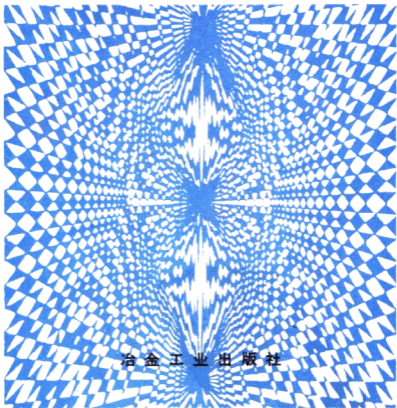


任凤玉 著

# 随机介质放矿 理论及其应用



冶金工业出版社

T085

R-337

# 随机介质放矿理论及其应用

任凤玉 著

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

图书在版编目 (CIP) 数据

随机介质放矿理论及其应用/任凤玉著. —北京:冶金工业出版社, 1994. 4.

ISBN 7-5024-1520-3

I. 随… I. 任… III. 放矿理论-计算机模拟 N. TD85  
3.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 03237 号

出版人 鞠启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京昌平长城印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行, 各地新华书店经销

1994 年 4 月第 1 版, 1994 年 4 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 7.25 印张; 188 千字; 219 页; 1~500 册

9.90 元

## 序 言

该书作者在研究各种随机介质放矿理论并且经过大量实验室试验的基础上创造性地提出了自己的随机介质放矿理论。该理论与其它放矿理论对比，其崩落矿岩移动速度场与试验结果相符合的程度较好，而且崩落矿岩移动速度场方程中的参数较容易测定出来。该方程和以该方程为基础推导出的崩落矿岩颗粒移动迹线方程、放出体表面方程和崩落矿岩接触面位置移动方程等，从多方面较好地反映了崩落矿岩移动规律。在该书中不仅给出了崩落矿岩移动不受整体矿岩边界影响时的上述方程，而且给出了崩落矿岩移动受整体矿岩边界影响时的上述方程。而给出后一组方程是其它放矿理论所没做到的。

该书作者用上述反映崩落矿岩移动规律的方程改进了放矿随机仿真方法，使这种放矿随机仿真方法能较准确地预测某种采场结构和放矿制度下的放矿中矿石回收率和贫化率，或使这种放矿随机仿真方法能通过较准确地预测各种采场结构和放矿制度下的放矿中矿石回收率和贫化率去优选采场结构和放矿制度。这种优选能显著提高矿山企业的经济效益。

该书作者以自己的大量科研实践说明随机介质放矿理论的可靠性和可操作性。结合科研实践为各种崩落法分别提出的新的采场结构和放矿制度等对于当前的生产实际很有指导意义，值得从事现场工作的科技人员高度重视。书中提出的在有无底柱分段和阶段崩落法中用不等距布置漏斗颈去代替等距布置漏斗颈有助于推迟采场开始贫化时间和减少矿石损失贫化，在无底柱分段崩落法中，在调整采场结构参数的同时，用低贫化或不贫化放矿制度去代替一直从采场放矿到放出矿石品位降低到盈亏平衡品位才截止

ABF 38/04

放矿的制度，有助于在国内外矿山中在不降低矿石回收率的条件下大幅度降低贫化率，从而大幅度提高矿山企业的经济效益。

该书作者为了写清楚自己的随机介质放矿理论中各个方程的来源，恰当地使用了数学公式和来自试验的数值和图形，使别人容易看懂。对于各个方程的导出，深入浅出，步骤清楚，结果正确。通过该书作者的精心撰写，高深的理论变得容易掌握了。

该书是一本理论水平高、实用价值强的好书，值得采矿界，尤其是从事崩落法科技工作的科技人员、大学生和研究生去阅读和使用。该书的出版是采矿界的一大喜事。

童光照 苏宏志

1994年3月15日

## 前 言

崩落采矿法在国内外金属矿山广泛应用。国内使用崩落法回采的矿量，黑色金属占地下采出量的85%以上，有色金属占30%左右；国际上使用崩落法采矿的矿山约占25%。而且随着采矿向地下深处发展，崩落法的使用有增加的趋势。

