

动态开挖扰动下采空区围岩 稳定性分析与监测

DONGTAI KAIWA RAODONGXIA CAIKONGQU WEIYAN
WENDINGXING FENXI YU JIANCE

■ 卢宏建 李示波 李占金 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

河北省自然科学基金 资助出版
华北理工大学学术著作出版基金

动态开挖扰动下采空区围岩 稳定性分析与监测

卢宏建 李示波 李占金 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社

2017

内 容 提 要

本书以典型铁矿山原型为工程背景,运用应力、应变与声发射监测技术手段,通过大尺度二维物理相似模拟试验,揭示动态扰动下硬岩矿柱破裂失稳演化特征与破裂失稳机制;结合矿山采空区群特征,建立了声发射在线实时监测体系,构建了岩石声发射及其他振动波形库,总结了矿山岩石破坏过程的声发射特征,制定了完善的预报预警制度。

本书注重理论和工程实践相结合,可供与金属矿山相关的工程技术人员阅读,也可供有关院校矿业类师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

动态开挖扰动下采空区围岩稳定性分析与监测/卢宏建,李示波,李占金著. —北京:冶金工业出版社,2017.6

ISBN 978-7-5024-7509-3

I. ①动… II. ①卢… ②李… ③李… III. ①采空区—围岩稳定性—分析 ②采空区—围岩稳定性—监测 IV. ①TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 090342 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 赵亚敏 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7509-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017 年 6 月第 1 版,2017 年 6 月第 1 次印刷

169mm×239mm;10 印张;201 千字;148 页

44.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

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

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)



前 言

铁矿床采空区是指铁矿回采过程中未及时处理,累积形成的结构复杂的巨大开挖空间。我国是铁矿资源大国,经过多年开采,特别是20世纪80年代以来,在全国各地形成诸多规模不等、范围不一的地下采空区,导致我国成为目前采空区诱发矿山灾害的多发国家。据不完全统计,我国因采矿引起的地表塌陷面积达 1150km^2 ,发生采矿塌陷灾害的矿产资源型城市有30多个,每年因采矿地面塌陷造成的损失达4亿元以上。采空区围岩破裂灾变是引发矿山灾害的根本原因,因此矿山资源开采过程中的采空区围岩破裂失稳监测预警是防灾减灾的关键,成为国内外研究的重点。

采空区围岩稳定性研究的主要方法有理论分析、相似模拟试验、数值模拟计算和现场监测等4种,集中于某个状态下的采空区稳定性与单层采场开挖下采空区围岩的稳定性分析。关于多层采场开挖影响下的采空区围岩的动态失稳过程研究,煤矿研究较多,而对金属矿山动态扰动下采空区围岩失稳过程研究尚处于完善阶段。本书以典型铁矿山采空区为工程背景,综合采用理论分析、物理力学试验,数值模拟、物理相似模拟等手段,对铁矿床动态开挖相似物理模型试验的设计、采空区围岩运动结构特征、采空区失稳破坏前兆信息以及采空区围岩破裂失稳机理进行了系统研究。

全书内容分为6章。第1章:对采空区与采空区群的定义及其分类,采空区围岩稳定性分析、数值分析、相似试验,采空区围岩稳定性监测预警方法进行了文献综述。第2章:在分析了典型矿山采空区现状的基础上,选择代表区域现场取样,通过室内力学试验对矿岩的力学特性和声发射特征进行了研究。第3章:以实例矿山典型矿段为物理原型,基于相似理论原理,确定了相似模拟试验相似比与采场模

拟参数。系统介绍了物理相似模拟试验加载与测试系统后,运用岩石破裂过程分析和有限元数值分析软件,对声发射、应力应变测点进行了分析。第4章:在确定相似材料的基础上,通过力学试验得出了相似材料配比与力学指标关系方程,依据相似比确定了相似材料的配比。通过矿岩相似材料的声发射特征试验,给出了物理相似模拟试验声发射监测适宜参数。系统介绍了相似试验的模型制作,监测设备安装与调试,试验实施与监测相关事宜。第5章:基于物理相似模拟试验应力应变与声发射数据,分析了不同矿房开挖过程中采空区围岩应力应变与声发射动态演化规律和岩层弱化过程中采空区围岩破裂失稳的应力应变与声发射特征,构建了动态扰动下采空区围岩破裂失稳模式,提出了预报预警方法。第6章:根据室内力学试验和物理相似模拟试验结论,提出了实例矿山的采空区声发射监测方案制定的思路和流程。基于现场监测数据,构建了岩石声发射及其他振动波形库,总结了矿山岩石破坏过程的声发射特征。通过波形分析及时掌握了采空区围岩地压活动的声发射信息变化规律,制定了预报预警制度。

