

金属矿山采空区稳定性 分析与治理

JINSHU KUANGSHAN CAIKONGQU WENDINGXING

FENXI YU ZHILI

张海波 宋卫东 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

金属矿山采空区稳定性 分析与治理

张海波 宋卫东 著

冶金工业出版社

2014

内 容 简 介

本书以某铁矿采空区工程治理为研究与工程实践背景,阐述了采用先进采空区探测设备对采空区进行实测,并运用3Dmine和FLAC建模耦合技术构建数值计算模型,较真实地反映了矿山采空区的具体形态和主要特征参数,在此基础上采用岩石力学理论计算、数值计算模拟、模糊-灰关联理论对采空区围岩稳定性进行了评判分析和稳定性分级;鉴于矿山采空区治理的复杂性,根据采空区稳定性级别和特征参数,提出了采用充填和隔离封闭处理技术分区域、逐步治理采空区措施。

本书适用于采矿工程、岩土工程领域的工程技术人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属矿山采空区稳定性分析与治理/张海波,宋卫东著. —北京:冶金工业出版社,2014.7

ISBN 978-7-5024-6617-6

I. ①金… II. ①张… ②宋… III. ①铁矿床—采空区—稳定性—研究 IV. ①P618.310.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第165105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 李培禄 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 978-7-5024-6617-6

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
2014年7月第1版,2014年7月第1次印刷

148mm×210mm;5.5印张;201千字;166页

29.00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 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)



前言

多年来,采用空场采矿法在开采矿产资源的同时,也造成大量采空区的形成,但大多数采空区都没有得到及时有效的治理,导致产生或诱发各种地质灾害,继而威胁矿山正常生产和矿区人民的生命财产安全。随着我国冶金业和矿业的迅速发展,采空区治理工程已刻不容缓。一方面是由于矿山经过滥采滥挖、有水快流的开采年代,造成在矿山实际生产中与矿山开采设计严重脱节,采空区相互贯通,分布十分凌乱,无法明确采空区的实际空间分布和体积大小,更为严重的是那些民采、盗采矿点,形成大量非法采空区;另一方面是随着矿山开采深度的不断增加,矿山滞留的采空区越来越多,如一旦上部采空区顶板暴露面积超过其极限暴露面时,采空区顶板将会发生崩落和塌陷,当其崩落的范围影响到顶板的整体稳定性时,就会出现顶板失稳连锁反应,致使发生下部开采中段巷道变形、采场顶板冒落等重大事故,同时也极易诱发井下突水和泥石流灾害,甚至会造成矿山停产或关闭。

对于这样复杂多变,涉及岩体力学、工程地质学和计算力学等多学科交叉的采空区治理工程,采用传统单一的研究方法与手段往往难以收到好的效果,需要多学科交叉融合、综合集成的方法,对采空区赋存状态与矿山实际工程进行整体研究,强调定性定量结合、经验与理论结合,以实现采空区及时有效的治理。本书采用先进采空区探测设备对采空区进行了探测,分别采用力学理论计算、数值模拟及模糊-灰关联理论对采空区围岩失稳进

行了分析研究,在研究采空区治理方法及适用性的基础上,提出采用综合处理技术治理采空区。全书各章自成体系,内容不求全面、系统,力求在学术上具有引导性、启迪性。

本书由河北联合大学张海波老师结合其科研成果撰写完成,其中部分研究内容得到作者的博士生导师北京科技大学宋卫东教授的指导和帮助,在此深表感谢。另外,北京科技大学杜建华博士、谭玉叶博士、付建新博士、吴姍博士等对本书的撰写也给予了大力帮助,同时感谢河北联合大学张艳博教授、李占金教授、李示波教授在本书撰写过程中给予的支持和帮助,在此一并表示感谢!

