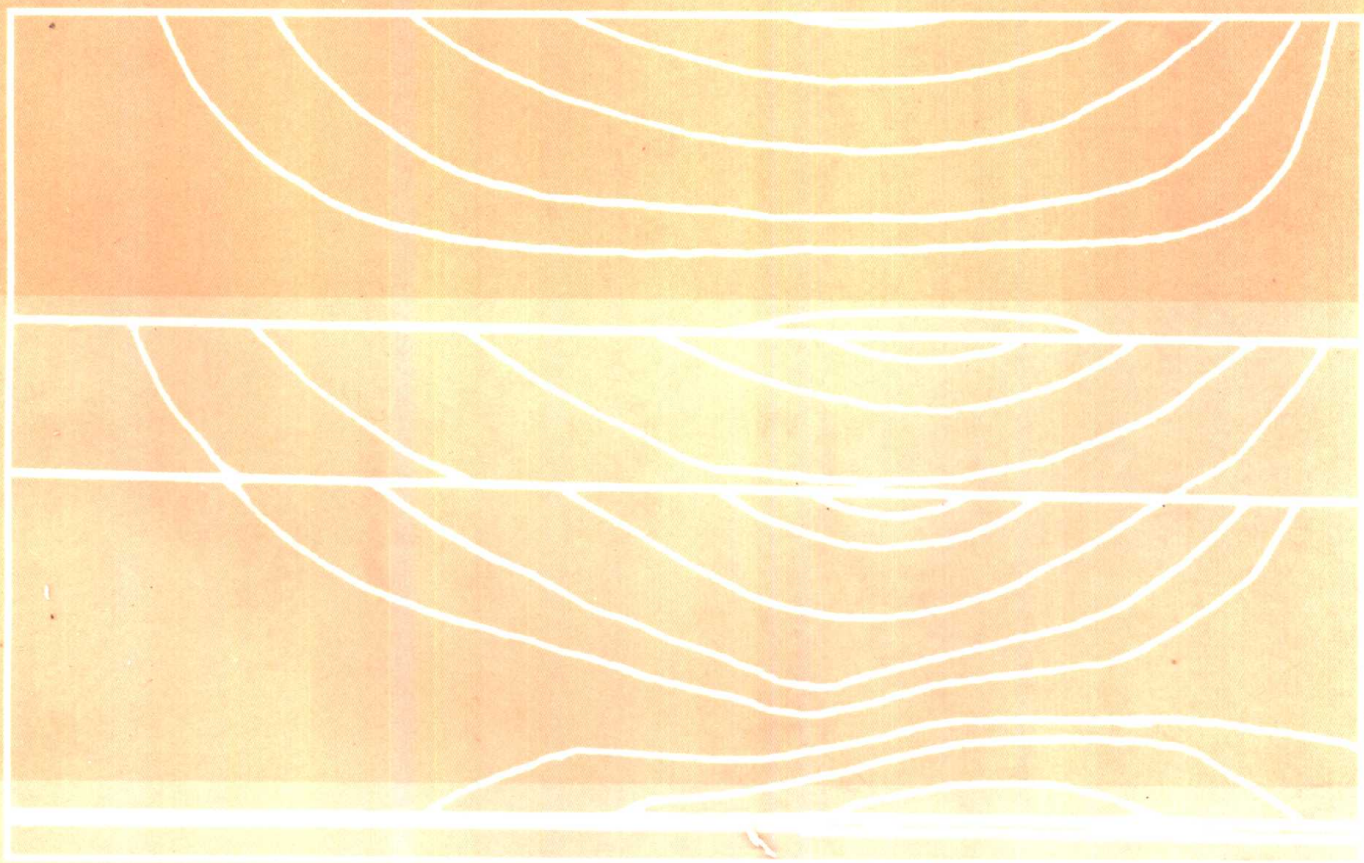


开采沉陷中的岩体结构效应

邓喀中 著

[国家自然科学基金重点项目资助]



中国矿业大学出版社

TD32
D-469

开采沉陷中的岩体结构效应

邓喀中 著

[国家自然科学基金重点项目资助]

中国矿业大学出版社

892038

内容提要

本书较全面地论述了岩体结构对开采沉陷的影响。全书共分七章:第1章介绍了岩体结构的基本概念、结构面对岩体力学性质的影响及结构面参数实测方法;第2章给出了节理岩体的力学模型及对开采沉陷的影响;第3和第4两章讨论了岩体层面对开采沉陷的影响并建立了层面滑移函数、滑移面位置判断式;第5章介绍了断层对开采沉陷的影响及其计算方法;第6章给出了含节理煤层条带煤柱留设的方法;第7章为层面滑移理论的工程应用,给出了一些算例。

本书是有关岩体结构对开采沉陷影响的第一本专著,内容新颖、资料翔实、可靠,论述严谨、实用性较强,可供煤矿现场工程技术人员,设计、科研人员及高校相关专业教师和學生参考使用。

开采沉陷中的岩体结构效应

邓喀中 著

出版人 解京选
责任编辑 陈玉和

中国矿业大学出版社 出版发行
(江苏 徐州 邮政编码 221008)

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷
开本 787×1092 1/16 印张 8 字数 200 千字
1998年11月第1版 1998年11月第1次印刷
印数 1~400 册

