



HUAXUE FUSHI XIA

SHENBU HANGDAO WEIYAN LIXUE XIANGYING YU ANQUAN KONGZHI

化学腐蚀下 深部巷道围岩 力学响应与安全控制

刘永胜 ○ 著



西南交通大学出版社



化学腐蚀下 深部巷道围岩 力学响应与安全控制

刘永胜 ○ 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·



图书在版编目 (C I P) 数据

化学腐蚀下深部巷道围岩力学响应与安全控制 / 刘永胜著. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.11
ISBN 978-7-5643-5932-4

I. ①化… II. ①刘… III. ①化学腐蚀-影响-地下工程-巷道-围岩应力(地下工程)-研究 IV. ①TU94
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 294787 号

化学腐蚀下深部巷道围岩力学响应与安全控制

刘永胜 著

责任编辑	柳堰龙
封面设计	何东琳设计工作室 西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	14
字 数	251 千
版 次	2017 年 11 月第 1 版
印 次	2017 年 11 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-5932-4
定 价	68.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

| 前言 |

随着社会发展、经济建设、能源开采以及国家安全的新需求，我国的地下空间开发不断走向深部已成必然趋势。深部岩体由于自身结构、变形形式和所处复杂地质环境等特点，其物理力学响应及破坏形式与浅部岩体相比具有显著的不同。高地温、高地应力、高渗流及化学腐蚀的多场耦合环境是影响深部岩体性能和稳定性的重要因素，也是诱发地下工程灾害的根本原因。因此，开展上述复杂环境下深部岩体力学性能研究及其稳定性控制是当前非常迫切的科学任务。

本书是作者及其课题组近年来在国家自然科学基金资助下所取得的研究成果基础上撰写而成的。书中运用了实验室与现场测试、模型试验相结合，理论分析与数值计算相补充的方法开展了化学腐蚀下深部岩体和力学响应与安全控制技术研究，主要内容包含：

(1) 分析了深部地下岩体力学的性能特点，推导了温度-应力-渗流耦合方程。研究表明：岩体的渗流场水头分布 $H = H(x, y, z, t)$ 与温度场的分布 $T = T(x, y, z, t)$ 密切相关，温度通过影响岩体的渗透系数而影响渗流场，温度梯度本身也影响水流的运动，而且温度梯度越大，对渗流场的影响也越大；渗流与温度相互影响，渗流速度越大对温度场的影响越大。

(2) 开展了化学腐蚀下岩体的质量测试、抗压强度、抗拉强度、细观力学性能等物理力学性能试验。试验表明化学腐蚀会造成岩体质量损伤，削弱各项力学强度，且随化学腐蚀的 pH、腐蚀时间的增长，强度降低越明显。开展了化学腐蚀下岩石的动态力学性能试验，得到了纯动态、一维动静组合和三维动静组合的应力应变曲线，分析了 pH、冲击气压、腐蚀时间、轴压和围岩对岩石动态性能的影响关系。

(3) 根据能量守恒和一维应力波理论，进行了一维动静组合作用下围岩力学响应过程中的能量耗散研究，得到了入射能、透射能、反射能和吸收能与平

均应变率的关系。结果表明：随着平均应变率的增大，入射能量、反射能量及吸收能量逐渐增大，透射能量变化与应变率关系并不显著。

(4) 基于损伤理论和本书试验方案，分析动态损伤因子的表达形式，建立了化学腐蚀-温度-应力耦合下的动态损伤本构模型，通过理论分析结果与试验曲线的比较，说明了该理论本构方程的科学性。

(5) 基于 DIC 全过程监测技术开展了深部巷道开挖卸荷的相似模型试验，得到了巷道开挖过程变形、位移云图，监测到了巷道围岩裂纹起裂、扩展过程。试验发现巷道的初期开挖卸荷对巷道断面的变形破坏影响明显，随着开挖深度的增加，巷道变形趋于平缓。

(6) 开展了化学腐蚀下巷道开挖的数值模拟，得到了化学腐蚀下巷道围岩的变形、应力等，并计算了测点的位移。通过以上计算可知，开挖过程中的最大应力出现在巷道的底部及顶部位置，这与理论上的情况相吻合。

