

深部巷道 钢管混凝土支架锚索 协同支护控制研究

魏建军 著

Shenbu Hangdao

Gangguan Hunningtu Zhijia Maosuo

Xietong Zhihu Kongzhi Yanjiu

中国矿业大学出版社

深部巷道钢管混凝土支架锚索
协同支护控制研究

Surrounding Rock Stabilization Control
of Intensive and Coordinative Support in
Deep Roadways

魏建军 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

深部煤矿高应力巷道的支护问题至今尚没有完全解决,特别是高应力破碎围岩巷道的支护问题日益突出,围岩控制困难,严重影响安全生产和施工成本。钢管混凝土支架与预应力锚索协同支护是一种新型的巷道支护技术,具有承载力高、施工方便的优点,有着良好的应用前景。

本书对钢管混凝土支架预应力锚索协同支护技术进行了系列研究。采用数值模拟、理论分析、实验室模拟试验和工业试验等手段,建立了支架锚索协同承载的力学模型,提出了支架锚索稳定支护的原则,研究了钢管混凝土支架的承载性能、支架承载敏感参数及其影响规律,为钢管混凝土支架的工程设计提供参考。钢管混凝土支架预应力锚索协同支护为深部高应力软岩及动压巷道支护提供了新的技术手段。

图书在版编目(CIP)数据

深部巷道钢管混凝土支架锚索协同支护控制研究 /
魏建军著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.1

ISBN 978-7-5646-2775-1

I. ①深… II. ①魏… III. ①钢管混凝土—巷道支护—研究 IV. ①TD353

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第180774号

书 名 深部巷道钢管混凝土支架锚索协同支护控制研究
著 者 魏建军
责任编辑 吴学兵
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail:cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 850×1168 1/32 印张 7.75 字数 201千字
版次印次 2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷
定 价 30.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

深部煤矿高应力巷道的支护问题至今尚没有完全解决,特别是高应力破碎围岩巷道的支护问题日益突出,围岩控制困难,严重影响安全生产和施工成本。钢管混凝土支架与预应力锚索协同支护是一种新型的巷道支护技术,具有承载力高、施工方便的优点,有着良好的应用前景。

钢管混凝土是一种组合结构,在钢管内填充混凝土,同时克服了钢管易失稳破坏、混凝土易脆性破坏这两个致命的弱点,因而既有钢材的高强和延性,又具有混凝土抗压强度高和造价低的特点,目前在地面建筑中应用广泛。将加工好的空钢管支架段运到井下拼装成拱架,再向拱架内泵送混凝土形成钢管混凝土拱架,具有承载力高、施工简便的优点,特别适合深部软岩及动压巷道的支护。预应力锚索能够充分发挥深部围岩的承载性能,提供主动支护阻力,且具有一定的让压能力,是我国深部煤炭巷道支护的首选,在工程中应用广泛。

本书对钢管混凝土支架预应力锚索协同支护技术进行了系列研究,采用数值模拟、理论分析、实验室模拟试验和工业试验等手段,建立了支架锚索协同承载的力学模型,提出了支架锚索稳定支护的原则,研究了钢管混凝土支架的承载性能、支架承载敏感参数及其影响规律,为钢管混凝土支架的工程设计提供参考。钢管混凝土支架预应力锚索协同支护为深部高应力软岩及动压巷道支护提供了新的技术手段。

本书的研究工作是在中国矿业大学深部岩土重点实验室蒋斌

松教授的指导下完成的；研究过程中还得到了中国矿业大学（北京）的高延法教授和河海大学土木交通学院沈德建博士的帮助，在此表示衷心的感谢！此外感谢宗义江、宋生志等同事的热心帮助！

本书的研究工作得到了“国家自然科学基金(51174196)”、“江苏高校科研成果产业化推进项目(JHB2011-66, JHB2012-69)”和“江苏省建筑安全与减灾工程技术研发中心自主研究项目(SAQZX2011-6)”等项目的资助，特此致谢！

