

硬岩矿山采空区损伤 失稳机制与稳定性控制技术

Damage Instability Mechanism and Stability
Control Technology of Gob in Hard Rock Mine

付建新 宋卫东 杜翠凤 谭玉叶 著



冶金工业出版社

www.cnmp.com.cn

硬岩矿山采空区损伤 失稳机制与稳定性控制技术

付建新 宋卫东 杜翠凤 谭玉叶 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 提 要

本书针对硬岩矿山采空区的稳定机制与控制技术做了系统的阐述,对最新的研究成果进行了归纳总结,并辅以工程案例。全书共包含 10 章内容,从采空区概念及结构特征入手,充分考虑了地下开采实际的应力条件,充分考虑地下开采过程中的实际力学条件,引入系统论及能量观点,同时融合了岩石力学、分形几何学、弹塑性力学、蠕变理论、结构力学、灾变链式理论、非线性科学等众多学科理论的先进思想,对浅部及深部硬岩金属矿山采空区的稳定性特征进行了较全面的研究,并提出了基于能量链式效应的采空区控制理论。采用室内力学实验、理论研究、数值模拟、现场监测、实证研究等多种方法,对硬岩矿山采空区的损伤失稳机制、稳定性控制技术及工程应用开展了深入研究,为金属矿山采空区的稳定性控制及灾害治理提供了科学指导。

本书可供金属与非金属矿开采理论及其工程应用领域的科研人员及高等院校相关专业的师生阅读,也可供采矿工程技术人员及矿山生产管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

硬岩矿山采空区损伤失稳机制与稳定性控制技术/
付建新等著. —北京:冶金工业出版社, 2016. 8

ISBN 978-7-5024-7290-0

I. ①硬… II. ①付… III. ①硬岩矿山—采空区—
屈曲—研究 ②硬岩矿山—采空区—稳定性—研究 IV.
①TD2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 200810 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 张耀辉 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 吕欣童

责任校对 石 静 责任印制

ISBN 978-7-5024-7290-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2016 年 8 月第 1 版, 2016 年 8 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 18 印张; 348 千字; 274 页

56.00 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 yjgchs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

地下开采是金属矿开采的主要方式，长期大规模开采及处理的滞后，形成了大量的采空区，成为了矿山的重大危险源之一。由于采空区自身结构及赋存环境的复杂性，造成采空区稳定性难以判断，无法及时采取有效措施。尤其是进入深部开采后，高地应力使采空区赋存环境进一步恶化。因此，采空区稳定与否，是保证安全开采的关键因素。

本书作者通过多年的科研工作，在硬岩金属矿山采空区围岩实验研究、稳定性分析及灾害控制方面积累了丰富的理论及实践经验，熟知目前采空区稳定性机制及控制最新的技术及理论研究的新进展。为了使读者尤其是现场一线技术人员更好地理解采空区的探测技术及分析手段，本书精选了通俗易懂的材料，并选取了大量的工程应用实例，内容具体而充实。

全书共分10章，第1章对金属矿山采空区稳定性研究的现状进行了简单介绍；第2章对采空区的概念、分类及主要特性进行了阐述；第3章采用室内力学实验对复杂应力条件下的损伤演化规律进行了研究；第4章基于分形几何理论对采空区形态的分形特征进行了研究；第5章对采空区稳定性影响因素的敏感性特征进行了分析；第6章则对不同空间形态的采空区的围岩扰动规律进行了分析，并建立了相应的力学模型；第7章对渗流及应力场耦合作用下的采空区稳定性进行了分析；第8章对深部采空区的卸荷失稳机制进行了分析研究；第9章基于能量链式效应，提出了采空区稳定性控制理论；第10章介绍了三个工程实例。

在本书出版之际，衷心感谢北京科技大学吴爱祥教授、胡乃联教授、高永涛教授、李长洪教授、谢玉玲教授在科研上给予的指导和帮助，以及杜建华博士、吴珊博士、孙新博硕士、母昌平硕士和汪海萍硕士的辛勤付出。