(7) 从化学腐蚀对岩石的作用机理、能量转化规律、分区破裂形成的角度研究了深部岩体的破坏机理，介绍了深部化学腐蚀下岩体分区破裂区的半径和宽度。进行了化学腐蚀作下岩体的稳定性分析，给出了稳定性验算的计算公式，提出了适合化学腐蚀下巷道岩体的支护方式。

全书内容共分为 8 章，第 1 章综述了深部地下工程围岩的力学特点，包含了围岩所处的工程环境、变形破坏的特点和深部巷道围岩的基本控制技术，最后提出本书的研究内容；第 2 章阐述了深部地下工程的多场耦合，推导了温度-应力-渗流的耦合机理方程，并对深部地下工程的施工难点进行了分析；第 3 章开展了化学腐蚀对岩石质量、抗压强度、抗拉强度、细观力学性能试验，并进行了试验结果分析；第 4 章开展了化学腐蚀作用下岩石的纯动态力学性能、一维动静组合和三维动静组合力学性能试验，分析了 pH、酸化时间、应变率等对岩石动态力学性能的影响，进行了动静组合作用下岩石的能量耗散规律研究；第 5 章建立了化学腐蚀-温度-应力耦合下的动态损伤本构模型；第 6 章包含巷道围岩变形的现场测试、化学腐蚀下巷道开挖的模型试验和数值计算；第 7 章为化学腐蚀下围岩的破坏机理和分区破裂形成；第 8 章为化学腐蚀下围岩的安全控制，介绍了化学腐蚀下巷道围岩支护设计和支护形式。

本书的在撰写过程中，参考了许多深部岩体力学相关著作和论文。参考文献的内容给予了本书撰写充分的启迪、支撑，为此作者表示衷心感谢！对辛勤耕耘在深部岩体力学、岩土工程技术领域的专家、学者表示由衷的钦佩和谢意，没有众多学者的辛勤劳动，就没有本书撰写的动机和存在的基础。由于参考文

献数量较多，若在本书中标注有遗漏，敬请谅解。本书的顺利出版得到了众多单位和个人的大力支持：丰城矿务局建新煤矿提供了本书巷道变形监测的数据和试件原样；岩石细观力学试验得到了中国科学院武汉岩土力学研究所周辉研究员的大力帮助；岩石的动静组合试验得到了中南大学资源与安全工程学院宫凤强教授的大力支持；理论分析和现场实验得到了安徽理工大学孟祥瑞教授、徐颖教授的悉心指导。研究生陈章林、高栋、杨猛猛、刘旺、董新玉、吴云、吕少勇、李进、邹家宇对于本书中的实验试验操作的具体实施、书稿的整理、图表的处理等做了大量的工作，在此一并表示深切的感谢！

深部地下空间建设方兴未艾，前景极具魅力。同时深部岩体力学的研究也是一项长期而艰巨的任务。力学理论体系不断深入、岩土工程技术标准日益更新，应用范围不断拓宽，给岩土工程科研工作者带来了无限挑战。由于作者知识水平欠缺，在撰写过程中参阅的资料有限，书中可能存在不妥和不足，欢迎有关专家、学者及所有读者批评指正。

刘永胜

2017年9月

| 目录 |

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 深部岩体力学的基本任务	2
1.3 化学腐蚀对深部巷道围岩影响研究进展	10
1.4 本书的主要研究内容	11
参考文献	12
第2章 深部地下工程的环境特征	15
2.1 深部地下工程的多场耦合概述	15
2.2 深部地下工程的温度-应力-渗流耦合分析	26
2.3 深部地下工程的施工难点	33
2.4 本章小结	37
参考文献	37
第3章 化学腐蚀下深部围岩的基本物理力学性能	40
3.1 岩样试样及其物理成分	40
3.2 酸性溶液对岩样腐蚀的表观特征分析	42
3.3 酸性腐蚀对岩石的质量损伤分析	43
3.4 岩石的单轴压缩试验	44
3.5 岩石的抗拉试验	51
3.6 岩石的细观力学性能研究	53
3.7 本章小结	64
参考文献	65
第4章 化学腐蚀下围岩的动态力学性能	67
4.1 SHPB 技术的理论基础	67
4.2 岩石的纯动态力学性能	70
4.3 动静组合作用下岩石的力学特性	93
4.4 动静组合加载下岩样的能量耗散规律分析	104

