

山东省自然科学基金 (ZR2018MEE009) 资助

国家“十三五”重点研发计划 (2016YFC0801403) 资助

国家自然科学基金 (51374140) 资助

大断面软弱围岩 巷道破坏机理及支护技术研究

顾士坦 蒋邦友 詹召伟 王荣超 沈建波 著

Daduanmian Ruanruo Weiyan

Hangdao Pohuai Jili Ji Zhihu Jishu Yanjiu

China University of Mining and Technology Press



中国矿业大学出版社

国家一级出版社 全国百佳图书出版单位

ZR2018MEE009)资助

国家“十二五”重点研发计划(2016YFC0801403)资助

国家自然科学基金(51374140)资助

大断面软弱围岩巷道破坏机理 及支护技术研究

顾士坦 蒋邦友 詹召伟 王荣超 沈建波 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书针对大断面软弱围岩巷道严重的断面收缩、底鼓等非线性流变大变形控制难题,综合运用力学试验、理论分析、数值模拟和现场测试相结合的方法,对大断面软弱围岩巷道破坏机理及支护技术进行了系统研究。首先,探明了大断面软弱围岩巷道围岩破裂特性,分析了大断面软弱围岩巷道围岩破坏机理;然后,在软弱围岩物理力学特性试验测试和巷道破坏失稳诱因分析的基础上,建立了梯形载荷作用下巷道底板岩层力学模型和顶帮支护结构体力学模型,揭示了大断面软弱围岩巷道破坏失稳力学机制及其控制机理;最后,通过数值模拟对比分析,提出了以锚注为主体的软弱围岩全断面封闭式浅、深耦合注浆加固技术,形成了锚网索梁喷注围岩整体支护与超挖锚注回填防治底鼓的大断面软弱围岩巷道支护控制技术体系,并进行现场试验,取得了良好的现场应用效果,为类似巷道工程提供了参考。

本书可供从事采矿工程、岩土工程、隧道工程等专业的科技工作者、研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大断面软弱围岩巷道破坏机理及支护技术研究 / 顾士坦等著. —徐州:中国矿业大学出版社,2018.11
ISBN 978 - 7 - 5646 - 4248 - 8

I. ①大… II. ①顾… III. ①大断面巷道—巷道围岩—破坏机理—研究②大断面巷道—巷道围岩—巷道支护—研究 IV. ①TD263②TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第254466号

书 名 大断面软弱围岩巷道破坏机理及支护技术研究
著 者 顾士坦 蒋邦友 詹召伟 王荣超 沈建波
责任编辑 杨 洋
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 787×1092 1/16 印张 8 字数 200 千字
版次印次 2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 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

2017 年我国煤炭总产量 34.45 亿 t, 约占世界煤炭总产量的 44.6%, 是世界第一产煤大国, 虽经历了 3 年左右的煤炭经济萧条期, 但煤炭总量依然多年保持世界首位。

随着煤炭开采程度的不断加强, 受复杂地质条件影响下巷道的支护和维护难度大, 特别是高地应力下的软岩大断面巷道的支护控制问题尤为突出。如何更有效地提高支护的效率, 降低支护和巷道复修的成本, 推动软岩巷道支护技术的进步, 是当下煤炭生产中急需解决的问题。

由于软岩的复杂的特性, 软岩巷道围岩控制问题一直困扰着我国煤矿安全高效生产。

软岩巷道开挖后围岩变形速度快、变形量大、持续时间长、巷道底鼓严重、稳定性差、极难维护、支护费用直线上升, 给煤矿的建设生产造成很大的损失, 甚至有些矿区的软岩巷道(断面 $15\sim 20\text{ m}^2$)每延米支护成本超过 2 万元或更高。即使这样, 有些软岩巷道还不得不反复维修, 甚至停产维修, 严重影响了煤矿安全生产和经济效益。

膨胀泥化软岩中掘进巷道, 岩层本身难以形成承载结构, 强烈的较长时间的持续膨胀变容易导致锚网索喷等支护体产生较大变形、开裂; 传统的架棚支护属于被动支护手段, 支护强度低, 也难以抵抗此类围岩的持续膨胀变形。

本书针对大断面软弱围岩巷道支护困难的问题, 以某矿软岩穿层开拓巷道支护为研究对象, 采用理论分析、实验室试验、数值模拟、现场试验等方法, 研究了大断面软岩巷道的变形力学机理及加固机理, 软弱围岩的物理力学性质及注浆改良的效果, 大断面软弱围岩穿层巷道底鼓机理及控制技术, 软弱围岩全断面封闭式浅、深耦合注浆加固技术等, 形成锚网索梁喷注围岩整体支护技术与超挖锚注回填的底鼓防治技术, 并进行现场试验, 在现场试验基础上对巷道支护和注浆工艺进行了科学的设计, 并对各支护参数进行了合理的优化。

本书的研究工作及出版得到山东省自然科学基金(ZR2018MEE009)、国家“十三五”重点研发计划子课题(2016YFC0801403)、国家自然科学基金

(51374140)的支持。

课题组研究生丁可、李男男、许春兆、和树栋、黄瑞峰、沈腾飞等参与了部分室内试验、数值模拟现场试验测试及排版整理工作,在此表示感谢。本书的研究工作同时也得到济宁矿业集团阳城煤矿有关领导及工程技术人员的帮助,在此一并表示感谢。

