

● 张 辉 著

深井高应力 巷道底鼓机理 及预应力锚固技术

 煤炭工业出版社

深井高应力巷道底鼓机理及 预应力锚固技术

张 辉 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

跑浆的问题，实现了底板锚索预应力带压注浆。研发了底板钻孔泵吸反循环钻具及施工工艺，解决了底板钻孔钻进过程中遇到的难题。将本书研究成果应用于井下，解决了深井高应力巷道底鼓控制的难题，加快了巷道施工速度，降低了成本，同时验证了理论的正确性和技术的可行性。

本书凝结着康红普院士在深部巷道支护领域的创新学术思想，凝聚着煤炭科学研究总院开采设计分院巷道支护研究所所有员工的辛勤劳动。本书为深部高应力巷道底鼓的防治提供了新的理论基础和技术途径，也为深部巷道围岩的控制提供新的研究思路。

本书部分研究成果得到煤炭科学研究总院开采设计分院、煤炭安全生产河南省协同创新中心的资助和新汶矿业集团华丰煤矿的支持，在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请专家、同行批评指正。

作者

2016年4月

图书在版编目 (CIP) 数据

深井高应力巷道底鼓机理及预应力锚固技术 / 张辉著. -- 北京:
煤炭工业出版社, 2016

ISBN 978 - 7 - 5020 - 5469 - 4

I. ①深… II. ①张… III. ①巷道围岩—底板隆起—预应力加筋
锚固 IV. ①TD263

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 192291 号

深井高应力巷道底鼓机理及预应力锚固技术

著 者 张 辉
责任编辑 徐 武 成联君
编 辑 杜 秋
责任校对 李新荣
封面设计 安德馨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010 - 84657898 (总编室)
010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)
电子信箱 cciph612@126.com
网 址 www.cciph.com.cn
印 刷 北京建宏印刷有限公司
经 销 全国新华书店

开 本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 11³/₄ 字数 280 千字
版 次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷
社内编号 8332 定价 36.00 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,电话:010 - 84657880

<h1>目 次</h1>	
1	绪论 1
1.1	研究背景 1
1.2	国内外研究现状及存在的问题 1
2	深井高应力巷道地质力学测试及变形规律监测 8
2.1	我国深井高应力巷道围岩地质条件调查 8
2.2	深井高应力巷道围岩地质力学测试 10
2.3	深井高应力巷道底板岩石力学试验 16
2.4	深井高应力巷道围岩变形破坏规律在线监测 25
2.5	小结 38
3	深井高应力巷道底鼓发生的机理 39
3.1	深井高应力巷道围岩变形破坏空间关系 39
3.2	深井高应力巷道围岩变形破坏机理 45
3.3	深井高应力巷道围岩各分区变形分析 52
3.4	小结 57
4	深井高应力巷道底鼓控制原理与控制技术 58
4.1	深井高应力巷道控制底鼓的作用 58
4.2	加固法对深井高应力巷道底鼓的控制效果分析 61
4.3	深井高应力巷道围岩高预应力强力支护技术 69
4.4	巷道底板预应力锚注加固的现场施工工艺 84
4.5	小结 86
5	巷道底板预应力锚索注浆封孔原理及封孔方法 87
5.1	底板锚固孔封孔机理分析 87
5.2	新型封孔装置封孔效果分析及结构尺寸设计 91
5.3	底板预应力锚索注浆新型封孔装置囊袋内材料 108
5.4	新型封孔装置封孔效果试验及封孔方法 121
5.5	小结 130

6 巷道底板锚固孔成孔技术及装备	131
6.1 底板锚固孔正循环钻进排渣机理	131
6.2 锚固孔正循环排渣孔内“钻渣三区”形成的力学特征	132
6.3 底板锚固孔正循环钻进现场试验	134
6.4 底板锚固孔反循环钻进排渣的原理	136
6.5 巷道底板锚固孔机具的研发与试验	143
6.6 小结	159
7 井下工业性试验	161
7.1 工程地质条件	161
7.2 新掘巷道围岩控制方案设计	162
7.3 矿压监测及支护效果分析	164
7.4 返修巷道围岩控制方案设计	169
7.5 返修巷道围岩控制效果监测	173
7.6 小结	174
参考文献	175

1 绪 论

1.1 研究背景

随着社会的发展煤炭需求不断增加,进一步加快了深部矿井的出现,预计未来20年内我国许多矿井和矿区将进入深井开采阶段。

随着矿井开采深度的增加,特别在进入深井开采阶段,巷道围岩呈现出明显的软岩变形特征,已成为实际意义上的深井高应力软岩。巷道围岩在高应力的作用下表现出软岩的特征,岩石的蠕变速度、蠕变时间都在增大。同时,巷道围岩的地质构造变得越来越复杂,矿山压力越来越大。在采动影响下,巷道周围的岩体承受的应力越来越大,矿山压力显现强烈,巷道周边岩体出现了明显的塑黏性变形和破坏,围岩滑移变形运动越来越强烈;此外,为适应综采、综放开采,需加大巷道断面及跨度、采用托顶煤支护等,使巷道的支护更加困难,且后期维修工作量极大,经济效益受到极大的影响。特别是巷道围岩处在破碎带及集中应力区等困难条件下,深部巷道锚杆支护面临更多的技术问题。国内外众多学者研究表明,深部煤炭开采的关键是解决巷道支护技术的难题。

