

放矿

FANGKUANG

理论研究与应用

LILUN YANJIU YU YINGYONG

乔登攀 著

云南出版集团公司
云南科技出版社

云南省中青年学术与技术带头人培养项目(2004PY01-6)
昆明理工大学基金(校引2005-13)经费资助

放矿

FANGKUANG

理论研究与应 用

LILUN YANJIU YU YINGYONG

乔登攀 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

云南出版集团公司
云南科技出版社

· 昆 明 ·

图书在版编目(CIP)数据

放矿理论研究与应⽤/乔登攀著. —昆明:云南科技出版社,2006.4

ISBN 7-5416-2332-6

I. 放... II. 乔... III. 放矿理论 IV. TD801

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 033453 号

云南出版集团公司
云南科技出版社 出版发行

(昆明市环城西路 609 号云南新闻出版大楼 邮政编码:650034)

昆明市五华区教育委员会印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:13 字数:300 千字

2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷

定价:46.00 元

序 言

崩落采矿法在国内外地下矿山应用广泛。崩落采矿法采场结构与生产工艺简单,便于高效凿岩和运搬设备运行,生产能力强,成本低,生产安全且管理方便,堪称高强度、高效率、高效益的地下采矿方法。

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,回采矿石的贫化及损失较大,若采场结构参数不合理或放矿管理不当,将恶化放矿结果,造成矿产资源的浪费和企业经济效益下降。我国崩落法矿山的矿石损失率为20%~30%,贫化率为20%~35%,同国外先进水平相比,一般要高出5%~10%。究其原因不外:方案不当,结构参数不合理,放矿控制不善,施工质量不高。众所周知,崩落矿岩散体在其形成初期即受到强烈的爆破挤压以及上覆散体的挤压,孔隙率很小。放矿是一个底部卸载过程,在矿岩散体由静止状态开始移动直至被放出过程中,发生不可逆结构变形,孔隙率逐渐增大,发生二次松散现象,散体粘结力和内摩擦角逐渐变小,静侧压逐渐变为动侧压。随着崩落法落矿技术的发展,崩落矿石的一次松散系数很小甚至仅为1.05,而矿石破碎质量相当好。显然,此种情况下已不能忽视散体二次松散对放矿效果的影响,否则会造成很大误差。众所周知,矿岩散体的移动与二次松散是同时发生的物理过程,然而,至今国内外对这一问题还缺乏深入研究,对生产指导性非常有限。

本专著系统地介绍了作者关于崩落矿岩散体移动规律与放矿理论研究的新成果。在理论部分,针对崩落矿岩散体的性质和二次松散特点,研究建立了重力场作用下散体移动微分方程,对崩落矿岩散体的移动规律做出了数学解析。通过理论推导和实验分析,建立了散体移动体积连续方程和移动体积分流连续方程。基于散体随机移动与移动概率分布的一致性关系,应用随机介质理论建立了底部及端部放矿时矿岩散体移动概率密度方程、密度场方程、速度场方程、移动漏斗方程、放出体表面方程、颗粒移动坐标变换方程,比较全面地考虑了采场放矿边界因素与矿岩散体流动参数对放矿结果的影响。根据实际放矿口散体流动状态,分析了放出口散体流动速度分布,给出了放出口影响范围的估算式,揭示了放矿口对矿岩散体移动规律的影响机理。根据崩落法采场放矿工艺,系统地研究了底部放矿和端部放矿情况下,放出口尺寸与放出口速度分布对矿岩散体放出过程中的速度场、密度场、颗粒移动迹线、移动漏斗和放出体的影响,建立了相应的方程。在应用部分,根据散体移动速度分布确定了矿岩散体有效移动带,给出了无底柱分段崩落法采场结构参数的近似计算公式,有底柱崩落法底部结构设计近似计算公式。实践证明,上述采场结构参数确定方法与实际符合很好。根据前述各类边界条件和散体移动特性,设计并开发了崩落法放矿计算机仿真与控制放矿软件。借助仿真结果,可选择崩落法方案、确定采场结构参数、分析矿石损失贫化原因和制定放矿管理制度,可使技术决策更具科学性。本项研究中应用随机介质理论建立的矿岩散体速度场方程与散体移动微分方程的解析解是相同的,并且满足散体移动体积连续方程,理论上使二者达到了一致,并且与模拟放矿实验结果符合

