

采场围岩 应力与运动

蒋金泉 著



煤炭工业出版社

采场围岩应力与运动

蒋金泉 著

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

内 容 提 要

本书是作者总结近十年来的主要理论与实践成果编写而成的。本书较详尽地论述了采场围岩应力与围岩运动的基本规律,变化规律、预测方法、监测原理和具体的实测结果,以及这些理论和成果在矿山压力控制中的应用。书中系统介绍了采场顶板运动过程、型式、运动参数的变化规律以及预测方法,支承压力及其显现的变化规律与顶板监测机理,各种监测方法与实践,围岩应力分布与变形破坏规律及其预测和监测方法,冲击地压煤层开采的围岩应力控制,承压水上带压开采的原理与设计,解放层的解放范围,采准巷道合理布置与维护等。对采场顶板运动和矿山压力的预测、预报与控制,采区合理布署与巷道矿压控制均具有较高的学术意义和应用价值。

本书可供煤矿生产、设计、科研系统的有关技术人员和矿业院校师生阅读和参考。

采场围岩应力与运动

蒋金泉 著

责任编辑:井光

煤炭工业出版社出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷

新华书店北京发行所

开本787×1092mm¹/₃₂ 印张12¹/₂

字数269千字 印数 1—1,070

1993年12月第1版 1993年12月第1次印刷

ISBN 7-5020-0885-3/TD·820

书号 3650 G0272 定价 15.80元



前 言

《采场围岩应力与运动》是专门为采矿专业技术人员、研究生、大专院校的学生撰写的一本理论与实践方面的参考书。

在煤层中进行掘进和回采后，必然会引起采动空间内围岩应力的重新分布，并产生围岩变形、破坏、冒落及来压等形式的围岩运动。围岩应力与运动的控制和利用是煤炭开采的基本前提和关键环节。为此，采矿领域中矿山压力学科得到了迅速发展。

80年代以前，我国矿山压力的理论研究工作就是紧紧围绕着控制对象——采场围岩应力与运动这一核心问题来展开的，其特点是以在初步实验与分析基础上所建立起来的矿山压力假说为主导，着重建立和完善了梁与拱等结构形式下的有关矿山压力理论，为指导和开展我国矿山压力控制、建立矿山压力学科奠定了基础。80年代以后，数值方法与模型实验等研究方法迅速得到应用，研究队伍的理论基础通过研究生制度很快得到充实，采场围岩应力与运动的研究在深度和广度上产生了飞跃，并逐渐趋于成熟，基本上满足了矿山压力控制的实际需要，基本上从梁发展到板、从理想固支发展到弹性基础、从平面发展到空间、从近水平发展到大倾角、从定性描述发展到定量决策。为此，在煤炭工业出版社的大力支持和鼓励下，作者以其研究成果为主线撰写了本书，在理论上基本达到了板、弹性基础、三维、大倾角、定量的

ABA25/07

深度；在系统性上涉及围岩运动的基本规律、变化规律、预测方法、监测预报、控制原理及实践成果，期望它对我国矿山压力控制和研究有所帮助。

本书的编写出版，得到了许多热心同志的支持。中国科学院学部委员宋振骐教授等多年来从研究思想上给予启迪，山东矿业学院矿山压力研究所的宋扬教授和谭云亮讲师提供了部分实测资料，山东矿业学院矿山压力研究所也为这些成果的取得创造了良好的研究条件。在此向他们一并表示感谢。

书中不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

1992年11月

目 录

前 言

第一章 概述	1
第一节 采场围岩应力与运动的内容和意义	1
第二节 采场围岩应力和运动的研究和应用	4
第二章 采场顶板运动规律	9
第一节 顶板运动的基本规律	9
第二节 平面问题的顶板初次运动过程	22
第三节 平面问题的顶板周期运动	35
第四节 空间问题的老顶断裂型式和过程	42
第三章 采场顶板运动参数及变化规律	55
第一节 顶板自身稳定性参数	55
第二节 老顶运动的结构参数	61
第三节 老顶来压步距与力学环境的关系	67
第四节 倾斜煤层采场老顶初次来压步距	74
第四章 支承压力与支承压力显现的变化规律	93
第一节 支承压力及其显现的分布	93
第二节 支承压力的变化规律	121
第三节 支承压力显现的变化规律	127
第五章 采场顶板运动的监测预报	148
第一节 概述	148
第二节 位移法监测预报	150
第三节 压力法监测预报	189
第四节 计算机监测系统监测预报	197

第五节	地音法监测预报	209
第六章	采场围岩应力分布	218
第一节	层面支承压力分布	218
第二节	采场底板应力分布规律	232
第三节	采场顶板应力分布规律	243
第四节	采场围岩应力分区及其预测	249
第七章	安全开采的矿山压力问题	258
第一节	采场底板岩层活动与突水	258
第二节	开采解放层的解放范围	286
第三节	冲击地压煤层的围岩应力控制	301
第八章	受采动影响的巷道合理位置与维护	346
第一节	回采巷道开掘的合理位置和时间	346
第二节	底板巷道合理位置与维护	359
参考文献		380

第一章 概 述

本章将简要叙述采场围岩应力与运动的基本概念，围岩应力与矿山压力两个概念的联系，围岩运动和应力分布研究的内容、意义、发展历史及近期研究成果。

第一节 采场围岩应力与运动的内容和意义

一、基本概念

在地下煤、岩体内开掘巷道或在煤层中进行回采，称为对煤、岩体的采动。采动所形成的巷道、回采工作面等作业空间为采动空间。地下煤、岩体在未受到采动影响以前，处于原岩应力平衡状态。而采动破坏了这种原始平衡，并引起采动空间周围的应力重新分布，甚至使采动空间周围的煤、岩体产生变形、破坏和冒落，直至重新达到相对平衡，在采动空间周围形成一个新的应力场(变形、位移和破坏场)。从力学角度广义讲，采动空间周围应力重新分布范围内的煤、岩体称为围岩；而从狭义上讲，采动空间周围的煤、岩体称为围岩。由此，有采场围岩和巷道围岩之分，受采动影响的巷道围岩又包含在采场围岩之中。

围岩运动是指采场或巷道周围顶板、底板、煤体的变形、移动和破坏等力学现象，围岩应力是指采场或巷道周围岩体内重新分布的应力，它是促使围岩运动的根源。本书采用围岩应力的概念是出于人们对矿山压力和矿山压力显现(以下简称矿压显现)两名词有着不同的观点、定义和使用

习惯。

我们将采动后重新分布于围岩中的力定义为矿山压力，即围岩应力就是矿山压力；把在矿山压力作用下通过围岩运动与支护体受力等形式表现出来的矿山压力现象定义为矿压显现，其基本形式有二：一是围岩运动现象，即围岩变形、移动、破坏、冒落、煤(岩)突出、地表塌陷等；一是支护受力现象，即支护体受力、变形(下缩)、损坏等。这种观点强调矿山压力与矿压显现的区别，认为矿山压力的存在是客观的、绝对的，一经采动就存在于采动空间的周围岩体中；而矿压显现是矿山压力与围岩和支护体共同作用的结果，是相对的、有条件的。围岩的明显运动是有条件的，只有当矿山压力达到或超过围岩强度以后才会发生；而支护体上的显现不仅取决于围岩运动的程度，而且与支护体自身的力学特性有关。

另一种观点同样分为矿山压力和矿压显现两个概念，不同之处是将支护体受力与围岩应力一起划为矿山压力。还有一部分人实际上不分矿山压力和矿压显现两个概念，以至用支架载荷、围岩移近量和移近速度来作为衡量矿山压力的指标^[1]。

作者认为，将绝对存在于采动空间围岩中的力定义为矿山压力，由其作用而引起的、相对的力学现象定义为矿压显现，划分成这样两个概念在采矿工程中是十分必要和有利的，否则容易引起混乱。例如，在围岩稳定的裸体巷道或刀柱法开采的工作面，围岩无需支护便可保持自身的稳定，即使采用一定的支护，则支护受力和变形也是很小的。也就是说，较大的矿山压力绝对存在于围岩中，只是矿压显现程度不明显而已。如果把支架受力划为矿山压力或不分矿山压力

与矿压显现，就会错误地认为这些工程的矿山压力小，而实际上只是矿山压力没有明显显现出来而已。再如，回采工作面前方支承压力分布通常是高峰在煤壁前方的单峰曲线，压力高峰在深入煤壁前方2~3倍的采高处，煤壁附近则应力降低；而相应的煤体压缩变形或回采巷道围岩移近、支架受力与变形等却是距煤壁越近越大，在煤壁处显现最为明显〔2〕。矿山压力与矿压显现的分布在此条件下是不一致的，压力显现最强烈的部位不一定是矿山压力的高峰位置。因此，如果把支架受力划为矿压显现，或不分矿山压力与矿压显现，就说不清矿山压力哪里大、哪里小。据此，应当从矿山压力存在的绝对性和矿压显现的相对性来明确定义和区分矿山压力和矿压显现两个概念。

二、内容和意义

在采场和回采巷道周围，由于围岩应力的作用促使围岩发生变形、破坏和移动，从而在工作面出现顶板冒落与来压、顶底板移近、支架受载和下缩等矿压显现，而在回采巷道则出现围岩移动与破碎、支架受载与折损等矿压显现，同样，在采动空间周围出现的煤与瓦斯突出、底板破坏与突水、冲击地压等现象也是矿压显现的特殊形式。矿压显现给开采工作带来了不同程度的危害，为了维护采动空间，保证开采工作安全顺利地进行，我们采取的支护或加固等必要的技术措施就是针对围岩运动与围岩应力的。同样，人们可以利用围岩应力分布与围岩运动的规律，达到减轻、避免或利用采动影响的目的。例如，依据围岩应力和运动规律，进行合理的开拓部署和开采设计，可以达到使巷道和工作面卸压、防止煤和瓦斯突出和冲击地压、实现承压水上安全开采等目的。因此，采场围岩运动与围岩应力是采动危害的根

源，是矿压控制和利用的对象。研究围岩运动和应力分布的基本规律、变化规律、预测方法和监测预报方法，才能有效地控制和利用矿山压力，并达到为生产服务的目的。

采场围岩运动和应力分布研究的内容和意义，可以归纳成以下几方面：

(1) 研究采场顶板的力学状态、破坏和运动的机理、运动的基本规律和变化规律，揭示影响采场矿压显现的直接顶和老顶组成规律及其确定方法，提出顶板运动参数的计算预测方法，建立采场顶板结构模型，为采场顶板控制提供理论基础。

(2) 研究采场推进和顶板运动过程中支承压力分布及显现的变化规律和工作面矿压显现的变化规律，揭示顶板来压监测预报的机理，试验探索顶板来压预测预报方法和预报规律，为采场顶板管理及时提供可靠的决策依据。

(3) 研究采场围岩应力分布的基本规律和变化规律、应力分布特征的预测和监测确定方法，提供采场周围采动影响问题（如巷道布置和开采解放层等）的设计、决策依据和方法。

• (4) 研究采场围岩的变形和破坏规律，进行煤层群的合理开采设计、承压水上安全开采设计。

(5) 根据顶板运动和支承压力分布及其变化的规律，预测重力型冲击地压可能发生的危险区域和时间，进行冲击地压危险煤层的开采设计。

第二节 采场围岩应力和运动的研究和应用

采场围岩应力分布、围岩运动的规律及其预测是矿山压力控制的基础，是解释各种矿压显现、揭示矿压显现规律的

依据。其研究和应用的深入和发展,使矿山压力控制水平从主要依靠经验和统计规律决策逐步上升到针对具体煤层条件进行科学定量的决策阶段,从而减少和避免了矿山压力控制的盲目性。因此,采场围岩运动及其预测和应力分布规律及其应用的研究过程,实际上是人们了解和认识自己的控制对象的过程,并一直是人们最为重视的矿山压力课题。特别是在80年代以后,这项课题的研究工作取得了重要突破,在理论和实践上都发展到了新的水平。

一、采场顶板运动和结构的研究

在采场顶板运动和结构研究方面,人们早就发现采场上方存在着某种结构,并根据在不同煤层条件下进行开采的经验,提出了相应的掩护结构模型,以用于解释开采过程中的矿山压力现象,设计和选择维护工作空间的支护型式及必需的反力,从而产生了各种假说。其中,具有一定历史地位和代表性的假说有自然平衡拱假说、压力拱假说、悬臂梁假说、顶生裂隙梁假说、铰接岩梁假说。我国矿山压力研究工作者经过多年的研究和实践,逐步形成了具有我国特色的砌体梁理论体系和传递岩梁理论体系,在解决我国的煤矿矿山压力预测和控制问题中发挥了重要作用,受到国内学术界和生产现场的高度重视,并在国际上具有一定的影响。

80年代,我国采场顶板运动和结构的研究得到飞跃发展,并取得了比较突出的成果。在理论研究方面,以原有固支梁的基本认识为基础,发展到建立顶板的弹性基础梁、弹性薄板、弹性基础板等理论模型,以揭示顶板运动的机理、过程和型式,明确了顶板运动随地质条件(顶板条件、煤层及底板条件、采深、煤层倾角)、边界条件、工作面长度等因素而变化的规律,并配合进行了顶板运动的非线性、三维

有限元数值计算和板或三维相似模拟，进一步证实了理论分析成果，初步形成了采场顶板运动的板结构理论，使我国采场矿山压力理论发展到新的水平，这方面的有关成果已经达到比较接近实际的程度。

二、采场顶板运动预测的研究和应用

对采场矿压显现有显著影响的直接顶和老顶是顶板控制的对象，其组成和运动参数的预测是顶板控制设计的依据。直接顶和老顶组成的预测可以根据传递岩梁的组合运动原理进行；其运动参数的预测，在运用固支梁和组合梁计算方法的基础上，目前已发展到运用弹性基础与板结构的理论进行预测，并能够考虑采场顶板所处的力学环境、边界条件、断层影响、工作面长度、倾角等因素，以达到从理论上得到接近实际的预测。

三、采场顶板运动监测预报的研究和应用

采场顶板运动监测预报为顶板管理提供决策依据。我国矿压工作者研究和应用的监测预报方法主要有超前巷道位移法、超前巷道压力法、煤粉粒度法等。其中山东矿业学院研究的超前巷道位移法得到广泛的应用，取得了较好的预报效果，特别是在坚硬顶板采场及改刀柱为长壁采煤中得到了广泛的应用，并发挥了巨大的作用。再如苏联古柯夫煤炭联合企业十月革命五十周年矿井，106个回采工作面应用煤体密度法可以系统和可靠地预报出老顶来压，取得了较好的效果。

“七五”期间，我国采场顶板运动预报机理和监测系统的研究取得重大进展，比较全面地揭示了老顶断裂过程中采场周围的支承压力显现规律，能够很好地解释各种预报方法的机理。山东矿业学院主持研制和推广的煤矿顶板来压计算机监测预报系统（包括系统硬件、预报方法、预报软件），实现

了顶板运动的地面自动监测预报,经鉴定和国家验收认为达到了国际先进水平。另外,还初步探索了地音法监测预报机理和规律,以及应用灰色系统理论研究了采场顶板动态灰色预测方法。

四、采场围岩应力分布的研究和应用

采场围岩应力包括层面支承压力和顶、底板岩层应力,其分布规律、预测和监测方法是开采解放层设计、巷道合理位置选择与维护、冲击地压预测和防治等矿压控制问题的依据。国内外学者对支承压力分布规律进行了大量的理论研究工作,并取得了一定的成果。在此基础上,我们按照煤体的全应力-应变本构关系,研究出了符合煤体力学特性的支承压力分布规律。随着现场实测技术水平的提高和岩石力学问题的三维相似模拟实验和数值计算模拟方法的发展和应用,还进行了采场推进过程中支承压力分布变化规律的研究,提出了内外压力区的理论,揭示出开采层面上支承压力的分布规律、顶板岩层和底板岩层应力分布及其随煤层倾角的变化规律,建立了采场围岩应力分布特征的预测方法和现场监测方法,可以直接为采场周围的矿压控制问题提供设计依据。

根据支承压力分布和变化的特征,研究了冲击地压发生区域和发生时间的规律性,并提出了冲击地压危险煤层的围岩应力控制原理和方法,以及解决了开采解放层防治煤和瓦斯突出的解放范围等问题。

五、采场底板移动和破坏的研究和应用

采场底板移动和破坏是承压水上安全开采、底板巷道合理布置与维护等矿山压力问题的设计依据。随着岩体探测技术、岩石力学相似模拟实验和数值计算模拟方法的不断发展与应用,采场围岩移动和破坏规律逐步被人们所认识。我们

