

采空区处理的理论与实践

CAIKONGQU CHULI DE LILUN YU SHIJIAN

李俊平 赵永平 王二军 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

采空区处理的理论与实践

李俊平 赵永平 王二军 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2012

内 容 提 要

本书涉及采空区处理从理论分析、方案设计、现场实施到效果观测的整个理论和实施体系。内容结合工程实例,着重阐述了切槽放顶法、切顶与矿柱崩落法、V形切槽上盘闭合法、硐室与深孔爆破法处理采空区的理论与方法,采空区及其安全评价的理论与方法,介绍了采空区处理方法的智能优选。书中介绍的顶板应力状态的数值仿真理论与方法,相似模拟理论与方法,矿柱设计与评价方法,顶板冒落的空气冲击波评价理论与方法等相关知识,倡导的研究思路,对推动采矿技术及岩土工程问题的解决,不无裨益。

本书可供采矿领域从事岩土工程理论及其工程应用的科研人员及高等院校相关专业的师生参考,也可供水利、铁道、人防及防灾减灾领域从事岩土工程的专业技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

采空区处理的理论与实践/李俊平,赵永平,王二军著.
—北京:冶金工业出版社,2012.10

ISBN 978-7-5024-6072-3

I. ①采… II. ①李… ②赵… ③王… III. ①采空区
处理 IV. ①TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 235036 号

出 版 人 谭学余

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 宋 良 张耀辉 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6072-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2012 年 10 月第 1 版,2012 年 10 月第 1 次印刷

148mm×210mm;8.875 印张;260 千字;270 页

29.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

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

世界上几乎所有的地下矿山都不同程度地受到顶板冒落冲击地压的威胁。1783 年英国在世界上首先报道了煤矿中所发生的顶板冲击地压现象，以后在俄罗斯、南非、德国、美国、加拿大、印度、英国等几十个国家和地区，顶板冲击地压现象时有发生。1960 年南非 Coalbrook North 煤矿发生的顶板冲击地压，井下破坏面积达 $3 \times 10^6 \text{ m}^2$ ，死亡 432 人，是迄今为止最大的一次顶板冲击地压灾难。在我国，顶板冲击地压最早于 1933 年发生在抚顺胜利煤矿，以后，随着开采深度的增加和开采范围的不断扩大，北京、抚顺、枣庄、开滦、大同、北票、南桐、锡矿山、盘古山、荆襄、邯邢、湖南石门等矿区的许多矿井，都先后发生过顶板冲击地压现象。

随着我国采矿工业的发展，目前各地遗留的大量未处理的采空区和老坑洞，严重威胁着当地的生产安全和生态环境安全。采空区处理正日益成为我国矿山现场普遍存在的技术难题。积极探索经济合理的采空区处理方法，对矿山地压控制具有重要的现实意义。

可持续发展是当今世界广泛关注的主题之一，各国日益重视，安全生产也得到极大关注。发达国家多已采用嗣后充填法处理存在和产生的采空区，或者将其加固、清理留作他用，采空区已不再成为威胁安全生产和导致地表塌陷及岩体移动的问题之源。在这样的形势下，引进和吸收相关学科的新理论、新技术和新方法，不断完善和发展采空区处理的理论与方法，是我国矿山岩石力学研究者面临的重要而紧迫的任务。

本书系统总结和阐述了采空区处理技术这一研究领域的理论体系和最新成果,并辅以一定的应用实例,归纳了作者近年来从事采空区处理的科研成果。它避开了地表沉陷监测与统计分析的陈旧观念,以采空区围岩应力分析为核心,提出了切槽放顶法、切顶与矿柱崩落法、V形切槽上盘闭合法及硐室与深孔爆破法等采空区处理新方法及其安全评价新方法。针对空场法开采遗留下的大型采空区处理,提出了从理论分析、方案设计、现场实施到效果观测的一整套可供推广借鉴的理论和实施体系,希望能对推动岩土工程和采矿技术的发展产生一定的影响。

本书既可作为高等院校相关专业师生的教学参考书,科研单位从事岩土工程、采矿工程和防灾减灾工作的科研人员的参考书,也可作为其应用计算机技术和相似材料模拟技术解决采矿工程实际问题的参考书,还可作为非煤矿山安全生产培训的选修教材。

西安建筑科技大学材料与矿资学院张雯参加了第1章的编写,郭进平参加了第2章的编写;湖南黄金集团有限责任公司王军民参加了第1章、第2章和第3章的编写;西北矿冶研究院刘武团参加了第6章和第8章的编写,在此特别对他们表示衷心的感谢和诚挚的敬意!

