

国家自然科学基金资助项目 (51704280, 51574223, 51579239, 51474095, 51674154)

中国博士后科学基金资助项目 (2017T100420, 2015M580493, 2017T100491, 2016M602144)

极弱胶结岩体结构 与 力学特性及本构模型研究

孟庆彬 韩立军 王琦 蔚立元 王红英 江贝 著



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

资助项目(51704280,51574223,51579239,51474095,51674154)

资助项目(2017T100420,2015M580493,2017T100491,2016M602144)

极弱胶结岩体结构与力学特性及 本构模型研究

孟庆彬 韩立军 王 琦 著
蔚立元 王红英 江 贝



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书在广泛调研冲击地压现象的基础上,结合同煤集团忻州窑矿厚层坚硬煤系地层的地质条件,综合运用统计调研、力学实验、正交试验、数值模拟、理论分析等方法,研究了地质赋存条件与冲击地压的相关性、基于真实地层厚度比的组合煤岩体变形破坏特性、厚层坚硬地层冲击地压致灾机理、基于地质赋存条件与采动因素的冲击危险性评价方法、厚层坚硬地层条件下的冲击地压防治技术等内容,研究结果具有前瞻性、先进性和实用性。

本书可供从事采矿工程及相关专业的科研人员及工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

极弱胶结岩体结构与力学特性及本构模型研究/孟庆彬等著. —徐州:中国矿业大学出版社,
2018.8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 4106 - 1

I. ①极… II. ①孟… III. ①胶结结构—岩石力学—研究 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 201693 号

书 名 极弱胶结岩体结构与力学特性及本构模型研究
著 者 孟庆彬 韩立军 王 琦 蔚立元 王红英 江 贝
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 11 字数 280 千字
版次印次 2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷
定 价 42.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着国民经济建设的快速发展,对煤炭资源的需求量急剧增加,我国中东部地区浅部煤炭资源基本趋于枯竭,矿井开采逐渐由浅部向深部延伸和向内蒙古、新疆、宁夏等煤炭资源丰富的西部矿区发展。由于我国西部地区特殊的成岩环境和沉积过程,造成西部矿区广泛分布着中生代侏罗系、白垩系极弱胶结地层,其成岩时间晚、胶结差、强度低、易风化、遇水泥化崩解,是一类特殊软岩。由于极弱胶结地层的特殊性,呈现出“煤层顶底板岩层强度低于煤层强度”的现象,而且岩石中含有蒙脱石、伊利石、高岭石等黏土矿物,遇水后泥化、崩解,具有一定的膨胀性,造成巷道围岩自承载能力极低、自稳能力差、自稳时间短。由于极弱胶结岩体结构性较差,无法实施有效的锚杆、锚索等主动支护方式;巷道开挖后易出现大变形、强底鼓、冒顶等工程灾害问题,严重影响了矿井建设与安全高效生产。

目前,由于在极弱胶结岩体的研究中存在一系列的难题,造成对极弱胶结岩体的基本物理力学性质试验及本构模型的相关研究涉及甚少。随着西部矿井的大规模建设,极弱胶结地层巷道围岩控制问题逐渐突出,亟需开展极弱胶结岩体的物理力学性质试验与本构模型方面的研究,对我国西部矿区的建设与安全生产具有重要现实意义和工程应用价值。本书以极弱胶结岩体为研究对象,综合运用室内试验、理论分析、数值模拟等技术手段,研究了不同应力状态及含水率条件下极弱胶结岩体的物理与力学特性(第2章),再现了极弱胶结岩体再生结构的形成过程(第3章),构建了极弱胶结岩体扩容大变形本构模型和分析了极弱胶结岩体扩容大变形破坏机理(第4章),揭示了极弱胶结地层巷道围岩位移、塑性区与应力分布的演化规律(第5章),提出了极弱胶结地层巷道围岩控制技术(第6章)。

本书的部分内容是在国家自然科学基金资助项目(51704280,51574223,51579239,51474095,51674154)和中国博士后科学基金资助项目(2017T100420,2015M580493,2017T100491,2016M602144)资助下完成的,在撰写本书过程中参阅了大量国内外的有关文献,在此谨向参考文献的作者表示感谢。同时,出版社编辑在本书编辑和校核中付出了辛勤工作,课题组的部分研究生在实验室试验、现场实测等方面做了大量工作,在此一并表示衷心的感谢。感谢山东科技大学大学乔卫国教授、林登阁教授对本书的审阅与建议,使本书得以高质量出版。

作 者

2019年5月

目 录	
1 绪论	1
1.1 问题的提出与研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 研究内容、方法及技术路线	7
2 极弱胶结岩体基本物理与力学性质试验研究	10
2.1 极弱胶结岩体基本物理性质	10
2.2 极弱胶结岩体基本力学性质	14
2.3 本章小结	21
3 极弱胶结岩体再生结构的形成与力学性质试验研究	22
3.1 极弱胶结岩体再生结构形成试验装置研制	22
3.2 极弱胶结岩体再生结构形成试验研究	32
3.3 极弱胶结再生结构岩体力学性质试验研究	43
3.4 本章小结	73
4 极弱胶结岩体本构模型与参数辨识研究	75
4.1 极弱胶结岩体变形破坏机理分析	75
4.2 极弱胶结岩体本构模型与参数辨识研究	81
4.3 极弱胶结岩体本构模型的数值实现	98
4.4 本章小结	115
5 极弱胶结地层巷道围岩演化规律研究	116
5.1 极弱胶结地层巷道围岩演化规律数值模拟研究	116
5.2 考虑岩体应变软化与扩容特性的围岩弹塑性分析	125
5.3 围岩塑性区及位移的理论解答与数值计算对比分析	132
5.4 本章小结	133
6 工程实例	135
6.1 极弱胶结地层回采巷道断面优化研究	135
6.2 极弱胶结地层回采巷道支护方案优化研究	137
6.3 极弱胶结地层回采巷道围岩变形与支护结构受力监测分析	141