良好,各方程中相应参数的物理意义较为明确,不仅形成了系统的放矿理论体系,而且二者的有效结合也可以作为进一步研究复杂散体系统的有力手段。可以预见本项研究成果在指导崩落法采场设计和放矿控制中将有很高的推广应用价值。

应当指出,受实验手段和仪器的限制,目前放矿中有关散体场的许多物理量难以实测,不得不依靠放出量与移动场的关系,从统计意义上反演散体场相应参数。散体移动的本质特征就是在复杂边界条件下,一个开放的非平衡散体系统在不可逆应力场作用下,复杂的散体结构由初始破坏的扩展到发展,导致散体的结构变形和进一步破坏,并向散体场纵深发展的过程,该过程中又表现出散体块的移动有渐变和突变等力学机理,随机性很强。因此就散体移动场而言,它不应当是固定参数的确定函数,但是在宏观统计意义上,散体移动却表现出稳态规律,本书中关于重力场作用下散体移动规律与放矿理论研究成果就是在宏观统计意义上对这种稳态结果的描述。

在本书的写作与出版过程中,得到了云南省中青年学术和技术带头人后备人才培养项目(2004PY01-6)经费资助,昆明理工大学基金(校引2005-13)经费资助,同时得到了昆明理工大学国土资源工程学院和资源开发系领导的关心和学科建设经费支持,在此一并感谢。作者十分感谢导师任凤玉教授几年来的指导;感谢李刚博士协助完成了《崩落法放矿计算机仿真与控制放矿系统》软件开发,研究生严体、张宗生、汪亮协助完成了插图、校稿等工作。

由于笔者水平有限,书中难免疏忽、遗漏及不当之处,期待读者不吝指正。

作 者

目 录

0 绪 论	(1)
0.1 放矿理论研究现状	(2)
0.1.1 随机介质放矿理论研究现状	(2)
0.1.2 椭球体放矿理论研究现状	(6)
0.2 放矿计算机仿真研究现状	(7)
0.3 力学在放矿中的应用	(9)
0.4 放矿理论研究中存在的不足与研究方向	(11)
1 矿石散体的基本物理力学性质与流动特性	(13)
1.1 散体的概念和结构	(13)
1.2 散体的基本物理力学性质	(14)
1.2.1 散体密度	(14)
1.2.2 密实系数	(14)
1.2.3 散体的孔隙率、孔隙比和压实度	(15)
1.2.4 散体的松散性	(16)
1.2.5 散体的湿度及含水性质	(17)
1.2.6 矿石散体块度	(17)
1.2.7 散体的自然安息角	(23)
1.2.8 散体的外摩擦角	(27)
1.3 散体的强度与变形特征	(28)
1.3.1 散体的内摩擦角	(28)
1.3.2 散体的黏聚力	(29)
1.3.3 散体的抗剪强度	(30)
1.3.4 散体的变形特征	(32)
1.4 矿石散体的流动特性	(34)
1.4.1 崩落矿石散体流动性单因素分类	(34)
1.4.2 崩落矿石散体流动性综合分类法	(39)
2 散体移动规律的数学解析	(40)
2.1 散体移动的连续性假设	(40)
2.2 散体移动的连续性方程	(40)
2.2.1 质量连续方程	(41)
2.2.2 体积连续方程	(42)
2.3 散体移动微分方程	(47)
2.3.1 散体移动场	(47)
2.3.2 散体移动微分方程	(55)

