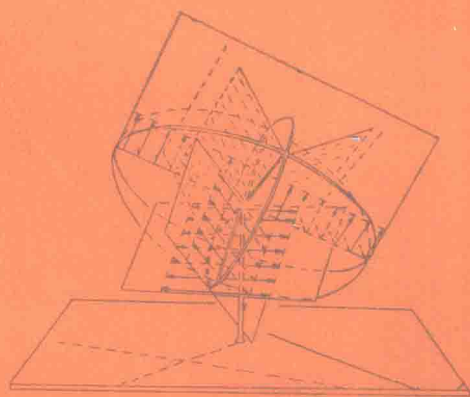


国家地震局地震地质大队情报室 编译

岩石和地壳的应力测量



地质出版社

岩石和地壳的应力测量



地质出版社

岩石和地壳的应力测量

国家地震局地震地质大队情报室编译

地质出版社

编 译 说 明

近二十年来,岩石应力测量伴随着岩石力学的发展有了很大进步,测量技术上的困难也正在克服。开展岩石应力测量工作,已为国内外日益关心和重视。因为它不仅对研究地质构造、构造应力场、地壳运动方式和地震预报有着重要的意义,而且对矿山、水工、隧道以及其他地下工程的合理设计、施工和安全生产也具有重要的实际意义。

用于矿山等工程上的岩石应力测量,国外已有几十年的历史。我国虽然开展较晚,但随着社会主义事业的发展,岩石应力测量技术正在得到广泛的应用和重视。除了用于解决工程上的问题,还在卓越的科学家李四光同志的倡导下,于六十年代开始了地应力预报地震的研究。

为了配合我国岩石应力测量工作的开展,我们编译了这本《岩石和地壳的应力测量》,共收集了十九篇文章,较系统地介绍了国外采用的各种测量方法、专用仪器的原理和结构、世界许多地区实测结果与分析等,供有关人员参考。

在编译过程中,为了使译文更准确,对过去已经在内部刊物上发表过的几篇论文我们又对照原文一一重新进行了校审,并做了必要的改动

岩石和地壳的应力测量

国家地震局地震地质大队情报室编译

*

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 18 5/8 字数: 456,000

1980年4月北京第一版·1980年4月北京第一次印刷

印数 1—5,840册·定价 2.60 元

统一书号: 15038·新444

目 录

矿井岩石压力的测量方法	N.哈斯特 (1)
地壳上部的应力状态 (一)	N.哈斯特 (40)
地壳上部的应力状态 (二)	N.哈斯特 (67)
地壳上部应力状态的测定	N.哈斯特 (75)
绝对应力的全球性测量	N.哈斯特 (86)
马姆贝里耶特地质时期地壳应力分布的稳定性和铁矿扁豆状矿体的形成	N.哈斯特 (96)
科罗拉多州西北部兰格里背斜的绝对应力测量	R.V.dela克鲁兹, C.B.雷利 (104)
加拿大的地应力测定	G.赫格特 (112)
岩石中应力的测量	E.R.利曼 (119)
测量绝对应力的钻孔加深法的理论基础	R.V.dela克鲁兹, R.E.古德曼 (180)
岩石力学中应力计的功能和使用范围	J.赫尔特, R.克瓦皮尔, H.森德克维斯特 (194)
压磁传感器——磁弹性传感器	M.H.古马纽克 (202)
压磁传感器——磁各向异性传感器	T.N.谢甫琴科 (227)
岩石应力测量与地质构造的关系	G.拉纳利 G. Ranalli (252)
水压破裂法深部应力测量	B.C.海姆森 (258)
用水压破裂法初步测量加利福尼亚中部地区的应力	M.D.佐巴克, J.H.希利, J.C.罗勒 (262)
低渗透性岩石中剪切和张性的水压破裂	P.索尔伯格, D.洛克纳, J.拜尔利 (274)
科罗拉多州兰格里地区与应力有关的地震	B.C.海姆森 (279)
德国西南部霍恩佐伦—格拉本构造附近的水压破裂应力测量	F.拉梅尔, R.荣格 (288)