崩落法采矿的特点之一，是矿石崩落后与岩石直接接触，且在岩石覆盖下从放矿口放出。由于矿、岩直接接触，若采场结构参数或放矿管理不当，容易造成较大的矿石损失与废石混入，因此，研究崩落矿岩移动规律，以此优化采场结构参数和放矿工艺方法，对于提高崩落法采矿的经济效益，具有重要意义。

按崩落矿岩移动的空间条件，可将崩落法放矿分为三类：一为无限边界条件，即在放矿时崩落矿岩的移动不受采场边壁的限制；第二类为半无限（端壁）边界条件，其壁面与散体颗粒固有移动迹线重合，如无底柱分段崩落法端部放矿；第三类为倾斜壁边界条件，即崩落矿岩移动时受上、下盘边壁影响的采场放矿条件。

以往放矿理论（主要是椭球体理论与随机介质理论），比较详细地研究了第一类与第二类边界条件的崩落矿岩移动规律，但对第三类边界条件研究较少。而第三类边界条件是生产中最常遇到的边界条件，只有解决这类边界条件的崩落矿岩移动规律，才能使放矿理论更广泛地用于生产实际。

就理论方法而言，随机介质放矿理论运用概率论方法研究崩落矿岩移动规律，能够较好地适应崩落矿岩移动中单个颗粒瞬时移、止的随机性与群体颗粒宏观流动的连续性同时存在之特征，具

有广阔的发展前景。但该理论早期的研究中给出的放出体形态(下部粗大、上部细小)与大多数研究者的常规物理模拟实验不符,由此影响了该理论的实用与发展。

在近年的研究中,本书作者在实验基础上,将随机介质方法与散体流动的实际物理过程相结合,使随机介质放矿理论获得较大进展,不仅克服了放出体形态失真并解决了上述三类边界条件的放矿问题,而且研究了放矿口对散体移动规律的影响。

本书详细介绍随机介质放矿理论及其研究的新成果。在理论部分,为圆满解决实用中的三大问题(放出体、矿石残留体与矿岩混杂过程),系统地研究了散体移动过程中存在的五种物理量:(1)散体移动速度分布;(2)颗粒移动迹线;(3)放出漏斗;(4)放出体(含达孔量场);(5)颗粒位置变换与放出量关系。换句话说,建立各类条件下这五种物理量的表述方程,构成本书理论部分的骨架。

在应用部分,本书依据随机介质放矿理论的研究结果,主要改进了放矿计算机仿真(又称放矿随机模拟)方法。该方法自1968年问世以来,虽经国内外学者多方面的大量的研究,但其数学模型问题一直未得到合理解决,因此仿真中不得不全部或部分地依靠反复调试方法确定模块递补概率值,使仿真结果难于完全消除主观随意性,同时当矿石层高度大时不能保证仿真精度。书中综合各类边界条件下的散体移动概率密度方程,作为放矿仿真的数学模型,从而将散体实际宏观移动状态与仿真模块宏观移动状态统一起来,解决了移动场相似问题,提高了仿真精度。书中介绍了经过改进的仿真技术在阶段崩落法放矿、分段崩落法放矿、以及综放采煤法放煤中的应用方法与实用效果。这些应用实例表明,用新的仿真法优化采场结构、工艺参数、以及改进放矿管理等,可取得良好的效果。

在本书出版之际,作者要特别感谢刘兴国教授对本书所做的贡献。他不仅自始至终指导了作者的研究工作,而且书中的许多细节都凝聚着他的心血。作为他的学生,作者在其他方面也得益

