

高等教育“十二五”规划教材

岩层控制

Strata Control

贾喜荣 编著

中国矿业大学出版社



TD 325
20121

高等教育“十二五”规划教材

岩层控制

贾喜荣 编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是关于岩层控制理论及其工程应用的教学用书,全书共分为四章。书中系统地阐述了煤层巷道锚固、长壁工作面采场矿压、采掘工程中的能量转换及其对工程稳定性的影响、煤层冲击地压等内容。书中内容反映了国际上一些岩层控制方面的研究成果和工程中采用的较成熟技术;同时反映了作者自1983年以来创立的采场薄板矿压理论、巷道顶板岩层剪胀锚固理论和煤柱临界宽度计算方面的理论研究成果,以及作者在煤柱设计计算、煤层巷道锚固强度设计计算、长壁工作面支架工作阻力设计计算、采煤工作面顶板来压强度分级方案等方面的理论研究成果、工程应用成果、工程测试成果和煤层冲击地压机理方面的分析。

本书可作为采矿工程、地下工程、地质工程专业的本科生、研究生的教学用书和教学参考书,也可作为相关工程技术人员的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩层控制/贾喜荣编著. —徐州:中国矿业大学出版社,2011.6

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1105 - 7

I. ①岩… II. ①贾… III. ①岩层控制 IV.

①TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 118449 号

书 名 岩层控制

编 著 贾喜荣

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 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 12.75 字数 318 千字

版次印次 2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

定 价 22.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

若把工程结构设计的关键归结于可靠度的确定,那么地下工程支护设计中的核心问题是支护系统须承担的载
荷量值的确定。

若把土木工程结构可靠度设计问题在理论意义上比
做西医的话,那么地下工程问题更类似于中医。

——作者

序 言

煤层地下开采中的采场岩石力学问题属岩石地下工程范畴,但由于其独特的工程特性,现已形成矿井岩石力学研究的一个专门领域——岩层控制。岩层控制这一术语的应用,要追溯到1951年在比利时列日(Liege)召开的第一届国际岩层控制会议(the First International Conference on Strata Control)。在广义上,岩层控制是指在一定开采技术条件下,为保障地下采矿工程和受其扰动的地面建筑工程的稳定与安全,所采取的一系列技术措施的统称。

岩石地下工程和土木工程同属固体力学范畴,通常情况下,土木工程中的结构受力与变形的规律,在很大程度上已经达到了科学的程度,但岩石地下工程却远非如此。岩体是天然的地质体,而非人工设计加工的工程构件或构筑物;岩石的工程强度往往表现为残余强度,且其值处在一个小于峰值和大于零的区间中。因此,围岩的载荷与位移间的关系会存在各种不同状况,而且已不再是经典力学意义上的应力—应变关系,这就为建立地下工程结构的变形与载荷间的关系带来极大的困难。

在工程设计上,地下工程与土木工程同属于工程结构可靠度设计问题,但在问题的难易程度上,两者截然不同。土木工程的可靠度设计,通常是在工程构件的物理力学性质指标、工程构件及其工程结构尺寸和工程结构载荷确定的条件下,对工程结构的可靠度进行校核,即土木工程结构可靠度设计多属定解问题;而在地下工程中,多数情况是在物性(围岩的物理性质和力学性质)、结构(围岩的承载结构)和载荷(围岩作用于加固或支护系统上的载荷)都难以确定的情况下,进行围岩的加固与支护设计,并对工程结构的可靠度作出判断,即地下工程结构可靠度设计往往属于不定解问题。

物性、结构和载荷是地下工程结构可靠度研究的三大主题。围岩的物性指标是确定工程可靠度计算参数的依据;围岩的承载结构特征是建立理论模型和理论分析的依据;围岩作用于支护系统上的载荷量值是围岩加固与支护设计的依据。三者中,最核心的问题是支护系统须承担的载荷量值的确定。

地下采矿工程中的岩石力学问题之所以受到岩石工程领域的特别关注,其一是因为岩体性态的许多有趣形式正是在地下采矿中才得以充分表现;地下采矿工程中岩体出现的极限承载、大变形甚至自由垮落的现象是其他岩石工程所无法容忍的;地下矿井常常是观测岩体不同组成部分极限性态的理想场所。其二,地下采矿工程中的岩石力学问题是最复杂的岩石工程问题。

在煤矿地下开采中,通常又把采场岩层控制称做采场矿压,并把工程中的载荷与变形(含破坏)两个固体力学基本概念俗称为矿山压力与矿山压力显现。煤层地下开采中,矿山压力与矿山压力显现是一种客观存在,但由于多属大变形问题,二者间的本构关系还很难确立,工程中往往是根据问题关注点的不同,对矿山压力或矿山压力显现问题分别进行处理。

