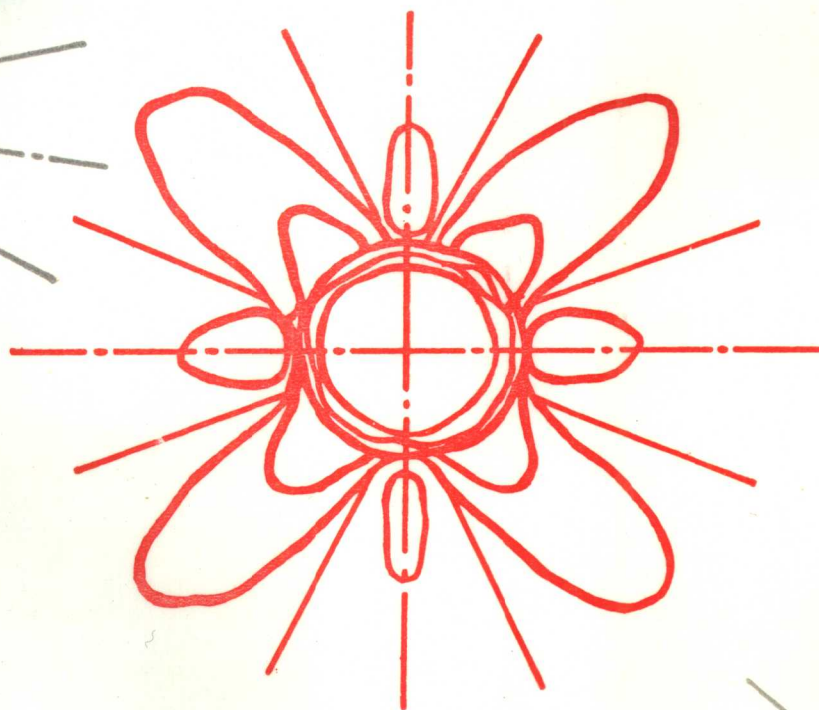


谭学术 鲜学福
郑道访 赵永忠 编著

复合岩体力学 理论及其应用



煤炭工业出版社

复合岩体力学理论及其应用

谭学术 鲜学福 郑道访 赵永忠 编著

煤炭工业出版社

(京) 新登字042号

内 容 提 要

本书根据作者近年来的研究成果,以及国内外有关文献资料撰写而成。书中较详细地阐述了复合层状岩体力学基本理论及其在工程中的应用诸问题,对于研究采矿、地质、水工、隧道等地下工程中的岩体强度和稳定性等岩体力学问题具有实用及参考价值。

全书共分十一章,内容包括岩石的强度理论及其特性,层间不具有粘结力层状岩体的强度分析;层间具有粘结力层状岩体的应力应变分析及强度条件;节理岩体强度条件分析;层状岩体的宏观强度及其当量物理力学性质的探讨;影响岩体强度的因素;岩石力学中的几个本构模型;巷道围压及其稳定性;井巷地压及其计算分析;巷道维护及其锚喷支护;矿山压力理论及其应用等。

本书可供地质、采矿、水利、隧道、建筑工程和力学等专业的研究工作者、工程技术人员及大专院校师生参考使用。

复合岩体力学理论及其应用

谭学术 鲜学福 郑道访 赵永忠 编著

责任编辑:向云霞 刘 瑾

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092\text{mm}^1/1$ 印张 $21^1/4$

字数494千字 印数1—750

1994年6月第1版 1994年6月第1次印刷

ISBN 7-5020-0937-X/TD·866

书号 3703 G0285 定价 18.00元



绪 言

岩体或岩石的强度是指岩体或岩石在极限破坏条件下所能承担的最大应力。岩体或岩石在简单载荷,如单向拉伸、单向压缩、纯剪切、弯曲以及扭转等作用下,相应的岩体或岩石的强度值可以通过实测求出,并建立相对应的强度条件或强度准则。

但是,自然界中的岩体或岩石一般均处在复杂载荷作用下,难以通过实测的方法求出其极限破坏强度值,并建立相应的强度条件或强度准则。所以,岩体和岩石在复杂受力情况下的强度条件或强度准则需要通过岩体或岩石的强度理论来解决。所谓岩体或岩石的强度理论是指岩体或岩石在复杂受力条件下普遍适用的强度准则,并用以说明岩体或岩石在复杂受力条件下的破坏机理以及破坏发生的普遍规律。

研究岩体或岩石的强度与其研究对象本身的物理力学性质的关系极大。在岩体力学中,岩石是泛指组成地壳的物质材料,它并不涉及生成后经受的各种地质作用而引起在体态上的改变,如断裂、裂隙、节理、褶皱等。因此一般都将岩石材料视作小型完整的块体,按各向同性的均匀连续介质对待。岩石的力学性也仅仅是指这种物质材料本身的力学性,其力学性可通过岩石材料试件测得。所以,岩石可定义为:在一定生成条件下,具有一定的矿物和化学成份,具有一定的结构特征及构造特征的地壳的基本组成的物质材料。但是,在漫长的地史过程中,岩石将经受各种地质作用,岩石保存了各种各样的永久变形和地质构造形迹,如褶皱、断裂、节理、层理、劈理、隐微裂隙、假整合、不整合等结构弱面,因而岩体是各向异性的非连续介质,特别是在外载荷作用下其结构面附近将产生应力集中现象,并且,由于结构面的内聚力小于岩石的内聚力,所以,岩体中的结构面是易于发生破坏的地方。因此,岩体是一种自然的地质体,是由岩石和结构面所组成的,即为岩石与结构面的统一体。

