

QINGXIE ZHONGHOU KUANGTI
SUNSHI PINHUA KONGZHI LILUN YU SHIJIAN

倾斜中厚矿体 损失贫化控制理论与实践

周宗红 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

倾斜中厚矿体损失贫化 控制理论与实践

周宗红 编著

北 京
冶金工业出版社
2011

内 容 提 要

本书针对倾斜中厚矿体应用无底柱分段崩落法存在损失贫化大的问题,详细介绍了倾斜中厚矿体损失贫化控制方面的理论与实践,主要包括倾斜中厚矿体损失贫化规律及控制方法、端部放矿散体流动规律与采场结构参数优选、夏甸金矿倾斜中厚矿体开采方案研究、垂直矿柱的变形移动和破坏规律、复杂中厚矿体落矿方法试验、卸压开采机理及应用、岩体冒落规律及控制、无底柱分段崩落法在矿山的试验应用。

本书适合采矿、安全专业的工程技术和管理人员及高等院校相关专业的师生阅读和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

倾斜中厚矿体损失贫化控制理论与实践/周宗红编著.
—北京:冶金工业出版社, 2011. 8
ISBN 978-7-5024-5703-7

I. ①倾… II. ①周… III. ①采矿贫损—控制
IV. ①TD8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 164584 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨秋奎 美术编辑 彭子赫 版式设计 葛新霞

责任校对 卿文春 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5703-7

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011 年 8 月第 1 版, 2011 年 8 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 6.375 印张; 167 千字; 188 页

23.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

倾斜中厚矿体在国内外地下金属、非金属矿山占有很大的比例。随着开采技术条件复杂矿床的开采、开采深度的增加和国民经济对矿石需求量的增大，越来越需要开发安全高效的采矿方法。在采矿方法理论与矿山生产实践中，针对倾斜中厚矿体高效开采领域进行了许多研究，但一直忽略了无底柱分段崩落法，使这一安全高效的采矿方法在倾斜中厚矿体应用得较少。究其原因，主要是无底柱分段崩落法开采倾斜中厚矿体的工艺技术没有得到合理解决，传统工艺技术的矿石损失贫化较大，从而限制了无底柱分段崩落法的应用。近年来，随着低品位、矿岩松软破碎难采矿床的开采及开采深度、地压增大，开采技术条件复杂而不能使用空场法或充填法，急需开发适宜的采矿方法。因此，改进无底柱分段崩落法，保证倾斜中厚矿体安全高效开采是亟待研究解决的课题。

本书以夏甸金矿Ⅶ号矿体为研究对象，通过理论分析、相似材料模拟试验、数值模拟和现场工业试验，系统研究了散体移动规律、采场地压活动规律和矿岩冒落规律，改进和试验应用低贫损分段崩落法工艺技术。

本书在研究散体流动规律与无底柱分段崩落法低贫损开采模式的基础上，针对夏甸金矿倾斜中厚矿体的条件，进一步改进了无底柱分段崩落法的采场结构与落矿、放矿方式。研究应用自落顶、设置回收进路与保持三个分段回采的采场结构，适应倾斜中厚矿体铅直厚度较小的特点；应用数值模拟方法，研究了岩体变形、移动和破坏规律，揭示了诱导空区顶板冒落的机理；用中深孔与浅孔两种落矿方法，解决矿

体边界多变条件下的洁净落矿技术；用两种放矿方式（回收进路截止品位放矿、其他进路按放出量控制放出）控制矿石损失贫化率，由此形成了适应倾斜中厚矿体开采条件的无底柱分段崩落法新方案。新方案在夏甸金矿得到了实际应用。

