

KEY STRATA THEORY IN GROUND CONTROL

岩层控制的关键层理论

钱鸣高 缪协兴 许家林 茅献彪 著



中国矿业大学出版社

国家自然科学基金项目资助(59674011,59734090)

岩层控制的关键层理论

钱鸣高 缪协兴 许家林 茅献彪 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统总结了岩层控制中的关键层理论。内容包括:关键层理论的提出、意义、基本概念及判别方法;在理论上阐明了关键层上的载荷分布规律、关键层的破断规律及其复合效应;同时也分析了关键层破断后形成的“砌体梁”结构力学模型以及关键层运动对采场矿压显现、覆岩移动与地表沉陷及采动裂隙场分布的影响;最后叙述了关键层理论在开采沉陷控制、卸压瓦斯抽放及底板突水防治等方面的工程应用。

本书可供从事采矿工程、矿山安全及岩石力学与工程等专业的科技工作者、研究生和本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

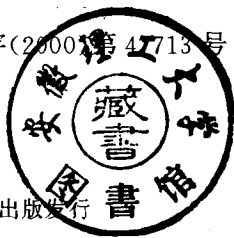
岩层控制的关键层理论/钱鸣高,缪协兴,许家林,茅献彪著. —徐州:中国矿业大学出版社,2000.10

ISBN 7-81070-254-8

I. 岩... II. ①钱... ②缪... ③许... ④茅...

III. 煤矿-岩层移动-控制-研究 IV. TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 4713 号



中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

中国矿业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 850×1168 1/32 印张 8.5 字数 217 千字

2000 年 10 月第 1 版 2000 年 10 月第 1 次印刷

印数 1~2000 册 定价 28.00 元

前 言

众所周知,岩层控制是采矿工程学科的心理理论与关键技术之一。解放前,我们国家在这方面的研究工作几近空白。解放后,由于我国采矿业的不断发展,至 90 年代煤炭工业产量已跃居世界第一。综采工作面,尤其是综采放顶煤工作面的单产水平也进入世界前列。在这几十年中,中国矿业大学在煤炭工业部及学校领导的关心下,在岩层控制的研究领域,从理论到实践等方面都取得了长足的进展。以中国工程院院士钱鸣高教授为首的科研群体在前人研究的基础上,于 60 年代形成上覆岩层活动中的“砌体梁”力学模型雏形,后于 70 年代末在孔庄矿采动上覆岩层活动观测中得到证实,于 80 年代初正式提出了采场上覆岩层活动规律中老顶岩层破断后的“砌体梁”力学模型以及老顶岩层“板”的“O—X”型破断规律等科研成果,在国内外产生了较大的影响。该科研成果的提出为当时在我国煤矿使用与推广液压支架,实现工作面的综合机械化以及老顶来压的预测预报奠定了理论基础。随着对岩层控制科学研究的不断深入以及为了解决岩层活动中更为广泛的问题,仅仅研究老顶岩层的稳定、破断及破断岩块形成结构等问题已显出其局限性。由此,进一步提出了岩层控制中的“关键层”理论,它显然是老顶岩层“砌体梁”理论的进一步发展,对开采后岩层活动的现象与规律将作出更为全面与深入的解释。岩层控制的关键层理论对采场矿山压力的解释也是一重要补充,尤其是对采动过程中整个上覆岩层内节理裂隙与离层的形成、发育及分布将作出更为全面的解释。这些内容对层状矿体开采过程中的离层区注浆、瓦斯抽

放以及突水防治等工程具有重要参考价值。

鉴于本书是钱鸣高教授负责的国家自然科学基金课题“层状岩体中的关键层理论研究(项目编号:59674011)”及煤炭科学基金课题(项目编号:95 采 10104)的一部分,因此撰稿人员仅为课题组的缪协兴教授、许家林副教授及茅献彪副教授三人。研究内容也得到了国家自然科学基金重点课题“厚煤层全高采方法基础研究(项目编号:59734090)”的资助。另外,第10章在论述采场底板突水防治中也涉及到关键层理论,而其工作主要是由黎良杰博士在论文中完成的,因而,将其有关内容收录于此。事实上,本书有关的部分前期研究工作还涉及到李鸿昌教授、赵国景教授、朱德仁教授以及刘双跃、王作棠、何富连、刘长友、曹胜根等博士的辛勤劳动。