由此看来,岩石和岩体是两个既有区别又相互联系的概念。岩石是岩体的组成物质,岩体是岩石和结构面的统一体。因此,岩体的强度特征等力学性并不是岩石的强度特征等力学性,也不是结构面的强度特征等力学性,而应是岩石和结构面强度特征等力学性的综合反映结果,所以,研究岩体的强度条件较之研究岩石的强度条件要复杂得多,困难得多。

目前,在关于岩体或岩石的强度研究中,应注意两个比较重要的因素,即各向异性和试样的尺寸问题。试样的尺寸不仅影响到受力后的应力分布,而且也相对地影响试样的均匀和连续程度;对于强度的各向异性,从微观上讲,它可能由于完整岩样中占优势的晶格排列方向,也可能由于具有优势的不连续方向所引起。近10多年来,在强度的各向异性的实验研究已有过许多资料,都充分说明其强度规律,特别是抗剪强度或内聚力均随优势方向与主应力之间的夹角变化。但是,在这些经验和实验资料基础上总结岩体和岩石各向异性的强度理论还不够。即仍用材料力学、弹性力学的原理,给出强度条件或强度准则,目前用得最广的仍是莫尔强度理论。该理论对于均质各向同性的岩石介质是比较适用的,计算结果也与实际情况较符合。然而,当岩石材料中有微裂隙、空洞以及粗结晶体时,由莫

尔强度理论得出的强度曲线将与实际情况有较大的出入。另外，莫尔强度理论认为，岩石的极限破坏强度只与最大主应力和最小主应力有关，而与中间主应力无关，这与实际情况有时也是不相符合的。并且莫尔强度理论只能为岩石破坏提供强度条件，而不能对岩石的破坏机理以及破坏的发生和发展过程进行描述。因此，莫尔强度理论不能说明岩石发生破坏的普遍规律性。由于莫尔强度理论存在着上述不足之处，近年来引用了断裂力学的基本原理来解释岩石受力破坏的机理以及岩石破坏的发生和发展过程，该理论即为格里菲斯脆断性强度理论。事实证明，格里菲斯强度理论对脆性岩石是较实用的。但目前在岩体力学中，格里菲斯强度理论还远不如莫尔强度理论应用广泛。

目前，在岩体力学中除使用莫尔强度理论和格里菲斯强度理论外，有时也还应用最大剪应力强度理论、最大拉应变强度理论以及八面体强度理论，这些强度理论各有优缺点，只适用于一定的条件。

从宏观上讲，地下岩体中由于各种结构弱面的存在，使岩体的强度较明显地显示出各向异性，这是岩体强度与岩石强度较重要的区别之一。到目前为止，还没有出现较理想的岩体强度理论来描述岩体的破坏机理以及破坏的普遍规律，并同时建立相应的岩体强度条件或强度准则。所以，各向异性岩体的强度理论更有待于岩体力学的研究工作者去探索和建立。

岩体强度或岩石强度是岩体力学中的重要内容之一，该问题与生产实际有着十分密切的联系，例如地下建筑物、矿山巷道、采矿工作面、铁道隧洞等地下工程中遇到的岩体稳定性问题以及动力现象问题（岩石垮塌、围岩破碎、岩爆、煤与岩石突出、煤与瓦斯突出等），都直接或间接地与岩体强度或岩石强度问题有关，所以，对岩体强度或岩石强度问题的研究，有着十分普遍的生产实际意义。加强和不断发展岩体或岩石强度的研究，应该引起岩体力学等研究工作者的高度重视，特别是随着地下工程的不断增加，以及地下工程向地层深部岩体发展，岩体或岩石强度等力学性的研究将会显示出更大的重要性和必要性。

岩石力学属于地质学和力学之间的边缘科学，是力学的一个重要分支。它广泛应用于采矿、石油探采、交通、水电、建筑和国防工程。矿山岩石力学重点研究采矿工程中所涉及的岩石力学问题。在采矿工程方面，岩石力学有其独特之处。与其它工程相比，它的特点是：

- 1) 采矿工程结构物多处于地下较深部位，其它部门的地下工程多在地表或距地表几十米的范围内。目前，我国虽然多数矿山尚属浅部开采（通常700m以上的矿井为深部矿井，超过1000m的矿井为超深矿井），但一般也多在距地表三、四百米的范围内，且已有部分矿井进入深部开采。深部岩体动态与地表附近大不相同，地表附近岩体的破坏形式一般为脆性断裂，而较深处岩体则属粘塑性破坏，也就是说，地表附近岩体是由于丧失凝聚力而破坏，破坏形式往往是裂隙的扩张，是突发性的，而深部岩体的破坏，则是某种程度的流动变形。其次，岩体的应力状态也不相同，浅部岩体垂直应力与水平应力之差一般很明显，深部岩体却相差不甚显著。上述情况，使得矿山岩体力学所采用的地压计算方法和测试技术与其它工程相比有所不同。

