

极复杂水文地质条件下 “三软”煤层安全高效开采的关键技术

李延河 刘宝敏 杨玉中 著



科学出版社

极复杂水文地质条件下“三软” 煤层安全高效开采的关键技术

李延河 刘宝敏 杨玉中 著



科学出版社
北京

内 容 简 介

本书针对极复杂水文地质条件下“三软”煤层安全高效开采的技术难题,综合运用理论分析、数值模拟、地质勘探和现场试验相结合的方法,对制约安全高效开采的关键技术进行深入而系统的研究,为煤矿安全高效生产提供理论和技术支撑。

本书主要内容包括:大流量底板承压水治理综合技术、“三软”煤层深孔注水机理及技术、“三软”煤层沿底托顶煤快速掘进支护及补强加固综合技术、破碎顶板大断面巷道快速掘进的浅固深注技术、“三软”煤层综采放顶煤技术以及条件复杂矿井管理体系优化技术。

本书可作为矿业工程、安全科学与工程以及地质工程等专业研究生教材和高年级本科生参考教材,亦可作为采矿工程专业研究人员、安全管理人员、现场生产技术人员和研究人员的参考教材及参考书。

图书在版编目(CIP)数据

极复杂水文地质条件下“三软”煤层安全高效开采的关键技术/李延河,刘宝敏,杨玉中著. —北京:科学出版社,2018.8

ISBN 978-7-03-058052-8

I. ①极… II. ①李… ②刘… ③杨… III. ①水文地质条件-影响-三软煤层-煤矿开采-研究 IV. ①TD823.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 132904 号

责任编辑:朱晓颖 张丽花 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 8 月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:448 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

安全生产事关人民群众生命财产安全，事关改革开放、经济发展和社会稳定大局，事关党和政府的形象与声誉。因此，安全生产历来受到各级政府的高度重视。煤炭工业是关系国家经济命脉和能源安全的重要基础产业，在未来相当长时期内，煤炭作为我国主体能源的地位不会发生根本性改变。但我国煤炭资源赋存条件千差万别，地质条件简单的矿井数量不多，部分矿井深受底板承压水的威胁，部分矿井受滑动构造的影响，还有部分矿井受其他致灾因素的影响，导致矿井生产的效率不高，而且安全性不能得到有效保障。

河南平禹煤电公司一矿(以下简称“平禹一矿”)属低瓦斯矿井，水文地质条件为极复杂型，所采二₁和二₃煤层均属“三软”煤层。平禹一矿自建矿以来共发生 49 次突水，造成 4 次淹井和淹采区事故。随着开采深度的增加，底板大流量高承压水害威胁突出，水害防治的难度大；“三软”煤层由于受滑动构造的影响，煤体强度低，巷道变形严重，需要反复维修；回采工艺落后，生产效率低下。因此，针对该矿面临的技术难题进行攻关，突破矿井安全生产的“瓶颈”，对实现安全高效生产意义重大。

根据该矿地质条件和煤层赋存条件，运用理论分析、数值模拟、地质勘探和现场试验相结合的方法，对制约该矿安全高效开采的关键技术进行研究，研究内容主要包括：大流量底板承压水治理综合技术、“三软”煤层深孔注水机理及技术、“三软”煤层沿底托顶煤快速掘进支护及补强加固综合技术、破碎顶板大断面巷道快速掘进的浅固深注技术、“三软”煤层综采放顶煤技术、条件复杂矿井管理体系优化技术。

通过近几年的研究及现场应用，课题组取得了如下主要成果：

(1)大流量底板承压水综合治理技术——浅部帷幕注浆、中部疏水降压、局部注浆加固技术，成功解决了困扰该矿多年的水害威胁。浅部帷幕注浆技术人为形成隔水边界；寒武系灰岩溶水疏水降压，消除了突水隐患；对工作面底板实施注浆加固技术处理，二₁-13091 等 6 个工作面实现了带压安全回采。

(2)煤层深孔注水技术，提高了煤体强度，成功解决了“三软”煤层片帮、冒顶的难题；提高了煤层的含水率，降尘率达到了 63.3%。

(3)“三软”煤层沿底托顶煤快速掘进支护及补强加固综合技术——煤巷帮锚索补强加固、钢丝绳加固顶板、注浆锚索加固和掘进期间超前煤层深孔高压注水辅助技术，成功解决了“三软”煤层巷道支护难、掘进慢的难题，掘进效率提高了 175%。

