能对磨矿工艺的要求, 开发了棒磨开路、球磨与水旋器闭路的两段磨—水力旋流器磨矿分级新技术及大型磨机。该工艺具有明显的优点: 设备大型化, 充分发挥了棒磨机 and 球磨机各自的特性; 工艺配置合理, 解决了难磨铝矿的磨矿技术问题。与传统的一段磨相比, 磨矿电耗降低约 6.22 kW·h/t, 矿石中氧化铝溶出率提高, 年创经济效益 4 400 多万元, 具有广泛的推广应用价值。

[关键词] 堆积型铝土矿; 可磨性; 溶出性能; 棒磨; 球磨; 水力旋流器

[中图分类号] TD921+.4

[文献标识码] A

国内氧化铝厂磨矿工艺均为一段磨加螺旋分级机, 磨机直径为 2.7~3.2 m, 生产能力均在 55 t/h 以下。由于螺旋分级效率(低仅约 40%), 且矿石粉碎和研磨均在一段磨内完成, 造成磨矿效率低及无效循环多, 部分矿石不能被磨细, 而部分矿石则被过磨, 产品粒度不均匀, 磨机产能得不到充分发挥, 电耗增加, 矿浆细度难以保证, 矿浆跑粗事故时有发生, 对生产影响严重。国外氧化铝厂大都采用易磨易溶的三水铝石或一水软铝石矿, 对磨矿要求不高, 多采用一段磨流程^[1]。平果铝土矿的可磨性极差, 必须自行研究开发出适合于处理平果铝土矿的磨矿新技术和大型磨机。

1 平果堆积型铝土矿的特性

1.1 矿石特性

平果铝土矿除了具有典型的一水硬铝石型铝土矿的属性外, 还具有自身的特性。由于长期岩溶及风化作用, 原生沉积的高硫铝土矿, 在风化改造过程中随着硫的流失, 矿石由沉积型高硫铝土矿逐渐转变为堆积型高铁铝土矿^[2, 3]。其综合样品化学成分为: Al_2O_3 55.66%~67.19%, Fe_2O_3 18.82%~19.26%, A/S 10~20。矿物组成为^[4, 5]: 一水硬铝石 61.04%, 三水铝石 0.57%, 高岭石 9.88%, 绿泥石 3.24%, 石英或玉髓 0.85%, 针铁矿 16.30%, 赤铁矿 2.60%, 锐钛矿及类质同象 TiO_2 2.99%。平果矿经实验室及半工业溶出试验证明, 属难溶矿

石, 其中有 3%~5% 的氧化铝属结晶完整的一水硬铝石, 几乎不溶出; 在 250 °C 以下溶出时, 平果矿的氧化铝溶出率比国内其它铝矿低 2%~3%, 在 260 °C 高温溶出时, 则偏低不超过 1%, 差别不大^[6, 7]。平果矿虽含铁高且主要以针铁矿形态存在, 但因其密度较大, 却有利于赤泥沉降^[8]。平果矿与国内外其它铝矿特点对比见表 1。

1.2 平果铝矿溶出性能—磨矿细度对氧化铝溶出率的影响

国内铝矿如河南、贵州矿的溶出性能较好, 在碱浓度 220 g/L, 磨矿细度大于 150 μm 的少于 10%, 大于 100 μm 的少于 20%, 溶出温度 243 °C 时, 就可取得满意的溶出效果(赤泥 $\text{A/S} < 2.0$)。希腊铝厂溶出一水硬铝石的技术条件为: 碱浓度 230~240 g/L, 磨矿粒度小于 315 μm 的占 95%, 小于 63 μm 的占 45%; 溶出温度 258~260 °C 时, 相对溶出率可达 94% 左右; 而平果矿在与希腊铝厂相同的溶出条件下, 磨矿细度必须在 315 μm 占 98.75%, 小于 63 μm 的占 65% 时, 才能达到 94% 左右的相对溶出率^[4]。这表明平果铝矿属极难溶出的矿石。