目前,我国部分矿井刚进入深井开采阶段,对深井高应力巷道的围岩控制问题研究较少,往往都是借助于以往的经验对巷道支护进行设计,巷道破坏极其严重,很难满足巷道使用的要求。

1.2 国内外研究现状及存在的问题

1.2.1 深井高应力巷道支护机理及支护技术

在我国按深度将矿井划分为浅矿井($< 400\text{ m}$)、中深矿井($400 \sim 800\text{ m}$)、深矿井($800 \sim 1200\text{ m}$)、特深矿井($\geq 1200\text{ m}$)。

矿井进入深部开采阶段后,开采扰动、高地温、高地应力及高岩溶水压会引起矿井冲击矿压、巷道片帮冒顶、强烈底鼓、矿井突水等工程地质灾害,威胁深部煤炭资源安全高效开采。目前,针对深部巷道条件,国内外学者从支护理论与支护技术方面进行了大量的研究和探索。

20世纪80年代苏联学者开始对埋深1600 m的开采矿井进行研究,德国学者通过建立大型相似模拟试验台,模拟了埋深1600 m矿井的三维矿压显现规律。近年来,加拿大、南非、澳大利亚等进入深部开采的国家相继对深部巷道围岩变形破坏机理和控制技术进行研究。加拿大对冲击矿压潜在区的支护技术和冲击矿压危险性评估等方面进行了大量的研究;南非针对深部金矿安全开采,在1998年启动了“深部开采”研究计划。目前巷道围岩控制理论主要有以下几种:

(1) 新奥法支护理论。此理论于20世纪70年代引入我国水利、水电、铁路、煤炭

等工程领域,并得到广泛应用。

(2) 联合支护理论。对深部软岩巷道,只提高支护体刚度很难有效控制围岩大变形,应采用先柔后刚、先让后抗、柔让适度的支护理念;对应的支护方式为锚网喷、锚网喷支架、锚梁网支架等联合加固。在复杂困难条件巷道中,联合支护理论得到广泛的应用,随着深部巷道地质条件越来越复杂,采用联合支护技术并不能有效控制巷道围岩的大变形,虽然经过多次返修,但巷道围岩一直持续变形。因此,在深部复杂条件下巷道支护时需要寻求更合理的支护理论与技术。

(3) 松动圈支护理论。按照松动圈的大小对巷道围岩进行分类,提出了不同松动圈大小的支护原理和技术。该理论虽然简单、直观,但也存在很多问题,如现场难以准确测定松动圈的范围,巷道加固对松动圈是否有影响及影响程度还需深入地研究。

近年来,随着煤矿科学水平的不断提高,国内外学者对深部矿井开采中巷道围岩变形破坏特征进行了大量的理论和试验研究,提出富有成效的深部巷道围岩控制理论及控制技术,在深部巷道支护中起到重要的指导作用。

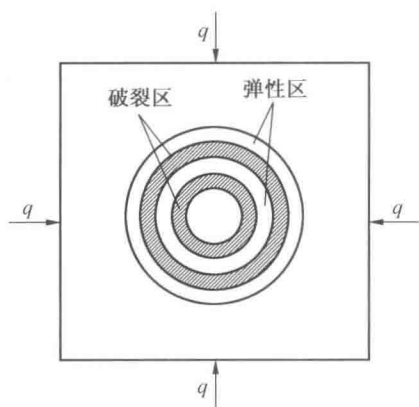


图 1-1 深部巷道围岩分区裂化

俄罗斯学者提出了深部巷道围岩分区裂化现象,认为围岩分区裂化现象是在深部岩体中开挖硐室或者巷道时,在其两侧和工作面前的围岩中产生交替的破裂区和不破裂区(图 1-1)。钱七虎、潘一山等对深部巷道围岩分区破裂化机制从现场监测、力学分析、实验室试验及数值模拟方面进行了大量研究,认为由于较高的初始地应力和巷道开挖形成卸荷面,破裂区的数量取决于初始地应力的高低,进一步丰富了分区裂化机制的内涵,对深部巷道支护理论及支护设计产生了较大影响。

勾攀峰、闫长斌等运用突变理论探讨了深部巷道失稳破坏机理,研究表明,深部巷道的失稳不仅受岩体特性及所荷载荷的影响,而且与围岩中承载区和松动区的刚度比有关;围岩力学指标弱化程度越高松动区范围越大,系统失稳的可能性就越大。

