

深井软岩巷道

钢管混凝土支架支护技术

■ 高延法 王军 王波 著



科学出版社

深井软岩巷道钢管混凝土 支架支护技术

高延法 王 军 王 波 著

国家自然科学基金(51474218,51404105,51304127)

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从支护结构设计、施工工艺、承载能力等方面入手,深入研究了井下灌注式钢管混凝土支架结构,提出了钢管混凝土支架支护工艺,开发了一整套基于钢管混凝土支架的支护理论与工程技术。同时,本书介绍了钢管混凝土短柱壁厚效应、钢管混凝土支架承载能力计算方法、钢管混凝土支架抗弯强化及其承载力计算方法等一系列具有实用性的理论成果。

本书可供从事采矿工程、岩土工程、工程地质等研究领域的工程技术人员、科研工作者及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

深井软岩巷道钢管混凝土支架支护技术/高延法,王军,王波著. —北京:科学出版社,2017. 1

ISBN 978-7-03-050578-1

I. ①深… II. ①高…②王…③王… III. ①深井-软岩巷道-钢管混凝土-混凝土支架 IV. ①TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 271222 号

责任编辑:李 雪 / 责任校对:张怡君

责任印制:张 伟 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:278 000

定价:96.00 元

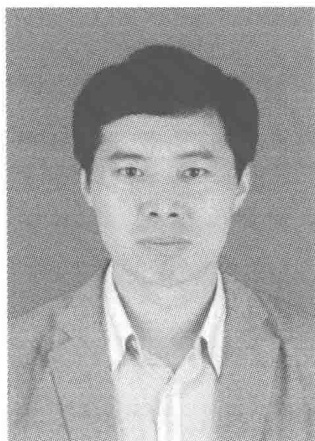
(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



高延法 1962年生,山东滕州人,博士,教授,博导。1982年毕业于山东矿业学院(现山东科技大学),1985年获硕士学位,1991年获武汉水利电力学院博士学位。1985年至2005年在山东科技大学工作,1994年晋升为教授。2005年起在中国矿业大学(北京)工作。主要从事矿山岩体力学、深井软岩巷道支护、开采沉陷控制和矿井水害防治等方面的教学和科研工作。

主持国家自然科学基金项目2项、省部级科研项目6项,参加国家重点基础研究发展计划(973计划)和国家自然科学基金委重点项目等5项。发表学术论文80余篇,出版专著和教材5部。获国家发明专利12项,所发明的钢管混凝土支架,已在20多个深井与软岩煤矿成功应用。获得省部级科技进步一等奖和二等奖6项,1993年起享受“政府特殊津贴”,1994年获孙越崎优秀青年科技奖。指导博士和硕士研究生40余名。



王军 1985年生,山东宁阳县人,讲师,工学博士。2014年获中国矿业大学(北京)岩土工程专业博士学位,现就职于山东建筑大学,主要从事矿山岩体力学、深井软岩巷道支护与沿空留巷的科研工作。



王波 1981年生,山东阳谷县人,副教授,工学博士,硕士生导师。2009年获中国矿业大学(北京)岩土工程专业博士学位,目前供职于华北科技学院,主要从事矿山岩体力学与软岩巷道支护的科研工作,主持国家自然科学基金、河北省自然科学基金、河北省高等学校科学技术研究项目、中央高校基本科研业务费资助项目及企业委托项目10余项,发表学术论文20余篇,获得国家专利11项,出版专著1部,获得省部级科技进步一等奖1项、三等奖1项。

前 言

随着煤矿开采逐渐向深部发展,越来越多的矿井面临着大埋深、高应力、软岩、动压及过断层或冲刷带等巷道支护问题。采用低成本的支护技术,得到更大的支护反力,取得更好的巷道支护效果是深井软岩巷道支护工作者不断追寻的目标。

