

# 层压破碎机理<sup>①</sup>

姚践谦 郭年琴 黄鹏鹏 欧阳镇堂

(南方冶金学院)

## 摘 要

综合散体力学、有限元和破碎理论等多学科知识,按全新的思路和方法研究了矿岩层压破碎机理;用散体力学建立了破碎腔内料层的散体等效模型,求得了粒间接触力大小和分布以及破碎规律;在新设计的层压破碎试验台上,实验验证了新建力学模型的可行性,揭示了层压破碎的一些新的特性和规律。

**关键词:** 层压破碎机理 散体等效模型 层压破碎实验台

层压破碎是指矿(岩)石在破碎腔内呈多层分布时的受压破碎。以往的研究都是从外部过程研究层压破碎和粒度的分布关系,或是在压力机上对装料盒内的矿石进行层压破碎研究,未能反映破碎腔形、行程及排料口等参数的影响,没有说明矿石颗粒的受力状态和破碎规律。本课题则运用散体力学、有限元和破碎理论等多学科综合知识,深入矿石层压破碎的微观领域,探索其受力状态和破碎机理,建立新的研究方法和设备,为研制新型的层压破碎设备提供了理论基础。

## 1 等效散体力学模型与计算分析

### 1.1 等效散体力学模型

为了探明料层内的颗粒受力状态,将破碎腔内杂乱无章的料层按散体力学方法,简化为等效散体力学模型,该模型的建立原则是:

(1) 假定层压破碎的关键参数为散体的孔隙率,等效是指模型的孔隙率与实际料层在发生大量破碎现象时的孔隙率相等;

(2) 力学模型中,每个颗粒与其它颗粒的接触点数为5。这是按散体稳定分析求得的概率最大的接触点数<sup>[1]</sup>;

(3) 为使理论分析有可能进行,力学模型中颗粒为等效粒径,且作有规律的排列,其等效粒径  $d$  按下式确定:

$$\left. \begin{aligned} \bar{d} &= \sum_{i=1}^n d_i / n \\ d_i &= \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $d_1, d_2, d_3$  分别表示颗粒在三个垂直方向上的长度;

$n$  为取样的颗粒数

(4) 模型中的颗粒总数按等效孔隙率确定。

图1(a)为按表1给料粒度建立的层压破碎模型。

表1 模型破碎腔中的矿岩粒径分布

| 粒径 $d_i$ / mm | 120~60 | 60~30 | 30~15 | 15~10 | 10~0 |
|---------------|--------|-------|-------|-------|------|
| 筛下百分比         | 12.74  | 16.9  | 18.80 | 21.54 | 0    |

建立模型时,假定矿石在破碎腔中有很好

① 本课题属中国有色金属工业系统高校科研基金资助项目; 本文于1992年5月8日收到

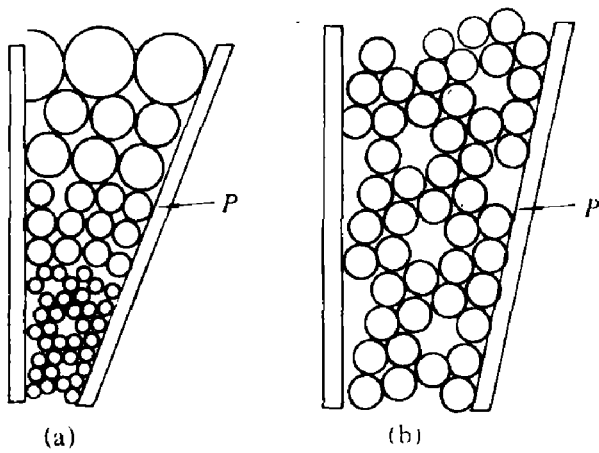


图1 散体层压破碎模型

(a)——“实际”粒径分布模型；(b)——等效粒径分布模型

的分级效果，即不同粒级颗粒分布于破碎腔的不同高度。但是，为易于找到内在规律，本课题的第一步只研究图1(b)所示的等效粒径模型，本文也只讨论这种模型。

## 1.2 接触力的计算与分析

为将有限元法引用于研究上述等效散体力学模型，我们将模型中每个颗粒的园心与其相邻颗粒的园心用直线连接起来，将每根直线视为一个杆件，将杆件内力视为颗粒之间的接触压力。这样就变成了图2所示的杆系统，运用有限元的计算方法，同时充分考虑散体颗粒只