6.4	极弱胶结地层煤巷锚网索耦合支护效应研究	145
6.5	极弱胶结地层开拓巷道支护技术研究	152
6.6	本章小结	158
参考文献		159

1 绪 论

1.1 问题的提出与研究意义

煤炭、石油、天然气是世界经济运行的三大主要支柱能源,煤炭在世界一次能源消费中约占 26.5%^[1]。我国是世界上的煤炭存储、生产与消费大国,煤炭是我国的主要能源,在一次能源的构成中约占 70%以上^[2]。我国煤炭资源分布极为不均衡,总体分布的特点为“西多东少、北丰南贫、相对集中”^[3-4]。在我国煤炭资源查明储量中^[5],西部地区煤炭资源约占 69%,中部地区煤炭资源约占 25%,东部地区煤炭资源约占 4%,东北地区煤炭资源约占 2%。根据我国煤炭资源预测结果统计表明^[6],内蒙古煤炭资源约有 12 250.43 亿 t,约占全国煤炭资源的 26.92%;根据资源的地质时代预测结果统计表明^[7],埋藏深度 2 000 m 以上,侏罗纪煤炭资源约占 65.5%,白垩纪煤炭资源约占 5.5%;埋藏深度 1 000 m 以上,侏罗纪煤炭资源约占 62.9%,白垩纪煤炭资源约占 11.4%。蒙东地区(主要包括锡林郭勒、呼伦贝尔、赤峰、兴安、通辽)有着丰富的煤炭资源,主要由扎赉诺尔、宝日希勒、白音华、五间房、霍林河、元宝山、大雁等 16 个大中型矿区组成,是我国 13 个大型煤炭基地之一^[8];蒙东地区煤炭资源的远景储量达 2 217.5 亿 t,煤炭资源保有储量 1 174.6 亿 t,约占内蒙古煤炭储量的 18.1%,约占全国煤炭资源的 4.87%^[9]。

随着国民经济建设的快速发展,对煤炭资源的需求量急剧增加,我国中东部地区浅部煤炭资源基本趋于枯竭,矿井开采逐渐由浅部向深部延伸^[10-12]和向内蒙古、新疆、宁夏等煤炭资源丰富的西部矿区发展^[13-15]。由于我国西部地区特殊的成岩环境和沉积过程,造成西部矿区广泛分布着中生代侏罗系、白垩系极弱胶结地层,其成岩时间晚、胶结差、强度低、易风化、遇水泥化崩解,是一类特殊软岩^[13-15]。由于极弱胶结地层的特殊性,呈现出“煤层顶底板岩层强度低于煤层强度”的现象,而且岩石中含有蒙脱石、伊利石、高岭石等黏土矿物,遇水后泥化、崩解,具有一定的膨胀性^[16],造成巷道围岩自承载能力极低、自稳能力差、自稳时间短。由于极弱胶结岩体结构性较差,无法实施有效的锚杆、锚索等主动支护方式;巷道开挖后易出现大变形、强底鼓、冒顶等工程灾害问题,严重影响了矿井建设与安全高效生产。

对于极弱胶结岩体中矿山巷道支护难点包括^[15]:第一,由于岩体组成为泥质胶结,其胶结性极弱或未胶结,导致岩体的内摩擦角和内聚力较低,造成锚杆与锚索锚固力低,锚固不可靠,极易脱锚;第二,极弱胶结岩体的原生裂隙或节理不发育,普通水泥浆液难以注入岩体内微小裂隙,造成注浆加固围岩效果较差;第三,地下水与施工扰动对围岩及支护结构损伤影响程度较大,导致支护失效,极不利于巷道围岩与支护结构的稳定及安全;第四,采用型钢支架、钢筋混凝土等被动支护结构,造成支护成本过高;第五,极弱胶结地层巷道变形破坏特点与普通软岩巷道有所不同,目前未能揭示其变形破坏机理,导致支护设计缺乏可靠理论依

据;第六,对极弱胶结地层巷道稳定控制技术研究不完善,未能形成支护理论与成套技术,处于不断试验与探索状态。

在试验与理论研究方面难点包括^[15]:第一,极弱胶结岩体具有岩石的基本特点,其裂隙、节理不发育,在干燥或天然状态下属于岩石,但其遇水后易泥化崩解,并随着含水率的增加有逐渐向土体性质转化的趋势,在饱和状态下甚至可具有黏土特性,其物理力学性质介于软岩与硬土之间,是一种过渡性特殊岩土介质,目前对其取样、制作与试验方法还没有标准和规范可循;第二,由于其胶结程度差、强度低,无法制作标准试样,难以进行岩石的加卸载等相关试验,缺乏相应的试验方法,造成了极弱胶结岩体试验研究成果极少;第三,由于极弱胶结岩体物理与力学性质易变化,造成其本构关系复杂化,且缺乏相应的试验研究成果及全过程特性研究,目前尚未开展反映其本构特性方面的研究;第四,未认识到极弱胶结岩体的结构重组特性,未进行破碎岩体结构重组试验研究。