本书的出版得到了西安建筑科技大学学科建设人才基金(DB09044)、重点培育学科建设基金(XK2012005)的资助,编写工作中参阅了相关专家、学者的大量文献,在此一并表示感谢!

由于作者水平所限,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

李俊平

2012年7月15日于西安

目 录

1 绪论	1
1.1 采空区处理的意义	2
1.2 采空区处理方法回顾	3
1.2.1 采空区处理的基本方法	3
1.2.2 采空区处理的简单联合法	6
1.2.3 采空区处理的基本方法与简单联合法特点比较	7
1.3 采空区处理的新方法概述	8
1.3.1 切槽放顶法	8
1.3.2 切顶与矿柱崩落法	8
1.3.3 V形切槽上盘闭合法	9
1.3.4 硐室与深孔爆破法	10
1.4 采空区处理方法的发展方向	11
参考文献	13
2 采场区仿真与分析理论	19
2.1 采空区仿真实论	20
2.1.1 有限元法基本原理	21
2.1.2 有限差分法基本原理	41
2.1.3 离散单元法简介	52
2.1.4 相似比与模拟准则	57
2.2 矿柱跨度与荷载理论	60
2.2.1 矿柱极限跨度理论	60
2.2.2 矿柱强度与荷载理论	63
2.2.3 矿柱设计新方法及其应用	73

2.3 井下空气动力学的相关理论	78
2.3.1 冒落激发的飓风速度估算	78
2.3.2 阻波堆石隔离墙的宽度设计	82
2.3.3 削波堆石(垫层)的厚度设计	84
参考文献	85
3 切槽放顶法实践	87
3.1 切槽放顶法在东桐峪金矿的实践	88
3.1.1 切槽放顶法的基本参量研究	90
3.1.2 顶板应力状态的数值模拟	98
3.1.3 切槽放顶实践	117
3.1.4 切顶效果的声发射监测评价	124
3.2 切槽放顶法在辽宁金凤黄金矿业公司的实践	127
3.2.1 矿山概述	127
3.2.2 切槽放顶位置观测	128
3.2.3 施工效果观测	128
3.3 切槽放顶沿空留巷地压控制实践	129
3.3.1 鸡西矿业集团沿空留巷布置及其地压显现特征	129
3.3.2 切槽放顶在鸡西矿业集团沿空留巷中的应用	131
3.3.3 结论与建议	137
参考文献	138
4 切顶与矿柱崩落法实践	141
4.1 顶板极限跨度理论计算	143
4.1.1 梁理论设计	143
4.1.2 模型法设计	144
4.1.3 板理论	144
4.2 顶板极限跨度与切顶深度的 ANSYS 分析	145
4.2.1 模型选择	145
4.2.2 极限跨度分析	148

4.2.3 切槽深度与极限悬臂跨度分析	149
4.3 顶板应力状态的数值模拟	151
4.3.1 顶板应力状态的 ANSYS 分析	151
4.3.2 ANSYS 分析修正	156
4.4 采空区处理的相似模拟	157
4.4.1 相似模拟实验	158
4.4.2 下沉分析与移动角计算	162
4.4.3 相似模拟结果与讨论	166
4.5 考虑层理单元的数值模拟与相似模拟比较研究	168
4.5.1 有限元模型	168
4.5.2 考虑层理单元的数值模拟与相似模拟比较	169
4.6 结论及施工效果观测	173
4.6.1 结论	173
4.6.2 施工注意事项及效果观测评价	174
参考文献	176
5 V 形切槽上盘闭合法探索	177
5.1 概述	177
5.1.1 矿山概况	177
5.1.2 V 形切槽上盘闭合法简介	178
5.2 切槽位置的材料力学研究	178
5.3 V 形切槽上盘闭合法的力学仿真	183
5.4 施工措施与经费估算	188
5.5 结论	190
参考文献	191
6 间隔间柱抽采及硐室与深孔爆破法实践	192
6.1 概述	192
6.1.1 矿床地质与岩体力学参数评价	196
6.1.2 矿柱回收与采空区处理方案	197