钢管混凝土支架预应力锚索协同支护技术是处于发展中的新型支护技术，要将其应用于实际工程中，还有待于进一步的完善和发展。由于作者水平有限，本书不可避免存在许多不足之处，敬请读者批评指正。

作者

2015年12月

变量注释表

γ	容重
E	弹性模量
σ_c	岩石抗压强度
σ_t	岩石抗拉强度
μ	泊松比
c	岩石黏聚力
φ	岩石摩擦角
σ_v	垂直应力
σ_H	水平应力
σ_c	峰值强度
ϵ_c	极限应变
σ_r	残余强度
ϵ_r	极限滑移应变
σ_s	屈服应力
ϵ_s	屈服应变
ω	应力应变关系比例参量
ϵ_v	体积应变
η	黏性系数
S_c	瞬时抗压强度
E_0	瞬时弹性模量
n	流变指数
r	半径

W_z	抗弯模量
K_c	锚索的刚度系数
α	含钢率
ξ	套箍系数
ξ_0	设计套箍系数
ξ_D	套箍度
λ	支架腿柱长细比
A_s	钢材截面积
A_c	核心混凝土截面积
f_y	钢材强度
f_c	混凝土抗压强度
f_{sc}	钢管混凝土组合强度
E_{sc}	钢管混凝土组合弹性模量
β	偏载指标
β_s	软化区剪胀参数
k	弹模劣化系数
Q	岩体强度的软化模量
S	半拱轴线长度
L_e	等效计算长度
μ	考虑拱端约束条件的等效计算长度的取值系数
C_p	预留变形量
K_p	预留变形系数
σ_i	支护反力
σ_0	设计支护反力

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 需要进一步研究的问题	17
1.4 研究内容与技术路线	18
2 深部巷道围岩变形破坏规律与稳定机理研究	20
2.1 八采区轨道下山工程概况	20
2.2 深部巷道围岩变形特征	24
2.3 深部高应力围岩基本力学性质与流变特性	26
2.4 深部巷道流变围岩支护变形破坏机理	68
2.5 深部巷道强力支护策略	79
2.6 本章小节	80
3 深部巷道协同支理论	83
3.1 协同支护的基本思想	83
3.2 支架—锚索协同支护结构的力学分析	88
3.3 主次承载区支护协同作用的力学分析	112
3.4 本章小节	123
4 钢管混凝土支架—锚索协同承载性能试验研究	126
4.1 强力护表支架选型	127

4.2	试验概况	130
4.3	试验装置与试验方法	134
4.4	试验过程与破坏形式	138
4.5	试验结果与分析	142
4.6	本章小节	169
5	钢管混凝土支架—锚索协同控制围岩研究	171
5.1	钢管混凝土支架承载机理	171
5.2	参数分析	182
5.3	钢管混凝土支架—锚索协同控制围岩机理	192
5.4	钢管混凝土支架—锚索协同支护设计建议	197
5.5	本章小节	198
6	钢管混凝土支架—锚索协同支护设计与工程实践	201
6.1	锚索协同下钢管混凝土支架设计方法	201
6.2	钱家营煤矿八采区轨道下山破坏情况	204
6.3	支护方案设计	209
6.4	支护效果分析	217
6.5	本章小节	219
7	结论与展望	221
7.1	主要成果	221
7.2	研究展望	227
	参考文献	229

1 绪 论

1.1 研究背景

随着我国经济的快速增长,对地下各种资源的需求也日益增长,浅部资源逐渐减少和枯竭,地下开采陆续转入深部。和其他发达工业国家一样,向深部资源进军已经成为一种必然趋势,国内很多大型矿区的开采或开拓延伸的深度目前已经超过 800 m,有的甚至达千米以上,如红透山铜矿采深已达 900~1 100 m,夹皮沟金矿二道沟坑口矿体延深至 1 050 m,沈阳采屯矿采深为 1 197 m,长广煤矿为 1 000 m,新汶孙村矿为 1 055 m,辽宁北票冠山矿为 1 059 m,徐州张小楼矿为 1 100 m,开滦赵各庄矿为 1 159 m 等。目前,煤矿的采深正以每年 8~12 m 的速度向下延深,东部矿井正以每年 10~25 m 的速度发展,照目前的发展速度,预计未来 20 年内将会有很多的矿井采深超过千米级大关^[1]。