于他多年的教诲。作者也十分感激徐小荷教授与王泳嘉教授，他们对本书工作提出了许多改进意见。本研究也得到了东北大学青年教科研基金的部分资助，对此一并表示谢意。

由于时间仓促，书中难免有不当之处，恳切希望读者不吝赐教。

作 者

1994年2月20日



# 目 录

<b>第一章 无限边界条件下崩落矿岩移动规律</b> .....	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 崩落矿岩移动概率方程.....	(6)
第三节 崩落矿岩移动规律方程.....	(12)
第四节 新理论方程及其特点.....	(23)
第五节 放矿现象分析.....	(32)
<b>第二章 半无限(端壁)边界条件下崩落矿岩移动规律</b> ...	(35)
第一节 概述.....	(35)
第二节 崩落矿岩移动概率方程.....	(36)
第三节 崩落矿岩移动规律方程.....	(38)
第四节 实验检验.....	(47)
第五节 方程的实用性.....	(52)
<b>第三章 倾斜壁边界条件下崩落矿岩移动规律</b> .....	(56)
第一节 概述.....	(56)
第二节 斜壁边界散体移动概率方程.....	(57)
第三节 斜壁边界散体移动规律方程.....	(62)
第四节 参数意义及其测定方法.....	(67)
第五节 方程的应用与补充说明.....	(71)
<b>第四章 放矿口对散体移动规律的影响</b> .....	(78)
第一节 概述.....	(78)
第二节 散体移动概率的叠加性质.....	(78)
第三节 放矿口对散体移动概率的影响.....	(82)
第四节 放矿口对散体移动状态的影响.....	(84)
第五节 放矿口对散体移动规律的影响.....	(86)
第六节 放矿图形的绘制方法与放出量计算.....	(89)
<b>第五章 有底柱崩落法出矿口布置的优化</b> .....	(95)

第一节	漏斗放矿结构与散体出口速度 .....	(95)
第二节	漏斗出矿放出体轴线的偏移 .....	(97)
第三节	有底柱崩落法出矿结构的改进 .....	(100)
<b>第六章</b>	<b>端部放矿出矿口影响范围内崩落矿岩的移动规律</b> .....	(103)
第一节	概述 .....	(103)
第二节	散体移动概率场与速度场 .....	(104)
第三节	散体移动规律方程 .....	(108)
第四节	废石混入过程 .....	(111)
<b>第七章</b>	<b>无底柱分段崩落法放矿方式的分析与采场结构的 改进</b> .....	(114)
第一节	概述 .....	(114)
第二节	截止品位放矿方式的分析 .....	(115)
第三节	无底柱分段崩落法贫化放矿 .....	(119)
第四节	无底柱分段崩落法不贫化放矿 .....	(123)
第五节	无底柱分段崩落法进路间残留矿量的回收 .....	(126)
<b>第八章</b>	<b>崩落法放矿计算机仿真</b> .....	(129)
第一节	概述 .....	(129)
第二节	D. Jolley 概型分析 .....	(132)
第三节	仿真准则与仿真概率场方程 .....	(137)
第四节	仿真方法与仿真程序编制 .....	(140)
<b>第九章</b>	<b>弓长岭井下铁矿分段留矿崩落法放矿计算机仿真</b> .....	(146)
第一节	原始条件 .....	(146)
第二节	6619 采场放矿方案的优选 .....	(148)
第三节	正常回采时分段留矿崩落法放矿仿真研究 .....	(154)
第四节	结论 .....	(160)
<b>第十章</b>	<b>综放采煤法顶煤放出规律计算机仿真</b> .....	(162)

第一节	概述	(162)
第二节	缓倾斜煤层综放采煤法顶煤放出规律计算机 仿真	(164)
第三节	急倾斜煤层综放采煤法顶煤放出规律计算机 仿真	(177)
第四节	结论	(186)
<b>第十一章</b>	<b>计算机仿真在无底柱分段崩落法设计与生产中的     应用</b>	<b>(188)</b>
第一节	概述	(188)
第二节	计算机仿真在优选开采方案中的应用	(188)
第三节	计算机仿真在参数优化中的应用	(193)
第四节	计算机仿真在生产矿山优选放矿步距与放矿制 度中的应用	(199)
<b>第十二章</b>	<b>随机介质放矿理论及其计算机仿真在玉石洼铁矿     采矿方法改革中的应用</b>	<b>(205)</b>
第一节	概述	(205)
第二节	矿石移动特性与回收进路参数	(207)
第三节	新方案放矿方式的仿真研究	(210)
第四节	结论	(214)
<b>参考文献</b>		<b>(216)</b>