ISBN 7 - 81040 - 911 - 5

TD·98

定价:40.00 元



前 言

对地下固体、液体甚至气体资源的开采都会导致不同程度的地表沉陷,由此带来一系列的环境问题,例如,位于地表沉陷区的建筑物、铁路、公路的损坏,地表、地下水体进入井下、淹没矿井,使地面大面积积水、破坏耕地等。这种地下资源开采和地面保护之间的矛盾严重制约着矿区的持续发展,对此进行研究具有重要的理论意义和实际意义。

国内外学者对开采沉陷已进行了大量的研究,取得了丰硕的成果,提出了一些实用的计算方法,如概率积分法、负指数函数法、威布尔分布法等。采用这些方法计算一般地质采矿条件下地表沉陷预计已达到相当高的精度,但对含岩体结构条件下的计算却存在一定的困难。如对有断层条件下断层露头处地表沉陷的计算,对岩体内部沿层面滑移的计算,就无能为力。原因之一是这些方法均是脱离岩体介质属性而建立的带有经验性质的方法。有些学者虽然也提出了一些与岩体介质相联系的力学方法,但由于未考虑岩体的结构效应而使计算结果与实际存在较大的差异,阻碍了力学方法的进一步发展。

近年来,随着岩体结构力学的发展,人们对岩体力学行为的认识已越来越深入,建立考虑岩体结构效应的开采沉陷预测方法不仅是必要的,而且是可能的。作者采用损伤力学与断裂力学相结合的方法,推出了节理岩体损伤张量,研究了节理对移动的影响机理和规律,获得了下沉系数,水平移动系数与节理要素之间的关系式。同时,采用复合梁板理论,推出了层面滑移位置判断式和层面滑移函数及岩体内部移动计算式,并用现场实测资料和室内试验资料证明了所得理论的正确性,在以上研究的基础上编写了这本书,旨在抛砖引玉,以期该领域得到更加广泛深入的研究。

本书主要介绍煤矿岩体中大量存在的节理、层理、层面及断层对开采沉陷的影响,给出了考虑这些结构面的理论和方法。在编写过程中力求简明扼要,循序渐进,理论联系实际。同时对国内外研究现状作简要评述,以使读者对研

11-31/59

究现状有大致了解。书末还附有大量参考文献,有兴趣的读者可查阅。

本书在编写过程中,马伟民教授给予了指导和鼓励,中国矿业大学开采损害及防护研究所的郭广礼副教授、吴侃副教授、周鸣工程师、谭志祥讲师给予了大量帮助。对以上各位专家和同事的帮助和指教,作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中可能仍有不当甚至错误之处,请读者批评指正。

作 者

1998 年 8 月

目 录

绪 论	(1)
第1章 岩体结构	(4)
1.1 引言	(4)
1.2 岩体结构面及分类	(5)
1.2.1 岩体结构面	(5)
1.2.2 岩体介质分类	(5)
1.3 结构面的参数	(7)
1.4 结构面的力学性质	(9)
1.4.1 结构面的强度	(9)
1.4.2 岩体的强度	(10)
1.4.3 结构面的变形	(10)
1.5 节理岩体参数现场实测方法	(13)
1.5.1 节理迹长的测定方法	(13)
1.5.2 节理密度的计算	(14)
1.5.3 结构面其它参数的测定方法	(15)
第2章 开采沉陷中的岩体节理效应	(16)
2.1 损伤力学简介	(16)
2.2 节理岩体损伤力学模型	(18)
2.2.1 闭合节理受力分析	(18)
2.2.2 张开节理受力分析	(19)
2.2.3 节理岩体损伤张量	(20)
2.2.4 损伤力学的弹性有限元及实施	(23)
2.3 节理对岩层及地表移动变形的影响	(25)
2.3.1 节理迹长对地表移动规律的影响	(25)
2.3.2 节理面倾角对地表移动规律的影响	(28)
2.3.3 节理密度对地表移动规律的影响	(30)
2.3.4 节理面抗拉强度对地表移动规律的影响	(31)
第3章 开采沉陷中的层面效应	(33)
3.1 层面的力学效应	(33)
3.2 岩体层面的力学模型及有限元	(35)
3.3 层面滑移规律	(36)
3.3.1 层面滑移的水平向分布规律	(36)
3.3.2 层面滑移的竖向分布规律	(39)
3.3.3 层面滑移分布函数	(43)
3.4 不同层面性质对开采沉陷的影响	(43)