矿井岩石压力的测量方法

N.哈斯特

一、引言

要测定矿井的巷壁、矿柱、顶部或底面的应力随巷道掘进的变化，我们可以考虑使用应变计，例如金属丝伸长计，把它固定在所要测量的岩石表面上。因此，如果已知岩石的弹性模量，则从应变计上记录到的变化来确定岩石应力的变化，便可看成是一个简单的问题。可惜问题决不这样简单。例如应用应变计有很大困难，因为矿井里的湿度高容易引起附着剂（用它把应变计的金属丝固定在岩石表面上）的流动。由于通常岩石表面上的应力状态不稳定，因而使问题更为复杂。挖掘与这些表面邻接的岩石，如用爆炸来进行，那末表面区域将不可避免地遭受一些破坏——形成裂缝，力通常不能越过裂缝传播。通过比较靠近岩石表面和深处各点的应力值，已经证实了这一点。这些应力值是从近年来用下述方法完成的几百个测量得到的。

譬如说，理论上在受应力状态的岩石里，巷道挖掘会造成巷道边缘附近岩石应力的聚增。对于截面为圆形、椭圆形和矩形的地下巷道，可以从基尔希（Kirsch）和英格利斯（Inglis）公式计算这种应力变化。

然而，这些计算并不能给出巷道周围的应力分布，因为被爆炸等破裂的岩石壁不是均匀物质，不满足计算所依据的基本条件。按照基尔希和英格利斯的理论，在所有的应力计算中，需要在未开采的岩石中假设一定的应力分布，通常即是所估计的覆盖岩石层自重。但是，这里报告的岩石应力测量结果表明，在许多情况下，覆盖岩层的重量和存在于未开采岩石里的水平应力相比，是相当轻微的。其理由在第六部分中讨论（见原书第171页），并且猜想这是一种地质学或地震学的特征。

如果要求主应力的绝对大小和方向^①，例如研究矿井的稳定性，那么，必须在这样的深度测量，使测量不为表面区（可达几米厚）的主要条件所影响。再者，甚至在不受平巷或竖井爆震影响的地方，岩石也很少没有裂缝。深部的应力测量已经显示在这些裂缝附近应力发生突然波动。测定一个具体地区主要的岩石压力，需要沿二条线测量足够多的点，使得能辨别裂缝的局部影响。因此，极为重要的是，所采用的测量方法应该能记录到固体岩石深部各点的应力。

① 在某一平面上通过一点的应力可以用中心在这点的椭圆来表示其大小和方向。椭圆的长、短轴分别表示最大和最小主应力。应力椭圆给出测量点处三个主应力的方向和大小

二、方法说明^①

参看图 1 a 和 1 b。

从岩石表面钻一个直径约为26毫米的孔，并穿过待测应力的地点。把一个专门设计的测量元件 c 放在孔内所要求的位置上，并把元件预加应力到某个适当的值，记录下来^②。与装有元件的孔（元件孔）同轴，钻一条环形槽 g （图1a）。这条槽离元件 c 要足够远，以使形成的岩心 d 不因弹性膨胀而在测量点产生应力。于是，元件上的负荷将同时减少。元件上原来的负荷和应力解除槽钻成时读出的最后数值之差，就表示作用于元件孔周围岩石的应力绝对值。假定钻孔钻完时，岩石圆柱内没有明显的残余应力。尽管这个假定并不总是完全正确，但是可以通过实际试验证明其误差甚小。元件记录垂直于元件孔轴的平面内的应力。与孔轴平行的应力场对这个读数也会有一些影响，以后将讨论此问题。

把元件放在测量平面的三个方向上，得到三个数值，从这些数值就可以计算在这个测量平面内作用于岩石此测量点的主应力大小和方向。在一个均匀柱内，如果已知一个主应力平行于柱的长轴，那么只在垂直和水平的方向上进行测量就足够了，因为元件孔垂直于表面。于岩石的一个点也可以测定三维主应力——应力椭球，但是需要在不同的方向上钻三个孔。然而，通过在一个垂直孔和一个水平孔内测量，常常能以足够的精度求得这些主应力。