2.3.3	硬壁影响下散体移动微分方程	(56)
2.4	散体下沉微分方程	(58)
2.5	微分方程求解与分析	(59)
2.6	散体移动微分方程与放矿随机介质理论	(63)
3	底部放矿随机介质理论	(65)
3.1	概 述	(65)
3.2	底部放矿时矿岩散体移动概率方程	(65)
3.2.1	基本假设	(65)
3.2.2	无膨胀散体移动概率密度方程	(65)
3.2.3	矿岩散体(二次松散系数 $\eta > 1$)移动概率密度方程	(70)
3.3	散体移动密度场	(73)
3.3.1	散体移动密度场	(73)
3.3.2	等密度体	(75)
3.4	散体移动速度场及其检验	(76)
3.4.1	无膨胀散体移动速度场	(76)
3.4.2	矿岩散体($\eta > 1$)移动速度场	(78)
3.4.3	散体移动连续性检验	(78)
3.4.4	速度场与运动微分方程	(78)
3.4.5	等速体	(79)
3.4.6	散体移动场划分	(80)
3.4.7	放矿中散体移动范围的近似确定	(82)
3.5	放出漏斗	(83)
3.5.1	无膨胀散体放出漏斗	(83)
3.5.2	矿岩散体放出漏斗	(84)
3.6	放出体	(85)
3.6.1	放出体母线方程	(86)
3.6.2	放出体形态	(87)
3.6.3	降落漏斗体积、放出体体积与放出量的关系	(89)
3.7	底部放矿模拟实验	(90)
3.8	放出体的过渡关系	(94)
3.8.1	放出体表面过渡关系	(94)
3.8.2	放出体与等速体(等密度体)关系	(96)
3.8.3	放出体表面厚度过渡关系	(96)
3.9	散体颗粒点的移动方程	(98)
3.9.1	颗粒移动坐标的正、逆变换方程	(98)
3.9.2	归零量与坐标变换	(100)
4	端部放矿随机介质理论	(107)
4.1	概 述	(107)
4.2	端壁条件下崩落矿岩散体移动概率方程	(108)

4.3	端壁前倾条件下崩落矿岩散体移动规律	(111)
4.3.1	概率密度方程	(111)
4.3.2	颗粒移动迹线	(113)
4.3.3	速度场	(113)
4.3.4	密度场	(117)
4.3.5	移动漏斗	(118)
4.3.6	放出体	(119)
4.3.7	坐标变换方程	(121)
4.4	端壁直立条件下崩落矿岩散体移动规律	(122)
4.4.1	概率密度方程	(122)
4.4.2	颗粒移动迹线	(124)
4.4.3	速度场	(124)
4.4.4	移动漏斗	(126)
4.4.5	放出体	(126)
4.4.6	端部放矿模拟实验	(127)
5	放矿口影响下崩落矿岩散体移动规律	(131)
5.1	概 述	(131)
5.2	实际放出口矿岩散体移动速度分布	(131)
5.3	底部放矿口影响下散体移动概率方程	(137)
5.3.1	底部放矿口影响下无膨胀散体移动概率密度方程	(137)
5.3.2	底部放矿口影响下矿岩散体移动概率密度方程	(138)
5.4	放出口对散体移动概率分布的影响	(139)
5.4.1	散体移动概率分布的数学期望 $E(x)$, $E(y)$	(139)
5.4.2	流 轴	(140)
5.4.3	放出口对散体移动概率分布的影响	(141)
5.4.4	放出口显著影响范围估算	(142)
5.5	底部放矿口影响下矿岩散体移动规律	(144)
5.5.1	速度场	(144)
5.5.2	密度场	(147)
5.5.3	连续性检验	(147)
5.5.4	底部放矿时矿岩散体放出漏斗	(147)
5.5.5	放出体	(148)
5.6	端部放出口影响下矿岩散体移动规律	(150)
5.6.1	端部放出口影响下散体移动概率密度方程	(150)
5.6.2	端部放出口影响下矿岩散体移动速度场	(152)
5.6.3	散体颗粒移动迹线	(154)
5.6.4	端部放矿散体放出漏斗方程	(154)
5.6.5	端部放矿放出体方程	(155)

6 崩落法采场结构参数确定	(158)
6.1 概 述	(158)
6.2 无底柱分段崩落法采场结构参数的演变	(158)
6.3 无底柱分段崩落法采场结构参数的合理确定	(160)
6.3.1 矿岩散体($\eta > 1$)有效移动带	(160)
6.3.2 无底柱分段崩落法采场结构参数的合理确定	(163)
6.4 应用实例一——北铭河铁矿崩落法采场结构参数确定	(165)
6.5 应用实例二——深部铜矿崩落法采场结构参数确定	(169)
7 崩落法放矿计算机仿真与控制放矿系统	(172)
7.1 概 述	(172)
7.2 主要功能介绍	(172)
7.2.1 矿块放矿管理	(173)
7.2.2 放矿参数设置	(175)
7.2.3 放矿仿真过程模拟	(184)
7.2.4 放矿结果显示、统计和打印	(186)
7.2.5 帮 助	(192)
7.3 培训及技术支持	(193)
7.3.1 培 训	(193)
7.3.2 技术支持	(193)
参考文献	(194)