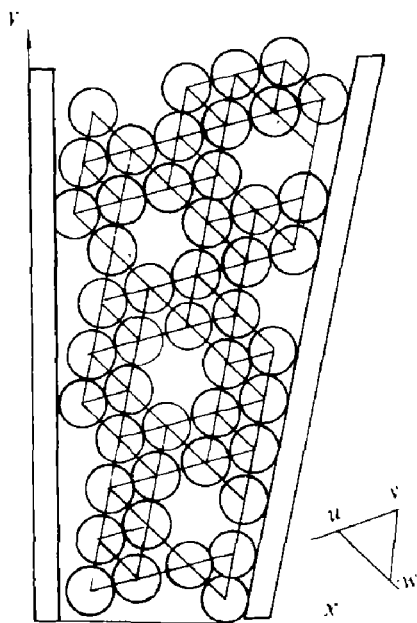


图2 等效散体力学模型

能受压不能受拉的特点，用 FORTRAN 语言，编制了计算机程序。

该程序的功能为：

(1) 计算  $u$ 、 $v$ 、 $w$  三个方向的接触力；  
(2) 对接触力进行统计分析，以获得接触力直方图；

(3) 用不同颜色显示破碎腔内各颗粒间接触力的大小及分布情况，以便于观察颗粒的破碎现象和规律；

(4) 按照图3的模式，改变作用于动颚上的作用力大小与分布规律，分别计算和分析破碎腔内颗粒间的接触力变化。

通过计算发现有以下规律：

(1) 破碎腔内处于5点接触的颗粒，其破碎力比处于3点或4点接触的大；

(2) 层压要满足一定的条件，即颗粒之间要有一定的孔隙率，此孔隙率应达到或接近模型中5点接触排列所对应的孔隙率。大于或小于此孔隙率，接触力大于施加的单位力  $P$  的数量均显著减少，从而导致破碎率降低；

