



# 煤矿充填开采 理论与技术

■ 刘建功 赵庆彪 著

 煤炭工业出版社

# 煤矿充填开采理论与技术

刘建功 赵庆彪 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

煤矿充填开采理论与技术 / 刘建功, 赵庆彪著. -- 北京:  
煤炭工业出版社, 2016

ISBN 978 - 7 - 5020 - 5095 - 5

I. ①煤… II. ①刘… ②赵… III. ①充填法—采煤方  
法 IV. ①TD823.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 314060 号

煤矿充填开采理论与技术

著 者 刘建功 赵庆彪  
责任编辑 唐小磊  
编 辑 梁晓平  
责任校对 尤 爽  
封面设计 王 滨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)  
电 话 010 - 84657898 (总编室)  
010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京玥实印刷有限公司  
经 销 全国新华书店

开 本 787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 20<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 字数 482 千字  
版 次 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷  
社内编号 7946 定价 88.00 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,电话:010 - 84657880

## 序

21 世纪以来,我国煤炭工业迅猛发展,有力地保障了国民经济快速发展对能源的巨大需求。特别是“十一五”期间,通过深入贯彻《国务院关于促进煤炭工业健康发展的若干意见》(国发〔2005〕18号)文件指示精神,紧紧地依靠科技进步,煤炭行业整体技术水平得到了较大的提升,煤炭产量由2005 年的  $21.1 \times 10^8 \text{ t}$  增加到2010 年的  $33.2 \times 10^8 \text{ t}$ , 平均每年有2 亿多吨的增量;原有的煤炭工业存在的一些突出问题也得到了较大的缓解或较好的解决。

为满足我国国民经济的快速发展,能源工业特别是作为能源主体的煤炭工业必须保障国民经济发展的供给。但是对我国工业发达的中、东部地区而言,煤矿开采条件日趋复杂,要稳定和巩固现有的煤炭生产规模,将会带来开采成本大幅攀升,矿井安全形势更加严峻等一系列问题,相应也将加剧“三废”与土地塌陷等生态环境问题。一是我国的中、东部矿区,大部分矿井服务年限较长,步入衰减阶段,可采储量严重不足;二是不少矿井进入大采深、煤层开采困难阶段,伴随而来的是开采成本大大增加及矿井安全问题,尤其是大采深矿井的冲击地压、煤与瓦斯突出和高承压水患等安全威胁问题;三是煤炭的大规模开采,产生了严重的环境和生态问题,煤矿产生的大量矸石、电力工业燃煤电厂产生的粉煤灰及其他工业产生的尾矿等固体废弃物需要无害化处理。矿区现阶段面临的资源和环境约束,是资源禀赋、发展阶段和体制条件共同作用的结果,解决资源和环境约束压力的出路在于发展方式的转变。因此,为保持煤炭工业持续健康发展,必须依靠科技进步,采取正确的对策和有效措施,以克服上述所面临的问题。据统计,目前我国国有煤矿的生产矿井“三下”压煤达  $137.9 \times 10^8 \text{ t}$ , 其中“建下”压煤  $94.68 \times 10^8 \text{ t}$ , 占总压煤量的 68.66%, 特别是我国中、东部矿区“三下”压着大量的优质煤炭资源,亟待开采出来支持我国中、东部工业发达地区的快速发展。因此,必须找出一种新的有效开采方法,进行综合治理,以解决上述问题。

冀中能源集团从2002 年开始,就着手研究矸石的有效利用问题,在煤炭

工业系统首先研究实现了矸石不升井，首创巷道矸石充填技术。2005—2008年，先后试验成功不同充填材料及相应的充填法采煤技术，较好地解决了上述问题，取得了非常好的经济效益与社会效益。煤矿充填开采消灭了传统意义上的采空区，解决了开采“三下”煤炭资源的一系列安全与环境问题，减轻了采煤引起的地面沉陷危害；同时能处理大量的矸石、粉煤灰甚至城市固体垃圾等废弃物，有效地缓解了由采空区煤柱产生的应力集中带来的巷道维护困难等问题。此外，还消除了采空区、工作面隅角瓦斯积聚的安全隐患。冀中能源集团研究开发的以固体材料、膏体材料和高水材料为代表的综合机械化充填法采煤技术，是实现安全、高效、绿色开采的科学采煤关键技术之一。该技术将引领煤炭行业充填开采技术创新的方向，随着在减少高承压水底板扰动深度、煤与瓦斯突出矿井消突等充填法采煤应用研究上的关键技术取得突破，必将使得充填法采煤理论、工艺、装备等技术更加成熟，在我国煤炭行业将得到大面积推广。