对平果铝矿进行了不同磨矿细度对溶出率影响的试验研究。在溶出温度 260 °C, 母液 Na_2O 浓度 230 g/L, 配料中铝酸钠溶液的苛性化系数(α_k) 为 1.50(R_p 1.10), 溶出时间 60 min 的条件下, 不同磨矿细度对溶出率的影响列于表 2。

由表 2 可知, 磨矿细度对溶出率有极大影响,

① [收稿日期] 2000-09-29; [修订日期] 2001-04-05

[作者简介] 汤世泰(1946-), 男, 教授级高工。

表 1 平果铝矿与其它铝矿对比表

Table 1 Content contrast of Pingguo bauxite with others										%
Mineral	Chemical composition				Main mineral			Mineral type		
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	H ₂ O	Diaspore	Kadinite	α-FeOOH	Hard bauxite	Brown iron	Clay mineral
Pingguo, Guangxi	62.2	14.7	4.37	14.60	60.89	9.31	20.78	77.5	16.7	5.6
Xin'an, Henan	71.30	1.17	8.90	14.53	75.53	14.91	Less	Main	0	Less
Xiuwen, Guizhou	71.65	1.10	8.98	13.37	77.13	13.22	Less	Main	0	Less
Greece	56.0	21.0	4.6	13.10						

表 2 不同磨矿细度对溶出率的影响

Table 2 Influence of different grinding particle sizes on digesting yield						
No.	Particle size distribution/ %				Digesting result	
	> 250 μm	100~ 250 μm	45~ 100 μm	< 45 μm	α _k (R _p)	η/ %
1	0.00	2.72	19.02	78.26	1.53(1.075)	89.24
2	3.57	9.65	20.63	66.15	1.54(1.068)	85.4
3	1.00	44.85	13.25	40.40	1.58(1.041)	80.0

磨矿细度粗时，可使氧化铝实际溶出率下降 9%。综合上述溶出试验和国内外氧化铝厂的操作条件，为确保溶出率和生产设备正常运转，确定平果氧化铝生产对磨矿粒度的要求为：小于 315 μm 的占 98.75%，小于 63 μm 的占 65%，并以此作为研究磨矿技术的依据。

分级效率达 80%。不同的给料粒度，可选择不同的给料含量，见表 3。

表 3 给料粒度与料液含量的关系

Table 3 Relationship between feeding particle size and content					
Content of particle below 63 μm/ %	25	30	35	40	
Feeding solid content/ %	35.5~ 37.5	39~ 41	41~ 43	43~ 45	

2 平果铝业公司的磨矿工艺

2.1 平果铝矿两段磨—水力旋流器磨矿分级技术

实验室磨机规格： $d420\text{ mm}\times440\text{ mm}$ ，实验室水力旋流器规格： $d75\text{ mm}$ 。平果铝矿化学成分及其它条件为：Al₂O₃ 62.77%，Fe₂O₃ 15.45%，A/S 11.21，矿石粒度 $\leq15\text{ mm}$ ，密度 3.16 g/cm³，向水旋器进料的矿浆细度小于 1mm，母液中 Na₂O_k 的含量为 227 g/L，Na₂O_l 253.34 g/L，α_k= 2.53，25℃时密度为 1.36 g/cm³，90℃时粘度为 1.84×10⁻³ Pa·s。

2.1.1 磨矿操作试验

试验结果表明：装球量 45% 时，出现“胀肚”现象，降至 40% 仍不易操作，以后的试验都在装球量 35% 的情况下进行，此时磨矿过程稳定，易于操作。

2.1.2 水旋器分级试验

水旋器分级试验表明：在给料压力 80~ 100 kPa，水旋器角锥比 0.4~ 0.6，给料粒度小于 63 μm 的占 25%~ 40% 条件下，可得到粒度小于 315 μm 的占 98.75%，小于 63 μm 的占 65% 的合格产品，

