

深部软岩巷道围岩 稳定性分析与控制技术

SHENBU RUANYAN HANGDAO WEIYAN
WENDINGXING FENXI YU KONGZHI JISHU

孔德森 薄福利 董桂刚 李振武 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

深部软岩巷道围岩 稳定性分析与控制技术

孔德森 薄福利 董桂刚 李振武 著



北京
冶金工业出版社
2014

内 容 提 要

本书系统地介绍了作者近年来在深部软岩巷道围岩稳定性分析与控制技术方面的研究成果。全书共分8章,详细论述了深部软岩巷道围岩的变形破坏特征、变形破坏机理以及巷道围岩稳定性控制技术。主要内容包括:深部软岩巷道围岩变形破坏特征分析、深部软岩巷道地应力实测分析、深部软岩巷道围岩岩性与破坏机理分析、深部软岩巷道围岩松动圈实测分析、深部软岩巷道围岩稳定性控制技术、深部软岩巷道稳定性控制数值分析、深部软岩巷道围岩稳定性控制效果分析等。

本书可供采矿工程、矿井建设工程、岩土工程、地下工程等专业的研究生和科研人员参考,也可供从事以上专业设计和施工的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

深部软岩巷道围岩稳定性分析与控制技术/孔德森等著. —北京:冶金工业出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-5024-6770-8

I. ①深… II. ①孔… III. ①煤矿—软岩巷道—围岩稳定性—研究 IV. ①TD322

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第244642号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 禹 蕊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6770-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014年11月第1版,2014年11月第1次印刷

148mm×210mm;5印张;144千字;146页

25.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

我国埋深超过 1000m 的煤炭储量约为 29500 亿吨，占煤炭资源总量的 53%。随着煤炭工业的发展，开采能力和机械化程度不断提高，深部矿井逐渐增多，深部开采已成为矿业工程发展的必然趋势。预计在未来 20 年，很多煤矿将进入 1000~1500m 的开采深度。

随着矿井开采逐渐向深部扩展，巷道断面逐渐增大，原岩应力与构造应力不断升高，相应的采掘工程围岩应力更为突出，在浅部呈现中硬岩变形破坏特征的工程岩体，进入深部后转化为高应力软岩，表现出大变形、高应力和难支护的软岩特征。深部巷道高地压现象极为突出，矿井深部巷道地质条件复杂，围岩应力分布与矿压显现异常，致使深部巷道不仅在采掘影响期间围岩急剧变形，而且在应力分布趋于稳定后仍保持快速流变，顶板下沉和两帮移近明显，底臃严重，失修和严重失修的巷道增多，巷道维护十分困难，维护费用增高，且常常出现前掘后修、重复返修的现象。一般来说，每米巷道平均每年的维修费用需要 2000 元左右，我国深部软岩巷道长 180 万米，深部软岩巷道每年的修复费用高达 36 亿元。对于开拓巷道来说，因其服务年限可达 50~80 年，所消耗的巷道维修费用就更为惊人。深部复杂软岩巷道围岩的稳定性分析与控制已成为当今地下工程中最为复杂的难题之一，

II 前 言

严重制约着深部矿井开采的高产、高效、低耗及安全生产水平，阻碍着深部开采的健康可持续发展，威胁着深部矿井企业的生存。

深部软岩巷道围岩的稳定性分析与控制技术不仅是目前一些深部矿井面临的问题，从长远来看，它也是今后进一步开发利用深部矿产资源具有战略意义的问题。近几十年来，国内外学者对深部软岩巷道围岩的稳定性控制问题进行了广泛深入的研究，且取得了很大的进展，提出了各种分析理论、设计方法和计算模型，发展和改进了各种施工、检测和实验方法，切实有效地指导了工程实践，但由于深部软岩巷道围岩稳定性分析与控制技术的复杂性，现有的认识仍不能满足采矿工程的需要，在理论分析和现场实践方面还存在很多问题。为此，作者围绕深部软岩巷道围岩稳定性分析与控制技术研究中存在的主要问题，在软岩巷道的变形破坏特征、巷道围岩的变形破坏机理以及深部软岩巷道围岩的稳定性控制技术等方面进行了系统而全面的研究工作。

