

物料粉碎设备设计理论及应用

刘志超 武良臣 薛铜龙 白云峰 著

中国矿业大学出版社

前 言

本书是研究物料粉碎机理和粉碎设备设计理论的一本专著,是作者十几年来承担国家和省、部级相关科技攻关项目研究成果的重要组成部分。

物料粉碎是伴随着人类从原始走向文明的基本技能。从远古时代谷物的研磨到石器的加工,从古代的物料粗加工到现代的工业化精加工,粉碎技术为人类提供了有效的帮助,拓宽了人类对大自然资源的利用,促进了人类精神文明与物质文明的发展。随着科学与工业技术的进步,粉碎技术作为粉体加工制备过程的重要手段,在材料、非金属矿、化工、冶金、食品、医药、饲料、涂料、塑料、建材机械等行业得到了广泛的应用,各种粉碎设备也随之应运而生。粉碎工程的发展离不开先进设备,因此研究物料粉碎设备的现代设计理论与方法,对于破碎、磨碎、筛分和分级、超细碎和超细分级、特殊粉碎等方面有重大意义。

早在 20 世纪 70 年代,河南理工大学(原焦作矿业学院、焦作工学院)矿山机械设备教研室针对煤块及掘进岩石的破碎需要,为平顶山矿务局设计了简易颚式破碎机、齿辊破碎机,从 20 世纪 80 年代开始,教研室先后承担了“400×600 超细碎颚式破碎机设计”、“顺槽筛选破碎设备研制”、“DCP400×650 单齿辊破碎机设计”、“全液压垃圾处理破碎机设计”“MG3260 钢球磨煤机优化设计”、“L1300 立式辊磨设计”等研究设计任务,公开发表学术论文 20 余篇,培养了四届研究生。对物料粉碎设备的设计理论与方法,运行状态与控制,以及主要性能参数的计算进行了深入的探索,研究了与粉碎过程有关的耗散结构理论、突变理论、分形结构及力学行为和动态特性。

在此基础上,教研室先后编写了《现代设计理论与方法》、《机械系统设计》、《矿井提升机械设计》、《机械动力学》、《通用机械设计》、《动态系统辨识》等多种教材,供本科生和研究生使用。本书就是在这些教材的基础上,结合作者几年来物料粉碎的研究成果,经多次讨论、修改,整理加工而成,这是河南理工大学有关教师的集体成果,作者对他们表示衷心的感谢。本书总结了教研室 20 余年的研究成果,特别是物料粉碎机理及粉碎设备设计和动态特性方面的成果。

本书由河南理工大学刘志超撰写第 1~3 章,白云峰撰写第 4 章,薛铜龙撰写 5~6 章,全书由武良臣教授统稿。

本书在撰写过程中,得到了中国矿业大学出版社和河南理工大学各级领导的大力支持,他们对本书的指导思想、内容体系提出了许多宝贵意见;中南大学张智铁教授、湖南科技大学唐果宁教授和周贤博士等专家、学者对本书的撰写给予了许多具体帮助,特别值得提出的是中南大学张智铁教授提供了他的研究成果,从某种意义上说,没有张智铁教授的具体指导和帮助,就不可能有本书的出版。在此,谨向以上单位的领导和有关专家、学者表示深切感谢,同时也感谢河南省机械制造及其自动化重点学科对本书的出版提供的资助。

由于作者水平所限,本书难免存在谬误与不妥之处,敬请读者不吝指教,我们表示衷心感谢。

作 者

2006 年 6 月

目 录

前 言	1
第一章 粉碎设备设计基础	1
第一节 物料粉碎的意义	1
第二节 物料破碎的机理及过程	2
第三节 破碎机及其检测与控制	7
第四节 粉碎原理与工艺	12
第五节 磨矿机及其主要性能控制	18
第六节 典型物料粉碎设备	33
第二章 物料的粉碎过程及分形结构	39
第一节 物料的构造和性质	39
第二节 晶格能	44
第三节 理想晶体的强度	47
第四节 非晶质体	48
第五节 物料粉碎的分形结构描述	49
第六节 粉碎过程的分形结构	54
第七节 粉碎过程中裂纹扩展的分形效应	58
第八节 物料颗粒表面分形特征	60
第九节 物料粉碎能耗的分形特征	61
第三章 物料粉碎的功耗与突变理论	64
第一节 物料粒度	64
第二节 物料粒度特性	68
第三节 粉碎功耗学说	73
第四节 突变理论基础	87
第五节 单颗粒物料粉碎的突变行为	91
第六节 料层粉碎的突变行为	95
第四章 物料粉碎力学分析	102
第一节 脆性断裂力学原理	102
第二节 弹塑性断裂理论	116
第三节 脆性物料断裂的力学行为	120

第四节	物料粉碎形成的耗散结构·····	126
第五节	物料粉碎的非线性热力学和动力学分析·····	129
第六节	破碎板温度场有限元分析·····	137
第五章	颚式破碎机现代设计方法·····	139
第一节	颚式破碎机的基本结构·····	139
第二节	破碎机合理腔形的研究·····	143
第三节	破碎机工艺参数的优化设计·····	146
第四节	破碎功率的计算·····	154
第五节	颚式破碎机的保险装置·····	161
第六节	破碎机的数字化设计·····	162
第六章	离心磨矿机动态特性的试验研究·····	168
第一节	离心磨矿机的特性·····	168
第二节	离心磨矿机的结构及工作原理·····	169
第三节	离心磨矿机的介质运动分析及有用功率的计算·····	173
第四节	离心磨矿机介质冲击应力的理论计算·····	184
第五节	离心磨矿机的物料粉碎状态·····	189
第六节	颗粒磨碎过程能耗的理论计算·····	192
第七节	离心磨矿机运行过程的优化控制·····	195
参考文献 ·····		200

第一章 粉碎设备设计基础

第一节 物料粉碎的意义

一、物料粉碎的含义

粉碎是使物料颗粒尺寸逐渐变小的工艺过程,它是破碎和磨碎的总称。

泛而言之,粉碎是宇宙中普遍存在的一种现象,从宇观的宇宙大爆炸,宏观的山崩地裂、岩石风化,到微观的原子核裂变,无一不是物质的粉碎过程。

二、物料粉碎在国民经济中的地位

物料粉碎工艺,至少有几十万年的历史。考古发现,距今约 170 万年的“元谋人”,其文化遗物中已有石制工具。距今约 40~50 万年的“北京人”所使用的石器中,一部分是把石块打制成带刃的石片,再经过单面加工制成的。打制石器并用来从事砍砸和刮削,这些都是古人类在生活和劳动中所从事的粉碎作业,可以看做是现代物料粉碎的最早起源。在古代,人们发明了杵、臼、碾、磨等许多粉碎工具,它们在现代生活中还偶有使用。直到 1858 年 E. W. Blake(布莱克)发明了复摆颚式破碎机和 1878 年第一台旋回破碎机问世,物料粉碎才成为工业生产部门的重要工艺过程。

