

■ 郭惟嘉 等 著

MEIKUANG CHONGTIAN KAICAI JISHU

---

# 煤矿充填开采技术

煤炭工业出版社

山东科技大学学术著作出版基金资助  
教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0843)资助  
国家重点基础研究发展计划(2011CB11900)资助  
国家“973”项目前期(2011CB411906)资助  
国家自然科学基金重点项目(51034003)资助  
国家自然科学基金(51274132,51104094)资助  
山东省高等学校科技计划(J111E14)资助  
国家自然科学基金煤炭联合基金(U1361105)资助  
矿山灾害预防控制国家重点(培育)实验室资助

# 煤矿充填开采技术

郭惟嘉 张新国 刘进晓 刘音 黄屹峰 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

煤矿充填开采技术 / 郭惟嘉等著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2013

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4263 - 9

I. ①煤… II. ①郭… III. ①充填法—采煤方法  
IV. ①TD823.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 156079 号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)  
网址: [www.cciph.com.cn](http://www.cciph.com.cn)  
三河市万龙印装有限公司 印刷  
新华书店北京发行所 发行

\*  
开本 787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 23 插页 1  
字数 546 千字 印数 1—1 000  
2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷  
社内编号 7091 定价 96.00 元

**版权所有 违者必究**

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

## 内 容 简 介

本书主要包括充填开采围岩控制机理研究、充填材料输送技术研究、充填材料配比试验与质量控制、煤矿主要充填开采技术、煤矿充填高产高效关键控制技术、充填开采评价技术及其应用、典型矿区充填效果实测、充填开采环境治理与评价、虚拟仿真技术在充填中的应用,以及城市垃圾充填关键技术及应用等内容。

本书可供采矿工程、安全工程、地质工程、测绘工程、环境保护工程等专业研究生、本科生,相关领域工作的科技工作者,以及矿山工程技术人员参考使用。

## 前 言

我国是一个富煤、少气和缺油的国家，煤炭作为我国主体能源的地位在今后50年内不会改变，在我国一次能源消费结构中长期是我国的主要能源。随着我国经济的高速发展，对煤炭资源的开发利用程度越来越高，建筑物下、铁路下、水体下和承压水上（“三下一上”）压煤开采成为我国尤其是中东部煤矿开采面临的主要问题。据对全国国有重点煤矿不完全统计，我国目前“三下一上”压煤 $1.379 \times 10^{10}$  t，其中建筑物下压煤 $9.468 \times 10^9$  t，铁路下压煤 $2.417 \times 10^9$  t，水体下压煤 $1.905 \times 10^9$  t。随着国民经济发展及城市化进程的进一步加快，实际压煤量要远远大于这一数字。人类在消费煤炭资源的同时，也面临着开采产生的煤矸石和电厂粉煤灰等所带来的空气污染、水体污染、耕地占用等一系列问题。因此，为延长矿井服务年限，减少固体废弃物污染，在保证地表建（构）筑物安全的前提下采取有效的技术途径最大限度地开采煤炭资源已势在必行。

充填开采是解放“三下一上”压煤的理想途径，是提高煤炭资源回收率和安全生产的一项重要举措，是解决矿山矸石污染及处理城市固体垃圾的一个新方法。作者经过多年执著的追求和坚持不懈的研究，以矿山开采沉陷学、开采损害与环境保护和矿山压力与岩层控制理论为出发点，深入研究了充填采场围岩控制机理、充填材料管输特性、主要充填开采技术，同时研发了充填开采高产高效控制技术及其装备，提出了充填效果评价体系并对典型矿区充填效果进行了分析，建立了充填开采矿山环境质量评价、环境影响评价体系并提出矿区环境可持续发展的途径，同时研究了虚拟仿真技术在煤矿充填开采中的应用并进一步分析了城市垃圾作为潜在充填材料的研究现状及发展前景。

全书共分为11章：第1章主要介绍了国内外充填开采技术发展现状、煤矿充填开采发展状况及前景。第2章主要研究了充填采场围岩控制机理。第3章主要介绍了充填材料两相流、结构流输送技术及充填管道磨损控制机理。第4章主要研究了充填材料配比试验及质量控制。第5章主要介绍了我国常用的煤矿充填开采技术。第6章主要研究了煤矿充填高产高效关键控制技术。第7章主要介绍了充填开采评价技术及其应用。第8章主要针对典型矿区充填效果进行了地表岩移观测和井下现场监测综合评价。第9章主要介绍了充填开采

环境治理与评价。第 10 章主要研究了虚拟仿真技术在充填开采中的应用。第 11 章主要介绍了城市垃圾作为潜在材料来源的充填开采关键技术及应用前景。

本书的成稿得到宋振骐院士的关心和指导，在此表示衷心感谢。本书的部分成果是在许多煤矿的合作中取得的，在此感谢淄博矿业集团岱庄煤矿、泮水煤炭有限公司张赵煤矿、尤洛卡矿业安全工程股份有限公司等单位及相关领导的大力支持。同时本书还选取了一些国内外的充填采矿技术资料，在此向选取资料的作者表示感谢。