本书是作者多年来在深部软岩巷道围岩稳定性分析与控制技术方面研究成果的总结，共分8章。第1章为绪论，介绍了深部软岩巷道围岩稳定性分析与控制技术研究背景、国内外研究现状与进展以及现有研究存在的主要问题；第2章重点介绍了深部软岩巷道围岩的变形破坏特征；第3章通过应力解除法实测了深部软岩巷道的原岩应力，并对实测结果进行了分析，在此基础上，给出了一些巷道布置与支护的建议；第4章对深部软岩巷道围岩的岩性进行了物相分析，进而全面分析了深部软岩巷道围岩的破坏机理；第5章对深部软岩巷道围岩的松动圈进行了实测分析；

第6章重点介绍了深部软岩巷道围岩的稳定性控制技术,具体包括各种已破坏巷道的加固技术和新掘巷道的支护技术等;第7章对研究确定的深部软岩巷道围岩的稳定性控制技术方案进行了数值模拟计算和对比分析;第8章对深部软岩巷道围岩的稳定性控制效果进行了反馈分析,分析结果表明,研究确定的深部软岩巷道围岩的稳定性控制技术方案是合理、有效的,可以保证深部软岩巷道围岩的长期稳定。

本书由孔德森、薄福利、董桂刚和李振武撰写。在本书写作过程中,王晓敏、赵志民、王安水、王士权、邓美旭、谭晓燕、陈士魁、宋城等研究生做了大量的数据整理工作,在此谨向他们表示衷心的感谢。同时,书中还参考了国内外众多单位和个人的研究成果与工作总结,在此一并表示感谢。

本书的出版得到了山东科技大学杰出青年科学基金项目(2012KYJQ102)和山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2012KYTD104)的资助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中不足之处,恳请读者给予批评指正。

作 者

2014年8月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状与进展	3
1.2.1 深部软岩巷道支护理论研究现状与进展	3
1.2.2 深部软岩巷道支护技术研究现状与进展	7
1.3 现有研究存在的主要问题	10
1.4 本书主要内容	11
2 深部软岩巷道围岩变形破坏特征分析	14
2.1 工程概况	14
2.1.1 矿井概况	14
2.1.2 巷道概况	16
2.2 深部软岩巷道围岩的变形破坏现象	20
2.3 深部软岩巷道围岩的变形破坏特征	23
2.3.1 软岩的工程力学特性	23
2.3.2 深部软岩巷道的工程特点	24
2.3.3 深部软岩巷道围岩的变形特点	25
3 深部软岩巷道地应力实测分析	27
3.1 地应力实测概述	27
3.2 地应力实测方法	28
3.2.1 地应力实测方法选择	28
3.2.2 地应力实测原理	29
3.2.3 应力解除法实测过程	30
3.2.4 地应力大小和方向确定	31
3.2.5 环氧树脂三轴应变计测量	33

3.3	地应力实测结果分析	34
3.3.1	地应力实测工作概况	34
3.3.2	地应力测点布置	34
3.3.3	地应力实测结果	35
3.4	地应力实测结论与建议	38
4	深部软岩巷道围岩岩性与破坏机理分析	40
4.1	深部软岩巷道围岩岩性物相分析	40
4.1.1	D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪	40
4.1.2	巷道围岩岩性物相分析结果	42
4.1.3	巷道围岩特性分析	47
4.1.4	巷道围岩岩性物相分析建议	47
4.2	深部软岩巷道围岩破坏机理分析	48
5	深部软岩巷道围岩松动圈实测分析	51
5.1	巷道围岩松动圈的定义	51
5.2	巷道围岩松动圈的常用实测方法	51
5.3	地质雷达探测巷道围岩松动圈的可行性分析	54
5.4	地质雷达仪器组成	54
5.5	地质雷达探测原理	55
5.6	地质雷达探测方法	57
5.7	测点布置与实测过程	58
5.8	巷道围岩松动圈实测结果分析	59
5.8.1	-700m 水平中央水泵房围岩松动圈探测结果分析	59
5.8.2	-700m 水平中央变电所围岩松动圈探测结果分析	61
5.8.3	-700m 水平回风石门围岩松动圈探测结果分析	62
5.8.4	-700m 水平轨道石门围岩松动圈探测结果分析	64
5.8.5	-700m 水平皮带石门围岩松动圈探测结果分析	65
5.9	深部软岩巷道围岩松动圈实测结论	67

