

超高水材料 充填采煤技术

Backfill Mining Technology with
Superhigh-water Material

孙春东/著

非外借



科学出版社

超高水材料充填采煤技术

**Backfill Mining Technology with
Superhigh-water Material**

孙春东 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

邯郸矿区具有地表村庄密集、人口众多、村庄压煤比重大的特点,如何高效开采村庄下压煤,实现矿区的可持续发展是矿区面临的重要挑战之一。本书紧密结合超高水材料充填采煤技术的发展历程,系统地总结了邯郸矿区超高水材料充填采煤理论、技术与实践方面的创新成果。

本书系统地介绍了超高水材料的基本性能和工程特性、超高水材料充填开采工艺方法、充填工艺系统和装备、矿山压力显现及覆岩活动规律、地表沉降规律及控制等内容。结合超高水材料充填采煤工程案例,通过地表沉降观测、工程探查、充填体承载监测、等效采高理论验证,阐述超高水材料充填固结体的整体稳定性及其存在的问题,给出了超高水材料充填开采设计的要素及主要原则等。

本书可供从事采矿工程、矿山安全及相关专业的工程技术人员、科研工作者、研究生等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

超高水材料充填采煤技术=Backfill Mining Technology with Superhigh-water Material/ 孙春东著. —北京: 科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-053575-7

I. ①超… II. ①孙… III. ①高水充填材料-充填法-采煤方法
IV. ①TD823.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 131955 号

责任编辑: 李 雪 / 责任校对: 桂伟利
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 19 1/2

字数: 460 000

定价: 188.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

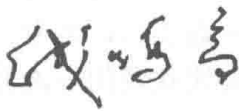
进入 21 世纪以来,我国煤炭工业发展迅猛,有力地保障了国民经济高速发展的需求。这一期间,煤炭行业的整体技术水平及科技创新能力也得到了较大的提升。“十一五”期间,国务院根据国内煤炭生产的发展形势,以〔国发(2005)18 号〕文颁发了《国务院关于促进煤炭工业健康发展的若干意见》。《国务院关于促进煤炭工业健康发展的若干意见》在肯定煤炭对国民经济和社会发展发挥了重要作用的同时,也指出“煤炭工业在发展过程中还存在结构不合理、增长方式粗放、科技水平低、安全事故多发、资源浪费严重、环境治理滞后、历史遗留问题较多等突出问题”。其中,采矿造成的环境治理问题,首次摆放到煤炭行业可持续发展的重要位置,学术界积极倡导绿色开采、科学采矿、建设生态矿山,至今已成为行业共识,不断出现新成果。

煤炭在我国一次性能源消费中,长期占据 70%左右的主体地位。改革开放以来,我国中东部地区的经济快速发展,对煤炭的需求大幅攀升,煤炭资源丰富的西部地区资源开发较为滞后,同时受运力的影响,对发达的中东部地区及东南沿海地区的煤炭需求支持力度不足,受市场需求和利益驱动等多重影响,造成中东部地区煤炭超强度开发,带来了一系列问题。比较突出的问题如下:①中东部地区煤炭矿山开发较早,大部分矿井到了服务年限的后期,随着开发强度的加大,资源消耗过快,剩余资源多为呆滞的“三下”(建筑物下、铁路下、水体下)资源,有的矿井村庄压煤量已占到矿井总储量的 70%;②部分矿井转入深部开采,矿井受煤与瓦斯突出、高承压水和冲击地压等地质灾害威胁增大,安全治理带来开采成本的大幅提升;③煤矿长期开采,造成地面矸石山堆积、自燃,采煤塌陷区将农田变为水塘。燃煤电厂的粉煤灰、钢厂的炉渣、金属矿山的尾矿等固体废弃物,都对环境产生了污染,已经到了人与自然环境不和谐、不可持续的严重程度。

当经济社会发展到一定程度,工业文明变革便呼之欲出。在人们认识到采矿带来环境污染问题时,便有人开始研究和攻克一些有效治理的关键技术。“十一五”期间,我国充填采矿技术得到较快发展。目前,煤炭矿山已基本形成较为成熟的三大充填采煤方法,一是以矸石等固体废弃物为主的固体充填采煤方法;二是以矸石与粉煤灰为主的膏体充填采煤方法;三是超高水材料充填采煤方法。三种充填采煤方法都实现了综合机械化和安全高效的规模化生产,减轻了传统垮落法开采造成的地表塌陷严重问题,处置了矸石、粉煤灰等固体废弃物,缓解了对环境的污染和占用耕地的问题,减少了对井上下水资源的破坏程度及瓦斯等有害气体的排放,解决了“三下一上”煤炭资源开采的一系列安全和环境问题。充填开采技术尽管能够大大缓解垮落法开采带来的环境破坏问题,但增加了部分开采成本(这些成本目前全部由煤炭企业承担),应强调指出的是这部分增加的成本,与治理恢复矿区生态大环境相比,还是较低的。在当前经济形势下,充填开采还仅用于“三下一上”呆滞资源的开采,若要将充填开采推广为常规开采方法,需要