受作者水平所限,书中难免存在错误与不足之处,敬请同行专家和读者指正。

著 者

2018年9月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 软岩物理力学性质研究现状	2
1.3 软岩巷道失稳机理研究现状	4
1.4 大断面软岩巷道支护理论研究现状	5
1.5 大断面软岩巷道支护技术研究现状	6
1.6 研究内容	8
2 大断面软岩巷道破坏与加固机理	10
2.1 软岩的特点与工程分类	10
2.2 工程概况	13
2.3 现场实测巷道深部围岩破坏特征	19
2.4 大断面软岩巷道破坏机理	27
2.5 大断面软岩巷道加固机理	33
2.6 本章小结	39
3 基本参数测试分析	41
3.1 现场试样采取	41
3.2 试验条件及试件制备	42
3.3 测试原理	43
3.4 试件测试结果分析	45
4 软岩穿层巷道失稳分析	52
4.1 软岩穿层巷道失稳主要影响因素	52
4.2 软岩穿层巷道失稳破坏力学分析	55
4.3 巷道失稳破坏控制研究	62
4.4 本章小结	65
5 大断面软弱巷道围岩控制方案提出与对比分析	67
5.1 模型建立	67
5.2 巷道开挖后围岩力学特性	70

5.3	巷道底鼓控制技术数值模拟分析·····	76
5.4	本章小结·····	80
6	大断面软弱围岩巷道支护控制技术·····	82
6.1	南翼软岩大巷围岩支护控制方案提出·····	82
6.2	巷道支护方案控制效果及参数优化模拟研究·····	90
6.3	围岩注浆加固合理时间研究·····	95
6.4	本章小结·····	98
7	现场试验及矿压监测分析·····	100
7.1	现场监测内容及监测方案·····	100
7.2	巷道围岩控制效果监测分析·····	103
7.3	本章小结·····	110
8	主要结论·····	112
	参考文献·····	114

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

软岩是一种在特定环境下的具有显著塑性变形的复杂岩石力学介质,可分为地质软岩和工程软岩两大类。地质软岩指强度低、孔隙度大、胶结程度差、受构造面切割及风化影响显著或含有大量膨胀性黏土矿物的松、散、软、弱岩层。工程软岩是指在工程力作用下能产生显著塑性变形的工程岩体。由于软岩的复杂的特性,软岩巷道围岩控制问题一直困扰着我国煤矿安全高效生产,是急需解决的科学技术问题之一。

软岩巷道开挖后围岩变形速度快、变形量大、持续时间长、巷道底鼓严重、稳定性差、极难维护、支护费用直线上升,给煤矿的建设生产造成很大的损失,甚至有些矿区的软岩巷道(断面 $15\sim 20\text{ m}^2$)每米支护成本达 2 万多元。即使这样,有些软岩巷道还不得不反复维修,甚至停产维修,严重影响了煤矿安全生产和经济效益。

随着煤矿开采深度和强度的不断增加,矿井开采条件越来越复杂,受围岩岩性和“三高一扰动”(即高地应力、高地温、高岩溶水压和强烈的开采扰动)的影响,原来坚硬的围岩也表现出软岩的特性。煤矿井下出现了大量支护困难的巷道、硐室,包括深部巷道、高地应力软岩巷道,受强烈动压影响巷道,强风化影响的围岩松软破碎、极破碎巷道,大断面、大跨度巷道、硐室、交岔点,沿空巷道等。这些复杂困难巷道共同的特点是在各种因素如地应力、动压影响、地质构造、成岩作用及岩体成分等的影响下,围岩节理裂隙发育、松散破碎、泥化易风化、变形强烈、破坏范围大,呈流变形态。

煤矿软岩巷道十分普遍,而且软岩工程是影响煤矿生产建设的重要难题,特别是在成煤期比较晚的侏罗系、白垩系、第三系的煤系地层中,泥岩、砂岩、泥砂岩,其成岩时间短、胶结强度低,而且含有膨胀性矿物成分,极易风化泥化。膨胀或碎胀,给巷道硐室支护带来很大的困难。许多软岩矿井巷道由于支护方式及支护参数选择不合理、针对性不强,加之施工岩层松软遭到破坏,出现多次返修现象。不仅延长了工期、增加了工程造价,同时也给煤矿生产带来了安全隐患。随着今后开采深度的不断增大,常规支护 U 方式难以维护巷道稳定,软岩问题将会更加突出,在相当程度上影响煤矿的安全生产,因此,软岩工程的支护研究工作势在必行。

随着我国煤矿开采强度与规模的显著增加,以及现代化综合机械化开采技术的发展,厚煤层综采放顶煤开采、中厚煤层一次采全高的高产高效开采方法得到了大面积推广应用,巷道的断面要求越来越大。回采工作面设备的大型化,开采强度与产量的大幅度提高,为了保证正常生产的运输、通风及行人安全,这些都要求更大的巷道断面。巷道断面的增大显著增加了支护的难度,特别是在软岩煤层及深部矿井条件下,大断面巷道支护困难的问题尤为

