



TANGSHANKUANG MAOGAN ZHIHU SHEJI JI
SHUZH I MONI YANJIU

唐山矿锚杆支护设计及 数值模拟研究

杨忠东 康志强 郭立稳 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

内 容 提 要

本书针对开滦集团有限责任公司唐山矿巷道支护设计及数值模拟研究,编制了唐山矿锚杆支护设计方法,建立了采场和巷道的三维有限元模型,对地应力场和各种地应力条件下的锚杆支护方案进行了模拟计算,同时计算分析了沿空巷道在不同埋藏深度、不同地应力条件下,锚杆支护结构和锚杆支护参数对沿空巷道顶板稳定性的影响,研究了不同锚杆初始预紧力对沿空巷道顶板稳定性的影响,并介绍了本研究在唐山矿的工程应用实例。

本书主要供矿山企业的工程技术人员及管理干部使用,也可供科研院所研究人员、矿业类大学本科生及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

唐山矿锚杆支护设计及数值模拟研究/杨忠东,康志强,
郭立稳著. —北京:冶金工业出版社,2012.7

ISBN 978-7-5024-5962-8

I. ①唐… II. ①杨… ②康… ③郭… III. ①煤矿—
巷道支护—锚杆支护—设计—唐山市 ②煤矿—巷道支护—
锚杆支护—数值模拟—研究—唐山市 IV. ①TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 144630 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 李 雪 卢 敏 美术编辑 彭子赫 版式设计 葛新霞

责任校对 郑 娟 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5962-8

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012 年 7 月第 1 版, 2012 年 7 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 5.75 印张; 202 千字; 175 页

25.00 元

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

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

我国煤矿主要是井工开采，需要在井下开掘大量的巷道。据不完全统计，国有大中型煤矿每年新掘进的巷道总长度在 8500km 左右，其 80% 以上是开掘在煤层中的巷道，因此保持巷道围岩的稳定对煤矿安全生产具有重要意义。

开滦集团有限责任公司唐山矿自 20 世纪 70 年代末 80 年代初开始推广煤巷锚杆支护技术至今，已有 30 多年的历史。现在，锚杆支护已成为采准巷道的主要支护形式之一。近几年，全公司每年的煤巷锚杆支护量占全部掘进巷道的半数以上。当前，唐山矿采准巷道锚杆支护已进入发展的关键阶段，虽然从总量上看，数量不小，但发展不平衡。随着采深的不断加大，矿压显现更为强烈，已经推广使用多年的锚杆支护系统表现出了种种不适应的情况，比如巷道变形量大，需要套修，锚杆、锚索拉断现象时有发生，锚杆支护的巷道稳定性和安全性受到挑战。为了解决这些问题，需要我们更新观念，与时俱进，学习借鉴国内外先进支护理念和技术。本书结合唐山矿实际开展工作，针对不同的巷道设计采用先进的数值模拟方法进行模拟研究，并运用到现场实际，能使唐山矿的锚杆支护健康快速地发展，促进企业的技术进步和矿井整体技术面貌和经济效益的提高。

全书共分 4 章，第 1 章介绍了唐山矿锚杆支护设计方法研究，第 2 章介绍了唐山矿回采巷道支护设计及方法研究，第 3 章介绍了回采巷道支护设计优化数值模拟研究，第 4 章介绍了唐山矿巷

道锚杆支护工程应用。

全书由康志强（河北联合大学）、杨忠东（开滦集团有限责任公司）、郭立稳（河北联合大学）、刘建庄（河北联合大学）、王国华（开滦集团有限责任公司）、耿清友（开滦集团有限责任公司）编写。在本书的编写过程中得到了开滦集团有限责任公司、河北联合大学矿业工程学院的大力资助，著者对此表示衷心的感谢。

