

第四届全国粉碎工程技术研讨会 专题报告及论文

中国选矿科技情报网粉碎工程网
中国金属学会选矿学会
中国有色金属学会选矿学术委员会
中国有色工业总公司选矿情报网

1988年10月

总
碎设

目 录

一、专题报告

- 粉碎工程技术进展.....北京矿冶研究总院 王宏勋 (333)
1. 矿岩料层的粉碎性质和功指数.....东北工学院 徐小荷 王淑鑫 胡景坤 (1)
2. 粉碎过程的物理化学.....中南工业大学 徐秉权 (8)
3. 料层的冲击破碎实验室研究初探.....中南工业大学 彭长明 徐秉权 黄圣生 周忠尚 (19)
4. 不同安装倾角的旋流器其分级指标变化的研究.....东北工学院 张 鑑 陈炳辰 刘其瑞 (25)
5. 工业磨矿回路动态模型研究及其应用.....中南工业大学 熊维平 (31)
6. 磨矿动力学及其应用.....昆明工学院 吴明珠 (45)
7. 对传统颚式破碎机的改进.....武汉冶金建筑专科学校 郎宝贤 (56)
8. 破碎机运动学及动力学.....洛阳矿山机械研究所 康继尧 (67)
9. 高能圆锥破碎机.....北京有色冶金设计研究总院 刘文拯 (86)
10. 高压辊式磨料层粉碎新技术.....中南工业大学 黄圣生 (94)
11. 振动磨的研究现状与展望.....西安冶金建筑学院 韩文正 (106)
12. 超细磨矿对非金属矿物结构及物化性能的影响.....武汉工业大学北京研究生部 郑水林 (115)
13. 使用不同方法的微粉碎技术.....北京矿冶研究总院 孙成林 (122)

二、论 文

15. 物料破碎机理研究及破碎机参数探讨.....北京矿冶研究总院 丁培溪 王宏勋 (130)
16. 粉碎力学初探.....鞍山黑色冶金矿山设计研究院 关维相 (134)
17. 振动磨的产生发展与现状.....西安冶金建筑学院 王树林 李隆秀 韩文正 (140)
18. TLPC (及TPC) 单段锤式破碎机.....天津水泥设计研究院 廖正光 (146)
19. 喷射粉碎机.....咸阳非金属矿研究所 郭 力 西安冶金建筑学院 韩文正 (155)
20. 动颚结构的有限元分析.....武汉工学院 郎世平 武汉冶金建筑专科学校 黎 民 (163)
21. 干式流态化选煤介质磨制及其研究.....中国矿业学院 谢广元 陈清如 (167)
22. 配比对磁铁矿-石英体系自然选择性磨碎的影响.....昆明工学院 刘升明 段希祥 (176)
23. 试论磨介抛落的“聚积层”及“聚积层”转速.....上海建筑材料工业学院 戴少生 (191)
24. 总体平衡模型及其在混合物料磨细中的应用.....昆明工学院 王喜良 吴明珠 (198)
25. 多层球磨运动分析的力矩法.....武汉工业大学北京研究生部 王 力 (209)
26. 提高粉碎设备生产能力的基本途径.....西安冶金建筑学院 李隆秀 (213)

27. 国外粉碎技术的现状 (摘要)	长沙有色金属专科学校	张鹏飞(219)
28. 我国选矿厂碎磨流程发展趋势	北京有色冶金设计研究总院	董必作(220)
29. 自磨机的应用和推广	洛阳矿山机械研究所	张连发(228)
30. 浅谈提高磨矿效率降低磨矿能耗的途径	德兴铜矿 刘建国	吴一微(232)
31. 细筛代替二次分级机的应用	首钢矿山公司	才振东(238)
32. 粉状物料的离心分级及其粒度分布	中国科学院化工冶金研究所	赵秀兰(242)
33. 微细颗粒的气流分级技术	中南工业大学 叶红齐	徐秉权(247)
34. 球磨机钢球尺寸的理论计算研究	昆明工学院	段希祥(251)
35. 金属型铸造洛屈氏体磨球的研究与应用	河北工学院	左贵平(258)
36. 高碳低铬合金钢锻造球试验总结	马鞍山市钢球厂	黄茂仁(265)
37. 分散剂、表面活性剂对某锌矿助磨效应的研究	中南工业大学	周贤渭(278)
38. 助磨剂对石英磨矿的影响	昆明工学院 刘全军 吴明珠	李启衡(283)
39. 对 $\phi 5.03 \times 6.4$ M溢流型球磨机衬板经济磨蚀的探讨	永平铜矿	白法铭(287)
40. 非金属矿的发展与微细粉碎		
	国家建材局地质研究所 蔡 玲 北京矿冶研究总院	孙成林(296)
41. 新华铅矿选矿厂碎磨工艺生产实践	新华铅矿	陈江宁(292)
42. 钨选矿碎矿流程评述	瑶岗仙钨矿	谭震波(299)
43. 对磨矿机橡胶衬里的实践与探讨	鞍钢齐大山选矿厂	李树明(303)
44. 磨矿机较佳衬板形状的探索	云锡公司羊坝底采选厂	杨才顺(310)
45. 缩小入磨粒度提高磨矿效率 (摘要)	午汲选矿厂	陈中合(312)
46. 精矿再磨扩大销售效益显著 (摘要)	桃林铅锌矿	陈宝权(313)
47. 浅谈中小型矿山粉碎设备的发展趋势	北京人民矿山机械厂	白廉侠(328)
48. 新型高效节能衬板—沟槽衬板研究与应用	合肥水泥研究院 鲁幼勤	王夏和(313)

编者话:

本着“文责自负”的精神, 论文未做修改。“参考文献”略去。

矿岩料层的粉碎性质和功指数

东北工学院 徐小荷 王淑鑫 胡景坤

一、概 况

传统的岩石力学是以岩体中所开挖空间的稳定性为其研究背景的；在矿岩粉碎领域内，必须研究以粉碎为背景的岩石力学行为。在通常岩石力学的实验室研究中，着重点是单块岩样在未曾破碎以前的力学行为，如弹性模量，泊松比，扩容性状等等。近年来也发展到应力-应变全过程曲线，但岩石破碎后的许多性态未受到充分重视，破碎效果（粒度尺寸及其分布）的讯息白白地被丢弃了。

