

第五届全国粉碎工程学术会议 论文集

中国选矿科技情报网
中国选矿科技情报网粉碎工程网
1990, 5, 北京

300
0.1

目 录

一、专 题 讲 座

1. 粉碎对矿物物性与可选性的影响·····	中南工业大学	徐秉权 (1)
2. 单颗粒破碎试验和研究·····	昆明工学院	吴明珠 (7)
3. 高压辊磨机的理论基础·····	中南工业大学	黄圣生 (13)
4. 料层粉碎规律与高压辊磨机的数学模型·····	东北工学院 左宇军、徐小荷	(20)
5. 大型球磨机应用·····	北京有色冶金设计总院	刘文拯 (30)
6. 锤式破碎机及其基本参数的合理化·····	天津水泥设计研究院	廖正光 (40)
7. 粉体层力学在料仓设计中的应用·····	上海建筑材料工业学院	戴少生 (49)
8. 磨机橡胶衬里的应用与标准化·····	北京橡胶制品设计院	阎守义 (63)
9. 颚式破碎机运动轨迹的电算分析·····	北京矿冶研究总院 丁培洪	王宏勋 (72)
10. 磨矿分级流程考查的正确方法及数据整理的必要性·····	·····东北工学院 韩跃新	陈炳辰 (80)
11. 粉碎工程的十年回顾及未来展望·····	北京矿冶研究总院	王宏勋 (86)
12. 超细粉碎的最近近展及发展趋向·····	北京矿冶研究总院 孙成林	·····国家建材局地质研究所 蔡 玲 (105)

二、会 议 论 文

1. 物料粉碎特性的分析及应用·····	西安冶金建筑学院	李隆秀 (114)
2. 层压粉碎理论的应用·····	上海市建筑材料学校	沈晓鹤 (119)
3. 料层冲击破碎的研究·····	广东有色冶金设计院 彭 明	·····湖南省教委 周忠尚 中南工业大学 徐秉权、黄圣生 (124)
4. 破碎机腔型优化设计与改造·····	·····武汉冶金建筑专科学校 郎宝贤 郎世英	(129)
5. 颚式破碎机的生产率及节能性破碎机的研制·····	·····上海建筑材料工业学院	戴少生 (138)
6. 颚式破碎机颚板齿形对生产能力的影响·····	·····石家庄矿山机械研究所	孙中录 (151)
7. $\phi 2200$ 短头圆锥破碎机腔型改造·····	北京矿冶研究总院	冯国俊 (155)
8. 圆锥破碎机功率和产品粒度预测·····	北京矿冶研究总院	吴建明 (159)
9. 辊磨机工作参数的研究·····	北京有色冶金设计总院	王乙强等 (163)

10. 振动磨传输理论及其特性分析的矩法.....西安冶金建筑学院 王树林(168)
11. 颚式破碎机齿形的研究.....焦作群英机械厂 王振贵等(174)
12. 新型高效节能设备—JC型颚式破碎机.....北京冶金设备研究所 魏盛远等(178)
13. 颚式破碎机的特胜曲线.....焦作群英机械厂 王振贵等(180)
14. 挤压磨在选矿领域中的应用.....安徽省冶金科学研究所 李玉亭(183)
15. 回转式破碎机的理论与实践.....中南工业大学 张智铤(186)
16. 超细粉碎与微粒分级.....西安冶金学院 张治元(192)
17. 木质素磺酸盐对水泥熟料粉磨影响和作用机理的研究.....
.....华南理工大学 卢迪芬等(196)
18. 本质素型复合水泥助磨剂的研究.....华南理工大学 卢迪芬等(201)
19. 适用于磁性材料行业细磨的搅拌球磨机.....北京矿冶研究总院
.....技术开发所 罗秀建等(206)
20. 利用转换系数法进行球磨机模拟计算.....东北工学院 肖文才 陈炳辰(208)
21. SRR型橡胶托辊式摩擦传动磨矿机的应用研究
.....昆明冶金研究所 黄云平(216)
22. PYD2200圆锥破碎机液压系统的改造.....易门狮子山选矿厂 杨汉勇等(221)
23. 圆锥破碎机润滑系统的防尘装置.....山东韩旺铁矿 张培义(224)
24. 自动喷雾除尘装置在选矿厂破碎系统的应用.....山东韩旺铁矿 赵振松等(227)
25. 苏联对磨矿机计算公式的探讨.....南京铅锌银矿 潘梓良(230)
26. 湿式自磨试验与选择计算.....青岛冶金矿山大学 孙长泉(235)
27. 国外金属耐磨材料应用概况.....青岛机械研究所 王定祥(242)
28. 球磨机磁性衬板.....北京矿冶研究总院 高 琳(245)
29. 磨机橡胶衬板结构的设计及材质的选择.....本溪市塑胶厂 陈 强(261)
30. 中碳铬衬板在球磨机上的应用.....梅山铁矿 吴元生(270)
31. 球磨机动静压轴承研究.....北京矿冶研究总院 黄冬颐 王宏勋(273)
32. 精英砂的细磨研究.....山东建材学院 王京刚等(275)
33. 包钢选矿厂细磨工艺流程浅析.....包钢选矿厂 李林玉等(277)
34. 粉磨设备稀油润滑站电气控制线路的改进.....山东韩旺铁矿 刘迁云等(281)
35. 球磨机角螺旋衬板的研究.....北京矿冶研究总院 刘惠林(283)
36. 北京密云铁矿干式磨矿机改为湿式磨矿机.....
.....鞍山黑色冶金矿山设计院 关维相(292)
37. 粉碎过程机械化学.....武汉工大北京研究生部 郑水林(298)

第一部分 专题讲座

粉碎对矿物物性与可选性的影响

〔中南工业大学〕 徐秉权

前 言

在粉碎工程发展的漫长的历史过程中，粉碎工程的任务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。

从矿物加工工业发展的初期到现在，粉碎工程的首要任务，是为矿物加工工业提供具有一定粒度、粒度组成、和充分解离而又不过粉碎的加工原料，以利于进行下一步的加工、处理和使用。这在冶金、化工、建材等许多工业部门是十分明确的。尤其在选矿工程中更为突出，因为粒度的大小、粒度的组成、解离度的高低，直接影响到分选能否进行，产品质量的好坏和金属回收率的高低。因此，在相当长的时期里，粉碎的唯一的的基本原则是不作不必要的粉碎。

随着现代化工业的发展，可供开采的矿产资源的贫、细、杂化、开采规模不断扩大，矿物加工工业为了满足对金属量的需求不断增长的要求扩大生产能力，因而对粉碎工程提出第二个方面的任务，即设备大型化。这一任务，通过粉碎界的努力，在七十年代的十年中，已基本上使其与现代矿物加工工业的发展规模相适应。

