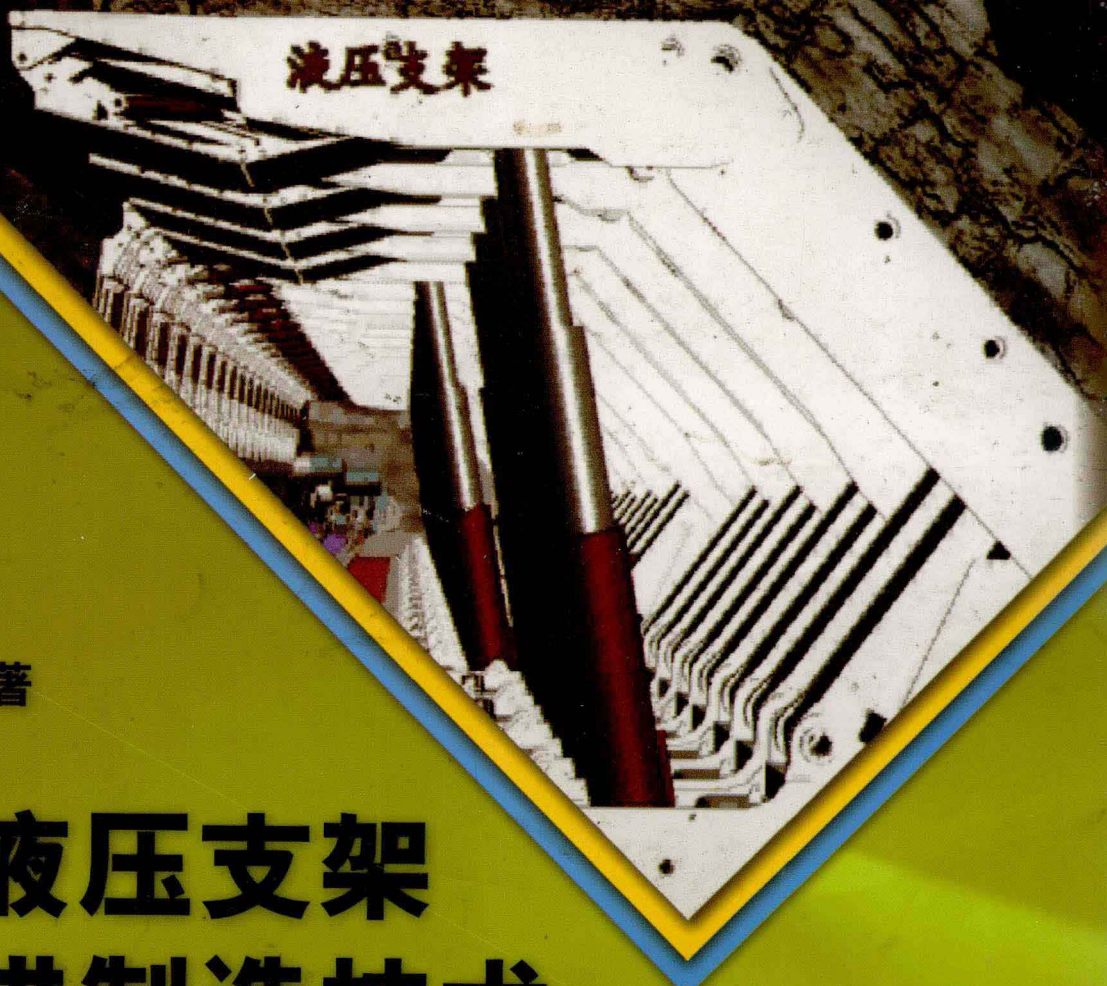




液压支架

王国法 等 著

# 高端液压支架 及先进制造技术

ADVANCED POWERED SUPPORT AND  
MANUFACTURE TECHNOLOGY

煤炭工业出版社

# 高端液压支架及先进制造技术

王国法 等 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

高端液压支架及先进制造技术 / 王国法等著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2010

ISBN 978-7-5020-3758-1

I. ①高… II. ①王… III. ①液压支架 IV. ①TD355

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 216875 号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)  
网址: [www.cciph.com.cn](http://www.cciph.com.cn)  
北京房山宏伟印刷厂 印刷  
新华书店北京发行所 发行

开本 889mm × 1194mm<sup>1/16</sup> 印张 23<sup>3/4</sup>  
字数 682 千字 印数 1—2 000  
2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷  
社内编号 6568 定价 70.00 元



版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

主编 王国法

著者 王国法 徐亚军 任怀伟 刘俊峰 赵志礼

李首滨 张银亮 傅京昱 姚连登 王 建

杜 望 李明忠 王 勇

# 序

煤炭是我国的基础能源。改革开放以来，特别是近十年以来，我国煤炭工业取得了长足发展，生产力水平显著提高。2009年，煤炭产量达到2.96 Gt。大基地大集团建设成效显著，一大批现代化安全高效矿井建成。综合机械化采煤技术、综采放顶煤技术取得重大突破，各项技术经济指标和纪录被不断刷新。实践证明，技术创新与进步是推动煤炭工业现代化的动力与源泉。

煤炭工业的快速发展为我国煤机装备制造业提供了难得的机遇和市场空间。“十一五”期间，我国开采装备技术创新步伐加快，关键技术攻关取得重大突破。在国家振兴装备制造业和煤炭产业政策的支持下，通过科技部国家科技支撑计划等技术创新和科技攻关计划的支持，取得了“年产6 Mt综采成套装备技术”、“自动化放顶煤关键技术与装备”、“0.8~1.3 m薄煤层安全高效开采成套装备技术”和“高端液压支架及先进制造关键技术研究产业化”等一大批重要科技成果，我国煤机装备制造业实现了历史性跨越和发展，成为世界最大煤机生产国，有力地推动了煤炭工业的技术进步。