3.4.1 层面切向刚度对开采沉陷的影响	(44)
3.4.2 层面法向刚度对开采沉陷的影响	(45)
3.4.3 层面位置及岩性对开采沉陷的影响	(48)
3.5 岩体内部移动变形规律	(49)
3.5.1 岩体内部水平移动规律	(49)
3.5.2 岩体内部竖直方向的移动变形规律	(55)
3.6 采动岩体破裂规律	(62)
3.6.1 岩体内部破裂规律	(62)
3.6.2 破裂岩体碎胀规律	(64)
3.7 地表及岩体下沉系数计算方法	(68)
3.7.1 初次采动时地表及岩体内部下沉系数的计算	(68)
3.7.2 重复采动时地表下沉系数的计算	(70)
第4章 考虑层面滑移岩体内部的移动变形计算	(73)
4.1 层面滑移的多层岩梁模型——平面模型	(73)
4.2 层面滑移规律	(78)
4.3 二维状态下滑移面的确定	(80)
4.4 层面滑移的多层板模型——三维模型	(82)
4.5 三维状态下滑移面的确定	(86)
4.5.1 沿层面滑移的判断	(86)
4.5.2 沿最大剪应力处的滑移判断	(88)
4.6 平面上最大滑移方向的确定	(89)
4.7 岩体内部移动变形计算	(90)
第5章 开采沉陷中的断层效应	(93)
5.1 断层“活化”机理	(93)
5.2 断层对地表移动变形的影响	(94)
5.2.1 断层处产生台阶的条件	(94)
5.2.2 断层对地表移动规律的影响	(96)
5.3 断层影响下地表的移动变形计算	(97)
5.3.1 台阶尺寸的估算方法	(97)
5.3.2 断层影响下地表的移动变形计算	(99)
第6章 含节理煤层条带煤柱留设方法	(102)
6.1 单向受力状态下条带煤柱的留设	(102)
6.2 三向受力状态下条带煤柱的留设	(105)
第7章 层面滑移理论在工程中的应用	(109)
7.1 层面滑移位置确定	(109)
7.2 滑移量计算	(112)
7.3 岩体内部移动计算	(113)
7.4 考虑层面滑移的有限元计算	(114)
参考文献	(118)

绪 论

地下有用矿物开采、隧道和地铁开挖、地下水抽取等都会破坏岩体的应力平衡,导致岩层及地表移动。在地表形成沉陷盆地、台阶、裂缝、甚至形成塌陷漏斗,这一现象称为开采沉陷。开采沉陷必导致位于沉陷区的建筑物、铁路、公路损坏,使地表、地下水进入井下,危及人民生命财产的安全。因此,准确地预测开采沉陷,对国民经济建设具有重要的意义。

对开采沉陷的研究国外已进行了二百来年,先后提出了“垂线理论”(德国 Keinhöster, 1828 年)、“法线理论”(比利时 Gonot, 1858 年)、“剖面函数”、“影响函数”及力学方法等。国内从 50 年代末 60 年代初建立地表移动观测站。目前已建立了几百个观测站,一千多条观测线,取得了大量的第一手资料,建立了符合我国实际的开采沉陷预测理论和方法——概率积分法、负指数函数法、威布尔分布法等。由于开采沉陷是非常复杂的时空过程,受到开采煤层厚度、倾角、开采深度、上覆岩层性质、层位、构造、采煤方法、顶板管理方法、采动次数、采动程度及地形、地貌、水文地质条件等的影响,使得它的研究非常复杂。就目前而论大多采用经验的方法,如剖面函数法、典型曲线法等。这些方法的最大缺点是通用性差,找不出其内在的机理。另一些方法是理论方法,包括粘性、弹性、塑性梁板理论以及基于弹塑性、粘性理论的有限元、边界元法等。这些方法的缺点是实际岩体参数与实验得到的岩块参数之间的关系无法统一,且不利于考虑岩体中包含的各种弱面(断层、节理、劈理、层理及层面等)的影响,使得这些计算与实测相差甚远,而不得不采用诸如等效模型、等效参数的方法,将理论的方法变成一个半经验的方法,而丧失了理论研究的优点。纵观开采沉陷研究,虽然取得了很大的成绩,能解决一些工程问题,但也可以说,还没有一个完全适用的理论方法,究其原因主要有:

(1) 开采沉陷受多种因素的影响,目前的研究仅涉及到比较直观的因素,如采厚、采深、倾角、采煤方法、顶板管理方法、采动次数等。对不直观或难于研究的参数,如覆岩性质的影响、地形、水文地质条件等就只好笼统用一些系数代替,如下沉系数,水平移动系数等,并且假定它们在一个矿区为一常量,这就限定了它们的应用范围。实践证明:即使在同一矿区,由于覆岩的变化,覆岩所含节理、水分等不同,也具有不同的参数。如峰峰矿务局在长壁开采、全部垮落法管理顶板时,初次采动条件下沉系数 $q = 0.734 \sim 0.838$, 小煤重采时 $q = 0.909 \sim 0.988^{[11]}$, 其相对误差分别为 14.2% 和 8.7%。文献[13]研究了鸡西矿区开采沉陷的水平移动系数,得到:

$$\begin{aligned} b &= 0.15 \sim 0.20 \quad (40 \leq H \leq 80) \\ b &= 0.20 \sim 0.25 \quad (80 < H \leq 200) \\ b &= 0.25 \sim 0.30 \quad (200 < H \leq 400) \end{aligned} \quad (1.1)$$

可见,所谓常量系数并不是常量,而是随各种因素变化的,且变化较大。就鸡西矿区而言, b 值的相对误差达到 100%。因而不考虑各种地质采矿条件变化的模型是不完善的。

(2) 由于受各种理论的限制,目前用于开采沉陷计算的理论可理解为两类:一是非连续性理论,如随机介质理论、离散单元法、块体理论等。这种理论的特点是:或认为岩体是离散

体,或认为岩体被各种地质作用切割成块状,块体的稳定仅受边界条件控制,而与块体自身力学性态无关。另一种理论是将岩体概化为一连续体,认为岩体的变形是连续的,岩体内不存在节理等弱面。显然这两种理论只考虑岩体的两个极端,对大多数岩体而言,既不能看成离散体,也不能看成连续体,其力学性态应介于两者之间。

从以上分析可以看出,现存理论不完善的主要原因是不能正确反映岩体的力学性态。岩体中虽存在节理、断层、层面等弱面,但也不是完全的离散体。如何考虑这些弱面,已引起岩石力学、工程地质专家的重视。