进入八十年代以来，由于世界能源的紧缺，合理利用能源，节约能量消耗，是人类面临的重大课题之一。在许多工业部门的能量消耗中，粉碎占有相当的比重，如在选矿厂中，粉碎的能耗占选矿总能耗的40~70%，甚至有的选矿厂更高。因此，降低粉碎能耗，提高经济效益成了粉碎工程界的突出任务。通过这近十年的努力，广大粉碎工作者提出了一整套较为完善的节能新措施，不论在理论上还是在实践中，实现了粉碎节能技术的新突破，并逐步在许多矿物加工企业得到推广应用，取得了明显的技术经济效益。这一任务的实现，正处于方兴未艾的阶段，仍在不断发展，以求能够更好地贯彻多碎多磨的原则。

随着科学技术的进步，生产水平的提高在推进上述任务的实现方面所取得的新突破，是与矿物加工工业的发展对粉碎工程的要求是基本相适应的。

但是，随着矿物加工工业的精细化，向粉碎工程又提出了新的任务，即要求粉碎产品不仅在粒度、粒度组成、解离度等方面符合下一步加工、处理的要求，而且希望粉碎产品在物质结构、表面物理化学性质等方面提供有利于加工、处理的物性，而不是影响矿物的进一步加工、处理的物性。许多生产、科研实践表明，仅仅在粒度、粒度组成、解离度等方面满足生产要求是很不够的，有时即使很好地得到了满足，仍不能顺利地进行矿物的加工、处理。因此，提供合理的物质结构、表面物理化学性质这一任务，对于粉碎工程来说是新的、更高的要求。

一、粉碎引起了矿物物性的变化

粉碎过程是一个不可逆的物理化学过程。粉碎所消耗的能量，根据朗夫 (Rumpf) 的研究，主要消耗在：

(1) 产生新的表面；(2) 在破裂点附近发生塑性变形；(3) 在破裂处的附近改变物体的结构；(4) 充电或放电 (发射) 现象；(5) 在破裂点或裂缝面上的吸热化学反映或吸附；(6) 弹性波的动能。

所有这些消耗能量的过程，都将引起矿物内部结构或表面结构等物性的改变。舍纳特 (Schönert, k) 测量了粉碎过程的热效应。发现当断裂以最大的速度扩展时，在裂口处会出现温度骤升。测得石英为4000k，玻璃为3000k，石灰石为1200k (k为绝对温度)。断裂区中的这种特殊状态，会引起结构上的变化，这种变化表明矿物具有较大的活性。

粉碎使晶体结构的周期性连续性在表面处中断，使表面质点排列有序程度降低，晶格缺陷增多。结果导致表面结构不同于内部，含有不饱和键价。这使固体表面形成了带有不同极性的表面官能团，从而具有不同的选择性反应能力。图1是石英晶体结构的平面示意图。其中 Si^{4+} 离子位于图面之下，并与上层的 O^{2-} 离子结合。 Si^{4+} 离子的配位数为4。每个 O^{2-} 离子为2个相邻的 Si^{4+} 离子共有。每个 $\text{Si}-\text{O}$ 键上 Si^{4+} 只占 $\frac{1}{2}\text{O}^{2-}$ 。故硅氧四面体可表示为 $\text{Si}^{4+}(\text{O}^{2-}/2)_4$ 。设晶体沿图中箭号方向被劈开形成两个新断面。由于 $\text{Si}-\text{O}$ 键被切断形成了D和E两种配位方式。由图1可见，在D断面上的 Si^{4+} 占有三个 $\frac{1}{2}\text{O}^{2-}$ ，在E断面上的 Si^{4+} 则占有三个 $\frac{1}{2}\text{O}^{2-}$ 和一个 O^{2-} 。于是其配位情况分别成为：

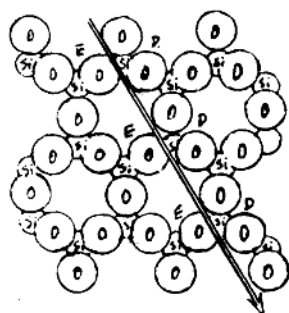


图1. 石英破碎后形成的新表面

个 $\frac{1}{2}\text{O}^{2-}$ 和一个 O^{2-} 。于是其配位情况分别成为：

D断面上为 $\text{Si}^{4+}(\text{O}^{2-}/2)_3$ ，故剩余一个正电价，即 $\begin{array}{c} \text{—O—} \\ \text{—O—} \end{array} \text{Si}^+$ 。

E断面上为 $\text{Si}^{4+}(\text{O}^{2-}/2)_3 \cdot \text{O}^{2-}$ ，故剩余一个负电价，即 $\begin{array}{c} \text{O—} \\ \text{O—Si—} \\ \text{O—} \end{array}$ 。

因此在断面处就形成了带有不同极性的基因而呈现选择性活性。这两种断面，一种是亲水的，另一种是疏水的，显然它们的可浮性是不同的。

人们通常只从形成新表面的观点去研究选矿生产中的磨矿过程。可是，近年来的许多研究工作都指出，磨矿机中磨矿作用的部分机械能被聚集到磨碎物料的微粒中，与此同时，被磨碎矿物的晶格结构发生变化，因而使分散微粒具有新的性质，可能是造成细微粒矿物浮选行为反常的因素之一。

特留金柯夫等人，对原始物料于水介质中经不同时间磨矿，获得的单一粒级闪锌矿的X射线衍射分析研究表明，相同粒级矿物的晶格结构，其磨矿时经受的机械作用时间越长，畸

变程度就越大。具有晶格畸变的样品，经放置几个月之后重作X射线分析的结果证明，畸变已不复存在。图2中所示的闪锌矿晶格畸变决定于磨矿时间的关系曲线，具有不同斜率的线性特征。这就是说，不同粒级之同种矿物产生畸变的积累与畸变形成的时间成正比，但不同粒级矿物的畸变积累速度是有差别的。并且在机械作用下，晶格畸变的产生先是在微粒的表面，继而向深部扩展。正如图3所表明的，不同粒级闪锌矿的浮选性质出现反常，其原因是它的晶格畸变而导致矿物的物理化学性质发生变化。