在矿岩粉碎的领域内，往往以整个料层的破碎为研究对象，十分重视破碎的效果，但对破碎的过程，甚至加载的方式并不注重，常常只以所施加的能量和所获得的破碎效果——粒度缩减来表示这个关系，它的典型方程是：

$$dE = -K \frac{dx}{X^n} \quad (1)$$

式中：

E ——单位质量物料的粉碎能耗；

X ——试样颗粒的尺寸（粒度）；

K ——反映矿岩粉碎难易的一个系数；

n ——指数，它和物料粒度对缩减影响的程度有关。

如所周知，当 $n=2$ 时便是黎金格（Rittinger）的表面能粉碎说； $n=1$ 时便是基格（Kick）的粉碎相似说；邦德（Bond）的裂纹说介于两者之间，相应的 $n=1.5$ 。

将式（1）积分，设粒度由 X_F 缩减到 X_P ，那么单位质量物料所耗的能量是：

$$E = K \left(\frac{1}{X_P^{n-1}} - \frac{1}{X_F^{n-1}} \right) \quad (2)$$

进行粉碎试验时，很少用单块的颗粒进行，常以整个料层来作试验，测定整个料层的力学性质和破碎效果。在实际破碎过程中，所得到的颗粒是一个含有大大小小的粒度分布。当采用平均粒度来表示各种粒度组成时，按照式（2）其定义如下：

$$\frac{1}{\bar{X}} = \sum_i \frac{r_i}{X_i^{n-1}} \quad (3)$$

式中 r_i 为 x_i 粒度的重量在总体中所占的比例，而 $\sum_i r_i = 1$ 。

式（2）中的 E 按理说应当是粉碎所耗的能量——粉碎功，但此项能量随破碎方法而异，难以测定。所施加的能量究竟有多少是耗于粉碎做功，有多少是以别的形式逸散了颇难以区分，因此在工程上往往是用施加能量直接当作破碎功来计算的。

在式（2）中如果 E 和 $\bar{X}_P$ ， $\bar{X}_F$ 已被测定，那么系数 K 也就能得到，它是一个反映岩石粉碎难易的物理力学量。它的意义不亚于岩石力学中的强度概念。

二、邦德功指数

邦德是在特定的条件下来测定K值的，他称之为功指数，其定义如下：

$$E = W_B \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (4)$$

比较式(4)和(2)可知，在此式中 $n=1.5$ ，并用80%所能通过的筛孔尺寸来代替平均粒度式(3)，他用 P_{80} 、 F_{80} 表示，单位是 μm ， E 用每短吨(907.2kg)所耗的能量 $kw \cdot h$ ($1kw \cdot h = 3.6 \times 10^6 J$)作单位。(本文为了方便改用公顿计算)。

式(4)中的 W_B 便是邦德功指数，它意味着一短顿物料由相当大的尺寸，在特定条件下粉碎到80%能通过 $100\mu m$ 筛孔时所耗能量的 $kw \cdot h$ 数值。

标准的磨矿邦德功指数，是利用一个标准的球磨机，规格是 $305 \times 305mm$ ，以达到稳定的投料和产品的情况下，单位产物所耗球磨机轴上的能量来算出功指数来，由下式给出邦德功指数：

$$W_B = 49.06 / \left[(P_1)^{0.23} \times (Gbp)^{0.82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \right] \quad (5)$$

式中除上述已有之外，

P_1 ——试验合格产品的筛孔尺寸 (μm)

G_{bp} ——球磨每转所产生的合格产品量 (g)

矿岩的邦德功指数，无论在我国、西方国家或苏联都得到广泛应用。不仅在粉碎工程界，邦德本人还将它用于爆破，甚至有人将它用于边坡稳定性的计算。颇有点象当年普氏岩石坚固性系数 f 得到广泛应用一样。

不过测定邦德功指数实非易事，既没有专门的设备，又要花费很长的时间，它的物理意义也不很明确，只起到一个相对的可粉碎性指标的作用。因此出现了许多代替它的试验方法，或简化其试验过程的方法。

三、压碎功指数和捣碎功指数的测定方法

从物理意义上讲，从式(2)看采用较为简单的粉碎手段，便可准确地测定出粉碎所耗之能，再筛分投料和产品的粒度组成，系数K是容易求得的。这个系数便成为一个很好反映岩石可粉碎性指标。为此，我们采取了料层压碎和捣碎的试验方法，相应的系数各称之为压碎功指数和捣碎功指数。与此同时用标准磨机平行测定邦德功指数以作对比。结果表明压碎功指数和邦德功指数相关良好，测定起来方便得多。

料层压碎功指数试验，是取 $3.5 \sim 5.3mm$ 粒度的物料三份，每份 $140cm^3$ ，放在内径 $67mm$ 的钢钵中，上置平底压头在压力试验机中施加约 $100RN$ 的载荷，测定料层的载荷-变形曲线，此曲线下所围之面积即为粉碎矿岩所耗之功。

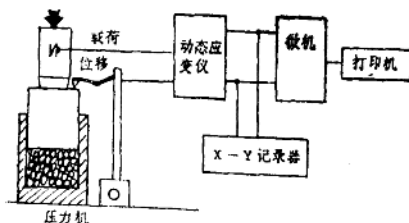


图1 料层压碎测定框图

这和测定岩石的应力-应变曲线相仿佛。粉碎过的矿岩试料，用3.5，2.5，2.0，1.25，0.8，0.4，0.154和0.109mm八个标准筛筛分。粒度用 μm 作单位，代入式(2)和(3)计算出K值，重复三次的平均值称压碎功指数，以符号 W_s 表示，单位是每公吨的千瓦小时数($\text{kw}\cdot\text{h}/\text{t}$)。

实际上所有测量和计算，都通过微机直接给出，见图1。

料层捣碎功指数的测定，是借助于苏联采矿科学院的捣碎筒(ΠOK)，见图2。它是用2.4kg的落锤，从640mm高处落下，共捣碎30次，总共冲击能是456J。其他计算和压碎功指数法相同，用符号 W_d 表示捣碎功指数，单位也是 $\text{kw}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