夏甸金矿Ⅶ号矿体为一典型的岩金矿床，矿岩节理裂隙发育，矿体埋藏深、倾斜中厚。原来采用干式充填法开采，在生产中存在着安全条件差、生产效率低和矿石损失大等诸多问题。应用改进的无底柱分段崩落法新方案，针对Ⅶ号中厚矿体的具体条件，解决了安全高效开采的工艺、技术问题：针对矿岩硬度与稳固性特点，研究了采动地压控制方法；针对夏甸金矿散体移动规律与矿岩容易冒落的特性，提出了诱导顶板围岩冒落形成覆盖层的方法；根据矿体产状，提出了根据上分段矿体边界设置回收进路的方法。由此，形成了小结构参数和组合式落矿、放矿方式的无底柱分段崩落实用新方案。该方案在夏甸金矿实施几年来，避免了矿山常年发生的采场安全事故，提高了采场生产能力，创造了巨大的经济效益，取得了良好的应用效果。

在夏甸金矿的实际应用表明，由诱导冒落、设回收进路、不小于三分段回收的采场结构与组合式落矿、放矿方式构成的无底柱分段崩落新方案，可成为一种高回采率、高效率、低贫化率的倾斜中厚矿体采矿方法。本书研究成果，拓宽了无底柱分段崩落法的应用范围，在国内外金属矿山具有广阔的应用前景。

低贫损分段崩落法用于岩金矿床开采，是一项采矿方法的重大突破。无底柱分段崩落新方案较好地解决了岩金矿床倾斜中厚矿体应用无底柱分段崩落法矿石损失贫化大的弊端，同时较好地保持了无底柱分段崩落法采场结构简单、安全条件好、机械化程度高和生产能力大的优点。该方案不仅在类似岩金矿床，而且在有色、黑色金属矿山有很高的推广应用

价值。随着开采深度的增加和地压的增大，低贫损分段崩落法将会在国内外矿山得到更多的应用。

在本书的编写和出版过程中，昆明理工大学国土资源工程学院给予了学科建设经费资助。

感谢昆明理工大学国土资源工程学院各位领导的关心和帮助，感谢导师东北大学任凤玉教授的鼓励和悉心指导。在本书撰写和相关研究工作中，还得到了昆明理工大学乔登攀教授、东北大学李元辉教授、南华大学陶干强副教授和武汉科技大学王文杰副教授的指导和帮助，在此表示衷心的感谢！特别感谢合作导师侯克鹏教授在博士后研究期间给予的指导、帮助，以及对本书编写提出的改进意见！

由于作者水平所限，书中不足之处恳请广大读者批评指正。

作 者

2011年5月

目 录

1 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 崩落法放矿理论研究进展	2
1.2.1 椭球体放矿理论	3
1.2.2 随机介质放矿理论	3
1.2.3 崩落法放矿计算机仿真	6
1.3 低贫损开采研究应用情况	7
1.3.1 无贫化放矿	8
1.3.2 低贫化放矿	8
1.3.3 低贫损开采模式及其应用	9
1.4 研究的主要问题	10
1.4.1 倾斜中厚矿体应用分段崩落法面临的问题	10
1.4.2 主要研究内容	11
2 倾斜中厚矿体损失贫化规律及控制方法	14
2.1 端部放矿随机介质理论	14
2.1.1 崩落矿岩移动概率方程	15
2.1.2 崩落矿岩移动规律方程	16
2.2 放出口对散体移动规律的影响	19
2.2.1 放出口影响范围散体移动规律	20
2.2.2 废石混入及其控制	22
2.3 散体流动规律室内模拟实验研究	23
2.3.1 矿岩混杂规律	23
2.3.2 下盘残留体	25
2.3.3 端部放矿散体流动规律	26