由于地应力升高,导致深部围岩在强度和变形性质上与浅部显著不同。浅部围岩大多处于弹性状态,进入深部以后,由于围岩内赋存的高地应力与其本身低强度之间的突出矛盾,巷道开挖后二次应力场引起的高度应力集中导致近表围岩受到的压剪应力超过岩体强度,围岩很快由表及里进入破裂碎胀和塑性扩容状态,极易出现大变形而整体失稳。

随着煤矿开采深度的增加,深部巷道围岩所处地质环境越发的复杂,自重应力增大、构造应力影响显著,高温高渗流等复杂环

境给巷道稳定支护带来了巨大的困难^[2]。对全国煤矿调查的文献显示,随着采深的增加,煤矿井下巷道的支护成本在 10 年增长了 13 倍,近 40% 的巷道工程进行过返修,这已严重影响了深部开采的生产^[3]。深部巷道由于岩石赋存条件的变化,高地应力、冲击地压等影响显著,岩石在复杂赋存条件下显现强流变、大变形等软岩特性,巷道收敛变形及底鼓严重,甚至出现大面积冒顶破坏,直接影响煤矿安全生产^[4]。

锚杆支护国内已有成套的理论及技术,由于该支护方法能提供高阻力、提高围岩强度及发挥围岩自承载性能的优势,在井巷支护中应用较为普遍。但在深部软弱、破碎围岩赋存条件下,锚杆在围岩表面难于形成稳定承载面,同时内部锚固段因围岩强烈变形而早早失效,难以发挥锚杆的支护承载能力,进而诱发巷道冒顶、垮塌等事故。

为了抑制围岩持续大变形,矿井采用多种支护方法进行联合支护,往往选择大刚度被动支护为主,如高强度金属棚架^[5]、高标号混凝土砌碛^[6,7]、高标号钢管混凝土支架^[8,9]等。其中 U 型金属支架由于具有可缩让压、提供高阻力等优点,在支护时能显著改善围岩近表的强度,提高围岩稳定性。但由于围岩赋存条件的复杂性与非均匀性和支架本身的刚度的正交异性,支架结构在承载过程中常常出现局部屈曲破坏,无法维护围岩的稳定。高标号混凝土碛体与大刚度钢管混凝土支护在工程应用中也因为与围岩刚度不耦合导致碛体压碎、材料性能得不到发挥。

因此,本书结合深部围岩所处的应力环境和变形规律,针对深井高应力破碎巷道围岩的大刚度稳定支护技术的刚度不耦合问题,采用钢管混凝土支架和预应力锚索分步联合支护措施,系统研究支护结构力学性能和结构围岩的共同作用机理,对解决破碎巷道的支护具有重要的理论意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 深部巷道围岩变形与破坏研究现状

1.2.1.1 深部岩体力学研究

深部巷道围岩显现大变形特点,谭文亮等在调查了部分煤矿深部巷道变形破坏特点后指出,采深 800 m 的巷道围岩收敛量已达到 300 m 浅埋巷道围岩收敛量的 10 倍,且其破坏率超出了 25% 之多^[10]。

南非 AngloGold 西部金矿深部开采实践表明,在深部高地应力环境下,硬岩同样会表现出持续的强流变与大变形特性,表现出明显的时间效应。深部巷道围岩流变变形十分明显,巷道围岩最大移近速度曾达到 500 mm/月^[11,12]。对于软岩巷道,姜耀东^[13]、何满潮^[4,14]、高延法^[15,16]、王连国^[17,18] 等对深井软岩体的流变特性及巷道变形特性进行了研究,取得了部分研究成果并应用于实际工程中。

