

高等学校教学参考书

煤矿地下结构

〔英〕 I. W. 法默 著
田家裕 等译

煤炭工业出版社

高等学校教学参考书

煤矿地下结构

[英]I.W.法默 著

田家裕等译

煤炭工业出版社

内 容 简 介

本书是一本综合论述煤矿地下结构的专著。书中系统阐述煤系地层岩石的性质,矿房和矿柱设计,岩石突出和不稳定性,井巷、硐室以及采煤工作面岩层的变形与支护,并详细介绍了现场测试及数据处理方法等内容。

本书的特点是将工程设计原则应用于煤矿主要地下结构物,从实例引入,再上升到理论,是一本理论联系实际的参考书。

本书可作为采矿工程、地下建筑、岩土工程、铁路建设、地质工程等专业师生和研究生的教学参考书,也可供在上述工程领域从事科研、设计和施工的工程技术人员参考。

责任编辑:吴秀文 张乃新

Palmer, I. W.
COAL MINE STRUCTURES
First Published 1985 by Chapman and Hall Ltd. London

高等学校教学参考书
煤 矿 地 下 结 构

[英] I. W. 法默 著
田 家 裕 等 译

煤炭工业出版社 出版
(北京安定门外和平里北街21号)
北京京辉印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092 \text{ mm}^1/16$ 印张 $12^{7/8}$
字数 304 千字 印数 1—1,245
1990年11月第1版 1990年11月第1次印刷
ISBN 7-5020-0444-0/TD·403
书号 3230 定价 2.55元

译者序

英国法默教授1985年来华讲学期间，详细介绍了他当年的新著《煤矿地下结构》，深受听讲人士和参加座谈讨论的同行专家的欢迎。事后，许多从事矿山压力研究和生产实际工作的同志希望得到该书的中译油印稿。我们向原煤炭工业部教育司教材编辑室推荐了这本书，建议正式翻译出版，得到了教编室的支持。

近年来，国内外出版了一些岩石力学和矿山压力方面的著作，但专门论述煤系地层地下结构物的专著为数不多。

本书密切结合煤矿生产和煤系地层特点，系统地阐述了各种地下结构物的特点、设计、维护、观测和改善的途径。本书资料丰富，分析详细，结论明确。用围岩变形特征来解释地下结构物的性能是本书较突出的特色。可以预料，本书翻译出版对我国矿山压力研究和生产实际工作将会有所裨益。

本书翻译工作由田家裕同志负责组织，汪浩同志进行了初审校，最后由田家裕同志审校定稿。各章译者为：第一、二章汪浩；第三、四章剑万禧；第五、六章冯震海；第七、八章田家裕。

译者

1987年6月

前 言

《煤矿地下结构》是根据太恩 (Tyne) 河口的纽卡斯尔 (Newcastle) 大学从1976年至1982年6年间完成的英国煤矿地下巷道性态 (项目编号7220-AC/806和7220-AC/814) 研究成果编写的。该项目由英国国家煤炭局和欧洲煤钢联营委员会提供经费。本书内容虽已扩大到包括了英国和其他国家的有关资料, 但仍有意识地保留以专门——虽然内容广泛——研究计划为基础的个人观点。本书不想全面阐述井筒、石门、煤房、煤柱和长壁式开采的情况, 也不打算作为一本设计手册, 主要目的是通过十分详细地实验室和现场数据的分析, 说明如何用围岩的变形特征来解释某些地下结构在采矿过程中所表现的性态。

本书是根据英国国家煤炭局所属煤炭科学研究院的工程师和纽卡斯尔大学的研究助手、研究生的观测报告编写的, 在此向他们致谢。特别感谢英国国家煤炭局的 A. H. Wilson 博士和 M. J. Bell 先生、P. F. R. Altounyan 博士、P. Garrity 博士、P. Holmes 博士, 纽卡斯尔大学以前的 P. D. Shelton 博士, 印度采矿中心研究站的 R. N. Gupta 博士, Dhanbed, Keele大学的 N. J. Kusznir 博士和 Warwick 大学的 A. M. Price 博士。

I. W. 法默

亚利桑那大学

目 录

第一章 煤系地层岩石的性质	1
1—1 煤系地层岩石	1
1—2 煤系地层岩石的变形特征	3
1—3 岩石变形的一般描述	8
1—4 煤系地层底板粘土岩的变形	11
1—5 剪切带	17
1—6 断层、节理和解理	21
第二章 矿房与矿柱设计	26
2—1 作用于矿柱上的压力	26
2—2 矿柱中的应力分布	30
2—3 矿柱的强度	32
2—4 矿柱破坏机理	34
2—5 矿柱设计	38
2—6 矿房的顶板稳定性	39
2—7 矿房的支护	46
第三章 隧道与巷道	50
3—1 隧道围岩的应力分布	50
3—2 岩石变形与支护	52
3—3 隧道支护	59
3—4 作用于支架上的压力	67
3—5 铸铁丘宾筒支架上的应力	69
第四章 立井井筒与马头门	78
4—1 井壁设计	78
4—2 塞尔比煤田井壁性质	80
4—3 马头门设计	87
4—4 施工期的马头门性质	91
4—5 施工后的支架性能	94
第五章 长壁工作面上覆岩层的变形	99
5—1 岩层变形的典型实例	99
5—2 岩层变形机理	105
5—3 岩层垂直下沉和地表下沉	107
5—4 垮落性的概念	111
5—5 由于地层变形引起的水流	113
第六章 工作面巷道和巷旁充填	122
6—1 工作面巷道的变形	124
6—2 充填材料的压缩性	130
6—3 围岩地质因素的影响	134