岩体工程计算的准确性决定于岩体力学模型选取的准确性。对岩体力学模型已有许多研究,一般认为在不考虑结构面条件下,岩体可看成是粘弹塑性体。由于结构面的存在,改变了岩体的变形和强度特征,使岩体中结构面成为变形集中面、软弱破坏面,结构面对岩体工程起控制作用。1974年L. Broili提出了五条岩体力学地质定理^[89]:

第一定理:岩体结构对岩体力学性质的影响大于岩石材料的影响,岩体力学本质上是结构力学;

第二定理:岩体强度是不同结合强度的多块体的残余强度;

第三定理:岩体变形决定于组成岩体的单元的活动性;

第四定理:岩体的机械强度、变形和应力分布特征决定了岩体结构特征;

第五定理:碎裂岩体力学性质的各向异性可以通过结构面空间特征及其力学效应分析推求,地应力和水是两个控制因素。

很显然,L. Broili地质定理的核心是结构控制。孙广忠在此基础上提出了“岩体结构控制论”,他认为“岩体结构控制论”是岩体力学的基础理论,据此理论,按结构面不同将岩体分为四种介质:①连续介质,②碎裂介质,③块裂介质,④板裂介质。他还给出了各种介质条件下岩体的本构关系,虽说理论上作了一些简化,但对含不同结构面的岩体分别处理的思想是可贵的。

何满潮对含结构面岩体作了进一步连续性概化,讨论了不同结构面的计算处理方法,提出了连续微元的概念,从而为结构面的处理提供了理论依据。

以上两位学者对岩体的划分,均是针对结构面的,对不同的结构面采用了不同的力学模型和不同的处理方法。这正是当前岩石力学发展的方向之一。

除了将结构面单独处理外,还有降低弹模的方法,即由于节理等结构面的存在使岩体刚度降低;又因节理的方向不同,岩体各方向上的刚度不同而导致各向异性。进行这方面工作的有:Goodman和Dunean(1971)提出了具有均匀分布节理的等效本构关系^[70];Olfsson^[74]、Amadei和Goodman(1981)推导了贯穿节理岩体材料的非线性本构关系;Gerrad(1982)提出了锚固节理岩体的等效本构关系^[73];J. Kemney和N. D. W. Cook(1986)对具有非贯穿随机分布节理的脆性材料采用断裂力学的方法,推出了等效各向同性的本构关系^[71]。国内陈胜宏(1986)、张武、张宪宏(1987)^[81]、曹平(1990)^[70]、朱维申、王平(1992)^[95]均研究了节理岩体的等效模型。

对节理岩体研究的另一途径是采用损伤力学理论,将岩体的裂隙看成是一种介质的损伤,采用损伤理论进行研究。将损伤力学最早用于岩体节理研究的是Dougill(1976)^[105],后来T. Kawamoto等(1988)^[69]将节理的迹长视为随机分布,得出了二阶损伤张量,该损伤张量与节理的迹长、间距、方向及单位体积内的节理数有关。S. Valliappan(1990)^[56]研究了控

制节理对地基承载力的影响,1991年他同 Zhang Wohhua^[58]又用概率论的方法并结合蒙特卡罗模拟,进行了随机损伤岩体各向异性问题的研究。国内谢和平(1998)^[54]通过蠕变损伤有限元分析了开采沉陷问题。李新平(1991)^[76,77]、赵震英(1991)^[55]、周维垣(1989, 1991)^[75,86]等都采用损伤力学研究了地下开采的硐室稳定性问题,并采用断裂力学方法建立了节理岩体的损伤演化方程,利用该方程不但可以研究初始节理的影响,而且还可考虑加载过程中节理的进一步发展,这是损伤力学比等效模型的一大优点。

从以上分析可以看出,对于不同岩体的结构面应采用不同的力学方法去模拟:

(1) 对不含结构面的岩体,采用连续介质力学方法。

(2) 对含有少量结构面的岩体,采用节理单元模拟结构面。这些结构面包括断层、层面、岩浆岩侵入面。对岩体仍采用弹塑性理论。

(3) 对含有大量结构面的岩体:

① 若岩体内结构面有很强的方向性,此时岩体呈各向异性特征,而由于节理多,不能一一用节理单元模拟,此时就采用损伤力学方法,将节理看成是岩体的损伤,采用损伤的方法模拟;

② 岩体内结构面多,但方向性不强,此时岩体仍为各向同性体,可采用损伤力学方法,也可采用降低岩体刚度和强度的等效方法模拟。

(4) 对含有层面的岩体,由于层面存在,使岩体呈现正交各向异性特征,可将岩体看成正交异性介质,采用诸如层状岩体的计算方法进行模拟。

虽然岩体可分为多种,但模拟计算方法不外乎以上几种。

当前,一些工程实践表明:采动岩体沿结构面滑移,使位于滑移范围内的离层注浆铅孔剪断(兖州东滩矿 14308 西注 5、注 6 钻孔),柱外开采使井筒错断(本溪彩屯矿主、副井井壁最大错动 211 mm),断层露头处产生台阶等等。现有的开采沉陷预测理论和方法对此无能为力,有必要发展一种新的计算理论和方法。岩体力学的发展为建立这一理论和方法提供了理论基础。本书将介绍有关岩体结构对开采沉陷影响的最新研究成果。

