

HANGDAO ZHIHOU ZHUJIANG WEIYAN KONGZHI LILUN YU SHIJIAN

巷道滞后注浆

围岩控制理论与实践

张 农 著

中国矿业大学出版社

CHINA UNIVERSITY OF MINING AND TECHNOLOGY PRESS

煤炭科学基金资助项目(1997 采 10107)

巷道滞后注浆围岩控制理论与实践

张 农 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是系统论述煤矿巷道注浆支护理论和实用技术的专著。总结了作者近10年完成的软岩巷道围岩滞后注浆的稳定性控制理论和技术的研究成果,系统反映了煤炭行业地下工程围岩控制领域注浆技术应用成果和技术水平,形成了巷道滞后注浆控制的理论体系。主要内容包包括破裂岩体注浆固结规律和裂隙岩体渗透规律,巷道围岩滞后注浆技术,软岩动压巷道的喷锚注分步加固技术,并详细介绍了不同类别软岩动压巷道综合控制及综放沿空掘巷注浆加固的工程实践。

本书可供从事采矿工程、岩土工程等领域的科技工作者和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

巷道滞后注浆围岩控制理论与实践/张农著. —徐州:

中国矿业大学出版社, 2004. 10

ISBN 7 - 81070 - 965 - 8

I. 巷… I. 张… III. ①巷道支护—注浆法(凿井)
②巷道—围岩稳定性—控制 N. ①TD265.4②TD322

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第106432号

书 名 巷道滞后注浆围岩控制理论与实践

著 者 张 农

责任编辑 朱明华

责任校对 周俊平

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 中国矿业大学印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×960 1/16 印张 10.5 字数 200 千字

版次印次 2004年10月第1版 2004年10月第1次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

近二十年来,软岩巷道围岩控制理论及技术一直是采矿工程学科的重大研究方向,并已取得长足的进步,而随着采深的加大及开采条件的日益复杂和恶化,巷道围岩控制技术始终面临着新的挑战。尽管由单一原因造成的软岩巷道支护问题已得到了比较好的解决,但随着支护条件的日益复杂和恶化,构造应力、深井、松软破碎围岩及采动影响等多因素作用下的复合型软岩巷道维护问题成为研究的重点,传统的锚喷支护、砌体支护、金属支架已不适应这种巷道大变形、高地压的要求。上述各种支护相结合的联合支护能够在一定程度上抑制或延缓巷道变形,但由于支护成本高等原因而得不到推广应用,因此复合型软岩巷道维护仍未得到很好解决,而此类巷道的比例在逐年增加,因此客观上要求进一步深入研究巷道围岩控制理论,并发展新的支护技术。巷道围岩注浆加固技术正是在这种背景下开发研究的。

根据现代岩石力学的基本理论,巷道围岩控制技术的核心和关键是采用工程手段保持和提高围岩的强度,充分利用围岩自身的强度来保持支护围岩系统的稳定性。注浆作为改善岩土性质的重要技术,能在原位对岩土进行加固或改性,使一定范围内的岩土体成为工程结构不可分割的一部分,充分挖掘岩土体的潜力,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中。20世纪80年代以来,注浆加固技术在煤矿软岩巷道维护中的应用受到关注。由于注浆技术能够有效控制围岩变形,显著改善支护效果,已显示出是一种极具潜力的巷道围岩控制技术。它不仅符合现代软岩巷道围岩控制理论,实践也证明了它在技术经济上具有很大的优越性。但注浆单纯作为一种支护手段,参与巷道变形与稳定过程,以控制围岩变形为目的的应用性研究还很少,相关的理论研究则更少,许多理论、技术和施工工艺问题尚未解决。国内外巷道围岩注浆实践表明,巷道围岩注浆加固并不是总能达到预期的目的,常常起不到作用或作用甚微,因此该项技术还难以掌握,极大地影响了它的推广应用。