在煤矿充填开采理论与技术方面，本书虽然取得了一些有益的研究成果，但很多内容还有待进一步完善。由于作者水平有限，书中不足之处，敬请读者批评指正。

**作 者**

2013 年 6 月

# 目 次

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 国外充填开采技术研究现状 .....	4
1.3 国内充填开采技术研究现状 .....	5
1.4 煤矿充填法开采发展现状 .....	6
1.5 充填开采主要研究方向、发展趋势及前景 .....	10
参考文献 .....	13
<b>2 充填开采围岩控制机理研究</b> .....	16
2.1 充填采场围岩力学相应机制 .....	16
2.2 充填采场围岩稳定评估方法 .....	20
2.3 非胶结充填围岩控制机理 .....	26
2.4 胶结充填围岩控制机理 .....	31
2.5 短壁充填开采覆岩运动规律 .....	36
2.6 长壁充填开采覆岩运动规律 .....	53
2.7 充填开采地表沉陷控制机理 .....	63
参考文献 .....	65
<b>3 充填材料输送技术研究</b> .....	68
3.1 两相流输送技术 .....	68
3.2 结构流输送技术 .....	82
3.3 充填管道选择及磨损控制 .....	92
参考文献 .....	102
<b>4 充填材料配比试验与质量控制</b> .....	104
4.1 充填材料选择依据 .....	104
4.2 常用充填材料及其性质 .....	104
4.3 充填体强度设计 .....	137
4.4 非胶结充填材料配比试验 .....	146
4.5 胶结充填材料配比试验 .....	152
4.6 (超)高水材料配比试验 .....	170
4.7 充填质量控制 .....	182

参考文献	188
<b>5 煤矿主要充填开采技术</b>	<b>191</b>
5.1 覆岩离层注浆充填技术	191
5.2 破碎矸石抛掷充填技术	192
5.3 低压管道风力充填技术	195
5.4 综合机械化自压式矸石充填技术	197
5.5 似膏体自流充填技术	201
5.6 膏体泵送充填技术	204
5.7 高水充填	211
5.8 超高水充填技术	215
参考文献	229
<b>6 煤矿充填高产高效关键控制技术</b>	<b>231</b>
6.1 管输性能室内模拟试验	231
6.2 管道压力在线监测预警技术	241
6.3 满管自流自动清洗技术	247
6.4 充填体在线监测技术	249
6.5 充填区隔离墙搭设技术	251
6.6 充填控顶区破碎顶板支护技术	253
6.7 充填工作面超前支护优化技术	257
参考文献	262
<b>7 充填开采评价技术及其应用</b>	<b>264</b>
7.1 充填开采评价概述	264
7.2 GIS 在充填评价中的应用	270
7.3 GPS 在充填评价中的应用	273
参考文献	277
<b>8 典型矿区充填效果实测</b>	<b>279</b>
8.1 充填开采地表岩移观测	279
8.2 充填膏体井下现场实测	302
8.3 充填开采地表岩移参数总结	308
参考文献	308
<b>9 充填开采环境治理与评价</b>	<b>310</b>
9.1 充填开采环境治理概述	310
9.2 矿山环境质量评价	311
9.3 矿山环境影响评价	314



---

9.4 矿山环境规划与管理 .....	321
9.5 矿区生态环境综合治理投资机制 .....	326
9.6 矿区环境与可持续发展 .....	329
参考文献 .....	333
<b>10 虚拟仿真技术在充填中的应用 .....</b>	<b>335</b>
10.1 虚拟仿真技术概述 .....	335
10.2 虚拟现实与系统仿真关系 .....	337
10.3 虚拟仿真系统制作流程 .....	337
10.4 虚拟仿真技术在充填方案中的应用 .....	343
参考文献 .....	347
<b>11 城市垃圾充填关键技术及应用 .....</b>	<b>349</b>
11.1 城市垃圾现状 .....	349
11.2 城市垃圾充填关键技术及应用前景 .....	354
参考文献 .....	358

# 1 绪 论

## 1.1 概述

我国是一个富煤、少气和缺油的国家,2011年全国预计煤炭储量4550 Gt,其中探明可采储量114.5 Gt,可供开采100年以上。我国煤炭资源赋存格局是北富南贫、西多东少,主要集中在山西、内蒙古、陕西、新疆、贵州和宁夏6省(自治区),占全国煤炭总储量的82.8%,而耗煤量较大的京、津、冀、鲁、苏、沪、浙、闽、台、粤、琼、港、桂13个省市煤炭储量仅占全国总储量的5.3%,消耗量却占全国煤炭总产量的65%以上。据中国煤炭工业协会预计,2020年我国煤炭消费需求将达到3 Gt。因此,煤炭作为我国主体能源的地位在今后50年内不会改变,在我国一次能源消费结构中将继续作为主要能源。