某些情况下，有意义的是在挖掘过程中监视岩柱或壁里应力的变化，而无需知道应力绝对值。因此，除了根本就不用钻应力解除槽 g 或至少在记录到存在应力波动时才钻应力解除槽这两种情况之外，其测量方法如上所述。通过钻解除槽得到校正值。用校正值可以把记录的应力波动换算成应力绝对值。有一种危险，即岩石如果发生塑性形变，这些结果就会失真，特别是岩石压力在一个长时期内逐渐变化时和岩石应力高时。但是，采用专门测量，有时在某种程度上可以避免这种误差。在任何情况下，经常做绝对测定，以便得到矿井中更可靠的长期应力波动图，看来是合适的。

最后，很难得到灵敏的应力记录仪器，其标定和性能在相当长的时期——甚至几年

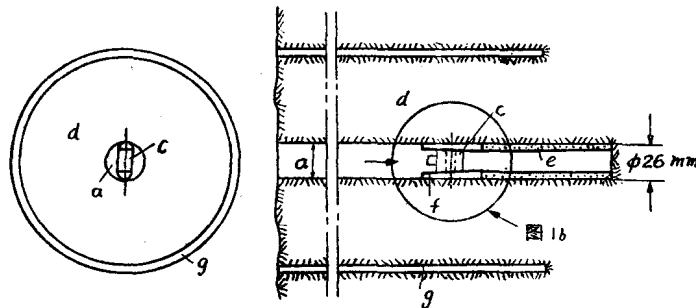


图 1a 钻孔 a 里的元件 c ，在孔周围已钻成同心的应力解除槽 g

① 下面叙述的方法原则上和瑞典专利№151, 797与南非专利№19, 559（《测量固体加载材料中应力和变形的方法和设备》）所评述的一样

② 此处用预加应力这个术语表示应力解除之前加到元件上的负荷，下面将描述

(有时是必须的)内都是可靠的。在此方法中所用的元件里,没有运动部分,其线圈完全铸在不透水的材料中,因此所讲的这种长期变化的可能性是小的。

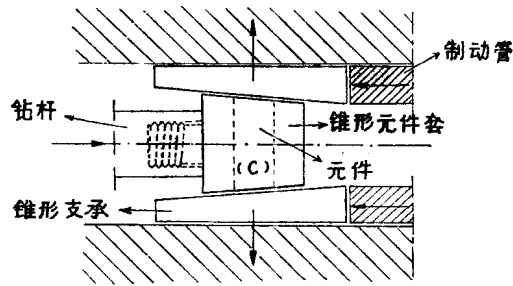


图 1b 是图 1a 的详图,表示按照最早的方法是怎样对元件预加应力的。把套里的元件插进元件孔a,直到锥形支承f的向前运动被制动管挡住为止。元件套(也是锥形的)起楔子作用,当向前压它时,由于支承f施加的法向反作用使元件受力。当钻应力解除槽g时,在所形成的圆柱岩心里的应力便逐渐被解除,因而元件上的一部分负载也就同它一起被解除

三、设 备

据作者所知,至今尚未在矿井里岩石深处测量过单独一个点的绝对应力值。因此,可以预料,早期阶段的工作是有点实验性质的。尽管如此,如果把今天的方法和在格兰耶斯贝里(1951)首次试验的方法比较,那么就看出,无论在测量手段上,或者在标定元件的方法上,均没有本质的改变。另一方面,几年来对元件的形状及给元件预加应力的方式等一些细节已经进行了改进,使得操作更容易和记录应力的精度更高。例如,在元件孔周围钻应力解除槽,早先用风钻,而现在用金钢钻(第7和9页)。

1. 元件

(1) 设计

压力是根据磁致伸缩原理记录的。

这个设备包括一个元件和一个记录装置。元件由一个长10毫米的镍合金线圈组成(图2a);其直径最粗部分是6毫米,最细部分 d 为2.5—3毫米。通过改变 d ,可以改变元件的弹性。用一个坡莫合金屏 f 来屏蔽外磁场。

