

第二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

1990年4月

目 录

1. 颚式破碎机腔形优化研究……………北京矿冶研究总院 丁培洪 王宏勋 (1)
2. 岩石破碎过程的分析研究……………北京矿冶研究总院 丁培洪 王宏勋 (7)
3. 新型工业脉动高梯度磁选机及其分选原理
……………中南工业大学 刘树貽 陈 蓁 熊大和 刘永之 (14)
4. 河南文峪金矿浮选混合精矿振动高梯度磁分离铜铅的研究
……………中南工业大学 孙仲元 何平波 河南冶金研究所 崔亚锋 凌敦平 (15)
5. 磁种分选技术的进展……………北京科技大学 松金元 陈绍林 (27)
6. 短选道摇床……………地矿部技术经济研究中心 刘鹤荣 (32)
7. 海滨砂矿筛选—螺旋选矿新工艺及其移动式采选设备
……………广州有色金属研究院 刘承宗 (42)
8. 重选新设备GL—600螺旋选矿机研制及选别实践
……………广州有色金属研究院 向延松 (执笔) (48)
9. 振动及回旋运动对床层分层的影响……………中南工业大学 许德明 (55)
10. 水力旋流器分选人造材料——空心玻璃微珠的探讨
……………长沙矿冶研究院 鄢汉骐 (61)
11. 苯基膦酸单酯的合成及其在非硫化矿浮选中的结构效应
……………中南工业大学 林 强 卓志云 吉干芳 王淀佐 (65)
12. 磷酸酯基二硫代甲酸钠的制备及其浮选性能的量化研究
……………中南工业大学 林 强 杨晓玲 吉付光 王淀佐 (71)
13. 两性捕收剂浮选泡沫特性的研究
……………中南工业大学 梅贤功 武汉工业大学 许 时 翁伟雄 (75)
14. 盐类矿物浮选分离条件的溶液化学计算预测
……………中南工业大学 胡岳华 王淀佐 (81)
15. 新型两性捕收剂浮选盐类矿物的研究
……………中南工业大学 王淀佐 胡岳华 林 强 (84)
16. 使用助磨剂对细粒锡石可浮性的影响……………昆明工学院 杨 敖 (86)
17. 腐殖酸钠在硫化矿除砷中的应用……………昆明工学院 钱 鑫 (87)
18. 矿物浮选与化学元素周期表(I)……………湖南有色金属研究所 周 菁 朱一民 (96)
19. 矿物浮选与化学元素周期表(I)
……………湖南有色金属研究所 朱一民 周 菁 (99)
20. 在孔雀石的硫化—黄药浮选中硫酸铵的硫化促进作用研究
……………昆明工学院 张文彬 (102)
21. 硫化铜矿石浮选新工艺的设计和研究
……………中南工业大学 孙永裕 李柏淡 吉干芳 王淀佐 (109)

22. 无捕收剂浮选小寺沟黄铜矿的试验研究及生产实践
.....小寺沟铜矿选厂 刘宝岱 (115)
23. HA与石灰组合剂在铜镍硫化矿浮选分离中的作用机理
.....中南工业大学 孟书青 王毓华 胡熙庚 (119)
24. 氧化矿与硫化矿混合浮选的可行性研究.....大姚铜矿 王振亚 (129)
25. 微细粒氧化铜矿疏水性团聚浮选的研究
.....长沙矿冶研究院 刘建军 中南工业大学 吉干芳 王淀佐 (139)
26. 坑道废水加细菌堆浸采场废矿和选厂尾矿中铜的开发研究
.....江西省科学院微生物研究所 肖美文等 (146)
27. 一种生产铅锌混合精矿的新工艺—铅锌异步混合浮选
.....北京矿冶研究总院 李凤楼 孙传尧 赵纯禄 (150)
28. 硫化铅锌矿除砷的研究.....昆明工学院 钱鑫 李廷勋 (158)
29. “CP”合剂抑制方铅矿的机理
.....长沙有色金属专科学校 龚明光 广州有色金属研究院 顾 禹 (164)
30. 硫磺山银铅矿选矿工艺流程的研究
.....广州有色金属研究院 马天民 张先华 (171)
31. 多金属硫化矿浮选工艺的发展及应用.....黄沙坪铅锌矿 周如松 (179)
32. 从广东省瑶岭钨矿中回收钼银铋铜等的研究
.....广州有色金属研究院 张有仁 (187)
33. 脆硫锑铅矿、铁闪锌矿和黄铁矿的浮选分离工艺及理论
.....北京矿冶研究总院 李长根 (193)
34. 采用选一冶联合工艺强化钨矿综合回收的研究
.....赣州有色冶金研究所 林海清 (204)
35. 人工合成 $MnWO_4$ 和 $FeWO_4$ 研究黑钨矿系列的可浮性
.....南方冶金学院 乔光豪 施辉亮 (211)
36. 论锡石硫化矿选矿流程中的脱硫
.....昆明有色冶金设计研究院 孙得成 (220)
37. 采用联合选矿工艺提高锡回收效.....云南锡业公司研究所 刘思国 (229)
38. 锡石、赤铁矿和石英体系选择性絮凝分离的研究
.....昆明工学院 杨 敖 邱雪平 石道民 (234)
39. 辉钼矿的载体浮选.....杨家杖子矿务局选厂 刘尚清 (244)
40. 从全浮硫化矿中优先分离辉钼矿的新调整剂的研究
.....广州有色金属研究院 张有仁 (251)
41. 金川镍矿选矿产品方案及两产品浮选工艺
.....中南工业大学 黄开国 胡熙庚 金川有色金属公司 曾晓晰 (257)
42. 金川二矿区硫化镍矿石浮选新工艺及机理研究
.....中南工业大学 王伟东 刘金华 胡熙庚 (262)
43. 广西桂东北离子吸附型稀土试验研究的实践.....大厂矿务局 刘瑞林 (269)
44. 我国各类铀矿床矿石的选矿研究.....中南铀矿地质研究所 周春艳 (273)