由于本书编写时间仓促,错误在所难免,恳切希望有关专家与读者批评与指正。

作 者

2000 年 10 月

目 录

前言	(1)
1 绪论	(1)
1.1 岩层移动及控制研究的任务	(1)
1.2 岩层移动及控制研究的概况	(4)
1.3 采场围岩控制理论与实践的简要回顾	(11)
2 关键层理论的基本概念	(17)
2.1 关键层的定义与特征	(17)
2.2 关键层的一般力学分析	(18)
2.3 关键层的判别方法	(28)
2.4 关键层的判别程序与实例	(31)
3 关键层的载荷分布与破断规律	(35)
3.1 关键层上的载荷分布规律	(35)
3.2 关键层上载荷的动态变化规律	(43)
3.3 关键层的破断规律	(53)
3.4 关键层破断对支承压力分布的影响	(59)
4 关键层的复合效应	(63)
4.1 关键层复合效应的基本概念	(63)
4.2 关键层复合效应对采场矿压的影响	(65)

4.3	关键层复合效应对采场来压步距的影响	(67)
5	砌体梁结构的力学分析	(74)
5.1	砌体梁全结构模型	(74)
5.2	砌体梁全结构的力学分析	(77)
5.3	砌体梁的形态与受力的理论解	(83)
5.4	砌体梁排列的拟合曲线	(85)
5.5	砌体梁结构中关键块的受力分析	(87)
5.6	砌体梁中关键块的稳定性分析	(91)
5.7	砌体梁结构的“S-R”稳定理论	(94)
6	关键层运动对采场矿压的影响	(96)
6.1	复合关键层运动对来压的影响	(96)
6.2	非复合关键层运动对来压的影响	(100)
6.3	主关键层运动对来压的影响	(106)
7	覆岩运动中的裂隙场分布规律	(111)
7.1	采动裂隙定量描述方法	(111)
7.2	覆岩离层动态分布规律	(119)
7.3	覆岩“导水、导气”裂隙的动态分布规律	(134)
8	关键层理论在覆岩运动控制中的应用	(136)
8.1	关键层对覆岩运动的控制作用	(136)
8.2	关键层与表土层对地表沉陷的耦合作用	(145)
8.3	用关键层理论指导覆岩移动模拟研究	(150)
8.4	用关键层理论指导离层注浆减沉设计	(157)
8.5	用关键层理论指导条带开采设计	(166)

9 关键层理论在卸压瓦斯抽放中的应用	(173)
9.1 卸压瓦斯抽放“O”形圈理论的建立	(173)
9.2 地面钻井抽放上覆远距离卸压煤层气 试验研究	(176)
9.3 综放面邻近层卸压瓦斯高抽巷布置的优化	(189)
 10 关键层理论在采场底板突水防治中的应用	 (198)
10.1 采场底板突水事故调查与分析	(198)
10.2 采场底板突水的关键层力学模型与分析	(209)
10.3 无断层底板关键层的破断与突水分析	(219)
10.4 有断层底板关键层的破断与突水分析	(233)
10.5 对采场底板突水现象的几点新认识	(253)
 参考文献	 (257)

1 绪 论

岩层移动与控制理论是采矿学科的一门重要分支,随着国民经济的快速发展,以及人们对生产安全与环境保护要求越来越高,这门学科分支迎来了蓬勃的发展生机,岩层控制的关键层理论就属此范畴。

1.1 岩层移动及控制研究的任务

随着地下资源的采出,围岩必将产生变形及破坏。采动岩体对工程及环境的损害包括:

(1) 危及井下工作面人员的安全及设备的正常运行。井下常见的灾害性事故有:顶板岩石垮落、煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸、矿井突水等。