6	深部软岩巷道围岩稳定性控制技术 ·····	68
6.1	深部软岩巷道围岩支护特点·····	69
6.2	深部软岩巷道围岩支护原则·····	70
6.3	深部软岩巷道围岩主要支护技术·····	72
6.4	深部软岩巷道围岩加固技术方案·····	74
6.4.1	-700m 水平中央水泵房围岩加固技术方案·····	74
6.4.2	-700m 水平中央变电所围岩加固技术方案·····	78
6.4.3	-700m 水平回风石门、轨道石门和皮带石门围岩加固技术方案·····	80
6.4.4	-700m 水平回风石门与皮带石门立交重叠段加固技术方案·····	85
6.5	深部新掘巷道围岩支护技术方案·····	90
6.5.1	新掘巷道的初次支护·····	91
6.5.2	新掘巷道的二次支护·····	92
6.5.3	新掘巷道的底板加固·····	94
6.5.4	新掘巷道支护的施工要求·····	95
7	深部软岩巷道稳定性控制数值分析 ·····	97
7.1	数值分析软件简介·····	97
7.2	数值分析过程·····	99
7.3	数值分析模型的建立·····	100
7.4	数值计算结果分析·····	102
7.4.1	-700m 水平中央变电所稳定性控制数值计算结果分析·····	102
7.4.2	-700m 水平皮带石门稳定性控制数值计算结果分析·····	112
7.5	深部软岩巷道稳定性控制数值分析结论·····	124
8	深部软岩巷道围岩稳定性控制效果分析 ·····	126
8.1	监测目的与监测内容·····	126
8.2	测点布置与监测方法·····	127

VIII 目 录

8.2.1	巷道围岩表面收敛变形监测	127
8.2.2	锚杆和锚索的受力监测	128
8.2.3	巷道顶板离层监测	128
8.3	-700m 水平中央变电所稳定性控制效果监测分析	129
8.3.1	巷道围岩表面收敛变形监测分析	129
8.3.2	锚杆和锚索的受力监测分析	132
8.3.3	巷道顶板离层监测分析	133
8.4	-700m 水平其他软岩巷道稳定性控制效果分析	135
参考文献		139

1 绪 论

1.1 研究背景

随着煤炭工业的发展, 矿井开采正经历着一个由浅到深、由简单到复杂的过程。我国埋深超过 1000m 的煤炭储量约为 29500 亿吨, 占煤炭资源总量的 53%^[1]。随着开采能力和机械化程度的不断提高, 煤炭矿井正以每年 15 ~ 25m 的速度向深部延深, 深部矿井逐渐增多, 深部开采也已成为煤炭工业发展的必然趋势^[2]。预计在未来 20 年, 很多煤矿将进入 1000 ~ 1500m 的开采深度^[3]。

目前, 我国采深超过 1000m 的煤矿已有几十处, 最深的达到 1200m 以上^[4-6]。例如, 沈阳矿业集团的彩屯煤矿采深达 1200m, 新汶矿业集团的孙村煤矿采深达 1055m, 北票矿业集团的冠山煤矿采深达 1059m, 徐州矿业集团的张小楼煤矿采深达 1100m, 北京矿业集团的门头沟煤矿采深达 1008m, 开滦矿业集团的赵各庄煤矿采深达 1159m。其他如唐山煤矿、马家沟煤矿、林西煤矿、台吉煤矿、华丰煤矿、王家营煤矿、唐口煤矿、安居煤矿等矿井的开采深度均达到了 1000m^[7-9]。