- 2) 对矿山的地下结构物，只要求其在开采期间不致破坏或适时破坏，在开采后能维持平衡状态不危害地面安全即可。所以，在计算精度、安全系数及岩体加固等方面的要

求，一般均低于水利、水电、交通、建筑和国防等部门的标准。

3) 由于矿山地质条件复杂，矿床赋存条件多样，使得采矿工程结构物的位置受多种因素的制约，其选择性不大。同时，采掘工作面的随时变化，又增加了支护工作的困难，这就造成矿山岩石力学具有复杂性的特点。

以上特点表明，对矿山岩石力学的研究必须给以足够的重视，要结合工程实践，加强矿山岩石力学基础理论的研究。

目前，在采矿生产实践中提出的一系列重大问题，需要从矿山岩石力学中寻求答案。因此，这些问题是岩石力学必须研究解决的重要课题，如：

1) 在特别困难条件下，井巷地压的控制方法。

2) 为了保证生产安全和最大限度地回收矿产资源，寻求适应岩体应力特征和地压显现规律的合理开采顺序、采矿方法及其结构要素以及采场维护方式。

3) 采空区的处理问题。

4) 防止地下开采所引起的滑坡。

5) 地下开采对地表建筑物的影响以及“三下”（水体下、建筑物下、铁路下）的安全开采问题。

6) 露天矿合理边坡角的确定及不稳定边坡的加固。

7) 岩爆问题。

从上述问题可以看出，矿山岩石力学在采矿工程中占有十分重要的地位，是采矿工程的理论基础。矿山岩石力学的发展水平是衡量一个国家采矿工业水平的重要标志，它反映采矿工业从单凭经验到有理论指导的完善程度。

矿山岩石力学的研究目的，主要在于总结生产实践中矿山压力显现的客观规律和控制方法，提出防止和消除地压危害的措施，研究利用地压落矿的方法，并以矿山岩石力学的理论为指导进行矿山设计、施工和生产，以便在安全、经济、高强度、高指标的原则下最大限度地开采地下资源。

矿山岩石力学的研究方法是科学实验和理论分析相结合，二者互相联系，互相促进。科学实验是理论分析的基础，理论是指导实践的根据。例如，确定岩体的物理力学参数是岩石试验中大量而普遍的工作，这项工作的直接目的是为工程服务的，同时，这些实验资料的积累又是发展理论研究的基础。

科学实验(包括实验室与现场实验、模拟研究与现场原位测量)是岩石力学理论形成和发展的坚实基础。一方面，岩石力学中概念和理论的产生是以生产实践和科学实验为根据；另一方面，其概念与理论的发展需要生产实践和科学实验的检验和证实。

岩石力学是一门技术科学，它要求研究人员除掌握岩石力学的基础理论和有关知识外，还必须通晓其所服务部门的有关工程知识。只有这样才能取得理论与实践相结合的研究成果，解决工程实际问题。

岩体力学还是一门十分年轻的新兴学科，1956年4月在美国的科罗拉多矿业学院举行的岩体力学讨论会上，才正式开始使用“岩体力学”这一名词，通过讨论，确定了岩体力学的基本轮廓。因此，不管是在理论上和实践上，岩体力学这门学科都存在着不够完善和不够完备的地方，还有待于加强岩体力学的研究工作。

目 录

绪 言

第一章 岩石的强度理论及其特性	1
1-1 莫尔强度理论	1
一、岩石单元体的莫尔应力圆	1
二、莫尔强度理论	3
三、莫尔强度曲线的简化	4
1-2 库伦强度理论	13
1-3 格里菲斯强度理论	16
一、格里菲斯强度理论概念	16
二、岩石中裂隙孔壁的切应力极值	16
三、格里菲斯强度准则	19
四、岩石中裂隙的扩展	22
五、格里菲斯强度曲线	23
六、修正的格里菲斯强度理论	25
1-4 其它强度理论	27
一、八面体强度理论	27
二、最大拉应变强度理论	28
三、最大剪应力强度理论	28
1-5 岩石强度测定及其特性	29
一、基本概念	29
二、单向抗压强度的测定及其影响因素	30
三、单向抗拉强度的测定	35
四、抗剪强度的测定及剪切强度曲线	35
五、岩石的三轴抗压强度	38
六、岩石的基本破坏类型	39
第二章 层间不具有粘结力层状岩体的强度分析	40
2-1 水平层状岩体的单轴抗压强度	40
一、水平层状岩体的应力分析	40
二、水平层状岩体的强度条件分析	43
2-2 水平层状岩体的三轴抗压强度	46
一、水平层状岩体的三维应力分析	46
二、按莫尔强度理论分析层状岩体的强度	50
三、按最大剪应力理论分析层状岩体的强度	53
2-3 倾斜层状岩体的应力及三轴抗压强度	54
一、倾斜层状岩体中岩石交界层面处的应力	54
二、倾斜层状岩体的强度条件分析	60