(3) 破碎腔内的颗粒排列对破碎的影响不很大。所以，尽管在接触点不变的情况下，颗粒的排列形式有无穷多个，但只要研究其中的一种就可以了；

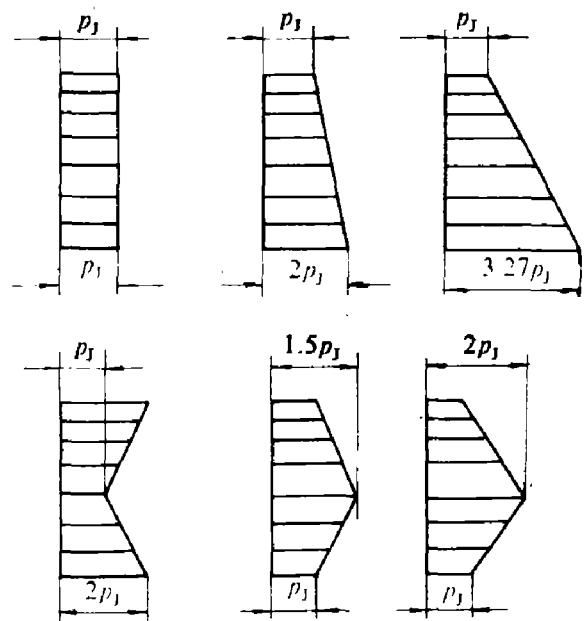


图3 动颚上的作用大小与分布模式

(4) 在颗粒的接触点数与排列不变的情况下，改变动颚上的作用力分布与大小，破碎腔内的颗粒接触力大于施加的单位力的数量和破碎区均有显著影响。表2为部分统计数据。

| 表 2 颗粒接触力 $p_p$ 与动颚上作用力 $p_j$ 统计分析数据      |                          |       |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------|--------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| 作用力模式                                     |                          | (a)   | (b)  | (c)  | (d)  | (e)  | (f)  |
| 总单位力(个)                                   |                          | 10    | 15   | 21.5 | 15.5 | 12.2 | 14.4 |
| $np_p > 1.25p_j$                          |                          | 16    | 34   | 37   | 28   | 38   | 35   |
| $np_p > 2.4P_j$                           |                          | 2     | 7    | 16   | 9    | 15   | 13   |
| $np_p > 1.6P_j$                           |                          | 4     | 16   | 33   | 22   | 29   | 29   |
| $n^2P_p > 2.4P_j$                         |                          | 0     | 4    | 10   | 5    | 13   | 9    |
| $n^2P_p > 2.4P_j$                         |                          | 0     | 10   | 20   | 11   | 24   | 19   |
| $(n^2P_p > 2.4P_j)$<br>$/(nP_p > 2.4P_j)$ |                          |       | 0.57 | 0.63 | 0.56 | 0.86 | 0.69 |
| $(n^2P_p > 1.6P_j)$<br>$/(nP_p > 1.6P_j)$ |                          |       | 0.63 | 0.60 | 0.50 | 0.83 | 0.66 |
| $n_i/P$                                   | $\sigma_p > 2.4\sigma_j$ | 0.20  | 0.47 | 0.74 | 0.58 | 1.23 | 0.90 |
|                                           | $\sigma_p > 1.6j$        | 0.40  | 1.06 | 1.53 | 1.42 | 2.38 | 2.01 |
| $R$                                       | $\sigma_p > 2.4\sigma_j$ | 0.04  | 0.15 | 0.34 | 0.19 | 0.32 | 0.28 |
|                                           | $\sigma_p > 1.6\sigma_j$ | 0.085 | 0.34 | 0.70 | 0.47 | 0.62 | 0.62 |

① (a)~(f)——参见图3；②  $n$ —颗粒个数， $np_p > 1.25P_j$ 表示接触力  $P_p$  大于  $1.25P_j$  的颗粒个数余类推； $n^2$ —双向受力的颗粒个数； $n_i$ —已破碎颗粒的个数； $R$ —破碎颗粒个数/总颗粒个数

2 层压破碎实验与结果

根据前述力学模型，我们研制了一个层压破碎实验台，见图4。

测试物料为经过筛分的石灰石，各次试验的给料粒径分别为10~15、15~20、20~25、25~30、30~45 mm。

实验内容包括：

- (1) 在动颚行程( $l$ )和排料口宽度( $b$ )(即料层厚度)不变的条件下，改变给料粒径  $d$ ，测定其起始孔隙率  $\eta'$ ，以及破碎后的粒度分布，一次破碎事件的选择函数  $S\%$ ，总破碎力  $P$  和动颚上下传感器承受的压力  $P_{lt}$ 、 $P_{lr}$ 、 $P_{bt}$ 、 $P_{br}$ (下标  $t$ 、 $b$ 、 $l$ 、 $r$  表示应变片在动颚上的粘贴位置，其中  $t$ —上部， $b$ —底部， $l$ —左边， $r$ —右边)和上拱力  $F$ ；
- (2) 在粒径和排料口宽度不变的条件下，改变动颚行程，测定(1)项规定的全部参数；
- (3) 在粒径与动颚行程不变的条件下，改

