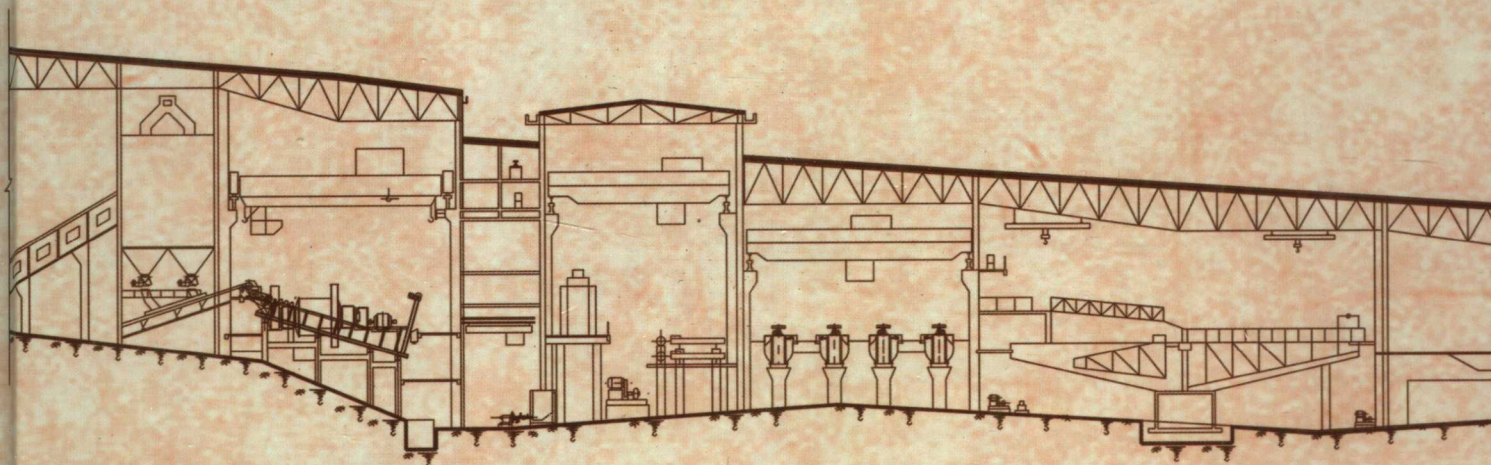


■ 孙传尧 主编



当代世界的 矿物加工技术与装备

——第十届选矿年评



科学出版社
www.sciencep.com

当代世界的矿物加工技术与装备

——第十届选矿年评

孙传尧 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是百余名专家学者研究成果的集成,对近年来国际上矿物加工领域的基础理论研究、新技术与新工艺开发、新设备与新药剂研制、选矿过程控制、环境保护及二次资源利用等方面的现状、发展趋势进行了系统研究和全面评述。全书共分5篇45章,内容包括:矿石粉碎工程、重选、磁选、浮选和固液分离的理论、工艺及装备的选矿综合评述,黑色金属、有色金属、贵金属、稀有金属、非金属、放射性金属、化工原料矿石及煤炭洗选和深加工的十几种矿产资源的选矿评述,工艺矿物学、选矿设备、自动化、药剂、矿物材料、环保及特殊选矿方法的选矿专题评述,六大洲及世界主要矿业国家的洲际与国家、地区的选矿评述;还有2006年9月第二十三届国际矿物加工大会的详细综合评述。

本书内容新颖,纵横交叉,便于读者从不同的角度快捷地了解近年来国际上矿物加工及矿产资源综合开发利用领域的最新状况、最新成果和最新发展态势,可供矿业开发、矿产资源综合利用和矿物加工领域的科研和工程设计人员、企业的领导及工程技术人员、高等学校及中等专业学校的教师以及大学生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

当代世界的矿物加工技术与装备:第十届选矿年评/孙传尧 主编. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-010781-0

I. 当… II. 孙… III. ①选矿②选矿机械 IV. ①TD9②TD45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 135640 号

责任编辑:谢洪源 王日臣/责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年12月第 一 版 开本:889×1194 1/16

2006年12月第一次印刷 印张:49 1/2

印数:1—2 800 字数:1 317 000

定价:270.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

本书作者及撰稿分工 (按各章顺序排列):

欧乐明 邵延海 (第 1 章, 中南大学)

杨英杰 林威 (第 2 章, 中南大学)

何平波 (第 3 章, 中南大学)

伍喜庆 (第 4 章, 中南大学)

顾帼华 (第 5 章, 中南大学)

李跃林 胡保栓 张凯 余江鸿 彭兴均 陈晓青 黄建芬 肖云 周涛 (第 6 章, 西北矿冶研究院)

王福良 邵广全 刘万峰 魏明安 (第 7 章, 北京矿冶研究总院)

林海清 (第 8 章, 赣州有色冶金研究所)

周兴龙 文书明 (第 9 章, 昆明理工大学)

秦奇武 马士强 陈志宇 (第 10 章, 长沙有色冶金设计研究院)

魏明安 何发钰 (第 11 章, 北京矿冶研究总院)

黄晓燕 沈慧庭 (第 12 章, 长沙矿冶研究院)

张泾生^{1,2}周光华¹ (第 13 章, 1 长沙矿冶研究院 2 全国锰业技术委员会)

余永富 车丽萍 (第 14 章, 武汉理工大学)

刘敏娉 (第 15 章, 广州有色金属研究院)

印万忠 (第 16 章, 东北大学)

