

国家自然科学基金面上项目资助(51678220)

破碎围岩注浆加固技术 及其工程应用

POSUI WEIYAN ZHUJIANG JIAGU JISHU
JIQI GONGCHENG YINGYONG

王雨利 王晓蕾 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金面上项目资助(51678220)

破碎围岩注浆加固技术及其工程应用

王雨利 王晓蕾 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地对破碎围岩注浆加固的科研成果和工程实践进行了总结。内容包括国内外注浆技术的研究现状,新型无机注浆材料的研发原则等相关问题,围岩注浆围岩特征,层次注浆法理论基础、气动注浆系统,注浆效果评价方法的阐述,注浆工程的组织管理,注浆过程中遇到漏浆、注浆管路堵塞、孔间串孔等问题的解决办法,以及无机材料的生产工艺的介绍。本书理论性和实践性强,是一本集破碎围岩注浆施工经验和研究成果于一体的综合书籍,可供相关专业工程技术人员与科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

破碎围岩注浆加固技术及其工程应用/王雨利,王晓蕾著. —徐州:中国矿业大学出版社,2017.3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3411 - 7

I. ①破… II. ①王…②王… III. ①破碎岩体—围岩—注浆加固 IV. ①TD265.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 315242 号

书 名 破碎围岩注浆加固技术及其工程应用
著 者 王雨利 王晓蕾
责任编辑 王美柱
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 江苏淮阴新华印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 10.75 字数 268 千字
版次印次 2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷
定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

煤炭在我国经济发展中起着重要作用,是我国国民经济的支柱产业,随着煤炭资源的大量回采,浅埋深煤层已趋于殆尽,煤炭开采不得不向深部延深,煤层开采深度增加必然导致巷道围岩应力升高,巷道围岩变形量相应增大,从而导致巷道围岩破碎、松散,巷道破坏严重。采取注浆技术对破碎围岩进行加固是一种有效的技术措施。本书在广泛借鉴前人经验的基础上,系统地对笔者的科研成果和工程实践进行了总结。

全书内容共分十章:第一章介绍了国外注浆技术发展历史和注浆技术在我国的发展;第二章介绍了注浆材料、注浆设备、注浆工艺国内外研究现状;第三章较详细地介绍了新型无机注浆材料,包括研发原则、试验材料及方法、硬化机理、外加剂对注浆材料水化性能的影响、添加剂对失流时间的影响、固化强度的调节等无机材料相关问题;第四章介绍了围岩注浆分区特征以及采动影响巷道变形规律和合理注浆时机;第五章介绍了层次注浆法理论基础、高性能无机注浆材料、层次注浆工艺参数、注浆管及封孔技术、气动注浆系统以及层次注浆技术工艺流程;第六章介绍了注浆效果评价方法,包括分析法、检查孔法、开挖取样法、物探法,并对每种方法进行了详细的阐述;第七章介绍了注浆工程的组织管理,相关单位的职责分工,现场钻孔注浆施工组织管理、质量保证措施及质量控制、安全生产保证措施;第八章介绍了注浆过程中遇到的问题,主要包括漏浆、注浆管路堵塞、孔间串孔、长时间注浆压力升不上,并对每个问题给出了相应的解决办法;第九章结合长平矿动压影响巷道加固、古书院矿 15[#] 煤层软煤巷道加固、寺河二号井叠加应力软煤巷道加固、寺河矿大采高工作面三角区加固、成庄矿原低强度支护采动影响巷道加固、成庄矿 5310 工作面片帮治理、寺河矿 1308 工作面端头区破碎围岩注浆加固、综采工作面过断层超前深孔注浆、成庄矿 4311 工作面沿空留巷巷内充填,以实际工程案例详细介绍了注浆技术中的注浆方案以及注浆效果分析,为类似工程的注浆施工提供借鉴;第十章介绍了无机材料的生产工艺,包括生产线设备和生产工艺。

本书内容丰富,理论性和实践性强,是一本集破碎围岩注浆施工经验和研究成果于一体的综合书籍,可供相关专业工程技术人员与科研人员参考使用。

本书在编写过程中参考了大量的文献和专业书籍,谨向相关作者深表谢意!

由于作者水平和能力所限,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者严加斧正,不吝指教为盼!

著 者

2016 年 12 月

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 注浆技术发展历史	1
第三节 注浆加固机理	3
第二章 破碎围岩注浆加固现状	7
第一节 注浆材料	7
第二节 注浆设备	10
第三节 注浆工艺	12
第三章 新型无机注浆材料	14
第一节 引言	14
第二节 注浆材料的研发原则	14
第三节 试验材料及方法	14
第四节 新型无机双液材料的硬化机理	17
第五节 外加剂对注浆材料水化性能的影响	19
第六节 添加剂对失流时间的影响	21
第七节 固化强度调节	29
第八节 新型无机双液材料的其他性能	40
第九节 新型单液材料配比及性能研究	51
第十节 系列化注浆材料	54
第四章 围岩变形破坏规律及合理注浆时机	59
第一节 围岩破坏分区特征	59
第二节 采动影响巷道变形规律	63
第三节 合理注浆时机	65
第五章 层次注浆工艺及理论	68
第一节 层次注浆理论基础	68
第二节 高性能无机注浆材料	69
第三节 层次注浆工艺参数	70
第四节 注浆管及封孔技术	78
第五节 气动注浆系统	79