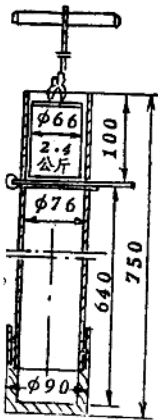


图2 捣碎筒

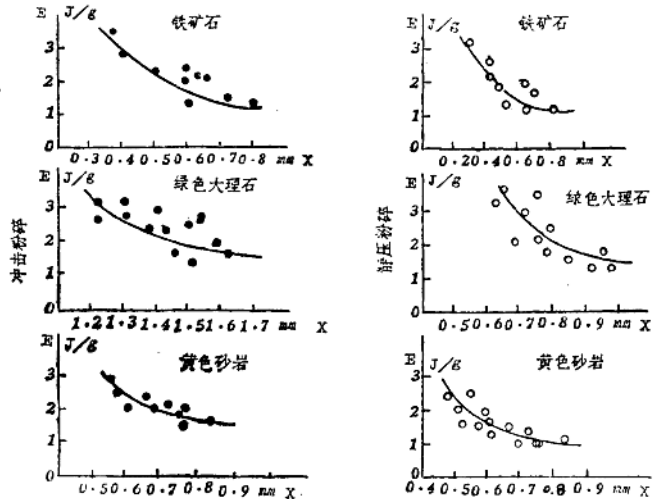


图3 E和n的拟合曲线

四、指数n的确定

当利用式(2)和(3)进行计算时，首先遇到指数 n 取多少为好。为此，对三种岩石利用不同的冲击功或加压荷载，使其粉碎到不同程度，每组测定十次左右，以所得数据按最小

表1 式(2) E、n的拟合结果

矿岩名称		南芬铁矿石	绿色大理石	黄色砂岩
静压粉碎	E	1.797	2.446	1.966
	n	1.467	1.496	1.537
冲击粉碎 控冲击能算	E	1.994	3.984	2.850
	n	1.513	1.484	1.474
冲击粉碎 控粉碎功算	E	1.283	2.873	1.939
	n	1.588	1.501	1.503

• E的单位是J/g

二乘法对式(2)进行拟合,确定最优的 E 和 n 值,其结果汇总于表1。拟合曲线见图3。

从表1可看出, n 值在1.45~1.6范围,按邦德理论,取 $n=1.5$ 是适宜的。

五、三种功指数的测定结果和相互关系

对表2所列的十种岩石进行了邦德功指数 W_B ,压碎功指数 W_s ,捣碎功指数 W_d 的对比测定,结果列于表3。表中包括邦德功指数在内,都以 $RW \cdot h/t$ 为单位。

表2 试验岩石的物质力学性质

矿岩名称	抗劈裂强度MPa	抗压强度MPa	巴西法强度MP2	捣碎法坚固性系数f
白色大理岩	3.14	46.28	5.13	1.59
闪长玢岩	10.56	92.87	11.95	8.10
绿泥岩	8.71	58.36	6.45	4.32
石灰岩	7.96	52.96	3.71	5.88
绿色大理岩	5.00	58.85	10.42	7.37
砂岩	3.24	46.71	4.98	2.08
辉绿岩	12.98	61.48	7.48	5.71
花岗岩	8.25	122.19	8.07	3.88
歪头山铁矿石	—	98.20	—	—
大桥煤	—	34.76	—	—

比较表2和表3的指标可看出,如白色大理岩,煤等,抗压强度低,岩石坚固性系数小,但粉碎功指数较高。所以常用岩石力学的指标看来是不能直接反映粉碎功指数的。

表3 三种功指数测定结果 (KWh/t)

矿岩名称	邦德功指数	压碎功指数	捣碎功指数
白色大理岩	10.31	2.53	3.13
闪长玢岩	21.96	42.17	14.24
绿泥岩	7.82	4.41	5.89
石灰岩	10.52	5.56	7.84
绿色大理岩	21.27	12.50	15.79
砂岩	15.98	5.33	5.61
辉绿岩	17.30	8.83	12.21
花岗岩	11.79	5.00	6.40
歪头山铁矿石	7.32	2.36	2.88
大桥煤	17.25	6.33	6.36

W_s 和 W_B 、 W_d 之间都有较好的相关关系。按线性回归可以得出如下方程:

$$W_B = 1.41W_s + 4.80 \quad (6)$$

相关系数 $r = 0.907$ ($r_{0.01,13} = 0.941$)

$$W_d = 1.24W_s + 0.0048 \quad (7)$$

相关系数 $r = 0.981$ ($r_{0.01,8} = 0.765$)

$$W_B = 1.19W_d + 2.40 \quad (8)$$

相关系数 $r = 0.837$ ($Y_{0.01, 0.5} = 0.765$)

近似计算, 可以采用

$$W_B \approx 2.2W_S \quad (6')$$

$$W_d \approx 1.25W_S \quad (7')$$

$$W_B \approx 1.76W_d \quad (8')$$

图4和图5给出了试验点和相关线的情况。在图4中符号“+”的五个点, 是时间相隔一另—批试验的结果, 压碎初始粒径为10~15mm, 每次压碎量150g。虽然和表3参数不同, 但测定结果仍然符合总的规律。它的 W_S 、 W_B 诸值列于表4。

表4 五种岩石的 W 和 W_B 值 (KW·h/t)

岩石名称	压碎功指数 W_S	邦德功指数 W_B
铝土矿	8.59	17.6
花岗岩	6.07	10.9
磁铁矿	3.36	9.05
东鞍山磁铁矿	7.56	15.8
硼镁矿	8.81	18.2

为了检验利用式(2)和(3)时, 取不同的 n 值的变化, 曾用 $n=1$, $n=2$, 以及按简单算术加权平均做为粒度平均值, 再用 $n=1.5$ 按式(3)计算, 三种情况的结果汇列于表5。从表中可看出 W_S 和 W_d 相关性都很好, W_S 和 W_B 用 $n=1.5$, 及算术平均也有较好的相关性。

六、料层压碎的载荷-位移曲线

在图6中绘出了三种岩石的料层压碎的载荷-位移曲线。对于此种曲线并没有被详细的研究过。从图中可看出, 开始曲线平缓, 这是物料颗粒间作点接触, 受载荷后局部破碎或变形所造成的。当载荷进一步增加时, 曲线变陡, 这是料层被压实了, 逐渐粉碎而形成平缓的一段过程较长, 而闪长玢岩开始的一段过程较短。此曲线和横座标所围的面积, 便是压碎所作之功了。