矿山压力是指采矿时,在巷道和采煤工作面周围岩层、煤壁和煤柱内,在支承物、采空区

垮落矸石或充填体上,引起的力的统称。矿山压力的大小及分布规律,与地质条件、开采深度、巷道和回采工作面的布置,以及巷道断面和回采空间的大小、形状和支护方法等因素有关。

矿山压力显现是指由于巷道和采煤工作面周围岩层应力重新分布,所引起的岩层变形、移动和破坏,煤柱压裂、倒塌,支架下缩、破坏,以及声响等力学效应。

煤矿采场岩层控制是一个特殊的地下工程领域,其工程结构可靠度设计的基本内容,包括回采巷道围岩加固与支护设计和采煤工作面支架工作阻力设计两方面内容。其显著的两大力学特征是:

- ① 巷道的大变形特征。如回采巷道的相对变形量可能会超过其断面直径的10%,这对于其他结构工程是无法想象的。
- ② 采煤工作面顶板岩层与支架间相互作用的动态平衡过程。在顶板岩层的作用下,支架既是一种承载机构,又是一种卸载(或转载)机构,每台支架承担的数百吨载荷要在瞬间卸载至零;与此同时,支架一方面要维护控顶区内顶板岩层的稳定,另一方面还要允许控顶区之外的顶板岩层自由变形或垮落。随着工作面的推进,支架始终处于一种周期性的加载和卸载的交替作用过程中。

考虑煤矿岩层控制目前的技术水平和工程实际要求,岩层控制研究所涉及的基本问题至少应包括:

- ① 巷道煤柱合理尺寸的确定与设计计算;
- ② 巷道围岩加固方案的确定与设计计算;
- ③ 巷道底鼓的防治;
- ④ 采煤工作面支架工作阻力的确定与设计计算。

目前,岩层控制尽管早已从采矿工艺上升为工程科学,但在通常的采矿工程设计中,岩石力学基本原理的应用仍不够普及。H. D. Dahl(1978年)曾强调指出:“尽管岩层控制技术水平已经大大提高,但它并没有成为工程设计的依据,人们还在照搬设计手册上的东西。”

这种科学原理应用于矿山工程实践比较迟缓的主要原因在于:对于一个矿井的工程设计而言,岩层控制原理只能确定一个设计方案是否比另一个更好,人们很难衡量生产过程中采用岩层控制原理会对生产成本产生多大影响,也很难确定开采条件的变化究竟是设计问题还是地质条件问题,而地质条件是千变万化的;此外,岩层控制的有些概念是否正确尚有疑问,甚至还存在理论求解与工程实际相悖、真理与谬误长期并存的现象;还有,工程设计和现场应用方面的人员之间缺少相互的技术交流。

目前,通常把煤矿地下开采中的岩石力学内容划分为两大部分:一部分是重点研究开拓系统中的岩石力学问题,俗称为井巷地压问题,其特点是工程结构位于各种岩层之中,工程断面面积通常为 20 m^2 左右,而一个矿井开拓巷道的长度可能会达数千米到数十千米,要贯穿各种岩层,会遇到各种不同的工程问题,工程的服务年限可达数年到数十年。另一部分是重点研究回采系统中的岩石力学问题,即岩层控制问题。回采系统中的采区巷道和采煤工作面的显著特点是工程结构位于煤层之中,回采巷道的服务年限仅几年,巷道变形量可能会超过其断面直径的10%;回采工作面空间的服务时间可以用小时计,且要求控顶区内顶板岩层保持稳定,控顶区外的顶板岩层自由变形、垮落。由于回采系统中的工程环境和工程结构与开拓系统的不同,回采系统中涉及的岩石力学问题,远比开拓系统中复杂困难得多。

在教材编写和教学安排上,现习惯于把矿井岩石力学内容分为“岩石力学”和“岩层控制”两门课程。

岩层控制涉及的研究内容较广,除书中内容外,还应包括矿压测试技术、数值模拟技术、物理模拟技术以及不断发展的各种新技术等内容。但是,作为采矿工程和地下工程专业的教材,岩层控制的课时一般要控制到40~50课时,为此在内容筛选上,主要考虑岩层控制的基本概念、基础内容,以及国际上岩层控制教科书中较成熟的教学内容和笔者在岩层控制方面的理论研究和工程应用成果。全书在内容上分为四大部分,以便于学生对课程在整体内容上的把握。在具体内容方面,还意在培养学生在学习岩层控制课程中应用数学、力学知识的兴趣,以及分析问题和解决问题的能力。希望能在严格遵循基本力学原则的同时,注重对岩石力学原理的理解和工程应用的把握。比如,对于数学、力学公式,适当给出详细的求解步骤,便于了解公式的推导过程,以有利于重点掌握表达式中的结论及其工程价值。