钢管混凝土结构是在空钢管内充填混凝土形成的一种组合构件,钢管为核心混凝土提供套箍力,使混凝土处于三向受压状态,混凝土的强度成倍增加;而核心混凝土的存在一方面提高了整体强度,另一方面则避免了薄壁钢管的内凹屈曲破坏。钢管混凝土结构具有高承载能力和良好的经济效益,在地面建筑中得到了广泛的应用,将钢管混凝土结构应用于采矿工程,可为深井软岩巷道支护提供一种新型高承载力支架。

井下灌注式钢管混凝土支架是中国矿业大学(北京)高延法教授发明的一种新型支护结构,从2008年进行第一次工业性实验至今,已经有22个矿井的61条巷道实施了钢管混凝土支架支护。该种支护方式得到了煤炭企业的一致好评,解决了诸多矿井的支护难题,巷道类型包括千米深井巷道、软岩和极软岩巷道、动压巷道、断层破碎带巷道、岩溶陷落柱巷道和变电所等重点硐室。

本书通过在实验室测试不同壁厚钢管混凝土短柱承载能力、钢管混凝土直梁与钢管混凝土圆弧抗弯拱承载能力及钢管混凝土支架整体承载能力,得到了钢管混凝土短柱壁厚效应、钢管混凝土的中性层偏移规律、钢管混凝土支架承载力计算方法及其抗弯强化方法等一系列具有实用性的理论成果。同时,本书研究了深井软岩巷道承压环力学模型、深井软岩巷道复合支护设计方法、应力场梯度稳定和深井软岩流变扰动效应等理论问题。本书的研究成果将为经济高效地解决深井软岩巷道支护问题开辟一条新途径。

在钢管混凝土支架现场实验研究过程中,得到了许多煤矿企业领导的支持和帮助,在此致以衷心感谢。他们是:开滦钱家营矿业分公司郑庆学总工;龙煤鹤岗矿业公司严如令总工、何清江副总工,开拓处涂忠惠处长、孟庆江总工,南山煤矿任建民副总工,益新煤矿付振祥副矿长;中煤平朔集团公司冯学武总经理、高建军总经理,技术中心刘建宇主任、郭生科长;神华宁煤科技发展部刘铜强总工、朱守东副部长,清水营煤矿张建华矿长、黄相明矿长、丁学福总工,宁夏煤炭科学技术研究所武振国、杨志华;冀中能源赵庆彪总工、邵太升副总经理,峰峰集团刘书灿总工、王殿录总工、尚书海副总工,查干淖尔一号井于广龙总工、杨永迁科长、刘建刚科长、邢东煤矿谢国强矿长、杜小河总工、杨军辉副总工、陈锋部长,大淑村煤矿王建民总

工;国投新集集团王志根副总工、孔德山副部长、刘庆波主任、杜库实总工;淮北矿业集团杨庄煤矿孟德军矿长、朱剑科长、李志伟科长;河南煤化集团鹤壁矿业集团公司张庆堂总工,生产部葛付东总工、王志强科长;沈阳焦煤有限责任公司夏洪满副总;山东能源集团新矿公司华丰煤矿李伟矿长、唐军矿长、胡兆峰副矿长、安伯义总工、王同金副总工、魏礼刚副总、顾鹏科长;龙口煤电公司北皂煤矿李恭建矿长、袁承禄副总工;山东济宁能源集团阳城煤矿高立群矿长、薄福利矿长、丁希阳总工、毛庆福科长;金川集团矿山工程公司穆玉生总工、刘福堂经理、杨亚平经理;衷心感谢中国矿业大学(北京)力建学院单仁亮教授、冯吉利教授、左建平教授、郭东明副教授和陈新副教授等人的帮助与支持;衷心感谢课题组成员:博士研究生牛学良、王波、王军、曲广龙、黄万朋、李学彬、刘国磊、何晓升、刘珂铭、徐鹏飞,硕士研究生王正泽、鹿士忠、夏方迁、田英楠、马鹏鹏、张慧敏、王超、王亮、张少峰、陈明程、杨柳、冯绍伟、赵伟、黄莎、朱全美、王东旭、徐斌经、谢浩、张凤银、张磊等,感谢他们的帮助与支持。