第六节 层次注浆技术工艺流程	81
第六章 注浆效果评价与检查	83
第一节 注浆效果评定方法分类	83
第二节 注浆效果检查评定方法	83
第七章 组织管理	90
第一节 职责分工	90
第二节 现场钻孔注浆施工组织管理	90
第三节 质量保证措施及质量控制	91
第四节 安全生产保证措施	92
第五节 技术资料	93
第八章 注浆施工中常见问题及对策	95
第一节 漏浆	95
第二节 注浆管路堵塞	97
第三节 孔间串浆	98
第四节 长时间注浆压力不上升	99
第九章 典型工程案例	100
第一节 长平公司动压影响巷道加固应用	100
第二节 古书院矿 15 [#] 煤层软煤巷道加固应用	109
第三节 寺河二号井叠加应力软煤巷道加固应用	114
第四节 寺河矿大采高工作面三角区加固应用	118
第五节 成庄矿原低强度支护采动影响巷道加固应用	121
第六节 成庄矿 5310 工作面片帮治理	126
第七节 寺河矿 1308 工作面端头区破碎围岩注浆加固	127
第八节 综采工作面过断层超前深孔注浆	135
第九节 成庄矿 4311 工作面沿空留巷巷内充填应用	137
第十节 典型工程注浆案例效果分析	154
第十章 无机材料生产工艺	156
第一节 生产线建立的背景和意义	156
第二节 生产线设备介绍	157
第三节 生产工艺	161
参考文献	163

第一章 绪 论

第一节 引 言

煤炭在我国经济发展中起着重要作用,是我国国民经济的支柱产业,我国是煤炭资源/储量大国,同时也是产量大国,位居世界第一,据统计,2012年36.6亿t,2013年39.7亿t,2014年38.7亿t,2015年37.4亿t,2016年34.1亿t。在《煤炭工业发展“十三五”规划》中明确提出,到2020年,我国要实现煤炭供需基本平衡,煤炭产量控制在39亿t,煤炭生产在我国经济发展中将继续保持关键性地位。

随着煤炭资源的大量回采,浅埋深煤层已趋于殆尽,煤炭开采不得不向深部延深,随着矿井开采深度的增加,煤矿开采难度也在不断加大,矿井安全问题也就随之变得越来越重要^[1-2]。煤层开采深度的增加必然导致巷道围岩应力升高,巷道围岩变形量相应增大,从而导致巷道围岩破碎、松散,巷道破坏严重,表现在巷道产生严重的变形,如巷道片帮、底鼓。针对巷道围岩支护,国内外支护专家们进行了大量的理论研究,逐渐形成了很多支护理论及技术^[3-6],诸如松动圈理论、锚喷—弧板支护理论、联合支护理论等,砌碛、锚喷、U型钢可缩支架、锚索网等支护技术,这些理论 and 支护技术对于软岩巷道的支护起到了很重要的作用,对煤矿巷道支护产生重要影响。但是,由于煤矿巷道支护受到地质条件复杂的影响,加上当前煤矿开采深度日渐增加,巷道的破坏形式更加复杂,当遇到一些巷道围岩破碎严重、围岩松软,再使用这些传统的支护方法生搬硬套地对破碎围岩巷道进行支护,就不能形成稳定的承载结构,当按照原先的支护方法对破坏形式复杂的巷道进行支护时,往往在支护后开采动压影响期间巷道产生严重的片帮、底鼓,顶板下沉严重,严重影响煤矿的安全生产。所以对于围岩破碎严重的巷道,新的支护技术的提出就成为当前煤矿开展安全生产工作的需要。

随着科学技术的进步,针对当前破碎围岩巷道支护难题,国内外专家提出了注浆与锚索支护相结合的破碎围岩支护技术,首先对巷道进行锚索网联合支护,而后进行注浆二次支护,浆液通过注浆泵注入破碎围岩后充填围岩内部裂隙,并对开裂破碎的围岩体进行胶结,使破碎围岩内部形成的裂隙消失,围岩恢复为具有完整结构的连续体,在破碎围岩恢复连续性后,高强锚索对其施加高强度的边界条件,使注浆后的围岩具有较强的承载能力,阻止围岩再次破坏,确保加固后的巷道围岩整体稳定。

第二节 注浆技术发展历史

一、国外注浆技术发展历史

早在1802年,法国的夏尔斯贝林尼用自己设计的冲击泵注入黏土和石灰浆液,修复被水流侵蚀的挡潮闸的砾石地基工程,被认为是注浆施工的开始。1876年,美国的托马斯、霍

克斯莱利用浆液自然下流方式向滕斯托尔水坝的岩石基础注入硅酸盐水泥。1886年,英国的克雷阿森德为了向衬砌与地层的空隙内充填水泥,研制成功了压缩空气注浆机。1880~1905年,当时在法国北部和秘鲁的煤矿工作的罗伊曼克斯、波迪埃尔、萨克雷埃尔、弗兰士等组成矿山技术小组,在涌水量大的立井施工中进行硅酸盐水泥的注浆试验,研制出高压注浆泵,并且对注浆材料的配方和注浆施工等有关问题做了改进。这些发明和改进构成现代岩层注浆技术的基础。