4.5 本章小结	109
参考文献	110
第 5 章 化学腐蚀下岩石的动态损伤本构模型	112
5.1 引言	112
5.2 损伤变量的定义及计算	113
5.3 动态增长因子的定义	116
5.4 损伤本构模型的建立	117
5.5 本构模型的验证及参数的确定	118
5.6 本章小结	121
参考文献	121
第 6 章 化学腐蚀下巷道开挖变形测试与模型试验	123
6.1 工程概况	123
6.2 矿区地质概况	123
6.3 巷道变形测量	127
6.4 化学腐蚀下巷道变形的数值模拟	129
6.5 相似材料模型试验设计	133
6.6 数字散斑基本原理	140
6.7 模型试验及结果分析	144
6.8 本章小结	170
参考文献	171
第 7 章 深部地下工程围岩的破坏机理	174
7.1 化学腐蚀对深部岩石的作用机制分析	174
7.2 巷道开挖时围岩的能量演化机理	179
7.3 深部地下工程围岩的分区破裂	182
7.4 深部化学腐蚀围岩分区破裂的形成	193
7.5 本章小结	198
参考文献	199
第 8 章 化学腐蚀下巷道围岩稳定性控制	201
8.1 引言	201
8.2 化学腐蚀下巷道围岩稳定性分析	202
8.3 化学腐蚀下巷道围岩支护设计	207
8.4 化学腐蚀下围岩支护技术	208
8.5 本章小结	214
参考文献	214

第1章 绪 论

1.1 引 言

我国是目前世界上最大的煤炭生产国和消费国,煤炭资源量占国内化石能源总量的 95%。根据国民经济发展对能源需要的预测,我国煤炭最低的需求量 2020 年为 2 100 Mt, 2050 年为 2 700 Mt。到 2050 年,煤炭将占一次能源需求比例(不含生物质能量)的 55%左右。由于我国石油、天然气等能源紧缺,因此从某种意义上来说,煤炭在今后几十年内仍将是我国的重要能源。

根据第 3 次全国煤炭资源勘测结果,我国埋深 2 000 m 以内的煤炭资源总量约为 5.57 万亿吨,其中埋深超过 1 000 m 的煤炭资源量约为 2.86 万亿吨,占总量的 51.34%。我国煤炭资源分布与区域经济发展水平、消费需求极不适应。从煤炭资源的地理分布看,在昆仑山—秦岭—大别山一线以北保有煤炭资源储量占 90%,且集中分布在山西、陕西、内蒙古 3 省(区)^[1]。煤炭资源分布地域广阔,煤层赋存条件多样,地质条件也极其复杂。目前我国 1 000 m 以内浅煤炭资源量中可靠储量仅有 9 169 亿吨,且主要分布于新疆、内蒙古、山西、贵州和陕西 5 省(区)^[2]。而经济社会发展水平高,能源需求量大的东部地区(含东北)煤炭资源量仅为全国保有资源储量的 6%。中东部地区的浅部煤炭资源已近枯竭,但深部煤炭资源还相对丰富;华东地区的煤炭资源储量 87%集中在安徽省和山东省;中南地区煤炭资源的 72%集中在河南省^[3]。华北聚煤区东缘深部资源潜力巨大,河北、山东、江苏、安徽省深部资源量为浅部资源量的 2~4 倍。东北及华北聚煤区拥有蒙东(东北)、鲁西、两淮、河南、冀中等 5 个大型亿吨级煤炭基地(全国共 13 个)。

由于近年来的大规模开采,一些地区的浅部煤炭资源已近枯竭,煤矿开采每年将以 8~10 m 的速度向深部递增。目前已有江苏、山东、河南、河北、黑龙江等省多个大型煤矿的采深超过 1 000 m^[4]。随着开采深度的日益增大,深部井的数量不断增多。表 1-1 为全国各省主要深部矿井数量统计情况。由表 1-1 知,

目前全国深部煤矿以山东、河南和河北 3 省占多数，3 省深部矿井数量达到 80 个，占全国深部矿井数量的 57.97%。目前我国煤矿矿井正以 8~12 m/a 的平均速度向深部延伸，中东部地区的延伸速度为 10~25 m/a。已有深部煤矿的省份，尤其是山东、河南、安徽、河北等中东部省区国有重点煤矿目前的平均采深在 600 m 以上，按照 10~25 m/a 的延伸速度，在未来 10 年内普遍进入深部开采，并且未来我国深部煤矿数量及产能所占比例越来越大。

