

巷道围岩弱结构破坏失稳分析 与非均称控制机理

樊克恭 翟德元 著

煤炭工业出版社

巷道围岩弱结构破坏失稳 分析与非均称控制机理

樊克恭 翟德元 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

巷道围岩弱结构破坏失稳分析与非均称控制机理/樊克恭, 翟德元著. —北京: 煤炭工业出版社, 2004

ISBN 7-5020-2410-7

I. 巷… II. ①樊…②翟… III. ①巷道-围岩稳定性-分析②巷道-围岩稳定性-控制 IV. TD322

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 017994 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 850mm × 1168mm¹/₃₂ 印张 7¹/₄
字数 179 千字 印数 1—1,500
2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷
社内编号 5181 定价 28.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

前 言

由于煤系地层的沉积特点,巷道围岩一般是由不同岩性的岩体组成的复合结构。随着煤矿开采深度的不断加大,巷道围岩复合结构中各部分的强度、应力状态及变形破坏特征等力学特性方面的差异越来越明显;在高压作用下,该类巷道围岩变形破坏出现的不均衡性和非对称性也越来越明显,导致传统的均称支护方式已不能适应巷道围岩变形的要求。有限元分析与工程实践表明,复合结构中的弱结构体对围岩稳定性起着关键控制作用,弱结构巷道的匹配支护(非均称控制)可以获得围岩稳定性控制的特效。因此,研究巷道围岩弱结构的破坏失稳及非均称控制机理显得尤为重要。

对于含有弱结构体的复合结构巷道围岩的研究,主要集中在软弱底板的底鼓机理及防治对策上,对其他单一岩性弱结构型和混合岩性弱结构型巷道、几何弱结构型巷道、应力弱结构型巷道的破坏机理、稳定状态演化及其控制缺乏系统的研究;含弱结构体的复合结构围岩控制理论与技术目前还没有很好地解决,究其原因除了岩体结构成因的复杂性和地应力确定的困难性外,另一个重要原因就是现有力学分析模型的局限性,导致对巷道围岩弱结构的变形破坏机理认识不清,控制技术及其支护参数确定缺乏理论依据。

作者在现场实测、数值模拟和理论分析的基础上,对巷道围岩弱结构破坏失稳过程及非均称控制进行了全面、系统的论述。利用有限元数值方法,研究了不同弱结构类型巷道围岩塑性变形区域的形态,并分析了弱结构巷道围岩塑性区形态、松动圈形态

与围岩弱结构类型的关系；从复合结构、分叉理论与弱结构效应出发，着重研究了弱结构体破坏对岩性弱结构、几何弱结构与应力弱结构巷道稳定性的影响；根据不同类型弱结构巷道围岩变形破坏规律、破坏效应与围岩应力状态的关系，提出了不同围岩应力条件下岩性弱结构类型的优选方案、弱结构体变形破坏的“控制部位”以及巷道围岩的“非均称控制”概念，研究了弱结构巷道围岩破坏的主控性与非均称控制机理。

本书的写作得到了蒋金泉教授的指导和帮助，书中也参阅、引用了蒋教授的部分科研成果，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限和时间仓促，书中不当之处难免，恳请读者批评指正。

作 者

2004 年 1 月

内 容 提 要

本书针对地下工程围岩赋存的不均一性和变形破坏的非均衡性,提出了巷道围岩弱结构与弱结构体的概念;在大量现场实测、理论分析和数值模拟的基础上,对巷道围岩弱结构破坏失稳过程及非均称控制进行了全面、系统的论述。从围岩塑性变形区域、松动圈发育形态出发,研究了巷道围岩塑性变形区域、松动圈形态与围岩弱结构类型的关系以及弱结构巷道破坏区域的差异性;从有利于围岩控制出发,提出了不同围岩应力条件下岩性弱结构类型的优选方案;根据不同弱结构巷道围岩变形破坏规律与破坏效应,提出了弱结构体变形破坏的“控制部位”与巷道围岩的“非均称控制”概念,研究了弱结构巷道围岩破坏的主控性,弱结构匹配支护的力学响应与非均称控制机理与控制方法。