事实上,人们在生产和生活中处处都离不开物料粉碎。人们一年粉碎的各种物料,据估计其总量为 10^{10} t。物料粉碎工艺广泛应用于冶金、煤炭、建材、化工、能源、交通、陶瓷、医药、食品加工、国防施工、农业、林业等许多行业和部门。

物料粉碎是一个高能耗、高钢耗、低效率的工艺过程。据统计,在世界许多国家中,粉碎消耗的电能约占总电能的 4%~5%,在选矿厂,粉碎能耗约占整个选矿能耗的 40%~70%,其比例不能不谓巨大,其地位不能不谓重要。

粉碎作业的任务是满足国民经济对各种物料产品在数量上以及粒度、粒度分布、解离度、物质结构、表面物理化学性质等许多方面的迫切需要。20 世纪 70 年代,为了满足对粉碎产品数量上日益增长的需求,出现了粉碎设备大型化的热潮,目前世界上最大的粉碎设备如 $2\ 100\times 2\ 100$ 复摆颚式破碎机、 $\Phi 2\ 130$ 旋回破碎机、 $\Phi 3\ 000$ 圆锥破碎机、 $\Phi 6\ 500\times 9\ 650$ 无齿轮传动磨机相继问世并投入生产应用。

三、粉碎的目的

1. 使矿石中有益成分解离

从地壳中开采出来的矿物原料,或因有用成分含量过低,或因几种有用成分与杂质共生,或因粒度不合要求,通常不能直接使用。只有将其充分粉碎,使有用成分与杂质充分解离,才能经选矿等一系列的加工处理,剔除杂质,提高有用成分品位。

2. 使物料的比表面增大

比表面是单位质量或体积的物料的表面积。显然,物料的粒度越小,比表面越大,即比表面与粒度成反比。增大比表面的目的有二:一是使物料与周围介质的接触面积增大,因而反

应速度增加,这有利于提高如催化剂的接触反应、固体燃料的燃烧与气化、物料的溶解、吸附与干燥以及化工上利用粉末颗粒流化床的大接触面积来强化传质与传热等的效率;二是提高物料的性能,如在水泥工业中提高水泥标号,因为水泥熟料同石膏一起磨成粉末状态的最终产品,粒度愈细,比表面愈大,水泥的标号就愈高。

3. 为下一步加工作原料准备

如在炼焦厂、烧结厂、制团厂、陶瓷工业、玻璃工业、粉末冶金等部门中,要求将原料粉碎至一定粒度以下,以供进一步加工之用。

4. 便于使用、贮存与运输

如在食品、化学、医药、化肥、农药等工业部门中,常将产品粉碎成粉末状态,以便于使用。另外粉碎后的物料便于采用气力或水力的管道输送。

5. 人工造砂

在大型水电站等建设中,混凝土耗量极大,天然砂常常不敷使用,于是用粉碎方法制备严格符合粒度规定的人工砂。

6. 用于材料科学与环境保护

如在一些功能材料、复合材料的生产中,就利用了粉碎过程的机械化学效应引起的粉末材料的表面改性、晶体变形和性变。

第二节 物料破碎的机理及过程

物料破碎的产品粒度大约为 $1\text{ mm}\sim 5\text{ mm}$,即使用外力使大块物料破裂为小块。其主要目的是为后道工序提供粒度合乎工艺要求的原料以及便于储存和运输。在工业生产中破碎均采用破碎机进行。破碎产品的上限粒度不小于 $3\text{ mm}\sim 5\text{ mm}$,实验室加工的试料可达 1 mm 。破碎是选矿、选煤、冶金、建筑、筑路、水泥、氧化铝、非金属矿物加工和火力发电等工业部门的一项重要作业。在选矿厂和水泥厂,粉碎车间的投资和生产费用所占比重很大,例如选矿厂破碎与磨碎车间的投资,约占全厂投资的 60% ,其生产费用占全厂生产费用的 40% 。因此,降低破碎能耗,提高破碎效率,意义十分重大。

一、破碎机理

破碎过程是一个复杂的物料块尺寸变化过程,与许多因素有关。主要影响因素有:物料的抗力强度、硬度、韧性、形状、尺寸、湿度、温度、密度和均质性,以及外部条件如物料块群在破碎瞬间相互作用及分布状态等。上述因素都导致了破碎过程的复杂化,因而至今尚未得出统一而完整的理论来阐述并指导破碎实践。破碎必须是在外力对物料做功,克服其质点间的内聚力时才能发生。内聚力的大小对同一种物料也是十分悬殊的,内聚力可分为两类:一类是晶体内部的各质点之间的力,另一类是晶体与晶体之间的力。两者具有相同的物理性质,但数值不同,第一类内聚力比第二类内聚力大很多倍。内聚力的大小,取决于物料块中晶体本身的性质和结构,也与结构中存在的缺陷有关。这些缺陷可能是宏观和微观的损伤性裂缝,它使晶体间的联系变弱了。根据晶体的构造和质点间作用力的性质,能从理论上计算晶体内的内聚力;至于晶体间内聚力的大小,以及所有降低物料坚固性的因素所引起的影响,尚不能精确地计算。

物料块在因受外力作用而破碎之前,首先产生弹性变形,当变形达到一定值时,物料的

缺陷处重新弥合,并发生硬化和应力增大,外力继续作用时变形也继续,直至沿着最脆弱面断裂开。观察破坏断面可知,物料或是被与之垂直的应力压裂(或拉裂),或是在剪应力作用下产生滑移,或是在两者共同作用下断裂。

