

5345
第四届国际岩石力学会议论文选集

第四届国际岩石力学 会议论文选集

田良灿 连志升 等译

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书从第四届国际岩石力学会议刊印的论文集中选出三十七篇论文，其内容包括以下几个方面：

(1) 岩石和岩体的物理力学性质的研究，特别是节理裂隙强度的研究；(2) 地下巷道（包括硐室）的设计 and 支护；(3) 巷道掘进面周围的应力和位移分析，以及刚性衬砌和软岩接触面的应力和位移分析；(4) 原岩应力测量；(5) 露天边坡稳定性分析；(6) 开采引起的地表移动。

本书可供从事矿山、水电、地质、铁道以及其他地下工程的设计和研究人员参考，也能对有关高等院校师生有所裨益。

第四届国际岩石力学会议论文选集

田良灿 连志升 等译

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 19 5/8 字数522千字

1985年5月第一版 1985年5月第一次印刷

印数00,001~2,400册

统一书号：15062·4080 定价5.25元

译 者 的 话

第四届国际岩石力学会议于1979年在瑞士举行。自第三届国际岩石力学会议以来(1974年在美国丹佛举行),五年中在岩石力学研究领域又取得不少进展。特别是在原岩应力测量方面,目前,已可能在深达300米的有水钻孔内进行测量。

我们从第四届国际岩石力学会议刊印的论文集中,共挑选出38篇论文翻译出版,内容着重以下几个方面:1)岩石和岩体的物理力学性质的研究,特别是节理裂隙强度的研究;2)地下巷道(包括硐室)的设计 and 支护;3)巷道掘进面周围的应力和位移分析,以及刚性衬砌和软岩接触面的应力和位移分析;4)原岩应力测量;5)露天边坡稳定性分析;6)开采引起的地表移动。这些内容,对从事矿山、水电、地质、铁道以及其他地下工程的设计和研究人员,均可能有所裨益。

本书由冶金工业部长沙矿山研究院,长沙矿冶研究所,北京钢铁学院,中南矿冶学院等单位的有关同志译校,最后由长沙矿山研究院田良灿,连志升两同志作了统一审校,对某些篇幅过长的论文作了删节。

在挑选本文集的内容时,虽力求满足国内的地下工程开挖的普遍要求和尽可能反映五年来研究岩石力学的进展,但限于译者的水平,可能选得不尽恰当和存在某些局限性,译文中也可能有许多不妥甚至错误之处,谨希读者批评指正。

译 者

1982. 5

目 录

一、布里斯托尔地区石炭纪石灰岩的土工技术特性——岩相学和化学的影响·····	1
二、围压下层状岩石的力学特性的变化·····	24
三、评价混凝土结构与岩石基础接触强度的新方法·····	42
四、地质力学分类在岩石工程中的应用·····	48
五、流变引起残余应力的变化·····	64
六、混凝土坝岩基破坏机理的研究及其稳定性分析·····	71
七、岩石节理的膨胀作用·····	82
八、裂隙岩石和半固结岩石材料的某些蠕变规律·····	96
九、现场岩石节理的剩余剪切强度·····	107
十、岩体不连续面的剪切强度是岩体基本特性的函数·····	122
十一、岩体变形性质的预计·····	141
十二、节理岩石强度的模型研究·····	157
十三、按现代化建设方法考虑地下构筑物设计的综述 ·····	170
十四、岩石模型中孔洞周围裂缝的发展及其对设计巷道 稳定性的影响·····	186
十五、设计和施工中试验和监控的使用·····	196
十六、矿山溜井破坏的控制·····	215
十七、地下油库的设计·····	234
十八、胶结充填材料参数的测定·····	243
十九、岩体隧道的加固系统：巴西铁路隧道建设所取 得的成就·····	259
二十、南非金矿深部大型地下硐室的设计与支护·····	277
二十一、有限元模型在瑞典北部 Stekenjokk 矿采矿设计 中的应用·····	288