本书可供从事采矿工程和岩土工程的技术人员以及大专院校与科研单位的相关专业人员参考。

目 录

1 绪 论	1
1.1 课题的提出	1
1.2 研究现状与文献综述	4
1.3 主要研究内容及研究方法	10
2 岩性弱结构体的力学性质与巷道围岩弱结构的 松动圈形态	12
2.1 巷道围岩弱结构分类	12
2.2 岩性弱结构体的力学特性	15
2.3 岩性弱结构巷道的塑性区与松动圈形态	27
2.4 本章小结	57
3 巷道围岩弱结构的损伤分析	59
3.1 巷道围岩的损伤破坏过程	60
3.2 损伤变量与损伤演化方程	63
3.3 损伤本构关系的建立	67
3.4 损伤带在巷道围岩稳定中的作用	67
3.5 本章小结	68
4 巷道围岩岩性弱结构破坏失稳分析	69
4.1 巷道围岩破坏与失稳的概念	69
4.2 巷道围岩岩性弱结构变形破坏的特点与 失稳机理	71

4.3	巷道两帮弱结构体变形破坏分析	112
4.4	I、IV、V型围岩弱结构破坏失稳分析	118
4.5	巷道顶底板弱结构体破坏失稳分析	133
4.6	本章小结	143
5	几何弱结构型与应力弱结构型巷道稳定性分析	145
5.1	几何弱结构型巷道稳定性分析	145
5.2	巷道围岩应力弱结构变形破坏特征	157
5.3	本章小结	161
6	巷道围岩弱结构非均称控制机理与方法	164
6.1	引 言	164
6.2	巷道围岩弱结构非均称控制机理及 控制技术途径	165
6.3	岩性弱结构型巷道围岩结构优选	167
6.4	巷道围岩弱结构非均称控制	168
6.5	本章小结	204
7	主要结论	207
	参考文献	211

Contents

1	Introduction	1
1.1	Raising of Subject	1
1.2	Present situation of study about this subject and summary of document	4
1.3	Main research questions and methods	10
2	Mechanics characters of weakness lithological structure body and fracture zone shape of weakness structure of surrounding rock	12
2.1	The classification of weakness structure of surrounding rock	12
2.2	Mechanics characters of weakness lithological structure body	15
2.3	Plastic zone and fracture zone shape of weakness lithological structure of surrounding rock	27
2.4	Summarize	57
3	Damage analysis of the weakness structure of surrounding rock of roadway	59
3.1	The damage and failure process of surrounding rock of roadway	60
3.2	Damage variable and equation of damage evolution	63
3.3	Establishing of damage constitutive relation	67
3.4	Function of damaged zone on steady of surrounding rock of roadway	67
3.5	Summarize	68
4	The failure and unstability analysis of weakness lithological structure of surrounding rock	69
4.1	The concept of failure and loss - stability of surrounding rock	69

4.2	Deformation and failure Characteristic of weakness lithological structure of surrounding rock and loss – stability mechanism	71
4.3	Analysis of Deformation and failure in roadside weakness structure body	112
4.4	Analysis of failure and loss – stability in weakness structure typed I , IV and V of surrounding rock	118
4.5	Analysis of failure and loss – stability in weakness structure body of roof and floor of workings	133
4.6	Summarize	143
5	Stability analysis of weakness geometric structure and stress structure of roadway	145
5.1	Stability analysis of weakness geometry structure of roadway	145
5.2	Deformation and failure characteristic of weakness stress structure roadway	157
5.3	Summarize	161
6	Nonequilibrium control mechanism and method of weak structure of surrounding rock	164
6.1	Foreword	164
6.2	Nonequilibrium control mechanism and technique approach of weakness structure of surrounding rock	165
6.3	Optimum selecting of surrounding rock structure of weakness lithologic structure roadway	167
6.4	Nonequilibrium control of weakness structure roadway	168
6.5	Summarize	204
7	Main conclusion	207
	Refevence	211

