

8

第十五届国际选矿会议 论文选集

中国选矿科技情报网

一九八六年十月

8

第十五届国际选矿会议 论文选集

中国选矿科技情报网

一九八六年十月

前 言

第十五届国际选矿会议于1985年6月2日至9日在法国戛纳(Cannes)举行。会议主题是“复合矿的选矿”。会议共发表论文145篇,分别汇编成三卷。论文从不同角度反映世界各国选矿科研、生产所取得的成就和进展,代表着当前国际选矿的技术水平。

《第十五届国际选矿会议论文选集》是从会议发表的145篇论文中选择81篇汇编而成,其中包括“复合矿新矿物学研究方法和技术”8篇,“磨矿、重选和磁选”13篇,“浮选”20篇,“湿法冶金”11篇,“模拟与过程控制”11篇,“复合难选矿石处理的技术和经济”18篇。本《选集》可供有关高等院校选矿专业师生及从事选矿科研、生产的工程技术人员参考。

《第十五届国际选矿会议论文选集》由参加中国专家代表团的各单位(中国有色金属总公司、地质矿产部、冶金工业部、化工部、国家建材局)分工负责翻译和校对。张卯均、李永蔚、何伯泉、陈祥涌、李瑞兴、陈子鸣、胡力行、郑飞、田福纯、汤集刚、陈鼎玖等同志分别对部份译文进行了审校。最后,由余兴远、罗家珂、赵涌泉同志审定,并由中国选矿科技情报网出版。

《第十五届国际选矿会议论文选集》在选编过程中,中国专家代表团虽多次进行过讨论,但由于会议论文涉及面广和篇幅有限,在译文选译上难免有考虑不周到之处。译文虽经多次审校,限于编者水平,其中还不免会有差错,敬希读者批评指正。

“参考文献”全略。

1986年2月

目 录

第一部份：复杂矿石新矿物学的研究方法和技术

利用图象分析结果计算颗粒组成的数学方法.....	(1)
S. W. Moore等〔英国〕	
连生体颗粒破碎的理论研究.....	(6)
T. P. Meloy等〔美国〕	
酸浸过程中磁黄铁矿的行为.....	(10)
V. A. Luganov等〔苏联〕	
浮选中矿物表面的性质——俄歇电子能谱分析.....	(16)
F. D. Schowengerdt等〔美国〕	
细粒黄铁矿型Zn—Pb—Cu—Ag矿面磨矿过程中闪锌矿、黄铜矿及方铅矿解离度的 图象分析研究.....	(22)
W. PetrK〔加拿大〕	
磁流体静力分选在解离分析中的应用.....	(31)
G. Harifeld等〔西德〕	
以色列磷块岩的矿物学及成分对其可选性的影响.....	(36)
y. Levy等〔以色列〕	
形状不规则的多相颗粒的模拟及其在单体解离分析中的应用.....	(41)
J. E. Sepulveda等〔智利〕	

第二部份：磨矿、重选和磁选

滚磨机中钢球磨损的现象模型.....	(49)
J. M. Menacho等〔智利〕	
不同类型的细磨对矿物(石英)的影响.....	(56)
J. M. Cases等〔法国〕	
磨矿回路中的多段离心分级法.....	(61)
S. Rantanen等〔芬兰〕	
再磨机的尺寸选定.....	(66)
D. C. Shelten〔美国〕	
采用复合水力旋流器富集黄金和白钨矿.....	(73)
P. D. Rao等〔美国〕	
圆柱形重介质旋流器的研究.....	(80)
E. Hacioglu等〔土耳其〕	
利用磁流体工业分选不同密度颗粒的新方法——MC法.....	(88)
M. S. Walker等〔美国〕	

廉价的新型高梯度磁选机.....	(93)
<i>B. R. Arvidson</i> 等〔美国〕	
载流介绍的超导高梯度磁选机.....	(101)
<i>J. H. P. Watson</i> 等〔英国〕	
用于选矿的筒式超导磁选机.....	(109)
<i>K. H. Unkelbach</i> 等〔西德〕	
铁矿石选矿无废工艺的実施.....	(113)
<i>L. A. Barsky</i> 等〔苏联〕	
高梯度磁分离介质附近颗粒的捕集与脱离.....	(118)
<i>H. M. Fricke</i> 等〔西德〕	
新型干式细粒分选圆筒——平板磁选机.....	(123)
<i>M. Brozek</i> 等〔波兰〕	