0 绪 论

崩落采矿法在国内外金属矿山应用广泛,典型的崩落法有底柱崩落法、无底柱崩落法、矿块崩落法和自然崩落法。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,在有色金属矿山用崩落法采出矿石总量的比重逐年增长,几乎达到40%左右。国际上使用崩落法开采的矿山约占25%。这足以说明崩落采矿法为冶金工业提供矿石原料的重要意义,并且随着采矿向深部发展,崩落法的使用也有增加的趋势。崩落采矿法主要应用于开采厚大矿体、急倾斜中厚至厚矿体。该法不留间柱,采场结构与生产工艺简单,便于大设备运行,生产能力大,成本低,生产安全且管理方便。从促进和实现矿山强化开采,提高矿山经济效益方面来讲,崩落法堪称高强度、高效率、高效益的地下采矿方法之一。

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,将恶化放矿结果,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,又提高了生产成本。我国老矿山资源消耗严重,许多矿山转入深部开采的问题和困难较大,而新矿山的建设时间长,原矿石的供应不足,这必将影响冶金工业持续稳定的发展。此外,除个别矿山外,我国崩落法矿山的损失率为20%~30%,贫化率为25%~35%,同国外先进水平相比,一般要高出5%~10%。究其原因不外:方案不当,结构参数不合理,放矿控制不善,施工质量不高。

我国矿产资源的一个显著特点是贫矿多,富矿少,后备资源储量增长速度跟不上消耗速度。随着我国国民经济的快速发展,金属矿石需求量将急剧增长。综合降低崩落法开采中的损失贫化、提高资源利用率,促进我国采矿业持续、稳定、高效发展仍然任重而道远。

放矿理论是研究废石覆盖层下崩落矿石移动规律的学科,属工业技术领域。根据计算表明:对有色金属矿山来说,同时降低损失贫化时,可使单位矿石工业储量平均盈利增加,若按全国使用崩落法的有色金属矿山,每年同时降低贫损5%所增加的年盈利,相当于4~5个经济效益较好的大型铜矿山的盈利额。但是,降低损失贫化却是崩落法矿山一项重要的技术性很强且难度很大的工作。由此可见,研究放矿理论,最佳地指导放矿控制,对提高崩落法矿山经济效益有非常重要的意义。

目前,世界采矿方法发展的大趋势是高阶段、大采场和井下大型无轨设备配套采矿。其中高分段崩落法和自然崩落法等大规模采矿方法在我国具有较广泛的应用面,如我国可望在可崩性较好的低品位矿体(如金川贫矿体)中研究应用自然崩落法,同时应研究改进采场结构,出矿工艺和出矿作业条件,用新设备、新技术强化出矿工作,使采矿朝着连续机械化和自动化的方向发展,为新结构、高效率、高强度采矿方法的提出创造有利条件,

为降低矿床开采损失贫化打下坚实的基础。

0.1 放矿理论研究现状

已有的放矿理论研究首先将散体抽象为连续流动介质,认为散体的受力、运动速度及密度等都可视为颗粒所处位置(坐标)的连续函数,建立相应的模型。当前的放矿理论研究主要有随机介质放矿理论、椭球体放矿理论和类椭球体放矿理论。

0.1.1 随机介质放矿理论研究现状

将散体抽象为连续流动的随机介质,运用概率论的方法研究散体移动规律而形成的理论体系,即称为随机介质放矿理论。

应用随机介质理论研究散体移动过程最早始于20世纪60年代,波兰研究地表移动专家J. Litwiniszyn教授在文献[1]中认为,松散介质运动过程是随机过程,可用概率论的方法研究。Litwiniszyn建立了随机介质模型(如图1a),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 或 b_2 重球下移占据,此时第II层又形成一个空位,比如是 a_2 ,它将由第III层的 a_3 或 b_3 球进行填补。这样从第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 连续放出球体,那么上部层中就有许多方箱被放空,空箱的边界区域形成台阶线。令第N层任意空位由第N+1层相邻两球递补,每球的递补概率为1/2,则当层数与放出的球数相当多时,该台阶线逼近正态(Gaussian)分布曲线(图1b)。Litwiniszyn并没有从建立的模型出发研究放矿过程,而仅从模型描述的现象引出推论——散体介质移动的随机性,即当从 Z_0 水平放出一定的单元体时,引起原来 Z_1 ($Z_1 > Z_0$)水平的单元体以一定的概率下移。Litwiniszyn将散体抽象为随机移动连续介质,建立了移动漏斗深度函数 ω 的微分方程式:

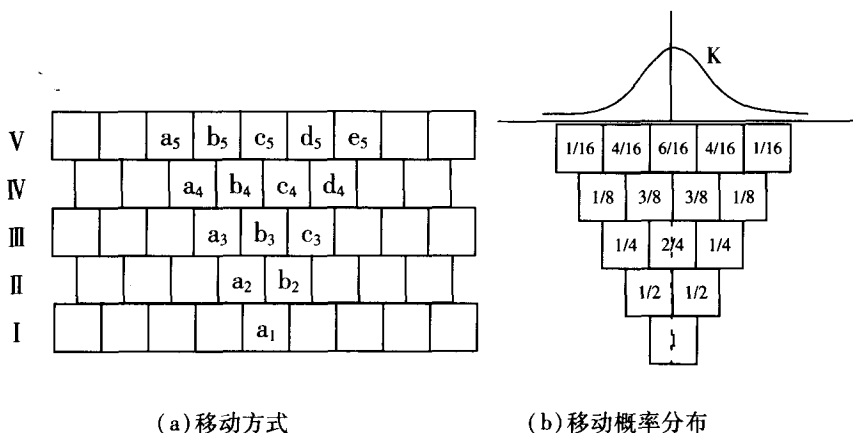


图1 J. Litwiniszyn 随机移动模型

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

前苏联学者 В. В. Куликов 仍以球体模型, 对放矿随机介质理论进行了较为深入的研究, 包括平面问题和空间问题, 给出的移动概率密度方程为^[8]:

$$p(x, z) = \sqrt{\frac{2b}{\pi kz}} \exp\left(-\frac{2bx^2}{a^2 kz}\right) \quad (3)$$

$$p(x, y, z) = \frac{2b}{\pi kz} \exp\left[-\frac{2b(x^2 + y^2)}{a^2 kz}\right] \quad (4)$$

式中: k ——移动不均匀系数(修正项);

a, b ——球体颗粒中心的水平及垂直间距。

式(3)与式(2)虽然表达形式不同, 但实质内容是一致的。两者均为 Gaussian 曲线, 方差均与高度 z 的一次方成正比。对于一定的散体, B, k, a, b 均被视为常数, 对应于同一运动微分方程:

$$\text{平面问题: } \frac{\partial p(x, z)}{\partial z} = B \frac{\partial^2 p(x, z)}{\partial x^2} \quad (5)$$

$$\text{空间问题: } \frac{\partial p(x, y, z)}{\partial z} = B \left[\frac{\partial^2 p(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p(x, y, z)}{\partial y^2} \right] \quad (6)$$

在随后的较为系统的研究中^[9,10,11], 尽管给出的理论方程形式不尽一致, 也都可归结为式(5)和式(6)。式(6)与式(1)相比, 一是将散体视为不可压缩介质($\partial a / \partial z = 0$), 二是将系数 $B(z)$ 简化为常数 B 。分析表明, 这种简化对散体移动规律认识的影响非常大。散体移动中因结构变形必发生二次松散现象, 实验表明一个常数不能综合反映散体的移动特性, 其实质问题就是散体移动概率场与实际移动场相似程度不高。实际上上述文献所得出的放出体形态尽管有肥瘦之分, 但总的规律为下部粗大上部细小(如图3), 放出量与放出高度的平方成正比, 这一结论与许多研究者的研究结果不尽相符^[12~23]。

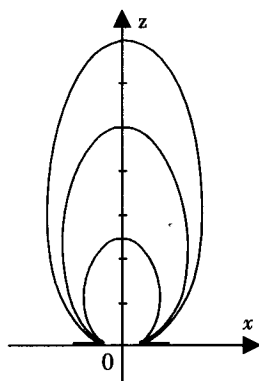


图3 王泳嘉的放出体形态

1981年,周先明用经验分析法给出另一种形式的移动概率密度方程^[24]:

$$z(x) = \frac{1}{\lambda(z)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2[\lambda(z)]^2}\right] \quad (7)$$

式中 $\lambda(z)$ 是 z 的单值连续递增函数,使用中取 $\lambda(z) = \lambda \cdot z$,即方差值与高度的平方成正比。同时文献[24]对一些放矿中的物理现象进行了讨论,但实质上仅给出了等速体有关计算式,没有进一步对放矿中的各种物理现象进行探讨,即未形成理论体系。另外文献[25、26]中的仿真概率密度函数与文献[24]属于同一类型。