第三章 层间具有粘结力层状岩体的应力应变分析及强度条件	63
3-1 水平层状岩体的单轴抗压强度	63
一、岩石交界层面处的应力应变分析计算	63
二、岩石交界层面处以外区域岩石的应力状态	66
三、岩体强度条件	66
3-2 水平层状岩体的三轴抗压强度	71
一、层状岩体的应力应变分析	71
二、层状岩体强度条件讨论	78
3-3 倾斜层状岩体的应力应变及其强度	80
一、倾斜层状岩体应力应变的计算原理	80
二、岩石交界层面处的应力应变分析计算	82
三、岩石交界层面处以外岩石的应力应变	87
四、结论及分析	87
3-4 层状岩体的单轴和三轴抗压强度试验研究	88
一、岩体试件及实验	88
二、单轴抗压强度实验结果及其分析讨论	89
三、三轴抗压强度实验结果及其分析讨论	94
第四章 节理岩体强度条件分析	99
4-1 概述	99
4-2 具有内聚力节理岩体的强度	101
一、节理强度曲线	101
二、单节理岩体的强度条件	102
三、单组节理岩体的强度条件	106
四、多组节理岩体的强度条件	108
4-3 无内聚力节理岩体的强度	111
一、单组节理岩体强度	111
二、多组节理岩体强度	113
三、节理摩擦角	113
4-4 节理岩体强度的试验研究及其分析	117
一、单组节理岩体强度的各向异性	117
二、多组节理岩体强度的“各向同性”	118
第五章 层状岩体的宏观强度及其当量物理力学性质的探讨	119
5-1 层状岩体宏观强度条件的基本概念	119
5-2 层状岩体的宏观强度理论	120
一、层状岩体的基本强度	120
二、最大应力强度理论	122
三、最大应变强度理论	122
5-3 层状岩体的当量物理力学性质计算	123
一、层状岩体的当量弹性模量	124
二、层状岩体的当量泊松比	126
三、层状岩体的当量剪切弹性模量	129
第六章 影响岩体强度的因素	132
6-1 层状岩体的宏观热膨胀应力	132

一、层状岩体的热膨胀系数	132
二、层状岩体的热膨胀应力	134
6-2 层状岩体的微观热膨胀应力及对岩体强度的影响	136
一、层状岩体中岩石交界层面处的热膨胀应力	137
二、层状岩体中岩石交界层面处区域以外的热膨胀应力	141
三、全约束条件下层状岩体的热膨胀应力	141
四、热膨胀效应对层状岩体的强度影响	143
6-3 湿膨胀效应对层状岩体强度的影响	144
一、层状岩体的湿膨胀系数	144
二、层状岩体的湿膨胀应力	147
三、层状岩体的微观湿膨胀应力	147
四、全约束条件下层状岩体的湿膨胀应力	150
五、湿膨胀效应对层状岩体强度的影响	151
6-4 影响岩体强度的其它因素	151
一、岩体的孔隙	151
二、岩体中的水	152
三、气体和瓦斯的影响	154
四、地震应力的影响	155
第七章 岩石力学中的几个本构模型	157
7-1 应力不变量和应力路径	157
一、应力不变量	157
二、八面体应力	158
三、应力路径	159
7-2 线弹性模型	162
一、线弹性矩阵 $[D]$	163
二、材料常数的确定	164
7-3 弹塑性模型	167
一、屈服准则	167
二、流动法则	170
三、硬化定律	171
7-4 变弹性常数模型	176
一、双线性模型	176
二、 K — G 模型	176
三、双曲线模型	177
7-5 帽盖模型	180
一、固定屈服面	181
二、帽盖屈服面	181
三、帽盖模型中参数的确定	183
7-6 德赛模型	191
一、德赛模型	192
二、常数 α 、 β 、 γ 、 m 、 n 的确定	193
7-7 不连续岩体模型	196
一、无拉压力模型	196

二、层间滑移模型	197
第八章 巷道围压及其稳定性	200
8-1 巷道围岩弹性区的应力	201
一、圆形断面巷道的次生应力	201
二、椭圆形断面巷道的次生应力	205
三、矩形断面巷道应力分布	207
四、拱形断面巷道围岩应力分布	208
五、巷道稳定性判断	208
8-2 巷道围岩塑性区应力	210
一、平衡方程	211
二、塑性条件	211
三、塑性区的次生应力	212
四、围岩应力变化规律及其变形状态	213
五、塑性区半径 R_0	214
六、 $\lambda \neq 1$ 时塑性区的边界	215
8-3 巷道围岩位移分析	217
一、弹性区位移	217
二、塑性区位移	220
第九章 井巷地压及其计算分析	222
9-1 概述	222
一、地压现象与地压	222
二、地压的分类	222
三、围岩与支架共同作用	224
四、圆形巷道支架压力——位移的数学表达式	226
9-2 巷道变形地压	228
一、解算方法	228
二、弹性变形地压	228
三、塑性变形地压的计算	230
9-3 水平巷道松动地压	234
一、普氏理论	234
二、浅埋巷道地压的计算	241
三、太沙基理论	242
四、块体极限平衡理论	244
9-4 竖井地压分析	246
一、岩体开掘竖井后的应力重新分布	246
二、竖井地压计算	249
第十章 巷道维护及锚喷支护	253
10-1 井巷维护的基本原则	253
一、选择合理的井巷位置	253
二、选择合理的井巷断面形状和尺寸	253
三、选择合理的支护类型	254
四、确定合理的支护时间	254
五、改变巷道围岩应力状态, 减小巷道周边应力集中	254