该书系统地总结了充填法采煤研究的创造性成果，发展丰富了采煤理论、方法及技术。该书出版对推进充填法采煤技术深入研究必将起到积极的作用，对今后煤炭工业的持续健康发展和煤矿开采技术的创新将产生推动作用。因此，我愿为本书作序，并谨向广大工程技术人员推荐本书。

中国工程院  
成鸣高

二〇一一年九月

# 前 言

自 2008 年冀中能源集团试验成功综合机械化充填采煤技术以来, 充填采煤技术在全国煤炭行业得到了大面积的推广和应用, 如山西、山东、河南和内蒙古等省、区得到了较广泛的应用, 取得了显著的经济效益和社会效益。同时, 经过不断持续地深入研究, 在充填采煤理论与技术等'方面有了较大的新发展, 特别是提高充填采煤单产水平、降低充填成本和扩大应用范围等取得了长足的进步。

2010 年 6 月, 冀中能源集团经河北省批复成立了河北省充填采煤工程技术研究中心; 2013 年 2 月, 经国家发展改革委能源局批准成立了'国家能源充填采煤技术重点实验室, 并承揽国家、省研究课题 4 项。4 年多来, 冀中能源集团先后接待了 75 批兄弟单位前来参观学习, 参加了国际采矿技术交流等会议 26 次, 承办了充填采煤技术培训班 15 次; 博士后科研工作站培养了 3 名充填采煤技术研究专门人才。相应, 为了大力推广充填采煤技术, 满足广大工程技术人员的需求, 在中国煤炭学会支持下, 于 2011 年出版了《煤矿充填法采煤》一书, 该书出版后得到了广大读者的好评。

2008 年以来, 在充填采煤技术深入研究方面取得了较好的新进展。例如: 在充填采煤矿压理论方面, 研究了密实充填控制煤层顶板上覆岩层运移规律、矿压显现相似材料模拟、岩层来压强度力学计算、底板采动扰动破坏深度等, 取得了一定的进展; 在充填材料方面, 使用自燃后的红矸石增强膏体材料早凝及强度得到了突破; 在充填采煤工艺方面, 将高水材料充填工艺应用到老矿复采滑移顶梁采煤领域, 也取得了较好的经济效益和社会效益; 在充填采煤装备研制上, 以采充一体液压支架为核心技术取得了技术新突破, 研制成功了大采高 (4.5 m) 高水材料充填液压支架, 分为整体和分体两种, 应用效果较好。为降低充填开采成本, 研究成功了条柱式部分膏体充填方法和装备, 减少了充填量和充填时间; 为提高充填效率, 研究成功了双泵并联膏体输送系统, 提高了充填效率 1.6 倍以上。以上研究成果, 获得了两项中国煤炭工业

一等奖和一项中国煤炭工业二等奖。充填采煤技术是煤矿绿色开采，生态矿山建设的核心技术，在增加煤炭开采储量，提高矿井安全程度，保护土地和水环境等方面社会效益非常显著。近年来，由于充填采煤技术发展较快，为满足开展充填采煤技术培训工作需要和推广工作要求，决定再版《煤矿充填法采煤》一书，书名更名为《煤矿充填开采理论与技术》。这次再版主要补充了冀中能源集团在充填采煤技术深入研究及技术创新方面的成果，以飨广大工程技术人员。