随着我国经济的高速发展,对煤炭资源的开发利用程度越来越高,建筑物下、铁路下、水体下和承压水上(“三下一上”)开采成为我国尤其是中东部煤矿开采面临的主要问题。据对全国国有重点煤矿不完全统计,我国目前“三下一上”压煤13.79 Gt,其中建筑物下压煤9.47 Gt,铁路下压煤2.42 Gt,水体下压煤1.9 Gt,随着国民经济发展及城市化进程的进一步加快,实际压煤量要远远大于这一数字。据山东省统计资料,截止到2010年底全省共有压煤村庄2072个,涉及65万农户200万人口,村庄下压煤2.24 Gt,占可采储量的59.6%。2012年前需搬迁的村庄达564个,像龙固、赵楼煤矿首采面一次性分别搬迁12个和11个村庄,特别是在一些开采较早的老矿区,随着可采资源的枯竭,村庄下压煤问题尤为突出。目前,济宁、菏泽及枣庄西部部分矿井已经到了不搬迁就被迫停产的境地。因此,为延长矿井服务年限,在保证地表建(构)筑物安全的前提下,采取有效的技术途径最大限度地采出建(构)筑物下(简称“建下”)压煤已势在必行。

长期以来,我国建下压煤主要采用村庄搬迁、条带开采、水砂充填和覆岩离层注浆等几种方式。目前,我国从建下采出的煤炭资源仅为233 Mt,占压煤总量的4%,尤其是中厚煤层开采75%是靠村庄搬迁来完成的。然而,继续采用村庄搬迁的办法越来越困难:一方面村庄搬迁土地征用困难、费用大,给煤矿企业带来了沉重的经济负担;另一方面由于搬迁距离过大,给农民带来了许多生产和生活上的不便。条带开采是减小地表变形的有效方法之一,但条带开采采出率仅为40%~60%,资源浪费严重,同时条带开采掘进量大,生产管理复杂,尤其是在厚煤层开采条件下采出率更低。水砂充填可以有效提高村庄下压煤的采出率,但存在几个问题:一是近年来随着开采的逐步加大,水砂资源越来越少,充填成本越来越大;二是水砂充填需要建立专门的输送和排水系统,同时构建专门的护壁和隔墙,工艺复杂,清理工作量大,充填强度不高;三是水砂充填工艺落后,劳动效率低,不能满足高效生产的需要。覆岩离层注浆是20世纪80年代初首先在波兰发展起来的一门采矿技术,但该方法充填效果存在较大争议,一般认为覆岩离层注浆地表减沉量不

超过 40%，达不到控制地表变形的目的。

人类在享受煤炭资源带来工业革命的同时，也受到开采产生的煤矸石和电厂燃煤所产生的粉煤灰等带来的空气污染、水体污染、占用耕地等一系列问题的困扰。煤矸石是煤炭生产和洗选过程中产生的废弃物，每年排放量相当于煤炭产量的 10% ~ 15%。目前，全国煤矸石总积存量已达 4.5 Gt，形成矸石山 1700 多座，占地 3 万多公顷，而且正以每年 100 Mt 的速度增长。煤矸石长期堆存，占用大量土地，污染水源，自燃后生成  $H_2S$ 、 $SO_2$  等有害气体，对生态环境构成巨大危害。为解决煤矸石排放导致的一系列问题，我国相继建成 80 多座以燃烧煤矸石、煤泥、劣质煤炭为主的电厂，由于所用燃料灰分较高，粉煤灰的排放量相当大，已成为我国潜在的最大固体废弃物来源之一。现阶段我国能源生产结构仍以火力发电为主，在相当长时间内将维持燃煤机组为主的格局。电力是清洁能源，但火力发电要排出大量的灰渣，每 10 MW 的装机容量需排放粉煤灰约 10000 t。全国发电机装机容量达  $1.1 \times 10^8$  kW 以上，其中燃煤火电站装机容量占 80%，年排放粉煤灰量 110 Mt 左右，且呈现不断上升的趋势。多年来未被利用的粉煤灰达 800 Mt 以上，且以每年 50 ~ 70 Mt 的速度增长。粉煤灰的处置大多以堆放为主，在多风季节灰尘四起，严重污染大气环境，需投入大量的资金和设备进行喷淋降尘，同时粉煤灰占用大量土地，污染江河湖海，严重破坏生态环境。《“十二五”资源综合利用指导意见》中提出：“到 2015 年，矿业资源总回收率与共伴生矿产综合利用率提高到 40% 和 45%；大宗固体废物综合利用率达到 50%；工业固体废物综合利用率达到 72%。”目前我国固体废物综合利用率较低，其中煤矸石的利用率达不到 40%，粉煤灰利用率达不到 50%，大部分固体废弃物只能以简单堆存的方式处理，造成了固体再生能源浪费。