2.1.3 磨矿分级工艺流程的选择

根据平果氧化铝厂一期工程设计年产 30 万 t 氧化铝，每小时需磨制 85 t 铝矿的要求，实验对传统的一段磨与新开发的二段磨流程进行了对比研究^[9, 10]：1) 一段磨流程：用螺旋分级机脱粗，水旋器作控制分级的闭路流程，见图 1；2) 两段磨流程：一段棒磨机开路，二段球磨机与水旋器闭路的流程，见图 2。

对上述两种磨矿流程分别进行了磨机功耗计算和选择，结果见表 4。两种磨矿分级流程研究结果表明：棒磨开路、球磨与水旋器闭路的两段磨流程，不但能充分发挥棒磨机破碎能力强而球磨机研磨能力好的特性，而且棒磨机排矿与球磨机排矿进入同一泵池混合，然后送至水旋器分级，不仅易于实现自动控制，而且可以充分调节两段磨的负荷，配置上整齐合理。最终决定采用棒磨机(粒度为 900 μm) 开路、球磨机(粒度为 125 μm) 与水旋器闭路的两段磨矿分级工艺流程，并以此流程来选择和计算相应的磨机和水力旋流器。

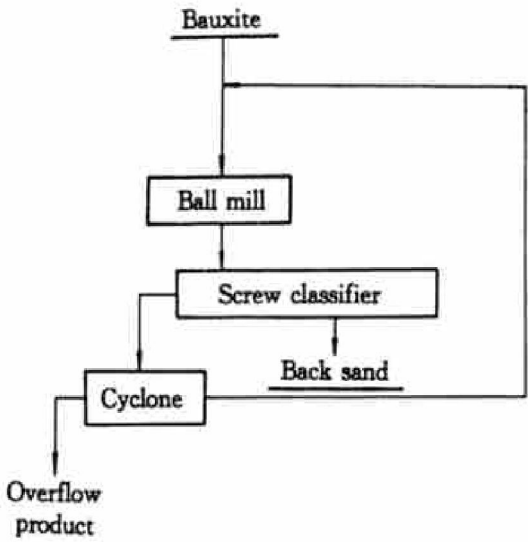


图 1 一段磨矿工艺

Fig. 1 Process of one stage grinding

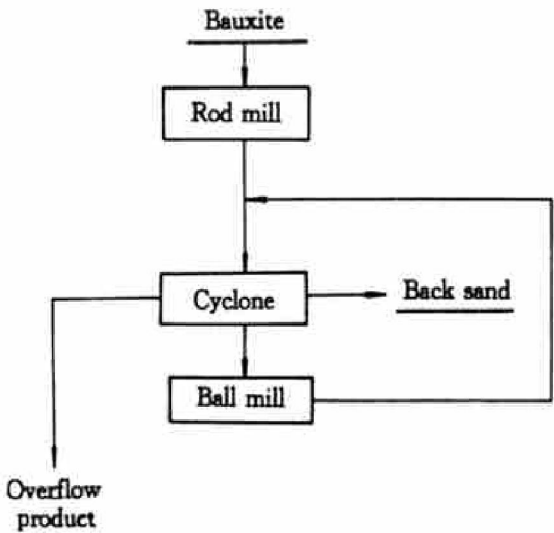


图 2 两段磨矿新工艺

Fig. 2 New process of two-stage grinding

2.2 磨机设备的规格和计算

为确定磨机规格,进行了平果铝矿可磨性试验。对比矿样,取自郑州铝厂用的河南铝矿。试验主要内容:测出平果铝矿的邦德棒磨功指数、邦德球磨功指数,对比可磨度等数据。

2.2.1 计算依据

平果铝矿的邦德棒磨功指数、邦德球磨功指数试验结果见表 5。

平果铝矿用母液介质磨矿与用水介质磨矿,在产品粒度小于 63 μm 占约 65% 时的相对可磨度 (K) 为 1.17。平果铝矿与河南铝矿的对比可磨度 (K) 为 2.25,即磨 1 t 平果矿所消耗的功相当于磨 2.25 t 河南矿。