如果压力是平行于元件轴作用在元件上,那么镍合金的导磁率就会变化,线圈的阻抗亦随之变化。如有交流电通过线圈,则它的两端就产生电位降。对这个元件施加已知的负荷,就可以绘制一条标定曲线(图2b)。然后利用这条曲线把仪器读数换算成岩石压力。通常把元件安装在一个铜、铝或其他某种金属的套内,因此在对元件预加应力时,能施加相当大的负荷而不会有过载的危险(图3a和3b)。

(2) 预加应力的方法——以前的系统

元件套的两个侧面略有锥度并几乎垂直于元件的轴(图3a)。在每个侧面上放一块金属窄条作为支承,支承也是锥形的,这样元件套和它的两个支承就形成一个有平行侧面的装置。用一根专用钻杆把这个装置插进元件孔(图1b)。接近孔底时,支承碰到一个金属管状的挡块(制动管),阻止其向前运动。通过金属钻杆把压力作用于元件套时,这个套(它起楔子的作用)受到固定支承的挤压。挤压力传递到元件上,于是元件被预加到需要

的应力值。

通过钻杆上面的一个指示器，可以检验元件在所要求的测量方向上的准确方位。

在施加预加应力时，元件套和支承受到元件套、支承与岩石表面的接触面间摩擦力的作用。这些摩擦力在一定程度上引起元件读数的误差，但是只要预加应力高，以致钻

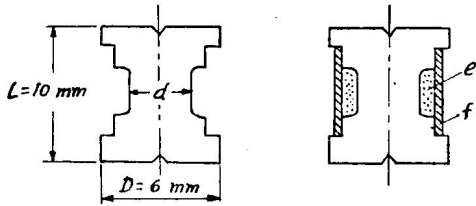


图 2a 镍元件芯子和带有线圈e与屏蔽f的芯子

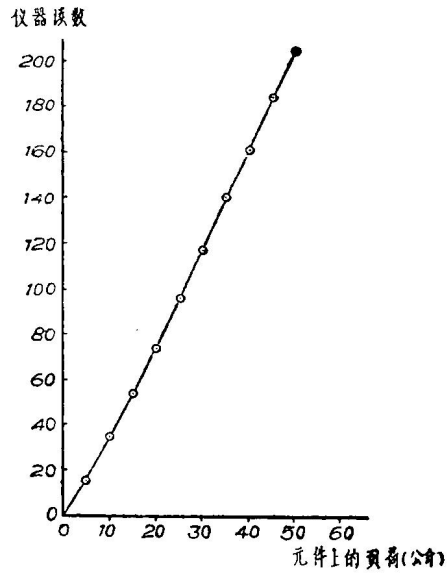


图 2b 元件的标定曲线

了解除槽之后，还剩有明显的压力，那么就可以保持低的误差。

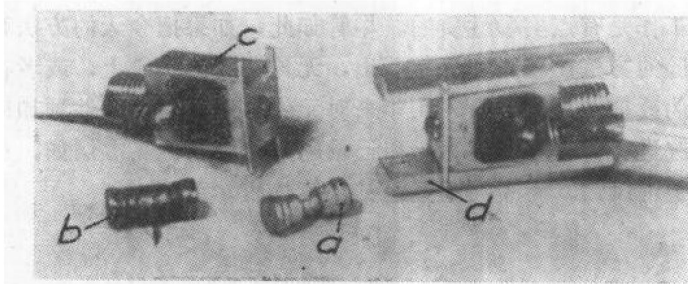


图 3a 较早的元件、套和支承外形。a是镍磁芯；b是整个元件；c是在套里的元件；d是装配上的一个锥形支承

(3) 预加应力的方法——目前的系统

在格兰耶斯贝里矿井里，必须在离岩石表面相当深的深度测定主应力大小和方向。为此，设计了新的元件套和嵌入元件以及对元件预加应力的装置，如图3b和4a-b所示。图3b示出元件套，图4b示出嵌入元件及对元件预加应力的装置，它是在格兰耶斯贝里矿井里进行