表 1-1 全国主要深部矿井数量分布统计^[5]

省 份	矿 井 数 量 / 个			比 例 / %
	开 采 深 度 800~1 000 m	开 采 深 度 1 000~1 200 m	开 采 深 度 >1 200 m	
江 苏	3	3	7	9.42
河 南	19	8	0	19.57
山 东	10	8	11	23.91
黑 龙 江	11	5	0	11.59
吉 林	0	2	2	2.90
辽 宁	6	5	0	7.97
安 徽	14	0	0	10.14
河 北	15	3	2	14.49

1.2 深部岩体力学的基本任务

1.2.1 深部地下工程的环境特点

深部与浅部开采的明显区别在于深部岩石所处的特殊环境，即“三高一扰动”的复杂力学环境。“三高”主要是指高地应力、高地温、高岩溶水压，“一扰动”主要是指强烈的开挖扰动。

(1) 高地应力：进入深部开采以后，仅由重力引起的垂直原岩应力（约 20 MPa）通常已超过工程岩体的抗压强度，而由于工程开挖所引起的应力集中（大于 40 MPa）则远大于工程岩体的抗压强度。资料表明^[6]，深部岩体形成时间久远，形成过程中留有远古构造运动的痕迹，其中存有构造应力场或残余构造应力场，二者的叠合累积为高应力。因而在深部岩体中形成了异常的地应力场，据南非地应力测定，在深部 3 500~5 000 m，地应力水平为 95~135 MPa，属于

高地应力。

(2) 高地温: 测量结果显示, 越往地下深处地温越高。地温梯度为 $30 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 一般取 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。有些地区如断层附近或导热率高的异常局部地区, 地温梯度有时高达 $200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。岩体在超出常规温度环境下, 表现出的力学、变形性质与普通环境条件下具有很大差别^[7]。地温可使岩体热胀冷缩破碎, 而且岩体内温度变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可产生 $0.4 \sim 0.5\text{ MPa}$ 的地应力变化。岩体温度升高产生的地应力变化对工程岩体的力学特性会产生显著的影响。

(3) 高岩溶水压: 进入深部开采后, 随着地应力及地温的升高, 同时将会伴随着岩溶水压的升高, 当采深大于 $1\ 000\text{ m}$ 时, 其岩溶水压将高达 7 MPa , 甚至更高。岩溶水压的升高, 使矿井突水灾害更严重。深部开采高井深环境 (开采深度大于 500 m) 将使煤炭提升和排水的技术困难加大, 成本上升, 管理更加困难。

(4) 开挖扰动: 进入深部开采后, 在承受高地应力的同时, 大多数巷道要经受巨大的回采空间引起强烈的支承压力作用, 使受采动影响的巷道围岩压力是原岩应力的数倍, 甚至近十倍, 从而造成在浅部表现为普通坚硬的岩石, 在深部可能表现出软岩大变形、大地压和难支护的特征; 浅部的原岩体大多处于弹性应力状态, 而进入深部以后则可能处于塑性状态, 即由各向不等压的原岩应力引起的压、剪应力超过岩石的强度, 造成岩石的破坏。

1.2.2 深部岩体变形破坏特点

1. 围岩分区与破裂

浅部巷道围岩状态通常可分为松动区、塑性区和弹性区 3 个区域, 其本构关系可以采用弹塑性力学理论进行推导求解。然而, 研究表明, 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, 且其宽度按等比数列递增, 这一现象被称为区域破裂现象。现场实测研究也证明了深部巷道围岩变形力学的拉压区域复合特征。因此, 深部巷道围岩的应力场更为复杂。深部的岩石在受到较大外部压力的影响下, 就会表现出较为容易破裂的特点, 且上述破裂现象主要发生于围岩区域的压缩带以及膨胀带当中。上述两个区域所发生的破裂严重程度通常还会随着所受到压力的提升产生范围的扩大, 并且范围扩大的速度亦随着压力的提升而提升。因此可以发现, 对于深部岩石层的研究不仅应当考虑岩石本身所具有的特性, 还需要考虑与机械作用力之间的关系, 以便于防止破裂情况的产生。

