

· 磨矿工艺与设备 ·

## 自磨(半自磨)的进展

吴建明

(北京矿冶研究总院)

**摘 要** 回顾了国内外自磨(半自磨)的历史发展过程,论述了自磨(半自磨)设备和流程的特点及应用情况,评价了自磨(半自磨)的优缺点,介绍了国内外各种自磨(半自磨)试验方法及其进展,提出了我国应注重发展自磨(半自磨)技术。

**关键词** 自磨 半自磨 自磨机指数

### Advances in Autogenous (Semi - autogenous) Grinding

Wu Jianming

(Beijing General Institute of Mining and Metallurgical Research)

**Abstract** The development process of autogenous (seim - autogenous) grinding both in and outside China is reviewed. The characteristics and application of its equipment and flowsheets are discussed and its merits and demerits evaluated. The related test methods and advance achieved both at home and abroad are presented and it is concluded that China should lay stress on the development of autogenous (semi - autogenous) grinding.

**Keywords** Autogenous grinding, Semi - autogenous grinding, Work index of autogenous grinding

### 1 国外自磨(半自磨)的进展

#### 1.1 国外自磨(半自磨)的发展历程

1932年,美国Hardinge公司制造了世界上第1台湿式自磨机,为Hadsel型,规格为 $\phi 7.3\text{m} \times 0.9\text{m}$ 。20世纪50年代工业型自磨机开始应用于矿业,干式占65%以上。60年代自磨技术逐渐完善,湿式自磨机迅速发展,达到自磨机的70%以上,最大规格达到 $\phi 9.75\text{m}$ 。而干式自磨机达到 $\phi 10.5\text{m}$ 。70年代自磨(半自磨)已经成为矿山碎磨作业设计和设备选用中必须考虑的磨矿方式,自磨(半自磨)机最大规格达到 $\phi 10.75\text{m}$ 。80年代大型选矿厂中多数采用了自磨(半自磨),但大型化停滞不前。90年代以来,自磨(半自磨)仍然呈现出蓬勃发展的局面,磨机最大规格增加到 $\phi 11.58\text{m}$ 。进入新的21世纪之初,又达到 $\phi 12.19\text{m}$ 。据不完全统计,目前世界各地安装的各种形式、各种规格的自磨(半自磨)机大约有1200台,其中直径10m以上的自磨(半自磨)机为50余台,绝大多数为湿式作业。最大规格的是瑞典Svedala集团制造的 $\phi 12.19\text{m} \times 6.10\text{m}$ 半自磨机,安装功率为19388kW,用于澳大利亚新南

威尔氏州的Cadial Hill金铜矿。

自磨(半自磨)的发展过程有以下特点:①设备规格不断增大;②设备结构和性能不断优化;③越来越多地应用湿式磨矿;④越来越多地应用半自磨;⑤流程和设备配置方式日益灵活和多样化。

#### 1.2 自磨(半自磨)机结构和性能的进展

自磨(半自磨)机在结构和性能上也在不断发展。早期的自磨(半自磨)机采用齿轮传动,从单个小齿轮发展到双小齿轮传动。还出现了整体减速机-小齿轮部件和组合柔性传动方式(Krupp Polysius公司)。1995年,美国Allis公司为智利RTZ和BHP采矿集团Escondida铜矿制造了当时世界最大规格的 $\phi 10.97\text{m} \times 5.18\text{m}$ 半自磨机,也是目前采用齿轮传动方式的最大规格的半自磨机。其大齿圈由美国Falk公司制造,直径达 $\phi 13.2\text{m}$ ,质量达86t以上,材料为铸钢,是世界上最大的齿轮。该设备由两套功率为6714kW的同步电动机、减速机和齿轮驱动。其传动链较长显然影响了机械效率。如采用

吴建明,北京矿冶研究总院,教授级高级工程师,100044北京市西直门外文兴街1号。

环形电动机,安装功率只需要 11 920 kW。

在自磨(半自磨)机上采用环形电动机的无齿轮传动方式是一个革新。环形电动机为低速同步电动机,将转子固定在磨机筒体上。其优点有:①驱动功率大,解决了齿轮传动难以用于特大型磨机的问题;②传动链短,传动效率较高;③便于采用变频调速;④减小了设备整体占地面积。其缺点是设备价格较齿轮传动的高 25% 左右。1989 年,瑞典 Boliden Allis 公司在世界上首次制造了 2 台无齿轮传动半自磨机,规格为  $\phi 9.75 \text{ m} \times 4.57 \text{ m}$ ,功率 8 206 kW,用于智利 Chuquicamata 铜选矿厂。到 20 世纪 90 年代末,世界上已有近 20 台自磨(半自磨)机采用了这一驱动方式,其中大多为大型设备。

采用变速驱动是一个发展趋势。其原因是:①自磨(半自磨)机易受物料粒度和硬度等性质变化的影响。在这些变化发生的情况下,传统的操作方式是调整给矿量,这将影响后续作业的稳定。采用变速驱动就可以在保持给矿量恒定的情况下解决物料性质变化带来的问题;②自磨(半自磨)机的操作特点是负荷充填率较低。对于大型设备,避免钢球掉落在衬板上非常重要。当负荷充填率波动到较低水平时,防止钢球落在衬板上的最便捷的方法是降低磨机转速。现代变频调速技术为变速驱动提供了有效的手段。

到 20 世纪 80 年代前期为止,自磨(半自磨)机一直采用耳轴支承。80 年代后期,一种使用多个液压滑瓦轴承支承筒体的设计出现了。与耳轴支承结构相比,筒体支承结构的优点是:①优化了机体受力状态;②不再需要端盖和耳轴铸件,方便了筒体和端盖的加工,降低了制造成本;③磨机长度缩短,减少了占地面积,降低了基建投资;④减少了重型铸件的维修问题,降低了维修费用;⑤去除耳轴后,简化了给料斜槽的设置,方便了给料。

多年的发展和应用中,以自磨(半自磨)机筒体长径比为特征形成了两个不同的流派。世界大部分地区采用短筒形磨机,长径比为 0.35 ~ 0.5;而北欧和非洲南部一些国家采用长筒形磨机,长径比为 1.2 ~ 1.5。短筒形磨机的优点是:①筒体直径较大,产生的冲击作用较强,适于粗磨;②筒体长度较短,物料停留时间较短,不易产生偏析和过磨;③有一定的端壁效应(端部对物料的提升作用);④可制造出较高功率的磨机;⑤磨矿效率较高。缺点是:①工作过程易受物料性质波动的影响;②衬板磨损较快;③制

造难度较大;④机械故障较多;⑤一般需两段磨矿才能达到要求的最终产品粒度。长筒形磨机的优点是:①工作过程不易受物料性质波动的影响;②临界尺寸物料更易排出;③磨剥作用较强,物料停留时间较长,适于细磨;④衬板磨损较慢;⑤一段自磨即可达到要求的最终产品粒度;⑥制造较容易;⑦机械故障较少。缺点是:①端壁效应较弱;②难以制造出较高功率的磨机;③磨矿效率较低。

### 1.3 自磨(半自磨)流程的进展

在多年的应用实践中,自磨(半自磨)形成了多种流程形式,主要有:①一段自磨(半自磨)流程;②自磨(半自磨) - 砾磨流程;③自磨(半自磨) - 球磨流程;④自磨(半自磨) - 砾磨 - 破碎流程;⑤自磨(半自磨) - 球磨 - 破碎流程。这些流程中的开路或闭路工作方式又有多种。例如可以两段分别闭路工作;可以第一段开路,第二段闭路;可以第一段开路,第二段闭路的粗产品返回到第一段给料。

在自磨(半自磨)顽石破碎中采用了多种新型先进破碎设备。毛里塔尼亚 SNIM 公司使用 2 台德国 KHD 公司的 RP16 - 170/180 型辊压机破碎 2 台  $\phi 10.36 \text{ m}$  Areofall 型自磨机排出的铁矿石顽石。美国的 Empire 铁选矿厂采用德国 KHD 公司的 RP7 - 140/80 型辊压机破碎 3 台  $\phi 9.75 \text{ m} \times 5.13 \text{ m}$  自磨机排出的坚硬的铁燧岩顽石,使自磨机处理能力提高了 33% 以上,全流程电耗减少了 50%,后续磨矿电耗减少了 30%。美国 Hibbing 铁燧岩公司 1992 年采用芬兰 Nordberg 公司的 FW300 水冲式破碎机破碎  $\phi 10.97 \text{ m} \times 4.57 \text{ m}$  自磨机排出的顽石,1996 年又在 4 个自磨系列中采用了瑞典 Svedala 集团的 Barbac Duopactor B9000XHD 立式冲击破碎机破碎顽石。Nordberg 公司的 MP1000 圆锥破碎机也有多台用于自磨(半自磨)顽石破碎。

芬兰 Outokumpu 公司于 20 世纪 90 年代初推出了特有的 Outogenius 自磨流程。流程特点是用一段破碎将原矿破碎到 300 ~ 400 mm,然后使用长筒形磨机进行两段自磨。第一段为块磨机,开有较大的砾石孔,排出较多的砾石,一部分供第二段砾磨机作为粉磨介质,一部分经圆锥破碎机破碎后返回块磨机。砾磨机与旋流器构成闭路流程。

国外自磨(半自磨)应用实例见表 1。

## 2 国内自磨(半自磨)现状

我国 20 世纪 50 年代末研制出第 1 台干式自磨机,1969 年研制出第 1 台湿式自磨机,规格为  $\phi 5.5$

m × 1.65 m,用于大冶铁矿选矿厂。

表1 国外自磨(半自磨)应用实例

年代	国别	选矿厂	矿石	磨机规格/m	制造者	功率/kW	数量	给矿粒度/mm	产品粒度	产量/(t·h <sup>-1</sup> )
1960	瑞典	Vassbo 选矿厂	铅锌矿	φ6.7 × 2.1		882	1	-250	70% -200目	21 ~ 25
1962	加拿大	Cartier 选矿厂	镜铁矿	φ5.4 × 1.5		440	12	-300	-8 ~ 10目	200
1962	加拿大	Carol	镜铁矿	φ6.7 × 1.5(干) φ10.5(干)		919	8	-150		
1963	美国	Empire	磁铁矿	φ7.3 × 2.4 φ7.6 × 3.7	MPSI Allis Chalmers	1490	16 5	-250	-400 ~ 500目	~ 90
1965	美国	Butler	磁性铁燧岩	φ7.9 × 2.1(干)		2205	4	-165	80% -1 mm	
1965	加拿大	Wabush	镜铁矿	φ7.33 × 2.44		1286	6	-380	1 - 0 mm	450
1965	利比亚	Bong	赤磁铁矿	φ6.71 × 2.13 φ6.71 × 2.44 φ7.32 × 2.44	MPSI MPSI	660 × 2 850 × 2 870 × 2	6 2 4	-250	-20目 1 - 0 mm	150 ~ 200 175
1966	俄罗斯	Ингулец	磁铁矿	φ7.0 × 2.3		1600	1		70% -0.074 mm	72 ~ 95
1972	乌克兰	Лебедин	磁铁矿	φ7.0 × 2.3		1600	1		60% -0.074 mm	≥ 105
1967 1977	美国	National	磁性铁燧岩	φ7.9 × 2.1(干) φ8.23 × 5.49	Allis Chalmers	2205	6 4	-165	50% -0.044 mm	
1967	澳大利亚	Savage River	磁铁矿	φ9.75 × 3.66	MPSI	2250 × 2	1	-150	6.3 ~ 0 mm	320
1968	加拿大	Sherman	磁铁矿	φ8.24 × 3.05	Allis Chalmers	1268 × 2	3	-180	1 - 0 mm	150
1968	加拿大	Griffith	铁燧岩	φ9.75 × 3.66		2499 × 2	2	-203	3.2 ~ 0 mm	306
1971	美国	Cyprus Pima	铜钼矿	φ9.76 × 4.27		2205 × 2	3	-250	50% -200目	200 ~ 240
1972	瑞典	Aitik	黄铜铁矿	φ6.10 × 10.52 φ6.71 × 12.19 φ9.75 × 4.7	Allis Chalmers	1800 × 2 3000 × 2	2 1 2			
1981	加拿大	Highland Valley Lornex	铜矿	φ10.4 × 4.9 φ10.4 × 4.6	Allis Chalmers		1 2			
1973	加拿大	Sept - Pies	赤铁矿	φ9.14 × 3.05	Nordberg	2572	2		55% -0.44 mm	500
1974	美国	Tilden	赤铁矿	φ8.23 × 4.42	Allis Chalmers	2102 × 2	6	-250	-2 mm	230
1976	美国	Hibbing	磁性铁燧岩	φ10.97 × 4.57		4410 × 2	9	-203	-0.44 mm	367
1976	美国	Handerson	辉钼矿	φ8.5 × 4.26 φ10.9 × 4.01		2574 5149	3 1	-230	-100目 65%	324
1980	美国	Empire 二期	赤铁矿	φ9.75 × 5.13			6			
1982	美国	Chino Mines	铜钼矿	φ8.53 × 3.51	Allis Chalmers	2573 × 2	2			
1983	美国	Thompson Greek	钼矿	φ9.75 × 4			2			
1988	智利	El Cobre	铜矿	φ8.53 × 4.57	Kobe Steel	2610 × 2	1			
1988	美国	Kennecott Bing- ham Canyon	铜矿	φ10.36 × 4.6 φ10.97	4410 × 2 11760	3 1				
1989	智利	Chuquibambilla	铜矿	φ9.75	Boliden Allis	4103 × 2	2			
1989	加拿大	Highmont	铜矿	φ10.4 × 4.6	Allis Chalmers		2			
1990	智利	El Teniente	铜矿	φ10.97		11025	1			
1991	澳大利亚	Mt. Isa	铅锌矿	φ9.75 × 4.62			2			
1995	智利	Escondida	铜矿	φ8.54 × 4.27 φ10.97 × 5.18	Allis	4100 6714 × 2	1 1		-30 mm	
1995 其后	印尼	Grasberg	铜金矿	φ10.36 × 5.18 φ11.58 φ10.36 × 4.57	Allis	10600	1 1 3			2600
2000	美国	Copperton	斑岩铜矿	φ10.97 × 5.18 φ12.19 × 6.10			1 1			
2001	澳大利亚	Cadia Hill	金铜矿	φ12.19 × 6.10	Svedala	19388	1			
2003	伊朗	Miduk	铜矿	φ9.75 × 3.9	Metro		1			

20世纪70年代和80年代前期,在国际形势的影响下,我国出现了自磨(半自磨)的热潮,多家矿山选矿厂采用了自磨(半自磨),最大规格的自磨(半自磨)机为沈阳重型机械厂制造的φ7.5 m × 2.8 m 半自磨机,用于德兴铜矿。这一时期国内粉碎界对自磨(半自磨)进行了大量的研究和讨论。

但是在20世纪80年代,国内能源处于紧缺状态,在粉碎界的讨论和认识中,因为能耗高而否定自磨(半自磨)的观点占了上风,致使我国的自磨(半自磨)从80年代中、后期开始出现了长时期的基本停滞状态,拉大了与国外先进水平的差距。这一时期只有少数矿山选矿厂选用小规格自磨(半自磨)机,例如新疆阿希金

矿于1995年采用了国产 $\phi 5.5\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 自磨机。

这一情况一直持续到20世纪90年代末,铜陵有色金属公司冬瓜山铜选矿厂采用了1台瑞典Svedala集团制造的 $\phi 8.53\text{ m} \times 3.96\text{ m}$ 、4 850 kW的半自磨机。昆明钢铁(集团)公司大红山铁矿选矿厂采用了1台芬

兰Metro集团制造的 $\phi 8.53\text{ m} \times 4.42\text{ m}$ 半自磨机,安装功率为5 593 kW。这2项应用使我国结束了在自磨(半自磨)领域的基本停滞状态。在国际先进水平的带动下,可以预见,我国必将出现自磨(半自磨)的蓬勃发展的局面。

表2 国内自磨(半自磨)应用实例

年代	用户	矿石	磨机规格/m	制造者	功率/kW	数量	给矿粒度/mm	排矿粒度/-200目	产量/(t·h <sup>-1</sup> )
1969	大冶铁矿	含铜磁铁矿	$\phi 5.5 \times 1.65$		800	1	-400	55%	50
1972	歪头山铁矿	磁铁矿	$\phi 5.5 \times 1.8$	沈重	900	9	-350	35%~40%	80
1973	东山铁矿	磁铁矿	$\phi 5.5 \times 1.8$		900	2	-350	40%	70~80
1973	吉山铁矿	磁铁矿	$\phi 5.5 \times 1.8$		900	3	-400	60%	33~42
1973	漓渚铁矿	砂卡岩型铁矿	$\phi 5.5 \times 1.65$		800	2	-350	-0.4 mm	39~49
1974	石人沟铁矿	磁铁矿	$\phi 5.5 \times 1.8$		900	3	-350	50%	73~76
1974	潘洛铁矿	砂卡岩型铁矿	$\phi 4.0 \times 1.4$		245	2	-150	34%~40%	30~35
1974	铜矿峪铜矿	斑岩铜矿	$\phi 5.5 \times 1.8$		900	1	-280	40%	83
不详	金山店铁矿	砂卡岩型铁矿	$\phi 5.5 \times 1.8$		900	4	-350	30%	100~139
1982	铜绿山铜铁矿	砂卡岩型	$\phi 5.5 \times 1.8$			1			
1984	德兴铜矿	斑岩铜矿	$\phi 7.5 \times 2.8$	沈重	2500	1	-500	67%	
不详	云浮硫铁矿	硫铁矿	$\phi 5.5 \times 1.8$			3			
1987	东乡金矿	金矿	$\phi 2.4 \times 1.0$		75	1			
1990	鸡冠石银金矿	银金矿	$\phi 2.4 \times 1.0$		75	1			
1993	武山铜矿	砂卡岩型铜硫矿	$\phi 5.5 \times 1.8$		800	2	-350	35%	58
1995	阿希金矿	金矿	$\phi 5.5 \times 1.8$		800	1	-350	40%	30~40
2000	城门山铜矿	铜硫矿	$\phi 5.5 \times 1.8$		800	1			
2004	冬瓜山铜选厂	铜矿	$\phi 8.53 \times 3.96$	Svedala	4850	1			
在建	大红山铁选厂	铁矿	$\phi 8.53 \times 4.42$	Metro	5593	1			

目前我国共有60多个厂矿使用了150多台自磨(半自磨)机,绝大多数为湿式作业,绝大多数使用短筒形磨机,绝大多数采用半自磨。国内自磨(半自磨)应用实例见表2。

### 3 自磨(半自磨)的优缺点

多年来,国内外对自磨(半自磨)的经济性和优缺点进行了大量对比分析。

美国亚利桑那州立研究开发中心的F. M. Lewis和J. L. Coburn以一个假想铜选矿厂为对象,计算对比了采用粗碎-半自磨-球磨流程和常规三段-闭路破碎-球磨流程的经济性。假设原矿粒度为-610 mm,破碎或半自磨到-12.7 mm,然后一段球磨到同样的最终产品粒度。假设生产能力为18140t/d和36280t/d。对比结果表明,采用半自磨的流程比常规碎磨流程基本投资低30.9%左右,生产费用少7%左右。半自磨流程优于常规碎磨流程的原因是:①半自磨机的购置费大大低于中、细碎圆锥破碎机;②由于半自磨产品粒度较细,其后续球磨机数量只有常规碎磨流程的一半,大幅度减少了投资;③虽然半自磨机的单位电耗高于中、细碎圆锥破碎机,但其后续球磨机和分级循环砂泵的安装功率低,致使总单位电耗低于常规碎磨流程;④半自

磨流程设备数量少,操作人员少,劳务费低;⑤半自磨流程的单位钢耗较高,但其维修费用较低,两者互为补偿。

美国Placer开发集团对其所属的分别采用半自磨-球磨流程和常规碎磨流程的两个金矿进行了经济性对比。一个是澳大利亚Kidston金矿,采用半自磨-球磨流程。另一个是美国Golden Sunlight金矿,采用三段-闭路破碎-棒磨-球磨流程。对比表明,半自磨-球磨流程比常规碎磨流程基本投资(包括粗碎机、中碎机、半自磨机棒磨机、球磨机、钢棒、钢球、半自磨机衬板装卸设备、棒磨机加棒设备、基础、粗矿和粉矿堆矿场、胶带输送机等)低38%,单位生产成本(包括人工费、电耗、磨矿介质、衬板、备件和维修费等)低7%,具有明显的优越性。其缺点是调试周期长和作业率低。

我国冬瓜山铜选矿厂的可行性研究设计中,对采用半自磨-球磨流程和三段-闭路破碎-球磨流程进行了分析对比。结果表明,前者比后者工程造价少1 129万元,生产成本少172万元/a。

总的来说,自磨(半自磨)的优越性有:①前面只需一段初碎或根本不需破碎,粉碎比大,粉碎段数少,流程简单,设备(包括主设备和辅助设备)数量少,投资

低;②由于设备数量少,厂房面积小,从而基建投资少;③由于设备数量少,操作人员少,从而劳动成本低;④不受物料水分的影响,可处理含水、含泥量多的矿石。这时如采用常规流程,将使颚式破碎机和圆锥破碎机等设备严重堵塞而无法正常工作。在我国南方的一些矿山选矿厂,矿石含水导致的流程堵塞长期以来难以解决。如采用自磨(半自磨),这一问题就迎刃而解了;⑤磨矿产生的游离铁少,产品解离较好,有利于后续浮选作业;⑥单系列处理能力大,适于大型矿山选矿厂;⑦衬板和介质钢耗较少。

其缺点是:①自磨易受给矿粒度和性质波动的影响,可通过添加少量(2%~10%)介质变为半自磨和采用砾石破碎机解决;②主要用矿石作为介质,粉碎效率较低,单位电耗较高;③最初投产时的调试周期长;④维修工作量较大,作业率较低。

综合来看,自磨(半自磨)的优越性是主要的,其缺点完全可以由其优点弥补。

#### 4 自磨(半自磨)试验技术

##### 4.1 传统的自磨(半自磨)试验方法

自磨(半自磨)流程设计和设备选用是以自磨(半自磨)试验结果为依据的。不同的国家和地区有不同的自磨(半自磨)试验方法,一些大型设备制造公司或从事矿业技术的公司也都有自己的试验方法。

传统的美国 Allis Chalmers 公司和 Koppers 公司的试验方法是:先在  $\phi 1.829 \text{ m} \times 0.305 \text{ m}$  自磨介质试验机内进行较廉价的自磨介质适应性试验,结果表明能形成足够的自磨介质,再进行半工业试验。半工业试验磨机规格最小为  $\phi 1.829 \text{ m} \times 0.610 \text{ m}$ ,其试验结果准确、可靠、全面,但是试验费用高、用矿量多、工作量巨大。其用矿量少则数十吨,多则数百吨,试验周期从几个月到数年不等。个别情况下还进行工业试验。

苏联则先用  $\phi 750 \text{ mm}$  自磨机进行实验室湿式自磨试验,再用  $\phi 2 \text{ m}$  自磨机进行多种流程的半工业试验。

20世纪70年代末至80年代初,北京矿冶研究总院与美国 Koppers 公司共同进行了武山铜矿自磨半工业试验,自主完成了司家营铁矿磨矿半工业试验。在司家营铁矿磨矿半工业试验中,进行了一段自磨、一段半自磨、自磨-球磨、半自磨-球磨等多项自磨(半自磨)半工业条件试验和稳定试验。北京矿冶研究总院参考美国 Allis Chalmers 公司设备研制了自磨介质试验机,掌握了其试验工艺,填补了国内空白。在这一时期,司家营铁矿综合试验厂、首钢矿业公司矿业研究所、武钢矿业公司设计研究所和德兴铜矿等单位也从

美国 Allis Chalmers 公司和 Koppers 公司引进了半工业自磨(半自磨)试验系统。

我国一些中小型矿山为了节约费用,则往往只进行自磨介质适应性试验,而省略了自磨(半自磨)半工业试验,参考已有矿山经验进行设计和设备选型。

##### 4.2 自磨(半自磨)试验技术的新发展

在我国自磨(半自磨)的基本停滞时期,自磨(半自磨)试验技术的发展也同时停顿下来,使我国在这方面远远落在国外后面。当我们再抬起头来向国际瞭望时,发现国外已经摒弃了消耗大量人力、物力、财力和时间的自磨(半自磨)半工业试验,而代之以实验室试验和计算机模拟的简便方法。所用的方法有:

(1) 瑞典 Svedala 集团使用  $\phi 1829 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$  半自磨机进行试验,通过数据处理,既可为设计提供依据。该半自磨机内径为  $1803 \text{ mm}$ ,有效容积为  $1.106 \text{ m}^3$ ,转速为  $23.3 \text{ r/min}$ ,临界转速率为  $73.8\%$ ,可自动记录净功率。试验矿样粒度为  $0 \sim 150 \text{ mm}$ ,进行5项试验,加球率分别为  $0.6\%$ 、 $8\%$ 、 $10\%$  和  $12\%$ ,每项试验用矿  $272 \text{ kg}$ ,运转  $5 \sim 15 \text{ min}$ ,产品粒度为  $100\% 12.7 \text{ mm}$ 。设计时使用试验获得的单位净功耗( $\text{kW} \cdot \text{h/t}$ ),乘以设计生产能力( $\text{t/h}$ )和  $1.2$  的系数,即为选用的自磨(半自磨)机的功率。该公司用这一方法为我国冬瓜山铜选矿厂选择了  $\phi 8.534 \text{ m} \times 3.962 \text{ m}$  半自磨机。

(2) 澳大利亚 SMCC Pty 公司开发了一项用少量钻探岩芯样品进行简单的试验,并与计算机模拟相结合,为自磨(半自磨)流程设计和设备选型提供依据的方法。该方法只用  $2.5 \text{ kg}$  或略多的钻探岩芯样品,用金刚石锯片沿其轴向切成饼状,可以将饼状岩芯切成  $1/2$  或  $1/4$  的扇形,粒度为  $27 \sim 85 \text{ mm}$ 。将样品置于 JKMR C 公司制造的落重试验仪上破碎。搜集碎后产品进行筛分,绘制产品粒度与破碎能量的关系曲线,获得强度指数  $DW_i$ 。从现有选矿厂的24个生产流程获得了36组数据,其矿石类型包括铝、金、铜、镍和铅锌等。根据这些数据以及  $DW_i$  推导了以下公式。

$$W = K \cdot F_{80}^a \cdot DW_i^b \cdot [1 + c(1 - e^{-dJ})]^{-1} \cdot \phi^e \cdot f(A),$$

式中, $W$  为单位能量; $K$  为系数,由回路中的砾石破碎机确定; $F_{80}$  为给料中  $80\%$  通过的粒度; $J$  为加球量, $\%$ ; $\phi$  为磨机转速率, $\%$ ; $f(A)$  为磨机长径比的函数; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  为常数。由上式可求得单位能耗,并进而由要求的生产能力求出所需磨机功率。

(3) 加拿大 MinnovEX 技术公司使用  $\phi 305 \text{ mm} \times 102 \text{ mm}$  Starkey 实验室半自磨机,添加  $\phi 25 \text{ mm}$  的钢球

和2 kg 0~12.7 mm的矿样进行试验,磨至80%通过10目。其粉磨时间与设计的半自磨机功率成正比,由此确定 MinnovEX 半自磨功指数,用于设计计算。

(4) 美国的 Macpherson 使用  $\phi 450$  mm 干式自磨机,用(150~200) kg -30 mm 的物料进行试验,获得自磨功指数,作为流程初步设计的依据。

(5) 芬兰 Outokumpu 公司开发了用于其 Outogenius 自磨流程的试验工艺。该工艺包括坠落试验、介质能力试验、自磨可磨性试验和功指数试验。

坠落试验属于一种简单的介质能力试验,使用6~8 kg 的大块矿石和0.4~3 kg 的小块砾石各20~25块,使每块逐次从2 m、4 m 或6 m 高处自由坠落到一个箱子中的重金属板上,取质量大于最初质量的5%的矿块使之重复坠落,最多重复坠落50次。收集所有碎后物料,大于某一粒度的产品质量与最初物料质量之比为坠落破碎阻力。对比被测物料和参照物料的坠落破碎阻力曲线,可定性地获得被测物料作为自磨介质的情况。

介质能力试验的设备是 $\phi 1.8$  m  $\times$  0.5 m 试验机,内装3块120 mm 高的提升板。物料是矿石块或钻探岩芯,粒度为100~200 mm,逐次运转2、3、5和7 min,每次筛出-6目物料。最终产品中+6目含量为介质能力。本试验将可能取代坠落试验。

自磨可磨性试验的设备是 $\phi 485$  mm  $\times$  485 mm 分批磨机。每批装入30块平均质量为400g左右的砾石或钻探岩芯,并加入10d m<sup>3</sup>水。逐次运转15、30、60和120 min,每次筛出-11.2 mm 物料。最终产品中+22 mm 物料量为自磨阻力。

功指数试验设备是 $\phi 268$  mm  $\times$  268 mm 实验室磨机,安装在悬浮的基础上以测定净能耗。这一试验只能测定-4 mm 给料的性能,其结果与 Mcpherson 自磨指数试验相类似。

这些新的自磨(半自磨)试验技术中有一些采用了自磨功指数的概念,但与早期的自磨功指数概念已经完全不同。早期美国 Allis Chalmers 公司和 Koppers 公司也曾采用自磨功指数的概念,但只用于判断矿石作为自磨介质的可能性,而不能直接用于计算选择自磨(半自磨)机。新的自磨功指数则可以直接用于计算选择自磨(半自磨)机。

## 5 结 论

面对国际上自磨(半自磨)技术和生产应用的蓬勃发展局面,我国选矿界应解放思想,重新认识,重视对自磨(半自磨)技术和设备的研究,尽快开发出我国自

己的具有现代技术水平、可直接用于流程设计和设备选型自磨(半自磨)实验室试验技术,加快自磨(半自磨)应用的步伐,使我国在这一领域跟上国际发展的节拍。

## 参 考 文 献

- 1 任德树. 粒群粉碎原理及辊压机的应用. 金属矿山, 2002, (12): 10~13
- 2 Knecht J, Patzelt N. SAG and ball mills - developments in mining. Proceedings of XX International Mineral Processing Congress, 1997, 2: 287~298
- 3 Phelps R W. Moving a mountain a Day - Grasberg Grows Six - Fold. Engineering and Mining Journal, 2000, 201(6): 22~28
- 4 Bigger Mills Smarter Control. E&MJ, 1991, 192(4): 34~38
- 5 华金仓. 阿希金矿碎磨工艺的设计与实践. 中国选矿科技情报网. 第七届全国粉碎工程学术会议论文集, 1999, 101~108
- 6 夏菊芳. 冬瓜山铜选厂初步设计碎磨流程的选择与计算. 有色金属(选矿部分), 2001, (2): 28~31, 13
- 7 Boughey A, Svalbonas V, Jones S M. Cadia Hill features the world's largest grinding mill. Mining Engineering, 2001, 53(8): 21~27
- 8 段其福, 毛卫东. 湿式自磨技术探索与评述. 中国矿业, 1997, 6(专刊): 28~31
- 9 张光烈. 自磨技术的发展及其有关问题的评述(之一). 中国矿业, 2000, 9(2): 63~68
- 10 张光烈. 自磨技术的发展及其有关问题的评述(之二). 中国矿业, 2000, 9(3): 52~55
- 11 邵全渝. 论自磨技术的进展和对策. 国外金属选矿, 1995, 32(8): 1~9
- 12 Morrell S. A new autogenous and semi - autogenous mill model for scale - up, design and optimisation. Minerals Engineering, 2004, 17(2): 437~445
- 13 Morrell S. Predicting the specific energy of autogenous and semi - autogenous mills from small drill core samples. Minerals Engineering, 2004, 17(2): 447~451
- 14 Heikonen K, Morsky P, T. Knuutinen, et al. Autogenous grinding parameter estimation. Proceedings of XX International Mineral Processing Congress, 1997, 2: 299~306
- 15 MacPherson A R. Autogenous grinding 1987 - update. CIM Bulletin, 1989, 82(921): 75~82
- 16 雷存友. 国内外(半)自磨工艺设计及设备配置特点. 国外金属选矿, 1998, 35(8): 10~13
- 17 杨松荣. 国外自磨技术的应用. 有色金属(选矿部分), 1993, (1): 27~32
- 18 邵全渝. 我院对自磨技术的研究和应用. 有色冶金设计与研究, 2002, 23(特刊): 43~45
- 19 Mular A L, Jergensen G V. Design and installation of comminution circuits. New York: Port City Press, Inc., 1982
- 20 Morsky P, Klemetti M, Knuutinen T, et al. The developments of laboratory testing for autogenous grinding. International Journal of Mineral Processing, 1996, (44~45): 261~271

(收稿日期 2004-08-10)