煤炭安全高效开采始终是我国煤炭工业技术发展的重要方向，而高效开采工作面成套装备技术的创新是实现这一目标的重要保证。液压支架是工作面关键装备，其技术水平是煤机装备水平发展的重要标志。目前，我国高端液压支架和部分运输设备等开采装备关键技术已经达到或接近国际先进水平，综采放顶煤开采装备技术处于国际领先地位。高端液压支架和电液控制系统已基本实现国产化，结束了依赖进口的历史，国产成套综采装备技术开始出口。但是，在采煤机整体性能及可靠性、变频器、轴承、密封、电控、重型运输机软启动、高强度圆环链等关键元部件技术和液压支架材料、液压元件可靠性方面距国际先进水平还存在差距，需要加强科技创新，不断提升煤机制造水平。

“十二五”期间，我国开采装备技术必将进一步加快发展，由煤机装备制造业大国向煤机制造业强国转变，通过创新发展实现振兴中国煤机装备制造业的宏伟目标。

国家有突出贡献中青年专家、博士生导师、天地科技开采装备技术研究所所长王国法研究员和他带领的科研团队长期致力于液压支架和开采装备技术的研究，取得了丰硕成果。继出版《液压支架技术》、《煤矿高效综合机械化采煤成套装备技术》等专著之后，将相继出版《液压支架控制技术》、《放顶煤液压支架与放顶煤技术》、《高端液压

支架及先进制造技术》、《薄煤层开采成套装备技术》和《煤矿支护设备标准化技术》。这套煤矿开采实用新技术丛书立论新颖，内容翔实，论述深入、系统，具有重要参考价值，是一套难得的好书，相信一定会为广大读者提供有益的帮助。

全 国 政 协 常 委  
全国政协提案委员会副主任  
中国煤炭工业协会会长

A stylized, bold cursive signature in black ink, likely belonging to Wang Yiguo, the Vice Chairman of the National Committee of the Chinese People's Political Consultative Conference and Chairman of the China Coal Industry Association.

2010年6月18日

# 前 言

煤炭高效、安全开采始终是我国煤炭工业发展的方向，高效开采工作面成套装备技术的创新和发展是实现这一目标的根本途径。随着国民经济和社会的快速发展，煤炭工业作为重要的能源行业已经上升为国家战略，其发展取得了令人瞩目的重大成就。中国是世界最大的产煤国，2009 年煤炭产量突破 2.96 Gt，2010 年煤炭产量预计将突破 3.0 Gt，占世界煤炭总产量的 44% 以上。煤炭工业的快速发展为煤机装备制造业的发展创造了空前的机遇，实现了历史性跨越发展，目前我国已成为世界最大的煤机生产国。同时，受益于国家振兴装备制造业的产业政策，高效开采装备技术受到了越来越广泛的关注。“十五”和“十一五”期间，通过国家科技支撑计划和科技攻关计划的支持，开采装备技术创新步伐加快，关键技术攻关取得重大突破，在大采高和放顶煤开采技术与装备等方面取得了一批重要成果，支撑了煤炭工业的技术进步和快速发展。“十二五”期间开采装备技术必将进一步加快发展，我国将由煤机装备制造大国向煤机制造强国发展，通过创新发展实现振兴中国煤机装备制造业的宏伟目标。

液压支架是煤矿开采重大装备，液压支架技术发展水平是国家煤机装备发展水平的重要标志。2004 年以前，我国煤矿使用的高端液压支架完全依靠进口，神东、晋城等矿区先后进口了几十亿美元的高端液压支架。自 2003 年起，天地科技开采装备研究所与行业内外骨干企业合作，对高端液压支架核心技术进行联合攻关，取得重要突破，形成了具有自主知识产权的高端液压支架技术体系，开发了产业化先进制造技术和工艺装备，形成这一重大高端装备的产业链，目前已完全取代进口，并使我国液压支架制造产业跃居世界前列，具有明显的国际市场竞争优势。高端液压支架已开始出口，并将逐步增大出口量。

中国煤炭科工集团煤炭科学研究总院开采设计研究分院、天地科技股份有限公司开采设计事业部开采装备技术研究所是我国液压支架技术的开发者，从引进、试验、完善和建立我国独立的液压支架技术体系的各个阶段始终引领着液压支架技术的发展，从研制第一套液压支架，到研制世界领先的高端液压支架，液压支架的各种新架型几乎都是由这里首先开发研制成功。这里是国家级技术创新基地，这里聚集了大批国内外著名的专家，他们发挥综合技术优势，坚持与煤矿现场密切结合，依靠煤矿企业开展技术创新，取得了大批技术创新成果，支撑了液压支架技术的进步。

本书总结了天地科技开采装备技术研究所及行业骨干企业在高端液压支架及产业化先进制造技术研究的最新研究成果，系统介绍了高端液压支架及配套装备技术发展概况，论述了液压支架与围岩耦合适应性研究，高端液压支架设计方法研究，液压支架用高强度焊接结构钢开发与焊接性研究，高端液压支架结构件焊接工艺研究与残余应力分

析, 液压支架结构件焊接机器人研制, 液压支架高可靠性立柱、千斤顶及其密封件研制, 液压支架电液控制系统开发与产业化先进制造技术, 高端液压支架技术标准研究, 高端液压支架试验台研制与试验系统和系列高端液压支架研制等内容。

