

江苏高校优势学科建设工程项目（PAPD）资助

# 膏体充填综采覆岩变形控制 研究与实践

常庆粮 史泽坡 周华强 李海 孙晓光 著

GAOTI CHONGTIAN Zongcai Fuyan Bianxing Kongzhi Yanjiu Yu Shijian

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学出版社

——国家科技重大专项(863计划)资助

# 膏体充填综采覆岩变形控制 研究与实践

常庆粮 史泽坡 周华强 著  
李 海 孙晓光

中国矿业大学出版社

## 内 容 简 介

本书从理论和实践两个方面,着重研究了膏体充填开采岩层移动变形与地表沉陷控制的相关问题。本书内容丰富,主要包括:绪论,充填开采覆岩变形破坏特征研究,膏体充填控制覆岩变形机理研究,膏体充填控制地表沉陷影响因素分析,充填开采地表沉陷预测模型研究,膏体充填开采的数值模拟研究,膏体充填工业性试验及效益分析,结论。

本书可作为采矿工程及相关专业的研究人员、生产技术人员、政府管理人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

膏体充填综采覆岩变形控制研究与实践/

常庆粮等著. —徐州:中国矿业大学出版社,2017.2

ISBN 978-7-5646-2856-7

I. ①膏… II. ①常… III. ①煤矿开采—地表位移—  
充填法—研究 IV. ①TD823.7②TD32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 229824 号

书 名 膏体充填综采覆岩变形控制研究与实践

著 者 常庆粮 史泽坡 周华强 李 海 孙晓光

责任编辑 马晓彦

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 8.75 字数 167 千字

版次印次 2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

煤矿膏体充填开采是一种有效的解决煤矿开采对水资源、土地资源、建筑物等造成破坏的开采方法,相对于其他垮落法开采、条带开采、离层区注浆、水砂充填等开采技术而言,具有安全性高、采出率高、环境友好等优点,膏体充填采矿技术的应用,是煤炭工业贯彻落实科学发展观、实现绿色采矿的重要举措,是煤炭开采技术的革新,也是 21 世纪采矿技术的重要发展方向之一,必将促进我国煤矿安全、高效、可持续地发展。本书从理论和实践两个方面,着重研究了膏体充填开采岩层移动变形与地表沉陷控制的相关问题。

膏体充填开采岩层控制理论是充填体参与作用条件下的,顶板岩层和地表变形破坏与充填开采活动之间的关系规律,区别于垮落法开采的岩层控制问题。与其他充填开采技术相比,膏体充填开采的最大优点在于顶板垮落前已经进行采空区充填,顶板下沉只发生在工作面前方和控顶区,采空区顶板下沉则因充填体的支撑作用得到控制。因此,充填开采岩层控制的关键是控制直接顶及下位基本顶的变形破坏。

采用物理模拟和数值计算相结合的方法,分析了充填开采时顶板岩层的移动变形过程及支承压力分布特征,并对充填开采覆岩变形破坏进行了分类,明确了充填开采岩层控制的关键是控制直接顶及下位基本顶的移动变形。通过理论计算和现场实测,对充填开采顶板岩层变形破坏范围进行了研究,结果表明,充填开采顶板裂隙破坏范围可按传统算法进行预测研究。探讨了充填开采技术下充填体的支护作用机理。

根据膏体充填开采工作面煤体、支架、充填体组成的支撑体系耦合作用特点,建立了考虑充填体作用过程的组合顶板岩梁力学模型及其微分方程,推导出了充填体、支架和煤体三区耦合作用顶板关键岩层的挠曲方程。利用顶板关键岩层的挠曲方程,给出了充填开采工作面支承压力的计算方法,系统分析了关键岩层移动与充填程度、充填体力学性能之间的关系规律,分析了充填开采对充填体早期强度和控顶区支架支护强度的要求,并给出了计算式。研究了充填工作面顶板关键岩层移动影响因素的主次关系和可能达到的控制程度,明确了下位顶板岩层移动影响因素的主次关系依次为充填欠接顶量、充填前顶底板移近量、充填体压缩率。探究了充填开采顶板岩层稳定性判据,阐明了充填开采控制地

表沉陷的机理。

通过数值模拟计算,分析了不同条件下充填工作面支承压力的分布特点,研究了充填率对小屯矿地表变形及支承压力的影响,明确了小屯矿膏体充填开采对充填率的要求,并阐述了提高充填率的措施。探讨了充填开采的地表沉陷预测模型,预测小屯矿充填开采时地表下沉系数可控制在 0.16 以内,能够保证南旺村的建筑物安全。

介绍了小屯矿膏体充填的背景、充填系统组成、充填工艺流程、充填开采进展情况。结合小屯矿充填工作面具体情况,提出了充填材料的性能要求,对小屯矿充填工作面的矿压显现、充填质量、顶板管理质量及充填开采后地表沉陷规律进行了观测和分析,介绍了小屯矿充填开采取得的成果和存在的问题,并提出了改进措施。