在编著过程中，武钢程潮铁矿和大冶铁矿、青海山金矿业有限责任公司、河北钢铁石人沟铁矿、山东招金矿业等有关单位提供了翔实的资料和数据，在此谨对上述单位表示谢意！

本书的出版得到了国家自然科学基金（No. 51374033）、中央高校基本科研业务费专项资金（FRF-TP-15-042A1）、教育部博士点基金（No. 20120006110022）的资助。

限于时间和水平，书中难免有不妥之处，恳请专家、学者不吝批评和赐教。

作 者

2016年4月

目 录

1 概述	1
1.1 采空区稳定性研究的重要意义	1
1.2 金属矿山采空区研究现状	2
1.2.1 采空区稳定性分析与研究	5
1.2.2 深部硬岩矿山采空区稳定性研究现状	7
1.2.3 采空区失稳机制及模式研究现状	8
1.2.4 深部硬岩卸荷力学特性及本构模型研究现状	10
1.2.5 采空区稳定性控制及处理技术	12
1.3 采空区失稳机制与稳定性控制研究面临的主要问题	14
1.3.1 采空区形态复杂程度定量表征及其与稳定性的相关性	14
1.3.2 单一采空区稳定性敏感特征与多采空区耦合结构效应	15
1.3.3 高应力复杂路径下岩石力学性质	15
1.3.4 深部矿山嗣后充填法采空区失稳机制及稳定性特征	16
1.3.5 采空区失稳灾变模式与控制技术	16
2 金属矿山采空区形成及特征	18
2.1 采空区概念及基本特征	18
2.2 采空区分类及特性	18
2.2.1 根据不同的开采方法分类	19
2.2.2 根据采空区存在时间分类	21
2.2.3 根据采空区空间形态分类	22
2.2.4 根据采空区规模大小分类	22
3 高应力复杂条件下岩石损伤演化规律及数学模型	24
3.1 引言	24
3.2 试验设备及试验应力路径	25
3.2.1 实验设备	25

3.2.2 试验方案	25
3.3 岩石常规三轴加载试验力学响应	27
3.3.1 应力应变规律分析	27
3.3.2 围岩强度分析	29
3.3.3 岩石变形规律分析	30
3.3.4 岩石破裂特征分析	30
3.4 轴向压力恒定的匀速卸载围压试验	32
3.5 轴向压力增加的匀速卸载围压试验	34
3.6 不同应力路径下的岩石力学响应特征对比	36
3.6.1 不同应力路径下的岩石强度特性	36
3.6.2 不同应力路径下的岩石破裂特征	37
3.6.3 声发射计数率变化规律	40
3.6.4 声发射能量特征变化规律	42
3.7 复杂应力路径下岩石损伤演化规律	44
3.7.1 高应力复杂条件下岩石损伤能量耗散分析	44
3.7.2 常规三轴加载	44
3.7.3 轴压恒定的卸围压应力路径	45
3.8 基于最小耗能原理的损伤演化分析	46
3.9 本章小结	48
4 采空区空间形态分形特性及边界模拟预测	50
4.1 引言	50
4.2 计盒维数与矿体分形特性	50
4.2.1 计盒维数	50
4.2.2 矿体分形特性	52
4.3 采空区三维精细模型及空间信息的获取	53
4.3.1 金属矿山采空区基本特征	53
4.3.2 采空区三维精细模型及信息获取	53
4.4 采空区分形特征研究	55
4.4.1 采空区边界线一维分形特性	55
4.4.2 采空区平面区域二维分形特性	60
4.4.3 采空区顶板三维分形特性	64
4.4.4 采空区分维值的物理意义	69
4.5 基于分形插值理论的采空区边界模拟与预测	70