本书在注重内容与结构体系的同时,还侧重于探讨解决地下采矿工程中出现的一些岩石力学问题的方法与途径。希望本书能够成为普通高等学校相关专业本科生及现场相关专业工程技术人员在岩层控制理论和工程设计方面的有益读本。

在此,对提供帮助和书中引用材料所涉及的个人和组织表示感谢,对为本书编辑出版付出辛劳的团队深表敬意和感谢。

限于水平和经验,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2011年3月于太原

目次

第一章 煤层巷道锚固	1
第一节 引言	1
第二节 煤柱	3
第三节 巷道围岩锚固理论	9
第四节 巷道围岩锚固设计计算实例	22
第五节 开采深度对巷道围岩稳定性的影响	25
第六节 锚杆	26
第七节 锚索	35
第八节 煤层巷道矿压观测	42
第九节 煤矿锚固巷道围岩分类	44
提示与练习	45
第二章 长壁工作面采场矿压	46
第一节 引言	46
第二节 采场矿压基本概念	47
第三节 顶板岩层断裂机制及其运动过程	49
第四节 采煤工作面矿压特征	55
第五节 采煤工作面顶板分类	64
第六节 采煤工作面底板力学特征及其分类	65
第七节 库兹涅佐夫铰接岩块矿压假说	69
第八节 采场薄板矿压理论	72
第九节 采场支承压力	121
第十节 采场上覆岩层的断裂与移动	143
提示与练习	154
第三章 采掘工程中的能量转换及其对工程稳定性的影响	155
第一节 能量转换的力学关系	155
第二节 能量转换对工程稳定性的影响	158
第三节 静水应力场中的球形硐室	159
提示与练习	163

第四章 煤层冲击地压.....	164
第一节 引言.....	164
第二节 煤层冲击地压危害.....	165
第三节 煤层发生冲击地压的力学系统.....	167
第四节 煤层发生冲击地压的影响因素.....	168
第五节 煤层冲击倾向性测定及其分类.....	170
第六节 煤层冲击地压现场探测.....	172
第七节 煤层冲击地压控制措施.....	174
提示与练习.....	177
附录一 缓倾斜煤层采煤工作面顶板分类.....	178
附录二 缓倾斜煤层采煤工作面底板分类.....	186

第一章 煤层巷道锚固

第一节 引言

岩石锚固工程的起源,可以追溯到距今 1 300 多年前的乾陵地宫墓道的加固工程。

乾陵建于公元 684 年,公元 706 年武则天与高宗合葬时才最后完工。这座帝王陵墓是十八座唐陵中唯一没有被盗的一座。乾陵的坚固性经受了历次地震、盗掘与时间的考验。

1957 年至 1960 年间的考古发掘显示:乾陵地宫墓道位于梁山主峰东南半山腰部位,全部在天然的斑状石灰岩岩体内开凿。乾陵地宫墓道由甬壕和石砌两部分组成,全长 63.1 m。根据当时的试掘,坑道呈斜坡形,南宽北窄,宽处达 4 m,窄处仅为 2.8 m,甬壕深 17 m。

考古勘察也证明,乾陵墓道全部用石灰岩石条填砌,层叠于墓道口直至墓门。石条由南往北顺坡层叠扣砌,共 39 层,平面裸露 410 块,39 层用石条 8 000 余块。相邻石条之间用蝶形铸铁栓板拉固,形成岩板结构;上下石条之间凿孔,并用铸铁杆贯穿,使得各层岩板形成整体的坚固结构。铸铁栓板、铸铁杆与石条之间的缝隙均用熔铅灌注。

乾陵地宫墓道封石的锚固结构如图 1-1 所示^①。

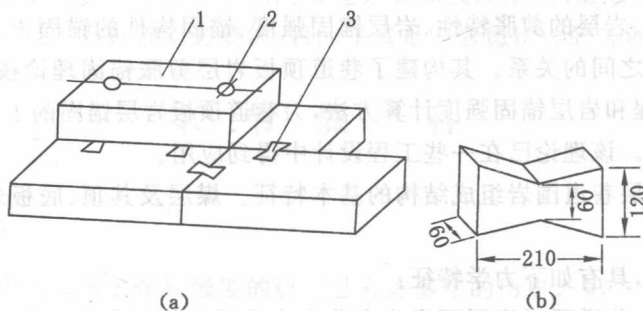


图 1-1 乾陵地宫墓道封石锚固结构示意图

(a) 墓道封石锚固结构; (b) 铸铁栓板结构

1——石灰岩石条; 2——铸铁杆; 3——铸铁栓板

石灰岩石条:平均块度为 $1.0\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.7\text{ m}$,质量约为 500 kg,精细加工,缝隙严密平直。