蒋昊 (第 17 章, 中南大学)

汪淑慧 (第 18 章, 核工业北京化工冶金研究院)

雷绍民 龚文琪 (第 19 章, 武汉理工大学)

杨小芹 马树江 (第 20 章, 中蓝连海设计研究院)

刘炯天^{1,2} 张海军¹ 曹亦俊¹ 王永田¹ 荣国强¹ (第 21 章, 1 中国矿业大学, 徐州 2 东北大学)

汤集刚 (第 22 章, 北京矿冶研究总院)

王泽红 韩跃新 (第 23 章, 东北大学)

夏晓鸥 吴建明 梁殿印 沈政昌 (第 24 章, 北京矿冶研究总院)

朱建光 (第 25 章, 中南大学)

黄宋魏 (第 26 章, 昆明冶金研究院)

杨久流 程新朝 (第 27 章, 北京矿冶研究总院)

孙兴来 (第 28 章, 北京有色金属研究总院)

罗仙平 陈江安 熊淑华 (第 29 章, 江西理工大学)

阮仁满 温建康 (第 30 章, 北京有色金属研究总院)

朱书全 崔广文 吴晓华 韦鲁滨 (第 31 章, 中国矿业大学, 北京)

刘新海 郭珍旭 冯安生 (第 32 章, 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所)

杨英杰 林威 (第 33 章, 中南大学)

李成必 谭欣 周连碧 (第 34 章, 北京矿冶研究总院)

杨松荣 (第 35 章, 中国有色工程设计研究总院)

孙伟 胡岳华 (第 36 章, 中南大学)

孙体昌 王金良 张强 周桂英 汪顺才 (第 37 章, 北京科技大学)

袁致涛 宋振国 韩跃新 (第 38 章, 东北大学)

刘殿文 张文彬 (第 39 章, 昆明理工大学)

吴熙群 张立诚 郑桂兵 张云海 (第 40 章, 北京矿冶研究总院)

李长根 孙传尧 (第 41 章, 北京矿冶研究总院)

龚文琪 雷绍民 (第 42 章, 武汉理工大学)

孙传尧 吴熙群 刘耀青 周秀英 张云海 (第 43 章, 北京矿冶研究总院)

张立诚¹ 夏晓鸥¹ 韩龙¹ 任爱军¹ 何发钰¹ 敖宁¹ 顾帼华² (第 44 章, 1 北京矿冶研究总院
2 中南大学)

孙传尧 李长根 王福良 周俊武 魏明安 申士富 周少珍 任爱军 (第 45 章, 北京矿冶研究总院)

主要编辑人员: 敖宁 刘耀青 李长根 晨阳

前 言

由百名专家学者经过两年的艰苦努力,共同完成的《当代世界的矿物加工技术与装备——第十届选矿年评》一书,即将与读者见面了,这是我国矿物加工学术界及工程技术领域一件很有意义的事情。

谈到本书的编辑出版,不能不涉及选矿年评,因为在新一代选矿工作者中,有些人对选矿年评及年评会的背景不是很清楚。

选矿年评最初由中国选矿科技情报网发起,后与中国有色金属学会选矿学术委员会等学术组织合办,是我国选矿工作者独创并已形成传统的影响力最大的跨部门、跨行业的学术活动。早在1980年12月25~26日,在江西西华山钨矿召开的全国选矿科技情报网成员单位的会议上,首次提出了举办选矿年评报告会的倡议,得到全网成员的一致赞同,并委托中国选矿科技情报网的依托单位北京矿冶研究总院负责承办。

从1981年12月在北京召开的首届选矿年评会算起,至今已跨过了25个年头。在过去的25年间,国内外的情况发生了很大变化,尤其是近几年形成了全球范围的矿业开发热,给选矿工作者带来了新的机遇和希望。我国选矿工作者在密切关注国内外矿业发展宏观形势的同时,更加关注国内外选矿理论、选矿工艺技术、选矿设备、选矿药剂、选矿过程控制、选矿厂节能与环保、矿业经济以及选矿厂经营管理等领域出现的新成果和新动态,并不断解决科研、设计、教学和生产实践中出现的新课题。在这方面,历届选矿年评会及选矿年评论文集以其独特的方式和作用为选矿界的同行所认同。

在国内外种类繁多的学术期刊和各种不同类型的学术会议上,每年都出现大量的选矿科技文献或信息。对于大多数选矿工作者而言,通常没有精力、也不必花费大量的时间去全面检索那些繁杂的专业文献并进一步整理和评述。即使是互联网技术高度发展的今天,专业工作者平时得到的信息也是局部的、有限的,特别是位于边远地区的一些企业,由于条件所限,往往不能及时、全面地了解国内外矿物加工领域的最新动态和信息,影响了企业的科技进步。选矿年评会和年评论文集恰好弥补了这一不足。在每一届年评会召开之前,选矿学术委员会的组织者都要与有关专家、学者商定年评的选题,然后组织一批知名的专家、学者,或对某一领域较熟悉的青年科技骨干撰稿。他们在检索大量文献的基础上,经过精心筛选和消化整理,并结合个人的见解分专题写出年评论文,再经编辑汇集成论文集。在每届选矿年评会上都要选择一些典型的年评论文在大会上报告。可见,少数专家、学者的辛勤劳动,使选矿界的同行及广大读者广泛受益。因此,选矿年评会和论文集一直深受广大选矿工程技术人员和专家、学者的青睐。例如,1985年在北京召开的第三届选矿年评会,参会人员竟达到820人,使会议不得不分期召开。每届选矿年评会出版的论文集更是选矿界同行所喜爱的文献资料,也是不少著名专家、学者每届必读、必收藏的文献。