在国外主要采煤国家中, 原联邦德国和前苏联较早进入深部开采^[10,11]。早在 19 世纪 60 年代初, 埃森北部煤田中的巴尔巴拉煤矿的开采深度就已经超过了 1000m, 采深达 1200m。1960 年至 1990 年间, 联邦德国煤矿的平均开采深度从 730m 增大到 900m 以上, 最大开采深度从 1200m 增大到 1500m, 并且分别以每年约 10m 的速度递增, 目前最大采深已达 1713m。前苏联在解体前的 20 年中, 煤矿的开采深度以每年 10 ~ 12m 的速度递增。在俄罗斯, 仅顿巴斯矿区就有 30 多个矿井的开采深度达到 1200 ~ 1350m。英国煤矿的平均采深为 700m, 最深的达到 1100m; 波兰煤矿的平均采深为 690m, 最深的达到 1300m; 日本煤矿的开采深度也已达到了 1125m^[12-14]。

随着矿井开采逐渐向深部扩展,巷道断面逐渐增大,原岩应力与构造应力不断升高,相应的采掘工程围岩应力更为突出,在浅部呈现中硬岩变形破坏特征的工程岩体,进入深部后转化为高应力软岩,表现出大变形、高应力和难支护的软岩特征。深部巷道高地压现象极为突出,矿井深部巷道地质条件复杂,围岩应力分布与矿压显现异常,致使巷道不仅在采掘影响期间围岩急剧变形,而且在应力分布趋于稳定后仍保持快速流变,顶板下沉和两帮移近明显,底臃严重,失修和严重失修的巷道增多,巷道维护十分困难,维护费用增高,且常常出现前掘后修、重复返修的现象^[15,16]。

对于深部复杂条件下的软岩巷道,原来适用于浅部硬岩巷道的支护技术表现出明显的不适应,巷道在服务期间屡遭破坏,需要多次翻修,每米巷道每年的修复费用需要 2000 元左右,我国深部高应力软岩巷道长达 180 万米,深部高应力软岩巷道每年的修复费用高达 36 亿元,严重影响了矿井的正常生产和企业的经济发展,是制约煤炭工业进一步发展的技术关键^[17-20]。尤其对于开拓巷道来说,因其需要 50~80 年的服务期限,所消耗的修复费用就更为惊人。

深部复杂软岩巷道围岩的稳定性控制已成为当今地下工程中最为复杂的难题之一,严重制约着深部矿井开采的高产、高效、低耗及安全生产水平,阻碍着深部开采的健康可持续发展,威胁着深部矿井企业的生存^[21]。

复杂条件下深部软岩巷道的稳定性控制不仅是目前一些深部矿井面临的问题,从长远来看,它也是今后进一步开发利用深部矿产资源具有战略意义的问题。因此,必须加强对深部软岩巷道原岩应力状态、围岩岩性特征和变形破坏规律的研究,认清围岩应力作用与围岩变形破坏的关系,探明深部软岩巷道围岩破坏机理与变形破坏的规律,从而为选择合理的加固支护方式、优化加固支护参数、确定合理的加固支护工艺提供依据,以形成适应深部复杂软岩巷道的围岩稳定性控制理论和方法,从而达到降低巷道支护与维护费用、显著提高深部复杂软岩巷道稳定性的目的^[22-24]。

1.2 国内外研究现状与进展

1.2.1 深部软岩巷道支护理论的研究现状与进展

国外以南非为代表的深部开采研究从 20 世纪 80 年代初期开始,其他国家如俄罗斯、波兰、德国、印度和日本等都进行过广泛的深部开采的研究。大量的工程实践和理论研究使软岩巷道支护理论有了比较系统、全面的发展,各种支护理论和技术都得到了不断的完善和推广,形成的几种具有代表性的支护理论如下^[25,26]:

(1) 古典压力理论。20 世纪初发展起来的以海姆 (A. Haim)、朗肯 (W. J. M. Rankine) 和金尼克理论为代表的古典压力理论认为:作用在支护结构上的压力是其上覆岩层的重量 γH 。其不同之处在于,海姆认为侧压力系数为 1,朗肯根据松散体理论认为侧压力系数为 $\tan^2(45^\circ - \varphi/2)$,而金尼克根据弹性理论认为侧压力系数为 $1 - \mu$,其中 μ , φ 和 γ 分别表示岩体的泊松比、内摩擦角和重度^[27]。

(2) 坍塌拱理论。随着开采深度的增加,研究发现古典压力理论在许多方面不符合实际,于是,坍塌拱理论应运而生,具有代表性的有太沙基 (K. Terzaghi) 理论和普氏理论^[28,29]。坍塌拱理论认为:坍塌拱的高度与地下工程的跨度和围岩性质有关。太沙基认为坍塌拱的形状为矩形,而普氏则认为坍塌拱形状呈抛物线形。坍塌拱理论的最大贡献在于它认为巷道围岩具有自承能力。

(3) 新奥法理论。20 世纪 60 年代,奥地利工程师 L. V. Rabcewicz 在总结前人经验的基础上,提出了一种新的隧道设计施工方法,被称为奥地利隧道施工新方法 (New Austrian Tunneling Method),简称为新奥法 (NATM)^[30-32]。

新奥法目前已成为地下工程的主要设计施工方法之一。1978 年,米勒 (L. Muller) 教授比较全面地论述了新奥法的基本指导思想和主要原则,并将其概括为 22 条。1980 年,奥地利土木工程学会地下空间分会把新奥法定义为:在岩体或土体中设置的使地下空间周围的岩体形成一个中空筒状支撑环结构为目的的设计施工方法。新奥法的核心是利用围岩的自承作用来支撑隧道围岩,促使围岩本身变为支护结

构的重要组成部分,使围岩与构筑的支护结构共同形成坚固的支撑环。新奥法自奥地利起源之后,先后在欧洲诸国,特别是在意大利、挪威、瑞典、德国、法国、英国、芬兰等大量修建山地与城市隧道的国家得以应用与发展,然后,世界各国,特别是亚洲的日本、中国、印度;北美的美国、加拿大;南美的巴西、智利;非洲的南非、莱索托以及大洋洲的澳大利亚、新西兰等国都成功地把它应用于一些不同地质情况下的隧道施工中,并且从最初的隧道施工扩展到采矿、冶金、水力电力等其他岩土工程领域^[33,34]。

虽然新奥法的应用已十分广泛,但不同的应用者对它的解释还存在着许多差异。实际工程中存在着一种倾向,就是盲目地把新奥法应用于不适宜的地质条件,从而使这些巷道工程出现这样或那样的问题。这种情况在中国也同样存在,尤其是煤矿,人们对软岩的物理含义和力学性质理解不够、对利用仪器进行巷道变形及荷载测量的重要性认识不足,不仅时常出现不合理的套用新奥法理论来解释煤矿受采动影响巷道、极软弱膨胀松散围岩巷道的支护机理,而且也出现过因应用新奥法不当而造成锚喷或锚喷网支护的巷道大面积垮落、坍塌等事故,从而导致人力、物力的巨大浪费。

(4) 应变控制理论。日本山地宏和樱井春提出了围岩支护的应变控制理论,该理论认为:隧道围岩的应变随支护结构的增加而减小,而允许应变则随着支护结构的增加而增大。因此,通过增加支护结构,能较容易地将围岩的应变控制在允许的应变范围内^[35]。支护结构的设计则是在由工程测量结果确定了对应于应变的支护工程的感应系数后确定的。