2.3.4	实验结果分析	28
2.4	组合放矿方式	29
2.5	采场结构优化	31
2.5.1	采场结构的改进	31
2.5.2	下盘回收进路的设置	33
2.6	结论	36
3	端部放矿散体流动规律与采场结构参数优选	38
3.1	散体流动参数实验研究	38
3.1.1	实验材料制备与实验模型	39
3.1.2	端部放矿实验数据	40
3.1.3	实验放出体形态与散体流动参数	43
3.1.4	实验结果分析	46
3.2	采场结构参数优选	46
3.2.1	分段高度的确定	47
3.2.2	进路间距优选	47
3.2.3	崩矿步距确定	50
3.3	下盘岩石合理开掘高度确定	53
4	夏甸金矿倾斜中厚矿体开采方案研究	58
4.1	矿床赋存条件	58
4.2	采矿方法及存在的问题	59
4.2.1	上向水平分层充填采矿法	59
4.2.2	存在问题	63
4.3	采矿方法优选	64
4.3.1	对采矿方法的要求	64
4.3.2	现有问题的解决对策	65
4.4	低贫损无底柱分段崩落法	67
4.5	新方案成本优势分析	72
4.5.1	干式充填法可比成本估算	72

4.5.2 低贫损分段崩落法可比成本估算	73
5 垂直矿柱的变形移动和破坏规律	75
5.1 引言	75
5.2 FLAC ^{3D} 简介	76
5.3 矿柱变形移动规律	77
5.3.1 矿岩力学参数	77
5.3.2 计算模型的简化	79
5.3.3 模型的建立	81
5.4 数值模拟结果	82
5.4.1 应力	82
5.4.2 位移	86
5.4.3 塑性区	88
5.4.4 模拟结果分析	90
6 复杂中厚矿体落矿方法试验	92
6.1 中深孔爆破机理	92
6.1.1 相似材料模拟试验	92
6.1.2 试验结果	95
6.1.3 机理分析	96
6.1.4 试验结论	99
6.2 落矿工艺参数优化	100
6.2.1 边孔角的确定	100
6.2.2 炮孔布置	103
6.2.3 爆破效果改善	105
6.2.4 预装药技术	106
6.3 组合落矿方法试验	107
7 卸压开采机理及应用	110
7.1 引言	110

7.2	采场地压及其控制方法	111
7.2.1	采场地压显现特点	111
7.2.2	地压活动规律	112
7.2.3	采场地压控制方法	115
7.3	采准巷道掘进与支护方法研究	120
7.3.1	采准巷道的失稳和控制	120
7.3.2	采准巷道的布置	121
7.3.3	简易光面爆破	122
7.3.4	采准巷道的支护	127
7.4	中厚倾斜矿体卸压开采机理	128
7.4.1	影响卸压效果的因素	130
7.4.2	卸压开采的数学模型	130
7.5	夏甸金矿卸压开采	133
7.5.1	卸压开采方案	133
7.5.2	卸压开采工艺	134
8	岩体冒落规律及控制	139
8.1	采空区冒落规律与诱导冒落	139
8.1.1	采空区冒落规律	139
8.1.2	采空区的诱导冒落	141
8.2	采空区冒落过程	143
8.2.1	矿岩冒落形式	143
8.2.2	采空区临界冒落面积分析	144
8.2.3	采空区顶板可冒性	146
8.2.4	采空区顶板冒落过程	146
8.3	岩体冒落形式控制	148
8.4	空区岩体冒落危害及其防治	152
8.4.1	冒落气浪危害及数学模型	152
8.4.2	绕流模型的冲击气浪估算	154
8.5	采空区处理方法研究	159

8.5.1 诱导冒落法	159
8.5.2 冒落过程控制	161
8.5.3 诱导冒落在后和睦山铁矿的应用	162
8.6 地表沉陷程度的预估	166
8.7 结论	170
9 无底柱分段崩落法在矿山的试验应用	172
9.1 方案在夏甸金矿的实施效果	172
9.2 岩体冒落规律	177
9.2.1 冒落过程监测	178
9.2.2 监测巷道端部冒落过程	179
9.2.3 监测结果分析	183
参考文献	185

1 绪 论

1.1 引 言

倾斜中厚矿体在国内外地下金属、非金属矿山占有很大的比例。随着开采技术条件复杂矿床的开采、开采深度的增加和国民经济对矿石需求量的增大,越来越需要开发安全高效的采矿方法。在迄今为止的采矿方法理论研究与矿山生产实践中,在倾斜中厚矿体高效开采领域进行了许多研究^[1~4],但一直忽略了无底柱分段崩落法,使这一安全高效采矿方法在倾斜中厚矿体应用得较少。究其原因,主要是无底柱分段崩落法开采倾斜中厚矿体的工艺技术没有得到合理解决,传统工艺技术的矿石损失贫化较大,从而限制了无底柱分段崩落法的应用。近年来,随着低品位、矿岩松软破碎难采矿床开采及开采深度、地压增大,开采技术条件复杂而不能使用空场法或充填法^[5],急需开发适宜的采矿方法。因此,改进无底柱分段崩落法,保证倾斜中厚矿体安全高效开采是亟待研究解决的课题。

夏甸金矿为一典型的岩金矿床,属于中温热液低硫低品位构造破碎带蚀变岩型金矿床。Ⅶ号主矿体矿岩节理裂隙发育,中等稳固到不稳固,倾角 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}$,厚度上部为 $1 \sim 10\text{m}$,下部 $0.2 \sim 20\text{m}$,矿体产状稳定,形态复杂。应用上向水平分层干式充填采矿方法开采,目前开采深度已超过 500m 。随着采深的增大,矿体厚度和地压增大,矿岩稳固性变差,易冒落,生产过程中存在着安全条件差、矿石损失大、生产效率低和采矿成本高等问题,每年均发生不同程度的事故。为解决上述问题,夏甸金矿进行了多年的探索,1993~1997年试验应用分级尾砂充填,2000年建立了胶结充填系统,但技术和管理难度大、成本高,且两者无法

从根本上解决顶板冒落问题，不能适应夏甸金矿Ⅶ号中厚以上矿体的开采，急需研究应用安全高效的采矿方法。

夏甸金矿Ⅶ号矿体节理裂隙发育，埋藏深，为破碎难采矿体，在倾斜中厚矿体中很有代表性。为此，研究散体流动规律、地压活动规律和岩体失稳冒落规律（简称“三律”），降低损失贫化，改善矿山安全生产条件，研究适合矿山开采条件的高效采矿方法，实现早达产及低损失、低贫化、低成本、低事故隐患与高生产能力的“四低一高”目标。由此开发的低贫损分段崩落法，对于国内外同类矿山将有很好的推广应用价值。试验研究的低损失贫化、安全高效开采工艺技术，对提高我国地下倾斜矿床开采的安全程度、生产效率，进一步完善分段崩落法，提高技术经济效益，使其成为可适用于倾斜中厚、厚矿体的采矿方法都具有十分重要的现实意义。

1.2 崩落法放矿理论研究进展

崩落采矿法在国内外金属矿山应用广泛，典型的崩落法可分为有底柱分段崩落法、无底柱分段崩落法、阶段崩落法。我国黑色金属矿山地下采矿中用崩落法采出的矿量高达85%以上，在有色金属矿山中用崩落法采出矿石总量的比重逐年增长，几乎达到了40%。国际上使用崩落法开采的矿山个数约占25%。

崩落法采矿的特点是崩落矿石和覆盖层废石直接接触，矿石是在覆盖层废石的包围下从放矿口放出，因而回采矿石的贫化及损失较大，并且若采场结构参数不合理或放矿管理制度不当，将恶化放矿效果，造成矿产资源的浪费和企业经济效益下降。矿石损失贫化都是经济损失，既浪费了国家的宝贵资源、降低了矿山经济效益、缩短了矿山服务年限，又增加了生产成本。

国内外采矿工作者对覆岩下矿岩移动规律已有较深入的研究。崩落法放矿理论进入使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）^[6]。目前放矿理论研

究均将散体抽象为连续介质, 将散体的运动速度视为颗粒所处位置的连续坐标, 建立相应模型, 从宏观意义上研究崩落矿岩散体移动规律^[7]。

1.2.1 椭球体放矿理论

椭球体放矿理论是根据实验室实验得出放出体为一近似椭球体, 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。

1952 年, 苏联学者 Г. М. 马拉霍夫出版了《崩落矿块的放矿》, 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做了很多的研究工作。20 世纪 70 ~ 80 年代, 国内一些单位和学者对放矿理论进行了深入的研究, 进一步完善了椭球体(类椭球体)放矿理论^[6], 代表性人物有东北大学刘兴国教授和西安建筑科技大学李荣福教授。椭球体理论建立最早, 应用较广, 其采用的研究方法为实验分析方法, 简单实用, 对指导放矿研究与生产发挥了很大的作用。对于无限边界条件和半无限边界, 建立了完整的理论体系, 但它对于倾斜壁边界条件下散体的移动规律难以处理。另外, 该理论的放出体不灵活(恒为椭球体或椭球缺), 实际中因散体流动性质与放出条件的差异, 放出体形态呈多样性。

1.2.2 随机介质放矿理论

将散体简化为连续流动的随机介质, 运用概率论方法研究散体移动过程而形成的理论体系, 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始于 20 世纪 60 年代。波兰 Jerzy Litwiniyszyn 教授认为, 松散介质运动过程是随机过程, 并给出了随机介质模型。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^[8]:

$$\frac{\partial W(z, x)}{\partial z} = \frac{\partial a}{\partial z} \cdot W(z, x) - B(z) \left[\frac{\partial^2 W(z, x)}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 W(z, x)}{\partial x_2^2} \right] \quad (1-1)$$

1962年，我国东北大学王泳嘉教授给出了放矿平面问题的理论方程，认为崩落矿石移动中最本质的现象是运动的随机性^[9]。1972年，苏联B. B. КУЛИОВ将平面问题扩展为空间问题。这些以及随后较为系统的研究，可归结为同一运动微分方程：

$$\frac{\partial P(u, v, w)}{\partial w} = B \left[\frac{\partial^2 P(u, v, w)}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 P(u, v, w)}{\partial v^2} \right] \quad (1-2)$$

式中 u, v, w ——分别为沿 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。

由式(1-2)得出的放出体形态为上部细小下部粗大，最宽部位所在高度偏于下部。这与国内许多由常规实验测得的放出体形态明显不符。放出体形态与实际相差较大的原因是，散体移动概率场与实际情况有较大出入。由于早期的随机介质放矿理论得不到常规实验的普遍证实，未得到广泛接受，因而基本上没有得到实际应用。

东北大学任凤玉教授将随机介质方法与散体流动的实际物理过程相结合，依据实验对各种边界条件的散体运动过程建立了系统的理论方程，引入两个反映散体流动特性的参数，使放出体形态与实际相符更好，完善和发展了该理论体系，使该理论在实际应用方面向前跨进了一大步。并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，能较准确地预测各种采场结构和放矿制度下的矿石回收率和贫化率，优选采场结构参数和放矿方式。大量的科研和生产实践证明随机介质放矿理论具有较好的可靠性和可操作性。

任凤玉教授认为出现放出体形态差异的主要原因是：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：所建立的随机介质模型没有深入到散体移动的实质，给出的散体移动场与实际出入较大。因此，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。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，采用新的散体移动模型（图 1-1）考虑实际散体概率场分布的不均匀性，通过对实验数据回归得到了方差的表达式，运用理论分析与放矿实验相结合的方法建立了空间问题的散体移动概率密度方程^[10]：

$$p(x,y,z) = \frac{1}{\pi\beta z^\alpha} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\beta z^\alpha}\right) \tag{1-3}$$