# 第一章 无限边界条件下崩落 矿岩移动规律

## 第一节 概述

矿石崩落后成为松散介质，堆于采场。打开漏口闸门后，采场内崩落的矿岩籍重力向漏口下移，并从漏口流出。散体移动中不受边界影响的放矿条件，称为无限边界条件，如厚大矿体中部矿块远离边壁的漏孔放矿条件，以及缓倾斜矿体底板漏斗崩落法的放矿条件等，都属于无限边界条件。

这类边界条件下散体移动过程如图 1.1 所示。当从漏口放出  $Q_f$  散体时， $Q_f$  放出体原来占据的空间位置由其上方和其附近的散体籍重力作用下移递补。散体在下移过程中颗粒移动速度随位置而变化，在每一水平剖面上，离漏口轴线越近的颗粒下降越快，离轴线越远的颗粒下降越慢，因此原来位于同一层面上的颗粒，在下移过程中由于下降速度不等而形成漏斗状凹坑，此凹坑称为放出漏斗。放出漏斗形状随形成它的层面高度而变化，当层面高度小于放出体高度时，漏斗最低点颗粒已被放出，称之为破裂漏斗；当层面高度等于放出体高度时，漏斗最低点颗粒刚好到达放出口，称为降落漏斗；当层面高度大于放出体高度时，放出漏斗处于整体移动过程中，称之为移动漏斗。

将散体简化为连续流动的随机介质，运用概率论方法研究上述散体移动过程而形成的理论体系，即称为随机介质放矿理论。

以概率论为工具研究散体移动过程的方法，最早始于 60 年代。波兰 J. Litwinişzyn 教授在文献 [1] 中认为，松散介质运动过程是随机过程。他给出的随机介质模型如图 1.2 所示，设想每个方箱内包含一个重球，当第 I 层  $a_1$  球移出，其空位由第 II 层  $a_2$

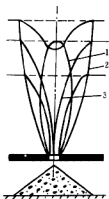


图 1.1 散体移动过程示意图  
1—放出体；2—移动范围；3—放出漏斗

或  $b_2$  的球体下移占据，此时第 I 层少了一个球体（比如是  $a_2$ ），它将由第 III 层的  $a_3$  或  $b_3$  处的球体所递补。这样第 I 层放出一个球体就引起上部各层下移一个球体。如果从  $a_1$  连续地放出很多球体，那么上部层中有很多方箱放空，空箱的边界区域形成台阶线。若第  $N$  层空箱由第  $N+1$  层相邻两球每球占据的概率各为  $1/2$ ，那么当层数与放出的球数相当多时，该台阶线便逼近正态 (Gaussian) 曲线。

J. Litwiniszyn 从模型描述的现象引出推论——当从  $z_0$  水平放出一定的单元体时，

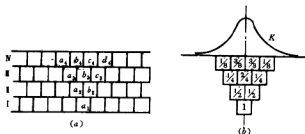


图 1.2 Litwiniszyn 移动模型  
(a) — 移动方式；(b) — 移动概率分布

引起原来位于  $z_1$  水平 ( $z_1 > z_0$ ) 的单元体以一定的概率发生下移。他把散体视为随机移动连续介质，建立了移动漏斗深度函数  $W$

的微分方程式

$$\frac{\partial W(z, x)}{\partial z} = \frac{\partial z}{\partial z} \times W(z, x) - B(z) \left[ \frac{\partial^2 W(z, x)}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 W(z, x)}{\partial x_2^2} \right] \quad (1.1)$$