本书第3、4、5、6、7章由王军执笔,第1、2、8、9章由王波执笔。由于笔者水平有限,书中不足之处,还请读者和同行专家批评指正。

作 者

2016年8月5日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 深井软岩巷道支护技术与理论研究现状	1
1.1.1 巷道稳定性控制理论研究	2
1.1.2 深井软岩巷道支护技术研究	3
1.2 井下灌注式钢管混凝土支架支护技术研究现状	5
第 2 章 钢管混凝土支架结构与承载能力	7
2.1 井下灌注式钢管混凝土支架结构设计	7
2.1.1 井下灌注式钢管混凝土支架整体结构设计	7
2.1.2 钢管混凝土支架的断面形状	8
2.1.3 钢管混凝土支架各节间连接方式设计	9
2.1.4 钢管混凝土支架间连接	12
2.2 钢管混凝土支架注浆孔补强技术研究	14
2.2.1 注浆孔补强结构设计	14
2.2.2 钢管混凝土注浆孔段承载能力实验	15
2.3 早强型钢管混凝土支架	20
2.3.1 早强型混凝土实验	20
2.3.2 早强型钢管混凝土支架承载能力分析	22
2.3.3 实验总结	23
2.4 巷道交岔点搭接式钢管混凝土支架	23
2.4.1 交岔点支架整体结构	24
2.4.2 异形支架结构设计	26
2.4.3 支撑架结构设计	27
2.4.4 支架间对接方式设计	27
2.4.5 交岔点支架施工工艺	29
2.5 钢管混凝土支架承载能力实验测试研究	29
2.5.1 钢管混凝土支架承载力实验方案	30
2.5.2 扁椭圆钢管混凝土支架实验	37
2.5.3 钢管混凝土支架承载力实验汇总	46
2.6 钢管混凝土支架支护施工工艺	46

2.6.1	钢管混凝土支架井下安装工艺	47
2.6.2	钢管混凝土支架井下灌注工艺	50
第3章	钢管混凝土短柱力学性能实验及其壁厚效应	51
3.1	钢管混凝土短柱轴向压缩实验	51
3.1.1	实验方案	51
3.1.2	直径 127mm 钢管混凝土短柱轴向压缩实验	52
3.1.3	直径 168mm 钢管混凝土短柱轴向压缩实验	57
3.1.4	直径 194mm 钢管混凝土短柱	60
3.2	钢管混凝土短柱壁厚效应的力学机理	63
3.2.1	钢管受力分析	64
3.2.2	混凝土受力分析	65
第4章	钢管混凝土结构抗弯性能及中性层偏移规律	66
4.1	钢管混凝土抗弯强化直梁实验	66
4.1.1	实验设计	66
4.1.2	试件变形特征	70
4.1.3	实验结果与分析	71
4.2	钢管混凝土直梁中性层偏移规律分析	75
4.2.1	中性层偏移过程分析	76
4.2.2	中性层偏移曲线分析	81
4.3	钢管混凝土抗弯强化圆弧拱实验	83
4.3.1	实验设计	83
4.3.2	不同荷载形式下圆弧拱承载力分析	87
4.3.3	集中荷载作用下试件变形特征	91
4.3.4	集中荷载作用下圆弧拱荷载-位移曲线	92
4.4	钢管混凝土结构抗弯性能实验汇总	93
第5章	深井软岩巷道承压环力学模型与理论研究	95
5.1	承压环力学模型	95
5.1.1	承压环概念的提出	95
5.1.2	承压环力学模型的建立	97
5.1.3	承压环强化支护作用下巷道稳定的条件	99
5.1.4	承压环强化支护作用机理分析	100
5.2	深井软岩巷道承压环的分类与支护设计方法	101
5.2.1	深井软岩巷道承压环的分类	101
5.2.2	深井软岩巷道支护设计方法	101
5.3	深井软岩流变及其扰动效应	103