目前,国内外学者主要针对软岩巷道岩体力学性质^[10,17-19]、软岩巷道围岩变形破坏特点与机理^[20-22]、软岩巷道围岩控制理论与技术^[23-25]等方面进行了大量的科学研究及工业性试验,而对极弱胶结岩体的相关研究涉及甚少。故以开发我国西部煤矿资源为契机,以极弱胶结岩体为研究对象,基于理论分析与试验研究,揭示极弱胶结岩体物理与力学性质及围岩再生结构形成过程,建立反映极弱胶结岩体特殊属性的本构模型,并进行二次开发与数值实现,揭示极弱胶结地层巷道围岩位移、塑性区与应力分布的演化规律,进而研究极弱胶结地层巷道围岩变形破坏机理,为极弱胶结地层巷道围岩控制提供理论依据,对我国西部矿区建设与煤炭资源开采具有重要的现实意义和工程应用价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 软岩力学理论与试验研究

1.2.1.1 软岩物理特性理论与试验研究

软岩的主要矿物成分是蒙脱石、伊利石、高岭石等黏土矿物,其次是石英、长石、云母等碎屑矿物,还有一些钙、铁质胶结物或游离氧化物。并且黏土矿物的成分及含量不同,会引起岩石的结构、构造、物理力学性质、水理性质也不相同^[26-28]。何满潮等^[28]采用X射线衍射仪、偏光显微镜和扫描电镜对新生代、中生代及古生代软岩的黏土矿物成分与微观结构特征进行了分析,并对其物理、水理及力学性质进行了试验研究,揭示了不同地质时代煤矿软岩的物理特性与力学性质。彭向峰等^[29]研究了淮南、沈北、舒兰、内蒙古、龙口、唐山等矿区软岩物理力学与水理性质、物质组成与结构,指出了软岩的特殊物质组成和结构是其工程性质差的根本性原因,其中蒙脱石是造成软岩性质差的主要矿物成分。周翠英、朱凤贤等^[30-32]通过扫描电镜、偏光显微镜、能谱分析、X射线衍射及物理力学试验等技术手段测定分析了泥岩、炭质泥岩等软岩的微观结构、矿物成分、物理力学性质、水溶液的化学成分及其随时间的变化特点,揭示了软岩软化的动态变化规律,初步建立了软岩耗散结构形成的分岔演化模型。钱自卫等^[33]通过水理性质、X射线衍射及电镜扫描试验等,对深部煤系地层软岩遇水崩解的宏观特征及微观机理进行了分析研究。黄宏伟等^[34]通过扫描电镜、X射线衍射仪对华北中生代泥岩的微观结构与物质组成进行分析,揭示了泥岩遇水软化过程中微观结构随时间变化的动态特征。

表 1-1

软岩物理与力学一般特征^[79]

地质时代	地质力学参数						
	抗压强度/MPa	液限/%	塑限/%	干燥饱和吸水率%	黏土矿物	亲水性	膨胀性
古生代	>20	<25	<15	<50	高岭石为主, 少量伊利石	弱亲水	弱膨胀
中生代	10~20	25~50	15~30	50~90	伊蒙混层为 主,少量伊利石	亲水	中膨胀
新生代	1~10	> 50	>30	> 90	蒙脱石为主, 少量伊蒙混层	强亲水	强膨胀

1.2.1.2 软岩强度与变形特性试验研究

岩石是一种天然的地质材料,其内部包含各种节理、裂隙和微缺陷,是一种各向异性、非线性、非连续的具有初始损伤的材料介质。由于受试验设备及监测技术的制约,要全面客观地掌握岩石类材料的物理力学性质较为困难^[35]。岩石力学试验是确定岩石基本力学性质的基础方法,是揭示岩石类材料强度与变形特性的重要手段。

李杭州、廖红建等^[36-37]对强风化膨胀性泥岩进行了固结不排水剪切试验,揭示了泥岩的应力—应变曲线呈现应变软化特征,且膨胀性泥岩的应变软化特征并未随围压的增大而减弱。许兴亮等^[38]采用 MTS 815.02S 型电液伺服岩石力学试验系统研究了煤系地层泥岩典型应力阶段岩体遇水后强度弱化规律。吴益平等^[39]采用岩石刚性试验机对泥质粉砂岩进行了单轴与三轴压缩试验,获得了全应力—应变曲线,并对曲线阶段进行了划分。孙强、杨志强等^[40-42]对软岩进行了峰后软岩渗透特性试验,获得了饱和前后软岩各向异性力学特征。李海波等^[43]对软岩进行了动态单轴压缩试验,揭示了岩样的变形参数(弹性模量、泊松比)及抗压强度随应变速率的变化规律。乔卫国、韩立军等^[44-46]对山东济北矿区和巨野矿区、内蒙古上海庙矿区与五间房矿区的软岩在分析矿物成分的基础上,采用 TATW—2000 型岩石三轴试验系统和液压式材料试验机进行了单轴与三轴试验,获得了这些矿区软岩物理力学参数与破坏模式等。

1.2.1.3 软岩流变特性理论与试验研究

流变性是岩石类材料重要的变形与力学特性,软岩的流变性极为显著^[47]。流变试验可揭示在不同应力与环境条件下岩石的流变力学性质,可为岩石流变本构模型的构建及地下工程稳定性分析奠定基础。

国外的岩石流变力学性质试验研究可以追溯到 20 世纪 30 年代末,至今已取得了较多的研究成果^[48-51],Griggs、E. Maranini、M. Brignoli、Y. Fujii、Okubo、Malan、Maranon、Vouille 等在单轴压缩或三轴压剪蠕变试验基础上探讨了岩石蠕变的本构方程。我国的岩石流变研究始于 20 世纪 50 年代,孙钧等^[52-53]长期从事岩石流变力学研究,在岩石的流变特性、本构模型与参数辨识等方面均取得了较多研究成果。张向东等^[54]采用自行研制的重力杠杆式岩石蠕变试验机进行了软岩三轴压缩蠕变试验,揭示了泥岩的蠕变特性,建立了非线性蠕变本构方程。赵延林等^[55]采用 RYL—600 微机控制岩石剪切流变仪对节理软岩进行了分级加载蠕变试验,揭示了软岩的剪切流变特征。范秋雁等^[56]开展了单轴蠕变试验研究泥岩的蠕变特性,分析了在蠕变过程中泥岩细微观结构的变化特征。刘保国等^[57]采用自主