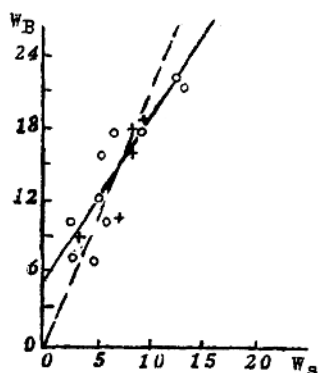


图4 邦德指数和压碎功指数相关曲线

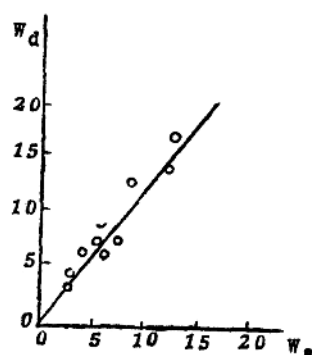


图5 捣碎功指数和压碎功指数相关曲线

表5 用不同粉碎理论计算 W_s , W_d 及其与 W_B 相关性。

关系	$n=2$	$n=1.5$	$n=1$	算术平均•
$W_d - W_s$	$W_d = 1.26W_s + 0.01$ $r = 0.991$	$W_d = 1.24W_s + 0.0048$ $r = 0.981$	$W_d = 1.3W_s$ $r = 0.971$	$W_d = 1.19W_s + 1.49$ $r = 0.964$
$W_d - W_B$	$W_d = 0.08W_B - 0.19$ $r = 0.839$	$W_d = 0.69W_B - 1.68$ $r = 0.625$	$W_d = 0.11W_B - 0.26$ $r = 0.808$	$W_d = 0.80W_B + 4.09$ $r = 0.793$
$W_s - W_B$	$W_s = 0.06W_B - 0.19$ $r = 0.881$	$W_s = 0.06W_B - 0.192$ $r = 0.900$	$W_s = 0.09W_B - 0.25$ $r = 0.868$	$W_s = 0.75W_B + 1.09$ $r = 0.917$

• 用简单算术加权平均代替邦德理论中的 P_{80} , F_{80} 计算

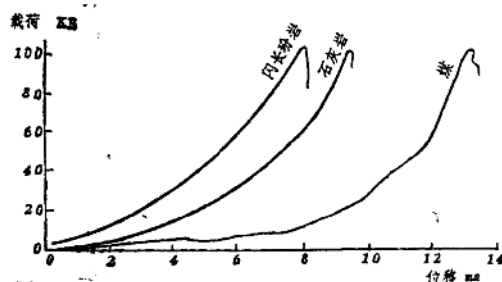


图6 三种岩料层的载荷-位移曲线

七、冲击粉碎的效率

从表3或图5可以看出, 捣碎法的功指数要比压碎法高出25%。这原因有两方面, 一是冲击作用下岩石的抗压强度、硬度、凿碎比功都有所增长; 而主要的还是冲击作用下能量是以波的形式传递的, 冲击能转化为粉碎功时必将有部份逸散, 尤其是匹配不当损失更大。

为了搞清冲击作用下, 冲击能转化成粉碎功的部份, 必须测定冲击下的载荷-位移曲线。为捣一两次的就能达到和压碎同样的粉碎程度, 采用了18kg重的落锤, 从0.65m高处坠落, 冲击在料层上之压头上, 冲击两次, 总能量为22pJ。在冲击作用下料层受力的过程约为2~3ms, 载荷峰值可达40kN。用瞬态波形存储器可以记录下这个过程。图7是冲击下载荷位移曲线一例。此曲线下的面积便是冲击能转化成的粉碎功。令

$$\text{冲击粉碎效率} = \frac{\text{破碎功}}{\text{冲击能}}$$

第一次冲击粉碎效率约为35~40%, 第二次约为85~90%, 平均是60~65%。第二次效率提高, 是因为料层被击实之后, 冲击匹配较好的缘故。十种岩石的冲击粉碎效率列于6。

在表6中还给出了料层在冲击和静压粉碎下的功指数比较。值得指出的是, 当利用粉碎功(即冲击作用下的载荷-位移曲线下面积)计算时, 总的看来和静压粉碎的功指数是不相上下的。但用冲击能作为施加能来计算的时候, 功指数就要高得多。这说明了在每秒几米的

表6

冲击粉碎效率

矿岩名称	冲击粉碎效率%			W_d/W_s	
	第一次	第二次	总效率	按冲击能算	按粉碎功算
南芬铁矿石	32.4	96.2	64.3	0.604	0.939
壶头山铁矿石	31.0	83.3	57.2	0.484	0.847
片麻岩	34.8	89.8	62.3	0.612	0.981
石灰岩	37.7	70.7	54.2	0.484	0.893
辉绿岩	38.6	87.7	63.2	0.689	1.090
花岗岩	41.5	74.6	58.1	0.518	0.892
混合岩	36.7	85.6	61.2	0.840	1.373
铝土矿	42.3	75.5	59.0	0.510	0.865
绿色大理岩	51.7	81.5	66.6	0.948	1.423
黄色砂岩	33.1	86.3	59.7	0.638	1.068

冲击速度下,在粉碎功相当的条件下,和压碎的程度量差不多的,但冲击能转化为冲击功,效率只有60~65%左右。在表3和4中也反映了相似的情景,压碎功指数不到邦德功指数(相当于2.4m的球磨)的一半,因此用压碎来代替或部分代替球磨将是一个节能的有效措施。

八、应用举例,温度效应

含石英的铁矿石,由于石英在575℃由 β 相转变成 α 相,同时体积增加2.4%。可以预期当加热温度经过这个相变点时,将会产生很大的热应力,它将使岩石变酥,粉碎功指数会相应的降低。验证这一点,当然可以测定邦德功指数的变化,但这是很费事的。我们采用了压碎功指数 W_s 的测定,很容易证实了这个设想。在表7和图8中给出了含铁石英岩在不同温度下空冷或水冷,然后测 W_s 的变化情况,在加温在550℃到620℃之间,粉碎功指数突然下降47%这一效应如何利用有待进一步探索。