6—4 巷道变形的预计.....	137
第七章 采煤工作面岩层的变形与支护	141
7—1 顶板和工作面的稳定性.....	142
7—2 工作面顶板支护.....	147
7—3 工作面支架设计.....	149
7—4 工作面支架的初撑力.....	153
7—5 初撑力与顶板的稳定性.....	159
第八章 岩石突出和不稳定性	167
8—1 煤矿中的岩石突出.....	167
8—2 煤的突出.....	172
8—3 煤岩互层的相互作用.....	176
8—4 顶板垮落时的破坏.....	184
参考文献	186

第一章 煤系地层岩石的性质

由于各种岩石的破坏特性不同，因此沉积岩层中的工程结构物设计是很复杂的。从工程角度看，“破坏”并不是一个容易确定的状态，它既可以表现为强度的降低，也可以表现为过度的变形。例如，较坚硬的岩石或者在低围压下的岩石，一般表现为伴有能量释放和体积膨胀的断裂而破坏，同时其承载能力也从峰值降到残余强度。就采煤工程而言，这种破坏的形式将表现为长壁开采过程中煤层上覆坚硬砂岩层的垮落；或在长壁开采、短壁开采或房柱式开采中表现为隔离煤柱的崩落。

较软的岩石，或在高围压下的岩石的变形一般是均匀的，并伴有体积的轻微膨胀和承载能力的不断增加。但是，这类岩石的变形往往相当大，以致于使结构物无法继续使用，其结果和结构物的破坏是相同的。在采煤工程中，这种急剧的、近似于塑性的变形，尤其和煤层底部软弱的或被剪切的粘土岩有关，这类粘土岩会引起长壁工作面出入巷道顶底板大规模的收敛。

当然，岩石的破坏不只是和原岩的变形有关。沉积岩中含有层理面（通常本身含有接触面或其他剪切带）、断层、节理和其他不连续面。这些都影响岩石，特别是较坚硬岩石的性质。事实上，因采掘而改变了地下环境，地下建筑物变形的最常见形式是在重力影响下以不连续面为边界的岩块的松动。人们往往会忽略地下建筑物的挖掘除了会改变应力场和引起重力作用之外，还会改变岩石中空气和水的运动形式。

因而，在试图说明煤矿典型例子的数据之前，用非常简单的方法概括一些控制煤系岩石变形和破坏的因素是十分重要的。

1—1 煤系地层岩石

英国的含煤地层主要是由泥岩、砂岩、粘土岩和煤层组成，这些岩层呈一系列有规律性或周期性的顺序排列。这种顺序或沉积旋回在煤田范围内和在沉积顺序上都有变化。煤层及其底板粘土岩层，位于旋回的中央。煤层底板粘土岩的变化很大，可以是软的有机耐火粘土或是硬的致密细晶硅石。煤层的平均间隔为10m。分隔煤层的沉积层，通常含有不同比例的粘土矿物和细粒石英。沿沉积顺序向上，粘土矿物逐渐减少而细粒石英逐渐增加。因此，尽管煤层上部是砂岩层的情况并不少见，但更普遍的顺序则是煤层上部为硅质页岩和泥岩，接着是位于上部煤层底板粘土岩下的粉砂岩、砂岩和砾岩。泥岩中含有碳酸盐类，主要是褐铁矿，有时在煤层上部也会出现薄层状的海相石灰岩。

英国煤田特有的这种地层类型实际上在所有烟煤和无烟煤矿床都普遍存在，但偶尔也有厚度上和岩层排列顺序上的重大变化，譬如印第安（Indian）煤田，砂岩在地层中的比例在64~95%范围内变化，个别砂岩层厚可达50m[萨色纳（Saxena）和辛（Singh），1982]。在肯塔基（Kentucky）的阿巴拉契亚（Appalachian）煤田，厚层坚硬砂岩是地层的特征之一，[豪厄尔（Howell）、赖特（Wright）和迪林格（Dearinger），1976]这样的砂岩在英国煤系地层中也可见到，但很少。

虽然普赖斯 (Price, 1966) 已经证明粘土矿物含量和强度之间存在着相反的相互关系, 但煤系地层的多变性和许多不明显岩性界限的存在, 就意味着很难准确地将岩性描述和任何工程描述联系起来。为了能够把岩性学和简单的试验结果联系起来, 戴维斯 (Davies, 1977) 曾把标准试验资料收集在一起。这些试验资料是由英国煤炭部 (NCB) 所属煤炭科学院 (MRDE) 从英国各煤田的一组煤系地层的 927 个岩石试样的试验中获得的。这些试验包括抗压强度、抗拉强度、回弹硬度值、比能指数和耐磨蚀性等试验。根据列出的岩性种类, 在表 1-1 中收集了抗压强度的资料, 沃雷 (Worrey, 1978) 计算检验这些资料的平均范围和标准离差, 表明岩性种类之间及各类岩石内部的一致性极差。譬如砂岩, 除了归入中粒砂岩一类的以外, 其他类的试样中均有抗压强度低于泥岩的平均强度的试样, 但一般说来砂岩强度要比粘土岩强度高。最弱的岩石是被剪切的、具有擦痕面或光面的泥岩和粘土岩。

表 1-1 英国煤系岩石的抗压强度 (MNm^{-2}) (戴维斯, 1977)