最初的选矿年评会是单纯的学术活动。随着市场经济的发展,在近几届选矿年评会上也有某些国内外厂商参展或发布信息,建立广泛的合作关系,使选矿年评会成为学术交流与科技、市场和经济相结合的活动,促进了产学研的联合。

第十届选矿年评会及年评专题是2004年11月在福州召开的第七届全国矿产资源综合利用学术会议及中国有色金属学会选矿学术委员会第五届一次会议上确定的。原计划本届年评会2005年秋季在江西九江召开,由于某些原因年评会改为2006年11月在四川成都举行。相应《当代世界的矿物加工技术与装备——第十届选矿年评》一书的内容也做了增补,增加了

工艺矿物学、铀矿石选矿和中国选矿三方面的年评。此外,将本届年评会安排在本年度第四季度召开,还有一个重要的意图是将2006年9月在土耳其伊斯坦布尔召开的第二十三届国际矿物加工大会的主要内容分两章做出评述收集在本书中,使读者能尽早地、比较系统地了解当今国际上最新和最高层次的选矿科技与学术信息。

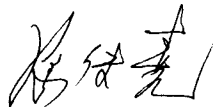
第八届及以前的选矿年评论文都是以内部文集的形式印发,属于非正式出版物。第九届选矿年评论文是以《有色金属》(选矿部分)2001年增刊的形式出版,但这仍不能满足论文作者和广大读者的要求。因此,第十届选矿年评论文经编者统稿、整理加工后改由科学出版社出版。全书分为5篇45章,包括选矿综合评述、各种矿产资源的选矿评述、选矿专题评述、洲际与主要矿业国家选矿评述及第二十三届国际矿物加工大会综述等内容。与以往历届选矿年评论文相比,从年评选题,到作者撰写论文的深度、广度以及反映当今全球矿业和矿物加工的时代性方面,本书的内容均达到一个新水平。并且,年评的内容纵横交错、相互交叉,便于读者从不同角度和不同作者的评述中透视国内外选矿界取得的最新成果和最新发展趋势。相信本书的编辑出版及第十届选矿年评会的召开对我国矿物加工领域的学术发展和科技进步能产生有益的影响,特别是对2008年在中国北京召开的第二十四届国际矿物加工大会的筹备和召开能起到一些促进作用。

不可否认,本书的编辑出版还存在明显的缺陷:其一是,按历届年评撰稿的传统习惯,本届年评选题及论文撰写前,编者没有规定标准的编写格式和编写提纲,以至于出现自由撰稿的现象,加上不同编写单位和不同作者的兴趣、风格,对国内外文献检索和理解的程度以及投入精力的不同,使年评论文的篇幅及质量存在较大的差异。尽管编者在统稿时与部分作者进行了沟通,但仍没有出现根本性的改善。其二,由于本届选矿年评会原定2005年召开,文献检索的时间跨度是以2001~2004年的文献为主。因此,先期完稿的部分作者在论文中没有涉及2005年及以后的文献,只有少数作者将文献检索到2005年或2006年上半年。好在有第二十三届国际矿物加工大会论文的综述,在一定程度上弥补了这一不足。产生这些缺陷的责任在编者,各位作者已尽力了。此外,其他还有许多不足或错漏之处,请各位读者批评指正,以便在今后的年评论文编辑出版时得以改善。

衷心感谢论文作者所付出的艰辛努力和作者所在单位的大力支持,感谢科学出版社的大力协助,使本书能在第十届选矿年评会召开前夕顺利出版。在本书的编辑出版过程中,北京矿冶研究总院敖宁、刘耀青、晨阳、李长根等同志及科学出版社谢洪源先生协助做了许多工作,在此一并致谢。

借此机会我还要代表广大选矿科技工作者对选矿年评的倡导者、历届年评会议的组织者、历届年评的撰稿人、报告人,表示衷心的感谢。过去的二十五年间我国选矿工作者已完成了代际转移,造就了一批年轻的学者和科技骨干。以往的专家、学者的贡献为今天矿业及矿物加工事业的繁荣和发展奠定了基础,他们的业绩已永远载入史册。

中国矿业联合会选矿委员会主任委员
中国有色金属学会选矿学术委员会主任委员
北京矿冶研究总院院长,中国工程院院士



2006年10月于北京

目 录

前言

第一篇 选矿综合评述	1
第1章 粉碎工程	3
第2章 重选	18
第3章 磁选	27
第4章 浮选	34
第5章 固液分离	49
第二篇 各种矿产资源的选矿评述	57
第6章 铜矿石选矿	59
第7章 铅锌矿石选矿	87
第8章 钨矿石选矿	119
第9章 锡矿石选矿	131
第10章 钼矿石选矿	142
第11章 镍矿石选矿	152
第12章 铁矿石选矿	166
第13章 锰矿石选矿	176
第14章 稀土矿石选矿	188
第15章 稀有金属矿石选矿	201
第16章 贵金属矿石选矿	216
第17章 铝镁矿石选矿	251
第18章 铀矿石选矿	259
第19章 非金属矿石选矿及深加工	270
第20章 化学工业矿物原料选矿	279
第21章 煤炭洗选	285
第三篇 选矿专题评述	301
第22章 选矿工艺矿物学	303
第23章 破碎筛分和磨矿分级	309
第24章 选矿设备	335
第25章 选矿药剂	378
第26章 选矿过程自动化	393
第27章 细粒分选	402
第28章 超导磁选	426
第29章 化学选矿	449
第30章 生物冶金技术	462
第31章 洁净煤和水煤浆技术	496
第32章 矿物材料加工	506
第33章 选矿过程的信息技术	516
第34章 二次资源利用及三废处理	526