本书在完成过程中，由于时间原因及作者水平所限，书中不妥之处，敬请同行专家和广大读者批评指正，并提出宝贵意见。

著 者
2012 年 6 月

目 录

绪论	1
1 锚杆支护设计方法研究	3
1.1 锚杆支护设计方法	3
1.1.1 锚杆支护设计工程类比法	3
1.1.2 锚杆支护设计数值模拟法	11
1.2 煤巷锚杆支护预紧力设计	13
1.2.1 问题的提出	13
1.2.2 理论研究成果和实践经验	13
1.2.3 预紧力锚杆理论	14
1.2.4 锚杆预紧力值的选择确定	15
1.2.5 提高锚杆预紧力的技术措施	16
1.3 锚杆支护参数选择确定原则	16
1.3.1 锚杆几何参数	17
1.3.2 锚杆力学参数	18
1.3.3 锚固参数的选择确定	18
1.3.4 锚杆布置参数	20
1.3.5 锚杆组合构件与网的参数	22
1.3.6 锚索参数	23
1.4 锚杆支护形式及材料	24
1.4.1 锚杆支护形式	24
1.4.2 锚杆支护材料	26

1.5 工程质量检测与矿压监测	34
1.5.1 锚杆支护工程质量检测	34
1.5.2 锚杆支护矿压监测	37
2 唐山矿回采巷道支护设计及方法研究	43
2.1 U型钢可缩性拱形支架巷道支护设计	43
2.1.1 U型钢拱形可缩性支架使用概况	43
2.1.2 T ₂ 022 工作面 10.4m ² 拱形支架支护设计	44
2.2 地应力测量与围岩强度测量	48
2.2.1 地应力测量	48
2.2.2 围岩强度测试	51
2.3 锚杆支护设计	52
2.3.1 唐山矿煤巷锚杆支护的发展历程	52
2.3.2 12 煤较薄煤层锚杆支护设计	53
2.3.3 9 煤特厚煤层锚杆支护设计	57
2.4 煤巷掘进施工组织与工程监测	62
2.4.1 施工方式	62
2.4.2 架棚巷道安全技术措施	63
2.4.3 锚杆巷道安全技术措施	64
2.4.4 锚杆支护质量及监测	66
3 回采巷道支护设计优化数值模拟研究	68
3.1 唐山矿回采巷道支护设计的进一步探讨	68
3.2 巷道支护的理论计算	69
3.2.1 煤帮破碎深度 C	69
3.2.2 巷顶板岩层潜在破坏深度 b	71
3.2.3 锚杆长度	71
3.2.4 锚杆直径和间排距	72

3.2.5 锚索支护	72
3.3 巷道锚杆支护数值模拟分析模型的建立	72
3.3.1 有限元软件的分析与选取	72
3.3.2 巷道锚杆支护数值计算模型的建立	75
3.3.3 非线性有限元分析	77
3.3.4 计算模型所用的单元类型	84
3.4 回采巷道锚杆支护结构数值模拟分析	85
3.4.1 锚杆支护巷道围岩稳定性判别准则	86
3.4.2 水平应力场条件下巷道锚杆支护地质模型参数	88
3.4.3 第二种应力条件下 300m 埋深时回采巷道围岩应力 分布规律	89
3.4.4 第一种地应力条件下回采巷道不同锚杆支护时巷道 离层分析	103
3.4.5 第二种地应力条件下回采巷道不同锚杆支护时巷道 离层分析	127
3.4.6 锚杆间距不同时回采巷道稳定性分析	142
3.5 主要结论与建议	149
4 巷道锚杆支护工程应用	152
4.1 唐山矿 12 煤平巷实体煤巷道锚杆支护	152
4.1.1 唐山矿 12 煤平巷锚杆支护存在的问题	152
4.1.2 12 煤平巷锚杆支护设计	153
4.1.3 施工工艺	157
4.1.4 锚杆支护巷道矿压监测	158
4.1.5 经济效益比较	159
4.2 唐山矿 9 煤采准巷道锚杆支护	161
4.2.1 唐山矿 9 煤工作面概述	161
4.2.2 问题的提出	162

· VI · 目 录

4.2.3 唐山矿9煤工作面支护设计	163
4.2.4 矿压观测	164
4.2.5 9煤工作面煤巷在掘进期间矿压显现规律	165
4.2.6 9煤工作面两巷在回采期间矿压显现特征	166
4.2.7 主要结论、建议	172
参考文献.....	175