本书是作者在近 10 年完成的巷道注浆加固工程实践及实验室实验研究的基础上,围绕滞后注浆稳定巷道围岩的特殊性问题形成的理论研究和现场实践的成果总结,全书共分 8 章。第一章简要回顾了注浆理论和技术现状,并分析了巷道围岩滞后注浆的特殊性问题;第二章研究了裂隙岩体注浆固结性能,通过实验室注浆加固试验详细分析了破裂煤岩体注浆固结前后的基本性能,提出破裂岩体注浆固结的基本规律;第三章围绕巷道裂隙岩体内浆液流动过程开展随机裂隙岩体注浆渗流规律性研究,结合巷道围岩渐进变形破裂特征及渗透性能变化特征,分析随机裂隙岩体注浆渗流机理及影响因素;第四章在巷道滞后注浆围岩稳定性分析、紧紧把握巷道围岩渐进变形和裂隙发育特点的基础上,研究了以巷道变形控制为目的的巷道围岩注浆加固技术,进一步分析控制巷道围岩稳定的合理注浆方式和时机,揭示了滞后注浆参与巷道围岩稳定过程的科学规律;第五章介绍巷道滞后注浆技术,系统地分析了注浆参数、工艺、监控等,结合实验室注浆材料性能实验,分析了高水速凝材料的优良注浆固结性能;第六章介绍软岩动压巷道注浆加固的工程实践;第七章提出并分析软岩巷道动态支护原理和喷锚注分阶段支护技术,从而形成了深井和高应力软岩巷道的新的围岩控制体系;第八章介绍综放沿空掘巷注浆加固的工程实践。

本书的大部分研究成果是在我国煤炭行业著名的采矿专家侯朝炯教授的指导下完成的,博士生导师贺永年教授在相关课题研究期间给予了作者热情的指导和帮助,第三章的内容与杨米加博士的研究工作息息相关,陈庆敏博士是第八章相关课题的负责人,对于他们的工作表示深深的谢意。本书中的许多实测结果和科研成果的取得得到了有关现场工程技术人员的帮助,在此一并表示感谢。

书中有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2004 年 10 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 注浆技术简述.....	1
第二节 软岩动压巷道支护技术.....	5
第三节 巷道围岩注浆控制技术的特殊性.....	9
第二章 破裂煤岩体的注浆固结规律	14
第一节 破裂岩体的注浆固结规律	14
第二节 松散煤体的注浆固结规律	30
第三节 影响注浆固结效果的几个因素	35
第四节 裂隙岩体注浆加固体的本构方程	38
第三章 裂隙岩体注浆渗流规律	42
第一节 概述	42
第二节 单一裂隙注浆渗流规律	45
第三节 随机岩体裂隙注浆渗流规律	54
第四节 注浆参数选取的影响因素分析	55
第四章 巷道滞后注浆围岩稳定性分析	58
第一节 软岩巷道围岩的滞后注浆方式	58
第二节 巷道滞后注浆围岩稳定过程的力学分析	64
第三节 巷道滞后注浆的围岩位移和应力分析	67
第五章 巷道滞后注浆技术	73
第一节 巷道围岩滞后注浆加固参数设计	73
第二节 高水速凝注浆加固材料	78

第三节	巷道围岩滞后注浆施工控制技术	90
第六章	软岩动压巷道围岩滞后注浆的工程实践	93
第一节	概述	93
第二节	新掘岩巷的注浆加固工程	104
第三节	修复巷道的注浆加固工程	112
第四节	煤巷的注浆加固工程	118
第五节	结论	122
第七章	软岩巷道喷锚注分阶段加固技术	124
第一节	软岩巷道喷锚注分阶段加固机理	124
第二节	软岩巷道喷锚注分阶段加固技术	126
第三节	工程示例	131
第八章	综放沿空掘巷注浆加固技术及实践	133
第一节	概述	133
第二节	综放沿空巷道注浆加固技术	141
第三节	综放面沿空掘巷锚杆注浆加固工程实录	148
参考文献	156

第一章 绪 论

本章主要通过岩土注浆技术和软岩支护技术的简要回顾,分析比较了巷道围岩注浆控制技术的特殊性和研究现状。

第一节 注浆技术简述

注浆技术一般从三个方面开展研究:注浆理论和实验;注浆参数、方法、工艺和施工技术;注浆材料。现分别简述如下。

一、应用情况

采矿工程师应用注浆技术已有一个多世纪的历史,1864年首创水泥注浆法,1885年铁琴斯(Tietjens)成功采用地面预注浆开凿井筒,获得专利权;20世纪初注浆技术应用到井下巷道,此后注浆法在矿井建设中作为防治水和改善工程地质条件的重要方法,先后在英国、法国、南非和苏联得到广泛应用^[1]。比较有名的注浆工程^[2]如:巴黎地铁奥柏(Auber)车站注浆、横跨尼罗河的阿斯旺(Aswan Dam)水坝防渗注浆、日本青函隧道围岩预注浆等,其目的主要是防渗和堵水,客观上也起到稳定工程结构及围岩的作用。