第1章 岩体结构

1.1 引言

岩体与一般材料的重大差别在于它是包含了各种类型的破裂面而使其结构不连续的特殊介质。这些破裂面有层面、断层、节理、褶皱、层理等。谷德振(1979)、孙玉科(1965)把岩体开裂的和易开裂的地质界面抽象地称为结构面。被结构面切割成的岩块称为结构体。结构面和结构体称为岩体结构单元或称为岩体结构要素。

结构面是由一定的地质实体抽象出来的概念,它在横向上的延伸具有面的几何特征,而在垂直上则与几何学中的面不同,它常充填有一定的物质,具有一定的厚度,而不同于一般数学上的几何面。如节理和裂隙是由两个面及面间充填水或实体组成的。断层及层间错动面是由上、下盘两个面及面间充填的断层泥和水构成的实体组成的。从力学作用上看,这种地质实体在一定程度上具有面的作用机理,它完全可以抽象为一种面,称为结构面。在变形上它的机理是两盘张开、闭合或滑移。在破坏上,它是一种弱面,岩体沿它滑动和开裂,导致岩体破坏、变形或失稳。因此,岩体内的结构面控制着岩体的变形,破坏及力学表现。

结构体是岩体被切割成的岩体单体,它自身具有连续介质特征,它不同于结构面。不同类型的结构面、结构体在岩体内的组合和排列形式称为岩体结构。这个概念包含三个要素。

第一要素是不同岩体结构面、结构体。说明岩体结构面、结构体是多样的。从力学作用机理看,结构面可分为坚硬结构面、干净结构面和软弱结构面(夹泥的、夹层的)。坚硬结构面的力学行为取决于组成结构面两边岩石的性质、结构面的粗糙度等。软弱结构面的力学行为除与组成结构面的岩石的性质、粗糙度有关外,更多地取决于软弱夹层的性质、厚度等。从结构面成因看,又可分为原生结构面、构造结构面和次生结构面。原生结构面主要指岩体形成过程中形成的结构面和构造面,如沉积岩的层面、岩浆岩冷却收缩时形成的原生节理面、流动构造面、变质岩的片理、片麻理构造面等。构造结构面是岩体形成后地质构造运动导致的各种破裂面,如断层、节理、劈理等。次生结构面是指在外营力作用下产生的裂隙面,如风化裂隙面、卸荷裂隙面、矿山开采中顶板的⊗破坏面、地表裂缝等。岩体结构按其力学行为可分为块状结构体(短轴的)、板状结构体(长厚比大于15)。块状结构体的变形破坏特征主要是拉、压、剪破坏。板状结构体不但产生拉、压、剪破坏,更重要是产生溃屈破坏。

第二要素是不同岩体结构面、结构体的组合。组合是指不同岩体结构面、结构体的搭配。如坚硬结构面与块状结构体的“组合”构成碎裂结构;软弱结构面与块状结构体“组合”构成块裂结构;软弱结构面与板状结构体“组合”构成板裂结构。“组合”是构成岩体结构的主要因素。

第三要素是不同岩体结构面、结构体的“排列”。排列是指岩体结构面、结构体是有序的,还是无序的,是贯通的、还是断续的。

以上三个要素,限定了岩体结构的差别,以此为依据可将岩体划分成不同的类型。不同

类型的岩体包含不同结构面和结构体及相应的排列组合,不同类型的岩体具有不同的变形、破坏特征及不同的力学效应。岩体结构是岩体的基本特征之一,研究岩体力学必须研究岩体结构。

1.2 岩体结构面及分类

1.2.1 岩体结构面

岩体结构面是由一定的地质实体抽象出来的概念。实质上是指岩体中的力学不连续面。它包括层面、断层、节理、劈理、层理、褶皱等。按结构特征可分为:

结构面 $\left\{ \begin{array}{l} \text{开裂结构面} \\ \text{闭合结构面} \left\{ \begin{array}{l} \text{弱胶结的} \\ \text{压力愈合的} \end{array} \right. \end{array} \right.$

按充填状况的力学属性,又可分为:

结构面 $\left\{ \begin{array}{l} \text{软弱结构面(夹有一定厚度的软弱物质)} \\ \text{坚硬结构面(干净结构面或夹坚硬碎屑)} \end{array} \right.$

不同类型结构面在不同力作用下可相互转化,如闭合结构面在拉应力作用下可转变成开裂结构面。开裂结构面在压应力作用又可能使其闭合(称为冷焊效应),呈假胶结状态,形成闭合结构面,即隐节理。这种节理在风化、振动等外力作用下又可能开裂,形成显节理。因此,结构面的特征与所处的外部条件密切相关,在进行结构分析时应注意这一点。

1.2.2 岩体介质分类

由于岩体是由不同结构面、结构体组合而成的,其遵循的变形规律、破坏方式不同,应采用不同的方法进行研究,为此,应将岩体进行分类。孙广忠根据岩体内不同结构面、结构体的排列、组合方式将岩体分为四种介质。

1. 连续介质

连续介质具有以下特征:第一,结构面不连续延展,不能切割成分离的结构体,而具有完整结构岩体的特征;第二,碎裂结构岩体在较高的围岩压力下结构面闭合,在摩擦力的作用下,使之在传递应力或变形、破坏过程中结构面不起主导作用;第三,在人工改造作用下使其结构面人工愈合,碎裂结构变为完整结构。