10-2 喷锚支护原理	255
一、喷层的力学作用	256
二、锚杆的力学作用	257
10-3 锚杆设计与计算	258
一、支护均质层状软岩	258
二、支护块状围岩	259
三、加固裂隙围岩	260
10-4 喷射混凝土设计与计算	260
一、支护危岩	260
二、支护软弱围岩	262
10-5 喷锚支护计算及分析	263
一、结构承载力计算方法	264
二、支护抗力计算方法	266
10-6 喷锚支护类型及选择	270
第十一章 矿山压力理论及应用	274
11-1 概述	274
一、采场地压的特点	274
二、采场地压的研究内容	275
三、按采矿方法划分的地压问题	275
四、采场围岩次生应力场分析	275
11-2 空场法地压计算分析	280
一、空场法地压显现形式及一般规律	280
二、缓倾斜矿体顶板稳定性与极限跨度	281
三、缓倾斜矿体的矿柱稳定性分析	284
四、倾斜及急倾斜厚矿体围岩稳定性分析及矿柱计算	289
五、急倾斜薄矿脉群的地压	293
六、采空区处理	295
11-3 充填法地压分析	297
一、充填体类型	298
二、充填体对地压的控制作用	299
三、充填体的稳定性分析	300
四、对充填法控制地压的评述	301
11-4 崩落法地压计算及其分析	301
一、有底柱崩落采矿法的地压问题	302
二、受控崩落	306
三、长壁式采矿法的地压问题	308
11-5 覆盖岩层的破坏与移动规律研究	309
一、空区覆盖岩层的破坏规律	309
二、地表塌陷及崩落角	312
三、滑坡及滚石	313
11-6 采场地压控制方法	315
一、合理确定采场断面形状及矿房、矿柱参数	316
二、支撑与岩体加固	316

三、利用免压拱控制采场地压	316
四、合理的回采顺序	317
五、充填	318
六、崩落	318
11-7 矿山冲击地压及其控制	318
一、概述	318
二、冲击地压的发生条件	320
三、冲击地压的预测	321
四、冲击地压的控制	322
主要参考资料	324

第一章 岩石的强度理论及其特性

岩石在不同类型载荷的作用下，将具有完全不同的极限强度值。岩石在简单载荷，例如单向拉应力、单向压应力、纯剪切等作用下，可以通过实验的方法直接测定其相应的极限强度，并建立相应的强度条件或破坏准则。但是，地下岩石的受力是十分复杂的，一般并非受简单载荷的作用，而岩石所处的位置不同，其所受的载荷也不相同。并且，考虑到岩石载荷之间的匹配、组合以及数值上的变动可以是无穷无尽的，要直接测定其对应的极限破坏强度并建立相对应的强度条件或强度准则是十分困难的。所以，要研究岩石在复杂受力条件下产生破坏的原因，探究其破坏机理以及普遍破坏的规律，就必须建立岩石在复杂受力条件下普遍适用的强度条件或强度准则，这就是岩石强度理论所研究的内容。

基于对岩石破坏机理的认识不相同，于是就产生了各种各样的岩石强度理论。但事实上，由于岩石本身的结构特征、构造特征、力学性质（弹性或塑性等）、载荷类别、加载方式（静载荷或动载荷等）及其它条件的差异，岩石的破坏状态和破坏规律也是完全不同的。所以，不能单用某一种岩石强度理论来解释所有岩石的破坏机理及普遍破坏的规律等问题，而需要对具体问题进行具体研究，从而寻求符合实际的岩石强度理论。

地下岩石是组成地壳的物质或材料，在岩石力学中，它并不涉及其生成以后经受的各种地质作用而引起在体态上的改变，如断裂、褶皱、裂隙、节理、层理等等。因此，通常都把岩石视为完整连续的小型块体，作为连续介质对待。岩石的力学性也是仅仅指岩石材料本身的力学性，它是通过由岩石材料所组成的试件来测定的，所以，本章将所研究的岩石均看成均匀连续介质，且各个方向的力学性均相同。另外，考虑到岩石力学的惯例，将拉应力符号规定为负，而将压应力符号规定为正；与此相应的拉应变为负，压应变为正。剪应力规则定为使受力物体沿逆时针方向转动为正，反之为负。3个主应力的大小为 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ （以后各章均按此规则）。

本章主要介绍岩石力学中的主要强度理论，即莫尔强度理论、库仑强度理论以及格里菲斯强度理论，同时也对其它强度理论作一定的简介。本章还对岩石强度的测定方法以及强度特性诸问题加以介绍。

