

高等学校教学用书

# 放矿理论基础

**G**AODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社



ISBN 7-5024-1618-8



9 787502 416188 >

ISBN 7-5024-1618-8

TD·247(课) 定价 6.10元

高等学校教学用书

# 放矿理论基础

东北大学 刘兴国 主编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

**图书在版编目 (CIP) 数据**

放矿理论基础/刘兴国主编. -北京:冶金工业出版社, 1995.6

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-1618-8

I. 放… I. 刘… I. 放矿理论-基础理论-高等学校-教材 IV.TD801

中国版本图书馆CIP数据核字 (94) 第12223号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷39号, 邮编100009)

香河县第二印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店 经销

1995年5月第1版, 1995年5月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16, 10印张, 233千字, 152页, 1-500册

6.10元

## 前 言

1978年在编制高等学校采矿工程专业教学计划与教学大纲会议上确定采矿工程专业学生设置“放矿理论基础”选修课,将放矿理论从“金属矿床地下开采崩落采矿法”中分离出来,单独设课。1982年出版了由王昌汉教授主编的第一本教材《放矿学》。本教材是在《放矿学》基础上编写的,无论是教材框架或具体内容都参考了《放矿学》。

本书由东北大学刘兴国担任主编,编写绪论、第2、3和5章,第1和4章由中南工业大学周骥编写。

西安冶金学院李荣福、青岛矿山大学鞠玉忠、唐山工程技术学院吕广忠和东北大学任凤玉等同志参加了本书的审稿会,提出了很多宝贵意见,编者向他们致以衷心感谢。

书中放矿理论部分内容,有的是编者与王泳嘉、任凤玉合作完成的,有的是取自任凤玉的硕士论文与博士论文,在此向王泳嘉和任凤玉两位同志深致谢意。

放矿理论是一门新的学科,有的内容不够成熟,需要进一步充实和完善,还有一些问题正在探索,再加上编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,热诚欢迎批评和指正。

编者

1994年5月

ABE84/67

I

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 绪论 .....                       | 1   |
| 1 崩落矿石的物理力学性质 .....            | 6   |
| 1.1 密度 .....                   | 6   |
| 1.2 松散性 .....                  | 7   |
| 1.3 湿度 .....                   | 8   |
| 1.4 块度 .....                   | 9   |
| 1.5 自然安息角 .....                | 15  |
| 1.6 外摩擦角 .....                 | 17  |
| 1.7 内摩擦角 .....                 | 19  |
| 第1章 思考题 .....                  | 22  |
| 2 底部放矿 .....                   | 23  |
| 2.1 单漏孔放出时崩落矿岩移动的基本规律 .....    | 23  |
| 2.2 多漏孔(底柱漏孔)放出时崩落矿岩移动规律 ..... | 41  |
| 2.3 有底柱崩落法数值模拟放矿 .....         | 50  |
| 2.4 采场边界条件与随机模拟放矿 .....        | 53  |
| 2.5 有底柱崩落法降低矿石损失贫化的技术措施 .....  | 70  |
| 2.6 有底柱崩落法放矿管理 .....           | 82  |
| 第2章 思考题与习题 .....               | 88  |
| 3 端部放矿 .....                   | 90  |
| 3.1 端部漏口放出时崩落矿岩移动基本规律 .....    | 90  |
| 3.2 无底柱分段崩落法放矿数值模拟 .....       | 97  |
| 3.3 无底柱分段崩落法降低矿石损失贫化技术措施 ..... | 99  |
| 3.4 无底柱分段崩落法放矿管理 .....         | 111 |
| 3.5 无底柱分段崩落法不贫化放矿 .....        | 113 |
| 第3章 思考题与习题 .....               | 117 |
| 4 振动放矿及其应用 .....               | 118 |
| 4.1 概述 .....                   | 118 |
| 4.2 振动放矿原理 .....               | 121 |
| 4.3 振动设备结构及工作参数 .....          | 124 |
| 4.4 振动放矿的应用 .....              | 131 |
| 第4章 思考题 .....                  | 136 |
| 5 矿石损失贫化的经济计算 .....            | 137 |
| 5.1 矿石损失贫化的经济计算 .....          | 137 |
| 5.2 崩落法放矿截止品位的确定方法 .....       | 143 |
| 第5章 思考题 .....                  | 150 |
| 参考文献 .....                     | 151 |

## 绪 论

崩落采矿法包括有底柱的分段崩落法和阶段崩落法、无底柱分段崩落法以及近年开始应用的自然崩落法,属生产效率高、采矿成本低和作业安全的采矿方法。在我国地下矿山已获得广泛应用,地下铁矿山用崩落法采出的矿石量占采出矿石总量的85%以上,有色金属矿山约占35%,化工矿山也有使用。随着采矿工业的发展以及开采深度的加大,崩落法的应用将更加广泛。

