

高等学校教学用书

煤矿岩层与地表移动

中国矿业学院 阜新矿业学院 焦作矿业学院 编

煤炭工业出版社

2589.9 23097

U114.6
Z-16

高等学校教学用书

煤矿岩层与地表移动

中国矿业学院 阜新矿业学院

焦作矿业学院 编

煤炭工业出版社

510638

i,

75.

评

组

社

T.

ke

c-

it-

of

1.

4.

to

e

内 容 提 要

本书系统地论述煤矿区岩层及地表移动的基础知识。内容包括地下采煤引起的岩层与地表移动过程,地表及岩层移动观测方法,地表移动的一般规律,地表移动变形计算方法,矿山沉陷的防护(建筑物下、铁路下及水体下采煤)等方面。

本书为煤炭高等学校矿山测量专业的《煤矿岩层与地表移动》课程试用教材。亦可供煤矿生产技术人员、设计人员及科学研究人员参考。

高等学校教学用书 煤矿岩层与地表移动

中国矿业学院 阜新矿业学院
焦作矿业学院 编

煤炭工业出版社 出版
(北京天安门外和平北路16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 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $14^{1/4}$
字数 339 千字 印数1—3,100
1981年1月第1版 1981年1月第1次印刷
书号15035·2370 定价 1.80元

前 言

《煤矿岩层与地表移动》教材是根据煤炭工业部1978年高等教育座谈会制定的矿山测量专业教学计划和教学大纲的要求编写的。总结了1974、1975年四川矿业学院、阜新矿业学院、焦作矿业学院所编《煤矿岩层与地表移动》教材的经验，加强了基础理论，吸取了国内外岩层与地表移动以及建筑物下、铁路下、水体下采煤领域内的新技术和新成果。

本教材共分五章，分别论述地下采煤引起的岩层与地表移动一般规律、地表与岩层移动的观测方法及成果整理、国内外地表移动与变形预计的多种方法，并对建筑物下、铁路下、水体下采煤及其防护措施作了较为详细的介绍。本书作为煤炭系统高等院校矿山测量专业教材，也可供煤炭系统科研、设计和矿山测量、采煤工程技术人员参考。

本教材由中国矿业学院主编，执笔编写的有：中国矿业学院马伟民（第四章）、王金庄（第三章）、聂孟荀（第一章）、阜新矿业学院范学理（绪论、第五章第二、三、四、五节）、焦作矿业学院胡昌炽（第二章、第五章第一节）等同志。

煤炭科学研究院北京煤炭科学研究所、唐山煤炭科学研究所以及有关矿务局等单位为本教材提供了资料和提出了宝贵意见，谨向这些单位和同志们表示衷心的感谢。

由于编者学识有限，实践经验不足，书中一定存在不少缺点甚至错误，恳请读者提出批评指正。

编 者

一九八〇年四月

目 录

绪 论	1
第一章 地下采煤引起的岩层与地表移动	4
第一节 岩石的物理力学性质	4
第二节 地下采煤引起的岩层移动	17
第三节 地表移动盆地的形成及其特征	29
第四节 盆地内地表移动与变形分析	34
第二章 地表与岩层移动的观测工作	40
第一节 概述	40
第二节 地表移动观测站的设计	41
第三节 观测站的设置和观测工作	45
第四节 观测成果的整理工作	48
第五节 地表移动的短期观测方法	53
第六节 岩层移动观测	60
第三章 地表移动的一般规律	66
第一节 地表移动稳定后主断面内移动与变形分布规律	66
第二节 采动过程中地表移动与变形的一般规律	74
第三节 岩层及地表移动与地质采矿条件的关系	80
第四节 地表移动观测资料的综合分析	89
第四章 地表移动与变形预计	98
第一节 最大下沉值及最大水平移动的预计	99
第二节 典型曲线法	102
第三节 剖面函数法	111
第四节 以随机介质理论为基础的预计方法	119
第五节 非主断面地表移动与变形预计	136
第六节 下沉格网法	155
第七节 多煤层开采时地表移动预计	164
第五章 矿山地表沉陷的危害及其防护措施	168
第一节 保护煤柱设计	169
第二节 地下采煤对竖井的影响及其防护措施	186
第三节 地下采煤对水体的影响及其防护	193
第四节 地下采煤对建筑物的影响及其防护措施	202
第五节 地下采煤对铁路的影响及其防护	211
参考文献	223

绪 论

地球上有许多原因引起地表沉陷，这些原因中为人们所熟知的有地震、地下含水层疏干、油层开采以及矿山开采等等。本书中所涉及的是由于矿山地下开采引起的岩层与地表移动问题，或者叫做矿山岩层与地表移动。地表移动有时叫做地表沉陷。

矿山开采破坏了岩体内部原有的力学平衡状态，使岩层位移、变形，使岩体的完整性受到破坏。当开采的面积达到一定范围之后，起始于采场附近的移动和破坏、将扩展到地表。显然，此时的地表变形将影响到位于开采影响范围内的房屋建筑、河流、铁路和管道等，改变它们的原有状态，甚至破坏。同样，在移动岩体内的主要井巷，如井筒、巷道、峒室等也可能受开采影响而遭受破坏。

矿山开采的实践表明，在大多数情况下，矿山地表沉陷会造成极大危害。当前，这些问题还远远没有得到完满地解决。

据文献记载，地表移动问题很早已被人们所注意。在采矿业的历史上早就有预防开采有害影响的法律性措施。

早在十五、六世纪，在比利时曾经公布一项法令，对由于开采从而破坏供列日城用水的含水层者处以死刑。并规定：在列日城下开采时，开采深度应大于100米。到本世纪初以前，由于缺乏矿山地表沉陷的知识造成铁路、房屋破坏及井下透水而死亡的惨案是不少的。

1897年，德国的陶德曼矿山管理局在备忘录中记载：1875年在约汉·载梅尔矿，由于地表塌陷使铁路的钢轨悬空。

据1895年的德国“幸福”杂志记载，在波希米亚的柏留克城发生了地下开采危及地面的严重事件。地面的突然崩塌曾毁坏了三十一所房屋，严重破坏的达三十五所；当时地表下沉15米。造成这种严重事件的原因是开采煤层的厚度大（28~30米），采深小于100米。以及此处有厚流砂层；开采后引起流砂溃入井下，引起了地表的崩塌。

在水体（河流、湖泊、含水砂岩等）下采煤时，有时会造成井淹事故。如1916年日本在海底下采煤时，发生了重大伤亡事故。当时开采两个煤层，开采工作离开海岸1.2公里，在煤层上面覆盖有47米厚的砂岩，再上面是厚25米的冲积层和粘土层，同时在四个矿井采煤。溃决发生在离岸边相当远的地方。由于上覆岩层中有构造裂缝，地下开采后，这个裂缝受开采影响产生移动而裂开。海水沿裂缝溃入井下，两小时内淹没了矿井，死亡237人。

类似于上面所列举的事例是很多的。这足以说明地表沉陷给人们带来的危害。当然，这些危害势必引起人们对于地表沉陷问题的注意。促使人们去观察它、研究它、提出克服它的措施。为此，人们提出很多关于岩层移动的各种假说、论点。矿山工程技术人员不断探讨这些问题，并寻求岩层移动的规律性和它的影响因素。

对于岩层移动的研究方向也是经过几番变化的。起初，大多数的研究者都力图创立一套完整的理论，用以解决有关矿山地表沉陷的各种问题。但是，在当时既没有必要的实验条件，也缺少反映岩层移动过程的实际资料。所以，大多数的理论与实际情况不相符合，即使如此，前人的研究仍然为我们提供了很多重要的、有意义的经验。

例如,在十九世纪七十年代,比利时人总结了开采的破坏性影响,提出:建筑物的破坏程度与它在移动盆地内的位置有关。认为移动盆地内对建筑物有危险的是边缘地带。还认为,建筑物受损害不是由于绝对下沉引起的,而是相对下沉,即倾斜引起的。因为它使地表和建筑物倾斜。比利时人认为,要想减少开采对地面的损害,应该在大范围内连续开采。这一论点,现在正应用于解决建筑群下开采问题。波兰在这方面多年来的实践,证明上述论点是可取的。此外,比利时人当时还很重视地表下沉与开采厚度的关系。根据精密水准测量资料得出,在列日城地区,地表下沉值不小于所采煤层厚度的三分之一。

在上世纪的研究成果中应当指出的是德国陶德曼矿山管理局的研究。他们在研究过程中,进行了大量而系统的仪器观测。在此基础上提出了下沉角值与岩石性质及矿层倾角有关,并求得了数量上的关系。

到上世纪末为止,岩层与地表移动问题无论是在实验工作方面,还是在理论研究方面,都一直没有间断过,而且得到了发展。随着采矿科学技术的发展,矿山地表沉陷这个学科也得到了进展,特别是近三十年内发展比较显著。

目前,人们已初步掌握了岩层与地表移动的基本规律。通过大量的现场仪器观测,德国、苏联、波兰、英国等寻求了岩层与地表移动各主要参数与地质采矿因素的关系。并建立了各种类型的地表移动盆地剖面数学表达式,为地表移动与变形预计方法的建立创造了条件。有了地表移动预计方法,就可以预计一定条件下开采引起的地表变形值,因而,就有可能估计出房屋、铁路由于地下开采而受损害的程度。为此,人们可以事先采取防护措施,避免灾难性的破坏。

野外仪器观测手段方面发展也比较快。有些国家应用激光技术于距离丈量,提高了精度和工效,提高了反映地表变形的真实性。在建筑物变形观测中,应用了摄影测量技术和陀螺经纬仪。有的国家,如西德,早在本世纪六十年代已应用电子计算技术整理地表移动观测资料。并且用数字电子计算机控制自动绘图仪,将观测成果和预计成果绘成地表移动与变形的等值线图。据文献报导,有的国家正在研究制造地表变形自动记录装置,使观测工作向自动化方面迈进。

矿山地表沉陷的理论研究也得到发展。理论研究基本上是从两个途径——连续介质力学和随机介质理论开展的。由于岩体结构复杂,矿体产状变化大,目前还没有一种完整的理论解决生产实际问题。为配合理论研究,各国开展着各类室内实验研究工作。这对于揭示岩层移动规律,寻求各地质采矿因素的影响性质,起到了积极的作用。

随着岩层与地表移动规律的研究,地表移动预计方法的不断完善,在矿山生产实践中岩层与地表移动理论应用的深度与广度不断扩大。昔日用留设保护矿柱的方法保护地面建筑物的情况已大有改观。并代之以开采防护措施和建筑结构措施。波兰应用这些措施已开始在大面积的城镇下开采;日本、英国在海底下采煤为防止灾害性透水事故方面积累了经验。

我国岩层移动研究工作是在新中国成立后开始的。淮南和开滦煤矿在五十年代初期即建立了地表移动观测站。开始了我国岩层移动科学研究的仪器观测工作。五十年代后期,我国各主要矿区,开滦、抚顺、阜新、峰峰、淮南、大同、鹤岗、新汶、阳泉、本溪等先后制定了开展地表移动观测的规划,并建立了一批观测站。多年来的仪器观测,积累了大量的资料。在此基础上,初步提出了移动与变形的计算公式,以及选定有关参数的方法。

从而改变了过去那种引用外国数据解决我国实际问题的局面。

二十多年来,有关矿山地表沉陷问题的专门性全国会议召开过五次。在这些会议上,各矿区的工程技术人员、科学工作者,大专院校的教师交流了科研及生产实验成果,总结了我国岩层移动工作,用大量的新资料充实了已有的科研成果。它促进了我国矿山地表沉陷科研工作的进一步发展。近十几年来,我国在水体下、铁路下和房屋建筑物下采煤积累了大量经验。自从新汶矿区1956年在小汶河下试采以来,很多矿区开始了水体下采煤工作。经过多年的实验、研究初步摸清了开采煤层上方岩体内冒落裂隙带的高度。掌握了粘土层隔水性能。实现了在河流、流砂层下安全采煤,并且提高了开采上限。在此期间,很多矿区开展了房屋建筑物下采煤的研究工作。虽然房屋建筑物受开采影响而损害的规律比较复杂,但是,一些矿区仍然取得了有价值的成果。本溪、枣庄、峰峰矿区针对我国房屋结构特性,提出了房屋受损害程度与地表变形值的相互关系。有些矿区试验了适合我国条件的防护建筑物免受开采有害影响的措施。铁路下采煤工作开始于峰峰矿区。从此以后焦作、鹤岗、鸡西、枣庄、开滦、淮南等矿区相继在矿区专用铁路线下,在国家铁路支线和二级干线下进行了试采。最近,淮南矿区在急倾斜煤层上方进行了铁路下采煤。应当指出,近年来我国在淮南矿区已开始进行回收竖井保护煤柱的试验。

由于建筑物下、水体下及铁路下采煤的需要,我国的科学工作者也提出了几种预计地表移动盆地的剖面函数式和盆地内任意点移动与变形的计算方法。

我国幅员辽阔、矿产丰富。大量开发矿产资源使矿山地表沉陷问题日益增多。需要广大科技人员在理论研究、科学试验和观测手段方面做更多的工作,为实现我国四个现代化建设努力奋斗。

第一章 地下采煤引起的岩层与地表移动

第一节 岩石的物理力学性质

地下开采工作破坏了岩体内原有的初始应力场（岩体的初始应力场是客观存在于岩体内的自然力场），使采空区周围的岩石乃至地表发生移动。岩层与地表移动过程的性质受地质采矿等许多因素的影响，而岩体及岩石的物理、力学性质乃是其主要影响因素之一。因此，我们研究有关岩层与地表移动的种种问题时，首先应对移动的主体——岩体的物理、力学性质有所了解。

首先应当指出的是，目前对于岩石的物理、力学性质的研究，在大多数情况下都是在实验室内通过岩石试样进行的。但是，岩石试样的性质，并不能全面代表岩体的性质。这是因为岩体是非均质的、不连续的组合体，而岩石试样几乎总是取自不连续面（断层、裂隙和层理）之间较完整的岩石。不连续面在体积甚小的岩石试样上一般不可能得到反映。同时，岩石的某些重要性质：强度、承载力、孔隙性和渗透性等，也因试样的规格而有所不同。因此，我们除了在实验室内对岩石试样进行研究以外，还必须在野外现场进行岩体试验，以求得较全面的岩体的物理、力学性质。这里，只简单扼要的介绍在实验室内通过岩石试样得到的岩石物理力学性质。

一、岩石的物理性质

岩石的物理力学性质与其构造密切相关。查明其间的相互联系及其变化规律，就有可能判断和推测岩石的其它特性。例如，比重及其它特征相同的岩石，如果其容重不同，则说明岩石之构造亦有差别，因而其强度和可缩性等也就有所不同。这里只介绍岩石的湿度、容重、比重、密度、孔隙度以及岩石的碎胀性等物理性质。这些物理性质对于岩石性能有直接的影响。

1. 岩石的湿度

具有自然湿度的岩石试样中所含水的重量与绝对干燥的岩石试样的重量之比称为岩石的湿度。一般用百分数表示：

$$W = \frac{Q - Q_0}{Q_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 W ——岩石的湿度；

Q ——具有自然湿度的岩石试样的重量；

Q_0 ——烘干后的岩石试样的重量。

为了准确的测定岩石的自然湿度，采样后应立即将样品放在密封的容器中带回试验室，以避免试样的湿度受大气的影响而发生变化。

2. 岩石的容重及比重

岩石试样之重量与其包含孔隙在内的总体积之比称为岩石之容重，以下式表示：

$$\gamma = \frac{Q}{V} \quad (1-2)$$

式中 γ ——岩石的容重；

Q ——具有自然湿度的岩石试样之重量；

V ——包括孔隙在内的岩石试样的总体积。

容重有自然湿度容重和绝对干燥容重之分。上式中，如果 Q 为绝对干燥岩石试样的重量，则所求出的容重为绝对干燥岩石之容重。绝对干燥岩石之容重也可按下式换算：

$$\gamma' = \frac{\gamma}{100 + W} \times 100 \quad (1-3)$$

式中 γ ——绝对干燥岩石之容重；

W ——岩石的湿度。

岩石试样之重量与其除去孔隙后的体积之比谓之岩石的比重，以下式表示：

$$\delta = \frac{Q}{V_1} \quad (1-4)$$

式中 δ ——岩石的比重；

V_1 ——岩石试样除去孔隙后的体积。

岩石之比重决定于组成岩石的矿物及胶结物之密度。容重除决定于岩石所含矿物及胶结物之密度外，还与岩石的孔隙度和湿度有关。

3. 岩石的密度与孔隙度

岩石中矿物及胶结物所占之体积与总体积之比谓之岩石的密度，以下式表示：

$$D = \frac{V_1}{V} \quad (1-5)$$

式中 D ——岩石的密度；

V_1 ——岩石试样除去孔隙后的体积；

V ——岩石试样包括孔隙在内的总体积。

岩石中孔隙所占的体积与总体积之比谓之岩石的孔隙度，以百分数表示：

$$n = \frac{V - V_1}{V} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 n ——岩石的孔隙度。

不难理解，以小数表示的孔隙度与密度之和恒等于一。

将式 (1-2)、(1-4) 代入式 (1-5) 和 (1-6) 得：

$$D = \frac{\gamma}{\delta} \quad (1-7)$$

$$n = \frac{\delta - \gamma}{\delta} \quad (1-8)$$

由此可知，如果已知岩石的容重和比重便可求得岩石的密度和孔隙度。

岩石的孔隙度变化范围较大，如粘土质页岩的孔隙度变化范围为 0.4~10%，有的甚至更大。在表 1-1 中列举了部分岩石的以百分数表示的孔隙度。

岩石的透水性强弱与孔隙度有关，孔隙多而大者，透水性亦强。水经常存在并储集于

表 1-1

岩 石 名 称	孔 隙 度 %		
	最 小	最 大	平 均
粘 土	18.3	47.9	26.75
砾石和卵石	15.0	42.0	28.0
粘土质页岩	0.4	10.0	4.0
硅质页岩	0.8	1.5	1.0
第三纪砂岩	2.2	42.0	15.3
第三纪石灰岩			20.0
中生代次生石灰岩	1.2	26.5	11.65
黄 土	30.0	55.0	44.0

地壳的岩体中,当其具有水力坡度时,水渗透于孔隙、裂缝、裂隙、断层和洞穴之中,并在岩石内产生物理的和化学的作用。这些作用或多或少地影响或改变岩石的物理力学性质。

另外,岩石的孔隙度与其容重的关系亦大,岩石的孔隙度越大,则其容重越小。同时,同类岩石的强度与容重也有一定的关系。从表1-2可以看出,容重增加,岩石的强度也相应增大。

表 1-2 岩 石 强 度 与 容 重 之 关 系

石 灰 岩		砂 岩	
容 重	抗压强度(公斤/平方厘米)	容 重	抗压强度(公斤/平方厘米)
2.10	200	1.87	150
2.25	300	1.95	200
2.35	400	2.05	300
2.45	600	2.10	400
2.60	1000	2.20	600
2.67	1400	2.30	700
2.70	1800	2.57	900

4. 岩石的碎胀性及碎胀系数

采掘或崩落下来的碎石,其整个体积大于它在岩体内的体积。这种体积增大的性质,叫做岩石的碎胀性。岩石的碎胀性通常用碎胀系数K表示:

$$K = \frac{V + \Delta V}{V} \quad (1-9)$$

式中 $V + \Delta V$ ——采掘或崩落下来的碎石总体积;

V ——碎石在岩体内的体积。

实践证明,岩石的碎胀系数恒大于一,其数值决定于岩石的组成、结构和强度以及采出碎石的块度大小等因素。致密而坚硬岩石的碎胀系数大于软的或松散岩石的碎胀系数。

对于同一种岩石而言,它的碎胀系数并非常数。刚破碎而堆积起来的岩石碎胀系数最大。经过日晒雨淋以及由于岩石的自重作用而压实以后,系数K值就要变小。此外,矿山压力的作用也能使破碎岩石中的孔隙变小,从而使K值减小。但是,除砂土以外,所有破碎岩石都不可能恢复到原来的体积。

5. 岩石的波速

在弹性体上施加一瞬间的力，使作用点（震源）周围的质点产生位移，这种位移以波动的形式向外传播，从而形成了一种弹性波。

岩石虽非理想的弹性体，但是，如果作用力小和持续时间短，使岩石质点产生的位移非常微小，在其不超出弹性变形范围时，可以把岩石近似地作为弹性体来加以研究。在岩体中激发的弹性振动的频率，在声波范围内（每秒振动几千周到20千周左右）的弹性波称为声波，振动频率超过20千周以上的弹性波称为超声波。

弹性波的传播速度主要决定于介质的弹性模量及其密度。根据弹性波因质点振动的方向与波的传播方向相一致或相垂直，分为纵波（或称P波），和横波（或称S波）。它们的传播速度分别以下式表示：

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{D} \cdot \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1-10)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{D} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (1-11)$$

式中 V_P ——纵波速度；
 V_S ——横波速度；
 E ——岩石的弹性模量；
 μ ——岩石的波松比；
 D ——岩石的密度。

从式（1-10）、（1-11）可以看出，岩体中弹性波的传播速度，基本上决定于岩石的弹性模量、波松比和密度等因素。因此，岩石的某些物理、力学性质的改变，如岩质、密度、裂隙、弹性模量以及岩体应力状态的改变等等，都能直接引起波速、波幅和频率的变化。一般来说，岩性好、结构面不发育、风化微弱、岩石坚硬完整，则波速高、波幅大；反之，岩性差、节理发育、结构松散、风化严重、岩石比较破碎，则波速低、波幅小。应力增大，波速高；反之，则波速低。

近年来，国外在利用弹性波探测技术研究岩体力学和工程地质方面得到了广泛的应用。国内许多单位也正在开展这方面的研究工作，例如，用声波法探测煤矿老窖的位置，以及解决地下工程有关岩体稳定性的问题。

二、岩石的力学性质

岩石的力学性质主要是指岩石的强度性质、单向压缩下应力-应变性质、联合应力下的岩石强度和应力-应变性质以及硬度等等。对于这些性质，这里只作简单的介绍，若需详细而系统的了解，可参阅有关岩体力学方面的著作。

1. 岩石在单向压缩下的应力-应变性质

岩石在外力作用下，其体积和形状发生变化，即通常所称的变形；当去掉外力以后，岩石又能恢复（名义上是全部瞬时恢复，而实际上有一小部分是某一段时间间隔内恢复的）其原来的形状或状态的性质称为弹性。这种性质的变形称为弹性变形。在岩石受到超过一定限度的载荷而发生变形时，当去掉载荷后，其变形不能完全恢复而产生剩余或永久变形，这种变形称为塑性变形。或者按照另外一种习惯说法，塑性变形可以是指材料（这里指岩石）在超过屈服点以后产生的残余应变或变形。有的岩石在外力作用下，没有产生

显著的塑性变形便开始破坏的性质称为脆性。

为便于理解，我们通过图1-1所示的岩石试样在单向压应力状态下的“应力-应变”曲线来说明岩石在外力作用下的变形过程。

图上以纵坐标表示应力 σ ，以横坐标表示应变 ε 。曲线ob由两部分组成，oa段相当于弹性变形段，而ab段表示塑性变形段。a点为岩石的屈服点，它的纵坐标为弹性极限 σ_e （或屈服极限 σ_m ），而b点的纵坐标为岩石试样的抗压强度，以 R_H 表示之。

如果载荷增至a点后除去，则一部分变形立即消失，而另一部分变形则逐渐减小。这种现象称为弹性后效。它往往经过很长时间以后，还留有很小的剩余变形。在实验室测定时，人们就以一定大小的这种剩余变形作为确定弹性极限的公差。一般说来，岩石的弹性极限是个相对数值。它决定于测定变形的精度，精度越高，则弹性极限越小。

岩石在单向压应力情况下的特性，在一定程度上受试验条件的影响。最重要的是岩石试样的长度和直径之比值、加载速度和试样的端部条件。例如，加载速度增大时，岩石试样的强度和弹性模量也随之增加。而岩样的端部条件也常常影响岩样的破坏方式和破坏强度。加垫岩样的放射状向外蠕变的趋势，会引起一种张性劈裂破坏，从而使试样的强度比无垫试样的强度低。所以在试验时，岩样不应加垫层，而且应将其端部磨平。

米勒^[3]根据对28种岩石试验的结果，将单向压应力状态下的“应力-应变”曲线划分为如图1-2上所示的六种类型。由图可以看出，类型I表现为近于直线的特性，直到发生突然的、爆发性的破坏。这是玄武岩、石英岩、辉绿岩和白云岩以及非常坚固的石灰岩的典型特征。类型II是较软的石灰岩、粉砂岩在单向压应力下的应力-应变曲线，它的特点是在接近破坏载荷时，非弹性屈服继续增长。类型III应力-应变曲线是砂岩、花岗岩、平行于叶

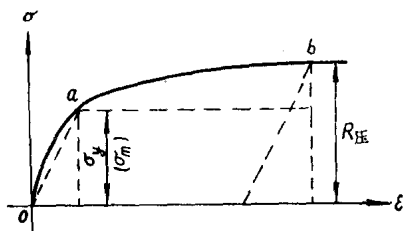


图 1-1 岩石在单向压应力状态下的“应力-应变”图

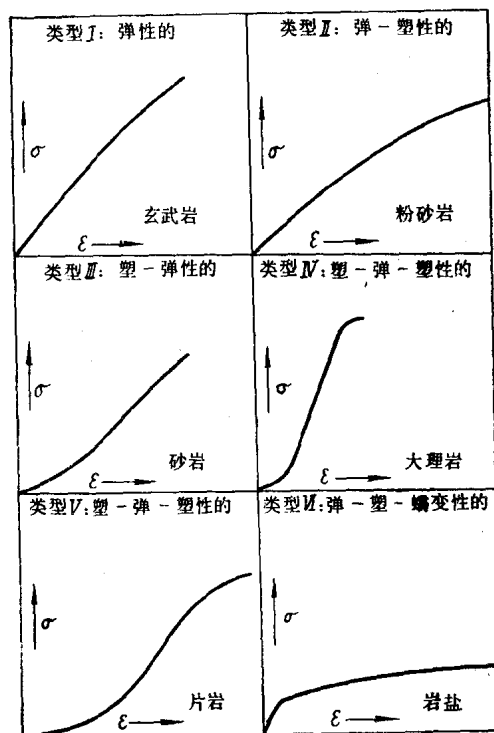


图 1-2 在单向压应力状态下岩石直至破坏的典型应力-应变曲线

理切取的片岩和某些辉绿岩所特有的。变质岩（如大理岩和片麻岩）具有类型IV所示的、中部很陡的S形曲线。只有垂直于叶理切取的片岩试样呈现高度的压缩性，这是S型、类型V的曲线特征。类型III、IV、V曲线的特点都是开始部分呈凹形，而当岩样的微小裂缝或叶理闭合时，则变得较陡。因此，在开始部分之后，是一定的直线段。当趋近于破坏时，

它们逐渐显示出不同程度的非弹性屈服。类型Ⅲ岩石没有显著的屈服，然而，却具有类似类型1岩石那样的脆性型破坏。

类型Ⅵ应力-应变曲线是岩盐的特征，它具有一个小的开始直线段，紧接着是不断增长的非弹性变形和连续蠕变。

从以上岩石的六种类型的应力-应变典型曲线可知，岩石在单向压应力作用下，产生弹性变形、塑性变形和脆性破坏。但也应懂得，岩石的塑性变形和脆性破坏具有相对性。岩石的压应力超过弹性极限以后，是塑性变形还是脆性破坏取决于一系列因素。除了岩石结构、颗粒大小、形状及其胶结物以外，还决定于温度、外力作用的时间和所处的应力状态等条件。试验证明，所有固体的塑性变形均具有不同的速度。在一定温度下，塑性变形速度有一个极限 V_0 ，当变形速度 V 大于此极限 V_0 时，则塑性变形还来不及发展，岩石就发生脆性破坏。反之，若变形速度 V 小于塑性变形速度极限 V_0 ，则岩石发生塑性变形。

岩石的弹性可用岩石的弹性模量 E 和波松比 μ 来表示。弹性模量是变形符合虎克定律的材料（这里是指岩石），在一定载荷条件下所产生的正应力与正应变之比，以下式表示：

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

式中 σ ——试样的应力；

ε ——相应的应变。

波松比：是物体（这里指岩石）在单向应力作用下产生的横向正应变与纵向正应变之比。

$$\mu = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}$$

式中 ε_1 ——横向应变；

ε ——纵向应变。

为了便于参考，表1-3中列出了北京煤炭研究院对峰峰一、四矿的几种岩石的弹性模量的测试结果。

表 1-3

岩 石 名 称	岩 石 特 征	弹性模量 $E \times 10^4$ 公斤/平方厘米(单向压应力状态下)
细 砂 岩	均质、肉红色	3.00
页 岩	砂质、灰黑色	0.77
砂质页岩	深灰色、中粒	1.45
页 岩	灰 黑 色	2.08
页 岩	黑 色	0.79
大 煤	—	0.32
灰 页 岩	—	1.56
石 灰 岩	—	3.20

2. 岩石的强度

岩石的强度是岩石抵抗载荷、防止破坏的能力的指标，根据施加载荷性质的不同而分为抗拉、抗压、抗剪和抗弯强度。岩石的强度指标，一般是以岩石发生破坏（即断裂）前所能承受的最大应力值来表示的。

岩石的强度性质决定于岩石的组成、颗粒结构、胶结物质以及孔隙度、湿度等因素。细粒而胶结紧密的岩石之强度大于同类的粗粒岩石的强度。

岩石所受的应力状态会影响岩石的强度。在三向应力状态下的岩石强度远高于在单向应力状态下的岩石强度。譬如，以混凝土为例，在单向应力状态下，它的抗压强度为175公斤/平方厘米，而在三向应力状态下则增至1700公斤/平方厘米。这主要是侧向应力引起的。一般的说，在三向应力状态下，由于侧向应力的增加，而使极限强度增大，而且在极限破坏时应变较大。此外，岩石在破坏前非弹性应变也随侧向应力增大而增加。

岩石的每一种类型的破坏，都在一定的持续时间和应力条件下表现出来。如果分别以 $R_{拉}$ 、 $R_{压}$ 、 $R_{剪}$ 和 $R_{弯}$ 表示岩石的抗拉、抗压、抗剪和抗弯的强度，则在单向应力状态下它们之间有如下关系：

$$R_{压} > R_{剪} > R_{弯} > R_{拉}$$

$$\frac{R_{拉}}{R_{压}} \approx \frac{1}{5} \sim \frac{1}{38}$$

$$\frac{R_{剪}}{R_{压}} \approx \frac{1}{2} \sim \frac{1}{15}$$

$$R_{剪} \approx \sqrt{\frac{R_{拉} \cdot R_{压}}{3}}$$

根据我国若干煤田的资料，砂岩的抗压强度为140~1900公斤/平方厘米，一般为400~1000公斤/平方厘米；页岩的抗压强度为110~770公斤/平方厘米。这里应该指出的是，就是同名的岩石，它的强度指标变化也是很大的。因此，各生产现场对于具体的岩石，都应通过试验测定它的强度。只有在不具备试验条件时，才按岩石的详细特征，如颗粒结构、容重等因素与别处已知其强度的岩石进行对比，以选用相似岩石的强度，作为它近似的强度数据。现将几种常见的岩石强度指标列于表1-4⁽¹⁾，以供参考。

表 1-4

岩 石 名 称	抗拉强度(公斤/平方厘米)	抗压强度(公斤/平方厘米)
坚硬花岗岩	30~50	800~1200
玄武岩	50~80	2500~3000
致密石灰岩	30~60	1000~1500
多孔石灰岩	10~30	200~500
硬砂岩	40~140	800~1500
中硬砂岩	20~50	400~700
硬泥质页岩	30~40	300~400
中硬砂质页岩	10~20	80~200
煤	—	60~500

3. 主应力、应力圆和最大应力圆包络线

岩石在各向应力状态下的强度特征，可以通过最大主应力圆包络线给以明确的表示。为了说明这一问题，我们首先从岩石内任一点的应力状态说起。我们知道，应力作用的面积是无限小的。因此，作用在一点上的应力可以被看做是作用在由几个无限小的平面所限定的单元体（即正六面体）上。所以，这个单元体的六个面上的应力，就表示岩石内任一

点的应力状态。由此可知,在任何应力状态下,通过岩石内每一点,都有三个互相垂直的断面,在这些断面上只作用有正应力,而剪应力为零。这些断面称为主断面,作用在主断面上的正应力称为主应力。主应力有三个,其中有一个是最大的正应力,按其大小分别以 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 来表示,即 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。举个例子来说,假若岩体内某点的三个主应力分别为500公斤/平方厘米,200公斤/平方厘米,100公斤/平方厘米,则 $\sigma_1 = 500$ 公斤/平方厘米, $\sigma_2 = 200$ 公斤/平方厘米, $\sigma_3 = 100$ 公斤/平方厘米(见图1-3)。

在岩体内任一点,过该点任意斜面上的应力都可以通过主应力表示,其值并决定于斜面法线方向与主应力的交角。

在单向应力状态下(图1-4a),其法线与主应力 σ_1 成 α 角的斜面上的正应力 σ_α 和剪应力 τ_α 按下式求得:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1}{2} (1 + \cos 2\alpha) \quad (1-12)$$

$$\tau_\alpha = \frac{1}{2} \sigma_1 \sin 2\alpha \quad (1-13)$$

当 $\alpha = 0$ 时, $\sigma_{\alpha \max} = \sigma_1$;
 $\alpha = 90^\circ$ 时, $\sigma_{\alpha \min} = 0$;
 $\alpha = 45^\circ$ (和 135°) 时,

$$\tau_{\alpha \max (\min)} = \pm \frac{1}{2} \sigma_1 \quad (1-14)$$

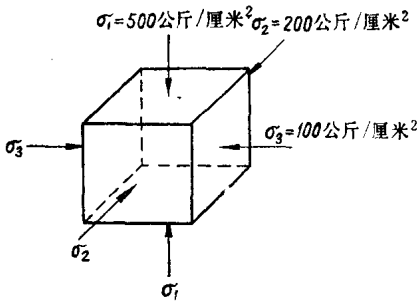
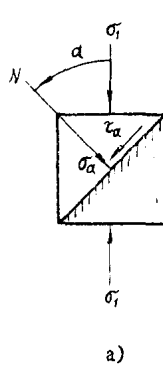
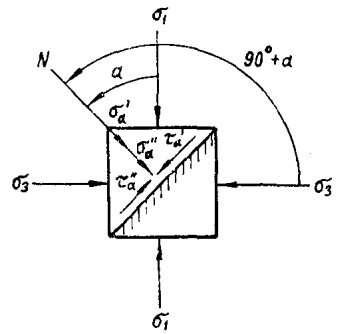


图 1-3 单元体上主应力示意图



a)



b)

图 1-4 单向及平面应力状态下斜面上的正应力与剪应力

在平面(二向)应力状态下(图1-4b),主应力 σ_1 和 σ_3 为已知。斜面上的外向法线 N 对主应力 σ_1 成任意角 α ,而对最小主应力 σ_3 成的角度为 $90^\circ + \alpha$ 。此时,斜面上的正应力 σ_α 及剪应力 τ_α 可以用叠加原理来求。

由式(1-12)和(1-13)可知,当单元体上只作用有 σ_1 时,斜面上的正应力及剪应力应该是:

$$\sigma'_\alpha = \frac{\sigma_1}{2} (1 + \cos 2\alpha) \quad (a)$$

$$\tau'_\alpha = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\alpha \quad (b)$$

同理, 当单元体上只作用有 σ_3 时, 斜面上的正应力应该是:

$$\sigma_a'' = -\frac{\sigma_3}{2} [1 + \cos 2(90^\circ + \alpha)]$$

即

$$\sigma_a'' = \frac{\sigma_3}{2} (1 - \cos 2\alpha) \quad (c)$$

剪应力应该是:

$$\tau_a'' = \frac{\sigma_3}{2} \sin 2(90^\circ + \alpha)$$

即

$$\tau_a'' = -\frac{\sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (d)$$

把 σ_1 及 σ_3 所引起的斜面上的应力迭加起来, 得出:

$$\sigma_a = \sigma_a' + \sigma_a''$$

把式(a)及(c)代入上式, 即得

$$\sigma_a = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (1-15)$$

同理

$$\tau_a = \tau_a' + \tau_a''$$

把式(b)及(d)代入后化简, 即得

$$\tau_a = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (1-16)$$

由式(1-15)和(1-16)可以看出, 岩石在平面应力状态下, 单元体任意一点的应力 σ_a 和 τ_a 由主应力的大小及斜面的法线与主应力之夹角所决定。

方程式(1-15)和(1-16)可以简化如下:

$$\text{令} \quad a = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad b = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

则

$$\sigma_a = a + b \cos 2\alpha$$

或

$$\sigma_a - a = b \cos 2\alpha$$

$$\tau_a = b \sin 2\alpha$$

将上述两式平方然后相加, 得:

$$(\sigma_a - a)^2 + \tau_a^2 = b^2$$

这一方程可视为圆的方程, 也就是说, 它类似于方程 $(x-a)^2 + y^2 = r^2$ 。若以 σ_a 为横坐标, 以 τ_a 为纵坐标, 则该圆的圆心就在 $\sigma_a = a$ 和 $\tau_a = 0$ 这一点上, 该圆的半径就等于 b , 如图1-5所示。

这个圆也就是通常所说的应力图, 它表示了岩石试样内某一点的应力 σ_a 和 τ_a 的轨迹。在图1-5上, 若将 a 和 b 相加, 则可发现该圆上A点的横坐标就代表最大主应力 σ_1 , 亦即代表作用在主平面上的最大主应力。B点的横坐标代表作用在主平面上的最小主应力 σ_3 。

图1-5上E点的坐标, 则代表作用在与最大主应力成 α 角的那个斜面上的应力 σ_a 和 τ_a 。通过分析E点的几何关系, 即可求得圆心角 α' 的大小:

$$\begin{aligned} \overline{OD} &= \overline{OC} + \overline{CD} \\ &= \overline{OC} + \overline{CE} \cos \alpha' \end{aligned}$$

因此

$$\sigma_a = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \alpha'$$