再版补充撰写分别由所在应用研究单位主研人员承担，其中：王家臣、刘建功等补充撰写了4.2、4.4节；赵庆彪、张振芳补充修改了6.1.1，毕锦明、刘建功等补充撰写了5.2.2、5.4.3、5.4.4、5.4.5、5.4.6、5.4.7、5.4.8等节，张振芳、刘连伏等补充撰写了6.3.1节，赵兵文、张步勤、王慕德补充撰写了5.3.3、5.3.4、6.2.2、6.2.3、6.3、8.1.4等节，丁燕斌、张振芳、刘长武补充撰写了7.6节，杜丙申、谢国强、杜小河、张振芳等补充撰写了9.4节，高文亭、尹保亭、张振芳、高会春等补充撰写了第12章。再版总体构思及统稿由刘建功、赵庆彪负责，审稿由赵庆彪、张振芳负责。随着充填采煤技术研究深入持续开展，必将取得更大的技术突破和进步，该书的再版，相信在推进充填采煤技术发展方面将起到积极推进作用。由于作者水平有限，谬误在所难免，恳请广大读者予以指正。

作 者

2015年12月

## 目次

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1 国内外充填开采技术发展历程与现状 .....     | 1  |
| 1.1 国外充填开采技术发展历程与现状 .....    | 1  |
| 1.2 国内充填开采技术发展历程与现状 .....    | 3  |
| 1.3 充填法采煤发展现状 .....          | 3  |
| 2 充填介质 .....                 | 7  |
| 2.1 煤矿矸石 .....               | 7  |
| 2.2 电厂粉煤灰 .....              | 11 |
| 2.3 其他 .....                 | 14 |
| 3 充填材料 .....                 | 18 |
| 3.1 充填主料——矸石的力学特性 .....      | 18 |
| 3.2 充填配料——粉煤灰的力学特性 .....     | 22 |
| 3.3 矸石与粉煤灰固体（散体）充填材料 .....   | 23 |
| 3.4 矸石膏体充填材料 .....           | 26 |
| 3.5 高水速凝固结充填材料 .....         | 33 |
| 3.6 似膏体充填材料 .....            | 43 |
| 4 充填法采煤矿山压力规律与岩层控制 .....     | 48 |
| 4.1 采场矿压控制原则及研究现状 .....      | 48 |
| 4.2 充填采煤顶板运移分析 .....         | 49 |
| 4.3 充填法采煤覆岩运移监测 .....        | 51 |
| 4.4 矸石充填开采上覆岩层移动特征模拟试验 ..... | 51 |
| 4.5 充填法采煤覆岩移动变形规律 .....      | 61 |
| 4.6 充填法采煤地表沉陷量成因分析 .....     | 71 |
| 4.7 小结 .....                 | 72 |
| 5 充填液压支架 .....               | 74 |
| 5.1 充填液压支架主要工作参数确定 .....     | 74 |
| 5.2 固体（散体）充填液压支架及配套设备 .....  | 84 |
| 5.3 膏体充填液压支架 .....           | 94 |

|      |                          |     |
|------|--------------------------|-----|
| 5.4  | 高水材料充填液压支架 .....         | 99  |
| 6    | 充填材料制作及输送系统 .....        | 105 |
| 6.1  | 固体(散体)材料充填系统 .....       | 105 |
| 6.2  | 矸石膏体充填系统 .....           | 113 |
| 6.3  | 高水材料充填系统 .....           | 132 |
| 7    | 固体(矸石与粉煤灰)充填法采煤技术 .....  | 143 |
| 7.1  | 试验条件概述 .....             | 143 |
| 7.2  | 采煤装备及工艺 .....            | 144 |
| 7.3  | 矿压观测 .....               | 148 |
| 7.4  | 充填效果监测 .....             | 172 |
| 7.5  | 地表移动变形实测 .....           | 181 |
| 7.6  | 7608 底分层工作面充填开采实例 .....  | 194 |
| 8    | 矸石膏体充填法采煤技术 .....        | 201 |
| 8.1  | 采煤与充填工艺 .....            | 201 |
| 8.2  | 矿压观测 .....               | 207 |
| 8.3  | 地表沉陷预测与实测 .....          | 213 |
| 9    | 高水材料充填法采煤技术 .....        | 229 |
| 9.1  | 采空区充填方法简介 .....          | 229 |
| 9.2  | 高水材料开放式充填实例 .....        | 236 |
| 9.3  | 充填效果观测 .....             | 241 |
| 9.4  | 4.5 m 采高综采高水材料充填工艺 ..... | 253 |
| 10   | 巷道矸石充填技术 .....           | 258 |
| 10.1 | 巷道充填装备 .....             | 258 |
| 10.2 | 充填系统 .....               | 259 |
| 10.3 | 工程实例 .....               | 261 |
| 10.4 | 充填效果 .....               | 268 |
| 11   | 矸石似膏体充填法采煤技术 .....       | 270 |
| 11.1 | 充填系统与工艺 .....            | 270 |
| 11.2 | 矿压观测 .....               | 271 |
| 11.3 | 地表沉陷实测 .....             | 276 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 12 高档普采、滑移顶梁高水材料充填采煤技术····· | 286 |
| 12.1 高档普采充填采煤工艺·····        | 286 |
| 12.2 工作面充填开采矿压观测及规律分析·····  | 289 |
| 12.3 悬移支架充填开采工艺·····        | 295 |
| 12.4 充填工作面地表移动观测与分析·····    | 307 |
| 参考文献·····                   | 314 |
| 后记·····                     | 317 |