从政策方面对煤炭企业大力扶持。相比膏体、矸石充填而言，超高水材料充填采煤，水体积可达 95%以上，固体资源用量很少，可直接使用矿井废水，远距离输送成本很低，是一种适合持续大规模使用的充填开采方法。

本书系统地总结了超高水材料充填采煤技术研究的创造性成果，介绍了研究团队创建的超高水材料充填采煤成套技术及其初步的理论体系，详实地介绍了超高水材料的基本性能和工程特性、开采工艺方法、充填工艺系统和装备、矿山压力显现及覆岩活动规律、地表沉降规律及控制等系统研究内容，并给出了若干超高水材料充填采煤工程案例。通过地表沉降观测、工程探查、充填体承载监测及等效采高理论验证，基本查清了超高水材料充填固结体的整体稳定性及其存在的问题，从理论上探索出了解决问题的技术途径。鉴此，我愿为本书作序，并谨向广大工程技术人员推荐本书，相信本书的出版必将对超高水材料充填采煤技术的深入研究起到重要的奠基作用，对煤矿开采技术的不断创新和煤炭工业持续健康发展产生积极的推进作用。



中国工程院院士
2016 年 7 月

前 言

“煤炭是工业的粮食”，这句话对于从事煤炭行业的人来说，是深深植入骨髓的记忆。无论当今发达国家，还是发展中国家，其工业化发展的过程中煤炭都是头等功臣。我国煤炭工业长期以来主要以井工长壁垮落法开采为主，这种开采方法回收率高，特别是实现了综合机械化开采后，其开采效率大幅提高。但同时存在着地表沉降严重，地下含水层被破坏，大量农田变为水塘或干旱土地；矸石山堆置占用大量土地，矸石自燃；煤炭利用后产生的废弃物严重污染环境等生态破坏问题。改革开放以来，我国经济增速较快，煤炭需求总量持续增加，特别是“十五”后期开始，煤炭经济经历了十年“黄金期”，有力地支持了国民经济的高速增长。对煤炭工业自身发展来说，经济效益的提高，带动了技术装备水平的大幅提升，同时也造成了矿井超强度开发，特别是中东部矿井资源快速萎缩，一些矿井“三下一上”呆滞储量成为主要可采资源。在煤炭经济尚好的时期，煤炭人意识到了生态保护的重大意义，为了有效开发利用呆滞资源，同时解决生态环境破坏问题，充填采煤技术得到了快速发展。

冀中能源集团是较早研究应用充填采煤技术的大型煤炭企业，自 2005 年以来与中国矿业大学合作，先后在邢台矿、小屯矿、陶一矿进行了矸石固体充填，矸石粉煤灰膏体充填，超高水材料充填等充填采煤技术试验，多种充填采煤技术均突破了关键技术难题，获得成功。经过近十年的不断深入研究，各种充填采煤技术都实现了综合机械化开采和规模化应用，形成了较为成熟的三大充填采煤技术体系，引领了充填采煤技术的发展方向。充填采煤技术不仅解决了呆滞资源开采的技术屏障，同时也成为生态矿山建设，实现绿色开采的关键技术，取得了可观的经济效益和显著的社会效益。

邯郸矿区开采历史较为悠久，地处华北平原，矿区地表村庄密集，人口众多，村庄压煤比重较大，属典型的“三下”开采矿区之一，由于开采规模不断加大，矿区资源逐渐减少，如何成功开采村庄下压煤已成为矿区可持续发展面临的主要关键问题之一。自 2008 年，邯矿集团首次以陶一煤矿为试点采用超高水材料进行充填开采，研制了第一套井下使用的自动化程度较高的超高水充填制浆设备（ $120\text{m}^3/\text{h}$ ），研制了第一套 4.5m 袋式充填支架。经过近十年的不断探索，已形成了较为完善的理论基础和工艺技术体系，主要体现在：①超高水材料充填开采工艺的适应性进一步提高。在开放式充填工艺的基础上，成功开发并实施了开放式、袋式、混合式等多种充填方法与工艺（工作面长度为 50~60m），取得了良好的技术经济效益。②与长壁充填开采（工作面长度 120m）相适应的充填工艺系统和覆岩沉降控制机理与方法进一步完善。建立了超高水材料充填开采“顶板-煤层-支架-充填体”整体结构力学模型，结合充填体力学性能，揭示了超高水材料长壁充填开采顶板变形破坏机理，提出了相应的顶板控制方法，首次设计实施了配套的地面充填工艺系统（充填能力达到 $400\text{m}^3/\text{h}$ ，满足了充填工作面年产百万吨的需求），并构建了顶板控制技术体系。③“充填体-覆岩-地表”三位一体变形实时监测技术得到

