

国家自然科学基金项目 (51474206) 资助

建筑物下 粉煤灰膏体充填采煤技术的 研究与应用

Jianzhuwu Xia

何荣军 张 丽 著

Fenmeihui Gaoti Chongtian Caimei Jishu De Yanjiu Yu Yingyong

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

基金项目(51474206)资助

建筑物下粉煤灰膏体充填采煤技术的 研究与应用

何荣军 张 丽 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以河北金牛集团能源公司邢台煤矿粉煤灰膏体充填建筑物下采煤项目和矿山开采与安全教育部重点实验室的重要组成部分——充填采矿实验室为依托,系统深入地研究了建筑物下粉煤灰膏体充填采煤技术。全书主要内容包括绪论、粉煤灰膏体充填材料的配比选择、粉煤灰膏体的管道输送理论和阻力特性研究、粉煤灰膏体充填采煤控制地表下沉效果的预测与分析、现场工业性应用、结论及建议。

本书可供相关专业的研究人员借鉴、参考,也可供广大教师和学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

建筑物下粉煤灰膏体充填采煤技术的研究与应用/

何荣军,张丽著. —徐州:中国矿业大学出版社,

2018.6

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3965 - 5

I. ①建… II. ①何… ②张… III. ①粉煤灰—充填—采煤技术—研究 IV. ①TD82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 106370 号

书 名 建筑物下粉煤灰膏体充填采煤技术的研究与应用
著 者 何荣军 张 丽
责任编辑 何晓明
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 787×960 1/16 印张 7.25 字数 210 千字
版次印次 2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书研究内容以河北金牛集团能源公司邢台煤矿粉煤灰膏体充填建筑物下采煤项目和矿山开采与安全教育部重点实验室的重要组成部分——充填采矿实验室为依托,以周华强教授提出的固体废物膏体充填不迁村采煤新理论与新模式为研究背景,系统深入地研究了建筑物下粉煤灰膏体充填采煤技术。

粉煤灰膏体材料配比方面,在满足邢台矿实际要求的情况下,本书确定了最优的配比,并对粉煤灰膏体强度的影响因素进行了分析。

输送方面,本书推导出了粉煤灰膏体的流变方程;分析了管道特性、颗粒特性、膏体特性对管道阻力损失的影响规律。本研究首次将遗传神经网络应用于膏体输送的水力坡度预测计算模型,通过大量的试验,验证了该方法的可行性。

充填控制地表沉陷方面,本书对充填采矿条件下充填体的稳定性和作用机理进行了分析,并对全采全充条件下地表沉陷的主要影响因素进行了探讨。运用数值模拟软件 FLAC 对膏体充填开采和常规开采条件下地表的水平变形、曲率和倾斜状况分别做了模拟试验,并对模拟结果进行了比较分析。通过研究分析认为,在一定的

地质采矿条件下,充填体强度和充填率是粉煤灰膏体充填开采条件下地表沉陷的主要影响因素,得出了充填体强度和充填率与地表最大下沉值的关系曲线。

感谢重庆工程职业技术学院张丽老师对本书做了大量的信息处理和数值模拟工作;感谢在本书完成过程中给予支持的家人;感谢同意引用资料的前辈和同仁;感谢中国矿业大学博士生导师周华强教授对本书的指导和支持;感谢侯朝炯教授、瞿群迪副教授、王旭锋教授和关明亮老师为本项目提供的支持;感谢赵才智、王光伟、常庆粮、强辉、郑保才、王伟、全永红等专家对有关章节写作的支持;感谢武龙飞、郭振华、孙晓光等在数据搜索、文字录入和校对方面给予的帮助!