本书逻辑严谨、内容全面、图文并茂,是作者近年来在膏体充填综采覆岩变形控制技术领域研究的成果总结,可供采矿、土木、工程力学等学科的广大科技工作者及相关专业的高校教师和高年级本科生、研究生参考使用。

本书撰写过程中,侯朝炯教授、柏建彪教授、邹喜正教授、瞿群迪副教授、万志军教授等给予了许多有益的启示和热情的帮助。在物理试验中得到了煤炭资源与安全开采国家重点实验室张少华高工和赵海云高工,以及李玉寿老师、关明亮老师、赵才智老师、王光伟博士、吴锋锋博士、李永元硕士、段昌瑞硕士等的热心帮助;在现场观测的研究中,得到了峰峰集团李玉泉总工程师、小屯矿任建利副总工程师、太平矿赵庆杰总工程师以及两矿技术科技人员的关心和支持;项目实施过程中,得到了徐州中矿大贝克福尔科技股份有限公司技术人员朱友荣、胡兴斌、李亮、胡永锋、宋光远、刘长安、甘建东、安虎、胡艳锋、张培莉、王冉冉、廉方、杨晓威、王福友、马英等给予的指导、支持和帮助。

在此,对以上各位专家、老师及朋友们对本书出版给予的指导、支持和帮助表示衷心感谢!对本书中所引用的成果与资料的所有者以及所引用文献中的作者表示衷心感谢!向参与本项目研究和本书出版的同事、专家和朋友表示衷心感谢!

本著作的研究和出版得到了江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)资助,在此表示衷心感谢!

由于作者研究水平和条件有限,书中难免存在不足之处,望读者不吝赐教。

作 者

2016 年 8 月

## 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>1 绪论</b>               | 1  |
| 1.1 问题的提出                 | 1  |
| 1.2 国内外研究现状               | 6  |
| 1.3 煤矿膏体充填研究现状            | 15 |
| 1.4 膏体充填技术特点及其主要问题        | 17 |
| 1.5 研究内容与方法               | 19 |
| <b>2 充填开采覆岩变形破坏特征研究</b>   | 21 |
| 2.1 充填方法及其特点              | 21 |
| 2.2 覆岩变形破坏的物理模拟研究         | 23 |
| 2.3 覆岩变形破坏的数值模拟研究         | 31 |
| 2.4 充填开采覆岩破坏实测研究          | 33 |
| 2.5 充填开采覆岩变形破坏规律          | 35 |
| 2.6 本章小结                  | 37 |
| <b>3 膏体充填控制覆岩变形机理研究</b>   | 38 |
| 3.1 煤矿开采覆岩破坏的基本规律         | 38 |
| 3.2 膏体充填开采控制覆岩变形的力学原理     | 40 |
| 3.3 支架支护强度的确定             | 60 |
| 3.4 充填体早期强度的确定            | 61 |
| 3.5 本章小结                  | 63 |
| <b>4 膏体充填控制地表沉陷影响因素分析</b> | 64 |
| 4.1 地表沉陷对建筑物的影响           | 64 |
| 4.2 “三下”压煤充填开采的设计原则       | 65 |
| 4.3 充填开采顶板岩层下沉的计算与分析      | 68 |
| 4.4 充填开采的减沉机理             | 78 |
| 4.5 本章小结                  | 78 |

|     |                |     |
|-----|----------------|-----|
| 5   | 充填开采地表沉陷预测模型研究 | 80  |
| 5.1 | 充填材料的压缩性能分析    | 80  |
| 5.2 | 开采沉陷模型的理论基础    | 85  |
| 5.3 | 开采沉陷模型及预测分析    | 87  |
| 5.4 | 本章小结           | 92  |
| 6   | 膏体充填开采的数值模拟研究  | 93  |
| 6.1 | 数值分析软件的简介与选择   | 93  |
| 6.2 | 典型顶板分类         | 94  |
| 6.3 | 数值模拟计算模型及其方法   | 94  |
| 6.4 | 数值模拟计算结果与分析    | 97  |
| 6.5 | 本章小结           | 103 |
| 7   | 膏体充填工业性试验及效益分析 | 105 |
| 7.1 | 工作面位置及顶底板条件    | 105 |
| 7.2 | 充填方法及其技术参数的确定  | 107 |
| 7.3 | 膏体充填工艺系统组成     | 108 |
| 7.4 | 膏体充填综采工艺       | 110 |
| 7.5 | 工业性试验概况        | 110 |
| 7.6 | 现场实测与分析        | 111 |
| 7.7 | 效益分析           | 118 |
| 7.8 | 取得的成果、存在的问题与建议 | 119 |
| 7.9 | 本章小结           | 120 |
| 8   | 结论             | 121 |
|     | 参考文献           | 124 |