绪 论

开滦集团有限责任公司唐山矿自 20 世纪 70 年代末 80 年代初开始推广煤巷锚杆支护技术至今，已有 30 多年的历史。现在，锚杆支护已成为采准巷道的主要支护形式之一。近年来，全公司每年的煤巷锚杆支护量占全部掘进巷道的半数以上。煤巷锚杆支护的推广应用，明显地改善了采准巷道的维护状况，提高了围岩的稳定性。锚杆支护对于提高巷道断面利用率，简化回采工作面端头支护工艺，降低支护成本，减轻工人劳动强度，特别是对于保证回采工作面快速推进，实现工作面高产高效，从而提高矿井经济效益都发挥了明显作用。理论研究和实践经验均证明，锚杆支护作为巷道的先进支护方式，有着架棚不可比拟的诸多优越性，对于从根本上解决深井、大地压巷道的支护问题，锚杆支护更是代表了巷道支护技术的发展方向。世界各国和国内各大型煤矿都把锚杆支护作为巷道的主要支护形式，许多矿区的锚杆支护率都达到了 100%，取得了巨大的经济效益。

开滦集团唐山矿业分公司在采准巷道锚杆支护工作推广过程中，在面临各种复杂、困难地质条件和井深、矿压显现大等不利情况下，勇于实践和创新，取得了大批科研成果，积累了丰富的经验。使得这项技术的推广不断向深度和广度发展。同任何新生事物的发展都要经过艰难、曲折一样，锚杆支护在其发展过程中也不是一帆风顺的，特别是当锚杆支护巷道出现一些冒顶、垮落乃至伤人事故时，往往会出现一些对锚杆支护安全可靠性的怀疑情绪，使得锚杆支护的推广受到阻碍。应当指出的是，锚杆支护作为煤矿所有新技术推广中“最具革命性”的技术进步，虽然已被无数的事实证明是先进的，是代表未来支护发展方向的，但直到现在，人们对锚杆支护的理论研究和各

种实践活动仍未停止,其原因就在于煤矿各种条件的复杂性和人们对客观世界的认识还需要进一步深化。而只有当人们的主观认识和客观条件相统一时,我们才能从必然王国走向自由王国。回顾和分析集团公司历次锚杆支护巷道事故发生的原因,按照今天我们所确立的锚杆支护技术的新理念,可以看出,绝大部分的锚杆事故都不是必然要发生的,而是带有相当偶然性。这些偶然性的事故出现,证明了我们在锚杆支护推广工作中还需要重点解决以下问题:第一,锚杆支护理念需要更新,特别是面对开滦大多属于深部开采的现状,必须用先进的支护理念来指导工程实践,才能取得预期效果;第二,要科学设计锚杆支护。这是关系到锚杆支护工程的质量优劣、是否安全可靠及经济是否合理的重要问题;第三,要规范各类锚杆产品的加工,采用先进工艺,确保锚杆及配套产品的质量;第四,要严格培训各级技术人员,特别是现场主管技术人员和管理人员,确保按设计施工,确保施工质量;第五,要建立健全锚杆巷道的质量检验标准和锚杆巷道的矿压监测体系。

当前,唐山矿采准巷道锚杆支护已进入发展的关键阶段,虽然从总量上看,数量不小,但发展不平衡。随着采深的不断加大,矿压显现更为强烈,巷道变形量大,需要套修,锚杆、锚索拉断现象时有发生,锚杆支护的巷道稳定性和安全性受到挑战。解决这些问题,需要我们更新观念,与时俱进,学习借鉴国内外先进支护理念和技术,结合唐山矿实际创造性地开展工作,扎扎实实地做好各方面的基础性工作。只有这样,才能使唐山矿的锚杆支护健康快速地发展,促进企业的技术进步,提高矿井整体技术面貌及经济效益。