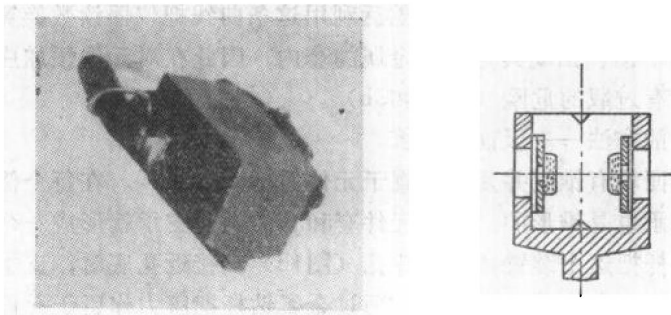


图 3b 新设计的元件套。一个支承和元件套铸成一体

测量工作期间改进的。可以把元件嵌入在所要求的角度上，并在所需深度高度精确地预加应力。至今已在15米的深处做了测量，但使用这种新设备，能在更深处进行测量。

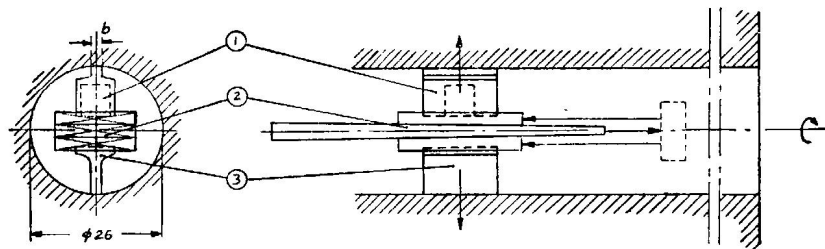


图 4a 预加应力原理。①元件；②三部件楔子系统；③支承
通过转动位于元件孔外面的曲柄把压力正向压到孔壁。箭头表示摩擦力怎样被楔子系统所限制，而不影响元件套和支承

图4a示出元件、T形支承和三部件楔子系统（即由三个斜块构成——译者注），当元件已放到所需的深度，并且在垂直于元件孔轴的测量平面内放在所测量的方向上时，通过这个楔子系统对元件预加应力。由于设计了这种装置（同早先的方法相比，它能利用元件