45. 电凝聚法强化细粒锰精矿的浓缩脱水
..... 武汉钢铁学院 翁 达 丁忠浩 (280)
46. 金红石的选矿..... 中南冶金地质研究所 吕世海 (285)
47. 攀枝花钛铁矿浮选研究
..... 攀枝花钢铁研究院 冯成建 张厚生 昆明工学院 钱 鑫 (294)
48. 微细粒钛铁矿油团聚的研究..... 中南工业大学 陈万雄 朱德庆 陈 荃 (301)
49. 几种小分子有机抑制剂的合成及其对黄铁矿、毒砂的抑制性能
..... 中南工业大学 林 强 金华爱 王淀佐 (302)
50. 100米³双层燃烧室焙烧炉焙烧酒铜铁矿石的工业试验
..... 酒钢公司选厂 程瑞英 (307)
51. 粉煤办资源化研究的现状..... 长沙矿冶研究院 唐林生 (315)
52. 磨矿分级过程最优控制策略研究..... 中南工业大学 苏 震 (319)
53. 磨矿分级回路自校正控制仿真的研究
..... 曾文清 钱 鑫 缪尔康 万太福 (328)
54. 不断改进药剂添加监测控制手段稳定提高选矿经济技术指标
..... 广西德保铜矿 唐 刘 谢云生 (333)
55. 浮选回路的自适应超前预报模型
..... 中南工业大学 尹 蒂 李松仁 胡为柏 (335)
56. 磁流体静力跳汰分选(MHSJS)的研究
..... 南方冶金学院 黄万抚 卢继美 许孙曲 (345)

颚式破碎机腔形优化研究

北京矿冶研究总院 丁培洪 王宏勋

一、破碎腔形优化研究的重要性

颚式破碎机自问世以来,以结构简单,高度小,规格多,适应性强和制造维修容易等优点被广泛地用于冶金矿山、建材(水泥和碎石)、化工等部门。而近年来,特别是移动式破碎筛分厂以及井下破碎的发展,促进了颚式破碎机的研究和新机型的开发工作。对新型颚式破碎机提出了更高的要求,如:减小体积(亦即减轻机重),提高处理能力,降低产品粒度,提高颚板寿命和使用率等。为此,国内外厂家和研究人员从不同角度进行广泛研究,使其结构和性能有了不同程度改善,推出了一批新机型。

我国在颚式破碎机研究方面起步较晚,而且许多专家都把研究的焦点集中在结构优化和有限元分析方面,优化的约束方程和边界条件都是取自经验方程和研究者的经验。这只能提高设计计算速度,对破碎机工艺性能改进并不大。

颚式破碎机工作区断面形状,也就是腔形的研究被忽视了,而这又恰恰是影响破碎机工艺性能的重要参数。所以,腔形的优化研究是非常重要的研究课题,因为,腔的动态变化是破碎物料的原动力。机械电子工业部已把颚式破碎机腔形优化研究列为八五期间科技攻关重点课题,可见其重要意义。

二、国外典型腔形技术特点分析

在所有的优质复摆颚式破碎机中,除了都有各自的结构参数和运动参数外,它们都有着独特的破碎腔形状。

美国Allis-Chalmers公司生产的S—T型复摆颚式破碎机(图1),采用高深破碎腔,小咬角,破碎过程中物料没有打滑现象。排料口处腔形为不易阻塞的曲线形状,实现了非阻塞排料,颚板的磨损有显著改善。

捷克Ragcinuest公司生产的DCJ系列颚式破碎机也有一个独特的破碎腔形。据介绍使用效果良好(图2)。

苏联全苏建筑与筑路机器制造所曾对各种纵断面形式和齿形参数进行了研究(表1)。国外几种性能优异的颚式破碎机腔形的共同特点是:

1. 高深式破碎腔,以利于实现大破碎比;
2. 小的咬角,强化破碎作用;
3. 曲线型不阻塞破碎腔,减少摩擦,强化破碎作用,延长颚板使用寿命;
4. 合理的结构参数和运转参数与之相匹配。

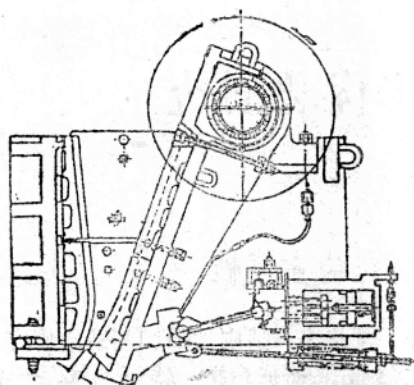


图1 U.S.A Allis-Chalmers
公司S-T型颚式破碎机

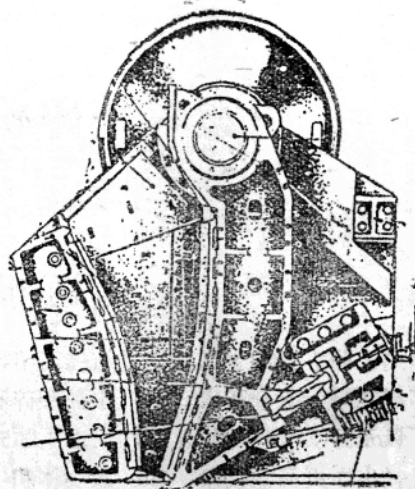


图2 捷克DCJ型颚式破碎机

但如何定量确定和计算优化破碎腔参数，
尚未见公开报道，如何与特定的破碎物料性质和工艺要求相适应尚没有从理论上和实践上解
决。

表1 各种纵断面破碎腔的技术参数

断面 形式 No.	断 面 形 式	用 途	制 造 厂 (公 司)	生产率 Q (吨/时)	破碎产品 平均尺寸 dcp (毫米)	破碎比 i ≤ 22.1 dcp	所需 功率 N (千瓦)	综合 指标 $K = \frac{Q_i}{N}$
1	V	一般用途	Zemag(东德) Pegson(英国) Dragon(法国) ВЫКСУНСК(苏联)	0.296	4.85	4.55	1.65	0.82
2	V	细碎	Pegson(英国) Grundler, Pioneer(美国)	0.316	5.42	4.10	2.20	0.59
3	V	细碎	Dragon(法国) Pegson(英国) Lorparisini(意大利)	0.292	4.94	4.46	1.48	0.88
4	V	细碎	"Fac"(法国) Makrun(波兰)	0.265	4.74	4.67	1.55	0.80