式中  $\partial z / \partial z$  为下移过程中散体体积增量。当  $\partial z / \partial z = 0$  时，即将流动散体简化为不可压缩介质时，式(1.1)形式上表现为 Einstein-Kolmogorow 类型的方程，同热传导、分子扩散是同一类型的方程。

此后王泳嘉教授与苏联 В. В. Куликов 分别在 60 年代与 70 年代初期提出散体移动球体递补模型<sup>[2,3]</sup>，其中文献[2]进一步指出，崩落矿石移动中最本质的现象是运动的随机性。如图 1.3 所示，假定从漏口每隔一秒钟放出一个颗粒，则颗粒 *a* 如取箭头所示的路径，最顺利时第 4 秒就会流出漏斗口。但也有可能颗粒 *a* 暂时不动而颗粒 *b* 先动，或者 *b* 和 *c* 先动；也有可能 *a* 先动但到下一层位置后就不能顺利地通过以下位置。这样颗粒 *a* 就不能在第 4 秒时流出，而是比 4 秒大。就是说，对于某一具体颗粒来说，无法确定它究竟何时流出漏斗口。这样，颗粒的运动表现出不确定性、随机性。

对放矿来说，最有意义的不在于研究个别颗粒的运动，而在于研究那些发生运动的并相互制约的大量颗粒所组成总体的运动规律。在图 1.4 所示的理想球体模型里，打开漏孔后，第 0 层直接位于漏口上方的颗粒必然掉下来，这一必然事件的发生概率是 1。这一颗粒掉出后的位置，必然用第 1 层颗粒掉下补充；第 1 层共有两个颗粒可能下移，究竟是左边颗粒下移还是右边颗粒下移递补，则是一个随机事件，没法事先完全确定；但由于对称性可以肯定，两个颗粒有相同的可能下移递补，即第 1 层两个颗粒下移概率各为 1/2。当第 1 层中某个颗粒补充到第 0 层后，其原来的位置又空缺了，同样必然由第 2 层相邻颗粒按等概率下移递补。这时第 2 层有 3 个颗粒可能下移，中间颗粒无论第 1 层空位出现在左、右哪一位置都有可能下移，其移动概率为 1/2；两边颗粒仅当空位出现在邻近位置时才有可能下移，递补概率各为 1/4。据此类

推，可计算出其它各层颗粒的移动概率（图 1.4）。用数学归纳法求出概率分布规律，再据实际散体颗粒组合状态引入常数项调整，使得颗粒移动概率分布方程。以概率分布方程为基础，借助场论知识即可建立各种放矿现象的描述方程，形成随机介质放矿理论。

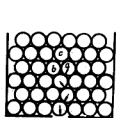


图 1.3 颗粒移动的随机性

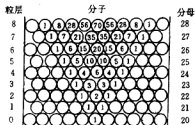


图 1.4 球体模型颗粒移动概率分布

纵观随机介质放矿理论的研究历史，前期工作中文献 [2, 3] 的研究成果最具有代表性。概括说来，文献 [2] 基于上述思路比较系统地研究了放矿的平面问题；文献 [3] 进一步将理想球体视为不变形、运动彼此独立的随机介质，它不仅研究了放矿的平面问题，也研究了空间问题。这些研究以及随后较为系统的研究中<sup>[4-7]</sup>，尽管给出的方程形式不尽一致，都归结为同一运动微分方程<sup>[8]</sup>

$$\frac{\partial P(u, v, w)}{\partial x} = B \left[ \frac{\partial^2 P(u, v, w)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(u, v, w)}{\partial y^2} \right] \quad (1.2)$$

式中  $u, v, w$ ——沿  $x, y, z$  轴方向的变换坐标；

$B$ ——常数；

$P(u, v, w)$ ——散体移动概率密度函数。

式 (1.2) 为椭圆形偏微分方程，与式 (1.1) 对比，一是将流动散体视为不可压缩介质 ( $\partial u / \partial x = 0$ )，二是将系数  $B(z)$  简化为常数。