了普遍应用。首次将岩层破裂产生的震动场探测与覆岩应力场及地表沉降观测相结合,实现了实时联合监测,取得了丰富的实测成果。系统分析了超高水材料大采高长壁袋式充填开采顶底板破裂特征、采场矿压显现、充填体承载特性及其稳定性;揭示了“井下开采与充填参数”和“顶板破裂动态与地表沉陷规律”的多参量相关关系,实现了“一张图”多参量对比及覆岩沉降预测功能;得出了超高水材料袋式充填开采地表下沉量与采高无关、垮落法开采覆岩下沉系数不适合预计超高水材料袋式充填开采地表下沉量的新认识;通过工程探查、充填体承载监测、等效采高理论验证,证实了超高水材料充填固结体的整体稳定性及其存在的问题,从理论上探索出解决问题的技术途径。基于超高水材料充填开采大量的实验室研究和现场工程实践,证明了超高水材料充填采煤技术是成功的,特别是在单一回采工作面非充分采动条件下,地表沉降控制达到了预期效果。结合关键层理论,在工作面间留设区段小煤柱,使工作面处于非充分采动状态,也达到了区域充填开采控制地表沉降的目的。充分采动状态下的充填实践,充填体的承载为其上覆岩石自重,充填固结体承载超过了其“临界抗压强度”,固结体发生泌水,产生较大压缩变形,影响了充填开采效果。降低超高水材料水体积比、提高充填固结体强度,是实现超高水材料区域充填无煤柱化的有效途径。

本书以2008年以来冀中能源邯郸矿业集团与中国矿业大学、北京科技大学、河北工程大学等单位合作,针对应用超高水材料充填采煤进行的试验、应用、推广所取得的技术研究成果为基础,全面、系统地总结论述了超高水材料充填采煤技术的方法、工程实践及其理论创新研究成果。书中详细介绍了超高水材料的基本性能和工程特性、充填开采工艺方法、充填工艺系统和装备、矿山压力显现及覆岩活动规律、地表沉降规律及控制等系统研究内容,提出了今后应用该技术在设计方面应当充分考虑的因素、原则及参考指标,创建了完整的超高水材料充填采煤技术与理论体系。为了记载超高水材料充填开采技术的初始研究现状,书中基本录入了所有应用了的技术,尽管有些技术不一定会成为今后的主流方向。特别是在应用研究方面编录了典型充填工作面实例,系统详实地表述了研究方法及取得的成果和存在的问题,真实地展现了超高水材料充填采煤成套技术,具有较强的实用性和指导性,可供设计、生产、装备制造、科研和教学等工程技术及研究人员参考。期许本书能对超高水材料充填采煤技术的后续研究起到一定的基础作用,对该技术的推广起到积极的促进作用。

全书的整体构思、统稿和审定工作由孙春东负责。编写分工如下:第1章,孙春东;第2章,冯光明、孙春东、张东升、王旭锋;第3章,孙春东、冯光明、李永元;第4章,孙春东、冯光明、卢永战;第5章,孙春东、毕锦明、高文亭;第6章,孙春东、姜福兴、张东升、王旭锋、李永元;第7章,姜福兴、孙春东、张东升、王旭锋;第8章,孙春东、张东升、王旭锋;第9章,张兆江、孙春东、李永元;第10章,张兆江、孙春东;第11章,王旭锋、孙春东、李永元。

本书文献内容主要源自科研成果总结报告,主要合作单位为中国矿业大学、北京科技大学和河北工程大学等。在此作者首先向在成果的原创性研究、试验和推广应用过程中做出了突出贡献的冀中能源邯郸矿业集团有限公司原副总工程师胡海江、邸志平、孟杏莽、生产部齐惠敏副部长;陶一煤矿李风凯、马民乐矿长、王春耕总工程师、赵玉泉副