本书由华北理工大学卢宏建、李示波和李占金撰写完成。全书内容主要由河北省自然科学基金项目(编号:E2014209093)和采空区相关科研项目研究成果组成,在此对给予项目支持的河北省自然科学基金委和相关科研支撑单位表示衷心感谢。本书也得到了华北理工大学学术著作出版基金资助,在此表示感谢。

本书在有关资料整理、录入、排版过程中得到了华北理工大学矿业工程学院梁鹏、张松林、蔡晓盛同学的帮助,感谢他们的辛勤劳动。在本书的撰写过程中,参考了有关国内外的文献资料,在此向文献资料原著作者表示衷心的感谢。

限于作者的学识和水平,书中难免有疏漏和不妥之处,诚请同行专家和广大读者批评指正。

作 者

2016年12月16日

目 录

1 绪论	1
1.1 采空区基本概念	2
1.1.1 采空区定义和特征	2
1.1.2 采空区群的定义和特征	3
1.1.3 采空区的类别与特点	3
1.2 采空区围岩稳定性理论分析	5
1.2.1 矿柱稳定性理论	5
1.2.2 顶板稳定性理论	6
1.2.3 采空区稳定性评价理论	7
1.2.4 研究进展	9
1.3 采空区围岩稳定性数值分析	10
1.4 采空区围岩稳定性相似试验	11
1.4.1 物理相似模拟材料研究	12
1.4.2 物理相似模拟实验加载模拟	13
1.4.3 物理模拟实验测试方法	13
1.5 采空区围岩稳定性监测预警方法	14
1.5.1 采空区稳定性监测技术	14
1.5.2 采空区失稳预警方法	14
2 工程概况与岩石力学特性研究	16
2.1 工程概况	16
2.2 矿岩力学特性研究	17
2.2.1 物理力学试验	18
2.2.2 岩体力学参数研究	20
2.3 岩石试件声发射试验	20
3 采空区围岩破裂失稳物理模型试验设计	22
3.1 物理相似模拟试验基本原理	22
3.2 物理模型建立	23

3.2.1	物理原型选择	23
3.2.2	物理模拟相似比	23
3.2.3	物理模拟参数设计	24
3.3	加载与测试系统	25
3.3.1	加载系统	25
3.3.2	测试系统	27
3.4	监测点布设分析	30
3.4.1	声发射测点布设分析	30
3.4.2	压力盒与应变测点布设分析	34
4	相似材料选择配比与模型制作实施	41
4.1	相似材料配比试验	41
4.1.1	相似材料选取的一般原则	41
4.1.2	相似材料配比正交试验方案设计	41
4.1.3	试件制作与力学参数测试	43
4.1.4	相似材料力学性能影响因素分析	44
4.1.5	材料配比与力学指标关系方程确定及应用	47
4.2	相似材料声发射监测适宜参数试验	48
4.2.1	试验设备及参数选择	48
4.2.2	相似材料单轴压缩变形力学特征	49
4.2.3	相似材料单轴压缩声发射特征	50
4.3	相似试验模型制作实施	53
4.3.1	相似模型制作	53
4.3.2	监测设备安装与调试	56
4.3.3	试验实施与监测	62
5	采空区围岩破裂失稳规律与破坏机制	64
5.1	开挖过程中围岩应力应变与声发射演化规律	64
5.1.1	不同矿房开挖围岩应力监测分析	64
5.1.2	不同矿房开挖围岩位移与应变演化规律	66
5.1.3	不同矿房开挖围岩声发射特征分析	74
5.2	岩层弱化过程中围岩破裂失稳特征分析	93
5.2.1	围岩破裂失稳位移演化特征分析	94
5.2.2	岩层弱化过程采空区围岩应力演化规律分析	96
5.2.3	围岩破裂失稳与声发射特征分析	99