近数十年来,注浆技术在岩土工程实践中获得了更广泛的应用,已研制开发出多种注浆方法和上百种注浆材料,满足了很多复杂地质条件的工程要求,并积累了丰富的经验,逐渐发展成为一个相对独立的研究方向。1989年国际岩石力学学会成立注浆委员会,1991年我国在广州举行全国灌浆会议,并成立了中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会,加强了理论研究和学术交流。但由于岩土介质的极端复杂,裂隙岩体的渗流理论尚不够成熟,注浆工程常常依赖于经验,大型注浆工程技术参数只能依赖于反复的现场调试和监测,其中注浆固结体的力学性质、浆液流动时的力学过程以及注浆参数设计等理论问题,尤其缺乏系统完整的研究与论述(何修仁,1990)。这些问题影响到注浆效果和技术经济指标的提高,甚至造成人力、物力的浪费,其总体研究水平与其他岩土工程技术相比尚处于初级阶段(Widmann,1996)。

在我国煤矿的井巷施工中,注浆技术早在20世纪50年代就有较多的应

用^[3],东北鹤岗矿区、鸡西矿区和山东淄博矿区首先采用井壁注浆封堵井筒漏水,随后山东新汶矿区张庄立井采用工作面预注浆取得良好堵水效果。20世纪60年代以后注浆法有了很大发展,在矿井中已将注浆用于堵水、灭火、密封(瓦斯)以及对软土和构造破碎岩层进行加固,处理围岩冒落坍塌事故,进行巷道修复等方面的工作。20世纪80年代以来,由于现代支护理论的发展和注浆技术的进步,以支护为目的的巷道围岩注浆在苏联、德国等地开始研究和推行^[4],我国同期也在复杂和不良岩体内的巷道工程中采用过注浆加固技术^[5]。典型的实例有:金川镍矿用后注浆法加固巷道取得良好效果^[6];山东龙口矿区采用注浆加固与锚喷支护或锚喷架联合支护治理软岩取得实效^[7];徐州旗山矿应用锚注支护技术维护巷道取得成功^[8];抚顺矿区采用卸压加固注浆获得成功^[9];徐州矿务局权台煤矿在V类回采巷道中采用围岩注浆与锚架联合支护取得成功^[10],淮北矿务局朱仙庄煤矿、芦岭煤矿的新掘岩巷、修复岩巷和煤巷中应用滞后注浆加固技术控制围岩变形取得明显效果^[11]。

注浆材料也从水泥浆发展到多种化学浆、水泥—水玻璃浆。

因此,从历史发展看,注浆多用于岩土工程的堵水、防参与加固,主要是一门与地下水害作斗争的工程技术^[12]。而煤矿巷道围岩注浆加固技术目前仅作为一项特殊的手段,用于如下两种情况:

(1) 为提高掘进头及掘进工作面前方煤和岩体的稳定性,短期加固煤岩体,便于安全掘进和支护,从时间上可分为预注浆和随开挖及时注浆,由于巷道开挖工程扰动和初期的剧烈变形,注浆加固区很快出现严重破坏,对长期维护的作用不大;

(2) 为提高已掘完和被支护巷道松动岩体的稳定性,对破坏岩体进行滞后注浆加固,注浆加固体参与围岩稳定过程,并成为围岩承载结构的一部分,达到长期稳定巷道围岩、限制围岩变形的支护目的。

第一种情况主要用于原始工程地质条件恶劣时,注浆的目的是为施工创造条件,防止冒落和渗水;第二种情况为滞后注浆方式,目的是控制围岩变形。从控制巷道围岩变形的实际效果出发,在巷道掘进后周围形成破坏区时,应用注浆加固作为维护巷道稳定性的手段最有效^[13]。本文针对这类注浆问题开展研究,其特点主要为滞后加固注浆是在巷道开挖后的围岩变形过程中实施的,参与巷道变形与稳定过程,以控制围岩变形为目的。

二、注浆理论和实验研究

1. 注浆理论研究

近几十年来一般岩土注浆理论发展较快,成果主要集中在岩土介质中浆液流动规律及岩土体的可注性^[14,15,16],裂隙充填物对流动和围岩稳定性的影响,平

面裂隙接触面积对裂隙渗透性的影响^[17],仿天然岩体的裂隙渗流实验^[18]等方面,但应用较多的仍然是渗透注浆理论^[19,20]和劈裂注浆理论^[21,22]。