岩石种类	平均	方差	标准离差	最小值	最大值	范围	试件编号
砂岩	96.3	1582.0	39.8	27.1	303.0	235.9	123
粗砂岩	48.7	68.3	8.2	36.2	56.3	20.1	5
中粒砂岩	94.5	961.7	31.0	49.0	177.9	128.9	22
细砂岩	108.8	2130.0	46.2	34.9	221.2	186.3	47
炭质砂岩	73.6	918.6	30.3	19.1	146.6	127.5	17
松散砂岩	41.9	211.6	14.5	27.4	55.8	28.5	4
粉质砂岩	76.9	579.6	24.1	32.0	139.0	107.0	55
粉砂岩	65.2	551.3	23.5	17.7	236.3	218.6	161
砂质粉砂岩	67.8	462.4	21.5	35.3	121.3	86.0	42
泥质粉砂岩	59.2	286.9	16.9	24.4	119.2	94.8	49
菱铁矿砂岩	91.1	1458.1	38.2	42.1	115.7	73.6	14
粉砂褐铁矿	68.2	280.5	16.7	47.6	93.0	45.4	5
褐铁矿	114.1	1219.6	34.9	51.8	142.0	90.2	16
泥岩	38.7	219.3	14.8	3.4	74.8	71.4	53
粉质泥岩	52.3	390.0	19.7	21.0	104.8	83.8	49
页状泥岩	31.1	304.6	17.4	7.6	75.1	67.5	13
炭质泥岩	43.4	690.1	26.3	19.9	149.7	129.8	33
铁质泥岩	79.1	2563.1	50.6	40.7	152.7	112.0	4
泥岩褐铁矿	52.8	85.1	9.2	42.8	63.8	21.0	5
擦痕光面泥岩	25.2	10.9	3.3	19.7	28.6	8.9	6
光面泥岩	28.1	73.1	8.5	15.8	41.4	25.6	9
砂质粘土岩	63.5	155.6	12.5	48.8	89.9	41.1	10
粉质粘土岩	48.7	230.5	15.2	26.7	81.3	54.6	41
粉泥质粘土岩	39.1	62.7	7.9	25.3	58.9	33.6	25
泥质粘土岩	30.5	109.6	10.5	4.7	56.5	51.8	47
光面泥质粘土岩	26.6	23.6	4.9	21.8	33.1	11.3	4
擦痕光面泥质粘土岩	19.3	178.7	13.4	5.5	37.8	32.3	5
煤	30.4	154.3	12.4	11.9	55.0	43.1	53
暗木质煤	48.3	58.5	7.6	41.0	60.6	19.6	5
暗煤	26.0	165.1	12.8	15.8	43.8	28.0	4
镜煤	29.7	51.8	7.2	20.0	37.9	17.9	6

然而, 最重要的是这些资料对岩石性质的描述是不能令人满意的。那么, 什么才是真正所需要了解的呢? 在煤矿开采的实际应力条件下, 应该说变形特征的定性描述比强度的定量

描述更有价值。

1—2 煤系地层岩石的变形特征

一般岩石（包括一部分煤系岩石）的变形特征，在《岩石的工程性质》一书中〔法默（Farmer），1983〕已进行了描述。为了确定与井下结构物设计有关的岩石变形特征，任何实验室的试验方案都必须体现以下一些特点：

1. 试验机必须能够模拟试件周围理想化岩体或连续介质的性质。因此，当试件开始破坏而不能再传递力的时候，就必需迅速将这些力转移掉（就象在巷硐周围发生的情况一样），以便进一步研究岩石的残余强度。这就需要有一个有伺服控制系统的试验机。

2. 试验设备必须能够施加与煤矿中实际条件相似的侧向约束力。这就需要有可达 40 MNm^{-2} 侧向压力的三轴压缩机，能够得到水平和垂直应力分量相等的静水应力场中约 1500m 深度处的水平压力。

3. 试验设备必须能够使试件产生足够大的变形以充分发挥岩石的残余强度。

4. 试验设备必须能够测量变形过程中的膨胀和体积应变，以便于估算地下巷道的周边移近量。

在作者的实验室里设计了一种能符合这些要求的三轴试验机，它的特性和试验方法由普赖斯（1979）作了详细说明，法默（1983）也作了概述。应用这种压力机对直径为 75mm，

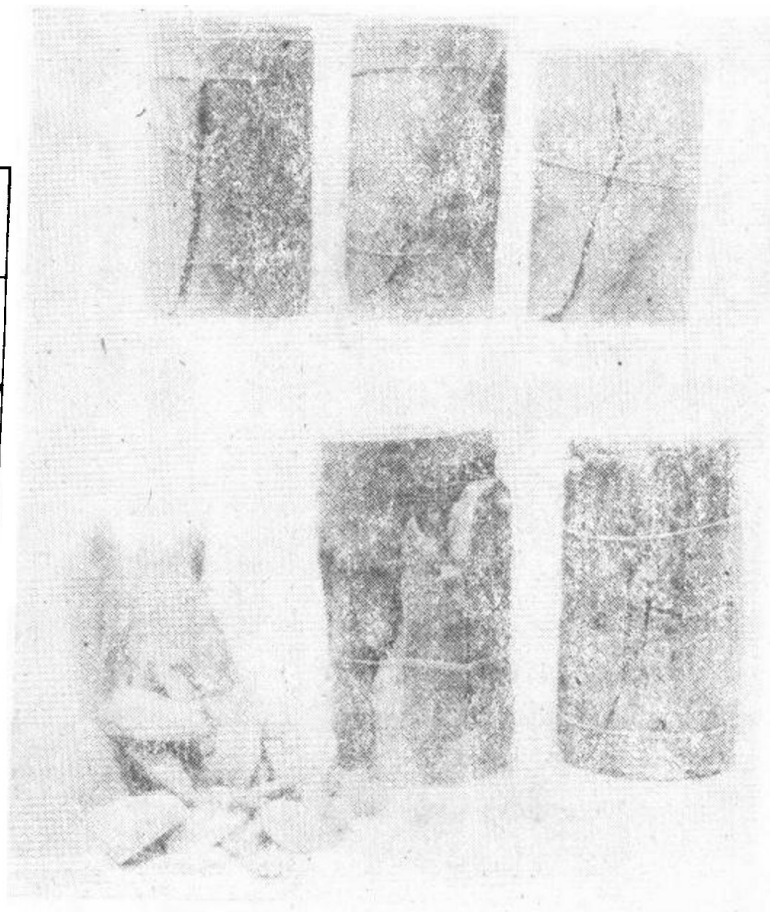
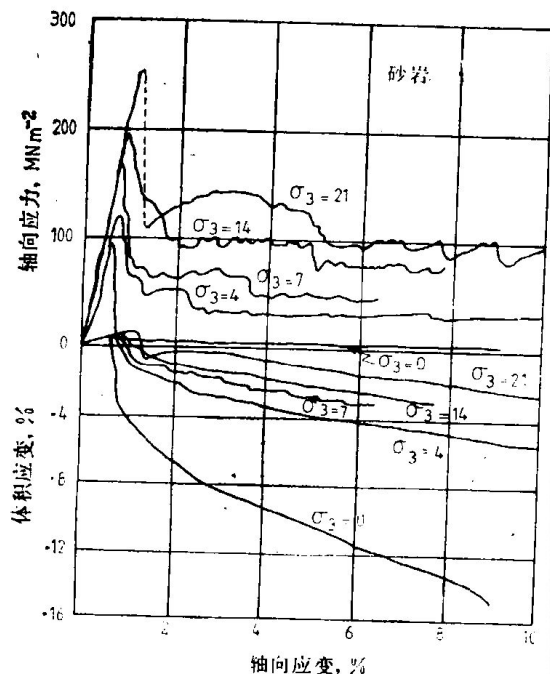


