

Gangguan Hunningtu Zhijia

Jiegou Lixue Xingneng Shiyan Yu Gongcheng Yingyong

钢管混凝土支架 结构力学性能实验与工程应用

牛学良 王波 著

Gangguan
Hunningtu
Zhijia
Jiegou Lixue
Xingneng

Yu
Gongcheng
Yingyong

中国矿业大学出版社

Gangguan Hunningtu Zhijia

Jiegou Lixue Xingneng Shiyan Yu Gongcheng Yingyong

钢管混凝土支架 结构力学性能实验与工程应用

牛学良 王波 著



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书主要包括钢管混凝土支架国内外研究现状、U25 型钢支架结构力学性能实验、钢管混凝土支架结构力学性能实验、钢管混凝土支架结构力学性能分析、钱家营煤矿动压巷道钢管混凝土支架支护数值仿真、软岩巷道钢管混凝土支架支护现场试验。全书内容丰富,层次清晰,图文并茂,理论与实践性强。

本书可供从事采矿工程及相关专业的科研及工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

钢管混凝土支架结构力学性能实验与工程应用/牛学良,王波著. —徐州:中国矿业大学出版社,2018.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 4319 - 5

I. ①钢… II. ①牛… ②王… III. ①钢管混凝土—巷道支护—结构力学—研究 IV. ①TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 299205 号

书 名 钢管混凝土支架结构力学性能实验与工程应用

著 者 牛学良 王 波

责任编辑 王美柱

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 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 10 字数 190 千字

版次印次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着煤炭开采规模的扩大和机械化水平的提高,开采煤层的埋藏深度必然向矿井深部发展。由于开采深度的不断增加,地质环境不断恶化,地应力增大,地温升高,导致作业环境恶化、巷道维护困难、地质灾害增多等一系列问题。在深井开采条件下,采掘过程中的地质灾害事故如巷道变形、岩爆的表现形式及频度与浅部开采具有明显的区别,其原因在于岩石所处的应力环境以及由此导致的岩体力学性质的差别。在浅部表现为普通坚硬的岩石大多处于弹性应力状态,进入深部后则可能处于“潜塑性”状态,进而可能表现出大变形、大地压、难支护等软岩的特征。目前,在深井软岩巷道支护方面,形成了锚网喷、锚喷网架、预应力锚索支护、钢架支护、钢筋混凝土支护、料石砌碛支护以及注浆加固和卸压支护等系列支护技术,这些支护技术都在一定程度上抑制或延缓了巷道围岩的变形。本书在总结前人研究成果的基础上,提出了一种适用于大埋深、高应力、软岩动压以及过断层或冲刷带等新型巷道支护技术——钢管混凝土支架支护技术。钢管混凝土构件是一种实心构件,其整体稳定性和局部稳定性均优于钢管构件,钢管混凝土轴向受压后,内充混凝土由于受到钢管壁的侧向约束作用而处于三向受压状态,使其强度得以大幅度提高;另外,由于该构件是在钢管内充混凝土,避免了轴向受压时薄壁钢管的内凹屈曲破坏,使钢管混凝土构件受压时形成一种具有较高承载能力和良好经济效益的承载构件,钢管和内充混凝土互相弥补了对方的缺点,发挥了各自的优点,表现出两者力学性能上的共生现象,使材料的强度得到充分发挥。

本书在实验室进行了 U25 型钢支架、空钢管支架与钢管混凝土

支架的结构力学性能实验,得到了三种支架的整体极限承载能力,通过对比钢管混凝土支架整体极限承载能力分别为 U25 型钢支架与空钢管支架的 5.6 倍与 1.6 倍;采用极限平衡分析方法,推导出了轴心受压钢管混凝土短柱极限承载能力计算公式,其中钢管混凝土短柱的套箍系数表达了钢管对核心混凝土的套箍约束程度,是影响钢管混凝土极限承载能力的主要因素;为了提高巷道支护效果,避免钢管混凝土支架发生平面外失稳等现象,对钢管混凝土支架支护方案进行了优化;利用三维有限元数值仿真,分析了巷道开挖后围岩位移场和应力场的分布规律;通过对龙口北皂煤矿海域 H2101 工作面运输巷基于钢管混凝土支架复合支护实践表明,钢管混凝土支架复合支护方式合理,支护效果明显优于锚杆锚索支护,钢管混凝土支架能够有效控制软岩巷道围岩变形。