5.3 围岩破裂失稳机理	103
5.3.1 围岩损伤阶段	103
5.3.2 围岩大变形阶段	103
5.3.3 围岩失稳垮塌阶段	105
5.4 采空区围岩失稳特征综合分析与稳定性预测方法	108
5.4.1 采空区围岩失稳特征综合分析	108
5.4.2 采空区围岩稳定性预测预警方法	112
6 典型采空区群声发射监测	113
6.1 采空区群稳定性监测系统	113
6.1.1 监测系统的选择	113
6.1.2 声发射监测系统的特点	114
6.2 采空区群稳定性监测方案	115
6.2.1 监测目标与技术路线	115
6.2.2 监测网点确定与布设	115
6.2.3 现场安装与调试	130
6.3 声发射监测与数据分析	132
6.3.1 声发射监测基础参数设定	132
6.3.2 波形数据库建立	132
6.3.3 典型波形分析	134
6.4 采空区安全等级划分与预报预警	138
6.4.1 采空区安全等级划分	138
6.4.2 预报预警	139
参考文献	141

1 绪 论

我国矿产资源的绝大部分来源于地下开采,随着社会经济建设的不断发展、对矿物资源需求的大幅增长,迫使我国大幅度提高矿山开采强度。我国 62.5% 的冶金矿山、89% 的有色金属矿山和近乎全部的黄金矿山为地下开采,其中采用空场采矿法的比重约占 53.5%,滞留了大量采空区。2009 年,25 个省市金属、非金属矿山统计数据显示,独立采空区达 8892 个,总体积约 4.32 亿立方米。至 2015 年,全国金属非金属地下矿山采空区总体积达 12.8 亿立方米,导致我国成为采空区诱发地压灾害的多发国家。采空区的地压灾害主要表现为以下两方面:一是空区矿柱的变形破坏、顶板的大面积冒落以及岩层移动等会造成地表的沉陷、开裂甚至塌陷,这会破坏地表环境,危害更大的是空区突然垮塌所产生的高速气浪和冲击波,它们会造成人员伤亡和设备损坏;二是矿山开采过程中的开采扰动会导致采空区围岩裂隙发育,甚至贯通地表或连通老窿积水,极易发生突水事故,淹没巷道及工作面,造成巨大的经济损失。如,1961 年 10 月,大同矿务局挖金湾矿,采空区发生冒顶,诱发大规模地面塌陷,造成 18 人死亡,矿井的通风、运输系统均遭破坏,全井被迫停产;1980 年 6 月,湖北远安磷矿,由于采空区塌陷,诱发了大规模的山体崩塌;2001 年 7 月,广西南丹拉甲坡矿由于采空区围岩贯通,发生特大透水事故,造成重大人员伤亡;2005 至 2006 年,昭通某铅锌矿采空区引起地表塌陷,造成了巨大的经济损失;2005 年 11 月,河北某石膏矿发生采空区上覆岩层坍塌,造成重大人员伤亡,给当地环境造成巨大影响;2005 年 12 月 26 日,安阳县都里铁矿采空区突然引发大面积地表塌陷,造成 8 人坠落、3 人失踪;2006 年 6 月 18 日,包头市聚龙矿业公司采空区塌陷造成 1 人遇难,6 人失踪;2008 年 4 月 16 日,山西忻州市平型关铁矿由于地下采空区顶部矿柱及回填料塌陷,导致地面材料库房陷落,造成 3 人下落不明。2011 年 8 月 15 日上午,湖北黄石阳新县铜矿采空区发生塌陷,塌陷面积 60 多平方米,深度约 13 米,采空区塌陷导致居民住房倒塌。随着矿山采空区安全事故的愈发严重,对采空区的分析治理受到了国家安全部门的高度重视。国务院安委会办公室下发了《金属非金属地下矿山采空区事故隐患治理工作方案》(2016 第 5 号文件),要求加强安全生产工作,坚决遏制采空区引发的重特大事故。诱发采空区安全事故的根本原因是采空区围岩的破裂灾变,因此矿山资源开采过程中的采空区围岩破裂失稳监测预警是防灾减灾的关键,成为研究的焦点。

1.1 采空区基本概念

1.1.1 采空区定义和特征

“采空区”是矿山开采的专业术语，煤炭开采中也称“老塘”、“老窿”，金属矿山开采中称为“空区”、“空场”，外文资料中称为“goaf”、“gob”、“waste”，“abandoned mine”，“stoped-out area”，冶金学名词审定委员会于2001年发布的《冶金学名词》，在“冶金学—采矿—矿山测量”中规定了“采空区处理”的英文对照名词为“stoped-out area handling”，但未对采空区进行定义和解释。《中国百科大辞典》中，解释“采空区”是由于采矿工作而遗留下来的各种形状和大小的空间。《矿山安全术语》(GB/T 15259—94)标准中规定“采空区”是井下采矿(煤)后所废弃的空间。而《矿山安全术语》(GB/T 15259—2008)中，更改了这一说法，定义“采空区”为采矿以后不再维护的地下和地面空间。