崩落法放矿基本特征之一是,崩落的矿石与崩落的岩石直接接触,在此种条件下放矿(即一般所谓的覆岩下放矿),若搞不好,将增大矿石损失贫化,浪费资源,恶化技术经济效益。为此国内外对崩落法放矿进行了大量的研究工作,获得了很多理论的与实际的资料,刊出很多的论文,出版了放矿专著。

崩落法放矿理论内容概括起来讲就是研究覆岩下放矿的崩落矿岩移动规律以及据此揭示矿石损失贫化过程,以资优化崩落采矿方案,确定合理结构参数和改进放矿管理,最终是为了达到降低矿石损失贫化和提高经济效益的目的。

崩落法放矿理论于20世纪50年代初步形成理论体系。我国于60年代随着崩落采矿法,特别是无底柱分段崩落法的推广应用,高等院校和研究院等都对放矿理论进行了大量研究,并取得了好的成果,指导了矿山生产。尤其硕士生与博士生投入放矿理论研究之后,使我国的放矿理论突飞猛进,就总体讲,我国的放矿理论研究水平当居世界领先地位。

崩落法放矿理论进入实用阶段的有椭球体放矿理论、随机介质放矿理论和随机模拟放矿(计算机仿真)。椭球体放矿理论建立最早,应用最广,遍及世界。它的特征是,根据实验室试验得出放出体为一近似椭球,故以椭球方程为放出体的数学模型,并根据放出体基本性质求出一系列的表述各种规律性现象的方程式,以此所构成的放矿理论就是椭球体理论。

本书根据当前应用情况与教学要求,主要采用椭球体放矿理论体系,同时简介了随机模拟放矿及其应用情况。

本书共设5章,第1章根据研究放矿过程需要,阐述崩落矿岩物理力学性质;第2章为底部放矿,主要讲有底柱崩落法放矿崩落矿岩移动规律及其应用;第3章讲端部放矿,除了端部放矿理论及其应用之外,于本章最后针对端部放矿贫化大的问题,提出了改革现用截止品位放矿方式,施行低(不)贫化放矿,这种新的放矿方式可使贫化率降低到5%~6%,无疑对无底柱分段崩落法放矿将是一次突破性进展;第4章讲振动放矿及其应用,除了讲述振动放矿原理与有关的振动设备之外,还简述了振动放矿在溜矿井与采场放矿中的应用,在狮山铜矿有底柱崩落法中试验成功的振动放矿与连续出矿也列入本章,该项试验的成功是崩落法放矿技术的新进展;第5章讲矿石损失贫化经济计算,在讲述常规内容之后,指出工业矿石全价值概念,深化了矿石损失贫化经济分析与计算。

下面首先阐述椭球体放矿理论的形成和研究现状,其次简介其他各种放矿理论的研究情况,给出整个放矿理论研究的现时概况。

## 一、椭球体放矿理论的形成与现状

从模型单漏孔放出散体时,所放的散体在模型中原来占据的形体称为放出体,模型试验表明,放出体为一近似椭球体,故用椭球方程作为放出体的表达式。在这个基础上,根据放出体基本性质<sup>①</sup>,推导出一系列的表达散体放出规律性现象的方程式,用来说明散体的移动过程,这就是一般所谓的“椭球体放矿理论”。这个放矿理论提出最早,应用最广,它可以说明和解决一些生产实际问题。Г.М.马拉霍夫1952年出版了《崩落矿块的放矿》(综合文献〔5〕简称综〔5〕),形成了椭球体放矿理论,同时对崩落法放矿管理和选择有底柱崩落法合理结构参数等作了很多的研究工作。

以后于1968年Г.М.马拉霍夫与B.П.别朱赫等人撰写的《放矿理论与实践》〔综6〕,增加了一些实验与生产实际资料,但在放矿理论方面未有明显进展。

继Г.М.马拉霍夫之后,B.B.库里柯夫在1965年出版的《金属矿床的联合开采与二次开采》,对单孔放矿理论有所发展,提出放出漏斗方程以及放出体表面颗粒在放出体移动过程中保持相对高度不变的观点(即本书的放出体第三性质)。1972年在该书的修订版〔综7〕中和1980年出版的放矿专著《放矿》〔综8〕对单孔放矿理论进行了深入研究,同时对随机介质放矿理论也进行大量研究,并简介了计算机随机模拟放矿原理。

H.Г.杜培宁于1965年出版了《地下开采的放矿》,他主要靠模型实验结果得出各种关系值,缺少理论研究工作。

这三种崩落采矿法放矿著作,基本上可反映原苏联的放矿研究情况。

根据获得的瑞典、澳大利亚、英国和美国的有关放矿理论研究资料看出,大都采用椭球体理论体系,其中提出流动椭球体的概念(放出体第二性质)是具有理论价值的;在无底柱分段崩落法放矿研究中,提出放出体形状为半椭球体和椭球缺的结论。就总的情况讲,这些国家的放矿理论研究没有超出原苏联的研究水平。