研制的五联单轴蠕变仪对泥岩进行了 8 个不同应力水平、3 个不同时间段的蠕变试验,根据蠕变损伤试验结果建立了泥岩力学参数损伤函数。万玲等^[58]利用自行研制的岩石三轴蠕变仪进行了软岩蠕变试验,揭示了围压对蠕变的影响规律。李亚丽、张志沛等^[59-60]采用 RLJW—2000 岩石流变伺服仪对饱和粉砂质泥岩和泥岩进行了三轴压缩蠕变试验,揭示了软岩的蠕变特性。刘传孝等^[61]采用 SAW—2000 型微机控制电液伺服岩石三轴压力试验机及分级加卸载方式对深井泥岩试件进行峰前与峰后单轴短时蠕变试验,得到了差异性蠕变试验曲线。胡斌、陈小婷、李男等^[62-64]利用岩石剪切流变仪进行了剪切流变试验,对在剪切变形过程中的流变特征进行了深入研究。高延法等^[65]研制了岩石流变扰动效应试验仪,进行了岩石流变及其扰动效应试验,建立了不同蠕变阶段的岩石本构方程。

1.2.1.4 软岩细观力学试验研究

细观力学是从细观与微观尺度研究材料内部结构缺陷的几何表征及演化规律的新兴力学,有光、声、射线、热像等分析技术,可利用细观力学试验方法分析软岩的黏土矿物成分、细观结构、结晶体形貌及裂纹扩展等特征。

Komine^[66]通过 SEM 发现了软岩内部存在大小不同、形状各异的微孔隙和微裂隙,并分析了软岩膨胀的微观结构机理;Arnould^[67]提出了泥岩中存在不连续网络,并从矿物成分及微观结构等方面分析了泥岩易泥化崩解的原因;Risnes^[68]研究了水的弱化和活动性对软岩微结构变化的影响规律。何满潮等^[28]采用偏光显微镜和扫描电镜对黏土矿物的微观结构特征进行了分析,确定了高岭石、蒙脱石及伊利石的单体与集合体形态。周翠英等^[69]通过扫描电镜、偏光显微镜、能谱分析、X 射线衍射等方法测定了泥岩、炭质泥岩等岩石的微观结构,探讨了软岩软化的微观机制。杨春和等^[70]采用扫描电镜、偏光显微镜及 X 射线衍射等方法测定了板岩浸水过程中的吸水率、润湿角、矿物颗粒微观结构、孔隙度的变化等,探讨了板岩遇水软化的微观结构变化规律。朱建明等^[71]采用扫描电镜对小官庄铁矿软岩进行了物化试验,全面分析了软岩的微观特性。刘镇等^[72]在分析粉砂质泥岩饱水软化过程微观结构变化规律的基础上,构建了软岩浸水软化过程微观结构演化规律的单元重整化模型。

数字图像处理技术可对材料的细观空间结构及几何形态进行量化描述,已在金属材料、混凝土及岩土体的细观结构定量分析中得到应用^[73-74]。PAN 等^[75]采用白光数字散斑相关方法研究了煤岩变形局部化特征,为研究岩石类材料非均匀变形的演化过程提供了新思路。潘一山等^[76]采用白光数字散斑相关方法研究了岩石的变形局部化,通过试验测定了煤岩变形局部化的开始时刻、演化过程及局部化带的宽度;马少鹏等^[77]将数字散斑相关方法应用到花岗岩的单轴压缩试验中;李元海等^[78]研制了岩土工程数字照相量测系统,为钢筋混凝土与岩土体等材料变形破坏的全程观测、演化过程及局部化分析提供了技术支持。

CT 技术可定量及无损量测材料在受力过程中内部结构的动态变化过程,且 CT 数包含着材料变形、损伤、断裂与破坏等重要信息。国外 W. F. Brace、T. N. Dey 等^[79-81]采用 CT 技术研究了裂隙的初始扩展及次生裂纹的演化规律;杨更社等^[82]基于 CT 图像处理技术研究了岩石损伤特性;尹光志等^[83]基于 CT 试验研究了煤岩单轴压缩破坏的分叉与混沌特性;党发宁等^[84]基于 CT 试验研究了岩体分区破损本构模型;李廷春等^[85-86]进行了单轴压缩作用下内置裂隙扩展的 CT 扫描试验;葛修润、任建喜等^[87-89]采用 CT 技术揭示了岩石变形破坏全过程的细观损伤扩展规律,并对岩石蠕变损伤演化特性进行了探索。

声发射技术也是研究岩石力学性质的一种有效方法,通过对加卸载试验过程中岩石声

发射信号的采集与分析,可反映岩石内部形态的演化规律。L. Obert、W. I. Duvall^[90]最早发现了岩石在压力作用下存在声发射现象;T. Hirata^[91]提出了岩石破坏前声发射满足幂律的分布规律;Holcomb、Costin^[92]利用声发射技术探测脆性材料的损伤演化等;Mansurov^[93]将声发射技术用于测量岩石破坏过程的信息,预测岩石的破坏模式。吴刚等^[94]通过对加卸载试验岩石声发射现象变化对比分析,探讨了岩石变形破坏过程中的声发射特征。张茹等^[95]在单轴多级加载条件下,进行花岗岩破坏全过程的声发射试验研究,获得了应力—应变与声发射参数的关系。包春燕等^[96]用单轴循环加卸载来模拟交通荷载,进行了加卸载过程的声发射特性研究。李庶林等^[97]进行了岩石单轴压缩变形破坏全过程声发射试验,揭示了岩石的力学与声发射特征。陈宇龙等^[98]利用 MTS 岩石力学试验系统和 PAC 声发射信号采集系统,研究了砂岩在单轴压缩条件下应力—应变全过程的声发射特征及加载速率的影响。赵兴东等^[99]应用声发射及其定位技术,研究了不同加载方式(单轴加载、巴西劈裂及三点弯曲)、不同尺寸岩石及不同岩样的破裂失稳过程。