矿山开采包括露天开采和地下开采两大类。露天开采必须剥离矿层上覆的岩土层，这些剥离的废弃物要占用大量的土地，同时废弃物中有害物质的释放会造成环境污染。地下开采必将造成地表沉陷，对地表产生的主要危害如下：对地表建（构）筑物、铁路、公路、堤坝、桥涵等产生危害或破坏；开采沉陷盆地会形成常年积水，导致土壤盐碱化、荒漠化等。此外，不合理的采矿活动会造成地质环境恶化，引发工程地质灾害，破坏自然环境及景观等。目前，我国因采矿业每年占用和破坏的土地高达  $3.4 \times 10^4$   $hm^2$ ，其中仅煤炭开采每年造成的地面塌陷就达  $3.0 \times 10^4$   $hm^2$ ，累计已达  $50 \times 10^4$   $hm^2$ 。以山东煤炭主产区济北为例，至 2009 年底因采煤造成土地塌陷达  $35 \times 10^4$  亩（1 亩 = 666.7  $m^2$ ），且以每年 3 万多亩的速度递增，预计到 2020 年全矿区塌陷土地将达  $70 \times 10^4$  亩，近 500 万农民将失去赖以生存的土地。开采活动已经对自然环境、经济环境、社会环境造成了严重的损害，影响了国民经济的可持续发展，日益引起了人们的重视。开采沉陷引起的土地损害可归纳为以下几种形式：

(1) 开采沉陷引起的地表裂缝、台阶下沉、塌陷坑及滑坡破坏，也被称为开采地表非连续移动变形破坏。这种沉陷破坏了原有的地形地貌，对地表生态、植被破坏严重，导致水土流失和土地的荒漠化，是开采沉陷土地损害最严重的形式之一。

(2) 降低了地表标高，形成低洼积水坑或沼泽地。在潜水位较高地区，由于开采沉陷使地下水位升到地表标高以上接近地表，就会形成积水坑、沼泽地或使地表盐碱化，破坏土地的经济使用价值。盐碱化严重时，一般植物都很难成活，这样的土地就成了不毛之地。我国黄淮海中部地区地势平坦，潜水位高，是我国人口较密集的粮棉重要产区，这里分

布着许多大型煤矿,如徐州、淮北、淮南、枣庄、兖州等矿区,还有一些金属、化工矿山,地表塌陷区比比皆是,对农业生态损害严重并有大量的常年积水区,最大深度达10 m左右。徐州矿区的塌陷区常年积水占其面积的1/4,淮南矿区开采塌陷老区的最大下沉深度已达19 m之多,沉陷积水约占总面积的12.6%,淮北矿区的塌陷区中常年积水面积已占其总面积的1/3。

(3) 开采引起湿陷性黄土裂缝损害主要包括晋、陕、蒙西区的汾渭谷地区,以及铜川、蒲白、澄合、韩城、晋城、潞安等地区,湿陷性黄土层的特性导致采动地表裂缝破坏,表土层的破碎在雨水冲刷侵蚀作用下造成土地大面积毁坏,复垦难度大、费用高。湿陷性黄土的抗拉伸变形能力小,采动极易形成垂直裂缝地表破坏。在地表水和地下水流动的作用下,采动地表裂缝扩大,裂缝间连通形成地表塌陷坑或冲刷沟破坏。地下开采对地表房屋的损害主要是由采动地表在垂直方向的移动变形(下沉、倾斜、扭曲)和水平方向上的移动变形(水平移动、拉伸与压缩变形)以及地表平面内的剪应变引起,不同性质的地表移动变形,对房屋的影响是不同的。采动地表产生的移动变形,破坏了建筑物与基础之间的初始平衡状态,伴随着力系的重新建立,使房屋结构中产生附加应力,从而导致房屋发生变形破坏。

(4) 开采沉陷构筑物损害主要包括地面铁路、公路、高压输电塔、线路、索道、电视转播塔、烟囱等高层建(构)筑物、堤坝、桥涵、管路及地下埋藏的各类建(构)筑物等。其中,井筒煤柱的开采已成为老井挖潜和报废矿井要解决的一个重要问题,也属于“三下”压煤开采的重要组成部分。

采矿造成的典型破坏如图1-1、图1-2所示。



图1-1 地表下沉



图1-2 地表斑裂

因此,科学合理地解决“三下一上”压煤、固体废弃物处理和开采损害等问题,减轻采矿业对自然、社会和生活环境的影响和破坏,最大限度地回收利用有限的资源,实现煤炭资源的“绿色开采”,是当前我国矿业领域急需解决的一项重大课题。充填开采作为“绿色开采”体系的重要组成部分,能有效控制上覆岩层运动和地表沉陷,保护地面建(构)筑物和生态环境,是解决村庄等建(构)筑物下压煤的理想途径。充填开采就是把煤矿附近的煤矸石、粉煤灰、炉渣、劣质土、城市固体垃圾等废弃物充填采空区,控制开