4.5.1 分形插值基本理论	70
4.5.2 工程实际应用	71
4.6 本章小结	74
5 金属矿山采空区稳定性敏感特征分析	76
5.1 引言	76
5.2 金属矿山采空区稳定性影响因素分析	76
5.2.1 采空区结构因素	76
5.2.2 采空区赋存环境	77
5.3 单一采空区稳定性敏感分析	78
5.3.1 单一采空区稳定特征的结构效应	78
5.3.2 采空区分维值与采空区稳定性关系	87
5.3.3 赋存环境对单一采空区稳定性的影响规律	89
5.4 多采空区耦合结构作用效应	95
5.4.1 相似材料试验研究	95
5.4.2 多采空区耦合效应的数值模拟分析	100
5.5 结构面对采空区稳定性的影响	104
5.5.1 单组结构面对采空区稳定性的影响	104
5.5.2 可产生滑塌锥的结构面对采空区的影响	112
5.6 本章小结	121
6 不同空间形态采空区围岩扰动规律与顶板力学模型	123
6.1 引言	123
6.2 立方型采空区形成过程围岩扰动规律	123
6.2.1 工程背景	123
6.2.2 围岩扰动规律现场监测布置	124
6.2.3 围岩扰动规律及稳定特征分析	125
6.3 狭长型采空区形成过程围岩扰动规律	126
6.3.1 工程背景	126
6.3.2 围岩扰动规律现场监测及分析	127
6.3.3 基于精细探测的采空区围岩稳定状态分析	128
6.4 不同类型采空区顶板力学模型构建	132
6.4.1 基于弹性厚板理论的立方型采空区顶板稳定研究	132
6.4.2 基于弹塑性理论的狭长型采空区顶板稳定研究	138

6.5 本章小结	144
7 渗流-应力场耦合下采空区稳定性研究	145
7.1 经典节理渗流模型简介	145
7.1.1 单一裂隙渗流模型	145
7.1.2 粗糙节理水力学模型	146
7.1.3 单裂隙渗流与应力耦合	147
7.1.4 裂隙网络渗流模型	148
7.2 数值模拟与结果分析	150
7.2.1 节理剪切本构模型的选择	150
7.2.2 模型的建立与参数选择	150
7.2.3 数值模拟分析	152
7.3 本章小结	163
8 深部嗣后充填法采场采空区围岩卸荷失稳机制	164
8.1 引言	164
8.2 开采卸荷数值模拟仿真原理	164
8.2.1 采空区形成过程围岩应力状态	164
8.2.2 采空区岩体卸荷荷载算法及步骤	165
8.3 采空区形成过程中围岩能量释放规律	167
8.4 基于尖点突变理论的采空区失稳局部能量突变判别准则	169
8.4.1 采空区系统失稳的能量失稳准则基础	169
8.4.2 岩石单元局部能量突变准则	169
8.5 工程背景概述	171
8.5.1 工程地质条件	171
8.5.2 围岩物理力学特征	172
8.5.3 深部地应力实测及分析	172
8.5.4 模拟开采方案	173
8.6 嗣后充填法采场采空区卸荷数值模型构建及实现	174
8.6.1 数值分析模型构建	174
8.6.2 边界条件	174
8.6.3 物理力学参数	175
8.6.4 开采卸荷扰动区确定原则	175
8.6.5 卸荷数值计算过程的实现	176

8.6.6 能量释放指标的数值解算及可视化实现	176
8.6.7 深部采空区围岩稳定状态分析指标	176
8.7 分段空场嗣后充填法围岩卸荷失稳机制	177
8.7.1 采空区围岩应力场演化规律分析	177
8.7.2 采空区围岩位移场演化规律分析	183
8.7.3 采空区围岩塑性区扩展规律分析	185
8.7.4 采空区围岩能量演化规律分析	188
8.7.5 基于局部弹性释放能突变的稳定性判别	191
8.8 本章小结	192
9 基于能量链式效应机理的采空区稳定性控制技术	194
9.1 引言	194
9.2 采空区失稳灾变链式特性	194
9.2.1 采空区系统基本特点	194
9.2.2 采空区失稳灾变链式特征	195
9.2.3 采空区失稳灾变链演化过程与规律	196
9.3 采空区失稳灾变能量链式效应机理	199
9.3.1 采空区周围岩体能量分析	199
9.3.2 围岩能量链式效应耗散结构理论分析	200
9.3.3 采空区能量链式演化规律	202
9.4 能量链式演化数学模型	203
9.4.1 能量链式关系结构分析	204
9.4.2 能量链式效应演化的数学模型	205
9.4.3 采空区失稳灾变能量链式启动判据	205
9.5 基于能量链式效应的采空区稳定性控制	206
9.5.1 采空区失稳灾变能量链断链控制机制	206
9.5.2 采空区失稳灾变能量链断链措施	208
9.6 深部采空区稳定性控制工程实例	210
9.6.1 大尹格庄金矿概述	210
9.6.2 矿区工程地质与开采技术条件	210
9.6.3 开采现状概述与调查	211
9.6.4 采空区稳定性控制技术	213
9.7 本章小结	217