化学注浆最早是在1920年,由德国的尤斯登(E. J. Joosten)注入水玻璃和氯化钙。1945年到现在,广泛采用以水玻璃为主要成分的科密则科特(丸安隆和博士等研制的MI法)、海德罗克以及获得国铁技术研究所专利权的(通口芳朗博士)Lw法等。波兰华沙气象水利研究所地下水动力学专题组最近研究了利用合成树脂进行止水防渗的新工艺,所完成的研究主要包括新的合成材料、注浆工艺和浆液在地层中的扩散理论。第一阶段首先完善了MS-10脲醛树脂和AF-3甲醛丙酮的生产工艺。然后进行了这两种浆液的室内和野外注浆试验,以检验其实际应用条件。此外,还进行了一系列控制注浆试验,以便通过有控制的注浆固结成所要求的空间形态。日本研究的重点为可注性好、固结强度大、凝结时间易于控制、价格便宜和使用方便的注浆材料,而且改革注浆工艺,从原始的钻杆注浆法逐步改进并采用了过滤管法、套管法、电渗法、井点法以及喷射法等注浆施工方法。

利用数值模拟技术动态指导帷幕施工。可在帷幕上下游布置一定数量水位观测点,通过地下水数学模型,及时掌握帷幕线上主要渗水段的变化,从而达到注浆施工的目的,以保证帷幕总体堵水效果。同时,为防止地下水对注浆结石的侵蚀及水位抬高后对充填的潜蚀作用,采用抗侵蚀的注浆材料并对充填物进行压注浆加固。注浆过程的智能化:将流量、压力等检测仪表、电动调节阀、微机、打印机及电控柜等集中安装于中央控制室内,采用模块化结构的系统软件,即可初步实现注浆过程智能化。20世纪80年代以后,世界各国对化学浆液进行了不同程度的改性,提高了浆液的性能,降低了毒性。进入21世纪,注浆材料正向着超细水泥和改性水玻璃等方向发展,并逐步替代化学浆材,从而减小环境污染,降低注浆成本。

综上所述,注浆技术经过大约两百年的发展,由开始的单浆液注浆发展到多浆液注入,设备也由单一的注浆设备发展到集勘测、记录、检查等多技能为一体的专用设备;注浆材料由传统的黏土类浆液发展到高效无毒易注的化学类浆液;工艺技术等日渐完善,应用范围更加广泛。其大致发展如表1-1所示。

表 1-1 注浆技术发展历程简表

时 间	阶 段	所用注浆材料
1802~1857年	原始黏土浆液注浆阶段	黏土浆液
1858~1919年	初级水泥浆液注浆阶段	水泥浆液
1920~1969年	中级水泥浆液、化学浆液注浆阶段	水泥浆液简单改性、化学浆液
1970年至今	现代注浆阶段	新型注浆材料

二、注浆技术在我国的发展

20世纪50年代初,我国开始了注浆技术的应用。在煤炭、水电、铁路等行业中,利用注

浆法治理水害。应用初期,由于理论不够完善、技术比较落后,注浆效果不够理想。60年代以后,煤炭行业的注浆技术得到快速发展。注浆材料由单液水泥浆发展到CS双浆,即水泥、水玻璃浆液、MG-646、聚氨酯(包括水溶性聚氨酯及其他许多种化学浆液)。近年来,又开发了以黏土为主剂的CL-C型黏土水泥浆,降低了注浆成本,为注浆技术的进一步普及应用开辟了一条新路。

注浆技术在国内矿山工程中得到了广泛应用。1960年在山东济宁1号井用水玻璃、铝酸钠首次处理30.6 t/h的井壁淋水;1963年4月,凡口铅锌矿金星岭矿井首次采用预注浆凿井,顺利通过了喀斯特地层;从1964年开始,在湖南水口山矿山进行防水帷幕的注浆施工,前后共耗用水泥23 129.6 t。

注浆材料的发展,促进了注浆设备和机具的研制,相继出现了一系列高性能专用注浆泵、高精度的陀螺定向测斜仪、KWS型止浆塞等。北京建井研究所研究开发的许多注浆新工艺、新材料,相当一部分在技术水平、施工效果等方面已达到国际先进水平。流量测井技术的开发为井筒涌水量的预测、注浆效果的检查,提供了准确可靠的技术手段。在软弱地层加固方面研究出单管、双管和三重管高压喷射注浆法。在加固土体和浆液流向方面,旋喷、定喷、定摆喷技术不仅在矿山建设中得到应用,还在土建、坝基及交通工程中发挥了重要作用。

注浆技术在全国范围内得到很大的发展和推广应用。各地建立起了专业注浆队伍,治理矿山各种水害或加固不良岩体。如用于预注浆凿井,井壁或壁后注浆,井巷及硐室的涌水封堵,软岩或软土的封水加固,特大透水或淹井事故的治理等。

第三节 注浆加固机理

在维护巷道稳定的各种控制手段中,只安设支护来维护巷道稳定是一种被动的办法,仅从进行支护的角度研究围岩稳定是一种局部的研究,采用注浆等地质体改造的办法是维护巷道稳定的一种主动办法,由于注浆具有良好封闭性,理所当然地成为控制巷道变形的关键手段。注浆是借助于外力把浆液注入岩体中,产生充填、挤压、压密、固结、封堵作用,形成强度高、抗渗性好、稳定性强的密实结构体,从而达到改善岩体物理力学性质的目的。它能够通过改善局部围岩的力学性能,充分调动围岩自身强度进行自组织支护,保持围岩稳定。注浆作为改善岩体性质的重要技术,能在原位对岩体进行加固或改性,使一定范围内的岩体成为工程结构不可分割的一部分,充分挖掘岩体的承载潜力。注浆技术较为完善地解决了一些棘手的岩土工程稳定与安全问题,受到岩土工程界的高度重视,广泛应用于各种以堵水和加固为目的的岩土工程。近年来注浆技术开始应用于煤矿破碎巷道维护,由于它能够有效控制围岩变形,显著改善支护效果,而且很容易与其他支护手段配合使用,在巷道围岩控制体系中显示出极大潜力。在动压影响下,不能把注浆单纯作为一种支护手段,应参与巷道变形与稳定过程,使注浆施工与巷道变形过程相结合,在这个动态矛盾统一过程中来把握注浆支护。由于巷道围岩变形不同阶段的可注性、注浆固结规律、加固与封闭为目的、合理注浆时机、浆液流动与扩散规律及注浆参数等工程应用中的关键问题尚未很好解决,直接影响到注浆效果和技术经济指标的提高。

煤岩体注浆是通过外界压力将浆液注入煤岩体中,浆液以充填、渗透、劈裂等方式驱走

煤岩体裂隙中的水分或空气,使裂隙煤岩体胶结成一个整体,以改善煤岩体的物理力学性能,提高煤岩体稳定性,其示意图如图 1-1 所示。从力学原理和岩体破坏机制的角度,可以认为岩体注浆加固与封闭主要有以下几方面的作用机理。

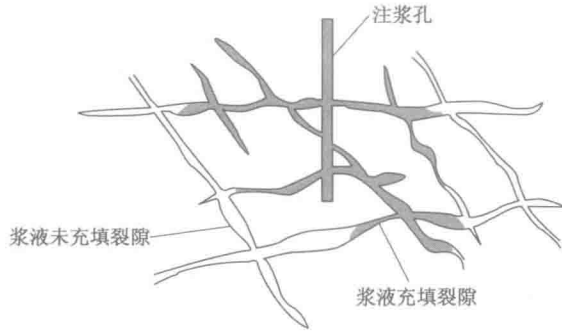


图 1-1 注浆充填示意图

一、浆液固结体形成网络骨架

浆液在泵压、自身膨胀压力以及微裂隙的吸渗作用下,挤压或渗透到岩体的裂隙中,反应固结,以固体的形式充填在裂隙中,这些充填的材料在岩体内形成纵横交错的网络状骨架结构。图 1-2 显示经化学加固后的煤体结构,可以清楚看到,注浆后煤体内增加了许多加固材料形成的白、黄色的浆脉。现场观察浆脉厚度一般为 0.1~1.5 mm,这些薄厚不均的片状或条带状浆脉在煤体中互相连接形成网络骨架。由于化学浆液固结体具有良好的韧性和黏结性,当外载增加时,固结材料发生变形,传递与转移应力,使得载荷主要由强度较高的网络骨架内密实岩块承担,这样围岩的破坏条件由原来的裂隙弱面强度条件向接近完整岩块强度条件转化。当外载超过围岩强度而发生较大变形时,固结材料的网络以其良好的韧性和黏结强度起到骨架作用,限制岩体破坏范围的扩展,可使岩体继续保持较好的完整性,仍具有较高的残余强度和承载能力,从而改善巷道维护状况。



图 1-2 煤壁注浆效果

二、注浆固化提高围岩强度

通过注浆可以改善弱面的力学性能,提高裂隙岩体的黏聚力和内摩擦角,增大岩体内部块体间相对位移的阻力,从而提高围岩的整体稳定性。注入煤岩体裂隙中的化学加固材料对裂隙面具有很高的黏结力,可以提高破裂面的静摩擦与滑动摩擦阻力,约束固结区内的细小裂隙的扩展,从而提高弱面抗变形性能和围岩的整体抗变形刚度。注浆固结体的结构面力学性能和抗剪强度实验表明,黏聚力和内摩擦角都有不同程度的提高,刚度和抗剪强度都得到改善。以马丽散(聚亚胶脂产品)注浆为例,室内测得其黏结强度高达 10.2 MPa,考虑到工程岩体的不稳定性,在现场施工时一般也能达到 1~4 MPa,也就是说每平方米黏结面下可悬吊 3~10 m 厚的岩柱,这样高的黏结力对阻止顶板的离层和裂隙的扩展显然是十分有利的。据前苏联、法国、西班牙、意大利等国有关资料报道,注浆后可使砂岩强度增加 50%~70%,粉砂岩和泥质岩强度增加 3 倍,黏聚力提高 40%~70%,岩体静弹性模量提高 22%~375%,动弹性模量提高 4.5%~175%,地震波波速提高 14%~53%。图 1-3 为煤体加固前后的莫尔强度包络线,阴影部分即是由注浆加固使煤体的抗剪切强度提高量。

不同破坏程度岩体进行注浆加固,固结体强度提高程度不一样,被注介质的块体强度和破坏程度是注浆固结体强度最大的影响因素,根据张农教授的研究,注浆固结体随岩体破坏程度增加固结系数提高,即强度提高程度大,固结效果明显,残余破坏段岩体的固结系数可达 1.5,但绝对强度值有降低趋势。

三、注浆充填压密

当岩体内有裂隙和其他弱面存在时,承载过程中会在裂隙端部形成强烈的应力集中,如裂隙尖端的应力集中达到一定程度,岩体的裂缝会出现失稳扩展,并进一步形成宏观破坏,如图 1-4 所示。

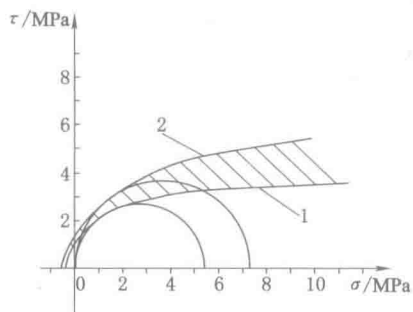


图 1-3 煤体加固前后的莫尔强度包络线

1——注浆前;2——注浆后

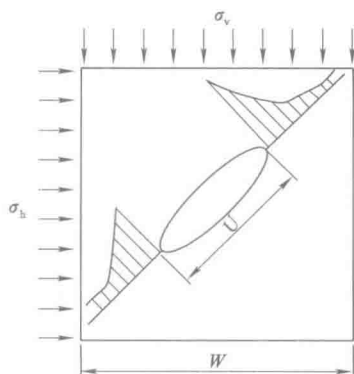


图 1-4 裂隙端部应力集中

围岩中较大裂隙的裂隙面附近岩体实际处于二向应力状态,注浆时由于浆液优势取向作用,张开度比较大的裂隙先受浆,化学浆液在泵压和自身反应形成的膨胀应力的作用下,将裂隙内充满加固材料,加上加固材料对裂隙面的黏结作用,使周围裂隙面岩体转化为三向应力状态,强化弱面两侧的约束和传力机制,改善岩体的内部应力,使裂隙端部的应力集中

大大削弱或消失,从而改变裂隙的破裂机制,岩体强度必将显著增大。对于张开度较小的裂隙,由于粒度和表层效应等原因不能进浆,浆液在把一些较大的裂隙充满的同时将一些充填不到的封闭裂隙和小裂隙挤压,甚至使其闭合,从而对岩体整体起压密作用,提高围岩的弹性模量、强度和密实度。

四、注浆强化破碎岩体形成承载结构

在破碎松散岩体巷道中实施注浆加固,可以使破碎岩块重新胶结成整体,形成浆液扩散加固拱,提高支护结构的整体性、承载能力和稳定性,强化已有的支护结构。注浆也可以使得普通端锚式锚杆改变为全长锚固,使得锚杆与围岩形成一个整体。利用浆液充填围岩裂隙,配合锚喷支护,可充分发挥锚杆的作用,大大减少失锚现象,因此能承受更大的载荷,提高支护结构的承载能力,扩大支护结构的有效承载范围,强化支护结构的整体性,改善支护结构的适应性,能够承受动压的作用。注浆施工可充分发挥围岩的自稳能力,并与巷道支架共同作用,从而减轻支架承受的载荷,相关研究表明围岩注浆加固可使巷道支架载荷降低 $2/3\sim 4/5$,围岩与支架一起变形时支架载荷降低 $3/4\sim 5/6$ 。

巷道围岩经过注浆加固后,岩块间由加固材料紧密地黏结在一起。可提高顶板的整体性,使原来层状顶板离层后形成的多层梁或裂隙梁转化为组合梁或整体梁结构,从而提高直接顶的抗破坏能力,使顶板的平衡条件不再是块体或松散体的拱式平衡条件,而是接近连续介质的梁式平衡条件,加固材料有较好的弹黏性可适应较大的顶板下沉而保持其黏结力。

巷道围岩注浆后,使得作用在顶部的压力能有效传递到两帮,通过对帮部的加固,又能把载荷传递到底板。由于帮部承载厚度加大,这样又能减小作用在底板上的载荷集中程度,减弱底板的塑性变形,减轻底鼓,从而整个支护结构的稳定有了保证。注浆具有先天的自优化特点,即浆液总是在软弱的破坏区最优先最充分的渗入,浆液流动具有定向性,只要注浆钻孔在关键部位附近,浆液便可有效进入该区域,从而实现的关键部位有效加固。这可以极大地简化支护参数的设计,是其他支护技术不具备的。关键部位的有效加固可形成结构效应,大大减缓围岩的渐进破坏,并使围岩的结构稳定性得到提高。

第二章 破碎围岩注浆加固现状

第一节 注浆材料

围岩注浆加固是阻止动压影响巷道变形破坏的有效方法,注浆材料的选择是影响注浆效果的关键,注浆材料一般由主料、辅料、溶剂组成,一般所说的注浆材料都是指其主料。目前,国内外注浆材料及分类如图 2-1 所示。

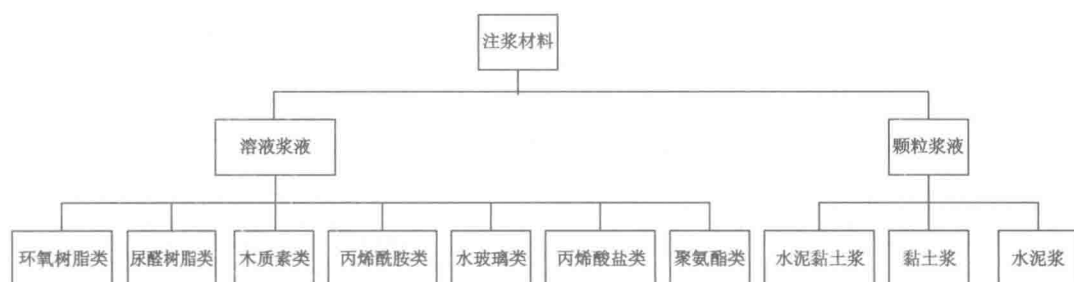


图 2-1 注浆材料分类

不同类型的注浆材料由于其自身性质的差别各有优缺点,一种特定的注浆材料是不可能同时满足理想注浆材料的全部要求的。因此,在注浆施工时,应该根据注浆工程的具体要求、地质条件、浆液性能、注浆工艺及成本等因素,对施工进行综合考虑,选用一种与其相适应的注浆材料或几种浆材配合使用,使工程达到理想的技术经济指标。表 2-1 对颗粒浆液和溶液浆液的特点进行了总结。

表 2-1 注浆材料的性能特点

性能	颗粒浆液	溶液浆液
凝胶体强度和抗渗性	强度高、抗渗性强	强度低、抗渗性强
原料价格	便宜	昂贵
黏结力	强	强
凝结时间	较长且不宜控制	可控、可调
可注性	一般只能注入大的孔隙和裂隙(0.2~0.3 mm),注入能力有限	可以注入水泥浆不能注入的细小裂隙和粉细砂层
环保性	无毒、无污染	大都不同程度地存在着一定的毒性
耐久性	好	一般都存在老化问题
凝胶体膨胀与收缩性能	一般都有不同程度的收缩	收缩非常小,有些甚至可以膨胀数倍

一、无机注浆材料

1. 单液水泥类浆液

该浆液是一种悬浊液,由于该浆液粒径一般为 $60\sim 100\ \mu\text{m}$,所以难以注入较小的孔隙或裂隙中。虽然该浆液的可注性较差,但是由于水泥类浆液具有价格低廉、结石体强度高等特点,又加上近年来随着水泥类浆液的可注性、凝胶速度、结石体早期强度的改进,水泥浆液的应用范围得到扩大。目前,水泥类注浆材料是注浆工程中应用最多的注浆材料。

近几年来,我国研制出超细水泥,这种水泥平均粒径为 $4\ \mu\text{m}$,最大粒径为 $10\ \mu\text{m}$,这种特性使超细水泥浆液能渗入到渗透系数为 $10^{-4}\ \text{cm/s}$ 的粉细砂岩中,其可注性与化学浆液相当。超细水泥浆液具有普通水泥浆液和化学浆液的优点,是一种具有广泛应用前景的注浆材料。

2. 水泥—水玻璃类浆液

水泥—水玻璃类浆液(简称“CS浆液”)能够克服单液水泥浆液凝固时间长且不能控制、结石率低等缺点,而又具备单液水泥浆液的基本优点。同时,水泥—水玻璃类浆液具有结石体强度高、抗渗性能好、结石率高、材源丰富等优点,而且可注性好,但是该注浆材料水玻璃凝结体强度低、稳定性差,只能用于临时或者半永久性工程中。近30年来,水泥—水玻璃浆液注浆技术在工程实践中得到不断的改进,逐渐发展成为一种十分重要的注浆技术。

3. 高水速凝材料

高水速凝材料是选用铝矾土、石灰和石膏为主要原料,再加上多种无机原料和附加剂,经磨细、均化等工艺而配制成甲、乙两种粉料的高水速凝材料。

该材料是一种具有独特性能的新型材料,材料具有高含水、流动性好、适应于远距离输送等特点,而且本身无毒、无害、无腐蚀性。

综上所述,普通水泥注浆材料作为灌浆材料具有强度高、耐久性好、无毒、无味、材料来源方便、价格低廉等优点,但是由于水泥本身固有的性质,作为注浆材料也具有很大的缺点,具体如下:

(1) 普通水泥材料颗粒较大,水泥粒径较大,粗颗粒多,最大粒径可达 $90\sim 100\ \mu\text{m}$,渗透性差,这就导致普通水泥注浆材料不能有效注入细微裂隙,扩散半径小,注浆效果不明显。

(2) 水灰比较大时,浆液的稳定性差,易析水回浓,且硬化时伴有析水,固相体积收缩,使硬化结石与被灌基体的黏结强度降低。

(3) 注浆时机和注浆工艺参数对注浆效果影响较大,由于水泥注浆材料凝结时间慢,破碎围岩注浆时产生跑浆、漏浆现象,导致浆液消耗量大,围岩加固效果也不明显。

(4) 超细水泥虽然颗粒小,能够注入普通水泥材料达不到的细小裂隙,但是正是由于它颗粒小,容易产生颗粒团聚,易沉降,注浆扩散半径小,效果差,而且超细水泥的价格也很高。

(5) 水泥、水玻璃双液注浆材料具有来源广泛、价格低廉、副作用小、不易污染环境、凝结速度可调、能够封堵围岩表面漏浆通道、黏度小、可注性好等优点,但是水玻璃凝结体强度低、稳定性差,只能用于临时或者半永久性工程。

目前国内外注浆施工中所使用的化学注浆材料存在高污染、成本高的缺点,不符合可持续发展要求。因此,绿色注浆材料——普通水泥和超细水泥得到广泛使用,但是无机注浆材料由于其本身的性质,即存在漏浆、跑浆等方面的缺点,因此,成本低、环保且性能符合破碎围岩注浆加固的无机注浆材料研发就成为当前解决煤矿破碎围岩巷道支护难题的重要

途径。

二、有机注浆材料

1. 丙烯酰胺类浆液(MG-646 或丙凝浆液)

丙烯酰胺类浆液是以有机化合物丙烯酰胺为主剂,配合其他药剂而制成的水溶性浆液,一般运用双液注浆的方法注入岩体中。丙烯酰胺类浆液具有黏度低(仅 $1.2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)、渗透能力好、抗渗性能好、耐久性强、凝胶时间可准确控制在几秒至几个小时之间等优点,但是它同时具有毒性、结石体强度低、价格昂贵等缺点。由于这种材料的独特特性,在细砂岩和细微裂隙岩层的防水防渗工程中往往得到应用。此种浆液一般有两种常用的混合浆液:聚丙烯酰胺—水玻璃浆液、聚丙烯酰胺—水泥浆液。

2. 环氧树脂类浆液

环氧树脂类浆液的凝胶结石体具有抗压强度和抗拉强度高、黏结力大等优点,但该浆液黏度大、可注性差、与潮湿裂隙黏结力差。近年来,国内进行大量实验研究和工程实践,已逐渐形成一套具有低黏度、高亲水性的改性环氧树脂浆材,其浆液黏度可调至 $(6 \sim 20) \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

3. 脲醛树脂浆液

脲醛树脂是一种在酸性条件下能迅速凝固成有一定强度的固结体的水溶性树脂,该材料适合于钻孔护壁堵漏。由于脲醛树脂是由原料易得的尿素和甲醛水溶液合成的一种聚合物,故可人为控制固化时间,成本较低,配制简单,且是低毒的化学注浆材料。

这些注浆材料在使用中存在以下问题:

(1) 事故呈高发、多发趋势

近年来全国煤矿应用高分子化学材料引发的事故达 130 多起。多数事故为自燃、燃爆、火灾、燃烧产生大量有毒有害气体导致中毒、腐蚀等,甚至导致堵塞巷道等重大安全隐患。种种迹象表明,该类事故呈高发、多发趋势。

(2) 准入、存放、运输、操作使用管理存在问题

① 未按危险化学品进行管理,缺乏相应的规章制度、安全技术及应急防护措施。

② 包装物强度、阻燃、抗静电指标不符合要求,缺明确标示、标志(组分、化学品类、操作使用说明等)。

③ 储、装、输方面问题。存放高分子化学材料的专用仓库(室)、专用场地、标志,储存方式、方法与储存数量、温度、安全距离、监控防护手段、专人管理、出入库、核查登记、定期检查以及安全、消防的要求多数情况和条件不符合国家有关规定。井下运输、存放的条件也不符合有关规定,部分矿井在使用高分子化学材料过程中,A、B 组化学材料混合存放、混装混运、安全距离不够,个别单位曾发生过包装桶破裂现象,如包装桶发生破裂,会发生剧烈化学反应引起火灾,产生大量有毒有害气体。

④ 产品质量不稳定。黏度、闪点、反应温度、扩散半径、注入压力等质量指标达不到相关要求和效果。

⑤ 人员培训及操作资格问题。操作人员应由生产厂家配备经过培训合格的专业人员,但一些厂家没有配足人员,也不具备培训资质。矿方与厂家责任不清,由矿方顶岗人员未经培训也不具备专业知识,不佩戴防护眼镜、口罩和专用手套。国家及行业主管部门应加强准入、储存、运输、使用等方面的管理。

(3) 标准本身仍存在重大隐患,准入门槛过低

① 使用条件不能满足材料性能:材料本身遇水后迅速降低其阻燃性,导致煤矿燃烧、燃爆等事故。

② 《煤矿安全规程》第十条规定:煤矿使用的纳入安全标志管理的产品,必须取得煤矿矿用产品安全标志。目前全国没有一家高分子化学材料取得煤矿安全标志,原因就是标准本身存在重大安全隐患。

(4) 成本高,企业不堪重负

2010 年仅晋城煤业集团就消耗各种高分子化学加固材料 8 000 多吨,成本 2.7 亿元,排全国第一,约占总生产成本的 40%。神华集团也消耗了 1.6 亿元。

第二节 注浆设备

一、注浆泵

注浆设备是注浆工艺的重要组成部分,注浆设备的选择直接影响注浆效果。由于目前国内使用注浆材料大部分不一样,不同的注浆材料对注浆设备性能的要求也不同,但是目前国内注浆设备单一,有针对性的注浆设备的研究还处于初始阶段,注浆设备的落后直接制约注浆技术的发展,所以研发适合新型注浆材料的注浆泵以及研制出相应配套附件就显得更加重要。

1. 电动往复泵

电动往复泵结构形式如图 2-2(a)所示,它采用曲柄连杆机构,当曲柄带动连杆做往复运动时,连杆带动油缸活塞也做往复运动,泵就不断地吸入和排出浆液,此种泵本身工作原理导致泵排出浆液的流量与压力都不均匀,原动机的负载不均匀,泵的寿命则会大大缩减。