金属矿采矿学中，没有权威著作明确解释过“采空区”的定义，转而更深入研究和解释的是“地压”的概念。实际上，在金属矿山开采中“地压”与“采空区”是不可分割的。比如，“采空区处理”也经常被被称为是“地压管理”。采矿工程之所以重视“采空区”，根本原因在于它是“地压”灾害的始作俑者。“地压”在冶金行业英文为“ground pressure”（冶金学名词审定委员会，2001年），石油行业英文为“geopressure”（石油名词审定委员会，1995年），煤炭行业英文为“rock pressure”（煤炭科技名词审定委员会，1997年）。《矿山安全术语》(GB/T 15259—2008)中，修改为“地下采掘活动在井巷、硐室及采矿工作面周围矿(岩)体和人工支护物上引起的力”。《采矿手册》第四卷第23章中对于“地压”的定义更广泛被金属矿山行业的研究者所接受，“采场地压”是指回采工作面的矿体、围岩和矿柱的应力及其与采场内支护系统相互作用的应力场的总称。“地压”，从字面理解即“地层的压力”，是时刻存在于岩石体中的。如果对采场进行尾砂胶结充填并接顶后，消除了采矿后的采场空间，可以有效控制地压灾害，则不再是“采空区”。如果采用废石充填，接顶效果不理想，充填体不能有效支撑顶板，采空区依然存在，“地压活动”会依然发展。如果采空区顶板覆岩彻底崩落，与地表贯通，地压灾害解除，则不再是“采空区”。如果对采空区采用“开天窗”的方式消除冲击性灾害，大面积覆岩垮落的地压活动在“可控”状态下发展，则“采空区”依然存在。可见“诱发矿山灾害”是采空区在矿山生产中受到重视的根本原因。

无论煤矿还是非煤矿，对于“采空区”的理解大致相同，但也存在各种细微的差别。相同的是，“采空区”均指采掘活动后产生的空间。不同的是，煤矿定义的“采空区”侧重于废弃的、不再维护的空间，即“弃掉的”才是采空区。而金属矿山定义的“采空区”则侧重于矿石采出后剩余的空间体积，即“开挖

的”就是采空区。

对于生产矿井的“采空区”具备以下四个特征：

- (1) 因采矿活动而产生。
- (2) 可能诱发矿井灾害。
- (3) 回采矿体后的空间。
- (4) 随采矿作业而变化。

因此，“采空区”概念应归纳为：采矿活动中随矿石开采后留下的可能诱发矿山灾害的空间。包括两个层次：对于生产中的矿山，“采空区”就是“未被崩落或未充填的采场”；对于废弃的矿山，“采空区”就是“地下所有井巷工程和采场”。

1.1.2 采空区群的定义和特征

采空区不是单独存在的，多数矿山都留有大小不等的采空区。在空间上密集分布、相互影响、共同作用于顶板覆岩，形成相对独立群落的若干个采空区称为“采空区群”。采空区群具有以下特点：

(1) 采空区群是一个动态的系统。该区域内每一个采空区都是该系统中的有机组成部分，相互影响。单个采空区的稳定性并不能决定整个系统的稳定性，系统的稳定与否取决于各个采空区之间的相对稳定状态。每一个采空区在形成时，经历了矿区凿岩、爆破以及地应力、构造应力的作用，表面岩石不断剥落，与周围采空区发生作用，采空区群系统的空间状态、稳定性都处于动态变化之中，调查和掌握采空区群系统的状况十分困难。

(2) 采空区群区域内岩石应力状态复杂。每一个采空区在形成过程中都会打破原有的力学平衡，使周围的岩石产生损伤，应力重新分布。经过多次应力重分布，围岩的应力状态变得极其复杂，并且，围岩中的节理和裂隙在开采过程中不断发育，逐渐成为岩层变形与移动的控制因素。实际生产中，开采往往是连续进行的，新采空区形成时，前一个采空区造成的应力重分布并没有完成，围岩的应力状态往往更加复杂。