2. 碎裂介质

碎裂介质具有以下特征:第一,在剖面上节理多与层面正交,但节理不切层,具错缝砌体堆积特征;第二,在层面方向上,轻微构造作用区多呈棋盘格式结构,在剧烈构造作用区结构体是四面体或多面体形;第三,岩体结构具有强烈的方向性,当力的作用方向不同时,具有不同的力学效应。

3. 块裂介质

块裂介质是岩体在软弱结构面的切割下形成的,其基本破坏方式为块裂体结构沿结构软弱面滑移。其特征如下:第一,在软弱结构面的切割下形成;第二,其运动严格地受贯通性结构面及其组合特征控制着;第三,其力学作用主要受贯通性结构面,特别是软弱结构面控制。

4. 板裂介质

板裂介质具有以下特征:第一,当骨架岩层长度与厚度之比大于15~18时,具有板裂介质岩体力学机能,遵守梁板结构的变形和破坏规律;第二,岩浆岩及深变质岩在构造作用下沿一组节理面发育成错动面,将岩体切割成的板裂结构者;第三,碎裂结构岩体在人工或天然地应力场作用下使其一组结构面开裂,一组结构面闭合而形成的板裂结构者;第四,完整结构岩体由人工开挖或劈裂成板状结构体而构成板裂结构岩体。

对煤矿而言,大部分岩体为沉积岩,部分为变质岩和岩浆岩。沉积岩的特点是:在层面上岩体结构相同,介质单一,变化不大。在层面法线方向上,由于沉积环境的改变,岩性发生变化,形成多介质体。在层与层之间存在层面,该结构面有整合的、不整合的、假整合的等等。由于受各种地质因素的影响,层面接触条件各异,结构效应不同,因而在进行开采沉陷计算时必须考虑它的影响。另外岩体中存在的节理、劈理、断层等结构面形成了岩体不连续的力学界面,也是开采沉陷计算中应加以考虑的问题。考虑到煤矿岩层的特点及结构面效应,将煤矿岩层分为四种介质。

(1) 完整层状岩体

介质中不存在节理、劈理等结构面,岩体完整性好。这部分岩体可采用连续介质力学方法进行分析计算。

(2) 碎裂层状岩体

岩体受节理、劈理等切割,使岩体分为许多不连续的岩体力学单元,连续微分元不能跨过结构面,岩体的变形和强度受结构面控制。如果结构面各向异性,则岩体的性质也各向异性。如果结构面各向同性,岩体的性质也各向同性。岩体结构面的效应受应力控制,当法向压应力较大时,岩体结构面效应逐渐减弱,最终呈现完整岩体的特征。

(3) 块状岩体

在结构面作用下,岩体被分成若干结构体,构成块裂介质。它是在软弱结构面切割下形成的,其力学作用主要受贯通性结构面,特别是软弱结构面的控制。

(4) 板状结构岩体

受层面、层理的作用,使岩体连续单元在厚度上较小,而宽度、长度方向很大,形成板状结构。板状结构的特点是:板法线方向上抗变形能力低,易产生变形。结构面上抗剪强度低,易产生剪切滑移。在煤矿中主要表现为层面法向变形能力低。

针对上述煤矿中常见的岩体介质,可简化为以下几种模型:

① 完整岩体模型 采用弹塑性、粘弹性、粘塑性理论计算这种岩体模型。该模型适用于结构面不发育或被结构面切割后的完整岩体部分。

② 碎裂层状结构岩体模型 采用节理岩体力学模拟节理、层理、劈理效应。在层间设置节理单元模拟层面效应。本书采用损伤力学模拟节理,在层间设节理单元模拟层面效应。

③ 块状岩体模型 对于断层、层面将岩体分割成较大的块,针对块状岩体力学性质主要受结构面控制的特点,在结构面处采用节理单元模拟,块内节理、裂隙等不发育的岩体采用弹塑性理论计算。

④ 板状岩体模型 由于沉积岩中沉积界面和层理面将岩体分成薄层状岩体,该部分岩体可采用弹塑性梁板理论进行分析计算。本书中采用弹性薄梁、薄板理论计算开采后岩体的变形和界面的滑移,同时也采用有限单元计算地下开采后的岩体变形。

1.3 结构面的参数

结构面的参数主要包括方位、间距(或密度、分离度)、迹长(或贯通度)及粗糙度等。这些参数对结构面的力学性质及岩体的工程性质有较大的影响。

方位或称结构面在空间的位置。用结构面上(从水平面量起)最大倾斜线的倾角和该线从正北顺时针方向测出的倾向和方位角来表示。有时也用结构面走向和倾角表示。倾向逆时针转动 90° 为走向方向。结构面方位对硐室开挖方向的选择、顶板的控制及地表水平移动大小、方向均有较大的影响。

间距(或称分离度)系指相邻结构面之间的垂直距离。通常用特定节理组的平均间距来表示。结构面的密度是单位长度上结构面的条数,在数值上等于间距的倒数。结构面的间距或密度决定了组成岩体的岩块尺寸,从而决定了岩体的介质属性。岩体的变形和破坏与结构面间距密切相关。如可崩性、破碎特性和渗透性等则随结构面间距而变化。