5.3.1	岩石流变扰动效应的基本概念	103
5.3.2	岩石流变扰动实验仪研制	104
5.3.3	岩石单轴流变实验实例	107
5.3.4	岩石流变扰动效应	109
5.4	深井软岩巷道应力场梯度稳定理论	109
5.4.1	应力场梯度	110
5.4.2	基于库伦准则的应力场梯度	110
5.4.3	软岩巷道围岩应力场梯度理论	111
第6章	邢东煤矿深井巷道钢管混凝土支架支护研究	112
6.1	邢东矿井概况	112
6.1.1	二水平皮带下山地质条件	112
6.1.2	二水平皮带下山支护现状及破坏分析	117
6.2	钢管混凝土支架支护方案设计	118
6.2.1	钢管混凝土支架结构设计	118
6.2.2	钢管混凝土支架承载力计算	121
6.3	钢管混凝土支架应用效果	122
6.3.1	支架荷载监测分析	122
6.3.2	支架变形观测分析	126
6.4	二水平皮带下山钢管混凝土支架支护巷道稳定性数值分析	127
6.4.1	支护方案初步设计与数值模型建立	128
6.4.2	钢管混凝土支架的支护数值模拟分析	131
6.4.3	钢管混凝土支架支护优化建议	134
第7章	清水营软岩巷道钢管混凝土支架支护	136
7.1	工程地质条件与巷道围岩力学性质	136
7.1.1	清水营煤矿地质条件	136
7.1.2	巷道围岩岩石力学参数、水理性质与矿物成分	138
7.2	钢管混凝土支架支护方案设计	139
7.2.1	+786m 水平井底车场临时水仓	140
7.2.2	主变电所及通道	148
7.2.3	主排水泵房及通道	153
7.2.4	2号主副水仓	159
7.3	钢管混凝土支架支护性能监测	164
7.3.1	巷道与钢管混凝土支架变形观测	164
7.3.2	钢管混凝土支架荷载监测	168

第 8 章 钢管混凝土支架在其他深井软岩巷道中的应用	170
8.1 华丰煤矿软岩巷道	170
8.1.1 华丰煤矿—1100m 中央泵房钢管混凝土支架支护	170
8.1.2 华丰煤矿—1100m 水平大巷钢管混凝土支架支护	175
8.1.3 华丰煤矿—1100m 风井联络巷钢管混凝土支架支护	181
8.2 平朔井工三矿东翼大巷	185
8.2.1 平朔井工三矿东翼大巷地质概况	185
8.2.2 平朔井工三矿东翼大巷巷道钢管混凝土支架支护方案设计	187
8.2.3 平朔井工三矿东翼大巷巷道变形现场监测与支护效果	189
8.3 北皂煤矿极软岩巷道	191
8.3.1 北皂煤矿矿井地质概况与巷道围岩岩石性质	191
8.3.2 北皂煤矿海域二采区回风联络巷钢管混凝土支架支护	191
8.3.3 北皂煤矿海域 H2304 运输联络巷钢管混凝土支架支护	197
8.4 查干淖尔一号井极软岩巷道	202
8.4.1 查干淖尔一号井极软岩巷道地质概况	203
8.4.2 巷道原支护参数和破坏情况分析	203
8.4.3 查干淖尔一号井极软岩巷道钢管混凝土支架支护方案设计	206
8.4.4 基于钢管混凝土支架的复合支护方案	208
8.4.5 查干淖尔一号井极软岩巷道支护效果	209
第 9 章 钢管混凝土支架经济效益与社会效益	213
9.1 钢管混凝土支架应用效果	213
9.2 钢管混凝土支架经济效益	214
9.3 钢管混凝土支架社会效益	215
参考文献	217

第 1 章 绪 论

煤炭资源是支撑我国国民经济发展的主体能源,随着浅部煤炭资源日益枯竭,煤矿开采逐渐向深部发展,受埋深大、围岩软弱、动压扰动及断层等影响,越来越多的矿井面临着深井巷道和软岩巷道的支护难题。深井软岩巷道在服务年限内需对巷道进行多次返修,不仅耗费大量的人力物力,而且影响煤矿安全与生产。采用低成本的支护技术,得到更大的支护反力,取得更好的巷道支护效果是深井软岩巷道支护工作者不断追寻的目标。