采引起的上覆岩层的破坏与变形,使地表等建(构)筑物变形保持在安全的允许范围内,实现建(构)筑物下不迁村及承压水开采,充分回收煤炭资源,保护矿区生态环境的采矿方法。

## 1.2 国外充填开采技术研究现状

矿山充填是为满足采矿业的需要而发展起来的,在国外已有 100 多年的历史。矿山充填首先在金属矿山中得到应用,在煤矿首次应用是 1915 年澳大利亚的塔斯马尼亚芒特莱尔矿和北莱尔矿。充填开采在波兰、德国应用效果好,波兰在城镇及工业建筑物下采煤时采用水砂充填法,采煤量占全国建筑物下采煤量的 80% 左右,使用的充填材料通常是河砂、煤矸石和电厂粉煤灰等;英国、法国、比利时等国都不同程度地采用了风力充填方法。经过近百年的发展,充填开采技术在金属矿山和煤矿均取得了长足的发展,国外充填采矿技术的发展主要经历了以下 4 个发展阶段。

第一阶段:20 世纪 40 年代以前。以处理固体废弃物为目的,在不完全了解充填物料性质和效果的情况下,将废料直接送入采空区。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直接充入采空区充填。

第二阶段:20 世纪 40—50 年代。为保护一座教堂基础安全,美国宾夕法尼亚州一个煤矿首次进行了水砂充填试验,随后南非、德国、澳大利亚等国相继应用了水砂充填工艺。由于水砂充填浓度较低,一般为 45%~60%,需要在采场大量脱水,同时由于水砂源的限制,在 20 世纪 70 年代该技术逐步被淘汰。

第三阶段:20 世纪 60—70 年代。由于非胶结充填体无自立能力,难以满足高采出率和低贫化率的要求,因此在水砂充填得以发展并推广之后开始研发胶结充填技术。1960 年加拿大国际镍矿公司开始试验波特兰水泥固结水砂充填技术,并于 1962 年在 Frood 矿投入生产应用。随着胶结充填技术的发展,这一阶段已开始深入研究充填材料特性、充填体与围岩相互作用机理及长期稳定性等。

第四阶段:20 世纪 80—90 年代。随着采矿业的发展,充填工艺已不能满足回采要求和进一步降低采矿成本及环境保护的需要,因而发展了高浓度胶结充填技术,如膏体充填、碎石砂浆胶结充填和全尾矿胶结充填等技术。国外如澳大利亚坎宁顿矿,加拿大基德克里克矿、洛维考特矿、金巨人矿和奇莫太矿,德国格隆德矿和奥地利布莱堡矿,以及南非、美国和俄罗斯的一些井工矿近年来也应用了这项技术。

国外在发展充填技术的同时也对开采沉陷理论进行了研究,人们从不同角度、按照不同标准进行了沉陷影响范围及采动后上覆岩层、地表变形移动规律等方面的研究。国外开采沉陷理论研究大致分 3 个阶段。

第一阶段:开采沉陷初步研究时期。19 世纪 30 年代后期到 20 世纪 20 年代期间,比利时工程师哥诺特在 1838 年通过对烈日城下开采引起的沉陷问题调查,提出了第一个开采沉陷理论——垂线理论,后经与法国工程师陶里兹共同改进发展成为“法线理论”。另外,依琴斯在 1876 年提出二等分理论和高斯理论,耳西哈在 1882 年提出自然斜面理论,裴约尔在 1885 年提出拱形理论,这些理论都对沉陷控制研究作出了一定贡献。

第二阶段:岩移理论形成时期。从 1923 年至 1940 年,舒密茨、坎因霍斯特等人相继

提出了开采影响分布的几何沉陷理论。苏联学者阿维尔辛通过塑性理论及实践经验提出了下沉剖面方程呈指数函数形式,并提出了水平移动与地面倾斜成正比的著名观点。波兰学者克诺特在1950年提出了几何理论,之后布德雷克解决了克诺特提出的下沉盆地中的水平移动及水平变形问题。波兰学者李特维尼申在1954年把开采过程作为一个随机过程,依据这一理论发展形成了至今在我国还在广泛应用的概率积分法。

第三阶段:开采沉陷理论的快速发展时期。20世纪80年代后,随着科学发展和研究手段的进步,研究人员又把新的理论和方法引入地表沉陷的研究中,如分形理论和损伤力学等。从20世纪70年代至今,在经典理论的算法基础上编程,3种主要的计算方法(有限元法、边界元法和离散元法)均在开采沉陷预计计算中得到广泛应用。