由式 (1.2) 得出的放出体形态如图 1.5 (a) 所示，上部细小

下部粗大，最宽部位所在高度偏于下部。

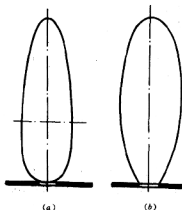


图 1.5 放出体形态对比

(a)一式 (1.2) 放出体形态；(b)—实验放出体形态

放出体形态是移动场中可实测的物理量，它在放矿理论研究中占有极其重要的位置，一方面人们通过测绘放出体形态来认识散体的移动属性，另一方面人们通过放出体形态来评价理论的逼真度。这里应当指出，随着研究的深入，人们对放出体形态的描述也越来越精确。早在 40 年代，前苏联 C. C. 米纳耶夫在实验室测得放出体形状为一旋转椭球体；1952 年原苏联 Г. М. 马拉霍夫通过以细砂为充填料的放矿实验认定，放出体是一被漏口平面切割的戴头椭球体<sup>[9]</sup>；80 年代后期，国内研究者<sup>[10-12]</sup>改进了实验技术与数据处理方法，测得放出体并非标准椭球体，其形态常常是上部较标准椭球体粗、下部较标准椭球体细，可视为近似椭球体<sup>[10,11]</sup>。总之，尽管描述精度不同，所有这些由常规实验获得的放出体形态与图 1.5 (a) 放出体形态明显不符。作者以颗粒直径  $d=0.2\sim 0.5\text{cm}$  的白云岩作充填料进行放出体常规物理模拟实



验, 装填密度  $\rho = 1.56\text{g/cm}^3$ , 测得的放出体形态见图 1.5 (b), 与图 1.5 (a) 对比, 两者差异也是较大的<sup>[14]</sup>。

由于得不到常规实验的普遍证实, 早期的随机介质放矿理论迄今未得到广泛接受, 仅作为一种理论方法解说放矿现象, 基本上没有得到实际应用。

本书作者近年发现, 出现上述差异的主要原因, 是以往随机介质放矿理论仅注重颗粒移动的随机性, 而忽略了颗粒移动中必然受到的移动场的宏观制约。也就是说, 放出体形态与实际差异较大的原因是, 所建模型没有深入到散体移动的实质, 给出的散体移动概率场与实际出入较大。

鉴于上述原因, 笔者认为改善放出体形态并使之与实际相符的根本途径, 是提高散体移动概率场的逼真度。为此, 所建模型应能充分反映散体移动的实际, 同时给出的移动概率方程应能充分反映散体流动的实际物理过程。因此, 本书采用新的散体移动模型, 并运用理论分析与放矿实验相结合的方法建立散体移动概率密度方程。

## 第二节 崩落矿岩移动概率方程

崩落矿岩是一种结构极为复杂的多空隙散体, 遇有适宜的空间条件便藉重力作用发生移动, 忽略移动中瞬时松散的影响, 可将其简化为连续流动的随机介质。

为便于考虑移动场的制约条件, 用直角坐标系将散体堆划分成网格, 在任一固定空间区域内, 散体的移动状况如图 1.6 所示。设从  $D$  方格放出散体,  $D$  方格内形成的空隙主要由其上方格  $A$ 、 $B$ 、 $C$  内的散体填补, 其中  $B$  方格填补量应大于  $A$ 、 $C$  的填补量。假定理想条件下散体在方格间的填补运动仅由重力引起, 则从  $B$  方格进入  $D$  方格的位移方向与重力方向一致; 按形心计算, 从  $A$  或  $C$  方格进入  $D$  方格的位移方向与重力方向夹角  $45^\circ$ 。设重力引起  $B$  方格散体的平均填补速度为  $v_B$ 、平均移动距离为 1 个长度单