二十二、构造应力对崩落过程的影响——用矿块崩落法 开采——	306
二十三、膨胀岩石中隧道的修建和设计原理	328
二十四、瑞典的岩石力学评述	353
二十五、测量原始应力的刚性探测器的理论分析	365
二十六、深孔三轴岩石应力测量及岩石应力测量在岩巷设 计和修建中的应用	382
二十七、隧道掘进面周围的应力和位移	397
二十八、刚性隧道衬砌和软岩接触面的应力和应变	417
二十九、软弱结构对矩形巷道动力效应影响的实验室模拟	432
三十、岩石边坡稳定性的概率分析方法	447
三十一、增强边坡稳定性的爆破设计	463
三十二、风化岩石边坡的稳定性分析	481
三十三、岩石的封闭应力、蠕变和扩容以及本构方程	499
三十四、开采层状矿床的地表移动研究	519
三十五、开挖工程引起的地表移动	539
三十六、开采倾斜煤层引起的地表沉陷与水平移动	577
三十七、用房柱法进行地下采矿引起地表移动的若干研究	592
三十八、适于模拟地下结构的三维物理模型	604

一、布里斯托尔地区石炭纪石灰岩的 土工技术特性——岩相学和化学的影响^①

(英国) S.H.AL-JASSAR A.B.HAWKINS

摘 要

石炭纪石灰岩由八种岩石组成：贝壳灰岩、海百合灰岩、鲕状灰岩、微晶质灰岩、白云岩、杂质灰岩、硅质砂岩和泥岩。除泥岩外，上列各种灰岩都采集了试样，都作了切片和详细描述，确定了九种主要元素，并用X射线衍射法分析了不溶解的残渣。

在完成这些试验当中，测定了平行、垂直和倾斜于层理方向的单轴抗压强度和弹性模量；三轴试验，加卸载的二次循环试验，破坏试验，各种尺寸试件的点负荷试验，现场和试验室中平行和垂直于层理的斯密特锤试验。绘出了土工技术特性及其与岩石的岩相学和化学之间存在的关系。

1. 前 言

在布里斯托尔地区，下石炭纪地层出露相当充分。岩石厚度从Mendip地区以南的1100米变化到Cromhall地区以北的大约500米。Vaughan (1905和1906) 将这类岩层划分为古生物区。Vaughan和Reynolds (1935) 对这些区又进一步划分为许多小区。Kellaway和Welch (1955A和B) 在重新绘制这一地区的区域图时，根据岩性决定将石炭纪灰岩重新分类。因此，他们在布里斯托尔地区的基础上采用了一组新的名字。由于沉积作用随时间的变化，特别是在浅海沿岸环境中，在他们采用的四大类中存

① 本译文有删节。——校注

在着很大的岩性差异。

在布里斯托尔地区，每年大约从采石场开采1500万吨石炭纪石灰岩，约占英国碎石产量的20%。尽管露天采石工业在当地占有重要地位，但却极少介绍过（除Chapman1912年的著述外）石炭纪石灰岩的化学性质和土工技术性质。

2. 岩 相 学

贝壳状灰岩：这是一种具有晶石结构（ $>10\mu$ ）的生物碎屑石灰岩。介壳常常表现为平行于层理的方位，因此使岩体具有各向异性特性。原生的介壳物质常常被拼花晶石所取代。

海百合状灰岩：这是一种以微晶质构造胶结的拼花晶石取代海百合小骨片组成的石灰岩。有些微晶质再结晶成同源异态晶石（ $4\sim 10\mu$ ）。有时海百合小骨片呈现出最佳方位。

杂质石灰岩：是一种多晶石灰岩，在结构中沿某些层理面存在铁质粘土夹层，也呈现出罕见的半随机不连续面。

鲕状石灰岩：是一种由方解石晶体胶结的石灰岩，一般具有同源异态晶石结构。

微晶石灰岩：这是一种主要由微晶（ $<4\mu$ ）构成的石灰岩，在有些地方微晶再结晶成同源异态的晶石和微晶石。

白云岩：是一种微晶岩，在结构中大多数颗粒都显现为菱形。

硅质砂岩：是一种由硅质胶结剂牢固粘结的粗粒砂岩，其化学性质介于石英颗粒和胶结剂之间。

鉴于岩相学的这些差异和本文后面将要介绍的土工技术数据，在描述钙质岩石的土工技术特性时，一般绝不能单独使用石灰岩这一术语。

3. 化 学 分 析

利用湿式化学分析法对石炭纪石灰岩层的各种钙质岩石和硅质砂岩进行了化学分析，以便确定8种氧化物的含量（见表1）。

主要变量是难溶的残渣百分比和CaO与MgO的比，利用10%

醋酸分离碳酸盐的方法确定难溶残渣的百分比，而利用X射线衍射法分析确定残渣的组分。分析表明除了在硅中伴有大量粘土和氧化铁的杂质灰岩外，难溶残渣主要由硅组成。白云岩中的MgO含量（19.1%）接近于化学上可能的最大值（21.2%），因此，这种岩石可看作是纯白云岩。只有海百合灰岩是另一种含MgO比例很高的岩石，可以确信这种特性影响了此种灰岩的强度特性。