1 绪 论

1.1 课题的提出

由于煤炭开采的需要,每年都要在地下开掘大量不同类型的巷道(全国每年均在10000km左右),这些巷道多数处于岩体强度较低的沉积地层中。基于沉积地层的特点,巷道围岩一般是由不同岩性的岩体组成的复合结构。由于沉积历史、岩性状况等的不同,复合结构围岩中各部分的强度、受力特征等力学特性是有差异的,当其中含有强度较低、变形较大或受力状况恶化的岩体(柱)时称为巷道围岩弱结构,其中的软弱岩层或岩(煤)柱称为弱结构体。随着矿山开采的大规模进行和采深的不断加大,巷道围岩应力状态趋于恶化,高地压问题日益严重,制约着矿井生产的高产、高效水平,并给矿井安全生产带来很大威胁。在地压及工程应力的作用下,巷道围岩弱结构中的弱结构体会首先发生渐近损伤、破坏乃至引起巷道严重变形失稳。而在这类巷道中,目前通常采用均称的支护结构和参数来控制围岩的变形与破坏,如砌碹支护、锚喷支护、组合锚杆支护、U型钢支护等支护形式。传统的砌碹支护由于施工复杂、成本高、可缩量小,与弱结构围岩变形规律和支护要求不相一致,因而其适应性受到很大的限制,已逐渐被淘汰;锚喷支护与组合锚杆支护属主动支护,支护效果好,成本低,但在高地压状态或巷道开挖后重分布应力的作用下,围岩弱结构的损伤、破坏将导致围岩整体稳定状态恶化与支护结构的失效,必须从支护与弱结构的匹配上实现非均称支护;各种刚性支架与弱结构围岩及大变形围岩的变形规律不相适应,成本高,支护效果不佳;以U型钢为主的各种可缩性金属

支架本身虽然具有高支护阻力、高承载能力和较大可缩量,但实际使用中因支架受力状态恶化,支护阻力发挥有限,有时甚至根本不能发挥,且被动支护造成围岩破坏范围较大,支架变形折损严重,往往无法整形重复使用。在均称支护巷道中若按照弱结构围岩中的弱结构体选择支护参数,往往过于保守,必然造成整个支护体系材料消耗多,浪费比较严重;若不考虑弱结构体的存在选择支护参数,则支护与弱结构体不匹配,必然由于弱结构体处首先发生的围岩损伤变形及破坏,而最终导致整个支护体系的失效与围岩稳定状态的恶化。

煤矿开采的工程实践表明,围岩变形与破坏的发展取决于围岩复合结构、工程应力环境及支护状况。有限元分析与工程实践表明,复合结构中的弱结构体对围岩稳定性起关键控制作用,弱结构巷道的匹配支护可以获得围岩稳定性控制的特效。由于弱结构的存在,围岩变形与破坏呈现非均衡的复杂现象,弱结构体在工程应力环境中一般首先发生变形破坏,它对围岩弱结构的破坏区域发育形态、应力分布、结构变形破坏的演变过程、围岩稳定性及支护效果均产生重大影响,在围岩稳定性中起着主控作用。

Cook (1965) 提出的岩石应力—应变全过程概念,使人们认识到,岩石不仅在达到最大强度前能承受载荷,而且在此之后仍具有一定的承载能力^[1]。大量的复合结构巷道支护实践也证实了这一点。尽管围岩中弱结构体已破坏,但由于破坏后的弱结构体仍存在一定的残余强度,只要支护适当,对围岩其他部位的影响就可控制,巷道仍能维持稳定。但这种稳定性非常敏感地取决于围岩弱结构变形的程度,即存在一个变形临界点。当巷道围岩中的结构变形超过该临界点后,变形就会迅速增大并出现失稳,其结果又与结构条件、围岩破碎程度、支护条件以及应力状态密切相关。这正是力学上的分叉现象,即依赖于参数的某一研究对象当参数在一个特定值附近作微小变化时,它的某些性质所发生的本质的变化^[2~5]。复合结构中的弱结构体既不属于完全的连接