### 1.3 国内充填开采技术研究现状

国内充填开采技术的发展也经历了与国外类似的4个阶段,只不过国内的充填开采技术是在近40年内取得了较大的发展,总体落后国外10~20年。由于近年来我国,尤其是我国中东部地区的“三下一上”压煤问题越来越突出,国内学者对充填开采技术的研究达到了前所未有的高度。国家能源局于2012年4月底在山东泰安召开了全国煤矿充填开采现场会,国家能源局副局长吴吟出席会议并指出:要认真贯彻全国能源工作会议和煤炭工作会议精神,总结煤矿充填开采工作,推广煤矿充填开采经验,探讨扶持煤矿充填开采的政策措施,推动煤炭生产方式变革,促进煤炭工业科学发展,使国内学者对煤矿充填开采技术的研究达到了前所未有的高度。

国内矿山充填开采技术发展分为4个阶段。

第一阶段:在20世纪50年代以前,以处理固体废弃物为目的的废石干式充填。废石干式充填曾在20世纪50年代初期成为我国主要的采矿方法之一,主要问题是生产能力小和劳动强度大,满足不了高产、高效的要求。自20世纪50年代以后,废石干式充填比重逐年下降,目前基本处于被淘汰的边缘。

第二阶段:20世纪60年代,国内矿山开始采用水砂充填工艺。1965年在山南锡矿为了控制大面积地压活动,首次采用了尾矿水力充填工艺;湘潭锰矿也从1960年开始采用碎石水力充填工艺,取得了较好的效果;20世纪70年代在铜绿山铜矿、招远金矿和凡口铅锌矿等应用了尾矿水力充填工艺,至20世纪80年代水砂充填技术已在国内60余座有色、黑色等金属矿山中得到应用。

第三阶段:20世纪六七十年代,开始应用和研发尾矿胶结充填技术。国内初期胶结充填均为传统的混凝土充填,即完全按建筑混凝土的要求和工艺制备充填材料,这种传统的粗骨料胶结充填输送工艺复杂,对物料级配要求较高,因而一直未获得大规模推广使用。20世纪七八十年代,上述充填技术逐渐被细砂胶结充填技术取代。目前,以分级尾矿、天然砂和棒磨砂等作为集料的细砂胶结充填工艺与技术已日臻成熟,我国仍有20多座金属矿山应用细砂胶结充填技术进行开采。

第四阶段:20世纪90年代,国内开始发展高浓度充填技术,如膏体充填、碎石砂浆胶结充填和全尾矿胶结充填等技术。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并成功应用,之后铜绿山铜矿、湖田铝土矿、咯拉通克铜矿等相继建成了膏体充填泵送系统。

国内从 60 年代初开始对采动引起的地表沉陷影响进行研究,一些理论也是沿用国外的研究成果。由于我国煤矿赋存情况复杂,建(构)筑物下、水体下、铁路下压煤量巨大,我国专家学者在这方面做了大量的工作,在理论和实践方面均取得了重大进展。地表移动变形机理研究成果主要由刘宝琛、廖国华将波兰学者李特维尼申等建立的岩层或地表下沉预计随机介质理论引入我国,成为我国应用最广泛的地表下沉预计方法之一。刘天泉、马伟民、王金庄等对水平煤层、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,提出了导水断裂带概念,并总结了地表移动变形的一般规律。国家颁布的《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》,代表了我国在采动地表移动变形及其控制方面所取得的研究成果。刘长友研究了采空区全部充填情况下,充填体的压缩率对上覆关键层活动的影响规律。张华兴研究了宽条带充填全柱开采地表沉陷的主控因素,采用数值模拟的方法分析了充填率、充填体强度、隔离煤柱宽度对上覆岩层运动的影响。孙晓光开展了膏体建筑物下压煤开采的数值模拟研究,对膏体充填后地表沉陷控制、支承压力的分布进行了研究。

## 1.4 煤矿充填法开采发展现状

充填采矿法的分类方法很多,按照充填动力的不同可分为风力充填、水力充填、机械充填、矸石自溜充填等;按充填材料和输送方式的不同可分为用人力、重力或者机械设备将块石、砂石、土壤、工业废渣等干式充填材料输送到采空区的干式充填采矿法,用水力管道输送选厂尾砂、山砂、河砂、炉渣、矿渣、碎石等充填料充填采空区的水力充填采矿法,用水泥及其各种添加剂等或其他凝胶材料与选厂尾砂等配置成具有胶结性质的充填材料的胶结充填采矿法。目前我国充填法采煤主要有矸石干式充填技术、覆岩离层注浆充填技术、冒落矸石空隙注浆充填技术、(似)膏体充填技术、(超)高水充填技术。