突出。

某矿—650 m 水平南翼 3 条大巷(南翼回风大巷、南翼轨道大巷、南翼胶带大巷)在同一标高并行掘进,在掘进过程中遇较多断层,造成巷道在掘进施工中在多个软弱岩层层位中穿行,巷道围岩强度低、完整性差,围岩泥化程度高,极易风化、潮解,属于高集中应力泥化软岩巷道。

巷道围岩以泥岩、泥质粉砂岩、细砂岩为主,巷道穿越软弱复杂岩层,施工过程中巷道变形严重,多处片帮、炸皮、底鼓甚至冒顶,架棚段巷道支架受压破坏严重、梁腿弯曲甚至折断,部分地段断面收缩率在 80% 以上,采用常规的支护方法难以较好控制围岩变形,巷道变形破坏如图 1-1 所示。针对上述巷道变形情况,矿方曾多次组织过对巷道进行修复加固,但由于缺乏对软岩巷道变形破坏及控制机理的认识,仅根据以往的经验方法进行刷帮、卧底和锚网索配合 U 型钢棚重新支护,巷道围岩控制效果不理想。随着巷道返修次数的增加,围岩破碎程度逐渐加大,导致围岩逐渐丧失自承能力,修复后的巷道围岩很快又遭到严重的变形破坏,形成了“前掘后修,前修后坏”的恶性循环。

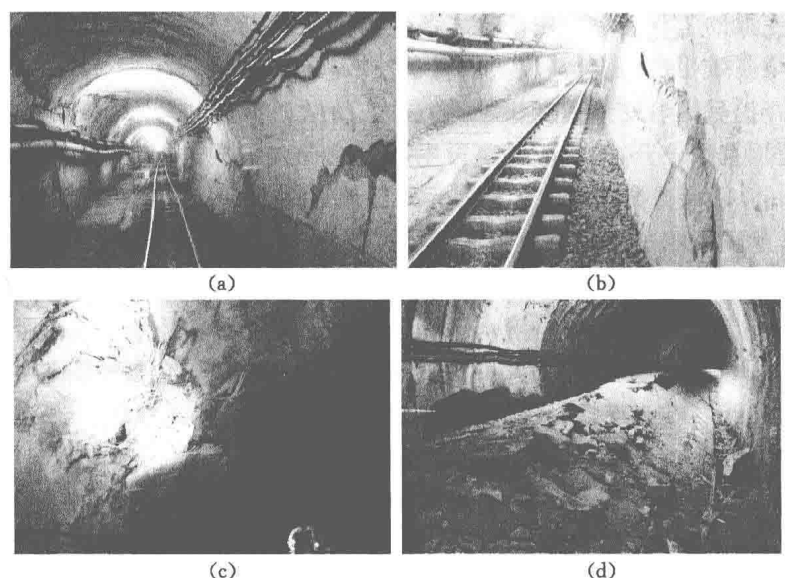


图 1-1 南翼大巷围岩变形破坏照片

(a) 大巷整体收敛变形严重;(b) 巷道右帮鼓出;(c) 巷道围岩破碎;(d) 巷道底鼓严重

本书以该矿—650 m 南翼大巷支护为主要工程背景,研究软岩巷道破坏失稳及加固支护机理,研发适合复杂条件软岩大巷的支护控制技术,为软岩工程控制设计提供科学的依据,具有重要的理论意义和应用价值。

1.2 软岩物理力学性质研究现状

软岩因其所属地区的不同以及其内部所含矿物组分和各组分含量所占比例的差异性,在外界因素影响下其物理性质(风化效应以及遇水软化、泥化、崩解、膨胀的水理效应等)与力学性质(强度指标与变形指标劣化等)会呈现出一定差异性^[1-3]。为此,较多专家与学者展

开了大量研究工作,吴道祥等^[4]基于红层软岩单轴抗压强度低,且遇水易崩解、软化等物理力学特性,进行浸水崩解水理试验,分析了该类岩层的崩解性能和崩解机制,表明了红层软岩所含胶结物种类以及黏土矿物含量是该类软岩的崩解程度高低的重要内在因素;周翠英等^[5-7]根据红层软岩遇水软化的特性,综合考虑该类软岩物理力学特性以及微观结构等试验结果,得到了水影响下软岩的工程特性转变至稳定状态的临界时间。单仁亮等^[8]采用X衍射分析、单轴压缩试验以及电镜扫描的试验方法,获得了氧化带软岩具有较高含量的泥质、易受孔隙水软化与风化等物理力学性质。王之东等^[9]综合采用电镜扫描、透射电镜以及X射线衍射的试验方法,对泥质软岩巷道围岩的物理化学特性进行了研究。黄宏伟等^[10]采用X射线衍射和电镜扫描针对不含蒙脱石泥岩遇水软化期间的微观结构的动态特征进行了研究,得到了泥岩内在的结构特征是其产生宏观软化崩解的本质原因。王振等^[11]通过采用矿物成分分析法与物理力学试验,分析了钙质泥岩遇水后的软化、膨胀以及强度与变形参数衰减的特性;杨成祥等^[12]利用X-ray技术实时监测水与岩石之间相互作用过程中,泥岩的遇水软化过程中细观结构的演化特征。钱自卫等^[13]通过电镜扫描、水理试验以及X射线衍射的试验手段,对煤系软岩的稳定性进行了较深入研究,表明该类软岩遇水崩解的主要因素为其自身的内在结构特征以及黏土类矿物的膨胀作用。