图 1-1 煤系砂岩试件三轴压缩下的轴向应力-轴向应变，体积应变-轴向应变关系曲线，侧压力范围从 0 到 21 MNm^{-2} 。照片是直径为 75mm 试件的破坏情况，侧压力为：下行从左至右为 4，7， 7 MNm^{-2} ，上行从左至右为 14，14， 21 MNm^{-2} （法默，1983；普赖斯，1979）

高150mm的岩石试件，用 $21\mu\text{s}^{-1}$ 的恒定应变速率进行了三轴抗压试验。试件取自英国北部地区的伍德霍恩（Woodhorn）煤矿蒂里（Tilley）（P）煤层上部的三种典型煤系岩石和一种三叠纪泥灰岩。试验结果见图1-1~图1-4。

其中砂岩是典型的中粒煤系砂岩，容重（重度）为 25kNm^{-3} ，孔隙比为0.07，抗压强度

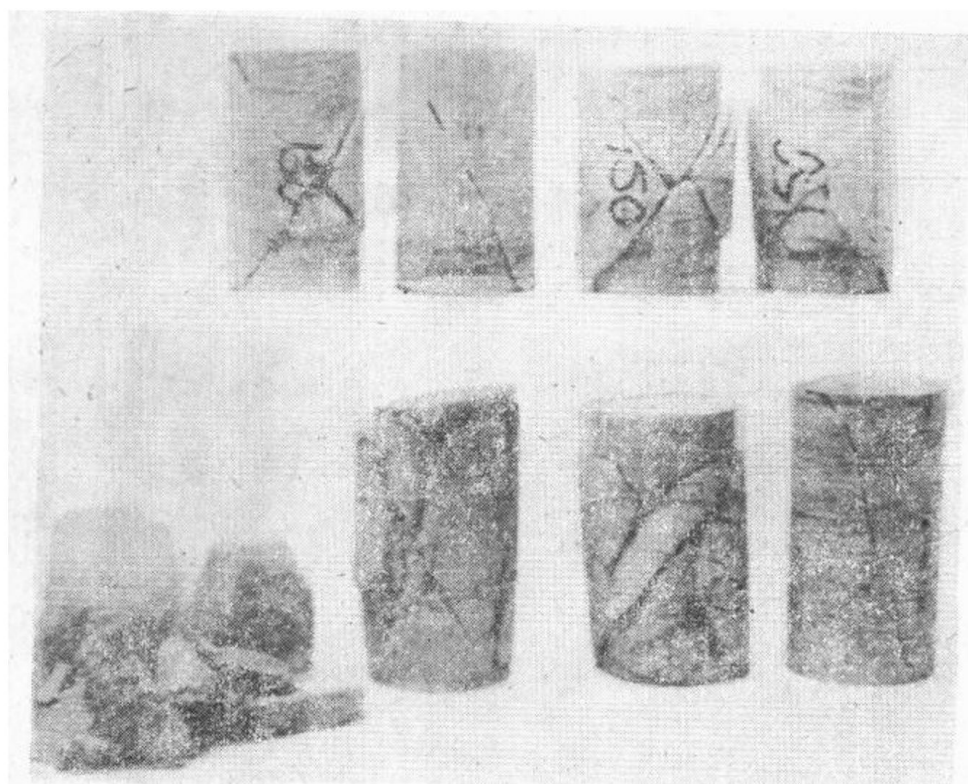
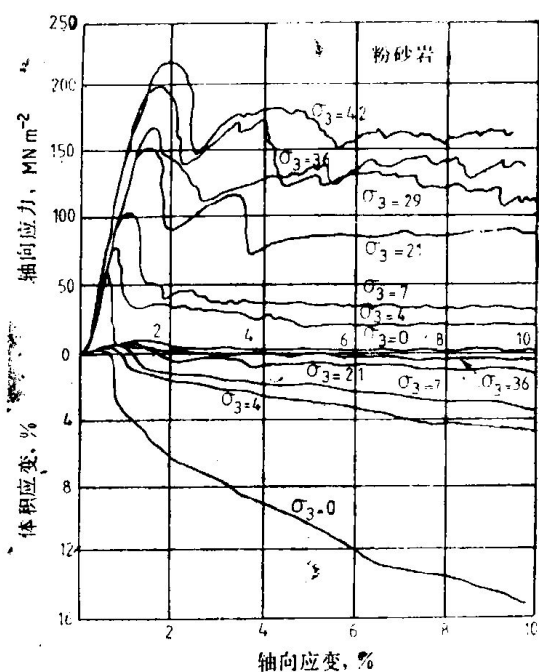