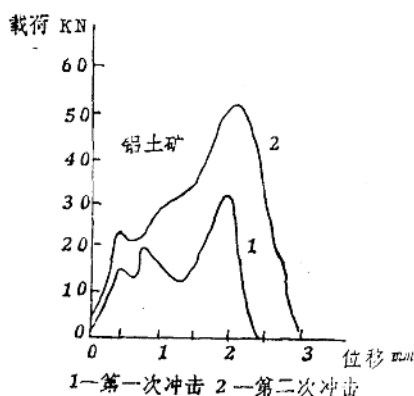


图7 冲击料层载荷-位移曲线

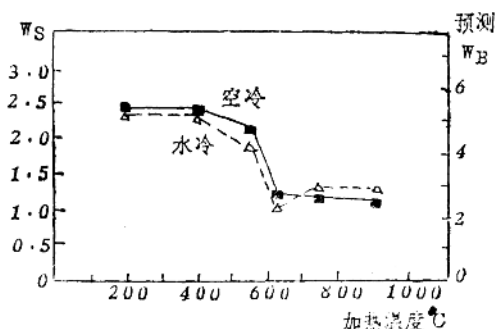


图8 含铁石英岩的加热效应

表7

含铁石英岩加热后粉碎功指数的变化

温 度 $^{\circ}\text{C}$	压碎功指数 W_s ($\text{kw}\cdot\text{h/t}$)		预测邦德功指数 W_B ($\text{kw}\cdot\text{h/t}$) (平均)
	空冷	水淬	
200	2.36	2.33	5.2
400	2.36	2.33	5.2
550	2.14	1.91	4.5
620	1.21	1.01	2.4
740	1.19	1.33	2.8
900	1.10	1.28	2.6

九、结 论

1. 粉碎功指数是岩石力学的一个重要课题，目前还没有详细地被研究。
2. 从初步试验看，压碎功指数是一个测定很方便的方法，可以代替邦德磨碎功指数的测定。
3. 捣碎或冲击粉碎的功指数高于压碎功指数，这主要是由于冲击作用下匹配不当，冲击能转化成粉碎功的效率不高所造成的。
4. 加热到石英相变温度 (575°C)，含石英岩石的粉碎功指数将大幅度下降。

粉碎过程的物理化学

中南工业大学 徐秉权

对粉碎过程的认识，在传统的观念上认为是一个机械——力学过程。对于产品的要求，一般只是从粒度和解离度来考核。从而提出粉碎的原则是不作不必要的破碎，既使矿物获得充分的解离，又不过粉碎。

在实际生产过程中，除少数部分直接使用粉碎产品外，在绝大多数工业部门粉碎是为矿物的进一步加工处理准备合格的物料。这就要求粉碎过程所提供的产品不仅在解离度和粒度上符合下一步加工的要求，而且在物理——化学性质方面满足下一步加工的要求，以不致于造成下一步加工的困难。

为了节省粉碎过程的能耗和钢耗，人们也希望能够人工地改变矿物的粉碎性能，提高介质材料的抗腐蚀磨损的能力。

近年来，粉碎工程的一个新方向——粉碎过程的物理化学，为解决这类问题提供了新的途径。许多研究工作者开始了这方面的较为广泛的探讨和研究。本文就这个崭新的领域作一探讨性的介绍。

一、矿物的化学结构与粉碎性能的关系

矿物的化学结构与粉碎性能的关系，是结构化学的一个重要组成部分，从结构化学来探讨粉碎过程是重要的理论意义和实践意义。

(1) 弹性

所有的固体在力的作用下会改变形状，小的应力下，应变 ϵ 和应力 σ 服从虎克 (Hock) 定律，即 $\sigma = C\epsilon$ 。C为弹性刚度系数。

地球外壳上大多数矿物是氧化物，堆积密度是影响氧化物弹性模数的主要变量。伯奇曾指出，大多数普通矿物有着大体同样的平均原子量（化学式中分子量除以原子数），纵向声速度大体上与密度成正比，切变速度也随着岩石密度的增加而增加。

声速度随原子质量的增加而下降，在N族元素，C, Si, Ge, Sn, Pb中，纵向速度从金刚石的 1.8×10^5 降低到铝的 0.2×10^5 厘米/秒。力常数随原子序数增加而逐渐减小，这是由于键强度减弱的原因，因此弹性常数变小，声波速度减弱。

体积压缩系数及其倒数，即体积弹性模量K为体积随压力的增加而减小提供了一种方便的量度。原子间距大的物料一般比键合力强的物质更容易压缩，因此体积弹性模量随原子半径的增加而减小，随密度的增加而增大。刚度不仅随键的密度而增加。而且也随键的强度而增加。刚度与硬度、与熔点均有关，它们都随键的强度而增加。键强度可以用原子间距来量度。对具有岩盐结构的化合物进行比表较明（见图1），锂卤化物要比较大的钾和铷离子的卤化物更硬。

(2) 弹性的各向异性

大多数氧化物，在 C_{11} ， C_{22} 和 C_{33} ，即沿主轴的抗张刚度系数方面存在着某些规律性。表1中列出的硅酸盐矿物的刚度系数说明了在弹性各向异性与结构类型之间存在着一定的关系。所有的硅酸盐都含有 (SiO_4) 四面体，根据这些四面体是如何连接一起的，可以把它们为分骨架状、层状、链状或环状的硅酸盐。

在骨架状硅酸盐（如石英和石英玻璃）中，四面体组成了三维网络。由于成键是接近各向同性的，因此不存在解理面，而硬度或弹性的各向异性也很小。

链状硅酸盐中晶体结构的影响变得较为明显。辉石包含 SiO_3 单链，而闪石则包含 Si_4O_{11} 双链，如图2所示。表1中的弹性系数是参照图2中箭头所指明的方向测量的。沿链状方向的

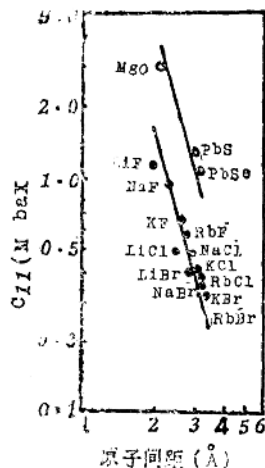


图1 一些岩盐化合物中纵向刚度系数 C_{11} 与毗邻原子距离的函数关系。单价和二价化合物分别用实心圆和空心圆表示。直线的斜率为-4。

表1

纵向的刚度常数（单位：千巴）

骨架状硅酸盐

α 石英 SiO_2 $C_{11} = C_{22} = 0.9$, $C_{33} = 1.1$

石英玻璃 SiO_2 $C_{11} = C_{22} = C_{33} = 0.8$

单链硅酸盐（辉石）

霓石 $NaFeSi_3O_8$ $C_{11} = 1.9$, $C_{22} = 1.8$, $C_{33} = 2.3$

辉石 $(CaMgFe)SiO_3$ $C_{11} = 1.8$, $C_{22} = 1.5$, $C_{33} = 2.2$

透辉石 $CaMgSi_2O_6$ $C_{11} = 2.0$, $C_{22} = 1.8$, $C_{33} = 2.4$

双链硅酸盐（闪石）

角闪石 $(Ca, Na, K)_{2-3}(Mg, Fe, Al)_5(Si, Al)_4O_{11}(OH)_2$ $C_{11} = 1.2$, $C_{22} = 1.8$, $C_{33} = 2.0$