苏永华等^[14]基于室内崩解试验,采用分形理论中的分数维作为软解崩解机理的定理表征。王来贵等^[15]通过综合运用化学、水泥以及复合改性的方法以从微观角度改变软岩结构,降低软岩遇水软化性质。陆银龙等^[16]通过三轴压缩试验获得了软弱泥岩不同围压时全应力应变曲线,定义了广义内摩擦角与黏聚力,分析了两者的围压变化的演化特征,揭示了软弱岩石受力变形特征以及破坏机制。杨志强等^[17]通过室内试验,并结合相关理论,对软岩峰后应变软化及渗流特性进行了研究,获得了软弱岩石峰后应变软化渗流机制。李海波等^[18]对不同应变速率条件下软岩强度指标与变形指标演化规律进行了研究,表明试样强度指标随应变速率增加的幅度高于变形指标。范秋雁等^[19]基于岩石蠕变机制,分别通过单轴无侧限与有侧限蠕变试验以及电镜扫描,研究了泥质软岩蠕变过程中的细观结构变化特征,得到了泥质软岩蠕变结果是岩石损失与硬化效应的共同作用。闫小波等^[20]通过对干燥、饱水软岩的变形与强度各向异性的力学特性进行了研究,结果表明饱水岩石的弹模与单轴抗压强度弱化程度高,泊松比增加幅度大。邓华锋等^[21]通过对软岩进行三轴加载与三轴卸载试验,结合两种试验状态下的不同应力路径并引进了半对数法,确定了软岩两种试验状态下抗压强度参数的取值方法。范庆忠等^[22]采用三轴流变仪对含油泥岩进行了蠕变试验,对蠕变参数围压效应以及时效性特征进行了研究。王宇等^[23]在应力水平各异的条件下,进行软岩轴压恒定、围压分级卸载流变试验,得到了在卸载状态下软岩具有轴向与侧向流变较大且各向异性的特征。陈卫忠等^[24]采用现场原位测试方法,获得软岩真三轴状态下的蠕变试验整个过程,探究了软岩蠕变变形随时间的演变规律,表明了泥岩蠕变速率与两方面因素有关:时间和应力水平。郭富利等^[25]通过常规三轴试验对饱水时间不同的岩石,分别处于不同围压条件下软岩强度演变的规律性进行了研究,表明了软岩的抗压强度与围压呈正相关,饱水时间的长短对软岩的力学性质具有不同程度的软化作用。还有众多专家学者^[26-29]对红层的红层软岩进行了力学特性(蠕变特性、剪切蠕变特性、变形性质、抗剪强度等)进行了较深入研究。

Ping Cao等^[30]针对处于高地应力条件下软弱岩层,分别采用分步加载与一次性加载单

轴压缩试验进行了软岩蠕变试验,并根据蠕变试验结果建立了非线性损伤蠕变模型。孟庆彬等^[31]采用离散元软件 UDEC,利用可以综合考虑材料受拉、受压和受剪切破坏形态的黏滞断裂模型对软岩的多重可能性断裂破坏形态问题进行研究,并与试验结果进行了相对比。S. P. Li 等^[32]采用渗透试验进行了砂质泥岩渗流场与应力场之间的耦合关系研究,获得了渗透率与应变之间的方程。Y. W. Pan 等^[33]采用模拟颗粒流的离散元数值模拟软件 PFC3D 对软岩的侵蚀过程进行了微观研究,揭示了软岩侵蚀过程中的破坏机理。Riccardo Castellanza 等^[34]采用固结试验对受天然侵蚀的碳酸盐软岩的力学性质进行研究。P. Zdenek 等^[35]针对软弱岩石峰后的应变软化特性,获得了应变软化模型的指数形式,构建了等效塑性应变和等效应力之间的相互关系。张峰等^[36]采用自主研发的平面应变装置,研究了受中间主应力影响下不同加载路径下沉积软岩的强度效应。Tuong Lam Nguyen 等^[37]采用延展数字成像方法,监测了软岩内部位移的不连续演变过程,为获得软岩内部的断裂机制提供了参考依据。D. S. Agustawijaya^[38]通过对软岩进行大量点荷载试验,得到了点荷载试验所获得的软岩强度与单轴压缩条件下软岩的抗压强度存在一定的关联性,并确定了两者之间强度转换关系。Okada 等^[39]对软岩试样(粉砂岩、砂质泥岩和泥岩)在高温条件下进行了三轴压缩试验,得到了温度在 60°时岩样抗压强度降低,而残余强度不依赖于温度水平的变化。Elli-Maria Charalampidou 等^[40]采用声发射、超声 X 线断层摄影技术等多种研究手段,对处于三轴压缩条件下含多空隙砂质泥岩的剪切压缩带的形成机制与特征进行了较全方位的研 究。M. S. A. Siddiquee 等^[41]利用一系列三轴试验而获得的软岩唯象模型,对明石软岩的力学性质进行研究,并对该模型进行了进一步开发与应用。J. Muñoz 等^[42]通过加热脉冲试验对软岩的热动力学特性进行了研究。M. Quirion 等^[43]通过考虑流体流变与侧限应力的影响,进行了软岩的水压致裂试验研究,获得了侧限应力和流体流变对砂岩裂纹形态的形成与扩展具有强烈影响。