### 1.4.1 矸石干式充填技术

矸石干式充填技术主要有自溜充填、简易机械充填、风力充填和人工垒砌矸石带 4 类。矸石自溜充填只能在急倾斜煤层中应用,在淮南、北京、北票及中梁山等矿业集团曾应用过这种充填开采方法;矸石风力充填对充填系统、设备和充填料的要求比较高,适用范围较小,国外在 20 世纪 80 年代曾开展过煤矸石充填采空区的研究。我国在 60—70 年代进行过矸石充填采空区的试验,结果表明矸石充填开采地表下沉系数大致在 0.4~0.5。以前的矸石充填开采工程实践表明,由于充填机械设备简陋、充填质量较差,导致对地表沉陷控制效果不佳,并且缺乏岩层控制理论指导和完善的充填设备支持,矸石充填工艺落后,充填作业对采煤生产影响很大,生产效率低,工人劳动强度较高,造成了矸石充填开采始终没有得到大的发展和推广。然而,由于矸石干式充填具有材料来源广、矸石不升井、充填开采成本远低于其他充填方式等显著优点,使许多学者开始加大对矸石充填开采的方法、矿压及岩层控制理论、矸石充填关键设备等问题的研究。钱鸣高院士提出了绿色开采概念和技术体系,认为充填采矿是解决开采环境问题的理想途径;张东升在预掘过断层处理技术中采用预掘硐室作为储矸空间,使煤与矸石得到合理置换,避免矸石升井,增加了煤炭产出;刘建功、郝永明等在邢东煤矿矸石充填中使用矸石充填输送机直接充填和高压泵巷道注浆的充填方法进行了矸石充填试验;张魁武等研究了掘进矸石井下处理方法;王宜振在枣庄煤矿 12<sub>下</sub> 煤 1216 工作面开展了矸石充填沿空留巷的试验;张吉雄在邢

东煤矿开展了巷采矸石充填技术研究；李宗峰在良庄煤矿矸石充填中应用了煤矸分离、矸石回填技术；王有俊分析了矸石充填的几种可行方法，并指出了每种方法的适用性；淄博许厂煤矿实施了矸石置换条带煤柱的试验；新矿集团在孙村、良庄、鄂庄等矿开展了矸石充填试验；许家林结合关键层理论提出了部分充填和短壁充填的思路，在多座煤矿进行了条带充填试验。在国外，Popovich、J. M. 等研究了适合小型煤矿的矸石回填设计，并分析了煤矸石回填后对采煤沉陷和矿井水、地表水的影响。

#### 1.4.2 覆岩离层注浆充填技术

覆岩离层注浆充填技术是利用煤层开采后覆岩下沉开裂过程中形成的离层空间，借助高压注浆泵，从地面通过钻孔向离层空间注入充填材料，支撑上位离层岩层，减缓岩层进一步弯曲下沉，从而达到减缓地表下沉的目的，是一种从岩层内部移动规律出发，提出的煤矿注浆充填减沉开采新技术。

覆岩离层注浆充填技术于20世纪80年代初首先在波兰发展起来，我国是在80年代末开始，自抚顺矿务局首次采用离层注浆减缓地表下沉的试验取得成功之后，此项技术引起了我国从事开采沉陷及“三下一上”采煤专家和技术人员的重视，先后在大屯徐庄煤矿、新汶华丰煤矿、兖州东滩煤矿和开滦唐山煤矿等进行了离层注浆减缓地表沉降现场试验，取得了一定的效果。离层注浆可以实现地下开采与地面注浆充填同步进行，互不干扰，具有简单易行、投资省等优点，普遍受到人们的重视，但盲目采用离层注浆充填可能达不到预期效果，主要原因在于：一是注浆中离层位置的预计、离层量大小的计算、离层发育的动态过程等理论尚未成熟，离层注浆技术的适用范围等需进一步研究；二是目前对离层区注浆充填减沉效果尚存在争论。

#### 1.4.3 冒落矸石空隙注浆充填技术

冒落区注浆充填控制地表沉陷技术是在采空区冒落矸石之间的空隙未被压实之前注入浆液，充填加固冒落岩块，一起支撑上覆岩层起到减缓地表沉陷的技术。该技术的价值体现在以下3个方面：一是作为一项地表沉陷控制措施，对地表沉陷进行控制；二是充填材料选用粉煤灰、煤矿粉碎岩石等工业废物，实现工业废物的地下安全处置，减少粉煤灰场占用耕地及环境污染；三是该技术充填作业不干扰井下采煤生产，工艺简单，有利于井下通风和防止冒落区发生火灾，对实现煤矿安全、高效生产有促进作用。根据采煤方法的不同，冒落区充填可以分为长壁开采冒落区注浆充填、房柱式冒落区注浆充填和条带开采冒落区注浆充填。