10 金属矿山采空区稳定性分析工程实例	218
10.1 空场法房柱式采空区稳定性分析	218
10.1.1 工程背景	218
10.1.2 石人沟铁矿采空区 CMS 三维激光扫描及分析	220
10.1.3 基于 CMS 实测的采空区稳定性数值模拟分析	229
10.1.4 采空区稳定性分析模糊综合评判	235
10.2 充填法狭长型采空区稳定性分析	239
10.2.1 工程背景	239
10.2.2 果洛龙洼金矿采空区 CMS 三维激光探测及分析	241
10.2.3 基于 CMS 实测的采空区稳定性数值模拟分析	244
10.2.4 基于现场调查及 Mathews 稳定性图法采空区最大跨度计算	248
10.3 崩落法隐覆型采空区稳定性分析	251
10.3.1 工程背景	251
10.3.2 岩石力学参数和地应力场	253
10.3.3 边界条件和初始平衡	255
10.3.4 模拟分析方案	256
10.3.5 计算结果分析	258
参考文献	267

1 概 述

1.1 采空区稳定性研究的重要意义

地下开采是矿产资源开采的主要方式。在矿山开采过程中,通过机械切割或爆破技术,将矿石从矿体上分离下来,矿体中形成的空洞就是采空区。作为矿山的重大危险源之一,采空区严重影响着矿山的安全生产,也威胁着周围居民的生命财产安全和生态环境。近年来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,采空区数量急剧增加,事故也随之增加。因此,采空区稳定与否,是保证矿山企业正常生产的关键因素。由于对采空区的处理不及时,目前仍然存在大量采空区。随着这些采空区暴露时间的增加,稳定性也越来越差,不断诱发岩石崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等地质灾害。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,造成307人死亡,震惊国内外;2005~2006年间,昭通铅锌矿采空区引起地表两次塌陷,面积达到 600m^2 ,造成重大的经济损失;2005年11月,河北邢台石膏矿采空区坍塌,造成32人死亡,33人受伤,地面塌陷严重,严重影响了当地环境;2008年贵州晴隆煤矿发生采空区顶板垮塌事故,造成多人死亡。随着采空区灾害愈发严重,采空区稳定性分析及治理已经引起国家安全管理部门的高度重视。

由于长期以来我国金属矿山以空场法作为主要的开采方法,在地下形成了大量的采空区,超过10亿立方米,已引起了大量的地质灾害,对地下矿山安全生产造成了重大的安全隐患,成为了金属矿山重大危险源之一。国家安监总局于2014年6月17日颁布67号令,规定金属非金属地下矿山“必须加强顶板管理和采空区监测、治理”。2015年12月25日,山东平邑一石膏矿发生大规模采空区顶板坍塌事故,事故造成十余人遇难,坍塌造成的矿震相当于4级地震,造成了重大的经济损失,事故示意图及地表塌陷如图1-1和图1-2所示。

采空区灾害的日益严重,已引起国家相关部门的高度重视,国家安监总局于2015年7月启动了全国采空区普查,对全国范围内特别是重点矿区内的有主采空区和无主采空区进行了全面的调查,以掌握目前国内采空区的分布及数量。该项工作的开展,为采空区灾害的防治提供了丰富的数据,为后续工作的开展奠定了基础。