本书撰写过程中,笔者参阅了大量的中外文献,借此机会向所有文献作者表示诚挚的谢意。感谢山东科技大学矿业学院谭云亮教授、刘承论教授、秦忠诚教授、杨永杰教授等在本书撰写过程中提出的宝贵意见。感谢山东科技大学资源与土木工程系所有老师在室内实验过程中给予的帮助。感谢龙口北皂煤矿高明飞、高兆利在现场工程试验中给予的大力支持。感谢山东科技大学崔希海博士、范庆忠博士、付志亮博士与王素华博士等给予的指导和帮助。在此不能一一列举所有曾提供帮助与支持的同行,深表歉意!

由于笔者水平所限,书中难免有疏漏和错误之处,恳请读者给予批评指正。

著 者

2018 年 10 月

目 录

1 绪论	1
1.1 课题的提出及研究意义	1
1.2 文献综述与国内外研究现状	3
1.3 研究内容与研究方法	9
2 U25 型钢支架结构力学性能实验	11
2.1 概述	11
2.2 支架设计与制作	12
2.3 加载装置	14
2.4 加载方法	15
2.5 测试内容与测点布置	16
2.6 实验结果与分析	20
2.7 本章小结	27
3 钢管混凝土支架结构力学性能实验	28
3.1 概述	28
3.2 支架设计与制作	29
3.3 加载装置	35
3.4 加载方法	37
3.5 测试内容与测点布置	38
3.6 实验结果与分析	44
3.7 本章小结	64

4	钢管混凝土支架结构力学性能分析	66
4.1	概述.....	66
4.2	钢管混凝土轴心受压短柱力学分析.....	67
4.3	钢管混凝土支架支护力学模型.....	74
4.4	钢管混凝土支架支护应力计算.....	76
4.5	钱家营矿钢管混凝土支架支护方案优化.....	81
4.6	本章小结.....	83
5	钱家营煤矿动压巷道钢管混凝土支架支护数值仿真	85
5.1	岩土工程数值仿真概述.....	85
5.2	巷道围岩力学模型建立.....	88
5.3	钢管混凝土支架支护与模型内侧边界条件.....	92
5.4	有限元数值仿真结果分析.....	94
5.5	钱家营煤矿巷道围岩稳定性评价	102
5.6	本章小结	104
6	软岩巷道钢管混凝土支架支护现场试验	105
6.1	北皂煤矿软岩巷道支护方式与变形特征分析	105
6.2	北皂煤矿海域软岩巷道围岩力学参数与现场地应力测试	109
6.3	软岩巷道钢管混凝土支架支护方案设计	118
6.4	钢管混凝土支架复合支护方案设计	128
6.5	钢管混凝土支架复合支护体支护反力计算	131
6.6	巷道复合支护监测设计	135
6.7	本章小结	143
7	主要结论	144
7.1	主要结论	144
7.2	本书创新点	145
	参考文献	146

1 绪 论

1.1 课题的提出及研究意义

随着煤炭资源的采出,开采煤层的埋藏深度必然要增加,开采规模扩大和机械化水平提高加速了生产矿井向深部的发展。由于不同的产煤国家在煤层的赋存条件、技术装备水平和开采技术上的差异,以及在深部开采中出现问题的程度不同,国际上尚无统一和公认的根据采深刻分深井的定量标准。一些采煤国家的学者对深井的界定提出了一些不同的见解和论述。原苏联学者 A. Ф. 巴赫晋、A. E. 维杜林以及 A. C. 库兹未奇将采深超过 600 m 的矿井归为深井,而另一部分学者 B. Ф. 布拉特钦科和 Ю. К. 巴特曼诺夫把采深 800 m 作为统计深井的标准。原西德学者把采深 800~1 200 m 定为深部开采,把 1 200 m 以下称为超深开采,英国与波兰煤矿把深部开采起点定为 75 m,日本定为 600 m。我国^[2]提出按开采深度可以将矿井划分为 4 类,各类的深度范围如表 1-1 所示。