4. 孔 隙 度

据Al-Jassar和Hawkins（1977）报导，除鲕状石灰岩的孔隙度增到6.1%外，贝壳状石灰岩、海百合石灰岩、杂质石灰岩和鲕状石灰岩以及白云岩的孔隙度介于2.7%和3.2%之间。测定了微晶石灰岩和硅质砂岩的孔隙度，分别为2.4%和6.3%。应当指出，这些孔隙度值大大低于多数教科书中给出的值。

表 1 石炭纪石灰岩八种岩性的湿化学分析

岩 性	贝壳状 石灰岩	海百合 石灰岩	杂质石 灰 岩	鲕状石 灰 岩	微晶石 灰 岩	白云岩	硅 质 砂 岩
Na ₂ O	0.22	0.36	0.55	0.15	0.02	0.48	0.20
K ₂ O	0.08	0.05	0.11	0.00	0.01	0.26	0.00
CaO	55.30	47.00	49.20	55.20	53.60	35.20	0.30
MgO	0.80	7.60	0.00	0.00	0.62	19.10	0.02
MnO ₂	0.02	0.002	0.08	0.02	0.02	0.02	0.00
FeO	0.32	0.21	1.73	0.01	0.20	0.50	0.64
Al ₂ O ₃	0.12	0.16	0.22	0.00	0.08	0.88	0.21
CO ₂	42.80	42.49	38.03	43.55	44.10	42.57	0.00
残 渣	1.10	3.57	10.20	1.40	1.80	2.50	99.20

5. 单轴抗压强度

利用76×38毫米岩芯对石炭纪石灰岩和硅质砂岩的不同钙质岩性作了单轴抗压强度试验。岩芯是仔细准备的（见Al-Jassar和Hawkins1977），以确保外加应力均匀地作用于试件上。制备了有明显层理标记的大试块，使它们重新定向以便依次在平行、

垂直和斜交于层理的三个方向上进行试验。对于每个方向，每种岩性至少要进行三次试验。现场调查和手工加工试件表明，石灰岩往往被方解石充填细脉所贯穿，可以预料这种细脉将起弱面的作用，的确，这就是为什么决定不采用大立方体，和不把这些数据与比较标准的岩芯试件的试验结果作比较的一个原因。试件的制备应尽可能不包含任何细脉。但是，因为这类细脉，存在明显不连续性特性，观察试件碎块表明，在少数试块中存在着细脉。仔细检查试验碎块证明，在方解石脉内或界面上未发现破坏面。

硅质砂岩在各个方向都具有最高的单轴抗压强度（表2）。这可能归因于这种岩石的结构特性和它的成分。岩石颗粒主要是石英并有硅质胶结，颗粒发育具有化学相似性，从而产生很坚硬的岩石。结果，硅质砂岩的破裂模式表现为沿轴向突然破坏。在每种情况下至少取三次试验的平均值。

表 2 布里斯托尔地区石炭纪石灰岩岩性的单轴抗压强度

岩 性	平行层理 $\times 10.2$ (公斤/厘米 ²)	垂直层理 $\times 10.2$ (公斤/厘米 ²)	斜交层理 $\times 10.2$ (公斤/厘米 ²)
贝壳状石灰岩	105	131	113
海百合石灰岩	154	161	161
杂质石灰岩	143	141	140
鲕状石灰岩	179	176	166
微晶石灰岩	218	233	225
白云岩	251	240	261
硅质砂岩	287	296	288

6. 弹性模量

Bieniawski(1967), Jaeger (1969), Jaeger和Cook(1969), Wawersik和Fairhurst(1970), Brown(1977) 等人都曾研究了应力应变图。