(3) 采空区群对围岩的影响范围和程度往往更加广深。在群区域内，由于采空区在空间上距离较近，开采经常在上一采空区形成时造成的损伤岩石环境中进行，此时开采对围岩的扰动势必会变大。实际上，采空区群整体对围岩扰动的程度和范围远远大于单个采空区扰动影响范围的简单相加。

1.1.3 采空区的类别与特点

1.1.3.1 按采矿方法分类

采矿方法是采准、切割在时间上与空间上所进行的顺序以及它与回采工作进

行有机的合理的配合工作。目前普遍认同的采矿方法,是按照“采空区”的处理方法不同分为三大类的,即:空场采矿法、充填采矿法及崩落采矿法。

(1) 空场法回采形成采空区。采用空场法开采的采空区特点是围岩稳固性好,采空区体积大,顶板暴露面积大,采空区贯通性强,易于观测。空场法采空区需要控制顶板暴露面积、体积、暴露时间与空区崩落时间、深度的关系,合理安排空区处理时间和措施,避免突然大规模冒落所造成的危害。采用空场法回采形成的采空区特点是采空区体积小,形态狭长,围岩有一定的稳定性,暴露时间长,空区形态易于观测。

(2) 充填法处理采空区。充填采矿法(简称充填法)是在回采的过程中用充填料处理采空区的一种采矿方法。充填采空区与充填采矿法是有区别的。前者是采后一次充填,充填效率高,而充填采矿法是边采边充,采一层后充填一层。因而在工艺和充填质量上也不同。一次充填采空区的质量较差。

应用充填法采矿的矿山,在矿房开挖过程中形成单体小采空区,并用充填料消除了采空区。如果充填料接顶不好,仍会残留一部分采空区,尤其是采用干式充填的矿山,会残留较大体积的采空区。

(3) 崩落法处理采空区。崩落采矿法以崩落围岩来实现地压管理,是消除采空区的一种方法。崩落法采矿过程中,由于围岩滞后崩落形成采空区,滞后崩落的空区体积变化大小难以观测。由于顶板滞后冒落,采空区顶板面积达到一定规模后,会发生大规模突然冒落,并产生气浪冲击。必须通过合理设置垫层厚度,承受突然大冒落的气浪冲击。

综上,空场法是形成采空区的主要方法,充填采矿法和崩落采矿法均应视为消除了采空区的采矿方法。

1.1.3.2 按含水状态分类

(1) 充水采空区。废弃的采空区失去排水条件被后期的地下水或地表水充满,就形成了充水采空区。如果后期的地下采掘工程触及到这种充水采空区的边界,采空区内积水将以突然溃入的方式涌入井下,造成一些突发性的水害事故。此外,充水采空区在长期地下水的浸泡下,围压强度变差,垮塌的风险增大。

(2) 不充水采空区。在地下水位线以上,具备排水能力的采空区,不会发生积水或仅有少量积水,为不充水采空区。

1.1.3.3 按采空区形成时间分类

这种对采空区时间性的划分方法,主要是地质勘察和城市规划部门,关注于采空区造成的地表沉降对建筑物的影响而提出的。在矿山生产中,也采用各开采水平的地表移动界限和终了移动界限来圈定不同阶段采空区对地表的影响范围。实际上,在矿山采空区管理中,对于采空区形成时的关注,更主要在于采空区与现有生产系统的关联程度和采空区资料的掌握程度。

(1) 老采空区。老采空区是指已经完成回采计划后未进行处理的采空区,煤矿也称“老窿”或“老窗”。历史采矿遗迹,废弃的民采、盗采矿井,已经无据可查、无料可考的采空区,已经闭坑的矿井也属于老采空区。老采空区的最主要特点是与现有生产系统的关联度极小。资料少、形态不清、状况不明、边界难寻,是大多数矿山治理老采空区灾害面临的问题,治理难度最大。当工程地质调查不能查明老采空区的特征时,应进行物探和钻探。老采空区中积水后会成为附近区域开拓工程的危险源,威胁井下生产,被称为“老窿水”或“老窑水”。

(2) 现采空区。现采空区是指地下正在开采或正在嗣后处理的采空区。矿山生产进行地压管理的重点是现采空区,一方面是要选择合理的矿房矿柱尺寸,严格控制采空区的暴露面积和暴露时间。另一方面是要及时处理采空区,以此保证回采工作的顺利进行。