6.2 矿柱回收及采空区处理方案的数值模拟	199
6.2.1 仿真模型与边界条件	199
6.2.2 计算与分析	200
6.3 矿柱回收与采空区处理施工方案	216
6.4 结论	218
参考文献	218
7 采空区安全评价的理论与实践	220
7.1 采空区安全评价理论	221
7.1.1 数值仿真实理论与方法——顶板冲击地压 可能性评价	221
7.1.2 矿柱布置定量分析方法——矿柱布置的 合理性评价	225
7.1.3 顶板冒落的空气冲击波危险性分析方法—— 削波构筑物的合理性评价	226
7.2 黄沙坪铅锌矿与方黄联办矿结合开采部位采空区 安全评价	228
7.2.1 稳定性调查分析	228
7.2.2 顶板冲击地压可能性评价	231
7.2.3 矿柱布置的合理性评价	233
7.2.4 安全评价结论	234
7.3 陈贵矿业集团大广山矿柱回收安全评价	235
7.3.1 矿山概况	235
7.3.2 验收安全评价	236
7.3.3 验收安全评价结论	237
7.4 湖北黄石天青石矿采空区处理安全评价	238
7.4.1 采空区处理调查	238
7.4.2 空气冲击波危险性评价	239
7.5 开采过程岩体稳定性及其对周边矿山的影响评价	240
7.5.1 磨基山铁矿开采的稳定性分析	241

7.5.2 金龙铁矿开采的稳定性分析	246
7.5.3 伏三铁矿开采的稳定性分析	247
参考文献	251
8 采空区处理方法的优选	254
8.1 采空区处理方法的模糊优选法	255
8.1.1 模糊优选模型	255
8.1.2 应用实例	258
8.2 采空区处理方法的集对分析同一度优选法	260
8.2.1 集对分析的概念与基本思想	260
8.2.2 集对分析同一度的方案综合评价	261
8.2.3 应用实例	263
8.3 采空区处理方法的突变优选法	265
8.3.1 突变优选模型	265
8.3.2 采空区处理方案优选实例	266
参考文献	269
后记	270

1 绪 论

本章摘要 地下矿山只有应用空场类采矿方法开采时,才存在采空区的处理问题。阐述了采空区处理的意义及一般要求,回顾了采空区处理的4类基本方法及按此思路发展起来的简单联合法,概述了采空区处理的4种新联合法,提出了采空区处理方法的发展方向。

我国广泛分布着各种倾角的未处理采空区。根据采空区的倾角变化,可将我国现存的采空区分为:水平和微倾斜采空区(倾角 α 小于 5°)、缓倾斜采空区(α 介于 $5^\circ \sim 35^\circ$ 之间)、倾斜采空区(α 介于 $35^\circ \sim 55^\circ$ 之间)和急倾斜采空区(α 大于 55°)。

采空区处理一直是矿山岩石力学研究领域的一个热点课题。尽管已有崩落法、充填法、支撑法和封闭隔离法(即“崩”、“充”、“撑”、“封”)4类采空区处理的基本方法,以及支撑充填法、崩落隔离法、矿房崩落充填法、支撑片落法、切槽放顶法和切顶与矿柱崩落法6种采空区处理的联合法,但多少仍有局限。如李俊平所著《矿山岩石力学——缓倾斜采空区处理的理论与实践》中研究的切槽放顶法和切顶与矿柱崩落法只适合处理倾角 $\alpha \leq 40^\circ$ 的采空区。倾斜采空区处理方法的发展状况与我国采空区处理的实际需要还有一定差距,目前还缺乏十分经济、有效的倾斜采空区处理方法,并且采空区处理方法的力学原理也有待进一步研究。

根据我国长期和短期矿产资源经济、安全战略,将采空区的处理与利用相结合,少占耕地,保护环境,促进矿业持续发展,实现无公害、高效生产,最大限度地利用地下资源,是我们今后需要长期努力的目标。在细致调查工程地质条件、施工技术因素、地压显现和地表岩体移动许可条件的基础上,清晰分析采空区围岩的应力

分布状态及变形情况,探索经济合理、简便适用的倾斜采空区处理方法,探索采空区及其处理的定量安全评价方法,是当今采矿业发展的迫切需要。

1.1 采空区处理的意义

以回采时的地压管理方法作为分类依据,矿床地下开采方法可分为空场采矿法、充填采矿法和崩落采矿法三大类。工程上采用何种采矿方法,取决于矿体的赋存条件,矿石和围岩的物理力学特性,矿石的经济价值,矿山的地理地形特征,以及采矿技术和设备的发展水平等因素。据对我国 18 个重点铁矿山的统计,崩落采矿法占 94.1%,空场采矿法占 5.9%。黄金矿山中,充填采矿法占 31%,空场采矿法占 65%,其他占 4%。有色金属矿山中,空场采矿法占 46.1%,充填采矿法占 19.6%,崩落采矿法占 34.3%^[1]。