第 35 章 矿业经济	541
第四篇 洲际与主要矿业国家选矿评述	551
第 36 章 北美洲国家选矿	553
第 37 章 南美洲国家选矿	563
第 38 章 欧洲国家选矿	574
第 39 章 非洲国家选矿	585
第 40 章 亚洲国家（不含中国和独联体）选矿	600
第 41 章 俄罗斯和独联体国家选矿	621
第 42 章 澳大利亚选矿	658
第 43 章 中国选矿	666
第五篇 第二十三届国际矿物加工大会综述	707
第 44 章 大会概况及大会报告概述	709
第 45 章 论文综述	724

第一篇 选矿综合评述

第1章 粉碎工程

欧乐明 邵延海

(中南大学)

粉碎理论、粉碎设备及粉碎工艺的发展总是与矿物加工工业的发展相适应,不断满足矿物加工工业的新要求。节能降耗,提高设备的粉碎效率是粉碎技术发展的永恒的方向。就目前而言,粉碎理论、工艺和设备的研究主要着重于:①研究粉碎过程中节能、高效的理论,力求找出新理论,突破人们已熟知的破碎三大理论;②研究新的非机械力的高能或多力场联合作用的破碎设备,目前还少见有工业化的设备,基本处于研究阶段;③改进现有设备,这方面经常是根据用户自己需要来进行,而不常见市场上大规模生产或研制的新设备。

1.1 粉碎理论

1.1.1 粉碎物理学

矿物颗粒受外力作用后,产生变形并进一步发生粉碎。矿物颗粒变形和破碎行为的考察以及粉碎基础理论的研究,常借助于微观的单颗粒破碎的研究。单颗粒破碎是指颗粒的受力和破裂是单独进行的,即颗粒之间无相互作用。破碎行为和变形的考察以及与粉碎技术有关的物料特性的研究,常借助于单颗粒破碎这一特殊方法。从某种意义上讲,单颗粒破碎是粉碎技术的基础。在单颗粒的压力粉碎过程中,物料粒子受不断增加的压力作用而发生粉碎。李云龙等系统研究了矿物单颗粒破碎的基本规律,认为单颗粒高压破碎的实质是无边界约束的“微料层”粉碎,粉碎过程可以划分为“预损—碎裂—压实”三个阶段。不同矿物的挤压阻力大小顺序为方铅矿>绿柱石>石英>黑钨矿>硬水铝石>闪锌矿>萤石^[1]。

物料的破碎过程实质上是应力波的产生、传播与耗散的过程。研究物料破碎过程中波的传播、物料破碎的应力波效应及料层非线性作用,对研究设计新型破碎设备、新的破碎方法和降低能耗具有实际意义。刘树英等通过物料破碎全过程的分析,揭示了物料破碎过程中的应力波效应,为振动破碎机的设计和物料破碎方法的改进提供了理论依据^[2]。

1.1.2 粉碎能耗

物料粉碎所需的能量一般通过邦德功指数来估计,但邦德功指数的计算是比较困难的。Vedat Deniz 等采用动力学方法,研究了传统邦德功指数的计算参数(W_i 和 G_{kg})与动力学弹性参数(G_d , E_d 和 K_d)的关系,提出了计算邦德功指数的修正公式^[3]。Mosher 等在实验室对邦德测试的方法和过程进行了详细研究,讨论了单一程序的准确性,并指出了测试中的明显缺陷^[4]。

实践表明,常用的能量与颗粒大小模型——邦德方程式在磨矿中对 $-100+0.1\text{mm}$ 是不适用的。Morrell 研究了邦德方程修正因子的计算方法,提出了邦德方程的修正表达式^[5]。Stamboliadis 研究了易碎物料粉碎过程中颗粒大小与能耗的关系,提出了能耗与颗粒大小的

关系式^[6]。Gay 以概率论为基础,建立了物料粉碎的解离模型^[7,8]。Fuerstenau 等以石英为研究对象,讨论了石英球磨能量效率的影响因素^[9]。

姚宇新利用分形和分维数基本概念,导出了破碎粒度分布的分维数和分裂比、粉碎概率互相存在的简单关系;从能耗与表面积相关性出发,推出单位体积破碎能耗与粒度分布的分维数的相关性:当破碎粒度分布的分维数小于 1,破碎能耗呈现自然分形的特征^[10]。

王泽红等研究了磨机有用功率与工作参数的关系^[11],莫莱斯对近年来精确预测磨机功耗的模型进行了分析和讨论^[12]。

翟宏新用多因素试验设计、计算机辅助的多元回归分析和多维作图技术构成的多参数方法,研究了磨机转速、介质充填率、给矿量和矿浆浓度等过程变量对磨矿细度和净功耗的影响,确定了它们之间的相互关系,评价了各过程变量的相对作用,并且由一系列三维曲面显示了诸变量的组合效应,确定了各过程变量的相对重要程度:介质充填率对磨矿细度和净功耗均有十分显著的影响;给矿量对功耗的影响大于对磨矿细度的影响;磨机转速对磨矿细度的影响大于对净功耗的影响;对于确定的磨机转速、介质充填率和给矿量,磨矿细度特性曲线随矿浆浓度的变化呈双曲抛物线状,且有确定的极大值。在兼顾磨矿细度和净功耗两个指标的前提下,确定了各过程变量的适宜操作范围:充填率 0.30~0.35,磨机转速率 70%~85%,无因次给矿量 1.3~1.6,矿浆重量浓度 50%~70%^[13]。