续表1

5		中碎	Esch-Werke(西德)	0.320	6.00	3.68	2.00	0.59
6		粗碎	Treilor (美国) Kurimotto (日本)	0.285	4.90	4.50	1.75	0.73
7		粗碎	Волгоцем (苏联) Treilor (美国) Kurimotto (日本)	0.238	4.33	5.12	1.70	0.72
8		一般用途 (主要是 烧结物料 的破碎)	全苏建筑与筑路机 器制造研究所试验的断 面形状	0.260	4.86	4.54	1.65	0.72
9		同上	同 上	0.275	5.23	4.23	1.70	0.68
10		主要是 粗碎	同 上	0.327	4.90	4.50	1.55	0.95

三、破碎腔形优化研究

颚式破碎机优化腔形是什么呢？也就是优化的目标函数的确定问题。我们认为：优化腔形应当是根据被破碎物料的性质及工艺的要求，确定高处理能力，大破碎比，低磨损的优化腔形和与其相匹配的结构参数和运转参数。更具体地说如何处理腔形各点咬角、腔断面形状和运转参数合理匹配问题。

对于颚式破碎机优化腔形，必须全面考虑破碎机诸因素的影响。如主轴偏心距大小、摆频、颚板长度、颚板倾角、肘板长度、主轴悬挂位置、肘板支承点等等。一台新设计的颚式破碎机，在设计时可据此优化。也就是说，由于原始条件的不同，设计出发点的差异，可以得出各种类型的优化腔型。设计的优劣就必然和设计者对破碎机了解的深度和经验的丰富程度有很大的关系了。

为了深入研究优化腔形，我们采用电子计算机的动态模拟方法，对北京人民矿山机械厂新型PEX250×750强力复摆颚式破碎机的破碎腔进行观察和分析。图3给出动态模拟程序框图。

在分析中发现该机的设计机理上存在着缺欠，它的动态工作咬角（见另文）远远大于物料与颚板间的许用摩擦角的两倍。当然这主要是由于传统的设计理论造成的。传统理论提出

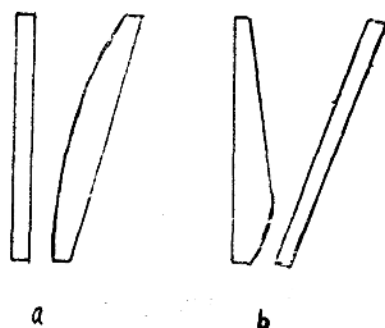
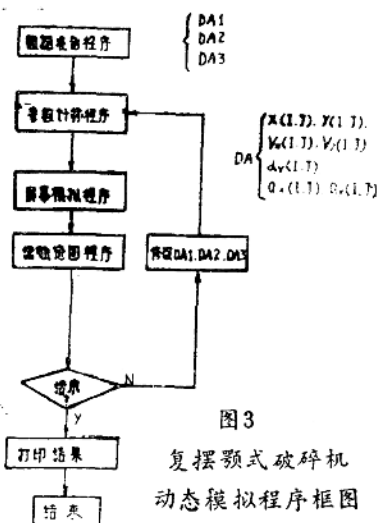


图4 两种破碎腔形
a—原圆弧腔形；b—改进后新腔形。

的 $\alpha < 2\varphi$ 这一公式是基于静态的简摆颚式破碎机而导出的，使其用于动态的复摆颚式破碎机必然有很大的局限性。

为了改善250×750破碎机性能，在北京人民矿山机械厂的支持下，我们运用我们提出的“动态咬角”设计思想和设计方法，采用CAD设计了新颚板形状，组成新的优化破碎腔形。图4给出了两种腔形示意图。

为了考察新腔形的工作效果，我们在对各种变量进行了筛选后，确定只对破碎腔的形状进行改进（图4b），而颚板的材质、热处理条件和齿形等参数暂不做任何变动，以显示破碎腔形状的单—因素影响结果。

表2 给 料 粒 度 分 布

粒级（毫米）	单重（公斤）	百分含量（%）	累积百分含量（%）
- 210+180	101.15	37.02	37.02
- 180+135	22.90	8.38	45.40
- 135+95	28.00	10.25	55.65
- 95+75	17.00	6.22	61.87
- 75+42	15.20	5.56	67.43
- 42+26	21.20	7.76	75.19
- 26+22	6.45	2.36	77.55
- 22+16	10.70	3.92	81.47
- 16+12	3.35	1.23	82.70
- 12+10	4.95	1.81	84.51
- 10+8	6.60	2.42	86.93
- 8	35.70	13.07	100.0
合计	273.20	100.0	

两种腔形的工业对比试验选择在某选矿厂的同一台现役PEX 250×750复摆颚式破碎机上进行的。对比试验工况条件相同，所以具备良好的可比性，使之更有说服力。表2、表3和图5列出了在山东××金矿对比试验结果。试验物料为石英脉含金花岗岩矿，抗压强度为210MPa。