# 1 绪 论

## 1.1 问题的提出

膏体充填采煤是一种把煤矸石、粉煤灰、工业炉渣、城市固体垃圾等加工成胶结性或非胶结性膏状浆液,然后利用充填泵或自溜管道输送到井下,部分或全部充填采空区,形成以膏体充填体为主体的覆岩支撑体系,控制地表沉陷在建筑物允许值范围内,实现村庄不搬迁,安全开采建筑物下压煤,保护矿区生态环境的开采方法。作为煤矿绿色开采技术的重要组成部分,膏体充填技术能够把固体废弃物利用与采动破坏、地表沉陷控制有机结合起来,做到地表破坏程度低、煤炭资源采出率高、废弃物资源化利用,并保护矿区生态环境。膏体充填采矿技术的开发应用,是煤炭工业贯彻落实科学发展观、实现绿色采矿的重要举措,具有“高安全性、高采出率、环境友好”的基本特征,是一种新的绿色采矿技术,也是21世纪采矿技术的重要发展方向之一。因此,研究膏体充填控制覆岩变形与地表沉陷理论无疑是十分必要的。

### 1.1.1 解放“三下”压煤与提高采出率的需要

煤炭是我国经济和社会发展的重大战略资源,也是我国实现全面建设小康社会目标的基本保障。中华人民共和国成立60多年来,煤炭在一次性能源消费结构中占有很高的比重,煤炭作为能源的强力支撑这一事实在短期内不会改变。据中国工程院院士倪维斗教授在《中国能源现状与发展战略》的报告中指出:“到2050年甚至更晚,我国以煤炭为主的能源结构不会改变,而且总量需求会逐年增加”。因此,如何高效地利用煤炭资源,是摆在我们面前的一个重大课题。

我国煤炭资源赋存丰度与地区经济发达程度呈逆向分布,在地理分布上的总格局是西多东少、北富南贫。而且主要集中分布在山西、内蒙古、陕西、新疆、贵州、宁夏等6省(自治区),煤炭资源总量为4.61万亿t,占全国煤炭资源总量的82.8%;截至2008年末煤炭资源保有储量为8229亿t,占全国煤炭资源保有储量的82.1%,煤类齐全,煤质普遍较好。而耗用煤量最大的北京、天津、河北、辽宁、山东、江苏、上海、浙江、福建、台湾、广东、海南、香港、广西等14个东南沿

海省(市、区)煤炭资源量只有 0.27 万亿 t,仅占全国煤炭资源总量的 5.3%,而煤炭消耗量则占全国煤炭总产量的 65%左右。截至 2017 年,上述煤炭销售主区的煤炭资源保有储量仅占全国煤炭资源保有储量的 5%,资源十分贫乏。这样的分布特点决定了煤炭资源中心远离消费中心,从而加剧了远距离输送煤炭的压力,带来了一系列问题和困难。

以大同为例,从山西大同到东部和南部的用煤中心沈阳、上海、广州、北京、天津等地的距离分别为 1 270 km、1 890 km、2 740 km、340 km 和 430 km。据了解,从山西到山东,火车运费平均每吨 220 元左右,汽车则为每吨 270~280 元左右。随着经济高速发展,用煤量日益增大,加之煤炭生产重心西移,运距还要加长,压力还会增大。因此,如何高效地利用有限的煤炭资源,是摆在东部地区面前的首要问题。

我国的大小煤田遍布于全国各地。在煤田上方有数量众多的村庄、工厂和城镇,各矿区都存在不同程度的建筑物下压煤问题。据对国有重点煤矿的不完全统计,截至 1996 年,我国生产矿井“三下”压煤量高达 137.9 亿 t,随着经济社会发展,村镇规模不断扩大,新矿区和新井田的建设,目前实际压煤量远高于这一数字。从分布区域上看,人口密集、村庄集中的河南、河北、山东、安徽、江苏五省区村庄压煤占我国“三下”压煤总量的 55%以上。

以山东省为例,全省煤炭资源保有探明储量约 310 亿 t,可采储量 81 亿 t,且 95%以上已被生产建设矿井占用。生产建设矿井保有地质储量 218.93 亿 t,其中可采储量 63.69 亿 t,且“三下”压煤达到 31 亿 t,约占可采储量的 48.7%,经济可采储量仅为 32 亿 t 左右,按照目前的生产能力和采出率,仅能维持 20 年左右。产煤大省与资源小省的矛盾日益突出,而且大型煤炭企业基本无后备接续资源。同样,郑州煤业集团可采储量 1.96 亿 t,压煤量高达 1.18 亿 t。截至 2007 年底,河北省国有煤炭企业剩余地质储量为 80 亿 t,“三下”压煤达 46 亿 t,约占 57.5%,仅开滦、峰峰、邢台、邯郸四大煤业集团的村庄压煤量就达 33.5 亿 t,约占 49%。

在一些开采较早的老矿区,随着可采资源的枯竭,村庄等建筑物下压煤问题也尤为突出,煤矿面临村庄搬迁征地难、搬迁费用高、地方政府积极性不高等问题,正常开采的难度越来越大,难以保证稳定生产,这些地区煤炭产量规模将难以增加。“三下”压煤问题得不到解决,不仅会损失煤炭资源,而且还会影响矿井的生产布局,合理的开采方法是解决上述问题的关键。

人们普遍认为山西大同煤矿集团具有开采不尽的煤炭资源,“三下”压煤问题并不迫切。促使各矿遇到煤柱绕着走,先挑条件好的采,以至造成煤柱周围煤层开采完毕、系统报废后,煤柱成为“孤岛”,开采越来越难。所属的各个矿从

