

深井巷道围岩破坏机理与安全 控制技术研究

郭忠平 孙常军 著

煤炭工业出版社

·北京·

内 容 提 要

本书介绍了作者多年来在深井巷道围岩破坏机理与安全控制方面的一些研究成果。针对千米深井高地应力、地质构造复杂的特点,采用先进的地应力测量仪器测试了深井原岩应力和次生应力分布规律,建立了多元应力作用下的物理模拟模型和数值模拟模型,对多元应力作用下的巷道围岩破坏机理进行了分析,得出了深井巷道围岩中最大水平应力大于垂直应力,且随着侧压系数的增加巷道由两帮破坏严重逐渐趋于四周均匀破坏。在此基础上,提出了在多元应力作用下巷道支护系统需具有变形让压功能,锚杆应具有较高强度及预应力的安全支护理念。

本书可供煤矿、科研院所的有关人员和矿业院校师生阅读、参考。

前 言

深部开采是世界上许多采矿国家所面临的共同问题。随着开采深度的增加、地质条件恶化、地应力增大、地温升高，深部巷道围岩在高应力的作用下进入软岩状态，岩石的蠕变速度及时间都在增大。在采动影响的情况下，巷道周围的岩体承受的垂直应力越来越大，巷道周边岩体出现了明显的塑性破坏和变形，围岩变形运动越来越强烈，尤其是在破碎带及集中应力区等困难条件下，深部巷道支护面临较多的技术难题。

地应力是引起采矿及其他各种地下工程变形和破坏的根本原因，其大小和方向对巷道围岩稳定性影响很大。地应力测量是确定工程岩体力学属性、进行围岩稳定性分析以及实现地下工程开挖设计科学化的必要前提。为全面掌握和反映新汶矿区原岩应力的分布特点和规律，分别在矿区内所属的潘西煤矿、华丰煤矿和协庄煤矿应用钻孔应力解除法进行了原岩应力和次生应力实测，得出深井开采最大水平主应力大于垂直应力，对巷道稳定性影响最大的为水平主应力。

通过相似材料模拟研究得到：无支护巷道围岩顶板及两帮发生强度破坏及产生破碎区后，由破碎岩石所形成的平衡结构具有稳定性差、可持续时间短等特征；从两帮破坏前的顶板初次拱形破坏阶段到顶板初次破坏后的两帮破坏阶段，再发展到两帮破坏后的顶板二次破坏，形成一个整体拱形破裂面到拱形破裂面以外围岩的破坏阶段；无支护巷道围岩强度破坏过程是一个稳定断面形状的自然优化过程。

通过对深井巷道围岩变形破坏数值模拟研究得出：深部巷道

开挖初始阶段围岩松动塑性破坏现象明显，围岩变形量大，变形速度快；在巷道两侧和掘进面前端一定距离附近形成侧向和超前应力增高区，巷道围岩表面以里一定深度为松动塑性破坏区，也是主要的卸荷区和位移发生区；随掘进的不断向前推进，巷道塑性区和应力卸荷区以及主要位移区的变化逐渐趋于稳定。

为探寻合理有效的解决深部高地应力巷道支护这一难题，针对矿井深部巷道多元应力作用下矿压显现规律特点，提出了“三高一低”的设计原则，即高强度、高刚度、高可靠性与低支护密度原则。针对新汶矿区深井高应力巷道围岩条件，研发了高强度、高刚度柔性锚杆支护系统。其特点是支护系统具有变形让压功能，柔性锚杆可以调整锚杆所受的载荷，避免锚杆过载破坏，实现巷道有控制变形；锚杆预应力的扩散，抑制了围岩的变形与破坏，保持了巷道顶板的完整性。

在编写过程中，我们参考了国内外一些煤矿企业成功的生产经验、技术资料及大专院校和科研院所的文献，在此表示诚挚的谢意。同时，还得到了许多专家、教授和有关同志的大力帮助和支持，在此一并表示衷心的感谢！由于本书编著时间紧迫和著者水平所限，不妥之处，祈望读者不吝赐教！