本书由国家级有突出贡献中青年专家、中央联系的高级专家、煤炭科学研究总院首席科学家、博士生导师、天地科技开采装备技术研究所所长王国法研究员主编和统稿, 本书第一章由王国法研究员执笔, 第二章由王国法研究员、刘俊峰博士执笔, 第三章由任怀伟博士、王国法研究员、徐亚军博士执笔, 第四章由姚连登研究员、王国法研究员、徐亚军博士执笔, 第五章由王国法研究员、王建教授级高工、任怀伟博士执笔, 第六章由杜望高工、任怀伟博士执笔, 第七章由王国法研究员、赵志礼研究员执笔, 第八章由李首滨研究员执笔, 第九章由王国法研究员、王勇研究员执笔, 第十章由张银亮研究员、李明忠博士、任怀伟博士执笔, 第十一章由王国法研究员、傅京昱高工执笔。天地科技开采装备技术研究所王彪谋、杜忠孝、曾明胜、朱军、孟二存、胡万昌、冯立友、苏林军、宋智鹰、孙桂英、刘成峰、宁桂峰、刘新华、程骏、孟传明、孟凡龙、马端志、王建国、吕东林、李提建、佟友等和平顶山煤矿机械有限公司李雪伟、山西平阳重工机械有限责任公司冀贵升、马占江等参加了相关课题的研究。本书是团队合作的成果, 是集体智慧的结晶。在此, 谨向为本书编著和相关研究作出贡献和提供帮助的同志们表示衷心的感谢, 向为我国综采装备和液压支架技术发展作出贡献的人们致以崇高的敬意。

中国煤炭工业协会、中国煤炭学会、中国煤炭科工集团、天地科技股份有限公司和煤炭科学研究总院领导对本书的编著出版给予了亲切的关怀和积极支持, 天地科技股份有限公司开采设计事业部领导和学术委员会的专家们和煤炭工业出版社的有关同志给予了重要帮助, 天地科技股份有限公司著作基金为本书出版提供了赞助, 特别是中国煤炭工业协会会长王显政部长在百忙中为本书作序, 谨向他们表示衷心的感谢。

**作 者**

2010 年 7 月

# 目 次

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第一章 高端液压支架与配套装备技术发展概论   | 1   |
| 第一节 国内外大采高综采技术和装备的发展    | 1   |
| 第二节 年产6 Mt大采高综采技术和装备的研发 | 3   |
| 第三节 年产千万吨大采高工作面成套装备研发   | 33  |
| 第四节 高端液压支架及其技术特征        | 35  |
| 第二章 液压支架与围岩耦合适应性        | 40  |
| 第一节 岩层移动基本理论            | 40  |
| 第二节 液压支架与围岩耦合关系分析       | 40  |
| 第三节 支架支护强度的确定           | 42  |
| 第四节 大采高工作面煤壁片帮机理及防护     | 45  |
| 第五节 液压支架架型分析            | 55  |
| 第三章 高端液压支架设计方法          | 59  |
| 第一节 基于围岩耦合的三维参数化动态设计方法  | 59  |
| 第二节 参数可视化力学计算和有限元分析     | 69  |
| 第三节 基于有限元分析的支架结构优化设计    | 88  |
| 第四节 液压支架控制系统优化设计        | 96  |
| 第五节 液压支架可靠性分析与保证        | 100 |
| 第四章 液压支架用高强度焊接结构钢及其焊接性  | 104 |
| 第一节 液压支架用钢国内外发展现状       | 104 |
| 第二节 高强度焊接结构钢焊接性分析的内容和方法 | 106 |
| 第三节 Q690CF钢焊接性分析及试验     | 108 |
| 第四节 Q800CF钢焊接性分析及试验     | 119 |
| 第五节 Q960钢焊接性分析及试验       | 125 |
| 第五章 高端液压支架结构件焊接及质量保证    | 136 |
| 第一节 液压支架结构件制造技术条件       | 136 |
| 第二节 高端液压支架工艺技术          | 144 |
| 第三节 液压支架焊接残余应力测试        | 148 |
| 第四节 结构件应力测试结果分析         | 148 |
| 第五节 高端液压支架生产管理及质量控制     | 156 |
| 第六章 液压支架结构件焊接机器人        | 163 |
| 第一节 工件分析及其焊接工艺          | 163 |

|                   |                                  |            |
|-------------------|----------------------------------|------------|
| 第二节               | 焊接机器人系统·····                     | 166        |
| 第三节               | 机器人柔性焊接系统的优缺点·····               | 171        |
| <b>第七章</b>        | <b>液压支架高可靠性立柱、千斤顶及其密封件·····</b>  | <b>174</b> |
| 第一节               | 高可靠性大缸径立柱·····                   | 174        |
| 第二节               | 抗冲击立柱·····                       | 183        |
| 第三节               | 重要千斤顶设计·····                     | 189        |
| 第四节               | 液压支架立柱千斤顶密封技术·····               | 196        |
| 第五节               | 密封型式、结构、沟槽尺寸及公差·····             | 201        |
| 第六节               | 无模加工高可靠性密封件·····                 | 209        |
| <b>第八章</b>        | <b>液压支架电液控制系统与产业化先进制造技术·····</b> | <b>210</b> |
| 第一节               | 概述·····                          | 210        |
| 第二节               | 液压支架电液控制系统·····                  | 212        |
| 第三节               | 电液控制系统产业化制造·····                 | 221        |
| 第四节               | SAC 支架电液控制系统的推广应用·····           | 223        |
| <b>第九章</b>        | <b>高端液压支架试验台与试验系统·····</b>       | <b>226</b> |
| 第一节               | 高端液压支架试验台·····                   | 226        |
| 第二节               | 立柱、千斤顶试验台·····                   | 242        |
| 第三节               | 大流量安全阀试验系统·····                  | 245        |
| <b>第十章</b>        | <b>系列高端液压支架研制·····</b>           | <b>257</b> |
| 第一节               | ZY12000/28/64D 型大采高液压支架·····     | 257        |
| 第二节               | ZY17000/32/70D 型特大采高液压支架·····    | 262        |
| 第三节               | “三软”复杂煤层大采高高端液压支架·····           | 273        |
| 第四节               | ZY8600/17/35 型中厚煤层高端液压支架·····    | 275        |
| 第五节               | 系列高端一次采全高液压支架·····               | 280        |
| 第六节               | 放顶煤高端液压支架·····                   | 285        |
| <b>第十一章</b>       | <b>高端液压支架技术标准体系·····</b>         | <b>310</b> |
| 第一节               | 国内外液压支架技术标准发展概况·····             | 310        |
| 第二节               | 液压支架的国家标准·····                   | 313        |
| 第三节               | 液压支架系列行业标准的制修订与标准体系现状·····       | 338        |
| <b>附录</b> ·····   |                                  | <b>354</b> |
| <b>参考文献</b> ····· |                                  | <b>368</b> |