第三部份：浮 选

盐类矿物选择性浮选中晶格离子的作用.....	(130)
<i>P. Schulz</i> 等〔西德〕	
表面活性剂和无机物在矿物固体上的表面沉淀和它在吸附和浮选中的作用.....	(136)
<i>K. P. Ananthapadmanabhan</i> 等〔美国〕	
在硫化矿浮选中混合使用捕收剂和起泡剂的理论与实践问题.....	(140)
<i>S. I. Mitrofanov</i> 等〔苏联〕	
铅矾、白铅矿和方铅矿的硫化及其浮选行为.....	(144)
<i>D. W. Fuerstenau</i> 等〔美国〕	
喷水水力旋流器中的液流现象.....	(152)
<i>J. D. Miller</i> 等〔美国〕	
应用实验室浮选速率数据进行浮选回路最佳化设计.....	(160)
<i>G. E. Agar</i> 〔加拿大〕	
实验室间断浮选数据放大到工业浮选效据的研究.....	(167)
<i>R. Kalapudas</i> 〔芬兰〕	
阿尔萨斯钾矿公司新浮选厂的设计以及对现有选厂的革新.....	(173)
<i>R. Darius</i> 等〔法国〕	
用发泡新技术从工业磷酸中回收阳离子的离子浮选研究.....	(178)
<i>E. Jdid</i> 等〔法国〕	
在碱性条件下用硫酸铜活化铅——锌——铁硫化矿选矿时闪锌矿——白铁矿的浮选 选择性.....	(183)
<i>J. Girczys</i> 等〔波兰〕	
硫化矿物在浮选中的相互影响.....	(189)
<i>V. A. Konev</i> 等〔苏联〕 <i>J. L. Cecile</i> 等〔法国〕	
在电化学——浮选槽中浮选辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿和黄铁矿.....	(193)
<i>P. E. Richardson</i> 等〔美国〕	

萤石和方解石浮选分离的新药剂制度.....	(200)
<i>H. Baldauf</i> 等〔民主德国〕	
用油酸盐优先浮选时方解石、磷灰石的交互作用及它们的影响.....	(205)
<i>P. Somasundaran</i> 等〔美国〕	
预测浮选工艺参数的能量法.....	(209)
<i>S. Gaidarjiev</i> 等〔保加利亚〕	
长石特性及其浮选行为之间的关系.....	(214)
<i>D. Uhlig</i> 〔民主德国〕	
难选矿石的某些选别特性.....	(221)
<i>M. T. Baymakhanov</i> 等〔苏联〕	
优先浮选前的准备——焙烧法改变菱镁矿、白云石的性质.....	(226)
<i>N. M. Calic</i> 〔南斯拉夫〕	
一种新型的喷射式浮选槽的应用与尺寸选择.....	(231)
<i>A. Bahr</i> 等〔西德〕	
粗粒浮选动力学基本原理和分级机沉砂浮选实践.....	(238)
<i>J. Kallioinen</i> 等〔芬兰〕	

第四部份：湿 法 冶 金

在硫化铁矿物细菌氧化过程中硫化物硫的去向.....	(243)
<i>H. Kandemir</i> 〔澳大利亚〕	
用微生物脱除石英砂、高岭土和粘土中的铁.....	(248)
<i>S. N. Groudev</i> 等〔保加利亚〕	
法国核材料总公司旺代矿业分公司低品位铀矿的静态堆浸.....	(253)
<i>J. L. Narcy</i> 等〔法国〕	
影响低品位镍矿细菌堆浸的因素.....	(259)
<i>A. J. Southwood</i> 等〔南非〕	
选矿系统中物料的过滤、脱水和洗涤过程.....	(267)
<i>A. Rushton</i> 〔英国〕	
粘土矿物的固结水冶处理.....	(276)
<i>G. Boutonnet</i> 等〔法国〕	
镍(Ⅱ)在酸性介质中的液液萃取.....	(281)
<i>G. Cote</i> 等〔法国〕	
电解精炼和电解沉积湍流流体模型的应用.....	(287)
<i>J. W. Evans</i> 等〔美国〕	
用氯化物溶液电解生产纯铅的新方法.....	(293)
<i>C. Palvadeau</i> 等〔法国〕	
粘土矿物滤饼过滤的动电学.....	(300)
<i>J. R. Castro</i> 等〔墨西哥〕	
铜精矿滤饼脱水的理论和实验研究.....	(306)

G. D. Riquelme等〔智利〕

第五部份：模拟与过程控制

- 螺旋选矿机数学模型及其在两个锡选厂的应用……………(314)
P. Tucker等〔英国〕
- 浮选柱的分批浮选和连续浮选动力学模型……………(321)
许长连〔湖南化工研究所〕
- 控制不同矿石硬度条件下棒磨机磨矿作业的鉴别……………(328)
V. K. Gupta〔加拿大〕
- 法国安德尔谢拉克重晶石浮选厂流程改革对生产指标影响的模拟预测……………(333)
A. Broussaud等〔法国〕
- 选矿过程的自适应最优控制……………(344)
J. A. Herbst等〔美国〕
- 奥托昆普公司研究的电位控制浮选新方法……………(352)
S. Heimala等〔芬兰〕
- 罗辛铀矿集中控制冶金过程的最优化……………(358)
S. B. Kesler等〔纳米比亚〕
- 通过磨矿回路中的浮选作业实现对铜矿工业选别的有效控制……………(365)
J. Dziadek等〔波兰〕
- 萤石浮选的动力学研究……………(370)
S. Mori等〔日本〕
- 钾盐选矿厂的自动化……………(375)
B. Yu. Goloukov等〔苏联〕
- 布莱克芒庭铅浮选最佳控制……………(382)
T. R. Twidle等〔南非〕

第六部份：复杂难选矿石的处理技术和经济

- 复杂细粒矿石连续压滤的按比例放大、生产工艺和车间设计……………(389)
W. Stahl等〔西德〕
- 选择性浸出富集复杂矿石的最佳化……………(395)
D. Morin等〔法国〕
- 从塞罗科罗拉多铜锌混合精矿中分选闪锌矿……………(404)
F. Ser等〔西班牙〕
- 用浸出和浮选法处理黑页岩矿石……………(410)
S. Fugleberg等〔芬兰〕
- 铜铅混合精矿分离方法的改进……………(417)
V. F. Pudov等〔苏联〕
- 复杂矿石浮选试验室试验过渡到半工业试验的问题……………(422)
J. J. Predali等〔法国〕