为了研究包括硅质砂岩在内的七种岩石的石炭纪石灰岩的应力-应变关系，在每个76×38毫米岩芯的轴向方向上粘贴三个10

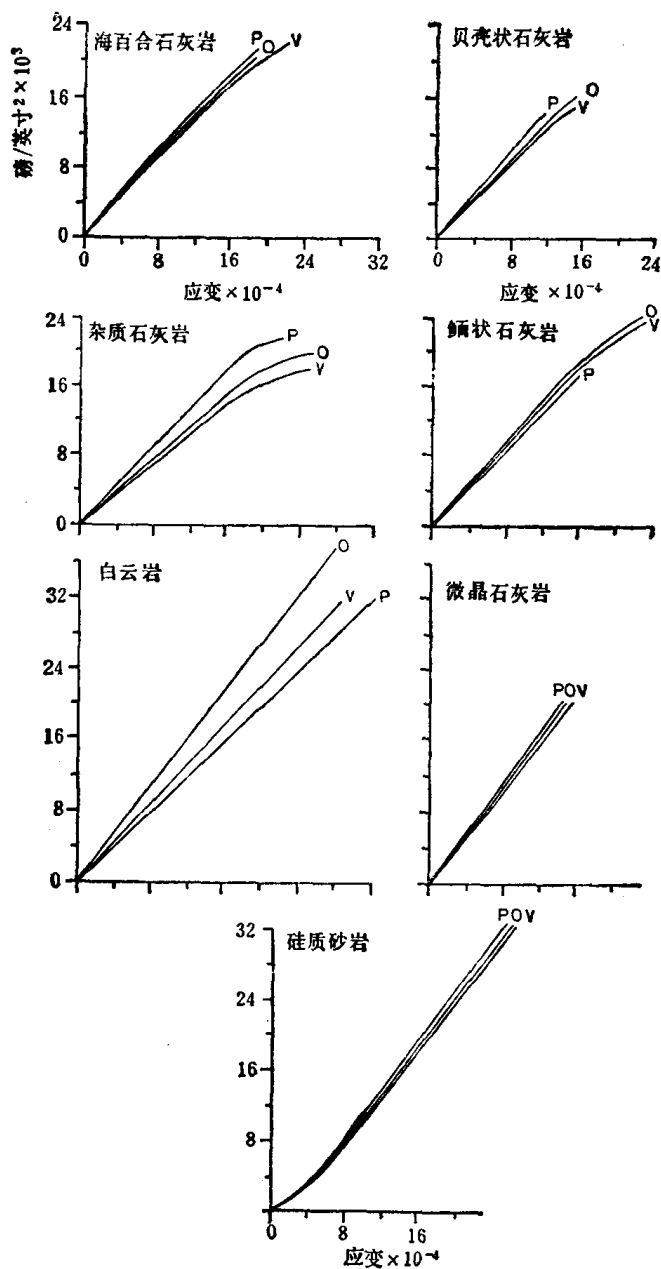


图 1 七种岩性的石炭纪石灰岩每一个方向上的应力-应变图

毫米线性应变的箔式应变片。应变片是贴在试件的中间高度上以使端部效应最小。在岩芯周围相隔120°贴三片应变片，以便消除弯曲的影响。各应力-应变图（图1）表示与层理平行、垂直和斜交三个不同方向上的应力-应变关系。每一种岩石的每一个方向至少试验三个试件。根据应力-应变关系计算了每种岩石的每个方向上的割线弹性模量，并将计算值列于表3。

表 3 布里斯托尔地区石炭纪石灰岩岩性的割线弹性模量

岩 性	平行×10.2	垂直×10.2	斜交×10.2
	(公斤/厘米 ² ×10 ³)	(公斤/厘米 ² ×10 ³)	(公斤/厘米 ² ×10 ³)
贝壳状石灰岩	79	68	71
海百合石灰岩	81	77	79
杂质石灰岩	77	63	64
鲕状石灰岩	75	77	77
微晶石灰岩	92	91	91
白云岩	67	74	91
硅质砂岩	81	78	81
硅质砂岩T ^①	98	94	96

① T = 切线模量。

图1表明，微晶石灰岩和白云岩直到破坏都存在线性应力-应变关系，即属于完全弹性体。微晶石灰岩和白云岩的这种弹性性态可能归因于各向同性和有高的强度。海百合石灰岩、贝壳状石灰岩、杂质石灰岩和鲕状石灰岩最初存在线性关系，接着在破坏前存在一小段塑性变形。硅质砂岩最初存在向上弯曲，然后才出现线性关系。有些作者把这种性态归因于在加载的初始阶段孔隙闭合，而在孔隙闭合之后砂岩在破坏前表现为弹性材料。