侯朝炯、柏建彪等对深部巷道围岩稳定性问题进行了深入研究,得出深部巷道围岩控制的方法是提高锚固区内围岩强度、转移围岩高应力以及采用合理的支护技术。

康红普等针对我国深部高地压巷道围岩条件的特殊性与复杂性、巷道支护存在的问题,分析了高地压巷道围岩变形与破坏机理、支护系统控制围岩变形的作用,提出深部巷道围岩高预应力、强力锚杆一次支护理论。

近年来,我国有 30 余处矿井开采深度超过 1000 m,有些学者对深井高应力巷道的围岩控制理论与技术展开了研究。

赵兵文、张修峰等采用多维联合支护技术对邢东矿深井进行支护,使巷道支护体形成一个多层有效组合拱,达到了提高围岩强度、改善锚网梁支护的综合效果。

李帅、公建祥等对千米深井大断面软岩巷道锚架注联合支护技术进行了研究,提高巷

道围岩整体强度,有效解决了深井地压大、支护困难的问题,基本有效地控制了软岩巷道的稳定性。

张农、王保贵等对朱集煤矿千米深井软岩巷道进行锚注支护,而后进行二次滞后注浆支护,在保证滞后注浆的最佳滞后时间后,巷道围岩支护效果显著。

康红普、王金华等对新汶矿区深井高应力巷道围岩变形与破坏机理进行深入细致的研究,认为影响新汶矿区深部巷道围岩变形与破坏的因素主要表现在巷道围岩地质力学条件、巷道围岩赋存的环境、巷道施工因素等方面。对于深部高应力或受强烈采动影响的巷道,受高应力的挤压作用,围岩结构体的结构效应显著降低。在高应力环境中岩层将产生剪切滑移、挤压屈服,从而显现出岩层的塑性变形与剪切破碎,导致巷道出现较大变形。当巷道变形发展到一定程度时,将产生片帮、冒顶等现象。

综上所述,国内外学者虽然在深部高应力巷道围岩控制机理和控制技术方面取得了丰硕的成果,但对深井高应力巷道围岩大变形破坏的机理研究得很少,而且在深部巷道围岩的变形破坏机理研究中很少考虑巷道围岩的地质特征。因此,实现深井高应力巷道无论从围岩变形破坏的机理还是从控制技术上都需要做进一步深入的研究。

1.2.2 巷道底鼓机理与防治技术

底鼓是巷道底板岩层产生变形和破坏的现象,它会导致巷道断面变小,阻碍矿井通风运输和人员的行走。随着我国煤炭生产规模的不断扩大,开采深度不断增加,复杂岩层条件越来越多。目前,很多矿井都不同程度地存在着巷道底鼓现象。特别是煤矿开采进入深部以后,巷道底鼓则更加显著,底鼓量占顶、底板移近量的 $2/3 \sim 3/4$;深部巷道底鼓不仅引起底板变形与破坏,而且对巷道顶板和两帮的稳定性造成严重影响。因此,深部巷道的底鼓进一步加速了巷道围岩整体破坏的进程。

1. 巷道底鼓的机理

M. JI. 兹包尔什奇克研究认为,底板岩层突然剧烈鼓起是底板岩层暴露的面积与周长比例急剧变化,底板直接底塑性岩层区对下部岩层移动的阻力使底板岩层中存储的弹性能突然释放的结果。

Jl. M. 秦巴列维奇研究发现,巷道底鼓的力学本质就像松散土体在两个压膜作用下将底板压出,他利用极限平衡理论分析了巷道两帮对底鼓岩层上力的作用。

曼·奥顿哥特通过模拟试验对巷道底鼓的全过程进行了研究,结果表明巷道围岩的变形与破坏首先在垂直应力作用下两帮岩层被压裂,其次是在水平应力的作用下巷道顶、底板向巷道内移近,其中直接底板围岩先破坏。

K. Haramy 等把底板岩层看作两端固支的岩梁进行了力学分析,研究了底板岩层的应力状态及其稳定性。

A. Afrouz 等对底板的承载能力进行了研究,表明巷道底鼓是由 21 个因素引起的,一般认为是底板岩层松软、巷道围岩应力高以及水理的作用。

康红普分析了影响软岩巷道底鼓的因素,结果表明底板岩层挠曲变形引起的底鼓占总底鼓量的 67%,而底板岩层弹塑性变形和扩容变形占比分别为 11.8% 和 11.2%。因此,软岩巷道底鼓是受底板岩层的失稳使岩层向巷道内压曲变形、在偏应力作用下产生的扩容以及遇水膨胀的影响。