图 1-2 采空区坍塌造成地表陷落

1.2 金属矿山采空区研究现状

表 1-1 2000~2015 年国家自然科学基金中关于采空区的课题列表

批准号	项 目 名 称	金额/万元	项目起止年份
50004008	废弃采空区破裂岩体变形机理与沉陷控制	15	2001~2003
50074002	基于非线性动力学的采空区稳定性监测、分析与预报系统研究	17	2001~2003
10402033	西部煤矿大采空区煤岩失稳及衍生灾害“S-AE-D”量化预报基础研究	24	2005~2007
50674091	移动坐标系采空区自然发火无因此模型及判别准则研究	29	2007~2009
10772144	西北强震区煤矿采空区动力灾害预报预报基础研究	37	2008~2010
40772191	废弃采空区上方建筑地基稳定性评价理论及应用研究	39	2008~2010
50774041	基于模糊渗流理论的采场瓦斯涌出和自然发火位置研究	28	2008~2010
51004102	煤矿未知采空区边界探测理论与试验研究	20	2011~2013
51074140	浅埋采空区层状结构顶板损伤失稳机理及安全风险分析	35	2011~2013

续表 1-1

批准号	项 目 名 称	金额/万元	项目起止年份
51074086	高瓦斯易燃采空区遗煤自燃与瓦斯灾害耦合研究	36	2011~2013
51074159	功能化离子液体抑制采空区煤自燃的基础研究	38	2011~2013
51104116	抽放条件下采空区流场的叠加方法研究	25	2012~2014
41130419	煤矿灾害事件与地震槽波波场特征示范研究—煤层厚度变异与断裂构造和采空区探测	310	2012~2014
51104154	防灭火泡沫在采空区松散煤层多孔介质中的流动特性	25	2012~2014
51174079	复杂条件下采空区瓦斯运移及分布规律研究	56	2012~2014
41202196	多因素地缝成因机理研究	24	2013~2015
51204135	采空区可燃气体爆炸冲击灾害动力学研究	25	2013~2015
41272389	废弃柱式采空区塌陷风险性评价理论和应用研究	84	2013~2016
51310105026	采空区层状顶板变形破坏特征实验研究	2	2013
U1361118	采区通风动态特性与采空区微流动耦合机理研究	60	2014~2016
51304202	浅埋式残留煤柱致灾机制及防控	25	2014~2016
51374033	多场耦合作用下深部硬岩矿山采空区损伤演化机理及稳定性研究	80	2014~2017
41372368	薄松散层覆盖煤矿采空区高光谱遥感特征研究	25	2014
51374124	采空区垮落岩体矿井水储存机理及水质演化规律研究	83	2014~2017
41304113	多层采空区地面-巷道瞬变电磁探测理论与方法研究	26	2014~2016
51404086	采空区瓦斯抽放与自燃“三场”耦合作用机理研究	25	2015~2017
51404295	触变性水泥浆在煤矿采空区空洞及塌落裂隙带中的流动特性	25	2015~2017
51404167	采空区下特厚煤层大采高综放采场压架机理研究	25	2015~2017
51404131	煤层冲击地压与采空区自然发火共生灾害开采速度效应研究	25	2015~2017
51404257	地面钻井抽采条件下封闭采空区瓦斯渗流特性研究	25	2015~2017
51474106	近距离煤层上覆采空区煤自燃动态演化机制及探测技术基础研究	83	2015~2016
51404247	煤矿固体充填体密实度控制机理与方法研究	25	2015~2017
51404128	非均质各向异性三维动态采空区渗透系数反演研究	25	2015~2017
51404090	顶板巷卸压瓦斯抽采诱导遗煤自燃机理及扰动效应研究	25	2015~2017
51404089	基于气热耦合的综放采场隐蔽火源定位原理与方法研究	25	2015~2017

另外,“十一五”期间,国家科技支撑计划先后立项了“冲击性灾害风险评价与监测、预警技术研究”、“老空区风险分级技术”等专题,开展采空区动力灾害基础研究;“十二五”期间立项了“采空区探测技术与装备研发”等课题。

目前对采空区的研究仍然主要集中在煤矿领域,主要关注以下五个问题:

- (1) 未知采空区探测技术;
- (2) 采空区失稳和地表沉陷预测方法;
- (3) 采空区充填治理技术;
- (4) 采空区安全监测和预警技术;
- (5) 采空区“自燃”火区灭火技术。