# 1 国内外充填开采技术发展历程与现状

充填开采是在井下或地面用矸石、粉煤灰、砂、碎石、矿渣等废弃物料充填采空区,达到控制岩层运动及地表沉陷的采煤方法。

## 1.1 国外充填开采技术发展历程与现状

充填采矿在国外已有近百年历史,最早采用充填开采技术的是1915年澳大利亚的塔斯马尼亚芒特莱尔矿和北莱尔矿,通过应用废石充填矿房;其后60多年,充填开采技术在重金属和非金属矿山的应用研究中取得了长足的进步,先后经历了早期的固体废弃物干式充填阶段、水力充填阶段和细砂胶结充填阶段;21世纪以来,进入高浓度介质的膏体充填、碎石砂浆胶结充填和全尾矿充填等现代充填采矿方法研究及应用阶段。

国外开采沉陷理论研究大致分3个阶段:

第一阶段是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(1838年);后来经与法国工程师陶里兹共同改进,发展成为“法线理论”,给出了岩体下沉是沿煤层层面并沿法线向上传播的直观机理和规律。另外,依琴斯(1876年)的二等分理论和高斯理论、耳西哈(1882年)的自然斜面理论,裴约尔(1885年)的拱形理论等均对开采引起的沉陷研究作出了一定贡献。

第二阶段是岩移理论形成时期。20世纪20年代到80年代初,经过积极深入研究,形成了比较完善且较为实用的理论。1923—1940年,舒密茨、坎因霍斯特、巴尔顿和派茨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(1950年)提出了几何理论,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,这一理论现在被称为布德雷克-克诺特理论。另一波兰学者李特维尼申(1954年)把开采过程作为一个随机过程,并将其称为随机介质理论,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。

第三阶段是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矿山岩层移动的研究中,如分形理论和损伤力学等。特别是计算机的发展与应用,数字模拟的方法引起了越来越多的研究人员关注。从20世纪70年代至今,在经典理论(第二阶段)的算法基础上编程,使得过去难以计算的问题得以解决。三种主要的计算方法(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。

20世纪40—50年代,欧洲一些产煤国家利用水力充填进行了建筑物下采煤试验,并取得了成功,充填开采得以在波兰、德国广泛应用,波兰在城镇及工业建筑物下采用密实

水力充填技术的采煤量占全国建筑物下采煤量的 80% 左右。在 20 世纪 80 年代国外曾开展过煤矸石充填采空区的试验研究,其使用的充填料包括河砂、煤矸石和电厂粉煤灰等。英国、法国、比利时等国均不同程度地采用过风力充填技术进行采煤。

国外矿山充填开采技术的发展经历了 4 个发展阶段。

第一阶段:国外在 20 世纪 30 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使用效果的情况下,将矿山废料送入井下采空区。如澳大利亚北莱尔矿在 20 世纪初利用废矿石进行充填开采,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。

第二阶段:1864 年,为保护一座教堂的基础安全,美国宾夕法尼亚州的一个煤矿首次进行了水力充填试验。其后,南非、德国、澳大利亚等国家也先后试验并成功应用了水力充填工艺,20 世纪 40—50 年代,美国、澳大利亚和加拿大等国的一些矿山开发并应用了水力充填技术。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。这一阶段主要是将尾矿借助水力充入井下采空区,开发了采用选厂分级尾砂进行水力充填的技术工艺,在悬浮液输送固体物料、水力旋流器脱泥等方面取得了进步,实现了低浓度泵压或自流输送的水力充填采矿,其充填料的输送浓度较低,一般在 45% ~ 60% 之间,需要在采场大量脱水,因而通过脱除尾矿的细泥部分以加快渗透速度,并以渗透速度作为工业标准。