^① 弭庆录,等:《唐代锡铁锚杆加固原理之分析》,会议资料,1982 年。

铸铁栓板:是一种蝶形棒,其与开凿在相邻两块石条上的一对燕尾槽构成石卯铁棒结构。其质量为 10.5 kg,起每层石条间的横向锚固作用。

铸铁杆:是一种 $\phi 70$ 的铸铁锚杆,间距 0.25~2.66 m,按石条缝隙疏密而设置,起层与层间的竖向锚固作用。

锚固剂:熔铅,层厚 5~8 mm。在石条与铸铁栓板或铸铁杆间起固结、充填和消减集中应力的作用。

近代的岩石锚杆首次使用的资料已无法考证,较多的文献认为早在 1872 年始用于英国北部威尔士露天页岩矿。1943 年前,W. W. Weigel 就在工程和采矿杂志(《the Engineering and Mining Journal》)上阐述过锚杆被系统地用于基础加固的情况。1947 年,岩石锚杆技术在美国推广。1956 年,我国开始在煤矿岩巷中使用锚杆支护。

巷道围岩锚固技术是目前煤层巷道支护与加固中首选技术方案。锚杆、锚索的作用是连接岩体中的不连续结构面,提高锚固岩层的整体强度,有效地利用被加固围岩的自承载能力,以改善巷道围岩的稳定性。巷道围岩加固系统的设计,取决于岩层结构和不连续结构面特征、岩石的工程地质特征、围岩应力状态、巷道尺寸及其在整个服务期间所能承受的变形程度等。巷道围岩加固机理,包括围岩—支护相互作用这一重要原理。

尽管锚固技术在煤矿巷道支护与加固中得到广泛应用和迅速发展,并且已成为不可缺少的一种巷道支护方式;但目前锚固参数确定方法上,大多采用工程类比方法,并没有从理论上得到充分的论证。在工程实践中,支护成本、工程进度、支护效果和合理支护参数难以确定的状况始终存在。加大支护强度,势必增加支护成本、降低施工速度和工程进度。

近年来,在工程应用的同时,锚固技术的理论和工程测试研究也得到重视。煤层巷道顶板岩层剪胀锚固理论笔者在锚固参数量化设计计算方面提出的一种新的锚固理论。

剪胀锚固理论,将锚固构件(锚杆、锚索)和巷道顶板裂隙体岩层所构成的力学系统,简化为三铰拱锚固结构力学模型;根据岩层剪胀力学原理,分析研究锚固岩层的稳定性与岩层物理力学性质指标、岩层的剪胀特性、岩层锚固强度、锚固构件的锚固力、锚固岩层厚度、巷道跨度等相关因素之间的关系。其构建了巷道顶板岩层剪胀锚固理论模型,建立了相应的数学、力学关系方程和岩层锚固强度计算方法,为巷道顶板岩层锚固的工程设计提供新的锚固理论和技术支持。该理论已在一些工程设计中得到应用。

层状结构是煤层巷道围岩组成结构的基本特征。煤层及其顶、底板岩层属不同力学性质的层状介质。

对于煤层巷道,具有如下力学特征:

工程结构特征:巷道顶板岩层可视为弯曲应力作用下的组合板结构,巷道煤柱(帮)可视为垂直应力作用下的墙体结构,巷道底板岩层可视为受煤柱载荷作用的基础结构。

载荷特征:巷道顶板载荷为有限载荷,巷道煤柱(帮)载荷为覆岩荷重,巷道底板载荷为承载煤柱在半无限体中的传递载荷。

强度特征:根据巷道顶板岩层、巷道煤柱和巷道底板岩层各自不同的受力状况,应具有相应的稳定性判据。

其巷道围岩稳定的必要条件是:巷道顶板岩层、巷道煤柱和巷道底板岩层三者必须同时保持稳定,任何一方失稳,都会导致巷道围岩的整体失稳。因此在煤层巷道支护与加固设计中,要分别对三者进行稳定性评价,确定其支护与加固方案。

巷道两煤帮可视作墙体结构,其载荷可视作覆岩荷重;巷道两煤帮强度可视为柱(墙)体强度;巷道两煤帮的锚固强度和稳定性判据,可以借助于郎肯(Rankine)强度准则来确定(类同于土力学中的深基坑问题)。