二、破碎方式及过程

破碎方式分机械破碎和非机械破碎两类。机械破碎按外力作用方式分为:挤压破碎、冲击破碎、研磨破碎、劈裂破碎和弯曲破碎(见图 1-1)。非机械破碎有:爆炸破碎、水力破碎、超声破碎(即利用超声高频振荡的冲击力使物料破碎)、热裂破碎(即将物料加热,改变其周围压力而使之破碎)、高频电磁波破碎(即用高频或超频电磁波(3 000 MHz/s 以上)使物料表面受高热,产生巨大张力而破碎)、水电效应破碎(利用离子性液体对物料产生短暂脉冲高压放电作用使之破碎)等。无论采用哪种破碎方法,物料受外力作用时,总是沿着其最脆弱面产生应力集中而发生破裂。破碎后,新生成的碎料块上,原有的脆弱面减少或消失了,同时又形成了更加微小的新的脆弱面。随着物料粒度的减小,损伤相对减少,物料变得更加坚固。因此,破碎较小的物料,需用较大的能量消耗,即磨碎 1 t 物料的能耗大于破碎 1 t 物料的能耗。用某一种物料的破碎、磨碎邦德功指数计算粒度变化和能耗关系,绘制如图 1-2 所示曲线,可以确定该物料的合理的破碎产品粒度,使破碎和磨碎的综合能耗大幅度降低。

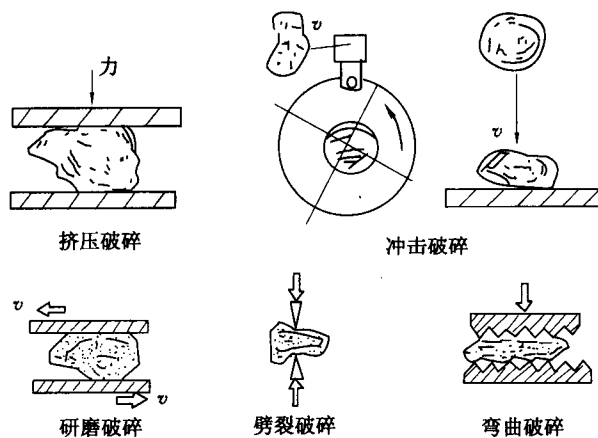


图 1-1 机械破碎方法

中国学者宏力于 1958 年提出了降低破碎产品粒度,提高球磨机处理能力,降低磨碎作业能耗的多碎少磨的学术思想。这一思想经历了 20 多年的能源危机之后,已被世界公认和提倡,形成了“多碎少磨”节能型破碎工艺。图 1-2 所示的确定磨机合理给料粒度的方法可视作“多碎少磨”工艺的理论依据。实际生产中,物料群在破碎设备中的破碎与单个颗粒的破碎不同,它虽以单个颗粒的破碎为基础,但反映的是力对物料群体破碎的总情况,由于各个颗粒在破碎过程中所处的状态不同,只能近似地对群体破碎的总状态进行定性和半定量分析。从宏观上看,破碎过程是颗粒群的物料粒度组成的逐步变化过程,即由较粗的颗粒组成,变成较细的颗粒组成的过程。变化的程度,取决于破碎加工的强度和频率(见图 1-3)。

破碎过程中,物料的粒度变化还可用图 1-4 来说明。在破碎过程中,每一物料块可能碎成产品中的各个粒级,并不是逐次地被破碎,当然,也有可能未被破碎而进入产品中。

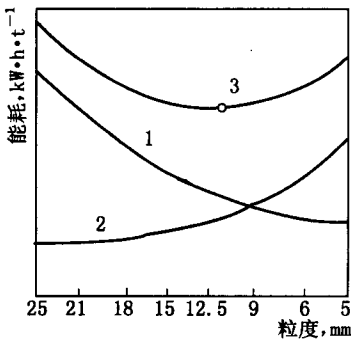


图 1-2 破碎产品粒度与能耗关系

1——磨碎过程；2——碎矿过程；3——碎矿与磨矿

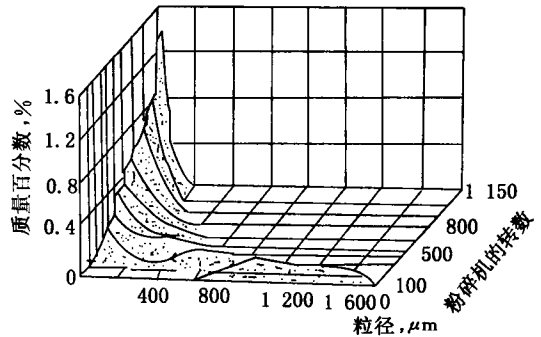


图 1-3 破碎过程中粒度分布曲线的变化

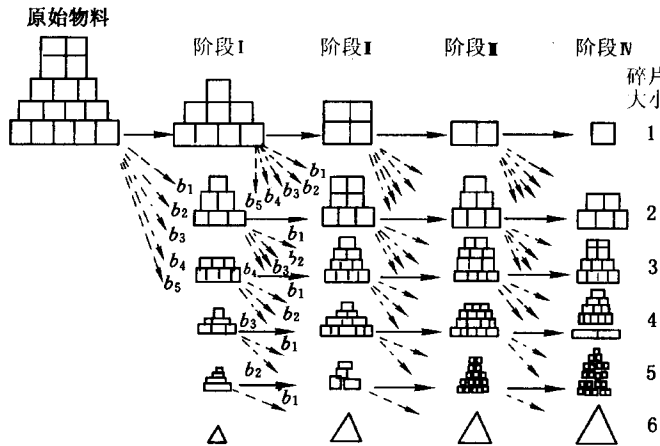


图 1-4 物料碎裂过程颗粒粒度的变化

三、破碎模型

破碎产品包含粗粒和微粉两部分。粗粒部分称为过渡成分，微粉部分称为稳定成分。由此可以推论固体颗粒的破碎过程不是连续单一的一种破碎形式，而是两种以上不同破碎形式的组合。德国胡廷等人提出了破碎时的三种破碎模型，如图 1-5 所示。

体积破碎模型是指整个颗粒都受到破坏(破碎)，生成物大多为粒度大的中间颗粒，随着破碎的进行，这些中间粒径的颗粒依次被破碎成具有一定粒度分布的小粒径颗粒，最后逐渐积蓄成微粉成分(即稳定成分)。表面破碎模型是指仅在颗粒的表面产生破坏，从颗粒表面不断剥下微粉成分，破坏不涉及颗粒的内部。均一破碎模型是指加于颗粒的力，使颗粒产生分散性的破坏，直接破碎成微粉成分。三种模型中均一破碎模型仅在结合极不紧密的颗粒集合体如药片之类中出现，实际的破碎是(a)、(b)两种模型的叠加。(b)模型构成稳定成分，(a)模型构成过渡成分。(a)模型与破碎机构造和参数有关，(b)模型与