# 第一章 高端液压支架与配套装备技术发展概论

## 第一节 国内外大采高综采技术和装备的发展

大采高综采一般是指采用长壁一次采全高方式开采3.5 m以上厚煤层（通常指4 m以上采高）的开采方法，其所采用的成套装备和相关技术组成大采高综采技术体系。

### 一、国外大采高综采技术与装备的发展

4~6 m厚煤层在世界主要产煤国均占有很大比重，井工开采这类厚煤层有3种方法，一是分层开采；二是放顶煤开采；三是一次采全高大采高综采。与分层开采相比，一次采全高大采高综采减少了50%巷道掘进和支护工程量，提高了单刀割煤量，不但降低了生产成本，而且提高了煤炭采出率，为实现工作面安全高效生产创造了条件。与放顶煤开采相比，在适宜大采高综采条件下，其回采率、煤质控制和生产效率均有更大优势。

国外主要产煤国家自20世纪70年代开始发展大采高综采，1980年联邦德国就开发试验了6 m大采高两柱掩护式液压支架并在维斯特伐伦矿进行大采高综采。该支架并相继出口到南斯拉夫、捷克和南非等国家的煤矿。这一时期的两柱掩护式液压支架工作阻力一般为4000~5000 kN，支架中心距1.5 m。

波兰是重要产煤国家，厚煤层储量丰富，在大采高装备和开采技术方面投入了很大力量，几乎与联邦德国同步开发大采高综采技术和装备，开发了最大高度达6 m的大采高液压支架和成套设备。

美国和澳大利亚等发达产煤国自20世纪80年代开始采用世界最先进的装备，大采高开采高度保持在4~4.5 m之间，并不断提高液压支架工作阻力和成套装备的装机功率，以高可靠性设备“大马拉小车”的配套模式实现高效集约化生产。

20世纪90年代，德国、英国等发达国家煤矿大多关闭，导致煤机制造商破产、兼并和重组。以美国为代表的长壁高效集约化生产模式引领了世界长壁开采装备的快速发展，配套装备成为大采高高效综采生产技术的核心。国外技术发展的最新特点是：

(1) 新型大功率电牵引采煤机总功率达到2000~3000 kW，装备了采用先进信息处理技术和传感技术的控制和故障诊断系统。德国Eickhoff公司的SL500系列采煤机采高范围2.0~6.5 m，最大牵引力可达1000 kN，最大牵引速度可达37 m/min，可以截割 $f \leq 10$ 的煤和岩石。美国JOY公司的7LS系列采煤机截高范围为2.0~5.5 m，最大牵引力可达800 kN，最大牵引速度可达30 m/min。

(2) 工作面刮板输送机向着大运量、软启动、高强度、重型化、高可靠性方向发展。最大运量达6000 t/h，装机功率 $4 \times 1200$  kW。中部槽的槽间连接强度已达到4500 kN，链环直径最大达 $2 \times \phi 52$  mm。采用伸缩机尾的液压自动张紧装置。

(3) 液压支架向高工作阻力的两柱掩护式支架发展，支护工作阻力达6000~12000 kN，支护高度3~6 m，支架立柱缸径320~440 mm，支架中心距1.75 m和2.0 m，支架控制方式为环形供液及电液控制，支架的降、移、升循环时间小于10 s，支架的寿命试验高达5万次以上。

(4) 长距离、大运量、高带速的大型带式输送机已成为主要发展方向。目前，煤矿带式输送机装机功率可达 $4 \times 970$  kW，运输能力已达5500 t/h，带速为5 m/s以上。应用动态分析技术和计算机

监控等手段实现动态设计及动态过程监测、监控等,确保了输送机运行的可靠性。采用 CST、变频等大功率软启动技术、自动张紧技术、高寿命高速托辊、快速自移机尾等,使设备开机率、可靠性指标与生产效率不断提高。

(5) 在实现单机工况实时监测的基础上,研究开发了基于振动信息或采高-位置自学习控制的采煤机滚筒自动调高技术、液压支架电液控制技术。工作面巷道集中控制中心通过采用位置红外传输、速度检测和计算机集中控制软件程序,使采煤机、刮板输送机、液压支架等设备自动完成割煤、运输、液压支架移架和顶板支护等生产流程,实现了工作面自动化生产。工作面巷道计算机集中控制中心还实时监测工作面顶板压力、供电、供液系统、运输巷带式输送机系统、煤仓料位等设备运行工况,并通过矿井通信光纤等介质经 Internet 网络与矿井及上部管理层实现信息交流和通信控制。