图 1-2 煤系粉砂岩试件三轴压缩下的轴向应力-轴向应变，体积应变-轴向应变关系曲线，侧压力范围从0到 42MNm^{-2} 。照片是直径为75mm试件的破坏情况，试验侧压力为：下行从左至右为0，4，7，14 MNm^{-2} ，上行从左至右为21，29，36，42 MNm^{-2} （法默，1983；普赖斯，1979）

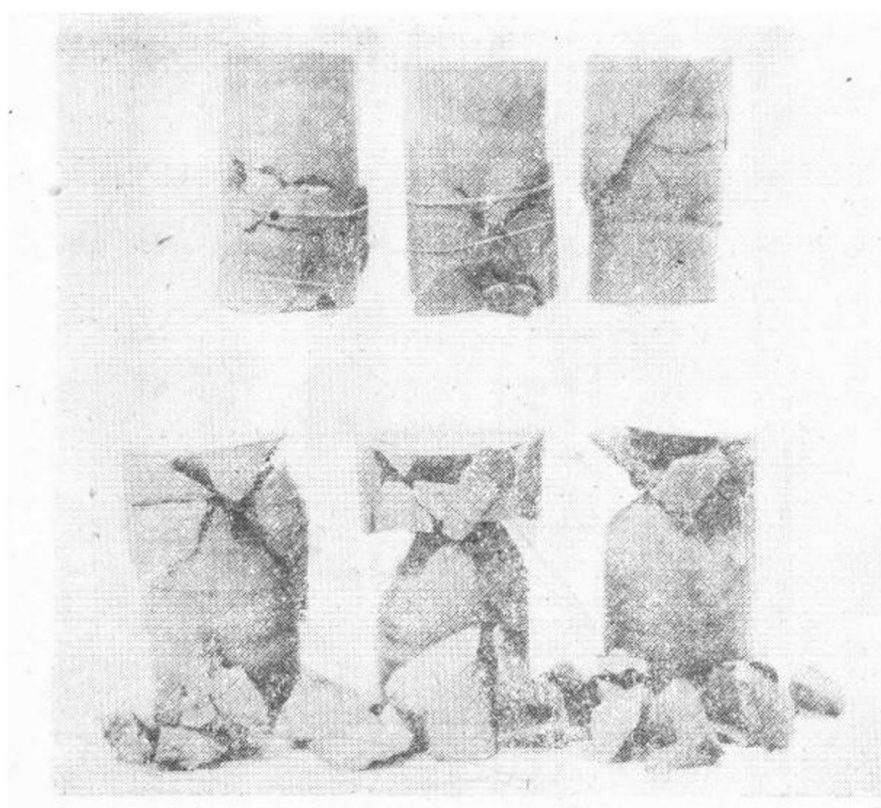
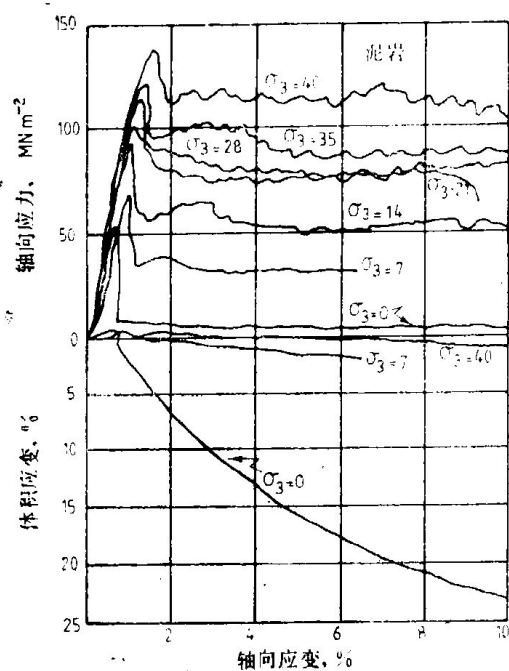


图 1-3 煤系泥岩试件三轴压缩下的轴向应力-轴向应变, 体积应变-轴向应变关系曲线, 侧压力范围从 0 到 40MNm^{-2} 。照片是直径为 75mm 试件的破坏情况, 侧压为: 下行从左至右为 7, 14, 21MNm^{-2} ; 上行从左至右为 28, 35, 40MNm^{-2} (法默, 1983; 普赖斯, 1979)

为 97MNm^{-2} 。试验这种岩石所遇到的困难是在高侧压条件下达到极限强度时, 试件沿单一或交叉平面的剪切破坏往往会损坏三轴试验膜套。在低侧压条件下 (直到 14MNm^{-2}) 主要是通过与最小主应力 (侧向应力) 作用面平行的垂直裂隙而破坏 (图 1-1), 属典型的格里菲思 (Griffith) 拉伸破坏。