本书在有关资料整理、录入、排版过程中得到了河北联合大学矿业工程学院李祥军、田福义、孙建辉三位同学的帮助,作者感谢他们的辛勤劳动。本书在撰写过程中,参阅了大量国内外参考文献,作者在此谨向文献作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处,诚恳欢迎读者给予指正,共同交流。

作者
2014年5月

目 录

1 采空区概述	1
1.1 大面积采空区的危害	2
1.2 采空区探测技术	3
1.3 采空区稳定性监测技术	4
1.4 采空区稳定性理论分析	5
1.4.1 矿柱稳定性理论	6
1.4.2 顶板稳定性理论	7
1.4.3 采空区稳定性评价理论	9
1.5 采空区稳定性数值分析	11
1.6 采空区处理技术	13
1.6.1 崩落围岩处理采空区	13
1.6.2 用充填料充填处理采空区	14
1.6.3 留永久矿柱或构筑人工石柱处理采空区	15
1.6.4 联合法处理采空区	16
1.7 采空区充填体与围岩作用机理	16
1.8 采空区充填体强度分析	18
1.9 小结	19
2 基于实测的数值计算模型构建方法	20
2.1 采空区井下 CMS 探测	20
2.1.1 CMS 设备简介	20
2.1.2 CMS 测量原理	20
2.1.3 CMS 使用步骤	23
2.1.4 CMS 数据处理	24

2.1.5 CMS 探测技术与地球物理探测的比较	25
2.2 采空区实体模型的构建	27
2.2.1 3Dmine 简介	27
2.2.2 采空区三维实体模型的建立	28
2.2.3 采空区三维块体模型的构建	28
2.3 构建 FLAC3D 数值计算模型	29
2.3.1 FLAC3D 简介	29
2.3.2 地表及整体数值计算模型的建立	30
2.3.3 矿体和采空区数值计算模型的建立	31
2.4 小结	34
3 采空区关键岩体稳定性评判	35
3.1 采空区顶板应力分布及覆岩破坏规律	35
3.1.1 顶板应力分区	35
3.1.2 采空区顶板覆岩变形分布	37
3.2 采空区顶板失稳分析法	38
3.2.1 梁理论分析法	38
3.2.2 模型法分析	40
3.2.3 板理论分析	41
3.2.4 载荷传递交汇线法	41
3.2.5 采空区厚跨比理论	42
3.3 实测采空区顶板稳定性评判	42
3.4 采空区矿柱稳定性评判	46
3.4.1 矿柱应力状态分布	47
3.4.2 矿柱强度分析	48
3.5 基于实测采空区计算模型构建	49
3.5.1 地表实体模型建立	49
3.5.2 计算模型的基础坐标数据提取	51
3.5.3 三维数值计算模型的建立	53

3.6 基于实测复杂采空区数值模拟分析	56
3.6.1 力学参数选取	56
3.6.2 初始应力场形成	57
3.6.3 模拟结果分析	57
3.7 实测采空区失稳评判	73
3.8 小结	76
4 基于模糊-灰关联理论采空区失稳分析	78
4.1 模糊综合评判法	78
4.1.1 模糊评判步骤	78
4.1.2 隶属函数确定方法	80
4.1.3 影响因素重要程度系数及确定方法	80
4.2 采空区失稳模糊综合评判研究	80
4.2.1 区域地质条件影响因素	81
4.2.2 采空区水文影响因素	84
4.2.3 采空区周围环境因素	86
4.2.4 采空区结构参数影响因素	87
4.2.5 采空区失稳评判模型的建立	89
4.2.6 模糊评判确定采空区失稳级别	96
4.3 基于灰关联理论采空区失稳分析	98
4.3.1 灰关联理论	99
4.3.2 采空区失稳灰关联分析	100
4.4 小结	104
5 复杂采空区综合治理技术研究	106
5.1 采空区治理技术及适用性	106
5.1.1 充填法治理采空区	106
5.1.2 崩落围岩治理采空区	107
5.1.3 设置矿柱支撑采空区	108

5.1.4	隔离封闭采空区	109
5.1.5	联合法治理采空区	110
5.2	采空区分类及综合治理技术	111
5.2.1	全尾砂胶结充填治理采空区	114
5.2.2	隔离封闭治理采空区	123
5.3	试充矿段采空区数值模拟研究	131
5.3.1	力学参数确定	131
5.3.2	试充采空区数值模拟结果分析	133
5.4	小结	156
参考文献		158