表3 PEX 250×750复摆颚式破碎机腔形对比(粒度百分含量与排料)关系

腔形	粒度 (毫米)		+42	-42+26	-26+22	-22+16	-16+12	-12	P ₈₀ (毫米)	生产能力 (吨/时)
	排料口 (毫米)									
原腔形	14	γ%			3.24	16.21	5.99	74.56	16.0	17.90
		Σγ%				19.44	25.44	100.0		
	18	γ%			13.32	20.85	5.34	49.30	23.5	25.10
		Σγ%		11.19	24.51	45.36	50.70	100.0		
	25	γ%			12.05	15.40	3.35	53.57	25.6	30.07
		Σγ%		15.63	27.68	43.08	46.43	100.0		
改进腔形	31	γ%			6.92	12.71	3.91	48.50	31.0	34.30
		Σγ%	1.37	26.59 27.96	34.88	47.59	51.50	100.0		
	15	γ%				15.08	8.96	75.96	14.0	19.28
		Σγ%					24.04	100.0		
	17	γ%			2.82	18.15	5.53	74.50	16.0	23.81
		Σγ%				20.97	26.50	100.0		
新腔形	22	γ%			7.09	20.07	6.69	63.21	18.5	26.49
		Σγ%		0.94	8.03	28.10	34.79	100.0		
	25	γ%			10.01	20.28	5.08	59.42	21.0	28.25
		Σγ%		4.59	14.60	34.88	40.58	100.0		
	32	γ%			17.43	20.43	4.24	41.97	25.0	34.37
		Σγ%		15.93	33.36	53.79	58.03	100.0		

本次试验的主要考察内容为两种颚板形式对产品粒度、生产能力和生产过程中颚板磨损量的影响。这三个指标对评估破碎机工艺性能是非常重要的。表2给出了破碎机给料的粒度特性，表3是两种腔形试验结果，图5为两种腔形在生产能力相近情况下产品粒度对比。

从表3可以看出：在设想的优化范围内，在产品粒度相近的情况下（P₈₀相近），新腔形生产能力比旧腔形高15~30%；在生产能力相近情况下，产品粒度P₈₀，新腔形比旧腔形降低4~5毫米左右。

对于金属矿山，由于应尽量降低产品粒度，破碎机在较小排料口工作，新腔形产品粒度小，细粒度含量高；对于碎石工业，产品粒度要求均匀，且不过碎，破碎机宜于在中等排

料口处工作，大排料口不是本试验优化范围内，故不作考察。

对于普通复摆颚式破碎机，颚板下端磨损极为严重，故不易于长期保持在较小排料口工作，故旧腔形尽管试验结果不十分粗大，但在工业上是不能实现的。

颚板的磨蚀量是新型颚板的另一重要检测指标，以一个工作周期内颚板的净减轻量与所加工的矿石吨数的比为单位净磨蚀量的定义。新型颚板的单位净磨蚀量为 37.53 克（高锰钢）/吨（矿石），以前采用的圆弧形颚板的净磨蚀量为 86.13 克（高锰钢）/吨（矿石）。从净损耗的角度来讲，颚板的高锰钢的有效利用率提高了 1.29 倍。可见，提高目前颚式破碎机颚板的寿命、降低高锰钢的消耗量是完全可能和可行的。此外，如对颚板的齿形和颚板结构再做一些改进工作，上述的三个技术指标仍有潜力可挖。

这一技术的应用对我国现有破碎机的改造无疑是有效的。同时，对于新的颚式破碎机开发来说，破碎腔形状的设计应该视为颚式破碎机结构设计的重要组成部分，以综合设计高效颚式破碎机。

为了进一步验证我们提出的优化设计思想和程序的可靠性，于 1989 年又对 250×400 深腔型颚式破碎机和 150×500 悬挂颚式破碎机进行了优化试验。试验是在 ×× 碎石场进行的，试验得到了较好的效果，其结果绘于图 6 和图 7。

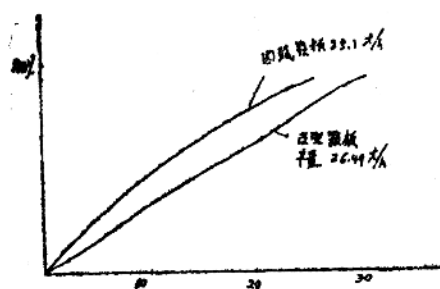


图5 250×750颚式形对比

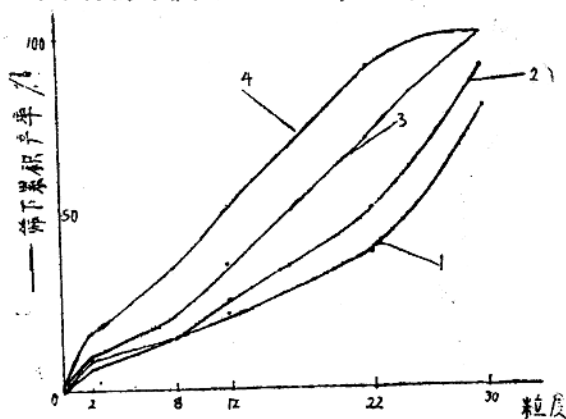


图6 250×400颚破碎机新腔形测定结果

注：给入原始物料为200毫米左右的石灰石，1#的产量为19.3吨/时；2#的产量为15.1吨/时；3#的产量为10.5吨/时；4#的产量为7.5吨/时。

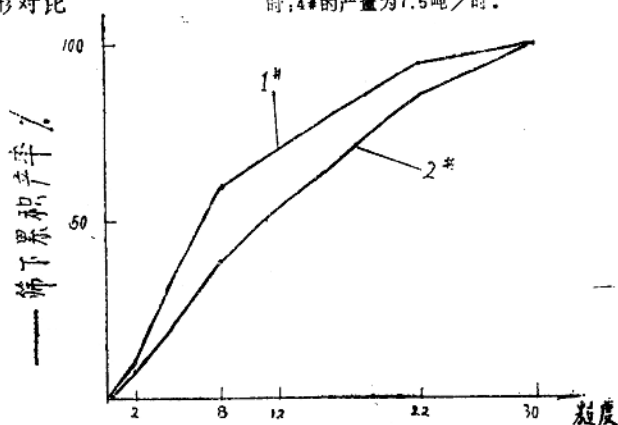


图7 150×500颚式破碎机新腔形测定结果

注：给入的原始物料均为100毫米的石灰石，1#的产量为6.84吨/时，2#的产量为8.8吨/时。

四、几点看法（代结语）

颚式破碎机的腔形优化设计问题已引起国内外专家们广泛地注意。美国 Allis-Charlmers公司、Rexnord公司,瑞典MS、日本神户公司等先后开发了腔形和参数优化软件系统。机密性极强,从未公开报道。但据我们了解多从容积平衡角度进行优化。国内专家多用图解法和静态咬角进行研究,这一观点有很大局限性。