用硫酸化——浮选联合流程处理复合硫化矿的研究·····	(429)
T. Wakamatsu等〔日本〕	
复杂多金属矿石选矿工艺的改进·····	(436)
A. A. Abramov等〔苏联〕	
用选择性磁复盖从碳酸盐脉石中回收磷酸盐·····	(442)
P. Parsonage〔英国〕	
用两段调整工艺富集佛罗里达南部复杂磷矿石·····	(447)
B. M. Moudgil等〔美国〕	
埃及红海阿布谢盖拉复杂低品位磷矿的选矿·····	(453)
N. S. Hammoud等〔埃及〕	
低品位含粘土锰矿石选矿工艺的研究与工业应用·····	(460)
V. A. Arsent'yev等〔苏联〕	
含镍磁黄铁矿精矿湿法冶金和浮选联合工艺的工业应用·····	(464)
M. I. Mantsevich等〔苏联〕	
处理含铁、稀土、铌、氟共生矿选矿流程的新发展·····	(468)
罗家珂 陈祥涌〔北京矿冶研究总院〕	
威特沃特斯兰尾矿中回收金和铀工艺的改进·····	(475)
I. J. Corrans等〔澳大利亚〕	
加入细粒活性炭后用浮选法从滤渣中回收溶解金·····	(482)
P. C. Van Aswegen〔南非〕	
从选矿厂尾矿中回收金、铀和黄铁矿时技术—经济模型的应用·····	(487)
W. T. Ruhmer〔南非〕	
处理难选矿石的一种新型反应设备——明普罗机械窑·····	(494)
A. S. Ericson等〔瑞典〕	

第一部份 复杂矿石

新的矿物学研究方法和技术

利用图象分析结果计算颗粒组成的数学方法

S. W. Moore等〔英国〕

前 言

为了估算解离设备（例如球磨机）的性能参数，也为了计算或预测选矿工艺（如摇床、跳汰、磁选）的效率，矿物工程师常常需要计算总矿物颗粒中的矿物组成。

用图象分析法直接测定颗粒的矿物体积组成（即体积百分数）是极端困难的，但是，图象分析的线法或面法能够通过对颗粒的随机测量测得矿物的“线长百分数”（或“面积百分数”）。遗憾的是，由这些测量值所推算出的矿物的体积百分数一般都有偏差，因此，为了把这些测量数据换算成无偏差的矿物组成已经提出了许多探索性的方案。

本文所叙述的内容是涉及这种换算过程的问题，并对已经提出的各种换算方法进行了评论。

换 算 问 题

矿物工程师经常需要通过对颗粒线性的或面积的随机测量所获得的数据计算特定系统中的各矿物的分布率。如果所测样品只含有单离散（mono-disperse）（即粒度很接近的）颗粒，并且样品中的矿物相仅限于两相，那么换算过程就可大大简化。当然，把矿样制成只含有均匀粒度的筛选样是相当简单的事情；同时，把含有任意矿物相的混合样当作两相系统处理也是可能的，因为，在任何情况下，可把感兴趣的矿物作为A相，把其他所有矿物作为B相。

假设通过样品中任何颗粒所作的随机测量数不大于1，则某种样品中的矿物体积百分数和通过同种样品随机测量的线长（或面积）的百分数有如下的关系（Moore, 1983）；

$$f(g) = \int_0^1 G(g, x) V(x) dx$$

式中：g是线长（或面积）百分数；

x是体积百分数；

f(g)是线长（或面积）百分数分布函数，包括A相或B相的解离测量在内（解离测量是一种只穿过某个颗粒中的一个相的测量）；

V(x)是体积百分数分布函数，包括A相和B相的单体颗粒；

G(g, x)是通过对一定体积百分数的颗粒的随机测量得到的线（或面）的百分数分布

函数。其中, $0 \leq x \leq 100\%$ 。

上述方程式中 $G(g, x)$ 函数依赖于颗粒的全部结构因素, 即颗粒形态, 颗粒组成及 Horton(1978) 所确定的颗粒内部结构。所以体积百分数分布函数 $V(x)$ 的确定要求有三个步骤, 即:

- i. 测量出线长(或面积)的分布率;
- ii. 确定结构相关函数 $G(g, x)$ (更可能采用模拟法确定)
- iii. 解上述积分方程。

在把颗粒矿物组成的低维测量结果换算成等价的三维的体积组成的工作中, 早期的许多研究者实际上已应用了上述方程式, 为了推导出结构相关函数, 他们也应用了简单的理想化了的连生颗粒模型。应用这种方法的研究者被称为 Gaudin 学派, 因为在这方面 Gaudin 是第一个尝试者。

近来, 其他一些研究人员试图不用上述的积分方程式解决换算问题, 他们试图避开在求结构相关函数过程中所固有的那些棘手问题。

换算方法

Gaudin 学派的换算方法

Gaudin 学派的研究者假设, 所测颗粒具有完全相同的结构以作为一种简单的颗粒模型。这种简单颗粒模型的内部结构只为一个变量所确定: 颗粒的体积百分数, 而且假设连生颗粒的体积分配率服从一个特定的分配参数。为了把分配参数与被测的连生体的分配百分数的各种统计数据联系起来, 这些研究者要么用计算机进行模拟, 要么进行数学分析。最后, A 相和 B 相两种解离测量值的比例就可以从已获得的结果中推算出来。