2.2.2 棒磨机选择与计算

棒磨粒度 900 μm, $d_{80} = 677 \mu\text{m}$; 球磨粒度 125 μm, $d_{80} = 90 \mu\text{m}$ 。

$W_{iR} = 14.53 \quad W_{ib} = 20.46$

按功指数直接计算法,

棒磨: $W_R = \frac{W_{iR} \times 10}{\sqrt{P_2}} - \frac{W_{iR} \times 10}{\sqrt{F_2}} = \frac{145.3}{\sqrt{677}} - \frac{145.3}{\sqrt{12000}} = 4.26 (\text{kW} \cdot \text{h/s})$

未修正轴功率: $4.26 \times 1.102 \times 1.17 \times 85 = 467 (\text{kW})$

每吨棒支取的功率:

$K_{WR} = 1.752 \times D^{1/3} (6.3 - 5.4 V_p) f_{cs}$
 $= 1.752 \times 3.0^{1/3} (6.3 - 5.4 \times 0.4) \times 0.664 = 6.95 (\text{kW/t})$

总装棒量: $448 \div 6.95 = 65 (\text{t})$

每米磨机装棒量: 15.4 t (充填率 40%); 需要磨机长度: $L = 65 \div 15.4 = 4.22 (\text{m})$

实选棒磨机规格: $d 3.2 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$, 配用 630 kW, 10 kV 异步电动机。

采用 $d 115 \text{ mm} \sim d 50 \text{ mm}$ 钢棒, 棒长 4.35 m。

2.2.3 球磨机选择与计算

球磨: $W_b = \frac{W_{ib} \times 10}{\sqrt{P_2}} - \frac{W_{ib} \times 10}{\sqrt{F_2}} = \frac{204.6}{\sqrt{90}} - \frac{204.6}{\sqrt{677}} = 13.7 (\text{kW} \cdot \text{h/s})$

$EF_3 = (2.44/D)^{0.2} = (2.44/3.4)^{0.2} = 0.936$

表 4 各磨矿流程磨机参数表

Table 4 Mill parameters of various grinding flow

No.	Grinding process	Unit consumption /(kW·h·t ⁻¹)	Mill shaft power/kW	Mill specification/m	Filling rate/%	Load/t
1	One stage grinding: particle size 125 μm	26.36	2 241	d 4.57 × 7.7	35	198
2	Two stage grinding: rod mill 900 μm	5.27	448	d 3.2 × 4.5	40	65
	ball mill 125 μm	16.54	1 406	d 3.6 × 8.5	35	131
3	Two stage grinding: rod mill 900 μm	5.27	448	d 3.2 × 4.5	40	65
	ball mill 100 μm	20.93	1 779	d 3.6 × 10	35	165

表 5 邦德棒磨、球磨功指数试验结果
Table 5 Testing results of pond index of rod mill and ball mill

Item	Test particle size/ μm	Production particle size $d_{80}/\mu\text{m}$	Pond index W_i	
			As short ton	As metric ton
Rod mill pond index	1 680	1 340	13. 77	15. 18
	900	677	14. 53	16. 02
ball mill pond index	150	110	20. 23	22. 30
	125	90	20. 46	22. 55
	100	65	20. 06	22. 11

未修正轴功率： $13.7 \times 1.102 \times 0.936 \times 1.17 \times 85 = 1\,406(\text{kW})$
每吨球支取的功率：
 $K_b = 4.879 D^{0.3} (3.2 - 3V_p) f_{cs} (1 - 0.1/2^{9-f_{sc}}) + S_z = 10.75(\text{kW/t})$
总装球量： $1406 \div 10.75 = 131(\text{t})$
每米磨机装球量： 15.4 t (充填率 35%)；需要磨机长度： $L = 131 \div 15.4 = 8.5(\text{m})$
实选球磨机规格： $d\,3.6 \text{ mm} \times 8.5 \text{ m}$ ；可配用 $1\,800 \text{ kW}$ ， 10 kV 异步电动机。
采用 $d\,50 \text{ mm} \sim d\,25 \text{ mm}$ 钢球。