## 二、国内大采高综采技术与装备的发展

我国是世界上厚煤层储量最大的国家,国有重点煤矿厚煤层储量占 44%,而厚煤层采出的产量占煤炭总产量的 45% 以上,绝大多数高产高效矿井是在以厚煤层开采为主的生产条件下实现的。目前,我国重点煤矿厚煤层开采方法主要有综采放顶煤开采和大采高综采两种。放顶煤开采虽然已经在我国发展成为一种厚煤层高产高效采煤方法,广泛应用于 5~15 m 厚煤层的一次采全高,但仍有许多难以解决的技术难题。对于 4~6 m 的稳定厚煤层,大采高综采具有更好的技术经济优势。

我国自 20 世纪 70 年代末开始大规模引进国外综采装备,1979 年开滦矿区范各庄煤矿使用从联邦德国引进的 G320-23/45 型两柱掩护式支架,配套进口 EDW-3000LH 型双滚筒采煤机和 EKF374V 型刮板输送机开采 3.3~4.3 m 煤层。1986 年开始在邢台和义马等矿区试验国产 4.7~5 m 大采高综采装备,并陆续在西山、大同、铁法、双鸭山和徐州等矿区应用国产大采高综采装备技术。至 20 世纪末,国产大采高综采装备技术一直处于较低水平,液压支架工作阻力 3200~5000 kN,采煤机装机功率 600 kW,输送机输送能力 1000 t/h 以下,成套设备可靠性差、故障多。特别是大采高工作面支护效果差,矿压显现强烈,片帮和冒顶事故严重制约生产。

有效的支护是大采高工作面安全生产的前提条件,大采高液压支架的稳定性、适应性和可靠性是决定大采高成败的主要因素。大采高液压支架由于受力复杂,对设计、制造和使用的技术要求高、投资大,因而成为液压支架技术发展水平的标志。我国一些高产高效矿井长期依赖进口,神东和晋城等矿区先后引进了几十套国外大采高液压支架。

近十年来,以神东矿区为代表的现代化矿井建设,依靠得天独厚的厚煤层赋存条件和先进的管理模式,采用国际一流装备,进行 4~6 m 一次采全高,不断刷新工作面高产高效纪录,工作面年产量达到千万吨级水平。晋城寺河煤矿采用国产大采高液压支架,成功实现 6 m 一次采全高,月产量突破  $80 \times 10^4$  t。

2003 年,晋城煤业集团与天地科技股份有限公司开采所事业部及有关制造厂合作,率先进行高端大采高液压支架国产化研发。首次研制的 30 架 ZY8640/25.5/55 大采高液压支架于 2004 年 2 月底安装在寺河矿 3302 工作面,与 DBT 公司生产的支架在同一个工作面使用。经过一年多的井下使用,状况良好,最高日产量达  $3 \times 10^4$  t 以上,最高月产  $76 \times 10^4$  t。截止到 2006 年 5 月底,该 30 架支架的过煤量已经超过 11 Mt。在首采工作面试验成功的基础上,对使用中出现了的问题进行了改进,经过改进后制造的成套支架从 2005 年 3 月起开始在 2303 工作面生产,平均日产量  $2 \times 10^4$  t 以上,月产量  $63 \times 10^4$  t。试验期间对 2303 工作面支架性能进行了观测,表明支架工作阻力与支护强度合理,能够适应顶板来压,稳定性和护帮效果好,总体性能达到引进德国 DBT 支架的水平。为了最大限度地提高回采率,在充分论证的基础上,晋城煤业集团又与郑煤机和天地科技股份有限公司开采所事业部共同研制了世界第一套 6.2 m 大采高液压支架 ZY9400/28/62 并在寺河矿使用取得成功,工作面最大采高达 6.2 m 以上,工作面运转正常,在限产条件下月产达  $78 \times 10^4$  t,为进一步提高采高积累了经验。

## 第二节 年产 6 Mt 大采高综采技术和装备的研发

自 2004 年起,先后由科技部、国家发改委组织,由煤炭科学研究总院牵头,全国骨干煤炭科研设计、制造和生产企业集团产学研相结合,进行“厚煤层高效综采关键技术与成套装备”和“年产 6 Mt 综采成套装备研制”项目攻关研究。通过相关课题的研究,攻克了厚煤层高效综采关键技术,开发研制了高可靠性大采高综采成套装备,改变了我国大采高高端综采装备依赖进口的局面。同时以此为契机,全面提升了我国煤机行业设计、加工、制造水平,进而全面提升了国产综采装备的生产能力和可靠性,建立了大采高综采技术体系。

### 一、年产 6 Mt 大采高工作面总体配套技术研究

年产 6 Mt 大采高工作面总体配套技术研究是“年产 6 Mt 综采成套装备研制”项目的重要综合性研究开发专题。针对大型煤矿高效集约化生产要求和项目工程依托单位的煤层开采条件,研究适应 4~6 m 厚煤层一次采全高工艺的年产 6 Mt 综采成套装备的合理选型配套,针对厚煤层赋存条件和高效综采工作面设备配套布置尺寸要求和安全通道及通风要求,确定合理的工作面巷道布置方式、端头支护方式、工作面生产作业方式,完成综采工作面 3.3 kV 供电系统和设备选型设计,针对工业性试验工作面顶板压力、瓦斯、涌水等情况,提出安全生产和地质保障技术措施。

#### 1. 4~5 m 厚煤层年产 6 Mt 大采高工作面设备参数的确定

调研国内外大采高高产高效强力综采工作面装备配套情况,建立一套科学计算工作面生产能力和优化确定设备参数的方法和公式,提出 4~5 m 厚煤层年产 6 Mt 工作面设备的合理技术参数和科学依据,为成套设备的研发确定基础参数。