钢管混凝土结构是在空钢管内充填混凝土形成的一种现代构件,钢管和混凝土优势互补钢管为核心混凝土提供紧箍力,使混凝土处于三向受压状态,增加了混凝土的强度;而核心混凝土的存在一方面提高了整体强度,另一方面则避免薄壁钢管的内凹屈曲破坏。钢管混凝土结构是一种具有高承载能力和很好的经济效益的承载构件,因其诸多优点,这种构件在建筑工程中有广泛的应用,如摩天大楼、地铁车站、拱桥、公路立交桥、大型场馆等。

将钢管混凝土结构应用于矿井支护,可为深井软岩巷道支护提供一种新型高承载力的支架。与地面工程相比,矿井系统中的井巷工程作业空间狭窄,机械化程度低。因此,将钢管混凝土支架开发成为一种方便施工、劳动强度低、综合成本优良的支架架型还有诸多问题有待解决。本书针对钢管混凝土支架在煤矿应用中面临的问题,从支架结构设计、施工工艺、承载能力、深井软岩支护理论等方面入手,设计了井下灌注式钢管混凝土支架结构,提出了钢管混凝土支架施工工艺,开发了一整套基于钢管混凝土支架的支护技术。本书的研究成果将为经济高效地解决深井软岩巷道的支护问题开辟一条新的途径。

1.1 深井软岩巷道支护技术与理论研究现状

深井软岩地下工程所表现出来的变形特征与浅部有着明显的不同^[1-3],浅部的支护理论及技术也已经无法适应深井软岩巷道支护的要求^[4-10]。因此,国内外相关学者从 20 世纪 80 年代开始,逐步对深井软岩巷道的稳定性控制理论和技术进行了相关研究,形成了一些专门针对深井软岩巷道变形特征的围岩控制理论与支护技术。

1.1.1 巷道稳定性控制理论研究

国外方面,奥地利学者缪勒(Müller)教授提出的“新奥法”支护理论是对深井软岩巷道围岩控制影响较大的一种理论。“新奥法”全称是“新奥地利隧道施工法”^[11-13],该理论提出,地下工程开挖所产生的二次集中应力作用和结构面的切割作用是地下岩体工程失稳的主要原因;支护体和围岩共同承担围岩压力,并且由围岩承担主要的部分。将共同作用理论作为其指导思想,这是“新奥法”的精髓所在。基于共同作用的理论指导,“新奥法”提出柔性支护和早期支护的概念,并合理设计支护体系,使围岩充分发挥自身的承载能力,因此“新奥法”成功地应用于岩石地下工程施工中。深井软岩巷道支护理念中的让压支护、早期支护的观点^[14-16]都是在“新奥法”的基础上提出来的,“新奥法”支护理论对巷道围岩稳定性控制起到了积极的作用。

国内针对深井软岩巷道围岩稳定性控制的问题形成了多种支护理论,包括松动圈理论、联合支护理论、锚喷-大弧板支护理论、围岩强度强化理论、高预应力强力支护理论及关键部位耦合支护理论,这些理论对我国深井巷道支护体系的发展均作出了重要的贡献。联合支护理论是由陆家梁^[17]教授提出来的,联合支护就是采用多种不同性能的单一支护,将各种单一支护形成组合支护结构,以适应围岩压力与变形的要求。初次支护采用让压原理,在一定支撑力的基础上允许围岩有一定的变形以使较大的围岩应力得到一定程度的释放,之后的二次支护给围岩提供较大的支护刚度,采取“不让”的方式坚决“支”住围岩,以保持巷道围岩的长期稳定与安全。郑雨天等学者在联合支护理论的基础上形成了锚喷-大弧板支护理论^[18-19],在“先柔后刚”的支护理念下,重点强调二次支护的强度和刚度,采用“锚喷+钢筋混凝土大弧板”支护技术控制围岩长期稳定性。中国矿业大学董方庭教授提出了围岩松动圈巷道支护理论^[20-22],该理论认为在不同的应力状态下,围岩破裂后会产生不同尺寸的松动圈,松动圈在发展过程中产生的碎胀应力是造成支护结构破坏的主要原因,松动圈越大,支护越困难,因此在进行支护设计时,应根据围岩应力状态确定松动圈的大小,进而进行合理的支护控制措施。侯朝炯和勾攀峰^[23]提出了锚杆支护的围岩强度强化理论,该理论认为巷道围岩的稳定性除了与外部支护的作用有关外,主要取决于围岩自身的强度和应力状态;该理论提出锚杆支护主要的作用不是施加较大的支护强度,而是改善围岩的力学参数,提高围岩的自身强度,尤其是提高峰后岩石强度的参数,从而使锚杆支护体和围岩共同形成承载结构以保持巷道的整体稳定性。康红普院士针对煤矿深井巷道支护困难的问题^[24-27],分析了锚杆的支护作用,提出了高预应力、强力支护理论,该理论认为,提高支护结构的早期支护强度与刚度是保持巷道围岩的完整性、减少围岩强度降低的有力措施,并研发出高预应力、强力支护系统,包括强力锚杆、强力钢带及强力锚