1.3 软岩巷道失稳机理研究现状

国内外学者对软岩巷道的失稳机理进行了长期的研究,提出了众多导致软岩巷道失稳的原因,可总结为以下几个方面:

(1) 物化膨胀机理

地层中的一些软岩中富含蒙脱石、伊利石、高岭石、腐殖质和难溶盐等^[44-49],它们的亲水能力较强,而且软岩中的裂隙较发育,岩体在地下水的作用下,其体积会发生较大的膨胀,最终会导致巷道围岩的变形破坏。

(2) 应力扩容机理

地下岩层在多个时期的地质构造应力的作用下,在地层岩体内部集聚了较大的变形能,以弹性变形的形式存在于岩体中。当地下巷道开挖后,岩体中存储的变形能通过弹性变形的方式向临空区释放,因此巷道围岩发生膨胀变形^[50-53]。

(3) 结构变形机理

地下岩层在形成过程中,受构造应力和地质环境的影响,岩体中常常富含众多结构面、节理和薄弱夹层,巷道围岩受结构面的影响,而发生沿结构面张开或滑动等失稳破坏现象^[54-60]。

(4) 最大应力破坏机理

地层的岩体处于原始构造应力场之中,其应力状态是三向的,在巷道开挖后,原先的围岩应力平衡被打破,应力状态发生改变,由原先的三向转变成了二向,最大主应力的方向也发生了改变,其方向与巷道围岩壁相切,导致围岩受力急剧升高,超出了岩体的强度而发生失稳破坏^[61-69]。

1.4 大断面软岩巷道支护理论 research 现状

软岩巷道的支护理论是以岩石力学、弹塑性力学、流变力学等经典力学知识为基础^[70,71],同时通过现场新的支护材料、支护工艺及支护技术的反馈而不断发展与进步的,是理论知识与工程实践相结合相互指导的产物,所以一方面它拥有较深厚的理论底蕴,另一方面又具有工程经验的性质。由于岩体材料的复杂性,同时又因为该理论发展起步较晚,故整个支护理论尚未完善与成形,形成了国内外百花齐放、百家争鸣的现象。

国外研究可以以四个阶段来划分软岩巷道支护理论的发展历程。

第一阶段——19 世纪末到 20 世纪初的古典压力理论阶段。这一阶段的主要观点是巷道支护结构的支护压力来源于巷道上覆岩层的重力,其代表理论有瑞典地质学家海姆(A. Haim)提出的静水压力理论^[72];苏联学者金尼克基于弹性力学理论提出的水平侧压力系数概念,即支护结构上的垂直压力等于 γH ,而水平压力则需要乘以一个侧压力系数,即 $\lambda\gamma H$ 。

第二阶段——20 世纪初至 30 年代的经验散体地压理论阶段。这一阶段的主要观点是将岩体看做一种散体材料,巷道支护结构的支护压力来源于围岩塌落拱内的破碎岩体的重力。其代表理论有苏联学者普罗托吉雅可诺夫的自然平衡拱理论,太沙基也提出了相近似的平衡拱理论,二者的区别仅是巷道平衡拱的形状不同,普罗托吉雅可诺夫认为是抛物线形而太沙基认为是矩形^[73-75]。

第三阶段——20 世纪 30 年代到 60 年代的经典理论阶段。这一阶段弹性力学和塑性力学被引入巷道围岩的力学计算分析中,形成了围岩与支护结构共同作用的理论。该理论主要分为连续介质理论和地质力学理论。连续介质理论主要分析材料的力学性质以此判定软岩的稳定。其代表有萨文^[76]用无限大平板孔附近应力集中的弹性解析解来计算分析巷道围岩应力分布问题;鲁滨涅特^[77]运用连续介质理论写出了求解岩石力学领域问题的系统著作;地质力学理论注重研究地层结构与力学和岩石工程稳定性的关系,其最具代表性的理论就是“新奥法”。该方法是奥地利工程师 L. V. 拉布采维茨(L. V. Rabcewicz)对前人的经验进行总结提出的一套新的隧道施工方法。该方法将支护过程分为两个阶段:第一阶段利用锚杆、金属网、喷射混凝土的支护手段在隧道断面开挖后立即进行初次支护,这些支护手段属于柔性支护,充分发挥了围岩的自承载能力。第二阶段主要通过现场变形监测确定最佳二次支护时间后通过喷射混凝土或砌碛进行对隧道二次永久支护^[78]。新奥法以岩石力学为理论基础,重视围岩与支护的共同作用,被广泛应用于地下工程的施工中,特别是在软岩巷道的掘进支护中被广泛使用,是软岩巷道的重要支护理论之一。

第四阶段——20 世纪 60 年代至今的软岩巷道支护理论的新进展阶段,该阶段的主要特点是多学科交叉^[79]。其代表有樱井春辅与山地宏于 20 世纪 60 年代提出的围岩支护应变控制理论,围岩的应变与支护结构的影响关系在该理论中进行了分析;萨拉蒙(M. D.