由于作者水平有限,疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

著 者

2017 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 问题提出及选题的目的意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 研究内容、研究方法与技术路线	13
第 2 章 粉煤灰膏体充填材料的配比选择	15
2.1 粉煤灰膏体充填材料的组成	15
2.2 粉煤灰膏体的配比选择与影响因素分析	22
2.3 本章小结	27
第 3 章 粉煤灰膏体的管道输送理论和阻力特性研究	28
3.1 粉煤灰膏体的管道输送理论	28
3.2 粉煤灰膏体输送环管试验	33
3.3 粉煤灰膏体输送阻力特性影响因素分析	40
3.4 本章小结	50
第 4 章 粉煤灰膏体充填采煤控制地表下沉效果的预测与分析	52
4.1 粉煤灰膏体充填采煤控制地表沉陷的理论分析	52
4.2 粉煤灰膏体充填采煤控制地表沉陷效果预测	57
4.3 影响地表沉陷主要因素的数值模拟及分析	68

4.4	本章小结	72
第 5 章	现场工业性应用	74
5.1	邢台矿充填系统概述	74
5.2	充填系统的要求和设备选择	74
5.3	充填系统检测与控制	88
5.4	进展情况	93
5.5	本章小结	94
第 6 章	结论及建议	95
6.1	主要结论	95
6.2	本书主要创新点	97
6.3	建议	97
附录		98
参考文献		101

第 1 章 绪 论

1.1 问题提出及选题的目的意义

随着经济的繁荣发展和社会工业化程度的提高,人类对原材料与能源的需求日益增长,对矿产资源的开发和利用力度将进一步加强。由于煤炭供应稳定、经济,人类对煤炭的依赖状况将会持续^[1]。虽然石油、天然气、水力发电、核电等能源所占比重在不断增加,但是煤炭在我国一次能源消耗中仍然占 60%以上,而且在未来一段时间内,我国以煤为主的能源结构将不会改变^[2]。我国煤炭资源分布广泛,建筑物下、水体下、铁路下压煤量大,但东部矿区煤炭资源正在逐步枯竭,矿井储量正在逐步减少,资源枯竭与经济发展之间的矛盾日益突出^[3-5]。据对国有重点煤矿的不完全统计,我国“三下”压煤约 137.9 亿 t,其中建筑物下压煤为 87.6 亿 t,村庄下压煤占建筑物下压煤的 60%^[6-7],这些储量大多集中分布于工业基础较好、开发条件优越、对煤炭需求较为迫切的经济发达地区。因此,大力研究和发展建筑物下煤层开采技术,对合理开发和充分利用地下资源、延长濒临破产的煤炭企业寿命、促进煤炭企业的可持续发展都具有重要的意义^[8]。

作为电厂燃煤副产物的粉煤灰产量随着燃煤用量的增加而增加。燃煤产生的粉煤灰总堆存量已超过 10 亿 t,而且还在以每年 1 亿 t 左右的速度增加,我国将成为世界上最大的排灰国^[9-10]。据统计,在全球排放的粉煤灰中,不到 1/2 的粉煤灰用于水泥生产、煤坑充填及成为土木工程及路面材料,剩余的部分则会就地堆放。要把如此大量的粉煤灰存放起来,不仅会占用大量的

土地,而且会对环境造成不同程度的威胁,建造储灰场又要耗费国家大量的工程投资费用,一旦发生事故,还会影响附近居民的正常生活。因此,对粉煤灰的处理和利用已成为我国面临的一个较突出的社会和经济问题。

粉煤灰俗称飞灰,是火力发电厂的废弃物,即煤粉在 $1\,500\sim 1\,700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下燃烧后,由烟道气带出并经除尘器收集的粉尘。据统计,每燃烧 1 t 煤就能产生 $250\sim 300\text{ kg}$ 的粉煤灰和 $20\sim 30\text{ kg}$ 的炉渣。近年来,随着电力工业的迅速发展,电厂粉煤灰的排泄量不断增加。粉煤灰不仅占用大量耕地,消耗大量冲灰用水,而且粉煤灰的二次扬尘对生态环境也造成了严重的危害。另外,随着国际性能源供需矛盾的加剧和国际社会对环境保护越来越高的要求,长期被作为固体废弃物的粉煤灰成为人们综合利用的研究对象,世界各国进行了从处理方法到利用方法的研究^[11],并取得了一定的成就。有关资料显示,美国和欧盟一些国家粉煤灰的利用率达到了 $70\%\sim 80\%$ ^[12-13],而我国粉煤灰的利用率仅为 40% 左右,远远落后于欧美等发达国家。所以,加强粉煤灰开发利用的研究工作,不仅可以减少环境污染,而且可以造福全人类。