2004 年开始相继出现了不同程度的资源趋紧、接替紧张的局面。截至目前,该集团能利用的储量为 30 亿 t,可采储量为 6.9 亿 t,按照现有的开采能力,仅能维持生产 18 年,而其“三下”压煤量为 6.5 亿 t。因此,为摆脱困境,延长矿井服务年限,采用有效的技术途径最大限度地采出村庄等建筑物下压煤已势在必行。

据第三次全国煤炭资源预测与评价显示,我国煤炭资源总量约为 5.57 万亿 t,探明煤炭资源总量达 1.3 万亿 t。国土资源部最新预测我国煤炭资源可采储量达 2 064 亿 t,净有效量 1 145 亿 t。以净有效量 1 145 亿 t 和煤炭采出率为 30% 计算,可采出量为 343.5 亿 t;若以 2008 年原煤产量 26.91 亿 t 测算,仅可保证不足 13 年的产量;则不到 2023 年,343.5 亿 t 储量将被完全采出。若采用重点煤矿矿井的开采方法,即采出率为 50%,以净有效量 1 145 亿 t 计算,其可采储量为 572.5 亿 t,也仅可保证不足 22 年的产量,而煤炭资源总量是有限的,尤其是我国人均占有经济可采储量不足 145 t,不足世界平均水平的 53%,更是要求我们要千方百计地提高煤炭资源采出率。

社会科学文献出版社出版的《2007 中国能源发展报告》指出,我国目前煤炭平均采出率仅为 30%~35%,不足世界先进水平的一半,其中国有大型煤矿占 45%,地方煤矿约占 30%,小煤窑占 10%~15%,资源浪费十分严重。据保守推算,在 1980~2000 年,我国累计浪费煤炭资源 280 多亿吨。而在美国、澳大利亚、德国、加拿大等发达国家,资源采出率能达到 80% 左右,每采出 1 t 煤只消耗 1.2~1.3 t 资源,而我国却需要消耗 3.3 t 甚至更多的煤炭资源。并且随着我国经济的快速发展,对煤炭的需求量会逐年增加,提高煤炭的采出率是煤炭资源高效利用的有效途径之一。

按照 2007 年的原煤产量 25.36 亿 t 和煤炭平均回采率 30% 计算,如果回采率提高 1 倍,全国每年将节约煤炭资源 42.26 亿 t 左右。如果到 2015 年以前煤炭回采率大体保持 50% 的平均水平,则 8 年间将至少节约 300 亿 t 煤炭资源,相当于我国煤炭资源的可采年限在目前的基础上又延长了 10 年。正如中国煤炭加工利用协会副会长、中国煤炭工业节约能源办公室副主任洪绍和所述:提高煤炭资源采出率,合理开发和利用煤炭资源,延长矿井寿命,提高煤炭利用效率是完成我国“十一五”煤炭工业节能减排任务的有效途径。

因此,无论从提高“三下”压煤采出率的要求,还是从提高煤炭资源贫乏地区的采出率要求,都需要发展一种具有高采出率特征的采煤方法。

### 1.1.2 矿区环境保护的需要

在煤炭开采过程中形成的环境问题主要是对土地资源地破坏和占用、对水资源地破坏和污染极为严重。在我国,95% 煤炭开采是井工开采,煤炭采出后,

会形成大量采空区,致使成千上万的人需要搬迁,需要投入大量的人力、物力和财力。以安徽省为例,两淮矿区是全国重要的煤炭生产基地,多年大规模开采形成较大面积的采煤塌陷区。2007年塌陷区总面积 $250\text{ km}^2$ ,并以每年3万亩的速度递增。到2010年,两淮矿区所在的皖北五市需搬迁26.6万人。

矿井开采改变了水资源的循环,破坏了自然水循环状态,而且矿井水管理不善,导致矿井污水遍地流淌,严重损害矿区环境。据统计,2007年全国矿区外排矿井水42亿 $\text{m}^3$ ,利用率仅为26%,排放的大量废水给矿区及周边区域造成了严重环境污染和水污染,加重了水资源危机,并严重威胁了矿井生产安全。

煤矸石是碳质、泥质和砂质页岩的混合物,具有低发热值,在掘进、开采和洗煤过程中排出的固体废物。从煤炭开采来看,中国每年生产1亿t煤炭,排放矸石1400万t左右,从煤炭洗选加工来看,每洗选1亿t炼焦煤排放矸石量2000万t,每洗1亿t动力煤,排放矸石量1500万t。目前全国堆积存放的煤矸石总量约35.5亿t(占全国工业固体废弃物排放总量的40%以上),矸石淋溶水将污染周围土壤和地下水,而且煤矸石中含有一定的可燃物,在适宜的条件下会发生自燃,在当前成规模的1500余座矸石山中,有389多座在燃烧,排放的二氧化硫、氮化物、碳氧化物和烟尘等有毒有害气体污染大气环境,严重危害矿区居民的身体健康,有的甚至发生矸石山爆炸,造成人员伤亡。如辽宁本溪矿区曾发生过因矸石自燃造成人员中毒死亡的事故。