总工程师；亨健公司布铁勇董事长、卢志敏总工程师等同志表示真诚的谢意！装备研发制造与材料加工生产合作单位：河南华威矿业工程公司荣金慧董事长；河北紫晨超高材料有限公司原董事长冀满良等对项目的实施给予了很大的支持。特别是在本书资料的搜集、编撰与审定过程中，得到了煤炭科学研究总院姚建国研究员、中国矿业大学（北京）王家臣副校长、中国矿业大学邓喀中教授等热忱的指导和斧正；还得到了冀中能源集团、邯矿集团有关领导和同事们极大的关注、支持和帮助，在此一并表示诚挚的感谢！

由于作者学识水平有限，书中不当之处，敬请各位同行、专家批评指正。

作 者

2016年7月

目 录

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 传统采煤方法存在的突出问题	1
1.2 国内外充填采煤技术沿革	3
1.2.1 国外充填采矿技术发展历程	3
1.2.2 国内充填开采技术发展历程	4
1.3 充填采煤技术现状	5
1.3.1 现代充填采煤特征	5
1.3.2 充填采矿分类	5
1.4 充填采煤技术发展趋势	6
1.5 超高水材料充填开采技术研发应用及发展	7
第2章 超高水材料及性能	9
2.1 超高水材料的基本组分	9
2.1.1 超高水材料水化反应	9
2.1.2 超高水材料固结体微观特性	10
2.2 超高水材料的基本性能	11
2.2.1 固结体力学特性	11
2.2.2 固结体物理化学特性	14
2.2.3 浆体流变特性	17
2.2.4 浆体的流动性	19
2.3 超高水材料固结体工程特性	22
2.3.1 不同形态固结体力学性能	22
2.3.2 大尺寸固结体蠕变特性	27
2.3.3 固结体侧限受压承载特性	35
2.4 影响超高水材料性能的因素	41
第3章 超高水材料充填开采工艺	43
3.1 采空区袋式充填开采工艺	43
3.1.1 工艺特点	43
3.1.2 袋式充填开采工艺的应用	45
3.2 采空区开放式充填开采工艺	55
3.2.1 工艺特点	55
3.2.2 开放式充填开采工艺的应用	56
3.3 采空区混合式充填开采工艺	61
3.3.1 间隔交错式充填	61
3.3.2 分段阻隔式充填	63

第4章 超高水材料浆体制备系统	64
4.1 井下浆体制备系统	64
4.2 地面浆体制备系统	65
4.2.1 地面浆体制备设备	65
4.2.2 地面浆体制备自动控制系统	69
4.3 浆体输送系统	73
4.3.1 输送泵浆体输送系统	73
4.3.2 浆体自流输送系统	74
4.3.3 浆料混合装置	76
4.3.4 风水联动管路清洗系统	78
4.4 制浆系统的推广应用	78
第5章 充填工作面液压支架	79
5.1 充填液压支架研究现状	79
5.2 整体式充填液压支架	79
5.2.1 基本原理	79
5.2.2 结构形式	80
5.3 分体式充填液压支架	81
5.3.1 基本原理	81
5.3.2 结构形式	81
5.4 悬移式充填液压支架	84
第6章 超高水材料充填开采覆岩活动及矿压规律	86
6.1 覆岩活动规律及矿压观测基本方法	86
6.1.1 微地震监测	86
6.1.2 围岩应力在线监测	92
6.1.3 支架工作阻力在线监测	95
6.1.4 充填体承载应力监测技术	97
6.2 开放式充填开采工作面覆岩活动及矿压显现	98
6.2.1 陶一煤矿充I工作面	98
6.2.2 陶一煤矿充VI工作面	104
6.3 袋式充填开采工作面覆岩活动及矿压规律	120
6.3.1 陶一煤矿12706工作面	120
6.3.2 亨健煤矿2515工作面	129
第7章 袋式充填开采覆岩控制机理及关键要素	154
7.1 袋式充填开采覆岩结构特征	154
7.1.1 充垮开采覆岩结构对比	154
7.1.2 袋式充填开采覆岩控制要素	155
7.2 袋式充填开采“支架-围岩”作用关系	158
7.2.1 袋式充填工作面需控围岩	158
7.2.2 袋式充填工作面“支架-围岩”关系	159
7.3 袋式充填开采覆岩控制机理及关键要素	162
7.3.1 袋式充填开采覆岩控制机理	162