岩石的弹塑性变形往往与其赋存压力相关,在低围压环境下,岩石往往表现为弹脆性,且很少伴有塑性变形或永久变形;在高围压环境下,岩石往往表现出强烈的塑形变形能力,且其变形破坏也由脆性破坏向延性破坏转变,表现出较大的塑形变形和强烈的剪胀,这已经通过大量的试验研究得到证实^[19-21]。

随着深度的增加,岩石破坏机理也随之转化,其破坏形式具有两种类型。一类是突发性的岩体破坏,具有强烈的冲击破坏,表现为岩爆和冲击地压现象;另一类是长期流变破坏,经过长期的变形过程,发生延性破坏或剪缩破坏。同时,由于高应力作用和弱结构的存在,深部巷道围岩内出现了分区破裂现象^[22,23]。

深部岩体的破坏适用非线性的岩石强度准则,在这方面国内外许多专家学者做了大量研究工作。Singh 根据大量试验数据,

在摩尔-库仑准则的基础上,提出了一个表征高地应力下完整岩石的非线性强度准则^[20],该准则未考虑岩体结构及中间主应力的影响。汪斌采用了已有的二次抛物线、双曲线、幂函数等形式的包络线研究岩石强度特征^[24]。Hoek 和 Brown 根据大量的岩石试验和现场监测,提出了一个经验强度准则^[25],该强度考虑了地应力和岩体结构对强度的影响,但未考虑中间主应力的影响。周小平等基于岩体的地质分类指数(RMR),将其与岩体的结构面作用建立联系,对 Griffith 准则进行了修正,提出了高地应力下的深部岩体破坏准则^[26]。咎月稳等通过研究,考虑中间主应力影响,提出了高应力下的非线性双剪统一强度理论和广义的非线性统一强度理论^[27]。

1.2.1.2 深部巷道围岩稳定性研究

对于深部巷道围岩稳定性的研究一直是国内外学者研究的热点,经过 30 多年的发展,深部地下工程的围岩稳定研究取得了长足的进步,出现了各具特色的研究方法和成果,并在很多工程中得到了成功应用。

深部巷道开采矿压和巷道围岩稳定控制方面联帮德国和苏联起步较早。联帮德国研究人员认为巷道的稳定性由底板的岩石力学性质控制,用底板岩性指数来评价巷道稳定性;并深入研究了巷道掘进时的变形,认为当岩石压力超过某极限值后,掘进后的巷道会产生收敛变形量,这一极限岩石压力的实用计算公式为 $\gamma H = 3.46\sqrt{\sigma}$,并进一步给出了不受采动压力影响时巷道失稳的极限深度表达式为 $H_{\max} = 138\sqrt{\sigma}$,式中的 σ 为巷道底板岩石强度^[28]。

苏联结合岩石抗压强度和埋深给出了巷道围岩稳定的评判指标为 $\gamma H/\sigma_c$,并依此将巷道分为不稳定、中等稳定和稳定三类。英国研究学者认为岩石的强度和岩体的完整性直接影响着巷道的稳定性,在分析巷道失稳的极限深度时,考虑了岩石裂隙、掘巷应力集中程度、岩石强度等因素。

国内对深部地下工程稳定性的研究起步较晚,但相对国外发展较为迅速,取得了很多积极的研究成果。付国彬等人^[29]实测了采深为 1 056 m 的开滦赵各庄矿巷道深度与围岩松动圈的关系,总结了松动圈范围岩性与采深的相关规律,给出了松动圈发展范围的计算公式为 $L_p = 1.315(p_0/\sigma_c - 0.4512)^{\frac{1}{2}}$ 。勾攀峰等^[30]等应用弹塑性力学及势能函数、突变理论等建立了巷道围岩系统尖点突变模型,从解析的手段获得了深部巷道临界深度的确定方法。柏建彪等^[31]认为深部巷道围岩稳定的关键是提高围岩强度,将围岩高应力向内部转移,并提出了相应的支护技术。吴昊等^[32]考虑深部巷道岩体的块体特性和结构面剪切滑移破坏特性,通过建立深部巷道的平面应变块系围岩模型,得到了轴对称条件下岩块相互作用的解析解,得到块系围岩径向位移、剪切滑移量的表达式。Liu 等^[33]利用试验与数值手段研究了处于高地压、高地温、高渗透压力环境下的深部巷道围岩变形破裂机理,总结了深部岩巷稳定控制的理论,并以此理论为指导提出了深部岩巷稳定控制的技术措施和支护成套技术。