2. 深部岩体动力响应的突变性

浅部岩体破坏一般是渐进的,且在临近破坏时经常表现出变形加剧现象,破坏前兆明显。在深部工程条件下,岩体破坏则具有强烈的冲击破坏性质,其动力响应的破坏过程往往是突发、无前兆的突变过程。在巷道中该过程表现为大范围巷道的突然坍塌和失稳,在工作面中该过程则表现为顶板的突然大面积冲击来压。深部与浅部岩体破坏形式如图 1-1 所示。

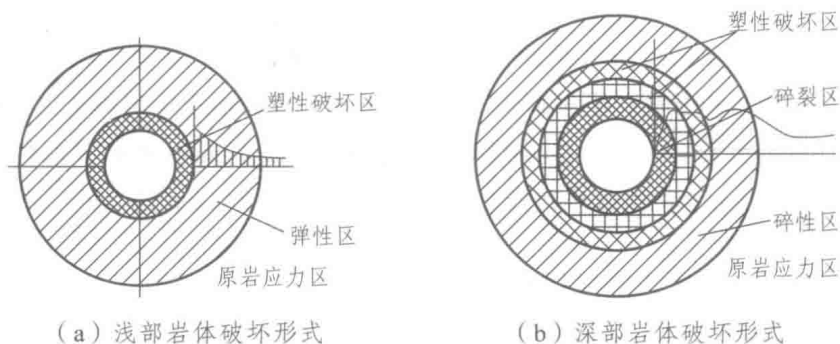


图 1-1 深部和浅部岩体破坏形式

3. 深部岩体的大变形和强流变性

岩体变形具有两种完全不同的趋势:① 岩体表现为持续的流变特性,变形较大但仍保持连续,如煤矿中有些巷道 20 余年底臃不止,累计底臃量达数十米。② 有的岩体并未发生明显变形但破碎却十分发育,按传统的关于破坏和失稳的概念,这样的岩体不再具有承载能力,而实际上深部破碎岩体却具有再次稳定的能力,有的巷道还不得不在破碎岩(煤)体中掘进开挖(如沿空掘巷)。因此,已破坏巷道围岩和支护相互作用达到二次稳定问题是深部岩体力学有别于浅部岩体力学的重要特征之一。

4. 深部岩体的脆-延性转化

岩石在不同围压下表现出不同的峰后特性,脆-延转化即岩石在低围压下表现为脆性,在高围压下转化为延性或韧性的行为。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,表现出的实际是其峰后强度特性。在高围压作用下,岩石可能转化为延性,破坏时其永久变形量通常较大。因此,随着开采深度增加,岩石已由浅部脆性力学响应转化为深部潜在的延性力学响应行为。

Karman^[8]首次用大理岩进行了不同围压条件下的压缩试验, Parterson^[9-11]在室温下也对大理岩进行了一系列试验研究, 发现随着围岩增大, 岩石变形行为由脆性向延性转变的特性, 如图 1-2 所示。

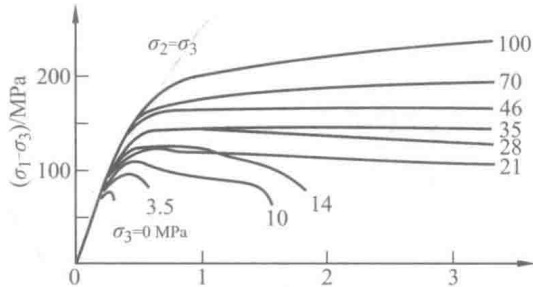


图 1-2 不同围压下大理石的脆性-延性转化现象

Mogi^[12-13]发表过类似的试验结果, 并指出脆-延转化通常与岩石强度有关。由图 1-2 可见, 岩石破坏时在不同围压水平上表现出不同的应变值, 当岩石发生脆性破坏时, 通常不伴有或仅伴有少量的永久变形或塑性变形, 当岩石呈延性破坏时, 其永久应变通常较大, 因此有人建议用岩石破坏时的应变值作为脆-延转化判别标准, 如根据 Heard^[14]的建议, 如果岩石发生破坏时的应变值为 3% ~ 5%, 就可视为岩石发生了脆-延转化。Singh^[15]则从应力和强度的角度提出了脆-延转化条件, 根据大量实验数据, 他认为脆-延转化条件为^[16]:

$$\sigma_1 / \sigma_3 = (3 \sim 5.5) \text{ 和 } \sigma_c / \sigma_3 = (0.5 \sim 1.25)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力; σ_c 为岩石的单轴抗压强度。总之, 脆-延转化是岩石在高温和高压作用下表现出的一种特殊的变形性质, 如果说浅部低围压下岩石破坏仅伴有少量甚至完全没有永久变形的话, 则深部高围压条件下岩石的破坏往往伴随有较大的塑性变形。目前的研究大多集中在脆-延转化的判断标准上, 而对于脆-延转化的机理却研究较少, 还没有比较成熟的成果。