1.1.3 磨矿动力学

磨矿动力学是指被磨物料的磨碎速率与磨矿时间的关系,一般由磨矿动力学方程(零阶、一阶和二阶)来反映。叶贤东等研究了超临速磨机的动力学方程,推导出其动力学方程通式为

$$R(t) = 100\exp[-(a_0 + a_1 d^{x_1})t^{(c_0 + c_1 \ln d)}]$$

随着超临速磨机转速增大,磨矿速度迅速增加;随着磨矿时间延长,磨矿速度减小^[14]。

Liu Yi 等借助 MATLAB/Simulink 图形编程工具,对磨矿流程进行了动力学模拟^[15]。Fuerstenau 等研究了磨矿过程的线性和非线性动力学,提出了解离率函数的修正,并与试验结果进行了对比^[16]。

李平等通过力学分析导出球磨机的理论转速,进而探讨了影响最佳工作转速的主要因素,对提高球磨机的处理量和磨矿效率具有一定的指导意义^[17]。

1.2 粉碎设备

1.2.1 破碎设备

1.2.1.1 颞式破碎机

颞式破碎机以其结构简单、性能可靠、操作容易、维修方便和适应性强等特点,广泛应用于诸多领域。近年来不断出现一些高效的新型颞式破碎机,它们大多都已在工业上得到了应用。

俄罗斯米哈诺布尔选矿研究设计院技术公司研制的振动颞式破碎机^[18~20]独具特点。它利用不平衡激振器高频振动产生的离心惯性力实现物料的破碎。它由机架、两个对称布置的动颞、不平衡激振器和颞板弹性悬挂装置等主要部件构成。不平衡激振器的传动装置与动颞弹性连接,可减少传动装置及其轴承上的冲击载荷。柔性的振动阻尼性能好,无动负荷负载传到底座,不需配备大型基础,适合安装在露天矿可移动式破碎机组和井下破碎。它采用自动

同步振动器, 颚板对物料能产生冲击-振动作用, 冲击频率高, 使用较小的力使物料破碎, 提高了处理能力, 增大了破碎比 (一般为 4~20)。该破碎机批量给料, 也可以完全满负荷给料, 大于排矿口尺寸的物料能自动通过, 不堵料。处理单位矿岩的能耗和钢耗都较低, 降低了经营费用。振动破碎机适用于露天矿和井下矿破碎坚硬物料, 也可以处理含有细粒成分多或含水分高的黏性物料。目前, 其最大规格为 1500mm×2000mm, 给料最大粒度 1300mm, 产品粒度 150~300mm, 处理能力 310~720m³/h。

研究发现, 增加颚式破碎机破碎腔的个数可达到高效节能和增大破碎比的目的。中南大学母福生等研究开发的双腔颚式破碎机, 具有生产能力高、单位功耗低的特点。双腔颚式破碎机的两个破碎腔是以偏心轴为中心对称分布。动颚左、右两侧各有一块活动齿板, 它们与固定齿板分别组成 I、II 两个破碎腔^[20,21]。该类破碎机是典型的四连杆机构, 当曲柄在角度 α 范围内回转时, 破碎腔 I 进行物料破碎, 而破碎腔 II 进行排料, 当曲柄转到 $360^\circ \sim \alpha$ 范围时, 破碎腔 II 进行物料破碎, 破碎腔 I 进行排料, 如此往复循环。电动机的能量得以充分利用, 生产能力提高 1 倍, 单位能耗显著下降。该机主要特点是啮角小, 破碎腔深, 排料口处平行区长, 物料破碎充分, 产品粒度细、且均匀; 双腔交替破碎能充分利用电能, 衬板磨损小, 比传统颚式破碎机衬板使用寿命延长 2 倍。另外一种双腔回转式破碎机^[22]结构简单, 处理能力大, 破碎腔具有动态变啮角特性, 破碎时提供的能量密度高, 物料破碎效果好。