综观国外放矿理论研究现状,可以得出下列概念:

(1) 原苏联在崩落法放矿理论研究方面进行了大量研究工作,并用放矿理论说明和解决了一些生产实际问题。

(2) 椭球体理论应用广泛,遍及世界。

(3) 单孔放矿理论研究较充分,有的已进入定量计算阶段。

(4) 多孔放矿和具有边界条件下放矿的理论研究,就理论高度讲尚属空白,有少量研究工作也只限于现象的说明,并都以模拟实验为基本手段。

(5) 放矿理论研究尚未进入矿石损失贫化预测阶段。

崩落法放矿理论研究工作在我国受到重视,随着崩落采矿法的推广应用,对放矿理论研究与应用方面进行大量工作。椭球体放矿理论体系获得发展和完善,并被广泛应用,在这方面的主要成果有:

(1) 单孔放出理论研究中,在马拉霍夫椭球理论基础上,解决了其中存在的各种问题。提出抽象放出体的概念,完满地解决了表面颗粒“同时到达”问题;在抽象放出体概念的基础上规定出放出体移动三条基本性质;根据三条性质推导出表述散体移动中各种规律性现象方程,即放出漏斗方程、颗粒点移动速度方程和移动迹线方程等。由于这些方程同出一源,是相互统一的,可以完整说明散体移动场中的各种问题,不仅能作定性分析,还可作出定量计算。

根据放出体过渡条件,用连续性方程检验结果得出结论:采用变偏心率时,放出体必须是完整椭球体;偏心率为常值时,完整椭球体或者截头椭球体均可。

只有这样的放出体,在它们表面之间才存在过渡关系,这种检验使理论体系更为完整和准确,因为理论体系应是封闭和完备的。

移动过程中的放出体称为移动体,移动体取决于偏心率的大小及其变化,偏心率值主要取决于散体的松散性质和放出条件。表示放出椭球体偏心率变化的回归方程  $1 - \varepsilon^2 = KH^{-n}$  [2.11],对完善椭球体表达式有着重要作用。

归零量(达孔量)的概念是放矿理论中的一个重要概念。它改变了放出体的传统实验,用标志颗粒的归零量试验值,绘制归零量曲线,实际也是获得了归零量场,在归零量场中可用相等的归零量点来圈绘放出体,因为放出体表面就是归零量的等值面。

用归零量曲线圈绘放出体对建立抽象放出体的概念是科学的方法。在文献[2.12]、[2.16]中,用统计数学方法整理试验数据后圈绘放出体,并提出期望放出体的概念,是确定放出体形状方面的进步。

(2) 多漏孔放矿理论研究始于20世纪80年代初,首先提出了多漏孔放矿理论研究的三项基本内容(多孔放出体、多孔矿石残留体、矿岩界面移动和矿岩混杂过程)。接着针对这三项内容提出计算颗粒点移动方程组和逆移动方程组,用该方程组可以解决多孔放矿问题。

(3) 建立数值模拟放矿理论体系。根据放出体基本性质推导出计算颗粒点的移动方程组,在已知移动场内颗粒点坐标和放出量的条件下,用此方程组可以求得颗粒点移动后的坐标。应用该方程组为数学模型和归零量概念建立了数值模拟放矿理论体系。可以用计算机模拟有底柱崩落法与无底柱分段崩落法的放矿过程,上机实验表明完满地解决了多孔放矿中三个基本问题,并可作出矿石损失贫化预测。

(4) 根据崩落矿岩移动空间条件,将崩落法采场分成三类边界条件:第一类为无限(简单)边界条件,如回采厚矿体的中间矿块,顶板极为软破的缓倾斜矿体矿块等;第二类边界条件为半无限(直壁)边界条件,主要指无底柱分段崩落法采场;第三类为复杂(倾斜)边界条件,具有上下盘倾斜面的矿块。

对前两类边界条件放矿已推导出颗粒点移动方程组,并建立了数值模拟理论体系。第三类边界条件,由于放出体产生变异,放出体已不是椭球体或椭球体的一部分,迄今未能得出放出体表达式,同时也还没有求得表述矿岩界面的移动方程,这是放矿理论研究的难点所在,有待进一步研究解决。文献[2.13]曾用归零量场的方法,文献[2.26]用分段建立移动方程进行数值模拟放矿,但都未能完满地解决此类边界条件的放矿问题。文献[2.36]也曾致力这方面的研究工作,但仅完成了平面问题的研究。