著 者

2013年3月

目 次

1 绪论	1
1.1 深部矿井开采特点	2
1.2 国内外研究现状	7
1.3 新汶矿区巷道支护现状与存在的问题	12
1.4 研究内容与目标	15
1.5 研究方法与技术路线	16
2 矿井地应力现场实测研究	18
2.1 矿区地质特征	18
2.2 原岩应力测量	22
2.3 潘西煤矿深井巷道次生应力实测	41
2.4 本章小结	54
3 深井巷道围岩稳定性相似材料模拟试验研究	56
3.1 试验概况	56
3.2 试验数据分析	64
3.3 本章小结	71
4 深井巷道围岩变形破坏数值模拟研究	73
4.1 概述	73
4.2 数值模型的建立	78
4.3 数值模拟结果分析	79

4.4	本章小结	92
5	深井巷道围岩应力状态理论分析	94
5.1	深井圆形巷道应力状态	94
5.2	深井椭圆形巷道应力状态	107
5.3	深埋矩形巷道的二次应力状态	110
5.4	本章小结	112
6	深井巷道围岩稳定性安全控制技术研究	114
6.1	巷道围岩安全控制理论	114
6.2	巷道围岩稳定性安全评价指标的聚类分析	121
6.3	巷道围岩稳定性安全控制设计	134
6.4	本章小结	148
7	工程应用实例	149
7.1	某矿井地质条件	149
7.2	支护系统参数的选择	150
7.3	支护系统测试与安装	154
7.4	某矿 1611 工作面回风巷支护效果测试	159
7.5	本章小结	171
8	结论与展望	173
8.1	主要结论	173
8.2	展望	175
	参考文献	177

1 绪 论

煤炭资源开发由浅部向深部发展是客观的必然趋势，也是世界上许多采矿国家面临的共同问题。德国和俄罗斯的一些矿井开采深度已超过 1400 m，加拿大超过 1000 m 的矿井有 30 座，美国有 11 座，开采深度以每年 8 ~ 16 m 的速度增加。国外部分国家深部工程开采现状^[1]见表 1-1。我国煤矿开采深度以 10 ~ 20 m/a 的速度逐年加大^[2]。20 世纪 50 年代，立井平均开采深度不到 200 m，到 90 年代平均开采深度已达 600 m。在 20 世纪 50 年代，仅能开采深度 300 m 左右的浅立井，而从 90 年代后期开始，已开采了一批 1000 m 以上的深立井。

表 1-1 国外部分国家深部工程开采现状

国家	英国	日本	波兰	德国	俄罗斯
开采深度/m	1100	1125	1200	1400	1550

除新建矿井以外，部分老矿井的开采深度有明显增长。据统计^[2]，1980 年我国煤矿平均开采深度为 288 m，1995 年为 428.8 m，2000 年为 500 m，2012 年为 580 m。2012 年，国有大中型煤矿开采深度超过 1000 m 的有 47 处，最深已达到 1350 m。这些深矿井主要分布在开滦、鸡西、七台河、北票、沈阳、新汶、淄博、平顶山、徐州、大屯、淮南等老矿区。随着科学技术的不断发展，矿山现代化促进了生产的高产、高效，进一步加大了矿井开发强

度,浅矿井的数目大为减少,中深矿井的数目明显增加,深矿井的数目将成倍地增加,并出现更多的特深矿井。预计在未来15年,我国很多煤矿将进入1000~1500 m的开采深度。随着开采深度不断增加,冲击矿压、地热、煤与瓦斯突出、巷道底鼓、矿井突水等灾害日趋严重^[3],将会对深部矿井的安全、高效开采造成巨大威胁。

1.1 深部矿井开采特点

1.1.1 深部开采矿井面临的灾害

深部开采会引起高地应力、高地温、高岩溶水压和强烈的开采扰动影响。深部矿井重力引起的垂直应力明显增大,构造应力场复杂,地应力高^[4];矿井开采深度越大,地温越高,同时由于热胀冷缩,温度变化会引起地应力变化;地应力与地温升高,岩溶水压升高,矿井突水严重。在深部开采环境下,煤岩体的变形特性发生了根本变化,由浅部的脆性向深部的塑性转化;高地应力作用下,煤岩体具有较强的时间效应,表现为明显的流变或蠕变;煤岩体的扩容现象突出,表现为高应力下煤岩体内部节理、裂隙、裂纹张开,出现新裂纹导致煤岩体积增大,扩容膨胀;煤岩体变形的冲击性,表现为变形不是连续的、逐渐变化的,而是突然剧烈增加。深部开采环境和煤岩体变形特征决定了深部矿井会遇到一系列灾害^[5,6]。