北京矿冶研究总院研制开发的外动颚式破碎机有三种类型: PEWS 型外动颚筛分破碎机^[23]、PEWA 新型外动颚低矮颚式破碎机^[18,19,24]和 PEWD 外动颚大破碎比颚式破碎机^[25]。PEWS 破碎机的特点是: 定颚置于动颚和偏心轴之间, 破碎腔倾斜设置, 并且从上到下分为两段, 两段的动颚和定颚具有不同的倾角, 上段用于粗碎, 下段用于细碎, 使破碎比提高, 可达 13。此外, 在动颚衬板下部沿排料口方向设有长条形筛孔, 构成筛分板。在同一设备上实现破碎和筛分两种作业, 减少了破碎机的堵塞和过粉碎, 节能效果较好。PEWA 低矮颚式破碎机将四连杆机构中连杆作为破碎机边板, 而动颚仅是连杆一点的延伸, 通过边板将动力传给外侧的动颚。动颚和连杆的脱开, 使连杆不再约束动颚的运动特性, 只要改变机构参数, 就可调整动颚的运动轨迹, 从而使动颚获得良好的运动特性。动颚的周期性摆动, 使落入破碎腔中物料受挤压、劈裂和弯曲作用而破碎。该机最大给料粒度为 750mm、破碎能力 90~340m³/h、电机功率 110kW、机重 50t。生产实践表明性能良好、运行稳定可靠、设备作业率 97%。该机外型低矮, 较同规格复摆式颚式破碎机高度降低 25.6%。动颚运动轨迹在水平方向行程大, 便于破碎并降低衬板磨损, 有助于给料排料。该机生产能力大、能耗低, 比同规格复摆式破碎机节能 15%~30%。PEWD 外动颚大破碎比颚式破碎机, 具有动颚有理想的运动轨迹、衬板磨损小、偏心距小、偏心轴转速高、处理能力大、外形低矮和喂料高度及整机重心低等突出优点。排料口的尺寸比普通颚式破碎机小, 破碎腔比普通颚式破碎机长, 能实现大破碎比, 可用一段大破碎比破碎机取代传统流程中的两段或三段破碎。

戴少生等研制了一种新型细碎颚式破碎机 (PEX150×750-A)。该破碎机利用“固定容积”原理, 将固定颚板设计成“直线-修正高斯曲线”型, 活动颚板是直线型, 构造出符合矿石破碎规律的理想的高深式破碎腔。该机与国内同类产品相比, 具有运转平稳、破碎比大、产量高、能耗低、噪音小、运转费用低等特点^[26]。

我国在大型颚式破碎机制造方面^[20]有中信重机公司 (原洛阳矿山机器厂) PE900×1200、PJ1200×1500, 沈阳重型机器制造有限责任公司 PE900×1200、分段启动的 PE1200×1500, 鞍山矿山机械股份有限公司 PE750×1060, 上海建设路桥机械设备有限公司 PE900×1200、PE1200×1500 等型号, 这些型号的颚式破碎机在国际上也属于大型号之列。但是, 我国在大型颚式破碎机制造方面与发达国家相比有明显的差距, 主要体现在大型号机型少、设计开发力度不够、自动控制水平低以及可靠性差。我国颚式破碎机发展的方向, 应向大型化、高可

靠性方向发展,此外还应拓宽领域,发展多用途的新机型。

对颚式破碎机的研究还表现在对现有设备的优化或改造^[27~30]以及对颚式破碎机一些工作参数计算或优化^[31~34]的探讨。

1.2.1.2 圆锥破碎机

圆锥破碎机生产效率高,排料粒度小而均匀,可将矿岩从 350mm 破碎到 10mm 以下的不同粒级,满足入磨粒度需要。该类破碎机目前仍是大中型选矿厂破碎作业的关键设备^[20]。

美国 Allis-Chalmers 公司在圆锥破碎机的更新换代、应用新技术方面做出了重要贡献。它首先研制了液压圆锥破碎机,接着在此基础上提出了高能圆锥破碎机的概念,并被实践所证明。高能圆锥破碎机^[18~20,35]的理论基点是当给料粒度一定时,产品粒度愈小,所消耗的能量愈大,也就是说产品细粒级含量与破碎机输入功率成正比。当物料性质和粒度一定时,破碎机输入功率增加则产量加大,产品粒度减少。实际上高能圆锥破碎机是在原有破碎机的基础上,对破碎机内部结构和机械参数做了改进,配备更大功率的电动机,以产生更大的破碎力,获得更高的产量和更细的产品。因此,圆锥破碎机不仅是向大型化发展而更重要的是向高能化方向发展。

美国 Nordberg 公司开发的新一代 HP 系列圆锥破碎机^[18,19,35,36]是在西蒙斯圆锥破碎机的基础上,吸收了德国 KHD Humboldt Wedag 公司圆锥破碎机偏心部件的特点而开发的多缸液压圆锥破碎机。它以层压破碎原理破碎物料,实现了选择性破碎。所谓选择性破碎是使物料沿着晶体表面缺陷处破碎,不仅节省能耗,而且产品粒度特性好,减少过粉碎,最大限度地满足“多碎少磨”的要求。该机采用缓锥、周边多缸液压锁紧、球面瓦支撑结构,大破碎力、高摆频、大偏心距、大容量电机,实现强化破碎,提高处理能力;该机装有旋转式布料器,自动控制给料量,使物料沿破碎腔周边均匀分布;该机还有液压调整机构,自动控制排料口尺寸,进而实现对产品粒度的控制;装有液压保险及过铁释放的清理系统,以保证破碎机安全作业。国内的鞍钢调军台选矿厂、马钢凹山选矿厂、辽宁阜新市排山楼金矿等已引进该设备用于生产^[18]。

瑞典 Svedala 集团 H 系列液压圆锥破碎机^[18~20,35]采用陡锥、高摆频、小偏心距、底部单缸液压支撑和顶部行星架结构。用 ASRplus 自动控制装置对排料口进行在线控制。优化衬板设计,使衬板磨损后保持腔型不变。同一台破碎机可安装从粗到细 7 种破碎腔型,为用户提供方便。H8800 圆锥破碎机已成功地应用于齐大山选矿厂^[37],获得了较好的效果。