5. 深部岩体开挖岩溶突水的瞬时性

浅部煤层开采中, 矿井水主要来源是第四系含水层或地表水通过采动裂隙网络进入采场和巷道。矿井水水压小, 渗水通道范围大, 基本服从岩体等效连续介质渗流模型, 涌水量也可根据岩体的渗透率张量进行定量估算, 因此突水预测预报尚具可行性。而深部的状况却十分特殊: ① 随着采深加大, 承压水位高, 水头压力大。② 由于采掘扰动造成断层或裂隙活化, 而形成渗流通道相对集中, 矿井涌水通道范围窄, 使奥陶系岩溶水对巷道围岩和顶底板造成严重的

突水灾害。另外,突水经常发生在采掘工作结束后的一段时间内,具有明显的瞬时突发性和不可预测性。

1.2.3 深部巷道围岩控制理论

深部巷道围岩控制涉及围岩强度、围岩应力和支护技术三大因素,所以应从这三个方面来考虑,实现深部巷道围岩稳定:

1. 提高围岩强度

破碎围岩中锚杆支护的作用在于提高围岩强度,随锚杆支护强度提高,锚固体极限强度、残余强度增大,残余强度增大更为显著,因此采用高强锚杆支护可显著提高围岩的承载能力。研究表明,在一定范围内支护阻力与围岩变形量呈负指数关系,提高支护阻力可大大减少围岩变形量,有利于巷道围岩稳定。由于深部巷道围岩比较破碎,采用围岩注浆加固可明显改善围岩力学参数、充填裂隙、提高岩体强度和锚杆锚固力,并且可以封闭水源、隔绝空气,保护围岩免受风化。注浆材料可选用化学类、水泥类、高水速凝材料等。注浆对象主要是软弱、破碎围岩。

2. 减小巷道围岩应力

合理布置巷道,从时间、空间减少采动支承应力对巷道作用的强度和次数,减小围岩应力、采动支承应力对巷道围岩破坏;合理设计煤柱尺寸,既要保持煤柱稳定,又要使巷道受到的集中应力尽可能小,将巷道布置在应力降低区内。对于深部巷道来说,采取应力转移、减小浅部围岩应力是减小巷道围岩变形量、保持巷道良好维护状态的重要技术途径。

3. 采用合理的锚杆支护技术

(1) 高强度、大延伸量锚杆支护:阻止深部回采巷道围岩发生较大变形既不经济也不合理。高强度锚杆支护可提供较大的支护阻力,控制围岩塑性区及破碎区发展、降低塑性区流变速度,提高支护阻力可以大大减小围岩变形;大延伸量锚杆支护允许围岩有一定变形,降低围岩应力、减少锚杆载荷,防止锚杆破断,改善巷道维护状况。

(2) 增大锚杆预紧力:增大锚杆预紧力显著减小深部巷道围岩强度弱化、减小围岩塑性区及破碎区的范围,提高深部巷道稳定性。

(3) 改善锚索性能:目前煤矿锚索使用的钢绞线直径有 15.24 mm、17.8 mm

两种, 延伸率 $W_s=3.5\%$ 。锚索直径偏小, 强度不够, 延伸量更小, 不能适应围岩较大变形, 难以避免破断失效。通过应用新材质、增大锚索直径, 提高锚索的延伸量和破断载荷, 使锚索适应深部巷道围岩大变形。

1.2.4 深部围岩支护技术

以上深部岩巷围岩支护理论需要通过相应的技术措施才能实现。通过一系列技术开发、现场试验和工程示范应用, 在系统总结的基础上, 提出如下关于深部岩巷围岩支护技术措施体系。