1. 冲击矿压明显加剧

冲击矿压是煤岩体中聚集的能量突然大量释放,快速破坏煤岩体,并产生剧烈震动。冲击矿压与采深有密切关系。随着开采深度的增加,冲击矿压发生的频率、强度和规模会随之上升^[7,8]。我国最大的冲击矿压发生在抚顺老虎台矿,震级为里氏

4.3级,破坏巷道500 m,地面震感明显。2003年,淮北芦岭矿“5·13”事故,由顶板冲击矿压诱发瓦斯爆炸,死亡84人;2005年,阜新孙家湾矿“2·14”事故,冲击矿压引起大量瓦斯涌出,巷道严重破坏,导致瓦斯爆炸,死亡214人。

2. 煤(岩)与瓦斯突出灾害日趋严重

煤(岩)与瓦斯突出是大量煤岩体与高压瓦斯突然涌入采掘空间,伴随大量能量释放,而且还可能引起瓦斯爆炸。四川三汇坝一矿主平硐曾突出煤岩 1.27×10^4 t,瓦斯 1.4 Mm^3 。2004年10月20日,郑州大平煤矿发生煤岩动力灾害,突然涌出大量瓦斯,诱发瓦斯爆炸,造成148人死亡。

3. 矿山工程垮落、冒顶灾害增加

矿井深度增大,围岩应力高于围岩强度,增大了围岩的失稳性和支护难度,极易导致顶板垮落,出现事故。近年来的统计数据表明,全国煤矿顶板事故占事故次数和死亡人数的50%和30%以上。深部开采工程围岩失稳垮落是矿山灾害的一个重要部分^[9]。

4. 围岩大变形与破坏引发的其他灾害

工程围岩大变形与破坏还可能引发除工程垮落外的其他事故^[10],如井巷严重变形,会影响矿井运输和行人的安全;巷道空间减小影响矿井正常通风,给瓦斯聚集和爆炸创造条件。

5. 突水事故趋于严重

在高承压水的作用下,煤岩体内部积聚了大量液体能量。当能量积聚到一定程度,受到开采扰动后极易发生突水灾害事故。

1.1.2 深部巷道围岩变形与破坏特征

随着矿井开采深度的增加,深部巷道围岩逐渐呈现出软岩变形特点,即使岩石抗压强度再高,也已成为实际意义上的深井高

应力区软岩。巷道围岩在高应力的作用下进入软岩岩性状态,岩石的蠕变速度、蠕变时间都在增大^[11]。同时,地质构造也越来越复杂,巷道压力越来越大。在采动影响的情况下,巷道周围的岩体承受的垂直应力越来越大,矿山压力显现强烈,巷道周边岩体出现了明显的塑性破坏和变形,围岩变形运动越来越强烈,使巷道的支护愈加困难,后期维修工作量极大,经济效益受到极大的影响,特别是在破碎带及应力集中区等困难条件下,深部巷道锚杆支护面临较多的技术问题^[12-19]。

1.1.2.1 深部巷道围岩的力学特征

在深部条件下巷道一旦被开挖,岩体原有的三向平衡应力状态就被打破,很快产生碎胀变形破坏,造成巷道周边破碎岩体增多、巷道支护困难等一系列问题,导致灾害事故增多,如大面积来压、冒顶、大变形且长期处于流变状态、冲击地压等,明显不同于浅部岩体表现出来的力学特性。深部巷道围岩的物理环境和力学特性较浅部发生了较大变化,主要是由于进入深部以后,多数巷道受“三高”和“一扰动”的作用,使深部巷道围岩的力学性质发生了明显变化,从而表现出其特有的力学特征^[20-27]现象,主要包括以下几个方面。

1. 围岩应力场具有分区破裂化特征

浅部巷道围岩状态通常可分为塑性破裂区、弹性区和原岩应力区3个区域,而深部巷道围岩产生膨胀带和压缩带(或称为破裂区和未破坏区交替出现的情形),而且其宽度按等比数列递增,这种现象被称为分区(区域)破裂化现象。因此,深部巷道围岩应力场更为复杂。