(5) 能量支护理论。20世纪70年代,萨拉蒙(M. D. Salamon)等提出了能量支护理论,该理论认为:支护结构与围岩相互作用、共同变形,在变形过程中,围岩释放一部分能量,支护结构吸收一部分能量,但总的能量没有变化。因而,主张利用支护结构的特点,使支架自动调整围岩释放的能量和支护体吸收的能量,支护结构具有自动释放多余能量的功能^[36]。

(6) 数值计算方法。目前,数值计算方法的发展日趋成熟,如有限单元法、边界元法、离散元法等,以此为理论基础的计算软件大

量涌现,如 ADINA, NOLM, FINAL, UDEC, SAP, FLAC, ANSYS, ABAQUS 等程序都为广大用户所熟知,这些软件与一些支护理论相结合,在地下工程支护中得到了广泛的应用^[37-40]。

在中国,软岩巷道支护的系统研究始于 1958 年春,北京市西部九龙山向斜北翼安家滩井田西部近向斜长轴处,木支架大巷遇到灰黑色泥岩,发生强烈底臃,后改用五节棚支护,再加底梁,均无效,巷道失稳而报废。自此上报,提出软岩支护难题。后开发辽宁的沈北矿区,在前屯矿建设时出现井口大变形,支护挤裂,无法继续掘进,停工维修,前掘后塌,停掘返修,因工程难以前进而报废,以致停工数年。此后,该矿区的蒲河矿、大桥矿、平庄矿区红庙矿也出现了重大软岩技术事故。为此,原煤炭部集中了一些科研院所、高校和设计院的技术力量,在前屯矿二号井、三号井和红庙矿进行了多种巷道支护形式的试验和测试工作,在巷道断面、支护形式及施工工艺等方面都取得了初步经验^[41-43]。

20 世纪 80 年代以来,与软岩工程相关的全国性学术会议召开了 20 余次,对地下工程软岩问题的理论研究进入了一个新的阶段。中国煤矿矿压专业委员会软岩分会召集全国的软岩科研、施工、生产各方面的专家进行交流,起到了很好的组织、交流和提高作用。特别是 20 世纪 90 年代初,中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会以及全国煤矿软岩工程技术研究推广中心的成立,更为软岩工程理论与技术的交流与推广创造了良好的条件。

目前,软岩巷道支护领域形成的具有代表性的分析理论主要包括以下几种:

(1) 岩性转化理论。中国著名的岩土工程专家陈宗基院士在 20 世纪 60 年代从大量工程实践中总结出了岩性转化理论,该理论认为:同样矿物成分、同样结构形态的岩体,在不同工程环境和工程条件下会产生不同的应力、应变,以形成不同的本构关系。坚硬的花岗岩,在高温、高压的工程条件下,产生了流变、扩容,同时还指出,岩块的各种测试结果与岩体的工程设计有明显的区别。强调岩体是非均质、非连续的介质,岩体在工程条件下形成的本构关系绝非简单的弹塑、弹黏塑变形理论特征^[44]。

(2) 轴变论理论。于学馥教授等提出的轴变论理论认为：巷道坍塌后可以自行稳定，可以用弹性理论进行分析^[45]。围岩破坏是由于应力超过岩体强度极限引起的，坍塌是改变巷道轴比、应力进行重分布的过程。应力重分布的特点是高应力下降，低应力上升，并向无拉力和均匀分布发展，直到稳定而停止。应力均匀分布的轴比是巷道最稳定的轴比，其形状为椭圆形。近年来，于学馥教授等运用系统论、热力学等理论提出开挖系统控制理论。该理论认为：开挖扰动破坏了岩体的平衡，这个不平衡系统具有自组织功能。

(3) 联合支理论。冯豫、陆家梁、郑雨天和朱效嘉教授等提出的联合支理论是在新奥法的基础上发展起来的，其观点可以概括为：对于深部复杂软岩巷道支护，一味地强调支护刚度是不行的，要先柔后刚、先抗后让、柔让适度、稳定支护。由此发展起来的支护形式有锚喷网支护技术、锚喷网架支护技术、锚带网架支护技术、锚带喷架等联合支护技术^[46]。