煤矸石的弃置不用,压占大量土地。当前矸石的堆放压占土地约7500 $\text{hm}^2$ ,每年煤炭生产和加工新生产煤矸石3亿~3.5亿t,增加占地200~300 $\text{hm}^2$ 。2005年排放的煤矸石综合利用率仅为43.5%,其中,67%是用来发电。预计2010年,煤矸石和洗矸排放总量将超过5亿t,即使利用率达到70%,净排放堆存量每年仍然还有1.5亿t,还要增加1亿t左右的矸石电厂粉煤灰以及地表塌陷面积6200 $\text{hm}^2$ 。

煤矿开采造成的环境问题,给企业和政府增加了困难,不仅影响了煤矿的正常生产,还会引起工农关系等一系列社会问题,给社会增添了不安定因素。为保护矿区环境,世界许多产煤国家都制定了相关政策或措施。如苏联,20世纪70年代以来,通过一系列决议和条例,规定在采矿区要保存和合理使用土壤耕作层。在我国,保护环境是一项基本国策,并于1979年颁布《中华人民共和国环境保护法》,随着国家环保执法力度的不断加大,人们对环境质量要求的不断提高,解决煤矿开采污染环境的问题显得越来越突出,煤炭开采也必将进入绿色开采的崭新阶段。因此,需要发展安全高效、环境协调的采煤新方法,以解决煤矿开采带来的环境污染问题。

### 1.1.3 矿区可持续发展的需要

我国学者刘培哲指出,可持续发展最现实的特征有三点:一是鼓励经济增长;二是以保护自然为基础,与资源和环境的承载能力相协调;三是以改善和提高生活质量为目的。可见,可持续发展是生态、经济、社会三位一体的协调发展,生态持续是基础,经济持续是条件,社会持续是目的。其宗旨是:“既要满足当代人的需要,又不损害子孙后代满足其需要能力的发展”,主张人类与自然和谐相处,从而实现人地关系的 PRED 协调,即人口(P)、资源(R)、环境(E)与发展(D)的协调。据此,矿区的可持续发展可归纳为:在严格的法制管理和市场经济调控下,运用科学的手段,合理、节约、环保高效地开采和利用煤炭资源,使其对社会和环境的负效应降到最低,确保经济、社会和环境的可持续发展。

煤炭资源是一种不可再生耗竭性资源,它是一种重要的有多种用途的有机原料,但它的总量是有限的,其不可再生性特点制约了矿区的可持续发展。

矿区可持续发展要求对煤炭资源的可持续开采,即要有计划、有序开采,既不要浪费资源,又不能抢子孙后代的资源,更不能掠夺式开采,不合理的开采方式往往会造成环境的损害或资源的浪费。而且环境的损害是不可逆的、无法恢复原貌的。近年来,在煤炭需求快速增长的拉动下,一些煤矿不顾客观条件盲目扩大生产,超能力生产现象相当严重,2004 年全国超能力生产的煤矿(井)有 5 305 处,超能力产量 1.8 亿 t,带来一系列严重后果:一是造成采掘失调,矿井服务年限大大缩短;二是造成煤炭资源大量损失浪费,部分煤矿主受利益驱使,大干快上,采厚弃薄,采易弃难,2005 年我国损失浪费煤炭资源 20 亿 t 左右,与采出量基本相当;三是造成生态环境严重破坏,加剧了煤炭开采与环境的不适应状况;四是必要的设备检修维护得不到保障,造成生产安全事故频繁发生。这些都影响了矿区的可持续发展。

随着人们对环境的关注,对社会可持续发展的认识,煤炭企业的众多负面效应也将凸现,影响煤矿企业健康持续发展的的问题也日渐暴露,有些问题已经影响或制约了煤炭企业的生存和发展,诸如环境的污染、资源的浪费等。但从目前形势来看,在今后一段时间内,还没有较经济、可靠的能源能替代煤炭,为了确保经济和社会的可持续发展,我们必须继续开采利用它,为此解决矿区可持续发展问题已是势在必行。

制约矿区可持续发展的根本原因是煤炭资源的不可再生性和开采方法,其中,目前的技术条件下煤炭资源的不可再生性是无法改变的,开发满足可持续发展要求的煤矿开采新方法则成为解决矿区可持续发展问题的关键。

综上所述可知,我国急需发展新的具有高效安全、高采出率、环境协调的技

术特征的采煤方法。为此,中国矿业大学率先提出胶结性膏体材料全部充填开采方法,解决“三下”压煤问题,并投资近 1 000 万元建设了充填采矿实验室。2005 年 8 月 4 日,国家发改委能源局副局长吴吟和高技术产业司有关同志组成的调研组对实验室考察后,认为:“传统的‘三下’(建筑物下、铁路下、水体下)采煤技术,在实际运用中存在着煤炭采出率低、控制地面沉陷难、搬迁村庄难度大等突出问题。膏体充填采矿技术的开发应用,是煤炭工业贯彻落实科学发展观、实现绿色采矿的重要举措,具有‘高安全性、高采出率、环境友好’的基本特征,是一种新的绿色采矿技术,也是 21 世纪采矿技术的重要发展方向,是煤炭开采技术的革新,将为煤炭工业健康发展注入新的活力”。