2. 围岩的大变形和强流变特性

研究表明,进入深部后岩体变形具有两种完全不同的趋势。

一种是岩体表现为持续的强流变性，即不仅变形量大，而且具有明显的“时间效应”，如煤矿中有的巷道 20 余年底鼓不止，累计底鼓量达数十米。Malan 等通过对南非金矿深部围岩的流变特性的系统研究，得出巷道围岩最大月位移量达 500 mm。另一种是岩体已不再具有承载性，但事实上它仍然具有承载和再次稳定的能力，生产中借助这一特性将巷道布置在破碎岩（煤）体中，如沿空掘巷。

3. 动力响应的突变性

浅部岩体破坏通常表现为一个渐进过程，具有明显的破坏前兆（变形加剧），而深部岩体的动力响应过程往往是突发的、无前兆的突变过程，具有强烈的冲击破坏性，宏观表现为巷道顶板或周边围岩的大范围突然失稳、坍塌。

4. 深部岩体的脆性 - 延性转化

研究表明，岩石在不同围压条件下表现出不同的峰后力学特性，最终破坏时应变值也不同。在浅部（低围压）开采中，岩石破坏以脆性为主，通常没有或仅有少量的永久变形或塑性变形，而进入深部开采以后，由于岩体处于“三高”和“一扰动”的作用环境之中，表现出的是其峰后强度特性。在高围压作用下，岩石可能转化为延性破坏，破坏时其永久变形量通常较大。因此，随着开采深度的增加，岩石已由浅部的脆性力学响应转化为深部潜在的延性力学响应行为。

1.1.2.2 深部巷道围岩的矿压显现

深部巷道围岩特有的力学现象，使其在宏观上表现出与浅部开采不同的矿压显现^[28,29]，主要体现在以下几个方面。

1. 矿压显现剧烈

研究表明，岩块的强度随深度的增加而有所提高，但进入深

部开采以后,覆岩的自重应力和地质构造应力随着开采深度增加的幅度远大于岩块强度随深度的增加值^[8],而且深部工程往往受采掘扰动复杂叠加支承压力影响,受其影响巷道周边围岩应力高达数倍岩体强度,致使围岩松软破碎、变形严重,并易发生破坏性冲击地压,给巷道的维护带来极大困难。

2. 围岩变形量大、破坏程度严重

深部巷道因埋深大,相应的围岩自重应力大,而且在深部岩层结构、节理、裂隙较浅部发育,构造应力十分突出、巷道围岩压力大,由此致使岩体破碎、难以支护,支护成本不断增加。国内外开采实践表明,开采深度为800~1000 m时,巷道变形量达1000~1500 mm,甚至更大,深部开采巷道的返修率在40%~80%。另据有关资料分析,近十年,巷道支护成本增加了1.4倍,巷道返修量占整个巷道掘进量的40%。

3. 破坏范围大

浅部巷道围岩在临近破坏时往往具有加速变形的征兆,据此可以进行预测、预报并采取相应的控制对策,而且其破坏一般局限于某一局部范围。与浅部不同的是,深部巷道围岩的破坏征兆不明显,具有突发性,预测预报工作十分困难,而且破坏往往是大面积的发生,具有区域性,如巷道发生大面积的冒顶垮落等灾害。

因此,针对上述的深部巷道围岩的动态灾变力学特性及宏观显现特点,通过现场、理论及实验的综合研究手段寻求深部巷道围岩变形破坏机理,提出适合深部巷道围岩自身变形特点的支护对策,完善深部巷道围岩控制支护理论及支护技术,对确保深部资源的安全开采具有重要的理论和现实意义。

1.2 国内外研究现状

国内外学者针对深部巷道，在地应力测试、支护理论及支护技术等方面做了大量工作。

1.2.1 巷道支护理论

支护理论的研究一直是巷道支护的一个重要方面。弄清巷道围岩变形和破坏规律，围岩与支护体相互作用关系，对认识支护对象，合理进行巷道支护设计具有重要意义。我国学者针对矿山巷道地质条件，在支护理论方面做了大量工作，提出多种巷道支护理论，并在生产实践中起到积极的指导作用。