围岩的稳定性问题受围岩性质和构造特征、开采深度、地质条件及构造、巷道形式、支护技术及工程管理等多种因素的影响,是多种因素综合作用的结果。

1.2.1.3 深部巷道变形破坏的弹塑性分析

深部巷道围岩普遍处于破裂状态,因此充分考虑岩石破裂后的力学特性,给出巷道围岩破裂范围的解析公式,用以指导深井巷道矿压控制实践,具有重要的理论价值和实践意义。长期以来,国内外学者对巷道围岩的弹塑性分析都是基于弹塑性力学和连续介质理论开展的。

Fenner 基于圆形巷道的围岩变形及围岩压力提出弹塑性分析方法^[34],后来 Kastner 作了重要修正^[35],基于岩体为理想弹塑性介质并服从摩尔—库仑屈服条件,推导出目前工程中广为应用

的卡斯特纳(Kastner)方程。卡斯特纳方程假定了围岩只发生塑性破坏而不发生破裂,这与实际的一些岩土类材料性状不符,围绕这一问题相继出现了一些考虑材料软化性质的计算模型。李世平等对以上的塑性分析进行一定的修正^[36];袁文伯对软化岩层巷道进行分析,提出了增强破碎岩体的残余强度是有效的^[37];Sulem考虑了硐室围岩的时间效应进行位移场分析^[38],付国彬考虑围岩的塑性软化和扩容特性,获得了破裂区半径和位移解析表达式^[39];Pan等对轴向应力和膨胀变形对岩层中洞室稳定性影响作了分析,并给出了解析表达式^[40]。Yarlong Wang对圆形洞室破裂围岩进行了分析,基于Hoek-Brown屈服条件和M-C屈服条件对围岩进行了弹塑性分析,并基于相关联和非关联流动法则的基础上对两种结果进行了比较分析,指出可以根据所得到的解析表达式估计破裂区的范围,用以指导工程实践^[41]。范文等基于统一强度准则考虑剪胀及软化得到洞室围岩弹塑性分析的统一解^[42];Sharan对峰后区弹脆性岩体作了分析,得到基于Hoek-Brown准则的解析表达式并给出了算例分析^[43]。潘岳等基于应变非线性软化的基础上对圆形硐室围岩进行了弹塑性分析并得到了其平面应变条件下硐室围岩塑性区的应力、应变表达式和塑性区半径、围岩平衡方程、地应力和硐室位移方程及围岩压力表达式^[44]。Kyung等对弹-脆-塑性岩体进行了理论分析,并分别基于摩尔库仑屈服准则和Hoek-Brown屈服准则得到了应力场及其变形场的闭合解^[45];蒋斌松等采用非关联弹塑性分析获得圆形巷道的应力与变形的封闭解^[46];张强等基于统一强度准则考虑材料劣化获得圆形巷道围岩应力场与变形场的解析解^[47],基于非线性H-B准则及非关联流动法则分析了圆形巷道围岩的变形及弹性模量劣化对变形的影响,运用FLAC进行相应的模拟分析,得出弹模劣化加剧了塑形变形,但对塑形圈大小和应力分布影响较小的结论^[48];张常光等基于统一强度理论和弹脆塑性软化模型,考虑不