(4)破碎顶板大断面巷道快速掘进的浅固深注技术使得二₁-15040 切眼得到了有效支护，为综采设备的安装奠定了良好的基础。

(5)综采放顶煤工艺在底板承压水上“三软”煤层中的应用技术，成功解决了带压高效开采的难题，实现了高效生产，单个工作面年度多回采煤炭 36 万 t。

(6)管理体系的综合优化，使得安全生产形势持续稳定，主要经营指标超额完成，现场管理水平得到有效提高，劳动工效得到大幅提高，吨煤成本得到有效控制。

本书由平禹一矿的李延河矿长、刘宝敏总工程师和河南理工大学的杨玉中教授共同主笔，全书由杨玉中教授统稿。在项目研究和成书的过程中，得到了国家自然科学基金项目(51674102)的资助，河南理工大学的吴立云副教授、博士研究生庞龙龙、平禹一矿的杨宽辉副总工程师等人也做了大量的工作，作者在此一并表示衷心的感谢。此外还特别感谢科学出版社对本书出版的大力支持和帮助!对有益于本书编写的所有参考文献的作者表示真诚的感谢!

由于作者的水平和时间所限，书中不当及疏漏之处在所难免，敬请广大读者不吝指正!

作者

2018年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 底板突水机理研究现状	1
1.2.2 巷道支护理论与技术发展现状	5
1.2.3 “三软”煤层巷道支护理论与技术发展现状	11
1.2.4 “三软”煤层开采技术研究现状	12
1.3 研究的主要内容和技術路线	14
1.3.1 研究的主要内容	14
1.3.2 技术路线	14
第 2 章 矿井概况及存在问题分析	16
2.1 矿井位置和范围	16
2.2 矿井自然地理概况	16
2.2.1 气象	16
2.2.2 水文	17
2.2.3 地形地貌	19
2.2.4 地表水	20
2.2.5 地震	20
2.3 矿井地质概况	21
2.3.1 矿区地层概述	21
2.3.2 矿井地层	23
2.3.3 矿区区域构造	24
2.3.4 矿井地质构造	25
2.3.5 矿区水文地质	29
2.3.6 矿井水文地质	56
2.3.7 矿井工程地质条件	61
2.3.8 含煤地层及顶底板	61
2.3.9 矿井瓦斯	64
2.3.10 煤尘爆炸性及煤的自然	73
2.3.11 地温	73
2.4 矿井建设、生产情况	74
2.4.1 煤矿及周边老窑、老空区分布情况	74
2.4.2 矿井生产情况	75

2.5	矿井存在问题分析	76
第3章	大流量底板承压水治理技术	78
3.1	矿井水害分析	78
3.1.1	平禹一矿历年水害分析	78
3.1.2	矿井充水因素分析	83
3.2	矿井前期帷幕注浆	98
3.2.1	I期堵源截流	98
3.2.2	疏放水试验	100
3.2.3	II期堵源截流	105
3.2.4	堵源截流实施效果	108
3.3	煤层底板灰岩承压水的疏放	108
3.3.1	疏放寒灰水可行性分析	108
3.3.2	岩溶水补给量的均衡计算	111
3.3.3	疏放寒灰水的矿井涌水量预测	114
3.3.4	疏水降压前期准备工作	122
3.3.5	寒灰水的疏放	125
3.4	底板注浆加固改造技术	129
3.4.1	底板注浆加固改造机理	129
3.4.2	底板注浆加固技术	137
3.4.3	工作面底板注浆加固改造技术的应用	139
3.4.4	二 ₁ -13110工作面带压开采参数计算	156
3.5	结果分析	157
3.6	矿井排水的资源化利用	158
3.6.1	矿井排水资源化利用的必要性和可行性	158
3.6.2	矿井排水的水质评价	159
3.6.3	矿井排水的可利用量评价	166
3.6.4	矿井排水的资源化利用途径	167
第4章	“三软”煤层深孔注水技术	170
4.1	煤层注水除尘及固结的微观机理	170
4.1.1	煤层注水除尘机理	170
4.1.2	煤层注水对软煤固结的微观机理	171
4.2	注水设备及参数设计	177
4.2.1	打钻、封孔、注水设备	177
4.2.2	钻孔参数	178
4.3	施工组织	179
4.4	效果分析	180