表 1-1 中国煤矿开拓系统按开采深度对矿井的分类

矿井类别	浅矿井	中深矿井	深矿井	特深矿井
采深/m	$H < 400$	$400 \leq H < 800$	$800 \leq H < 1\ 200$	$H \geq 1\ 200$

由文献[3]知,1982 年我国煤田在埋深 2 000 m 内预测的总资源量为 4 492 525 Mt,按深度分布如表 1-2 所示,可以看出,我国大部分的煤炭资源赋存在矿井深部,埋深大于 600 m 和 1 000 m 的资源量分别占 73.19%和 53.17%。

表 1-2 我国煤炭按埋藏深度预测的资源量

埋深/m	资源量/Mt	比例/%
<600	1 204 384	26.81
600~1 000	899 597	20.02
1 000~1 500	1 127 593	25.10
1 500~2 000	1 260 951	28.07

近年来,由于开采规模的不断扩大和开采作业的日趋集中化,许多国家的矿井开采深度仍在逐年增加,据统计^[4],国外矿井开采深度每年增长量为8~12 m,平均年递增10 m,国外一些主要的产业国家也已进入深部开采。开采深部最大的德国,目前平均采深已超900 m,最大采深达到1 443 m,采深超过1 000 m的工作面占20%;在俄罗斯顿巴斯150个深矿井中,有57个矿井的采深为800~1 000 m,30个矿井的采深达到1 200~1 350 m;在1 000 m以上采深的国家还有波兰、比利时等。

在我国的金属矿山中,地下矿山占总数的90%左右,其中20世纪50年代建成的矿山,有3/5左右因储量枯竭而接近尾声或已关闭,其余2/5左右的矿山则陆续进入深部开采。目前,我国已有一批金属矿山进入采深超过800~1 000 m的深部开采阶段^[5-12],其中,山东玲珑金矿采深达到800 m,安徽铜陵狮子山铜矿采深已达1 100 m,辽宁红透山铜矿第六系统投产后的开采深度将达到1 300 m,是全国金属矿山中开采深度最深的矿山。

我国是世界上第一产煤大国,并预测大部分储量埋深在1 000 m以下,浅部储量较少,随着社会的发展和资源开发的日益加强,矿井的开采深度不断加大。据统计^[13],1980年我国煤矿的平均开采深度是228 m,到1995年已达428 m,平均每年以近10 m的速度向下延深。全国主要国有矿区90多个,井工开采的生产矿井588对(1996年统计),采深超过800 m的深井19对,其中开滦矿务局赵各庄矿、沈阳矿务局彩屯矿、北票矿务局台吉矿、新汶矿业集团华丰矿等采深超过1 000 m,新汶矿区的其他矿如孙村矿、长广七矿的采深也已经超过了800 m。煤炭行业仅“八五”期间新建的矿井65个,平均深度为588 m,其中700~800 m的井筒28个,800~1 000 m的井筒13个,1 000 m以上的井筒有12个。目前,我国许多矿区的采深都已超过了600~800 m,超过1 000 m的矿井就有数十个^[14],如开滦矿业集团赵各庄煤矿十三水平开采深度达到1 155 m,新汶矿业集团华丰矿开采深度为1 070 m。

由于开采深度的不断增加,地质环境不断恶化,地应力增大,破碎岩体增多,漏水量加大,地温升高,导致作业环境恶化,巷道维护困难,地质灾害增多等一系列问题。在深井开采条件下,采掘过程中的地质灾害事故如巷道变形、岩爆的表现形式及频度与浅部开采具有明显的区别,这种区别的原因在于岩石所处的应力环境以及由此导致的岩体力学性质的差别^[15]。煤矿开采实践表明,在浅部表现为普通坚硬的岩石,在深部可能表现出软岩的特征:大变形、大地压、难支护等^[16],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“潜塑性”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,造成岩石的潜在破坏状态。

1.2 文献综述与国内外研究现状

煤炭是我国的主要能源,近 30 年来,煤炭占我国能源的 70% 以上,随着煤炭资源的连续开采,浅部煤炭资源已经越来越少,目前已转向深部煤层的开采,我国目前正以 10 m/a 的平均速度向深部发展,千米以上的立井在我国多个煤田可见,随着煤炭资源向深部开采,软岩工程、软岩巷道问题便越来越突出。据统计,我国目前煤炭开采每年开巷掘进大约 6 000 km,其中软岩巷道占 600 km,由于软岩支护问题,大约有 100 km/a 的软岩巷道需返修、维护,所以能否解决好软岩巷道的支护等问题,是我国煤炭开采向纵深发展和安全生产的关键问题,这一问题已引起国内外岩石力学界、工程地质学界等专家、学者的高度重视和极大兴趣,他们从各自的领域出发,结合当代其他学科的先进理论和技术,从理论分析到工程实践,致力于该领域的研究,并取得了丰硕的成果。