上述文献重点对软岩物理特性、强度与变形特性、流变特性及细观结构进行了试验研究与分析,取得了一系列研究成果。由于在极弱胶结岩体的研究中存在一系列的难题,造成对极弱胶结岩体的基本物理与力学性质试验的相关研究涉及甚少,目前尚未开展极弱胶结岩体的基础试验研究。

1.2.2 软岩本构模型研究

岩土体的本构关系反映了岩土体材料变形的特性,是在整理分析试验数据的基础上得出的应力—应变关系。岩土体本构模型是用数学方法来体现试验中所揭示的变形特性,合理的本构模型是进行数值分析获得可靠结果的重要保障之一。岩石的本构关系一直是受到广泛关注的基础性研究课题^[100],本构模型总体上可分为细观本构模型与宏观本构模型两大类,包括弹性、弹塑性、流变、断裂与损伤及组合本构模型等^[101-104]。

软岩本构关系的研究一直是受到广泛关注的研究课题。廖红建等^[105]基于应变空间的弹塑性理论,采用 Mises 剪切屈服准则及相关联流动法则,建立了三维弹塑性本构模型。宋丽等^[106-107]考虑了材料拉压不等及中间主应力的影响,建立了应变空间表述的弹塑性本构关系式,获得了软岩三维统一弹黏塑性本构模型。李杭州等^[108]基于统一强度理论,构建了软岩损伤统计本构模型。蒋维等^[109]基于 Mohr-Coulomb 准则,考虑岩石微元强度服从随机分布的特点,建立了岩石损伤本构模型。贾善坡等^[110]将损伤变量引入到修正的 Mohr-Coulomb 准则中,通过构建损伤势函数,推导了泥岩损伤演化本构方程。

岩石是一种具有复杂力学性质的材料,尤其是软弱岩石在应力达到峰值强度之后,将产生“应变软化”现象。Hoek、Brown^[111]指出了岩石的应力—应变曲线基本为应变软化模式;P. Zdenek、F. Bazant^[112]提出了指数形式的塑性应变软化模型,建立了等效应力与等效塑性应变之间的关系。李晓等^[113]提出“数据本构”的概念,建立了一种由幂函数与指数函数相结合形式的岩石塑性软化模型。杨超等^[114]采用黏聚力与内摩擦角等效数值和曲线拟合的方法,研究了围压对软岩峰后软化特性的影响。李文婷等^[115]基于 Mohr-Coulomb 强度准则,将弹性模量定义为主应变的函数,建立了岩体峰后非线性应力—应变关系。陆银龙等^[116]基于峰后岩石破坏满足 Mohr-Coulomb 极限破坏条件的假设,建立了采用广义岩石强度参数(黏聚力与内摩擦角)来表征软岩后继屈服面模型。张春会等^[117]采用岩石峰后强度下降指数函数,定量地描述围压对峰后残余强度及割线模量的影响规律,建立了考虑围压影

响的岩石峰后应变软化本构模型。曹文贵等^[118]引入统计损伤变量,建立了裂隙岩体应变软化损伤统计本构模型。张强等^[119]基于弹脆塑性模型有闭合解的特点,建立了多阶脆塑性逼近形式的应变软化力学模型。

国内外学者在岩体流变本构模型研究方面已取得了大量成果,包括经验流变本构模型、黏弹塑性本构模型、损伤流变本构模型、组合流变本构模型等^[52-53]。张向东等^[120]基于泥岩蠕变加卸载试验,建立了能够反映泥岩流变特性的弹性—黏性—黏弹性—黏弹塑性的统一流变力学模型。陈沅江等^[121]提出了蠕变体与裂隙塑性体等两种非线性元件,并与开尔文体及胡克体相结合,得到了复合流变力学模型。徐卫亚、杨圣奇等^[122]通过将非线性黏塑性体与线性黏弹性模型串联,建立了能够描述加速流变特性的岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)。陈卫忠等^[123]揭示了深部软岩在不同应力水平下的蠕变特征,提出了泥岩非线性经验幂函数型蠕变模型。李亚丽等^[124]引入非线性黏塑性元件,建立了能描述软岩的衰减蠕变、稳定蠕变及加速蠕变特性的非线性黏弹塑性 Burgers 蠕变本构模型。齐亚静等^[125]提出了改进的西原体模型,推导出了岩石三维蠕变本构方程。A. Dragon^[126]通过引入裂纹密度参数,建立了岩石的黏塑性损伤本构模型。李男等^[127]利用广义 Kelvin 模型对砂质泥岩的剪切蠕变试验曲线进行了拟合,提出了一种考虑先期损伤量的流变损伤模型。李良权等^[128]在三维 Burgers 黏弹性流变模型的基础上,建立了以等效应变为损伤变量的三维非线性流变损伤本构模型。

上述研究工作虽然构建了软岩的弹性、弹塑性、流变、弹塑性断裂与损伤等一系列本构模型,但是由于极弱胶结岩体物理与力学性质易变化,造成其本构关系更趋复杂化,现有本构模难以准确地反映极弱胶结岩体的变形与力学特征,应开展极弱胶结岩体本构理论方面的研究工作。