地下矿山只有应用空场类采矿方法开采时才存在采空区处理问题,除在采出率很低等特定条件下可以用矿柱等支撑并永久保留采空区外,通常都应当进行采空区处理,其目的在于消除采空区,防范顶板冲击地压,调控开采地压。因为若不处理采空区,或者仅用留矿柱支撑等不当的措施处理,迟早会发生顶板冲击地压。例如,1960 年南非的 Coalbrock North 煤矿发生了世界上最大的一次顶板冲击地压灾难,死亡 432 人。2005 年 11 月 6 日河北邢台尚汪庄石膏矿区经过 10 多年开采,积累了大量未经处理的采空区,加上矿房超宽、超开挖,导致矿柱尺寸普遍偏小,无序开采,从而在无隔离矿柱的康立和林旺两矿交界部位诱发了顶板冲击地压,造成 33 人死亡,4 人失踪,40 人受伤^[2~4]。2006 年 8 月 19 日,湖南石门县蒙泉镇天德石膏矿发生 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的采空区冒落,9 名矿工被采空区顶板冒落形成的空气冲击波(飓风)冲击致死。据调查部门测算,当时的飓风最大速度达 274 m/s ^[5]。文献[2~4]还阐述了山西大同、江西盘古山、河北寿王坟、湖南锡矿山、广西合浦恒大石膏矿等矿山因顶板冲击地压而带来的惨痛教训和荆襄刘冲磷矿的预测经验。2011 年韩国及其他采矿不发达国家也有类似报道^[6~8]。

李俊平在文献[2]中将坚硬顶板下采空区矿柱的多米诺骨牌式失稳过程称为顶板冲击地压。该类顶板的垮落范围,少则几千平方米、多则几万甚至几十万平方米,垮落具有突发性,通常在塌落过程中伴随压缩采空区内的空气而产生飓风,造成的破坏和危害难以控制,不但能够对采场中的人员造成伤害,甚至采场中的机械设备、矿井巷道与支护结构也会遭到破坏,甚至还有可能严重破坏地表。

为了提高开采效率,节约开采投资,目前我国在稳定岩体中应用空场法采矿的比例呈现上升的趋势。而为了更多地回收空场法开采留下的矿柱并控制开采地压,则必须采用技术可行、经济合理、简便适用的方法处理采空区。目前,对采空区处理一般有如下要求:

- (1) 确保矿区及其周边环境长治久安;
- (2) 确保矿石残采和矿柱回采安全、高效,最大限度地回收矿石资源;
- (3) 采空区处理费用力求最低;
- (4) 在采空区处理过程中不再消耗资源,力求回采曾经无法开采的矿石资源;
- (5) 采空区处理不能污染环境。

1.2 采空区处理方法回顾

尽管爆破等施工工艺不断向高效率、大尺寸等方向变革,充填材料和工艺也有新的发展,但2000年前采空区处理仍然只有4类基本的方法及按此思想发展起来的简单联合法^[2~4]。

1.2.1 采空区处理的基本方法

1.2.1.1 崩落法

崩落法是指崩落围岩充填采空区,分为自然崩落法和强制崩落法两大类。其特点是自然或强制崩落围岩充填采空区并形成缓冲保护垫层,或者强制崩落采空区覆岩,防止其因应力过度集中而突然冒落。为了简化处理工艺,提高采矿效率,目前国内外矿山广泛应用空场法采矿嗣后集中处理采空区。

强制崩落法细分为全面放顶法、切顶法和削壁充填法。切顶法的施工工艺有深孔、中深孔和浅孔爆破 3 种, 较容易与矿柱回收同步实施, 比全面放顶法经济, 适当控制切顶工艺与顺序还可以减缓地表沉陷。在处理厚大或地下转露天开采的采空区时常采用全面放顶法, 其施工工艺有硐室爆破和垂直漏斗后退式采矿法 (VCR, Vertical Crater Retreat) 两种, 相对深孔、中深孔或浅孔爆破其单价要低。削壁充填法的施工工艺也分深孔、中深孔和浅孔爆破 3 种, 一般用于极薄脉采空区的处理。