(1) 渗透注浆理论

近几十年来,国内外学者对渗透注浆法进行了较多的理论与实验研究,发展了一些渗透注浆理论,包括马格(球形扩散)理论、柱形扩散理论、卡罗尔理论、拉夫莱理论和袖套管法理论等。马格理论假设被注体为均质各向同性体,浆体在地层中呈球形扩散,并给出牛顿体注浆压力、注浆时间、扩散半径和注浆量等重要理论公式,该理论是以钻杆端部点注浆为基础建立起来的,既有普遍的适用性,又有很大的局限性。柱形扩散理论是以注浆管体的一部分为注浆过滤段,它与马格理论有类似的假设,导出了注浆时间、扩散半径和注浆量的公式。

(2) 劈裂注浆理论

劈裂注浆理论认为在注浆压力作用下,浆液可以克服地层的切应力和抗拉强度,使其沿垂直于小主应力的平面发生劈裂,浆液便沿此劈裂面渗入和挤密地层体,并在其中产生化学加固作用,浆脉形成骨架。我国在这方面的研究较多,并对基岩、砂层和粘性土层劈裂注浆时的劈裂条件作了充分研究,认为在均质软弱地层中首先产生竖向裂隙,在层状软岩中首先产生水平裂隙。

这些成果具有较好的理论指导意义,但在定量应用上受到较大限制。由于注浆介质的复杂性和工程的隐蔽性,注浆理论研究难以开展,其研究水平不仅严重滞后于注浆工程实践和注浆材料的发展要求,而且严重滞后于一般工程技术研究的发展水平。大多数注浆工程报道或论文中,只介绍注浆施工工艺过程及注浆效果,很少进行注浆理论分析研究,已有的结论也主要是基于宏观的和感性的认识,缺乏具体的、定量的测试分析,在细观、微观层次上的研究明显不足。

2. 注浆实验研究

注浆实验多结合室内模拟实验开展^[23,24,25],主要研究注浆参数及其影响因素之间的关系,国内外常用的有平板式、圆管式、槽式模拟实验台,通过调节裂隙张开度、长度、粗糙度等参数研究渗流规律,分析注浆参数等。注浆参数主要有浆液扩散半径 R 、注浆压力 P 、注浆量 Q 和凝结时间 T 等,影响因素主要有被注岩石的渗透率 k 、浆液初始粘度 μ_0 、注浆时间 t 等。苏联和我国学者通过实验研究得出有关注浆参数经验公式。国内学者利用特制的实验装置和测试系统对浆液渗流压力分布情况进行过测试,并通过回归分析得出渗透压力按二次抛物线规律衰减。国内外较著名的注浆参数模拟实验有:苏联学者在实验室进行过砂质岩层中浆液扩散参数模拟实验研究,以确定注浆参数与被加固的岩体性质、浆液特性之间的关系;奥地利学者模拟了不同开度的平面裂隙中的浆液流动规律;国内的注浆模拟实验装置有水利水电科学院的平板型、煤炭科学院的圆管型和东北大

学的槽型及扁圆柱型等实验台,利用这些装置可以研究岩层裂隙注浆和多孔介质注浆的模拟实验。

由于模拟条件与实际地层结构有较大差距,裂隙、孔隙状态参数、介质粒度等模拟参数均与实际条件难以吻合,而且常常仅能模拟单一裂隙,因此模拟出的浆液流动特征及其规律与实际情况相差较大,今后的发展方向是进一步仿真模拟,以缩小这种差距,指导具体的注浆工程实践。

三、注浆工艺和参数研究

注浆工艺是研究在不同的工程地质和水文地质条件下,根据施工对象(井筒或巷道)的技术特征、工程性质和施工要求等,所采取的不同注浆方案和施工方法,以及完成注浆工作全过程的作业程序和操作要领。注浆工艺复杂多变,针对性很强,而注浆参数是影响和确定注浆工艺的最重要因素之一,一直是注浆技术和注浆效果研究的一项主要内容。

当注浆用于堵水和防渗时,其注浆参数包括如下几项:

1. 注浆压力

注浆压力是浆液在岩土中扩散的动力,受工程地质条件、注浆方法和注浆材料等因素的影响和制约。国内外对确定注浆压力值持两种截然相反的原则:一是尽可能提高注浆压力;二是尽可能用低压注浆。这两种观点各有利弊,对不同的工程有不同的指导意义。一般来说,化学注浆比水泥注浆时压力要小得多,浅部注浆比深部注浆压力要小,渗透系数大的地层比渗透系数小的地层注浆压力要小。堵水与防渗工程中水压的影响十分显著,煤矿地面立井预注浆压力一般为静水压力的2.0~2.5倍。水坝注浆压力一般为1~3 MPa,浅表地层注浆压力一般为0.2~0.3 MPa,地下隧道和巷道围岩^[26]注浆压力最大可达6 MPa,最小值在1 MPa以下。