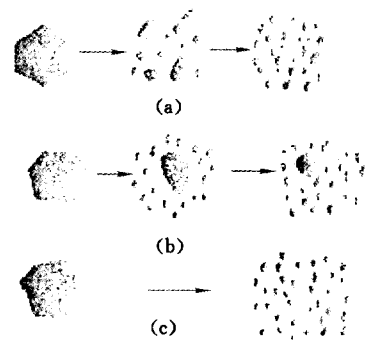


图 1-5 破碎模型

(a) 体积破碎模型；(b) 表面破碎模型；
(c) 均一破碎模型

被破碎物料的物理性质有关。通常又将体积破碎看做冲击破碎，表面破碎看做摩擦破碎。

四、破碎流程

破碎作业常与筛分作业联合进行。在待破碎的给料中常含有一些小于破碎阶段要求达到的粒度的物料，给入破碎机前有时先进行一次筛分，预先将它们筛出。破碎后的产品中常含有一些过大颗粒的物料，对此也常用筛子分出进行再破碎，称为检查筛分。因此，破碎机常与各种类型的筛子构成开路或闭路系统工作。闭路系统破碎产品粒度由检查筛分尺寸控制，而开路破碎系统的产品中常含有大于规定粒度的过大颗粒。在破碎和筛分作业过程中，由粗碎、中碎、细碎或超细碎组成的工艺过程叫破碎筛分流程，通常简称为破碎流程。选矿厂的破碎流程多种多样，共同的特点是：① 破碎分段进行；② 破碎机通常与筛子配合使用；③ 以破碎段为破碎流程的基本单元，通常分为粗碎段、中碎段、细碎段和超细碎段，它们又分别称为第一段破碎、第二段破碎、第三段破碎和第四段破碎。各破碎段都应选用相应的破碎与筛分设备。第四段破碎（超细碎段）的设置多是为了获得小于 8 mm 的破碎产品，以实现“多碎少磨”节能工艺。各种工艺流程的差别只是破碎段数、筛子的配置位置和作用以及采用设备的不同。常见的破碎流程有两段破碎流程、三段破碎流程和带洗矿作业的破碎流程；一段破碎流程只有在采用自磨机和半自磨机，以及在露天或井下矿山为便于运输时才使用。图 1-6 为

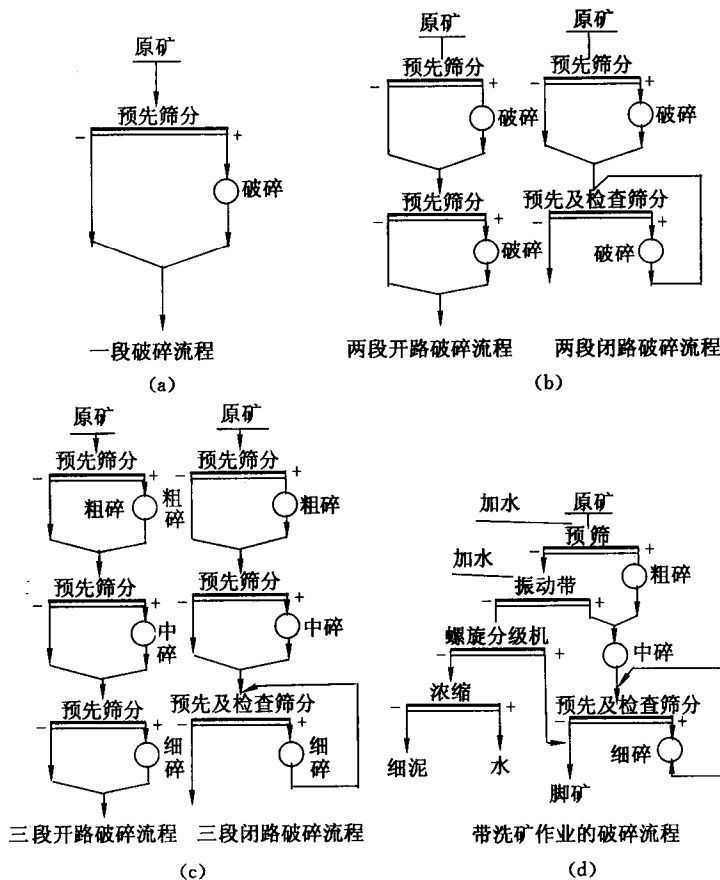


图 1-6 常见破碎工艺流程

(a) 一段破碎流程；(b) 两段破碎流程；(c) 三段破碎流程；(d) 带洗矿作业的破碎流程

选矿厂常见的破碎工艺流程。

两段破碎流程又分两段开路 and 两段闭路两种。适用于井下开采的小型选矿厂,原矿粒度为 200 mm~400 mm,产品粒度为 12 mm~30 mm。若第一段破碎机生产能力有较大富余,第一段可不设预先筛分,即采用第一段不设预先筛分的两段闭路破碎流程。两段开路破碎流程只在某些重选厂,或小型选矿厂把破碎产物直接送到棒磨机进行磨矿时才采用。

三段破碎流程的基本形式有三段开路和三段闭路两种。三段闭路破碎流程,作为磨矿的准备作业,只要原矿含泥不高,都能适应,在各种不同规模的选矿厂获得了较广泛的应用。三段开路破碎流程所得破碎产物较粗,但可以简化破碎车间的设备配置,节省基建费用。因此,当磨矿的给料粒度要求不严和磨矿段的粗磨采用棒磨时,以及处理含水分不高的泥质矿石和受地形限制等情况下,可采用该流程。

当原矿含泥量超过 5%~10%和含水量大于 5%~8%时,会恶化破碎过程的生产条件,此时应采用带洗矿作业的破碎流程。洗矿作业一般设在粗碎前后。由于原矿性质不同,洗矿的方式和细泥的处理方式也不同,因而流程多样。

五、破碎比

破碎比是原物料粒度与破碎产物粒度的比值。它是衡量破碎机、磨矿机在破碎和磨碎过程中功率消耗的指标。计算破碎比(i)的常用方法有三种:

(1) 用物料在破碎前的最大粒度 D_{\max} 与破碎后的最大粒度 d_{\max} 的比值来确定,即:

$$i = D_{\max} / d_{\max}$$

物料的最大块直径在中国和苏联取物料的 95%能通过的筛孔宽度,英、美等国取物料的 80%能通过的筛孔宽度。选矿厂设计和生产中使用者。

(2) 用碎矿机给矿口的有效宽度(B)和排矿口宽度(S)的比值来确定,即:

$$i = \frac{0.85B}{S}$$

生产中常用这种表示方法评估和选择破碎机。

(3) 用破碎前物料的平均直径 $D_{\text{平均}}$ 与破碎后物料的平均直径 $d_{\text{平均}}$ 的比值来确定,即

$$i = D_{\text{平均}} / d_{\text{平均}}$$

用这种方法算得的破碎比,能较真实地反映破碎程度,因而常在理论研究以及评估细碎和磨碎作用中采用。

由于采矿开采出的矿石块度很大,而入选粒度一般都很细,为了保证所需的高破碎比,通常是把适合处理各种粒度的碎矿机和磨矿机依次串联,构成破碎和磨矿流程。在流程中,形成了各个破碎段和磨碎段。整个破碎和磨碎流程的破碎比叫总破碎比(i),各段的破碎比($i_1, i_2 \dots i_n$)叫分破碎比。设 D_{\max} 是原矿最大块直径, d_{\max} 是破碎最终产物里的最大粒直径, $d_1, d_2 \dots d_n$ 是第一段、第二段至第 n 段破碎产物中的最大粒直径,则:

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n = \frac{D_{\max} d_1}{d_1 \cdot d_2} \cdot \dots \cdot \frac{d_{n-1}}{d_n}$$

六、破碎段

待破碎的物料,例如露天开采的矿石,其最大块尺寸可达 1 500 mm。假定要将其粉碎至 0.1 mm 以下,则破碎比高达 15 000。目前尚不能用一台粉碎设备来达到如此大的破碎比,通常是将适合处理各种粒度物料的破碎机和磨矿机依次串联,组成破碎和磨矿流程,来完成

这一任务,于是,形成分阶段粉碎,每经过一台粉碎设备,物料粒度减小一次,称为“一段”。根据处理的物料的粒度,破碎与磨碎的阶段划分如表 1-1 所示。整个流程的破碎比是各段破碎比的连乘积。

通常,中型和大型选矿厂采用三段或四段破碎;小型选矿厂只采用两段破碎。三段破碎分为粗碎段、中碎段和细碎段。粗碎段给料粒度为 300 mm~1 500 mm,产物粒度为 100 mm~350 mm;中碎段给料粒度为 100 mm~350 mm,产物粒度为 19 mm~150 mm;细碎段给料粒度为 19 mm~150 mm,产物粒度为 4.8 mm~30 mm。这种划分主要适用于颚式破碎机、旋回破碎机、圆锥破碎机和辊式破碎机等。而某些破碎机,如反击式破碎机和锤式破碎机,能将 1 000 mm 的大块物料一次破碎至 10 mm~30 mm 以下;自磨机能将 600 mm 的大块物料一次粉碎至 0.044 mm 以下,即一台设备兼有粗、中、细碎或粗、中、细碎及磨碎的功能。

表 1-1 粉碎阶段

阶 段	给料最大块尺寸/mm	产品最大块尺寸/mm
破碎:粗碎	300~1 500	100~350
中碎	100~350	19~150
细碎	19~150	4.8~30
磨碎:一段磨碎		0.3~1
二段磨碎		0.07~0.1 或更细

第三节 破碎机及其检测与控制

一、破碎机概述

破碎机是利用一定的机构以一种或几种施力方法使大块物料破碎成小块的设备。它是工业生产中广泛使用的一类通用设备。根据其工作原理、工艺特性和结构,破碎机可分为摆动式破碎机(如颚式破碎机)、旋摆式破碎机(如旋回破碎机、圆锥破碎机、双腔回转破碎机等)、辊压式破碎机(如对辊破碎机、高压辊磨机)和冲击作用破碎机(如锤式破碎机、反击式破碎机及笼形破碎机)等几种类型。选择破碎机时,应考虑使设备的主要施力方式与物料性质相适应,才会有良好的破碎效果。对于坚硬物料应当以挤压力为主,配合以冲击力破碎之;对于脆性物料,采用冲击、弯折较为有利;对于韧性及粘性较大的物料,采用劈裂和磨剥较为合适。

粗碎作业,通常采用大型颚式破碎机、旋回破碎机;它们与中、小型颚式破碎机适用于各种硬度物料。对于脆性、中硬以下, SiO_2 含量较低的物料,如石灰石、石棉矿、石膏、板石、煤、粘土、泥灰岩、焦炭及岩盐等可以采用锤式破碎机、反击式破碎机。中碎作业,通常采用圆锥破碎机(标准型和中间型)破碎含泥量、含水量低的各种硬度的物料;脆性、中硬以下, SiO_2 含量较低的物料也可以采用锤式破碎机和反击式破碎机。在中、小型矿山,还可以采用细碎型颚式破碎机和双腔回转破碎机。细碎作业,通常采用短头型圆锥破碎机破碎含水量、含泥量较低的各种硬度的物料。中硬以下、非粘性、 SiO_2 含量较低的物料也可以采用辊式破碎机;中硬以下、脆性、 SiO_2 含量较低的物料还可采用锤式破碎机、反击式破碎机、立式冲击破

碎机和笼形破碎机；中小型矿山可以采用双腔回转破碎机细破碎各种硬度以及 SiO_2 含量较高的物料。双腔回转破碎机可在冲水工况下工作，用于含泥量、含水量较高物料的细破碎。

旋回破碎机、圆锥破碎机、颚式破碎机、回转破碎机的最大给料粒度应小于破碎机入口的 85%；辊式破碎机的最大给料粒度不大于辊子直径的 1/20(光滑辊)；齿辊式破碎机不大于 1/6；槽形辊式破碎机不大于 1/10。反击式破碎机、锤式破碎机是自由冲击破碎，对给料粒度限制不是十分严格。表 1-2 中给出了破碎机类型和选择破碎机的参考原则。