1. 新奥法支护理论

新奥法^[30]支护理论在 20 世纪 70 年代末传入我国，在煤炭、铁路、水电等工程领域进行了推广应用，特别是煤炭行业，结合自身的特点，完善和发展了新奥法，形成以下支护原则：采用光面爆破；采用早强喷射混凝土及时封闭巷道周边，实施密贴支护；采用锚喷支护，主动加固围岩，提高其自承能力，在围岩内形成承载圈；实施二次支护；对破碎围岩实施注浆加固；实施动态设计和动态施工等。

2. 联合支护理论

联合支护理论^[31-38]认为，对深部软岩巷道，只追求提高支护体刚度难以有效控制围岩变形，要先柔后刚，先让后抗，柔让适度，稳定支护。相应的支护形式有锚喷网支护、锚喷网 + 支架、锚梁网 + 支架等联合支护技术。联合支护理论在困难条件巷道中得到比较广泛的应用，但随着巷道条件越来越差，该理论受到了挑战，有些巷道采用联合支护并不有效，需要多次维修和翻修，围岩变形一直不能稳定，需要寻求更合理的支护理论。

3. 松动圈支护理论

松动圈支护理论^[39-44]认为,当围岩应力超过围岩强度时,围岩将产生弧形破裂带,称为围岩松动圈。支护的最大载荷是围岩松动圈形成过程中的碎胀力。根据松动圈对巷道围岩进行分类,并提出相应的支护机理和方法。松动圈支护理论比较简单、直观,但存在两方面的问题:一是井下很难准确测定松动圈的范围;二是巷道支护对松动圈是否有影响及影响程度不清楚,需要进一步深入研究。

4. 锚杆支护的扩容-稳定理论

该理论针对锚杆支护提出,其实质是,锚杆支护主要作用在于控制锚固区围岩的离层、滑动、张开裂隙等扩容变形与破坏^[45],在锚固区内形成次生承载层,最大限度地保持锚固区围岩的完整性,避免围岩有害变形的出现,提高锚固区围岩的整体强度和稳定性。为此,应采用高强度、高刚度锚杆组合支护系统。高强度要求锚杆具有较大的破断力,高刚度要求锚杆具有较大的预紧力,并实施加长或全长锚固。组合支护要求采用强度和刚度大的组合构件。锚杆支护应尽量一次支护就能有效控制围岩变形与破坏,避免二次支护和巷道维修。该理论在井下工程应用中已经得到证实,但是还有很多具体的工作需要研究。

1.2.2 巷道支护形式

目前,用于深部软岩巷道的支护形式主要有以下几种^[46-57]。

1. 锚杆、锚喷支护

喷射混凝土可及时封闭巷道周边,实施密贴支护,减少水、风对围岩强度的影响。锚杆可及时支护围岩,起到主动加固作用,充分发挥围岩的自承能力。锚杆、锚喷支护是一种性能优越、比较适合深部软岩巷道的支护形式。但是,必须选择合理的

支护形式与参数，才能取得较好效果，否则容易出现冒顶事故。

2. U 型钢可缩性支架

U 型钢可缩性支架在我国煤矿和一些其他矿山得到比较广泛的应用。U 型钢具有良好的断面形状和几何参数，型钢搭接后易于收缩，只要支架设计合理，使用正确，连接件选择适当，就能获得较好的支架力学性能。我国可缩性支架所用的 U 型钢主要有 U25、U29 和 U36 三种。支架形式结构主要有不封闭和封闭两大系列。不封闭的有拱型直腿、拱型曲腿等形式，封闭的有圆形、方环形、马蹄形和直腿底拱形等类型。但是，U 型钢可缩性支架毕竟是一种被动支护形式，而且支护费用高，施工比较困难，不是首选的支护形式。

3. 注浆加固

围岩注浆加固是利用浆液充填围岩内的裂隙，将破碎的岩体固结起来，改善围岩结构，提高围岩的强度，改善其力学性能，从而增加围岩自身承载能力，保持围岩的稳定性。目前国内外用于岩体加固的材料共有两大类型：一类是水泥 - 水玻璃材料；另一类是高分子材料，如不饱和聚酯、环氧树脂、聚氨酯树脂等，其中聚氨酯树脂使用比较广泛。注浆加固一般适用于比较破碎的围岩条件，用于局部地段加固，并且与其他支护方法联合使用。