对邢台煤矿而言^[14],粉煤灰作为燃煤电厂排放的固体废弃物,产量大,可利用量小,存放粉煤灰占用大量空间,而且污染环境,图 1-1 所示为邢台矿电厂粉煤灰装车现场。邢台矿矸石发电厂日排放粉煤灰量在 $1\,000\text{ t}$ 左右,年排放量约为 35 万 t ,每年粉煤灰处理费用 120 万元左右 。邢台矿目前煤炭产量约 200 万 t/a ,剩余可采储量约 $2\,000\text{ 万 t}$ 。井田位于邢台市西南近郊,井田范围内地面建筑压煤量约 $3\,200\text{ 万 t}$ 。



图 1-1 邢台矿电厂粉煤灰装车现场

针对邢台煤矿的实际情况,本书就邢台煤矿提出开展粉煤灰充填技术的研究与试验。其目的是利用粉煤灰固体废物资源,解放地面建筑物压煤。本试验研究,一方面可以把粉煤灰输送到井下,实现邢台矿坑口电厂灰渣资源化利用,解决粉煤灰地面排放对环境的污染问题;另一方面将形成一套以粉煤灰为主要原料的、与邢台矿区厚煤层综采工艺相适应的粉煤灰膏体充填控制开采沉陷技术,能够显著提高煤炭资源采出率,解放呆滞煤量,实现不迁村采煤及延长矿井服务年限。此外,河北金牛集团能源公司其他兄弟矿井同样存在大量的各类建(构)筑物压煤问题,粉煤灰膏体充填采煤技术试验成功以后,将为全公司其他矿井解放建(构)筑物下压煤,提高煤炭资源采出率及固体废物资源化利用提供有效的技术途径,有着重要的理论意义和现实意义^[15-17]。

粉煤灰膏体充填^[18-19]是将粉煤灰、胶结料(混合料)与水进行优化组合,配制成具有良好稳定性、流动性和可塑性的膏状胶结体,在重力或外加应力(泵压)作用下,以柱塞流的形态输送到采空区完成充填作业的过程。膏体充填技术在我国有色金属矿山采矿工程中已广泛应用。煤矿开采有别于有色金属矿山开发^[20],随着煤炭市场的变化,国家对煤炭工业实现绿色开采越来越重视,因此,创新绿色采矿技术也是 21 世纪采矿技术的重要发展方向之一。可见,本书的研究方向既符合现代矿山充填技术发展的趋势,又可以解决当前存在的普遍性技术难题,具有明确的针对性和目的性;本研究内容既有理论成果创新的可能性,又有实际推广的应用前景,属矿业工程中的前沿性研究课题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外建筑物下采煤技术的发展

19 世纪末,德国在埃森矿区的充填试验标志着世界上建筑物下采煤技术的兴起。100 多年来,逐渐发展形成了包括充填开采、条带开采、房柱式开采、离层区注浆、联合开采、协调开采等的一系列建筑物下采煤方法^[21-23]。

(1) 充填开采

充填开采就是在井下或地面用矸石、砂、碎石等物料将采空区充填起来,达到控制地表沉陷的目的。充填开采在波兰、英国、德国等国家应用较多,初期主要通过自重和手工充填,后来发展了水力、风力充填方式,使用的充填材料通常是河砂、煤矸石和电厂粉煤灰等。其中,波兰采用水力充填(常称之为水砂充填)方式,在城镇和工业建筑物下充填时取得了较好的效果,其长壁工作面地表下沉系数 q 为 $0.1\sim 0.2$,用水砂充填开采的煤量占其建筑物下总采煤量的 80% 左右。英国曾采用风力充填开采缓倾斜煤层,但效果并不理想,下沉系数为 0.5 左右;德国在一般建筑物下采用人工充填、在重要建筑物下采用水力充填,充填材料为炉渣或经破碎的矸石;保加利亚和日本曾采用风力充填开采;法国曾采用水砂充填开采。