煤矿膏体充填开采在我国是一个新兴研究方向,开展充填开采岩层控制理论与技术的研究,将对我国国民经济发展、社会稳定、生态环境的保护具有极其重大的现实意义和深远的历史意义。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 充填技术的发展历史与现状

膏体充填是 1979 年德国在格伦德铅锌矿首先发展起来的第四代先进充填技术。世界上矿山充填发展已有近百年的历史,经历了废石干式充填、水砂充填、低浓度胶结充填、高浓度充填/膏体充填等四个发展阶段,一般认为:

第一个阶段,20 世纪 40 年代以前,以废石干式充填为代表,充填的目的是处理废弃物。如澳大利亚塔斯马尼亚芒特莱尔矿和北莱尔矿在 20 世纪初进行的废石干式充填;加拿大诺兰达公司霍恩矿在 20 世纪 30 年代将粒状炉渣加磁铁矿充入采空区;中国 20 世纪 50 年代初期废石干式充填成为金属矿山的主要采矿方法之一,1955 年在地下开采的有色金属矿山中采用废石干式充填方法的占 38.2%,在黑色金属矿山中达到 54.8%。自 20 世纪 50 年代以后,废石干式充填方法所占比重逐年下降,1963 年中国有色金属矿山采用废石干式充填方法的只有 0.7%。

第二阶段,20 世纪 40~50 年代,以水砂充填为代表。水砂充填在国内外煤矿一度作为解决地表开采沉陷,保护建(构)筑物的主要方法,曾经得到比较广泛的应用。世界上水砂充填最先进、应用最好的是波兰。1967 年波兰水砂充填法采煤占到总产量的 50.2%,目前,水砂充填产煤量仍占波兰煤炭总产量的 10%~20%。波兰以水砂充填为主,配合协调开采等措施,成功进行了卡托维兹(Katowice)、比托姆(Bytom)等城市下采煤。波兰吴杰克煤矿(Wujek)是欧洲

最大的水砂充填矿井,年产量 220 万 t,水砂充填产煤量占 70%,充填管线最长达 4.5 km,典型的水砂充填工作面布置在卡托维兹市国际铁路车站下,工作面煤壁长 214 m,走向长 2 000 m,采高 3.2~3.5 m(煤层厚度 7 m 左右,分两个分层开采),煤层倾角  $4^{\circ}\sim 6^{\circ}$ ,采深 700 m,采用综合机械化采煤,液压支架为带铰接尾梁和爬梯的支撑掩护式,其中尾梁由固定在掩护梁上的立柱支撑,采煤机割煤以后,即用圆木架棚,液压支架顶梁作用在圆木架棚下面支护顶板,支架后面每 3.5~4.2 m 为一个充填步距,充填区由圆木架棚和木点柱支护,用木点柱与编制塑料布作隔离墙,水砂充填材料的水砂比为 1:1,一天一个正规循环,两班采煤,一班充填,工作面煤炭产量 3 500 t/d,年产量超过 100 万 t。中国也是世界上最早应用水砂充填的国家之一。1901 年扎赉诺尔煤矿开始应用水砂充填。1952 年以后水砂充填逐渐在抚顺、扎赉诺尔、阜新、鹤岗、辽源、蛟河、井陉、新汶等推广应用。1957 年水砂充填采煤量达 1 117 万 t,占全国煤炭产量的 15.58%。1965 年,山南锡矿首次采用尾砂水力充填,由于其系统复杂、成本高等原因,20 世纪 70 年代以后,被逐步淘汰,目前中国煤矿已经基本不用。

第三阶段,20 世纪 60~70 年代,以低浓度尾砂胶结充填为代表。由于非胶结的水砂充填体无自立能力,难以满足采矿工艺高回采率和低贫化率的需要,在水砂充填工艺得以发展和推广应用以后,开始发展采用尾砂胶结充填技术。如澳大利亚芒特艾萨矿,20 世纪 60 年代采用低浓度尾砂胶结充填工艺回采底柱。20 世纪 70 年代中国凡口铅锌矿、招远金矿和焦家金矿率先应用细砂胶结充填。目前,中国有 20 多座金属矿山应用细砂胶结充填。

第四阶段,20 世纪 80~90 年代,以高浓度、膏体充填为代表。1979 年德国格伦德铅锌矿为了克服低浓度胶结充填泌水严重等问题,在世界上首次试验膏体充填技术。试验成功以后,逐渐在南非、英国、美国、摩洛哥、俄罗斯、加拿大、澳大利亚、葡萄牙、坦桑尼亚、土耳其等国家的金属矿山得到发展和应用。需要指出的是,金属矿山采用膏体充填技术并不是为了控制地表沉陷,而是为了提高矿石采出率和出矿品位。中国 1994 年在金川有色金属公司二矿区建成第一条膏体泵送充填系统,之后铜绿山铜矿、湖田铝土矿、喀拉通克铜矿等也建设了膏体充填泵送系统。