7.3.2 影响充填效果的因素分析·····	163
7.3.3 充填开采参数对覆岩活动的影响·····	164
7.3.4 提高工作面充填效果的保障措施·····	165
第8章 开放式充填开采覆岩控制机理及关键要素·····	167
8.1 开放式充填开采覆岩控制机理及力学模型·····	167
8.1.1 开放式充填覆岩控制机理分析·····	167
8.1.2 开放式充填开采覆岩整体结构力学模型·····	168
8.1.3 基本顶受力分析·····	171
8.1.4 直接顶断裂步距分析·····	177
8.2 开放式充填开采“支架-围岩”作用关系·····	181
8.2.1 直接顶初次破断期间支架初撑力分析·····	181
8.2.2 直接顶周期破断期间支架初撑力分析·····	185
8.2.3 支架工作阻力分析·····	187
8.3 开放式充填开采覆岩活动特征模拟分析·····	190
8.3.1 UDEC 数值计算模型建立·····	190
8.3.2 模拟结果与分析·····	192
8.3.3 地表移动变形特征·····	204
8.4 开放式充填开采覆岩控制关键要素·····	207
8.4.1 利用支架尾梁提高充填液面·····	207
8.4.2 提高充填率的其他措施·····	209
第9章 超高水材料充填开采地表沉降规律及控制技术·····	210
9.1 地表沉降观测方法·····	210
9.1.1 观测工作流程·····	210
9.1.2 技术依据·····	210
9.2 单一工作面充填开采地区地表沉降观测·····	210
9.2.1 地表移动观测站的布设原则与观测方法·····	210
9.2.2 观测设备·····	212
9.2.3 变形监测方案设计与测点布设·····	214
9.2.4 亨健矿 2515 工作面地表观测结果·····	217
9.2.5 陶一矿 12706 工作面地表观测结果·····	219
9.2.6 实测地表下沉率·····	221
9.3 单一工作面充填开采地表沉降规律研究·····	222
9.3.1 概率积分法简介·····	222
9.3.2 地表下沉实测参数拟合计算·····	223
9.3.3 等效采高·····	225
9.3.4 地表下沉系数·····	228
9.4 充填开采地表沉降控制技术·····	231
9.4.1 影响充填效果的要素分析·····	231
9.4.2 袋式充填开采提高充填率控制地表沉降效果·····	233
9.4.3 开放式充填开采提高充填率控制地表沉降效果·····	237
第10章 区域充填开采地表沉降规律·····	239
10.1 区域充填开采充分采动地表沉降规律·····	239

10.1.1	陶一矿邯长铁路下 12706 区块充填开采情况	239
10.1.2	亨健矿 2515 区块充填开采情况	249
10.1.3	陶一矿七采区充填开采情况	258
10.2	区域充填开采效果工程验证及分析	272
10.2.1	充填工作面开采情况	272
10.2.2	充填过程中遇到的问题	273
10.2.3	充填体应力监测	274
10.2.4	工程验证	274
10.2.5	充填体残余强度	277
10.2.6	对 2515 区块充填效果	277
10.3	超高水材料固结体稳定性综合分析	278
10.3.1	钙矾石生成及稳定性	278
10.3.2	采空区充填体泌水因素综合分析	281
10.3.3	区域充填固结体稳定的技术途径	284
第 11 章	超高水材料充填开采设计	285
11.1	超高水材料充填开采设计的总体原则	285
11.1.1	总体原则	285
11.1.2	地表建(构)筑物破坏等级划分标准与要求	286
11.2	超高水材料充填开采设计流程	287
11.2.1	一般流程	287
11.2.2	优化设计流程	289
11.3	超高水材料充填开采设计内容	289
11.3.1	超高水材料选择	289
11.3.2	充填率及充填采区布置	290
11.3.3	充填开采工艺系统设计	292
11.3.4	充填开采“三机”配套	293
11.3.5	采充工作制度	294
11.4	核心技术要素	295
参考文献		296

第 1 章 绪 论

随着矿井储量的逐渐减少，资源枯竭与经济矛盾的矛盾日益突出，有效地进行“三下”煤炭资源开采对充分利用地下资源、延长矿井寿命、促进煤炭工业的持续健康发展具有重要意义。随着煤炭开采技术的发展^[1-4]，覆岩移动及地表沉陷控制技术得到了进一步丰富和完善，如条带开采和充填开采等技术。充填开采逐渐成为解放“三下”煤炭资源的重要技术途径之一，按充填材料不同，充填开采划分为干式充填与非干式充填两大类。近年来，伴随着超高水充填材料的研发，超高水材料充填开采技术于近年来在煤矿采空区充填方面得到了较广的应用。

1.1 传统采煤方法存在的突出问题

我国煤炭资源的一个特点是资源总量较为丰富，截止到 2015 年，在已探明的煤炭可采储量前 10 位的国家中，我国位居第 3，见表 1-1。然而，我国的煤炭总储量不及美国的 1/2，由于我国人口是美国的 5 倍之多，人均资源占有量不及美国的 1/10，不足世界人口人均资源占有量的 1/2。我国的能源资源相对贫乏，能源消费对煤炭的依赖程度较高，一直占到消费总量的 70%左右^[5,6]。随着我国经济的快速发展，煤炭消耗大幅增长，连续超强度开采导致煤炭储采比逐年下降，由 2007 年的 45a、2011 年的 35a 减小至 2015 年的 31a，大大低于世界平均储采比^[7,8]。可以预见，随着国家经济建设的不断发展，储采比还会持续下降。