Gaudin (1939) 是首先认识到下面这种事实的人之一: 面积法测量(当然也包括线法测量)显然是过高估测了出现于任何两相颗粒系统中的解离度数值。因此他想提出一个校正因子(Gaudin 称为“连生因子”)。这个校正因子能消除过高估测的影响。Gaudin 用图解法表示了 这个“连生因子”, 并把它作为样品中连生颗粒的平均体积百分数的函数(参看图 1 的实线)。Gaudin 并没有介绍确定这个函数的方法, 然而, 后来的研究者从他的结果中推测, “连生因子”函数是从下面的两相颗粒体系出发用数学分析法得到的: (i) 所有颗粒都是单一粒度的球体; (ii) 所有的连生颗粒在 A 相和 B 相之间都有单一的面状界面, (iii) 所有连生颗粒都具有相同的连生度。按照这种模式可得出一个与上面提到的曲线稍有差异的“连

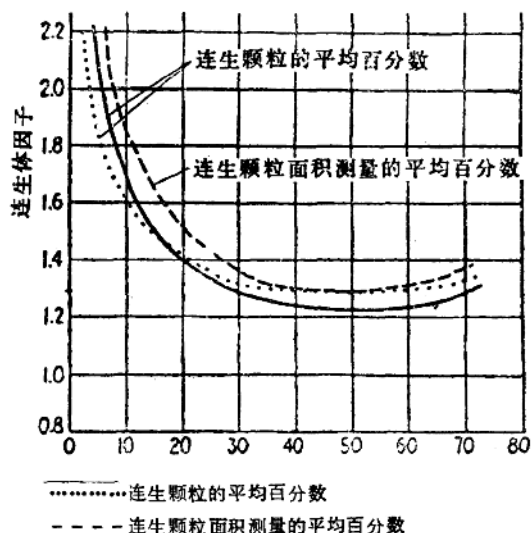


图1 连生因子曲线。实线是根据Gaudin发表的资料作出的; 点线用于已知体积百分组成的球体—平面模型; 虚线适用于连生体面积测量的平均百分数是已知的球体—平面的颗粒模型。

生因子”曲线(见图1的点线)。

为了得到特定样品的“连生因子”值,必须先计算这个样品中的连生颗粒的平均百分数。Gaudin以测量连生颗粒的平均面积百分数求“连生因子”。现在已知这种结果是有偏差的。无偏差的结果只有在样品的解离度是已知的情况下才能获得。按照Gaudin模式,利用计算机对随机面积测量进行模拟,确定出“连生因子”与连生体面积测量的平均百分数之间的关系是可能的,这种关系曲线在图1中用虚线表示,它是一条在实际中能应用的曲线。

注意,Gaudin的连生因子与通过某个连生体进行一次测量碰上两个矿物相的或然率成反比。Gaudin计算的连生颗粒百分数是面积测量值乘以“连生因子”所得的百分数。虽然,Gaudin只为面积测量法提供了校正因子,但是它同样也适用于“线法连生因子”的计算(Stewart, 1975)。

Gaudin提出的方法没有提供连生颗粒的体积百分数的计算方法,也没有提供两相解离颗粒的计算方法。在今天这些数据很容易用他的简单数学模型计算出来。

Stewart (1975) 和Stewart及Jones (1977) 提出一种方法,这种方法能计算某一样品的解离度,也就是每一矿物相单体解离的百分数。他们采用了和Gaudin所用过的基本相同的球体-平面模型。然而在总粒数中连生颗粒的体积百分数不是一个单一的固定数值,而是在两个预定的体积百分数之间成某种分布形式。当A相和B相之间的面状界面杂乱地落于垂直于界面的球体直径的两个预先设定的位置时,就产生这种体积百分数的分布型式。这些位置应当是事先已知的;因此,连生体的体积分布率假定也是已知的,在测量解离度前就应当把这些已知数输入模式。这种模式仅仅适用于一种近于完全解离的颗粒系统,也就是这样的一种系统,在此系统中大多数连生颗粒只具有单一的相界(参阅上面的Gaudin模式)。

Stewart和Jones证明过,如果某一岩石的破碎过程是随机的(即,不存在在某种特定的物相内或沿着相界出现优先的破碎方位),那么连生体内部的界面必然也是随机分布的。他们认为,总体颗粒中这种体积百分数的变化范围(这些百分数是和预定界面位置的分布百分数相一致的)应当用所测物料的地质来源(例如,来源冲积矿床或坚硬岩石的矿床)或用已做过的矿物工艺处理方法来确定。如果样品颗粒没有进行过任何工艺处理,那么这种颗粒体积百分数的变动范围在0和100%之间。如果样品是选出的精矿,那么它将趋向于只含那些完全解离的或接近完全解离的A相颗粒,因此颗粒百分数的变动范围将是85%和100%之间。另一方面,选矿尾矿产品的颗粒,这种百分数将在0到15%之间变动。