对于煤层底板的稳定性,人们已认识到其重要性,并进行了许多专门的研究工作,但在研究合理的底板稳定性分析方法方面做的还很不够。底板破坏将会给作业区和设备通道畅通、生产巷道稳定性和矿井安全生产带来很多困难。因此在矿井开采设计中,了解煤层底板承载能力是十分重要的。

工程观察和试验研究结果表明,在底板岩层中含有大量黏土,特别是蒙脱石的区域,极易发生底鼓,而且岩层含水率对这类底板的承载能力有严重影响。通常底鼓有三种模式:

- ① 底板岩层从煤柱下挤出;
- ② 由于减除竖向约束,底板岩层隆起;
- ③ 煤柱或支架压入底板岩层。

作为解决底板失稳问题的技术措施,通常采用三种方法:

- ① 对底板岩层进行锚固;
- ② 在巷道底板跨中开切垂直槽,释放高水平应力;
- ③ 使巷道轴线方向平行于水平应力的方向。

巷道底板可视为基础结构:其载荷取决于覆岩荷重,该载荷视为半无限体载荷;其强度视为半无限体强度;其稳定性判据可以借助于普朗特尔(L. Prandtl, 1920 年)极限承载力假定进行分析(类同于土力学与地基基础问题)。有关煤层底板岩层力学特征及其分类,在第二章第六节中讨论。

巷道锚固参数的设计,类似于钢筋混凝土结构中的钢筋配置方案的设计,其困难在于锚固系统须承担的载荷量值的确定。

既然巷道锚固设计要适用于围岩不同的反应方式和强度准则,那么设计过程中所采取的不同的分析方法和反复设计都是必要的,目的是满足围岩稳定性的各种要求。

第二节 煤 柱

一、煤柱的强度

岩层控制研究中有关确定煤柱强度的研究已有许多年的历史。第一个煤柱强度计算公式早在 1900 年就在美国出现了,由斯克安顿工程俱乐部(Sorantou Engineering Club)通过实验室实验提出,用于无烟煤开采。最近 20 a 的研究工作,在全面了解煤柱稳定机理方面取得了重要进展。这些进展主要体现在以下三个方面:① 以煤柱极限载荷—变形特性关系为基础的稳定性和刚度的概念;② 煤柱的现场大规模试验;③ 煤柱强度计算公式的建立。

煤柱的强度可以通过实验室实验和现场试验加以确定。实验室测试时使用的是立方体试块,或直径为 5~15 cm 而高度不等的圆柱形试样,受加工因素制约,立方体试块(边长为 5~15 cm)较常使用。

由于不同煤样的强度差异很大,为使实验室实验结果能较好地代表现场条件,应均匀地从煤柱各部分取样。C. T. Holland(1964 年)建议,对于 1.5 m 厚的煤层至少要取 30 个立

方体试样,且煤厚每增加 30 cm 应再增加 6 个以上试样。

1. 煤柱试样强度的尺寸效应

研究表明,煤的测试强度在很大程度上取决于试样的尺寸和形状。尺寸较小的试样,煤的强度高;随着试样尺寸增加,煤的强度按指数规律减小,直至达到一个渐近值,如图 1-2 所示。

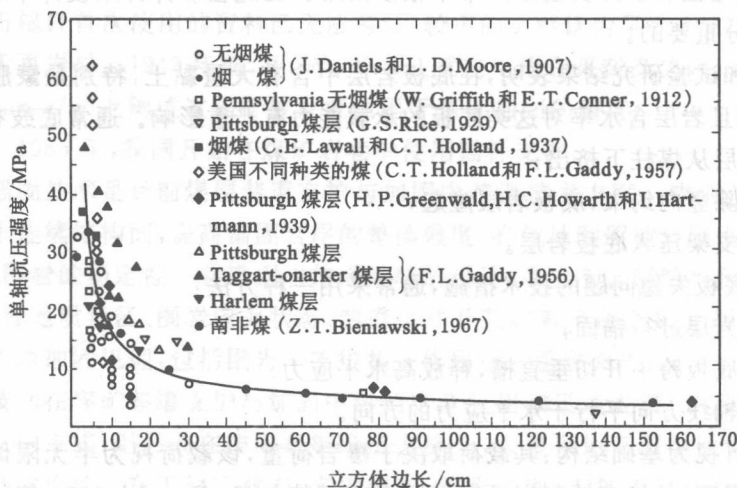


图 1-2 立方体试样尺寸对强度的影响(据 Z. T. Bieniawski, 1982)