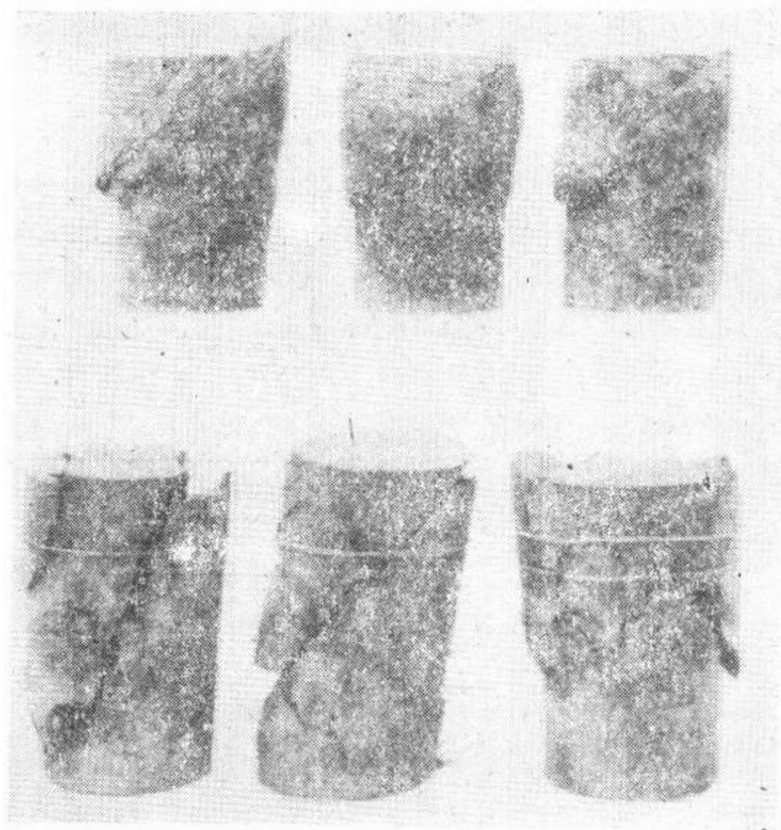
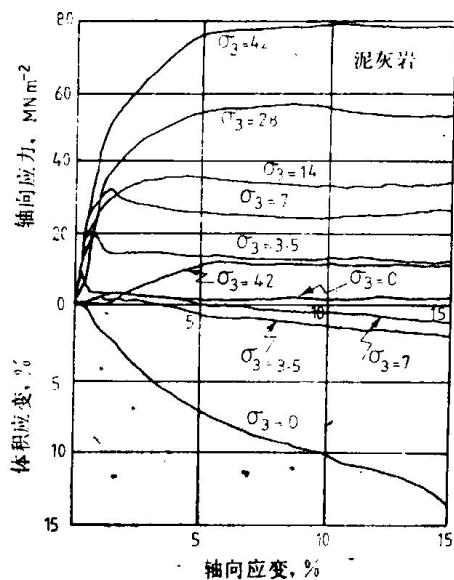


图 1-4 三叠纪泥灰岩试件三轴压缩下的轴向应力-轴向应变, 体积应变-轴向应变关系曲线, 侧压力范围从 0 到 42 MN m^{-2} 。照片是直径为 75 mm 试件的破坏情况, 侧压力为: 下行从左至右为 0, 3.5, 7 MN m^{-2} ; 上行从左至右为 14, 29, 42 MN m^{-2} (法默, 1983; 普赖斯, 1979)

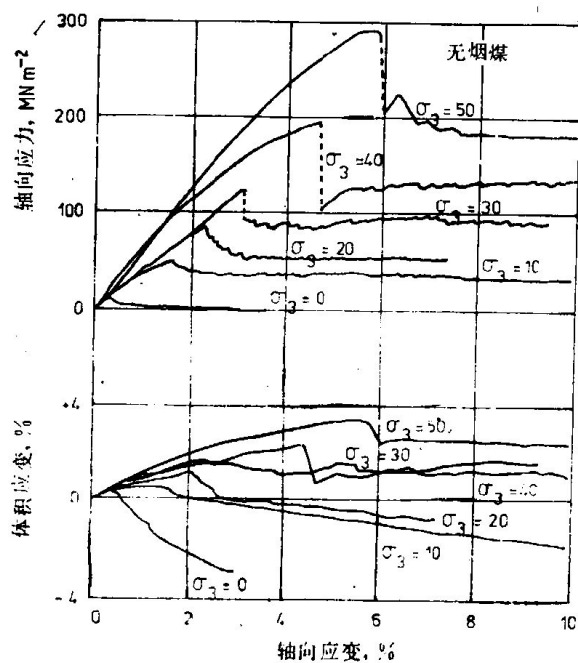


图 1-5 无烟煤试件三轴压缩下的轴向应力-轴向应变, 体积应变-轴向应变关系曲线, 侧压力从 0 到 50 MN m^{-2} [戈登 (Goddard), 1982]

在高侧压下，试件形成剪切面。而在低侧压下，应力-应变特性曲线（图1-1）从高峰应力迅速降到残余应力水平，并伴有试件的迅速膨胀，表现出非常明显的脆性或应变软化性质。

粉砂岩也是中粒煤系砂岩，含有粉砂包体，容重（重度）为 23.4kNm^{-3} ，孔隙比为 0.11，抗压强度为 61MNm^{-2} 。它的变形性质和上述砂岩相似，只是在高侧压下，剪切面或交叉剪切面（图 1-2）要清楚得多。应力-应变特性曲线（图 1-2）显示出从极限强度降到残余强度不太快，而残余强度/极限强度的比值也较高。在高侧压下，它的膨胀也减小了。



图 1-6 无烟煤试件破坏的情况，试验侧压力为 30, 40, 50MNm^{-2} （戈登, 1982）

虽然受试件岩层性质的影响,但所有这些特性对泥岩就更明显了。泥岩的塑性变形比较清楚(图1-3)。这是一种细粒煤系泥岩,偶而夹有粉砂和褐铁矿薄层,容重(重度)为 26.3kNm^{-3} ,孔隙比为0.02,抗压强度为 9MNm^{-2} 。

耐火粘土岩和烟煤,是两种常见的煤系岩石,未能获得满意的试验方式。因为前者总是处于被剪切状态,而后者常含有密集的解理构造。事实上二者都不可能加工成适当尺寸的试件来进行试验。于是对于前者,英国北约克郡布尔比(Boulby)煤矿的一种位于二叠-三叠纪蒸发岩上部的硬石膏泥灰岩——光卤石泥灰岩被选作代用品。除剪切构造外,在力学性质上,它和典型的煤系粘土岩十分相似(在1-4节中将进一步讨论),并具有大致相同的流动和塑性极限。它的容重(重度)为 21.7kNm^{-3} ,孔隙比为0.05,抗压强度为 26MNm^{-2} 。其变形性质(图1-4)的特点在于随着侧压的增加,由完全应变软化性态向应变硬化性态逐渐变化。另一方面,由于受层状结构的影响,它也具有明显的塑性性态的迹象。