(2) 岩层移动裂隙造成岩体内水与瓦斯的运移。尤其在干旱地区,地下开采对含水岩层的破坏,加剧了矿区水土流失和土地沙化灾害。

(3) 开采沉陷毁坏地面建筑物、耕地及环境。煤矿开采对地面造成的损害有:房屋、桥梁、道路的开裂与倒塌,河流干涸,耕地荒芜等。

上述灾害,均由岩体受开挖损伤和破坏引起。无论采场底板突水或顶板垮落,还是岩层移动和地表沉陷,其力学研究对象都是一个——采动岩体。长期以来,采矿研究工作者对此投入了很大的研究力量。由于受各自关注的问题方面的不同,以及研究手段和方法

的差异,形成了几个相对独立的学科研究领域和体系。例如,矿山压力学科和开采沉陷学科。矿山压力学科偏重对采动岩体行为的力学机理分析,而开采沉陷学科偏重于对采动岩体行为的数理统计分析与描述。这些研究都取得了相当丰硕的成果,主要表现在对靠近工作面的下部岩体活动规律认识和对地表沉陷形态分布特征的描述方面。但是,采场围岩活动和地表沉陷是由于煤炭采出后岩体损伤和破坏变化的结果,掌握整个采动岩体的活动规律,特别是岩体内部岩层的活动规律,才是解决采动岩体灾害的关键。

对于采动岩体的活动规律,需要重视的研究方面有:

(1) 控制采动岩体活动的主要因素分析。从十分复杂的采动岩体活动中寻找起控制作用的岩层,建立采动岩体的结构力学模型,由此展开对采场矿压、采场突水、岩层移动及地表沉陷规律的系统描述。

(2) 采动岩体裂隙动态分布规律研究。从采动岩体裂隙由下向上的扩展、闭合演化过程中,掌握其动态变化规律,确定其导水、导气通道,为瓦斯抽放、减沉注浆及治水工程提供理论依据。

(3) 岩层移动边界线分析。岩层移动边界线包括:纵向破断边界线;纵向移动边界线;横向破断边界线;横向裂隙边界线等等。由采动岩体的变形、破断力学机理分析入手,描述清楚其变形、破断的纵横几何形态分界线,为采场矿压与地表沉陷预计提供定量依据。

上述问题的深入研究,必将有力推动岩层控制理论的发展。

由于成岩时间及矿物成分不同,煤系地层形成了厚度不等、强度不同的多层岩层,总体上分为第四纪表土层与基岩两部分。表土层段多为松散沙土质,与基岩段相比具有不同的变形移动特性,研究岩层移动应将基岩段与表土层段区别开来处理。基岩段是由厚度不等、软硬不同的岩层相间组成,其中一层至数层厚硬岩层在整个覆岩层的移动过程中起着控制作用。如大同矿区直接赋存于煤

层上的厚硬砂岩,新汶华丰矿靠近地表的巨厚砾岩层,一旦它们破断垮落,不仅会造成采场强烈的矿压显现,而且其上部岩层直至地表还会随之同步垮落下沉。因此,为了研究清楚岩层变形、破断、移动的动态过程,关键在于要分析清楚岩层中起主要控制作用的厚硬岩层的变形破断运动规律及其运动过程中与上下部软硬岩层间相互耦合的作用关系。这就是建立并发展采动岩体活动的关键层理论的思路。

据统计,目前我国仅统配煤矿的生产矿井“三下”(建筑物下、铁路下、水体下)压煤就达 137.9 亿 t,可供 10 个年产 1000 万 t 的矿井开采 140 年,其中一些老矿区随着煤炭资源的枯竭,开采“三下”压煤势在必行。