2. 扩散半径

扩散半径的影响因素甚多,它随着岩层渗透系数、裂隙开度、注浆压力、浆液流动特征、注入时间等因素的变化而不同,它决定着注浆工程量和工程进度,常用一些理论或经验公式估算,但最终往往仍需通过试验确定。

3. 凝胶时间

凝胶时间是浆液本身的特征,不同的注浆工程可能要求浆液凝胶时间在几秒到几小时的范围内调节,并能准确控制。几种典型浆液的凝胶时间据文献[27]、[28]为:单液水泥浆从几十分钟到十几小时,水泥—水玻璃双液浆从几秒到几十分钟,高水速凝材料从几分钟到几十分钟。

四、注浆材料研究

注浆材料是注浆技术中一个不可分割的组成部分,浆液性能是决定注浆加

固效果的关键因素之一,浆液的消耗又影响到工程成本,因此国内外都致力于研究新型注浆材料。目前注浆材料品种已达上百种,性能各不相同,只能根据注浆工程的要求和目的选择不同性能的注浆材料。

目前,针对以限制变形为目的的巷道围岩注浆加固材料研究的较少,同时井下巷道多是临时性或半永久性工程,成本受到限制,因此对巷道围岩注浆加固材料有特殊的要求。一般只考虑采用价格低廉的水泥类材料,并通过添加剂来调节其性能,这些性能主要包括三个方面:工艺方面、破裂岩体的渗透性能、与煤岩体的粘结强度和抗变形性能。

常用的水泥类材料可分为三类:①以水泥或在水泥中加入一定量的附加剂为原料,用水配制成浆液,采用单液系统注入。试验表明,水泥浆液只能注入到比它本身粒度大三倍的空隙中去,目前常用的水泥最大粒径为 0.085 mm,在一般的压力下只能注入最小宽度为 0.255 mm 的空隙中。虽然这种浆液存在颗粒粗、可注性差、凝结时间长且不易控制、浆液易沉淀析水和结石率低等缺点,但它来源广、价格低、结石体强度高,因而被广泛采用。②以水泥和水玻璃为主剂,按一定比例,采用双液方式注入,其结石率较高,可注性比水泥好,凝结时间短且易控制,但结石体强度较低,如控制不好经过一段时间后结石体易松散,对工艺要求也较高。③中国矿业大学侯朝炯教授等发明的 ZKD 型高水速凝材料是近年来研制的一种新型水泥类注浆材料,它可以速凝成具有一定强度的固结体,水灰比调节范围大,可以在高的水灰比条件下固结而不析水,浆液流动性好,渗透性好,材料本身固结后塑性好,具有微膨胀性,且成本较低,是一种性能优良的新型注浆材料。

第二节 软岩动压巷道支护技术

一、软岩巷道的破坏形式及矿压特征

巷道围岩的破坏形式主要取决于岩体结构和地应力分布,按其诱发原因可分为两类:①地质弱面或结构面诱发的破坏,可称为弱面型破坏。表现形式为局部的节理块或楔状块体掉离顶板或侧墙;②地应力诱发的破坏,可称为应力型破坏。表现为顶板下沉,两帮移进、底鼓或全断面来压。

巷道支护对围岩破坏有一定程度的影响,一般来说喷浆、金属支架、锚杆支护能够抑制弱面型破坏,这些支护能够增加帮顶的径向约束,以阻止围岩的进一步松动,因而单一类型的松散、软弱和破碎型软岩巷道维护难度相对较小,采用锚喷架等常规支护可以取得成功。当这些软岩巷道受到构造应力或采动影响时即成为复合型软岩巷道,表现为应力型破坏,维护十分困难。

巷道地压基本上属于变形地压,局部岩层存在松散地压,膨胀性岩体内存在膨胀地压。变形地压的产生是一个复杂的过程,它可能包括:弹性恢复、塑性变形、粘塑性变形、破裂面的产生和沿结构面的挤压错动、膨胀岩体的遇水膨胀、空间效应等,由于岩性和岩体结构不同,各种变形及其对支护的影响也不同。从软岩巷道变形的宏观表现看,有如下特点:

(1) 来压快、压力强度大、持续时间长。

(2) 压力分布不均匀。

地压分布与岩性和岩层结构及矿物组成、岩层产状及空间几何位置、岩石力学性质、工程因素等有关。同一测量断面不同位置的支架载荷值相差可达10倍以上。在层状软岩采准巷道中这种现象十分突出,常见由于偏心受压或集中载荷作用而使支架变形折损。

(3) 塑性变形大,具有明显的流变性质,很容易产生松散地压。

由于围岩应力大,强度低,塑性变形量非常可观,长时间不能完成塑性变形。由于维护不当,巷道周边位移在无约束或低约束状态下任意增大,变形地压转化为松散地压。

(4) 具有明显的时间效应。巷道围岩位移随时间变化的趋势是初期迅速增长,随后位移增加变缓,到一定阶段趋向稳定。

(5) 巷道围岩变形具有明显的阶段性。软岩巷道大量的井下实测都显现出变形的阶段性:①掘巷之初的剧烈变形和应力调整阶段,随巷道围岩裂隙的发育,变形速度快速衰减,同时围岩变形量增长很快。②二次应力场初步形成,破裂范围趋向稳定的稳定变形阶段,围岩变形速度基本保持一致,位移量表现为缓慢增长。③应力扰动、围岩长时强度降低、采动影响等导致围岩稳定性降低,围岩进一步表现出加速变形的特征。当围岩极其软弱、高地应力作用、支护选型不合理和初期的松动破坏范围大时,可能导致第二阶段不明显,或几乎没有稳定变形阶段。事实上第二阶段的相对稳定在很大程度上取决于第一阶段的支护及围岩所能保持的承载性能。从巷道开挖后围岩的破坏及应力调整规律看,阶段性特征是始终存在的。

二、软岩巷道支护原理与技术^[29,30,31,32]

1. 软岩巷道支护原理

目前软岩巷道支护理论较多,一般都是从如下三方面不同程度地回答巷道与支护围岩的关系:①围岩的赋存特点;②围岩的应力状态及控制;③支护的作用。弹塑性理论按围岩的赋存及应力特征将围岩进行了合理的分区,并提出支架与围岩相互作用关系曲线,认为支护系统应具有适当的强度和一定的可缩量。松动圈支护方法研究了巷道浅部破裂松动范围及特点,认为巷道围岩松动圈厚

度能够综合反映围岩支护难易程度,并提出松动圈分类表及相应的锚喷支护参数和工艺方法。加固承载圈原理主要解释了支护的作用,有两种:①直接作用于周边浅部围岩,并作为内部结构的一部分,以改善围岩力学性能,提高围岩强度,形成主动式加固承载圈,比如锚杆支护,巷道围岩注浆加固技术;②通过提供周边径向约束力,改善浅部围岩的受力状态,并承担松散岩体的重量,形成被动式加固承载圈,比如砌圈、金属支架等支护形式。二次支护理论认为,由于软岩变形速度快、变形量大、变形时间长,且随掘巷立即支护恰逢围岩剧烈变形,一次支护成巷,其永久支护不能适应软岩变形特征,难以实现围岩长期稳定,而根据围岩变形的动态观测,确定二次支护时间,采用二次支护,可以达到最佳支护效果。应力控制理论与二次支护理论相近,强调利用围岩的自稳能力,充分释放围岩应力,使围岩二次应力小于围岩强度。

新奥法是充分利用和调动巷道围岩强度、自身承载能力,根据岩石力学及围岩支护共同作用原理制定的一套完整的地下工程设计、施工、支护、监测新方法。该方法主要包括以下内容:把围岩和支护结构看成统一的相互作用相互支持的共同承载体,最大限度地保持和调动围岩的原有强度,充分利用围岩的自身承载能力;提出以锚喷支护为主体的两次支护的概念;建立了地下工程施工的量测体制,对围岩位移和支护受力状态始终进行监测,进行信息反馈,评价支护效果,调整支护参数。新奥法明确提出并强调保持围岩强度,利用围岩自承能力及两次支护和观测反馈的思想已作为软岩巷道维护的基本原理成为共识,但是它更多地指出了应当遵循的支护理念,而对于如何从技术上实现并不明确。软岩工程力学理论从软岩强度和工程力的对立统一关系中分析把握软岩的相对性实质,提出支护过程原则、塑性圈原则,提出的围岩分类及复合型变形力学机制向单一型变形力学机制转化的思想及技术对软岩维护具有一定的指导意义。还有其他一些支护原理和方法,这些成果从不同的侧面和不同特点所做的总结,都具有可取之处。

