德兴铜矿选矿厂碎磨回路①

刘文拯②

(北京有色冶金设计研究院)

摘　要

该文从概述碎磨回路的现状与发展趋向出发，论述德兴铜矿60000t／d规模NO.3选矿厂碎磨回路选择；并据该矿大量自磨试验及生产实践数据，作出了不同方案碎磨回路的比较与分析。

关键词：碎磨回路，高能破碎，多碎少磨，单段球磨

1　碎磨回路的现状与趋向

在金属矿山选矿厂的建设和生产中，碎磨回路是投资最高、能耗最大、生产费用最高的重要环节；也是设备占有吨位，所需厂房面积和操作维修人员最多或者较多的生产工段。一般地讲，碎磨投资约占选矿厂投资的60%，生产费用占40—50%，能耗占60%以上。

Rowland C A，将碎磨回路归纳为8种类型[1]，即（1）单段自磨；（2）单段半自磨；（3）自磨-砾磨；（4）半自磨-球磨；（5）圆锥破碎机-棒磨-砾磨；（6）圆锥破碎机-棒磨-球磨；（7）圆锥破碎机-单段球磨；（8）高能自控破碎-单段球磨。但当前主要趋向于其中的两种回路：第一种是广泛采用的自磨回路，特别是，半自磨（或自磨）-球磨-破碎回路（即SABC或ABC回路）[2]。该回路在国外有色金属选矿厂已获得成功的应用，其典型流程如图1示；主要优点是投资少、生产费用低；主要缺点是能耗普遍高于常规碎磨回路。第二种是近期重新受到好评并有新发展的常规破碎回路，即高能自控破碎-单段球磨回路。它是中细碎破碎-棒磨或中细碎破碎-单段球磨回路的发展。由于这种回路应用高能破碎机实行高能破碎，能较一般破碎机获得数量更多和粒度更细的产品（最终产品粒度达P80 6-8mm），从而能为改善磨矿效率和提高磨矿能力创造良好的条件，亦即有可能实现“多碎少磨”，做到发挥破碎作业的长处和克服磨矿作业的不足，以提高碎磨回路的综合效益。

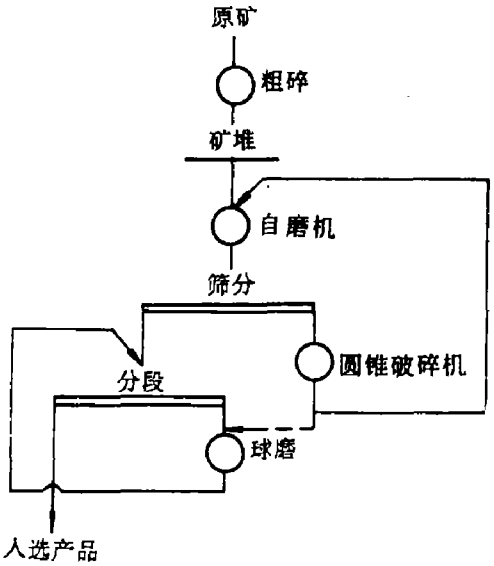

图1　典型的ABC自磨流程

①于1990年10月20日收到

②教授级高工

常规的中细碎破碎-单段球磨回路，在国外的大型特别是我国许多有色金属选矿厂中仍占重要位置。因此，重视高能破碎-单段球磨的新常规回路，使其进一步推广和发展，对于促进我国有色金属碎磨技术的发展和现有碎磨工艺的技术改造，会有重要现实意义。该回路的典型流程图见图 2。

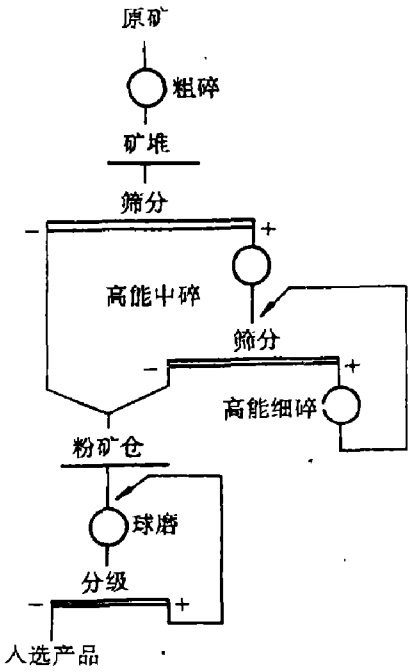

图 2 典型的高能破碎+单段球磨流程

当然，也应当看到，迄止目前，还没有那一种碎磨回路，能够有效的应用于任何碎磨作业，并满足能处理各种矿石及获得特定产品规格的要求。不同选矿厂的碎磨回路都应通过必要的试验研究和技术经济对比，才能获得最佳选择。