表 1-2 按作业条件、破碎比和物料可碎性选择破碎机的参考原则

作业	破碎机类型	工作条件	破碎比范围	适用物料性质
粗碎	大型颚式破碎机	开路	3~5	各种硬度物料
	旋回破碎机	开路	3~5	各种硬度物料
	中小型颚式破碎机	开路	3~6	各种硬度物料
	锤式破碎机	开路	8~25	脆性、中硬以下 SiO_2 含量较低的物料，如石棉矿、石膏、板石、煤、粘土、泥灰岩、焦炭及岩盐
	反击式破碎机	开路	8~25	
中碎	圆锥破碎机 (标准型、中间型)	开或闭路	3~6	含泥量、含水量低的各种硬度的物料
	锤式破碎机	开路	8~10	脆性、中硬以下， SiO_2 含量低的物料
	反击式破碎机			
	双腔回转破碎机	开路	8~10	各种硬度物料，含水量含泥量 < 10% 的物料(可冲水工作)
细碎	短头圆锥破碎机	开路 闭路	3~6 4~8	含泥量、含水量低的各种硬度的物料
	辊式破碎机	闭路	3~15	中硬以下、非粘性、 SiO_2 含量较低的物料
	锤式破碎机	闭路	4~10	
	反击式破碎机	闭路	4~10	
	双腔回转破碎机	闭路	8~15	各种硬度物料、含水量含泥量 < 10% 的物料(可冲水工作)
	立式冲击破碎机	闭路	8~10	中硬以下，脆性、含泥含水低的物料
超细碎	新型圆锥破碎机	闭路	10~20	各种硬度物料、非粘性含水低的物料
	双腔回转破碎机	闭路	10~20	各种硬度的物料
	立式冲击破碎机	闭路	10~15	中硬以下、脆性、含泥含水低的物料
	高压辊磨机	开路	10~15	中硬以下、脆性、含泥含水低的物料

破碎机的发展是与破碎工艺要求相适应的。20 世纪 70 年代以来，为了降低磨矿作业的能耗，除了不断提高破碎机可靠性外，更注重提高其破碎比，即研制和开发大破碎比破碎机。为了实现大破碎比，破碎机的强度、刚度和耐磨性能都相应提高，产品粒度调节能力(排料口调节)也得到改进。同时，破碎回路的自动优化控制和调节成了现代化破碎作业的标志。

二、破碎机负荷检测

它是检测破碎机破碎腔内瞬时通过的实际矿石量的选矿测试技术。破碎机的负荷影响破碎产品的粒度和能耗，也影响破碎机的正常运行，故应及时检测破碎机负荷。在多段破碎

时,一般只检测控制最终产品粒度的最后一段破碎机的负荷,这段破碎机通常是在闭路系统中,其入料量包括从前一破碎段来的量和循环负荷量。检测最后一段破碎机负荷的主要方法有:① 直接用触点料位计指示破碎腔内的料位,即知其负荷;② 检测破碎机的电动机电路中的电流值;③ 用皮带秤等称量破碎机给料皮带运输机的输送量;④ 由计算破碎、筛分闭路系统的循环负荷得出。前两种方法直接反映破碎机腔内的瞬时负荷的大小,检测方便,更便于及时调节,可与自动调节装置组成自动控制系统。第三种方法除了不直接反映破碎机腔内的负荷外,也具有前两种方法的优点,但需增加选矿厂的设置;当输送物料粒度太大时(进入最终破碎机物料粒度 $>50\text{ mm}$),各类皮带秤的称量精度均较低,故少选用。第四种方法只能反映在一段时间内破碎机的平均负荷,不能实现及时调节。

三、破碎机排矿口检测

破碎机排矿口检测也是选矿测试技术的内容之一。这项检测的目的是及时调节和控制破碎机排矿口的大小,以便有效地控制破碎产品的粒度并合理平衡各段破碎机的负荷。检测破碎机排矿口的方法有直接法和间接法两种。直接检测法是应用最早、最普遍也是最简单的方法,即将铅球(或铅块和铅柱)投入空载的破碎机中,测量破碎机排出的被压挤的铅球、铅块、铅柱的尺寸,以鉴定排矿口的大小。间接检测法又分为一般液压检测法和电感液压检测法。一般液压检测法是在调节排矿口的液压装置的油位指示器上设置一个标尺,油位实际上反映了破碎机可动锥的位置,直接显示了排矿口的大小;电感液压检测法依靠电动液压控制装置中的电子控制系统,即设在主轴下的电感式间隙测量器或设在主轴顶上的自动同步传感器,自动测定和显示主轴位置和排矿口的大小。间接检测法能连续地检测排矿口的瞬时大小,便于及时调节排矿口和实现操作自动化。但这种方法只能用于装有排矿口液压调节系统和电动液压控制系统的破碎机,主要应用于圆锥破碎机。

四、破碎机及过程控制

采用检测仪表和自动控制装置,检测、记录、调节和稳定作业参数使粗碎、中碎、细碎三段作业之间保持负荷均衡,生产过程的各种参数自动保持在给定的范围内,以最低的能耗实现高效破碎,达到要求的最终产品粒度。破碎机过程控制是选矿作业过程控制内容之一,包括破碎机及辅助设备的顺序控制、金属物体取出自动控制、矿仓料位自动控制、分矿小车自动控制、破碎机排矿口自动调整、破碎机负荷控制和多段破碎机负荷及排矿口控制。在各参数中,破碎机负荷和排矿口大小是破碎效率和产品粒度的主要控制参数。

1. 破碎机及辅助设备的顺序控制

为保证物料流畅通,破碎设备的启动、停机是按工艺流程规定的顺序,以一定的时间间隔相继进行的。图 1-7 为三段破碎流程图。矿石流动过程中的各台设备既可单独启动,也可集中连锁启动。设备的启动顺序与矿石的流动方向相反,按逆流程方向依次启动;正常停机顺序与矿石流动方向相同。破碎系统运行中,若某一台设备因故停机,为避免物料阻塞,供应该设备矿石的其他设备将会自动停机,而故障设备的后续设备可不必停机。如中碎机因故停机,1号皮带机和给矿机则立即停机,而中碎机的后续设备,包括 2~5号皮带机、振动筛、细碎机等继续运行,以保证该部分流程畅通。顺序控制功能通常由同一台顺序控制器实现。