(5) 尽管椭球体放矿理论对第三类边界条件下矿块尚不能作出矿石损失贫化预测(其他放矿理论也是如此),但该理论体系对指导放矿研究与生产仍起着巨大作用,例如对确定合理结构参数和改进放矿管理方面取得了很好效果,降低了矿石损失贫化以及提高了经济效益。

由于本书采用椭球体放矿理论,所以对该理论体系的形成与发展讲的多一些。下面简述非椭球体放矿理论的研究与应用情况。

## 二、计算机随机模拟放矿(计算机仿真)

计算机随机模拟放矿是加拿大D. 焦利于1968年提出的, 该种模拟方法不论采场何种边界条件都可进行模拟放矿, 可以用来预测矿石损失贫化, 优化采场结构参数等等。国内于70年代末开始进行研究, 80年代进行了大量研究与推广应用。为了提高放矿模拟精度, 在模块的移动模型和移动概率赋值问题方面, 主要是对后者进行了大量的研究工作, 完善和发展了随机模拟放矿。文献[2.26]中完成的研究工作颇有成效, 首先按D. 焦利概率赋值方法建立模块离散概率场, 接着将其转化为用连续函数表征的概率分布密度, 用此连续函数分析了D. 焦利模型失真原因。针对失真问题提出移动场相似原则, 将概率密度函数中加入了同散体流动性与放出条件有关的常数 $\alpha$ 、 $\beta$ (根据实验或现场数据求得)。应用此种概率密度方程式建立移动场, 用这个移动场模拟散体移动场。在随机模拟放矿中再将此种移动场进行概率赋值和确定移动模块, 完成随机模拟放矿。计算机模拟试验结果表明, 文献[2.26]较好地解决了模拟放矿中失真问题, 使随机模拟放矿获得突破性的进展。

本书简要叙述了随机模拟放矿及其改进, 并在书中应用随机模拟放矿的结果分析了崩落法放矿和矿石损失贫化。

### 三、随机介质放矿理论

60年代初, 发表了《放矿理论研究的新方向——随机介质理论》[2.37], 在理想散体移动的球体递补模型的基础上, 建立球体离散概率场, 并依据概率论的极限定理, 转化为概率密度函数。在概率密度函数基础上, 根据放矿基本概念, 求导出表示各种放矿规律性现象的表达式, 其中巧妙地引入了介质常数 $B$ , 将理想条件下建立的方程导入崩落矿石中, 用来解决崩落矿岩的移动问题。

B.B. 库里柯夫在1972年和1980年的著作中, 对随机介质理论也进行了深入研究, 解决了无限边界条件的平面问题与空间问题。提出的概率密度函数与文献[2.37]基本上是一致的, 为了适应崩落矿岩与放出条件, 文中加入了 $a$ 、 $b$ 值, 从实用角度分析不如介质常数 $B$ 方便。

在随机介质理论中, 放出体形状为下粗上细与实际不符。

文献[2.26]也采用随机介质理论研究崩落矿岩移动规律, 完善和发展了该理论体系, 特别是在实际应用方面向前跨进一大步,

(1) 为了适应放矿实际条件, 在移动概率密度方程中引进了 $\alpha$ 、 $\beta$ 值, 用来解决方程描述的形态失真问题, 提高了模拟精度。

(2) 结合各种边界条件分别建立三维移动概率方程, 可用来求得崩落矿岩移动规律方程。

(3) 将随机介质理论与随机模拟放矿结合在一起研究, 改进了概率场赋值方法, 大大提高了随机模拟放矿的模拟精度, 拓宽了适用范围。

就放矿理论应用方面考察, 主要的就是上面讲的三种: 椭球体放矿理论、计算机随机模拟放矿和随机介质放矿理论。

### 四、力学在放矿研究中的应用

由于崩落矿岩具有散体的一些特性, 所以不少学者从散体力学方面来研究放矿问题。散体力学可分为静力学和动力学。

文献[综.1]应用散体静力学的极限平衡理论求得放出漏斗直径和侧压系数。

散体动力学的研究方法分为两类, 即连续化法和离散化法, 而前者是常见的方法(连

续介质力学方法)。

文献[2.39]利用塑性理论模拟矿石移动,推导出求解应力和速度的数学方程,在研究中取得了一些成果。

文献[2.36]根据流体力学理论,建立了蠕流模型,较为完整地分析研究了放矿过程,对第三类边界条件下崩落矿岩移动过程进行了分析与计算,但该论文仅对平面问题作解。此外,由于崩落矿岩的不连续性,所以,用连续介质力学难以解决放矿中的全部问题。

离散化方法实际上就是散体颗粒材料的计算机模拟,即所谓的离散元方法。1987年国内将离散元法应用于崩落法放矿<sup>[2.38]</sup>,这种方法不仅能够模拟出放矿的几何过程,而且还能作出放矿的力学过程,比较适用于研究和解决放矿中的各种问题。但该方法模拟放矿的计算量非常大,尤其用来处理三维问题,对计算机条件要求很高,此外,对崩落矿岩的物理力学性质尚未提出完满的模拟方法。

### (5) 结论

综观当前放矿理论与应用情况,椭球体放矿理论应用最为广泛,该放矿理论对放矿基本概念的阐述是最为完整的,也被其他放矿理论采用,是对放矿的认识基础。

由于该理论以放出椭球体为理论认识基础,所以对解决第一类边界条件(放出体为椭球体)和第二类边界条件(放出体为椭球缺)下放矿问题是可以的。第三类边界条件下放矿,由于放出体产生变异,椭球体放矿理论的数学基础不足,文献[2.36]表述了崩落矿岩移动的数学模型,该模型可用来求解第三类边界条件下平面放矿问题。这是一种有前景的方法,有待进一步完善。

当前解决第三类边界条件下的放矿问题,主要用随机模拟放矿方法,或者采用实验室试验方法,模型试验对放矿研究仍然是一种重要而不可缺少的手段,就是理论分析计算与计算机模拟也需要模型试验的检验。

放矿理论研究中,除了第三类边界条件下放矿问题有待解决之外,还有多分段放矿的崩落矿岩移动规律问题也需要深入研究,例如近年对无底分段崩落法提出一种新的放矿方式——低(不)贫化放矿,实质上这是多分段放矿问题,有待用多分段放矿规律作出分析和解说。

## 1 崩落矿石的物理力学性质

松散矿石的每一个颗粒都具有固体的性质，但就整体而言，它能够流动，也能够改变组成松散矿石的相互联系和位置，从这点来看，它具有近似液体的性质。但它和液体的性质又不尽相同，因为颗粒间的活动受到一定的限制，具有一定的抵抗剪切的能力，内摩擦力要比液体大得多，它不象液体那样能在平面上向四周溢散，而是形成一个锥堆。因此，松散矿石是处于固体和液体之间的中间状态，既不属于固体，也不属于液体，可以说，松散矿石具有固体和液体的双重性。本章着重研究松散矿石的物理力学性质，以便了解它在放矿过程中的流动状态、规律和改善流动状态的方法，使放矿工艺趋于合理化。

### 1.1 密度

单位容积的松散矿石的质量叫做密度，其表达式为：

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (1-1)$$

式中  $\rho_s$ ——松散矿石密度， $t/m^3$ ；

$m_s$ ——松散矿石质量， $t$ ；

$V_s$ ——松散矿石体积， $m^3$ 。

根据堆积条件的不同，松散矿石的密度通常可分为自由堆积的密度和动力密实堆积的密度。

密实密度与自由密度之比称为密实系数，其表达式为：

$$K_m = \frac{\rho_m}{\rho_d} \quad (1-2)$$

式中  $K_m$ ——密实系数；

$\rho_d$ ——自由堆积密度， $t/m^3$ ；

$\rho_m$ ——密实堆积密度， $t/m^3$ 。

松散矿石的密实系数与松散矿石的内摩擦系数成正比，其近似的平均值，可用下式确定：

$$K_m = 1 + 0.2K_a \quad (1-3)$$

式中  $K_m$ ——密实系数；

$K_a$ ——内摩擦系数。

松散矿石密度，对放矿来说是一个重要的物理参数。在生产中用标准矿车作测量的容器，首先准确标定矿车容积，把欲测的松散矿石均匀倒入矿车，装满后刮平，称矿石质量，装载密度可用下式计算：

$$\rho_z = \frac{m_z}{V_z} \quad (1-4)$$

式中  $\rho_z$ ——装载密度， $t/m^3$ ；

$m_s$ ——装入矿车中的松散矿石质量, t;

$V_s$ ——矿车容积,  $m^3$ 。

松散矿石的装载密度, 通常是用于生产放矿的计量。

## 1.2 松散性

整体矿石经过破碎以后的体积, 比原体积增大的性质称之为松散性。

松散矿石的体积与原整体状态下的体积之比, 称为松散系数, 其表达式为:

$$K_s = \frac{V_k}{V_l} \quad (1-5)$$

式中  $K_s$ ——松散系数;

$V_k$ ——松散矿石的体积,  $m^3$ ;

$V_l$ ——松散矿石的整体体积,  $m^3$ 。

松散系数可分为一次松散系数和二次松散系数以及极限松散系数, 分述如下。

### 1.2.1 一次松散系数

把崩落的矿石所产生的碎胀, 称之为一次松散。而把碎胀后的松散矿石体积与原来整体矿石体积之比, 称为一次松散系数。

采场爆破时, 爆破虽然产生巨大的爆破动载荷, 由于补偿空间的制约, 被爆矿石仍然得不到自由松散。根据不同条件, 一次松散系数有下述三种:

(1) 深孔崩矿时, 在有自由补偿空间条件下, 一次松散系数为1.25~1.32;

(2) 垂直深孔崩矿时, 在挤压崩矿条件下, 一次松散系数为1.15~1.25;

(3) 药室崩矿时, 在挤压崩矿条件下, 一次松散系数为1.12~1.14。

### 1.2.2 二次松散系数和极限松散系数

矿石经过一次松散后, 由于不断地进行放矿, 采场矿石必然产生二次松散, 其表达式为:

$$K_e = \frac{V_c - V_e}{V_e} + 1 = \frac{V_c}{V_e} \quad (1-6)$$

式中  $K_e$ ——采场二次松散系数;

$V_e$ ——二次松散前的体积,  $m^3$ ;

$V_c$ ——二次松散后的体积,  $m^3$ 。

生产实践证明, 凿岩爆破参数和矿岩条件不变的情况下, 松散系数为一常数, 通常称为极限松散系数, 其值等于一次松散系数与二次松散系数之积, 即:

$$K_l = K_s K_e \quad (1-7)$$

式中  $K_l$ ——极限松散系数;

$K_e$ ——采场一次松散系数;

$K_s$ ——同前。

### 1.2.3 孔隙度

松散矿石的孔隙度是指松散矿石颗粒间的孔隙体积占松散体积的百分比, 其表达式为:

$$\psi_k = \frac{V_s - V_g}{V_s} 100\% \quad (1-8)$$

式中  $\psi_k$ ——松散矿石孔隙度, %;

$V_s$ ——松散矿石体积,  $m^3$ ;

$V_g$ ——松散矿石固体颗粒的体积,  $m^3$ 。

松散矿石的结构不同, 它的孔隙度也不同。块状的松散矿石孔隙度大, 粉状的松散矿石孔隙度小; 带棱角的不规则形状的松散矿石孔隙度大, 圆滑规则形状的松散矿石孔隙度小。在挤压崩矿条件下, 崩落矿石上部覆盖岩层厚度愈大, 在采场中停留时间愈长, 则孔隙度愈小, 反之, 孔隙度大。

实践表明, 采场崩落矿石的孔隙度小时, 会恶化放矿条件, 在放矿过程中不断产生悬拱, 降低放矿强度。当覆盖岩石块小于崩落岩石块之间孔隙的 $1/2 \sim 1/3$ 时, 小块岩石将穿过孔隙超前放出, 产生超前贫化, 恶化放矿指标。

#### 1.2.4 压实度

松散矿石的压实度是指在外力作用下矿石被压实的程度。通常是把松散矿石压实后体积与压实前体积之比, 称为松散矿石的压实度, 其表达式为:

$$\psi_y = \frac{V_y}{V_s} \quad (1-9)$$

式中  $\psi_y$ ——松散矿石压实度;

$V_y$ ——松散矿石压实后体积,  $m^3$ ;

$V_s$ ——松散矿石体积,  $m^3$ 。

在挤压崩矿时, 矿石堆积体会经受很大的动力负荷作用, 因此, 松散矿石的压实度与在静力负荷作用条件下相比约大0.75倍。如果振动机的参数选择不合理, 在振动力的作用下, 可以改变松散矿石的结构, 强化松散矿石的压实。如果振动机的参数选择合理, 松散矿石的压实度显著降低, 为连续出矿系统创造了条件。

如果松散矿石的压实度过大, 它就会丧失松散性而使放矿工作停顿, 但是, 在这种情况下如果松散矿石颗粒间的粘结力不大, 在放矿过程中松散性仍能逐渐得到恢复。

### 1.3 湿度

松散矿石的湿度是指松散矿石中所含水分的重量百分比, 其表达式为:

$$\psi_s = \frac{m_c - m_g}{m_g} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中  $\psi_s$ ——松散矿石湿度, %;

$m_c$ ——自然湿度的松散矿石质量, kg;

$m_g$ ——干燥的松散矿石质量, kg。

在松散矿石颗粒的表面上, 水分仅以水膜形式出现, 称为潮的松散矿石; 在颗粒之间的孔隙中充有水的松散矿石, 称为湿的松散矿石; 松散矿石表面不含水分, 称为风干的松散矿石, 只含化学结晶水的松散矿石, 称为干燥的松散矿石。

实践表明, 湿度是影响放矿的重要参数。当湿度小于4%~7%时, 松散矿石具有良好的松散性和流通性, 可以获得良好的放矿效果。

松散矿石湿度的大小, 除与矿石物理性质有关外, 还与矿山的水文地质条件和大气降雨量有关。特别是崩落带发展到地表以后, 采场的松散矿石的湿度常常随季节而变化, 在

雨季松散矿石的湿度可超过8%~20%，旱季只有2%~8%。

在松散矿石中，细颗粒的含量增大时，由于水分的作用，粘结力增大，严重地影响了放矿效果。实践表明，松散矿石颗粒尺寸愈小，颗粒间的表面粘结力就愈大，在细粒或粉状的松散矿石中，如果湿度增大，粘结力将会超过重力，便会在放矿口形成稳定拱，使放矿工作停顿。当湿度超过一定的限度时，达到水分饱和的程度，矿石块之间的内摩擦力和粘结力反而减小，松散矿石的流动性增大。如果地表有黄土层，崩落带又发展到地表，在雨季有可能引起“井下泥石流”，对生产造成严重的威胁，矿石的损失和贫化也急剧上升，因此，有类似危险的矿山，必须采取地表防洪措施。

若测定松散矿石的湿度，首先把腊封容器中的松散矿石试样取出摊平，用四分法分成4份，任取其中一份，称其试样的质量，把称好的试样置于烘箱内，在105~110℃的温度下烘干，直至质量不变为止。在烘干期间，每隔0.5h搅拌一次，而后称烘干的试样的质量，取三次以上的平行测定的平均值，作为湿度的测定值。

#### 1.4 块度

松散矿石的块度是指松散矿石块的尺寸以及各种尺寸的矿石块所占的百分比。

在生产中，根据采矿工艺的要求，松散矿石块不能过大，也不能过于粉碎。对松散矿石块的上、下限均有一定的限制，如果大块超过允许的尺寸，这种大块称为不合格的大块，需进行二次破碎。松散矿石中所包含不合格的大块的百分比，称为大块的产出率。实践表明，松散矿石块的尺寸和形状以及组成，对放矿强度和矿石损失贫化均有很大影响。

##### 1.4.1 单个矿石块的几何参数

矿石块的尺寸，可以用线性尺寸，或用面积、体积等表示。在矿山中，矿石块尺寸一般用线性尺寸来表示。松散矿石块的尺寸可用三个方向相互垂直的最大尺寸来度量，所量得的最大尺寸为矿石块的长度，中间尺寸为宽度，最小的尺寸为厚度。这三个尺寸是外接该矿石块的平行六面体各对应边的尺寸。

在生产中，松散矿石块的尺寸往往需要用一个数字来表示，一般是用矿石块的直径表示，其表达式为：

$$D_a = \frac{l_a + b + d}{3} \quad (1-11)$$

或者 
$$D_a = \sqrt[3]{l_a b d} \quad (1-12)$$

式中  $D_a$ ——单个矿石块的平均直径，m，

$l_a$ ——单个矿石块的长度，m，

$b$ ——单个矿石块的宽度，m，

$d$ ——单个矿石块的厚度，m。

在采矿中，松散矿石块的直径，一般用算术平均值表示。为了较精确起见，亦可用几何平均值表示。筛分松散矿石时，某种矿石块恰好只能通过某一种筛孔，这种筛孔的直径就是矿石块的直径。

松散矿石块的形状特征，可用三个方向相互垂直的矿石块尺寸比来表示。为了使各种松散矿石块的形状具有可比性，不用矿石块的绝对尺寸比，而是用矿石块的宽度为一个单位的相对尺寸比来表示，其表达式为：

$$\frac{l_d}{b} : 1 : \frac{d}{b} \quad (1-13)$$

式中  $l_d$ ——矿石块的长度, m,

$b$ ——矿石块的宽度, m,

$d$ ——矿石块的厚度, m。

根据矿石块的数值特征, 可将松散矿石块的形状分为下述六种。

立方体  $l_d = (1 \sim 1.3)b$ ,  $d = (1 \sim 0.7)b$ ;

柱状体  $l_d > 1.3b$ ,  $d = (1 \sim 0.7)b$ ;

板状体  $l_d = (1 \sim 1.3)b$ ,  $d = (0.7 \sim 0.3)b$ ;

长板状体  $l_d > 1.3b$ ,  $d = (0.7 \sim 0.3)b$ ;

片状体  $l_d = (1 \sim 1.3)b$ ,  $d < 0.3b$ ;

长片板状  $l_d > 1.3b$ ,  $d < 0.3b$ 。

#### 1.4.2 松散矿石的块度组成

在采矿生产中, 崩落矿石由各种不同尺寸的矿石块的集合体所组成。在这种集合体中, 各种不同块度级的矿石量占其总矿石量的百分比, 称为块度组成。

松散矿石块的分级, 是根据矿石产品、评价爆破效果以及科学试验研究的要求划分的。对前两种情况, 将松散矿石块分为大、中、小三级为宜。如果是科学试验研究, 最少也得分为五级。