2 德兴铜矿碎磨回路的试验研究与生产实践

2.1 自磨回路的试验研究

德兴铜矿于 1971 年将原来 2500t／d 选厂扩建成 10000t／d 的 NO.1 选厂。同年还建成我国第一个 $d2400\times900$mm 湿式自磨试验车间，对德兴矿石进行不同自磨回路的试验研究，多年来累计运行约 4600h，试验用矿石超过 9000t；特别是自 1979 年与美国福陆公司联合进行大规模不同类型矿石的自磨、半自磨试验以来，试验量更多，结果如表 1。

由表 1 可知：(1) 千枚岩型矿石不适于自磨和半自磨；(2) 花岗闪长岩型矿石适于自磨，但产生临界粒子，并且更适于半自磨；(3) 混合矿石适于 ABC 回路。

美国福陆公司为德兴 173000t／d 选矿规模进行概念性设计中，按照北美国家技术经济标准，对半自磨、常规、ABC、全自磨回路，

表 1 德兴铜矿铜厂矿区矿石自磨—半自磨试验数据

序号	矿石类型	试验内容	给料量干矿 (t／h)	给料粒度 F_{80} (mm)	单位功耗 kW.h／t	圆筒筛筛下产品 P80 (mm)	操作功指数 (W_{10})	平均产品粒度 (%) −5.13 (mm)	−0.3 (mm)	−0.076 (mm)	圆筒筛筛上物 +15mm (t／h)	占新给料%	最终产品通过 −200 目%
1	千枚岩	自磨	3.09	73.077	8.70	14.909	193.7	70.35	57.95	42.35	1.21	39.2	54.50
2	千枚岩	自磨	2.96	65.519	9.92	16.000	233.0	60.90	53.40	40.87	1.20	40.5	52.13
3	千枚岩	半自磨 8%	4.95	82.139	7.56	15.000	161.7	63.33	42.07	29.60	0.97	19.6	42.07
4	千枚岩	半自磨 8%	4.49	79.783	7.76	13.614	159.3	65.17	38.80	29.60	1.03	22.9	36.50
5	花岗闪长岩	自磨	2.50	144.296	10.85	0.884	35.0	86.00	76.43	51.33	0.46	18.4	67.17
6	花岗闪长岩	自磨	2.47	152.18	11.20	0.601	29.3	86.70	77.23	52.67	0.46	18.6	68.23
7	花岗闪长岩	半自磨 8%	3.69	169.799	9.49	0.944	31.5	89.90	70.73	43.87	0.28	7.6	58.77
8	花岗闪长岩	半自磨 8%	3.73	150.969	9.41	0.626	26.0	91.47	75.27	48.20	0.29	7.6	63.63
9	混合矿 50:50	ABC	3.47	146.60	7.43	0.534	18.3	93.05	77.80	51.95	0.76	21.9	67.00
10	混合矿 50:50	ABC	3.24	168.260	7.65	0.863	24.2	87.77	74.67	48.60	0.68	21.0	63.50
11	混合矿 50:50	ABC	2.72	81.053	9.71	4.678	86.47	81.03	67.63	45.20	0.89	32.7	58.30
12	混合矿 50:50	ABC	2.49	175.968	9.94	4.695	81.40	80.97	68.47	45.60	0.77	30.9	59.23

进行技术经济比较后认为：半自磨的生产成本居中，基建投资与常规回路相同；ABC 回路的生产成本最低，但投资最高。推荐半自磨流程。其方案比较详见表 2。

4.2 常规碎磨生产实践

NO.1 选厂采用的三段–闭路破碎–单段球磨常规碎磨回路，即上述圆锥破碎机–单段球磨回路。由于初期露采采出的矿石夹杂大量的地表泥水，被迫在中碎前设置洗矿筛分作业以解决破碎系统的生产畅通问题。然而，单段球磨作业从投产开始一直被证明是成功的，磨机的单位能力大，磨矿效率较其他选厂相同规格的球磨机高。其生产数据见表 3。根据该表算出的磨机操作功指数平均为 13.86，而在试验室测得的邦德功指数为 13.61，两者基本相当。