姜耀东根据巷道现场地质力学条件、应力状态及底鼓的方式的不同,将巷道底鼓分为挠曲褶皱型、剪切错动型、挤压流动型、遇水膨胀型4类。

王卫军通过理论分析、数值模拟的方法对回采巷道底鼓的机理进行研究,认为巷道底鼓主要是由于工作面超前支承压力的作用,使巷道产生挤压流动型和挠曲褶皱型底鼓。

A. H. Wilson 认为回采巷道底鼓主要是底板岩层被剪切破坏后形成的塑性区的岩石变形与破坏,塑性破坏范围与巷道断面形状、围岩力学特性、原岩应力、围岩膨胀性及支护阻力有关。

贺永年等对茂名矿区的软岩巷道底鼓研究发现,巷道底鼓是顶板通过两帮向底板传递高应力,顶板及两帮围岩在向底板传递应力的同时与底板一起向下移动,底板岩层在受到两帮高应力的情况下发生断裂,引起底板隆起。

何满潮等对深部巷道底鼓进行大量的现场与理论研究,认为巷道底板围岩是一个相互作用的系统结构,单纯对底板进行加固很难有效地控制巷道底鼓。

总之,国内外学者在对巷道底鼓机理的研究中取得了丰硕的成果,为巷道底鼓的控制提供了强有力的理论基础,但对深井高应力巷道底鼓机理方面的研究较少,并在底鼓机理研究中很少考虑巷道围岩结构面分布、产状等对底板变形破坏的影响。

2. 巷道底鼓防治技术

国内外学者对巷道底鼓机理的研究虽然进展十分缓慢,但对巷道底鼓的防治措施进行了深入探索,试验成功了许多防治底鼓的方法。

巷道底鼓的防治方法主要分为预防和治理。目前,底鼓的防治措施按照机理分为以下4类:

(1) 落底。落底是一种被动的底鼓治理措施,它是在巷道底鼓后,为满足生产的需要,将鼓出的部分清理掉。具有强烈底鼓的巷道,往往需要多次落底才能满足生产需要,落底工作工程量大、费用高且会对两帮及顶板的稳定性产生消极影响。

(2) 支护加固法。这种方法是针对具有强烈底鼓巷道的底板或两帮围岩进行强力加固,提高底板一定范围内围岩的强度,达到减小巷道底鼓量的目的。常用的有封闭式支架加固法、底板注浆加固法、底板锚杆加固法等。

(3) 应力控制法。这种方法的实质在于降低巷道周围围岩应力,达到保持底板岩层稳定的目的,通常采用卸压法和采掘布置法。

(4) 联合控制法。通常是两种方法的结合,如封闭式支架与底板锚杆加固法、底板锚杆与注浆加固法、底板爆破卸压与注浆加固法、切缝卸压与锚杆加固法、封闭式支架加固与爆破卸压法等,联合控制法兼有两种方法的优点,具有较强的适应性和控制能力。

1.2.3 底板锚固孔施工机具国内外研究现状

锚杆与锚索支护是控制巷道底鼓的有效方式,但是由于底板锚固孔钻进比较困难,特别是排渣存在问题,严重影响了该项技术的推广应用。为此,专门讨论一下底板锚固孔工艺与机具。

1. 锚固孔钻进排渣方式

目前,国内外地质钻探、矿山生产中,锚固孔施工时传统的排渣方式主要有水力排

渣、高压风排渣和机械螺旋排渣 3 种。

高压水排渣主要是利用高压水排出钻渣，以井下静压水为动力，将钻渣携带出孔外。这种排渣方式广泛应用于向上的锚固孔施工，在使用过程中存在的不足有：①水量和水压受供水系统影响；②在煤层中若使用高压水，则易诱发突出；③施工向下锚固孔排渣受孔深影响，排渣不畅，易抱钻、卡钻；④若排水不畅，会引起巷道底鼓和支架陷底，增加排水设备时会增大钻进成本。

高压风排渣利用压缩空气经过钻杆内部进风孔、钻头进入孔底，在内孔形成高速风流，钻渣则悬浮在风流中被吹出。在使用过程中存在的不足有：①风压和风量受矿井压风系统的影响极大；②垮孔孔径较大的区段，孔内排渣的动力陡降，容易堵孔；③底板存在积水时，钻渣与积水混合形成泥浆，在风力的作用下很难排出孔外。

机械螺旋排渣通过螺旋钻杆的旋肋“拉出”钻渣，是以螺旋钻杆的旋转为动力，由螺旋钻杆的旋肋将钻渣携带出孔外。当底板锚固孔垮孔严重时，钻渣排出不畅易引起卡钻、抱钻、烧钻等现象。

组合排渣是指利用上述两种或两种以上排渣方式联合排渣。如压风加螺旋排渣，通过风压“推”和螺旋钻杆叶片的“拉”来排渣。

2. 底板锚固孔施工机具

目前，用于巷道底板钻进的钻机多是其他用途的钻机，很少有专门的钻机用于底板锚固孔的钻进。

20 世纪 70—80 年代，德国在进行巷道底板锚杆支护研究中，几乎所有的巷道底板锚固孔都使用 Tamrock 矿山机械公司及 GIG 岩石和地下采矿工程公司生产的钻机。这种钻机有两根固定在上部横梁上并可摆动和伸缩的钻架支柱，支护上装有超重型（80 kg）Tamrock 凿岩机，最大推力为 7.5 kN，锚固孔直径为 42~60 mm，钻进方式为旋转冲击式，采用干式打孔。