Stewart和Jones用计点法确定样品的解离度,即只要测量A相和B相的点数及连生体颗粒的点数即可,不需要测量被测颗粒的线长和面积。

Horton (1978) 及Jones和Horton (1978) 继续用Gaudin的与Stewart和Jones提出的相同方法进行测量。他们把他们的兴趣集中在接近完全解离的特定颗粒系统中。他们用计算机模拟和数学分析方法研究一系列接近完全解离的颗粒模型,但他们特别把精力集中于这样两个特殊模型:(i)一种立方体颗粒系统,颗粒的相界面是平行于立方体表面的单一平面;(ii)一种球体颗粒系统,颗粒的相界面是抛物面状的,并在一个特定颗粒内的抛物面的曲线是这一颗粒体积百分数的函数。颗粒体积的分布率用双参量 β 分布模拟,这种分布率在0.0和1.0之间形成一个平滑曲线。已经查明这两个参数与连生体体积分布率的平均值和方差有关,而且这种关系已经通过这种颗粒模型的随机线测量的计算机模拟建立了起来。

上述所有的解离度测量模式中,对相同体积百分比的颗粒不允许有结构变化,因此这些

模式可能没有恰当地表达出存在于实际矿物颗粒中的结构变化。

虽然是Moore在内部科研报告中首先提出了方程式(1) (1983), 但Lin等人 (1984) 是最早公开发表这个方程式的Lin等人应用随机颗粒模型代表实际矿物颗粒, 在实际颗粒中外部结构和内部结构有相当程度的随机变化。它们的随机颗粒模型是在计算机里以单纯的随机增长过程产生出来的。和Horton及Jones一样, 这些人也用双参数 β 分布去模拟连生体颗粒的体积分布率。他们也用计算机模拟法把 β 分布的参数与连生体线法测量的分布率关联了起来。

虽然在Lin等人的颗粒模型中, 结构因子有相当大的变化范围, 但是, 在使用这种模型计算解离度以前, 这种变化必须是已知的 (或作出了假设)。这种要求是在上述积分方程式中规定了的, 即结构相关函数 $G(g, x)$ 必须在解积分方程前确定了的, 这又意味着颗粒结构必须预先模拟出来。

总之, Gaudin学派所用的连生颗粒模型不能精确地代表实际矿物颗粒。因此, 利用上述换算方法所获得的结果将有偏差, 这主要由于颗粒模型不合适 (部分是由于用作模拟连生颗粒的体积分布函数不适当)。这些偏差已经被Horton (1978) 及Moore和Jones (1981) 讨论过, 并且常常发现其偏差值是相当大的。

其它方法

其他研究者试图依靠下列方法来避免这种较大的偏差: (i) 应用对结构因素较小限制的颗粒模型; (ii) 用正在测量的颗粒自身制取模型, 即通过某些独立的测量而标准化了的颗粒作成模型。另外有些研究者承认这些自然偏差在任何试探性测量中都是固有的, 因而不准备把测量值转换成体积百分数就使用它们。

Barbery及其同事 (1977, 1978, 1981, 1983) 致力于制定一种全面的体积的解离度分析法。它们所用的颗粒模型是: (i) 所有颗粒都是凸形的, 并且都具有相同的大小和形状 (尽管不需要知道大小, 也不需要知道形状); (ii) 所有连生颗粒中A相和B相之间都有一个面状边界面, 也就是一个颗粒中的A相和B相两者都是凸形的; (iii) 连生颗粒的体积分布率具有双参量 β 分布特征, 分布范围是0到1.0。

遗憾的是, 详细的分析显示, 这个方法有错误, 而且这个模式实际上不能用Barbery所提出的方法获得解 (Moore和Jones, 1981, Moore, 1985)。

Steiner (1975) 提出了一个经验表达式, 这个式子把矿物解离度与它的比表面积关联起来, 表达式中的表面积项能用面积测量值计算, 也可用线法测量值进行计算, 然后就能计算出体积解离度值 (King 1983年的文章中对Steiner模式进行了讨论)。Steiner声称, 尽管该表达式没有作出理论证明, 但是它对已经达到了某种解离度的破碎矿石很可能是适用的。既然这个模式是一个经验模式, 那么只有通过各种彼此独立的标准化的样品对它进行检验后才能作出评价。至今, 还没有发表过这方面的检验结果, 因此它对测定解离度方面的可应用性必须再进行验证。

King (1983) 曾指出, Steiner模式没有一个严密的理论基础。King自己提出了一个方法, 它是利用线法测量数据计算样品中A相和B相两者的解离度。在King的模式中, 连生颗粒的A相颗粒粒度 (即筛网尺寸) 比连生颗粒的粒度要小。此外, 粒度为 x 的A相矿物颗粒与粒度为 X 的连生颗粒 ($x \leq X$), 对所有的 x 值都具有相同的形态分布特性。King通过对

这个模式的数学分析,宣称他已经证明解离度等于被解离颗粒的最大可能测量数的或然率。但是很遗憾,对这个模式的数学推导进行的详细分析显示,其中存在着一些错误。在修正错误的过程中又得出了解离度表达式,表达式中包含有一些用测量获得的数据在任何精度的情况下计算起来都特别困难的项(Moore,1985)。