(2) 部分开采

部分开采主要有条带开采、房柱式开采、巷道穿采、限厚开采、留不规则煤柱开采等。其中,条带开采的基本做法是:在被采煤层中采一条带、留一条带,利用保留的条带煤柱支撑上覆岩层,达到控制地表变形、保护地面建筑物的目的^[24]。条带的布置形式及开采方法包括水砂充填条带、矸石充填条带、冒落条带、分层冒落条带、近距离煤层群条带、变采留比条带、不规则条带、双对拉工作面条带等。其中,冒落条带开采一般地表下沉系数 q 为 $0.1\sim 0.2$,当煤柱宽度偏小时,地表下沉系数将增大,见表1-1。相比之下,水砂充填条带可以进一步提高控制地表沉陷的效果。

表 1-1 国外部分条带开采地表下沉量偏大情况统计

矿井	采深/m	采厚/m	采宽/m	留宽/m	顶板管理方法	地表下沉系数
波兰某矿	166	2.7	8	8	全冒落	0.285
英国某矿	75	1.3	6~7	6~7	全冒落	0.275
苏联滨海煤管局	265	2.5	4	4	全冒落	0.336

20世纪50年代,波兰、苏联、英国等主要采煤国家开始应用条带法开采建筑物下压煤,尤其是村镇、城市下压煤,均取得了较为丰富的实践经验。如波兰采用的充填条带开采法,成功开采了卡托维兹(波兰南部城市,人口35万)、

贝托姆(人口 25 万)等城市下的煤炭资源,采出率为 45.8%~60.0%。国外条带开采的采深一般小于 500 m,开采厚度多为 2 m 左右,个别达到 16 m,采出率一般为 40%~60%,除个别因采留宽度太小使下沉系数偏大以外,地表下沉系数一般小于 0.1,个别采深较大的下沉系数达到 0.16^[25]。

围绕条带开采技术,国外发展了有关条带煤柱设计理论,如有效区域理论、压力拱理论、威尔逊理论、极限平衡理论等,提出了多种煤柱强度计算公式,最常用的有欧伯特-德沃尔/王(Obert-Duvall/Wang)公式、浩兰德(Holland)公式、沙拉蒙-穆努罗(Salamon-Mnuro)公式、比涅乌斯基(Bieniawski)公式等。

对于房柱式开采,目前主要在以柱式开采为主的美国、澳大利亚、加拿大等国家应用,其采出率一般为 50%~60%,地表下沉系数 q 为 0.35~0.68。

部分开采方法可以在保护地面建筑物的前提下采出一部分煤炭资源,具有较好的经济效益,其最大的缺点是采出率低,会造成资源浪费。

(3) 覆岩离层区注浆

覆岩离层注浆控制地表沉陷技术^[26]是利用矿层开采后覆岩层断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中注入充填材料,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,从而达到减缓地面下沉的目的。

20 世纪 80 年代,该法首先从波兰发展起来,在覆岩出现离层之后,有关变形还未波及或很少波及地表之前,通过钻孔把粉煤灰等工业废料制成的料浆高压注入到离层空间,达到控制和减少地表沉陷的目的。以波兰为例,与全部垮落法开采相比,离层区注浆方法可以减少地表下沉 20%~30%。

(4) 联合开采与协调开采

联合开采与协调开采是通过本煤层或邻近煤层数个工作面之间的相互配合,使地表部分变形值得以相互抵消或使受保护建筑物下只出现变形值较小的移动边界。波兰、英国、苏联等都曾应用此法开采了大量的建筑物下压煤,但多工作面同时开采对矿井正常的开拓布局有较大影响,管理也比较复杂,所以联合开采与协调开采一般只在煤层不厚、地表建筑物范围有限时才比较有效。