河北同成科技生产的 ZQJ-300/1.1 型气动架柱式钻机，该钻机由冲击器、回转机构、推进部分、操纵部分、油雾器等机构组成。锚固孔直径为 90~100 mm，耗气量为 12 m³/min，机重 403 kg，钻机实物如图 1-2 所示。

使用常用的煤矿用全液压坑道钻机进行底板钻进（图 1-3），该钻机由主机、泵站、操纵台三大部分组成，锚固孔倾角 $\pm 90^\circ$ ，锚固孔直径不小于 75 mm，主要使用硬质合金、金刚石复合片钻头回转钻进。

采用锚杆锚索钻机配备麻花钻杆进行钻进（图 1-4），锚杆锚索钻机固定在支架上向下钻进，使用风力或水力排渣，优点是锚固孔直径小，非常适合底板锚杆锚索支护，缺点是钻进速度极慢。

架柱式液压钻机分为回转式和冲击-回转式（图 1-5），钻机由主机和配套泵站组成，主机由立柱、副支柱、外跨式推进器及其拖动的液压动力头组成。进行底板钻进时使用中空麻花钻杆和圆钻杆，钻杆直径为 42 mm，锚固孔直径不小于 65 mm，采用风力或水力排渣。

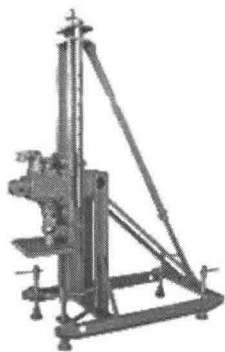


图 1-2 ZQJ-300/
1.1 型气动架柱式
钻机

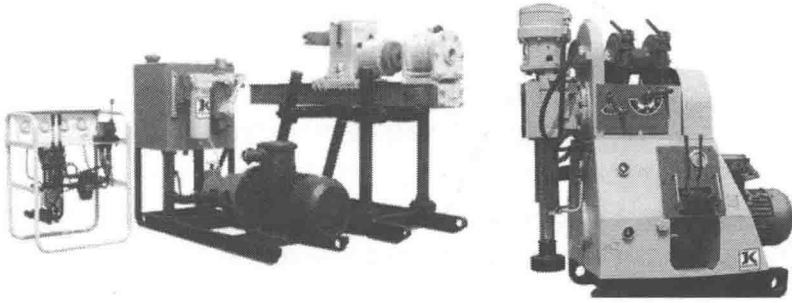


图 1-3 全液压坑道钻机

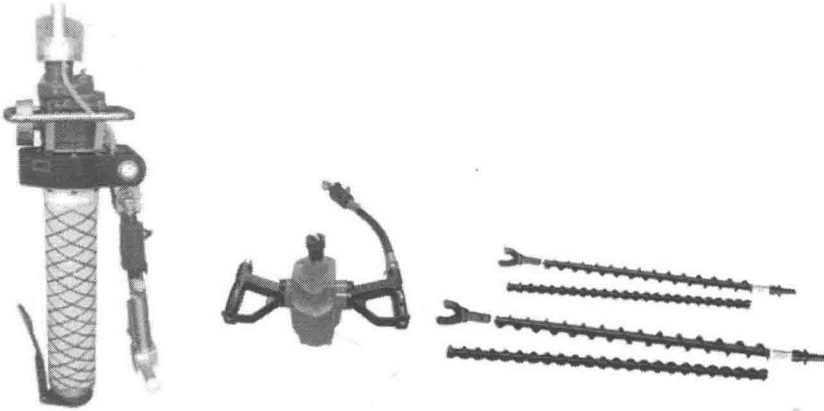


图 1-4 锚杆钻机及钻杆

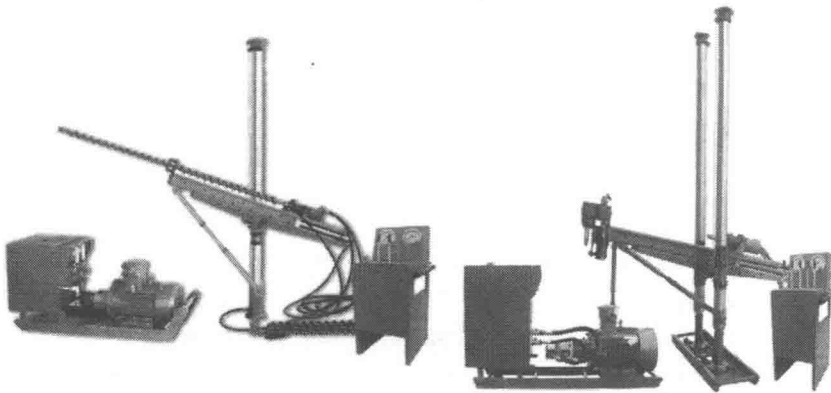


图 1-5 架柱式液压钻机

1.2.4 存在的问题

目前,国内外学者虽然在深部巷道底鼓机理和控制技术上都进行了深入细致的研究,取得了丰硕的成果,对深井高应力巷道破坏机理及支护设计上有许多值得学习和借鉴的地方。但深井高应力巷道在高地应力作用下有其独特的破坏机理,采用通常的支护方法和手段巷道支护效果很差,不能有效地控制围岩变形,巷道安全受到严重威胁。归纳起来,主要存在以下几方面的问题:

(1) 缺乏对深井高应力巷道围岩变形破坏机理的深入研究。首先,巷道多处于层状结构的沉积岩中,在长期的地质构造运动中,煤(岩)体中往往存在多种结构面。在深井中,巷道围岩处于高地应力条件下,在研究巷道围岩变形破坏机理时,必须考虑结构面分布、产状及力学性质对巷道围岩的影响;其次,在研究深部巷道变形破坏机理时,缺乏整体性研究,往往只注重对顶板和两帮的研究;再次,研究巷道底鼓机理时,国内外缺乏考虑结构面分布、产状及力学性质对巷道底鼓的作用。

(2) 对深井高应力巷道围岩控制机理认识不清。国内外学者在对一般深部巷道围岩控制技术上都有其独特的见解。有的主张一次支护,有的主张“先柔后刚”二次支护,有的采用卸压法等支护技术。但对于深井高应力巷道围岩的控制,这些技术遇到了严重挑战。在高地应力作用下,深井高应力巷道顶、底板和两帮是一个相互作用的有机体,不能隔开任何一方面进行支护,尤其对巷道底板的控制问题没有引起足够的重视。