4. 复合支护

复合支护是采用两种或两种以上的支护方式联合支护巷道。如果能充分发挥每种支护方式的支护性能，做到优势互补，复合支护会有更好的支护效果和更广泛的适用范围。复合支护有多种类型，如锚喷 + 注浆加固，锚喷 + U 型钢可缩性支架，锚喷 + 弧板支架，U 型钢支架 + 注浆加固，以及锚喷 + 注浆 + U 型钢支架等形式。复合支护虽然适用范围广，但支护费用高，支护形式选

择不匹配时,往往造成各个击破的情况。

5. 卸压技术

将巷道布置在应力降低区,或采取人工卸压措施,使巷道周边的高应力向深部转移,是深部巷道围岩变形控制的另一个途径。在应力降低区布置巷道是首选的方法,而人工卸压法由于种种原因,目前还没有推广,仅局部采用。

1.2.3 煤巷锚杆支护技术

随着矿井产量和效率的不断提高,要求的巷道断面越来越大,成巷速度越来越快,传统的棚式支护越来越不能满足生产需要。近年来,煤巷锚杆支护技术^[58-66]发展极为迅速。与棚式支护相比,锚杆支护显著提高了支护效果,降低了巷道支护成本,减轻了工人的劳动强度。更重要的是,锚杆支护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。

在国外,美国、澳大利亚等国家的锚杆支护技术比较先进。美国最先重视高预应力锚杆支护技术。1992年,美国 A. Wahab Khair 观测了高水平地应力对巷道顶板产生的离层及剪切破坏,并提出了采用预应力桁架控制巷道顶板的措施。1994—1997年,美国 J. Stankus 系统地研究了水平地应力对巷道稳定性的影响,认为水平地应力是造成巷道顶板离层垮落、底板鼓起的主要原因,并在锚杆支护设计中考虑锚杆预应力的影响,认为预应力是决定锚杆支护效果的关键因素。澳大利亚锚杆支护技术已经形成比较完整的体系。澳大利亚的煤矿巷道几乎全部采用 W 型钢带树脂全长锚固组合锚杆支护技术,尽管其巷道断面比较大,但支护效果非常好。英国的锚杆支护技术是从澳大利亚引进的,在近十年实践的基础上又作了改进和提高。到目前为止,锚杆支护巷

道的长度占 90% 以上。

我国煤巷锚杆支护技术近年来也取得长足发展。特别是 1996—1997 年我国引进了澳大利亚锚杆支护技术，并完成了与锚杆支护技术有关的项目，使我国的煤巷锚杆支护技术有了较大提高。在全煤巷道、冲击地压巷道、复合、破碎顶板等困难条件下，锚杆锚索支护技术得到了应用，并取得较好的支护效果和经济效益。

在深部巷道支护方面，对锚杆、锚索控制巷道围岩变形的原理进行了研究，并应用于软岩巷道、构造破碎带、动压巷道、大断面开切眼等困难条件，取得一定的支护效果。尽管如此，深部高地应力巷道，特别是千米深井巷道支护难题还没有很好地解决，无论是从理论还是从技术方面，都需要进行更深入、细致的研究与试验。

1.2.4 地应力测试技术

地应力是引起采矿及其他各种地下工程变形和破坏的根本作用力，其大小和方向对巷道围岩稳定性影响很大。地应力测量是确定工程岩体力学属性、进行围岩稳定性分析以及实现地下工程开挖设计科学化的必要前提。

地应力测试理论与技术一直是岩石力学与工程学科的重要研究内容。目前，地应力测量方法有很多种，根据测量原理可分为三大类：第一类是以测定岩体中的应变、变形为依据的力学法，如应力恢复法、应力解除法及水压致裂法等；第二类是以测量岩体中的声发射、声波传播规律、电阻率或其他物理量的变化为依据的地球物理方法；第三类是根据地质构造和井下岩体破坏状况提供的信息确定应力方向。其中，应力解除法与水压致裂法得到比较广泛的应用，其他几种只能作为辅助方法。