(3) 未来采空区。未来采空区是指目前尚未开采,而后续采矿生产中逐渐形成的采空区。对于未来采空区,最关注的问题是开采影响的问题。一方面,是岩层移动对现有采矿工程的影响,合理规划回收保安矿柱。另一方面,是地表建筑物安全界限的问题,应通过计算预测地表移动和变形的特征值,提前对受影响的建构筑物采取措施。

1.1.3.4 按采空区形态分类

(1) 房状采空区。空场法回采缓倾斜矿体形成的采空区,其结构特点是采空区的上下为顶、底板,空区四周由连续的条带矿柱围成,使空区呈房状。空场法回采急倾斜矿体后形成的采空区,其结构特点是采空区的上下为顶底柱,四壁为间柱和上、下盘。房状采空区在开采初期,形态较规整,有矿柱相隔,顶底板稳定性好,在进一步回采后,矿柱连续性遭到破坏,房柱式大片空区连通,往往造成大面积地压灾害。

(2) 矿体原形状空区。小规模矿体回采后形成的空区多为原状空区,当矿柱回采完毕后,空区的形状与矿体形状大致相同。

1.1.3.5 按地表联通形式分类

(1) 明采空区。由于顶板岩层塌陷或人为在采空区顶板开“天窗”,使地表与采空区贯通的,为明采空区。

(2) 盲采空区。不与地表贯通的采空区为盲空区。大面积盲空区突然冒落时,会形成空气冲击波,破坏力极强。

1.2 采空区围岩稳定性理论分析

1.2.1 矿柱稳定性理论

国内许多学者引入尖点突变理论对矿柱稳定性进行分析,建立了矿柱失稳突变模型,并进行了矿柱失稳机理的深入研究,王连国等基于定态曲面方程和分支

曲线方程,采用突变理论建立了矿柱失稳尖点突变模型,分别求得矿柱应力强度比 F_q 和临界破坏宽度 rp_1 。研究表明:当 $F_q > 1$ 或 rp_z (矿柱破坏宽度) $> rp_1$ 时,矿柱会发生失稳;当 $F_q < 1$ 或 $rp_z < rp_1$ 时,矿柱不会发生失稳。朱湘平等从能量原理及断裂力学的角度出发,研究了脆性岩体中轴向劈裂引起的矿柱稳定性问题。刘沐宇等应用断裂力学理论讨论硬岩矿柱初始裂纹在上覆岩层作用下贯通形成层状结构的机理,指出裂纹间相互作用引起裂纹的失稳扩展,从而相互连接形成层状结构。张晓君认为矿柱的稳定性取决于两个基本方面:一是上、下盘围岩施加在矿柱上的总载荷,即矿柱所承担的地压,以及在该载荷作用下矿柱内部的应力分布状况;二是矿柱具有的极限承载能力。其给出的矿柱上总荷载公式:

$$\sigma_{av} = (a_m + a_p)\sigma_v/a_p \quad (1-1)$$

式中 σ_{av} ——矿柱平均应力, MPa;

a_m ——矿房开采面积, m^2 ;

a_p ——矿柱横断面积, m^2 ;

σ_v ——垂直应力, MPa。

垂直应力 $\sigma_v = k_1\gamma H$, k_1 为不确定性因子,是垂直应力与上覆岩层重力之间的关系系数; γH 为上覆岩层重力。矿柱具有的极限承载可以采用实验统计值或摩尔—库仑公式计算。节理和裂隙是影响岩体强度的主要因素,对于矿柱来说,矿柱的被软化程度和爆破破坏程度也是重要因素,因此采用如下改进公式:

$$S = 2K_2C\cos\varphi/(1 - \sin\varphi) \quad (1-2)$$

式中 S ——矿柱抗压强度, MPa;

K_2 ——不确定性因子,是影响矿柱强度的因素系数;

C ——矿柱内聚力, MPa;

φ ——矿柱内摩擦角。

根据上述公式,可推导出空区顶板冒落的极限状态方程:

$$Z = \frac{2K_2C\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} - \frac{(a_m + a_p)\gamma H}{a_p} = 0 \quad (1-3)$$