### 1.2.2 开采沉陷的理论研究现状

地下有用煤炭被采出后,开采区域周围的岩体原始应力平衡状态受到破坏,造成应力重新分布,并寻求新的平衡,从而使岩层和地表产生移动变形和非连续性破坏,这种现象称为“煤矿开采沉陷”,随着地下开采工作面的推进,采场顶板的变形过程与上覆岩层的变形过程是不同的,即采场的顶板岩层变形、层面开

裂、弯曲、离层,达到极限跨距开始断裂、垮落,形成初次垮落乃至周期性垮落过程。在非充分采动过程中,采场上覆岩层表现出垮落、断裂、离层、移动和变形等特征,形成四带,即垮落带、断裂带、离层带和弯曲下沉带。在充分采动后,上覆岩层形成三带即垮落带、断裂带和弯曲下沉带,最终表现为地表大范围的下沉。地表沉陷幅度主要取决于开采煤层的厚度及上覆岩层的岩性,上覆岩层形成一个由动态到静态的沉陷发展过程,导致地表的建筑物、水体、耕地、铁路、桥梁破坏等诸多灾害性后果。开采沉陷是煤矿开采对环境影响的一个重要方面,井工开采与环境保护是当今可持续发展战略的主题之一,也是广大科技工作者的课题之一,寻求科学合理的解决途径是当代科技工作人员不可推卸的责任。

国内外对开采沉陷的研究由来已久,早在 15~16 世纪,人类就注意到地下开采引起的地表和岩层移动对人类生活和生产造成的影响。当时,比利时就颁布了一项法令,对因开采而使列日城的地下含水层水源受到破坏的责任人处以死刑。而在英国法院,记载有 15 世纪初有关开采损害财产的争论和诉讼。20 世纪 30 年代,在一些矿业比较发达的国家,如苏联、波兰、德国、澳大利亚、加拿大、日本和美国等国家,已把岩层与地表移动作为一项重点研究工作,把这项研究工作作为一门学科而进行研究始于 20 世纪 20 年代,到 60 年代得到了迅速发展。多年来众多的研究者进行了大量的研究工作,取得了丰硕的研究成果。采矿工作者与测量工作者分别从不同的角度采用不同的方法对岩层移动与开采沉陷的规律进行了研究,前者着重对采动岩体的变形行为机理进行分析研究,后者则偏重对采动岩体的行为进行数理统计分析与描述,提出了众多典型的解释和控制采场矿山压力显现的假说与理论。

开采沉陷理论的发展概括起来可以分为三个阶段:① 开采沉陷的初步认识和研究阶段,自 1838 年比利时列日城下开采所引起的地表塌陷的认识开始到二战前夕。② 开采沉陷理论的形成阶段,二战以后至 20 世纪 60 年代末。③ 开采沉陷现代理论研究阶段,20 世纪 70 年代至今。

1839 年比利时组成专门委员会对列日城受开采影响而引起的破坏进行了调查,形成了最初开采沉陷学的“垂直理论”假设。1858 年比利时人哥诺(Gonot)在观测资料和“垂直理论”的基础上提出了“法线理论”,后又被 Dumont 进行了修正,提出了下沉量的计算公式  $W = m \cos \alpha$ 。1876~1884 年德国人依琴斯凯(Jicinsky)提出了“二等分线理论”,1882 年耳西哈教授提出了“自然斜面理论”,1885 年法国人 Fayol 提出了“圆拱理论”,1889~1897 年豪斯提出的“分带理论”等,至此学者们对覆岩变形移动与地表下沉关系有了初步认识,并建立了相关的几何理论模型,这些理论成果为后来积分网格法和影响函数法的诞生在某种程度上起到了催化作用,但它们仅局限于简单、直观的几何图形上,对岩

体的力学特性仍未予以考虑,故不能描述岩体与地表沉陷的本质过程。

20 世纪开采沉陷学科迅速发展并逐步走向成熟。1903 年, Halbaum 将采空区上方岩层看作悬臂梁,推导出地表应变与曲率半径成反比理论。1909 年,波兰学者 Korten 根据实测结果提出了水平移动与变形的分析。1923~1932 年,德国学者斯奇米茨(Schimizx)、凯因霍斯特(Keinhost)和巴尔斯(Bals)等研究了开采沉陷影响的范围及其分带,形成了影响函数的概念。1940 年,德国学者派茨(Perz)等进一步研究发展了开采影响函数分布理论。1950 年,波兰学者布德雷克(Budryk)和克诺特提出了几何理论,得出了正态分布的影响函数。1960 年,南非的沙拉蒙(Salamon)应用弹性理论提出了面元原理,西德学者克拉茨(H. Kratzsch)总结概括了煤矿开采沉陷的预测方法,并出版了著作《采动损害及其防护》。苏联学者布克林斯基建立了在移动衰减函数基础上的岩层移动变形计算方法,研究了采动影响条件及允许变形,并出版了著作《矿山岩层与地表移动》。近二三十年来,由于一些相邻学科与开采沉陷相互渗透、互相促进,开采沉陷逐步发展成为一门综合性、边缘性的学科,并在概念、方法、手段上都有了很大发展。