表 1-1 世界 2015 年煤炭探明储量前 7 位国家

排序	国家	探明储量/亿吨	比重/%	储采比/年
1	美国	237295	26.6	292
2	俄罗斯	157010	17.6	422
3	中国	114500	12.8	31
4	澳大利亚	76400	8.6	158
5	印度	60600	6.8	89
6	德国	40548	4.5	220
7	乌克兰	33873	3.8	>500

我国煤炭资源的另一特点是“三下”压煤比较普遍，形成呆滞煤量，不能有效开采利用，回采率较低。据对国有重点煤矿的不完全统计，全国国有重点煤矿生产矿井的“三下”压煤就达 137.9 亿吨，其中建筑物下 94.68 亿吨，占总压煤量的 69%^[9]。几乎每个矿井都存在建筑物下压煤问题，一般都占矿井储量的 10%~30%，有的高达 40%。随着经

济的持续发展，村镇规模不断扩大，新矿区和新井田不断建设，实际压煤量远高于这一数字。主要产煤省，如河北、江苏、安徽、河南等，多数矿区(井)地处平原，村庄密集，人口众多，村庄压煤比重较大，有的矿区或井田村庄压煤量占总储量的 70%^[10, 11]。一方面，随着国家经济建设的发展，“三下”压煤量在不断增加；另一方面，随着矿井开采强度的增大，矿井资源在逐年减少。老矿区如不进行“三下”采煤，尤其是村庄下采煤，将面临矿井关闭的局面；新矿区如不从可持续发展的战略高度进行统筹规划、协调“三下”压煤开采问题，就很难保证矿区的可持续发展。

此外，现代科学技术的高速发展和现代工业生产的高速增长，使煤炭资源的开发利用规模和强度也达到了前所未有的程度。据有关资料统计，截止到 2015 年，我国在过去的 10 年间，煤炭生产总量增长了约 1.09 倍，见表 1-2。在这不断快速增长的开发过程中，多数老矿区煤炭资源正逐步枯竭。

表 1-2 我国能源生产总量和构成

年份	能源生产总量 /万吨标准煤	构成(能源生产总量 = 100)			
		原煤	原油	天然气	水、核、风电
1991	104844	74.1	19.2	2.0	4.7
1993	111059	74.0	18.7	2.0	5.3
1995	129034	75.3	16.6	1.9	6.2
1997	132410	74.1	17.3	2.1	6.5
1999	125935	72.5	18.2	2.7	6.6
2001	137445	71.9	17.0	2.9	8.2
2003	163842	75.1	14.8	2.8	7.3
2005	205876	76.5	12.6	3.2	7.7
2007	237000	76.6	11.3	3.9	8.2
2009	274619	77.3	9.9	4.1	8.7
2011	317987	77.8	9.1	4.3	8.8
2013	340000	75.6	8.9	4.6	10.9
2015	362000	72.1	8.5	4.9	

经济快速发展与资源匮乏、枯竭矛盾的日益尖锐，给人们合理开发和充分利用煤炭资源提出了严峻的考验。如何充分利用现有资源，更加科学、合理、有效地开发和利用不可再生的矿产资源是我国矿业发展亟待解决且不能回避的问题。

同时，传统的煤炭开采技术或方式也产生了一系列的问题：据统计，平均每开采万吨原煤会造成塌陷土地 0.2hm²，每年由于煤炭开采塌陷土地面积为 5~6 万 hm²^[12, 13]。全国受煤炭开采下沉影响的土地面积达 60 万 hm²，直接经济损失约为 20 亿元。煤矿在生产过程中排放大量的矸石，目前全国历年累计堆放的煤矸石约 45 亿吨，规模较大的矸石山有 1600 多座，已占用土地约 1.5 万 hm²，而且堆积量每年还以 1.5~2.0 亿吨的速度增加。煤矿自备电厂生产中排放大量粉煤灰，历年排放达到 5 亿吨以上，且每年新增 5000~7000 万吨^[14, 15]。煤炭开采使地下水系与土地资源严重破坏，引起地下水位大幅度