第三阶段:20 世纪 60—70 年代,开始应用和研发尾矿胶结充填技术。由于非胶结充填体无自立能力,难以满足采矿工艺高采出率和低贫化率的需要,因而在水力充填工艺得以发展并推广应用后,就开始研发胶结充填技术。胶结充填始于 20 世纪 50 年代末的加拿大鹰桥镍矿,该矿应用水泥尾砂浆取代充填料上铺板做工作面底板。1960 年,加拿大国际镍矿公司开始试验波特兰水泥固结水力充填技术,并于 1962 年在 Frood 矿投入生产应用。后来,这方面较为典型的代表为澳大利亚的芒特艾萨矿,在 20 世纪 60 年代采用尾矿胶结充填工艺回采底柱,其水泥添加量为 12%。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。

第四阶段:20 世纪 80—90 年代,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。高浓度充填是指充填料到达采场后,虽有多余水分渗出,但其多余水分的渗透速度很低、浓度变化较慢的一种充填方式。制作高浓度充填料的原料包括天然集料、破碎岩石料和选矿尾砂。所谓高浓度充填料,一般是指质量浓度达到 75% 的充填料浆。膏体充填是指充填料呈膏状,在采场不脱水,其胶结充填体具有良好的强度特性;碎石砂浆胶结充填是指以碎石作为充填集料,以水泥浆或水泥砂浆作为胶结介质的一种在采场不脱水的高质量充填技术;全尾矿胶结充填是指尾矿不分级,全部用作矿山充填材料,这对于尾矿产率低和需要实现零排放目标的矿山是十分有价值的。国外如澳大利亚的坎宁顿矿,加拿大的基德克里克矿、洛维考特矿、金巨人矿和奇莫太矿,德国的格隆德矿,奥地利的布莱堡矿,以及南非、美国和俄罗斯的一些井工矿近年来也应用了这些新的充填开采技术。

## 1.2 国内充填开采技术发展历程与现状

国内矿山充填开采技术的发展经历了与国外类似的4个发展阶段。

第一阶段：在20世纪50年代以前，国内均采用以处理固体废弃物为目的的废石干式充填技术。废石干式充填采矿法曾在20世纪50年代初期成为我国主要的采矿法之一，1955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和劳动强度大，满足不了采矿工业发展的需要。自20世纪50年代以后，废石干式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只有0.7%，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力充填工艺。1965年，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采空区工艺，有效地减缓了地表下沉；1960年，湘潭锰矿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，铜绿山铜矿、招远金矿和凡口铅锌矿等矿山应用了尾矿水力充填工艺。至20世纪80年代水力充填技术已在国内60余座有色、黑色等金属矿山中应用。

第三阶段：20世纪60—70年代，开始应用和研发尾矿胶结充填技术。国内初期的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输送胶结充填材料。其中，凡口铅锌矿从1964年开始采用压气缸风力输送混凝土胶结充填，充填材料水泥单耗为 $240\text{ kg/m}^3$ ；金川公司龙首镍矿也于1965年开始应用戈壁集料作为骨料的胶结充填工艺，并采用电耙接力输送，其充填体水泥单耗量为 $200\text{ kg/m}^3$ 。这种传统的粗骨料胶结充填的输送工艺复杂，且对物料级配的要求较高，因而一直未获得大规模推广使用。在20世纪70—80年代，上述充填技术被细砂胶结充填取代。20世纪70年代，凡口铅锌矿、招远金矿和焦家金矿率先应用细砂胶结充填。细砂胶结充填以尾矿、天然砂和棒磨砂等材料作为充填集料，胶结剂主要为水泥，集料与胶结剂通过搅拌制备成料浆后，以二相流管输方式输入采场进行充填。因细砂胶结充填兼有胶结强度和适于管道水力输送的特点，在20世纪80年代得到广泛应用，以分级尾矿、天然砂和棒磨砂等材料作为集料的细砂胶结充填工艺与技术也日臻成熟。目前，我国有20多座金属矿山仍在应用细砂胶结充填技术。