1. 围岩应力状态恢复改善措施

关于巷道开挖后围岩应力状态的恢复与改善措施, 目前能够做到的就是通过给锚杆和锚索施加足够高的预紧力, 通过喷射混凝土面层的应力扩散作用, 对巷道自由面主动施加一定的表面应力。表面应力必须达到一定的量值, 应力太低难以起到对围岩应力状态的有效恢复与改善作用, 因此, 将预应力施加到合理量值就成为这一技术措施有效性的关键。这包括两个方面: 一是需要将锚杆、锚索的预紧力施加到合理量值; 二是喷射混凝土面层必须具备足够的抗弯刚度, 能够起到应力的有效扩散作用。传统的风动扳手和风动锚杆钻机等机具由于其额定扭矩太小 (一般不超过 $200 \text{ N} \cdot \text{m}$), 所以能够给锚杆施加的最大预紧力一般只有 20 kN , 而根据物理与数值模拟研究结果, 对深部岩巷 II 类围岩, 要维护巷道的稳定, 需要对锚杆施加 100 kN 左右的预紧力才能满足要求。试验表明, 100 kN 的预紧力相当于施力机具的扭矩要在 $1\,000 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右, 需要研究开发专用的锚杆高预紧力施加机具。因此, 笔者开发研制了专门用于深部岩巷支护锚杆预紧力施加的 MQS90J2 型气动锚杆安装机。为了提高喷层的抗弯刚度, 实现围岩表面应力的均匀扩散, 采用了以下关键技术措施: 增加喷层厚度, 在喷层中布设内外双层钢筋网和螺纹钢格栅拱架, 形成钢筋混凝土结构。与普通混凝土喷层相比, 以内外双层钢筋网和螺纹钢格栅为骨架的喷射混凝土面层除了具有较高的抗弯强度和刚度外, 能够承受更大的围岩变形而不易开裂, 具有更强的变形适应能力。这是将隧道支护技术移植发展后应用于煤矿深部岩巷支护的一项技术进步。

2. 围岩增强与固结修复措施

如上节所述, 深部岩巷开挖后围岩承受的最大差应力为 $4 \sim 5$ 倍围岩强度,

因而高应力与低强度之间的矛盾尤为突出,这在浅部巷道中是无法想象的,所以必须采取强力支护手段增强围岩,大大提高围岩的固有抗剪强度。目前从技术上能够实现、经济上可行的围岩增强措施主要是强力锚固支护(包括超强锚杆和高预应力锚索)和高强高韧的注浆补强。超强锚杆是选用Ⅳ、Ⅴ级螺纹钢作为杆体材料经过热轧工艺加工而成的,锚杆杆体材料屈服应力在 540 MPa 以上、杆体抗拉强度在 200 kN 以上。研究表明,对Ⅱ类围岩,当预应力达到 100 kN 时,维持巷道稳定所需的最终锚固力约为 200 kN,这就是在深部岩巷支护中需要采用超强锚杆支护的原因。超强锚杆增强围岩的机理在于通过强大的轴向抗力严格限制围岩沿巷道自由面法向和裂隙滑移面法向的张开变形,通过强大的横向抗力抵御围岩沿滑移面切向的剪切变形,提高围岩的固有抗剪强度 c 值和 ϕ 值。所以,超强锚杆起的是增强围岩的作用。通过现场试验监测与数值模拟结果的对比可以说明,采用高预应力超强锚杆支护后,Ⅱ、Ⅲ类围岩的 c 值和 ϕ 值能够提高 20%~30% (Ⅱ类围岩提高的幅度大于Ⅲ类围岩提高的幅度),弹性模量大约能够提高 20%。高强高韧注浆就是将高强度高韧性的注浆材料注入围岩裂隙中,使破裂区围岩得到固结,损伤区围岩得到修复,其作用也是提高围岩的固有抗剪强度。高强高韧是对注浆材料强度变形性能的根本要求,关于高强需要满足两方面的技术指标:① 注浆材料结石体 24 h 单轴抗压强度不小于 8 MPa, 28 d 单轴抗压强度不小于 30 MPa, 28 d 龄期黏结力 $c \geq 5$ MPa。② 注浆材料与围岩裂隙面具有良好的黏结性能,两者黏结后 28 d 龄期沿裂隙面法向的抗拉强度大于等于 2 MPa,沿裂隙面切向的黏结力 $c \geq 5$ MPa。关于高韧的基本要求是 28 d 龄期的峰前最大应变为 3%~5%,峰后应变在 2%以上,峰后 2%的应变范围内应力跌落幅度小于 20%。只有使用满足以上强度变形要求的材料进行注浆,才能使补强加固后的围岩体能够抵抗深部高地应力的作用而保持长期稳定。以上两种措施需根据围岩类型合理搭配采用。对完整性和坚硬性均好或较好的围岩(一般为Ⅰ、Ⅱ级围岩,少数Ⅲ级围岩),应以超强锚杆支护为主,注浆所起的是补强加固作用,是辅助性的。对这类围岩来说,巷道开挖后裂隙扩展有一个过程,因而需要把握正确的注浆时机,若注浆过早,由于深部裂隙尚未得到扩展,浆液难以渗透到足够的深度,只能对近表破碎的围岩进行固结,难以起到修复损伤的作用,因而补强加固的效果不明显。对Ⅰ级围岩,适宜的注浆时间应为巷道开挖后 50~60 d;对Ⅱ级围岩,适宜的注浆时间应为巷道开挖后 30~40 d。对完整性差或完整性好但极软弱的围岩(多数Ⅲ级围岩和所有的Ⅳ、Ⅴ级围岩),应以注浆固结为主,锚杆支护为辅。对这类围岩,注浆对围岩起到固结