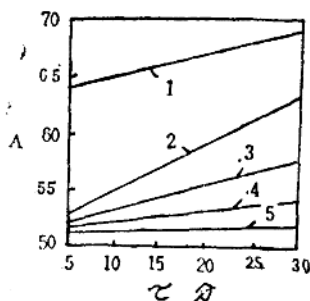


图2 不同粒级的闪锌矿的晶格畸变程度与磨矿时间的关系

不同粒级, μm

- 1—(-5+0); 2—(-10+5);
3—(-15+10); 4—(-20+15);
5—(-30+20)。

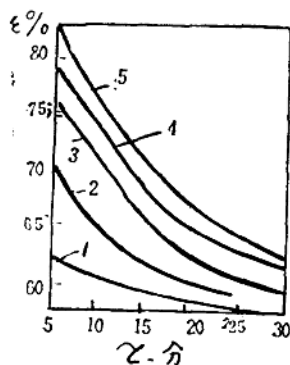


图3 闪锌矿泡沫产品回收率决定于原料的磨矿时间

不同粒级, μm

- 1—(-5+0); 2—(-10+5);
3—(-15+10); 4—(-20+15);
5—(-30+20)。

二、粉碎方式及介质对矿物可浮性的影响

粉碎方式,粉碎设备类型及介质成份不同,对矿物的可浮性影响不同,甚至于从可浮矿物变成无可浮性矿物。这就要求我们应特别注意研究粉碎所造成的影响,如何变不利为有利。

卡塞 (Cases. J. M.) 等人采用了如下磨矿方式对石英的可浮性进行了研究: (1) 摩擦磨矿: 采用Auree环形振动磨矿机和玛瑙振动盘(矿样标记为 Q_{vba})或采用Retsh Muller机械研钵和玛瑙研磨杵(矿样标记为 Q_{m}); (2) 冲击和摩擦研磨: 用Minemet金属球磨机进行干磨(矿样标记为 Q_{b})或湿磨(矿样标记为 Q_{bh}); (3) 冲击磨矿: 用Planiol磨机,在部分真空下作业(矿样标记为 Q_{p})。不同磨矿方式对石英的若干基本表面参数值的影响列于表1。参比值用破碎所得的矿样100—250微米(标记为 Q_{ref})和0—15微米(标记为 Q_{fp})粒级产品。

研究结果表明,从与不同矿样的等电点相应的pH值可知,除矿样 Q_{m} 外,破碎所得细产品(Q_{fp})或磨矿产品的pH值比参比相的pH值高。这些值与用硅胶所得的值相近,即pH值为2.1和pH值接近5。这表明,表面未受氢氧化铁污染的矿样,如 Q_{bh} ,形成干扰度较大的表面相,这可通过对不同矿样溶解动力学(即研究不同矿样在氯气条件下与pH初始值为4.0,2个当量浓度的氯化钾溶液接触24小时的溶解动力学)中看出。进入溶液中的二氧化硅剂量可按矿样分类,参比石英样(Q_{ref})的溶解动力学最弱。

表1

若干表面参数值

矿样标号	比表面积 米 ² /克	M-OH反应点的表面密度 反应点/纳米 ²	浸入热焓 焦耳/反应点	等电点的pH值
Q _{REF}	0.033	4.6	0.40×10^{-18}	1.65
Q _{EP}	1.10	3.5	0.13×10^{-18}	2.55
Q _{VBA}	1.90	2.9	0.13×10^{-18}	2.60
Q _{VBA, HCL}	1.70	5.0	0.06×10^{-18}	2.11
Q _{VBA, NaOH}	0.72	9.1	0.02×10^{-18}	2.43
Q _{VBA, HF}	0.98	2.5	0.11×10^{-18}	2.77
Q _M	3.60	4.8	0.12×10^{-18}	1.38
Q _{BS}	2.73	4.7	0.11×10^{-18}	2.26
Q _{BH}	17.60	1.1	0.30×10^{-18}	2.60
Q _{PL}	0.65	4.2	0.16×10^{-18}	2.02

$$Q_{REF} < Q_{EP} < Q_{PL} < Q_{VBA \cdot HCL} \approx Q_{VBA \cdot HF} \approx Q_{VBA \cdot NaOH} > Q_{VBA} < Q_M < Q_{BS}$$

在pH值接近9.0时, 经磨矿和化学处理的矿样溶解动力学最强。

对于未受氢氧化铁污染的部分矿样来说, 矿样Q_{REF}、Q_M、Q_{BS}、Q_{PL}的硅醇基密度值是每纳米²约为 4.5 ± 0.3 基, 而矿样Q_{VBA}和Q_{EP}的较低, 经盐酸或氢氧化钠处理的磨矿样较高。至于矿样Q_{VBA \cdot HF}, 其获得的较低值是由于部分表面羟基离子被氟化物离子置换所致。所得到的值为硅烷醇在硅胶面上所占有的反应点数, 即每纳米²为4.6~9。

按表面硅烷醇基浸入热焓值可将矿样明确地分为三组。第一组参比矿样Q_{REF}组成, 其值最高, 即 0.4×10 焦耳/反应点。第二组由经细碎或磨矿的Q_{EP}、Q_{VBA}、Q_M、Q_{BS}、Q_{PL}、Q_{VBA \cdot HF}矿样所组成, 其热焓值为 0.2 ± 0.01 焦耳/反应点。第三组的经研磨和化学处理的矿样Q_{VBA \cdot HCL}、Q_{VBA \cdot NaOH}组成, 其热焓值小于或等于0.06焦耳/反应点。

在平衡浓度值大于 5×10^{-3} 摩尔/升时, 复盖率急剧增大是由于表面活性剂分子进入三相溶液所致, 这一点可通过核磁共振显著降低脂肪族链质子释放的时间显示出来。

对不同表面相的表面活性剂的亲和力的测量表明, 此力按下列次序递减:

$$Q_{REF} > Q_{BS} > Q_{EP} > Q_{PL} > Q_{VBA \cdot NaOH} > Q_{VBA \cdot HCL} > Q_{BH} \approx Q_M \approx Q_{VBA} \approx Q_{VBA \cdot HF}$$

摩擦研磨(Q_{VBA}, Q_M)湿式冲击和摩擦研磨的磨矿方式, 导致表面活性剂对矿物表面的亲和力几乎为零。只有采用干式球磨磨矿, 才不会引起显著的降低捕收剂的亲和力。

雷伊(Rey·M)等人最先研究了磨矿介质对铅锌硫化矿浮选的影响。他们对比了瓷球磨机和钢磨机的磨矿影响, 并发现闪锌矿在瓷磨机中酸性或中性介质条件下磨矿时显示出天然可浮性, 但在碱性矿浆中或者任何pH条件和钢磨机中磨矿时则无可浮性。曾发现铅矿物对闪锌矿有活化作用。在钢磨机中磨矿, 铅离子因与磨蚀的金属铁反应而产生金属铅的沉淀。

严琦(Iwasaki·I)等人探讨了自磨和常规磨矿方法对德卢斯辉长岩铜—镍硫化矿浮选性能的影响。发现自磨产品中铜、镍、钴和硫的回收率大于类似球磨产品的相应指标。采用球磨时, 即使增加捕收剂加入量, 浮选尾矿中残存的硫也不会低于采用自磨时所达到的量值。为了确定自磨和球磨造成的浮选性差别是否可归因于磨矿产品的解离特性, 对最终

精矿和尾矿矿样进行了筛分，并测定了各粒级的矿物结构和嵌布方式。采用自磨和球磨时的精矿和尾矿矿样间几乎看不到什么区别。从浮选产品的粒度分布特性分析和显微研究可以推测，是磨矿介质和硫化矿物之间相互作用，而不是这两种磨矿方式的破碎特性导致了自磨和球磨产品可浮性的差异。法尔斯里姆等人描述了无钢介质磨矿在艾蒂克选矿厂的最直接应用。自磨机与使用时间超过三年的有橡胶衬板的普通磨机相比，自磨流程的回收率增加2%（自磨机93%，普通磨机91%，）。因此，对硫化矿是选用自磨还是常规磨矿，不但要认真权衡与基本投资和操作费用有关的指标，而且要慎重考虑磨矿介质对浮选结果产生的影响。