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新技术。1994年在金川公司二矿区建成第一条膏体泵送充填系统，进而铜绿山铜矿、湖田铝土矿、喀拉通克铜矿等相继建成了膏体充填泵送系统。

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，以及研究力度的加大，其技术差距正在逐步缩小。

## 1.3 充填法采煤发展现状

### 1.3.1 充填采矿分类

按充填动力方式可分为水力充填、风力充填、机械充填、矸石自重充填等。按所采用充填材料和输送方式的不同，可将充填开采方法分为如下几种：用矿车、风力或其他机械输送干式充填料充填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代用

品或其他胶凝材料与选厂尾砂等配制成具有胶结性质的充填材料充填采空区的胶结充填采矿法。煤矿充填法采煤还可分为巷道充填和采煤工作面采后充填两大类。

目前,矿山应用的充填开采方法与技术主要有胶结充填采矿法、覆岩离层注浆充填法、垮落矸石空隙注浆胶结充填减沉法、粉煤灰等部分代替水泥充填法、矸石充填采煤法等。

### 1. 胶结充填采矿法

近几十年,围绕充填材料选择、物理化学特性、优化配比组合、充填料管水力输送流体力学、充填体与围岩相互力学作用机理等进行了大量的试验研究,胶结充填采矿技术有了长足发展。胶结充填始于20世纪50年代的加拿大,现已发展出似膏体充填、膏体充填和高水材料充填等多种胶结充填采矿技术。膏体充填技术于1979年首先由德国格伦德铅锌矿开发成功,其目的是解决金属矿山尾砂充填需要建立复杂的隔排水系统等问题,其后在南非几个金矿陆续推广使用,效果良好。这种新工艺是将尾砂或其他充填骨料经浓缩机浓缩和真空过滤机过滤后,形成浓度达85%左右的膏体,用往复式活塞泵经管道以结构流形式压送到待充地点。水泥的添加方式通常有两种:一是将水泥制成砂浆后在井下泵站添加;二是在膏体出口前约30 m处安装一个45°角的喷射头,由压风吹入干水泥,使之与膏体混合。1992年以后,加拿大、澳大利亚、美国、南非等国家多个机构和企业投入了大量的人力、物力研发和应用膏体充填技术。1991年,我国金川公司建成膏体充填试验系统,并于1996年正式投入生产应用,随后武山铜矿也建成了膏体充填系统。

1991年,德国矿冶技术公司与鲁尔煤炭公司合作,把膏体充填技术应用到沃尔萨姆(Walsum)煤矿,进行长壁工作面的充填试采,充填设备为普茨迈斯特公司制造的液压双活塞泵,工作压力为25 MPa,最大输送距离可达7 km。主充填管沿采煤工作面布置在输送机与液压支架之间,每隔12~15 m接一布料管伸入采空区内12~25 m进行充填,充填管路随采煤工作面前移,但由于充填比较滞后,地面下沉系数较大。膏体充填系统的优点:一是充填材料浓度高,固体含量达到76%~84%,目前最高可达到88%;二是流动状态为柱塞结构流,无临界流速,最大颗粒达到25~35 mm,管路磨损小;三是膏体料浆基本不沉淀、不泌水和不离析,降低了井下污染,节省了排水费用;四是充填体强度高且水泥消耗量少;五是充填体易于接顶,有利于采矿作业安全等。膏体充填系统的不足之处是初期投资较高、需大功率泵送设备、充填管道堵塞处理难度大等。

高水速凝材料不强调提高充填料浆的质量浓度,而是利用高水速凝材料混合后形成的钙矾石有较强固水且速凝早强的特性,实现较广范围内高浓度的胶结充填。20世纪60年代,该工艺在英国率先研制成功,起初用于煤矿的巷道充填支护。20世纪90年代初,中国矿业大学发明了高水固结充填材料。招远金矿、小铁山矿、新桥硫铁矿等于20世纪90年代开始进行现场试验研究,并取得突破性进展。实践证明,高水材料配比要求严格,在干燥条件下充填体易失水粉化,但是其工艺可以有效地解决金属矿山水泥胶结充填作业中分级制浆复杂、井下采场脱水困难、充填体强度低、矿石损失贫化率高、采场生产能力低等一系列难题,为研制材料来源广泛、成本较低、性能更好的新型高水速凝材料奠定了基础。