作者测到的硅质砂岩的6.3%低孔隙度一般要比砂岩的孔隙度低得多。据大多数作者介绍，硅质砂岩的单轴抗压强度也比砂岩的强度高得多，正如本文所介绍的那样，布里斯托尔地区石炭纪石灰岩中的硅质砂岩的孔隙度低而强度大，因此本文作者不能同意其应力-应变曲线的起始向上弯曲是由于岩石孔隙度的闭合这样的前提。此外，由于试块加工仔细，可以确信端部的不规则

对这种情况不会有任何影响。

贝壳状石灰岩、杂质石灰岩、微晶石灰岩和硅质砂岩平行于层理的弹性模量最大，而垂直于层理的最小。最大模量值的方位是平行于最大应力方向，在Varican地壳运动期间，最大应力方向对岩石有影响，并在许多地方使岩层发生严重的逆断层。鲕状石灰岩和白云岩是在斜交层理方向而不是在平行或垂直于层理方向存在较大的弹性模量。

7. 在加载和卸载的两个循环下应力-应变特性

如上所述，贝壳状石灰岩、海百合石灰岩、鲕状石灰岩和杂质石灰岩在破坏前起始存在弹性性态。微晶石灰岩和白云岩存在线性应力-应变关系，而硅质砂岩最初表现为非弹性性态，继之为弹性性态（图1）。

为了研究加载和卸载循环下的应力-应变性态，在这两个加载卸载循环中都大致保持相同的应力值（图2）。贝壳石灰岩和杂质灰岩都存在滞后现象。在第二循环卸载之后，产生相应的残余应变为 1.8×10^{-4} 和 1.7×10^{-4} 。海百合石灰岩存在类似形态，在第二循环卸载之后产生 1.0×10^{-4} 残余应变。鲕状石灰岩在第一循环中表现为一种弹性材料，而在第二循环卸载后产生的残余应变为 0.9×10^{-4} 。微晶石灰岩和白云岩在两个循环中都表现为线弹性性态，而不会产生任何大的残余应变。这就证明这两种岩石具有很大的各向同性特性。如图2所示，硅质砂岩呈现出向上弯曲曲线，既而成为直线。硅质砂岩在第一循环内产生 0.8×10^{-4} 残余应变，而在第二循环中残余应变为 1.1×10^{-4} 。

根据石炭纪石灰岩的不同岩性的研究表明，在加载和卸载两个循环后，其单轴抗压强度值小于表2所列的单轴抗压强度。可以断定，在单轴抗压强度与残余应变之间存在着相反的关系，也就是说，如果单轴抗压强度增加，则残余应变减小，但硅质砂岩例外。这可能是由于相对钙质岩性而言，硅质砂岩具有不同的应力-应变特性。