1-1 莫尔强度理论

一、岩石单元体的莫尔应力圆

地下岩石一般均处于三向应力状态。设地下岩石在3个主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 作用下，如果3个主应力的关系为：

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \quad (1-1)$$

则在3个主剪切面上出现的3个剪应力极值分别如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{1,2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \\ \tau_{1,3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \\ \tau_{2,3} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \end{array} \right. \quad (1-2)$$

由上式可以看到，在 3 个剪应力极值中，以 $\tau_{1,3}$ 的数值最大。

在岩石力学中，如果认为岩石的破坏是由剪应力所引起的，则岩石的强度只与最大剪应力 $\tau_{1,3}$ 有关，即与最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 有关，而与中间主应力 σ_2 无关。在此情况下，地下岩石的三维应力状态就可以简化为二维应力状态。地下岩石平面受力单元体如图 1-1 所示，该单元体中与最大主应力平面交成 α 角的任一斜面上的正应力 σ 及剪应力 τ 可按静力平衡原理求得，即

$$\Sigma F_n = 0 \quad \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (1-3)$$

$$\Sigma F_t = 0 \quad \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (1-4)$$

由 (1-3)、(1-4) 式可得

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 \quad (1-5)$$

显然，(1-5) 式是关于 σ 、 τ 的圆方程式，其中 σ 为横轴， τ 为纵轴，圆心坐标为 $\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, 0 \right)$ ，半径为 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ ，如图 1-2 所示，该图即图 1-1 所示平面岩石受力单元体的莫尔应力圆，其圆周上任一点 P 的横坐标即表示该单元体一个对应斜面上的正应力 σ ，纵坐标则表示该斜面上的剪应力 τ 。平面岩石单元体与莫尔应力圆之间的对应关系是，当单元体任一斜面的外法线与最大主应力 σ_1 之间的夹角（或该斜面与最大主应力 σ_1 作用平面之间的夹角）为 α 时，则其莫尔应力圆周上的对应点和圆心的连线与 σ 轴之间的圆心角为 2α 。由此可以看到，当已知某平面岩石单元体所受的最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 时，即可作出该岩

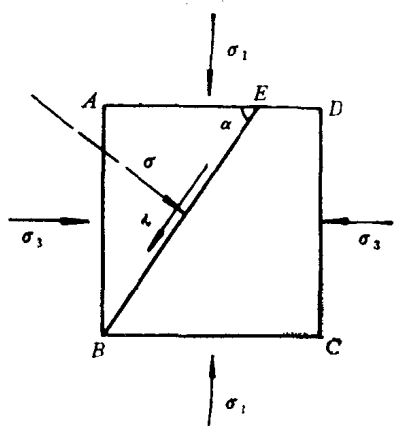


图 1-1 岩石平面受力单元体

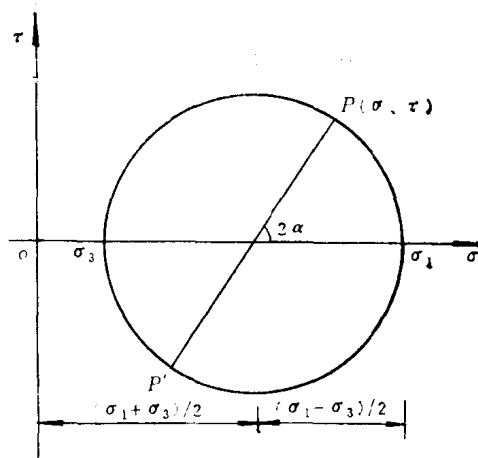


图 1-2 莫尔应力圆

石单元体的莫尔应力圆,并通过此应力圆求出岩石单元体中任意斜面上的正应力和剪应力;反之,当已知岩石单元体中各面上的正应力及剪应力如图1-3所示,即相当于已知莫尔应力圆上的 P 点及 P' 点,也可作出其莫尔应力圆,并且通过莫尔应力圆求出其主应力的大小和方向。

二、莫尔强度理论

莫尔强度理论是一种剪切破坏理论。该理论认为岩石在单向拉应力、单向压应力、三向压应力及三向压——拉应力等作用下,如果岩石发生破坏,其破坏原因是由于岩石中所出现的最大有效剪应力而引起的。

岩石的莫尔强度曲线一般是通过三轴试验机来测定的,即对某种岩石的若干个试件,在三轴试验机上顺序改变围压(即 $\sigma_3 = \sigma_2$)的应力数值,进行一系列的三向抗压强度试验,并将各次试验的极限莫尔应力圆绘在同一个 σ - τ 坐标系中,再补入其单向受拉和单向受压时的极限莫尔应力圆,则这些极限莫尔应力圆的外公切线就是该种岩石的莫尔强度包络线,或叫莫尔强度曲线,如图1-4所示。显然,如果对该种岩石所作的试验次数足够多,其极限莫尔应力圆足够密集,则莫尔强度包络线上任意一点都是该种岩石的一个极限莫尔应力圆的切点,即表示该种岩石的一种极限应力平衡状态。所以,岩石的极限莫尔强度包络线就是该种岩石在各种应力状态下的强度曲线。当按岩石实际受力情况而绘出的莫尔应力圆在其极限莫尔强度包络线以内时,该岩石处于安全状态,即不致发生破坏。但是,当按岩石实际受力情况而绘出的莫尔应力圆与其极限莫尔强度包络线相切时,该岩石处于不安全状态,即岩石开始发生破坏,其切点和圆心的连线与 σ 轴之间夹角的 $1/2$,即为岩石破裂面与最大主应力作用面之间夹角。