索系列材料。何满潮、孙晓明等学者提出深井巷道耦合支护理论^[28-30],该理论认为深井巷道围岩的变形进入塑性变形阶段以后,其发生的破坏主要是支护体与围岩之间的不耦合造成的,并提出了锚网索耦合支护非线性设计方法,从而实现软岩巷道支护体与围岩在强度、刚度和结构上的耦合,保证软岩巷道围岩的稳定性。

1.1.2 深井软岩巷道支护技术研究

总体来说,国内外煤矿巷道支护技术经历了木支架—刚性金属支架—可缩性金属支架—锚杆的发展过程,其中可缩性金属支架和锚杆是支护技术上的两次重大突破。经过多年的实践和研究,已经形成了多种软岩巷道的支护形式。

1. 锚杆支护技术^[26]

随着矿井向深部延伸,支护技术面临一系列复杂困难条件,包括全煤巷道、沿空掘巷、极破碎围岩巷道等,而且随着开采强度增大,要求的巷道断面越来越大。为了解决这些巷道支护难题,在引进、消化吸收国外先进技术的基础上,煤炭系统经过集中攻关,形成了针对我国煤矿条件的高强度锚杆支护技术,并得到大面积推广应用,取得良好的技术经济效益。近年来,针对深部高地应力巷道、采动影响的巷道、特大断面巷道等复杂困难条件,提出了高预应力、强力支护理论,开发了强力锚杆、锚索支护系统,这些措施大幅度提高了巷道支护效果与安全性,并有利于巷道快速掘进,使煤巷锚杆支护技术发展 to 更高的水平。

2. 棚式支护技术

近年来,锚杆支护理论和技术得到迅速的发展和完善,成为我国非常重要的巷道支护手段。对于围岩条件较好的巷道,锚杆支护已经完全可以满足生产需求,但是对于深井软弱围岩、破碎巷道,锚杆支护不能满足支护要求。金属支架能很好地支撑软弱破碎的岩(煤)体,使巷道的形状及尺寸满足要求,可缩性金属支架还能一定程度上适应围岩体或煤体的变形,可以在一定程度上弥补锚杆支护的不足。

在20世纪60年代以前,由于生产技术和经济条件落后,我国煤矿巷道基本采用木支架支护,直到20世纪60年代初期才引入金属支架支护技术。20世纪七八十年代,随着生产技术发展,刚性金属支架逐渐成为矿井巷道支护的主要支护形式之一。20世纪后期,随着煤矿开采深度的增加,矿山压力逐渐增大,刚性金属支架不能很好地维护巷道围岩体稳定,可缩性金属支架代替刚性金属支架成为煤矿巷道主要的支护方式。经过几十年的快速发展,我国巷道棚式支护取得巨大的进步,主要成果如下。