1.2.1 软岩工程力学研究

软岩工程力学是一门特殊的岩石力学,是岩石力学发展的更高形式,它是研究软岩的工程地质力学特性和软岩巷道在多种力作用下的变形、破坏全过程及其稳定性评价的一门科学。我国的软岩工程问题的出现大大地促进了软岩工程力学的发展,围绕软岩的工程力学性质,该领域的专家学者从不同的角度对软岩的水理性质、软岩的抗压、抗剪参数、膨胀力、流变性及本构关系等进行了系统的研究。彭涛研究了软岩工程的混沌力学效应(工程断面效应、工程环境效应和工程过程效应),提出了软岩工程力学的混沌控制途径^[17]。缪协兴应用湿度场理论研究了软岩的工程力学性质,并用有限变形理论分析了软岩的工程力学作用^[18]。李洪志通过大量的地质调查和力学化学实验,确定了我国膨胀性软岩的地质力学化学特征^[19]。康红普专门就软岩巷道的底鼓机制作了理论分析,认为造成软岩巷道底鼓的主要力学机制是软岩的弹塑性变形、扩容、膨胀、流变、弯曲等因素,并通过有限元分析、相似材料模拟和现场实测得到了验证^[20]。何满潮在软岩工程地质研究的基础上,系统地总结了软岩巷道变形的八种力学机制^[21-22]。林育梁评述了目前软岩工程力学的研究水平,并就软岩的力学定义、工程力学分类和变形流动形式提出了若干建议^[23]。何满潮对煤矿软岩的工程力学研究现状作了较为全面的总结^[24]。

煤矿软岩的变形破坏与时间因素密切相关,这早已被理论和工程实践所证实。郑雨天全面分析了软岩的流变特性,并就实验方法、流变模型的选择等提出了若干建设性的意见^[25]。孙钧在理论分析的基础上总结和归纳了岩石流变学

研究的内容和意义,同时提出了工程算例^[26]。康红普、何满潮对软岩流变的基本概念和基本模型作了简单介绍^[20,22]。吴立新通过煤岩流变实验,揭示了煤岩在长期荷载作用下的流变特性,并将流变成果应用于峰峰矿区的煤柱设计及地表二次开采沉陷研究中,比较符合实际情况^[27,28]。范秋雁结合“新奥法”的特点,系统地论述了岩石、围岩蠕变的全过程,并以此为基础建立了软岩流变地压的控制理论^[29]。周瑞光对某地下工程黏土岩的流变特性进行了单轴和三轴压缩实验,取得了黏土岩在长期荷载下的变形和强度参数,为支护设计提供了重要依据,同时对软岩的尺寸效应和结构效应也作了探讨^[30]。黄润秋和夏熙伦对高边坡岩体的流变特性分别从地质和工程力学的角度作了研究,得出了边坡岩体的长期变形特征^[31]。郭志、金丰年、李青麒、许宏发也分别就软岩流变过程的强度特征、软岩强度和弹模时间效应、软岩的黏弹性模型、软岩的流变参数的求取等方面进行了研究^[32-35]。

从工程实用要求来看,流变岩石力学尚处于发展阶段,理论有待于完善,解围题范围需进一步拓宽,要使理论分析成果应用于工程设计和施工还有许多工作要做。但流变特性作为软岩的固有属性,尤其是在长期荷载作用下软岩巷道的支护设计必须考虑软岩的流变特性。