每一级的矿石块, 一般用级内最小和最大块的尺寸来表示, 其表达式为:

$$D_k = \frac{D_{max} - D_{min}}{2} \quad (1-14)$$

式中  $D_k$ ——某一级内矿石块的平均直径, m;

$D_{max}$ ——某一级内最大的矿石块直径, m;

$D_{min}$ ——某一级内最小的矿石块直径, m。

##### 1.4.2.1 矿石块度的测定

随着采矿技术的进步, 对矿石块度的测量方法也是多种多样的, 除传统的筛分法外, 还有照相面积法和照相频率法。近年来, 由于计算机技术的开发利用, 矿山一般用多角形计算法测量矿石的块度组成。

##### A 筛分法

首先, 根据要求确定矿石块的分级, 按分级的矿石块的尺寸大小选取筛格。

根据采矿方法或爆破的种类, 采用不同的方法取样。例如: 在无底柱分段崩落法的整个出矿过程中, 各出矿时期的块度组成是不相同的, 因此, 在同一地点, 按不同出矿时期进行取样, 即在出矿初期、中期、后期各取样1~3t。当采用水平扇形深孔崩矿的有底柱分段崩落法时, 要求在同一时期, 不同的漏斗中取样, 每个地点取样1~3t。当采用垂直扇形深孔崩矿的有底柱分段崩落法时, 要求在不同的放矿时期取样, 所取的矿样必须要有代表性, 然后把所取的矿样, 用四分法进行缩分, 直至松散矿石量只有0.5~1t时为止。对缩分后的矿石选用要求的筛格依次筛分。为了使筛分的结果具有可比性, 必须按规定的给料制度和一定的振荡时间, 称出每号筛格上筛余的矿石块质量。用下式计算各级矿石块的质量所占总质量的百分比:

$$\theta_c = \frac{m_y}{m_s} \times 100\% \quad (1-15)$$

式中  $\theta_c$ ——某一级的矿石块质量百分比，%，

$m_y$ ——某一级矿石块筛分余量，kg，

$m_s$ ——松散矿石质量，kg。

实践证明，用筛分法测量的块度组成是非常精确可靠的。但劳动量大，操作困难，需要的时间长，因此，一般少用。

#### B 照像面积法

实践表明，在松散矿石堆的表面上，各级矿石块所占的面积百分比，与其堆体内各级矿石块所占体积百分比几乎是相等的，因此，测定块度组成，可直接在松散矿石堆表面上，圈出一定尺寸的测量面积，借助平面块度尺进行量测。块度尺的结构如图1-1所示。

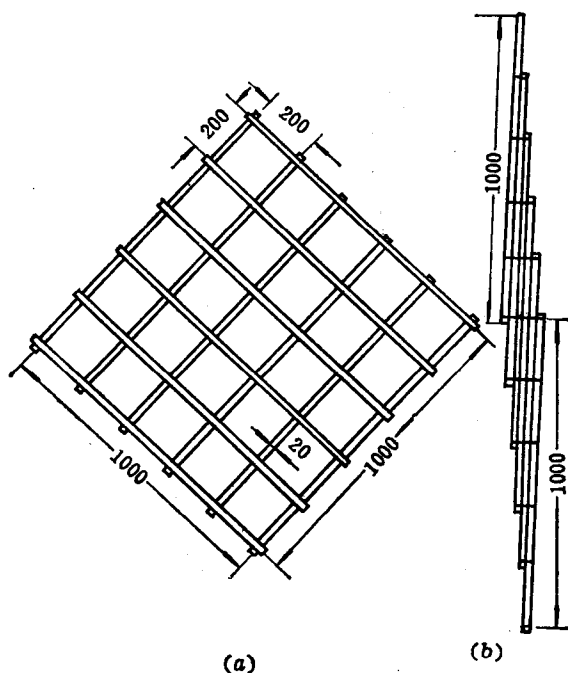


图 1-1 平面块度尺结构示意图  
(a) 平面块度尺展开图；(b) 平面块度尺折叠图

平面块度尺的规格，主要取决于被测矿石块的大小，一般可用下式确定平面块度尺的最小边长：

$$l_k = 3\sqrt{S_p} \quad (1-16)$$

式中  $l_k$ ——平面块度尺的最小边长，m，

$S_p$ ——最大块矿石的水平投影面积， $m^2$ 。

按式 (1-16) 计算的平面块度尺的最小边长，在任何情况下，都能测出一个完整的最大矿石块的面积。一个网格的尺寸，是根据最大块含量多少而选用，如果大块含量多，其网格选用20cm×20cm。反之，选用10cm×10cm。

用照相面积法量测块度时，首先在欲测的松散矿石堆表面上铺上白色的平面块度尺，