#### 2. 工作面合理参数和工艺系统优化配置

应用模糊数学和系统分析等方法,建立综采工作面参数优化数学模型和系统分析,提出 4~5 m 厚煤层高效综采工作面系统优化配置方案,实现工艺系统的适应性、有效性和可靠性的最大化。

#### 3. 工作面设备总体配套优化

完成工作面设备的总体布置图设计,合理确定工作面“三机”配套关系,工作面巷道设备的配套关系,供电系统、通信、照明、乳化液泵站、供液系统、远程监控、工作面巷道集中控制等系统的协调配套,建立安全、高效、可靠的系统网络。

#### 4. 工作面生产工艺优化与控制系统适应性研究

针对大同塔山和神东矿区的 4~5 m 厚煤层赋存条件和高产高效开采要求,研究综采工作面作业方式和工序匹配。优化采煤机作业方式和液压支架的控制方式,开发与生产工艺相适应的电液控制程序。

#### 5. 远程控制与通信

研究确定采煤机与支架电液控制系统间的位置监测和通信方式,研究确定地面调度中心远程控制的实现途径。

#### 6. 合理的巷道断面尺寸及端头支护方式

根据工作面设备配套布置的尺寸要求和安全通道及通风条件等要求,确定合理的工作面巷道断面尺寸,研究确定端头支护方式,最大限度地减少端头作业量,为实现工作面高产高效创造条件。

#### 7. 综采工作面 3.3 kV 供电系统设计和设备选型

根据设备装机功率,核定 3.3 kV 供电系统设备容量,优化配置移动变电站、负载中心、开关和电缆等设备。

#### 8. 综采工作面安全生产保障措施设计研究

根据工程依托单位具体情况设计综采工作面顶板控制、通风、降尘、快速掘进、巷道支护、地质探测等施工方案和安全生产保障措施,并针对突出问题进行专题研究。

#### 9. 顶板压力显现规律及两柱掩护式强力支架与顶板相互作用关系研究

内蒙鄂尔多斯、神东和黄陵矿区4~6 m煤层埋深较浅,顶板较稳定,是目前我国具备高产高效开采条件的主要矿区。通过工作面矿压观测研究和相似材料模拟试验及离散元分析等相结合,研究该煤层大采高工作面矿压显现规律,建立两柱掩护式强力液压支架与顶板相互作用力学模型。

#### 10. 工作面支护质量评价体系研究

研究工作面片帮、冒顶、顶板破碎度等规律和支护质量的评价指标,建立科学的支护质量评价体系。

#### 11. 工作面设备适应性研究

研究配套设备的协调性,设备与工作面地质条件的适应性,影响开机率的因素和提高开机率的措施。

#### 12. 技术经济分析

对项目实施效果进行综合技术经济分析研究,总结经验教训,指导推广应用。

## 二、大采高电液控制强力液压支架的研制

液压支架是综采主要设备之一,其投资约占综采装备总投资额的60%以上。目前我国重点矿区使用的大采高强度液压支架主要依靠进口,引进一套大采高强度液压支架需花费外汇3000万欧元以上,并且受到国外公司价格垄断的制约,备件进口价格甚至达到整机进口时随机备件价格的40倍。这种国外一两家公司垄断我国高端液压支架市场的局面,不但极大地制约了国产液压支架行业的发展,而且制约着煤炭工业的可持续发展。

大采高强度液压支架是液压支架的高端产品,涉及设计、材料和加工等综合技术。本项目设计研制开发满足高产高效矿井4~5.5 m厚煤层一次采全高产6 Mt工作面要求的高可靠性大采高强度液压支架,对其架型参数、结构适应性、设计方法、材料、配套元件和制造工艺等关键技术进行攻关,全面提升国产液压支架技术水平。使其主要性能和可靠性指标达到国外同类产品的先进水平,实现高端液压支架国产化,替代进口。

### (一) 国内首台套10000 kN两柱大采高支架主要技术特征和指标

#### 1. 黄陵中部支架主要技术参数

| 型式                  | ZY10000/26/55型掩护式液压支架 |
|---------------------|-----------------------|
| 支架高度(最低/最高)         | 2600/5500 mm          |
| 支架宽度(最小/最大)         | 1660/1860 mm          |
| 中心距                 | 1750 mm               |
| 初撑力( $p=31.5$ MPa)  | 7917 kN               |
| 工作阻力( $p=39.8$ MPa) | 10000 kN              |
| 对底板比压(前端值)          | 1.7~4.5 MPa           |
| 支护强度                | 1.10~1.15 MPa         |
| 泵站压力                | 31.5 MPa              |
| 控制方式                | 电液控制                  |
| 双伸缩立柱(2根)           | $\phi 400/290$ mm     |
| 推移千斤顶(1根)           | $\phi 180/115$ mm     |
| 侧推千斤顶(4根)           | $\phi 80/60$ mm       |
| 抬底千斤顶(1根)           | $\phi 140/105$ mm     |
| 平衡千斤顶(2根)           | $\phi 180/115$ mm     |