1.2.2 软岩巷道支护研究

地下工程支理论的发展至今已有百余年的历史,20世纪20年代以前,主要是古典的压力理论阶段,这类理论认为,作用在支护结构上的压力是其上覆岩层的重力。20年代至60年代出现了散体理论,认为当地下工程的埋藏深度较大时,作用在支护结构上的压力不是上覆岩层的重力,而只是围岩坍塌拱内的松动岩体重力。50年代后期开始有人引用弹塑性理论来研究围岩的稳定性问题,也有人将流变理论引用到围岩稳定性分析的研究中来。60年代末出现了考虑支护与围岩共同作用的弹塑性理论解,同时也出现了考虑围岩节理、裂隙的解析解,所有这些理论为解决一般的地下工程问题提供了积极的作用。

随着施工的地质结构复杂性的增加,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施工设计方法,即新奥地利隧道施工方法(New Austrian Tunneling Method),简称新奥法(NATM)^[36-38],新奥法是日前地下工程的主要设计施工方法之一,新奥法的核心是利用围岩的自承作用来支撑隧道,使围岩本身也成为支护结构的一部分与支护共同成为支撑环。在此期间,日本人山地宏和樱井春辅对提出了围岩支护的应变控制理论^[39],他们认为,巷道围岩的应变随支护结构的增加而减小,而许用应变则随着支护结构的增加而增大,因此,通过加强支护结构可较容易地将围岩的应变控制在许用应变范围内。到了70年代,M. D. Salamou 等人又提出了能量支护理论,他们认为支护

与围岩相互作用,共同变形,在共同变形过程中围岩释放一部分能量,而支护则吸收一部分能量,但总的能量没有变化,故而主张利用支护结构来使其自动调解围岩释放的能量和支护体吸收的能量,使其相互调解达到平衡作用。

软岩工程问题研究中支理论是最活跃的方面,并取得了丰富的成果,形成了几种具有代表性的分析控制理论。

(1) 由于学馥等人提出的“轴变理论”^[40]和“开挖系统控制理论”,轴变理论认为巷道围岩破坏是由于围岩应力超过岩体强度极限所致,坍塌改变巷道轴比,导致应力重新分布,高应力下降、低应力上升,直到围岩自身平衡,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。而开挖系统控制理论^[41,42],认为是开挖扰动了岩体的应力平衡,这个不平衡系统具有自组织功能,可以自行稳定。

(2) 由董方庭、靖洪文等人提出的围岩松动圈理论^[38,43,44],它是根据围岩松动圈的大小,将围岩分为五类,并提出了各类围岩的支护方案,该观点认为:凡是裸体巷道,其围岩松动圈都接近于零,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,支护越困难,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。

(3) 由何满潮教授提出的关键部位耦合组合支理论^[45,46],将工程地质学和近代力学相结合,分析总结了软岩巷道的变形力学机制,把它归纳为物化膨胀类、应力扩容类和结构变形类三大类,每一类又分成四小类,针对不同类型的变形力学机制,分别给出了与之相适应的支护对策。其认为:巷道支护破坏大多是由于支护体与围岩体在强度、刚度和结构等方面存在不耦合造成的,要采取适当的支护转化技术,使其相耦合,复杂巷道支护分为两次支护,第一次是柔性的面支护,第二次是关键部位的点支护。

(4) 由陆家梁、冯豫、郑雨天、朱效嘉等人在总结新奥法支理论的基础上,提出了软岩联合支理论^[47,48,49],该观点认为,对于软岩支护,一时地追求加强刚度是难以奏效的,要先柔后刚,先让后抗,柔让适度,稳定支护,并由此发展起来了锚喷网、锚喷网架、锚带喷架等联合支护技术。

(5) 以郑雨天、孙均和朱效嘉等为代表的学者提出了锚喷—弧板支理论^[50,51],该理论认为:对软岩总是强调放压是不行的,放压到一定程度要坚决顶住,即联合支理论的先柔后刚的刚性支护形式(钢筋混凝土弧板),坚决限制和顶住围岩向中空位移。

(6) 陆士良、侯朝炯等提出了软岩巷道内锚外注的支护方法,即通过注浆改变围岩的松散结构,改善弱面的力学性能,提高裂隙的黏聚力和内摩擦角,增大岩体内部岩块间相对位移的阻力,从而提高围岩的整体稳定性^[50-52]。

综观软岩巷道的各种支理论,它们是从不同的方面、不同的角度阐述了锚喷支护作用机理,并在许多软岩矿井得到了具体的应用,尽管它们研究的内容各有侧重,但落实到软岩巷道支护效果上是基本一致的,即软岩巷道支护技术主要是锚喷、锚网喷、注浆加固、钢架支护、锚喷网架等系列支护技术。