式中 α, β ——与散体的流动性质和放出条件有关的常数。

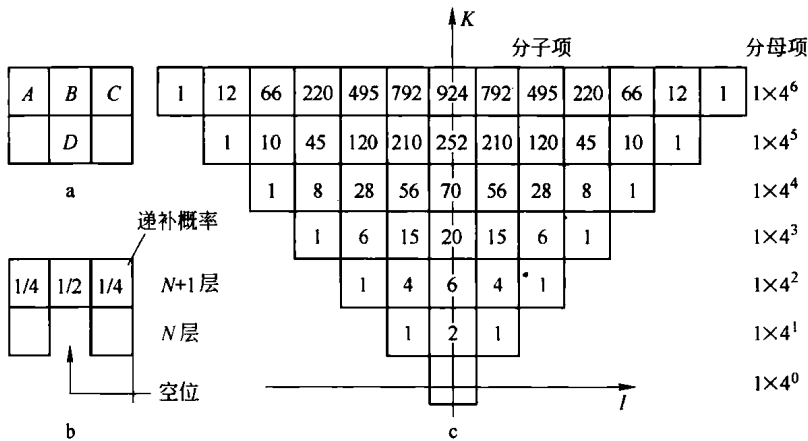


图 1-1 理想散体移动模型

a—散体移动区域；b—理想散体移动模型；c—理想散体移动概率分布

式（1-3）移动概率密度方程是建立随机介质放矿理论的基础方程，以此为基础推导建立了反映放矿现象的移动速度场、颗粒移动迹线方程、放出漏斗方程、放出体方程以及颗粒移动方程，形成了新体系。同时给出了复杂边界条件下（半无限边界条件及倾斜边界条件）的上述方程，并进行了放矿口对散体移动规律影响的研究。式（1-3）引用了散体流动参数 α, β 来调整放出体的粗细和形态。

由式（1-3）导出的放出体方程为：

$$r^2 = (\alpha + 1)\beta z^\alpha \ln \frac{H}{z} \quad (1-4)$$

通过合理确定 α 、 β 值，可与各种形态的实际（实验）放出体达到良好拟合。

该理论体系的特点是参数容易确定，对各种条件下的放矿过程具有较高的逼真度，且适用范围较广。该理论给出的放出体形态与众多研究者的实验室物理模拟实验结果符合良好，解决问题有一定的理论依据和深度，并在实际中得到了广泛的应用。

1.2.3 崩落法放矿计算机仿真

崩落法放矿计算机仿真方法，最早由加拿大学者 David Jolley 于 1968 年提出^[11]，仿真模型如图 1-2 所示^[12]，把矿岩堆体划分成大小相等、形状规则的模块，用模块之间从上向下的随机递补运动来模拟崩落矿岩的流动过程。David Jolley 仿真法提出后，因

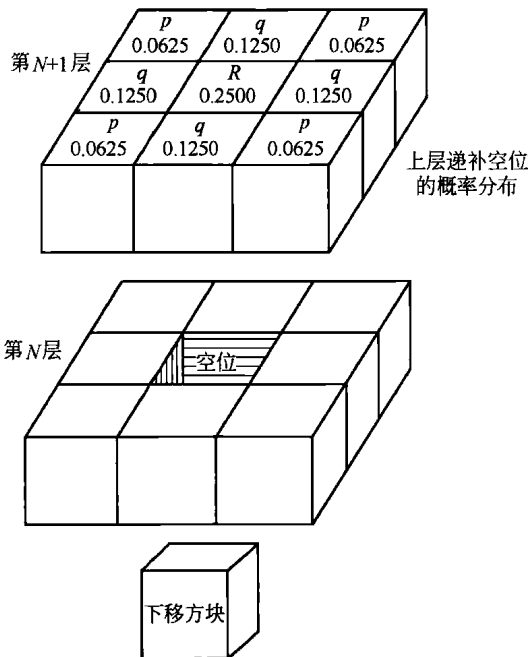


图 1-2 David Jolley 仿真模型中的概率分布