Salamon)于20世纪70年代提出了著名的能量支护理论,在该理论中能量守恒的观点被应用在支架和围岩的关系中,围岩通过变形所释放的能量被支护结构所吸收,以该理论为依据可对支护结构进行构造上设计使其能够自动调整围岩释放的能量和支架吸收的能量,一方面充分调动围岩的自承载能力,另一方面可以使支架提供足够的支护阻力且不被破坏。20世纪80年代随着计算机科学及有限元、离散元、有限差分等数值计算学科的发展,计算机仿真模拟分析的方法逐渐成熟,特别的是一些商业数值模拟软件如FLAC、ADIAN、ANSYS、UDEEC等的推广,使该方法在软岩巷道支护设计中得到更加广泛的应用^[80-91]。

自从20世纪80年代末,国家对煤炭行业越来越关注,加上对深部软岩巷道支护理论及技术进一步的研究,使我国深部软岩巷道支护研究进入了一个崭新阶段。这期间主要支护理论有^[92]:

(1) 由于学馥等(1981年)提出的“轴变理论”和“开挖控制理论”^[93]认为:巷道围岩破坏是由于应力超过岩体强度极限所致,垮落改变了巷道的轴比,导致应力重新分布,高应力下降低应力上升,直到自稳平衡,应力均匀分布的轴比是巷道最稳定的轴比,其形状为椭圆形。而开挖系统控制理论认为是开挖扰动了岩体的平衡,这个不平衡系统具有自组织功能,可以自行稳定。

(2) 由冯豫、陆家梁、郑雨天、朱效嘉等在总结新奥法支护的基础上,又提出了“联合支护技术”^[94,95]理论,并认为该理论对于软岩巷道支护,要“先柔后刚、先挖后让、柔让适度、稳定支护”,并由此发展起来了锚喷网技术、锚喷网架支护技术、锚带网架和锚带喷架等联合支护技术。

(3) 以郑雨天教授、孙钧教授和朱效嘉教授为代表的学者提出了“锚喷—弧板支护理论”^[96],该理论认为:对软岩总是放压是不行的,放压到一定程度要坚决顶住,即联合支护理论的先柔后刚的刚性支护形式为“钢筋混凝土弧板”,要坚决限制和顶住围岩向中空位移。

(4) 由董方庭教授等提出的围岩松动圈理论^[97],其基本观点是:凡是裸体巷道,其围岩松动圈都接近于零,此时巷道围岩的弹塑性变形虽然存在,但并不需要支护,松动圈越大,收敛变形越大,支护越困难。因此,支护的目的在于防止围岩松动圈发展过程中的有害变形。

(5) 由何满潮教授提出的关键部位耦合组合支护理论^[98,99]认为:巷道支护破坏大多数是由于支护体与围岩体在强度、刚度和结构等方面存在不耦合造成的,要采取适当的支护转化技术,使其相互耦合,复杂巷道支护要分为两次支护,第一次是柔性的面支护,第二次是关键部位的点支护。

(6) 煤炭科学研究总院开采研究所的康红普^[100]研究员提出了关键承载层(圈)理论。该理论认为巷道稳定性取决于承受较大切向应力的岩层或承载层(圈)。承载层(圈)的稳定与否就决定了巷道的稳定性。因此,该承载层(圈)为关键承载层(圈)。巷道支护目的就在于维护关键承载层(圈)的稳定,只要关键承载层(圈)不发生破坏,保持稳定,则承载圈以内的岩层将保持稳定。

1.5 大断面软岩巷道支护技术研究现状

1.5.1 锚杆支护技术研究现状

我国从20世纪80年代开始重点研究煤巷锚杆支护,并在锚杆支护理论方面取得了许

多可喜的研究成果。锚杆支护以其优良的支护性能、低廉的支护成本等特性成为煤矿巷道最主要的支护形式,并广泛应用于各类岩土工程的支护中^[101-110]。

陆士良等^[111]深入研究锚杆锚固力作用机理后认为,巷道开挖后围岩发生弹塑性变形,锚杆由围岩的峰后剪胀变形产生锚杆的锚固力,随着剪胀变形的继续产生,锚杆将对围岩产生切向和径向两个方向上的支护阻力,在这两个方向的支护力作用下,使得围岩在较高的应力状态下获得平衡稳定。

李大伟等^[112,113]从巷道围岩发生应变软化和弹塑性力学计算出发,引入软化模量和非关联流动法则,建立了在围岩锚固体的黏结力和内摩擦角不变的情况下的锚杆支护对围岩的稳定作用的弹塑性力学模型,得到了锚杆不同支护强度下的围岩应力分布、巷道变形量、围岩应变软化区和破碎区半径的理论计算公式。