根据上述情况，于 1982 年建设 20000 t／d 的 NO.2 选厂时，仍采用了常规碎磨回路。

3 不同碎磨回路的选择比较

1984 年 8 月我们在设计日处理 60000t／d 规模的德兴铜矿 NO.3 选矿厂时，根据矿石性质，本着技术上要先进可靠、设备要大型化、投资要少、经济效益要好的原则，按照我国的实际价格及德兴生产数据，并参考同类选矿厂——布干维尔的高能破碎实践，对高能破碎的新常规破碎回路、自磨 ABC 开路回路、半自磨回路三个方案进行了全面的技术经济比较，主要结果列于表 4。根据该表并考虑生产要稳定，达产要迅速，运转率要高等综合要求，经过全国专家会议论证，最后推荐采用高能破碎—单段球磨的常规回路。

表 2　17.3 万 t／d　方　案　比　较　表

序号	项　目	单位	半自磨	常　规	ABC	自　磨
1	自磨机规格	mm	*d*9753.6×4572	–	*d*9753.6×4572	*d*9753.6×5182
2	自磨机台数	台	12	–	16	20
3	自磨机电机功率	kW	6710	–	4800	5968
4	自磨机总功率	kW	69747	–	65333	98031
5	球磨机规格	mm	*d*5029.2×8839.2	*d*5029.2×8534.4	*d*5029.2×6705.6	*d*5029.2×8534.4
6	球磨机台数	台	24	36	32	20
7	球磨机电机功率	kW	3730	3730	2798	3730
8	球磨机总功率	kW	81073	115019	81873	65508
9	磨矿辅助设备功率	kW	6730	6530	9337	6140
10	破碎机规格	mm	–	2133.6	2133.6	–
11	破碎机台数	台	–	36	12	–
12	破碎机电机功率	kW	–	260	260	–
13	破碎机总功率	kW	–	7074	2350	–
14	破碎机辅助设备功率	kW	–	508	–	–
15	碎磨回路总功率	kW	157550	133680	158090	169720
16	相对碎磨回路总功率	%	100	88.26	1.00	108
17	基建投资	$\times 10^8$US$	1.88	1.88	2.32	2.26
18	相对基建投资	%	100	100	124	120
19	破磨厂房长度	m	336	61.6	432	456
20	破磨厂房面积	m^2	22848	26508		31008
21	劳动定员	人	525	743	636	518
22	单位电耗	kW·h／t	19.67	17.87	19.68	21.19
23	单位成本	US$／t	1.815	2.212	1.79	1.71

表 3 德兴铜矿 NO.1 选矿厂球磨机生产数据表

球磨机规格(mm)	d 3 200 × 3 100	d3200 × 4500
球磨机台数(台)	8	2
电动机功率(kW)	600	800
球磨机容积(m^3)	22	32
装球量 (t)	46	65
磨矿浓度 (%)	78–80	78–80
给矿粒度(mm)	20–0	20–0
给矿粒度(F_{80}, mm)	14–15	14–15
给矿量(平均 t / h)	52	67
产品细度(–200 目%)	57–63	60–65
产品细度(P_{80}, μm)	119–146	116–120

表 4 60000t / d 规模三种碎磨回路技术经济比较

碎磨回路名称	常 规	ABC (开路)	半自磨
粗碎产品粒度(mm)	250～0	350～0	350～0
第一段磨机给矿粒度 F_{80}(mm)	7	180	1800
最终产品粒度 < 200 目的%	65	65	65
主要设备的名称、数量和型号规格	中碎机 4 台 SXHD2133.6mm	自磨机 4 台 d9753.6 × 3962mm	半自磨机 4 台 d9753.6 × 4267.2mm
	细碎机 8 台 SXHD2133.6mm	球磨机 8 台 d5029.2 × 8229.6	球磨机 8 台 d5029.2 × 7924.8mm
	双层筛 4 台 d2438.4 × 6096mm	细碎机 6 台 SXHD2133.6mm	–
	单层筛 18 台 d2438.4 × 6096mm	双层筛 6 台 d2438.4 × 6096mm	–
	球磨机 10 台 d5029.2 × 8839.2mm	–	–
设备总重 (t)	8810	9090	8700
安装功率 (kW)	63000	65000	70000
建筑面积(x10^4m^2)	2.9	3.0	2.6
建筑容积 (m^3)	620000	700000	580000
设备投资(× 10^4RMB yuan)	9700	10500	9800
建筑投资(× 10^4RMB yuan)	2700	2500	1800
钢耗 (kg / t)	0.52	0.40	0.58
电耗(kW · h / t)	15.31	18.85	19.25
生产成本(RMB yuan / t)	3.095	3.222	3.501