锚杆支护设计方法研究

1.1 锚杆支护设计方法

巷道支护的目的就在于使巷道在服务期间保持稳定。而支护设计的目的就是在保持巷道稳定的前提下确定更经济合理的支护形式与参数。因此,锚杆支护设计是关系到锚杆支护巷道工程质量优劣、是否安全可靠及经济是否合理的基础。应当指出的是,寻求一种绝对合理能适应绝大多数巷道支护应用的锚杆支护设计方法,多年来一直是专家、学者追求的目标,但是,由于矿井条件复杂多变,不确定因素多,加之当前研究手段的制约,至今尚未有一种设计方法“放之四海而皆准”。根据不同理论所建立的锚杆支护计算和设计方法,均存在一定的局限性,因此,设计者在进行特定条件下的锚杆支护设计时,首先需要对设计对象进行深入全面的了解,然后可根据相应的设计方法进行设计。需要强调的是,锚杆支护设计应当是一个动态的设计过程,应遵循地质力学评估→初步设计→监测与信息反馈→修改完善设计的原则。通过这样一个过程,才能最终确定比较科学、合理的锚杆支护设计。

目前,国内外锚杆支护设计方法主要归纳为三大类(也有分为四大类),即:工程类比法、理论计算法、数值模拟法(监测法)。本章主要介绍工程类比法和数值模拟法。

1.1.1 锚杆支护设计工程类比法

1.1.1.1 直接类比法

工程类比法在煤巷锚杆支护设计中应用比较广泛。这种方法是根

据已开掘的成功应用锚杆支护巷道的地质与生产条件与待开掘的巷道条件进行对比,在各种条件基本相同的情况下,参照已掘巷道的支护形式与参数,来设计待掘巷道的各种支护参数。

采用工程类比法进行锚杆支护设计时,要求相比的两条巷道的条件要基本相似,不能有较大的差异。比较的内容要全面、细致、可靠,不仅要抓住主要因素,而且不能忽略细节,工程类比的内容主要有以下几个方面:

(1) 围岩物理力学性质。围岩物理力学性质包括巷道顶底板、煤层赋存状态、物理力学参数。巷道顶底板应取巷道宽度 1~1.5 倍范围岩层进行比较。物理性质包括岩性、矿物成分、密度、孔隙率、水理性质等内容。力学性质包括抗压强度、抗拉强度、弹性模量等,其中,岩层的单轴抗压强度是最常用的力学指标。

(2) 围岩结构特征。围岩结构特征指煤岩体内节理、层理、裂隙等不连续面的空间结构特征。

(3) 地质构造。地质构造对煤岩体的完整性和稳定性有明显的影响,对巷道支护形式与参数的选取起关键性作用。

(4) 地应力。地应力大小与方向是影响巷道变形与破坏的重要因素之一,地应力一般分为垂直应力和水平应力。地应力对比参数一般应包括垂直主应力的大小和方向,最大水平主应力的大小和方向,最小水平主应力的大小和方向,以及最大水平主应力与巷道轴线的夹角。

(5) 巷道特征与使用条件。巷道特征与使用条件包括巷道断面形状、尺寸等。

(6) 开采深度。随着开采深度的增加,地应力在增加,采深是巷道支护必须考虑的重要因素。

(7) 煤柱尺寸。煤柱尺寸的大小对矿压显现的大小及巷道维护的难易有着重要影响。

(8) 采动影响特征。采动影响状况包括:采动空间关系、采动时间关系、采动次数等。采动对采准巷道围岩变形与破坏影响很大,

类比时应作为一个重要考虑因素。

1.1.1.2 经验公式

经验公式是在大量支护设计经验的基础上，得出的指导支护设计，计算锚杆相关参数的简单公式。采用经验公式来选择和确定锚杆相关参数，在目前的锚杆支护设计中应用相当普遍。这种方法简便易行，但也存在着明显的缺陷和弊端：一是经验公式只能提供锚杆支护的主要参数（锚杆长度、直径、间排距等），而其他重要参数，如锚杆杆体结构、预紧力、锚固长度、托板结构与尺寸等，很难在经验公式中全面反映；二是经验公式一般只考虑巷道宽度、高度、岩石软硬程度、结构面分布，而影响巷道变形和破坏的因素还有很多，经验公式都不能全面、客观地反映。因此，经验公式提供的支护参数一般只能作为参考，不能不顾巷道的具体条件生搬硬套。在此介绍一些应用较多、效果较好的经验公式，供设计者参考。