近 40 年来,我国共发生矿井突水事故 2000 余次,2000 余人丧生,直接经济损失高达 40 多亿元。据统计,我国国有煤矿中半数具有突水危险性,并且,突水危险越来越严重。煤矿瓦斯爆炸,煤与瓦斯突出一直是我国煤炭开采所面临的重大灾害。另一方面,随着煤炭开采,我国每年向大气排放的甲烷气体约 $77 \times 10^9 \text{ m}^3$,占世界煤矿瓦斯排放量的 32.5%,造成严重环境污染。而有人估计我国埋深在 2000 m 以内的甲烷资源量可达 14 万亿 m^3 ,大致与天然气相当,极具开采价值。岩层移动与控制理论发展到今日,迫切需要建立对岩层由下往上移动过程的整体认识,并建立起岩层活动控制的关键层理论;需要建立起地表沉陷与岩层移动的内在联系,以指导地表沉陷的预计与控制;需要掌握上覆岩层移动过程中的裂隙场分布规律,以指导覆岩离层注浆减沉与卸压、瓦斯抽放钻孔布置的优化;需要分析清楚岩层变形、破断中突水“通道”的形成机理,为采场突水灾害防治提供新的理论方法和技术途径。因此,发展岩层控制理论,对采矿工程来说具有重大的实践意义。

I — 冒落帶; II — 裂縫帶; III — 彎曲下沉帶

上岩层移动分为垮落带、断裂带、整体弯曲下沉带。

另一方面,测量工作者广泛开展了地表沉陷的实测与统计工作,掌握了缓斜、倾斜、急斜煤层开采后地表沉陷的分布形态特征,提出了多种地表沉陷预测方法,如典型曲线法、影响函数法、概率积分法。其中以概率积分法应用最为普遍。该方法的预计结果在有些条件下往往与实测结果相差甚远。针对概率积分法预计结果与实际的差异,许多学者都试图从岩层内部的移动机理来修正地表下沉的预计方法。如何国清教授提出了地表下沉预计的威布尔分布法,郝庆旺在地表下沉预计中提出了采动岩体空隙扩散模型,邓喀中在地表沉陷预计中考虑了岩层移动层间错动的影响,隋旺华研究了厚表土层土体变形对地表沉陷的影响,所有这些都丰富和完善了地表沉陷预计法。然而完全根据岩层移动规律直接预计地表下沉的方法目前还未提出。

实践表明,上覆岩层的岩性对岩层移动及地表沉陷有着很大的影响。因此,在岩层移动研究中必须考虑上覆岩层岩性的作用。从回采工作面矿山压力控制的角度出发,我国对煤层顶板进行了分类,并以研究硬岩的破断运动为主体,建立了砌体梁理论并对坚硬岩层板模型的破断规律进行了研究。近年来,针对坚硬岩层在岩层移动中的控制作用,在钱鸣高院士领导下的课题组,提出了岩层移动与控制的关键层理论。在地表沉陷预计中也注意到了覆岩岩性的影响作用,将覆岩分为坚硬、中硬、软弱三类选取预计公式中的各项参数值,如在概率积分法中的下沉系数的取值,在覆岩平均为坚硬、中硬、软弱时,分别取值为 $0.4 \sim 0.65$, $0.65 \sim 0.85$, $0.8 \sim 1.00$ 。

为了减缓煤层开采引起的地表沉陷,目前国内外常采用的开采技术措施为:①采空区充填,即煤层开采后用水砂充填或风力研石充填工作面后方采空区,该方法在德国和波兰应用最为普遍,如波兰采用采空区充填法的采煤量占全国三下总采煤量的 80%

左右。我国目前仅在个别矿井应用该方法。② 部分开采法,主要有条带开采、房柱开采等。该方法的采出率低,一般只达到 30%~60%。条带开采是目前我国三下开采所采用的主要方法。③ 协调开采,按照开采沉陷理论,协调优化设计工作面位置及开采顺序,使地表变形值不产生累加,甚至能抵消一部分变形值。由于受到组织工作和生产地质条件限制,此法一般难于实现。④ 覆岩离层注浆法,是 80 年代发展起来的一种技术,它与采空区充填法相比,不受井下作业空间、时间的限制,不干扰工作面生产。“覆岩离层注浆减缓地表沉陷”技术,在我国最先由齐东洪、范学理等在抚顺老虎台矿试验并取得了一定成效,已先后在抚顺、大屯、新汶、兖州等矿区开展了工业性试验,取得了一定的减沉效果。国外也有该项技术应用的报道。覆岩注浆减沉的基本原理是利用岩移过程中覆岩内形成的离层空洞,从地面布置钻孔往离层空间充填外来材料来支撑覆岩,从而减缓覆岩移动往地表的传播。覆岩注浆减沉技术应用的前提条件是对煤层采后覆岩内部所形成的离层分布有所了解,从而根据离层位置的判别来合理布置注浆钻孔。国内外许多学者对覆岩离层进行了多方面的研究,但对离层的时空动态分布规律仍缺乏深入的认识,而这对离层注浆能否取得效果是至关重要的。