也许,进行立体的解离度分析最精确的方法是使用一种精确的独立的测量,使特定系统标准化。在这种方法中要用实际矿物做模型,并避免进行颗粒结构上的任何限制。遗憾的是,要把多矿物相的颗粒系统标准化几乎是不可能的,因为按照连生颗粒的组成矿物百分比对它们进行分类在实际上也是没有办法的。(退一步说,如果存在这种分类法,那么也不存在立体处理的问题了,)然而,的确有许多研究人员试图这样做,例如Stewart (1975)、Petruck (1975), Horton (1978) 和King (1979)。正如预料之中的,他们几乎没有取得什么结果。

有越来越多的人——有些是出于盲目,其他的也许是因为未能找到一种合理的立体换算法而感到失望——正在直接使用线法(或面积法)测量数据,而不打算把它们转换成三维值。例如,Petruck及其同事(1976-1977), Grant等(1981), Berrube和Marchand(1983, 1984)都持这种态度。对于试图确定颗粒的矿物组成时所遇到的问题采取这种处理方法有避免使用复杂的数学分析也避免使用猜想的颗粒模型的优点。很遗憾,虽然这种粗略的未转换数据能安全地用于对相似物料所获得的结果进行对比,但是不能精确地计算出颗粒的矿物组成,所以这种方法对在解离度图相分析中得到的结果的应用受到了限制。

结 语

对关于从图象分析结果进行颗粒的矿物组成的推导方面公开发表的文章进行的讨论表明,数学推导上没有错误,一般可用的方法只有Gaudin学派提出的那些方法。在这些方法中,Horton和Jones的方法,与Lin等人的方法最为重要。这两种方法不仅能计算解离颗粒的百分比,而且也能计算一个特定的颗粒体系全部组分的体积分配率。

Gaudin学派的方法的主要缺点是在进行转换之前要把所测连生颗粒的全部结构因子进行模拟,这是因为在测量的百分数中几乎没有关于被测颗粒的结构和形状方面的信息。然而测量本身包含有结构方面的东西。这种情况都被上面评论过的所有研究工作者忽视了。例如线测时穿越的相边界的数量是有用的结构资料。在帝国学院正在进行这方面的研究工作。其目的是为了制定出一种利用这种资料来计算颗粒体系中结构因素的变化范围,同时计算体积分布百分数的转换方法,(Moore和Jones在1980年报导过这方面的一些早期研究结果)。

葛书华 译 钱定福 校

连生体颗粒破碎的理论研究

T.P.Meloy等〔美国〕

前 言

连生体是由两种或多种矿物相所组成的。当处理多组份矿石时，连生体就是那些由目的矿物和一种或多种其他矿物构成的多矿物相颗粒。磨矿作业的目的，是把有用矿物，即目的矿物从与之连生的其他矿物颗粒中解离出来。当矿样磨愈来愈细时，就会有愈来愈多的矿物得到解离，连生体中的目的矿物也就会愈来愈少。Gaudin是第一个详尽地研究了解离过程。在一些文献中对解离过程的各个方面都给了充分的讨论。虽然解离过程从字面上来说是很简单的，但还没有任何人对解离过程提出简单而明确的理论解释。所以这一领域中在很大程度上是依赖于经验进行预测的。但是，下面提出的定则提供了一个在理论上是充分的，然而又是简单的关于连生体破碎过程的分析。

解 离 理 论

下面推导出的解离模式首先假设子碎屑(daughter fragment)的形状、大小和所处的位置是和该碎屑在原来未破碎矿石中的位置无关的。破磨时产出了四类基本颗粒，即目的矿物单体颗粒、脉石单体颗粒、由单界面相连的目的矿物和脉石矿物组成的颗粒（第三类，连生颗粒）以及含有几个目的矿物包裹体的脉石颗粒（第四类，连生颗粒）。见图1。

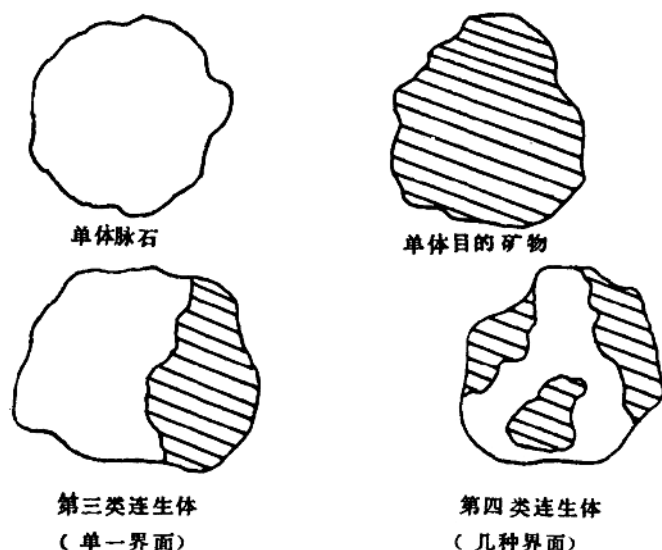


图1 单体和连生体颗粒

在第三、四类颗粒中, 存在一些目的矿物和脉石之间的原有的界面。当坚硬岩石破碎时, 这种界面完全不会出现解体, 只有在很少见的情况下, 破碎才会沿着这种相与相间的界面发生。因此界面面积是守恒的。随着子碎屑粒度的减小, 既不会创造出也不会破坏这种界面。从数学术语上来说, 界面面积是个不变量, 这就是解离理论的第一条定则。

为了使其余定则的推导方便起见, 做了下列合理的假定:

1. 最大的破碎颗粒的粒径小于包体颗粒的粒径。
2. 在破碎过程中, 保持着颗粒外形的相似性。
3. 破碎颗粒的粒度分布符合Gaudin-Schuhmann分布公式。
4. 磨碎颗粒呈球形。

前两条假定是推导的必要条件, 后两条是为简化推导过程而提出的。为了使这种分析有根据, 还需要假定目的矿物要么是单体解离的, 要么以第三类的连生体存在, 也就是说, 第四类连生体的数量必须很小。如果假设最大颗粒粒径和包体颗粒粒径相比较是小的, 那么上面这个假定就能成立。

Durney和Meloy已经指出, 在均匀的固体物质破碎过程中, 如果颗粒几何外形不是粒度大小的函数时, 那么误差相对来说是小的。因此这种假定对于结果的真实性的影响也是小的。为了计算这种误差实际产生的影响, 就需要详细查明样品中各种颗粒的形态和了解有关复杂的概率模式的知识, 后者要求进行四个附加的积分运算以消除多余的变量。

因为在Gaudin-Schuhmann粒度分布公式中指数是一个常量, 所以只要设一个方程就可以很容易地推算出常量指数的偏差。当不是所有粒度的分布都遵循Gaudin-Schuhmann公式时, 在那些不同的粒度分布中, 较小粒级部分还是遵循Gaudin-Schuhmann公式的。

为方便起见, 假设所有的颗粒都是球形的, 这样可以不必考虑长条状颗粒的连生度 (lokedness), (在第三类颗粒中, 连生度可以定义为颗粒中连生的目的矿物的体积百分数)。对于长条状颗粒, 在计算几率和颗粒连生度时, 就必须考虑它们在三维空间中的方位。这种三维空间的方位问题使计算过程复杂化, 但它并不显著影响最终结果。

下面提出的八条定则, 对每一条都作了直观的推导。Meloy 与 Meloy和Clark 详细证明了这些定则。

定则1: 界面积守恒

当一种坚硬而具有脆性的多相物质破碎时, 不管物质磨碎得多细, 两个矿物相之间的界面积保持不变。已经证明, 如果两矿物相之间的结合力达到两相中任何一相内部的抗拉强度的相当大的百分比的话, 那么明显地沿着两矿物相界面发生破裂的可能性几乎近于零。界面积守恒得到了证明, 而且Steiner认为, 任何一个解离理论都应该以这个守恒概念为基础。

有许多弱结合的岩石, 例如发育有裂理的岩石或像砾岩那样的沉积岩石以及应力侵蚀裂隙 (stress corrosion cracking) 先于裂理形成的岩石。在砾岩中, 河流砾石与基质填充物之间实际上是不存在结合力的。在这样一些岩石中, 如果我们小心翼翼地使岩石显著地沿着裂理破碎, 那么就会发生粒间破裂。但是, 对于坚硬的岩石, 两矿物相之间的粒间破裂是不会优先发生的, 因此粒间的界面积是守恒的。

定则2: 连生体颗粒的表面积守恒

如果第四类颗粒在矿料中所占的数量很少, 并且矿料中的颗粒形状不随粒度变化而变化, 那么不管样品磨得多细, 第三类颗粒的表面积保持不变。

从直观上来说,如果颗粒形状相似这一点成立,那么第三类颗粒的表面积与界面积之比应是常数(界面积和表面积两者都和颗粒直径的平方成正比)。不管物料磨得多细,因为连生体的界面积保持不变,那么连生体的表面积也必然保持不变。随着粒度减少所增加的表面积是由新生成的单体颗粒产生的。

定则 3: 连生体质量与粒度成正比

如果第四类颗粒质量很小,并且颗粒形状不随粒度大小而变化,那么连生体的总质量(或总体积)和平均粒度成正比。如果各种颗粒形态的配合比(the particle mix)不随粒度减小而变化,那么,由于颗粒的质量和它的特征尺寸的立方成正比,并且连生体的表面积守恒,因此连生体的质量必然与平均粒度成正比。

作为这条定则的一条推论,在连生体中的目的矿物的质量也与平均粒度成正比。如果随着粒径减小其颗粒形状保持不变,那么在连生体中目的矿物的质量百分比是保持不变的,并与粒度大小无关。因为颗粒的质量和特定尺寸的立方成正比,并且连生体的表面积保持恒定,因此连生体的质量与平均粒度成正比。

定则 4: 连生体颗粒粒度分布曲线的斜率

如果破碎颗粒的粒度分布符合斜率为“ m ”的Gaudin-Schuhmann曲线,那么连生体颗粒的粒度分布也遵循同样的规律,但它的斜率为“ $m+1$ ”。一个颗粒被连生时,其体积等于界面积乘以该颗粒的粒径。这意味着一个颗粒处于连生体状态的几率与它的粒径成正比。因此连生体的粒度分布曲线之斜率比破碎颗粒的粒度分布曲线斜率要大一倍。

定则 5 (Durney定则): 在某一筛析粒级中连生体的质量

对于一个给定筛孔而言,筛上连生体的数量与粒径的“ $m+1$ ”次方成正比。这条定则是直接从定则 4 得来的。因为小于粒径 x 的累计体积是和 x^{m+1} 成正比,所以在某一筛上的体积也必然服从于同次方规律。