姚振华等^[114]在前人研究的基础上,运用理论分析的方法对黏结锚杆作用力的发生机理、分布规律及锚固体对岩体作用的力学效应进行了探讨。朱浮声等^[115-118]将锚杆加固作用等效于改善围岩力学参数,利用锚固体—围岩相互作用解析解,得出了锚杆加固岩体的等效力学参数解析表达式。

杨双锁、康立勋等^[119]运用理论分析及数值计算的方法对锚杆作用力的产生机理、分布规律及锚杆对岩体力学作用进行了研究。结果表明,锚固力是由锚杆与围岩间的相对位移或相对位移趋势所产生;从力学角度考虑,端部锚固和全长充填的支护方式是理想的锚固方式,这两种方式都能极大地改善岩体应力状态的轴向作用和控制围岩剪胀变形的横向作用。

马全礼等^[120]对锚杆支护对围岩碎裂区的作用及围岩稳定性进行探讨。得出锚杆通过对锚固区域提供径向力,恢复碎裂区围岩原始强度,阻止了碎裂区的快速发展并维持破碎区围岩较高的残余强度,并得到锚杆支护的支护强度计算公式。

马刚等^[121]通过对颗粒的物理力学性质及细观损伤软化模型研究,采用细观数值模拟的方法研究在散粒体围岩中加不同密度的锚杆时锚杆加固的作用机制。研究表明:锚杆加固的作用机制为使颗粒体与锚固体紧密接触、相互咬合形成摩擦阻力,承托结构(如托盘)提供对颗粒体的径向力,锚杆与其周围的围岩颗粒形成锚固区,从而得出锚杆加固能提高散粒体的物理力学性质。

许国安等^[122,123]在真三轴试验台上,通过对相似模型模拟巷道开挖后施加支护阻力,研究深部巷道掘进与支护过程中围岩中应力场和位移场的演化过程。研究不同的支护阻力与巷道围岩稳定性关系,研究得出支护阻力能延缓和减少深部巷道围岩的中裂纹的产生、扩展与贯通,同时防止已破碎围岩冒落,有利于围岩中破碎岩块相互挤压形成稳定的承载结构,从而提高巷道围岩的稳定。同时得出在均布支护阻力作用下巷道围岩中存在薄弱的“关键部位”,应该加强支护防止该部位的破坏导致围岩的整体失稳。

马念杰等^[124,125]提出了基于地应力的锚杆支护设计方法,该方法以现场实测的地质力学参数为依据,利用有限差分软件 FLAC 进行数值模拟计算,通过巷道围岩的应力分布、位移变形曲线和塑性区分布规律,得出合理支护方案及最优支护参数。并建立围岩稳定性评估系统,将井下监测数据输入评估模块可判断出围岩的稳定性等级和需采取的加固措施。

康红普^[126]通过采用拉格朗日有限差分软件 FLAC 分析了不同预应力的锚杆、锚索产生的应力场分布规律,以及钢带的作用。提出锚杆主动支护系数、强度利用率、预应力长度系数、预应力扩散率、有效压应力区、临界支护刚度和有效压应力区骨架网状结构。

何富连^[127]针对厚泥岩顶板巷道在掘进初始阶段出现的顶板严重下沉和局部冒顶问题,分析巷道冒顶垮落的影响因素,提出采用高预始应力桁架锚索、单体锚杆(索)双支护技术。

刘波涛^[128]通过研究深部巷道中锚杆、锚索大面积破断机理,研制出锚杆、锚索让压装置。让压装置中的预留压缩量可用于补偿围岩变形,避免了锚杆(特别是锚索)破断,同时实现高阻力让压,阻止围岩进一步变形。

郭志飏等^[129]利用理论分析和数值模拟相结合分析了锚网索—桁架耦合支护的力学机理。张益东等^[130]分析了桁架锚杆和普通锚杆的不同支护机理,阐明两种不同的支护形式对巷道顶板的支护作用。

1.5.2 锚索支护研究现状

英国、美国、澳大利亚等采矿技术比较发达的国家近年来尤为注重锚索技术的应用和发展,为了在围岩条件较差的情况下提高支护强度和支护效果,工程实践中更多采用锚索作为加强支护^[131-136]。在交岔点、破碎带、断层带和采动影响剧烈、较难支护的巷道中,也普遍采用锚索作为补强支护^[137]。

我国的锚索加固技术应用始于 20 世纪 60 年代。锚索+喷浆技术目前已经成为我国煤矿巷道采用的主要支护技术之一^[138-145]。

在软岩非线性大变形设计理论的基础上^[146],何满潮教授和孙晓明博士提出了锚网索耦合支护技术^[147-150],该技术认为:围岩破坏的根本原因是支护体力学特性与围岩力学特性不耦合,并且首先从某一关键部位开始破坏,进而导致整个支护系统的失稳,耦合支护就是通过限制围岩产生有害的变形损伤,实现支护一体化、荷载均匀化。

陆家梁教授等提出联合支护技术^[151-154],认为巷道支护必须采用先柔后刚、先抗后让、柔让适度、稳定支护的原则,并由此发展了锚网索+钢架等联合支护技术。该技术的特点是钢架支护直接与围岩间紧密接触,没有预留变形空间。这种联合支护技术在煤巷、综采切眼、大断面硐室和交岔点支护中得到应用,并取得了一定的效果。