作为烟煤的代用材料,这里选用南威尔士无烟煤试件进行试验。虽然它没有煤的解理结构,但具有大多数烟煤小试样所呈现的高极限强度和高残余强度的特征(图1-5)[见伊文斯(Evans)和波默罗伊(Pomeroy),1966]。在高侧压下,它的破坏也表现出典型的单一剪切脆性破坏特征(图1-6)。因此在煤柱设计中,考虑典型工程应力下煤的脆性性质是非常重要的(见第二章)。

1-3 岩石变形的一般描述

本节简单介绍如何用图1-1~图1-5的资料,来简单描述岩石变形的力学性质。例如,侧压力对于所有试验岩石的应力——应变特性曲线具有明显的影响。如果认为应力-应变曲线的波动是由于释放阀的不均匀动作所造成,而不是由于粘性滑移作用的话,那么可以看到侧压增加会引起极限强度和残余强度的增加。这对泥灰岩来说,最终将导致其应变软化性态变为应变硬化性态。

通过绘制图1-1~图1-4中砂岩,泥岩和泥灰岩的极限和残余强度包络线,可以更清楚地说明侧压的影响,图1-7系根据轴向破坏应力(σ_{1f})和残余强度(σ_{1r})对侧向压力(σ_3)绘制的关系曲线。

于是得到,强度包络线的形式如下:

$$\sigma_{1f}' = \sigma_{cf}' + k_p \sigma_3' \quad (1-1)$$

$$\sigma_{1r}' = \sigma_r' + k_p \sigma_3' \quad (1-2)$$

式中, σ_{cf}' 是抗压强度, σ_r 是残余强度, k_p 是三向应力系数,等于 $(1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$ 。

σ' 表示符合工程实际的有效应力,不过可以看出与其他颗粒材料相比,岩石要致密得多,所以岩石中的有效应力概念就显得不太重要了。

可以证明极限强度包络线表示整体岩石的极限强度,而残余强度包络线则表示摩擦阻力。大量岩石的试验如同泥灰岩试验一样,都提供了这样的证据:即这二条曲线最终会相交在一起(法默,1983)。这和强度包络线结合起来,可以作为岩石变形一般描述的依据,它对于性质各异的沉积岩地层中的工程设计具有重要意义。

例如,布朗(Brown)和霍克(Hoek,1978)指出,沉积岩地层中,地表下一定深度处的主地应力趋于相等。这样,如在其中掘进一个圆形巷道,并假定它们对短期压力变化的反应是弹性性态的,此时巷道侧壁的应力变化将从

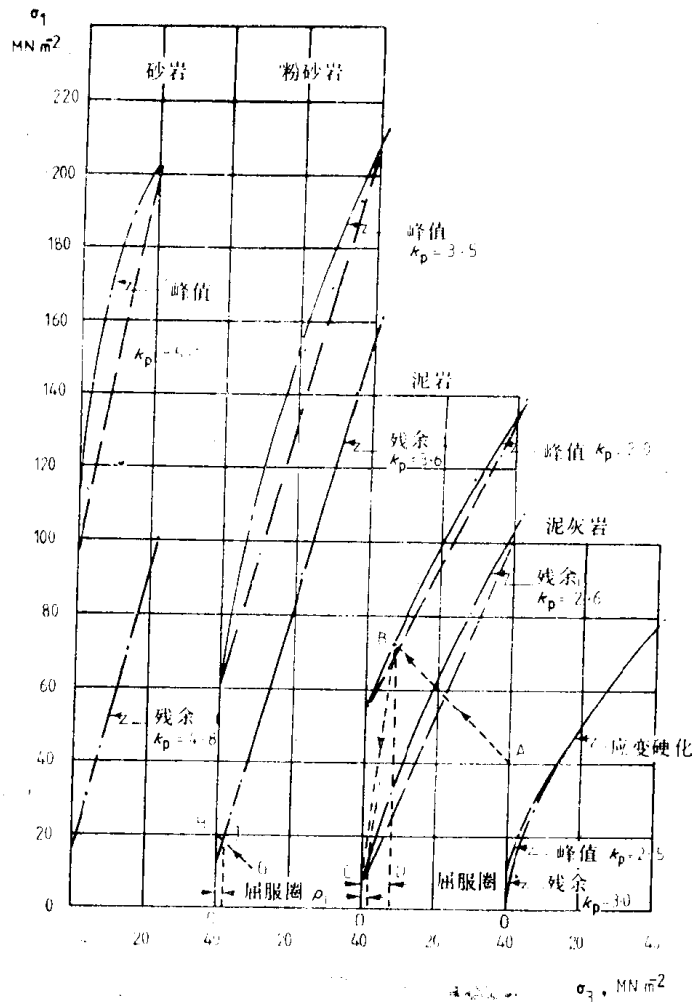


图 1-7 根据图1-1~图1-4中的资料绘制出的峰值和残余强度包络线,
 $k_p = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ 是包络线的平均斜率 [见式 (1-1)、
 (1-2)], 称为三向应力系数或被动土压力系数

$$\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma z \text{ (开挖前)}$$

式中, σ_0 是深度 z 处的应力, γ 是岩石的容重 (即重度) 到

$$\sigma_{\text{径向}} = 0, \sigma_{\text{切向}} = 2\sigma_0 \text{ (开挖后)}$$

这是根据厚壁圆筒理论求解的结果, 它可以在任何应力分析课本中找到 [见耶格 (Jaeger) 和库克 (Cook), 1979]。根据 1000m 深度处 $\sigma_0 = 40 \text{ MNm}^{-2}$ 的假设, 其应力变化可由图 1-7 中的巷道应力轨迹 A-B 来表示。那么, 如果建成一个圆形巷道, 则在巷道周边上

$$\sigma_{\text{径向}} = \sigma_3 = 0, \sigma_{\text{切向}} = \sigma_1 = 2\sigma_0 = 80 \text{ MNm}^{-2}$$