1.2.3 软岩巷道稳定性控制研究

20世纪20年代前,由于当时地下工程埋藏深度不大,海姆(A. Hazm)、朗金(W. J. M. Rankin)和金尼克等提出了古典压力理论^[53],这一理论认为,作用在支护结构物上的压力是上覆岩层的重力。后来随着开挖深度的增加,越来越多地发现古典压力理论不符合工程实际情况,于是又出现了以太沙基(K. Terzahi)的地压理论和普氏的散体地压理论为代表的理论。后来发展起来的轴变论对松散理论中提出的塌落拱从理论上作了论述^[54]。进入深部工程以后,不同的岩石会表现出不同的变形破坏特征,即使是同一种岩石,在不同的应力水平下亦表现出不同的变形破坏形式^[55-58]。最明显的特征,一是原来在浅部变形较小,稳定性较高的围岩体进入深部开采以后会发生明显的软岩大变形、大地压、难支护的现象;二是随着开采深度的增加,具有突发破坏的岩爆现象明显增加,给生产和生命财产安全带来极大的威胁。随着地下工程向深部的发展,深井围岩体的变形破坏机理及稳定性的研究得到极大的关注。

80年代以来,随着煤矿开采深度加大,千米矿井不断出现,深部工程软岩问题更为突出^[59-63]。以南非为例,在南非深部金矿的开采中,由于地震等事件诱发的岩爆、岩石冒落,使南非的采矿工业成为最危险的工业之一。据南非政府所属的采矿工程师协会统计,1984年至1993年有总计6966名矿工在地下采矿事故中丧生,其中3275人是金矿矿工;1994年到1998年有139000名矿工严重受伤,其中金矿占到126130人,总计有2264名矿工死亡,金矿占到了1634人,导致金矿伤亡严重的主要原因是在2000m以下采矿未能研究和采用与高应力环境相适应的有利于控制岩爆与岩石冒落的采矿方法与工艺,致使采矿事故频繁。

原西德、原苏联、波兰、英国、比利时、荷兰和日本等国都对深部开采的巷道区域及其控制措施进行了大量研究。原西德经过几年的深部开采实践,逐步建立起集现场实测、模型实验和理论计算于一体的“岩层控制系统”,成为国外深部巷道矿压实用技术研究的代表。

原西德认为巷道的稳定性主要决定于底板岩石的力学性质,从而用底板岩性指数评价其稳定性^[64]。对于不受采动影响的巷道,原西德给出了巷道失稳极限深度经验公式:

$$H_{\max} = 138\sqrt{\sigma_c} \quad (1-1)$$

式中 H_{\max} ——巷道失稳的极限深度, m;
 σ_c ——岩石的单轴抗压强度, MPa。

原苏联的研究结果表明^[65], 工作面前方支承压力影响带内巷道的顶、底板移近量与巷道围岩强度及采深存在表 1-3 所示的关系。由此可见, 岩性不同, 采深的影响不同。在软弱岩层中, 开采深度对围岩变形的影响比对硬岩层的影响显著得多。在这里, 起内在作用的是围岩应力与围岩强度的对比关系。因此, 原苏联采用 $\gamma H/\sigma_c$ 作为指标评价深部巷道的稳定性。英国提出了巷道失稳的极限深度为^[64]:

$$H_{\max} > k_v \eta \sigma_c / (2\gamma) \quad (1-2)$$

式中 γ ——岩石重度, kN/m^3 ;
 η ——长时荷载影响系数;
 k_v ——裂隙影响系数。

表 1-3 巷道移近量与围岩强度及采深的关系

岩石强度/MPa	巷道埋深/m	移近量/mm	采深每增加 100 m 移近量增量/mm
30	400	750	212
	600	1 200	
	800	1 600	
50	400	250	115
	600	470	
	800	710	
90	400	80	35
	600	140	
	800	220	