由于强度与尺寸的关系按指数规律衰减,曲线的渐近值就是煤的强度的下限,它可以代表原位煤柱的强度。Z. T. Bieniawski 发现,南非煤层的这种渐近强度值可以用边长为 1.5 m 的立方体煤样进行试验而取得。

实验室测试煤块强度的缺点是:① 小试样内含缺陷少,不能代表大煤柱中宏观发育的大量节理、裂隙;② 加工试样过程难以保持煤柱原有水分(湿度)及避免对煤块形成扰动。

2. 大规模现场强度试验

大规模现场强度试验包括:抗压试验、剪切试验、板承载试验和调压试验,其中抗压试验最适合用于确定煤柱的强度和稳定性。进行大规模现场试验是因为现场大试件更具宏观代表性,且环境条件相同。这种试验主要针对以下一个或多个目的:① 确定煤柱强度特性;② 建立煤体变形特性曲线;③ 获得煤体残余变形特性。

对煤柱的第一次大规模现场抗压试验于 1937 年在美国由 H. P. Greenwald 等人进行。试验地点为匹兹堡(Pittsburgh)煤层,目的是确定大煤样的强度和变形特性。7 个试块均为矩形,宽 0.8~1.6 m,宽高比为 0.5~1.0。试件用手工凿成而非用爆破方法。每一试件顶端套一厚层混凝土垫块,用塞在垫块与煤层顶板之间的 1~2 台液压千斤顶加载。部分试块破坏成对顶棱锥体。1941 年,该组试验人员又进行了另外 5 个试块的测试。

Z. T. Bieniawski(1967 年,1968 年,1969 年)展示了 1966 年至 1968 年在南非进行的 16 种不同尺寸 44 次大规模现场试验及其结果。如图 1-3 所示,试块为长方体,边长为 0.5~2.0 m,宽高比在 3.1 以内变化。试块由万能切割机切割而成,5 个自由面,底面与底板连接。试块用 36 个液压千斤顶单向加载,直至试块破坏为止(每个千斤顶加载能力为 1.5

MN,加载面积为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,行程为 125 mm),试块破坏情况如图 1-4 所示。为模拟由煤柱顶部产生的约束效应,在试件端部安置木模套、钢模套或钢筋水泥帽(75 mm 厚)以产生侧面约束。试件的轴向和侧向变形,用附在试件表面的伸长计测量。



图 1-3 大尺度煤样原位强度试验

(据 Z. T. Bieniawski, 1967)



图 1-4 大尺度煤样对顶棱锥破坏

(据 Z. T. Bieniawski, 1967)

Y. A. Bich, R. D. Lama(1971 年)对不同煤层进行大量现场试验并进行分析,结果表明煤的强度随试验地点不同而有较大的改变,煤层的现场强度为 $2.45 \sim 17.65\text{ MPa}$ 。

1977 年,美国科罗拉多矿业学院的 F. D. Wang, J. Wolgomott 和 W. A. Skelly 在西弗吉尼亚南部的 Pocahontos 3 号煤层进行了最大规模的现场试验。在该煤层中,宽 24 m ,高 2.3 m 的矩形煤柱被有步骤地切割成宽度为 7.9 m 。各种应力变化和初始应力变化的分析表明,未扰动煤柱的强度为 $4.5 \sim 4.8\text{ MPa}$ 。

1984 年 8 月,波兰科学院地层力学研究所的塔得乌茨·苏如尔(Tadeusz Cyrul)报道了他在波兰哥德瓦尔得(Gottwald)矿 504 号煤层进行的一次大规模现场压缩测试。试块是从煤层中平整切割出来的边长为 1.5 m 的立方体。测试时进行控制加载和变形测量,并在煤块四周布设 60 个测点,用百分表(千分表)量测位移和变形,试验结果显示了由煤材料的非均质性和各向异性引起的复杂力学行为。

在类似的现场试验中,还可以得到一些有意义的经验:

① 煤柱破坏一般与试件垂直节理的逐渐开裂和剥落有关。如果试件以非突发性方式破坏,逐渐解体,则试件的最终破坏形态为对顶棱锥体。此时,试件完全崩溃,小碎片甚至从中心有力蹦出,轴向总变形约 20 mm ,残余强度约 1 MPa 。

② 在载荷最大时,试件内部常发出声音或沉闷的爆裂声,严重的片帮仅在试件破坏后才发生。

③ 试件无偏斜是保证试验稳定进行的条件,只有这样,试验才能获得典型的全应力—应变过程曲线,如图 1-5 所示。

3. 煤柱强度的确定

Z. T. Bieniawski(1968 年)将煤柱“极限尺寸”定义为试件宽度连续地增加,其强度不发生明显降低时的试件尺寸。Z. T. Bieniawski(1968 年)指出南非煤层立方体试件边长极限尺寸是 1.5 m ; W. G. Pariseau(1977 年)指出美国西部煤层极限尺寸是 0.9 m ; W. A. Hus-