4 几点剖析

1 德兴铜矿有两种不同性质的矿石，一种是给料粒度小，易于破碎而又不利于自磨的千枚岩型矿石；另一种是硬度较大和较难破碎的花岗闪长岩型矿石；前者约占出窿矿石的 70%，后者约 30%。显然，这种矿石组成，对中细碎及筛分有利，但不利于自磨。

2 从表 1 所列自磨、半自磨试验数据分析，50%：50%混合矿石 ABC 开路试验(序号 9、10)的操作功指数，产品细度是可取的；没有提供混合矿石半自磨的数据则是试验工作的欠缺。而美国福陆公司推荐半自磨回路，主要是根据北美斑岩铜矿半自磨成功应用作出的选择，而不是在充分的试验数据基础上决定的。

3　图2的中细碎破碎-单段球磨新常规碎磨回路，虽然比中细碎破碎-棒碎-球磨的老常规回路有所发展，且碎磨效率有所提高，但与表4的常规回路还是有区别。因为后者的高能破碎-单段球磨常规回路是体现了"多碎少磨"原则的。正如前述，这种回路可以改善碎磨综合经济效益。因此，在表2，结果却是另一种情况。

高能自控破碎-单段球磨的碎磨回路已在世界上最大的巴布亚新几内亚布干维尔铜选矿厂，美国西雅丽塔铜选矿厂及菲律宾卡门铜选矿厂等应用。德兴NO.3选矿厂便是根据矿石性质、气候条件与其相似的布干维尔选矿厂的实践经验为基础来设计的。

高能破碎回路除需用高能圆锥破碎机外，还应采用电动机功率自动控制技术。也就是说，需依靠破碎机电动机的功率自动控制来调节破碎机的给料机，使破碎机能在满负荷下连续运行，以发挥整个回路的最大效率。

4　表4所列ABC及半自磨回路的生产成本比常规回路高，主要原因是该矿的火电单价(1983年为0.09YMB yuan／kWh)比较高。如果改用单价低(如北方水力发电地区1983年的单价为0.02～0.03YMB yuan／kWh)的水电，则ABC回路就可能低于常规回路而变成较优回路。这种情况与Srinivasa　V　P所指出的一样，即"有时候，自磨、半自磨回路不一定在基建投资和生产成本的综合效益方面总是优越的"。他曾对12000～90000t／d的六种规模做过财务分析，结论为当电费高达0.045US$／kWh时，常规棒磨-球磨回路才开始显示其优越性"[4]。

5　地区和生产费用的组成比例不同，也有可能使同一回路得出不同的经济效果。例如，在美国，广为人知的皮马斑岩铜矿选矿厂两种碎磨回路的生产费用组成如表5。

不难看出，由于常规回路的生产环节多，工人多，其工资及管理费占21.6%；而半自磨-球磨回路，由于回路简单，工人少，其工资及管理费只占11.9%。致使半自磨-球磨回路的生产总费用降低4.7%。但是，在中国，工资及管理费只占3-7%（德兴铜矿常规回路占5%），如果按照这个比率对表5进行重算、则半自磨-球磨回路的生产费用高于常规回路(见表6)。

6　含有大量粘、泥的矿石，往往使常规破碎回路难于正常生产。在这种情况下，若改用自磨、半自磨回路便有较大的优越性。但可能由于矿石性质及粒级组成的变化较大而致生产波动，为此需有高度的自动控制及操作管理水平。而且对于技术水平较低的选矿厂，如果在经济上并不比自磨、半自磨差、则常规回路往往是更可取的。

表5　美国皮马斑岩铜矿选矿厂的生产费用组成　%

碎磨回路名称	材料消耗	电耗	工资及管理费	其他	合计
常规回路	44.1	32.4	21.6	1.9	100
半自磨-球磨回路	45.7	36.4	11.9	1.3	95.3

表6　按中国工资及管理费比率改算的生产费用组成　%

碎磨回路名称	材料消耗	电耗	工资及管理费	其他	合计
常规回路	44.1	32.4	5	1.9	83.4
半自磨-球磨回路	45.7	36.4	2.75	1.3	86.15

参　考　文　献

1. Rowland A C. E & MJ, Feb; 1987: 34～38
2. Doyton S H. E & MJ.Feb, 1987: 26
3. 穆拉尔 A L，杰根森 G V. 粗磨机的选择、计算与当代实践。北京：冶金工业出版社，1990，343
4. E and MJ. The Wide World of Autogenous and SAG Grinding. E & MJ. Dec. 1983. 36