1.2.3 软岩巷道围岩变形破坏机理与控制技术研究

地下工程失稳主要是由于开挖扰动引起的集中应力超过围岩强度或引起围岩变形过大所致,常运用弹塑性、黏弹塑性理论研究分析巷道围岩中的应力与变形特性。软岩巷道冒顶、底鼓和片帮等均为围岩大变形的结果。何满潮等^[129]在分析软岩大变形机制的基础上,构建了软岩工程大变形力学分析设计系统。李术才等^[130]研制了大型地质力学模型试验系统,揭示了巷道开挖支护过程中的围岩内部应力与变形演化规律。靖洪文等^[131]在真三轴试验台上,真实再现了深部巷道开挖与支护过程中围岩的变形演化过程。张农等^[132]采用相似材料模拟试验研究了软弱夹层不同层位、泥化特性和动压影响导致软弱夹层顶板巷道失稳规律,提出了软弱夹层渗水泥化巷道的安全控制对策。韩立军等^[133-136]在分析深部高应力软岩巷道变形破坏特性的基础上,进行了断面形状与支护参数的优化设计,揭示了深部巷道围岩变形破坏机理,提出了以内注浆锚杆为核心的“三锚”联合支护体系。

著名的围岩特性曲线和支护—围岩共同作用原理为地下工程支护提供了重要的实践性指导原则^[137-138],形成了一系列联合支护技术,且支护理论也不断发展和完善。Шемякин Е И、Курленя М В 等^[139-142]在分析了软岩巷道变形破坏特性的基础上,研制了高强度新型锚杆,提出了锚网带联合支护技术。柏建彪等^[143]针对深部软岩巷道四周来压、整体收敛、变形强烈的特点,提出了主动有控卸压方法。何满潮等^[144]针对软岩大变形的特点,提出了以

恒阻大变形锚网索耦合支护为核心的主动支护技术体系。高延法等^[145]针对深井软岩及动压巷道支护难度大的难题,研制了高性能钢管混凝土支架。康红普等^[146]在分析锚杆支护作用机制的基础上,提出了高预应力、强力支护理论与围岩控制技术,并研制了巷道支护与监测成套设备。刘泉声等^[147-148]在分析了破碎软岩巷道围岩变形破坏过程及非线性大变形机制的基础上,提出了分步联合支护技术。袁亮等^[149]在系统地研究了淮南矿区深部岩巷围岩复杂赋存条件的基础上,提出了深部岩巷围岩分类标准体系及围岩稳定控制理论与技术体系。

综上所述,国内外学者主要针对软岩巷道围岩变形破坏特征与稳定机理、围岩控制理论与技术等方面进行了大量的试验研究与理论分析,但极弱胶结地层巷道围岩变形破坏特点与普通软岩巷道有所不同,对其变形破坏机理认识不清,导致支护设计缺乏可靠理论依据,常造成巷道支护失败。目前相关研究成果鲜见报道,应基于极弱胶结岩体本构模型的构建与数值实现,揭示极弱胶结地层巷道围岩的变形破坏特征,逐步形成极弱胶结地层巷道支护理论与成套技术,为从根本上解决这一类巷道的支护难题奠定基础。

1.3 研究内容、方法及技术路线

1.3.1 研究内容

本课题以极弱胶结岩体为研究对象,通过试验研究与理论分析,研究不同应力状态及含水率条件下极弱胶结岩体的物理与力学性质,反映围岩再生结构的形成过程及围岩位移、塑性区与应力分布的演化规律,揭示极弱胶结地层巷道围岩变形破坏机理,为确定合理的围岩稳定控制技术奠定基础。因此,本课题主要研究内容包括以下几方面:

(1) 极弱胶结岩体基本物理与力学性质

研究极弱胶结岩体基本物理与力学性质,揭示极弱胶结岩体的强度与变形特性,分析总结岩样的破坏模式与类型。

(2) 极弱胶结岩体再生结构形成机制

自主研制极弱胶结岩体再生结构形成试验装置,确定再生结构岩样分级加载与固结稳定方法,形成不同含水率极弱胶结岩体再生结构岩样,揭示再生结构岩样的形成过程。

(3) 极弱胶结再生结构岩体力学性质

研究极弱胶结再生结构岩体力学性质及破坏过程,揭示不同含水率及应力状态下再生结构岩样的强度与变形性质的演化规律。

(4) 极弱胶结岩体本构模型与参数辨识

揭示极弱胶结岩体强度与扩容参数随等效塑性应变及含水率变化的演化规律,建立相应屈服准则,构建极弱胶结岩体的本构模型。

(5) 极弱胶结地层巷道围岩演化规律与控制技术

揭示不同埋深、侧压力系数及剪胀角条件下巷道围岩位移、塑性区与应力分布的演化规律,研究极弱胶结地层巷道围岩变形破坏特征,提出围岩控制技术与参数。

1.3.2 研究方法和技术路线

本课题采用岩样试验装置研制、实验室试验、理论分析、数值模拟分析与工程实践相结

合的综合技术路线,如图 1-1 所示。主要包括以下几方面:

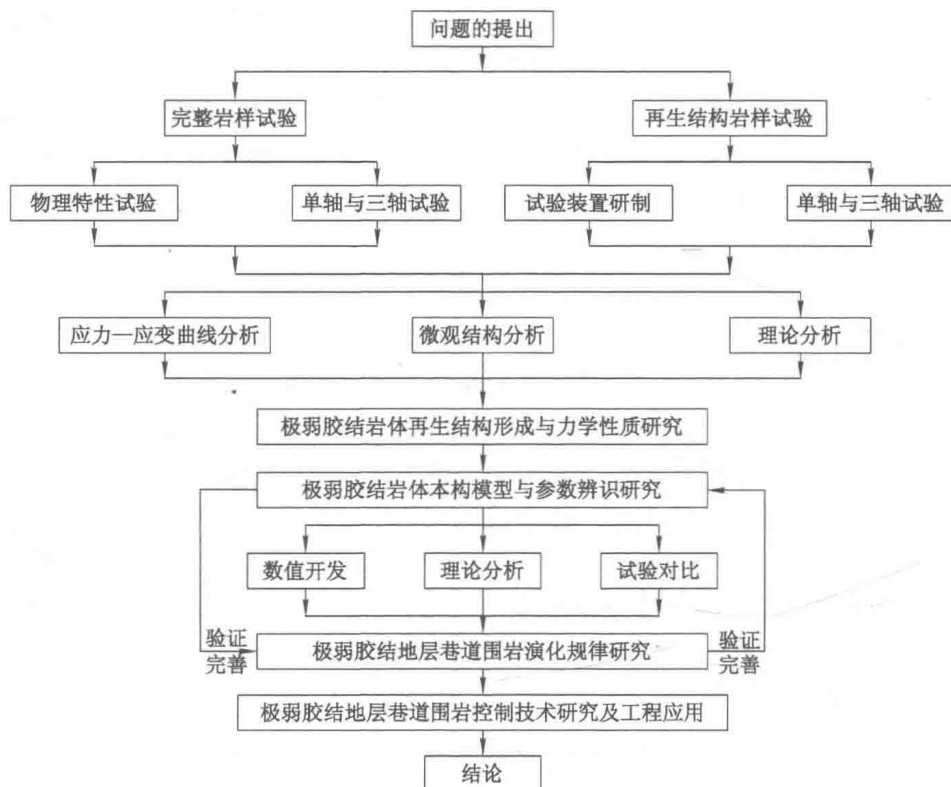


图 1-1 研究技术路线

(1) 极弱胶结岩体物理与力学性质试验

采用 MTS 伺服控制试验机进行极弱胶结岩体完整与再生结构岩样的单轴及三轴加卸载试验,反映极弱胶结岩体的物理与力学性质,揭示不同含水率及应力状态下再生结构岩样的强度与变形性质的演化规律;并采用 X 射线衍射仪进行岩样矿物组成分析,确定极弱胶结岩体的黏土矿物成分与含量,分析其胶结规律;同时采用环境扫描电子显微镜,探测岩样的微观结构,确定其形貌特征。

(2) 极弱胶结岩体再生结构形成过程试验

将现场取来的破碎岩样或完整岩样试验后的破裂岩块粉碎进行颗粒筛分试验,选择一定粒径的岩石粉末与不同水量混合,搅拌均匀后装入模具中,采用击实锤分层振捣压实;将模具放入自主研发的再生结构形成试验装置下施加固结压力进行结构重组,最终可形成不同含水率的极弱胶结岩体再生结构岩样,并揭示再生结构的形成过程。

(3) 极弱胶结岩体本构模型与理论分析

在分析极弱胶结岩体全应力—应变曲线特性的基础上,对已有本构模型进行修正,建立相应屈服准则,构建极弱胶结岩体的本构模型;并基于本构模型的二次开发与数值实现,进行本构模型的数值模拟试验,验证所构建的本构模型的合理性与可行性。

(4) 极弱胶结地层巷道围岩演化规律数值模拟分析

以极弱胶结地层巷道为工程背景,建立三维数值计算模型,揭示极弱胶结地层巷道围岩演化规律,并将数值计算结果与考虑岩体应变软化—扩容特性的围岩塑性区半径及位移理

论解答进行对比分析,以揭示极弱胶结地层巷道围岩复杂的变形与破坏特征。

(5) 极弱胶结地层巷道围岩控制技术研究及工程应用

针对极弱胶结地层巷道围岩变形破坏特征,提出极弱胶结地层巷道支护技术方案;采用FLAC3D模拟分析支护方案的合理性,并对围岩变形与支护结构受力进行实时监测及分析,动态掌握巷道围岩变形与支护结构受力状态,进而优化支护参数。

2 极弱胶结岩体基本物理与力学性质试验研究

岩石强度与变形特性是地下工程理论计算和设计的基础,利用岩石试验机对岩样进行力学性质试验,可得到岩石的应力—应变关系曲线,基本反映了岩石的强度与变形特性;并可获得岩石的主要力学性质参数,如岩石的变形参数(弹性模量、泊松比)和强度参数(内摩擦角、内聚力)等,这是建立岩石力学本构关系不可或缺的基础数据,也是进行地下工程数值计算分析及研究复杂应力状态下岩石变形破坏与力学响应的基础资料^[150]。

在地下工程领域中岩体均处于三向应力状态,因而研究三向应力状态下岩石的强度与变形特性,对于揭示岩石地下工程变形破坏机理、诱发的工程灾害等均有着重要的工程应用价值^[150]。极弱胶结岩体由于成岩时间晚、胶结程度差、强度低、易风化、遇水泥化崩解,形成了独特的物理力学性质。可通过极弱胶结岩体的基本物理与力学性质试验,揭示其强度与变形特性,为确定极弱胶结岩体力学参数奠定了基础。

2.1 极弱胶结岩体基本物理性质

岩样取自蒙东五间房矿区西一矿典型的极弱胶结地层,为泥质结构、块状构造,层理不发育,胶结程度较差或未胶结,极易风化、遇水泥化,颜色一般为灰色,质偏软。泥岩层中多数见有滑面,滑面上有明显的滑动擦痕;泥岩的强度极低,用手指甲极易画出印痕。经鉴定综合命名为灰黑色块状构造高岭石泥岩,鉴定结果详见表 2-1。