环状硅酸盐

续表 1

绿柱石 $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ $C_{11}=C_{22}=3.1$, $C_{33}=2.8$

电气石 $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Li}, \text{Mg}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mn})_3(\text{OH})_4(\text{BO}_3)_3\text{Si}_3\text{O}_{11}$ $C_{11}=C_{22}=2.7$, $C_{33}=1.6$

层状硅酸盐

黑云母 $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ $C_{11}=C_{22}=1.9$, $C_{33}=0.5$

白云母 $\text{KAl}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ $C_{11}=C_{22}=1.8$, $C_{33}=0.6$

金云母 $\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ $C_{11}=C_{22}=1.8$, $C_{33}=0.5$

注: 1巴 = 1.020公斤/厘米²

成键较强, 引起明显的解理。晶体在这一方向刚度更大, 导致模量较大。在辉石和闪石中, 平行于链的刚度 (C_{33}) 最大, 角闪石中 C_{22} 显著增大。

Si_2O_5 环彼此连接时, 形成了云母中所见到的四面体层。层状硅酸盐中, 解理和刚度各向异性变得十分明显, 这时 C_{11} 和 C_{22} 比 C_{33} 大三倍。

(3) 硬度

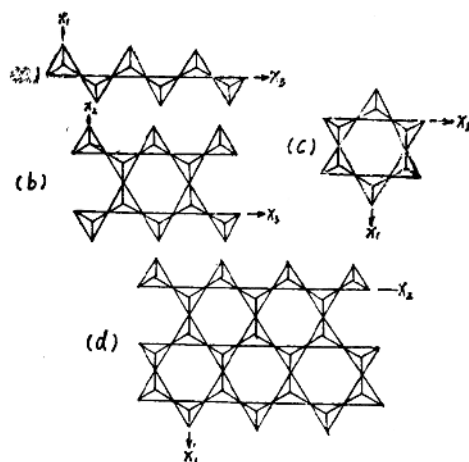
链的强度与硬度有着密切的关系。在滑石中, 镁硅酸盐层在二维方向成键很强, 但在层间却不存在强的共价键、离子键, 甚至连氢键也没有。因此滑石比其它硅酸盐要软得多。

分子晶体总是很软的其莫氏硬度很少超过 3。氢键固体也是一样。在水合盐中, 硬度随含水量的增加而下降: 无水石膏 (CaSO_4) 比石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 硬, 硫酸镁石 ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 比泻盐 ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 硬。

离子晶体比分子晶体硬, 但却比具有三维共价键的晶体如金刚石与 SiC 软。离子晶体表现出晶格能与硬度之间的协同变化, 因此在同系盐中, 硬度随着电荷的增加以及离子半径的减小而增大。

从结晶化学的参数来看, 硬度随堆积密度和价数而增加, 随离子的增大而减小。离子大小与价数的相互关系从方解石结构的同构化合物中可得到说明。菱镁矿 (MgCO_3) 的莫氏硬度为 4.5, 对比起来方解石 (CaCO_3) 的莫氏硬度只为 3, 表明了硬度如何随离子半径的增加而减小。 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的半径分别为 0.72 和 1.00 Å。钠硝石 (NaNO_3) 也具有方解石的结构, Na^+ 的半径 (1.02 Å) 也与 Ca^{2+} 的半径大体相等, 可是钠硝石 (莫氏硬度为 2) 却比方解石软, 因为价数减少了。这些材料中离子键的强度决定了硬度, 因为在碳酸盐和硝酸盐基团中, 离子键比共价键弱。键强和硬度与价数成正比, 但与原子间距成反比。

硬度随堆积密度而增加。比较一下同质多晶型, 霞石比方解石更致密, 因而也更硬, 石英比磷石英既致密也更硬。在其他因素相同的情况下, 硬度取决于单位体积中键的数目。骨架状硅酸盐的硬度范围: 沸石在 4 或 5 之间, 长石为 6, 石英为 7。密度也以同样的次序增加, 沸石为 2.2, 正长石为 2.56, 石英为 2.65 克/厘米³。石英玻璃的硬度为 5, 密度为 2.3。

图2 硅酸盐中 SiO_4 四面体的排列

(a) 单链硅酸盐 (b) 双链硅酸盐
(c) 环状硅酸盐 (d) 层状硅酸盐

各向异性物料，例如石墨或辉钼矿常常是熔点高但硬度低，似乎违背了硬度与晶格能之间的正比关系。其原因在于象硬度和解理这样一些力学性质是取决于最弱的键，而熔点和化学反应性则取决于最强的键。

硬度随温度的升高而降低。就软的材料而言，温度每升高 $20\sim 100^{\circ}\text{C}$ ，硬度大约降低了一级。

(4) 解理

解理主要决定于晶体结构，它与化学组成的关系是次要的。 NaCl ， MgO ， PbS 及其它许多岩盐结构的化合物在平行于立方 $\{100\}$ 面呈现出容易解理的性质。 CaCO_3 的晶体结构是 NaCl 的一种畸变结构，方解石特征的解理菱形六面体也相应于岩盐的解理立方体。

矿物中有许多解理的很好实例。白云母可以解理成许多薄片，与其他层状硅酸盐一样，解理是在硅酸盐层间进行的，即断开 $\text{K}-\text{O}$ 键。滑石、石墨、辉钼矿都是层状硅酸盐，易于解理。

在大多数矿物中，硅——氧键是最强的键。硅酸盐基团的各向异性——如在层状硅酸盐中——一般是造成解理的主要原因。辉石和闪石是两种链状硅酸盐，其 SiO_3 或 Si_4O_{11} 链沿轴伸展。解理发生在平行于硅酸盐链的四个 $\{110\}$ 面。