A 锚杆长度的选取与计算

(1) Hoek 与 Brown 等提出确定锚杆长度的一般经验准则：

最小锚杆长度 = 锚杆间距的两倍、三倍不连续面平均间距所确定的不稳定岩块宽度或巷道跨度之半。

(2) Lang 与 Bischoog 认为：锚杆长度与锚杆间排距之比应为 1.2 ~ 1.5，锚杆长度 L 与巷道宽度 B 的函数关系为： $L = B^{2/3}$ 。

(3) Schach 等人提出确定锚杆长度的经验公式为：

$$L = 1.4 + 0.184B \text{ (非预应力锚杆)}$$

$$L = 1.6 + (1 + 0.012B^2)^{1/2} \text{ (预应力锚杆)}$$

式中 L ——锚杆长度，m；

B ——巷道宽度，m。

(4) 日本的经验认为：锚杆长度与巷道宽度或高度的 0.6 倍，如果再加长锚杆，支护效果将不会明显变化。

(5) 我国学者提出锚杆长度的经验公式：

对于岩巷锚喷支护巷道： $L = N(1.3 + W/10)$

对于煤巷： $L = N(1.5 + W/10)$

式中 W ——巷道或硐室跨度，m；

L ——锚杆总长度，m；

N ——围岩影响系数（按表 1-1 选取）。

表 1-1 围岩类别影响系数取值

围岩类别	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V
围岩影响系数 N	0.9	1.0	1.1	1.2

(6) 其他经验公式：

顶板锚杆长度： $L = 2 + 0.15B/K$

帮锚杆长度： $L = 2 + 0.15H/K$

式中 B ——巷道宽度，m；

H ——巷道高度，m；

K ——由围岩性质等有关的系数，一般取 3~5。

B 锚杆间排距选取与计算

(1) Hoek 与 Brown 等人提出：

最大锚杆间距 = 锚杆长度之半、1.5 倍不连续间距确定的不稳定岩块宽度

(2) Lang 与 Bischoff 认为：锚杆间排距与锚杆长度之比为 2/3 ~ 5/6 比较合理。

(3) Schach 等从拱形巷道顶部能够形成有效的压力拱出发认为：锚杆长度与锚杆间距的比值应接近 2。

(4) 新奥法对锚杆间距提出的准则:

硬岩, 锚杆间距取 $1.5 \sim 2.0\text{m}$;

中硬岩石, 锚杆间距取 1.5m ;

松软破碎岩体, 锚杆间距取 $0.8 \sim 1.0\text{m}$ 。

(5) 我国学者提出锚杆间距经验公式为:

对于岩巷锚喷支护: 锚杆间距 $M \leq 0.4L$;

对于煤巷锚杆支护: 锚杆间距 $M \leq 0.9/N$ 。

1.1.1.3 以围岩稳定性分类为基础的锚杆支护设计

A 煤层回采巷道围岩稳定性分类

经过多年的应用和不断完善, 我国已经形成了包括缓倾斜、倾斜、急倾斜煤层及不同煤层厚度的所有回采巷道的分类方法。煤巷围岩稳定性分为五个类别: I 类非常稳定, II 类稳定, III 类中等稳定, IV 类不稳定, V 类及极不稳定。在围岩稳定性分类的基础上, 结合已有的支护设计和实践经验, 提出了巷道锚杆支护基本形式和主要参数选择的建议, 见表 1-2。