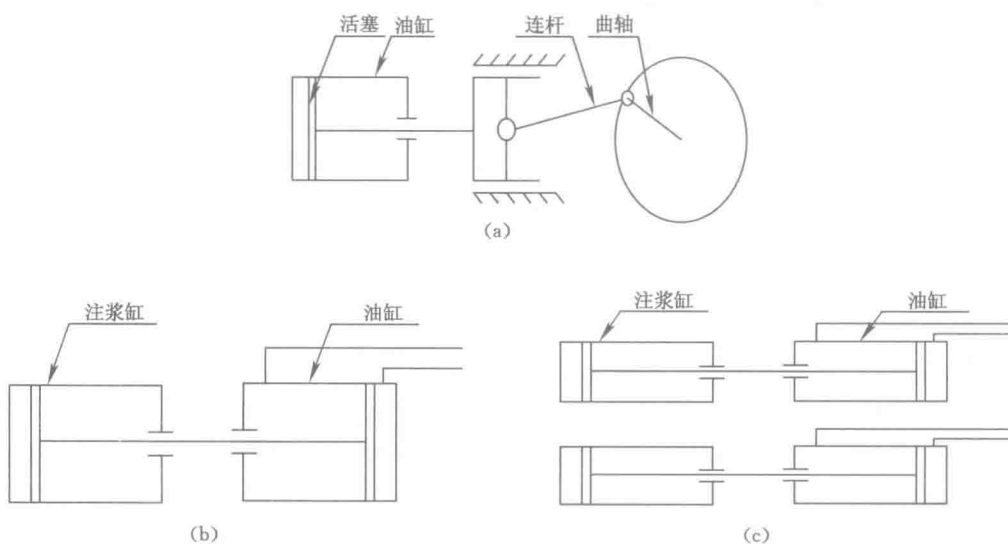


图 2-2 几种注浆泵结构图

(a) 往复泵的曲柄连杆机构;(b) 卧式单缸活塞双作用注浆泵结构;(c) 卧式双缸活塞双作用双液注浆泵结构

2. KBY 系列液压注浆泵

该泵结构图如图 2-2(b)所示,该泵适用于单液和配比固定的双液注浆,由防爆电动机驱动,通过三角胶带驱动齿轮油泵旋转,油缸和注浆缸往复运动,泵就不断地吸入和排出浆液。

3. HFV 型注浆泵

该注浆泵为卧式双缸活塞双作用双液注浆结构[图 2-2(c)],为双缸作用往复活塞运动,这种泵的优点是可以调节双缸排浆比例,缺点是液压驱动系统复杂。

根据对上述注浆泵的介绍及现场施工发现液压及电动式注浆泵具有注浆压力大、流量大的优点,但是液压及电动式注浆泵也有很大的缺点:

- (1) 设备体型笨重,复杂,不方便移动;
- (2) 需要接入供电线路,设备安装麻烦;
- (3) 动力源是电,设备存在安全隐患,操作复杂;
- (4) 注浆流量无法调节,不适应间歇式注浆工艺。

二、注浆配套设备

注浆配套设备也是注浆施工中的重要设备,通常注浆配套设备主要包括搅拌桶、封孔器、混合器、注浆管。下面对现场注浆施工中使用的注浆配套设备进行分析。

(1) 搅拌桶。注浆使用的泥浆及灰浆搅拌桶是注浆工程的主要设备之一(图 2-3),搅拌设备的选择对注浆的质量有重要的影响。对于水泥悬浊浆液,一般要求电动的泥浆及灰浆搅拌桶和风动的水泥搅拌桶应具备较高的搅拌速度,以便于使浆液混合均匀。对于化学浆液则混合较易,对搅拌器的要求也较低。煤矿通常使用的搅拌桶为液压驱动搅拌桶,这种搅拌桶体型比较笨重,由于煤矿巷道空间比较狭窄,所以此种搅拌桶不方便挪动、存放。搅拌桶的笨重导致注浆地点距离搅拌地点太远,通信不畅,致使注浆人员无法随时掌握材料状态变化,无法根据注浆情况随时调整注浆参数。

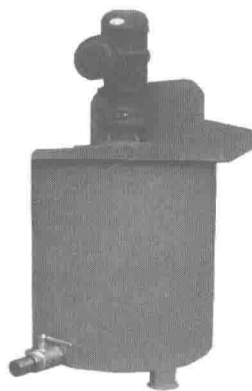


图 2-3 搅拌桶

(2) 封孔器。目前,主要采用以水泥和水玻璃为封孔原料,以棉纱为载体,用沾有双液封孔剂的棉纱封堵注浆孔,这种封孔方式由于封孔深度和长度均较小,封孔效果较差,致使封孔质量不好,漏浆严重。另外,也有煤矿用专用注浆封孔胶囊进行封孔(图 2-4),该封孔器使用方便,封孔效果明显,而且能够大大提高注浆封孔的工作效率,但是该封孔器成本比较昂贵,再加上注浆工程作为煤矿安全生产的重要环节,注浆施工广泛应用于煤矿支护,更由于目前注浆材料的扩散半径有限,在注浆过程中每个注浆孔就需要消耗一个封孔器,这样就会造成注浆成本的大大增加。

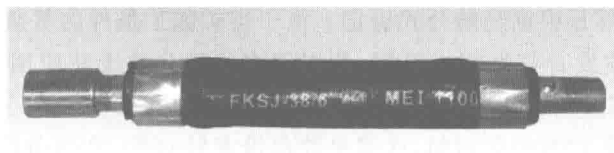


图 2-4 封孔器