当存在的成键类型不只一种时，解理时断裂是最弱的键。石膏沿平行于 (010) 解理，打断了一层氢键，而保持较强的离子键和共价键不动。

(5) 脆性破裂

所有的材料在大的拉伸应力下产生断裂，不过断开的方式却不一样。脆性破裂常常是由于不稳定裂缝的快速发展而导致的。裂缝沿垂直于主拉伸应力的方向行进，所消耗的能量相当小，基本上就是用来产生新的表面所需要的能量，约为 10^3 尔格/厘米²。破裂的速度范围从靠近零到大约一半膨胀应力波速度的限定速度，在 MgO 中约为5000米/秒。具有界限分明解理面的结晶固体比起玻璃及其它各向同性材料来破裂速度较高。

二、粉碎引起的机械化学反应

固体物料受到冲击、压缩、破碎、磨碎、混合等机械作业所施加的机械能的作用，引起物料自身的构造发生变化，即引起物料的物理性质与化学性质的变化，称为机械化学反应。

机械化学反应，如粉碎食盐产生氯气，粉碎碳酸盐产生二氧化碳，石英受冲击、压缩被细粉化和无定形化。石英与方解石混合、粉碎被细粉化和无定形化。石英与方解石混合，粉碎生成硅酸钙，金属氧化物与 $\alpha\text{-FeOOH}$ 混合、磨碎生成尖晶石。 F^{++} 离子与 N^{+++} 离子的水溶液混合产生的沉淀，在磨碎过程中生成铁和镍。许多高分子物质，经机械处理分子键断裂，分子量减小或相反形成连接的聚合物，分子量增加。

矿物晶体在粉碎过程中，受机械应力的作用而发生的变化，可分为四类：

(1) 粒径的减小到引起表面能增加。

把固体微细化，必须克服粒子内的结合力。每克分子颗粒所含有的能量，粒径愈小则愈大。实际上用微细粒与粗大粒所含能量的差来表示表面能。

表2是将棱边长100微米的铜微细化成 $100\text{\AA}$ 时，1克原子中的粒子数、表面积、表面能、表面能与结合能的比值。

表2

铜的微细化与表面能

棱边长度	1克原子中的 原子数	1个粒子的 重量(克)	表面积 (厘米 ²)	表面能 (卡)	表面能/结合能 (%)
100 Å	7.10×10^{18}	9.07×10^{-18}	4.2×10^7	1.40×10^8	1.75
1000 Å	7.10×10^{18}	9.07×10^{-18}	4.2×10^6	1.40×10^2	0.175
1 μ	7.10×10^{18}	9.07×10^{-18}	4.2×10^5	1.40×10^1	0.0175
10 μ	7.10×10^{18}	9.07×10^{-18}	4.2×10^4	1.40×10^0	0.00175
100 μ	7.10×10^{18}	9.07×10^{-18}	4.2×10^3	1.40×10^{-1}	0.000175

注：1克原子(63.54克)铜的粉末的表面能：原子容7.10，表面张力1500达因/厘米，凝聚能81.2千卡/摩尔。

(2) 受机械应力与周围环境的影响，使表面构造与内部构造产生差异，引起表面性质的变化。

在空气中，物料粒子表面形成无定形膜式氧化膜。在这种情况下，表面层的厚度随着粉碎过程的进行有一定的变化，一般是增厚。属于此种情况的有：石英(α -SiO₂)，铝，锑，铋，碲， α -氧化铁，锐钛矿型或金红石型的二氧化钛等等。

在湿式磨矿中，机械化学反应远比在空气中复杂。

布里翁(D. Brion)用化学分析电子光谱(ESCA)法测定了在磨矿和浮选过程中黄铁矿表面化合物的特性。他指出了在不同pH下黄铁矿的表面组成：

在棒磨机内磨矿后，矿浆pH为9。矿浆的氧化还原电位(Eh电位)-475毫伏。此时黄铁矿表面不再是硫化物表面，而是形成氢氧化物层。其谱线与针铁矿的谱线很相似。表面硫的含量比刚干磨的黄铁矿要少得多。因此，70%的表面是FeOOH形式。虽然它很可能是Fe(OH)₂或Fe(OH)₃。剩下的30%铁相当于黄铁矿的硫化铁。在pH为7、8及11时，情况大抵相同。

在pH为3.0时，在棒磨机内磨矿，静置2分钟，不充气和充气搅拌10分钟之后，表面组成是不相同的。与刚干磨的黄铁矿相似，因为酸清洗了黄铁矿表面。

普雷德阿利(J. J. Predali)等人的研究证实，在与上述相同的条件下，pH>9时，纯方铅矿表面及棒磨机中再磨过的复杂矿石的铜精矿表面，也观察到氢氧化铁复盖层。

伊沃塞基(I. Iwasaki)等于进行的自磨和球磨对硫化矿浮选的研究中发现自磨产品中铜、镍、钴和硫的回收率大于类似球磨产品的相应指标。从浮选产品的粒度分布特性分析和显微研究中得出，这是磨矿介质和硫化物之间的相互作用，而不是这两种磨矿方式的破碎特性所导致的浮选性的差异。

卡塞(J. M. Cases)等在不同类型的细磨对矿物(石英)的影响研究中，认为破碎能引起受大气水蒸气局部饱和的化学键的断裂，因此，矿物表面拥有较高的界面能；磨擦和冲击磨矿的细磨方式趋向于产生与硅胶性质相似的干扰表面层，此硅胶将破碎后的新生表面场饱和并阻止浮选捕收剂的吸附；化学浸蚀加重了饱和现象并且不能再使粗碎产品的表面性质恢复；采用干式球磨使矿样受到金属铁自由粒子的污染，但从所使用的磨矿方式来看，此方法对减少捕收剂对矿物表面亲合力的作用最小；湿式磨矿引起氢氧化铁污染，从而抑制了捕收剂的吸附；破碎的细粒对捕收剂的亲和力大小界于粗产品和大部分磨矿产品之间，这表明表面场的下降不仅与破碎方式有关，且与获得的颗粒大小有关。

(3) 机械应力所产生的构造应力传递到矿物的内部，极端程度使构造失去结晶性。

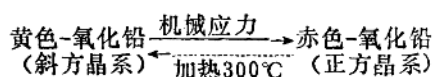
在机械应力所产生的构造应力的作用下,一些矿物整个构造慢慢地不规则化。产生这种现象的多为层状构造类的矿物,如大多数的粘土矿物,滑石、石墨,二氧化钛,氧化锌等矿物。许多矿物属于在粉碎过程中,在应力作用下开始有层状构造,最后结晶构造消失成为无定形的。