2. 金属物体取出自动控制

利用金属探测器探测出混入矿石中的金属物体,并控制自动取出装置,把金属物体从生产流程取出。

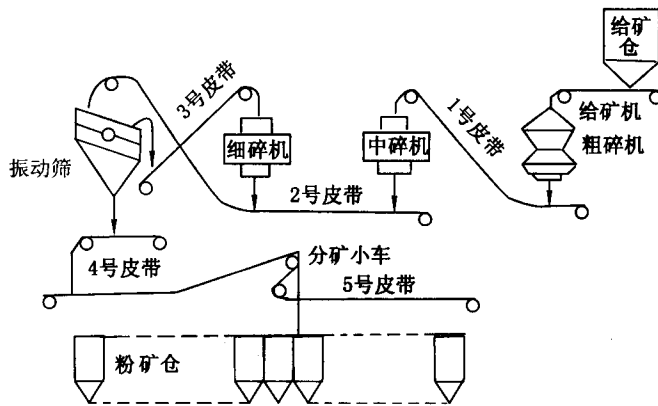


图 1-7 三段破碎流程图

3. 矿仓料位自动控制

通过料位计和矿仓的给矿控制装置或出矿控制装置,使矿仓的料位保持在一定的范围内。当矿仓料位高于上限值时,则停止给矿;当矿仓料位低于下限值时,控制给矿或停止出矿。

4. 分矿小车自动控制

由矿仓料位计、小车定位器和控制器组成的控制装置,根据矿仓料位和磨矿机供矿的需要,定点定时依次将破碎的合格产品通过分矿小车合理地分配给各个磨矿机的粉矿仓,保证向磨矿机均匀供矿。

5. 破碎机排矿口自动调整

圆锥破碎机通过排矿口自动控制装置,改变破碎腔的动锥或定锥的位置,以调整破碎机排矿口,排矿口自动调整装置由动锥位置检测仪表、执行器和控制器组成,见图 1-8。液压圆锥破碎机排矿口的调整则是根据动锥位置检测信号,启动高压油泵,将油注入锥体的液压油缸,或将油缸内的油排到油箱内,使动锥上升或下降,以改变破碎机排矿口,使其达到所要求的数值。

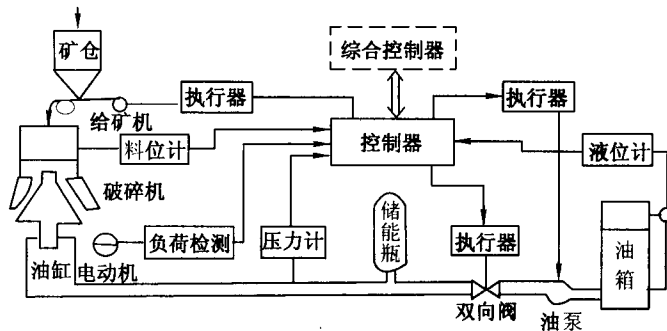


图 1-8 破碎机负荷与排矿口自动控制系统框图

6. 破碎机负荷控制

破碎机的破碎效率与矿石的装载量有关。根据装载量检测信号,进行破碎机负荷控制,使破碎机稳定在高效破碎状态。如液压圆锥破碎机负荷控制系统,当负荷指示值超过给定值上限时,系统自动减少给矿量,使负荷指示值回到给定值范围内;反之,当负荷指示值低于给定值下限时,系统则自动地增加给矿量,使负荷稳定在给定值范围内。当破碎机内混入了金属物体时,油缸内油压急剧上升,超过储能瓶内气体压力,则使换向阀自动打开,油缸内高压油迅速进入储能瓶,破碎机动锥下降,排矿口扩大,把金属物体排出破碎腔。随后,油缸内油压降低,储能瓶内的油返回油缸,破碎机动锥上升,破碎机恢复正常工作状态。

7. 多段破碎机负荷及排矿口控制

在多段连续破碎的生产过程中,各段破碎比之间的配合若不适当,将使每段破碎机负荷不均匀,不能全部达到高效破碎状态。为此采用多段破碎机负荷及排矿口控制,根据检测的每台破碎机的负荷值和排矿口尺寸,自动调整相应破碎机的排矿口或(和)给矿量,在最终产品粒度和破碎效率都达到工艺要求的条件下,使每台破碎机都处于满负荷运行。例如,在粗碎、中碎和细碎的三段开路破碎过程中,根据生产要求的最终产品粒度,手动(或自动)设定细碎机的排矿口尺寸,通过细碎机负荷定值控制系统,调整细碎机的给矿量,即中碎机的排矿量,使细碎机维持在满负荷状态下运行;中碎机负荷定值控制系统,则根据细碎机负荷值(或给矿量要求值)和中碎机负荷值,调整中碎机的排矿口或给矿量,使中碎机维持在满负荷状态运行,并使其排矿量按细碎系统要求改变,由此使细碎机也维持在满负荷状态运行;中碎机的给矿量是粗碎机的排矿量,该系统则通过调整粗碎机给矿量来改变中碎机的给矿量,实现中碎机负荷定值控制。

五、破碎机数学模型

破碎机数学模型是描述破碎机排料和给料粒度特性之间定量关系的数学表达式。在破碎机(如颚式破碎机,圆锥破碎机等)中,物料在破碎腔内仅作短暂的停留就被排出,因而可将其破碎过程视为静态过程,可以采用与时间无关的矩阵模型来加以描述。破碎机数学模型的基础是美国的爱泼斯坦(B. Epstein)1948年提出的碎裂概率函数(又称选择函数或碎裂速率函数) S 和碎裂分布函数(又叫碎裂函数) B 两个基本概念。 S 表示固体颗粒被破碎的概率,不同粒级的物料,其碎裂概率不同; B 表示某一粒级的物料经破碎后分配到比该粒级更细的粒级中的质量分数。1956年,布罗德本特(S. R. Broadbent)和考尔科特(T. G. Callcott)从上述两个基本概念出发,运用矩阵代数,建立了破碎机数学模型,其形式有三种:

$$P = (BS + I - S)f \quad (1-1)$$

$$P = (I - C)[I - (BS + I - S)C]^{-1}f \quad (1-2)$$

$$P = (I - C)(BS + I - S)[I - C(BS + I - S)]^{-1}f \quad (1-3)$$

式中: P 为排料粒度分布矩阵; B 为碎裂分布函数矩阵; S 为碎裂概率函数矩阵; I 为单位矩阵; f 为给料粒度分布矩阵; C 为分级函数矩阵。各种破碎机的数学模型都可以归结为以上三种形式,其中式(1-1)适用于破碎机中不存在内分级作用的情况;式(1-2)用于内分级作用与破碎同时发生的情况;式(1-3)用于内分级作用发生在破碎之后的情况。

为了满足破碎过程动态控制的需要,马查多(M. R. Machado)研究了比较通用的破碎机动态模型,其形式为

$$C(t_2) = T(t_1, t_2)C(t_1), t_2 > t_1 \quad (1-4)$$

式中: $C(t_2)$ 为 t_2 时刻物料的粒度分布; $C(t_1)$ 为 t_1 时刻物料的粒度分布; $T(t_1, t_2)$ 为转换函数。式(1-4)实际上是一个用马尔柯夫链表达的随机过程, 转换矩阵 T 相当复杂, 在马查多模型的转换矩阵中包含了碎裂概率函数矩阵 S 和碎裂分布函数矩阵 B 。