其中,采空区失稳的动力灾害仍旧是采空区研究的核心问题。采空区灾害的研究中,与工程力学直接相关的核心是地压问题。从19世纪20年代的“矿山压力拱”假说开始,弹性力学方法被广泛应用于地压规律研究。在采场围岩结构、采场地压规律方面,我国学者于学馥教授在20世纪60年代提出了“轴变论”,80年代钱鸣高院士提出了“砌体梁理论”,美籍华人石根华教授提出了“块体理论”;另外,“关键层理论”及“打气筒”或“绕流”两种模型也在煤矿中取得了广泛的应用。同时,井下冒落导致地表沉陷,通常采用“三带”规律和概率积分法计算地表塌陷范围。随着计算机技术的发展,从90年代开始,有限元、有限差分、离散元、边界元、颗粒元、无网格伽辽金法等数值模拟计算技术在矿压灾害分析中获得了普遍应用,使得大型复杂采空区的耦合、非线性问题得以评估。

然而,目前关于采空区的研究,主要集中在煤矿中,而金属矿山采空区的研究尚处在起步阶段。相对于煤矿而言,金属矿山具有明显的区别,矿区内的围岩基本以硬岩为主,其力学性质与煤矿内的软岩有本质的区别,采空区表现出的稳定性特征也有明显差别,需要进行针对性的研究。

近几年随着开采强度的不断增大,开采深度不断增加,金属矿山陆续进入了深部开采阶段,如红透山铜矿、冬瓜山铜矿、夹皮沟金矿及程潮铁矿等。此时,采空区成为采场地压控制的主要因素,其稳定性直接关系到深部矿山的安全生产。对采空区稳定性进行研究,并及时进行控制及处理,具有重要的工程意义。

金属矿山围岩以硬岩为主,浅部开采时,主要表现为弹脆性破坏。进入深部阶段后,开采造成了剧烈的应力释放,产生明显的卸荷效应。同时,采空区在形成过程中,不断受到频繁的动力扰动。应力环境的改变使得深部采空区面临着新的岩体力学问题,如岩体性质改变,应力及能量的聚集与突然释放,卸荷下的复杂破坏等,给开采人员与设备安全带来严重威胁。

在深部高地应力的作用下,开采前岩体在高地应力作用下,集聚了大量的初始应力和能量,矿体的开采势必引起应力的剧烈释放,从而引起岩体的破裂,造成采空区的失稳,因此,深部岩体的破坏实际上是一种卸荷破坏,由此造成的深部采空区失稳机理,与浅部相比有显著的差异。正确地认识深部硬岩在动力扰动及卸荷效应下的强度特征及失稳模式,是进行深部采空区安全控制和处理的前提。目前,深部采空区围岩稳定性研究是一个崭新的研究领域,具有一定研究

难度。

1.2.1 采空区稳定性分析与研究

金属矿山采空区稳定性分析研究是一个极其复杂的问题,尤其是在深部开采条件下。常用稳定性分析方法主要包括理论分析法、预测评价法、物理模型试验法和数值模拟法。

1.2.1.1 影响采空区稳定性的因素

采空区的存在是矿山地压活动产生的根源,为此采空区稳定成为安全工作的重点。采空区失稳是由多方面因素造成的,主要有以下几个方面:

(1) 采空区形态。采空区的稳定性与采空区长、宽、高及采空区面积有关。若采空区长、宽、高及采空区面积较大,稳定性控制难度较大。随着开采的深入并形成大规模采空区,为岩移、地压活动提供了条件。

(2) 地质构造。地质构造是影响地压活动关键因素,其中构造和岩性是最重要的。大型连续结构弱面(如断层、破碎带等),一方面起控制发生大范围破坏的作用,即成为岩体移动边界的切割面或滑动面;另一方面对其发生发展起促进作用。规模较大的岩层移动,均受地质弱面控制。