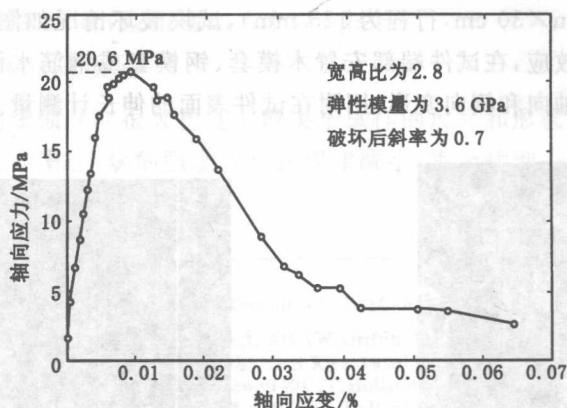


图 1-5 边长 1.4 m 的方煤柱全应力—应变曲线

(据 Z. T. Bieniawski 和 W. L. van Heerden, 1975)

trulid(1976 年)则称,0.9 m 作为极限尺寸可普遍适用于煤矿工程实践。

由于煤柱强度的尺寸形态效应,如何将实验室小煤块的测试数据换算为现场大试件的强度值,便成为人们研究的方向。

W. A. Hustrulid(1976 年)以 Gaddy 公式(F. L. Gaddy, 1956 年)为基础,指出实验室的实验数据可用下述公式换算为现场立方体试件的强度值。

① 立方体煤柱边长 h 小于 0.9 m 时。

$$\sigma_m = \sigma_c \sqrt{\frac{D}{h}} \quad (1-1a)$$

② 立方体煤柱边长 h 大于 0.9 m 时。

$$\sigma_m = \sigma_c \sqrt{\frac{D}{0.9}} \quad (1-1b)$$

式中 σ_c ——实验室测试单轴抗压强度,MPa;

σ_m ——现场临界立方体试件单轴抗压强度,MPa;

D ——实验室圆柱体试件直径或立方体边长,m。

人们通过大量的现场测试研究,提出各种不同的煤柱强度计算公式,最常用的有下列几种。

(1) Obert-Duvall/Wang 公式(L. Obert, W. I. Duvall 和 F. D. Wang, 1967 年)

$$\sigma_p = \sigma_m \left(0.778 + 0.222 \frac{W}{h} \right) \quad (1-2)$$

式中 σ_p ——煤柱强度,MPa;

σ_m ——现场临界立方体试件单轴抗压强度,MPa;

W, h ——分别为煤柱的宽和高,m。

该公式虽是基于硬岩试验和弹性力学研究提出来的,但科罗拉多矿业学院(1975 年)的研究证明,该公式适用于宽高比为 1~8 的煤柱。

式(1-2)与 1911 年 D. Bunting 得出的关系式一致。

(2) Holland 公式(1973 年,1984 年)

$$\sigma_p = \sigma_m \sqrt{\frac{W}{h}} \quad (1-3)$$

式中,参数意义同前。该公式适用于宽高比为 2~8 的煤柱,可取安全系数为 1.8~2.2。

(3) Salamon-Munro 公式(1967 年)

$$\sigma_p = 7.2 \left(\frac{W}{h} \right)^{0.46} \quad (1-4)$$

式中,参数意义同前。该公式是 M. D. G. Salamon 和 A. H. Munro 在调查了南非 125 个煤柱(其中 98 个稳定,27 个破坏)的基础上提出来的,故仅适用于南非部分矿区的条件。

(4) Bieniawski 公式(1969 年,1975 年)

$$\sigma_p = \sigma_m \left(0.64 + 0.36 \frac{W}{h} \right) \quad (1-5)$$

式中,参数意义同前。该公式是 Z. T. Bieniawski 和 W. L. van Heerden 通过对南非 Wit-bank 煤田宽高比为 0.5~34 的 66 个煤柱试件的大规模现场测试而求出的。C. T. Holland (1973 年)认为,美国煤矿应用这一公式时,安全系数为 2.0 已足够,房柱法采煤可取安全系数为 1.5~2.0。

在图 1-6 中,利用 Pittsburgh 煤层性质,给出了用上述四种公式计算的煤柱强度与宽高比的关系曲线。由图可见,用 Obert-Duvall/Wang 公式计算的强度最低,用 Bieniawski 公式计算的强度最高。