变排料口宽度(即改变料层厚度)，测定(1)项规定的全部参数；

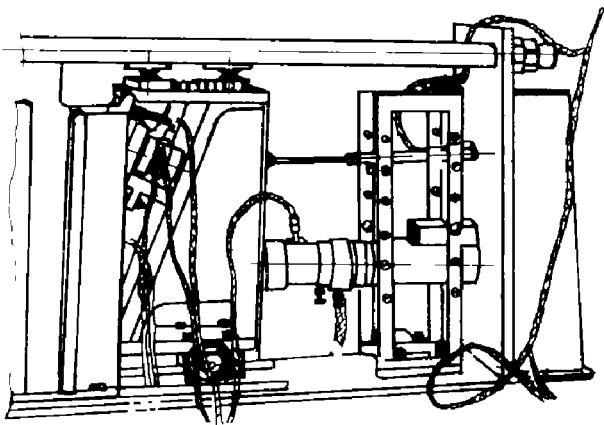


图4 层压破碎实验台示意图

(4) 在行程和排料口宽度不变的条件下，测定(1)项规定的全部参数。

为减小误差，每次试验重复三次，其典型试验结果分别列入表3、4。

| 表3 粒径 $d=20\sim25\text{ mm}$ 的颗粒层压破碎试验结果 |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $b/l$                                    | 4.67  | 3.50  | 2.80  | 2.50  | 3.34* | 2.17* | 2.17* | 2.17* |
| $\eta'$                                  | 0.417 | 0.387 | 0.338 | 0.335 | 0.298 | 0.29  | 0.262 |       |
| $S\%$                                    | 13.0  | 21.8  | 29.6  | 34.7  | 35.6  | 40.7  | 45.1  |       |
| $P/\text{kN}$                            | 117.0 | 175.4 | 238.1 | 259.7 | >294  |       |       |       |
| $l$                                      | 8.8   | 7.8   | 5.1   | 0.9   | 5.1   | 4.4   |       |       |
| $\Delta P_j/\text{kN}$                   | 57.8  | 62.7  | 21.6  |       |       |       |       |       |
| $\Delta l/\Delta P_j$                    | 0.15  | 0.12  | 0.24  |       |       |       |       |       |

\*  $b=70\text{ mm}$ ；\* \* —表示存在压实现象

| 表4 $d=10\sim15\text{ mm}$ 颗粒的层压破碎试验结果 |       |       |       |       |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $b/l$                                 | 3.5   | 2.8   | 2.34  | 2.11  |
| $\eta'$                               | 0.407 | 0.389 | 0.346 | 0.295 |
| $S\%$                                 | 14.0  | 19.9  | 26.1  | 32.2  |
| $P/\text{kN}$                         | 84.3  | 138.2 | 214.6 | 299.9 |
| $\Delta l/\Delta P_j$                 | 0.11  | 0.08  | 0.08  |       |

从表3、4可见，对于  $d=20\sim25\text{ mm}$  的颗粒，当  $b/l=2.8\sim2.5$ ，即  $l$  为  $25\sim28\text{ mm}$  时，其  $\Delta l/\Delta P_j$  最大，破碎效果较好，腔内出现层状密实流动状态，对应的孔隙率为0.34左右。而当  $b/l>2.34$  即行程大于30时，便出现压实现象，此时，破碎腔内结饼，物料不能流动；选择函数虽大，破碎效果却不佳。对于  $d=10\sim15\text{ mm}$  的颗粒，当  $b/l=3.5\sim2.8$ ，即行程为  $20\sim25\text{ mm}$  时，破碎效果

转好, 此时对应的孔隙率为 0.4 左右。

因此, 分析上述实验结果可知:

(1) 实际压碎时确实存在某一最佳孔隙率, 这与前面力学模型所获得的规律是一样的;

(2) 如果运用概率统计法算出与空间孔隙率相对应的平面孔隙率, 则不难发现与破碎效果最佳的空间孔隙率相对应的平面孔隙率, 非常接近 5 点接触力学模型中的孔隙率, 见表 5:

(3) 在  $b/l=4.67$ , 即行程  $l$  为 15 mm 之前, 压缩的结果, 主要出现破碎腔内的颗粒发生结构变形, 即颗粒相互靠紧, 排列趋于紧密。颗粒破碎甚少, 在破碎力与行程的曲线上, 有一斜率较小的曲线段(见图 5)。当  $b/l < 4.67$  时, 颗粒间相互挤紧, 开始出现破碎现象, 其破碎量也随行程的增加而增加;  $\Delta l / \Delta F$  有所变化, 但变化不显著, 反映于破碎力与行程的关系曲线上为近似的直线。 $b/l$  到达某值(例如  $d=20 \sim 25$  mm,  $b/l=2.34$ ;  $d=10 \sim 15$ ,  $b/l=2.12$ )出现压实现象时, 破碎力与行程曲线上的斜率便增加很快。

表 5 最佳空间孔隙率  $\eta$  与平面孔隙率  $\eta'$

| $d / \text{mm}$                                | 10~15     | 20~25     |
|------------------------------------------------|-----------|-----------|
| $\eta_{\text{exp}}$                            | 0.40~0.39 | 0.34      |
| $\eta_{\text{cal}}$                            | 0.397     | 0.400     |
| 与 $\eta_{\text{cal}}$ 对应的 $\eta'_{\text{cal}}$ | 0.269     | 0.225     |
| 5 点接触模型的 $\eta'$                               | 0.27~0.28 | 0.23~0.21 |

\* 下标 exp 表示实验结果, cal 表示计算值

### 3 层压破碎特性分析与研究

#### 3.1 料层上拱特性与上拱力

与一般破碎机不同, 由于矿石在破碎腔内呈多层分布, 动颚施加压力时, 必然产生颗粒间的相互挤压, 从而朝阻力小的破碎腔即颗粒层的顶面上拱, 其结果, 原来稍有压实的矿层又显松动, 开始有所减少的孔隙率又复回升。可见, 为保证一定的孔隙率和达到最好的破碎效果, 必须设法防止上拱现象的产生或使其受到约束。

实验测定证实, 上拱力的变动幅度很大, 其统计平均值随行程的增加而增加, 并有一转

折点, 如图 6 所示。在最佳破碎状况下, 上拱力产生的压力约为 0.7~0.8 Mpa, 是一个不可忽略的数值。为减少上拱现象对破碎效率的影响, 可采取如下措施:

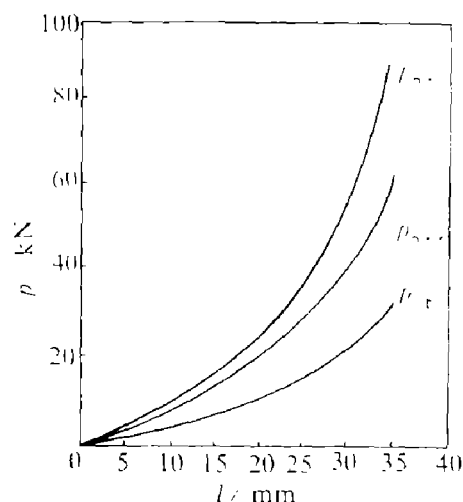


图 5  $d=10 \sim 15$  mm 颗粒层压破碎时的压力  
( $P$ )—动颚行程( $l$ )的关系

#### (1) 减小啮角

一般破碎机设计啮角的原则是单个矿块不会在两颚板作用下向上滑动。此外, 层压破碎还应考虑使上拱力最小。据我们实验, 啮角由  $20(^{\circ})$  减至  $10(^{\circ})$ , 上拱力产生的压力便由 0.8 Mpa 减至 0.2 Mpa, 即啮角减少一倍, 压力减少 4 倍, 效果非常明显;

#### (2) 采用特殊的腔形

例如, 像图 7 所示, 破碎腔 A 中啮角较小, 而且中间大两头小, 能够保证压缩破碎时上下通道不致大量上拱下卸。

#### 3.2 层压时动颚的受力分布特性

对层压破碎实验的传感器受力示波图进行统计分析, 可以获得以下印象:

(1) 矿石给动颚的反力(相当于压力)随行程  $l$  的增加而增加, 见图 5;