2.3 磨机结构参数

2.3.1 磨机转速

随着磨机的大型化，其转速率一般在 80% 以下，对于棒磨机，为防止乱棒，转速宜更低些，根据试验结果，确定棒磨机工作转速为 14.2 r/min ，转速率 75%；球磨机工作转速为 17.4 r/min ，转速率 80%。

2.3.2 格子型和溢流型磨机填充率

大型磨机的填充率较低，研究证明，球磨机的填充率为 35% 时，磨机工作性能优于 40%，而棒磨机的填充率仅需 40%。由于填充率较低，可不用格子型，均采用溢流型磨机。

2.3.3 静动压轴承的应用

静动压轴承属节能新技术，即在磨机启动前用 30 MPa 的高压油将轴颈顶起，使之升浮 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 。据测试，磨机启动电流下降 11.9%，启动转矩下降 40%；可减少电机容量，同时对运行中防止大瓦发热、减少磨损起到良好的作用。

2.3.4 同步电动机和异步电动机的选择

大型磨机的驱动方式有两种：第一种是同步机—空气离合器—磨机；第二种是异步机—齿轮减速机—磨机。同步机的控制回路复杂，启动电流较高（为额定值的 7~9 倍），投资较大；异步机控制回路简单，启动电流较低（为额定值的 4~7 倍），较易实

现且投资少，故决定采用异步电动机驱动。
2.3.5 高压电机电压等级
一般铝厂，其高压电机均使用 6 kV 电压。经研究决定在平果铝采用 10 kV 高压电机，其理由为：1) 工厂 10 kV 电网的容量较大，磨机大功率电机启动时，对电网的冲击影响较小；2) 国内已具有生产 10 kV 高压电机的成熟经验。

2.4 水力旋流器组的配置

根据水旋器的试验结果，采用 $d\,500 \text{ mm}$ ，角锥比 0.5，进料口 $d\,132 \text{ mm}$ ，溢流口 $d\,200 \text{ mm}$ ，排砂口 $d\,90 \text{ mm}$ 的水力旋流器 6 台组成水旋器组^[11]，3 台运行，3 台备用。水旋器组采用放射状圆周排列，使各水旋器的工况条件（压力、进料量）相同，以保证溢流的矿浆细度。

3 两段磨新工艺的生产运行情况

开发研制的两段磨矿及水力旋流器分级装备于 1995 年 7 月安装完毕并投入生产运行。为了确保矿浆产品细度合格，在矿浆槽和溶出前槽分设两道返回粗砂的装置，一旦发现水旋器溢流跑粗，可立即从后面工序返回粗砂，从而保证了矿浆的细度。几年来的生产实践证明：研究开发的两段磨矿分级技术，充分发挥了棒磨机破碎能力大、球磨机研磨性能好，水旋器分级效率高的优点，工艺、技术可靠，操作、控制简单，能确保磨矿细度；基本未发生过矿浆跑粗现象，细度合格率长期保持 100%，水旋器与螺旋分级机相比，机械故障大为减少，运转率大大提高，前者分级效率可达 80% 以上，后者仅 50% 左右^[12]；生产实测表明：一段棒磨出口矿浆粒度小于 $63 \mu\text{m}$ 含量已达 10%~20%，经水旋器分级后，直接进入成品矿浆，避免继续在二段球磨内发生过磨；同时减轻二段球磨的负荷。

1997 年 1~7 月有关生产统计数据见表 6。

表 6 生产实际统计指标

Table 6 Practical data

Capacity $I/(\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$	Operating rate/ %	Content of particle/ %		
		Particle below $500 \mu\text{m}$	Particle below $315 \mu\text{m}$	Particle below $63 \mu\text{m}$
81.5	91.3	100	99.98	79.35

4 经济效益及结论

4.1 节电

与传统的一段磨相比,在达到相同的产能及磨矿细度下,原设计每吨磨矿节电 4.55 kW·h,按 1997 年 6 月实测数据计算,实际磨矿电耗为 20.14 kW·h/t,节电 6.22 kW·h/t,2000 年磨矿 85 万 t,动力电价按 0.50 元/(kW·h)计,则年节电 529 万 kW·h,直接经济效益 264 万元/a。