(3) 深井高应力巷道底板锚索加固是控制巷道底鼓最有效的手段,但巷道底板施工机具及施工工艺成为制约巷道底板锚杆支护实现的关键因素。由于煤矿巷道底板的地质条件和所处的特殊环境,现有的施工机具在底板打锚固孔时,成孔效率极低,锚固孔直径大,产生了一系列的负面影响,锚索锚固效率低;底板锚固速度跟不上巷道掘进速度,底板锚杆主动支护的作用得不到充分的发挥;孔径大,锚固力达不到设计的要求;使用水泥浆锚固,无法施加高预紧力;支护成本较高。

2 深井高应力巷道地质力学测试及变形规律监测

随着我国煤炭资源开采深度的不断增加,深井开采的矿区和矿井不断涌现。新汶矿区的华丰矿、孙村矿、潘西矿,徐州矿区的庞庄矿,淮南矿区的谢一矿、朱集矿,平顶山矿区的十矿、十一矿、十二矿,邢台矿区的邢东矿等矿井均已进入超深井开采阶段。

矿井进入深井开采阶段,煤岩体力学性质发生显著变化,在高地应力作用下,煤(岩)体由脆性向塑性转化,并具有明显的时空效应;巷道围岩表现出节理裂隙的滑移和扩展,出现显著的大变形;随着开采时间的延长,巷道变形持续发展。

2.1 我国深井高应力巷道围岩地质条件调查

目前,我国深井开采的矿区主要分布在中东部地区,开采深度最大的矿井为新汶矿区的华丰煤矿,深度达到 1450 m。对我国深井矿区地质构造及煤(岩)体的岩性进行调研分析,具体的深井开采煤(岩)体地质特征见表 2-1。

表 2-1 深井开采煤(岩)体地质特征

矿区名称	煤矿名称	采深/m	地质构造特征	岩性	巷道破坏特征
新汶矿区	华丰矿	1450	矿区为一简单向斜构造,无大型地质构造,煤层走向在 $85^{\circ} \sim 80^{\circ}$,煤岩层倾角为 $31^{\circ} \sim 34^{\circ}$,平均 32°	开采煤层为 4 煤,直接顶为粉砂岩,基本顶为砂岩、二灰岩;直接底为砂岩,基本底以粉细砂岩、二灰岩为主,局部夹有煤线和少量泥岩,岩石强度较高	巷道产生非对称性大变形,两帮内移、底鼓强烈
	孙村矿	1280	矿区为单一向斜构造,煤层走向在 $300^{\circ} \sim 330^{\circ}$,倾向为 $48^{\circ} \sim 59^{\circ}$,倾角 $30^{\circ} \sim 41^{\circ}$,平均 35.5°	主采煤层为 4 煤,直接顶为中粒砂岩,灰白色,厚层理,基本顶为灰色粉砂岩,局部有厚泥岩夹层;直接底为粉砂岩,灰色,层理发育,基本底为砂岩,较坚硬,厚层理,局部有较厚的泥岩,性脆、易碎,层理发育	巷道产生非对称性大变形,两帮内移、底鼓强烈
	潘西矿	1390	矿区为单一向斜构造,地层走向在 $290^{\circ} \sim 320^{\circ}$,岩层倾角 $34^{\circ} \sim 48^{\circ}$,平均 41°	主采煤层为 4 煤,直接顶粉砂岩,缓坡状层理,坚硬稳固,基本顶细砂岩,层理发育;直接底粉砂岩,基本底细砂岩,深灰色,致密性脆	巷道底鼓强烈,两帮位移量大,顶板下沉量相对较小