桑顿 (Thornton, E.) 研究对比了自磨机和软钢磨机磨矿后的浮选结果，发现软钢磨机磨矿后，方铅矿只有用戊基黄药作捕收剂才能浮选，而自磨后用乙基黄药就易于浮选。芬克尔斯坦 (Finkelstein, N. P.) 等人也观测得到颇为相似的结果，发现由方铅矿和黄铁矿组成的矿石用不锈钢球代替软钢球进行磨矿时，浮选的选择性更好一些。

粒度很细的颗粒浮选速度低，这是无疑的。这种颗粒具有比表面积大，故可能需要特殊的药剂浓度，较长的处理时间，或者不同的颗粒—气泡碰撞方式。然而，即使所有这些因素都已调整适当，硫化矿在钢球磨机内长时间磨矿的明显抑制效应，仍继续存在。

当磨矿粒度要求非常细（如，80%通过325目）时，对于同样的矿石，每磨一吨矿石可能要消耗2~5公斤钢。这样的钢耗量，将比浮选剂耗量高出一个或甚至两个数量级。磨矿介质的磨损，导致金属铁（钢）的细小鳞片在所有受磨的颗粒上沉积。只要这些金属相沉积在半金属性的硫化物（其半导体性质是众所周知的）表面，即形成微电偶。有电解质存在时，例如存在含无机离子（来自溶解的矿物组分）、捕收剂离子和调整剂的矿浆的液相时，这些电偶变得相当活泼。粗磨矿时，散布硫化矿粒表面的金属鳞片很稀少，电偶的效应不明显。然而磨矿粒度很细时，磨剥的金属鳞片沉积并复盖在硫化矿物表面，其面积大小可变得相当于或甚至大于未被复盖的区域。这时，硫化物的电化混合电位将逐步降低，并可达金属铁的电位值。就是说，该硫化物可能变成强还原性。由此导致的还原反应，无益于黄药按所需的使硫化物表面转化为疏水性的方式进行吸附。看来，用钢介质对细粒浸染的矿石磨矿，其表面可能已被磨蚀的铁过度污染，以致在黄药溶液中不能变得充分疏水，因而是不可浮的。

这些研究充分说明，不仅介质类型，而且介质成分对矿物的可浮性会造成很大的影响。不论从什么角度来看，降低介质消耗，都是有利于提高矿物加工的技术经济指标。

三、粉碎过程中的氧化作用对矿物可浮性的影响

众所周知，不论是在干式粉碎还是在湿式粉碎过程中，空气的存在是难以排除的。尤其是其中的氧气的存在，在粉碎过程中必然影响到矿物的表面物性及其可浮性。

在粉碎过程中，对暴露于空气中的矿物，当组成矿物相的元素发生反应，形成氧化物或氮化物时，就出现化学吸附的特征。作为化学吸附的取代，硫化物趋向于形成额外的表面氧化物，因为硫化物的两种组成元素（即金属和硫）对于氧具有很高的亲和力。

根据固体表面不均匀性的观点，无论是最初的吸附或是其后形成表面氧化物的反应，都不是在暴露出的整个表面上均匀地进行的。起初，表面的扭折和突面部分优先吸附氧，且在相邻的台阶为第一化学吸附单层所布满之前，就可能开始形成多层氧化物的微区（因而起到核心的作用）。不同的晶面（作为表面露出的）以不同的速度氧化。

与组成表面的金属原子的电子结构有关，在扭断、突面、出露位错等不同部位上化学吸附形成的键；在性质上和能量上可有很大的差异。随着化学吸附键的形成，表面原子发生某些扰动。化学吸附引起的表面扰动，在表面不同的部位会产生拉伸应力或压缩应力；在某些部位上，这些应力会抵销或增加形成表面时产生的压力。

新断裂的多晶金属表面有许多的晶面，每个晶面以不同的速度化学吸附氧，其后再与更多的氧分子反应，形成厚度不一的氧化膜。因此，整个表面氧化产物的厚度和成分是不均匀的，且氧化膜的每一部分都会被化学吸附氧的单分子层复盖在下面。当金属元素有几个化合价时，氧化产物的整个组成要比在单化合价金属元素上形成的氧化产物不均匀得多。不同氧化物的各层是沿平行于表面方向而形成的，电价最低的金属氧化物最靠近化学吸附层。例如，在钢球各氧化层距化学吸附氧层越来越近的顺序是 FeO ， Fe_3O_4 ， Fe_2O_3 （最外层）。

当新断裂的金属硫化物表面在空气或水溶液中受到氧化时，所形成的产物将由更为广泛的组分组成，由元素硫、金属氢氧化物、金属硫代硫酸盐（ $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$ ）、金属连多硫酸盐（ $\text{S}_x\text{Q}_6^{-2}$ ， $x=2\sim6$ ）和金属硫酸盐（ SO_4^{-2} ），直至挥发的 SO_2 和残留金属氧化物。可能组分的数目随金属元素的多电价性而迅速增加。普拉特（Plante）和萨瑟兰（Sutherland）研究了方铅矿、黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿在中性和碱性溶液中的氧化产物。表2概括了他们的研究结果。

电池作用是影响氧化产物的性质和影响反应速度的另一个参数。直接接触的两个不同的硫化物相之间（如在未充分单体解离的颗粒中），或在磨矿过程中通过研磨自钢球或磨机衬里沉积在硫化物表面上的少量铁与矿物之间都会产生电池电偶

表2 硫化矿悬浮液氧化反应产物

矿物	起始pH值为6时的产物	起始pH值为10~11时的产物
方铅矿	有 Ca^{+2} ， Fe^{+2} ， Fe^{+3} ， SO_4^{-2} 没有 Pb^{+2} ，连多硫酸盐。	有 H^+ ， Ag^+ ， Pb^+ ， SO_4^{-2} ，硫化盐。 没有 Fe^{+2} ， Fe^{+3} ， Cu^{+2} 。
黄铁矿	有 Fe^{+2} ， H^+ ， SO_4^{-2} 没有 Fe^{+3} ，连多硫酸盐。	有 $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$ ， H^+ ， SO_4^{-2} ， $\text{S}_3\text{O}_6^{-2}$ ， $\text{S}_4\text{O}_6^{-2}$ ， SO_3^{-2} 。 没有 Fe^{+3} ， Fe^{+2} ， Cu^{+2} ， S^{-2} ， $\text{S}_5\text{O}_6^{-2}$ ， $\text{S}_2\text{O}_8^{-2}$ 。
黄铜矿	有 H^+ ， Cu^{+2} ， Fe^{+2} ， Fe^{+3} ， SO_4^{-2} 。 没有连多硫酸盐。	有 H^+ ， SO_4^{-2} ， $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$ ， $\text{S}_4\text{O}_6^{-2}$ 。 没有 Cu^{+2} ， Fe^{+2} ， Fe^{+3} ， SO^{-2} 。
闪锌矿	有 SO_4^{-2} ，硫代盐， 没有 Zn^{+2} ， Fe^{+2} ， Fe^{+3} ， Cu^{+2} 。	有 H^+ ， Zn^{+2} ， S_4^{-2} ， SO_3^{-2} 。 没有 $\text{S}_4\text{O}_6^{-2}$ ， $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$ 。