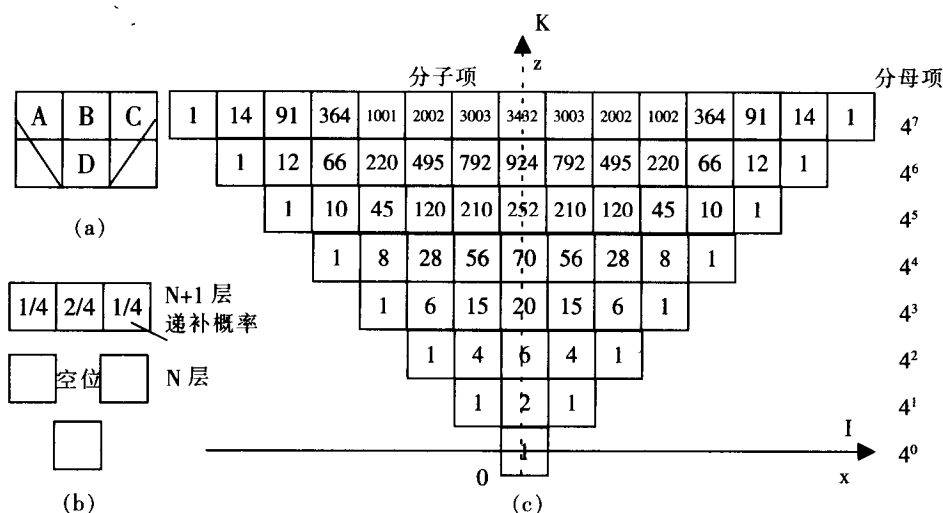
使放矿随机介质理论取得突破性发展的主要贡献人是任凤玉教授。他在前人研究的基础上,进一步研究了散体移动概率分布(图4),通过实验数据分析得出方差的表达式,继而在理论推导和经验分析的基础上,依据实验建立了散体移动概率密度方程^[27,28]:

$$\text{方差表达式:} \quad \sigma^2 = \frac{1}{2} \beta z^\alpha \quad (8)$$

$$\text{平面问题:} \quad p(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{\pi \beta z^\alpha}} \exp\left(-\frac{x^2}{\beta z^\alpha}\right) \quad (9)$$

$$\text{空间问题:} \quad p(x, y, z) = \frac{1}{\pi \beta z^\alpha} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\beta z^\alpha}\right) \quad (10)$$

式中: α 、 β ——与散体的流动性质和放出条件有关的实验常数。



(a) 散体移动区域

(b) 散体移动概率

(c) 散体移动概率分布

图4 任凤玉的散体移动模型^[28]

式(8)中方差 $\sigma^2 = \frac{1}{2}\beta Z^\alpha$ 尽管是由实验数据回归得出的,但却使散体移动场与概率场得到了有效的统一。任凤玉教授以式(10)为理论基础方程,推导了散体移动速度场、移动漏斗、放出体方程、颗粒移动迹线和坐标变换方程,继而进行了复杂边界条件下(半无限边界条件及复杂边界条件)散体移动规律研究和放出口对散体移动规律的影响研究,取得了开创性的成果。推导出的放出体表面母线方程可适应放出体形态的各种变化(图5),并可根据散体移动系数预测放出体长、短轴,为崩落法采场结构参数的设计提供了理论依据;根据不同的放矿方式引起的放矿口不同的散体速度分布,推导出了对称和不对称分布时相应的放出体方程,与模拟试验结果达到良好的吻合,使放矿理论与实际现象大为接近;对放矿问题进行了计算机仿真研究,使放矿随机介质理论能够定量地解决各种复杂条件的崩落法采场放矿问题,如预测贫化损失问题、采场结构优化问题,极大地增强了该理论的实用性和逼真程度,拓宽了放矿随机介质理论的适用范围,形成了目前为止系统的随机介质放矿理论体系^[28~36]。该理论先后在国内多家崩落法矿山取得了试验成功,并得到推广应用^[36]。