(2) 总破碎力  $P$  及选择函数  $S\%$  与行程  $l$  的关系如图 8 所示。 $P-l$ ,  $S\%-l$  曲线虽均随行程的增加而增加, 但增长规律并不完全一致, 说明选择函数  $S\%$  和力  $P$  均受随机因素影响。其统计规律有待大量实验才能确定。尽管

如此, 但对每一特定产地的物料, 均有一合适的行程, 在此行程, 破碎效果最优;

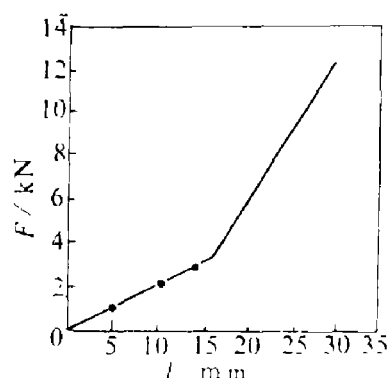


图6 上拱力( $F$ )与行程( $l$ )的实验关系

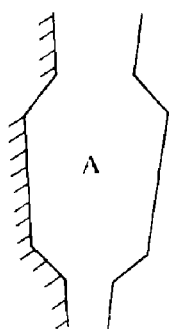


图7 特殊腔形(示例)

(3) 沿动颚宽度方向的受力分布也是不均匀的, 其均值在 15% 范围内波动。

### 3.3 层压时粒径的影响

根据实验, 当粒径变化三倍时, 在一次破碎行为中, 被选择去破碎的矿石量(即选择函数  $S\%$ )由 11.4% 变至 31.6%, 变化了 0.77 倍。如图 9 所示。其所以出现此现象, 是由于粒径大时, 接触力大。

这一结论告诉我们, 在破碎效果相当的前提下, 大颗粒层压破碎的体积变形比小粒度的小, 或者说动颚行程可以小一些。

### 3.4 排矿口尺寸与动颚行程的关系

行程的选择, 应以能够保证将破碎腔内矿石的原始孔隙率压缩至最佳破碎状态所对应的孔隙率为原则。此外, 由图 8 可见, 行程增加,  $S\%$  也增加, 但增加程度视粒度而变, 粒度大, 曲线斜率大, 增加快。故在确定行程时, 需要考虑  $S\%$  的变化。

一般破碎机的排矿口尺寸多据排料粒度决

定。而要实现层压破碎, 其排料口尺寸应在排料粒度的 3 倍以上。

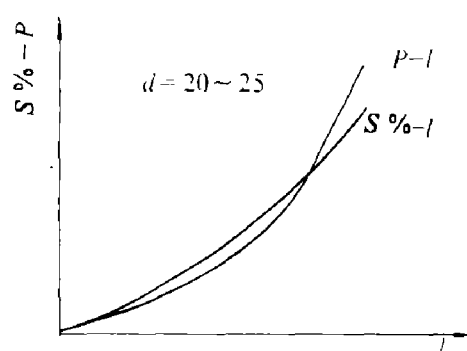


图8  $P-l$  及  $S\%-l$  关系曲线

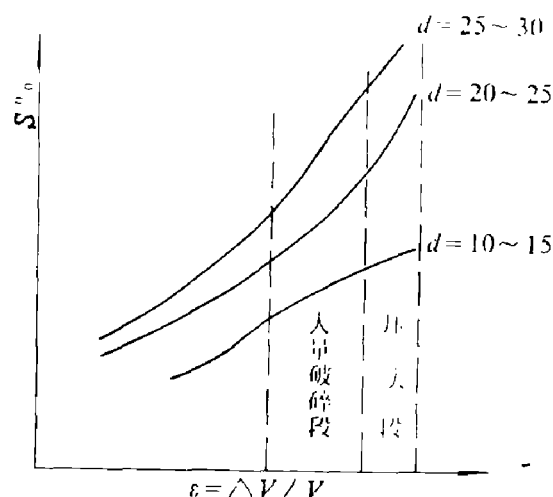


图9 不同粒径时的  $S\%-\epsilon$  关系示意图

在选择排料口尺寸时, 还应注意: 最大排料口的尺寸太大, 将导致层压层数过多和引起  $S\%$  的下降。亦即层压破碎时并非层数越多越好。因为太多则  $S\%$  下降, 太少则  $S\%$  也不大, 总之, 应有一合理的层数范围。