构造失去结晶性与使用的磨矿设备性能有关。艾特金(Y, Aytakin)在研究土耳其东海区的四个铜—铅—锌复合矿床时,发现在振动磨矿机与碾磨机中细磨混合精矿时,对磨矿产品的x射线显微结构谱线图进行了对比,结果表明:在振动磨矿机中磨得的试样产生了x射线非晶形化现象,晶格畸变的数目与磨矿时间成正比。在碾磨机磨得的试样中并未发现随着磨矿时间的延长而产生的x射线非晶形化现象。

日本学者对绢云母粉末状粒度进行超细磨及将其薄片状颗粒改变及颗粒特性进行磨矿研究时,发现天然绢云母在干式超细磨处理3小时以上时,有生成颗粒的现象,长时间干磨时,产生矿物结晶水发生变化、颗粒变形的机械化学作用,影响颗粒的吸附特性和凝聚性。在湿磨时,在乙醇中,薄片状粉碎好。

(4) 其他结晶性构造的变化。

机械力引起物料结构的多种形式间的转移,克拉克(Clark)和罗恩(Rowan)用黄色氧化铅在球磨机内磨碎时,生成了赤色氧化铅,其变化如下:



碘化银亦有此现象。属于这种类型的转移的还有:碳酸钙的方解石→霞石,钙·碳化钙由Ⅲ型→Ⅱ型,各种二氧化钛由锐钛矿型→金红石型。而且 γ -氧化铁、二氧化铅、氧化铈等也是如此。除这些无机物外,还有一些有机物,机械应力使其从稳定型→不稳定型。

三、物理化学环境对粉碎过程的作用

物料在细磨时,磨矿的物理化学环境改变,会改变矿物的粉碎过程。早在1931年列宾捷尔(П. А. Resinger)就已着手研究,近年来,已变到越来越多的重视。这种重视,尤其表现在对粉碎性质的人工调节和助磨剂的研究。

(1) 水介质的作用

水介质侵入岩石后,岩石强度减低的情形早已被人们所发现。为水所饱和的岩石在干燥时能恢复其强度,这种岩石强度减低现象是一种可逆过程。

水对岩石强度的影响,在很大程度上决定于岩石的孔隙和裂缝。在其他条件相同的情况下,孔隙性较大和裂缝发达的岩石被水浸湿时,强度减低的程度也大些。

水入侵岩石后,不仅影响岩石的强度,而且会减低杨氏模数。这种现象在多孔岩石中表现得特别明显,如为水饱和的矿岩,其杨氏模数就比干砂岩要小三分之二。

所以,常规的湿式磨矿常常比干式磨矿更有效。

2) 吸附效应的作用

П. А. 列宾捷尔认为,固体在介质作用下发生应变和破坏的过程中,其机械性质之所发生变化,主要是由于固体和周围介质间分界面上所发生的物理化学现象,即由于润湿现象和

吸附现象。只有在对于固体具有很大润湿能的介质中，或者在含有易吸附于固体表面的物质的介质中，固体的机械性质才会发生变化。

在固体发生应变的过程中，会不断出现新的裂缝，它们呈楔形沿裂缝从各方面伸入到物体中去。这种新生的表面很快就被单分子的被吸附层所遮盖，这些单分子被吸附层一直能钻到裂缝的厚度小于被吸附原子或分子的大小的地方为止（图3）。

列宾捷尔发现，吸附的物质（表面活性剂）有降低固体强度的效应。在这个效应中，表面活性剂分子在微细裂缝中二维移动的动力，降低固体的自由能，它们引起：

$$\Delta\sigma_n = \sigma_n(o) - \sigma_n(I) \quad (1)$$

式中： $\sigma_n(o)$ ——在真空中固体的表面能；

$\sigma_n(I)$ ——表面活性剂分子达到饱和程度时的固体表面能。

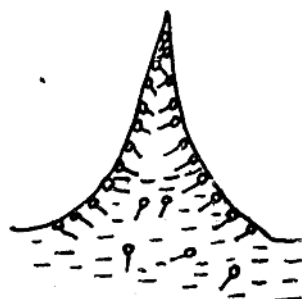


图3 被吸附层钻入的情况

方程式（1）也能表示出单位长度的被吸附层边界上被吸附层的二维压力的 P 大小，即：

$$P = \Delta\sigma_n \quad (2)$$

这种压力特别要发生在微缝最窄，但吸附层还能进入的地方，同时也是被吸附层楔入作用能造成附加应变的地方。

此外，还可以推测出被吸附物质进入固体内的另一种机理：当微缝在液面下形成时，微缝空间处于绝对真空状态，所以液体的蒸气和液体中所溶解的物质能够马上饱和微缝的空间，同时被吸附层能盖住微缝的整个表面。

在表面活性物质存在的情况下发生破碎时，被吸附层就会很快地传播开来，深入很细的裂缝中，结果撤去载荷后，微缝不能在分子引力的作用下重新闭合。表面活性物质的作用，只有在破碎过程中同时形成碎前带时不能表现出来。为此，破碎过程必须是多次的，周期性的，这样，残余缝隙区才能周期性地转变为破碎区。

所以，能促进破碎过程的助磨剂的作用，不是由于助磨剂与岩石发生纯粹化学相互作用的结果，而是与被吸附的过程有关。这种过程能在被破碎层内造成附加的应力，由于显微缝数目以及显微缝隙渗入岩石深度的增加而使被破碎层变得疏松了。

继此之后，许多研究工作者从不同角度，探讨了各类化学药剂对固体粉碎过程中力学性能的影响，丰富和发展了吸附效应的作用。大量研究表明，吸附效应的作用取决于温度的高低，应力的的大小和应力状态的特点，以及多晶体的化学组成与其分散体的结构，试件直径与试件中的晶粒直径的比值及孔隙等。以外，还与应力状态的持续时间紧密相关。

3. 环境的物理化学性质对矿浆流变特性的作用

在1977年和1979年的第十二、十三届国际选矿会议上，克利佩（R.Klimpel）和埃尔沙洛（H.Elshall）提出，在湿法选矿中，矿浆性质是一个关键因素，水量及助磨剂对矿浆性质的影响极为重要。克利佩认为，矿浆中的固体含量，粘度分布特性，化学环境和矿浆温度等因素决定了矿浆的流变特性。

由流变学可知，细粒分散固体组成的矿浆，其流动性可分为：突厄姆（Bingham）塑性流体、微塑性流体和膨胀型流体。

克利佩等人经过长期地研究矿石和煤的选矿循环中的流变特性和磨矿效果的关系，结合