1.2.2 顶板稳定性理论

采空区顶板作为采空区相对薄弱的部分,在空区跨度、高度、承载状况发生变化时,都可能发生坍塌,导致上下相邻空区相互贯通,改变原有空区结构,诱发地应力改变,形成局部应力集中和岩体破坏,进而导致更大范围的空区贯通和失稳。因此,分析不同尺寸采空区的顶板安全厚度对评价已有采空区(群)的稳定性有着重要的意义。对于采空区顶板安全厚度的确定,众多矿山采用经验类比法,当然也有不少研究者通过基于数学与力学理论建立了相应的方法,对科学

确定空区顶板厚度和评价空区顶板稳定提供了依据。主要方法有应用结构力学方法, 鲁佩涅依特理论算法, 荷载传递交汇线法, 厚跨比法, 普氏拱法, 长宽比梁板法。

(1) 应用结构力学方法。应用结构力学对空区顶板稳定性分析研究中, 假定空区顶板是结构力学中两端固定的梁, 计算时将其简化为平面弹性力学问题, 将顶柱受力认为是两端固定的厚梁, 依此力学模型, 可得到顶板厚梁内的弯矩与应力大小。计算得出:

$$\sigma_{\text{许}} \leq \frac{\sigma_{\text{极}}}{nK_c} \quad (1-4)$$

式中 $\sigma_{\text{许}}$ ——顶板允许的拉应力, MPa;

$\sigma_{\text{极}}$ ——顶板的极限抗拉强度, MPa;

n ——安全系数;

K_c ——结构削弱系数。

采用该法, 可以对空区顶板的安全厚度进行计算。

(2) 鲁佩涅依特理论算法。前苏联科学技术博士鲁佩涅依特和利别尔马恩在普氏破裂拱理论基础上, 根据力的独立作用原理, 考虑露天开采采空区上部岩体自重和露天设备重量作用应力对岩石的影响, 并且在理论分析计算中假定: 1) 空区长度大大超过其宽度; 2) 空区的数量无限多, 不计边界跨度影响。在此前提下, 将复杂的三维厚板计算问题简化为理想的弹性平面问题, 然后建立力学模型, 对此进行分析与研究, 确定顶板的安全厚度。

(3) 荷载传递交汇线法。此法假定载荷由顶板中心按竖直线成 $30^\circ \sim 35^\circ$ 扩散角向下传递, 当传递线位于顶与洞壁的交点以外时, 即认为溶洞壁直接支承顶板上的外载荷与岩石自重, 顶板是安全的。使用该法, 得到不同采空区跨度与其顶板的安全隔离层厚度的关系。

(4) 厚跨比法。该法内容为: 顶板的厚度 H 与其跨越采空区的宽度 W 之比 $H/W \geq 0.5$ 时, 则认为顶板是安全的。

(5) 普氏拱法。根据普氏地压理论, 认为在巷道或采空区形成后, 其顶板将形成抛物线形的拱带, 空区上部岩体重量由拱承担。对于坚硬岩层, 顶部承受垂直压力, 侧帮不受压, 形成自然拱; 对于较松软岩层, 顶部及侧帮有受压现象, 形成压力拱; 对于松散性地层, 采空区侧壁崩落后的滑动面与水平交角等于松散岩石的内摩擦角, 形成破裂拱。根据普氏压力拱理论计算得到不同采空区顶板安全隔离层厚度。

1.2.3 采空区稳定性评价理论

采空区稳定性分析是一项复杂的系统工程, 由于影响采空区稳定性的因素很

多而又十分复杂,且各因素影响的程度也不尽相同,其相互间必存在一定联系。一般来说,地质因素包括覆岩赋存性质、地质构造、松散土厚度及性质、地应力状态、地下水作用、岩层组合等方面;采矿因素包括采厚与采深、采空区面积、开采方法、顶板管理、重复采动、时间过程等方面。作为采空区危险性评判级别的各因素标志及界限又是模糊不清的,难以采用经典数学模型加以分析,而采用模糊数学将会得到很好的解决。

焦家金矿采场空区的稳定基本上受采场顶板结构面的发育程度的控制,所以在进行采场空区顶板稳定性综合评判时,选择了下面四个指标作为判据:

- (1) 岩体点荷载强度 I_s 。
- (2) 控制性结构面组数 N 。
- (3) 控制性结构面质量指数 I_j :

$$I_j = \sum a_j \cdot N_j \quad (1-5)$$

式中 a ——各级结构面的权重,对于 I、II、III 级结构面, a 值分别为 1、0.5 和 0.25;