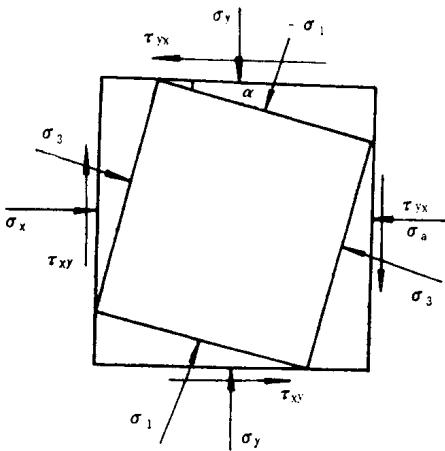


图 1-3 受力单元体

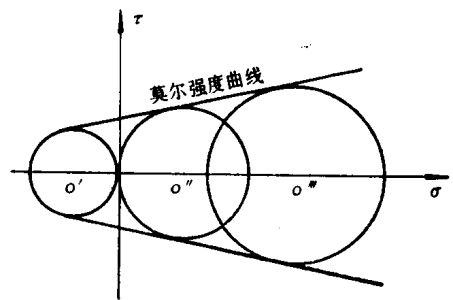


图 1-4 莫尔圆及莫尔强度曲线

极限莫尔强度包络线上的所有点,实际上表明了岩石在一切极限应力状态下破裂面上正应力 σ 与剪切应力 τ 之间的对应关系,其函数关系可以表示如下:

$$\tau_1 = f(\sigma_1) \quad (1-6)$$

(1-6)式即为岩石极限莫尔强度的一般表达式。不同岩石的极限莫尔强度包络线不相同,所以,其极限莫尔强度表达式也不会相同。当岩石中某斜面上的剪应力具有以下关系:

$$\tau < \tau_1 \quad (1-7)$$

$$\tau = \tau_j$$

(1-8)

则 (1-7) 式表示该岩石某斜面处于安全状态, 而 (1-8) 式表示该岩石某斜面处于极限应力平衡状态, 即该岩石开始沿该斜面发生破坏。

由莫尔强度理论可以看出以下物理力学意义:

1° 岩石的强度是随受力条件而变化的, 其侧向压应力 σ_3 越高, 则其轴向抗压强度也就越大, 即岩石的强度越大。

2° 岩石在三向受压时, 其极限破坏强度只与最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 有关, 而与中间主应力 σ_2 无关。

3° 岩石在三向等压下, 其莫尔应力圆为 σ 轴上的 1 个点圆。显然该圆不会与莫尔强度曲线相切; 因此, 处于三向等压状态下的岩石不会发生破坏。

4° 岩石在外力作用下如果发生破坏, 其破裂面位置不与最大剪应力面位置相重合, 而是取决于极限莫尔应力圆与莫尔强度曲线相切处的位置 (见图 1-5), 即在满足条件

$$\tau_j = (k \cdot \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_j) \operatorname{tg} \varphi = k + \sigma_j \operatorname{tg} \varphi$$

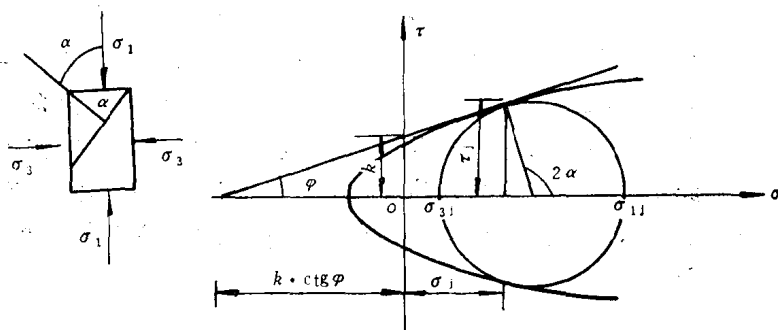


图 1-5 强度曲线与破坏面的关系

时的断面上破裂, 该断面亦称为最大有效剪切面。这说明岩石的破裂不仅与破裂面上的剪应力有关, 还与破裂面上的正应力以及表示岩性的内聚力、内摩擦角有关。换言之, 岩石的破坏是由于破裂面上出现的剪应力达到岩石本身的内聚力和破裂面上的极限内摩擦力之和时所引起的。

5° 莫尔强度曲线在受压区内能够完善的反映岩石在各种应力状态下的强度特性, 也能反映单拉和拉—压应力状态下的强度特性, 但在受拉区内不能说明岩石在多向拉伸时的强度特性。不过地下岩石一般很少处于多向拉伸应力状态, 所以, 岩石的莫尔强度曲线具有较为普遍的工程实际意义。