如果地质构造弱面存在于采空区中央部位,该处就很可能成为产生灾害性地压活动的导火索。

(3) 地下水。水导致结构面软化,降低摩擦系数,尤其是与结构面配合,更易促成不稳定条件的形成,使岩石膨胀,增加围岩压力。

(4) 工程因素。工程因素主要指方法,如开采顺序、开采强度、开采工艺(如钻爆法或掘进机法)、支护方法等。这些都对采空区稳定有较大的影响。在一定条件下可以简化或忽略它,在另一些场合,则必须专门研究它们的影响。

采空区围岩在原岩应力、围动应力及结构构造作用下,首先在稳定性最差的结构弱面出现变形,并使应力重新分布而改变其应力的方向甚至应力场性质;然后,重新分布的围岩应力又加剧弱面的应力集中和围岩变形,从而加剧围岩的破坏。此时,若围岩或弱面强度不足以抵御其应力和变形作用,且无外力补偿,其结果必然是变形不断扩展,并最终导致采空区破坏。

杨锡祥等通过对山东蚕庄金矿上庄矿区的岩体结构面进行调查分析,得出了井下矿块开采的稳定性受主裂面和4组结构面控制。慕青松通过将矿区地应力的变化规律与矿体上盘围岩中节理分布的几何特征结合起来,应用弱结构面滑移的判断准则进行了研究。

从上述文献中可以看出,在地下开采过程中,主要通过岩体结构面对围岩的稳定性进行监测。由于采用分段空场嗣后胶结充填采矿法进行开采,会形成较大的采空区,而采空区的稳定与否又是采场结构参数优化设计的关键。在开采过程

中,通过对采空区围岩结构面节理裂隙的发育情况进行监测,可对采空区的稳定性进行准确的分析。

1.2.1.2 采空区稳定性分析方法

A 理论分析法

理论分析法是早期常用的采空区稳定性分析方法。分析过程中,根据实际情况对采空区结构进行简化,将采空区抽象为一个理想的力学模型进行求解。

贺广零等基于温克尔假设,依据板壳理论和非线性动力学理论,建立采空区柱-顶板相互作用系统,揭示了系统稳定性机理。贡长青等基于弹性薄板理论对煤矿采空区的地表沉降进行了分析,对其引发地质灾害进行预测。V. M. Seryakov 基于数学建模思想建立了采空区上覆岩体数学模型,可以有效识别地下开采中岩体状态。

B 预测评价法

预测评价法是通过以往工程分析研究,归纳得出采空区稳定性影响因素,综合考虑各因素的权重,建立采空区稳定性预测评价模型。

宫凤强等基于未确知测度理论,选取 14 个影响因素,建立了采空区危险性等级评价和排序模型,对采空区稳定性影响因素进行定性和定量分析。赵奎等基于块体理论和模糊分析学中模糊测度理论,建立了采空区块体稳定性模糊概率测度计算公式,对采空区稳定性进行概率分析。来兴平等利用人工神经网络的计算方法,对大尺度采空区细观损伤进行了统计和预测,所得结果与实际综合检测数据基本吻合。

预测评价法虽然在采空区稳定性研究中得到了广泛应用,但该方法是基于统计思想,通过建立预测评价模型,对采空区稳定性进行评价。其结果一般都是定性或者半定性半定量的,评价模型针对特定采空区,因而对于不同采空区,评价模型也各不相同,操作过程繁琐。另外,研究人员所具备的工程经验也会对采空区稳定性预测评价产生影响。

C 物理模型试验法

物理模型试验法通过在室内构建与实际工程相似的模型,辅助有效的监测手段,可以详细地将变化规律展现出来。作为一个重要研究手段,物理模型试验广泛应用于各种工程领域,成为一种解决复杂工程课题的重要手段。

近年来,由于试验设备不断改进,研究人员开始利用模型试验手段研究采空区稳定性。李鹏、宋卫东分别采用物理模拟方法,对高速公路下伏煤矿房柱式采空区和长臂法开采倾斜极薄类矿体形成采空区过程中,围岩冒落规律及破坏过程进行了模拟研究。

通过物理模型试验研究采空区稳定性、失稳模式及破坏过程中围岩应力应变