第 5 章 “三软”煤层沿底托顶煤快速掘进支护技术	182
5.1 数值模拟软件简介	182
5.2 试验工作面的基本概况	182
5.2.1 工作面概况	182
5.2.2 工作面地质情况	184
5.3 巷道支护数值模拟分析	184
5.3.1 数值模拟方案确立	184
5.3.2 巷道不同支护方式数值模拟	186
5.4 巷道支护设计	191
5.4.1 巷道断面规格	191
5.4.2 巷道支护方式	191
5.5 掘进工作面支护综合补强技术	193
5.5.1 锚索加固支护技术	194
5.5.2 钢丝绳加固顶板技术	194
5.5.3 注浆锚索加固技术	195
5.6 掘进工作面正前深孔注水技术	200
5.6.1 施工组织	200
5.6.2 注水孔参数	200
5.6.3 注水系统及注水设备	200
5.7 沿底托顶煤快速掘进支护效果分析	201
第 6 章 破碎顶板大断面巷道快速掘进的浅固深注技术	202
6.1 浅部注胶加固技术	202
6.1.1 施工方案	202
6.1.2 施工参数	202
6.1.3 施工步骤	203
6.1.4 施工安全技术措施	204
6.2 锚注一体化支护技术	205
6.2.1 锚注一体化支护机理	205
6.2.2 锚注一体化支护技术的优点	206
6.2.3 锚注一体化支护结构特征	210
6.2.4 锚注一体化支护材料	211
6.2.5 锚注一体化注浆工艺参数	212
6.3 使用效果	215
第 7 章 “三软”煤层综采放顶煤技术	216
7.1 综采放顶煤采煤法	216
7.1.1 综采放顶煤基本特点及适用条件	217
7.1.2 矿压显现特点及顶煤破碎机理	218

7.1.3	放顶煤工艺特点	219
7.2	综采放顶煤技术	222
7.2.1	采煤方法	222
7.2.2	采煤工艺	222
7.2.3	机电设备配置	226
7.3	工作面顶板控制	229
7.3.1	二 ₁ -13110 综放工作面支护设计	229
7.3.2	工作面顶板控制技术	230
7.4	端头及两巷超前顶板控制	233
7.4.1	端头支护	233
7.4.2	机、风两巷支护	233
7.4.3	机、风两巷质量控制标准	234
7.4.4	机、风两巷支架的回撤	234
7.4.5	备用材料的管理	235
7.5	综放工作面生产系统	235
7.5.1	运输系统	235
7.5.2	液压系统	235
7.5.3	供电系统	236
7.6	综采放顶煤技术效益分析	237
第 8 章	管理体系优化技术	238
8.1	四优化一提升	238
8.2	安全精细化管理	240
8.2.1	“四位一体”安全管控体系	240
8.2.2	安全生产标准化管理	250
8.2.3	安全绩效考核评价	253
8.3	坚持正规循环作业	254
8.3.1	正规循环作业的意义	255
8.3.2	采煤、掘进(开拓)工作面正规循环作业标准	255
8.3.3	实现正规循环作业的管理措施	256
8.3.4	正规循环作业考核办法	257
8.3.5	实施正规循环作业的效果	257
8.4	经营精细化管理	258
8.4.1	刚性的经营管理考核体系	258
8.4.2	人力资源优化	258
8.4.3	严格控制经营重点	259
8.5	管理体系优化的成效	261
第 9 章	研究成果与效果	262
9.1	研究的主要成果	262

9.2 研究的创新点	263
9.3 取得的效益	263
参考文献	265

第1章 绪 论

1.1 研究目的及意义

煤炭工业是关系国家经济命脉和能源安全的重要基础产业，在未来相当长时期内，煤炭作为我国主体能源的地位不会发生根本性改变。煤炭的安全开采是我国社会稳定、经济发展的重要保证之一。

随着采煤技术水平的不断提高和开采装备的不断完善，煤炭的开发力度也在逐年加大，矿井的开采逐步向深处转移，由此产生的制约煤矿安全高效开采的因素也日益复杂，如高地应力、动压影响、地质构造、成岩作用及岩体成分等。在这些因素的影响下，围岩节理裂隙发育、松散破碎、泥化易风化、变形强烈、破坏范围大，呈流变形态；巷道冒顶、片帮及底板高承压水的突出问题已经严重制约和影响了高产高效矿井的建设。