1.2.2 瓦斯抽放研究现状

在煤层形成过程中,由于生物化学作用和煤化作用产生了大量甲烷 CH_4 气体,通常被称为煤层气,亦称为矿井瓦斯。瓦斯以吸附和游离两种状态赋存在煤体中,其中大部分瓦斯以吸附状态存在。瓦斯不仅对矿井生产安全造成危害,还会造成极大的环境破坏(CH_4 对臭氧层的破坏比 CO_2 强 16 倍)。瓦斯抽放并加以利用能将其变为一种清洁能源,因而是一项变害为利的技术。瓦斯抽放最早起源于对矿井安全的考虑,而将瓦斯作为一种新型能源加以开发(即目前常说的煤层气抽放)是 20 世纪 70 年代开始的。瓦斯抽放方法总体上可分为煤层开采前预先抽放与煤层开采过程中或开

采后的卸压抽放两大类。

美国的第一口商业性生产气并于 1976 年投产,迄今美国已成功地开发了布莱克沃里尔(Black Warrior)和圣胡安(San Juan)两个煤盆地的煤层气。与此同时,加拿大、澳大利亚、原苏联等 20 多个国家和地区开展了煤层气资源的评价与开发试验工作。目前,采前地面钻孔抽放煤层气方法在美国应用效果最好,已达到商业规模。以 1993 年为例,美国煤层气生产井数目达 5497 个,产气量达 214 亿 m^3 ,约占美国天然气年产量的 5%。

我国政府和有关工业部门高度关注煤层气资源的勘探与开发。目前,我国煤层开采前煤层气开发的研究工作仍处于起步阶段,还未进入工业开发阶段。1993 年以来,我国石油、煤炭及地质矿产部门开展了多项煤层气地质、煤层气勘探方法和开发工艺等方面的专项研究。在辽宁铁岭,山西寿阳、霍东、西山、晋城,陕西韩城,河北峰峰,河南平顶山,安徽淮南、淮北,江西丰城,重庆南桐等近 30 个煤田或矿区,实施煤层气资源评价井和生产试验井 80 余口,完成了“全国煤层气资源评价”等多个研究项目。“全国煤层气资源评价”项目的研究结果表明,我国煤层气含气量 $4 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上,埋藏在 2000 m 以内的煤层气资源总量达 14.34 万亿 m^3 ,其中华北聚气区占 66.6%。我国煤储层渗透率变化于 $0.002 \times 10^{-3} \sim 16.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,煤层渗透率总体偏低。煤储层一般为低压异常煤层。我国煤储层的临界解吸压力、理论采收率(平均为 27%)和含气饱和度在总体上偏低的特征,将对我国煤层气的开采造成不利的影响。从目前已有资料分析来看,我国采用美国的采前地面钻井抽放煤层气方法的前景并不十分乐观,但不排除将在个别煤田或某个煤田的局部块段会取得理想的开发效果,因而对采后卸压抽放方法仍不能忽视。