下降,矿区水源枯竭,地表植被干枯,自然景观破坏,地表土壤沙化,进而引起农业产量下降,此外矿井排出的污水、矸石堆淋溶水及选煤废水等对地表河、海、水库等水资源又造成严重污染,使地表生态环境失去平衡,严重影响人类生存环境。开采对环境、生态的破坏越来越严重,如何解决建筑物下压煤开采、采矿引起的地表沉陷、固体废弃物矸石与粉煤灰的排放处理问题,已成为煤矿企业亟须解决的重大技术难题之一。近年的开采实践证明,充填开采可解决上述提及的问题。因此,进行充填开采技术的研究十分必要。

1.2 国内外充填采煤技术沿革

充填采矿在国际上已有百年以上历史,最早采用充填开采的是1915年澳大利亚的塔斯马尼亚芒特莱尔矿和北莱尔矿,应用废石充填矿房。近60多年来,充填开采技术在重金属和非金属矿山的应用研究中得到了长足发展,先后经历了早期的固体废弃物充填^[16~18]、水砂充填^[19~24]和细砂胶结充填^[25~31]的技术演化过程;21世纪以来,充填采矿进入高浓度介质的膏体充填^[32~36]、碎石砂浆胶结充填^[37~41]和全尾矿充填^[42~46]等现代充填采矿技术研究及应用阶段。

1.2.1 国外充填采矿技术发展历程

在20世纪40年代以前,出现了以处理固体废弃物为目的的充填采矿方法,这个时期,是在不完全了解充填物料性质和使用效果的情况下,将矿山废料送入井下采空区。例如,澳大利亚北莱尔矿在20世纪初进行的废矿石充填^[47];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黄铁矿充入采空区^[48]。

20世纪40~50年代,澳大利亚和加拿大等国就开始研究应用水砂充填技术,欧洲一些产煤国家利用水砂充填进行了建筑物下采煤试验,并取得了成功,在波兰、德国应用效果好且广泛,波兰在城镇及工业建筑物下采用密实水砂充填技术的采煤量占全国建筑物下采煤量的80%左右^[49,50]。从此真正将矿山充填开采纳入采矿计划,成为采矿技术的一个组成部分,并且对充填材料及充填工艺展开研究。之后,这一技术也逐步扩展到世界多数主要产煤国。

20世纪60~70年代,一些国家开始研发和应用尾矿胶结充填技术。由于非胶结充填体无自立能力,难以满足高效采矿、高回采率和低贫化率的需要,因而在水砂充填工艺得以发展并推广应用后,就有了胶结充填技术研发和应用。例如,20世纪60年代澳大利亚的芒特艾萨矿采用尾矿胶结充填工艺回采底柱,胶结方式是在尾矿中添加12%左右的水泥^[51,52]。随着胶结充填技术的发展,在这一阶段已开始深入研究充填材料的特性、充填料与围岩相互作用和充填体稳定性等。

20世纪80~90年代,为了提高尾砂利用率和充填浓度,70年代后期开始研究全尾砂高浓度充填技术。80年代早期,该技术先在德国、南非等国进行了试验研究,取得了一定成果,如南非的西德瑞方登金矿。随着采矿工业的发展,原充填工艺已不能满足回采工艺的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。膏体充填技术首先在西德 Preussage 金属公司格隆德铅锌矿进行全尾砂膏体泵送充填试验^[53]。所形成的泵送充填新工艺,效果良好。所谓膏体充填则是指充填料呈膏状,其具有的特点是,充填材料是以全尾砂或全尾砂与碎石混合作为充填集料,以水泥浆或水泥砂浆作为胶结介质,其胶结充填体具有良好的强度特性;充填料充入采场后不会出现离析、脱水现象,减少了井下充填水对环境的污染及排水费用。在 80 年代,国外曾开展过固体充填采空区的实验研究,其使用的充填料通常有河砂、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过风力充填技术进行采煤^[54-56]。

1.2.2 国内充填开采技术发展历程

我国矿山充填开采技术起步较晚,基本也经历了与国外类似的四个发展时期^[57-66]。

20 世纪 50 年代以前,国内均是以处理固体废弃物为目的的废石充填开采技术^[67, 68];废石充填采矿法在 50 年代初期成为我国金属矿山的主要采矿法之一^[69, 70],1955 年在有色金属矿床地下开采中占 38.2%,在黑色金属矿床地下开采中达到了 54.8%。废石干式充填主要问题是生产能力小、效率低和劳动强度大,满足不了采矿工业发展的需要。50 年代以后,废石充填所占比重逐年下降,1963 年中国有色金属矿山废石干式充填仅占 0.7%,处于被淘汰的边缘。