平禹一矿年核定生产能力 150 万 t，属低瓦斯矿井，水文地质条件为极复杂型，所采二₁和二₃煤层均属“三软”煤层。随着开采深度的不断延伸，矿井地质条件更加复杂化，生产过程中安全问题较为突出，底板大流量高承压水害威胁突出，水害防治的难度大，治理的周期长，工作面接替矛盾更加凸显；“三软”煤层由于受滑动构造的影响，煤体流变现象非常明显，煤体强度低，长期以来井下掘进巷道支护效果不理想，巷道断面收缩、变形严重，重复维修形成恶性循环，影响正常使用；回采工艺落后、规模小、效率低、安全状况不稳定等因素，严重威胁着煤炭资源的安全高效开采。

综上所述，针对平禹一矿开采过程中所面临的底板承压水威胁、巷道围岩控制难和工作面回采工艺落后等问题，急需对底板承压水上安全开采新技术，“三软”煤层条件下煤巷安全快速掘进及补强加固支护措施，综采放顶煤工艺在“三软”煤层中的回采工艺、采煤工序和实践操作应用技术进行深入研究，突破矿井发展生存的“瓶颈”，实现高产高效矿井发展之路。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 底板突水机理研究现状

煤层底板突水影响因素众多，不同的影响因素组合使得不同矿井突水机理不尽相同。长期以来，国内外学者对煤层开采底板突水机理做了大量的研究工作，取得了卓有成效的研究成果，极大地提高了我国矿井水害防治理论和技术。

1. 国外研究现状

国外对煤矿底板岩层变形破坏特征和突水机理的研究已有 100 多年的历史，尤其是匈牙

利、俄罗斯等受底板岩溶水影响较大的国家,在底板岩层应力场、变形破坏特征及突水机理研究、探测防治等方面,取得了巨大的成就,积累了丰富的经验。

匈牙利学者弗伦斯在 1944 年研究底板突水问题时,认识到煤层底板突水与隔水层厚度和含水层水压都相关,并首次提出了相对隔水层的概念。

苏联学者斯列萨列夫(1983)根据静定梁和强度理论推导了底板抵抗一定静水压力的安全厚度。由于该方法涉及底板突水影响因素较少,在应用过程中具有一定的局限性,尤其是随着煤层开采深度的增加,预测精度偏低。Mironenko 和 Strelsky(1993)则通过研究认为:矿井突水过程是地下水和地下岩体结构在采动影响下的复杂作用过程,据此提出了防治矿井突水和岩体破坏的方法等。

波兰学者 Motyka 和 Bosch(1985)通过对奥尔库什矿区大量底板钻孔资料进行调查,查明了该区岩溶发育规律,同时认识到造成矿井突水灾害最直接的原因是采动裂隙导通了岩溶含水层,这为底板高压水突入矿井创造了条件。

意大利学者 Sammarco(1986)在对意大利采矿活动的研究中发现:矿井突水常伴随水位和瓦斯浓度的急剧变化等前兆,并通过对这些征兆的监测实现对矿井突水进行提前预报。

南斯拉夫学者 Kuscer(1991)也发现矿井突水前后地下水动态的变化,提出用地下水动态进行突水预测的设想。

伴随计算机技术的迅猛发展,学者 Charlez(1991)、Valko 和 Economides(1994)、Noghabai(1999)、Bruno 等(2001)根据岩石材料弹塑性的性能,按照弹塑性力学、断裂力学和损伤力学理论进行数值模拟分析,学者 Veatch(1983a; 1983b)、Gidley 等(1989)及 Murdoch 和 Slack(2002)等对矿井突水的动水压力作用和水压致裂机理进行了渗流-损伤耦合、渗流-应力演化的模拟,进而形象地描述与研究了底板突水过程和突水机理。

总之,国外的相关研究经验及成果对于我国解决底板水害问题,提供了较好的理论基础和可以借鉴的方法手段。

2. 国内研究现状

与国外相比,我国对底板突水问题的研究相对较晚,起步于 20 世纪 60 年代。从 80 年代开始,随着各矿区开采水平不断延伸,突水事故不断发生,我国对煤层底板突水机理及预测预报的研究越来越重视。在国家、部门、地区、企业组织的科研攻关和技术研究中,许多研究人员纷纷加入了该研究领域,研究成果主要体现在采后煤层底板应力和位移的变化规律、底板破坏特征和突水机理等方面,形成了自己的特色。

1) 突水系数法

1964 年,为了解决焦作矿区底板水害问题,煤炭工业部组织了焦作水文地质会战,根据焦作、井陘、淄博和峰峰等大水矿区的煤层底板含水层水压和隔水层厚度进行统计,我国首次采用突水系数法进行煤层底板突水预测。突水系数就是单位底板岩层厚度所能承受的水压值,即

$$T_s = P / M \quad (1-1)$$

式中, T_s 为突水系数, MPa/m; P 为底板承压水压力, MPa; M 为底板岩层厚度, m。

在之后的实际应用过程中发现突水系数法公式存在着一些缺陷,曾多次考虑底板突水的

影响因素,对突水系数法公式进行了多次修改。2009年《煤矿防治水规定》又将公式进行了调整,改回了最初的表达式。主要原因是公式修订的过程中仅将公式进行了修改,而未对临界突水系数值进行相应改变,造成评价结果偏于保守。

2) 强渗通道学说

中国科学院地质研究所许学汉和王杰(1991)等认为强渗通道有两种:一是底板固有天然通道,采掘沟通这种通道则发生突水;二是完整底板在矿压和水压的联合作用下底板的薄弱带发生破坏,形成突水通道而发生突水。突水通道的存在及产生是煤层底板突水的关键因素。

3) 零位破坏与原位张裂理论

煤炭科学研究总院北京开采所王作字等(1993, 1994)提出了零位破坏与原位张裂理论。该理论认为被开采的煤层在矿压与水压的联合作用下,工作面相对于底板的影响范围在水平方向上分为三段:超前压力压缩段(I段)、卸压膨胀段(II段)和采后压力压缩稳定段(III段)。在垂直方向上同样分为三带:直接破坏带(I带)、影响带(II带)、微小变化带(III带),如图1-1所示。

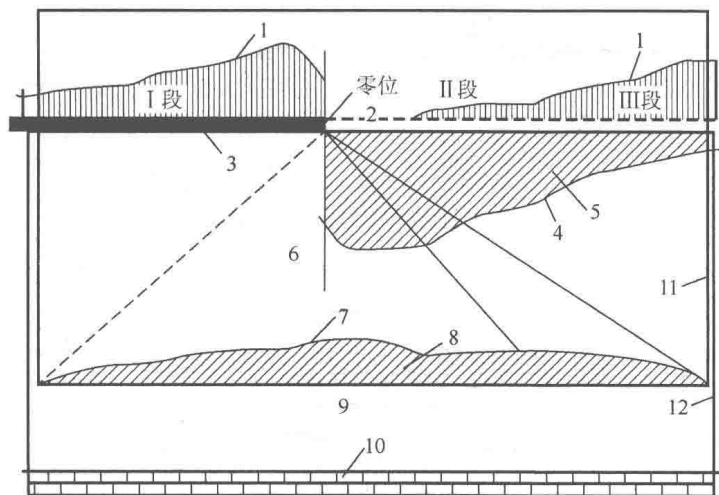


图 1-1 底板岩体的零位破坏与原位张裂示意图(王作字和刘鸿泉, 1993)

1-应力分布; 2-采空区; 3-煤层; 4-零位破坏线; 5-零位破坏带; 6-空间剩余完整岩体(上); 7-原位张裂线;
8-原位张裂带; 9-空间剩余完整岩体(下); 10-含水层; 11-采动应力场空间范围; 12-承压水运动场空间范围

随着工作面的推进,底板逐步由超前压力压缩状态过渡为卸压膨胀状态,其超前压力压缩段岩体整个结构呈现上半部受水平挤压、下半部受水平张拉的状态,因而在其中部附近底面上的原岩节理、裂隙等不连续面就产生岩体的原位张裂。煤层底板岩体移动的破坏即零位破坏,底板岩体的内摩擦角是影响零位破坏的基本因素,王作字等(1994)进一步引用塑性滑移线场理论分析了采动底板的最大破坏深度。

4) 板壳模型理论

煤炭科学研究总院张金才等(1997)认为底板岩层由导水裂隙带和底板隔水带组成,并运用弹塑性力学理论和相似材料模拟试验来研究底板突水机制,采用半无限体一定长度上受均匀竖向载荷的弹性解,结合 Mohr-Coulomb 强度理论和 Griffith 强度理论分别求得了底板采动的最大破坏深度。在此基础上,将底板隔水带看作四周固支、受均布载荷作用的弹性薄板,然后采用弹塑性理论分别得到了以底板岩层抗剪及抗拉强度为基准的预测底板所能承受极

限水压力的计算公式。然而，一般情况下，底板隔水层不满足薄板厚宽比小于 1/8 的条件，只有隔水层较薄时方能适用，另外，该理论并未考虑采动时底板的破坏深度和承压水的导升高度及渗流作用。

5) 下三带理论

山东矿业学院李白英(1999)提出下三带理论，认为煤层底板自上而下存在着三个带：I 底板破坏带、II 完整岩层带、III 承压水导升带，如图 1-2 所示。底板破坏带是指由于在采动矿压的作用下，底板岩体连续性遭到破坏，导水性发生明显改变的层带；承压水导升带是指含水层中的承压水沿底板中的裂隙或断裂破碎带上升的层带，有时称为原始导水带，由于裂隙发育的不均匀性，故导升带的上界是参差不齐的，有的矿区也许无原始导升带存在，承压水导升是否成带的问题并未解决；完整岩层带位于两者之间，其保持着采前岩层的连续性和阻水性，它是阻抗底板突水的最关键因素。该理论基于大量底板实测资料，揭示了底板突水的内在规律，对底板突水预测与安全开采评价具有重要的意义。

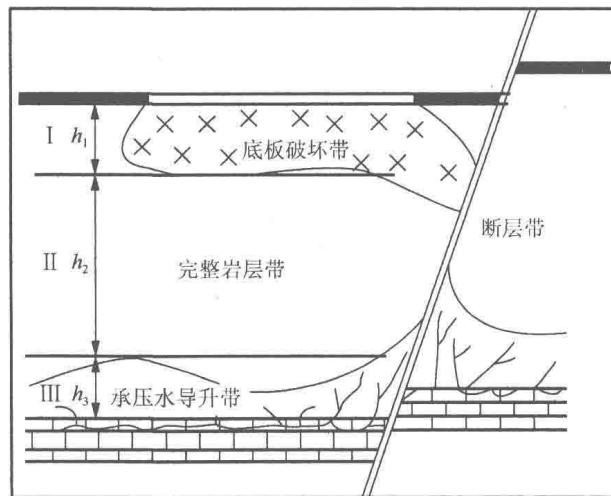


图 1-2 下三带示意图(李白英, 1999)

6) 突水优势面理论

高延法等(1999)提出了含煤地层构造最易突水的薄弱区是控制突水的关键因素，即突水优势面理论。在平面上煤层底板带压区域存在最易发生突水的危险面-优势面。

7) 递进导升学说

煤炭科学研究总院西安分院王经明(1999)通过现场监测发现底板承压水在采动矿压和底板含水层水压力的联合作用下，沿隔水层裂隙向上逐渐导升，认为当其与矿压破坏带沟通时会发生突水。

8) 关键层理论

中国矿业大学钱鸣高等(2003)认为在矿压破坏带与底板含水层之间存在一承载能力最强的岩层——关键层，推导了完整底板和有断层破断的条件下的突水准则，如图 1-3 所示。认为将完整底板、断层底板关键层分别视作四边固支的矩形薄板和三边固支一边简支的矩形薄板，依据弹塑性理论通过求解关键层在水压等作用下的极限破断跨距，判断底板突水危险性。关键层理论抓住了煤层底板层状结构特征，不仅给出了底板突水的力学判据，而且能够

判断底板断裂、突水的准确位置,对隔水层较薄煤层底板突水评价具有一定的适用性。浦海(2007)将该理论应用到保水采煤中,白海波(2008)将奥陶系顶部岩层作为隔水关键层,扩大了关键层理论的应用范围。

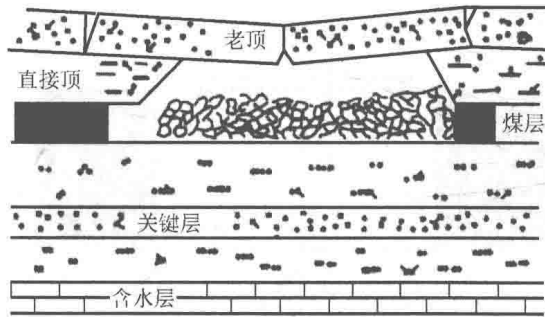


图 1-3 采场结构和关键层示意图

9) 岩、水、应力关系理论

煤炭科学研究总院西安分院王成绪和王红梅(2004)提出了岩、水、应力关系理论。该理论综合考虑了岩石、水压及地应力的影响,认为底板突水是岩(底板隔水层岩体)、水(底板承压水)、应力(采动应力和地应力)共同作用的结果。采动矿压使底板隔水层出现一定深度的导水裂隙,降低了岩体强度,削弱了隔水性能,造成了底板渗流场重新分布,当承压水沿导水裂隙进一步侵入时,岩体受水软化导致裂缝继续扩展,直至两者相互作用的结果增强到底板岩体的最小主应力小于承压水水压时,便产生压裂扩容,发生突水。

上述学者从不同角度、利用不同的方法对煤层底板突水机理进行了深入的研究,为我国受底板水害的矿井提供了宝贵的理论与经验,使得我国矿井水害防治理论研究水平处于世界前沿,但由于煤层底板突水机理极其复杂,至今其仍为国内外一个重要的研究课题。

1.2.2 巷道支护理论与技术发展现状

1. 锚杆支护理论的研究现状

我国在 1956 年开始使用锚杆支护,锚杆支护机理研究随着锚杆支护实践在不断发展,该领域学者已经取得了大量研究成果(侯朝炯等,1989,1999;陈炎光和陆士良,1994;陆士良等,1998;康红普和王金华,2007)。

1) 悬吊理论

悬吊理论认为锚杆支护的作用就是将巷道顶板较软弱岩层悬吊在上部稳固的岩层上,在预加张紧力的作用下,每根锚杆承担其周围一定范围内岩体的重量,锚杆的锚固力应大于其所悬吊的岩体的重力,如图 1-4 所示。

悬吊理论是最早的锚杆支护理论,认为锚杆支护作用是将顶板下部不稳定松散破碎岩层悬吊在上部稳定岩层中,在比较软弱的围岩中,巷道开掘后应力重新分布,出现松动破碎区,在其上部形成自然平衡拱,锚杆支护的作用是将下部松动破碎的岩层悬吊在自然平衡拱上。悬吊理论具有直观、易懂及使用方便等特点,应用比较广泛,在采深较浅、地应力不高、没有明显构造应力影响的区域使用最多。悬吊理论能较好地解释锚固顶板范围内有坚硬岩层时

的锚杆支护。但跨度较大的软岩巷道中，自然平衡拱高往往超过锚杆长度，悬吊作用难以解释锚杆支护获得成功的原因。

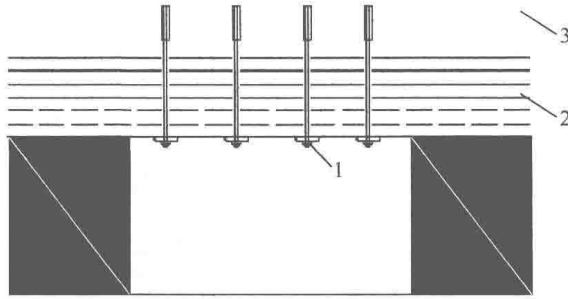


图 1-4 悬吊理论示意图
1-锚杆；2-松散破碎岩层；3-稳定岩层

2) 组合梁理论

组合梁理论认为，端部锚固锚杆提供的轴向力将对岩层离层产生约束，并且增大了各岩层间的摩擦力，与锚杆杆体提供的抗剪力一同阻止岩层间产生相对滑动，如图 1-5 所示。

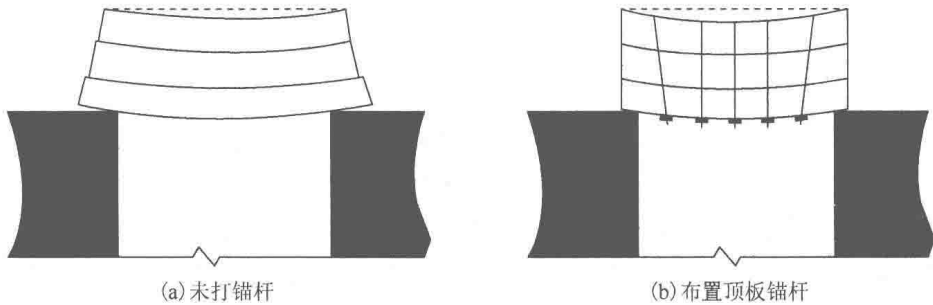


图 1-5 顶板锚杆的组合梁作用

对于全长锚固锚杆，锚杆和锚固剂共同作用，明显改善了锚杆受力状况，增加了控制顶板离层和水平错动的能力，效果优于端部锚固锚杆。从岩层受力角度考虑，锚杆将各个岩层夹紧形成组合梁，组合梁厚度越大，梁的最大应变值越小，其充分考虑了锚杆对离层及滑动的约束作用。组合梁理论适用于若干层状岩层组成的巷道顶板。