1 采空区概述

20 世纪 50 年代中后期以来,在我国应用留矿、空场等采矿方法开采一些金属及非金属矿床的采空区没有进行有效处理,相继发生了采空区顶板崩落和地表岩移,不少矿山产生了很多危害,如设备财产遭受破坏、资源损失、生产失调、企业经济技术指标受到影响等,个别矿山甚至造成极为严重的人身伤亡事故。例如:1967 年盘古山钨矿在已形成 177.8 万立方米采空区的条件下产生了大范围的移动,破坏了四个采矿阶段,七大工艺系统,损失工业矿量 29.38 万吨,1967~1970 年,连续四年企业生产能力平均下降 45%,直接损失达 735 万元;湖北宜昌地区盐池磷矿矿区,1980 年 6 月 3 日产生大规模的山崩事故,崩塌岩体量约 135 万立方米,直接导致 284 人遇难,河流中断,受灾面积达到 25.9 万平方米。形成山崩的主要原因是采空区处理方法不当,采空区处理中应用浅眼爆破房间矿柱、底柱,与此同时将顶板强制崩落,使采空区上部产生大量移动,导致山崩。

近几年来,金属矿山由采空区塌陷引发的灾难事故接连发生,已经造成重大人员伤亡和财产损失,引起了国家安监总局、省安监局和企业领导的高度重视。例如,2001 年 7 月 17 日,广西南丹采空区突水,81 人遇难;2005 年 11 月 6 日,因采空区大面积冒顶而引发的河北省邢台县尚汪庄石膏矿区“11.6”特别重大坍塌事故,造成 33 人死亡。2005 年 12 月 26 日,安阳县都里铁矿采空区突然发生大面积地表塌陷,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 13m,采空区塌陷导致居民住房倒塌。

1.1 大面积采空区的危害

我国矿山安全事故频发,特大安全事故也时有发生,其主要诱因有两个:一个是瓦斯,另一个就是采空区。

从岩体力学分析,岩体开挖以后,空场周围岩石的原始应力平衡遭到破坏,应力重新分布,形成次生应力场,在某些部位形成应力集中,另一些部位则形成应力降低区。次生应力场对采空场稳固性的影响结果有两种可能:一是随着时间的推移和空间的扩大,岩移变形随着次生应力场的形成变化基本结束,或者在安全限度以内,因之采空区是稳固的;另一种是随着采空区的不断扩大或时间的推移,岩体应力不断重新分布,应力超过岩体的强度极限、岩移量超过安全限度,随之出现顶板下沉、侧帮突起、底板隆起、岩石剥裂等现象,进而发展成为岩石离层和崩落,大面积采空区岩石突然崩落,会造成很大的冲击载荷,破坏矿山生产。

采空区对工程的危害是显著的,主要体现在两个方面:

(1) 采空区失稳,其主要表现为:

1) 采空区顶板大面积垮落产生冲击气浪。顶板垮落的岩石会以极快的速度压缩采空区内的空气,在采空区和巷道内会产生冲击气浪,危害井下的人员、设备。

2) 顶板冒落产生冲击力。顶板垮落的岩石会对底板产生巨大的冲击,其能量传递至其他地下工程,会产生极大破坏(尤其对矿柱),并有可能诱发矿震。

3) 采空区变形危害地表安全。采空区的变形将破坏上覆岩层的应力平衡,使地表下落形成塌陷,引发建筑物沉降和地面开裂,还能诱发滑坡、塌方、泥石流等地质灾害。

4) 采空区变形危害周围采空区及采场安全。采空区局部的变形可能对整体的稳定性产生影响,一旦某个采空区发生失稳,必定影响周围采空区的稳定性,使其他地下工程的受力发生巨大变化,并可能引起连锁反应而发生连续失稳,极大威胁采矿安全。

(2) 在矿山开采过程中,采空区围岩受爆破震动影响导致岩体裂隙发育,甚至贯通地表或连通老窿积水,发生突水事故,从而淹没

坑道和工作面, 2001 年 7 月南丹特大透水事故就是民窿留下的采空区积水相互贯通而造成的。

1.2 采空区探测技术

采空区探测最先起源于各类以军事和地质找矿为目的的物理探测方法, 目前国内外采空区探测主要是采矿情况调查、工程钻探、地球物理勘探, 辅以变形观测、水文试验等。采空区主要的探测方法主要有以下几种: 微重力法、直流电法、瞬变电磁法 (TEM)、高密度电法、探地雷达 (GPR) 技术、瞬态瑞雷波法、地震层析成像法 (CT)、浅层地震勘探法和射气测量技术等。