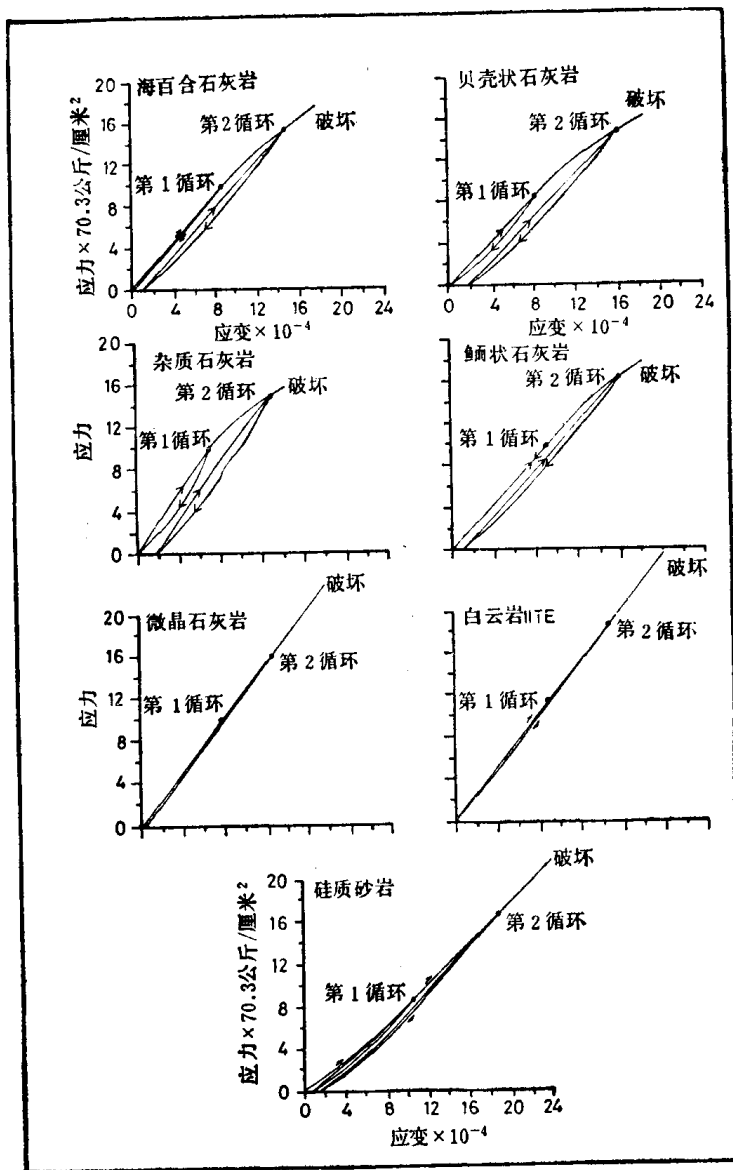


图 2 加载和卸载两个循环下的应力-应变曲线 (直至破坏)

8. 三轴试验

利用工程试验设备公司生产的Hoek三轴压力室完成7种岩石的三轴压缩试验。每种岩性取4个76×38毫米的岩芯试件，围压取0, 200, 400, 和600公斤/厘米²。为了确立剪切强度参数(ϕ 和 c)，将试验数据绘成如图3所示的莫尔圆。莫尔圆的包络线是线性的，这可能是由于岩石的坚硬性质，以及围压比轴压较小之故。根据莫尔圆，显而易见应力差是一变量，它直接与材料类型有关从而与岩石的抗压强度有关。

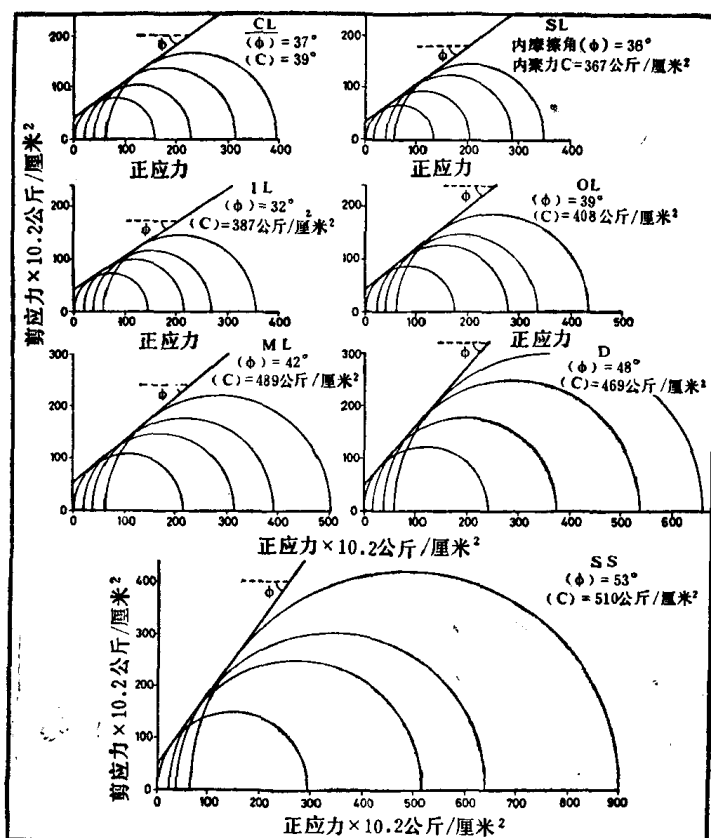


图3 布里斯托尔地区石炭纪石灰岩三轴试验的莫尔圆

根据图解计算的內聚力和內摩擦角（剪切阻力）列于表4中。绘制曲线图（图4）的结果表明，在內聚力和內摩擦角之间存在一种关系，但微晶石灰岩是例外，它具有大的內聚力且与內摩擦角成比例。图5中的抗剪强度参数（ c 、 ϕ 值）曲线是这样绘制的，以纵坐标表示根据图解算得的內聚力，并根据图解算出內摩擦角作莫尔圆的切线。此图表示石灰岩强度参数的危险条件，除非出现范围很宽的数值。