表 2-1 (续)

矿区名称	煤矿名称	采深/m	地质构造特征	岩性	巷道破坏特征
淮南矿区	谢一矿	1300	矿区以单斜构造为主, 走向 $N20^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 倾向 NE, 地层倾角 $10^{\circ} \sim 38^{\circ}$, 平均倾角 22°	主采煤层为 A3 煤, 直接顶为砂质页岩, 基本顶为细砂岩, 钙质胶结, 致密坚硬, 中间有煤线夹层; 直接底为砂页岩互层, 致密, 基本底为白层中粒砂岩、层面发育的灰岩	巷道产生非对称性大变形, 两帮内移、底鼓强烈
	朱集矿	1100	矿区总体为背斜、向斜构造, 背斜轴部附近两翼地层倾角 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 其他在 $3^{\circ} \sim 10^{\circ}$	主采煤层为 13-1 煤, 直接顶为泥岩、砂质泥岩, 基本顶为粉砂岩、细砂岩; 直接底为泥岩, 基本底为粉砂岩	两帮支撑失稳, 顶板沿两帮有明显的切顶断裂性位移, 底鼓剧烈
徐州矿区	庞庄矿	1060	矿区位于九里山向斜中段, 为一个不对称的复式向斜构造, 即由两个背斜、三个向斜组成, 煤层倾角 $8^{\circ} \sim 10^{\circ}$	煤层直接顶为砂质页岩, 基本顶为砂岩; 直接为底黑灰色页岩, 基本底为白层灰岩	巷道底鼓强烈, 顶板下沉量相对较大
平顶山矿区	十矿	1110	矿区为单一向斜构造—李口向斜, 浅部地层倾角 13° , 深部大于 15°	开采煤层直接顶多为泥岩、砂质泥岩, 基本顶为中粗砂岩、砂岩、石灰岩; 直接底为砂质泥岩, 其下基本底为灰岩, 局部底板可相变为巨厚的砂岩	巷道产生非对称性大变形, 两帮内移、底鼓强烈
	十二矿	1200	矿区为走向北西西的单斜构造, 地层倾角一般在 15° 左右, 局部达到 $25^{\circ} \sim 33^{\circ}$	开采煤层为已 15、已 15-17、已 16-17 煤层, 直接顶多为泥岩、砂质泥岩及粉砂岩等, 基本顶为大占砂岩; 直接底多为砂质泥岩, 一般无伪底, 基本底多为细砂岩、石灰岩	巷道底鼓强烈, 顶板下沉量相对较大
邢台矿区	邢东矿	1300	矿区为褶皱构造表现为雁行斜列式断背斜和断向斜。地层倾角一般在 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$, 地层走向及倾角随向斜的部位不同而变化, 向斜地层倾角 $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$, 背斜地层倾角 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$	煤层顶底板以粉砂岩、细砂岩、灰岩为主, 含泥岩夹层, 胶结性差, 节理发育	两帮支撑失稳, 顶板沿两帮有明显的切顶断裂性位移, 底鼓剧烈; 支护体严重破坏, 局部出现断锚索、锚杆、槽钢的现象

从表 2-1 可以看出, 虽然我国超深井高应力开采矿井位于不同地区, 煤岩体的地质构造却表现出许多相同的特征: ①埋深大, 地应力高; ②煤层顶底板岩性多为砂岩、粉砂岩及灰岩, 岩石强度较高, 但岩层节理裂隙较发育; ③地质构造多为单斜构造, 地层倾角较大; ④位于岩体中的岩石巷道多为穿层巷道, 变形破坏特征相似, 表现出巷道围岩大变形、两帮非对称性破坏、底鼓强烈等特征; ⑤由于煤层为单斜构造且倾角大, 开采方式多采用多水平分段开采。

2.2 深井高应力巷道围岩地质力学测试

为进一步了解深井高应力巷道围岩地质力学概况,对新汶华丰煤矿-1180 m水平(埋深1300 m)和孙村煤矿-1100 m水平新掘巷道进行了地质力学测试,测试内容包括地应力测试、巷道围岩强度原位测试及围岩结构观测,每个矿井设置3个测站,具体测试地点见表2-2。