美国、日本、俄罗斯等发达国家在地下空洞探测中主要采用了以地球物理勘探为主的探测技术, 并积累了丰富的经验。美国较全面地发展了电法、电磁法、微重力法及地震勘探技术, 其中以浅层地震勘探最为突出, 20 世纪 70 年代以地震折射波法为主, 80 年代发展了地震法, 并以高分辨率地震反射法为代表。美国的地震层析技术发展很快, 除浅层地震勘探法外, 高密度电法或电位 CT 法在美国也获得了明显的发展。

俄罗斯在工程物探技术方面发展比较全面, 曾用地震反射法完成了莫斯科市 1000km 地震剖面, 成功地圈定了裂隙及岩溶范围。对于采空区勘探, 俄罗斯主要采用直流电法及瞬变电磁法, 同时并间电磁波透视、声波透视及射气测量技术也发展较快。

日本 20 世纪 80 年代主要采用“GR-810”瑞雷波全自动地下勘探系统, 在勘察地下空洞方面具有特别功效。英、法等欧洲国家用来探测采空区的方法有微重力法、高密度电法、地质雷达法及浅层地震勘探法。20 世纪 70 年代中期, 国外较成功地将微重力法应用于隐伏岩溶、矿山采空区探测。

国内近年来在利用地球物理勘探技术查明地下采空区方面作了大量的工作, 发展了多种方法, 如瞬态瑞雷波法、地质雷达、弹性波 CT、超声成像测井等。但是根据各方法的有效探测深度, 在不同深度的采空区, 选择的方法也有所不同, 有时根据采空区位置、类型、深度及产状, 灵活选用合适的组合探测手段, 可以达到高质量的勘探

效果。闫长斌等人针对复杂关联多群采空区情况,在现场摄影调查的基础上,提出了以探地雷达和瑞雷波法为主的综合探测技术,两种不同的先进物探技术,相辅相成,提高了采空区探测的准确度和精度。

但随着我国物探技术测量精度和信息处理速度的提高,工程物探越来越成为探明地下采空区的一项重要的勘探手段。然而以上探测方法不能或很难形成采空区的三维模型,只能确定采空区的范围、埋深和大致形状。况且,这些探测方法对采空区的探测要依赖于采空区周围的岩、土体进而确定采空区异常体,不同的探测方法适用于不同的地质条件,地质情况都是很复杂的,这就极大地阻碍了对探测结果的准确解释,这也是采用综合探测方法进行采空区探测来弥补单一方法探测不足的原因,即使如此也很难得到采空区准确的形态。近年来,基于激光测距技术的采空区三维探测方法在国内外矿山得到了广泛应用,这是一种很好的采空区三维探测方法。张新光运用采空区激光自动扫描系统(CALS)对河南栾川三道庄钼矿地采留下的采空区进行了详细、系统的探测,基本查明了采空区的分布、大小和贯通关系,为该矿由地下生产转入露天开采的采空区处理提供了相对可靠的决策依据。刘晓明、罗周全等采用CMS系统探测采空区,通过前后采空区模型的对比分析,准确掌握采空区的变化趋势,最终实现采空区的动态监测。王运敏等人借助三维激光采空区监测系统对地下矿山采空区进行三维扫描,精确地获取了激光头到采空区边界的距离,解决了传统采空区稳定性分析建立数值分析模型时,对采空区的形状进行过多简化的问题,从而使采空区模型趋于真实,采空区稳定性分析的结果可靠度提高。

1.3 采空区稳定性监测技术

采空区的稳定性监测分析是矿山开采中一项基础性研究,对采空区应力、应变、位移变化的现场监测,对采空区稳定性情况做出直接反馈具有真实、准确的特点。目前,国内对采空区稳定性监测分析主要利用声发射监测法、光弹应力计法等。

国内学者赵刚等人利用声发射法在采空区稳定性监测分析方面做了一定的研究。蔡美峰通过对岩石基复合材料支护的采空区声发射监

测,利用声发射特征统计方法,发现了采空区(或塌陷区)围岩动力失稳的非线性关系,结合岩体失稳的全应力应变关系,揭示围岩失稳过程与声发射之间内在的规律性和必然联系。万虹等人采用光弹性应力计对具体矿山采空区应力变化情况进行了长期监测,通过围岩(含矿柱)应力监测得到应力变化规律,反映了采空区稳定状况。

在情况较为复杂的采空区稳定性分析中,单一的监测手段很难得到采空区稳定性的结论。对于复杂的高峰矿采空区,叶粤文采用光弹应力、声发射、水准测量综合测量方法对采空区进行了稳定性分析,取得了良好效果。纪洪广将压力监测、声发射监测、位移监测等多种手段应用于采空区围岩的稳定性监测,实践表明所得到的判别模式利用了压力和声发射两种信息之间“耦合内涵”,有着更好的可操作性,更宜于现场监测人员的理解和掌握。此外,在实际采空区稳定性工程分析中,套孔应力解除法、声波监测法、水准测量法也得到了应用。

近年来,国内采空区动力灾害的数字化监测理论与技术在岩石力学领域兴起,对采空区稳定性监测分析发展起到了推动作用。地下采空区系统是高度非线性复杂大系统,并始终处于动态不可逆变化之中。因此,要对它的力学行为进行预测与控制,必须借助于先进的监测技术和数据分析手段。采空区动力灾害的数字化监测理论研究一般分为围岩灾害数字化监测、采空区非线性动力学破坏过程监测、监测数字信号处理三个阶段。对此,蔡美峰、宋兴平、刘德安、纪洪广等人在采空区动力灾害的数字化监测理论和应用方面做了很多研究,取得了一定进步。宋兴平认为子波变换分析对大采空区动力灾害声发射监测的信号特征分析有很大的优势。上述研究为工程信号中奇异点的探测与识别和矿山采空区动力灾害声发射监测信号识别提供先进、可行的测试手段,也进一步提高了国内采空区稳定性监测分析水平。

1.4 采空区稳定性理论分析

矿山开采会打破原有的岩体系统平衡,若对遗留的采空区不进行处理,就会产生一系列的矿山灾害,如地表沉降、地面塌陷、矿坑突(涌)水、采空区冒落与塌陷等。这些采空区隐患对矿山建设工程存

在巨大的威胁。20 世纪 70 年代, Jones 等最先研究了采空区塌陷对公路的影响; 80 年代, Jones、Sergeant、Wang 等探测了采矿等下伏空洞对建筑物地基的危害。然而, 这些研究多出采空区外其他构筑物失稳安全考虑, 对采空区本身安全关注较少, 即便涉及到采空区自身稳定, 也多研究采空区中矿柱的稳定, 而对大规模采空区群中采空区层间顶板稳定性分析不足。

1.4.1 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_g 和临界破坏宽度 r_{pl} 。研究表明: 当 $F_q > 1$ 或 r_{pz} (矿柱破坏宽度) $> r_{pl}$ 时, 矿柱会发生失稳; 当 $F_q < 1$ 或 $r_{pz} < r_{pl}$ 时, 矿柱不会发生失稳。李江腾等人针对具有初始几何缺陷的超高矿柱稳定性问题建立了一个简化的力学模型, 基于初始挠度的形状、岩石的应力-应变关系、应变-曲率关系及静力平衡关系对具有初始挠度的矿柱的弹性及弹塑性稳定性进行了探讨, 确立了超高矿柱稳定性对初始几何缺陷的依从关系, 确定了具有初始几何缺陷的超高矿柱的弹塑性失稳的极限载荷。王学滨考虑了矿柱的渐进破坏, 推导出了矿柱剪切失稳判据的解析式。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。给出了矿柱上的总载荷公式:

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

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:

$$S = 2K_2 C \cos \phi / (1 - \sin \phi) \quad (1-2)$$

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, 可推导出采空区顶板冒落的极限状态方程:

$$Z = \frac{2K_2 C \cos \phi}{1 - \sin \phi} - \frac{(a_m + a_p) \gamma H}{a_p} = 0 \quad (1-3)$$

1.4.2 顶板稳定性理论

采空区顶板作为采空区相对薄弱的部分, 在采空区跨度、高度、承载状况发生变化时, 都可能发生坍塌, 导致上下相邻采空区相互贯通, 改变原有采空区结构, 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采空区贯通和失稳。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, 对科学确定采空区顶板厚度和评价采空区顶板稳定性提供了依据。具体方法介绍如下。

1.4.2.1 应用结构力学方法

应用结构力学对采空区顶板稳定性分析研究中, 假定采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, 可以对采空区顶板的安全厚度进行计算。

1.4.2.2 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, 研究了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) 采空区长度大大超过其宽度; (2) 采空区的数量无限多, 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。

1.4.2.3 载荷传递交汇线法

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。

1.4.2.4 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。

1.4.2.5 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, 采空区上部岩体重量由拱承担。对于坚硬岩石, 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