### 2. 覆岩离层注浆充填法

覆岩离层注浆充填法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,占据空间、减少采出空间向上的传递,支撑离层上位岩层、减缓岩层的进一步弯曲下沉,从而达到减缓地表下沉的目的。

覆岩离层注浆充填法在 20 世纪 80 年代初首先从波兰发展起来,与垮落法控制顶板相比,离层区注浆可减少地表下沉 20% ~ 30%。经研究认为,该充填法采场离层带的产生是有一定条件的,即在煤层上覆岩层中存在硬度明显不同且具有一定厚度的岩层。试验表明,在工作面前后方 15 ~ 20 m 处离层发展最为充分。20 世纪 80 年代后期,抚顺矿务局和阜新矿业学院合作开展了离层区注浆试验,获得了初步成功。此后,在大屯徐庄煤矿、新汶华丰煤矿、兖州东滩煤矿和开滦唐山矿等进行了离层区注浆试验。不同程度地减缓了地表沉陷,取得了一定的实践经验,获得了一定的效果。但该充填法只能减缓地表塌陷,一般地表下沉系数小于 0.4,无法将地表沉陷控制在给定范围内,从而不能有效保护地面建(构)筑物、水体或铁路等。

### 3. 垮落矸石空隙注浆胶结充填减沉法

该技术利用垮落带岩石的碎胀性注入胶结材料对采空区矸石进行固结,现尚处于试验阶段。此充填法有以下特点:第一,浆液充填至采空区垮落矸石的空隙;第二,浆液凝固后有胶结性能及一定的强度;第三,充填浆液凝固后无水析出,克服了水力充填排滤水的难题;第四,充填与采煤平行作业。

### 4. 粉煤灰等部分代替水泥充填法

在充填采矿中,传统的低浓度胶结充填和近十几年出现的高浓度全尾砂胶结充填、块石砂浆胶结充填和膏体泵压输送胶结充填的胶结剂主要是普通硅酸盐水泥,充填成本中充填材料成本占 80% 以上,而水泥成本在胶结充填成本中占 30% ~ 60%,是造成充填成本过高的主要原因。因此,在不降低充填体强度的情况下,降低水泥单耗量或寻求水泥代用品,是充填技术的主要研究内容之一。

国内外的研究及应用实践表明,冶炼厂水淬炉渣、火力发电厂粉煤灰、铝土赤泥均是性能良好的水泥替代品。尤其是粉煤灰,除可部分替代水泥降低充填成本外,还可改善浆体流动性能,提高浆体悬浮性,因此应用更为广泛。目前,芬兰奥托昆普公司所属南维汉蒂等矿,已用高炉渣取代了 90% 的波特兰水泥。加拿大基德克里克矿的试验与应用表明,高炉渣或粉煤灰至少可取代 30% ~ 60% 的普通硅酸盐水泥。根据中南大学在安徽铜陵新桥硫铁矿、湖南柿竹园有色金属矿、湖南水口山矿务局、贵州开阳磷矿等进行的试验研究成果,添加粉煤灰后,充填体固水性能明显提高,泌水率仅为 4% 左右,与普通胶结充填(泌水率一般为 12% ~ 15%)相比,降低了 60% 左右,取得了良好的经济效益与社会效益,在矿山充填开采领域具有广阔的应用前景。

### 5. 矸石充填采煤法

充填开采就是在井下或地面用矸石或碎石等将采空区充填起来,以达到控制地表沉陷的目的。合理的矸石充填技术能够置换出更多的煤炭资源,从而提高煤炭资源的采出率。矸石充填的分类一般根据充填料充填采空区的方式来确定,包括人工充填、机械充填和风力充填,常用的是风力充填和机械充填。英国曾采用风力充填开采缓倾斜煤层,但效果不理想,下沉系数为 0.5 左右。充填料一般有煤矿矸石、矸石山矸石、采石场碎石、砂子和

粉煤灰等，一般不添加胶结料。

### 1.3.2 现代充填法采煤技术研究方向及发展趋势

现代煤矿充填法采煤是在安全、高效、绿色和生态开采的科学采煤理念的指导下所提出的新的采煤方法。发展现代化充填法采煤技术，要满足三点要求：①高产高效及高采出率；②可控制岩层运动与地表沉陷；③具有先进机械化装备与安全保障。