菅玉荣等^[9]利用硐室爆破上、下盘围岩, 刘玲平^[10]利用中深孔爆破与废石充填采空区, 徐必根等^[11]应用条形药室大爆破, 刘福春^[12]和丁金刚等^[13]采用条形药室爆破, 刘献华^[14]采用双层双侧硐室爆破和崩柱卸压, 郭辉成^[15]采用分台阶穿爆、侧向补孔爆破或 VCR 爆破, 尤仁锋等^[16]采用硐室爆破和中深孔爆破, 这些事例都是爆破工艺发展后在强制崩落围岩处理采空区方面的具体应用。由于崩落松石充填采空区后将在上部形成松石垫层, 若在其下继续开采, 如果不留隔离层, 将在松石覆盖层下出矿, 可能增大出矿的损失和贫化率。

爆破预处理弱化、注水软化或弱化顶板技术的不断成熟, 使得采空区在采后不久无害地自然冒落成为可能^[2~4], 由此在长壁后退基础上发展了无间柱连续采矿工艺^[17]。为了保护地表环境, 发达国家一般不采用崩落法处理采空场, 除非应用了预防性灌浆技术^[18]。为了减少地表崩落沉陷, 我国在 20 世纪 80 年代也发展了覆岩离层注浆减沉技术^[2~4]。近几年国内外在自然崩落处理采空区领域的研究主要集中在顶板沉陷监测与动态分析、可崩性分析等方面^[19~24]。

1.2.1.2 充填法

充填法狭义上只指从坑内外通过车辆或管道输送废石、河沙、尾砂等充填采空区, 广义上还包括垃圾、粉煤灰、自然蓄积的水、废液等充填采空区。这种方法限制岩体移动的效果良好, 一般适用于处理上部需要保护, 或矿岩会发生内因火灾以及稀有、贵重、高品位矿床开采的采空区^[2~4]。

为了控制采区的地表移动, 1864 年美国宾夕法尼亚州某煤矿首

次应用水砂充填法处理了采空区。随后各国逐步发展了矿房采矿嗣后充填、水力充填、机械输送充填、胶结充填、膏体充填和覆岩离层注浆减沉技术^[2~4]。为了降低成本,许多矿山都应用空场法采矿嗣后充填采空区。为了实现可持续发展,环保和无公害地利用采空区建核电站、生产车间或实验室,埋藏自产垃圾、生活垃圾或核废料,储存水或废液等也在不同程度上得以实现^[25]。

充填法可分为干式充填和湿式充填两种。前者建充填系统投资少,简单易行,但充填能力低。后者流动性好,充填速度快,效率高,但需一整套充填输送系统和设施,投资大,其中胶结充填较水砂、尾砂充填成本更高。因此,选用充填法的一般原则是:首选干式充填,若矿山自产废石难以满足采空区处理的要求则考虑补建尾砂充填系统,如果矿山现有尾砂量有限或其他原因则考虑水砂充填,胶结充填一般用于极差的岩体条件。为了降低湿式充填的水患或跑浆量,应尽量提高浆体浓度,改进滤水、疏干工艺。

为了降低湿式充填水患或跑浆量,近年来矿山大量应用膏体充填法,并不断改进滤水和疏干工艺。文献[26~28]回顾了嗣后充填浆料的发展。文献[29~34]研究了充填矿柱的失效行为及沉陷控制效果。文献[35~38]研究了固体充填材料的物理力学特性、废石或注浆充填的工艺及管路维护。文献[39]研究了充填参数。文献[40~42]研究了充填体或围岩的稳定性及岩体移动规律。文献[43~46]研究了充填料的性能、充填体的力学机制或影响因素。但是,未见报道采空区处理的新充填法。

1.2.1.3 支撑法

支撑法是指留下永久矿柱或构筑人工矿柱支撑顶板的采空区处理方法。该方法一般适用于地表允许冒落的空场类方法开采缓倾斜薄至中厚且顶板相当稳定的矿体、贱矿体形成的采空区的处理。

在18世纪,采矿工业一经成型,就有用支撑法处理采空区的相关报道^[47]。1907年Danieis和Moore开始研究矿柱强度,随后提出了一系列的矿柱设计方法^[2~4,48~54]。实践证明,仅用矿柱支撑顶板,只能暂时缓解开采期间的地压显现,除非采出率极低,一般并不能长期避免冒顶或顶板冲击地压事故^[55]。