岩体结构和地应力是客观存在的,对特定的工程而言,巷道围岩条件选择的余地很少,而支护及工程施工对巷道围岩稳定性的作用则具有主观性,属于能动的因素。巷道围岩控制理论和相关技术的发展已表明,采用先进、科学的维护技术能够改善或保持围岩的稳定性,满足工程要求。

2. 软岩巷道支护技术

20世纪80年代以后,巷道围岩控制技术快速发展,对支护与围岩的关系认识更加深入,围岩不仅被看作是传递和产生载荷的介质,同时也是与各种在其内部或外部支撑的支护结构物构成统一的、相互作用共同承载体。软岩巷道维护是支护结构与围岩结构相互作用的过程,其变形与破坏不仅表现为岩石材料的

变形破坏,更主要的表现为整体结构的变形与失稳,软岩结构力学效应在工程中占主导地位,控制并允许有限制的围岩变形以满足工程需要是支护的惟一目的。因此加固围岩以改善和提高围岩本身的力学性能已成为支护技术发展的主流,因而巷道围岩注浆加固技术的发展也就成为必然。从支护与围岩的相互作用关系和实质来看,巷道支护技术可分为三个层次:

(1) 通过提供外力的方式直接作用于巷道围岩的表面,如支架、硃体。

① 硃体支护。利用水泥砂浆粘结料石组成拱形或封闭形状的承载体,被动承受因围岩变形而产生的压力,大量的实践表明,硃体只是在一定的围岩载荷方式下才能表现出较高的强度和承载力,而随着开采深度的增加,暴露的问题日益突出,部分软岩矿井采用双层乃至三层硃体加固仍不能满足要求,短时间维护即遭破坏。因而不适应软岩高地应力或复杂地质条件下的巷道支护要求。

② 金属支架。常用的有工字钢梯形支架和 U 形钢拱形可缩支架。普通支架为刚性支护,支撑力小,不适应软岩变形,改进的双向(或单向)可缩的工字钢梯形支架可缩性能大大提高,但整体的支撑性能仍较差;U 形钢拱形可缩支架具有较强的可缩性能和一定的支撑能力,但其力学性能受连接件性能和壁后充填程度等因素影响很大,在高应力、侧向大变形和严重底鼓的巷道中适应性较差,封闭形 U 形钢支架(圆形、方环形和长环形)强化了支架对两侧及底板的约束能力,但施工复杂,成本高。

刚性支架通过产生被动的径向约束力来平衡围岩的变形压力,减少围岩变形;可缩支架则有利于实现支让平衡,对软岩的适应性大大提高,但随着采深的加大,需加大架形,支护费用增加很多,支护效果却得不到明显改善。实践已经证明,单纯依靠加大型钢重量已不适应煤矿深井支护的要求。

(2) 不仅能提供施加于巷道表面的力,而且能与巷道围岩内部建立某种相互作用关系,如锚杆、锚索等。

常用的是锚喷支护,它是由金属材料等加工而成的杆状物体,用水泥药卷、树脂药卷或水泥砂浆等粘结材料,以端锚、部分长度锚固和全长锚固的形式直接作用于巷道周边一定范围内的岩体,约束杆体周围岩体的相对变形,常和围岩表面喷射混凝土结合,具有及时性、密贴性、封闭性和经济等优点,被广泛采用。其中应用较多的是水泥端锚锚杆,因施工质量受人为因素影响较多,安装质量难以保证,在软岩巷道中应用,其可靠性、安全性及支护效果都不理想,实用性较差;近期发展起来的高强树脂锚固螺纹钢锚杆克服了以上缺点,在深井软岩中应用取得了较好的效果,发展潜力大。

(3) 直接作用于巷道围岩结构本身,可根本改善围岩性状,提高围岩力学性能,如围岩注浆加固。

以上所述实际上是逐渐提高的三个层次,按照现代软岩控制思想,采用的层次越高,维护巷道的效果越好,越能充分发挥和调动围岩自身的承载能力。目前锚杆支护系列受到广泛的重视,并在深井、软岩等复杂条件的巷道中开始应用,巷道围岩注浆加固技术则刚刚开始,但已显示出了较大的优越性,发展前景广阔。

还应当提及的是联合支护,它是由两种以上单一支护形式的结合,一般多采用不同性能的单一支护的组合结构,以便发挥各自的性能,弥补不足,共同作用,促使围岩稳定。目前联合支护已成为软岩支护的一个基本原则,常用的有锚喷支护、锚喷与金属支架联合支护和U形钢支架与喷层联合支护,并已有很多成功的实践。

