

山西省自然科学基金资助项目(991030)

回采巷道围岩控制理论 及锚固结构支护原理

杨双锁 著

煤炭工业出版社

山西省自然科学基金资助项目(991030)

回采巷道围岩控制理论 及锚固结构支护原理

**Study on the Control Theory of Gate Roadway
Surrounding Rock and the Support Principle of
the Bolting Structure**

杨双锁 著

Yang Shuang suo

煤炭工业出版社

·北京·

ABSTRAT

The traditional surrounding rock control theory is suitable for the roadway that there is no fracture zone surrounding it. But there is often a fracture zone in the surrounding rock of gate roadways, and there is no a kind of control theory suitable for gate roadways surrounding rock at various deformation states including loose state up to now. Bolting support is used more and more extensively because of its advantages, but there are still some problems about bolting technique and bolting theory has not been solved perfectly. Based on this situation, some studies have been done and some results have been achieved in this book.

Using the key stratum theory of strata control in long - wall face, the boundary location and the boundary restraint and load conditions have been determined. Using the brick beam theory, the structure characteristics of gate roadways surrounding rock has been analyzed systematically, and the mechanical models indicating their basic characteristics have been designed.

Based on the mechanical models, the general feature of phenomenon of underground pressure of gate roadways has been studied completely; the result indicates that the phenomenon of underground pressure of gate roadways is variable. The mechanisms of giving rise to the large - deformation feature and its possibility of being controlled have been revealed, and the deformation calculation method of gate roadways surrounding rock has been put forward.

The staged stability feature of gate roadways has been revealed, and the fluctuating equilibrium theory about the whole process of surrounding rock - support interaction has been put forward for the first time. Based on the new theory, the control principles which is suitable for gate roadways with various surrounding rock conditions has been suggested. I. e. for surrounding rock with higher stability, reinforcement measures should be taken and elastic - plastic stable state should be managed to form, for surrounding rock with lower stability, control measures of surrounding rock deformation should be taken and loose stable state should be managed to form.

Using theoretical analysis, numerical calculation and simulating test, the mechanical effect of bolt action, and the bolting structure characteristics have been studied thoroughly. The results indicate that with the action of bolts, the cohesive strength of rock can be increased, but the internal

friction angle is decreased because of tensile state of the bolts. For remedying the defects of traditional methods a new anchorage method has been suggested, and the concept of bolt – rock structure entity has been put forward for the first time.

The deformation mechanism of bolt – rock structure entity and the reaction between the bolt – rock structure and the gate roadways surrounding rock have been studied completely. The results indicate that bolt – rock supporting structure is suitable for the gate roadways with large deformation features, and the reaction process between bolt – rock structure and the inner surrounding rock follows the fluctuating equilibrium law.

序 一

巷道围岩控制是井工开采的永恒主题，从早期人们对巷道矿压显现产生朴素认识并开始尝试进行简单支护算起，围岩控制技术及理论的发展有了悠久的历史，尤其是经过近半个世纪的快速发展，巷道围岩控制技术及理论取得了重大进展。然而，回采巷道有着突出的特殊性，由于受到回采的强烈影响，在服务期间围岩大多要发生强烈破坏并产生较大的松动变形，即产生大变形是回采巷道矿压显现的重要特征。因此，有必要继续开展巷道围岩控制理论及技术的研究，建立能够涵盖松动变形阶段的巷道围岩控制理论，发展适用于大变形巷道的支护技术。

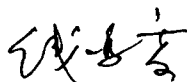
锚杆支护是巷道的一种既古老又新兴的支护技术。其古老在于人类应用锚杆支护的历史已相当久远；其新兴在于锚杆支护仍有许多未知领域有待人们去探索，包括锚杆支护在回采巷道中的应用，其技术及理论还有待于进一步发展和完善，新技术及新理论的开发与研究将使锚杆支护适用范围进一步拓宽。

本书作者针对当前煤矿生产中存在的巷道支护问题，基于原有理论，创造性地对回采巷道的矿山压力显现及锚固结构进行研究，并得出了一些新的结论。如：利用回采工作面的矿压理论对回采巷道进行研究，由此建立了反映回采巷道基本特征的力学模型，阐明了采空区、煤柱、回采巷道与上覆岩层的结构关系，并由此阐明了回采巷道大变形特征的产生机理；对锚固结构的受力及变形特征进行了探索，得出了锚固结构对围岩的作用与普通支架的作用方式迥然不同的结论，提出了在回采巷道中，根据煤柱大小，锚杆将主要呈现剪切与拉伸两种受力特点，尤其是防止岩层错动对锚杆的影响，是提高锚固体稳定性的重要途径；基于回采巷道围岩处于不同物性状态的变形特征进行了研究，提出了涵

盖松动变形过程的围岩压力随变形的波动性和阶段性变化规律；研究了锚杆作用的力学本质及锚固结构的力学效应，提出了整体锚固结构支护的新概念，建立了锚固结构与其外部围岩的相互作用规律，得出了锚杆支护在大变形巷道中依然可以获得成功的结论。

当然，回采巷道围岩控制，尤其是应用锚杆支护控制回采巷道的稳定性还有待于更进一步的深入研究，但本书作者提出了不少独到的见解，富有创新性。愿它的出版，能为人们从事新的研究提供借鉴和启迪，成为推动巷道围岩控制尤其是回采巷道的控制及锚杆支护理论进一步发展的新生力量。

中国工程院院士
中国矿业大学教授



2004年元月于徐州

序 二

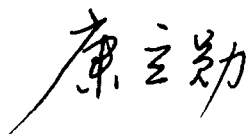
探索正确的巷道支护理论、选择安全可靠的支护方法、确定经济合理的支护参数以及实用高效的施工工艺成了长期以来采矿工程领域所致力解决的一个重大理论及技术课题。为了实现支护与围岩共同承载，锚杆支护技术不断被发展完善，在煤矿巷道围岩控制中的应用也越来越广泛。然而，与锚杆支护技术广泛应用的现实极不相称的是人们对很多情况下锚杆作用的机理尚不明确，锚杆支护结构的力学性能还无法确定，锚杆支护理论也还不够完善。实际工程中锚杆支护技术的应用能否成功，很大程度上依赖于工程设计人员经验的运用是否合理以及对工程条件等客观因素的主观判断是否准确。

本书作者运用采场岩层控制中的关键层、砌体梁等理论的基本原理和方法对回采巷道围岩结构特征进行了系统的分析，建立了运用锚固结构进行回采巷道围岩控制的基本理论框架。主要内容包括：与采场岩层结构特征及其变化规律相联系，系统分析了不同形式回采巷道的围岩结构特征，由此建立了反映回采巷道围岩基本特征的力学模型，并对其矿压显现的一般规律进行了全面分析，揭示了回采巷道大变形特征的产生机理及其可控制性，提出了回采巷道围岩变形量的计算方法；揭示了回采巷道围岩稳定性的阶段性特征，创造性地提出了围岩—支护相互作用全过程中的波动性平衡理论以及不同围岩条件下回采巷道围岩控制的基本原则；运用理论分析、数值计算、相似模拟等方法对锚杆作用的力学本质、锚固体的结构效应等进行了深入研究，提出了适用于回采巷道围岩控制的整体锚固结构支护的新概念；对锚固结构的变形机理进行了研究，对锚固结构与锚固范围以外的围岩的相互作用规律进行了全面研究，结果表明，锚固结构对回采巷道围岩

的大变形特征具有较强的适应性，锚固结构与其外部围岩间的相互作用遵循波动性平衡规律；提出了适用于破碎两帮的锚固结构设计原则；对层状顶板的破断回转规律进行了研究，提出层间错动是回采巷道围岩的突出变形特征之一，锚杆支护设计对此应予以充分重视。

本书思路新颖，见解独到，富有创新性。愿它尽早付梓，以飨读者。

太原理工大学教授
矿业工程学院院长

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '康', '志', and '勇'. The characters are written in a cursive, flowing style.

2004年元月于太原

前 言

回采巷道是矿井生产的交通、运输及通风等不可缺少的通道，为了开采工作的正常进行，为了生产人员及财产的安全，必须保持巷道在服务期间内始终处于稳定状态。巷道的稳定性状况取决于围岩的自然条件及支护条件。实际工程中的许多巷道不具备保持自稳状态的条件，因此，必须采取一定的围岩控制措施。然而，变形及应力状态的不同将使围岩表现出不同的承载特性及稳定性特征，所以，巷道围岩的控制过程是一个贯穿围岩各个变形阶段的复杂过程。因此，要实现对接道围岩的有效控制，必须正确认识围岩在各变形阶段的稳定状态本质。

多年来，科技工作者对接道围岩—支护相互作用的本质规律进行了不懈的探索，并获得了许多有益的结论，尤其是对松动变形区产生之前的支护—围岩相互作用规律的认识已较为统一，在生产实践中发挥着积极的指导作用。但关于围岩发生强度破坏后的研究还未能达到相应水平。

近年来锚杆支护技术快速发展，在煤矿巷道围岩控制中的应用也越来越广泛。然而，与锚杆支护技术广泛应用的现实极不相称的是人们对很多情况下锚杆的作用机理尚不明确，锚杆支护结构的力学性能还无法确定，锚杆支护理论也还存在有待进一步研究之处。实际工程中锚杆支护技术的应用能否成功，很大程度上依赖于工程设计人员经验的运用是否合理以及对工程条件等客观因素的主观判断是否准确。

可见，回采巷道围岩控制及锚杆支护是一个既古老又新兴的课题。其古老在于人类从事该领域研究的历史已相当久远，且许多原理及方法已被认识和掌握；其新兴在于该领域仍有许多未知现象及规律有待人们去探索和发现，包括已有的技术及理论的进

一步发展和完善、新技术及新理论的开发与研究以及锚杆支护设计方法的改进及适用范围的拓宽等。

本书为回采巷道围岩控制及锚杆支护的应用基础性研究总结。书中以理论分析、现场调研、相似材料模拟实验以及数值模拟计算等为手段，对回采巷道围岩矿压特征及其控制中的锚固结构支护进行了研究，建立了可涵盖回采巷道大变形过程的围岩控制理论以及整体锚固结构支护理论的基本框架。主要内容包括：

(1) 回采巷道围岩结构特征及其力学模型的建立。回采巷道围岩的变形破坏过程极为复杂，掌握其结构特征并建立其力学模型有利于揭示其矿压显现规律，为建立正确的围岩控制理论准备条件。

(2) 回采巷道围岩的矿压显现特征研究。由于受煤层赋存条件的限制，回采巷道与永久性巷道有所不同，其位置及围岩条件很大程度上具有不可选择性，故稳定性条件往往较差，而且还要受到工作面开采的剧烈影响，因此，其矿压显现规律具有突出的复杂性。本书以岩石力学的基本理论为依据，运用岩层控制中的关键层理论及砌体梁理论等对回采巷道在整个服务期间所产生的应力、变形、位移及破坏等矿压显现的力学机制进行系统分析，为掌握合理的巷道围岩控制原理奠定基础。

(3) 回采巷道围岩控制理论研究。以回采巷道围岩矿压显现的一般规律为基础，分析巷道变形、破坏及失稳全过程中的支护—围岩相互作用规律及其稳定性特征，并对常用支护的结构特性及其支护效果进行分析，指出其存在的缺陷及局限性，从而探讨回采巷道围岩控制应该遵循的基本原则以及合理的巷道支护应该具备的基本要素。

(4) 锚杆作用机理研究。运用固体力学中的基本原理分析锚杆各种作用力的产生机理，运用数值模拟方法研究端部粘结式锚固以及全长粘结式锚固锚杆的作用力分布特征，应用岩石力学理论分析不同锚固形式所形成的锚固体的力学性质的改善效果，从而揭示锚杆作用的力学本质。

(5) 锚固体的结构效应。运用数值分析方法对不同锚固结构处于弹塑性稳定状态时的力学效应进行分析,并通过相互间的对比分析以及与无支护巷道的对比分析,研究不同锚固结构支护的作用效果差异。

(6) 锚固结构综合研究。分析不同锚杆布置方式所形成的锚固体的结构特征,运用相似材料模拟方法研究锚固结构以及在锚固结构支护作用下巷道围岩的变形状态、强度破坏及工程失稳全过程的本质规律,进而揭示锚固结构与其外部围岩之间的相互作用关系及其所形成的平衡状态特征,建立锚固结构—巷道围岩共同作用的平衡理论,为回采巷道围岩控制中锚杆支护技术的工程应用提供理论依据。

本书是在作者的博士论文以及近年来的研究工作基础上完成的。期间得到了导师钱鸣高院士、康立勋教授以及侯朝炯教授、靳钟铭教授、贾喜荣教授、赵阳升教授、段康廉教授、田取珍教授等的悉心指导。值此书出版之际,谨向两位导师及各位专家学者致以崇高的敬意和诚挚的感谢。写作中参阅了大量的文献资料,谨向有关作者表示由衷的谢意。

本书的主要研究内容是在山西省自然科学基金的资助下完成的,在此,谨向有关部门及人士表示衷心感谢。

本书的出版得到了太原理工大学矿业工程学院的资助,在此深表感谢。

本书受诸多因素的影响,书中不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2004年元月

目 录

第一章 绪 论	1
第二章 回采巷道围岩控制及锚杆支护的基本理论	14
第一节 回采巷道围岩控制原理	14
第二节 锚杆支护的基本理论	17
第三章 回采巷道围岩结构特征及其力学模型的建立	24
第一节 回采巷道围岩赋存特征	24
第二节 回采巷道围岩边界条件的确定	26
第三节 回采巷道围岩结构特征	28
第四节 回采巷道围岩力学模型的建立	36
第四章 回采巷道矿压特征	47
第一节 煤体—煤体回采巷道矿压特征	47
第二节 煤体—煤柱巷道矿压特征	64
第三节 煤体—采空区（小煤柱）巷道矿压特征	66
第四节 回采巷道围岩大变形特征分析	71
第五节 层状顶板的变形特征	76
第六节 小 结	83
第五章 回采巷道围岩控制原理	85
第一节 支护与围岩共同承载机理分析	85
第二节 回采巷道围岩阶段性稳定特征	90
第三节 回采巷道支护原则	91

第四节	普通支护条件下回采巷道围岩 稳定性特征	93
第五节	普通锚杆支护条件下回采巷道 稳定性特征	95
第六节	小 结	100
第六章	锚杆作用的力学机制	102
第一节	锚杆的作用力	102
第二节	锚杆的作用力对锚固体力学性质的影响	112
第三节	锚固方式的优化选择	116
第四节	小 结	117
第七章	锚固体的结构效应	119
第一节	分析模型的建立	119
第二节	应力分析	120
第三节	变形分析	133
第四节	小 结	139
第八章	回采巷道锚固结构支护稳定性物理模拟 综合研究	141
第一节	研究方法	141
第二节	无支护巷道围岩的稳定性特征	145
第三节	普通锚固结构的稳定性	151
第四节	框形整体锚固结构的稳定性	158
第五节	拱形整体锚固结构的稳定性	166
第六节	小 结	174
第九章	锚固结构与围岩耦合作用分析	176
第一节	锚固结构的变形特性	176
第二节	锚固结构的稳定性特征	180

第三节	锚固结构中锚杆的作用机理·····	183
第四节	锚固结构与围岩的相互作用特征·····	185
第五节	锚固结构支护的适用性·····	187
第六节	锚固结构支护的设计原则·····	188
第七节	小 结·····	195
第十章	主要结论 ·····	197
	主要参考文献 ·····	201

第一章 绪 论

一、引 言

煤炭是我国的主要能源，也是重要的化工原料。建国以来，在我国的一次性能源结构中煤炭所占的比重一直在 70% 以上。火力发电、金属冶炼、交通运输、化工生产乃至人民生活的方方面面，无一不与煤炭生产密切相关。煤炭被誉为工业的食粮，煤炭工业在我国国民经济中占有举足轻重的作用。然而，我国的煤炭生产多采用井工开采，巷道总量长达约 3 万 km，是一项浩大的地下工程。由于巷道所处地层条件复杂多样，围岩性质千差万别，且多数巷道在服务年限内还要经受采动的强烈影响，所以，煤矿巷道的掘进与维护存在着难度大、安全性差、成本高等问题，而其中的支护费用往往高达巷道工程总费用的 50% 以上。因此，探索正确的巷道支护理论、选择安全可靠的支护方法、确定经济合理的支护参数以及实用高效的施工工艺成了长期以来人们所致力解决的一个重大理论及技术课题。

受地面结构工程理论的影响，早期巷道围岩控制理论认为，围岩是被维护的对象，支架是承载的结构。巷道挖掘以后，围岩中产生应力重新分布，在此过程中伴随有围岩变形、破裂及松动等现象的发生，而这种破裂、松动岩体的重量须由支架全部承担，且除此之外，支架还被认为应具有阻止围岩产生变形的功能。这种观点一度促使支架朝着大刚度、大支护强度的方向发展，加之支架多为巷内支架，致使支架具有结构笨重、支护迟缓、工程量大、劳动强度高、成本高昂且支护效果难以尽遂人愿等不足之处。

随着人们对巷道围岩受力变形规律认识的逐步深入，近来巷

道围岩已不再被认为是纯粹的施载体。现代支护理论认为，巷道围岩支护结构是一种“支架—围岩”结构，即围岩既是施载体又是承载体，在岩体工程中支架与围岩应形成一个有机的整体并共同承载。支护结构的刚度也不是越大越好，而是应具有一定的可缩性，允许围岩产生一定量的变形，以使支承压力向围岩深部转移，从而减轻支护结构所承受的载荷，在围岩发生强度破坏之前，围岩压力与围岩变形呈反变关系。然而，回采巷道有其特殊性，在服务期间围岩大多要发生强度破坏并产生较大的松动变形，但目前尚无能够涵盖松动变形阶段的巷道围岩控制理论。

为了实现支护与围岩共同承载，锚杆支护技术不断被发展完善，在地下工程围岩控制中发挥着越来越重要的作用。锚杆支护是通过锚杆的轴向及横向作用改善围岩的应力状态、提高围岩的整体性以及强度参数，并利用锚杆自身的承载能力对围岩中的危石起到悬吊、楔固等支护作用。大量工程实践表明，锚杆支护具有用料节省、巷道断面利用率高、支护及时、劳动强度小、经济效益高以及对巷道围岩变形的适应性好等许多优越性，因此，受到工程技术人员以及研究工作者的高度重视。近年来锚杆支护技术日益成熟，在煤矿巷道围岩控制中的应用也越来越广泛，尤其是在澳、美、英等锚杆支护技术先进国家，锚杆支护在巷道围岩控制中占有极高的比重，几乎已成为唯一的支护形式。然而，与锚杆支护技术广泛应用的现实极不相称的是人们对很多情况下锚杆作用的机理尚不明确，锚杆支护结构的力学性能（如刚度及强度等参数）还无法确定，锚杆支理论也还不够完善。实际工程中锚杆支护技术的应用能否成功，很大程度上依赖于工程设计人员经验的运用是否合理以及对工程条件等因素的主观判断是否准确。尤其在国內，由于锚杆支护设计尚缺乏完善的理论依据，加之锚杆选材、施工机具、施工工艺及速度、施工质量及管理 etc 配套设备及手段的相对落后，致使锚杆支护在回采巷道尤其是在软岩及全煤巷道等困难条件下的应用受到严重制约。可见，锚杆支护是巷道的一种既古老又新兴的支护方式。其古老在于人类应用

锚杆支护的历史已相当久远，且锚杆支护的许多原理及方法已被认识和掌握；其新兴在于锚杆支护仍有许多未知领域有待人们去探索，包括锚杆支护已有技术及理论的发展和完善，新技术及新理论的开发与研究以及锚杆支护适用范围的拓宽等。

近年来，随着我国煤矿长壁及放顶煤开采技术的推广应用以及开采深度的不断增加，全煤巷道及软岩巷道的数量越来越多，围岩产生破坏松动及大变形的现象也越来越普遍。因此，探索出一种适用于大变形回采巷道的围岩控制理论，并使锚杆支护技术在全煤及软岩巷道中得到普及应用，势必对实现煤炭生产的安全、高产、高效产生巨大的促进作用。

二、回采巷道围岩控制技术及理论研究现状

巷道围岩控制是井工开采与生俱来的问题。我国是世界上从事井工开采最早的国家之一，从早期人们对巷道矿压显现产生朴素认识并开始尝试进行简单支护算起，围岩控制技术及理论的发展已经有了悠久的历史，尤其是经过近半个世纪的快速发展，巷道围岩控制技术及理论在许多领域都取得了重大进展。

围岩性质、围岩应力、围岩控制是决定巷道围岩稳定性的三大要素。材料试验机性能的不断改进尤其是刚性试验机和三轴试验机的问世使人们对围岩的变形性质有了全面的了解，各种强度理论的提出使人们对不同围岩在不同条件下的强度特征有了更加深入的认识。多年来，人们运用理论分析、现场实测、模拟实验、数值计算等方法对巷道围岩因采、掘等开挖工序引起的应力场及位移场的改变规律进行了系统的研究，取得了比较一致的结论，为有效进行回采巷道围岩控制奠定了坚实的基础。支护—围岩共同作用原理的提出更使围岩控制技术及理论产生了质的变化。

回采巷道围岩控制技术已有很长的发展历史，尤其是近 50 年以来，不同形式及内容的实验、实测及研究等非常活跃，并在巷道布置、巷道保护、巷道卸压以及巷道支护与监测等各个方面