20 世纪 60 年代,国内矿山开始采用水砂充填工艺。我国抚顺煤矿是最早应用水砂充填技术的煤矿,主要用于回收矿柱。水砂充填一般要求构筑专门的护壁和隔墙,充填工艺较为复杂,且从采场渗出的泥水污染巷道、水沟和水仓,清理工作量大、排水费用高、充填量小,不能从根本上阻止岩层移动,其应用范围受到很大限制。由于工艺复杂,开采成本高,煤矿中未能得到推广。1965 年,山南锡矿为了控制大面积地压活动,首次采用尾矿水力充填采空区工艺,有效地缓减了地表下沉;湘潭锰矿也从 1960 年开始采用碎石水力充填工艺,并取得了较好的效果;20 世纪 70 年代在铜绿山铜矿、招远金矿和凡口铅锌矿等矿山应用尾矿水力充填工艺;80 年代则已在国内 60 余座有色、黑色等金属矿山的开采中应用了水砂充填技术。

自 20 世纪 60~70 年代,国内矿山开始研究应用胶结充填技术。该技术一般采用以碎石、河砂、尾砂或戈壁集料为骨料,与水泥类材料拌和形成浆体或膏体后,以管道泵送或重力自流方式输送到采空区对围岩进行支撑。与水砂充填相比,胶结充填速度较快,工艺相对简单,有利于改善地压和防止地表的塌陷。胶结充填技术,在非煤矿山充填开采中发挥了较好的效果,但这种粗骨料胶结充填输送工艺比较复杂,对物料级配要求较高,未得到大范围的推广与使用。至 20 世纪 70~80 年代,开始有了细砂胶结充填技术,该技术以尾砂、天然砂和棒磨砂等材料为骨料,以水泥为凝固料,以两相流的管道输送方式输入采空区进行充填。该技术在 80 年代得到了广泛的应用,但该技术存在的明显问题是需要大量的水泥,充填成本明显高,且受管道输送浓度限制,充入采场后,大量的水溢出,增加了排水费用,污染了井下环境,也造成大量水泥料损失,既增加了成本又降低了充填体的强度。

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新技术。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,此后在铜绿山铜矿、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。2004年以来,中国矿业大学科技人员将膏体充填技术应用于煤矿采空区充填,对不迁村膏体充填工艺与方法进行了研究,取得了良好效果。

20世纪90年代以来,国内充填采矿技术研发比较活跃,几乎与膏体充填同期研究应用了矸石粉煤灰固体充填^[71~73]和超高水材料胶结充填^[74~76]等。超高水材料可将较高比例的水凝结起来,水体积可达到88%~97%,充填料浆凝固较快,早期强度较高,充入采空区后浆体可不脱水,无环境污染。

总之,充填采矿在国内的发展要比国外滞后10~20年,由于借鉴了国外的经验和研究力度的加大,其技术差距在逐步缩小,个别技术,如超高水材料充填开采技术处于国际领先水平。

1.3 充填采煤技术现状

1.3.1 现代充填采煤特征

从国内外充填采矿的发展历程可以看出,每一种充填采矿方法,都有一个明确的目的。最早的矸石充填是为了处置废弃矸石,不占用土地和污染环境。金属矿山采用尾砂充填、水沙充填或膏体充填,其主要目的是防范采空区垮塌造成安全灾害。金属矿山采矿后会形成较大的不易垮落的采空区,如不进行处置,一旦垮塌就会形成灾害。利用废弃物充填开采,一是可有效解决发生灾害的问题;二是可以将废弃物进行处置,不再污染环境;三是可以提高资源回收率,可谓一举多得。煤炭矿山研究充填采矿也有着同样的目的而一路发展至今。

随着国民经济的发展,社会及工业文明的进步,现代煤矿充填采煤应当遵循的理念:一是能够解决开采带来的环境破坏问题;二是能够提高资源的开发利用率;三是能够实现安全高效采矿。

1.3.2 充填采矿分类

充填采矿根据充填作业的场所,可分为巷道式充填和采煤工作面充填两种类型;根据充填物料含水与否,可分成干式充填与非干式充填两种类型;根据充填物料的输送方式,可分为水力充填、风力充填、机械充填和自溜充填等;根据充填物料进入充填区域的方式,可分为空间直接充填、冒落空区灌注(钻注)间接充填、离层(裂隙)带钻注间接充填等。

1) 干式充填

干式充填^[77~85]是将充填物料以相对干燥状态送入采空区的工艺方法。其针对的作业场所可以是未垮落的巷道和采煤工作面,将矸石等充填料直接充入采空空间^[86,87]。实现的途径如下:①轨道+矿车;②管道风力;③机械化(皮带、刮板输送机);④自溜(开放槽、管道)。