美国 Cedarapids 公司推出新一代 MVP 型滚动轴承的液压圆锥破碎机^[18,19,35]。该机具有如下的特点:其主轴为固定式,偏心机件上移,直接驱动动锥体,消除了偏心轴套和直套的间隙;采用交叉轴传动、高摆频、大偏心距、大容量电机和大破碎力,破碎效果好,液压调节排矿口和过载保护,提高了机器的可靠性;迷宫式密封,效果好;设有 6 组衬板供用户选用,且使用寿命长;实现高能破碎,产品粒度特性好,为标定排料粒度的 75%~85%。

由俄罗斯米哈诺布尔选矿研究设计院技术公司开发的惯性圆锥破碎机^[18~20,35,38,39]引起了人们的广泛关注,它借助于不平衡偏心激振器高速旋转产生离心惯性力使动锥旋摆来破碎物料。该机满负荷给料以形成料层破碎条件;实现选择性破碎,产品粒度细且可调;料层阻止破碎腔衬板直接接触,延长了衬板使用寿命;技术指标稳定,衬板磨损造成排料间隙扩大,不会增大产品粒度;传动装置与动锥间非刚性联接,可带负荷启动或停车,即使有异物进入也不会造成设备损坏;整机采用隔振装置,传给地基动载荷小,不需大型土建基础;简化破碎流程,减少辅助设备台数,节省了设备和基建投资。该机型的主要特点是破碎比大,在 4~30 间调节,产品粒度细,−8mm 占 95%,或 −6mm 占 80%,使破碎磨矿作业基建投资节省 20%~30%,电耗降低 30%,生产能力提高 20% 以上。在国内,北京矿冶研究总院与

俄罗斯米哈诺布尔选矿研究设计院技术公司合作成立的中俄合资北京凯特破碎机有限公司,在原设备的基础上进一步改进,制造出系列的惯性圆锥破碎机已应用在黑色、有色及非金属矿石的破碎作业。有的企业也自主开发惯性振动圆锥破碎机。由于惯性圆锥破碎机性能优异,目前已在有色金属矿^[40]、非金属矿^[41]和碎石^[42]中得到了广泛应用。

优化圆锥破碎机腔型是改造圆锥破碎机,降低磨机入磨粒度的经济可行而又效果显著的方法之一。刘玉辉等介绍了南芬选矿厂对圆锥破碎机腔型优化改造的实践和效果^[43]。徐建平通过研究不同腔型中衬板在破碎机运行过程中的变化规律,对中碎腔型和细碎腔型分别提出了改进方案。实践证明,这些改进达到了延长衬板使用寿命的目的,消除了造成圆锥破碎机处理能力波动的因素^[44]。杜建发介绍了通过对PYD2200型圆锥破碎机破碎腔形、衬板、保险锁紧系统、机架等部分实施改造,使细碎系统生产稳定且提高了设备处理能力。改造后整体破碎效果明显改善,备件消耗显著降低,节能效益达23.96万元/a^[45]。中州铝厂通过改进破碎系统的中、细碎圆锥破碎机动锥和固定锥衬板的腔形,获得了较好的技术经济效益^[46]。

圆锥破碎机动锥的稳定性是人们检查验证圆锥破碎机运转是否正常的一项首要技术指标。朗世平等分析了动锥失稳现象,认为动锥稳定力矩是解决圆锥破碎机“飞车”现象的最根本依据,可根据影响动锥稳定力矩的各种因素去分析和排除偏心部件的故障,并进一步认为动锥稳定力矩是设计动锥稳定性的重要依据^[47]。王尊贞探讨了弹簧圆锥破碎机动锥稳定性问题,认为决定动锥是否稳定的关键和实质是安装过程中偏心套锥孔轴线与机架中心线的交点与球面轴承球心的相对位置问题。交点离开球心越远稳定性越差,离球心越近稳定状况越好,与球心相重合稳定状况最佳,并提出了几条稳定动锥的措施。他还以HP系列圆锥破碎机和PY2200系列圆锥破碎机为对象,探讨了圆锥破碎机的动锥转速与动锥稳定性之间的关系^[48]。高柏松等分析了圆锥破碎机主要机构的受力情况及动锥飞车故障产生的原因,介绍了几项有效的检修工艺技术^[49]。胡百鸣等采用动量矩定理,从整体的动量矩及外力矩着手开始,得出了一个较为简单的计算动锥惯性力矩的公式^[50]。

圆锥破碎机的自动控制也引起了人们的日益关注。朱大昌等提出了一种具有单层神经元自适应的控制方法,该方法引入了单层神经元模型(ADALINE模型)的修正函数。根据该函数对神经元自适应控制的3个输出权值进行在线、实时调整,从而实现了该控制器在尽可能小的超调情况下快速达到稳态,并且具有强抗干扰能力^[51]。马鞍山矿山研究院研制了一种新型高效破碎机自动控制器,经梅山铁矿选矿厂和德兴铜矿泗洲选矿厂数十台国内外圆锥破碎机实际应用表明,该自动控制器系统不仅保护了圆锥破碎机,而且在保证产品粒度合格率的基础上相应提高了处理能力,节电效果显著,在矿山具有广阔的应用前景^[52]。赵书玲等在仿人智能控制的基础上,吸取模糊控制的优点,运用新的控制算法,对控制系统进行了仿真。结果表明,仿人智能模糊控制具有很强的抗滞后和抗干扰等优点^[53]。韩建华介绍了一种圆锥破碎机润滑部分自动控制系统,它通过AI人工智能工业调节器、流量开关、压力开关、温度开关提供接点信号与TI565主机联系控制润滑油油量、油温、油压在一定范围之内,以保证圆锥破碎机高效运转^[54]。