第三节 巷道围岩注浆控制技术的特殊性

一、巷道注浆围岩稳定性控制技术的现状

由于巷道围岩和变形破坏是持续发展的,因而注浆固结作用必定参与巷道围岩的稳定过程,利用注浆材料充填和固结原有的或新产生的裂隙面,为巷道围岩的进一步稳定提供更好的围岩条件,符合现代软岩巷道围岩控制理论。但有针对性的具体深入的研究仍很少,多数停留在对巷道围岩注浆加固机理的宏观总结^[33,34,35]上,有的也涉及到考虑围岩动态变形的注浆时机和注浆参数,现分别介绍如下。

1. 对巷道围岩注浆加固机理的认识

(1) 提高岩体强度

改善弱面的力学性能,即提高裂隙的粘聚力和内摩擦角,增大岩体内部块间相对位移的阻力,从而提高围岩的整体稳定性。很多文献通过现场直接测试和实验室实验,分析比较了注浆前后的岩体力学性能,不同岩体力学指标的改善程度及影响因素^[36,37]。其中文献^[38]对二滩拱坝坝基弱风化岩体灌浆加固效果进行了比较详细的研究:目测裂隙被水泥浆充填数的比例为5.1%~34.8%;声波测试表明灌浆前声波传播速度分散,灌浆后有明显提高且分布均匀,岩体结构效应减弱;岩体强度改善与灌浆前岩体质量有关;钻孔变形和承压板中心法试验表明,风化正长岩变形模量提高55%~60%,甚至一到两倍;弹性模量提高28.1%;结构面力学性能和抗剪强度实验表明粘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,其中刚度更为明显。苏联学者对后注浆加固围岩的力学过程进行了理论分析和现场测试^[39],结果表明注浆后岩石的粘聚力增加了40%~70%,平均增加50%,从而提高了巷道的稳定性。据苏联、法国、

西班牙和意大利等国有关资料报道,注浆加固使砂岩强度增加 50%~70%,粉砂岩和泥质岩强度增加 3 倍,粘聚力提高 40%~70%,岩体静弹模提高 22%~375%,动弹模提高 4.5%~175%,地震波速提高 14%~53%。

(2) 形成承载结构

破碎松散岩体中巷道实施注浆加固,可以使破碎岩块重新胶结成整体,形成承载结构,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,围岩注浆加固使巷道支架载荷降低 2/3~4/5,围岩与支架一起变形时支架载荷可降低 3/4~5/6。根据抚顺龙凤矿深井软岩巷道卸压加固效果的有限元分析,注浆加固可明显改善围岩应力分布,大大减少围岩变形。

(3) 改善赋存环境

软岩巷道围岩注浆后,浆液固结体封闭裂隙,阻止水气浸入人内部岩体,防止水害和风化,对保持围岩力学性质、实现长期稳定意义重大。

2. 对巷道围岩注浆参数的认识

巷道围岩注浆参数除了上述几个参数外,还有注浆时机、注浆加固深度等需要特殊考虑的参数,它们与巷道围岩变形和稳定性相关,目前研究较少。文献[40]针对巷道围岩注浆加固的特殊规律,明确提出滞后注浆时间是一项主要技术参数,并详细分析了滞后时间的确定方法及影响因素,初步建立了滞后注浆稳定围岩的基本框架。此外还分析了注浆加固深度、注浆压力等巷道围岩注浆加固参数的确定原则。

二、巷道围岩注浆控制技术的特点

作为注浆加固的对象,巷道围岩在不同的工程地质条件下的破裂变形特征及演变规律是研究巷道围岩滞后注浆稳定性的基础,因而应首先把握软岩巷道围岩的赋存状态。

1. 注浆的对象是巷道浅部的破裂岩体

软岩巷道周边围岩产生大变形、大位移和严重底鼓等现象表明,巷道周边较大范围内的岩体在地应力作用下进入破裂状态,岩体峰后力学性能表现突出。地下工程的特殊性也使人们认识到软岩巷道围岩破裂圈是客观存在的,巷道的矿压显现主要表现为破裂后岩体的力学行为。因而只有对软岩巷道围岩的破裂发展过程和破裂后的力学性能进行深入研究,才可能揭示软岩巷道的变形机理,并指导软岩巷道围岩控制技术。

自 1938 年 O. G. Kien 和 J. A. Maldari 利用普通实验机附加刚性组件首次获得岩石单轴全应力应变曲线以来,特别是电液伺服(控制)试验机(servo-controlled testing system)的出现,使人们对岩石的本质特征有了更接近真实的