锚喷技术和锚注技术已经逐步成为我国煤矿巷道支护的主要形式。在锚喷支护基础上,通过锚注技术加固围岩,提高再生围岩岩体弹性模量以使极不稳定围岩巷道保持稳定。锚注技术由于工艺简单、成本低、支护可靠性高而被广泛应用。现在不仅用于岩巷硐室,而且用于煤巷;不仅用于新掘巷道,而且广泛用于地下工程维修;不仅用于静压巷道,而且也用于动压巷道,是目前处理大断面软岩等不稳定巷道支护优先选择的支护技术。

1.6 研究内容

本书针对大断面巷道施工过程中软弱围岩、巷道多岩层穿层构造复杂等不利因素造成的巷道围岩变形破坏严重、支护控制困难、修复加固效果不佳等问题,以软岩大巷围岩为研究对象,综合运用理论分析、实验室试验、数值仿真模拟和现场试验等方法,研究软岩巷道围岩破坏特征及变形机理、大断面软岩巷道加固控制机理、软岩巷道围岩位移场、应力场及破坏场的演化规律,研发复杂软岩大巷变形控制与支护加固技术,主要研究内容如下:

(1) 软岩大巷围岩破坏特征及变形机理分析

依据智能钻孔成像仪现场探测结果,结合理论分析,研究受复杂地质因素影响下软岩大

巷围岩破坏特征,特别是围岩深部破坏特征,分析软岩大巷围岩破坏变形机理。

(2) 大断面软岩巷道加固控制机理分析

根据深部软岩特点,分析深部软岩巷道的应力环境,揭示深部“三高一扰动”对软岩巷道稳定性的影响规律,研究大断面软岩巷道围岩锚注加固控制机理和底板超挖锚注回填卸固耦合作用机理,为大断面软岩巷道围岩加固控制技术提供理论依据。

(3) 复杂条件下大断面软岩巷道矿压规律数值模拟研究

基于实验室岩石力学试验结果,建立大断面软岩巷道三维 FLAC 数值计算模型,模拟研究巷道掘进及修复过程中受复杂地质影响围岩位移场、应力场及破坏场演化规律,研究分析复杂条件下大断面软岩巷道围岩变形特征,揭示巷道围岩加固控制的关键。

(4) 大断面软岩巷道支护控制技术及现场工业性试验

根据大断面软岩巷道围岩矿压显现规律、变形特征与大断面软岩巷道加固控制机理,研发大断面软岩巷道围岩支护加固技术与巷道底鼓预防控制技术,并在现场根据具体条件进行支护设计和工业性试验研究,然后依据现场应用结果进行总结优化,最终形成大断面软岩巷道支护控制体系。

2 大断面软岩巷道破坏与加固机理

2.1 软岩的特点与工程分类

2.1.1 软岩的概念

软岩也称松软岩层,不仅是指岩体松软,而且指岩体不稳定或极不稳定。软岩是我国煤炭系统的习惯用语,而我国冶金系统一般称为不良围岩,国外一般称不稳定、极不稳定围岩,或困难岩层。至今,岩石工程学界就软岩的概念仍未达成共识,根据不同角度,可将软岩分为以上三类。

2.1.1.1 描述性定义

- (1) 松软岩层是指松散、软弱的岩层,它是相对坚硬岩层而言的,自身强度很低;
- (2) 软岩是软弱、破碎、松散、膨胀、流变、强风化及高应力的岩体的总称;
- (3) 松软、破碎、膨胀及风化等岩层称为松软岩层,简称软岩。

2.1.1.2 指标化定义

- (1) 抗压强度 $\sigma_c < 20 \text{ MPa}$ 的岩层称为软岩;
- (2) $\sigma_c / \gamma h < 2$ 的岩层称为软岩。

2.1.1.3 工程定义

- (1) 松动圈大于 1.5 m 的巷道围岩称为软岩。
- (2) 岩石性质与其所处力学状态有关,当围岩所受荷载水平低于软化临界荷载时,属于硬岩范畴;而当荷载水平高于软化临界荷载时,围岩表现出大变形形态,此时该围岩称为软岩。
- (3) 采用传统支护(锚喷、砌碇、各类金属支架)不能使巷道保持稳定的围岩为软岩。

2.1.2 软岩的属性

2.1.2.1 软岩的一般属性

- (1) 软弱:一般指普氏系数 $f < 3$ 的岩石,抗压强度 1~5 MPa。
- (2) 松散破碎:胶结程度差,裂隙聚集,孔隙率 $> 30\%$ 。
- (3) 遇水崩解、泥化:遇水几分钟或几小时内崩解泥化。

2.1.2.2 软岩的特有属性

- (1) 强膨胀:蒙脱石含量,特别是纳蒙脱石含量大于 15%,自由膨胀率 $> 30\%$ 。
- (2) 强流变:围岩点荷载强度 $R < 1 \text{ MPa}$,软弱致密极易流变;大位移两帮水平位移