体,又不属于完全的非连续体,而是介于两者之间,并取决于力学条件(如高围压时为连续体特征,低围压时为不连续体特征)。受这种已经变形破坏的弱结构体的影响,弱结构巷道围岩有其独特的力学行为,其失稳具有分叉性质,如在同等围岩条件下巷道失稳的变形可以是200mm、300mm、400mm等,主要取决于支护条件与岩体结构。而即使是已经破坏的巷道,只要采取适当的支护措施,仍可使巷道变形稳定,即存在着失稳与破坏的多样性和非惟一性。因此用分叉理论可以研究复合结构围岩再变形破坏的力学过程和物理本质。

现有的巷道支护研究成果在硬岩和中硬岩巷道支护中发挥了非常重要的作用,是因为在巷道开掘后或受采动时,其围岩基本上遵循着从完整—损伤—破坏这样一个力学过程,且在力学分析时,可以将其简化为各向同性的均质材料,这正是目前岩石力学的主要研究成果,因而可以对这些巷道进行较为准确的力学分析和设计。

含弱结构体的复合结构围岩控制理论与技术目前还没有很好地解决,究其原因除了岩体结构成因的复杂性和地应力确定的困难性外,另一个重要原因就是现有的力学分析模型没能全面揭示其物理本质。

对于含有弱结构的复合结构围岩巷道的研究,主要集中在软弱底板的底鼓机理及防治对策上,其他单一岩性弱结构型和混合岩性弱结构型巷道、几何弱结构型、应力弱结构型巷道的破坏机理、稳定状态演化及其控制尚未作过系统的研究。本文拟从巷道围岩复合结构、分叉理论以及弱结构效应出发,建立围岩弱结构模型,研究弱结构损伤、破坏的演变规律与破坏效应,弱结构巷道围岩破坏的主控性和稳定性,弱结构匹配支护的力学响应与非均称控制机理,研究成果对于弱结构围岩与高地压围岩巷道变形破坏有效控制(非均称控制)具有重要的科学意义和广阔的应用前景。

1.2 研究现状与文献综述

在地下工程围岩稳定性理论和实践的探索中, 创立发展了许多理论和假说, 如 20 世纪 20 年代以前的古典压力理论, 认为作用在支护结构上的压力是其上覆岩层的重量 γH , 可以作为代表的有 Haim, A, Rankine, W. J. M 和金尼克理论; 40 年代的塌落拱理论, 认为当地下工程埋深较大时, 作用在支护结构上的压力, 不是上覆岩层重量, 而只是围岩塌落拱内的松动重量, 可以作为代表的有太沙基 (Terzahi, K) 和普氏理论; 60 年代以后考虑围岩节理、裂隙及流变性质的支护—围岩共同作用理论等, 从不同的侧面研究了如何有效地控制巷道围岩使其不破坏或不发生较大的位移与垮落^[6]。

底鼓现象是巷道围岩稳定性课题中的特殊问题, 近年来随着矿井开采深度的不断加大, 软岩巷道与弱结构巷道的大变形、高地压、难支护的工程问题日益严重, 底鼓现象已成为软岩巷道与弱结构巷道围岩变形和破坏的主要特征与形式之一。针对底鼓的机理与防治对策, 国内外开展了广泛的研究, 发表了许多论著^[7~31]。其研究工作主要围绕以下三个方面进行: 一是关于软弱岩层的性质^[8, 25~29], 借助于多种手段, 研究了软弱岩层的矿物成分及微结构特征, 初步论述了软弱岩层的物理性质与强度和变形的关系; 分析了软弱岩层遇水软化、崩解、鼓胀的机理以及水理性质对软弱岩层力学参数的影响; 在力学性质方面, 研究了软弱岩层受力后表现出来的弹塑性、扩容性及流变性等力学特性。二是关于巷道底鼓的机理, 前苏联及德国研究成果较多^[7, 9, 23]。前苏联的 П. М. 秦巴列维奇认为, 底鼓的力学本质与松散土体在由两个压模传给底板的荷重作用下压出的现象是一样的, 应用极限平衡理论计算底鼓岩层作用在巷道支架上的压力; Г. Г. 利特维斯基在研究准备巷道底鼓机理的过程中, 提出了判别岩层破坏的局部性准则; И. Л. 切尔尼亚克利用数理

