

第三届全国选矿 学术讨论会 论文集

中国有色金属学会选矿学术委员会

中国选矿科技情报网

中国有色金属工业总公司选矿情报网

1991年

目 录

1. 颚式破碎机运动轨迹的电算分析及应用研究.....北京矿冶研究总院 丁培洪 王宏勋 (1)
2. 大型破碎、磨矿设备及其控制.....北京有色冶金设计研究总院 刘文拯 (8)
3. 超细泥离心射流流膜分选原理与实践.....北京矿冶研究总院 吕永信 (16)
4. 粗粒动筛跳汰周期曲线的研究.....东北工学院矿物工程系 孙春葆 孙玉波 (25)
5. 电选过程中的矿物运动分析——一种新型电分选机的构思.....黄石市黄金公司 柯有泽 (32)
6. 外磁场中磁种团聚弱磁性矿粒磁力的研究.....东北工学院研究生院 胡筱敏 罗 茜 张维庆 (37)
7. 干式高梯度磁选 (DHGMS) 工艺和理论研究.....中南工业大学 俞康春 孙仲元 (43)
8. 乙二胺磷酸盐对难浮氧化铜矿物的活化作用特性及机理研究.....昆明工学院资源开发系 徐晓军 刘邦瑞 (51)
9. 选冶联合工艺回收细泥锡石及其浮选动力行为的研究.....广州有色金属研究院 张有仁 黎耀邦 蔡春河 (57)
10. 硫化矿物浮选电化学与无捕收剂浮选.....大冶有色金属公司 王雅富 (67)
11. 界面反应基本理论——浮选原理研究纲要.....白银有色金属公司 王望成 (75)
12. 高冰镍浮选分离的机理研究.....北京矿冶研究总院 卢荫芝 王沛皇 许 时 (81)
13. 有机整合剂活化氧化锌矿物浮选机理的研究.....昆明工学院选矿教研室 刘邦瑞 冷 熾 羊衣金 汪 伦 (82)
14. 三乙醇胺活化微细粒孔雀石的浮选机理研究.....昆明工学院 徐晓军 毕兆鸿 (89)
15. 东川式结合氧化铜的工艺矿物学特征与浮选回收.....昆明工学院 张文彬 张惠霖 东川矿务局 廖邦奇 (95)
16. 高硅型硅灰石矿石的物质组成研究及其选矿试验.....地矿部南京综合岩矿..... (102)
17. 微细粒砷金矿选冶新工艺研究.....北京矿冶研究总院 宣道中..... (109)
18. 栲胶抑制毒砂试验.....沈阳矿冶研究所 陈超超..... (115)
19. 微细粒浸染型金矿选别工艺流程的研究.....贵州省冶金设计研究院..... (121)
20. 激光照射铅锌矿物对选择性絮凝影响的研究.....昆明工学院 杨 敖 (124)
21. 使用大型浮选机的理论分析.....北京有色冶金设计研究总院 朱国明 (129)
22. BS—K型系列浮选机的研究与应用.....

- 北京有色冶金设计研究总院 曹芬耀(134)
23. PF—8浮选机的研制.....
.....化工部化工矿山设计研究院 赵正刚 杨庆成 戴从洲(140)
24. 高铝矾土工艺矿物学及其分选特性.....
北京矿冶研究总院 黄利明 杨井刚 张宝丽 山西阳泉铝矾土矿 李宏勋(145)
25. 提高金川二矿区矿石镍铜精矿品位的研究.....
.....西北矿冶研究院 方启学 张新红 周世伯(153)
26. 提高金川铜镍矿石选矿指标的研究.....
.....西北矿冶研究院 康纪珊 周世伯 周积元(162)
27. 提高金川二矿区富矿石选矿指标的研究.....
.....西北矿冶研究院 周世伯 王富余(167)
28. 改进铅锌浮选工艺提高回收率 and 产品质量.....
.....海南昌化铅锌矿 张名先(173)
29. 阿舍勒多金属矿综合回收工艺研究.....
.....乌鲁木齐有色冶金设计研究院 魏同宝(175)
30. 黑钨矿床伴生锆英石选矿.....
.....唐山市冶金公司 王树仁(180)
31. 海滨砂矿精选新工艺的研究.....
.....广州有色金属研究院 向延松 于景龙 叶志平 高玉德(184)
32. 多金属锑矿石的分选.....
.....广东工学院资源工程系 刘如意 何晓川 周为杏(190)
33. 萤石与其伴生矿物浮选分离的研究与实践.....
.....广州有色金属研究院 周维志(191)
34. 山东蓬莱黑岚沟金矿矿石选矿工艺特征的研究.....
.....青岛冶金矿山大学 孙长泉(192)
35. 角银矿(金)选冶工艺的研究.....
.....广州有色金属研究院 马天民 徐桂来 张先华(200)
36. 铜绿山矿强磁尾矿综合回收铜、金、银和铁及无尾矿工艺研究.....
.....广州有色金属研究院 徐桂来执笔(206)
37. 从铜离析浮选尾矿中回收铁的研究.....
.....广州有色金属研究院 陈从志(218)
38. 龙岩地区难选褐铁矿的选矿试验研究.....
.....南方冶金学院矿业系 黄万抚 卢继美(224)
39. 浅谈黄铁矿对矿石浸出的影响.....
.....核工业中南地质局230研究所 黎海雁 韩 勇(232)
40. 铋银矿的湿法提取和分离.....
.....核工业中南地质局230研究所 韩 勇 黎海雁 刘可均 徐建荣 刘成芳(238)
41. 有色金属浮选厂自动化前景.....
.....西林铅锌矿选矿试验室 俞义忠(242)
42. 选矿工艺计算中疑难数学模型的探讨.....
.....北京有色冶金设计研究总院 邓朝安 何方箴 曹汉臣 曲通达(244)
43. 电凝聚强化锰精矿浓缩脱水工艺及机理分析.....

-武汉钢铁学院 丁忠浩 卢寿慈 翁 达(250)
44. $\phi 5$ 米高效浓密机的研制与应用.....
.....北京有色冶金设计研究总院 林基明 刘德福(257)
45. 物料性质与过滤机选择.....东北工学院 罗 茜(262)
46. 浮选精矿离心机脱水工艺应用.....乌鲁木齐有色冶金设计研究院 李华盛(272)
47. 废渣吸收低浓度 SO_2 废气生产 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 研究.....
.....昆明工学院环境工程系 宁 平 孙佩石 吴晓明(278)
48. 南芬小庙儿沟尾矿库渗漏机理探讨与治理.....本溪钢铁公司 张双桥(282)
49. 浮选排放水生物接触氧化法治理工艺研究.....
.....化工部化工矿山设计研究院 裴凤蓉(290)
50. 城市污泥与造纸废液制备水煤浆燃料的研究.....
.....地矿部河南中心实验室 尹 明(296)
51. 毒砂矿真空蒸馏制取金属砷.....
.....沈阳矿冶研究所 水志良 陈起超 黄卫东(302)
52. 粉煤灰分选理论与工艺方法的研究.....
.....广东工学院资源工程系 宫中桂 唐晓莲 彭岫云 周有余(308)
53. 青铜与锡合金混杂屑末的分离.....
.....中南工业大学矿物工程系 黄开国 徐文贤(316)
54. 磁浮联合流程全面回收白云鄂博铁、稀土、铌及钽合理性探讨.....
.....长沙矿冶研究院 陈泉源 余永富(321)
55. 异步混合浮选新工艺的研究与实践.....
.....北京矿冶研究总院 李凤楼 孙传尧 赵纯禄(328)
56. 应用选冶工艺回收硫化铜矿物的探讨.....武山铜矿 赵金喜 张可凤(336)
57. 浮选过程中着孕气泡的行为.....
.....北京矿冶研究总院 陈子鸣 茹 青 联邦德国 A·巴尔 V·福格特(340)
58. 铜离子对毒矿与黄铁矿分离浮选的影响.....
广东冶金工业总公司 李广明 东北工学院矿物工程系 张洪恩 日本东北
大学选矿炼制所 白井进之助(自印)
59. 攀枝花圆锥选矿机选钛全工艺流程研究.....
.....广州有色金属研究院 勒玉荣执笔(自印)

颚式破碎机运动轨迹的电算分析及应用研究

北京矿冶研究总院 丁培洪 王宏勋

摘 要

单肘板颚式破碎机的运动轨迹复杂,本文用解析法与计算机技术结合,实现了用电子计算机对单肘板颚式破碎机真实运动轨迹的模拟运算。用此计算程序,可同时输出动颚各点的运动坐标值、速度值、运动方向、加速度等。解决了单肘板颚式破碎机动态分析困难的问题。在利用这一手段对破碎机运动轨迹进行分析时,发现目前普遍采用的啮角设计概念不准确。根据这一情况,作者通过对颚板形状的改进,改变了破碎机的工况啮角,生产试验证明,工况啮角的改变对颚式破碎机有着显著的影响,例如:降低产品粒度、提高产率、降低颚板磨损等指标,并取得了令人满意的结果。这一工作对单肘板颚式破碎机的进一步分析、研究和设计工作有着指导意义。本文用一复杂的手段探讨了一常见的问题,其结果却改变了对破碎机啮角的认识。

一、前 言

双肘板颚式破碎机、单肘板颚式破碎机由于其结构原理的不同,它们动颚的运动情况有很大的差别。目前所采用的设计分析方式则大多出自双肘板颚式破碎机,忽略了运动形式不同造成的影响。这主要是由于单肘板颚式破碎机的运动情况复杂,给分析、研究、设计带来困难的缘故。为此,作者通过建立数学模型和计算机的模拟运算,以使这一工作的完成变得简单、容易,为单肘板颚式破碎机的系统分析研究提供了一种方法,同时用此手段对单肘板颚式破碎机的作工腔进行分析,指出了目前国内采用的研究方法存在的缺点。

二、单肘板颚式破碎机的运动数学模型

单肘板颚式破碎机的运动过程复杂,动颚上部的轨迹近似于圆、中部则近似于椭圆、下部基本上为一斜线。这样的运动过程若想简单的描述是不可能的。目前常用做图的方法对运动轨迹进行描述,即制作一比例杆系进行模拟。这种方法即不方便也不准确。本文用解析几何和运动学的方法使这一过程的描述数字化。本数学模型由两部分组成,一部分为理论系统的运动学模型,另一部分为对破碎机系统的转换数学模型。

1. 理论系统的运动数学模型

封闭向量方程为:

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_3 + \vec{l}_4$$

投影方程为:

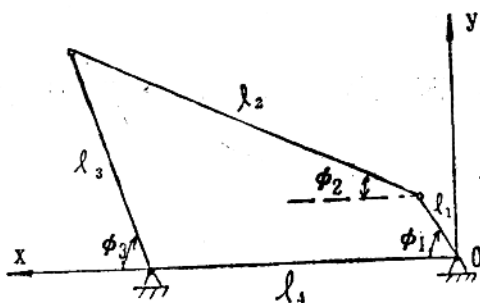


图1 四连杆机构运动分析图

$$l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 = l_3 \sin \varphi_3$$

$$l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 = l_4 + l_3 \cos \varphi_3$$

(1)

令:

$$a = l_4 - l_1 \cos \varphi_1, \quad b = l_1 \sin \varphi_1$$

代入(1)式并整理得:

$$l_2^2 = l_3^2 + b^2 + a^2 + 2l_3(a \cos \varphi_3 - b \sin \varphi_3)$$

令:

$$A = \frac{a^2 + b^2 + l_3^2 - l_2^2}{2al_3}, \quad B = \frac{b}{a}$$

$$\text{则: } \cos \varphi_3 + A = B \sqrt{1 - \cos \varphi_3}$$

$$\therefore \cos \varphi_3 = \frac{1}{1+B^2} \left(B \sqrt{1-A^2+B^2} - A \right)$$

$$\varphi_3 = \cos^{-1} \left(\frac{1}{1+B^2} \left(B \sqrt{1-A^2+B^2} - A \right) \right)$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1} \left(\frac{l_3 - \cos \varphi_3 + a}{l_2} \right)$$

(1)式求导得:

$$l_1 \omega_1 \cos \varphi_1 + l_2 \omega_2 \cos \varphi_2 = l_3 \omega_3 \cos \varphi_3 - l_1 \omega_1 \sin \varphi_1 - l_2 \omega_2 \sin \varphi_2 = -l_3 \omega_3 \sin \varphi_3$$

整理后得

$$\omega_3 = \frac{l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)} \cdot \omega_1$$

(2)

$$\omega_2 = \frac{l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)} \cdot \omega_1$$

对(2)式求导:

$$\varepsilon_3 = \frac{\omega_1^2 l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \omega_2^2 l_2 - \omega_3^2 l_3^2 \cos(\varphi_3 - \varphi_2)}{l_3 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-\omega_1^2 l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) - \omega_2^2 l_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + \omega_3^2 l_3}{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}$$

上述过程中导出了单肘板颚式破碎机的机构运动参数数学模型，依此可求出破碎机的基本运动条件。

2. 单肘板颚式破碎机运动参数的换算

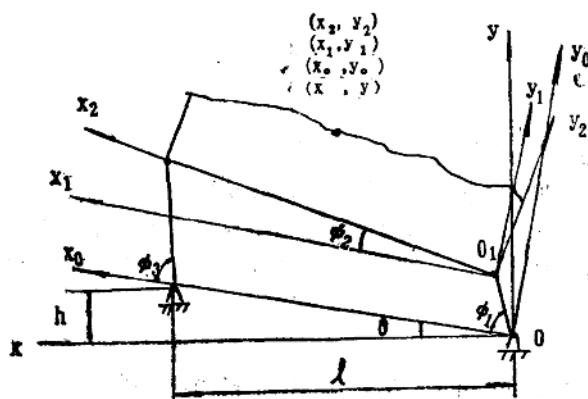


图2 单肘板颚式破碎机轨迹换算图

为了实现单肘板颚式破碎机的工作模拟，必须在机构运动数学模型的基础上进行换算。破碎机系统可分解为4个坐标系换算，如图2所示。 x_0y_0 为设备坐标， x_1y_1 为四连杆系坐标， x_2y_2 为动颚和颚板的坐标系。四个坐标系间的换算关系由下述方程组表示。

$$x_0 = l_1 \cos \varphi_1 + x_2 \cos \varphi_2 - y_2 \sin \varphi_2 \quad (4)$$

$$y_0 = l_1 \sin \varphi_1 + x_2 \sin \varphi_2 + y_2 \cos \varphi_2 \quad (5)$$

$$x = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta$$

$$y = y_0 \cos \theta - x_0 \sin \theta, \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{h}{l} \right)$$

式(4)中的 \$(x, y)\$ 即为颚板点 \$(x_2, y_2)\$ 在破碎机坐标系内的换算点。

对(4)式求一、二次导数：

$$\frac{dx_0}{dt} = l_1 \omega_1 \sin \varphi_1 + x_2 \omega_2 \sin \varphi_2 - y_2 \omega_2 \cos \varphi_2 \quad (6)$$

$$\frac{dy_0}{dt} = l_1 \omega_1 \cos \varphi_1 + x_2 \omega_2 \cos \varphi_2 + y_2 \omega_2 \sin \varphi_2$$

$$\frac{d^2 x_0}{dt^2} = -l_1 \varepsilon_1 \sin \varphi_1 - l_1 \omega_1^2 \cos \varphi_1 - x_2 \varepsilon_2 \sin \varphi_2 - x_2 \omega_2^2 \cos \varphi_2 - y_2 \varepsilon_2 \cos \varphi_2 + y_2 \omega_2^2 \sin \varphi_2$$

$$\frac{d^2 y_0}{dt^2} = l_1 \varepsilon_1 \cos \varphi_1 - l_1 \omega_1^2 \sin \varphi_1 + x_2 \varepsilon_2 \cos \varphi_2 - x_2 \omega_2^2 \sin \varphi_2 - y_2 \varepsilon_2 \sin \varphi_2 + y_2 \omega_2^2 \cos \varphi_2$$

如不考虑启动、停车时偏心轴的角加速度 \$\varepsilon_1\$，则上式为：

$$\frac{d^2 x_0}{dt^2} = -l_1 \omega_1^2 \cos \varphi_1 - x_2 \varepsilon_2 \sin \varphi_2 - x_2 \omega_2^2 \cos \varphi_2 - y_2 \varepsilon_2 \cos \varphi_2 + y_2 \omega_2^2 \sin \varphi_2 \quad (7)$$

$$\frac{d^2 y_0}{dt^2} = -l_1 \omega_1^2 \sin \varphi_1 + x_2 \varepsilon_2 \cos \varphi_2 - x_2 \omega_2^2 \sin \varphi_2 - y_2 \varepsilon_2 \sin \varphi_2 + y_2 \omega_2^2 \cos \varphi_2$$

对(5)式求一、二次导数:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx_0}{dt} \cos \theta + \frac{dy_0}{dt} \sin \theta \quad \frac{dy}{dt} = \frac{dy_0}{dt} \cos \theta - \frac{dx_0}{dt} \sin \theta \quad (8)$$

$$\varphi_v = \tan^{-1} \left(\frac{dy}{dx} \right) \quad \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2x_0}{dt^2} \cos \theta + \frac{d^2y_0}{dt^2} \sin \theta \quad (9)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d^2y_0}{dt^2} \cos \theta - \frac{d^2x_0}{dt^2} \sin \theta$$

上述过程中建立了单肘板颚式破碎机动颚运动的数学模型(1) — (9), 用它可求出动颚运动过程中任一时刻颚板运动位置、速度、加速度。与图解法相比, 本模型的优点是完全了字化地表述了单肘板颚式破碎机的工作过程, 为运动轨迹点的计算和计算机动态模拟提供数方法。

三、单肘板颚式破碎机的工态模拟

上节建立的单肘板颚式破碎机运动特性数学模型使动颚运动过程的连续描述成为可能。虽然数字的计算量非常大, 但这一工作可由计算机完成, 在大量运算的基础上即可实现单肘板颚式破碎机的工态模拟。模拟结果以计算机屏幕、绘图机、打印机三个终端进行输出。计算出的动颚板面各点的运动数据即为工态数学模拟的参数。计算过程一结束, 即可运行屏幕模拟程序, 在屏幕上再现破碎机的实际工作情况; 如认为必要, 可用绘图机将工态轨迹记录下来或用打印机输出全部数据参数(包括: 各点在运动过程中的位置坐标、速度、运动方向角、加速度), 供破碎机设计分析时使用。在对一组结构参数进行模拟过程中, 允许对动、定颚板参数及机构参数进行改变, 以使其更为合理。数学工态模拟的速度快、精度高。图3为程序运行框图。