1.2.1.3 冲击式破碎机

冲击式破碎是物料在极短时间内获得巨大的动量,冲击反击板或相互碰撞,使其沿自然裂隙、层理面和节理面等脆弱部分破碎,所以具有破碎效率高、能耗低、产品粒度均匀、过粉碎现象少、破碎比大(一般为10~15,最高可达40)、结构简单、造价低廉、运转平稳、维修方便等优越性,引起世界上破碎机制造商的普遍关注。20世纪90年代以来,冲击式破碎机是发展最快的破碎机械之一,其应用范围不断扩宽,已从早期水泥和制砂行业扩展到金

属矿和非金属矿石的超细碎作业^[18~20]。

国外一些典型的冲击式破碎机代表有^[18,19]：瑞典 Svedala 公司收购新西兰 TIDGO 公司后推出 Barmac 型自衬式立轴冲击破碎机，该破碎机已在巴西、美国、乌克兰等国的铁矿破碎作业中得到了成功应用；美国 Kue-Kon 公司的 Turbo VSI 型破碎机在乌兹别克斯坦国的 Newmont-Zarafshan 选矿厂处理堆浸法产生的含金尾矿时，采用闭路循环第四段破碎作业获得 -3.5mm 粒度的产品，从而提高了磨矿效率，降低了磨矿能耗；其他还有美国 Cedarapids 公司开发的 Wijay VSI 型立轴冲击式破碎机和美国 Nordberg 公司推出 VI 型立轴冲击式破碎机等。

国内生产的代表性冲击式破碎机有洛阳大华矿山机器厂开发的 PFL 系列立式冲击破碎机和 PFQ 涡旋强力反击式破碎机；上海建设路桥机械设备有限公司开发的 PLF 立式反击锤式破碎机是集锤式破碎机、反击式破碎机和立式冲击破碎机等设备优点的新型超细碎设备；上海多灵-沃森机械设备有限公司开发的 PLC 系列立式冲击破碎机以及北京重型机器厂和沈阳矿山机器厂联合引进的 MB 锤式破碎机等^[18~20]。

吴彩斌等介绍了反击式破碎机在巴里选矿厂特富矿石破碎中的工业试验情况。结果表明，用反击式破碎机代替传统的常规破碎机不仅简化了流程和设备，起到了节能降耗的效果，而且产品粒度细而均匀，平均粒度下降约 50%，符合多碎少磨的原则。山西铝厂西堆场民矿破碎系统中采用 MB28/45 锤式破碎机后，使用一段破碎工艺获得了比二（三）段工艺更好的效果，取得了良好的经济效益和社会效益^[55]。

1.2.1.4 辊压破碎机

辊压破碎机^[18,19]又称高压辊磨机，它是以“料层破碎”原理而工作的高效节能设备。物料在高压辊间受到强大作用力，一般为 150~300MPa，破碎比大，产品粒度细，是能实现“多碎少磨”或“以碎代磨”的新型超细破碎机。由于辊压破碎机对物料层施加作用力大，不仅使物料破碎，而且能使产品颗粒内部结构产生大量裂纹，从而使后续的磨矿能力大幅度增加。采用自生式耐磨衬板，使被破碎的物料卡在硬质合金镶嵌凸柱或焊接凸柱间，保护衬板，而减少磨损，使衬板使用寿命增加。生产实践表明，它具有生产能力大、产品粒度细、能量有效利用率高、占地面积小、能提高磨矿处理能力以及降低磨矿能耗和钢耗的优点，不仅是水泥行业首选设备，而且是金属矿石超细碎的理想设备。

智利 Loscolorados 铁矿选矿厂使用 RPB16-170/180 型辊压破碎机，给料粒度 -38mm 占 80%，产品粒度 -6.35mm 占 80%，处理能力达 1680t/h，可以替代常规破碎机两段破碎。在产品中 -150 μ m 粒级产率比常规破碎机多 1 倍，从而提高了磨机处理能力，降低了磨矿能耗^[18,56]。美国 Sierrita 铜选矿厂安装 1 台 2450mm $\times$ 1400mm 的辊压破碎机用做中碎后产品的破碎，生产能力为 1800t/h，产品粒度 80% 为 -250 μ m，使后续磨机生产能力提高 15%~20%^[20]。威勒特利 P. 阐述了一种被称为辊筒非圆柱形对辊式破碎机（缩写为 NCRC 破碎机），它具有两个交替排列的平面-凸圆面辊筒和平面-凹圆面辊筒组成，这两个奇特的辊筒外形增大了矿粒与辊筒之间的啮角，使得 NCRC 破碎机的破碎比传统对辊机大。NCRC 破碎机样机试验表明，即使对很硬的矿石也能获得破碎比大于 10 的结果。此外，由于 NCRC 破碎机的破碎过程为对辊破碎和颚式破碎的联合作用，这种辊面外形变化的新式辊筒，磨损率得到降低^[57]。

我国东北大学与沈阳矿山机器厂合作开发的 Φ 1000mm $\times$ 630mm 辊压破碎机^[18,19]在唐山钢铁公司棒磨山铁矿选矿厂试用，对 f 为 16 的铁矿石破碎，给矿粒度 -40mm，排料粒度 50%~60% 为 -5mm，连续生产能力为 80~100t/h，最大为 120t/h，使磨机处理能力提高 30%~50%，节省能耗 15%~40%，钢球消耗降低 30% 左右。相继又为马钢姑山矿业有限责