1.2.1.4 封闭隔离法

封闭隔离法是一种经济、简便的采空区处理方法,仅适用于隔离孤立小矿体、端部矿体开采后形成的采空区以及需继续回采的大矿体上部的采空区。

实践证明,对于大规模采空区处理仅用该方法很难保障完全有效;对分散、采幅不宽而又不连续的采空区,国内外很早就有应用留隔离矿壁、修筑钢筋混凝土等材料的隔离墙、爆破挑顶、胶结充填封堵或顶板开“天窗”的报道^[2~4,56]。

1.2.2 采空区处理的简单联合法

联合法是指在一个采空区内同时应用 1.2.1 节中几种方法,或者应用一种施工工艺而达到 1.2.1 节中多种方法处理功效的采空区处理方法。由于各基本方法均有局限性,因而产生了联合法。

1.2.2.1 支撑充填法

支撑充填,就是采用框架式原生条带矿柱支撑围岩,并用废石充填框架内的采空区,旨在维护采空区之间夹墙和条带矿柱的稳定性,防止大规模采空区坍塌,以确保矿床回采的顺利进行。它是支撑法与废石充填法的简单联合。为了处理密集分布的急倾斜薄脉矿体开采所形成的大规模采空区,盘古山钨矿等在 1973 年首次共同提出了这种采空区处理的联合法。实践证明,该方法控制顶板冲击地压,尤其是大规模岩体移动的效果良好。但由于它要求规则地布置条带矿柱和顶、底柱以形成完整的框架支撑结构,且处理区域必须按后退式回采,故施工和管理比较复杂,还要损失大量矿石^[2~4]。

张雯等^[57]提出的大型残留矿柱回采的采空区处理方案,实质就是支撑充填法的具体应用。

1.2.2.2 崩落隔离法

崩落隔离,就是用废石砌筑以隔断放顶崩落区域与开采系统的联系,旨在释放部分顶板应力,并避免人员误入、风路混入崩落区而造成危险和损失。它是全面放顶与封闭隔离的简单联合。这种联合法是在崩落法实施过程中逐步形成的,在我国铜陵、中条山等老矿业基地都有应用。

实践证明,该方法施工和管理简单,尤其是大面积放顶时释放应力的效果更好,但是矿体较厚大或开采深度较小时易引起地表岩移,而且爆破石方量大,也不很经济^[2-4]。吕淑然^[58]等提出的顶板分区崩落和隔离,实质就是崩落隔离法的具体应用。

1.2.2.3 矿房崩落充填法

矿房崩落充填,就是先崩落已采空的矿房顶板,随后对其注浆充填;或者先胶结充填,在料浆尚未固结前崩落矿房顶板;或者按前述两种方案或其联合方案多次充填。

这种方法是由俄罗斯国家有色矿冶研究设计院等在 20 世纪 90 年代共同试验成功的^[59],适用于两步骤回采的厚大矿体,其所形成的胶结体比一般胶结充填体强度高出 25% ~ 30%,与一般胶结充填相比,可降低充填成本 30% ~ 60%,且控制地压和岩移的效果较好。但是,由于要运用深孔爆破放顶及胶结充填,采空区处理总费用仍然较高^[2-4]。

1.2.2.4 支撑片落法

支撑片落,指用矿柱支撑隔离采空区,变大采空区为小采空区,并通过自然冒落形成废石垫层的采空区处理方法。这种方法是由李纯青等于 2001 年总结提出的,适用于顶板中等稳固、可自然冒落的岩体条件。2004 年他又分析了该方法的力学原理^[60]。

1.2.3 采空区处理的基本方法与简单联合法特点比较

综上所述,采空区处理的 4 类基本方法各有其局限性、优越性和特定的适用条件。尽管崩落法能及时消除采空区,且成本相对充填法低,但地表易发生沉陷,而且切顶与全面放顶也不很经济。充填法虽然控制地表移动的效果较好,但成本较高。支撑法除非采出率极低,一般不能避免冒顶或顶板冲击地压。封闭隔离法仅适合处理孤立小采空区。联合法吸收了上述 4 种基本方法的优点,克服其局限性,并易于将采空区处理与利用相结合^[25,61-67]。支撑充填、崩落隔离、矿房崩落充填、支撑片落 4 种简单的联合法,只是采空区处理的 4 类基本方法中某两类的简单结合,还不能通过一种施工工艺或方法而达到多种基本方法的功效,且费用也比较昂贵。