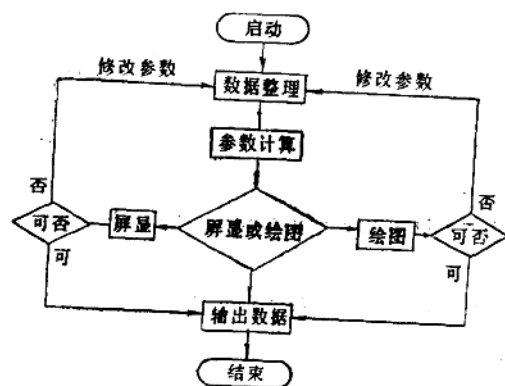


图3 单肘板颚式破碎机工态模拟框图

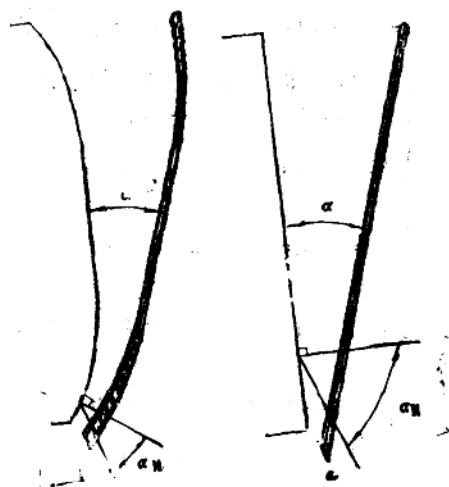


图4 PE250x400颚式破碎机工态轨迹模拟

- a. 直线型颚板
- b. 曲线型颚板

由图3可以看出,键入破碎机基本参数:偏心距(l_1)、肘板位置(l_2 、 h 、 l)、肘板长(l_3)、转速(n)、颚板尺寸及位置,该系统即可完成破碎机的工况模拟。图4所示为PE 250×400单肘板颚式破碎机的两种工况轨迹的模拟结果,给分析带来了方便。

四、模拟结果的应用和关于啞角的讨论

单肘板颚式破碎机工况模拟真实地再现了破碎机的工作情况,作者利用这一手段对破碎腔内部的工作机理进行了分析。

破碎腔是破碎机实现破碎过程的工作区,它的形状、参数、工作形式影响着破碎机对矿料的施力条件和矿物的破碎环境。几个参数中,啞角的设计计算是极重要的,它被视为颚式破碎机得以正常工作的关键,正确的选用啞角以保证破碎过程中矿块不被挤出,是破碎机设计的主导思想。目前采用的啞角设计方法是以颚板与矿块间的摩擦力和压碎力的向上分力的相平衡为出发点而求出的,啞角小于某一数值时矿块不被挤出。图5为传统设计方法所示的典型矿块受力平衡图。颚板以垂直于其表面的力 P_1 、 P_2 作用于矿块,颚板与物料间的摩擦系数 f 。^{[2]、[3]、[4]、[5]}

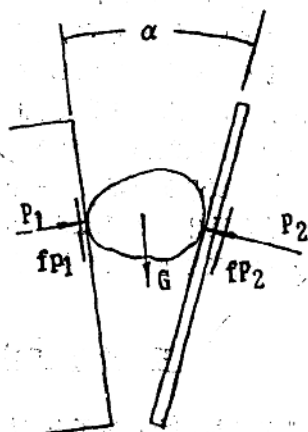


图5 颚式破碎机矿块受力分析图

建立平衡方程得:

$$\begin{aligned} P_1 - P_2 \cos \alpha - f P_2 \sin \alpha &= 0 \\ -f_0 P_1 - f P_2 - G + P_2 \sin \alpha &= 0 \end{aligned}$$

略去 G 并整理得:

$$\tan \alpha = \frac{2f}{1-f^2}$$

$$\because f = \tan \mu_0, \therefore \alpha = 2\mu_0$$

上式即为经典的啞角计算公式, μ_0 为摩擦角。也就是最大啞角为2倍摩擦角理论;通常情况下矿块与颚板间的摩擦系数 $f=0.2-0.3$,相当于 $\mu_0=12^\circ$,故要求啞角小于 24° 。图4a所示即为用这一设计思想的PE250×400颚式破碎机工况轨迹模拟结果,其设计啞角 $\alpha=18^\circ$,在采用圆弧形动颚板时,排矿口处的啞角 $\alpha=12^\circ$,啞角值满足小于两倍摩擦角的要求。但在使用中发现颚板磨损严重,除了由于物料坚硬引起的影响之外,作者通过对图4a所示的工况轨迹分析,认为,其原因是设计本身潜在的不合理性引起的。即下1/3破碎腔的工况啞角过大。这一问题在没改进颚板形状的单肘板破碎机中是普遍存在的。

对图4a和图5所示的情况进行分析,可注意到图5所示的矿块受力分析没有确切的反映单肘板颚式破碎机的工作特性。单肘板颚式破碎机应该用另一种啞角概念描述,即,工况啞角。只有工况啞角才能准确地描述单肘板颚式破碎机的工作特性,这一概念对双肘板颚式破碎也同样适用。原用的啞角概念来自于对双肘板颚式破碎机工作机理的分析,有着很大的片面

性,如图6所示。从中可以看到,双肘板颚式破碎机对矿块的施力方向为动颚施力点与悬点连线的垂线方向。严格的讲,这一方向也不垂直于动颚板。在远离悬挂点的位置可以认为运动方向垂直于颚板;而在进料口处,其影响是不可忽视的,通常双肘板颚式破碎机破碎大块矿物时发生的挤出现象,多是这一因素处理不当造成的。

综合上述的分析研究可得出结论:排矿口处过大的工况啮角加剧了破碎机下腔的磨损,降低了破碎效果。目前采用的啮角计算方法不准确,它只能作为一种形状参数或名义啮角。如果要保证破碎腔有一个良好的工作状态,啮角设计时必须以工况啮角为考虑因素。同时也应考虑工况摩擦角的影响。

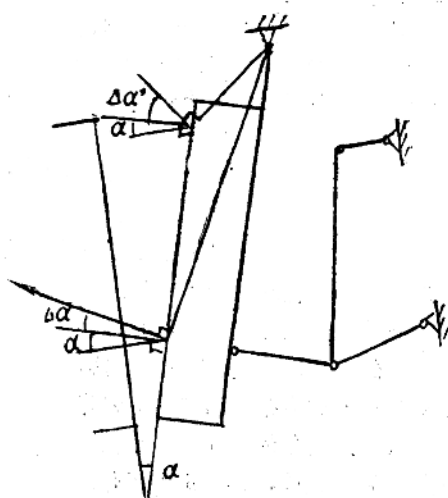


图6 双肘板颚式破碎机工作原理

五、改进工况啮角的破碎试验及试验数据分析

上节的分析研究得出了在传统啮角设计上存在错误的结论,且这一问题直接影响着单肘板颚式破碎机的工作效果,如,破碎腔的下三分之一区域的工作啮角与设计情况不符,导致纵向位移量大,使下三分之一破碎腔颚板磨损严重、产率降低,为了验证这一结论,即工况啮角的改变对单肘板颚式破碎机工作特性的影响,作者在PE250×400、PE250×750单肘板颚式破碎机上做了一系列对比试验。试验的内容是:在原设备参数不变的条件下,通过颚板板面的形状改变实现对下三分之一破碎腔的工况啮角调整(注:如改动运动机构也可改变动态啮角),目的是使动颚板对固定颚板的相对运动条件得到改善,即降低这一区域的工况啮角。而颚板的齿形和材质不作任何改变。图4b所示为将颚板改为曲线后的破碎腔工作模拟轨迹图,从中可以看到排矿区的工况啮角被大大地降低了。