破碎机数学模型主要用于破碎过程分析、模拟和控制, 进行破碎工艺设计和设备选择, 以达到破碎过程优化的目的。

六、破碎效率

破碎效率是评价破碎机和破碎流程工艺性能的数量指标。它可以指导确定破碎工艺参数, 选择最佳工作制度, 改进破碎机的结构参数及其设计, 以及决定新技术的采用。一般以破碎能耗来评价破碎机和破碎流程的工作效率。通常以每消耗 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 能量 E 所破碎的产品吨数 Q 表示, 即破碎效率 $[t/(\text{kW} \cdot \text{h})]$:

$$\Phi = Q/E$$

也可以用单位能耗 $[(\text{kW} \cdot \text{h})/t]$:

$$W = E/Q$$

来评价破碎机和破碎流程的工作效率。这类表示方法称为比能耗法, 它不考虑原矿和产品的粒度(即不考虑破碎比及破碎粒度范围), 不考虑被破碎物料的性质。因此, 在比较两台破碎机的破碎效率时, 需用同一物料在相同的粒度范围内进行。破碎不同物料时, 可以采用邦德冲击破碎功指数 W_i 与生产功指数 W_{ic} 的百分比, 即:

$$\Phi = \frac{W_i}{W_{ic}} \times 100\%$$

来表示。此值显示了实际能耗与标准能耗(即邦德冲击破碎功指数)的差距, 但应注意到, 破碎粒度范围和破碎比仍然会影响评价破碎效率的精度。在一些理论研究中, 亦有以“破碎概率”来评价破碎效率的。所谓破碎概率是指破碎产品中指定粒级的新生成产率 P_f 。为了与能耗相联系, 通常绘制成 $P_f - \Phi$ 算术坐标或对数坐标图形来进行分析, 得出破碎概率与比能耗的关系。

为了评价破碎流程整个作业线的破碎效率以及各破碎机和破碎机组的破碎效率, 1980年苏联的费多罗夫提出了用“工艺生产率”评价破碎效率的方法, 即:

$$\Gamma_j = \frac{DQ}{d_j}$$

式中: Γ_j 为作业线的工艺生产率(j 可取 $1 \sim n$, n 为破碎段数)和某部分工艺生产率(例如一段破碎 Γ_1 , 二段破碎 Γ_2 , 其他任意破碎段 Γ_j 等); D 为原矿粒度; Q 为生产率; d_j 为破碎产品粒度。

第四节 粉碎原理与工艺

20世纪90年代以来, 由于高新技术的发展和矿物加工工业的精细化, 人们对粉碎工程提出了新的要求。因此, 粉碎原理的研究向多学科多领域和交叉学科方向拓展, 从而推进粉碎原理不再停留于粉碎物理学和粉碎功耗方面, 而且出现了粉碎动力学、粉碎物理化学、粉碎机构学等新的领域, 粉碎工艺也出现了多样化。本书就这些方面作一简单介绍。

一、粉碎物理学

粉碎物理学是在传统的粉碎原理——岩石的机械力学基础上发展起来的,视野更加开阔,对生产的指导意义更加突出。

在传统的粉碎原理中,岩石的机械力学主要考虑两个方面:一是岩矿的物理性质(岩石的结构和构造、孔隙度、含水率和硬度、密度、容重及碎胀性)与其被粉碎的难易程度的关系;二是岩矿在外力作用下,因其性质和载荷大小、速度的不同,发生弹性形变和塑性形变直至粉碎的相关规律。粉碎物理学则大大地扩大了其研究的范围,也更逼近于粉碎的实际过程。主要方面有:单颗粒粉碎与料层粉碎,选择性破碎,粉碎极限等。

1. 单颗粒粉碎

单颗粒粉碎是粉碎技术的基础。1920年格里菲思提出了强度理论。在理想情况下,如果施加的外力未超过物体的应变极限,则物体又会恢复原状而未被破碎,但由于固体物料内部存在着许多细微裂纹,将引起应力集中,致使裂纹扩展。这一理论一直统治着固体单颗粒粉碎机理的研究。

舒纳特于20世纪80年代中期,归纳了应力状态与颗粒的关系,如图1-9所示,并指出,有关材料特性可分为两类:第一类是作为反抗粉碎阻力参数,第二类是应力所产生的结果参数。这两类参数不是从熟悉的材料特性(如弹性模数、抗拉强度、硬度等)引导出来的,它们包括有:

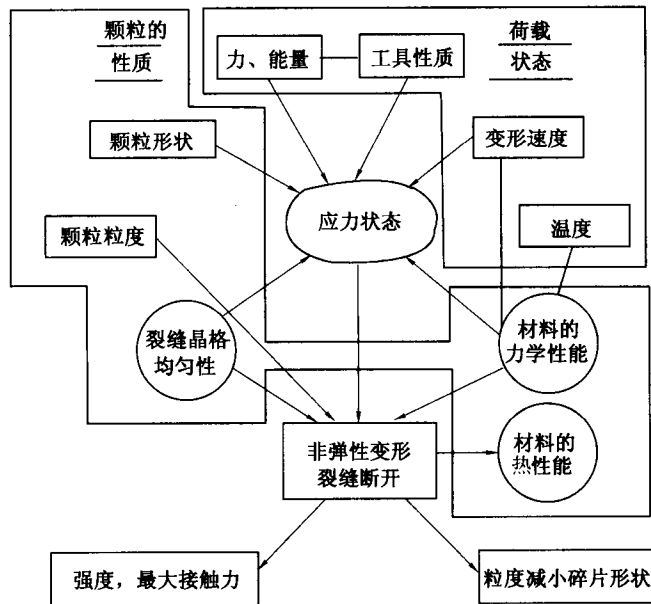


图 1-9 应力状态与颗粒断裂的关系

(1) 阻力参数:颗粒强度、断裂能、破碎概率、单面表面的反作用力、被破碎块的组分、磨碎阻力。

(2) 结果参数:破裂函数(破碎产物的粒度分布)、表面积的增加、能量效率;材料特性与被粉碎物料结构及载荷条件——物料种类、产地和预处理方法;颗粒强度、形状、颗粒的均匀