水分子倾向于吸附在所有表面上，但特别强烈地吸附于新形成的极性固体表面上，并在其上产生显出不寻常特性的水化层。大部分不溶金属氧化物通过解离化学吸附某些水，形成表面羟基，并在羟基上面吸附水分子。

这一切引起氧化的行为，对于磨机内介质和衬板的腐蚀和矿物的可浮性都必将造成较大的影响。这些影响往往对粉碎之后的矿物加工、处理是不利的。

布里翁 (Brion.D) 等人的研究表明, 在棒磨机内磨矿之后 ($\text{pH}=9$, 矿浆电位 $E_h = -475$ 毫伏)。黄铁矿表面被氢氧化铁所复盖, 同样也观察到这种表面氢氧化物不仅对黄铁矿, 而且对其他硫化矿石也起着重要作用, 表明在金属回收率方面缺乏选择性。在 $\text{pH}>7$ 时, 黄铁矿表面上有氢氧化铁 $[\text{Fe}(\text{OH})_2 \text{ 及 } \text{Fe}(\text{OH})_3]$ 存在, 无论矿浆电位 E_h 如何, 表面上依然是氢氧化铁。 pH 值 <5 时, 表面稳定的化合物是 FeS_2 , 因为原有的氢氧化物已被溶解了。氢氧化铁是复杂矿石中黄铁矿或其他矿物表面上形成的亲水性化合物, 这些矿物抑制时, 氢氧化铁起主要作用。被氢氧化铁复盖的黄铁矿阻障了它的浮, 这种表面复盖不允许大量双黄药的形成及吸附。

巴比 (Barbery) 的研究表明, 硫化矿物在空气与水存在时是不稳定的, 应当十分强调矿浆的氧化条件和 pH 值。然而氧化还原条件的控制是复杂的, 由于化学作用产生电流的交互作用不仅在矿石的不同矿物之间, 而且同时存在于矿物和钢质的磨矿介质之间。在硫化矿物表面的还原条件是由于钢在化学电池作用下发生氧化而造成的, 它会阻止捕收剂的吸附。

(参考文献共12条, 略)

单颗粒破碎试验和研究

(昆明工学院) 吴明珠

前言

粉碎理论的研究中心是探讨造成破碎所施的力和所需的能量, 以及裂缝的形成和扩展。半个多世纪以来, 已开展的在测定岩矿强度的同时, 用高速摄影记录裂缝的形成, 扩展和断裂的现象, 以及测定破碎产物的粒度分布, 观察粒子变化情况的单颗粒破碎试验和研究, 就是从破裂现象物理学入手, 探索其机理, 建立新的粉碎理论模型。尽管单颗粒破碎试验和研究, 只局限于用单纯的应力作用于单颗粒子, 与通常用复杂应力作用于粉群的实际破碎明显不同, 差距很大, 但它便于分析, 有利于研究粉碎物理学, 有助于建立新的粉碎理论模型, 因而成为当前研究粉碎理论的重大方向之一, 其研究成果对粉碎实践具有指导意义。现简介如下。

一、断裂的能量理论概述

本世纪廿十年代初, A·A 格里菲斯 (Griffith) 基于脆性固体材料的实测强度值, 较它由分子间力计算的理论值少 $2\sim3$ 个数量级, 即实测值仅理论值的几百分之一或几千分之一。于是认为: 这是由于物料试件内存有微裂缝, 在其微裂缝尖端附近产生高度的应力集中, 当此应达到弹性极限时, 就要导致裂缝扩展, 并造成破坏。A·A 格里菲斯从无限小变形的弹性理论出发, 推证出裂缝扩展的临界条件是, 物体释出的弹性形变能至少应等于裂缝扩展时所增加的表面能, 才会使裂缝扩展。A·A 格里菲斯创立的这一裂缝扩展能量理论, 已成为研究脆性断裂的基础。

A. 斯梅卡尔 (Smekal) 于1937年提出了配位缺陷理论, 认为配位缺陷造成的微裂缝, 当受载荷时, 使应力集中于缝的尖端, 它超过分子的抗拉强度, 约为 $10^3\sim10^4$ 兆帕, 而

分子的抗拉强度比脆性物料的实际强度值大2~3个数量级,故脆性破坏常由拉应力引起,即使是在压载荷时也有拉应力发生。

到六十年代, J·J 吉尔瓦里 (Gilvary)、B·H 伯格斯特姆 (Bergstrom) 等人对单颗粒破碎作过较广泛研究。他们在研究脆性固体的断裂中,都是以格里菲斯理论作指导,结合粉碎实际,阐明破碎作用的机理,开辟了粉碎物理学一门新学科的研究领域,试验研究结果证明,脆性物料破裂时的比功耗,是试件尺寸、形状和载荷的函数。三种传统功耗学说只是其中的一部分,还存有更多的其他形式。

1962年, H·鲁蒙卜夫 (Rumpf) 在试验中发现,通常认为像玻璃和岩矿这类典型的脆性材料,在裂缝附近也呈现出不可恢复的塑性变形。由于此塑性变形的存在,使裂缝扩展所需的能量就较按格里菲斯能量理论求得的高得多。鉴于断裂方式有多种多样,各自的机理互异,所耗的能量也就各不相同。于是,就有必要对适用于脆性断裂的格里菲斯的断裂判据式作修正,使其更符合实际。鲁蒙卜夫认为,要使裂缝扩展,由外力产生的弹性应力场中,必须提供耗于下列三方面的能量:(1)用于因裂缝扩展时增加的新表面上的表面能;(2)耗于裂缝附近发生塑性变形的能量;(3)因裂缝在扩展过程中,起初慢,随后加速,用于裂缝加速扩展的动能。如用断裂表面能 β 表示第一项和第二项所需的能量,它与温度 T 和裂缝扩展速度 v 有关, e_v 表示裂缝加速扩展的功能, dA 为断裂表面积的增量。则裂缝扩展的条件为:
$$-\frac{\partial U}{\partial A} \geq \beta(T, v) + e_v$$