作者通过两年多岩石力学和动力学分析,在分析国外典型破碎腔结构和研究结果的基础上,提出了动态咬口和无摩擦设计新思想,利用电子计算机进行模拟计算,并对PEX₂ 50×750复摆颚式破碎机的破碎腔形式进行了改造,并在相同的工况环境和条件下进行了工业对比试验。其结果证明用动态咬角思想设计的破碎腔,使该破碎机的粒度、产率、单位净磨蚀量这三个主要技术性能指标都得到了较大幅度的提高。

颚式破碎机的腔形研究,推广工作现已开始,随着工作的深化,优化设计思想和方法将会得到进一步完善,必然会给社会带来巨大的经济效益(参考文献略)。

岩石破碎过程的分析研究

北京矿冶研究总院 丁培洪 王宏勳

一、前 言

岩石力学是以岩体中开采空间的稳定性为基点,特别侧重于物料发生破碎的条件,即岩石发生碎裂前的力学行为。例如:弹性模量、泊松比、扩容性及变形量等。虽然近年来也发展到应力—应变全过程曲线的研究,但由于服务对象的限制,研究时对岩石一次破碎后的力学情况、矿岩在破碎时的状态及破碎后的效果等因素是不予考虑的。而在岩石粉碎领域的研究中,由于目的是使矿岩有效地破碎,故十分注视破碎的效果,常常以整个料层所难的破碎为研究对象,但对破碎的过程,甚至加载方式并不注重,常常只以所施加的能量和获得的破碎效果——粒度的递减来考察,其典型的关系式如(1)式所示

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

式中: E——单位质量物料的粉碎能耗; x——试样颗粒的尺寸; K——反映岩矿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。

n=2时便是雷廷格尔(Rillinger)的表面能粉碎说; n=1时便是基克(Kick)的粉碎相似性学说; 介于两者之间的是邦德的裂纹学说, n=1.5。

物料破碎的能耗、效果同物料所在的环境和施力方式有着直接的关系。在上述的讨论中矿岩在整个破碎过程中的力学特性被忽略了,但对破碎设备来说这一过程的力学性质的变化是重要的,因为破碎设备的工作是以各种形式将力施于岩矿,只有我们把两部分连起来

研究,才能帮助破碎机更有效的工作。

在研究对象的选择上也应考虑到破碎设备的工作性质。因为在机械破碎过程中,其形式可分为:单颗粒的压碎或击碎、颗粒群的压碎、岩矿颗粒在松散状被击碎或相互撞击而破碎。在这些过程中,大多同时存在着“单颗粒破碎”和“层压破碎”现象,即单个岩石颗粒在受到外力作用后的破碎和矿物颗粒群在外力作用下在伴有岩矿颗粒间相互作用的破碎过程,其应力状态比前者要复杂得多。故单颗粒粉碎和料层粉碎构成了破碎机理研究的主要对象,也是岩石力学和粉碎技术间的纽带。故破碎设备工作过程研究应与单颗粒、群体矿物颗粒在不同应力条件下的破碎过程的研究结合起来。