同工况下主应力顺序、岩石应变软化、剪胀和渗流等综合影响,推导了圆形水工压力隧洞应力和洞壁位移解析解^[49]。

由此可见,目前对深部巷道的非线性变形研究比较活跃,新的研究成果还层出不穷,非线性破坏的理论还不成熟,还需要进一步开展破坏过程中的力学演化规律研究。

1.2.1.4 深部巷道破坏的数值模拟研究

数值模拟分析方法已经成为工程设计和问题分析的重要工具,比较常见的有:有限元法、边界元法、离散元法、有限差分法以及块体单元法等,并且这些方法已经有了成熟的商业化软件如:ANSYS、ABAQUS、SAP、ADINA、FLAC、3DEC等。

有限元可考虑地下岩体的非均质性和不连续性,应用最为广泛。徐军等基于弹塑性有限元的初应力法推导了弹塑性随机有限元增量初应力法的计算迭代格式^[50];张华山等采用黏弹塑性模型对黄土隧道围岩进行了变形破坏的分析,其结果与现场吻合较好^[51];胡文清等对木寨岭隧道软岩段施工过程进行了平面弹塑性有限元分析^[52];刘刚等用 ANSYS 软件对巷道围岩松动圈进行了数值模拟,计算了松动圈与地应力间的定量关系^[53];李德海等采用粘弹性理论计算了圆形巷道的位移场解析解,并在 ANSYS 中进行了模拟,对理论解析解和数值模拟解进行对比^[54]。

离散单元 DEM 是研究节理裂隙岩体变形与稳定性的最有效的工具。王涛等对输水地下硐室全围岩稳定采用三维离散元软件 3DEC 模拟了随机结构面^[55];刘传孝等采用三维离散单元法对孤岛煤柱区巷道围岩破碎范围的发育规律进行了理论分析^[56];王勇等对裂隙岩体渗流场与应力场耦合的离散网络模型进行分析,并用离散元数值方法结合算例分别进行了渗流场与应力场的耦合、非耦合计算^[57]。

有限差分法主要解决有限元不能求解的大变形问题,基于该方法原理提出了 FLAC 数值分析方法。李夕兵等采用 FLAC^{3D}有

限差分程序对深部开采圆形矿柱进行高应力下动力扰动数值计算^[58]；马福义利用有限差分法对巷道变形进行三维数值模拟，分析表明与实际变形监测结果一致^[59]；周辉等对脆性大理岩弹塑性耦合性质、应变硬化软化性质，提出相应的数值迭代计算方法，并用有限差分软件 FLAC^{3D} 来实现^[60]；赵瑜等运用三维有限差分程序 FLAC^{3D} 软件，采用大变形方法对深埋隧道围岩系统卸荷进行数值仿真^[61]；何满潮对高句丽将军坟变形破坏特征，应用三维有限差分程序 FLAC^{3D} 进行模拟，研究了高句丽将军坟分别在自重、局部地基软化和地下水渗流工况下的应力场变化和变形破坏规律^[62]。

尽管现在对围岩变形破坏的分析研究取得了不少的研究成果，但是由于岩体本身的复杂性，岩体力学参数不容易确定，而且在数值分析中，若想准确地模拟岩体的力学状态，则需要建立复杂的模型进行精细化分析，在这方面还需要进一步的研究。

1.2.1.5 现场测试研究

现场实测是确定巷道围岩变形与破坏的重要方法。现场实测有多种方法，比较常用的是声波法和多点位移计法。实测数据只能综合反映围岩应力与围岩强度的相互作用结果，不能建立起二者之间的确切关系。而这种关系对于指导深井巷道矿压控制的实践是必需的。

宋宏伟等提出了采用地质雷达测试松动圈的实测方法，并在煤矿综采放顶煤工作面顺槽中进行了测试实践^[63]；刘传孝等通过实践，发现探地雷达技术是现场测定巷道围岩破碎区的有效方法^[56]；谭云亮等采用地质雷达探测方法系统地研究了不同围岩结构、不同采深、不同采动影响条件下巷道围岩破坏发育的形态，并给出破坏范围预测表达式^[10]。陈旭光、李术才等采用钻孔电视对淮南丁集煤矿深部巷道围岩的破裂情况进行了钻孔监测，观察到分区破裂现象并经分析得到了其分区破裂分布状态^[64,65]；刘洋等