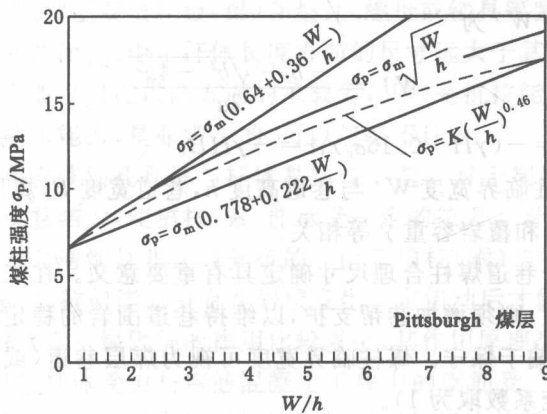


图 1-6 匹兹堡(Pittsburgh)煤层煤柱强度与宽高比的关系曲线

二、煤柱的临界宽度^①

约定:取回采巷道煤柱宽度为 W^* ,且此时煤柱的静载荷集度 q_l 恰好等于煤柱强度 σ_p ,则把宽度 W^* 称为煤柱的临界宽度。

由式(1-1b)(取现场临界立方体试件的边长大于 0.9 m,实验室标准试样直径 D 为 50 mm)可得,煤层现场临界立方体试件的强度 σ_m 与实验室标准试样强度 σ_c 间的关系式为

① 贾喜荣,等:《回采巷道煤柱临界宽度理论计算方法》,太原理工大学学报,2011 年。

$$\sigma_m = \sigma_c \sqrt{\frac{D}{0.9}} = 0.2357\sigma_c \quad (1-6)$$

按 Bieniawski 煤柱强度计算公式,有

$$\sigma_p = 0.2357\sigma_c \left(0.64 + 0.36 \frac{W}{h} \right) \quad (1-7)$$

取煤柱的静载荷集度 q_i 为

$$q_i = \gamma H + \frac{B\gamma H}{W} = \gamma H \left(1 + \frac{B}{W} \right) \quad (1-8)$$

式中 q_i ——煤柱静载荷集度, kN/m^2 ;

γ ——覆岩平均容重, kN/m^3 ;

H ——平均采深, m ;

B ——巷道(或条带)宽度, m ;

W ——煤柱宽度, m 。

以煤柱的静载荷集度 q_i 等于煤柱强度 σ_p 作为煤柱临界宽度 W^* 的判据,即

$$\gamma H \left(1 + \frac{B}{W^*} \right) = 0.2357\sigma_c \left(0.64 + 0.36 \frac{W^*}{h} \right) \quad (1-9)$$

可求得煤柱临界宽度 W^* 满足

$$\frac{0.085\sigma_c}{h} W^{*2} - (\gamma H - 0.15\sigma_c) W^* - \gamma H B = 0$$

由此可得煤柱临界宽度 W^* 为

$$W^* = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (1-10)$$

式中, $a = 0.085\sigma_c/h$; $b = -(\gamma H - 0.15\sigma_c)$; $c = -\gamma H B$ 。

式(1-10)表明,煤柱临界宽度 W^* 与巷道高度 h ,巷道宽度 B ,煤层标准试件单轴抗压强度 σ_c ,煤层覆岩厚度 H 和覆岩容重 γ 等相关。

煤柱临界宽度对于巷道煤柱合理尺寸确定具有重要意义。在工程设计中,如果巷道煤柱宽度小于其临界宽度,则须增加巷帮支护,以维持巷道围岩的稳定;如果巷道煤柱宽度大于其临界宽度,则可能偏于保守。煤柱临界宽度可视为煤层巷道(或条带)煤柱合理尺寸的最小值(此时,煤柱安全系数取为 1)。

在式(1-7)中,当煤柱宽高比 $W/h = 10$ 时,则煤柱强度与煤样标准试件强度一致。说明在式(1-7)条件下,当 $W/h < 10$ 时,煤柱强度小于标准试件强度;当 $W/h > 10$ 时,煤柱强度则高于标准试件强度。由此说明,煤柱(或煤层)的工程强度随其几何尺寸不同而变化,并非常量。

设想,当覆岩自重应力 $\sigma_z = \gamma H_0$ 与煤层标准试件单轴抗压强度 σ_c 相等时,定义 H_0 为煤层深部开采的临界深度。则 H_0 可表示为

$$H_0 = \frac{\sigma_c}{\gamma}$$

式中 H_0 ——煤层深部开采的临界深度;

σ_c ——煤层标准试件的单轴抗压强度;

γ ——煤层覆岩平均容重。