试验的对比情况如图7、图8、图9所示,试验分别在蚕庄金矿、赵各庄采石场完成,对比条件完全相同。

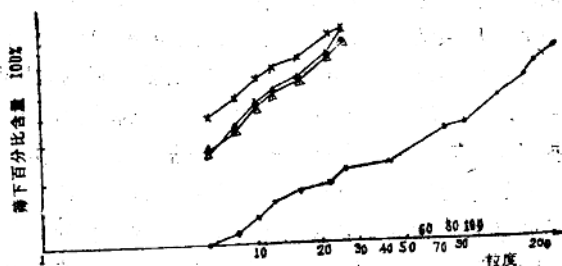


图7 PE250×750颚式破碎机的粒度分布对比曲线

1—给料的粒度分布曲线; 2—原用颚板、产率为25.1t/h时的粒度分布曲线; 3—改进曲线颚板、产率为31.29t/h时的粒度分布曲线; 4—改进曲线颚板、产率为26.39t/h时的粒度分布曲线。

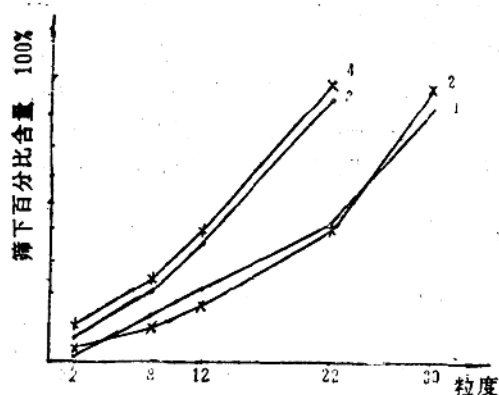


图8 PE250×400颚式破碎机的粒度分布对比曲线

1—原用颚板, 产率12.6t/h时的粒度分布曲线;
2—原用颚板, 产率7.6t/h时的粒度分布曲线; 3—改进曲线颚板, 产率14.77t/h时的粒度分布曲线; 4—改进曲线颚板, 产率8.99t/h时的粒度分布曲线;

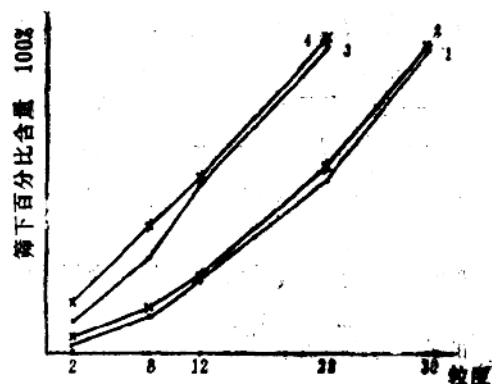


图9 PE250×400颚式破碎机的粒度分布对比曲线

1—原用颚板, 产率12t/h时的粒度分布曲线; 2—原用颚板, 产率5.4t/h时的粒度分布曲线; 3—改进曲线颚板, 产率13.0t/h时的粒度分布曲线; 4—改进曲线颚板, 产率6.53t/h时的粒度分布曲线。

上面的三组对比结果中可以看到, 在相同的工况条件下, 工况啮角改变后对破碎机的产率, 粒度等指标有着明显的影响; 在E组对比数据中, 改进曲线颚板的破碎机产率均提高5—25%, 且产品的粒度亦有所降低。同时由于相应的改善了施力条件, 颚板的磨蚀现象大为减轻, 在蚕庄金矿的工业试验中, 加工石英矿1550.77吨, 折合每吨矿石的颚板磨蚀量为37.53克, 而原用颚板加工每吨矿石的磨蚀量为76.13克。这些现象同前面进行的理论分析是吻合的, 工况啮角的降低使颚板的相对纵向行程降低, 减轻了加载过程中的阻塞作用, 这是造成产率提高的直接因素, 小的啮合角和相对纵向行程亦使磨蚀量大幅度下降。

结 语

本文通过对单肘板颚式破碎机机理的分析, 建立了其工作过程的数学模型, 借助于这一数学模型和计算机的结合实现了单肘板颚式破碎机的工作模拟。在对模拟结果的分析和论证试验中得到了如下结论:

1. 应用数学模拟的方法对单肘板颚式破碎机进行工况分析是十分有益的;
2. 目前采用的啮角计算公式不能反映单肘板颚式破碎机的工作机理, 而必须应用工况啮角的概念做设计的修正依据;
3. 双肘板颚式破碎机进料口处的啮角值也应考虑工况啮角的影响;
4. 生产试验证明工况啮角的改变对单肘板颚式破碎机的产率、粒度、颚板的磨损量有着显著的影响。如: 适当的选用工况啮角可使原破碎机的产率提高5—25%, 颚板寿命延长一倍左右。
5. 工况啮角概念的应用为新型高效单肘板颚式破碎机的设计提供了理论根据。

图中所用符号的意义:

l_1 ——偏心距, mm ; l_2 ——连杆长, mm ; l_3 ——肘板长, mm ; l_4 ——两固定交点间的距离, mm , $l_4 = \sqrt{h^2 + l^2}$; φ_1 ——偏心轴的旋转角度, 度; ω_1 ——偏心轴的角速度, $1/\text{秒}$; φ_2 ——连杆的摆角, 度; ω_2 ——连杆的角速度, $1/\text{秒}$; ε_2 ——连杆的角加速度, $1/\text{秒}^2$; φ_3 ——肘杆的摆角, 度; ω_3 ——肘杆的角速度, $1/\text{秒}$; ε_3 ——肘杆的角加速度, $1/\text{秒}^2$; α ——啮角, 度; α_m ——工况啮角, 度; x ——颚板在破碎机坐标系中 x 轴坐标值, mm ; y ——颚板在破碎机坐标系中 y 轴坐标值, mm ; $\frac{dx}{dt}$ ——颚板在破碎机坐标系中 x 轴向速度, mm/s ; $\frac{dy}{dt}$ ——颚板在破碎机坐标系中 y 轴向速度, mm/s ; α_v ——颚板在破碎机坐标系中的速度方向, 度; $\frac{d^2x}{dt^2}$ ——颚板在破碎机坐标系中的 x 轴向加速度, mm/s^2 ; $\frac{d^2y}{dt^2}$ ——颚板在破碎机坐标系中的 y 轴向加速度, mm/s^2 。

参 考 文 献

- [1] 丁培洪, 颚式破碎机腔形研究, 硕士论文。
- [2] N.L.Weiss, 《SME Mineral Processing Handbook》, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers Inc. 1985
- [3] 《СПРАВОЧНИК ПО ОБОГАЩЕНИЮ РУД》МОСКВА《НЕДРА》1982。
- [4] 周恩浦等, 《矿山机械》(选矿部分), 冶金工业出版社, 1986年版。
- [5] 任德树, 《粉碎筛分原理与设备》, 冶金工业出版社, 1982。
- [6] 王宏勋, 《国内外破碎与磨矿工艺和设计技术现状的发展动向》。
- [7] 丁培洪, 《PE250×750腔形改造试验报告》, 1988。
- [8] 丁培洪、朱俊利等, 《PE150×500, PE250×400腔形改造试验报告》, 1989。

大型破碎、磨矿设备及其控制

北京有色冶金设计研究总院 刘文拯

摘 要

本文概述破碎、磨矿设备大型化、高效化的发展过程, 着重对当前世界矿山工业破磨流程所推行的多碎少磨工艺中的两项主要设备——高能圆锥破碎机及大型球磨机作了专门介绍, 对这两种设备的发展过程、结构特点、优越性等给予评述。文章还提供了这两种设备在我国德兴铜矿的应用效果及有关生产数据, 并对其控制策略的选择及实践情况作出叙述。

由于矿石品位日趋贫化, 采矿、选矿规模不断增大。因此, 重视大型破碎、磨矿设备开

发是当前的一种必然趋势。

矿山工业面临的一个严峻问题是降低生产费用和基建投资。设备的大型化和高效化则是当今矿山工业建设中降低费用的重要一环。由于设备制造技术的巨大发展,为高效、节能、低消耗的大型新设备的诞生创造了有利条件。本文将着重对圆锥破碎机的高效化和球磨机的大型化,以及它们的控制,并在我国的应用实践作出综合评述。当然,这两者也是当前世界矿山工业破碎、磨矿设备的两个主要方面。

一、破碎设备大型化、高效化

在破碎设备大型化方面,旋回破碎机的大型化是很成功的,几乎是现代化大型矿山中独一无二粗碎设备,它的规格有1400mm、1500mm、1600mm、1800mm(给料口),都是高生产率、低功率消耗、运转可靠的粗碎设备。但是,对于中、细碎作业应用最广泛、使用数量最多的圆锥破碎机却有些例外,发展不快,从70年代末,遵循比例放大原则,由最大直径2.2m(或7英尺)规格只增加到直径3.0m(或10英尺)一种规格,并且根据该种规格破碎机的实践证明,它的大型化并不像旋回破碎机那样具有无可辩驳的优越性,因此,它步上另一种高效化的发展道路,推出了“高能圆锥破碎机”(High Energy Crusher)。

磨机大型化的开发工作始于60年代初,设备设计主要也是遵循比例放大原则进行,其进展一直是顺利的,证明较大规格磨机能发挥高生产率、低费用的优点。特别是自磨机的大型化,发展最为迅速(最大直径达11m)。但是,大型化工作首先在棒磨机方面受到限制,其原因是钢棒长度的限制($>6m$),并且按照长度与直径的比例,直径也受到限制($>4.6m$)。球磨机的发展直到70年代初仍是顺利的,从4m直径发展到5m直径都成功地投入运行。到1972年初,当时有8台最大直径为5.5m球磨机首次投产(用于布干维尔铜矿),发生了失效问题,即磨机对0.3至0.6mm粒级的磨碎效率不好,致使该粒级含量产生积聚,造成循环负荷过大,磨矿回路达不到设计要求的8.16万t/d规模和产品粗度 $P_{80}0.2mm$ 的指标,只能达到7.2万t/d及 $P_{80}0.317mm^{[1]}$ 。因此,人们提出了球磨机直径是否存在极限问题,并且认为当没有搞清楚极限问题之前,暂不推荐直径大于5m的圆筒型球磨机,(正是这个原因,目前世界上大型选矿厂中占多数数量的球磨机是5m直径的)。后来,经过1972—1983年间从事的进一步研究和对其他几台5.5m及1台6.5m球磨机的生产实践总结,1983年11月在美国盐湖城召开“大型球磨机磨矿性能”专题会议,肯定了大型球磨机的优越性,提出了发挥大型球磨机磨矿效率必须重视磨机设计及其操作的两个关键参数:磨矿时间(或称矿浆通过磨机的流速和停留时间)、充填率。多数认为布干维尔球磨机存在的失效并非球磨机比例放大极限问题^[2]。

二、高能圆锥破碎机

高能圆锥破碎机起初是由美国Allis-Chalmers公司提出的,于1986年11月美国“破碎与磨矿工艺改革”展览会后,对此提法取得公认,并对高能化的发展得到高度评价^[3]。所谓高能圆锥破碎机,实际上就是在原有圆锥破碎机基础上,对破碎机内部结构和操作参数作出改革,装备更大功率的驱动电机,使之产生更大的破碎力和达到更大的处理能力或更细的产

品。这种破碎机的发展是基于对破碎理论认识的深化为基础,即:破碎机的细粒产品含量与输入功率成比例;破碎机通过量与破碎机排矿口有一定关系,但是要获得多的细粒产品应给予更大的能量,而不一定是更小的排口。

破碎机功耗、产量、粒度关系式为:

$$\frac{kwh}{t} \cdot P_{80} = k \quad \text{或} \quad \frac{kw}{t/h} \cdot P_{80} = k$$

式中: kwh——功耗; t——产量; P_{80} ——产品中80%小于筛孔的粒级; t/h——小时通过量; k——常数。

由上式可知,对于一定性质的物料,在一定的 P_{80} 粒度下,如果破碎机输入功率增加,其产量将相应增加;在一定的单位小时通过量下,其 P_{80} 粒级将相应减小。因此,输入更大的能量是圆锥破碎机发挥更大效率的关键。能量的增加,既可以提高破碎机能力,也可降低破碎产品粒度。

高能圆锥破碎机较之普通圆锥破碎机主要有如下变革:

1. 改变破碎腔的结构形式。这是一项重要改革,必须有一种以更大能量利用的破碎腔形来使破碎机输入功率有较大提高。采取措施有:①增大破碎锥的圆锥角度,从而提高破碎力;②增加下部衬板的平行带长度,以此提高破碎比和细粒级含量;③采用深破碎腔,增加腔容,吸收更大能量;
2. 提高破碎锥体摆动速度,从而增加物料在排出过程中的压碎次数;
3. 提高设备材质及改进某些重要部件的结构。

国外高能圆锥破碎机已在巴布亚·新几内亚、美国、澳大利亚、菲律宾、秘鲁等大型铜、铅、锌、铁选矿厂中运行,并且都发挥出其应有的良好性能。主要有两种:一种是Nordberg厂的Omniconc液压型或Allis-Chalmers (现为Boliden-Allis) 公司的液压型,另一种为西蒙斯弹簧型。在铜矿及铅锌矿,这些高能圆锥破碎机都在常规碎磨流程中与球磨机组成“多磨少磨”的新碎磨流程,成为当今唯一能与自磨流程(特别是SABC、ABC流程)相抗衡的,并更为节能、低成本的优越流程。

我国德兴铜矿在原有选矿厂技术改造和新建6.0万t/d特大型选矿厂中也采用上述新碎磨流程。中细碎作业均采用高能圆锥破碎机,其性能及生产数据见表1。

从目前投产的情况来看,液压型高能圆锥破碎机具有生产能力大,产品中小于排口粒度的含量大(约占65%),但这种型号的细碎机,由于液压缸限定在4000kPa,对德兴中硬矿石在雨季其排口只能保持在9—11mm而不能更小。弹簧型高能圆锥破碎机用于新建选矿厂,尚在试车阶段,表1数据为设计值。

表1 高能圆锥破碎机性能及生产数据

原 有 选 矿 厂 技 术 改 造											
作 业	型 号	电动机功率		锥体直径 (mm)	偏心距 (mm)	偏心套转数 (r/min)	液压缸压力 (kPa)	圆锥角 (°)	紧边排口 (mm)	给料量 (t/h)	排料粒度 P_{80} (mm)
		kW	超载系数								
中 碎	液压型 14—84	375	1.15	2130	53	235	4000	55	30	760	30
细 碎	液压型 3—84	375	1.15	2130	53	235	4000	55	9—11	430	12.5

续表

新建 6.0万吨/日 选矿厂											
作 业	型 号	电动机功率		锥体直径	偏心距	偏心套转数	弹簧压力	圆锥角	紧边排口	给料量	排料粒度
		kW	超载系数	(mm)	(mm)	(r/min)	(t)	(°)	(mm)	(t/h)	P ₈₀ (mm)
中 碎	弹簧型 SXHD	375	1.15	2130	111	255	—	45	22	700	23
细 碎	弹簧型 SXHD	375	1.15	2130	111	255	590	45	6	425	11
原 有 圆 锥 破 碎 机 (无 功 率 控 制)											
中 碎	PYB	280	1.0	2200	120	220	400	40	35	440	50
细 碎	PYB	280	1.0	2200	120	220	400	45	6	210	18

从表1数据可见, 高能圆锥破碎机比($\phi 2200$)常规圆锥破碎机产品粒度更细的情况下, 其通过能力增加近一倍!

三、大型球磨机

当前大型球磨机主要在下列两种场合得到优先发展, 一是大型半自磨机或自磨机产品的磨碎, 二是常规破碎流程的细碎产品的磨碎, 尤其是采用单段球磨机磨矿的场合。

球磨机大型化发展中, 由于应用电子计算机实行有限元分析法, 能精确、快速确定磨机应力模型及其负荷分布, 使大型球磨机具有机械性能优化、部件强度与材质选用合理的特点, 这是大型球磨机取得成功应用的重要条件之一。

大型球磨机的优点是处理能力大, 减少磨机和辅助设备的系列数, 简化配置, 缩小厂房面积, 从而可以节省基建投资。并且根据现有实践, 大型球磨机的成功应用, 可以改善磨矿产品质量, 降低能耗和钢耗, 提高磨矿回路自动化水平, 减少操作和维修人员, 从而可以节省生产费用。

下面从磨机大型化的基本关系说明大型磨机的优越性。与磨机直径有关的基本关系式

- (1) 磨机容积 (V) 与磨机直径 (D) 关系: $V \propto D^2$;
- (2) 磨机功率 (P) 与磨机直径 (D) 关系: $P \propto D^{2.5}$;
- (3) 磨机能力 (Q) 与磨机直径 (D) 关系: $Q \propto D^{2.5}$;
- (4) 钢球充填量 ($V_{球}$) 与磨机直径 (D) 关系: $V_{球} \propto D^{1.9}$;
- (5) 由3/4可得单位钢球充填量的磨机能力与直径 (D) 关系: $Q/V_{球} \propto D^{0.6}$ 。

由上述各关系式可知,

当磨机直径增大时, 磨机功率的增加比磨机容积的增加要大, 也就是说, 大直径球磨机的单位容积具有更大的支取功率;

当磨机直径增大时, 磨机能力的增加比磨机容积的增加要大, 所以大直径球磨机的单位容积具有更大的生产能力;

当磨机直径增大时, 磨机单位容积的钢球能支取更大的功率和获得更大的生产能力, 也就是说, 在相同生产能力时, 较大直径的磨机可以使用较少的钢球。

在“大型球磨机磨矿性能”专题会议中, E.E.Hively等总结了当时直径5m、5.5m、

6.5m已经投产的十几台球磨机的生产参数（详见表2）^[4]，发生明显失效的只有布干维尔选厂5.5m球磨机。从表2可知，其磨机的磨矿时间仅0.8min左右，其他选矿厂都在1.2min以上，根据A. C. Rowland意见，一般情况至少应在1.2—1.5min或者更长时间为宜，布干维尔球磨机磨矿时间过短的根本原因是充填率过高，循环负荷也高，致使矿浆流速过高造成的。会议认为大型球磨机充填率应降低（直径≤5m时充填率35—40%，直径≥5.5m时，充填率应为25—35%）。大型球磨机的功率与充填率曲线见图1。从图1可知，如果充填率由45%降至40%（减少11%球量）时，磨机功率下降约4%；由40%再降至35%（减少12.5%球量）时，磨机功率下降约4%。这样由45%充填率降至35%充填率（下降22.5%球量），约下降8%功率^[4]。这说明，在较低充填率时，可有较高的支取功率，即有较好的磨矿作用。

表2 某些大型球磨机生产操作参数比较

厂名规格 参 数	Sydvaranger φ6.5m×9.65m	Quintana (昆塔那) φ5.5m×8.53m	Bougainville (布干维尔) φ5.5m×6.4m	Pinto valley (平托谷) φ5.5m×6.4m	Butleraconita φ5.0m×8.5m
F ₃₀ (给矿粒度)(μm)	16000	8500	8000	8000	2000
P ₈₀ (产品粒度)(μm)	210	115	253—200	190	42
R ₁ (粉碎比)	76	74	31—40	42	48
临界速度(%)	62 ⁽¹⁾	72	68	68	68
磨机容积(m ³)	298.8	206.5	148.1	148.1	178.7
钢球矿浆充填率(%)	32—30	33	40 ⁽³⁾	40—41.25	35—33
钢球充填率(%)	30 ⁽²⁾	25	40 ⁽³⁾	35 ⁽⁴⁾	33
矿浆容积(m ³)	40.1	36.0	22.5	22.5—23.3	25.7—22.4
干给矿量(t/h)	998.2	518.1	344.8—397.4	331.2	290.4
循环负荷(%)	0	300	600—400	150	350
矿石流量(m ³ /min)	4.29	12.4	14.5—12.9	4.96	5.64
水流量(m ³ /min)	3.01	14.9	17.3—14.3	5.95	7.29
矿浆流量(m ³ /min)	7.30	27.3	31.8—26.2	10.9	9.14
矿浆浓度(%)	70	70	70 ⁽⁵⁾	70	70
矿浆流速(m/min)	5.78—6.78	6.46—9.05	29.7—21.6	3.1—3.0	3.04—3.48
磨矿时间(min)	5.47—4.67	1.13—1.32	0.71—0.86	2.07—2.14	2.81—2.45

注(1) 1986年71；(2) 1986年22；(3) 1984年以后42；(4) 1985年以后30；(5) 实际78。

目前大型湿式圆筒型球磨机无论用于一段或二段磨矿，都采用溢流型结构。正如前述，大直径球磨机的矿浆流动速率较之小直径球磨机有较大变化，流速增加很多，故宜采用溢流型结构增加矿浆容积和停留时间。

大型球磨机结构与小型球磨机结构的差别，主要有两点：一是主轴承的润滑方式，采用低压喷淋（动压）和高压悬浮（静压）相结合的润滑。这是因为磨机直径、长度增大，轴承承载急剧增加，为保证大面积轴瓦的良好油膜所要求的；二是近些年来普遍采用低速同步电动机与空气离合器直接和小齿轮轮轴

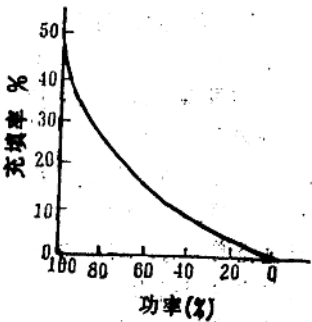


图1 功率与充填率曲线

衔接驱动,这是一种更经济、更有效的传动方式和更平滑的启动形式(小齿轮驱动功率不大于4500kW)。

另外,大型球磨机都需配备微拖动装置、千斤顶装置、衬板机械手等辅助设备,这是缩短维修时间,提高磨机运转率,发挥磨矿回路效率的必要措施;微拖动装置用于磨机更换衬板和检修时缓慢转动及长期停车后先行慢速转动,松动钢球与矿浆的固结状态,保证主电机安全启动,微拖动装置可以数台磨机共用一套;衬板机械手用于搬运衬板进入磨机及在磨机内部拆卸或安装大型衬板,它可以大大缩短更换时间,节省劳力;千斤顶装置用于磨机主轴承、中空轴检修,顶起磨机筒体,因为装有巨大重量钢球的大型筒体不可能采用桥式起重机起吊的。

自80年代初,我国在永平铜矿和德兴铜矿先后采用 $\phi 5.03\text{m} \times 6.4\text{m}$ 及 $\phi 5.5\text{m} \times 8.53\text{m}$ 大型球磨机。 $\phi 5.03\text{m}$ 共3台,已投产多年, $\phi 5.5\text{m}$ 已有4台正在安装试车。永平铜矿的2台磨机是引进Allis-Chalmers公司的。德兴铜矿的1台是由沈阳重型机器厂合作制造的,在德兴第二选矿厂投产后,证明是成功的,充分显示大型球磨机的优越性,迅速达产,全面达到设计指标及工艺要求。该台磨机的设计数据与投产后实际数据见表3。

实际生产不仅超过设计要求,它与平行系列的3台 $\phi 3.2\text{m} \times 4.5\text{m}$ 球磨机相比,在相同单位功耗的情况下,产品粒度细些,具有磨矿回路稳定性好,运转率高,维修工作量小、操作容易掌握的优点,因而更受操作者欢迎。

表3 德兴铜矿 $\phi 5.03 \times 6.4$ 球磨机数据

指 标	电动机功率 (kW)	装球量 (t)	充填率 (%)	临界转速 (%)	给矿量 (t/h)	给矿粒度 (mm)	产品粒度 -74 μm %
设 计	安装2600	210	38	72	208.3	-15	65
1988年平均	消耗2300	194	35	72	213	-20	67

德兴铜矿三期工程采用 $\phi 5.5\text{m} \times 8.53\text{m}$ 溢流型球磨机,设计数据见表4,有待实践考核。

表4 $\phi 5.5 \times 8.53$ 球磨机设计数据

电动机功率 (kW)	装球量 (t)	充填率 (%)	临界转速 (%)	给矿量 (t/h)	给矿粒度 F80(mm)	产品粒度 (-74 μm %)	矿石功指数 (kWh/t)	单位功耗 (kWh/t)
4100	286	290	73.8	326	7.0	65	13.8	11.47

四、设备及回路控制

1. 高能圆锥破碎机

除了整个碎矿系统应实行连锁控制外,70年代开始,国外选矿厂圆锥破碎机试行功率控制,目前已较普遍应用。破碎机功率控制可使破碎机在满负荷、连续稳定给料的条件下,达到最大能力和最大效率,这对高能圆锥破碎机尤为需要。典型控制系统图如图2及图3。满负荷运行就是使破碎机“挤满给料”,挤满给料是达到良好破碎效应的重要前提。圆锥破碎机各个制造厂家早已指出,如果间断给料,而且物料只在破碎腔下部排料口处受到冲压破碎,这不仅不能发挥破碎效率,还使破碎机体受力不平衡,更易造成机械损坏。表5为破碎