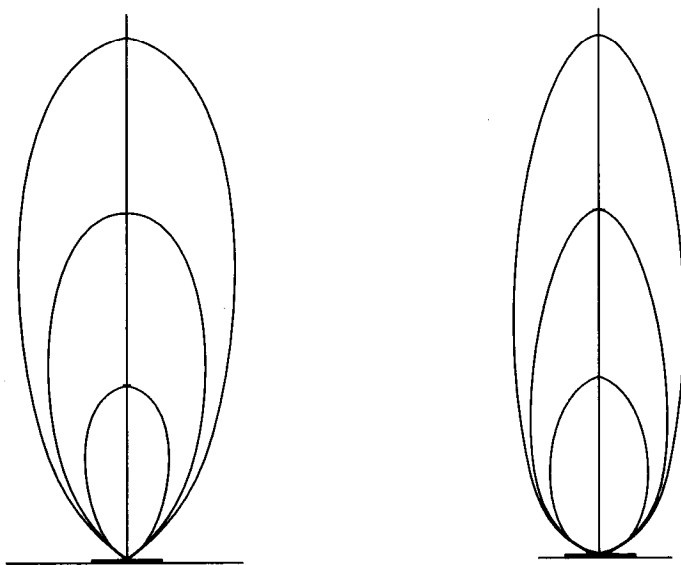


图5 任凤玉的放出体形态^[28]

0.1.2 椭球体放矿理论研究现状

椭球体放矿理论是在实验的基础上,通过抽象假设放出体、移动体和松动体的形状都是椭球体,继而建立的时间最早、研究较多、影响较大的放矿理论。

1952年前苏联学者Г. М. 马拉霍夫出版《崩落矿块的放矿》^[12],形成了椭球体放矿理论体系。但是许多研究者发现该理论在实际和理论两方面都存在一些问题难以解决^[7,16,20,40]: ①放出体是椭球体与大部分实验不吻合,实验证明放出体形态是随散体的流动性质而变;②认为散体密度的变化仅发生在松动体边界上不符合实际;③等速体与椭球体的基本假设是矛盾的。

20 世纪 70 ~ 80 年代中期, 国内大多数学者对放矿理论进行了深入地研究, 很多工作都体现在进一步完善椭球体放矿理论。1979 年刘兴国教授基于放出体的过渡关系提出等偏心率椭球体放矿理论^[38~43], 建立了相应的数学方程, 同时应用坐标变换方程解决多漏斗放矿问题, 在多孔放矿、定量计算、放矿边界条件研究等方面取得了开创性成果。但实验证明, 椭球体的偏心率是变化的, 等偏心率放矿理论的计算结果与实验结果相差很大。1983 年李荣福在实验的基础上得出了偏心率方程 $1 - \varepsilon^2 = KH^{-n}$, 应用该方程建立了变偏心率截头椭球体放矿理论, 使理论计算与实验结果的误差大大减小^[44]。但是, 变偏心率截头椭球体放矿理论只有其特殊形式($r=0$ 时)才能通过连续流动检验, 因此刘兴国教授在变偏心率完全椭球体放矿理论方面做了大量研究工作, 使椭球体放矿理论得到完善。然而刘兴国教授同时指出: “..... 椭球体理论的前提也正是这个理论的最大问题。如何解决这个问题? 能否首先建立移动带内的速度场, 由速度场再来求得放出体, 是一个有待研究的重要课题。”^[38]。

1994 年李荣福在实验的基础上提出了类椭球体放矿理论^[45~55], 其放出体表面方程为:

$$R^2 = KX^n \left[1 - \left(\frac{X}{H} \right)^{\frac{n+1}{m}} \right] \quad (11)$$

式中: K, m, n ——与放矿条件及放出物料性质有关的实验常数; H ——放出体高度; R, X ——颗粒点的坐标。

类椭球体放矿理论在椭球体放矿理论的基础上大大推进了一步。①放出体表面方程(11)能适应放出体形态的变化; ②速度场与类椭球体的基本假设不矛盾; ③对散体移动密度场做了有益的探讨。但是与椭球体放矿理论一样, 类椭球体放矿理论对“类椭球体”的形成原因没有做出科学的解释, 此外类椭球体放矿理论仅对对称条件下的室内单孔模拟放矿规律进行了研究, 没有对端壁放矿和其它复杂边界条件下的放矿理论做进一步研究, 而实际放矿中采场边界受矿体开采技术条件限制比较复杂, 正是放矿理论研究的难点所在, 此外未见到类椭球体放矿理论的相关实际应用报道。