(1) 完善了棚式支架支护理论及支架的设计方法,研究和分析了支架的结构、受力、配件、可缩性,形成了支架的支护理论和设计计算方法。

(2) 巷道支架类型、矿用支护型钢逐步增多,并发展形成系列。目前 U 型钢和矿用工字钢是两种主要的支护型钢。我国生产的工字钢有 9[#]、11[#]、12[#] 三种规格。U 型钢是制造可缩性金属支架的主要材料,我国常用的型钢型号主要有 U18、U25、U29、U36 四种。U 型钢可缩性金属支架包括:U 型钢拱形可缩性支架、U 型钢梯形可缩性支架、U 型钢封闭性可缩性金属支架,其中 U 型钢封闭性可缩性金属支架又形成了马蹄形、圆形、环形三种形状。

(3) 连接件逐步发展完善,研制了螺栓连接件、楔式连接件。

(4) 逐步完善壁后充填技术。支架壁后充填是加固围岩改善支架受力状况的重要技术途径。通过壁后充填使支架与围岩紧密接触,有效地改善了支架的受力状况,提高了支架的承载能力,在此过程中研制使用了矸石粉、高水速凝材料、粉煤灰、砂浆等充填材料。

3. 注浆加固技术

注浆技术是将注浆材料注入岩土体的孔隙裂隙中,使其能与岩土体固结形成整体结构,从而改善岩土体的物理力学性质的一种加固技术。注浆技术的发展已有二百多年的历史,法国人最先使用注浆技术进行施工,英国通过采用水泥注浆技术对井筒进行注浆堵水,成功地解决了井筒漏水问题,并发明了硅酸盐水泥。1940 年以后,注浆技术的研究和应用进入辉煌时期,注浆技术的应用越来越普遍。20 世纪 50 年代初我国才开始应用注浆技术,经过六十多年的发展已取得了较大的进步,特别是在软岩巷道支护方面成效显著。锚杆和注浆都是巷道支护的基本形式。杨新安、陆士良等学者利用锚杆兼做注浆管,将锚杆和注浆有机地结合起来,提高了锚杆支护系统的支护强度;通过进一步研究,提出了锚注结合加固软岩巷道的新思路,发明了外锚内注式新型锚杆及其加固软岩巷道新技术,并成功运用于工程实践,取得了显著的效果^[16,17]。

4. 联合支护技术^[17]

联合支护技术又称复合支护技术,是采用两种或两种以上的支护方式联合支护巷道。目前,联合支护技术主要采用主动支护方式的联合,通过改良围岩力学性能,充分利用围岩的自身承载能力。现行类型较多,如锚网喷+注浆加固、锚网喷+型钢可缩性支架+锚索、锚网喷+弧板支架、U 型钢支架+注浆加固、锚网喷注浆+U 型钢支架等形式。选择复合支护形式时,应根据巷道围岩地质条件 and 生产条件,确定出合理的支护形式和参数。不同类别的软岩巷道采用不同的支护形式。

1.2 井下灌注式钢管混凝土支架支护技术研究现状

2004年,中国矿业大学(北京)高延法教授课题组提出了研发井下灌注式钢管混凝土支架用于深井软岩巷道支护的设想。

2005年,课题组设计出合理的钢管混凝土支架,其中包括使用套管接头、留设混凝土灌注孔与排气孔、接头间增加可缩等细节考虑;设计加工钢管混凝土支架,准备钢管混凝土支架力学实验。

2006年,为验证钢管混凝土支架的力学性能,课题组进行了钢管混凝土支架力学性能实验,并同时做了相同尺寸的U型钢支架与空钢管支架的对比实验^[31-35]。

2007年至2008年,课题组为进一步改进钢管混凝土支架结构并深入研究其力学性能,在清华大学结构与振动实验室进行两架钢管混凝土支架实验,根据实验结果进一步改进支架细部结构^[36-38]。2008年,在开滦集团钱家营矿做了钢管混凝土支架的工业性实验,支架分4段,各段之间采用接头套管连接,钢管采用 $\Phi 140\text{mm} \times 8\text{mm}$ 的无缝钢管,混凝土采用强度等级为C40的混凝土。钢管混凝土支架支护两个月后巷道变形稳定,支护1年后支架无明显变形,巷道稳定。2008年12月高延法教授在内蒙古鄂尔多斯市上海庙地区临沂矿业集团所属的榆树井煤矿做钢管混凝土支架支护的技术交流。