统计法对大量实测数据进行了分析, 得出了预测巷道底鼓的经验公式; 德国的 M. 奥顿哥特运用相似材料模型试验研究了巷道底鼓的全过程, 认为巷道岩层的破坏顺序首先是两帮岩层由于垂直应力作用被压裂, 之后是巷道顶底板由于水平应力的作用向巷道内鼓出; N. 布什曼则得出底板岩层最大破坏深度与巷道宽度成比例的结论; 国内潘一山等人借助有限元法和相似材料模型研究了软岩巷道底鼓的时间效应及软岩遇水膨胀引起的底鼓^[15~17], 模拟结果能较好地反映这些因素对底鼓的影响; 康红普建立了求解底板岩层破坏范围的动态模型, 提出了估算软岩巷道底鼓量的公式^[18~21]; 姜耀东经过大量的现场观测和实验室研究认为^[22~24], 由于巷道所处的地质条件、底板围岩性质和应力状态的差异, 底鼓可分为挤压流动型、挠曲褶皱型、遇水膨胀型和剪切错动型四类, 巷道底鼓属于岩体破坏后的力学行为问题和在地质历史上已经破坏的岩体巷道开挖后再变形和再破坏的规律问题。三是软岩巷道底鼓的防治^[7~9, 18, 19, 23, 30], 国内外目前出现的防治措施有多种形式, 包括底板锚杆、底板注浆、封闭式支架等支护加固法, 切缝、打钻孔、松动爆破、开掘卸压巷等卸压法以及各种联合方法, 侯朝炯等人提出了加固巷道软弱围岩帮角 (主要是底角) 控制底鼓的方法^[31], 进行了数值模拟与相似材料模拟研究, 并得到了现场工程实践的验证。

在研究巷道底鼓的同时, 对巷道其他形式的变形破坏与围岩控制也开展了大量的研究工作。朱德仁、王金华等对巷道煤帮稳定性进行了相似材料模拟研究^[32], 分析了工字钢梯形支架、锚杆群支护和钢带组合锚杆支护条件下巷道煤帮的变形破坏特征, 以及水平应力对巷道煤帮变形破坏的影响, 结果表明, 水平应力对于巷道煤帮的稳定性影响显著; 侯朝炯、马念杰以松散介质应力平衡理论为基础, 求出了煤层巷道两帮煤体的应力极限平衡区宽度^[33, 34], 认为提高煤帮支护阻力对提高煤层巷道稳定性具有显著效果; 林崇德采用离散元数值方法^[35~37], 分析了层状岩石