人们常用构造数学模型的方法来描述事件, 如果这个模型特别成功, 则它也应能解释事件。比较而言, 对于矿山各种各样的实际放矿条件, 椭球体的局限性较大, 而随机介质放矿理论则显出很强的适应性。就理论体系严密性、完整性而言, 随机介质放矿理论体系比椭球体理论体系为好, 在椭球体理论体系中能说明的问题, 它不仅能说明, 还可说明在椭球体理论中所不能说明的问题。

0.2 放矿计算机仿真研究现状

1968 年, 加拿大学者 David Jolley 提出放矿计算机随机模拟方法^[56]。由于物理模拟试验法与现场试验研究法周期长、工作量大且难以发挥“即刻”的指导作用, 故仿真法提出后, 即受到国际采矿学术界的重视。但是人们很快发现由 D. Jolley 概型(图 6)确定的移动场与实际散体移动场不符, 放出漏斗宽度较窄, 得到的放出体下部粗大而上部瘦小, 放出量与放出高度的关系失真。对此许多学者就 D. Jolley 模块的概率赋值问题和新型空位递

补模型进行了大量研究^[11,25-34,37,57-76]，其中递补概率赋值是上述文献的研究核心。其中比较系统的如文献[61]等，文献[61]研究了不同高度采用不同 q 值的方法，证实 q 无论取什么常数，放出体失真问题均得不到有效解决。文献[62]还给出了六角递补模型和七块递补模型，文献[63、64]则认为 D. Jolley 概型存在先天缺陷，并提出了期望放出体理论。

然而笔者认为，上述文献中对仿真概率场和实际散体移动场的统一问题考虑不足^[37]，输入的参数中没有相应的表征散体流动性的参数，仿真的可靠度得不到保证。实验与理论分析认为，散体移动中存在横向填补现象，这一点在仿真中并没有予以考虑，因而概率场的相似特征值 q 无论取何值，其概率分布仍属于王泳嘉教授的概率^[2-7]的范畴（见式2），即放出体总是下部粗大而上部瘦小，放出量与放出高度为平方关系，不同的 q 值仅能改变放出体的肥瘦而已^[27,28,37]。

对此，任凤玉教授提出以移动场相似作为计算机仿真的准则^[27,28]，并以在式(10)的基础上推导出的各种边界条件下的移动概率密度方程作为放矿仿真过程的数学模型，改进了计算机仿真方法，并用之解决各种采场边界下的放矿问题，取得了显著的成果。

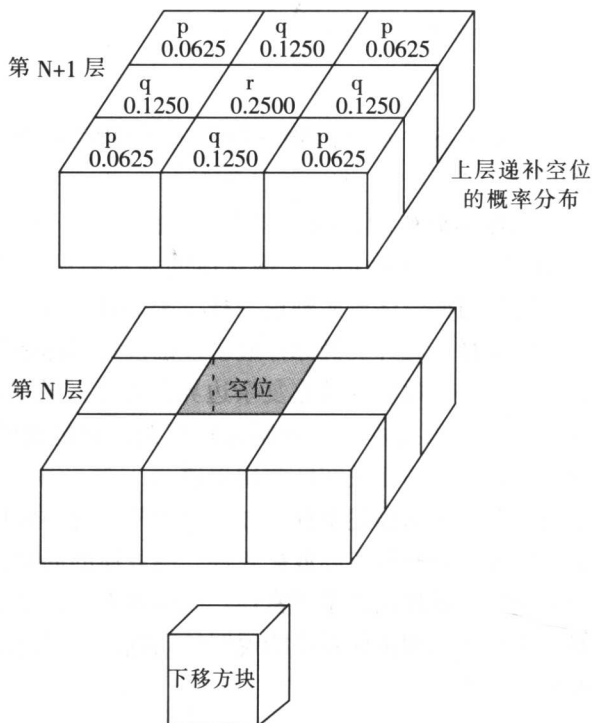


图6 D. Jolley 仿真模型中的概率分布

P. Gustafsson(文献[77])考虑了空位扩散中的暂时性滞留(空位扩散的不连续性、块体之间的相互锁定、移动阻力系数)问题和模块的横向填补问题，进一步改进了 D. Jolley 概型，使放矿仿真研究中的连续性假设条件得到松弛，使仿真与实际更加接近。其仿真模型中概率分布如图7：