二、岩石颗粒破碎过程的分析

岩石破碎的基本过程表现为颗粒的断裂。颗粒通过接触力而承受载荷,而接触则发生在颗粒与工具之间或颗粒与颗粒之间。接触力使岩石变形并生成应力,当应力足够大时引起颗

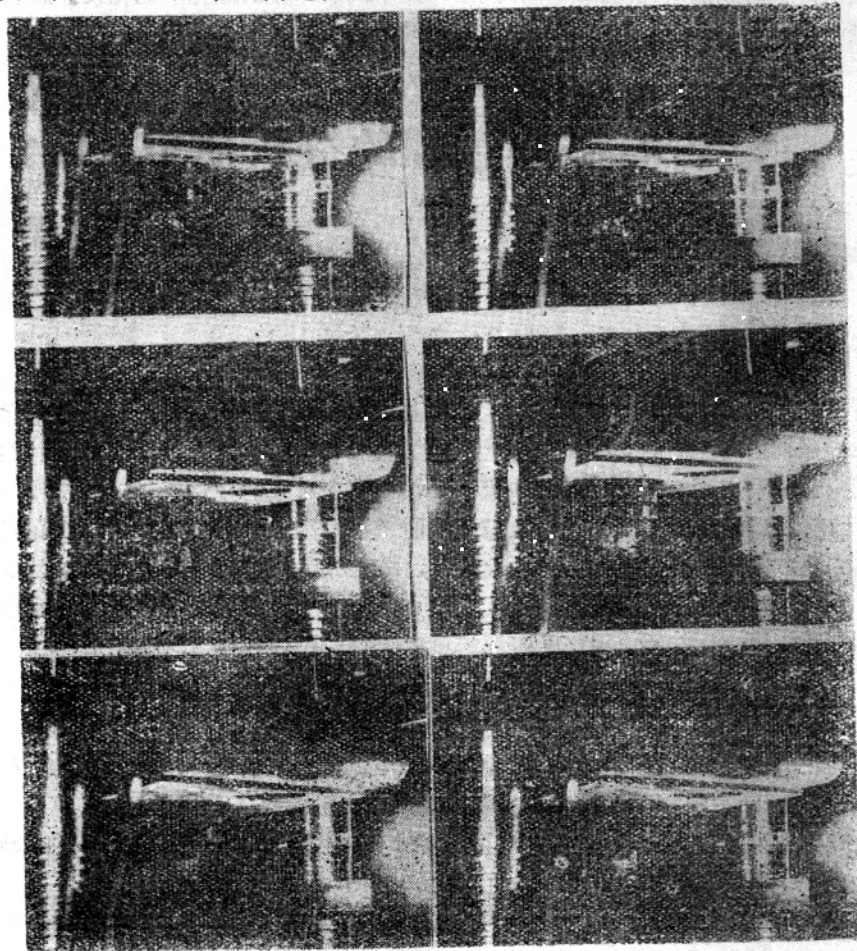


图1 连续拍摄的石灰石破碎过程

粒的断裂,断裂面的数目和方向则决定于碎块的大小和形态,以及生成的断裂表面。而应力状态对于物料是否发生非弹性变形和断裂起着关键作用,这时的变形和断裂过程可看作岩矿颗粒对应力的反应,即对应力状态的反作用,此外,应力状态的形成则取决于作用力、工具的形态、应变速度、岩矿颗粒的形状、岩矿性质等。图1所示为连续拍摄下的石灰石自然颗粒在压力作用下从变形到最终完全破碎的整个过程。

然而,由于岩石自身性质的差异,因是多种矿物组合成的矿物集合体,一般认为存在下述特点:(1)性质不连续和不均质;(2)结构构造上不连续和各向异性;(3)在岩层中水力参数的不均匀分布;(4)岩层内部初始应力的不均匀存在和不连续分布,以及各种矿物中大量存在着的缺陷,如:空穴、裂隙、晶界面等。这些缺陷在有外力作用时必然会引起应力集中,使局部应力增高,形成非弹性变形和微断裂。所以,物料的缺陷在某种程度上决定着物料的强度、破碎功及物料的产品粒度。为了保证测试数据的可用性及规律性,本试验采用了 $\phi 19$ 毫米中碱玻璃球、石灰石球、石灰石自然颗粒为研究对象。这些物料的性质比较稳定,有代表性。试验容器为钢筒和钢压头,压力机为因斯通 (INSTRON) 8000 液压伺服试验机 and YED-2000 型液压试验机。

图2、图3、图4分别为 $\phi 19$ 毫米中碱玻璃球、 $\phi 20$ 毫米石灰石球、石灰石天然颗粒在压碎试验时的压力——位移曲线。其破碎的物理过程如图1、图5所示。

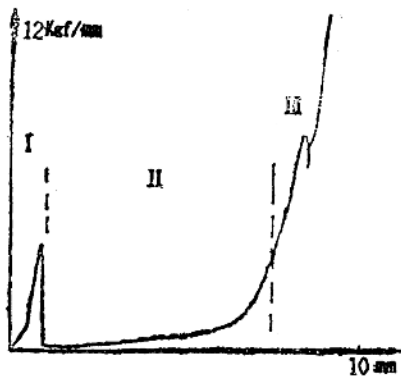


图2 $\phi 19$ 毫米玻璃球的压力——位移曲线

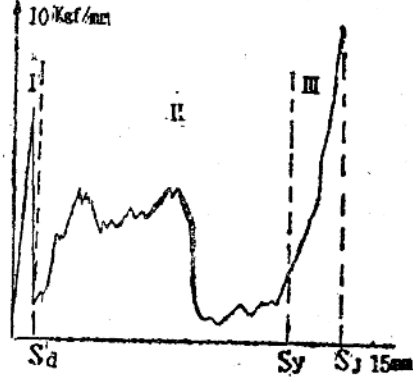


图3 $\phi 20$ 毫米石灰石球的压力——位移曲线

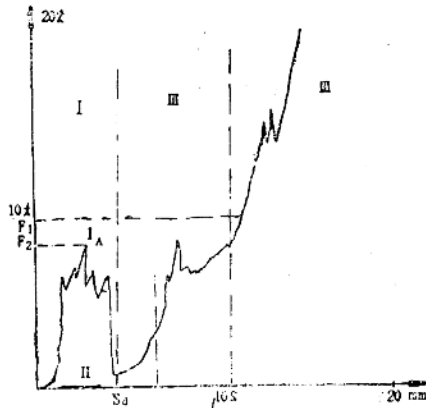


图4 石灰石自然颗粒物料的压力——位移曲线

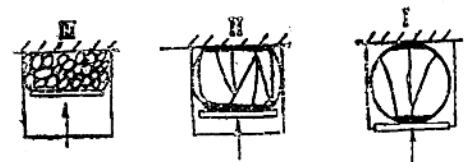


图5 压碎过程中的球体

在对整个过程的压力——位移曲线和连续拍摄的照片、示意图中可以看到，在对试验体的加载初始，几种材料的力学性质大致相同，物料发生呈线性的弹性变形并吸收能量，在达到一定值时便发生第一次破碎，并在瞬间内卸载；自然颗粒中由于棱角的存在而发生一定程度的波动，故这一阶段中球体与自然颗粒的压力——位移曲线有所不同。碎裂的物理过程为试件的初次碎裂。这时的岩矿将吸入能量的一部分增加新的表面积，一部分能作为弹性能释放出来；这一阶段就是岩石力学中稳定性的条件。在岩石发生了初次碎裂后，由于生成了许多裂纹和崩溃，压力——位移曲线表现出压下行程的大幅度位移，而压力没有上升趋势。这时的岩矿由初碎时的几块，迅速扩展成为若干片状，随后又被压折，这一区域是比较有效的破碎，物料受力状态也较简单，基本上是单向受力。压头的连续加压很快就使压力——位移曲线呈现了陡然上升的趋势，压力直线拔高；这是由于破碎物料在被压折后进一步细化，载荷接触面增加，碎块之间形成了相互的接触，颗粒由初始的单向荷载力过渡到多向受力，同时由于岩矿颗粒的细化，使裂隙、界面、空穴等内在因素的影响进一步降低，导致这时的破碎力加大。