根据理论研究成果和现场实测资料，提出了采场底板移动和破坏规律及分区，揭示了采场底板突水机理，并将其应用于巷道合理位置选择和煤层群开采的矿压控制设计之中，已取得了较好的效果。

六、受采动影响的巷道合理布置与维护研究

对于受采动影响的巷道矿压控制问题，人们一直十分重视其矿压显现规律和支护技术的研究和应用。近年来，这一研究和应用已取得了突出的进展，推动了我国巷道矿压控制技术不断发展。我们研究的着重点在于如何使巷道主动减轻采动影响，并通过选择合理的开掘位置和时间、合理的维护方法和参数，把围岩运动和矿山压力的作用降低到最低限度。为此，根据采场围岩运动和围岩应力分布及其变化规律，对巷道围岩的结构和应力分布变化过程进行分析，以确定其开掘的合理位置和时间；揭示了底板巷道围岩变形和破坏的机理和规律，提供了确定其合理位置的方法及维护方式。

第二章 采场顶板运动规律

第一节 顶板运动的基本规律

回采工作面从开切眼开始推进以后，顶板暴露面积逐渐增大，顶板岩层应力随之逐渐上升，并伴随着发生一系列的顶板岩层变形、破坏、冒落、形成某种暂时平衡结构等一系列运动现象。顶板各岩层由于距煤层的距离不同、各自的岩性和厚度也不同，因而，其运动发展的程度和对采场的影响也就会有明显的差异。只有认清采场顶板运动的基本规律，才能确定显著影响采场矿压显现的顶板岩层组成、预测顶板运动参数、开展顶板运动监测，从而实现采场支护设计的科学化和定量化。

一、顶板岩层纵向离层和组合运动

此处的纵向是指岩层的厚度方向。随着采场的推进，顶板岩层在自重作用下发生弯曲沉降，必然在各层面或软弱夹层上产生剪应力，如图2-1所示。又由于各岩层变形特性的差异，在某些层面或软弱夹层上还会出现纵向拉应力。沉积岩层的层面或软弱夹层的摩擦角较小，粘接力更小，而其受到的剪应力和拉应力随暴露面积的增加而增大。因此，在采场推进过程中，各层面将陆续发生剪切破坏或拉破坏。在此基础上，根据岩层变形特征（或弯曲刚度）的差异，发生离层和组合运动。在平面应变条件下，无论两端支承条件如何，顶板岩层在自重作用下的最大挠度 W_{max} 为：

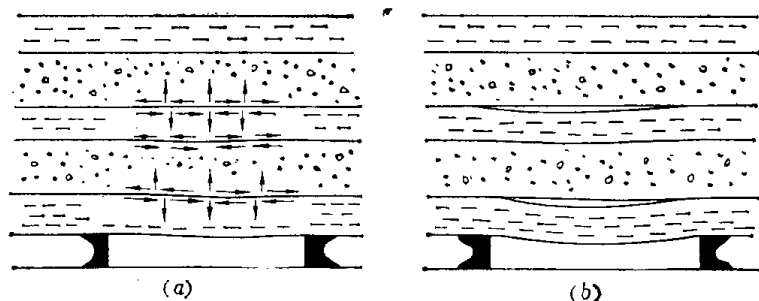


图 2-1 顶板离层和组合运动
a—层面拉应力和剪应力；b—离层和组合

$$W_{\max} = \eta \frac{\gamma L^4}{E M^2}, \text{ m} \quad (2-1)$$

式中 η ——两端支承条件系数。如两端固支或简支时分别为1/32、5/32；

L ——顶板悬跨度，m；

M ——顶板岩层厚度，m；

E ——顶板岩层平面应变弹性模量，Pa；

γ ——顶板岩层容重，N/m³。

若上下两岩层的挠度分别用 W_s 、 W_x 表示，两岩层离层或组合运动的判据为：当 $W_x > W_s$ ，下岩层与上岩层离层，分别运动；当 $W_s \geq W_x$ ，上岩层随下岩层同时运动，组合成同一岩梁。由于各岩层的容重、悬跨度和支承条件是基本一致的，岩层之间的组合运动情况主要由各自的弯曲刚度 EM^2 来决定。即上部弯曲刚度小的软岩层将随下部弯曲刚度大的硬岩层组合成岩梁而同时运动，下部软岩层将与其上部硬岩层离层而分别运动。事实上，依据顶板柱状图所提供的岩层