令 G 为裂缝扩展的能量释放率,即裂缝失稳扩展单位面积所提供的能量,于是:

$$G = -\frac{\partial U}{\partial A}$$

在裂缝失稳扩展的临界状态时的能量释放率为 G_c ,则裂缝失稳扩展必要条件是:

$$-\partial U \geq G_c \partial A$$

由此可知, G_c 是材料抵抗裂缝扩展的量度,也就是材料断裂的韧性。鲁蒙卜夫在研究岩矿这类物料的破碎理论中,运用了韧性断裂学说,对粉碎理论的研究起了很大的推进。

H·赫哈尔登 (Schardm) 于1962年,用摄影分析,观察了裂缝出现的次序是:压力波产生的辐射裂缝;从其他中心发生的辐射裂缝;表面波造成的边缘裂缝;折射。

Matsui 1972年的研究结果指出:破裂过程分两阶段,即破裂开始和裂缝扩展。第一阶段的能量指数用厘米⁸/焦耳计;第二阶段的能量指数用厘米²/焦耳计。

松居等人研究了静压力和冲击破碎单颗粒和料层所需的能量和受到的阻力。

D. Behrens与井上研究了冲击速度为30~120米/秒破碎单颗粒的行为。

U·赫西 (Haese) 等人于1975年研究了加载方法、破碎概率和能量消耗等关系。

国内在这一领域内的研究起步较晚,直到八十年代初,才有个别院所开展了局部的研究,与国外所取得的研究成果相比,差距很大,有待于填补这一研究方向的空白。

二、破碎作用的机理

1. 产物粒度特性与活性裂缝密度有关

J·J 吉尔瓦里在研究脆性固体的断裂中,认为,任一被破碎物体的体积内、表面中和棱上都独立地存在若干微裂缝。由于这些格里菲斯微裂缝的存在,它们受力时扩展,即造成断裂,故破碎产物粒度特性与这些活性微裂缝密度有关。通过单颗粒破碎试验证明,破碎产物中通过尺寸为 x 的筛孔的筛下累积产率分数为

$$W = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{x}{k} + \left(\frac{x}{j} \right)^2 + \left(\frac{x}{i} \right)^3 \right] \right\}$$

式中: K ——活性棱裂缝的平均距离; j^2 ——包含一个活性面裂缝的平均距离; i^3 ——包含一个活性体裂缝的平均距离。当不考虑活性面裂缝和活性体裂缝时,上式简化为:

$$W = 1 - e^{-\left(\frac{x}{k}\right)}$$

如 x 很小时,此式又可简化为 $W = 1 - e^{-\left(\frac{x}{k}\right)} \rightarrow \frac{x}{k}$

将它们与粒度特性方程式对照,不难看出,前者为 $n=1$ 时的罗辛—拉姆勒粒度特性方程式,后者代表 $\alpha=1$ 时的高登—舒曼粒度特性方程式。由此可知,这二个粒度特性方程式都是棱裂缝发展的结果,方程式中的参数 b 和 k 都与活性棱裂缝的平均距离有关的量。

单个球形试件破碎后,心部碎为细粉,周围碎成月牙形碎块,破碎产物的重量——粒度分部曲线,在粗级别出现峰态,是活性面裂缝和活性体裂缝发展而成,细级别由活性棱裂缝发展而成。它们的累积重量百分率与粒度关系在 $lg-lg$ 座标中斜率为1的直线,此规律直至粒度为1微米。超过该粒度限时,因其不含棱裂缝,破裂即告终止,故不符合上述规律。

2. 单粒破碎的比功耗与粒度的关系

B·H 伯格斯托姆在研究压碎单个球形试件所耗的能量与产物粒度的关系时,试验结果指出,如用由赫兹理论导出的平面压板压碎球形试件的下列功耗公式,作为压碎球形试件的比功耗实测值,即

$$\frac{\epsilon}{M} = \frac{q_0^2}{\rho} \cdot \frac{\pi^2}{40} \left[\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right]$$

式中 ϵ 为压板压碎试件所耗的能, M 为球形试件的质量, q_0 为极限压应力, ρ 为球形试件的密度, E_1 、 E_2 分别为球形试件和压板的弹性模量, μ_1 、 μ_2 分别为球形试件和压板的泊桑比。

当用粒度模数或 k 用产物的总比表面积 S/M 表示破碎后的产物粒度特性时,则可建立如下近似关系式 $\frac{\epsilon}{M} \approx \frac{k}{1} \approx \frac{S}{M}$

即单粒破碎的比功耗反比于粒度模数 k , 正比于总比表面积。此规律已为旋回碎矿机、棒磨机 and 球磨机等工业设备的产物的80%通过的筛孔宽作为粒度模数 k_{80} 时证实。

应当指出,旋回碎矿机的比能耗与粒度模数的关系和压碎单个玻璃球的规律一样,但前者的比能耗约为后者的20倍。这是由于旋回碎矿机要耗较多的能量,克服电动机与传动副的

损失和破碎腔中的摩擦, 为及周期地施力于沉重的动锥运动破碎矿石所致。

尔后, B·H 伯格斯托姆及其同事在研究试件尺寸对单颗粒破碎中比功耗的影响时, 结果表明, 试件尺寸 F 与比功耗 $\frac{\epsilon}{M}$ 有如下关系 $\frac{\epsilon}{M} \propto \frac{1}{F^\gamma}$ 。

式中的指数 γ , 实测值介于 $0 \sim 5/3$ 之间, 随物料种类而定。

由材料力学导出比能耗与破裂载荷 P 、强度极限 σ 和试件质量 M 等关系如下, 并经用石英和石灰石作试料, 用几种不同设备加载证明。

对于点接触 (平面压板与球形试件) $\frac{\epsilon}{M} \propto \left(\frac{P}{F^2}\right)^{5/3} \propto \left(\frac{P}{M^{2/3}}\right)^{5/3}$ 或 $\frac{\epsilon}{M} \propto (\sigma)^{5/3}$

对于线或面接触 (平面压板与圆柱或长方体)

$$\frac{\epsilon}{M} \propto \left(\frac{P}{F^2}\right)^2 \propto \left(\frac{P}{M^{2/3}}\right)^2 \text{ 或 } \frac{\epsilon}{M} \propto (\sigma)^2$$

将它们与三种传统功耗学说相联系, 作下述分析:

当 $P \propto F^2 \propto M^{2/3}$, $\frac{\epsilon}{M} \propto \frac{1}{F^0}$ 即体积学说; 当 $P \propto F^{2/3} \propto M^{1/2}$, $\frac{\epsilon}{M} \propto \frac{1}{F}$ (线接触) 即面积学说; 当 $P \propto F^{7/5} \propto M^{7/15}$, $\frac{\epsilon}{M} \propto \frac{1}{F}$ (点接触) 即面积学说; 当 $P \propto F^{7/4} \propto M^{7/12}$, $\frac{\epsilon}{M} \propto F^{1/2}$ (线接触) 即裂缝学说; 当 $P \propto F^{17/10} \propto M^{17/30}$, $\frac{\epsilon}{M} \propto F^{1/2}$ (点接触) 即裂缝学说。

由此可知, 破碎脆性物料的比能耗, 为试件尺寸、形状和破裂载荷的函数。在 $\frac{\epsilon}{M} < \frac{1}{F^\gamma}$ 中, γ 有广泛的值, 传统的功耗学说仅为其特殊情况, 尚有更多的其他形式。