这些结果表明，在外载的作用下，破碎应力呈波状变化，并在后阶段表现为很高的应力幅，为了能够全面的描述这一过程，作者将整个加载过程定义为三个阶段，如前面的压力——位移曲线中所示，它为破碎过程的分析提供了条件。

第一阶段为碎裂阶段，物体在外力的作用下吸收能量，生成裂纹并破碎，产物的形式为几个大块和一些小碎块；

第二阶段为压折阶段，第一阶段中产生的几个大块被相继压成片状，并压折，这一阶段的特点是间隙较多，能耗不高；

第三阶段为压实阶段，随着片状物料被压折，所生成的细小颗粒进一步填死了间隙，接触面加大，压力迅速上升，破碎效果下降。

在上述过程中，第一阶段是必须的破碎区，是完成碎裂的先决条件，这时由于裂隙是第一次扩展，体积膨胀现象并不严重。第二阶段的特点在于生成大量的细粒物料，并使之充满腔体，物料堆体积增加。第三阶段是压实阶段，它的物理特性表现为：物料间隙被压实，堆体积下降，压力迅速上升，用于克服摩擦阻力的能量增加。从破碎效果和能耗的角度来分析，一、二阶段都为有效的破碎区域；三阶段时，由于压实现象发生，故对颚式和圆锥式破碎机是不能用的。

上面我们对玻璃球、石灰石球、石灰石自然颗粒的压力位移曲线进行了分析，并将曲线分为三个区域以描述物料破碎的过程。从其形式上来看它与材料力学中的 σ —— ϵ （应力——应变）曲线。考虑到试验结果描述的方便，现将压力——位移曲线的特性值给予定义。一阶段的特性值为破碎点压力 F_1 、破碎时的压下行程 S_d ；二阶段的特性参数为压值 F_2 、允许压下行程 S_y ；所以，如果通过试验测定了各种物料的破碎特征值 S_d 、 S_y 、 F_1 、 F_2 ，就可为破碎机的运动、动力参数设计提供参考。

四、单颗粒破碎与料层破碎

前面讨论了在连续单向加载条件下单颗粒物料破碎的整个过程，并对过程中的特性值进行了定义。本节将就岩矿破碎中的另一热点：料层破碎问题进行研究。

料层破碎是一个讨论较多的课题，许多学者在这方面做过了大量工作，图6为一典型的料层破碎装置和压力——位移曲线。作者在用一类似系统做试验时发现：多层物料的压碎试验时，岩矿的应力状态复杂，由于压力的接触区的局部压强大，上下层的物料很快被破碎，由于碎后的细小颗粒使中间层未碎的大块物料周围的间隙被填死，加载面也迅速地由点接触扩展为多点、面接触，使压力陡然上升，破碎结果呈两极分化，一方面粉体物料很多，另一方面却有个别大块物料存在，并由于过大的压力而产生压实。

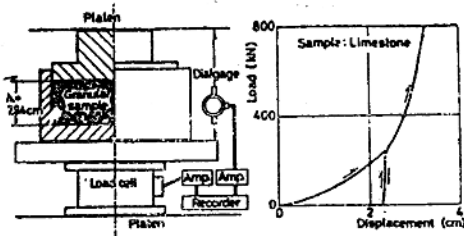


图6 常用的层压试验装置

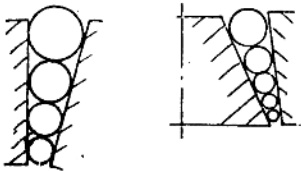


图8 颚式破碎机、圆锥破碎机腔内物料分布的状态

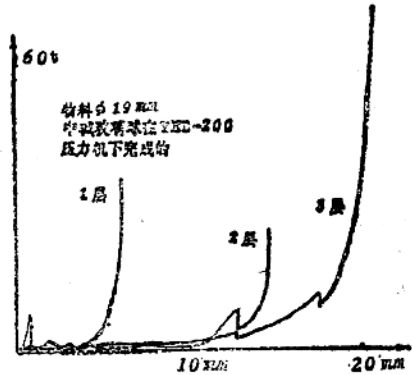


图7 层压玻璃球的压为——位移曲线

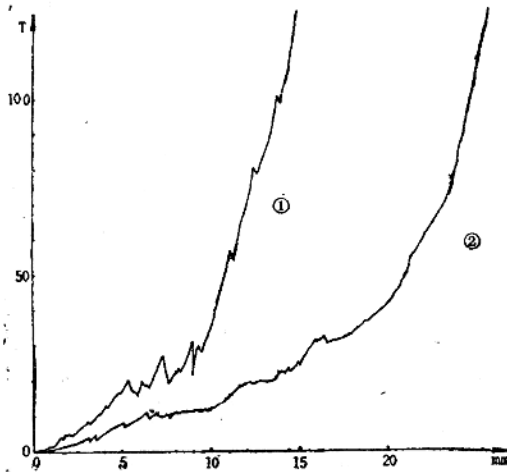


图9 层压物料的压力——位移曲线

- ①单层石灰石自然颗粒；
- ②双层石灰石自然颗粒。

由于不同的破碎机各自特性的限制，对物料的压碎试验亦有所考虑。例如：颚式破碎机、圆锥式破碎机，由于间断的加载、放松，从某种意义上来说破碎腔、振动和反复的冲击作用形成一种自然的筛网系统，纵断面的各个位置都由不同的粒级组成，随着破碎工作的进行，破碎的物料依次下移，小于排矿口的细颗粒被随时排出破碎机。如图8中所示。在这类破碎机的内腔中上述的循环在迅速的完成，一般来说不会出现几种粒级在一起破碎的现象。故作者认为超过两层的料层压碎试验对颚式破碎机和圆锥式破碎机来说是不合适的。