其大小足以破坏泥岩和粉砂岩, 但不会破坏砂岩。

后面将讨论这种破坏影响, 但其变形的力学性质应立即加以考虑。当应力轨迹与极限强度曲线相交于 B 点时, 岩石将破坏, 在巷道周围将形成一个侧向约束为零的破碎岩石带。换言之, 巷道应力轨迹将沿着 BC 线到 C 点。只要在巷道表面存在有某些约束, C 点开始的残余强度将沿着残余强度包络线向破碎岩石内部延伸, 一直到达 D 点为止。这时侧向应力应能阻止岩体的进一步破坏, 这就是破碎带的边界。如果巷道的半径是已知的, 那么破碎带的范围就可以很容易地用厚壁圆筒理论通过 D 值来求算 (见图 3-6)。如果巷道是由能对岩石作用一个内压力为 p_1 的支架支护, 而破碎带的范围就会减小。然而, 需要有与 D 值相等的支

撑压力才能完全阻止岩石的破坏，这不管是从经济角度还是从工程实践的观点来看都是不合理的。矿山支护的主要作用是提供能发挥岩石残余强度的条件。

还有一点必须在这里提一下，那就是所有简单的弹性分析如厚壁圆筒理论等都忽略了体积力。在采矿工程中它是极其重要的，在重力作用下，由于岩石松散脱落造成的支撑压力比岩石破裂引起的支撑压力更为重要〔见沃德（Ward），科茨（Coates）和特德（Tedd），1976〕。另一点就是不适当地应用屈服带这个词来描述岩石破碎带。在与泥岩相同应力轨迹下，通过考虑图1-7中泥灰岩发生的现象，可以更清楚地说明屈服的重要性。在这种情况下，应力轨迹将与极限和残余强度包络线合并后的曲线部分相交。这一交点表示变形进入稳定状态的起点（图1-4），并且膨胀变得很小；换言之，此时变形的增加总是需要通过应力的增加来达到。在工程中，该起点或界线具有各种名称，最常见的是“稳定界线”或“脆-塑性过渡点”。有时假定从脆性过渡点开始，岩石呈现出常体积的塑性变形，但并不都是这种情况（见普赖斯和法默 1979，1980，1981）。对此可作一个有用的试验，即把图1-4中泥灰岩的资料，根据偏应力（ q ）和球面应力（ p ）之比对体积应变的变化（ $\delta\epsilon_v$ ）和剪应变的变化（ $\delta\epsilon_s$ ）之比来作图。如果变形是塑性的，那么塑性势函数和屈服函数确定的屈服面应当重合，得出有关的流动法则的形式为〔见阿特金森（Atkinson）和布兰希（Branshy），1978〕

$$\frac{q}{p} = M - \frac{\delta\epsilon_v}{\delta\epsilon_s} \quad (1-3)$$

式中， M 是纵坐标截距。

对于泥灰岩（图1-8），可以看到其应变递增率需要乘上一个约为6的系数，并表明在整个试验侧压力范围内非塑性的程度。这类屈服面包含了脆塑性过渡和材料进入塑性破坏的临界状态之间的整个区域，有时被称为伏斯累福（Hvorslev）面〔斯科菲尔德（Schofield）和罗思（Wroth），1968〕。在采矿工程中软岩的抗变形阻力大于“延性”的预期阻力时，并在一定程度上忽略了蠕变的影响，确定膨胀变形的状态就很重要（见法默，1983）。但更重要的准则是脆-塑性过渡点，就如它的定义一样，从该点开始岩石的性态由应变软化变为

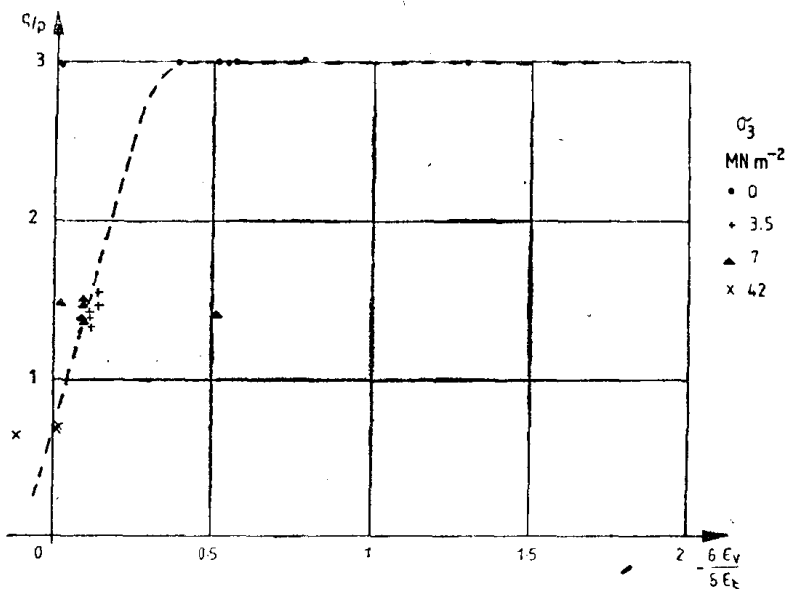


图 1-8 根据图1-4的资料计算的泥灰岩的伏斯累福面。注意 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ ， $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ ，所以 $q/p=3$ 对应于 $\sigma_3=0$ 时的单轴状态（法默，1983；普赖斯和法默，1981）