1.2.2 国外膏体充填技术的发展

膏体充填技术是 1979 年首先在德国格伦德铅锌矿发展起来的,目的是为了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。膏体充填技术试验成功以后,相继在加拿大、澳大利亚、美国、南非等国家得到推广应用,如澳大利亚的恩特普赖斯矿、坎宁顿矿,南非的库克 3 号矿,美国幸运星期五矿、格切尔矿,加拿大多姆金矿、基德里矿等许多金属矿山采用了膏体充填工艺技术^[27-30]。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煤矿,进行长壁工作面的充填开采,充填工艺上使用普茨迈斯特公司生产的液压双活塞泵,工作压力为 25 MPa,最大输送距离达到 7 km,主充填管沿工作面煤壁方向布置在输送机与液压支架之间,每隔 12~15 m 的距离接一布料管伸入到采空区内 12~25 m 进行充填,充填管路紧随着工作面设备前移,如图 1-2 所示。



图 1-2 德国沃尔萨姆煤矿井下回采面膏体充填方式

从德国的煤矿膏体充填初步试验的情况来看,其充填的目的主要是处理固体废弃物,充填比较滞后,因此采空区充填强度不够,地表下沉系数较大,地表下沉系数 q 为 0.3~0.4,介于水砂充填与风力充填之间。但与普通水砂充填等比较,膏体充填又表现出了独特的优越性,具体体现在以下三个方面:

(1) 浓度高

一般讲,膏体状充填料的浓度比分级水砂充填料和高浓度充填料都要高,目前膏体充填料最高浓度可以达到 88%。

(2) 流动状态为柱塞结构流

普通水砂充填过程中,料浆管道输送呈现出典型的两相紊流特征,存在着管道输送的不淤临界流速,低于该流速的料浆容易沉积堵塞管路,而流速过高又会导致管道磨损严重。膏体充填时,料浆在管道中基本是整体平推运动的,无临界流速,最大颗粒粒径可以达到 25~35 mm,流速小于 1 m/s 时仍然能够正常输送,管路磨损相对较小,称之为柱塞结构流。

(3) 膏体料浆基本不沉淀、不泌水、不离析

膏体充填材料的这个特点非常重要,可以降低凝结前的隔离要求,使充填工作面不需要复杂的过滤排水设施,也避免或减少了充填水对工作面的影响,充填密实程度高。而普通水砂充填时,除大部分充填水需要过滤排走以外,常常还在排水的同时带出大量的固体颗粒,其量高时达 40%,只在少数情况下低于 15%,由此会产生繁重的沉淀清理工作。

1.2.3 国内建筑物下采煤技术的发展

我国建筑物下采煤首先从辽宁抚顺胜利矿开始。之后,新汶矿务局孙村、良庄、协庄等矿也曾试验水砂充填。但是,水砂充填不仅需要建立充填物料输送系统,还要在工作面建立泄水系统,特别是随工作面推进必须用人工不断拆、建挡水墙(板),使得充填工艺复杂,机械化程度和劳动效率低。此外水砂充填存在比较严重的泌水收缩,需要反复充填,不适应高产高效生产的需要,因此水砂充填条带法并没有在国内得到推广应用。相比之下,冒落条带开采法克服了水砂充填条带的缺陷,在抚顺、阜新、蛟河、峰峰、鹤壁、平顶山、徐州等矿区得到了较好的推广应用。中国矿业大学等单位对条带开采技术进行了系统的总结,进一步发展了条带煤柱设计理论和条带开采地表沉陷预测方法。目前,我国煤矿冒落条带开采的宽度一般限制在 $1/10 \sim 1/5$ 采深范围内,采出率 40%~68%,采深越大,煤层越厚,则采出率越低,条带开采控制地表沉陷最大的缺点是煤炭永久损失率较高。我国条带开采实用效果见表 1-2^[25]。

1990 年,兖州矿务局与中国矿业大学合作,在北宿煤矿吴管庄进行了薄煤层双对拉工作面联合开采试验,由四个工作面协调开采,形成倾斜长 450 m 的均匀移动边界,沿走向长推进 1 100~1 500 m,使吴管庄村全部房屋一次性落入充分采动范围之内,有效地保护了村庄安全,开采过程中房屋 II 级破坏

率只占 4.9%。

表 1-2 我国条带开采减沉实用效果

矿名	采深 /m	采厚 /m	留宽 /m	采宽 /m	采煤方法	煤柱宽 高比	采出率 /%	下沉系数 /%
抚顺胜利矿	505	16.6	38	28	充填条采	2.3	42.4	1.0~2.0
蛟河三井四层	60~110	1.0	10	12~20	冒落条采	10.0	62.8	3.0
蛟河三井六层	105~170	1.0	13~17	18~43	冒落条采	15.0	68.9	10.0
四川南桐矿	240	1.5	12	12	冒落条采	8.0	50.0	5.6
阜新平安矿	144	1.4	20	30~50	冒落条采	14.3	64.0	15.0

20 世纪 80 年代后期,抚顺矿务局与阜新矿业学院(现辽宁工程技术大学)合作开展了离层区注浆试验,之后老虎台矿、徐庄矿、华丰矿、东滩矿、唐山矿等相继开展了离层区注浆试验,试验报道的减沉率为 36%~65%,个别甚至达到了 80%,具体见表 1-3^[31]。对于离层区注浆的减沉效果,学术界存在较大的争论。张华兴、王金庄等通过现场实测和理论分析,认为离层区注浆的地表减沉率不会超过 40%(这与国外结论是一致的),国内离层区注浆试验减沉率之所以偏大,主要是由于试验工作面开采深度均较大(529~734 m),工作面倾斜长度较小(82~135 m),属于典型的非充分采动情况。此外,目前离层区注浆未考虑浆液中水的渗漏问题,水灰比普遍偏高。如兖州东滩煤矿 14307 综采面离层注浆平均水灰比为 4:1,14308 综放工作面离层注浆平均水灰比为 3.2:1;徐州大屯徐庄煤矿 7215 工作面离层注浆水灰比为 4.88:1~2.21:1。

表 1-3 国内部分矿井离层注浆量情况统计

矿井	采深/m	采厚/m	采煤体积 /m ³	开采方法	注浆总量 /m ³	注采比 /%	减沉率 /%
老虎台	602	25.7	72 000	条带充填	34 000	47.2	65.2
徐庄	529	2.6	274 000	长壁垮落	129 000	47.1	30~70
东滩	545	5.4	626 000	综放	238 000	38.0	42~80
华丰	830	2.2	716 000	长壁垮落	486 000	67.9	54

20 世纪末,中国矿业大学钱鸣高院士提出了关键层理论,把在采场上覆岩层中存在着多层岩层时,对岩体活动全部或局部起控制作用的岩层称为关键层,为“三下”采煤覆岩控制提供了理论指导。该理论在徐州沛城煤矿城市下条带开采设计中得到了成功的应用。

1.2.4 国内膏体充填技术的发展

在我国,膏体充填技术首先引起了有色金属矿山的重视。“八五”“九五”期间,甘肃金川有色金属公司与北京有色冶金设计研究总院合作,利用国家重点科技攻关项目“全尾砂膏体泵送充填工艺及其设备研究”,在金川二矿区建成了我国第一条膏体充填工艺系统^[28]。如图 1-3 所示,充填材料主要为洗选尾砂、棒磨砂、粉煤灰和水泥,膏体质量浓度可达到 82%,水泥用量平均 280

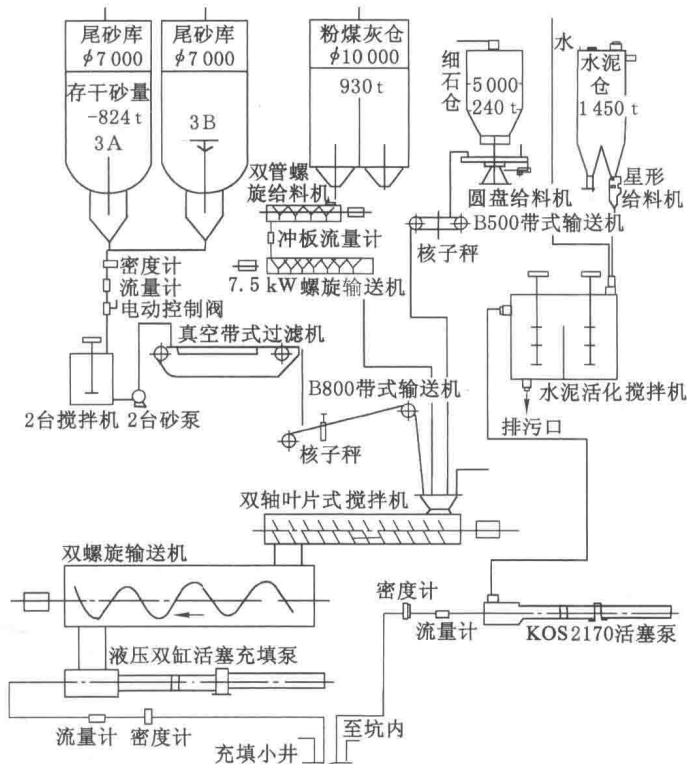


图 1-3 金川二矿区膏体充填工艺系统

kg/m^3 , 充填体最终抗压强度大于 4 MPa。该系统采用了德国施维因公司生产的 KSP-140HDR 矿用充填泵, 自制双轴连续搅拌机, 美国霍尼韦尔公司生产的 TDC-3000 型工业集散控制系统, 整个充填系统实现了计算机控制, 充填泵的泵送压力为 13 MPa, 充填能力为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

1994 年, 湖北大冶铜绿山铜铁矿推广运用了尾砂膏体充填技术, 充填泵也从德国进口, 型号为 KSP80, 泵送压力为 6 MPa, 充填能力为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 。充填工艺系统^[32]如图 1-4 所示。

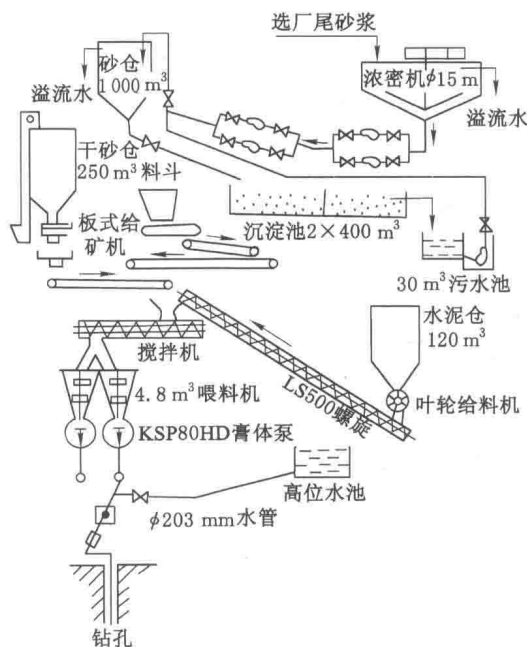


图 1-4 大冶铜绿山铜铁矿膏体充填工艺系统

需要指出的是, 金川二矿区和铜绿山铜铁矿的膏体充填均没有考虑控制地表沉陷的需要。

对于煤矿, 由于煤矿绿色开采的发展要求和村庄压煤开采的迫切性, 周华强等^[33]提出了固体废物膏体充填不迁村采煤的新方法, 该方法是煤矿绿色开采技术的重要组成部分。郭广礼等^[34]根据载荷置换原理, 提出了“条带开采—注浆充填固结采空区—剩余条带开采”的三步法进行开采沉陷控制以保