由于岩体结构面的多样性和复杂性,岩体结构面间距将不是唯一确定值,只能通过统计得出。1976年 Priest 和 Hudson 对英国的沉积岩进行了测量,发现结构面间距服从负指数函数分布,对于给定的结构面间距值 x ,其频步 $f(x)$ 由函数

$$f(x) = \rho \exp(-x\rho) \quad (0 \leq x < \infty) \quad (1.1)$$

给出。

式中 ρ ——结构面的密度, $\rho = 1/\bar{x}$;

$\bar{x}$ ——平均间距。

假设一组结构面的间距概率密度为式(1.1)给出的分布函数,则在长 L 的测线上,能测到间距大于 L 的概率为零,即

$$\rho(x > L) = 0 \quad (1.2)$$

因此,测线上的间距概率密度分布函数采用删截分布形式:

$$f_1(x) = f(x) / \int_0^L f(x) dx \quad (0 \leq x \leq L) \quad (1.3)$$

则有限测线上间距的期望值 $E_1(x)$ 为

$$E_1(x) = \int_0^L x f_1(x) dx = \frac{1}{\rho(1 - e^{-\rho L})} [1 - (1 + \rho L)e^{-\rho L}] \quad (1.4)$$

方差 $V_1(x)$ 为

$$V_1(x) = \frac{1}{1 - e^{-\rho L}} \left\{ \left[\frac{2}{\rho^2} - \left(L^2 + 2 \frac{L}{\rho} + \frac{2}{\rho^2} \right) e^{-\rho L} \right] - \frac{1}{\rho^2(1 - e^{-\rho L})} [1 - (1 + \rho L)e^{-\rho L}]^2 \right\} \quad (1.5)$$

当 $L \rightarrow \infty$ 时, $E_1(x)$ 、 $V_1(x)$ 分别趋于 $\frac{1}{\rho}$ 、 $\frac{1}{\rho^2}$ 。式(1.4)和式(1.5)给出了有限测线长度下测得的间距及方差估算式,为根据不同工程目的、不同间距、选取不同测线长度提供了理论依据。

在进行岩体工程分类时,大多采用岩石质量指标(RQD),RQD 由所钻取的岩芯确定。

$$RQD = \frac{\sum x_i}{L} \quad (1.6)$$

式中 x_i ——长度等于或大于 10 cm 的岩芯累计钻取长度;
 L ——钻孔总长度。

Priest 和 Hudson(1976)发现, RQD 与结构面密度 ρ 存在以下关系:

$$RQD = 100e^{-0.1\rho}(0.1\rho + 1) \quad (1.7)$$

当 ρ 值在 6/m ~ 16/m 范围内时,可采用如下关系式:

$$RQD = -3.68\rho - 110.4 \quad (1.8)$$

结构面间距是许多岩体分类中所采用的一个因素,表 1.1 给出了国际岩石力学学会专业委员会(1978)建议的结构面间距分级表。

表 1.1 结构面间距分级表

描 述	间距/mm	描 述	间距/mm
极密集的	<20	稀疏的	600~2 000
很密集的	20~60	很稀疏的	2 000~6 000
密 集 的	60~200	极稀疏的	>6 000
中 等 的	200~600		

结构面迹长(也称贯通度)是结构面迹线长度的简称。它描述了一个平面中结构面的面积范围。结构面迹线定义为它与露头面的交线。可以通过实测结构面迹线长度确定结构面迹长。结构面迹长是最重要的岩体参数之一,它影响结构面的抗剪强度、岩体破碎特性、可崩性和渗透性。国际岩石力学学会专业委员会(1978)采用在露头上测出的每组不连续面的最常见或最典型的迹线长度按表 1.2 对贯通度进行了分类。

表 1.2 结构面贯通度分类表

描 述	最常见的迹长/m	描 述	最常见的迹长/m
极低的	<1	高 的	10~20
低 的	1~3	极高的	>20
中等的	3~10		

结构面粗糙度是指结构面相对于其平均面的固有表面不平整度和波纹度,也叫结构面的表面凹凸性。它是评定结构面条件的主要参数。结构面的粗糙度对结构面的抗剪强度和变形有较大的影响。当结构面表面平滑(即粗糙度小)时,那么结构面易滑动、抗剪强度较小。当表面粗糙时,内摩擦角增大,抗剪强度增加,并产生剪胀剪缩效应,粗糙度对结构面强度、变形的影响随着结构面张开度、充填厚度和已发生的剪切位移的增加而减少。国际岩石力学学会专业委员会将结构面粗糙度分为九级,每级作出了相应的描述和图示,有兴趣的读者可参阅文献[88]。

结构面的张开度是指张开的结构面的相邻岩壁的垂直分离距离,其空隙由空气或水充填。张开度对结构面的抗剪强度、变形机理、渗透性有较大的影响。结构面张开度越大,渗透性越强,粗糙度对结构面的影响越小,抗剪强度越低。

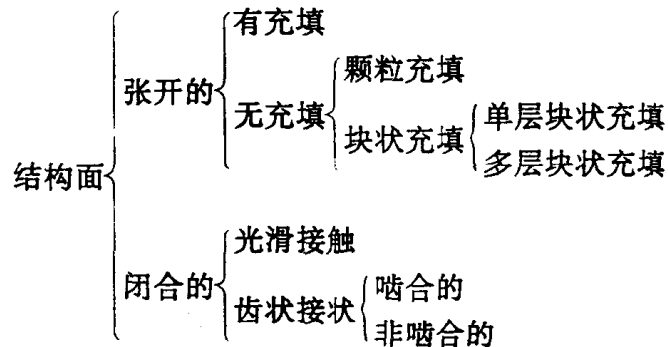
结构面风化性是指结构面岩壁的风化程度。风化程度越高,结构面抗剪强度越低,越易沿结构面滑移。

