

江苏省高校优势学科平台建设项目 (SZBF2011-6-B35)

煤炭资源与安全开

题 (SKLCRSM09X02)

矿业工程国家级实

助

厚煤层大采高综采 理论与实践

 屠世浩 袁 永 著

HOUMEICENG DACAIGAO ZONGCAI Lilun Yu Shijian

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

平台建设项目(SZBF2011-6-B35)

煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题(SKLCRSM09X02)

矿业工程国家级实验教学示范中心建设项目 资助

厚煤层大采高综采理论与实践

屠世浩 袁 永 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书对厚煤层大采高综采相关基础理论与应用技术进行了系统研究。全书共分七章,主要包括:大采高综采技术的研究现状与发展趋势,大采高综采采场覆岩结构特征及其稳定性分析,大采高综采采场直接顶分类及控顶机理,大采高综采支架稳定性分析及其控制技术,高帮煤壁片帮机理与防治技术,大采高综采采场支架—围岩耦合作用机理,“高突”、“三软”分叉合并煤层条件大采高综采技术的工程实践等。

本书反映了作者近年来在大采高综采技术方面的系统研究成果,可作为高等院校矿业工程类专业的研究生教材,也可供从事煤矿开采方面工作的研究人员、工程技术人员、设计人员和管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

厚煤层大采高综采理论与实践 / 屠世浩, 袁永

著. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2012. 2

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1328 - 0

I. ①厚… II. ①屠…②袁… III. ①厚煤层采煤法—研究 IV. ①TD823.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第251434号

书 名 厚煤层大采高综采理论与实践

著 者 屠世浩 袁 永

责任编辑 王美柱

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 850×1168 1/32 印张 6.125 字数 159 千字

版次印次 2012年2月第1版 2012年2月第1次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

2010 年我国煤炭总产量 32.4 亿 t, 占世界煤炭总产量的 48.3%, 我国厚煤层储量及产量占全国煤炭储量及产量的 40%~46%, 因此厚煤层开采技术水平决定着我国煤炭产业的科技进步与整体实力的提升, 对保障国民经济持续稳定发展具有重要作用。大采高综采技术是一种厚煤层安全高效高采出率开采技术, 随着综采装备研制水平的进步, 采煤机、液压支架和刮板输送机等成套大采高综采装备的生产能力和可靠性的提高, 大采高综采技术在 6.0 m 左右厚煤层中得到广泛应用, 出现了多个生产能力 1 200 万 t/a 以上水平的工作面, 我国大采高综采技术已达到国际先进水平。

由于大采高综采技术的相关理论发展相对滞后于工程实践, 现场工程应用过程中缺乏有效理论的指导, 也出现了一系列新的问题, 如煤壁容易片帮、端面冒顶严重、支架压架和倒架等事故发生率高, 严重威胁工人的人身安全, 导致工作面推进速度慢, 影响产量和效率的提高。上述问题在“三软”等复杂地质条件下更加突出, 已成为制约大采高综采技术推广应用的突出瓶颈。为此, 需要对大采高综采相关理论与技术进行深入研究, 以促进我

国厚煤层的安全高效高采出率开采。

本书的研究内容是作者在多年现场相关科研项目研究积累的基础上,对大采高综采采场的覆岩结构特征,顶板控制、煤壁稳定性控制以及支架稳定性控制的机理与技术,支架—围岩相互作用机理等方面研究成果的系统总结。全书共分七章。第一章介绍了厚煤层综采的主要方法、优缺点及发展趋势,大采高综采相关理论与技术的研究现状与急需解决的关键技术问题;第二章主要研究了采高对采场覆岩运动的影响规律,大采高综采采场直接顶关键层的概念、判别及其对覆岩破断特征和超前支承压力分布规律的影响,分析了大采高综采采场覆岩结构稳定性;第三章重点研究了大采高综采采场直接顶分类及控顶机理,提出了依据是否存在直接顶关键层对大采高综采采场直接顶进行分类和计算支架合理承载的方法;第四章分析了大采高综采支架稳定性控制机理和技术,建立了支架稳定性分析的力学模型,提出了基于多因素敏感性分析的支架稳定性控制方法,分析了端部底煤留设对支架稳定性的影响;第五章研究了高帮煤壁片帮机理与控制技术,在分析高帮煤壁片帮加剧原因基础上,重点研究了煤壁片帮的微观损伤机理与煤壁“楔形滑动体”的稳定特征,提出了高帮煤壁片帮的防治技术;第六章系统分析了大采高综采采场支架—围岩相互作用机理,包括支架与顶板、支架与煤壁以及支架与底板的相互作用关系;第七章介绍了大采高综采技术的工程实践,重点介绍了大采高综采技术在高突煤层和“三软”分叉合并

煤层条件下的创新研究成果。

课题组万志军教授、马文顶高级工程师参与了部分研究工作；博士研究生屠洪盛、白庆升、王方田、张源，硕士研究生吴其、马小涛、王冲、李根威、窦凤金、李志勇、孙璐璐、陈芳、赵杰、秦世通参与了部分研究的实验和现场实测工作，在此表示感谢。同时，本书的研究工作得到了阳煤集团寺家庄煤业公司、淮北矿业集团许疃煤矿等单位有关工程技术人员的帮助，在此一并表示感谢！

本书的出版还得到了如下资助：煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题(SKLCRSM09X02)、江苏省“青蓝工程”、江苏省高校优势学科平台建设项目(SZBF2011-6-B35)、矿业工程国家级实验教学示范中心建设项目、中央高校基本科研业务费专项资金项目(JA111780、JGA101871)。

由于水平所限，书中难免存在一些缺点和不足，恳求专家、学者不吝批评和赐教。

著 者

2011 年秋于徐州

目 录

第一章 绪论	1
第一节 厚煤层综合机械化开采的主要方法	1
第二节 文献综述	4
第三节 大采高综采技术急需解决的问题	10
第二章 大采高综采采场覆岩结构特征及其稳定性分析	12
第一节 采场覆岩破断结构的基本特征	12
第二节 采高对采场覆岩运动规律的影响	13
第三节 大采高综采采场直接顶关键层	15
第四节 大采高综采采场覆岩结构稳定性分析	31
第三章 大采高综采采场直接顶分类及控顶机理	34
第一节 大采高综采采场直接顶分类	34
第二节 大采高综采采场支架合理承载研究	37
第三节 大采高综采采场支架选型应用实例	46
第四章 大采高综采支架稳定性分析及其控制技术	61
第一节 支架稳定性分析的力学模型	63
第二节 影响支架稳定性的多因素敏感性分析	72
第三节 端部底煤留设对支架稳定性的影响	78

第五章 高帮煤壁片帮机理与防治技术	89
第一节 高帮煤壁片帮加剧原因分析	89
第二节 高帮煤壁片帮的微观机理	93
第三节 高帮煤壁片帮的宏观机理	100
第四节 高帮煤壁片帮防治技术	107
第六章 大采高综采采场支架—围岩耦合作用机理	110
第一节 支架—顶板相互作用机理	111
第二节 支架—煤壁相互作用机理	118
第三节 支架—底板相互作用机理	122
第七章 大采高综采技术的应用实践	128
第一节 大采高综采技术在高突煤层的应用	128
第二节 大采高综采技术在“三软”分叉 合并煤层的应用	154
参考文献	178

第一章 绪 论

第一节 厚煤层综合机械化开采的主要方法

2010 年我国煤炭总产量 32.4 亿 t, 占世界煤炭总产量的 48.3%。我国厚煤层储量及产量约占全国煤炭储量及产量的 40%~46%^[1], 因此厚煤层开采技术水平决定我国煤炭产业的科技进步与整体实力的提升。2006 年国有重点煤矿厚煤层综采机械化程度为 77.47%, 百万吨死亡率为 0.628。由于地质条件的差异、技术和经济条件的限制, 厚煤层常用的综采方法主要有分层综采、综放开采和大采高综采。

自 1974 年在开滦唐山矿进行厚煤层分层综采试验后, 分层综采技术先后在开滦、兖州、邢台等 77 个矿区推广应用。分层综采技术的优点是采出率高、覆岩下沉缓慢、安全条件好; 缺点是巷道掘进率高、支护和维护费用高、工作面单产相对较低、生产管理复杂。目前, 多数缓斜厚煤层已采用综放开采和大采高综采技术, 只有少数特厚或特殊条件厚煤层仍使用分层综采技术。

综放开采技术始于 20 世纪 60 年代的欧洲, 当时主要用于边角煤和煤柱开采。自从 1982 年综放开采技术引进到我国以来, 经过近 30 年的发展, 经历了三个阶段, 即探索阶段(1982~1990 年)、逐渐成熟阶段(1990~1995 年)、技术成熟和推广阶段(1996 年至今)^[2]。综放支架由初期的高位放顶煤支架、中位放顶煤支

架,向低位放顶煤支架和两柱掩护式放顶煤支架方向发展,综放开采技术在我国取得了举世瞩目的成绩。从图 1-1 可知,综放技术自 2002 年以来发展迅速。2002 年兴隆庄煤矿综放面利用国产 ZFS6800/18/35 型放顶煤液压支架、德国 Eickhoff 公司生产的 SL300 采煤机和国产配套运输设备,实现了工作面最高单产 640 万 t/a。近 5 年来,综放面最高单产均在 800 万 t/a 以上。2008 年平朔安家岭二号井工矿采用 ZFS8000/23/37 型液压支架、MGTY400/930—3.3D 型采煤机等全套国产设备,综放面单产达 1 033 万 t/a,最高日产 4.92 万 t,最高月产 106.87 万 t。

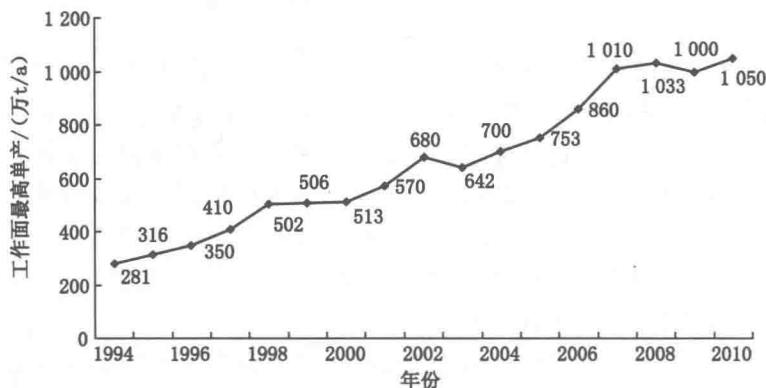


图 1-1 1994~2010 年综放面最高单产纪录

综放开采具有工作面单产高、巷道掘进率低、生产成本低及适应性强等优点,在我国厚煤层开采中被广泛应用,目前这项技术已出口到澳大利亚等主要煤炭生产国用于厚煤层开采。但综放开采存在采出率偏低的问题,工作面平均采出率在 80% 左右,不仅浪费了大量煤炭资源,而且采空区残留煤增加了瓦斯爆炸和煤层自燃的可能性,安全隐患大。

大采高综采是指采煤机割煤高度大于 3.5 m(即厚煤层定义

的下限)的综合机械化开采。近年来,随着综采装备水平的提高,采高 7.0 m、支护阻力 16 800 kN 的 ZY16800/32/70 型液压支架,采高 7.1 m、生产能力 6 000 t/h 的 MG1100/2760—GWD 型交流电牵引采煤机以及可满足工作面日产 4 万 t、年产 1 200 万 t 能力的 SGZ1400/3×1600 型刮板输送机等成套综采设备研制成功,大采高综采技术在 6.0 m 左右厚煤层中得到广泛应用,工作面煤炭采出率较综放开采提高 10%~15%,瓦斯事故与煤层自燃控制效果显著提高,单产大幅度提高,出现了多个 1 200 万 t/a 水平的工作面,大采高综采技术已成为 7.0 m 以下厚煤层开采的重要发展方向^[3]。

由于大采高综采采场围岩控制相关理论发展相对滞后于工程实践,现场工程应用过程中缺乏有效理论的指导,也出现了一系列新的问题,如煤壁容易片帮,端面冒顶严重,压架、倒架等事故发生率比一般综采面高 10% 以上^[4],严重威胁工人的人身安全,导致工作面推进速度慢,影响产量和效率的提高。上述问题在“三软”等复杂地质条件下更加突出,已成为制约大采高综采技术推广应用的瓶颈。

近年来,国内外学者对大采高综采采场覆岩结构特征与矿压显现规律、支架稳定控制、煤壁片帮机理与防治以及支架—围岩关系方面做了大量的理论研究和工程实践,一定程度上指导了大采高综采面的安全生产,但仍存在以下不足:① 认识到采高大、覆岩垮落高度大的规律,但对覆岩垮落岩层结构与支架承载的关系方面研究不足;② 认识到影响支架稳定性的主要因素,而对各因素对不同采场条件下支架稳定性的影响程度的研究不足,且缺少端部底煤留设对支架稳定性的影响方面的研究;③ 对煤壁片帮影响因素的研究较多,而对煤壁片帮微观机理和片帮体稳定控制的研究较少;④ 对支架—围岩关系的研究主要集中在支架与顶板的相互作用方面,而对煤壁—顶板—底板—支架系统之间的相互作用

认识不清。

针对上述问题,笔者在现场科研课题研究积累的基础上,对大采高综采的相关基础理论与应用技术进行了研究探索。相关研究成果对指导厚煤层大采高综采支架设计与选型、煤壁片帮防治,提高采场支架一围岩控制效果,推动安全高效高采出率煤炭开采技术发展具有重要的理论意义与应用价值。

第二节 文献综述

一、大采高综采技术的应用概述

美国、澳大利亚等先进采煤国家从 20 世纪 60 年代开始就研究大采高综采技术,目前大采高综采已成为国外厚煤层开采的主流技术^[5,6]。20 世纪末期以来,美国、澳大利亚等国家采用了大功率电牵引采煤机、电液比例控制的液压支架、软启动高可靠性刮板输送机等综采成套设备,生产能力达 3 000 t/h 以上,以 Bucyrus、Eickhoff 和 JOY 公司为代表的国际采矿设备供应商,垄断了综采高端产品市场。美国新一代安全高效综采设备基本上实现了采煤工作面的自动化^[7,8]。

我国自 1978 年开始研究大采高综采技术,1984 年官地矿 18202 工作面首次采用全套国产设备进行工业试验。1998 年之后,大采高综采技术发展加速,特别是在神东矿区的成功应用,工作面单产水平大幅度提高,如图 1-2 所示。近几年来,大采高综采面最高年产均在 1 100 万 t 以上,达到国际先进水平;神东矿区自 2009 年开始,相继在补连塔煤矿 22303 工作面、上湾煤矿 122067 工作面、补连塔煤矿 22304 工作面以及大柳塔煤矿 52304 工作面建成 7.0 m 采高综采工作面,我国综采技术实践在最大采高方面已达到世界领先水平。

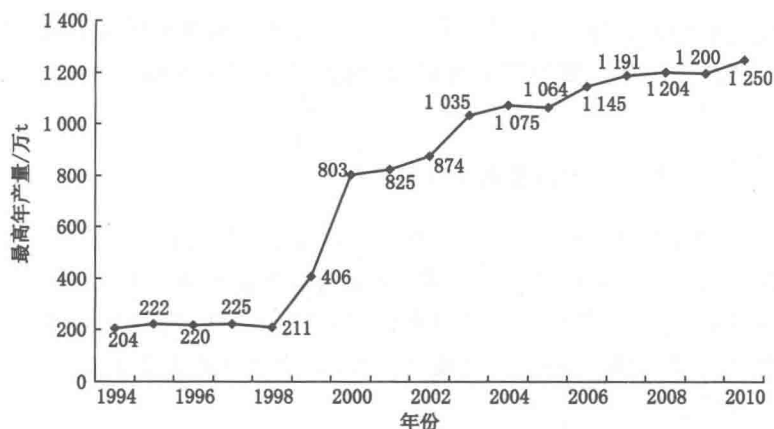


图 1-2 1994~2010 年大采高综采面最高产量纪录

综合分析国内外相关文献,可知大采高综采技术的发展具有如下特点:

(1) 国外煤层赋存条件相对简单,对大采高综采技术的研究主要侧重采煤装备,其研究成果主要集中于提高采煤装备的生产能力和自动化程度,对采场支架—围岩控制理论研究较少,成果不多。

(2) 我国大采高综采技术的发展呈现如下特点:

① 采煤机割煤高度进一步扩大。采煤机割煤高度由 5.0 m 以下发展到 6.0 m 左右,再到 7.0 m,神华集团神东煤炭公司在补连塔煤矿、上湾煤矿及大柳塔煤矿已成功装备 4 个 7.0 m 采高综采面。

② 应用范围进一步扩大。大采高综采技术由煤层赋存简单、埋深较浅的神东、宁东等矿区向埋深较大、倾角较大、“三软”煤层赋存为主的两淮、枣庄、邯郸等矿区推广,导致采场围岩控制难度增大。

③ 采场围岩控制复杂化。由于缺乏科学的大采高综采围岩

控制的理论指导,大采高综采片帮、冒顶、倒架和压架事故频发,发生机理难以用传统的理论解释,影响大采高综采工作面的安全高效生产。

二、大采高综采覆岩结构特征研究

“砌体梁”、“传递岩梁”以及关键层理论^[9,10]的提出,揭示了煤层开采后上覆岩层结构的存在,该结构是支架合理工作阻力确定的基础,也是支架处于正常位态的保证。在普通采高和综放开采条件下,覆岩结构特征研究成果较多,但针对大采高综采条件下的研究较少。

弓培林等^[11]研究了大采高采场覆岩结构特征及运动规律,认为大采高的垮落带及裂缝带高度大于相同煤厚分层开采相应的高度,且随采高增大呈台阶状上升;宋选民^[12]分析了大采高采场顶板断裂关键块稳定性,视基本顶初次断裂对称的关键块为可变形体,按照严格的变形对应关系,分析回转下沉不同位置的块体变形量与水平力的关系,探索块体结构的平衡—失稳状态转化的临界点,分析了关键块的稳定性及影响因素,得到了关键块平衡时具有承载能力的范围;石平五等^[13]以大柳塔矿 20601 大采高综采工作面为例,通过物理模拟,研究了高速推进条件下,支架初撑力对围岩控制的作用和上覆岩层运动规律与支架围岩相互作用的关系;郝海金、吴健等^[14,15]研究了大采高开采上覆岩层结构及采场支护参数,认为大采高综采上覆岩层存在着比分层开采层位更高,和放顶煤开采相似的平衡结构,该结构的运动是一个逐渐变化的过程,在这一过程中,平衡结构与其下的直接顶相互作用,这种作用方式与直接顶的多次损伤有关,传递到支架的载荷主要取决于支架上方直接顶的岩性和损伤的程度,平衡岩梁的变形对支架产生的影响取决于直接顶的岩性和其损伤后的强度;张世豪^[16]以晋城煤业集团寺河矿 3 号煤开采为例,运用相似模拟与数值模拟技术,研

究了综采采场超大空间结构的稳定性问题,探讨了采高与空间结构稳定性的相关关系。

前苏联矿山测量研究院^[17,18]研究了采高对覆岩结构特征的影响,认为:①基本顶来压步距大小取决于岩层的特性及结构,与采高关系不大;②随采高增加,基本顶断裂线由煤壁边缘向深部转移,引起的来压强度以及工作面内顶板下沉量都将增大;③增加煤层开采厚度,会使岩层垮落高度增大,顶板下沉量增大,必须预先规定支架的可缩量,支承压力范围随开采煤厚增加而扩大。

三、大采高综采支架支护阻力研究

支架合理工作阻力的确定是采场围岩有效支护的前提,确定支架合理工作阻力的方法主要有载荷估算法、实测统计法及理论分析法等^[10]。在大采高综采条件下,由于采高的增大,使普通综采或综放条件下的基本顶转化成直接顶,采用上述方法计算往往偏差较大^[19]。弓培林^[19,20]将大采高综采面直接顶划分为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ型3种类型,分别计算采场支架工作阻力。近年来,随着计算机在矿业领域的广泛应用,采用理论分析、实验室物理模拟与数值模拟相结合的综合方法来确定支架合理工作阻力在一些矿区得到应用,如伍永平^[21]采用物理模拟与理论计算相结合的方法来确定坚硬顶板条件下的大采高综采支架工作阻力,宋选民^[22]通过实测统计与理论分析相结合的方法确定沙曲矿大采高综采支架的合理工作阻力,李龙清^[23]采用物理模拟和FLAC^{3D}数值模拟相结合的方法确定羊场湾煤矿6.2 m采高条件下的支架工作阻力,宋德军^[24]通过理论计算与类比法确定大同矿区坚硬顶板条件下的大采高综采支架的工作阻力,W. Lawrence^[25]通过数值模拟和经验类比法进行工作面支护设计,均取得了一些有益成果。

四、大采高综采支架稳定性研究

支架的有效控制是大采高综采面实现安全高效生产的关键之

一。赵宏珠^[26]等研究了大采高综采支架的横向、纵向稳定性;何富连等^[4]得出了大采高综采支架在顶板冒空、移架过程中的倾倒控制条件;弓培林等^[27]认为倾角、采高、重心高度、移架顺序等对支架横向倾倒和滑移都有明显影响,并给出了影响程度排序,探讨了各因素与支架倾倒的相关规律;屠世浩等^[28,29]认为单架失稳是工作面支架失稳的诱因,支架稳定性控制的关键是使支架失稳临界角大于工作面倾角,目的是保持整个工作面支护系统的稳定;王国法^[30,31]等研究了两柱掩护式大采高支架的稳定性和适应性;华心祝^[32]研究了倾斜长壁大采高综采面支架的稳定性,分析了影响支架失稳的因素,提出了相应的控制技术措施;魏景生^[33]等研究了销轴连接对液压支架稳定性及可靠性的影响。

五、煤壁片帮机理及防治研究

防治煤壁片帮是大采高综采采场围岩稳定性控制的重点之一。赵宏珠^[34]实测得出了东庞煤矿 2101 大采高综采面煤壁片帮规律,得到了片帮形式及其分布特征、片帮与采高、冒顶的关系,并分析了片帮的影响因素;闫少宏等^[35]采用压杆理论分析完整性较好的煤壁的挠度特征,认为煤壁容易发生片帮的位置为煤壁的中上部;华心祝等^[36,37]研究了工作面推进方向、推进速度、煤体注水对煤壁片帮的影响,并应用极限平衡法分析了煤壁片帮的影响因素;刘长友等^[38]提出采用台阶式割煤工艺可控制极软厚煤层煤壁片帮的观点,并分析了其控制机理;宁宇^[39]认为提高支架工作阻力、缩小端面距、采用二级护帮机构、及时快速移架可有效控制煤壁片帮;王家臣^[40]研究了极软厚煤层煤壁片帮及防治机理,认为减缓煤壁压力和提高煤体抗剪强度是防治极软煤层煤壁片帮的主要技术途径,提出了提高支架工作阻力、煤体合理注水、加快工作面推进度、适当降低采高等防治煤壁片帮的技术措施;方新秋^[41]研究了软煤综放面煤壁片帮机理及其防治,认为煤壁中存在圆弧

状“滑动面”，控制煤壁稳定的关键是控制“滑动面”的稳定；杨双锁等^[42]研究了综放面俯、仰斜开采对煤壁片帮的影响机理。

六、采场“支架—围岩”关系研究

采场“支架—围岩”关系的研究长期以来一直是矿山压力控制研究的主题。钱鸣高等^[43-58]通过大量研究，认为：① 根据采场四边形直接顶的失稳特征，按刚度可将其划分为似刚性、似零刚度和中间型刚度 3 类。② 当直接顶刚度为似零刚度时，支架处于“给定载荷”或“限定载荷”工作状态；当处于似刚性时，支架处于“给定变形”工作状态；当处于中间型刚度时， $P-\Delta l$ 呈典型双曲线关系。③ 鉴于当直接顶为似零刚度时（如放顶煤条件）， $P-\Delta l$ 已不再存在类双曲线关系，此时，合理工作阻力的确定将主要决定于它对端面稳定性的影响。史元伟等^[59-61]采用有限元法研究了顶板动态与支撑参数之间的关系，为支架合理选型提供依据。石平五^[62]论述了“支架—顶板”共同承载结构形成的能量原理，基于上覆岩层、直接顶板和支架三者的功能关系，建立了支架的力学模型。靳钟铭^[63]论述了“两硬”条件下综放面矿压显现特征、支架初撑力与阻力的关系和悬梁式力学模型，认为“两硬”条件下综放面既保持了坚硬顶板的显现特征，又具有放顶煤垫层的特性，支架合理工作阻力应以悬梁力学模型为基础，用垫层效应系数来修正。吴健^[64]解释了综放工作面周期来压步距小、来压强度低、支架支撑力低、架前端面冒顶现象增加等现象的原因，论述了综放工作面支架—围岩关系的特征和综放面岩层控制对支架的要求。G. S. P. Singh^[65]通过建立数值分析模型，研究了采场支架与围岩的关系，分析了推进速度对覆岩运动的影响。G. Saeedi^[66]采用 FLAC^{2D} 模拟分析了支架支护参数与采煤机割煤时未支护空间顶板运动的关系。