##### 1. 长壁开采冒落区注浆充填

该技术主要应用于德国、波兰。德国采用与长壁开采综采工作面配套的尾管充填新技术，在工作面后方18m的采空区布置尾管，此处的顶板冒落尚未压实，高浓度浆液充填材料充满整个空洞。冒落岩块一方面吸收充填浆液中析出的多余水分，另一方面作为充填体骨架，共同支撑上覆岩层。波兰用粉煤灰、尾矿、少量水泥和工业废弃盐水制成浓度为30%的浆液，对长壁分层开采冒落区进行注浆加固；与传统的采空区充填相比，这种注浆法不要求在支架后面保留空间，而且允许将采煤作业和充填过程分离开来。波兰长壁开采冒落区采用两种方法用管道进行注浆充填，一是将注浆管穿过支架后部，深入到未固结的崩落岩石堆内15m；二是将输送管路预先留在采空区内或者将管路设在通往采空区的钻孔内。波兰实践表明，采用长壁冒落区注浆充填最大可以减小地面沉陷30%左右，但不



宜单独作为建筑下开采技术使用。长壁冒落区注浆充填适用条件如下：

- (1) 煤层或开采分层倾角为 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ，厚度 $2 \sim 3$  m。
- (2) 顶板岩层具有良好的破碎特性和规则的垮落性。
- (3) 长壁工作面长 $200 \sim 300$  m，仰斜作业。长壁冒落区注浆充填技术在我国尚处于起步阶段，使用较少，刘天泉等对长壁开采冒落区注浆充填开展了可行性研究，认为冒研注浆充填技术可以减缓地面沉陷，实现粉煤灰在井下冒落区安全储存，但需开发新的注浆胶结材料，需要进一步研究充填工艺。

## 2. 房柱式冒落区注浆充填

该技术主要应用于美国、加拿大等国。美国印第安纳州的卡莱尔煤矿（Carlisle）煤层平均埋深 $90$  m，采高 $2$  m，采用房柱式开采，煤炭采出率为 $68\% \sim 75\%$ 。为了防止地表沉降对建筑物产生破坏，对大量的重要建筑物下方房柱式开采形成的冒落区进行充填，并对 $90$  m深的已遭水淹的采区注浆。实施过程如下：

(1) 打钻孔以探明采区冒落范围和顶板冒落量。为此，对采空区的钻孔和煤柱内的相邻钻孔进行了比较，但受矿房内钻孔位置、钻孔引起的顶板冒落、钻探工程观测冒落区软弱风化顶板的影响，钻孔探得的冒落范围、冒落量与充填后统计的冒落范围仍有较大误差。

(2) 配制满足减沉目的和注浆工艺要求的材料。用粉煤灰、砂子和水泥配制成各种低强度和低压缩性充填材料。充填目的就是利用低强度、低压缩性充填体支撑加固关键冒落区，防止地表变形破坏。

(3) 注浆充填。首先利用在主进路或生产煤柱之间注浆充填高强度砂浆和冒落区周围的煤层形成隔离区，然后当冒落区一端用隔离砂浆封闭，从该端开始注浆充填低强度充填料浆，直至冒落区另一端。现场使用一台搅拌机，一台砂浆泵，通过 $75$  mm的输送钢管泵送到 $75$  mm的注浆管。当冒落区研石空隙较大时，使用一台堵塞器或将砂充填在注浆管周围替代堵塞器，以防止浆体逸出。浆体停止流动时或充填管线浆体压力达 $4.1$  MPa时，停止冒落区注浆。对隔离区域注浆时，如果浆体不停止流动或压力不能达到 $4.1$  MPa时，注浆量达到设定的最大目标量时停止注浆。向冒落研石堆区域注浆时，注浆管插入堆体内，管口距底板 $0.3$  m位置以使砂浆尽量多流入研石堆中。同时，使用堵塞器或泵施加压力，避免浆体沿注浆孔上冒。冒落区总注浆充填量为 $7308$  m<sup>3</sup>，单孔注浆量为 $15 \sim 850$  m<sup>3</sup>。

## 3. 条带开采冒落区注浆充填

条带开采冒落区注浆充填是煤矿部分充填的一部分，是一个全新的建筑物下压煤开采技术思路，其学术思想为，条带开采导致地表下沉的主要原因是条带采出后包括采空区及其上部一定范围岩层内形成冒落区。冒落区随即失去承载能力并将其上部岩层的载荷转移到两侧留设的煤岩柱上，留设煤柱及其上方一定范围内岩柱上所承受的载荷增加导致煤岩柱压缩变形，压缩变形累积导致地表沉陷。条带开采冒落区注浆充填就是在建筑物压煤条带开采情况下，通过地面或井下钻孔向采出条带已冒落采空区的破碎研石进行注浆充填，充填破碎研石空隙，加固破碎岩石，使得采出条带冒落区重新起到承载作用，有效减轻留设煤柱及其上方一定范围内岩柱上所承受的载荷，使得煤岩柱的压缩变形量减小，从而减缓覆岩移动往地表的传播，同时利用充填材料与冒落区内研石形成的共同承载体来缩短留