综上所述, 为了推广应用, 有必要采用相对行程  $b/l$  (最大排料口尺寸 / 行程) 这一无因次参数。  $b/l$  与其它指标的关系可以例示如下表 6。

实验中发现, 对于  $d=20\sim25$  mm 颗粒层压, 当  $b/l < 2.34$  时, 即出现压实现象, 故由表 6 可见,  $b/l$  的敏感区段是在  $b/l=2.8\sim2.5$  之间。在此区段, 用较小行程即可获得最大的破碎效果。但是, 粒度不同, 此敏感区段也有所不同。一般地讲, 粒度小,  $b/l$  值会略大一点。

由于有敏感区段的存在,在设计中应使排料口尺寸与行程大小选在此敏感区段之间。

表6  $d=20\sim 25\text{ mm}$  颗粒层压破碎时  $b/l$  与

其它指标的关系

| $b/l$                  | 4.67  | 3.5   | 2.8   | 2.5   | 2.34  | 2.17  | 2 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| $\Delta(b/D)$          | 1.17  | 0.7   | 0.3   | 0.16  | 0.17  | 0.17  |   |
| $\Delta S\%$           | 8.8   | 7.5   | 5.1   | 0.9   | 5.1   | 4.4   |   |
| $\Delta e$             | 0.059 | 0.036 | 0.020 | 0.031 | 0.07  | 0.005 |   |
| $\Delta l/\Delta(b/D)$ | 7.52  | 10.70 | 17.00 | 5.62  | 30.0  | 25.88 |   |
| $\Delta l/\Delta e$    | 149.2 | 216.6 | 255.0 | 290   | 728.0 | 176.0 |   |

又由于有压实门槛值存在,在设计中还应使所选排料口尺寸与行程能够避免出现压实现象。

## 4 结语

(1) 研究矿岩破碎的方法很多,而我们把散体力学,有限元,破碎理论综合运用岩石破碎机理的研究,在国内外还是首次。通过建立模型、计算分析与实验验证,说明所建力学模型是可行的;

(2) 本文所建模型是平面力学模型,我们将在此基础上,建立空间等效力学模型,并以动态计算机模拟,研究岩石破碎机理。结果将更加接近实际;

(3) 据此思路所进行的理论分析和实验验

证,初步揭示了新的层压破碎规律。得到了层压破碎条件下岩石粒度、破碎行程,排料口大小、上拱力、啮角、受力状态等参数与破碎效果的一些新观点;

(4) 通过对层压破碎实验研究发现,层压破碎比现有破碎设备(基本处于单颗粒破碎)的处理能力大4~6倍,并具有节能、产品粒度匀细等特点。如果据此层压破碎机理,研制新型高效破碎设备,有可能产生很大的经济效益和社会效益。

## 参考文献

- 1 Ресняев В И цпр. ОБОГАЩ · РУВ, 1984, 4: 1-6.
- 2 菅原胜彦,村田博之等.日本矿业会志,1984, 8: 41-46.
- 3 村田博之.日本专利昭58-20313, 1983.
- 4 Haneish J, Schubert H. AUFBEREITUNGS-TECHNIK, 1986, (10): 535-540.
- 5 第五届全国粉碎工程学会论文集.北京, 1990, 5.
- 6 马萨尔R J(著),左东启,郭坤(译).土石方工程,北京:水利电力出版社, 93-191.
- 7 Schubert H. AUFBEREITUNGS-TECHNIK, 1987, (5): 237-246.
- 8 Ching S Chang and Jia. H. Xue. Int. J. Solids Structures, 1989, 25(6): 665-681.