随着开采深度的增加, 围岩的变形破坏愈趋严重, 国内外的研究结果表明^[66-71], 从 600 m 开始, 采深每增 100 mm, 顶、底板移近量增加 10%~11%。新汶矿业集团孙村矿斜井及四煤上山巷道实际观测, 从开采垂深 750 m 开始, 采深每增加 100 mm, 顶、底板移近量约增加 50 mm; 另据开滦矿业集团的统计, 随巷道埋深的增加, 底鼓巷道长度占深部巷道总长度的比例增加, 当采深由 400 m 增大到 1 000 m 时, 回采巷道底鼓比例由 32% 增加到 70%, 准备巷道由 24% 增加到 57%, 开拓巷道由 20% 增加到 42%。深井巷道底鼓已成为影响巷道稳定性和巷道翻修工作量的主要变形形式。随着开采深度的增加, 支承压力影响范

围和强度明显增大。据新汶矿业集团孙村矿观测^[67],600 m 采深时,工作面前方支承压力影响范围平均为 100 m,800 m 采深时,该范围增大到 120 m,且煤柱支承压力沿底板深度达到 300 m 左右,影响范围显著增大,应力成倍增加。

此外,在深井巷道围岩稳定性控制技术方面,针对深井巷道变形大、支护难的特点,国内外发展了深井巷道的专门支护技术^[72-77]。岩爆巷道中的支护方式有改造的普通锚喷支护、喷射钢纤维支护、柔性钢支架支护、锚喷网+柔性钢支架联合支护等形式。原苏联在岩爆巷道中采用喷射钢纤维支护研究方面取得了较好的效果,并在矿山得到推广应用。深部软岩巷道形成了一系列支护技术,如采用结构复杂的全封闭支护系统,锚杆、喷射混凝土、钢筋网、锚索等联合支护系统,特种钢和提高型钢质量,以及硬石膏、水泥砂浆、聚氨酯或其他建筑材料壁后充填等。

1.2.4 钢管混凝土结构在桥梁、建筑中的应用

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而形成的构件。按截面型式不同,分为圆钢管混凝土、方钢管混凝土和多边形钢管混凝土。钢管混凝土利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互制约,即钢管对混凝土的约束作用,使混凝土处于复杂应力状态之下,从而使混凝土强度得以提高,塑性和韧性性能大为改善。同时,由于混凝土的变形,使钢管亦处于复杂应力状态。通过二者的组合,充分发挥两种材料的优点,使钢管混凝土具有一系列优越的力学性能^[82]。钢管混凝土构件具有如下特点:① 承载力高:当钢管混凝土构件受轴心压力时,混凝土三向受压,从而使其工作性能发生了质的变化,不但提高了承载力,而且还增大了极限压缩应变,这是钢管混凝土结构区别于其他结构的根本原因,而对于薄壁钢管来说,在轴心压力作用下,其承载力是极不稳定的,远比理论计算值低,因为它对局部缺陷很敏感,在钢管中灌混凝土形成轴心受压钢管混凝土构件后,钢管保护了混凝土,使它三向受压,延缓了受压时的纵向开裂,同时混凝土却保证了薄壁钢管的局部稳定,相互弥补了彼此的弱点,也充分发挥了彼此的长处。② 塑性和韧性好:混凝土破坏常属脆性破坏,尤其对于高强度混凝土更是如此,可靠性大为降低。但核心混凝土在钢管的约束下,不但在使用阶段改善了它的弹性性质,而且在破坏时产生很大的塑性变形。试验结果表明,钢管混凝土柱破坏时可以压缩到原长的 2/3,完全没有脆性破坏的特征。此外,这种结构在承受冲击荷载和振动荷载时,也具有很大的韧性,因而抗震性能好。③ 经济效果好:钢管混凝土和钢结构柱相比,可节约钢材 50%左右,降低造价 40%左右;和钢筋混凝土柱子相比,可节省混凝土 50%左右,减轻自重 50%。

钢管混凝土结构是一种在高层建筑和大跨度桥梁中应用最有效和最经济的结构形式。钢管混凝土在桥梁建筑中的应用已有半个多世纪,国外起步虽早,但

普及程度尚不够,主要受到理论研究、制造工艺、钢材生产水平以及防锈涂装技术等诸方面的制约。我国起步虽晚,但近十年来发展异常迅猛,跨径不断突破,形式日益创新,技术大幅提高,呈现出日新月异的可喜成果。我国的拱桥发展具有独自的特色,石拱桥(板拱、肋拱、卵石拱)、混凝土、钢筋混凝土拱(块石砌筑、现浇板拱、肋拱、双曲拱、扁壳拱、箱形拱、桁架拱、刚架拱等)以致现在流行的各种类型钢管混凝土拱,其中不乏居世界先进水平与独创的型式^[83]。