增强作用,能够大大改善围岩的完整性,显著提高围岩强度,巷道开挖后应尽早注浆,甚至需在开挖工作面超前注浆。对Ⅲ、Ⅳ级围岩,施作注浆补强的时机应根据巷道两帮收敛变形量来决定,一般当巷道两帮的收敛变形量在 70~80 mm 时,破裂损伤区的厚度相应扩大到 3~4 m,这时需要施作注浆补强。

3. 应力转移与承载圈扩大控制措施

所谓应力转移与承载圈扩大控制措施就是在巷道开挖后通过高预应力超强锚杆、高强高韧注浆、预应力锚索几种支护加固措施在时间上的有序安排与空间上的合理交错,控制破裂损伤区的扩展范围及其破裂损伤的程度,将控制应力峰值转移到距离巷道表面一定距离的更深部位的围岩中,最终将锚杆锚固增强区、注浆固结修复区和深部围岩稳定区联结成一个具有“三明治”结构的共同承载整体,将围岩承载圈扩大到预期的厚度,将巷道变形控制在允许的范围,实现巷道围岩的长期稳定。预应力锚索的施作时间要看巷道收敛变形量的大小和变形的速率,当巷道两帮的收敛变形量为 90~100 mm,破裂损伤区厚度相应扩大到了 4~5 m 时,这时需要施作预应力为 120~150 kN、长度为 6~8 m 的锚索。对Ⅱ、Ⅲ级围岩一般是先注浆后施作锚索;而对Ⅳ、Ⅴ级围岩,应在浅孔注浆后施作锚索,然后应尽快施作深孔注浆,应选用上述高强高韧的注浆材料。

4. 分步联合支护理念及其技术措施

上述几个方面的技术措施应根据具体的围岩类别联合应用,分步实施。对深部岩巷Ⅰ级围岩,采用高预应力超强锚杆支护实现围岩应力状态的恢复改善和围岩增强,即能控制其稳定;对Ⅱ级围岩,除了采用高预应力超强锚杆支护外,还需采用滞后注浆固结修复破裂损伤区围岩,需要将应力状态恢复、围岩增强和破裂损伤修复 3 项对策并用;对Ⅲ级围岩,需要在Ⅱ级围岩的支护措施基础上辅助以巷道断面形状的优化,并在高预应力超强锚杆的基础上增加预应力锚索,使巷道表面应力状态得到进一步恢复与改善,锚杆锚固区围岩进一步得到增强,同时还能将锚杆锚固区与深部围岩联为一体,实现应力峰值向深部的转移和围岩承载圈的扩大;而对Ⅳ、Ⅴ级围岩,还需在Ⅲ级围岩的对策基础上,采用施工临时支护措施:在工作面施工超前注浆锚杆对破碎围岩进行预固结和预增强,并架棚支护。临时支护的作用一方面是为了防止工作面冒顶、片帮,控制施工安全;另一方面可随着围岩变形对围岩表面施加被动应力,与锚杆锚索共同形成围岩应力状态恢复改善的联合支护体系,使围岩表面的侧限压力达到更