N ——各级结构面的总数目;

j ——结构面的级次。

- (4) 结构面的内摩擦角 φ_c 。

$$\varphi_c = \sum \varphi_j / N \quad (1-6)$$

式中 φ_j ——单条结构面的内摩擦角。

对焦家金矿的 18 个采场空区逐个收集、试验和统计数据,然后利用模糊数学评判方法划分其稳定程度。稳定的空区占 27.8%,中等稳定的空区占 22.2%,不稳定的空区占 22.2%,极不稳定的空区占 27.8%。此外还有其他一些评价采场空区稳定性的方法。

在控制论中,常用“黑箱”、“白箱”的概念来描述一个系统的已知信息量的多少。介于“黑箱”与“白箱”之间还存在一种“灰箱”,因此产生了相应的灰色系统理论。同时,地下采场稳定性的研究中,灰色系统理论也得到了应用。

在数学上,灰色系统用灰数、灰方程和灰矩阵来描述,对于一个力学系统内存在的灰数可以采取下述方法进行白化:

(1) 利用对称及转换的概念以增加可识别的变量及分析的自由度,主要技术方法是:

- 1) 赋予。信息的组合是赋予的方式之一,可以增加系统的可识别的变量。
- 2) 生成。用适当的方式将原始数据处理,以得到规律性强、随机性弱的数组,称之为灰色方程的生成。
- 3) 反推。在泛系统理论中,一个系统的子系统对该系统有某种确定性及其相

对局限性,从模拟该系统的模型泛适应性去推导原系统的泛适应性,是一种基于广义对称转化的反推。反推特别适用于力学系统状态的预测。

(2) 利用逼近和近似的概念以识别灰数。主要技术是:

- 1) 分段识别。
- 2) 逐次逼近。
- 3) 区间识别。

(3) 基于某种识别条件,利用优化的概念以识别灰数。采空区的治理必须了解各个采空区具体情况的差异性,判断其可能产生灾害的危险性程度,只有综合考虑各种信息,才能得到比较合理的采空区治理方案,并尽量使某些危险性程度大的采空区得到优先治理。目前,灰色关联度法、模糊综合评价方法、模糊测度理论已被应用到采空区稳定性评价中,灰色系统理论主要用于解决“小样本、贫信息且不确定”问题,其基本特点是“少数据建模”,并建立了相应的采空区稳定性分析数学模型,计算采空区灾害危险度以及采空区稳定性系数与稳定性级别间的对应关系。赵奎在应用模糊数学理论对矿柱稳定性分析方面取得了较大进步,建立了矿柱稳定性模糊推理系统。

1.2.4 研究进展

姜福兴用厚板力学的方法,研究了坚硬顶板采场薄板力学解的可行区域,作出了实用的工程判断图,并导出了四种边界条件板的厚化系数表达式,对必须用厚板来解的顶板,用相同边界条件的薄板解乘以厚化系数,得厚板的解。胡建华运用时变力学理论,针对大厂铜坑矿顶板诱导崩落试验采场的地质特征,建立有限元基本方程和时变力学模型,采用多步骤开挖的准时变力学有限元方法,模拟不同顶板诱导失稳崩落模式下的塑性区发展、东西预裂硐室与崩顶硐室的安全系数。弓培林采用现场实测及相似模拟技术研究大采高综采采场顶板结构特征,建立大采高综采采场的顶板控制力学模型。贺广零基于温克尔假设,将坚硬顶板视为弹性板(突破将坚硬顶板视为弹性梁的传统思想),将煤柱等效为连续均匀分布的支撑弹簧,从而形成煤柱-顶板相互作用系统。同时,将煤柱视为应变软化介质,采用近似的 Weibull 分布描述它的损伤本构模型,依据板壳理论和非线性动力学理论对采空区煤柱-顶板系统失稳机理进行了研究,得出了系统失稳的突变机制。王金安以采空区留矿柱采矿为背景,建立采空区矿柱-顶板体系流变力学模型,得出矿柱支撑下采空区顶板受流变作用位移控制方程,依此对采空区顶板破坏的不同阶段进行分析讨论,并考虑岩体的流变特性,运用弹性-黏弹性对应准则及 Laplace 数值逆变换对矿柱支撑的采空区顶板岩层变形进行了分析,建立了采空区顶板挠度随时间的关系。赵延林基于突变理论的采空区重叠顶板稳定性强度折减法,研究了重叠顶板的安全储备。浦海认为采场顶板的破断形态与采