中华人民共和国成立后,我国主要矿区先后开始地表移动观测,积累了大量实测资料,初步提出了地表移动与变形的计算公式及参数的确定方法。1965 年,刘宝琛等以随机介质理论为基础,用概率理论建立了研究煤矿地表移动的概率积分法,并与廖国华合作出版了专著《煤矿地表移动的基本规律》。经过多年的研究发展,目前已经成为我国最成熟、应用最广泛的技术方法。1978 年,刘天泉等对水平煤层、缓倾斜煤层、急倾斜煤层开采引起的覆岩破坏与地表移动规律作了深入研究,并提出了保安煤柱的开采方法,1981 年,他又和仲惟林等学者合作,研究提出了覆岩破坏的基本规律,并针对水体下采煤取得了一些经验性的成果和方法,提出了导水裂隙带的概念,给出了垮落带与导水裂隙带计算公式,为提高煤层开采上限、减少煤炭资源损失作出了巨大贡献。1979 年,刘宝琛等以概率的观点,研究了开采对岩体的影响,给出了一系列计算岩体位移场和变形场的公式。1981 年,何国清等提出了从随机观点研究碎块体移动规律的碎块体理论,得出了和威布尔分布密度函数形式相同的下沉单元盆地表达式。1983 年,马伟民、王金庄等组织编著了《煤矿岩层与地表移动》,并详细介绍了该领域的研究成果。周国铨、崔继宪提出了负指数函数法计算地表移动。何万龙等总结出山区地表移动计算公式。白矛、刘天泉对条带开采法中条带尺寸进行了研究。李增琪将开挖引起的地表移动看成是层间既满足力学平衡条件又满足几何接触条件的多层宏观各向同性的弹性力学问题,采用富氏积分变换法计算岩层和地表移动,后来杨硕对其又进一步完善并应用于生产。1987~1989 年,张玉卓应

用边界元法研究了断层影响下地表移动规律及提出了岩层移动的错位理论。吴立新提出了条带开采覆岩破坏的托板理论,邓喀中提出了岩体开采沉陷的结构效应。崔希民等以 Knothe 时间函数为基础,给出了符合实际地表移动过程的时间函数。杨伦、于广明的岩层二次压缩理论,将地表沉陷与岩层的物理力学性质联系起来。于广明应用分形及损伤力学研究了开采沉陷中岩层非线性影响的地表沉陷规律。邓喀中采用断裂力学、损伤力学相结合的方法,分析了岩层及地表移动的影响。李云鹏、王芝银先后提出了开采沉陷黏弹塑性损伤模型和裂隙损失岩体动态有限元分析模型。王建学提出了开采沉陷的塑性损伤结构理论。

近年来随着科学技术和研究手段的提高,开采沉陷理论研究得到了进一步发展。特别是计算机技术的飞速发展,使数值模拟和人工智能被成功应用到开采沉陷研究中,进行连续或非连续介质的较大变形分析,为研究大范围岩层移动规律提供了条件。如唐春安等研究与开发的 RFPA<sup>2D</sup>,能够真实地模拟开采过程中覆岩变形、离层、断裂及地表沉陷规律,为采场覆岩移动规律研究提供了一种新方法;美国明尼苏达 ITASCA 软件公司开发的 FLAC<sup>2D</sup>、FLAC<sup>3D</sup>、UDEC<sup>2D</sup>、UDEC<sup>3D</sup>、PFC 等一系列大型商业化计算软件,现在被广泛应用于地理勘探、土木建筑、采矿等行业。1988 年,谢和平利用非线性大变形有限元程序对巷道和采场引起的岩层移动进行了定量和定性分析,取得了理想效果,为岩层移动定量和定向的预测提供了一种新方法。1989 年,何满潮应用非线性光滑有限元法研究了软岩强度低、变形能量大的力学机制,建立了软岩工程的设计方法。麻凤海应用离散元法研究了岩层移动的时空过程,对岩体开采沉陷的状况进行了很好的模拟。高延法采用黏塑性有限元法对岩层移动进行计算研究,认为地表水平移动是岩层与松散冲积层倾斜变形引起的,水平移动值取决于倾斜和表土层翘曲变形两种因素。可以说,我国在岩层移动和开采沉陷的理论研究和实际应用方面都取得了巨大的成就。

### 1.2.3 开采沉陷控制技术研究现状

国内外学者、专家和工程技术人员为了减弱开采对地面建筑物、水体、铁路、桥梁、管路、通信光缆等设施的损害,保护农田及生态环境,开发了许多控制覆岩及地表沉陷的技术措施,发展到今天成为我国主要控制地表沉陷的“三下”开采技术,其主要方法和技术特点如下。

#### 1. 留设保护煤柱法

该方法多用于保护工业广场、井筒及重要建筑物或用于浅部开采,其针对不同的保护对象,留设一定尺寸的保护煤柱,再对煤柱外的煤炭资源进行开采回收。这种方法对保护地面建筑物与设施无疑是最有效的,但通常会造成煤炭资