1.4 结构面的力学性质

1974年L. Broili提出了五条岩体力学地质定理,其中第一定理为:“岩体结构对岩体力学性质的影响大于岩石材料的影响,岩体力学本质上是结构力学”。这一定理明确说明了岩体结构面对岩体力学性质的决定作用,由于结构面的强度、变形性质不同,将导致岩体的强度、变形的差异。明确结构面的力学性质,对于研究开采沉陷规律、硐室的稳定性等均有重要意义。

1.4.1 结构面的强度

结构面强度取决于结构面两侧岩体材料的性质。根据结构面两侧壁面的情况及两侧面的接触情况,结构面大致有以下几种情况:



对于不同的结构面,其强度不一样,但总的来看,基本符合库仑准则。

对于有充填的结构面,其抗剪强度为

$$[\tau] = \sigma_n \tan \varphi_j + c_j \quad (1.9)$$

式中 φ_j, c_j ——充填物的内摩擦角和粘聚力;

σ_n ——结构面所受的正应力;

$[\tau]$ ——结构面的抗剪强度。

对于闭合光滑接触的结构面,其抗剪强度为

$$[\tau] = \sigma_n \tan \varphi_j \quad (1.10)$$

式中 φ_j ——结构面的内摩擦角,其余符合同前。

对于齿状接触的结构面,应考虑齿存在时的滑升效应,其抗剪强度为

$$[\tau] = \sigma_n \tan(\varphi_j + i) \quad (1.11)$$

式中 i ——齿与结构面的夹角,称为滑升角。

Barton(1973)通过大量试验发现岩体中节理的峰值抗剪强度 $[\tau]$ 与节理面的粗糙系数、节理岩壁的抗压强度等有关,提出了如下节理的峰值抗剪强度公式:

$$[\tau] = \sigma_n \tan \left[JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right] \quad (1.12)$$

式中 σ_n ——有效法向应力;

JRC ——节理粗糙系数, 最光滑面取 1, 最粗糙面取 20;

JCS ——节理岩壁的抗压强度;

φ_r 排水条件下的残余摩擦角。

该强度公式实际由三部分组成: ① 基本摩擦部分, 其值为 φ_r ; ② 由表面粗糙度(JRC)所控制的几何形状; ③ 由比值 JCS/σ_n 控制的齿状物的破坏。

关于结构面的强度还提出了很多公式, 有兴趣的读者可参阅有关文献。

1.4.2 岩体的强度

岩体的强度一般认为介于岩块强度和结构面强度之间。在试验中, 当结构面倾角相对主应力变化时, 岩体的峰值强度也相应发生变化, 图 1—1 是 Donath(1972)、McLamore 和 Gray(1967)在三向压缩试验中得的千枚岩、板岩和页岩峰值主应力差值随最大主应力相对于弱面的倾角变化情况。从图中可见, 无论在任何围压下, 主应力差值最小值总位于同一角值, 说明结构面在该角值对岩体强度影响最大, 也说明主应力与结构面位于该角值时, 岩体最容易损坏。

为了分析上述情况, 1960 年 Jaeger 给出了图 1—2 的典型情况, 结构面法线与最大主应力方向的夹角为 β 。每一结构面的极限抗剪强度可由库仑准则给出:

$$[\tau] = \tau_n + \sigma_n \tan \varphi_w \quad (1.13)$$

当结构面上的剪应力 τ 大于或等于抗剪强度 $[\tau]$ 时, 岩石沿该面开始滑动。由任意斜面上剪应力和正应力计算式可得结构面滑动准则为

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{2(c_w + \sigma_3 \tan \varphi_w)}{(1 - \tan \varphi_w \cot \beta) \sin 2\beta} \quad (1.14)$$

从上式可看出, 当 $\beta \rightarrow 90^\circ$ 和 $\beta \rightarrow \varphi_w$ 时, 产生滑动所需的主应力差值趋于无穷大。其余情况下, 均可能沿结构面滑动, 对式(1.14)求极值, 可知 $\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_w}{2}$ 时, 产生滑动的应力差值为最小, 即结构面法线与最大主应力之间夹角为 $\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_w}{2}$ 时, 岩体强度最低。

上面分析的是单个结构面的情况, 对于多个结构面时, 岩体的强度可仍采用 Jaeger 的单一结构面理论, 逐个分析每个结构面的强度, 强度最小的结构面强度即为岩体的强度。

1.4.3 结构面的变形

1. 结构面压缩变形性质

当结构面受法向力作用时, 对于充填结构面, 其压缩变形性质取决于充填材料的性质, 充填物是否被挤出。当充填物不被挤出时, 其变形性质与充填物材料的性质相同。当充填物被挤出或无充填物时, 主要取决于结构面齿接触状况和所受的压力。当压力较小时, 为点或线接触(图 1—3), 随着压力增加, 齿局部破碎或劈裂, 接触面增加, 变形也逐渐增加, 这一过程相当复杂, 只能通过实验得到其经验方程。R. E. Goodman(1976)采用在试样中制造节理的方法以模拟不同的结构面, 获得节理压缩的如下本构方程: