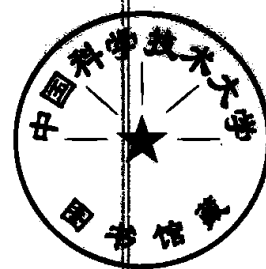


矿山岩层与地表移动

煤炭工业出版社

矿山岩层与地表移动

北京矿业学院 中南矿冶学院 合肥工业大学
矿山测量教研组合编



煤炭工业出版社

1960·5 北京

内 容 提 要

本書系北京矿业学院、中南矿冶学院、合肥工业大学根据教学需要编写而成。

其中共分九章，分别论述岩石物理力学性质、地下及露天开采的岩层移动的观测方法及其成果整理、用相似材料模型研究岩层移动，以及国内外岩层移动观测的主要成果及新的理论。并结合中国各主要矿区的实际观测资料进行叙述。此外对矿山压力计算及观测作了介绍。

本書作为高等学校矿山测量专业试用教材，也可供生产人员及研究人员参考。

1439

矿 山 岩 层 与 地 表 移 动

北京矿业学院
中南矿冶学院 矿山测量教研组編
合肥工业大学

*

煤炭工业出版社出版(社址：北京东长安街煤炭工业部)

北京市书刊出版业营业许可証出字第 084 号

煤炭工业出版社印刷厂排印 新华书店发行

*

开本 787×1092 公厘 $\frac{1}{16}$ 印张 $19\frac{1}{8}$ 插頁 2 字数 124,000

1960年5月北京第1版 1960年5月北京第1次印刷

統一書号：15035·1078 印数：0,001—3,000 册 定价：2.20 元

前 言

1958年党提出的“教育为无产阶级政治服务，教育与生产劳动相结合”的教育方针，在教育战线上引起了深刻的革命，因而教学质量比过去有了极大的提高。为了进一步贯彻这一方针和提高教学质量，编写新的结合中国实际的教材就成为教学工作中非常重要的一环；另一方面，建国十年来由于党的英明领导，在学习苏联的基础上我国工农业生产及科学技术水平已有了极大的提高，这给我们进行上述工作创造了良好的前提。这本高等学校矿山测量专业所用“矿山岩层与地表移动”教材，就是在这一基础上由北京矿业学院，中南矿冶学院，合肥工业大学的矿山测量教师集体合作编写成的。编写中承唐山煤炭科学研究院矿山测量研究室派人参加讨论，并提供了不少有关资料，给了本书编者以巨大的帮助。

本书主要是作为高等学校试用教材的要求来编写的，但同时也考虑到适用于现场参考，因此在书中我们把岩层移动有关的问题作了尽可能完整和系统的阐明，而且叙述比较详细。

由于编者学识有限，特别对于编写这样一本内容相当广泛的教材来说更是如此，因而书中一定有不少不当之处，我们热诚希望读者们提出批评和指正。

编 者 1959.12.30.

目 录

前 言	
緒 論	5
第一章 岩石的物理及力学性質	7
第1节 概述	7
第2节 岩石的物理性質	8
第3节 岩石的力学性質	11
第4节 岩石力学性質的測定	22
第5节 岩体的結構特性	32
第6节 岩体内的应力状态	33
第二章 地下采矿引起的岩层和地表移动过程	36
第1节 岩层和地表移动概述	36
第2节 地表移动的分析及其术语	40
第3节 影响岩层移动过程的主要因素	46
第三章 岩层移动观测	50
第1节 概述	50
第2节 地表观测站	51
第3节 岩层内部观测站	90
第4节 专门观测站	113
第四章 岩层及地表移动观测的主要成果	118
第1节 概述	118
第2节 岩层移动过程的发展及移动变形值的分布	118
第3节 地表移动过程的特性	130
第4节 地表移动及变形的几个主要参数	137
第5节 地表变形对建筑物的影响	139
第6节 安全深度	149
第7节 移动角及类比法	150
第五章 地表移动与变形的預計方法	157
第1节 概述	157
第2节 地表最大下沉值的預計	159
第3节 地表最大垂直变形值的預計	161
第4节 地表最大水平移动与最大水平变形的預計	163
第5节 地表最大下沉速度的預計	164
第6节 盆地内移动与变形值的預計	164
第7节 煤层群开采时地表移动与变形的預計	177
第8节 移动預計方法的应用及实例	179
第9节 与矿层走向斜交的剖面上采动地表移动預計	184
第六章 用相似材料模型研究岩层移动	184
第1节 概述	184

第2节	相似材料模型法的原理	185
第3节	相似材料	190
第4节	制作模型的設備	201
第5节	制作模型的工艺过程	204
第6节	模型上标点移动的观测方法	207
第7节	用相似材料模型研究岩层移动的实例	214
第8节	結束語	219
第七章	建筑物的保护	219
第1节	概述	219
第2节	建筑物的建筑加固措施	220
第3节	保护矿柱的设计	221
第4节	建筑物及水体下的开采	240
第八章	矿山压力和矿山压力现象的观测	250
第1节	概述	250
第2节	稳定矿压计算	252
第3节	冲击矿压	264
第4节	矿山压力现象的观测	267
第九章	露天采矿中的岩层移动问题	277
第1节	概述	277
第2节	边坡与台阶变形的类型及边坡稳定的影响因素	278
第3节	露天矿边坡稳定的基本条件	281
第4节	边坡稳定性计算	286
第5节	边坡移动的矿山测量观测	294

緒 論

为了尽快地把我国建設成为強大的社会主义工业化国家，党领导着全国人民以空前的飞跃速度发展着各种事业。几年来，采矿工业的飞跃发展为整个国民經济，特别是科学技术的发展提供了充分的物質条件，另一方面也正因为整个国民經济不断取得新的巨大成就，才更为有效的保证了采矿工业繼續高速度的发展。在这种情况下，全国的采矿工作者紛紛立下宏伟誓愿：高举总路綫与大跃进的紅旗，永远遵循着党指引的方向，把祖国的采矿事业从一个增产高潮推向另一个更新更大的增产高潮。

大家知道，党对我国采矿工业的基本技术經济政策是要安全与充分合理的开发地下資源。为了正确的貫徹党的这项技术經济政策，要求我国的矿山測量工作者和采矿工作者一起进行很多专门的工作，其中包括研究岩层移动方面的工作。

如各矿經常发生的現象是，当进行井下采矿工作或露天采矿工作时，开采地点附近围岩原有的平衡状态受到了破坏，从而引起了岩层的移动与变形；岩层的这种移动与变形在空間上自采空区起由近及远地向周围扩展，以至达到地表；在時間上由靜止起，經過起始的微小移动、中間的剧烈移动、終了微小移动而到达新的平衡状态为止的整个移动过程，会持續相当长的時間。这种情况下，处在移动范围的井上井下建筑物和其他目的物（如河流、湖泊、道路等）将会受到影响，而发生不同程度的移动与变形，甚至完全破坏。显然，井上与井下建筑物及其他目的物因采矿而遭到损坏，将会直接威胁着采矿工作的安全和其他事业的正常发展。

如我国有些旧矿井井筒曾发生过变形，所有这些均在不同程度上影响着正常使用。又如內蒙古的札賚諾尔煤矿、东北的本溪煤矿、山东的新汶煤矿等矿区内均有較大的河流通过，因为不了解在河下开采而引起的岩层移动規律，因而在这些河流下均留下了較大的煤柱，造成大量煤炭长期被压在地下不能有效地采出。另外，在铁路与房屋下所压的煤不能充份合理开采的也有不少。另一类問題是在露天矿中普遍存在着边坡稳定的問題。大家知道，从經济的观点出发要求露天矿有較大的开采深度和大的边坡角以减少剥离量，但从安全的观点出发，又要求边坡角越小越好；只有把二者很好的統一起来，也就是解决边坡稳定問題，才会安全合理地开采出矿体。

由以上所述不难看出，正确合理的解决矿产資源的充分开发和維護井上下建筑物的安全問題，是采矿事业的重要問題。

为了妥善解决这一重要問題，必須首先解答下列問題：

- 一、岩层移动过程的規律是什么？
- 二、那些因素影响着岩层移动过程的发展？
- 三、用什么方法寻求岩层移动过程的規律和分析各影响因素与移动过程的关系？
- 四、怎样計算地表的移动与变形值？

五、怎样确定不同建筑物和其他目的物（河流、湖泊等）所能承受的土壤变形值？

六、保护建筑物的措施是什么？

系統的討論和解答上述諸問題，就是岩层移动学科的基本任务。

随着人类开发矿产资源的活動不断发展，岩层移动問題会很自然的被提出。我国是利用矿产资源最早的国家，我們的祖先在处理此問題时，当会提出相应的方法，但因历代反动的封建統治，对劳动人民向自然作斗争的功績多不加以記載，故我們祖先在开发矿藏的过程中对待岩层移动問題的观点尚难查清。

根据文献記載，远在17、18世紀时就會有不少的人提出过有关解决岩层移动問題的理論，如法綫理論。此理論的內容是說，岩层弯曲乃至崩落是沿层面的法綫方向进行。所有这些理論都是建筑在各个不同的假定基础上，因而并不能用作解决实际問題的根据。后来，虽然曾为很多人所修正与补充，但因为岩层移动問題的复杂特性所限制，以致今天尚无适用于解决实际問題的完整理論。从岩层移动学科的实际发展过程来看：以实际观测得到一些不同条件下的移动性質与数据之后，再进行理論分析与解釋，从而綜合总结出系統的岩层移动規律的研究方法效果最好。在这方面工作規模最大，成績特別显著的是社会主义国家苏联。在十月革命之前，俄国并未正式开展岩层移动研究，从1932年起，苏联即有中央矿山測量科学研究所（即全苏矿山測量科学研究院）負責組織各主要厂矿和高等学校开展全国性的岩层移动观测与研究的工作。目前苏联各主要矿区已根据多年来的观测研究結果制定出适合其本矿区条件的建筑物保护規程。理論研究与实际观测研究工作仍在繼續进行，但已获得的成果已能有效的解决現阶段生产中所出現的保护井上下建筑物与充分合理开发地下矿产的問題。这一事实再一次有力地証明了社会主义制度的优越性，証明了苏联共产党和政府在全体苏联人民，大規模的进行有計劃的社会主义和共产主义建設的过程中，非常重視地下資源的充分合理开发和劳动人民（采矿工作者和其他企业的工作人員）的安全問題，并十分关怀科学研究工作的发展。

我国在解放前主要矿山为帝国主义与官僚資本主义者所霸占，进行着野蛮的掠夺式开采，对于劳动人民的安全和地下資源的合理开发根本不予重視。在这样的情况下，矿山所出現的岩层移动問題的解决是极无根据的，因而效果也是极坏的。如很多矿山虽然留了保护建筑物的矿柱，但結果还是不能达到保护的目的。

解放后，人民做了国家的主人，很快改变了矿山面貌。煤炭工业部一方面参考苏联研究岩层移动的經驗按类比法制定了保护建筑物的暫行規程；另一方面又組織了各矿山进行观测研究。从1952年起，如淮南煤田已开始設立了岩层移动观测站。1954年全国第一次矿山測量會議以后，設立观测站对岩层移动問題进行观测分析研究的矿山就更多了。1956年唐山煤炭科学研究院矿山測量研究室成立后，全国主要矿山的岩层移动观测与研究的工作即由該室組織与指导。与此同时，有关矿业学院的矿山測量教研組亦参加了协作共同开展此項工作。到目前已取得相当大的成果，如淮南矿务局已根据积累的观测資料編制了“淮南矿区保护建筑物及主要井巷的暫行規程”。其他矿区如开灤、峰峰、枣庄等，亦得到了不少观测成果。所有这些成果对于驗證类比法的正确性和进一步研究各矿区内岩层移动是有很现实意义的。岩层移动的观测分析研究工作还在繼續以更大

的規模进行着。从1958年起，我国已有相似材料模型法进行的实验室內的研究工作。

目前我国研究岩层移动的机构，除了唐山煤炭科学院矿山测量研究室，各矿业学院矿山测量教研組、各生产矿井的测量科(組)之外，还有冶金部长沙矿山研究所、中国科学院长沙矿冶研究所和撫順西露天矿边坡稳定研究室等。

不难看出，我們伟大的祖国在党和各族人民敬爱的領袖毛主席的正确领导下，采矿工业得到空前的发展，对科学研究工作給以很大的重視与关怀，岩层移动的研究机构也从无到有的日益加强起来。在全国人民干劲冲天，意气风发的形势下，岩层移动的研究工作定会迅速取得更大的成就。

岩层移动是介乎力学、地質、采矿、测量四方面之間的学科。因而这四方面的知識是研究岩层移动問題的必要基础。

岩层移动課程将系統地論述：岩石的物理力学性質、地下开采及露天开采条件下的煤矿金屬矿岩层移动問題的发生发展和有关影响因素，岩层移动問題的主要研究方法及已取得的主要成果，以及处理和預防岩层移动有害影响的主要方法。

由于岩层移动过程为很多复杂的自然因素与人为因素所影响，所以在研究岩层移动問題时，必須特別注意准确掌握移动現象、牢牢抓住空間的与時間的条件、深入細致地进行科学分析与归納。任何不实事求是的对待岩层移动的問題都将会导致錯誤的結論。

第一章 岩石的物理及力学性質

第1节 概 述

由于采矿工作破坏了岩层內原有的平衡，使岩层乃至地表发生移动。岩层及地表移动过程的性質决定于許多因素的影响，而岩石的物理及力学性質乃是其中主要因素之一。因此，我們研究有关岩层及地表移动的种种問題时，首先应对于呈現移动的主体——岩石——的物理和力学性質有所了解。因此，本章中将对岩石及其在岩体中的物理、力学性質，表示这些性質的参数以及参数的測定方法加以研究。

岩石是由以矿物胶結物或压力結合在一起的矿物質点(碎屑、顆粒及結晶)所組成的，其中具有孔隙和裂縫。在个别情况下，矿物質点間也可能沒有联系。这时候矿物質点是机械地堆积在一起，而称为松散性岩石。

胶結的岩石虽是有联系的整体，然而，按严格的物理意义來說，岩石不是連續的，因为其中具有孔隙和裂縫。

由于岩石的組成、結構不同，岩石中存在着各式各样的面，如层面、节理面等，并有着不同的方向，因此，大部份岩石是非均質的，是各向异性的。

有时候，由于岩石的孔隙度及結構的非均質性很小；或者虽有許多裂隙，但不能区分出明显的方向，因而可以把岩石近似地看作連續和均質的介質。在这种情况下为了理論上的研究，可以应用以連續函数为基础的数学方法。但是，这些都是近似的，只在一

定程度上为实际观测所证明。所以在岩石力学及岩层移动问题的研究中，试验及观测仍是最主要的方法。

对岩石的物理及力学性质的研究往往都是在试验室内通过岩石试样进行的。岩石试样固然能代表岩层的性质，但是它毕竟不能完全反映岩石在岩体内的性质，如岩层所具有的一些明显的结构裂隙或岩层面的性质在体积甚小的试样上便不可能得到反映。特别需要指出，上述的这些性质对岩层移动过程却有着重大的影响。此外，也还由于在岩体内复杂的应力状态在小块的试样中得不到反映。除了试验室内对岩石试样进行研究以外，还必须研究在岩体内岩层的结构特性及力学性质。

第2节 岩石的物理性质

岩石的力学性质及岩石的物理性质与其构造特征密切相关。我们探明其间的相互联系与变化的规律就有可能判断与推论岩石的其它特性。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、可压缩性等也有所不同。我们所要研究的岩石物理性质，主要有岩石的湿度、容重及比重、密度及孔隙度、岩石的碎胀性。

一、岩石的湿度

岩石中具有孔隙，在孔隙中常含有水份。在含煤岩层中岩石含水较多。

岩石的湿度就是具有自然湿度的试样中含水的重量与绝对干燥的岩石试样的重量之比。岩石的湿度可以用百分数表示如下：

$$W = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100\%, \quad (I-1)$$

式中 P_1 ——具有自然湿度的试样重量；

P_2 ——烘干后岩石试样的重量。

为了准确测定岩石的自然湿度，采样后应自样石打下一小块，放在密封的容器中带回试验室，以免湿度受大气影响而发生变化。

二、岩石的容重及比重

岩石试样之重量与其含孔隙在内的总体积之比谓之岩石之容重，以下式表示：

$$\gamma = \frac{P}{V}, \quad (I-2)$$

式中 P ——具有自然湿度的岩石试样之重量；

V ——岩石试样包括孔隙在内的总体积。

容重有自然湿度容重和绝对干燥容重之分。上式中，如果 P 为绝对干燥试样的重量，则求得者为绝对干燥容重。绝对干燥容重也可按下式换算：

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

式中 γ' ——绝对干燥容重；

W ——岩石的湿度。

岩石之容重可用静水天秤法测定。

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：

$$\delta = \frac{P}{V_1}, \quad (I-4)$$

式中 V_1 ——岩石除去孔隙后的体积。

岩石的比重可用比重瓶法测定。

岩石之比重决定于组成岩石的矿物及胶结物之密度。容重除决定于矿物及胶结物之密度外，还与其中的孔隙度和湿度有关。

济南煤矿管理局科学研究室对賈汪矿的三种岩石测定了容重和比重，其结果见表 I-1。一般岩石的容重及比重参考数字可在有关书籍中查到。

表 I-1

岩石名称	容重 (克/立方厘米)	比重 (克/立方厘米)
砂岩	2.5	2.6
砂质页岩	2.45	2.45~2.5
深灰色页岩	2.45	2.4~2.45

三、岩石的致密度与孔隙度

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致密度，以下式表示：

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

式中符号代表意义同上。

岩石中孔隙所占体积与总体积之比谓之岩石之孔隙度，以下式表示：

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

不难理解，以小数表示的孔隙度与致密度之和恒等于1。

将(I-3)，(I-4)代入(I-5)(I-6)可得：

$$D = \frac{V_1}{V} = \frac{\gamma}{\delta}, \quad (I-7)$$

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

由此，已知岩石干燥试样的容重和比重便可求得岩石的致密度和孔隙度。

坚硬岩石的孔隙度变化范围甚大，如花岗岩孔隙度为0.33~0.38%，而砂岩孔隙度可高达13%。

岩石透水性大小与孔隙度有关，孔隙多而大者，透水性亦强。

岩石孔隙度越大，容重便越小。同类岩石的强度与其容重有一定关系。由表 I-2 可见，容重增加，岩石强度也增大。

岩石强度和容重之关系

表 I-2

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

四、岩石的碎胀性及碎胀系数

采掘下来的岩石，其体积大于在岩体中的体积。这种体积增大的性质，叫做岩石的碎胀性。岩石的碎胀性用碎胀系数 ξ 表示：

$$\xi = \frac{V'}{V}, \quad (\text{I-9})$$

式中 V' ——采掘下来的岩石体积；

V ——岩石在岩体内的体积。

碎胀系数恒大于 1，其数值决定于岩石的组成及结构、强度和由采落方法所决定的块度大小等因素。致密而坚硬岩石的碎胀系数大于软的和松散的岩石。

岩石的碎胀系数也可通过破碎前和破碎后的孔隙度或容重用下式表示：

$$\xi = \frac{1-n}{1-n_p} = \frac{\gamma}{\gamma_p}, \quad (\text{I-10})$$

式中 n, n_p ——岩石破碎前后的孔隙度；

γ, γ_p ——岩石破碎前后的容重。

对同一种岩石而言，它的碎胀系数并非常数。刚破碎和堆积起来的岩石的碎胀系数最大。日久以后，破碎岩石由于自重作用而压实后，系数 ξ 就要变小。水会在一定程度上加速破碎岩石的压固。此外，矿山压力的作用也能使破碎岩石中的孔隙减小，从而减小系数 ξ 。但是，除砂土外，破碎岩石终究不可能恢复它原来的体积。

由于本身重量或矿压作用而压固后的最小的碎胀系数 ξ 称为剩余碎胀系数。

我们用系数 ζ 表示破碎岩石的相对压固程度，即：

$$\zeta = \frac{n_p - h'_p}{n_p - n},$$

式中 n_p ——系数 ξ 为最大值时的破碎岩石的孔隙度；

h'_p ——系数 ξ 为最小值时的破碎岩石的孔隙度。

系数 ξ 于1。数值越接近于1，说明破碎岩石压实程度越高。系数 ξ 大的岩石不宜于用作采空区的充填材料。

在处理许多采矿问题时都利用碎胀系数，如顶板管理、充填采空区、矿石装运以及有关排石场问题等。在处理不同问题时，碎胀系数 ξ 的确定方法也不应相同。

地下开采破坏了复盖地层，整体的地层破坏后体积稍大于原来体积。此时，岩石碎胀系数大致相当于该岩石的剩余碎胀系数。按苏联里昂托夫斯基的资料，这种情况下的碎胀系数对于软岩层为1.020，中硬岩层为1.025，坚硬岩层为1.030。

几种岩石和煤的碎胀系数见表 I-3。

碎胀系数表		表 I-3
岩 石	碎 胀 系 数	
	新采落岩石的	剩 余 的
有联系的砂子	1.05~1.15	1.01~1.03
粘土	1.20以下	1.03~1.07
碎煤	1.20以下	1.05
泥质页岩	1.40	1.10
砂质页岩	1.60~1.80	1.10~1.15
硬砂岩	1.50~1.80	—
一般软岩石	—	1.020
一般中硬岩石	—	1.025
一般硬岩石	—	1.030

第3节 岩石的力学性质

本节研究岩石的力学性质，主要是研究岩石的强度性质和应变性质，以及确定表示这些性质的参数。除此以外，还有专门性的研究，如岩石力学性质与岩石组成及结构的关系及其变化的规律，岩石粒度结构对岩石连续性的影响，和用计算变异数的方法判断岩层的均质程度等问题的研究。这些专门问题在本节内不加讨论。

由于胶结岩石和松散岩石的力学性质有很大不同，所以我们分别加以研究。

胶结岩石的力学性质

一、岩石的应变性质

岩石受到外力作用，其体积和形状发生变化，即产生变形；当外力去掉后又能恢复其原来的状态的性质称为弹性。这种性质的变形称为弹性变形。岩石受到超过一定限度的载荷而变形，当载荷去掉后，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。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。

我们可以通过如图 I-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 Δl 。

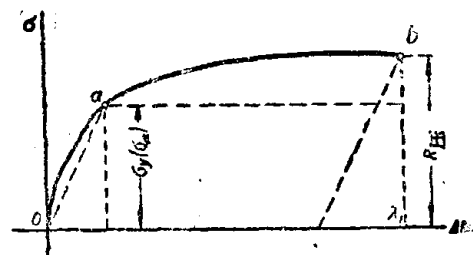


图 I-1 岩石试样在单向压应力状态下的“应力—应变”图

曲綫 ob 由两个部分組成。 oa 段相当于弹性变形段，而 ab 段表示塑性变形段。 a 点的縱坐标为弹性极限 σ_y (或屈服极限 σ_m)，而 b 点縱坐标为岩石試样的抗压强度，以 $R_{\text{压}}$ 表示之。

如果載荷增至 a 点后除去，則一部分变形立即消失，而另一部分变形則逐漸减小。这种現象称为弹性后效。往往經過很長時間后，还能看到有很小的剩余变形。在實驗室測定中，就以一定大小的这种剩余变形作为确定弹性极限的公差。一般說来，岩石弹性极限是个相对数值，它决定于測定变形的精度。精度越高，則弹性极限越小。

在 ab 段的塑性变形过程中，在試样中产生与作用力成一定角度的滑移面。在如图 I-1 所示的情况下，岩石試样产生加固，即在增加应力的情况下产生塑性变形。

有些岩石在应力超过弹性极限后，产生蠕变，即应力并不增加，但变形却随時間而发展。一些井巷在开凿后頂板在很長時間內繼續緩慢下沉而沒有破裂就是这种蠕变的表現。

大多数坚硬致密岩石是弹性塑性体，在常温下岩石受单向压縮时，載荷增加快，岩石呈弹性变形。反之，若載荷增加得慢，那么当所加载荷仅为强度极限的 10~15% 时，便可能产生塑性变形。

岩石的弹性可用弹性模数 E 和波松比 μ 来表示。弹性模数是应力与应变之比，以下式表示：

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

式中 σ ——試样的应力；

ε ——相应的应变。

在应力不变的情况下，岩石的弹性模数越大，則变形越小。試样在負荷作用下，除产生縱向变形外，还产生横向变形。横向变形是通过波松比 μ 以下式表示：

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

式中 ε ——縱向变形；

ε_1 ——横向变形。

这些参数被称为岩石的弹性常数，可以用力学試驗方法測定。

坚硬岩石都具有弹性，但是弹性范围不大。在弹性变形阶段內，“应力——应变”关系不是直綫，不合虎克定律，而存在着似直綫的比例关系。因此对岩石一般只提出岩石弹性模数的平均值。

岩石的弹性是各向异性的。沉积岩的弹性常数沿各个方向均不同。載荷平行于层理方向时的弹性常数一般大于垂直于层理的方向。例如，砂岩在平行于层理施压时的弹性模数为 $5.0 \times 10^5 \sim 5.5 \times 10^5$ 公斤/平方厘米，而在垂直于层理方向时則为 $3.4 \times 10^5 \sim 4.3 \times 10^5$ 公斤/平方厘米。

岩石弹性极限和弹性常数对不同性質的載荷是不同的。压应力情况下的弹性极限要高于张应力时的弹性极限，前者的弹性常数也大于后者。

表 I-4 内的数据，为北京煤炭科学研究所对峰峰一、四矿几种岩石的弹性常数的試驗結果。

峰峰矿岩石弹性常数

表 I-4

岩石名称	岩石特征	弹性模数 $E \times 10^5$ 公斤/平方厘米 (单向压应力状态下)
砂岩	均質、肉紅色	3
頁岩	砂質、灰黑色	0.77
頁岩	深灰色、中粒	1.45
頁岩	灰黑色	2.08
頁岩	灰黑色	0.79
大灰石	—	0.32
頁岩	—	1.56
灰岩	—	3.2

表 I-5 系苏联頓巴斯岩石弹性常数試驗結果，由此表我們可以看到上面所討論的岩石弹性常数的特征。

岩石的塑性和脆性是相对的。岩石的应力超过弹性极限后是塑性变形抑脆性破坏决定于一系列的因素。除了与岩石結構、顆粒形状及大小，顆粒与胶結物的变形有关外，还决定于温度、外力作用時間和所处的应力状态等条件。試驗証明，所有固体的塑性变形具有不同的速度，在一定温度下，塑性变形速度有一定的极限 v_0 。如果变形速度 v 大于此极限 v_0 ，那么塑性变形还来不及发展，而发生脆性破坏。

頓巴斯岩石弹性常数

表 I-5

岩石名称	弹性模数 公斤/平方厘米						波松比			
	伸 张		压 縮		弯 曲		伸 张		压 縮	
	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥
泥質頁岩	—	400×10^3	154×10^3	316×10^3	123×10^3	160×10^3	0.26	0.30	0.22	0.22
砂質頁岩	—	—	242×10^3	363×10^3	124×10^3	141×10^3	—	—	0.16	0.25
砂 岩	—	390×10^3	398×10^3	347×10^3	137×10^3	161×10^3	—	—	0.13	0.13
石 灰 岩	—	—	725×10^3	636×10^3	—	—	0.17	0.12	0.30	0.28
煤	—	—	$6700 \sim 8500$	$5500 \sim 8500$	—	—	—	—	—	—

反之，若变形速度 v 小于塑性变形速度极限 v_0 ，則岩石是塑性变形。

岩石的塑性变形与脆性破坏和应力状态的关系可从图 I-2 所示的曲綫上看到。图 I-2 的曲綫是在三向应力状态下对砂岩作試驗的結果所表明的应力 ($\sigma_2 - \sigma_1$) 与应变的关系。由图中可見，在单向压縮时 ($\sigma_1 = 0$)，砂岩的变形总共才 0.5%，呈脆性状态而破坏；而在侧压力 $\sigma_1 = 2475$ 公斤/平方厘米时，它能維持变形到 7% 以上，即大 15 倍，呈塑性状态变形。

有些岩石具有較大可塑性，如粘土、泥質頁岩等。这是由岩石的結構特性所决定的。可塑性岩石結構的特点是，顆粒极小，最大粒度不超过 0.005 毫米；顆粒呈鱗片状，

含有极小的胶性颗粒和水。

粘土的粘結性是由毛细管粘聚力所引起，好象坚硬岩石中由分子间的内聚力和结构内聚力产生内聚力一样。粘土的粘結力决定于孔隙度和湿度，它随孔隙度、湿度的增加而减小。

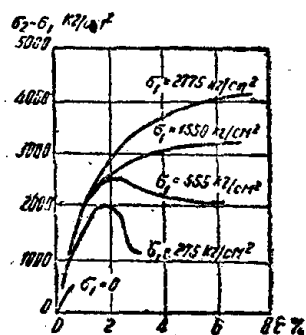


图 I-2 在三向应力状态下应力 $\sigma_2 - \sigma_1$ 与应变 ϵ 间的关系

粘土的力学性质决定于其湿度。湿度减小，则弹性模数增大。同样，抗压能力也随湿度减小而增大。试验表明，含水的粘土受压而没有排水的可能时，粘土压缩甚小。相反，如果水有可能排出时，粘土内空隙减小，含水减少，粘土开始压固。压固的速度将取决于水排出的速度，即水过滤的速度。因此，粘土的可压缩性决定于水过滤的速度。

上面我们讨论了岩石变形的一般性质。最后应该指出，对岩石的弹性和塑性目前研究得还不足，特别是对于复杂岩石（如花岗岩）。对于这种岩石，其中一种成份颗粒呈脆性破坏时，另一种成分的颗粒却可能呈现塑性变形。此外岩石在高压三向应力状态下的力学性质研究得很少。这是由于高压三向应力状态下试验技术的复杂性所致。

二、岩石的强度性质

岩石的强度是岩石抵抗载荷防止破坏的能力的指标。由载荷性质不同而分为暂时抗拉、抗压、抗剪和抗弯强度。岩石的这些强度指标一般是以岩石发生破坏时的主应力值表示，通过机械试验测定。

岩石的强度性质决定于：岩石的组成、颗粒结构、胶结物性质及孔隙度、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。

岩石的强度性质亦与应力状态有关。在三向应力状态下，岩石强度远高于单向应力下岩石的强度。譬如，以混凝土为例，在单向应力状态下，暂时抗压强度为175公斤/平方厘米；而在三向应力状态下增至1700公斤/平方厘米。

岩石抵抗各种类型载荷的能力不同。如果分别以 $R_{拉}$ 、 $R_{压}$ 、 $R_{剪}$ 和 $R_{弯}$ 表示岩石的抗拉、抗压、抗剪和抗弯强度，则单向应力状态下它们之间有如下关系：

$$R_{压} > R_{剪} > R_{弯} > R_{拉},$$

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

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

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

按我国若干煤田的资料，抗压强度，砂岩为140~1900公斤/平方厘米，一般为400—1000公斤/平方厘米；页岩为110—770公斤/平方厘米。

表 I-6 中列出几种常见岩石的强度指标，以供参考。应该指出，同名岩石强度指标