|                       |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| 一级护帮千斤顶(2根)           | $\phi 125/85$ mm         |
| 二级护帮千斤顶(2根)           | $\phi 80/60$ mm          |
| 2. 黄陵过渡支架主要技术参数       |                          |
| 型式                    | ZYG10000/26/55 型掩护式过渡支架  |
| 支架高度(最低/最高)           | 2600/5500 mm             |
| 支架宽度(最小/最大)           | 1660/1860 mm             |
| 中心距                   | 1750 mm                  |
| 初撑力( $p = 31.5$ MPa)  | 7917 kN                  |
| 工作阻力( $p = 39.8$ MPa) | 10000 kN                 |
| 对底板比压(前端值)            | 1.7 ~ 4.5 MPa            |
| 支护强度                  | 1.00 ~ 1.05 MPa          |
| 泵站压力                  | 31.5 MPa                 |
| 控制方式                  | 电液控制                     |
| 3. 黄陵端头支架主要技术参数       |                          |
| 型式                    | ZYT10000/26/45 型掩护式端头支架  |
| 支架高度(最低/最高)           | 2600/4500 mm             |
| 支架宽度(最小/最大)           | 1660/1860 mm             |
| 中心距                   | 1750 mm                  |
| 初撑力( $p = 31.5$ MPa)  | 7917 kN                  |
| 工作阻力( $p = 39.8$ MPa) | 10000 kN                 |
| 对底板比压(前端值)            | 1.7 ~ 2.8 MPa            |
| 支护强度                  | 0.94 ~ 0.98 MPa          |
| 泵站压力                  | 31.5 MPa                 |
| 控制方式                  | 电液控制                     |
| 4. 黄陵超前支护液压支架主要技术参数   |                          |
| 型式                    | ZTC39200/25/38 型超前支护液压支架 |
| 支架高度(最低/最高)           | 2500/3800 mm             |
| 支架宽度(最小/最大)           | 4300 ~ 5100 mm           |
| 立柱中心距                 | 3000 mm                  |
| 初撑力( $p = 31.5$ MPa)  | 31034 kN                 |
| 工作阻力( $p = 39.8$ MPa) | 39200 kN                 |
| 对底板平均比压               | 1.3 MPa                  |
| 支护强度                  | 0.38 MPa                 |
| 泵站压力                  | 31.5 MPa                 |
| 控制方式                  | 电液控制                     |

#### 考核指标:

(1) 支架样机寿命按达到 6 万次循环试验加载(按新标准),大修周期(按产煤计算)达到 12 Mt 以上。

(2) 强力支架焊接结构件、 $\phi 400$  mm 大缸径立柱和主要国产元部件达到国际同类产品水平。

#### (二) 大采高强度液压支架选型与合理参数的确定

大采高强度液压支架选型和参数的确定是保证支架适应性和可靠性的基础,涉及对煤层赋存条件、矿山压力规律、支架与围岩相互作用关系的研究等。国内外在中厚煤层选型与合理参数确定方面虽已进行了许多研究,在《缓倾斜煤层顶板分类》标准中推荐了液压支架的选型标准。但是,对于 4 ~ 6 m 厚煤层一次采全高年产 6 Mt 工作面高强度开采液压支架合理参数的确定还没有相应的理论和方法,国内外均没有一个大采高强度液压支架选型和参数确定的标准。岩层移动规律和支架-围岩关系

研究是进行支护理论研究和液压支架选型设计的基础,同时也是进行其他研究工作的重要依据。

该项目依托的黄陵二号矿和神华万利一矿 4~5.5 m 煤层是我国目前具备高产高效开采条件的主要矿区之一,目前对矿区的顶板压力显现规律还未掌握。由于目前用全套国产设备开采 4~5.5 m 厚煤层的综采工作面并不多,邢台东庞煤矿等进行过 4.5 m 大采高(年产量 2 Mt 左右)综采实践,另外,神华集团进行了 4~5.5 m 厚煤层大采高一次采全厚开采,积累了较为丰富的矿压观测资料,因此本项目详细搜集了这方面的研究和实测资料,并结合中厚煤层矿压研究成果总结分析 4~5.5 m 厚大采高矿压显现特点,为支架工作阻力的确定提供了依据。

#### 1. 4~5.5 m 厚煤层一次采全高综采工作面支架-围岩相互作用关系研究

根据试验工作面围岩条件,建立相应的力学模型,用相应的数学、力学工具进行力学计算分析,得出支架工作阻力确定的解析计算公式,作为确定支架工作阻力的理论计算公式,并提出上位岩层所形成的结构形式,分析支架外载主要影响因素及上位结构形成的力学机理。

#### 2. 采用岩石力学数值模拟和相似材料模拟实现支架参数与围岩的动态适应性设计

用先进的岩石力学三维有限差分软件 FLAC 3D 和三维离散元软件 UDEC 3D 进行耦合模拟计算,将用上述两种方法所确定的液压支架作为承载体放入模型中,进行开挖后变形、受力、运动模拟,进行不同方案的模型模拟,从而确定出合理的支架支护参数。

该项目通过取样进行试样力学特性实验,确定工作面煤质和顶底板的物理力学性质。通过物理力学性质的确定,进行 100:1 和 50:1 的相似模拟实验,以研究矿压显现规律、岩层控制措施和相应的工艺。

将 FLAC 3D 等数值模拟实验得到的数据与相似模拟实验结果进行对比,准确得出不同外载、不同结构下支架的受力状态,调整结构参数,实现支架参数与围岩的动态适应性设计。

### (三) 年产 6 Mt 综采工作面高可靠性液压支架优化设计

#### 1. 采用现代设计理念和三维动态设计方法进行高可靠性液压支架的设计

液压支架设计是液压支架技术最重要的组成部分之一,我国经过 30 多年的设计研究和实践,已具有较强的液压支架设计力量,取得了一批具有国际先进水平的成果。但是,长期以来由于受煤炭工业经济条件和基础工业条件的限制,设计理念注重经济性,对大采高强力液压支架缺乏基础性研究,在设计手段方面软硬件投入不足,一般只能进行二维设计。该项目拟对引进的国外先进大采高强力液压支架进行全面的消化吸收,解剖实验,分析研究,同时对国内大采高液压支架的设计制造和使用进行全面调研和总结分析,从设计理念和设计方法上进行全面创新完善,上一个新台阶。研究采用现代设计方法,建立三维动态设计方法体系,进行虚拟样机三维设计和动态仿真研究,神经网络优化设计,四连杆机构间隙及轨迹分析研究等。

大采高液压支架受力比一般支架更为复杂,4~5.5 m 厚煤层一次采全高工作面支架与顶板围岩的相互作用力远大于中厚煤层支架。由于支架的结构是采用高强度钢板焊接而成且为复杂的厚板箱形结构,由焊缝产生的残余应力和应力集中更为复杂。目前,虽然对常规液压支架受力和强度计算已有较成熟的方法,但对上述新问题缺乏研究。有限元计算方法虽然已很成熟,在液压支架结构计算上的应用也已进行多年,但由于液压支架厚板箱形结构和受力的复杂性,使得计算的实用性一直较差。本项目拟对这些难题进行攻关研究,借助项目资金的支持进行必要的软硬件投入,购置先进的 Pro/Engineer 和 ANSYS 软件系统,提高研究手段,攻克上述技术难题。

#### 2. 大采高液压支架防片帮冒顶机构设计

大采高工作面片帮冒顶是制约生产的最突出问题,国内外在大采高长壁开采方面虽然已积累了许多经验,但是,对片帮冒顶机理的研究和认识还很匮乏,治理措施也不够完善。除了像神东矿区这种世界上少有的优越煤层赋存条件外,我国大多数矿区煤层赋存条件复杂,片帮冒顶严重制约着工作的安全生产。要实现年产 6 Mt,必须有效解决大采高工作面片帮冒顶问题。本项目通过相似材料模拟实验和数值模拟试验相结合,理论分析与现场实测相结合,研究大采高工作面片帮冒顶的有效治理措

施,研制和试验支架高可靠性护帮机构。

### 3. 提高两柱掩护式大采高支架稳定性的研究及结构设计

大采高液压支架的稳定性包括横向稳定性和纵向稳定性,是支架使用成功与否的关键问题,其影响因素不仅包括四连杆机构参数、轴孔间隙,也涉及工作面条件参数、支架加工工艺等。目前,虽然已进行了一些研究,但是,针对年产6 Mt工作面高强度开采强力液压支架的稳定性必须进行专门深入研究,确保液压支架在工作面支护系统中的稳定性。本项目对各项影响因素进行单独的和综合的试验研究和理论研究,用于指导设计、加工和使用。根据依托工程的具体条件和研究确定的配套方案,进行整机支架优化设计,完成全套施工图纸。

#### (四) 基于 Pro/Engineer 平台的液压支架三维参数化设计系统开发

在引进 Pro/Engineer 和 ANSYS 软件的基础上,进行液压支架三维参数化设计系统的开发,主要研究内容如下:

##### 1. 支架设计布局的创建

布局(layout)又叫整体规划,是指一些能反映设计要求和设计意图的草绘几何,布局中包含用于控制整个组件的设计规范和要求。长期以来大型产品设计的最大缺陷在于没有一个环节来体现最初的设计思想与意图,用户的设计要求与支架设计人员的设计思想都是直接反映在工程图当中。由于没有一个环节来体现上述这些思想与要求,因而设计思想难以在设计过程始终得到贯彻与执行。而布局的最大特点就是可以将上述思想直接体现出来。

布局采取的做法是在支架最初设计阶段将产品的基本设计思想与要求定义为全局变量,由全局变量对骨架模型和零件的结构、形状以及装配关系进行控制,由于在骨架模型和零件当中无法修改全局变量的数值,这样支架的设计思想与要求就得到了自觉的贯彻与执行。

液压支架布局设计主要包括以下几方面研究内容:

(1) 参数化设计变量的确定。所谓参数化设计变量是指将支架的结构布置方式、销轴配合关系等空间几何关系通过合理的技术手段转化为便于分析的参数化设计变量。

(2) 骨架模型控制参数确定。对开采所已设计的支架结构进行研究,提取出一些基本变量(参数)作为骨架模型的控制参数。

(3) 全局变量的确定。由于支架结构尺寸繁多,如何选择全局变量意义重大。由于全局变量是对各部件都进行控制,因此必须要对支架结构进行认真分析,提取出一些基本的、唯一的、反映支架基本特性的尺寸作为全局控制变量。

##### 2. 液压支架骨架模型的建立

骨架模型(skeleton)是用户绘制的用以定义模型基本结构和装配关系的草绘图。由于它是将产品的最基本信息提取出来,代表了模型的基本结构与装配信息,有点类似人体骨架,故称为骨架模型。骨架模型主要由基准特征组成,是提供组件设计的框架,对连杆机构最为实用。由于骨架模型是将产品的最基本信息提取出来,代表了模型的基本结构与装配信息,因而液压支架采用上述模型很有效。采用骨架模型的优点主要在于:

(1) 可以与现有的二维参数化设计系统无缝兼容,充分利用现有资源,实现设计系统平稳过渡。

(2) 直接进行运动仿真,不必采用相关的软件来对支架进行运动仿真,大大提高了设计效率。

(3) 可以绘制支架重心轨迹和梁端轨迹曲线,使支架设计更加安全可靠。

(4) 可以绘制四连杆机构瞬心轨迹曲线,克服了目前仿真软件无法绘制四连杆机构瞬心轨迹曲线的缺陷。

(5) 可以对个别部件进行仿真并绘制其重心轨迹曲线,克服了目前仿真软件无法绘制个别部件重心轨迹曲线的缺陷。

##### 3. 基于 Top - Down 的液压支架设计技术