B 煤巷围岩稳定性分类计算机程序简介

煤巷围岩稳定性可采用计算机程序进行分类。

a 程序功能

该程序适应于缓倾斜、倾斜、急倾斜、厚煤层第一分层、中厚煤层、薄煤层回采巷道(工作面上、下顺槽)煤层上(下)山与煤层大巷围岩稳定性分类。

b 基本原理

程序的数学模型为模糊综合评判模型。根据全国缓倾斜、倾斜煤层回采巷道围岩稳定性分类的研究成果, 评语集合为非常稳定、稳定、中等稳定、不稳定、极不稳定 5 个类别。

表 1-2 巷道顶板锚杆支护形式与主要支护参数选择

巷道类别	巷道围岩稳定状况	基本支护形式	主要支护参数
I	非常稳定	整体砂岩、石灰岩类岩层：不支护	端锚：杆体直径： $\geq 16\text{mm}$ 锚杆长度：1.4 ~ 1.8m 间排距：0.8 ~ 1.2m 设计锚固力： $\geq 64\text{kN}$
		其他岩层：单体锚杆	
II	稳定	顶板较完整：单体锚杆	端锚：杆体直径：16 ~ 18mm 锚杆长度：1.6 ~ 1.8m 间排距：0.8 ~ 1.0m 设计锚固力：64 ~ 80kN
		顶板较破碎：锚杆 + 网	
III	中等稳定	顶板较完整：锚杆 + 钢筋梁，或桁架	端锚：杆体直径：16 ~ 18mm 锚杆长度：1.8 ~ 2.2m 间排距：0.6 ~ 1.0m 设计锚固力：64 ~ 80kN 端锚或全长锚固： 杆体直径：18 ~ 22mm 锚杆长度：1.8 ~ 2.4m 间排距：0.6 ~ 1.0m
		顶板较破碎： 锚杆 + W 型钢带（或钢筋梁） + 网，或增加锚索桁架 + 网，或增加锚索	
IV	不稳定	锚杆 + W 型钢带 + 网，或增加锚索桁架 + 网，或增加锚索	全长锚固：杆体直径：18 ~ 22mm 锚杆长度：1.8 ~ 2.4m 间排距：0.6 ~ 1.0m
V	极不稳定	(1) 顶板较完整： 锚杆 + 金属可缩支架，或增加锚索 (2) 顶板较破碎： 锚杆 + 网 + 金属可缩支架，或增加锚索 (3) 底鼓严重： 锚杆 + 环形可缩支架	全长锚固：杆体直径：18 ~ 24mm 锚杆长度：2.0 ~ 2.6m 间排距：0.6 ~ 1.0m

c 运行环境

程序用 BASIC 语言编写, 凡具备汉字 BASIC 运行系统的各类微机均可运行本程序。

d 原始数据输入方式

程序采用交互式与人-机对话的方式编写, 通过屏幕汉字提示, 用键盘输入 7 个分类指标的原始数据和薄煤层影响系数 K 。 K 为煤层开采厚度与巷道高度的比值。在薄煤层条件下, K 等于实际比值; 在其他条件下, $K=1$ 。

e 输出结果

输出结果包括: 评语集 B 的模糊向量, 对评语集排序择优, 输出巷道围岩稳定性类别。

C 缓倾斜、倾斜薄及中厚煤层回采巷道基本分类指标

缓倾斜、倾斜薄及中厚煤层回采巷道基本分类指标如表 1-3 所示。

表 1-3 缓倾斜、倾斜薄及中厚煤层回采巷道基本分类指标

分类指标	说 明
顶板强度 $\sigma_{\text{et}}/\text{MPa}$ (指单向抗压强度, 下同)	取巷道宽度 1.5 倍范围内顶板强度的加权平均值
煤层强度 $\sigma_{\text{cc}}/\text{MPa}$	取巷帮煤岩层强度加权平均值
底板强度 $\sigma_{\text{ef}}/\text{MPa}$	取巷道宽度范围内底板强度的加权平均值
巷道埋深 H/m	巷道所在位置至地表的垂直距离
护巷煤柱宽度 X/m	一侧煤柱的实际宽度。其中, 沿空掘巷 (无煤柱) 时, $X=0$; 巷道两侧均为实体煤时, $X=100$
采动影响系数 N	指因工作面回采引起的超前支承压力的影响, $N = \text{直接顶厚度} / \text{采高}$ (当 $N > 4$ 时, 取 $N=4$)
围岩完整性指数 D	指围岩节理裂隙、层理的影响程度, 以直接顶初次跨落步距代替