三、莫尔强度曲线的简化

由上可知, 岩石莫尔强度理论对其强度曲线的几何形状不作任何假定, 完全是通过实验结果来绘制的。可以看出, 由于各种岩石的内聚力 k 和摩擦角 φ 具有不同的数值, 所以, 各种岩石的极限莫尔强度包络曲线不会相同。试验表明, 不同岩石随着测压力的增加, 其莫尔强度曲线的发展趋势比较接近。另外, 在较高应力区, 坚硬致密的岩石, 其莫尔强度曲线的斜率随主应力的增大而变化较为平缓, 而疏松多孔的岩石, 其莫尔强度曲线的斜率多具有较为明显的随主应力的增大而减少的趋势。可以想见, 如果仅凭测定来确定岩石的莫尔强度曲线, 就必须作大量的岩石强度试验工作。为了大幅度地减少岩石强度的试验工作, 并能较好地反映岩石的强度特性, 就必须掌握和研究岩石强度曲线的变化规律, 因此

有效地对岩石的强度曲线进行简化是十分必要的。

目前,岩石的莫尔强度曲线的简化类型主要有直线型、双曲线型、抛物线型、摆线型等。一般认为直线型莫尔强度曲线比较简单,便于使用,能在一定程度上反映岩石的强度特性;而双曲线型则能较好地说明岩石的实际强度特性。所以,这两种简化的莫尔强度曲线得到广泛应用。

1. 直线型莫尔强度曲线

由图 1-5 可以看到,通过实测得到的莫尔强度曲线,其内聚力 K 和内摩擦角 φ 是随岩石应力状态变化而变化的。按照莫尔强度理论,如果将岩石的内聚力 K 和内摩擦角 φ 都看作常数,即不随岩石的应力状态发生改变,则岩石的莫尔强度曲线可以简化为 1 条直线,其极限应力平衡态为

$$\tau_j = k + \sigma_j \operatorname{tg} \varphi \quad (1-9)$$

(1-9) 式即为直线型莫尔强度曲线表达式,它是用破裂面上的正应力和剪应力来表示的。如果用两个外主应力 σ_{1j} , σ_{3j} 来表示,可按图 1-6 推导得到。

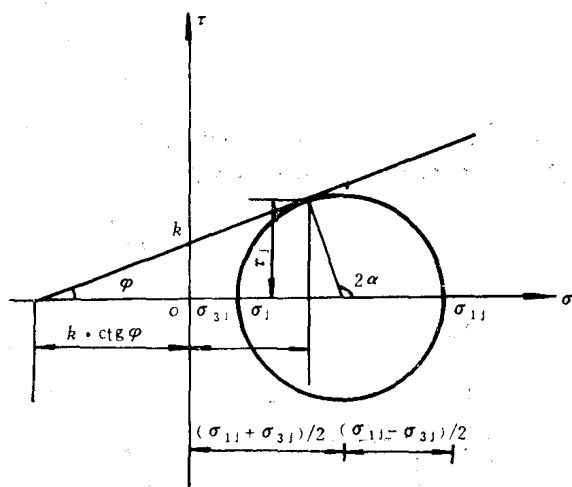


图 1-6 直线型莫尔强度曲线

$$\sin \varphi = \frac{(\sigma_{1j} - \sigma_{3j})/2}{k \operatorname{ctg} \varphi + (\sigma_{1j} + \sigma_{3j})/2}$$

$$\frac{\sigma_{1j} - \sigma_{3j}}{2} = \left[k \operatorname{ctg} \varphi + \frac{\sigma_{1j} + \sigma_{3j}}{2} \right] \sin \varphi$$

$$\sigma_{1j} - \sigma_{3j} = 2K \cos \varphi + \sigma_{1j} \sin \varphi + \sigma_{3j} \sin \varphi$$

$$\sigma_{1j}(1 - \sin \varphi) = \sigma_{3j}(1 + \sin \varphi) + 2k \cos \varphi$$

$$\therefore \sigma_{1j} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_{3j} + \frac{2k \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1-10)$$

式中: σ_{1j} 、 σ_{3j} 分别表示岩石处于极限应力平衡状态时所对应的 2 个极限主应力。

公式 (1-9) 和 (1-10) 均为直线型莫尔强度曲线表达式,只不过表达形式不同而已。当岩石中的应力满足 (1-9) 式或 (1-10) 式时,该岩石即处于极限应力平衡状态,开始发生破坏。由上述直线型莫尔强度曲线表达式,可以作以下讨论:

1° 公式 (1-9)、(1-10) 中,任一式都只有 2 个未知数,即岩石的内聚力 k 和内摩擦角 φ ,因此对任何一种岩石,只需进行两次强度试验,就可以由式 (1-9) 或 (1-10) 式求出 k 、 φ ,从而求出该种岩石的直线型莫尔强度曲线及其表达式。

2° 岩石的极限莫尔应力圆心和莫尔强度曲线的切点连线与 σ 轴之间夹角成 $90^\circ + \varphi$ 的角度,即