

煤巷锚杆支护理论与 成套技术

ROCK BOLTING THEORY AND COMPLETE
TECHNOLOGY FOR COAL ROADWAYS

康红普 王金华 等 著



煤炭工业出版社

煤炭科学研究总院学术著作出版基金资助

煤巷锚杆支护理论与成套技术

Rock Bolting Theory and Complete Technology for Coal Roadways

康红普 王金华 等 著

煤炭工业出版社

·北京·

内 容 提 要

本书以煤炭科学研究总院北京开采研究所近 15 年来所取得的 100 余项与锚杆支护技术有关的科研成果为基础,结合国内外最新发展动态与研究成果,全面、系统地阐述了煤巷锚杆支护理论与成套技术。具体内容包括煤巷锚杆支护理论、巷道围岩地质力学测试技术、锚杆支护设计方法、支护材料、施工机具和工艺、矿压监测仪器与技术、锚杆支护技术规范、煤巷快速掘进技术及现场应用实例。

本书既有深入、系统的理论研究成果,又有成套的实用技术,并用大量篇幅介绍了煤巷锚杆支护技术的应用实例。这些实例几乎涵盖了我国煤矿的各种煤巷类型,有很强的示范性。

本书可供采矿工程、岩石力学领域的科研、教学、设计及生产单位的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤巷锚杆支护理论与成套技术/康红普、王金华等著.
—北京:煤炭工业出版社,2007.11
ISBN 978-7-5020-3171-8

I. 煤… II. ①康…②王… III. 煤巷-锚杆-巷道
支护 IV. TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 125186 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
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 23¹/₂
字数 549 千字 印数 1—3,000
2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷
社内编号 5972 定价 110.00 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

序

我国煤矿以井工开采为主，需要在井下开掘大量巷道，而且80%以上是煤巷与半煤岩巷。保持巷道畅通与围岩稳定对煤矿安全生产具有重要意义。

煤矿巷道支护经历了木支护、砌碛支护、型钢支护到锚杆支护的漫长过程。国内外实践表明，锚杆支护是煤巷经济、有效的支护形式。与棚式支架相比，锚杆支护可显著提高巷道支护效果，降低支护成本，减轻工人劳动强度。更重要的是锚杆支护可大大简化采煤工作面端头支护和超前支护工艺，显著降低巷道维修工作量，为采煤工作面的快速推进、产量与效益的提高创造良好条件。

我国煤矿巷道应用锚杆支护技术的历史已有半个世纪。最早采用的锚杆类型主要是机械锚固锚杆和钢丝绳砂浆锚杆，之后研制出树脂锚杆、快硬水泥锚杆，还引进和应用了管缝式锚杆、胀管式锚杆等。20世纪90年代中期又引进和应用了高强度树脂锚固锚杆。可以说，国外使用过的锚杆型式国内基本上都用过。但是，我国煤矿巷道复杂困难条件分布广、类型多，对安全、大面积使用锚杆支护技术提出极大的挑战。

我国煤矿锚杆支护首先在岩巷中应用成功，并得到大面积推广应用，之后逐步开始应用于采区巷道。由于煤巷围岩比较松软破碎，又受到采动影响，围岩变形大，对支护技术要求高。而且早期的锚杆支护技术研究，无论从支护理论、设计方法，还是支护材料、施工机具与监测仪器等方面都还很成熟，支护系统的强度、刚度低，控制围岩变形与破坏的能力差，导致煤巷锚杆支护技术发展缓慢，应用范围局限于围岩条件较好的巷道。直到1995年，我国国有重点煤矿煤巷锚杆支护所占比重仅为15.15%，煤巷支护主要以棚式支护为主。

为了改善巷道支护效果，为矿井的快速建设、安全生产与高产高效创造有利条件，迫切需要大力发展煤巷锚杆支护技术，扩大锚杆支护使用范围。为此，在“九五”期间，原煤炭部把煤巷锚杆支护技术列为五大科技攻关项目之一，开展了全面、深入、细致的研究与试验工作。特别是1996—1997年引进了澳大利亚锚杆支护技术，在那台矿区进行了现场演示，并完成了与锚杆支护技术有关的一系列科研项目。这些科研工作显著提高了我国煤巷锚杆支护技术水平，带动了全国范围内煤巷锚杆支护技术的快速发展与大面积推

广应用，实现了巷道支护技术的一次飞跃。高强度螺纹钢锚杆，动态支护设计方法，小孔径树脂锚固预应力锚索等新技术、新材料、新方法得到广泛认可，并应用于综采放顶煤工作面煤顶巷道、复合与破碎顶板巷道等困难条件，取得良好的支护效果和技术经济效益。

近几年来，随着煤矿开采强度、规模与产量的大幅度提高，以及煤矿开采深度的不断增加，出现了许多前所未有的复杂困难巷道，包括深部高地应力巷道、特大断面巷道、沿空掘巷与留巷、受强烈采动影响巷道及松软破碎围岩巷道等，对锚杆支护提出更高、更苛刻的要求。为了解决这些支护难题，科研院所、大专院校及煤炭企业在锚杆支护技术方面又做了大量研究工作。针对复杂困难巷道条件提出多种锚杆支护理论，深化了对锚杆支护本质作用的认识；开发出多种巷道围岩地质力学参数测试仪器，并在井下得到广泛应用，为巷道布置与支护设计提供了比较全面、可靠的基础参数；研制出高强度、高刚度的支护材料，并逐步形成系列；施工机具与工艺进一步完善，掘进速度不断提高；矿压监测仪器不断完善，并向自动化、信息化方向发展；将锚固与注浆加固技术有机结合，研制出注浆锚杆、注浆锚索及钻锚注一体化锚杆，为破碎围岩提供了有效的加固手段；有些矿区针对具体条件，制订了本矿区的煤巷锚杆支护技术规范，促进了煤巷锚杆支护技术的健康发展。

到2005年，国有重点煤矿的煤巷锚杆支护率达到60%，有些矿区超过了90%，甚至达到100%。锚杆支护已经成为我国煤矿巷道首选的、安全高效的主要支护方式。煤巷锚杆支护技术是继我国煤矿成功应用综合机械化采煤技术以来，采掘技术的又一次革命。它深刻地改变了矿井的开拓部署与巷道布置方式，对我国高产高效矿井建设、煤炭产量与效益的大幅度提高起到不可替代的重要作用。

本书的作者长期从事锚杆支护理论与技术的研究工作，承担和完成过多项国家和煤炭行业重大项目，具有比较扎实的理论基础与丰富的实践经验。该书以近15年来煤炭科学研究总院北京开采研究所在全国30多个矿区所取得的100余项与锚杆支护技术有关的科研成果为基础，结合国内外最新发展动态与研究成果，系统阐述了煤巷锚杆支护理论与技术，涉及锚杆支护理论、围岩地质力学测试技术、支护设计方法、支护材料、施工机具和工艺、矿压监测仪器与技术、锚杆支护技术规范、煤巷快速掘进技术及井下应用实例。

本书既有深入、系统的理论分析，又有实用性强的成套技术。本书力求包含当前国内外的最新研究成果与应用情况，具有新颖性；全面、系统地介绍锚杆支护技术涉及的理论、方法、材料、机具、仪器及规范，具有全面性和系统性；用大量的篇幅介绍煤巷锚杆支护技术的工程应用实例，几乎涵盖

了我国煤矿的各种煤巷类型，为煤矿现场应用提供范例与参考，具有很强的实用性。本书还特别强调技术的成套性，强调必须做好锚杆支护工作中每个环节的工作。只有形成成套技术，锚杆支护技术才能安全、健康地发展。

我相信，本书的出版将对我国煤矿锚杆支护技术的发展和應用起到积极的推动作用，对从事巷道支护理论与技术研究的科技工作者具有较大的参考价值。

中国工程院院士 高鸣远

2007年7月

前 言

掘进与回采是煤矿开采的两个关键环节。安全、有效、快速的巷道支护技术是保证矿井安全、高效生产的必要条件。我国国有大中型煤矿每年新掘进的巷道总长度高达数千公里（2005年度原国有重点煤矿巷道掘进总进尺为7 598.4 km，其中开拓巷道进尺1 153.2 km），80%以上是煤巷与半煤岩巷。如此巨大规模的地下工程在其他行业是不多见的。因此，巷道支护成本、速度、可靠性直接影响煤炭企业的经济效益与安全生产。

煤矿巷道支护经历了木支护、砌碛支护、型钢支护到锚杆支护的漫长过程。多年来国内外的实践经验表明，锚杆支护是煤巷经济、有效的支护技术。与棚式支架支护相比，锚杆支护显著改善了巷道支护效果，降低了巷道支护成本，减轻了工人劳动强度。更重要的是锚杆支护大大简化了采煤工作面端头支护和超前支护工艺，改善了作业环境，保证了安全生产，为采煤工作面的快速推进创造了良好条件。目前，锚杆支护技术已在国内外得到普遍应用，是煤矿实现安全、高效生产必不可少的关键技术之一。

我国煤矿于1956年开始在岩石巷道中使用锚杆支护，至今已有50多年的历史。锚杆支护技术经历了从低强度、高强度到高预应力、强力支护的发展过程。

我国早期采用的锚杆支护强度、刚度低，支护原理上仍属于被动支护，加之支护理论、设计方法、支护材料、施工机具、监测仪器等不成熟，导致煤巷锚杆支护技术发展缓慢。1990年，我国国有重点煤矿煤巷锚杆支护仅占3%~5%。在“八五”期间，将煤巷锚杆支护技术列为国家重点科技攻关项目，完成了一批较高水平的科研课题，并应用于多个矿区，取得较好的支护效果。在“九五”期间，原煤炭部又把煤巷锚杆支护技术列为重点课题，展开了更全面、深入、细致的研究与试验工作。特别是1996—1997年我国引进了澳大利亚锚杆支护技术，在邢台矿区进行了现场演示，并完成了与锚杆支护技术有关的15个项目，显著提高了我国煤巷锚杆支护技术水平。高强度螺纹钢锚杆并进行加长或全长树脂锚固、动态支护设计方法、小孔径树脂锚固预应力锚索等新技术、新材料、新方法得到广泛认可，应用于煤顶巷道、复合与破碎顶板巷道等困难条件，取得良好的支护效果和技术经济效益。

进入21世纪以来，随着煤矿开采强度、规模与产量的大幅度提高，综采

放顶煤与厚煤层一次采全高采方法的大面积推广应用，以及煤矿开采向深度与广度发展，出现了许多前所未有的复杂巷道，包括煤顶和全煤巷道、松软破碎围岩巷道、深部高地应力巷道、特大断面巷道、沿空掘巷与留巷、受强烈采动影响巷道等。这些巷道对锚杆支护技术提出更高、更苛刻的要求。为了解决这些支护难题，近年来我国又开发出高预应力、强力锚杆与锚索支护技术，真正实现了锚杆的主动、及时支护，充分发挥了锚杆的支护作用。新型锚杆支护技术在井下的应用大幅度地减小了巷道围岩变形与破坏，巷道支护与安全状况发生了本质改变。同时，实现了高强度、高刚度、高可靠性与低支护密度“三高一低”的现代锚杆支护设计理念，在保证支护效果的前提下，显著提高了巷道掘进速度与工效。

1995年我国国有重点煤矿煤巷锚杆支护所占比重仅15.15%，到2005年，国有重点煤矿的煤巷锚杆支护率达到60%，有些矿区超过了90%，甚至达到100%。锚杆支护已经成为我国煤矿巷道首选的、安全高效的主要支护方式。可以说，煤巷锚杆支护技术是继我国煤矿成功应用综合机械化采煤技术以来，采掘技术的又一次革命。它深刻地改变了矿井的开拓部署与巷道布置方式，对我国高产高效矿井建设、煤炭产量与效益的大幅度提高起到不可替代的作用。

尽管如此，我国煤矿巷道锚杆支护技术还存在很多问题。很多矿区对锚杆支护作用机理认识不清；支护设计主要采用工程类比法，科学性、合理性和可靠性差；支护材料品种繁多、加工质量参差不齐，缺乏系列化与标准化；锚杆支护成巷速度比较低，不能满足回采工作面快速推进的要求，造成采掘接续紧张；工程质量检测和矿压监测没有纳入正常生产中，顶板事故时有发生；缺乏煤巷锚杆支护技术规范，不利于锚杆支护技术的健康发展。为此，需要出版一部全面、系统介绍煤巷锚杆支护理论与成套技术的专著，为全国煤巷锚杆支护技术的推广应用起到促进作用。

本书以煤炭科学研究总院北京开采研究所近15年来所取得的100余项与锚杆支护技术有关的科研成果为基础，结合国内外最新发展动态与研究成果，全面、系统地论述煤巷锚杆支护理论与成套技术，包括煤巷锚杆支护理论、巷道围岩地质力学测试技术、锚杆支护设计方法、支护材料、施工机具和工艺、矿压监测仪器与技术、锚杆支护技术规范、煤巷快速掘进技术及井下应用实例。本书既有深入、系统的理论研究成果，又有实用性与成套性强的应用技术，期望该书的出版对我国煤巷锚杆支护技术的健康发展和大面积推广应用起到积极的推动作用。

全书的整体构思、统稿和审定由康红普负责。各章编写分工：第一章，

康红普；第二章，康红普；第三章，康红普、林健、颜立新；第四章，康红普、王泽进、贾金河；第五章，康红普、王金华、林健、鲍海山；第六章，王金华、鲍海山、王兴库；第七章，鞠文君、贾金河；第八章，王金华、郑书兵；第九章，王金华；第十章，康红普、鞠文君、林健、郑书兵、王兴库、颜立新；第十一章，康红普、王金华。此外，北京开采研究所巷道支护室的其他人员也参加了部分章节的编写。

本书涉及的很多科研项目都是与煤炭企业合作完成的。山西潞安、晋城、大同、西山、阳泉、汾西，河北邢台、开滦；山东兖州、新汶，辽宁铁法，甘肃华亭，河南平顶山，陕西铜川，内蒙古平庄，神东等矿区，以及陕西彬县煤炭有限责任公司下沟煤矿、山西天地王坡煤业有限公司等煤矿给予大力帮助与支持。本书得到煤炭科学研究总院学术著作出版基金资助。在本书的编写过程中，煤炭科学研究总院北京开采研究所和学术委员会的领导给予大力支持。在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2007年6月

目 次

序	
前言	
第一章 概述	1
第二章 煤巷锚杆支理论	13
第一节 锚杆支护构件的作用	13
第二节 锚杆支护的加固作用	20
第三节 现有锚杆支理论评述	23
第四节 锚杆支护作用机理分析	28
第三章 巷道围岩地质力学测试技术	36
第一节 地应力测量	36
第二节 巷道围岩强度原位测试	44
第三节 巷道围岩结构观察	48
第四节 巷道围岩地质力学快速测试系统的现场应用	51
第四章 煤巷锚杆支护设计方法	67
第一节 锚杆支护工程类比设计法	67
第二节 锚杆支理论分析设计法	72
第三节 锚杆支护动态信息设计法	77
第四节 锚杆支护预紧力设计	83
第五节 锚杆支护参数设计	86
第六节 煤巷锚杆支护设计软件	95
第五章 煤巷锚杆支护材料	105
第一节 锚杆种类与支护形式	105
第二节 常用金属锚杆型式	108
第三节 高强度锚杆杆体及附件	112
第四节 树脂锚固剂	121
第五节 组合构件与网	124
第六节 可切割锚杆	131
第七节 锚索	134
第八节 锚杆桁架	140
第九节 锚杆与注浆联合加固	143
第六章 煤巷锚杆支护施工机具与工艺	151
第一节 国内外锚杆钻机发展概况	151
第二节 单体顶板锚杆钻机	153

第三节	单体帮锚杆钻机	159
第四节	锚索施工机具	162
第五节	钻头与钻杆	167
第六节	锚杆施工预紧机具	171
第七节	锚杆与锚索施工工艺	174
第七章	煤巷锚杆支护工程质量检测与监测技术	179
第一节	锚杆支护工程质量检测技术	179
第二节	巷道表面位移监测	189
第三节	巷道顶板离层监测	191
第四节	巷道围岩深部多点位移监测	194
第五节	锚杆与锚索受力监测	199
第六节	煤柱应力监测	205
第七节	巷道矿压监测数据处理与信息反馈	208
第八节	巷道矿压监测数据处理软件	210
第八章	煤巷锚杆支护技术规范	216
第一节	煤巷锚杆支护技术规范编制的必要性与方法	216
第二节	煤巷锚杆支护技术规范的内容及实例介绍	218
第九章	煤巷快速高效掘进技术	230
第一节	国内外煤巷快速掘进技术概况	230
第二节	普通综合机械化掘进技术	233
第三节	掘锚一体化技术	238
第四节	连续采煤机快速掘进技术	242
第五节	煤巷快速掘进技术的改进与发展	249
第十章	煤巷锚杆支护技术的工程应用	251
第一节	煤矿巷道类型与特点	251
第二节	复杂困难巷道类型与特点	256
第三节	大巷锚杆支护与加固技术	257
第四节	煤层上下山与集中巷锚杆支护与加固技术	271
第五节	回采工作面回风与运输巷锚杆支护技术(实体煤巷道)	276
第六节	回采工作面回风与运输巷锚杆支护技术(煤柱护巷)	288
第七节	小煤柱沿空掘巷锚杆支护技术	292
第八节	急倾斜特厚煤层全煤巷道锚杆支护技术	301
第九节	深部高地应力巷道锚杆支护技术	305
第十节	极软强膨胀围岩巷道支护技术	313
第十一节	回采工作面开切眼锚杆支护技术	315
第十二节	回采工作面回撤通道锚杆支护技术	322
第十三节	大断面交岔点及特殊条件巷道支护加固技术	328
第十四节	巷道底鼓防治技术	332
第十五节	采空区留巷与支护技术	338

第十一章 煤巷锚杆支护技术经济效益分析.....	344
第一节 煤巷锚杆支护的技术效果.....	344
第二节 煤巷锚杆支护的经济效益.....	346
第三节 煤巷锚杆支护的社会效益.....	355
参考文献.....	357

第一章 概 述

煤炭是国民经济和社会发展的基础。煤炭在我国一次能源生产和消费结构中始终占70%左右,而且煤炭在相当长的时期内仍将是我国的主要能源。当前,快速增长的经济对煤炭工业发展提出了更高的要求,为此必须确保煤炭工业持续、稳定、健康发展。

我国煤矿以井工开采为主,生产环境条件复杂,与其他行业相比,对煤矿开采技术、装备、生产安全要求更高。井工开采需要在井下开掘大量巷道,据不完全统计,我国国有大中型煤矿每年新掘进的巷道总长度高达数千公里(2005年度原国有重点煤矿巷道掘进总进尺为7 598.4 km,其中开拓巷道进尺1 153.2 km),80%以上是煤巷与半煤岩巷。如此巨大规模的地下工程在其他行业是不多见的。因此,保持巷道畅通和围岩稳定对煤矿建设与生产具有重要意义,巷道支护成本、速度、可靠性直接影响煤炭企业的经济效益与安全生产。

一、煤矿开采对巷道支护技术的要求

掘进与回采是煤矿开采的两个关键环节。安全、有效、快速的巷道支护技术是保证矿井实现高产高效的必要条件。巷道支护技术应满足以下3方面的要求:

1. 煤矿安全生产的要求

我国煤矿事故死亡人数远远超过世界上其他主要采煤国家。死亡事故主要发生在技术与装备比较落后的国有地方煤矿与乡镇煤矿。我国煤矿事故类型当中,顶板事故非常严重。近年来的统计数据表明,顶板事故次数占全国煤矿事故次数的50%~55%,顶板事故死亡人数占全国煤矿死亡人数的30%~40%。顶板事故发生的频率高,死亡总人数多,而且顶板事故主要发生在掘进工作面与巷道。因此,煤矿安全生产要求巷道支护必须安全、可靠,保证巷道围岩的稳定,避免冒顶、片帮事故发生。

2. 提高煤炭产量的要求

掘进为采煤服务,巷道支护技术必须满足高产高效回采工作面的要求。近年来,我国以综采放顶煤、一次采全高为代表的采煤技术得到迅速发展,不断刷新和保持着煤炭行业高产高效的全国纪录。出现了亿吨级矿区、千万吨级矿井,综采工作面的年产量超过6 Mt,甚至突破10 Mt。

如此高的工作面产量与推进速度对巷道支护提出前所未有的严格要求:首先,成巷速度必须大幅度提高,以满足回采工作面快速推进的要求,否则造成严重的采掘接续紧张,制约工作面产量的提高;其次,要保证矿井的稳产高产,服务于工作面的回采巷道必须确保正常使用,在回采工作面推进过程中,巷道基本不需要维修,支护效果能满足运输、通风、行人等生产要求,否则巷道维修会影响回采工作面的推进速度,降低工作面产量,甚至导致停产。

3. 提高煤矿经济效益的要求

巷道掘进与支护费用是煤炭企业成本的重要组成部分。此外，巷道施工完毕后，由于地质条件复杂或受到采动影响，还需不断维修。我国部分煤矿的困难巷道，经常需要维修或翻修3~4次，巷道维修费用大大超过成巷费用，巷道在服务期间的总成本远远大于成巷成本。我国煤矿巷道工程规模巨大，巷道掘进与维护成本总量很大。因此，在满足煤矿生产要求，保证巷道安全的前提下，降低巷道支护、维修成本，即使降低幅度不大，也会给煤炭企业带来巨大的经济效益。合理的巷道支护技术是提高煤矿经济效益的重要途径。

二、我国煤矿巷道布置的发展趋势

随着我国煤矿开采强度与范围显著增加，煤炭开采技术的不断进步，巷道布置出现了以下发展方向。

1. 岩巷向煤巷发展

传统的巷道布置方式将大巷、采区准备巷道等服务时间较长的巷道布置在岩石中，虽然有利于巷道维护，但是带来一系列问题：巷道掘进成本高，施工速度慢，增加了许多联络巷；掘进出现大量矸石，给矿井辅助运输造成极大压力。随着巷道支护技术的发展与支护水平的提高，岩巷布置已逐步转向煤巷布置。特别是现代化矿井，岩巷占的比例已经很小。大量使用煤巷虽然增加了巷道支护难度，但带来了许多优点：显著降低了巷道掘进费用，大大提高了施工速度，缩短了矿井建设周期，巷道掘进出煤，增加经济效益。

2. 岩石顶板煤巷向煤层顶板巷道和全煤巷道发展

综采放顶煤工作面要求回采巷道沿煤层底板掘进，巷道顶板是煤层。随着综放开采技术的大面积推广应用，煤顶巷道所占的比重逐年增加。一般情况下，煤层相对于岩石比较松软、破碎，显著增加了巷道的支护难度。此外，对于特厚煤层开采和急倾斜厚煤层水平分层开采等条件，不仅巷道顶板与两帮为煤层，有时底板也是煤层，属全煤巷道，支护难度进一步加大。

3. 巷道拱形断面向矩形断面发展

拱形断面虽然能够改善巷道受力状态，有利于巷道支护，但是拱形巷道施工工艺比较复杂，成巷速度低，有时还需要破坏顶板，出现矸石。对于回采巷道，拱形断面给回采工作面端头支护造成很大困难，阻碍工作面的正常推进。而矩形巷道，除巷道受力状况比拱形巷道差外，拱形巷道的缺陷基本都被克服，非常有利于回采工作面的快速推进。

4. 巷道从小断面向大断面发展

随着回采工作面设备的大型化，开采强度与产量的大幅度提高，为了保证正常的运输、通风及行人，要求的巷道断面越来越大。煤层大巷的跨度已经超过6 m，断面超过20 m²；回采巷道宽度也达5~6 m，断面积达15~20 m²；开切眼跨度达到10 m，断面积超过40 m²。巷道断面的增大显著增加了支护难度。

5. 单巷布置向多巷发展

回采工作面开采强度和产量越来越大，要求的运输、通风断面逐年增加。特别是高瓦斯矿井，往往单巷布置不能满足生产要求，出现了一个工作面布置3~5条，甚至更多巷道的多巷布置方式。多巷布置带来了煤柱留设，巷道受到二次甚至多次采动影响，巷道复用等问题，增加了巷道维护的难度。

6. 巷道埋深从浅部向深部发展

我国煤矿开采深度以 8~12 m/a 的速度增加。新汶、淄博、开滦、徐州等矿区的开采深度已超过 1 000 m，出现了一批千米深井。煤炭开采技术的进步和矿山的现代化促进了生产的高产高效，进一步加速了矿井深度的增加。预计在未来 20 年我国很多煤矿将进入到 1 000~1 500 m 的开采深度。深部开采带来一系列高地应力巷道支护难题，如冲击矿压、围岩大变形、强烈底鼓等浅部巷道没有的支护问题。

7. 简单地质条件巷道向复杂地质条件发展

我国煤矿煤系地层中具有复杂地质条件的矿井分布十分广泛。北起黑龙江、内蒙古，南到广东、广西，东起山东、浙江、西到新疆、青海广大辽阔的幅员内有复杂地质条件的矿井遍布全国各主要产煤省区，近半数的矿区存在地质条件复杂矿井。随着我国新生代第三纪煤田的开采及老矿井采深的增加，复杂地质条件煤矿的数量和分布范围将会继续增加和扩大。复杂地质条件巷道围岩稳定性差、围岩变形和破坏强烈，巷道维护十分困难。有的复杂地质条件矿井，每米巷道的支护费用已高达 1~2 万元，严重影响了煤矿的正常生产和经济效益。

三、煤矿巷道锚杆支护技术发展现状

煤矿巷道支护经历了木支护、砌碛支护、型钢支护到锚杆支护的漫长过程。多年来国内外的实践经验表明，锚杆支护是煤巷经济、有效的支护技术。与棚式支架支护相比，锚杆支护显著提高了巷道支护效果，降低了巷道支护成本，减轻了工人劳动强度。更重要的是锚杆支护大大简化了采煤工作面端头支护和超前支护工艺，改善了作业环境，保证了安全生产，为采煤工作面的快速推进创造了良好条件。目前，锚杆支护技术已在国内外得到普遍应用，是煤矿实现高产高效生产必不可少的关键技术之一。

1. 国外锚杆支护技术发展现状

在 100 多年前，国外一些矿山就开始应用锚杆支护。如英国在 1872 年就采用过金属锚杆，美国 1900 年使用过木锚杆。地下工程中大量采用锚杆支护是在 20 世纪 40 年代末期。此后，锚杆支护在煤矿、非煤矿山、隧道及其他岩土工程中得到迅速发展，成为一种极具发展前景的支护方式。从锚杆支护形式的发展过程分，锚杆支护可分为以下几个阶段：

(1) 1950—1960 年，锚杆型式主要是机械端部锚固锚杆，分楔缝式、倒楔式、涨壳式等。这类锚杆锚固力低、在不同岩层中的锚固力变化大、支护刚度小、可靠性差，不宜在松软破碎的岩层中使用。由于这些弊端，导致了英国、法国等国家在使用锚杆支护过程中出现过反复。如英国煤矿在 1957 年使用了约 500 000 根锚杆，法国煤矿用量也较大，但到 20 世纪 60 年代初，锚杆用量大幅度降低。

(2) 1960—1970 年，树脂锚杆研制成功，并得到推广应用。1958 年德国开始研制树脂锚杆，经过一年多的实验室试验，埃森采矿研究中心制作了第一批药卷式树脂锚固剂，于 1959 年在煤矿井下进行试验，1961 年取得成功。之后树脂锚杆在世界主要采煤国家逐步得到应用和发展。初期树脂锚杆为端部树脂锚固，锚杆孔径较大（38~45 mm）。以后发展到小孔径（22~30 mm）全长锚固树脂锚杆。这种锚杆锚固力大、可靠性高、适应性强，极大地促进了锚杆支护技术的发展与广泛应用。

(3) 1970—1980 年，管缝式锚杆、胀管式锚杆等全长锚固锚杆研制成功，并在井下得到应用。但是管缝式锚杆、胀管式锚杆在井下容易锈蚀，锚固力受钢材质量、围岩性

质、钻孔直径等因素影响较大，施工工艺比较复杂，只能在适宜的条件下使用。

(4) 1980—1990年，锚杆支护形式更加多样化：出现了混合锚固锚杆、钢带式组合锚杆、桁架锚杆，可拉伸锚杆、锚注锚杆等特种锚杆和锚索加固技术也得到了应用，树脂锚杆材料得到了进一步改进与提高。

(5) 20世纪90年代以来，高强度树脂锚固锚杆以其优越的锚固效果和简便的施工工艺，逐步取代了其他类型的锚杆，成为锚杆支护的主导型式。锚索加固技术也得到了大面积的推广应用。

澳大利亚、美国等国的煤层地质条件比较简单，埋藏浅，护巷煤柱宽度大，而且大力推广应用锚杆支护。他们的锚杆支护技术比较先进，煤矿巷道锚杆支护所占的比重几乎达到100%。实际上，在澳大利亚和美国，如果一个矿区煤层顶板不适合采用锚杆支护，那么便认为开采这样的煤层在经济上是不合理的。澳大利亚锚杆支护技术已经形成比较完整的体系，煤矿巷道几乎全部采用W钢带树脂全长锚固组合锚杆支护。尽管其巷道断面比较大，但支护效果良好。对于复合顶板、破碎顶板，以及巷道交岔点、大断面硐室等难维护的条件，还采用锚索注浆进行补强加固，控制围岩的强烈变形。美国煤矿巷道锚杆消耗量很大，锚杆种类也比较多，有涨壳式锚杆、树脂锚杆、混合锚固锚杆，组合构件有钢带和桁架。具体应用时，根据岩层条件选择不同的支护方式和参数。

欧洲一些主要产煤国家，过去一直主要采用金属支架支护巷道。但随着巷道支护难度加大和支护成本增高，将巷道支护方式转向了锚杆支护，积极开展了锚杆支护技术的研究、试验与推广应用。

英国曾是欧洲主要产煤国中采用金属支架支护的典型代表。1987年以前，英国煤矿巷道支护90%以上采用金属支架，导致巷道支护效果差、成本高，回采工作面产量与效益低，煤矿亏损严重。由于国际市场的激烈竞争，英国煤炭工业面临严重的危机。在这种情况下，英国果断地把采用锚杆支护取代传统的金属支架支护作为提高其煤炭工业竞争力的三大策略之一，于1987年从澳大利亚引进了先进的锚杆支护技术，彻底扭转了过去被动的局面，锚杆支护技术得到迅速发展。到1990年，英国煤巷锚杆支护所占比例便从80年代中期几乎为零增长到50%，1994年达到80%，1997年达到90%。英国煤矿通过采用锚杆支护技术取得了显著的技术经济效益（表1-1）。巷道支护费用和吨煤成本显著降低，回采工作面产量、全员效率大幅度提高，事故率明显下降，巷道安全状况得到保证。一些濒临倒闭的矿井也因此获得了新生。在英国，锚杆支护技术被看成是煤矿巷道支护技术的一次变革，而且还没有那次技术变革能像锚杆支护这样在短时间内给煤矿带来如此巨大的效益。

表1-1 英国煤巷采用锚杆支护所取得的效益

年 份	1984 年	1994 年
回采工作面平均单产/($t \cdot d^{-1}$)	500	4 500
平均全员效率/[$t \cdot (d \cdot 人)^{-1}$]	3	13.5
平均吨煤成本/(英镑· t^{-1})	70	35
煤巷平均成巷速度/($m \cdot 周^{-1}$)	44	> 100
巷道支护费用比较/%	100	50
事故率比较/%	100	10

德国使用 U 形钢支架最早, 技术成熟、先进, 使用量大。无论是永久巷道还是回采巷道大多采用 U 形钢可缩性支架。但是从 20 世纪 80 年代以来, 随着矿井开采深度和开采强度增加, 重型采掘设备的采用, 要求巷道断面越来越大, 导致巷道围岩变形加剧, 支护困难。为了解决巷道支护难题, 不得不增加型钢重量、减小支架棚距, 致使巷道支护费用增高, 而且带来施工、运输等一系列问题。尽管如此, 巷道支护状况并没有得到根本改观。为此, 德国煤矿开展了锚杆支护技术的研究与试验。锚杆支护在鲁尔矿区试验成功后得到推广应用, 现已应用于埋深千米的深井巷道中, 取得较好的支护效果。

其他国家煤巷锚杆支护技术的发展也很迅速。如法国到 1986 年锚杆支护比重已占到 50%。俄罗斯研制了多种类型的锚杆, 在俄罗斯的第一大矿区——库兹巴斯矿区锚杆支护所占比重已达 50% 以上。

总结国外锚杆支护技术快速发展及大面积推广应用的经验, 主要有以下特点:

(1) 十分重视巷道围岩地质力学参数测试, 对支护对象有比较清楚的了解。如美国、澳大利亚、英国在锚杆支护设计前, 要进行全面、详细的地应力、围岩强度和围岩结构面力学特征的测量, 分析巷道应力场分布特征, 巷道围岩变形和破坏的主要影响因素。这是锚杆支护成功的必要前提。

(2) 根据煤矿巷道特点, 采用比较合理的锚杆支护设计方法。如澳大利亚、英国采用“地质力学评估—初始支护设计—井下施工与监测—信息反馈与修改设计—日常监测”的设计方法。这种方法符合煤矿巷道地质条件复杂性与多变性的特点, 因此得到国际上的普遍认可和采用。

(3) 根据本国巷道地质与生产条件, 采用适宜的锚杆型式。如澳大利亚、英国主要采用树脂全长锚固螺纹钢锚杆。美国锚杆种类比较多, 包括树脂锚固锚杆、涨壳式锚杆及混合锚固锚杆。德国除使用树脂锚固锚杆外, 还研制了可拉伸锚杆, 使锚杆既具有足够的支护阻力, 又有一定的延伸性, 适应围岩变形强烈的条件。

(4) 锚杆向高强度、高可靠性方向发展。一方面, 研制具有一定延伸率的高强度锚杆材料, 如澳大利亚锚杆杆体材料的屈服强度一般在 400 ~ 600 MPa, 有的甚至大于 600 MPa; 英国锚杆材料的屈服强度为 640 ~ 720 MPa; 美国锚杆材料的屈服强度一般为 414 ~ 689 MPa。另一方面, 加大锚杆直径, 国外多数使用 $\phi 20 \sim 22$ mm 的锚杆, 有的达到 $\phi 24$ mm。锚杆杆体的拉断载荷一般在 200 kN 以上, 有的甚至超过 300 kN。英国还研制出拉断载荷 500 kN 的大锚杆。在提高锚杆强度的条件下, 降低了支护密度, 有利于快速掘进。

(5) 先进的锚杆施工机具不仅保证了支护质量, 而且提高了成巷速度, 促进了锚杆支护技术的发展。澳大利亚、美国大量采用掘锚联合机组, 实现了掘进与锚杆支护一体化, 大幅度提高了巷道掘进速度与工效。同时, 单体锚杆钻机、钻头钻杆及快速安装系统也有较快发展, 基本满足了锚杆支护施工的要求。

(6) 锚杆支护监测仪器与技术保证了巷道安全。开发出顶板离层指示仪、声波多点位移计、测力锚杆等监测锚杆支护巷道围岩变形、离层、支护体受力的仪器, 及时、准确地监测围岩稳定性与支护状况, 确保巷道的安全程度。

(7) 采用科学、严格的管理, 制订了锚杆支护材料标准、锚杆支护技术规范, 促进了锚杆支护技术的健康发展。