定则 6: 连生度 (lockedness) 分布图

对于某一给定粒径来说,连生度的分布图形是和粒径或磨细度不相关的。对于第三类的颗粒而言,连生度可以定义为目的矿物在颗粒中的体积百分数。如果假设几何形态相似,那么对某一给定粒径而言,以连生度百分数为变量所得到的具有某一连生度的颗粒质量百分数的图形与磨细度及粒径不相关。

因为某一颗粒处于连生体状态的几率是粒径大小的函数,所以几何外形的类似意味着连生度大小的几率和磨细度无关,但与粒径成正比。具有一定连生度的颗粒体积或质量百分比仅仅是从颗粒中心到包裹体之间的颗粒半径除以颗粒半径所得百分比的函数。这种百分比是和粒径无关的,因此,连生度的频率分布与粒径大小和磨细度均无关。

定则 7: 在某一比重带内的连生体粒度分布

在某一给定比重带宽范围内的连生体,它们的体积(或质量)粒度分布曲线遵循定则 4 中提出的“ $m+1$ ”次方规律。这一定则是直接从定则 4 和定则 6 得来的。

定则 7 的含义是,在任何两个比重(密度)值之间的连生体,都具有定则 4 所提出的斜率同为 $m+1$ 的粒度分布曲线。例如,在石英—黄铁矿样品中,连生体的比重介于3和4之间,它们的粒度分布曲线也将具有 $m+1$ 的斜率。

定则 8: 粒度与连生度的相关性

较小的颗粒成为连生体的可能性较少。由于粒度减小,连生颗粒的百分数与粒径成正比

例。对于粒径一定的颗粒来说，其中能被连生的颗粒体积与颗粒直径成正比，见图 2。因为这种连生颗粒体积随粒度减小而减小，所以粒度一定的颗粒百分数也直接随粒度减小而减小。定则 8 由定则 4 直接推出。

新理论的应用

上面提出的八条定则可应用于工厂流程设计和实验室测试技术中，在实际工作中，这八条规则意味着，如果样品已经磨细到目的矿物有 60% 得到了单体解离（40% 的目的矿物处于连生体中），那么再把矿样磨细度增加一倍，将只能把其中的一半，即 20% 的目的矿物成为单体解离出来，从而达到 80% 的单体解离度。如果我们把矿样磨细到原来的 4 倍和 8 倍，我们将分别得到 90% 和 95% 的解离度（定则 3）。磨矿作业是大量消耗能量的工序，因此能耗大致正比于新增加的表面积。提高磨细度是以大的能耗换取有限的解离度。为了使解离度从 90% 提高的 95%，即为提高 5% 的解离度，磨矿费用却要成倍增加。再者，连生体分布曲线较陡表明绝大部分连生体分布在最粗粒级范围内。较粗的单体颗粒和连生体颗粒都比相应颗粒被磨得更细时容易回收。因此至少在初选时磨得粗一些对提高总回收率有利（定则 4）。这一点在流程设计中具有重要意义。即使由于细磨，解离度有所提高，但当磨到一定细度时，总回收率将会因矿泥增加而降低。进一步分析将证明，先进行有限的磨矿，然后浮选，接着再将尾矿进一步磨细，这将会在较有利的条件下达到较高的回收率。

因为通过磨矿要想达到矿物的完全解离是不可能的，因此选矿流程的设计应该既考虑单体颗粒的处理又应考虑连生体颗粒的处理。在许多传统的选矿工艺流程中，都有精矿产品和中矿产品。后者被认为是由连生体组成的，它们能够通过磨细回收解离出来的目的矿物。因为能源价格的不断上涨，同时也难以制订出更经济有效的磨矿技术，所以将来的流程可以制订为开始以较粗的粒度用较合理的流程回收第 3 类和第 4 类的连生体，接着提高磨细度，回收新的单体颗粒和较细的连生体颗粒。例如，我们可以把传统的流程进行修改，减少磨矿量，使样品粒度比以前增高一倍，用一种高效率粒度分级机分离矿样，然后把分级机筛下的矿样送入选矿回路。因为连生体的重量将增加一倍，所以精矿产品的品位将会降低，尾矿中目的矿物将会增加，（因为粒径较粗，矿泥损失会有所减少）。从尾矿中分出粗粒级矿样，使 90% 以上处于连生状态的未回收目的矿物包含在这种粗粒矿样中，再单独重磨这部分样品，就可以再回收其中大部分目的矿物。Gaudin 在报告中介绍的关于粗粒尾矿再磨作业是标准的工业生产实践，它证实了上述理论预测的正确性。应用这些关于连生体理论的知识，就能以较低的磨矿费用获得较高的回收率。产品的品位可通过再次精选得到改进。这种流程的设计请参考 Meloy 与 Williams 和 Meloy 的研究。

上面所一一列出的所有方法将会收到明显的节能效果。每一种方法都是为降低每吨矿石昂贵的磨矿费用而制定的。再者，即使每吨矿石磨矿量相同，但用这种较合理的流程预期能获得较高的回收率。总之，运用这些定则，可以用较低的成本和能耗得到较高的回收率。

这些定则也可以改进分析技术。在实验室，定则 7 能简化对连生体的分析。因为这一定则表明，只要对某一比重带的颗粒进行测定，其结果可适用于所有比重的颗粒。这样，在连生体的大量分析工作中，就不必使用高比重的重液或悬浮液了。