早在第二次世界大战前,钢结构建筑已在美国、德国等钢生产技术发达的国家出现。目前亚洲的新加坡、日本、韩国和中国香港等国家和地区民用建筑已较普遍采用了钢结构。为了防震的需要一些地震多发地区甚至法律规定5层以上的建筑必须使用钢结构建筑。我国近几年来也建造了一批钢结构大楼,尤其是深圳地王大厦、赛格广场大厦等,采用钢管混凝土结构修建高层、超高层建筑取得了突破性进展^[86]。钢管混凝土结构不仅具有承载力高、塑性和抗震性能优越、节省材料、施工简单、综合经济效益好等优点,与传统的钢筋混凝土结构相比较其优点主要表现在:①抗压、抗弯性能好、承载力高。②抗震性能好、延性好,用于高层建筑承重柱尤为适应。③能充分发挥高强混凝土的承载力,防止脆性破坏。④构件可以工厂化生产,钢管作为劲性骨架可以承受施工时材料自重和施工荷载,加快施工进度。由于施工时钢管充任外模,可以节省支模、拆模工料。一旦形成骨架,无须管内配筋,直接灌注混凝土而形成承重结构,施工周期短,可提前投入使用,加快资金回收。⑤耐火性能优于普通钢筋混凝土,一旦发生火灾时,管内混凝土能吸收相当部分热量,从而可延长钢管的耐火极限,同时也可在钢管混凝土结构外包防火材料,增加其耐火性。⑥实用面积和有限空间可获增加。⑦由于自重相对较轻,从而节省基础及其他施工费用。

1.3 研究内容与研究方法

1.3.1 研究内容

本书采用实验研究、理论分析和数值仿真相结合的研究方法,主要进行了以下几个方面的研究:

(1) U25 型钢支架结构力学性能实验研究

通过实验测试 U25 型钢支架的承压性能,得出 U25 型钢支架的极限承载能力、极限变形量以及加载装置中约束拉杆承受的拉力与应变状况等,分析加载过程中 U25 型钢支架的应变变化规律。

(2) 钢管混凝土支架结构力学性能实验研究

实验测试尺寸参数相同的空钢管支架和钢管混凝土支架的承压性能,得出

两种支架的极限承载能力、极限变形量以及加载装置中约束拉杆承受的拉力与应变状况等,分析加载过程中空钢管支架和钢管混凝土支架的应变变化规律。

(3) 钢管混凝土支架结构力学性能分析

利用极限平衡分析方法,推导轴心受压钢管混凝土短柱极限承载能力计算公式,进而分析钢管混凝土支架的整体受力性能及强度特性。以钱家营煤矿八采区轨道下山钢管混凝土支架支护为例,计算钢管混凝土支架短柱的极限承载能力,并对该巷道支护方案进行优化。

(4) 钢管混凝土支架支护数值仿真

以钱家营煤矿八采区轨道下山钢管混凝土支架支护为例,采用 ANSYS 计算软件模拟得出不同让压方式和不同设计支护反力条件下的围岩应力场和位移场。

(5) 软岩巷道钢管混凝土支架工程应用研究

以龙口北皂煤矿海域软岩巷道为例,分析巷道变形规律,并对岩石基本力学参数、水理性质、矿物结构、流变性能和现场地应力进行测试。基于测试结果和巷道工程地质条件,对该巷道进行钢管混凝土支架支护,并对支护效果进行监测。

1.3.2 研究方法

本书通过室内实验方法测试 U25 型钢支架、空钢管支架和钢管混凝土支架的承压性能,得出三种支架的极限承载能力、极限变形量与加载过程中支架的应变变化规律;通过理论分析方法,得出轴心受压钢管混凝土短柱极限承载能力计算公式,进一步探讨钢管混凝土支架的整体受力性能及强度特性;采用数值仿真计算方法,得到钢管混凝土支架支护条件下围岩应力场和位移场的分布规律;以龙口北皂煤矿海域软岩巷道钢管混凝土支架支护为例,通过工程应用验证钢管混凝土支架的支护效果。