世界各主要采煤国家都开展了矿井瓦斯抽放,年抽放量超过 1 亿 m^3 的国家有 10 个,其中前苏联矿井瓦斯抽放量最多达 21.2

亿 m^3/a 。我国于 20 世纪 50 年代开始从煤矿安全生产角度进行矿井瓦斯抽放,并在某些高瓦斯矿区(如阳泉)将抽出的瓦斯投入小规模民用及工业利用。目前全国共有 110 多对矿井建立了瓦斯抽放系统,年抽放瓦斯达到了 6 亿 m^3 。其中以抚顺、阳泉两矿区抽放量最大。以阳泉矿区为例,1957 年正式抽放矿井瓦斯,至 1992 年底,共抽放瓦斯 18.5 亿 m^3 ,1991 年的抽放量达到 1.06 亿 m^3 ,平均吨煤抽放瓦斯量达 9 m^3 ,大部分抽放瓦斯已成为阳泉市民用气化燃料的气源。国内外,矿井抽放瓦斯多为煤层开采过程中或采后的卸压抽放,如以阳泉矿区为例,其 90% 以上的抽放瓦斯都是煤层开采后卸压抽放。我国卸压瓦斯抽放总体上仍存在抽出率低及钻孔工程量大的问题。

瓦斯在煤岩体中的运移属于多孔介质中的渗流,其渗透性系数取决于煤岩体的裂隙场分布。目前,地面采前煤层气井都采用人工水力压裂来增加煤层裂隙和渗透性,而采后岩层移动导致了应力场与裂隙场的改变,煤岩体的渗透性显著增大,为瓦斯流动提供了便利条件。由于对岩移过程及其裂隙场的动态分布特征缺乏深入认识,尤其缺乏对覆岩采动裂隙场动态分布的定量描述,在采后卸压瓦斯运移规律研究中,未能充分体现采后煤岩体裂隙场特征,从而影响到卸压瓦斯抽放钻孔布置及抽出率。

1.2.3 岩层移动研究方法

就基岩段岩层而言,岩层介质具有两个显著特性:其一是它的层状特性,在移动过程中,易出现层与层间的离层现象;其二是岩层介质具有破断前的近似连续介质特性与破断后的非连续介质特性的双重性。对于厚硬岩层,其破断前后的连续与非连续双重性更为明显。岩层移动贯穿于岩层变形破断直至破断后运动的全过程,要弄清岩移过程不仅要研究岩层破断前的变形与断裂特征,更要研究其破断后的运动特性,这是岩层移动学科研究有别于其他主要考察岩体破断前运动特征的岩土工程学科的显著特征。岩层移

动研究方法只有很好地适应岩层的上述特点,才能得出符合实际的结论。

岩层移动研究方法总体上有三类:① 实测研究方法,主要包括地表沉陷观测,从地面往岩层打岩移观测钻孔或在煤层顶板布置岩移观测巷,尽管研究取得了很多成果,但该方法成本大、周期长,且不能掌握岩层移动的全貌。② 实验室模拟研究方法,目前多为平面应力模型,模型的侧向变形及干燥收缩变形误差难以估计与排除。实验室模拟研究方法不失为一种经济有效的方法,应进一步发展岩移研究的模拟试验技术,包括采用:“三维立体模型”,改善实验的测试手段,开展试验误差机理及误差排除方法的研究,提高模型实验研究结果的可靠性与可用性。③ 理论研究方法,是岩移研究最便捷的方法。理论研究方法的实质在于根据研究问题建立其数学力学模型,然后求解此模型得到问题的解和认识。理论研究方法以何种介质来处理决定了采用的数学力学方法及相应的结果。

将上覆岩层视作连续介质,用连续介质的力学方法来研究岩层移动规律,形成了以阿维尔申等为代表的连续介质学派。所用力学方法从弹性力学到塑性力学,从线性力学到非线性力学。研究方式往往采用解析法和有限元数值模拟,来获得岩层移动的位移场与应力场分布,常采用的数值模拟软件有 ADINA、SAP 等。如李增琪以弹性理论为基础,将整个覆岩视为层状介质模型,分析了岩层的变形与位移情况,使岩层移动的理论计算研究有了突破。连续介质模型方法难以解释岩移过程中的离层,且只能研究到岩层破断为止,对岩层破断后的力学行为研究不了。因此,该方法获得的结果仅可以在某些方面作为定性的参考与解释,与岩移实际情况相差甚远。

20 世纪 50 年代,波兰学者李特维尼申等应用颗粒体力学来研究岩层与地表移动问题,认为开采引起的岩层和地表移动的规