但应指出，多料层多粒级的压碎试验对于辊式破碎机是适用的；而反击式、锤式破碎机的研究则要采用冲击试验装置。

作者在层压试验时，分别对同一粒度一、二层物料状况进行了压力试验。测其压力一位移曲线。从曲线的形貌特征来看，与单颗粒的压力一位移曲线是相似的，如图9所示，我们定义的特征区域和特征值仍然是适用的。

严格地讲，单颗粒破碎与单层破碎的区别在于岩矿破碎时的环境不同。为研究不同环境下物料的破碎情况，作者在三种环境中完成了玻璃球的压碎试验。即将玻璃球置于钢筒中、橡胶筒中及三个玻璃球在一钢筒中进行破碎对比试验。图10、图11中就给出了试验的压力一位移曲线和破碎后的粒度分布情况。从中我们不难看出环境对物料的破碎力和破碎结果都是有明显影响的。

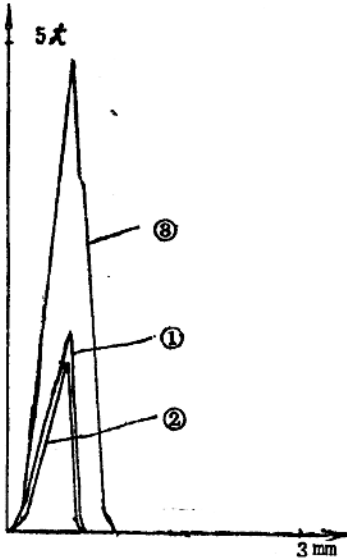


图10 $\phi 19$ 毫米中碱玻璃球在不同破碎环境中的压力——位移曲线
(第一阶段)

- ①单颗粒玻璃球在胶筒中加载；
- ②单颗粒玻璃球在钢筒中加载；
- ③三颗粒玻璃球在钢筒中的单层破碎；

注：加载速度均为50kg/s。

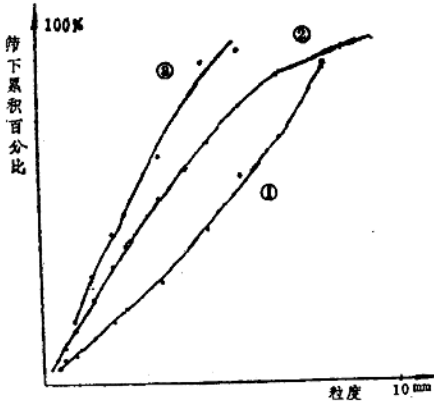


图11 在不同加载环境中 $\phi 19$ 毫米中碱玻璃球破碎后的粒度分布曲线

正是由于脆性物料在碎裂时大量的能量转变成飞溅动能，其结果导致飞溅碎片在撞到硬物料后产生了第二次破碎。B.H.Bergstrom等人的试验结果也证实了这点，在其报告中

指出：玻璃球破碎时，其飞溅动能占破碎能量的45%。所以，对于玻璃类脆性物料的破碎时，应尽量利用这部分能量。在对脆性不大的物料破碎试验时，环境的影响就显得不特别重要了，以石灰石为例，图1的照片就是在150kg/S的加载速度下拍摄的，从中可以看出几乎没有飞溅现象发生，飞溅动能只有很小一部分。

三、破碎物料的粒度分布

在对玻璃球、石灰石球、石灰石自然颗粒的压碎试验中，破碎后物料粒度分布情况和它的数学描述形式是人们所关心的。其中有代表性的粒度累积分布曲线如图11所示。经过用电子计算机进行多种回归形式的数据处理结果比较后证明，下式为较合理的累积粒度分布数学表达式

$$\lg y = a + bx \quad (2)$$

式中：x——粒度，毫米；y——筛上产品的百分比累积率。

用该式对全部数据进行了处理，相关系数均大于0.9，且满足显著性的条件。

四、合理的物料破碎条件

由上述试验结果及分析研究可以看出，对各种岩矿，在它们的破碎过程中既存在有共性的特点，也有个性的特点。其共性的特点是：物料的破碎效果、破碎力直接取决于破碎的上下行程和破碎环境。一台破碎机要达到理想的工作效果则不可忽视这些因素，例如：在颚式破碎机工作时，如有效的施力行程小于 S_d ，则不可能完成破碎工作；如有施力行程超过了 S_y 值，破碎腔内就开始有压实现象发生，这对颚式破碎机来说就会发生阻塞。故对各种物料进行了几个级别的综合压力破碎试验后，利用所得到的 S_d 、 S_y 、 $Y(i)$ 函数，结合机构运动学进行计算后就可得合理的破碎腔设计，最终得到理想的破碎效果。为此，破碎腔的工作应满足下列条件：

1. 对以压碎物料为工作原理的各种破碎机来说，其各个破碎点的有效压缩行程必须大于岩矿的断裂点行程极限 S_d ；
2. 在颚式破碎机中，有效的压缩行程不应大于压碎极限行程 S_y ，特别是排矿口处应注意；
3. 脆性物料的飞溅动能占破碎能量很大一部分，这些能量应在机构设计过程中设法利用；
4. 以辊压力进行破碎的设备，由于被破碎物料的排出是在辊的驱动下进行的，所以只要设计的压力 P 、物料的允许压实量 S_r 与排出力相匹配，就不会发生物料卡住或阻塞排矿的现象。

五、结 语

本文通过对几种物料在外力作用下的压力破碎试验，将物料的压力破碎过程作为一整体进行了分析，在连续记录破碎过程中的压力——位移曲线的基础上，对物料破碎过程进行