德国 Jacobin 等于 1952 年提出组合梁作用理论，其实质是通过锚杆的径向力作用将叠合梁的岩层挤紧，增大层间的摩擦力，同时锚杆的抗剪能力也阻止层间错动，从而将叠合梁转化为组合梁。组合梁理论能较好地解释层状岩体锚杆的支护作用，但难以用于锚杆支护设计。在组合梁的设计中，难以准确反映软弱围岩的情况，将锚固力等同于框式支架的径向支护力是不确切的。

3) 减跨理论

减跨理论建立在悬吊理论及组合梁理论的基础上，该理论认为：锚杆末端固定在稳定岩层内，穿过薄层状顶板，每根锚杆相当于一个铰支点，将巷道顶板划分成小跨，从而使顶板挠度降低。减跨理论作用原理如图 1-6 所示。

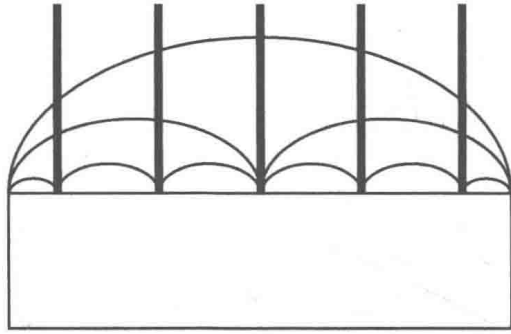


图 1-6 减跨理论作用原理

减跨理论认为，锚杆固定在稳定岩层内，距离巷道顶面较远，其对巷道顶板的悬吊作用并不像简支梁的支点那样，垂直位移为 0，由于锚杆要随围岩一起变形，锚杆及围岩的变形是一个相互影响的过程，因而其悬吊点实际上是一个有一定位移量的弹性铰支座。应在考虑锚杆变形的基础上进行更进一步的深入研究。

4) 组合拱理论

组合拱理论认为，在沿拱形巷道周边布置锚杆后，在预紧锚固力的作用下，每根锚杆都有一定的应力作用范围，只要取合理的锚杆间距，其应力作用范围会相互重叠，从而形成一个连续的挤压加固带，即厚度较大的组合拱，该加固带的厚度是普通砌碇支护厚度的数倍。故能更为有效地抵抗围岩应力，减少围岩变形，其支护效果明显优于普通砌碇支护。

组合拱理论认为，在软弱、松散、破碎的岩层中安装锚杆，形成图 1-7 所示的承载结构，假如锚杆间距足够小，每根锚杆共同作用形成的锥体压应力相互叠加，在岩体中产生一个均匀压缩带，承受破坏区上部破碎岩体的载荷。锚杆支护的作用是形成较大厚度和较大强度的组合拱，拱内岩体受径向和切向应力约束，处于三向应力状态，岩体承载能力大大提高，组合拱厚度越大，越有利于围岩的稳定。组合拱理论充分考虑了锚杆支护的整体作用，在软岩巷道中得到较为广泛的应用。

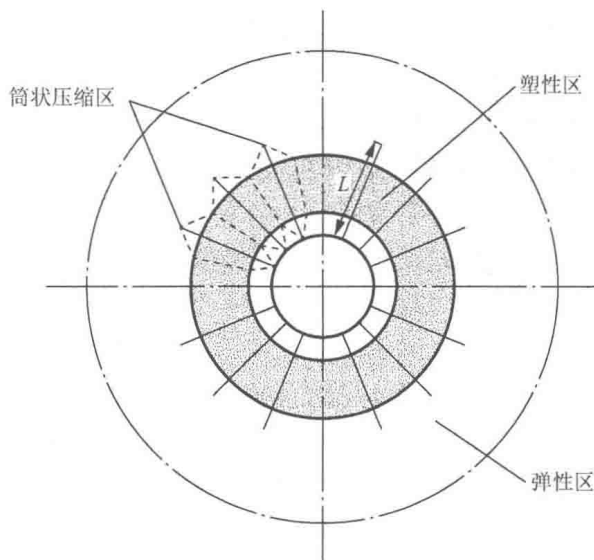


图 1-7 锚杆的组合拱理论示意图