根据每次三轴试验发现，贝壳石灰岩、海百合石灰岩、杂质石灰岩和鲕状石灰岩这种低强度试件一般是沿一个傾斜破坏面剪切，符合剪切破坏模式。强度较大的试件，如微晶石灰岩和白云岩沿几个接近轴向面破坏，有时伴随着轴向破坏。没有典型意义的砂岩，现出类似于低强度试块那样的只沿一个傾斜面剪切。

许多作者，例如Brace等人（1966）、Wawersik（1968）、Wiebols等人（1968）和Crouch（1970和1972）等都测量了三轴试验时的应变。

**表 4 布里斯托尔地区石炭纪石灰岩岩性的三轴试验参数
（ c 和 ϕ ）和单轴抗压强度**

岩石种类	內摩擦角 ϕ (度)	內聚力 $c \times 10.2$ (公斤/厘米 ²)	垂直于层理的单轴抗压强度 $\times 10.2$ (公斤/厘米 ²)
介壳石灰岩SL	36	36	132.7
海百合石灰岩CL	32	39	158.6
杂质石灰岩IL	32	38	144.3
鲕状石灰岩OL	39	40	174.1
微晶石灰岩ML	42	48	213.4
白云岩D	48	46	240.7
杂质砂岩SS	53	50	296.0

由于电阻应变片的电阻以及应变片与试件的粘结效果可能受围压的影响，因此可能得出错误的结果，所以本文作者不打算利用电阻应变片测定应变。粘结材料的变形不仅会记录到额外的变形数据，也会有粘结胶被挤入试件孔隙的可能性，因而将会影响

到应变片附近岩石的材料性质。

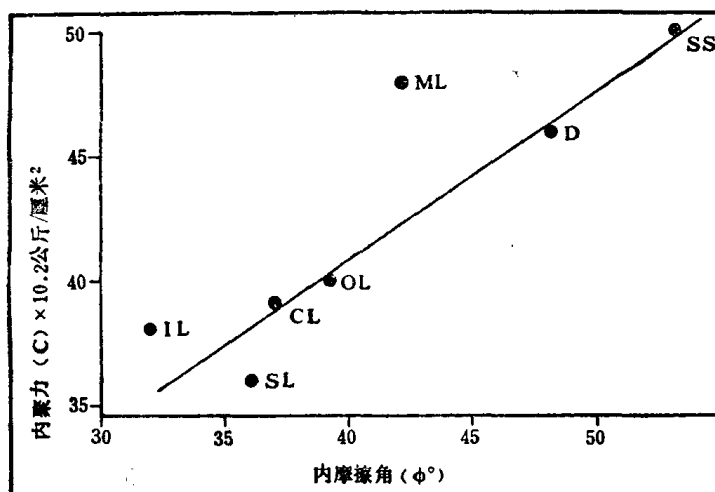


图 4 各种石炭纪石灰岩抗剪强度参数之间的关系

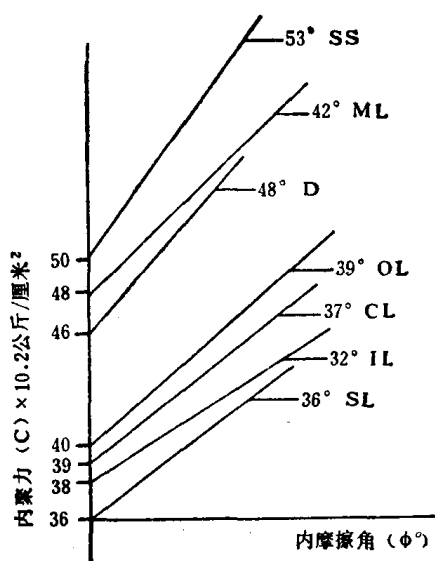


图 5 根据图4给出的各种石炭纪石灰岩岩性的内聚力计算值绘制的莫尔圆包络线