(4) 锚喷-弧板支理论。孙钧、郑雨天和朱效嘉教授等提出的锚喷-弧板支理论是对联合支理论的发展^[47]。该理论的要点是：对软岩总是强调让压是不行的，让压到一定程度，要坚决顶住，即采用高标号、高强度的钢筋混凝土弧板作为联合支理论先柔后刚的刚性支护形式，坚决限制和顶住围岩向中空位移。

(5) 松动圈理论。松动圈理论是由中国矿业大学的董方庭教授提出的，其主要内容是：凡是坚硬围岩的裸体巷道，其围岩松动圈都接近零，此时巷道围岩的弹塑性变形虽然存在，但并不需要支护。松动圈越大，收敛变形越大，支护难度也就越大。因此，支护的目的在于防止围岩松动圈发展过程中的有害变形^[48-52]。

(6) 主次承载区支理论。主次承载区支理论是由方祖烈教授提出的^[53]，该理论认为：巷道开挖后，将在围岩中形成拉压域，压缩域在围岩深部，体现了围岩的自承能力，是维护巷道稳定的主承载区。张拉域形成于巷道周围，通过支护加固，也会形成一定的承载力，但其与主承载区相比，只起辅助作用，故称为次承载区。主、次承载区的协调作用将决定巷道的最终稳定。支护对象为张拉域，支护结构与支护参数要根据主、次承载区相互作用过程中呈现的动态特征

来确定，支护强度原则上要求一步到位。

(7) 应力控制理论。应力控制理论也称为围岩弱化法、卸压法等。该方法起源于前苏联，其基本原理是通过一定的技术手段改变某些部分围岩的物理力学性质，改善围岩内的应力及能量分布，人为降低支承压力区围岩的承载能力，使支承压力向围岩深部转移，以此来提高巷道围岩的稳定^[54]。

(8) 软岩工程力学支理论。软岩工程力学支理论是由何满潮院士运用工程地质学和现代大变形力学相结合的方法，通过分析软岩的变形力学机制，提出的以转化复合型变形力学机制为核心的一种新的软岩巷道支理论^[55-58]。它涵盖了从软岩的定义、软岩的基本属性、软岩的连续性概化，到软岩变形力学机制的确定、软岩支护荷载的确定以及软岩非线性大变形力学设计方法等内容。

(9) 关键承载层（圈）理论。煤炭科学研究总院开采研究所的康红普教授提出了关键承载层（圈）理论^[59,60]。该理论认为，巷道的稳定性取决于承受较大切向应力的岩层或承载层（圈）。承载层（圈）的稳定与否就决定了巷道的稳定性，因此，该承载层（圈）为关键承载层（圈）。巷道支护的目的就在于维护关键承载层（圈）的稳定，只要关键承载层（圈）不发生破坏，保持稳定，则承载层（圈）以内的岩层将保持稳定。基于该理论，关键承载层（圈）具有以下性质：1) 承载层（圈）厚度越大，分布越均匀，承载能力越大；2) 承载层（圈）内应力分布越均匀，承载能力越大；3) 在未支护前，关键承载层（圈）离巷道周边越近，巷道越容易维护。

1.2.2 深部软岩巷道支护技术研究现状与进展

对于深部软岩巷道的支护，英国、德国、法国、俄罗斯和波兰等国家直到 20 世纪 80 年代仍以金属支架为主，金属支架以其良好的支护效果，在浅部开采中得到了发展。随着采深的增大和赋存条件的复杂化，深部软岩巷道采用传统支护已不能控制其稳定性，需不断进行翻修处理，甚至报废，金属支架支护已不再适应煤矿深部开采的需要，后来，引进了美国、澳大利亚的锚杆支护技术。目前，西欧大多数国家各种不同类型的锚杆、组合锚杆、锚杆桁架及锚索支护约占支