20 世纪 80 年代末以来，把非煤矿山应用比较成熟的现代充填方法应用于煤矿充填开采，使胶结充填技术研究取得了显著进展。但由于煤矿开采工艺复杂，相应充填工艺也较复杂，成本较高，应用范围受到一定限制。从充填工艺的研究发展历程看，实现低成本，高效、绿色开采，以及提升安全保障程度是研究方向。主要有以下几个方面：

(1) 煤矿充填开采必须建立起相应的充填法采煤矿山压力及岩层控制理论。以此为理论指导，努力攻克充填开采所需空间、输送及动力等关键技术，达到安全高效开采和控制地面沉陷的目的。

(2) 高浓度输送、充填装备及工艺。积极研究高浓度输送装备、充填液压支架及充填装置，是实现高浓度充填工艺的关键；高浓度介质充填可以减少胶凝剂的用量，降低充填成本，减少采场的脱水量，增大充填料浆的有效利用率，提高实际充填能力。

(3) 新型胶结材料。明显改善充填体的物理力学性质，提高充填体强度，有效控制地压，提高充填作用效果，同时减少井下环境污染。新型胶结材料既要满足采煤充填工艺要求，又要达到控制顶板所需强度；同时要求材料来源广泛，生产成本低廉。因此，新型胶结添加剂的开发与研制是未来充填技术中最为重要，前景最为广阔的研究内容，它是充填技术发展水平的重要标志，目前已开始应用有一定活性的工业废弃物如炉渣、粉煤灰作为胶结剂的组分。这既满足了充填技术要求，又综合利用了工业废弃物，走上了良性循环的发展道路。

## 2 充 填 介 质

### 2.1 煤矿矸石

#### 2.1.1 煤矸石定义

煤矸石是煤炭生产过程中产生的岩石泛称,包括巷道掘进排出的岩石、采煤工作面顶板垮落岩石,以及所采底板岩石、煤层中夹石等混入煤中的岩石和经选煤过程排出的炭质岩石。从狭义上讲,煤矸石是与煤层共生、伴生的夹在煤层中或为煤层顶底板的脉石,即在成煤过程中与煤层伴生的一种含碳量较低、比煤坚硬的黑灰色岩石。其石化程度较高、含有机质较低,可作为低热值燃料和建筑材料加以利用。本文所讲的煤矸石是指前一种的统称,一般占原煤产量的8%~20%。其中岩巷矸石占矸石总量的41%~53%,回采与半煤岩巷掘进所产生的煤矸石一般占矸石总量的29%~42%,选煤所产生的煤矸石及手选矸一般占矸石总量的11%~23%。

#### 2.1.2 矿物组分及物理性质

煤矸石中的矿物种类类似于煤,大多是结晶相,有硫化物、氧化物、氢氧化物、硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐、磷酸盐、氯化物、钒酸盐、钨酸盐、单质元素和其他一些由矿物学严格定义分类的矿物。高岭石、石英、长石、石灰石、蒙脱石、伊利石、硫化铁和氧化铝等广泛存在于煤矸石中,煤矸石中含有某些稀有金属(如Ga、V、Ti、Co等)成分,但一般达不到回收品位。

煤矸石定量分析洗选矸石的矿物组分及含量见表2-1。

表2-1 洗选矸石的矿物组分及含量

%

| 矿物组分 | 含 量 | 矿物组分 | 含 量  |
|------|-----|------|------|
| 石英   | 37  | 绿泥石  | 2    |
| 高岭石  | 35  | 长石   | 1    |
| 伊利石  | 12  | 方解石  | ≤0.5 |
| 伊蒙混层 | 6   | 非晶物质 | 4    |
| 蒙脱石  | 1   | 其他   | 余量   |

煤矸石一般是指炭质、泥质、钙质、铝质、砂质页岩,砂岩,以及黏土岩等岩石混合物。含碳量为8%~30%,有些含腐植酸,具有低发热值,发热量一般为800~1800 cal/g (1 cal = 4.1868 J);灰分为80%~86%;自然含水率为7%~10%;耐火度为1100~1200℃。