表 2-1 岩石类别鉴定

矿物成分	鉴定特征
高岭石	泥级大小,镜下晶形不可见,少量结晶加大呈自形板柱状,可见一组完全节理,单偏光下无色透明,因混合铁质及其他物质而显黄褐色,正交偏光下一级灰干涉色
伊利石	呈细小鳞片状,另外可见凝胶状,单偏光下无色透明,正交偏光下呈黄色干涉色
石英	粒径 0.01~0.04 mm,塔形粒状颗粒,单偏光下无色透明,正低突起,无节理,正交偏光下一级灰白干涉色
白云母	细小片状,略呈顺层定向排列,单偏光下无色透明,一组完全节理,正交偏光下二级黄干涉色或绚丽多彩。白云母片因压实作用而弯曲变形

2.1.1 极弱胶结岩体黏土矿物成分测试分析

软岩的主要矿物成分是蒙脱石、伊利石、高岭石等黏土矿物,其次是石英、长石、云母等碎屑矿物,还有一些钙、铁质胶结物或游离氧化物。蒙脱石具有强膨胀性,伊利石与高岭石为弱膨胀性;并且黏土矿物的成分及含量不同,引起岩石的结构、构造、物理力学性质、水理

性质也不相同^[28]。为了研究极弱胶结岩体中黏土矿物成分,采用 D8 Advance X 射线衍射仪,对 4 组岩样进行了全岩矿物分析,X 射线衍射图如图 2-1 所示,测试结果详见表 2-2。

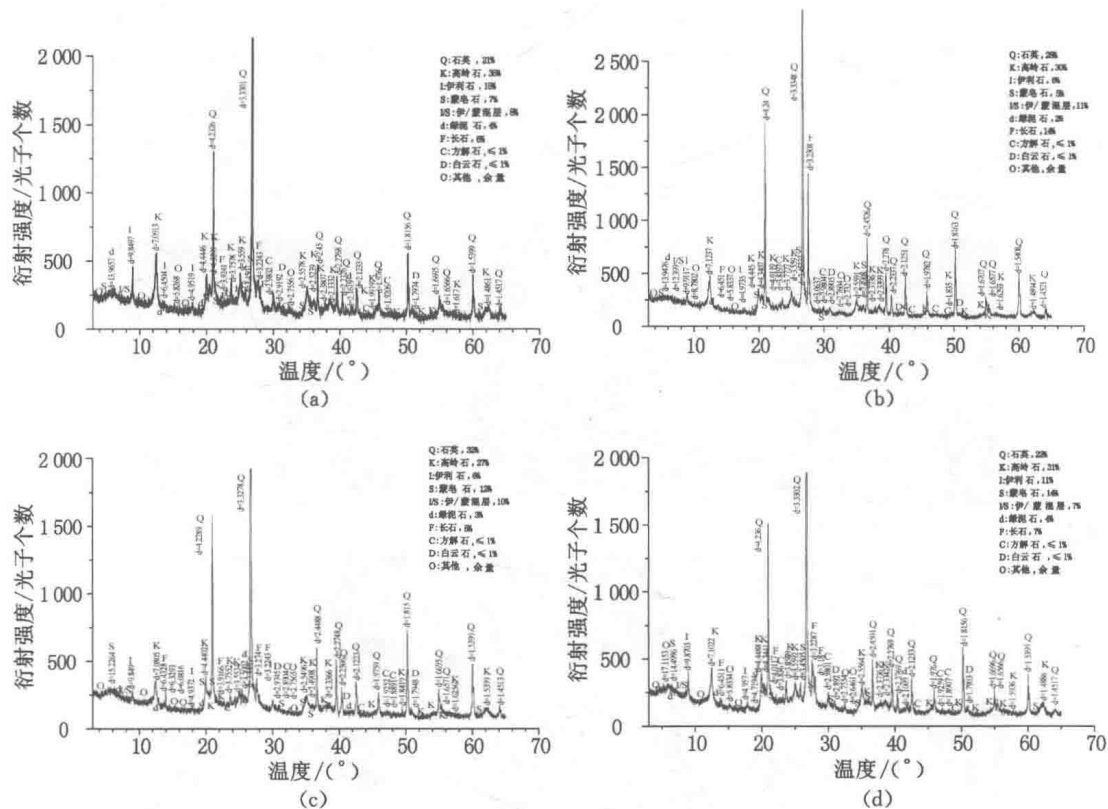


图 2-1 泥岩 X 射线衍射图

表 2-2 岩样矿物成分定量分析结果

试件	矿物成分含量/%									
	石英	高岭石	伊利石	蒙皂石	伊蒙混层	绿泥石	长石	方解石	白云石	其他
1#	21	35	15	7	8	4	6	≤1	≤1	余量
2#	28	30	6	5	11	2	14	≤1	≤1	余量
3#	32	27	6	12	10	3	5	≤1	≤1	余量
4#	22	31	11	14	7	4	7	≤1	≤1	余量

由图 2-1 可知,极弱胶结岩体中主要矿物成分为石英、高岭石、伊利石,各成分所占含量详见表 2-2。分析可知,极弱胶结岩体黏土矿物成分以高岭石为主,黏土矿物成分总含量高达 54%~69%,平均含量为 62%,不含有强膨胀性黏土矿物蒙脱石,遇水后具有一定的膨胀性,但膨胀程度不大,属于微膨胀性软岩。

2.1.2 极弱胶结岩体微观结构特性

软岩的内部微观结构对其强度及软化特性影响较大,采用 FEI QuantaTM 250 环境扫描电子显微镜测试极弱胶结岩体完整岩样的微观结构,测试结果如图 2-2 所示。

由图 2-2 可知,高岭石、伊利石为极弱胶结岩体的主要黏土矿物,其单元体为一些细小