3. 影响裂缝扩展能量的因素

K. 舍纳特以鲁蒙卜夫根据韧性断裂学说理论, 提出的裂缝扩展能量平衡式为基础, 从破碎所需的能量主要是由非弹性变形决定出发, 用韧性断裂理论观察断裂现象, 分析有关因素的影响情况。

(1) 试件尺寸和微塑性的影响: 舍纳特等人于1981年作了玻璃球、水泥熟料、大理石和石英等九种材料的粒度与强度关系的试验, 测得的结果如图1所示。它说明物料的强度随粒度的大小而变, 粒度愈小, 强度越大。其原因有二: 一为粒度越小缺陷越少; 另一为细粒的弹性应力场所贮的能量不足以保证扩展裂缝的需要, 要使裂缝扩展, 须增加外功。令试件面积为 A , 长度为 L , R 为单位面积的裂缝扩展阻力, 在应力为 σ 时破裂开始, 按所贮弹性能应大于裂缝扩展阻力, 即 $(\sigma/2E) AL \geq RA$, 计算出粒度的下限值。对于玻璃, $L > 10 \sim 100$ 微米, 对于钢, $L > 2 \sim 20$ 毫米。测得石英的单位作用力与粒度的关系如图2所示, 石英和石灰石的断裂能 E_B 、比破碎与粒度的关系如图3所示。它们说明, 在同一裂解率 $\frac{X}{S}$ 值时 (即粒度 x 与裂缝宽度 S 的比值), 单位反作用力, 断裂能 E_B 和比破碎率 W_M 都随粒度的减小而增加, 由于断裂点的能量可以传给粒子, 使它变得更细, 而粒又可反抵能量输入, 需继续施加载荷的参数单位为单位破碎功和单位反作用力。在图3中, 裂解率为 $1.2 \sim 1.3$ 时, 单位破碎功近似地等于断裂能。

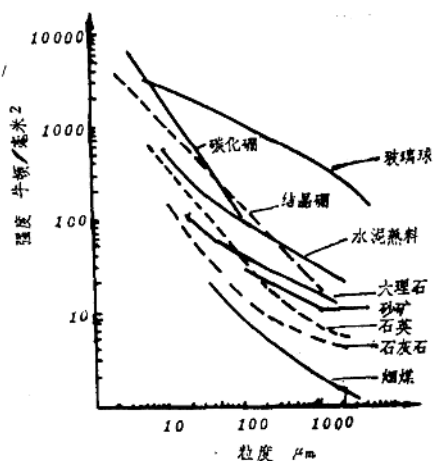


图1 强度与粒度的关系

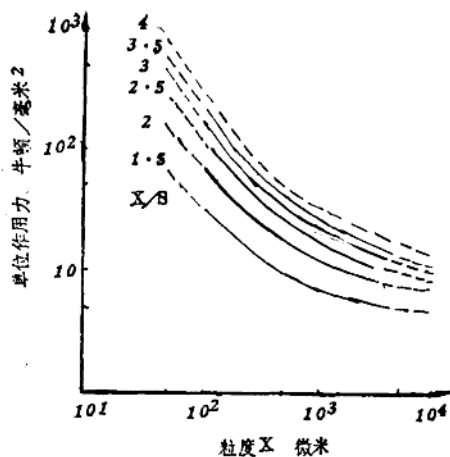


图2 石英颗粒的单位反作用力。

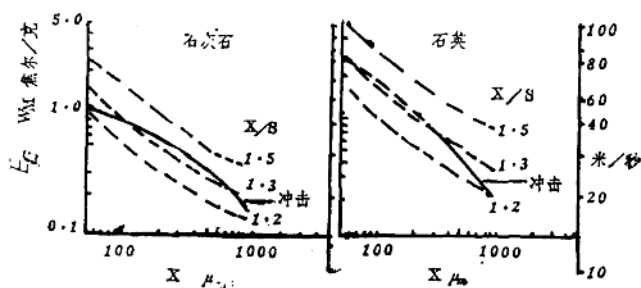


图3 石英和石灰石的 E_D 和 W_M

随着粒度的变小，非弹性变形量增加。向非弹性过渡有一粒度范围，细于过渡范围的粒子，难粉碎得多。测得钾盐等十种物料的过渡范围的颗粒粒度与颗粒强度的关系如图4。粒度细到一定程度后，变为塑性，即微塑性。物料越细越难磨，有时甚至会越磨越粗。微塑性在细磨中有重大意义。

(2) 周围介质和温度的影响：周围液体或气体的存在会引起腐蚀疲劳和发生化学反应，从而影响固体的强度。由于化学反应需要一定的时间，只有在开裂速度足够慢时，影响才较显著。例如在开裂速度为 10^{-4} 厘米/秒时，玻璃在真空中裂缝扩展所需能量为 8.5×10^3 尔格/厘米²，在水中仅需 2.4×10^3 尔格/厘米²，说明水可促使裂缝扩展，但当开裂速度为 10^{-1} 厘米/秒时，在真空和在水中裂缝扩展所需的能量相同。脆性断裂时，裂缝扩展的速度很大，用超声波测定玻璃的最度为 1.5×10^5 厘米/秒，硅橡胶为 $0.002 \sim 0.008 \times 10^5$ 厘米/秒。韧性断裂时裂缝扩展所需能量较大，故裂缝扩展较慢。

增加温度，扩展裂缝所需能量较小，故加热对裂缝扩展增加活性。

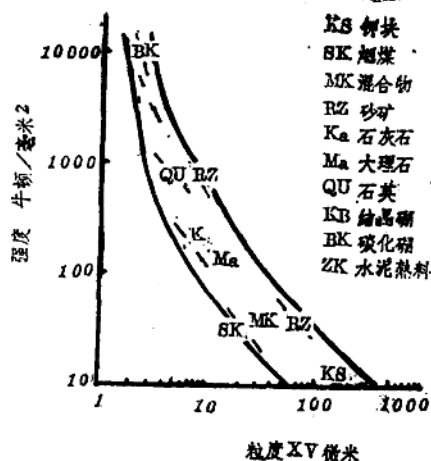


图4. 几种固体处于过渡范围的颗粒强度

三、能量利用率

K·舍纳特令破碎所耗的能量 E 与新生表面积 ΔS 之比 $\frac{\Delta S}{E}$ 为能量利用率(E, U)。由于单粒破碎的 E, U 值最高,故可用它作为评价实际粉碎机械的效率的标准。

图5用落重法测得石英的能量利用率与单位质量的能之间关系曲线,曲线的最高峰相应于破碎效率为100%,过多地输入能量,产生的新表面固然增加,因新生表面积不与多输入的能量成比例地增加,故 E, U 值都降低。