2009年,为彻底解决鹤岗断层破碎带石门难支护问题,课题组设计了钢管混凝土支架支护方案,并在清华大学进行了巷道原型支架1/2尺寸钢管混凝土支架的模拟实验,同时做了U型钢对比实验。为研究混凝土力学性能,在中国建筑材料科学院进行了混凝土配比研究实验,得出C60快硬混凝土等一系列配比方案^[39]。为研究钢管混凝土注浆效果,在鹤岗进行了钢管混凝土支架地面灌注实验。支架的细部结构、核心混凝土强度与施工工艺得到进一步完善。

2010年,高延法教授在全国各大会议讲述钢管混凝土支架的优良支护性能,并得到许多专家学者高度称赞。同年,钢管混凝土支架在鹤岗南山煤矿动压巷道、鹤岗益新矿断层破碎带巷道、平朔井工三矿冲刷带巷道和新汶华丰煤矿深井巷道中得到推广应用^[40-42]。高延法教授提出了基于钢管混凝土支架的承压环强化支护理论,整体支护技术日趋完善。

2011年,课题组钢管混凝土支架在峰峰集团大淑村矿深井巷道、沈阳清水煤矿软岩巷道、鹤壁三矿、查干淖尔一号井等深井巷道中得到应用,钢管混凝土支架支护技术日益完善并成熟。

2012年,课题组发现钢管混凝土结构受弯破坏过程中中性层偏移问题,对中性层偏移问题进行了理论分析。在北京工业大学进行了3根不同抗弯强化程度的

钢管混凝土圆弧拱抗弯性能测试,并测试了 2 架浅底拱圆形钢管混凝土支架承载能力。钢管混凝土支架支护技术在神华宁煤清水营煤矿、冀中能源邢东煤矿、山东能源榆树井煤矿、淮北杨庄煤矿等单位推广应用。

2013 年,课题组实验测试了 3 根不同抗弯强化程度的钢管混凝土直梁抗弯承载能力,并测试了 5 根不同抗弯强化程度的钢管混凝土直梁抗弯承载能力,研究了钢管混凝土结构受弯条件下中性层偏移规律及钢管混凝土结构抗弯强化措施^[43-44]。钢管混凝土支架支护技术在山东能源龙口北皂矿极软岩巷道、山东沂源鲁村煤矿深井巷道、山西运销集团古韩荆宝矿等单位推广应用。

2014 年,课题组实验测试了 6 根不同抗弯强化程度的钢管混凝土直梁抗弯承载能力,并测试了 2 架椭圆形钢管混凝土支架承载能力,以及测试了同等尺寸 U36 型钢支架承载能力^[45]。课题组进行了不同壁厚钢管混凝土短柱承载能力实验,研究了钢管混凝土短柱的壁厚效应问题^[46]。钢管混凝土支架支护技术在济宁矿业集团阳城煤矿、山东黄金三山岛金矿、甘肃金川集团龙二矿区等单位得到推广应用。

2015 年,为进一步研究圆弧拱后屈服破坏的中性层偏移规律,课题组测试了 36 根钢管混凝土圆弧拱试件,发现拱脚破坏占比较大,圆弧拱压平前拱内拉力较小,中性层处于拱轴线以下。随着拱向压平发展,拱内弯矩快速增长,中性层快速向上偏移。钢管混凝土支架支护技术在全国 22 家矿井 61 条巷道应用,支护巷道长度接近 12000m。

此外,安徽理工大学臧德胜教授在 2000 年前后对小口径钢管混凝土支架进行了较为系统的实验研究并进行了工业性试验,试验取得了一定成果,但后期没有进行推广应用。2011 年起,山东大学李术才教授课题组王琦等进行了方钢管混凝土支架的实验研究,随后又进行了工业性试验,支护效果良好。2008~2010 年,高延法教授带领的课题组有组织地进行了钢管混凝土支架在全国的推广应用,并取得了良好的支护效果,推动了国内多位学者对钢管混凝土支架的研究热情。