顶板破坏机理与顶板锚杆支护作用,认为层状岩石顶板主要受水平压应力作用而产生离层、弯曲破坏,而不是直接受垂直压力作用以承载梁的形式破坏,提出了以锚杆提高锚固岩层承载能力的幅度来衡量锚杆支护作用的方法。根据对软弱岩体中巷道围岩的特性及支护特点的研究,认为软弱巷道围岩出现小范围的破坏区,可以减轻支护压力,但破坏区的岩石易受外界因素的影响,应采取加固和封闭围岩的措施,才能有效地发挥围岩的承载作用;蒋金泉、刘传孝等采用有限元与 FLAC 分析软件^[38~40],对巷道围岩结构在岩层性质上有明显差异的条件(含弱结构体)进行了数值模拟,初步分析了弱结构的主控作用及巷道围岩软弱结构的控制途径;勾攀峰通过对锚杆支护巷道围岩运动特点的研究,建立了回采巷道锚杆支护两帮及顶板稳定的分析模型,提出了回采巷道两帮及顶板稳定的判别准则^[41,42]。刘高等分析了巷道开挖前后地应力状态的变化及其对围岩破坏的影响^[43],并从岩体和工程岩体围压状态变化和强度变化角度探讨了高应力软岩围岩的变形破坏机理。段克信通过数值模拟、相似模拟及现场试验^[44],对巷帮松裂爆破卸压维护软岩巷道的原理、软化卸压带参数、卸压巷道围岩变形规律等进行了研究,认为巷帮松裂爆破能够在巷帮围岩造成一个变形模量显著降低的软化卸压带,该带的存在改变了巷道围岩的应力分布,使支承压力降低,并向围岩深部转移;葛家良、陆士良等从浆液与围岩间的物理作用、化学作用以及注浆与锚杆共同作用等方面研究了注浆加固软岩巷道的作用机理和提高巷道稳定性机理^[45~48,160~163];何满朝提出软岩巷道关键部位二次耦合支护^[49,50],分析了关键部位破坏的力学机理和变形特征。王彩根、陆士良提出支架的高阻和可缩是确保软岩巷道稳定性的关键^[51~53],受力条件恶化严重抑制着软岩巷道支架支撑能力的发挥,实施支架壁后充填使支架及早承载和均匀受力,可大幅度提高支架的工作阻力,有效地控制围岩的强烈变形。董方庭等提出了围岩松动圈支护理论^[54~57],依据松动圈

的大小对围岩进行了分类,随后在研究中确定了巷道支护的主要对象为松动圈发展过程中的碎胀变形(碎胀力)。

自 Kachanov 于 1958 年提出连续度的概念、Rabotnov 于 1963 年提出损伤因子的概念,到 1977 年 Janson 与 Hult 等人提出损伤力学(damage mechanics)的新名词至今,经 Lemaitre, Chaboche, Krempl, Krajcinovic, Murakami 等学者的共同努力,在连续介质理论和不可逆过程热力学的基础上,建立了损伤力学的新学科^[58,59]。近年来,损伤力学的发展,为岩石材料的非弹性性质和破坏机理给出了一种可资借鉴的解释模式。最早进行岩石及混凝土材料损伤力学研究的是 Dougill (1976), Dragon & Mroz (1979),他们根据断裂面的概念研究岩石的脆塑性损伤行为,并建立了相应的连续介质模型^[60]; Krajcinovic, Kachanov, Costin 等学者从不同角度将损伤力学用于岩石材料,并建立相应的理论和模型,从而使岩石力学的研究不断丰富和完善。Moss & Gupta 从实验出发建立了描述脆性岩石扩容破坏的本构模型;谢和平对岩石的微观断裂机理及损伤特征进行了研究^[60],建立了节理岩体的损伤力学模型;朱维申、李新平等对多裂隙岩体的损伤断裂进行了分析^[61~64],提出了适合于多裂隙岩体特性的等效连续模型,建立了损伤演化方程和多裂隙岩体的本构关系,还讨论了如何通过现场工程地质调查,以获取确定岩体宏观损伤性质的工程地质信息,并采用粘弹-粘塑性理论和有限元法,编制了平面有限元通用程序,对三峡船闸高边坡稳定性进行了损伤流变分析;杨更社将 CT 检测技术用于岩石损伤特性的研究^[65],分析了 CT 扫描对岩石损伤的定性和定量的规律;唐春安假设岩石微元的强度服从正态分布或 Weibull 分布^[1],建立了岩石的损伤变量和单轴压缩的本构模型;曹文贵等从岩石微元强度分布的随机性出发,建立了三维岩石损伤演化方程和岩石损伤软化本构模型^[66],反映了岩石强度受应力状态影响的现象。

自从 20 世纪 70 年代 Rudinck 和 Rice (1975)^[67]把岩土局部变