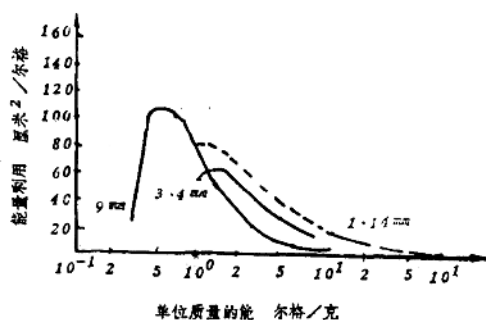


图5 石英的 E, U -尔格/克曲线

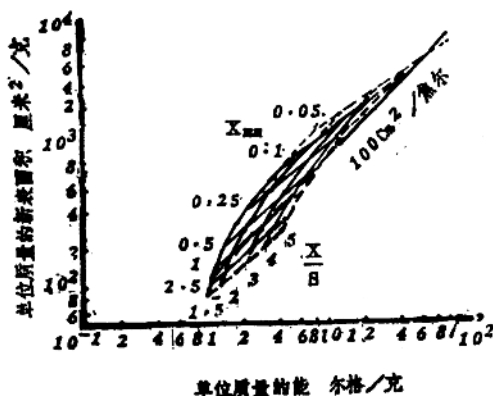


图6 石英的新生比表面积和比能量

图6为石英的表面积增量与比破碎功的关系,它说明消耗的比能量和新生比表面积的关系曲线的斜率皆小于1,反映随输入能量的增加,破碎比也加大,但能量效率下降

细颗粒与粗颗粒相比较,虽然强度较大,需要较多的破碎能量,但它所贮的能量可以较好地利用,因而能量效率较高。

压力和冲击能量相比较，在输入能较低时，压力的E、U值比冲击的高得多，但当输入能较高时，二者的E、U值接近。

用几种方法破碎石英时，它们的E、U值为：用压力破碎规则石英 $1\text{厘米}^2/10^4$ 尔格；用压破碎不规则石英为 $1\text{厘米}^2/10^5$ 尔格；冲击破碎的较此低；球磨的最低。因此，产生同样多的新表面积，球磨所需能量大约为单粒破碎的十倍以上。（参考文献9条略）

高压辊磨机理论基础

[中南工业大学] 黄圣生

近年来高压辊磨机已获得了成功的应用。国外在大力推广，国内也在引进和研究制造。在使用高压辊磨机时，面临着一系列问题的考虑：

1. 如何正确设计和制造；2. 怎样合理操作和维护；3. 新系列产品的开发。

为此，该设备的一些基本规律应该有所识认，给高效节能创造条件。国外在基础理论研究上做过一些工作，国内尚为少见。本文就某些主要问题进行探讨。

力学模型

图1为辊磨机的工作区间力学模型图。设P为辊隙某单元垂直于对称面的单位面积上的破碎压力，则垂直于对称面的力dF为： $dF = PL\left(\frac{D}{2}\right)\cos\alpha d\alpha$

式中：L为辊子的工作长度；D为辊子的直径； α 为该单元与两辊连线夹角。

辊面的正压力dN， $dN = dF\cos\alpha$ ；辊面切向力dT， $dT = dF\sin\alpha$ 。

在进行料层粉碎的实验研究中，通过对很多物料的压力P和位移a的关系分析，发现最长压力 P_m 与最大位移 a_m 遵循一个规律（图2）： $(P/P_m) = (a/a_m)^n$

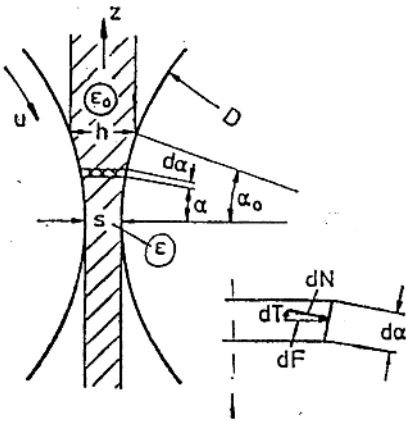


图1 力学模型图

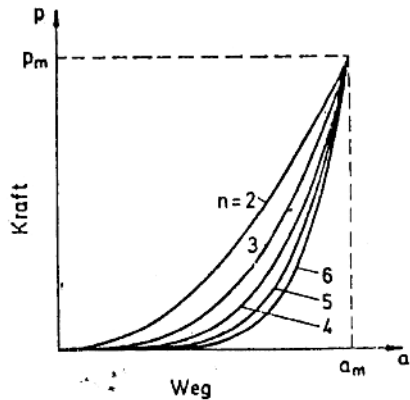


图2 压力与位移关系图

式中 n 为一指数。在一般情况下, n 在3—6之间。

根据几何关系, 物料开始受压的厚度 h 和两辊连线间的厚度 s 与拉入角 α_0 的关系为:

$$h = S + D (1 - \cos \alpha_0)$$

在 h 与 s 之间的任意厚度 x 为:

$$x = S + D (1 - \cos \alpha) \quad (0 \leq \alpha \leq \alpha_0); \quad a = h - x = D (\cos \alpha - \cos \alpha_0); \quad a_m = h - s = D (1 - \cos \alpha_0)。$$

$$\text{则 } (P/P_m) = [(\cos \alpha - \cos \alpha_0) / (1 - \cos \alpha_0)]^n$$

$$\text{令 } \alpha/\alpha_0 = q, \text{ 通过相应变换得: } (P/P_m) = (1 - q^2)^n$$

辊磨机是在上部填满给料而工作的, 因此压力的分布具有不对称性, 合力偏上; 而在横向的压力分布基本上是均匀的。

拉 入 角

拉入角 α_0 是一种名义参量, 便于进行其他参数的计算和机理的解释, 在必要时是可以测量的。引入压实度 $\eta = \delta/\delta_0 = n/s$

式中: δ_0 为开始受载时物料的密度; δ 为受载后物料的密度。

$$1 - \cos \alpha_0 = (h - s) / D = \frac{S}{D} (\eta - 1)$$

$$\text{简化后得到下列表达式: } \alpha_0^2 = (2s/D) (\eta - 1)$$

由此可见拉入角 α_0 主要与设备规格, 排料间隙和压实度等因素有关, 其变化规律可见图3所示。对于既定规格的设备, 调节相应的排料口和压实度, 可以保持拉入角不发生变化; 如果排料口保持不变, 随着压实度的增加拉入角也将增大。

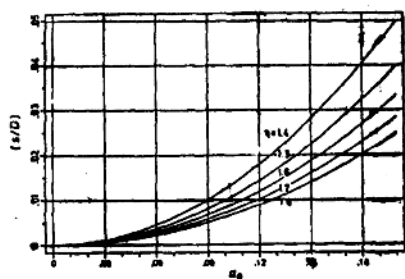


图3 拉入角的变化规律

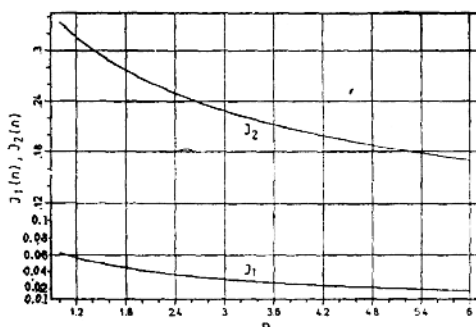


图4 $J_1(n)$ 和 $J_2(n)$ 与 n 的关系

理论转矩

所谓理论转矩 M_d , 是指不考虑摩擦损失, 一个辊子在工作时必须的转矩, 可以直接从单位质量的粉碎功耗和产量来确定, 亦可以用应力应变的微分关系来确定。

从第一种关系考虑。