4.2 提高氧化铝产量

由于磨矿产能、指标稳定,均达到设计要求,为氧化铝厂达标超产提供了保障,1997 年氧化铝产量已超过设计产能 10% 以上,2000 年实际完成 42.5 万 t 氧化铝;溶出率、氧化铝回收率、生产成本等指标达世界先进水平。矿浆细度小于 63 μm 含量比一段磨提高 10% 以上,对提高氧化铝溶出率非常有利;据统计数据,现仅以提高溶出率 4.6% 计,则每年可多产氧化铝 2.43 万 t,按每吨氧化铝获利 1 600 元计,则每年可获 3 888 万元的经济效益。

以上 2 项合计,每年可获 4 417 万元的经济效益。

[REFERENCES]

- [1] WANG Lirjuan(王丽娟), LIAO Xintai(廖新泰). “双流法”高固含矿浆适宜磨矿分级流程分析 [J]. Light

Metals(轻金属), 1997(12): 16– 19.

- [2] NONG Hengjie(农恒杰). 广西新圩铝土矿地质特征 [J]. Light Metals(轻金属), 1997(8): 8– 11.
- [3] LU Dongnong(陆东农). 广西某岩溶堆积型铝土矿物质组分的初步研究 [J]. 西南矿地质, 1992(1): 23– 24.
- [4] LIAO Sifu(廖思福). 平果岩溶堆积型铝土矿矿床地质特征及其成因探讨 [A]. 全国铝工业新技术推广应用暨交流展示会议文集 [C]. Beijing: Editorial Office of World Nonferrous Metals, 2000. 377– 380.
- [5] GUO Huaxiong(郭焕雄). 强化一水硬铝石矿的拜耳法溶出 [J]. Light Metals(轻金属), 1997(10): 14– 19.
- [6] ZHAO Qingjie(赵清杰). 一水硬铝石矿溶出新工艺的研究 [J]. Light Metals(轻金属), 2000(1): 17– 21.
- [7] YAN Feng(严峰), ZHOU Jirmin(周霁明). 牙买加拜耳赤泥不良沉降过程中针铁矿的特性 [J]. 轻金属文集氧化铝专辑, 1998(30): 8– 13.
- [8] WU Guoliang(吴国亮). 铝土矿选矿过程中选择性磨矿工艺的应用 [A]. 全国铝工业新技术推广应用暨交流展示会议文集 [C]. Beijing: Editorial Office of World Nonferrous Metals, 2000. 58– 59.
- [9] CHEN Guangzhan(陈广展), GAN Guoyao(甘国耀). 水力旋流器在氧化铝矿浆分级中的应用分析 [J]. 平果铝科技, 2000(4): 29– 31.
- [10] WU Huayou(吴华友), LIU Jiankang(柳健康). 水力旋流器在氧化铝生产中的应用 [J]. Light Metals(轻金属), 1997(氧化铝专辑 25): 30– 34.

Development of two-stages grinding in alumina refinery — new process of water-cyclone grinding and classification

TANG Shitai

(Pingguo Aluminum Company, Pingguo 531400, P. R. China)

[Abstract] In view of Pingguo bauxite properties, the requirements of the attrition of bauxite and digesting performance for grinding process, two-stages grinding —water-cyclone grinding and classification new process and giant mill were developed, one is rod mill open circuit, the other is ball mill and water-cyclone closed circuit. With sufficient advantages, the equipment is giant, making full use of the different characteristics of rod mill and ball mill, solving the grinding problem of difficult attrition bauxite. Compared with the traditional one-stage grinding, the power consumption was decreased about 6.22 kWh/t, the digesting yield was increased, economic benefits of 44 million yuan (RMB) were achieved.

[Key words] accumulating bauxite; attrition; digesting performance; rod mill; ball mill; water-cyclone

(编辑 龙怀中)