表2-2 巷道围岩地质力学测试地点

煤矿名称	测站名称	测站地点	巷道布置位置
华丰煤矿	测站1	-1180 m大巷左迎头	-1180 m大巷布置在8煤至10煤之间的岩层中
	测站2	-1180 m皮带井硐室	
	测站3	-1180 m大巷右迎头	
孙村煤矿	测站1	-1100 m一采区轨道大巷联络巷	-1100 m轨道大巷布置在4煤至11煤之间的岩层中
	测站2	-1100 m二采区轨道下山回风巷	
	测站3	-1100 m三采区轨道下山联络巷	

1. 地应力测试

水压致裂法测量原理如图2-1所示,采用SYY-56型水压致裂地应力测量仪分别对华丰矿-1180 m岩巷和孙村煤矿-1100 m岩巷共6个测站进行地应力测试。首先进行钻孔,其次用注水管将一组封隔器送到孔内指定位置,注入高压水,将封隔器胀起,密闭两个封隔器之间的孔,然后向该孔段注入高压水,直到将围岩岩裂,裂纹的方向即为最大水平主应力的方向。

地应力测试结果见表2-3。

表2-3 地应力测试结果

煤矿名称	测站名称	测试结果			
		σ_{II}/MPa	σ_{I}/MPa	σ_{V}/MPa	σ_{II} 方向
华丰煤矿	测站1	29.34	14.74	31.85	N60.7°W
	测站2	30.19	16.82	31.85	N46.8°W
	测站3	31.19	16.74	31.78	N67.7°W
	平均值	30.24	16.10	31.83	N58.4°W
孙村煤矿	测站1	35.67	18.54	31.28	N39.9°E
	测站2	35.82	19.05	31.48	N26.9°E
	测站3	39.13	21.03	31.78	N21.3°E
	平均值	36.87	19.54	31.51	N29.4°E

注: σ_{II} 为最大水平主应力; σ_{I} 为最小水平主应力; σ_{V} 为垂直主应力。

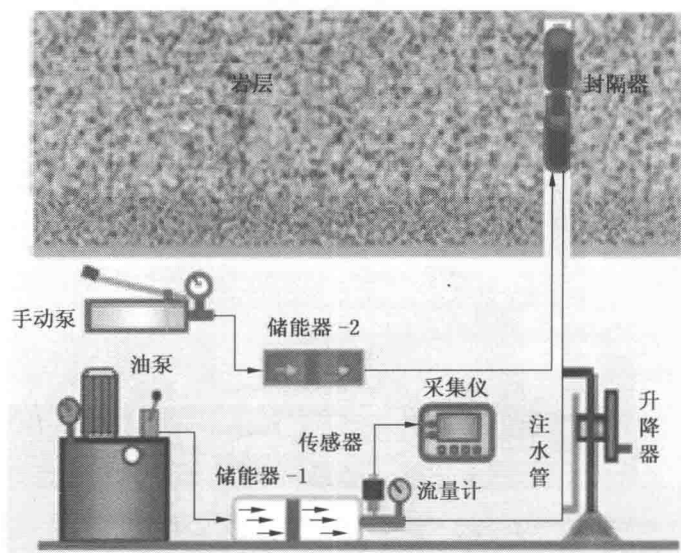


图 2-1 水压致裂法测量原理

从表 2-3 中可以看出：

(1) 华丰煤矿的最大水平主应力平均值为 30.24 MPa，最小水平主应力为 16.10 MPa，垂直主应力为 31.83 MPa；孙村煤矿最大水平主应力平均值为 36.87 MPa，最小水平主应力为 19.54 MPa，垂直主应力为 31.51 MPa。

(2) 从测试结果来看，随着深度的增加，最大水平主应力越接近垂直主应力，当深度到 1300 m 时，最大水平主应力与垂直主应力几乎相等。但同一水平的最大水平主应力与最小水平主应力之间的差值仍然较大，垂直应力与最小水平主应力的差值也普遍较大，很大程度上受地质构造的影响。

(3) 根据于学馥教授提出的判断标准，大于 30 MPa 为超高应力区，从量级上划分这两个矿区开采水平都进入超高应力阶段。

(4) 华丰煤矿最大水平主应力方向以 NWW 方向为主，孙村煤矿则以 NNE 方向为主，平均最大主应力与新汶两矿区单斜构造地层走向几乎相垂直，但存在一定的偏差。

2. 巷道围岩强度原位测试

巷道围岩强度测试原理如图 2-2 所示，钻孔后将探头放入钻孔，探头内的活塞在高压油的驱动下产生移动，将端部探针压向钻孔孔壁，当孔壁的压力达到临界压力时，孔壁岩体被压坏，手动泵压力表记录的最高值便是此处孔壁岩体的临界强度。经过换算得到此处岩体的单轴抗压强度。

利用巷道顶板地应力测试钻孔，采用 WQCZ-56 型围岩强度测试装置对华丰煤矿 -1180 m 大巷和孙村煤矿 -1100 m 大巷共 6 个测站进行巷道围岩强度原位测试，测试结果见表 2-4。