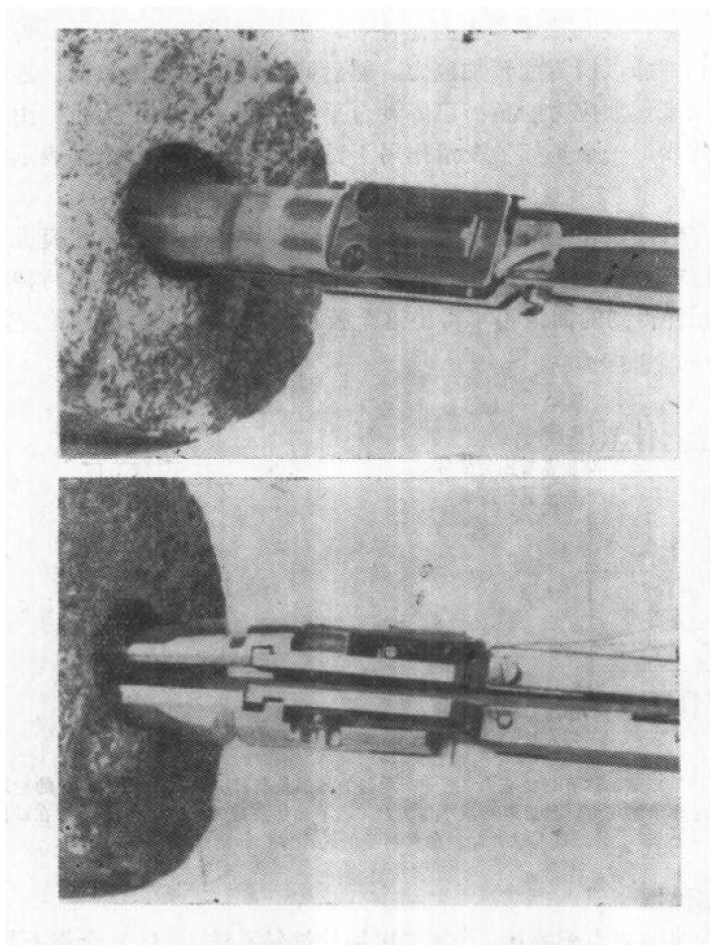


图 4b 元件安装和预加应力的新装置

上预加应力的较大部分),因而加宽了元件的工作范围。在所设计的系统中,对元件装置预加应力时产生的摩擦力完全作用在三部件楔子系统内,而没有作用于元件、套、支承或孔壁。

在新的型号中,把套设计成与一个支承连成一块,元件位于套内的一个凹槽里(图3b)。而另一个支承是T形的。三部件楔子系统的锥体形成一个平行体。每个楔子、支承和套与楔子的各接触面都是精密研磨光的。

在最新的型号里,可以用装有一个测量元件的套来代替图4a中的T形导杆。这样,可由两个元件来读出应力的大小,但是测量的量程减小。

(4) 标定

为了直接从元件记录的数值来计算主应力的大小和方向需要标定元件。这是在一个专用棱柱内进行的,并且是这个测量方法一个不可缺少的部分,从而大大地简化计算和提高测定应力的精度。

试件是金属的——例如钢、黄铜或铝——或者是待测应力的那种类型的岩石。图5即为一种试件。孔A的直径 d 等于元件孔的直径——即26毫米。在矩形棱柱试件的情况下,宽度 b 等于岩心直径。

把试件放在一个压力机上,通过可消除摩擦的多孔木纤维板把压力 P 均匀地加到试件的两个端面上。然后,放入置于套里的元件B,使其测量方向平行于试件的轴(因此平行于压力 P),对元件施以所需的预加应力。然后同步减小压力机负荷,连续取元件的读数,直到元件上原来预加应力的负荷已降到合乎要求的最低水平为止。由此,绘制试件内测量元件的标定曲线,一个坐标轴表示作用于试件的负荷,另一个轴表示元件相应的记录值(图20)。

构成试件的材料应该和使用这个装置的岩型具有大致相同的弹性模量。不然,必须对弹性差别作校正。如果差别小,则其校正也就小,而差别大时,根据两种或更多种模量不同的试件内标定元件得到的曲线不难得出这个校正值。也可以根据理论计算进行校正,但这个过程更麻烦。

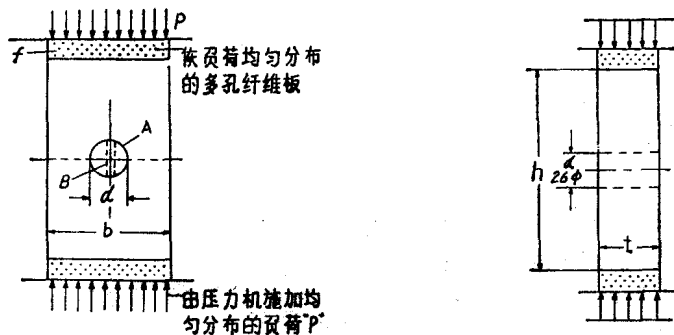


图5 通过可消除摩擦的多孔纤维板 f ,把一个均匀的外加负荷 P 加到放在压力机里的标定试件上。元件插在孔A内并预加应力。然后逐渐减小压力 P ,记下元件负荷的减少。于是,对在试件里或在刚性与试件相同的材料里的元件作出标定曲线

2. 应力解除槽

使用过两种方法钻应力解除槽:(a)风钻接缝钻孔法,(b)金钢石钻孔法。

接缝钻孔法:早期使用过这种方法。在斯德哥尔摩的坎托波(Kantorp),阿特拉斯

迪塞尔 (Atlas Diesel) 试验场和在格兰耶斯贝里的初期试验阶段, 发展了这种方法, 并在格兰耶斯贝里和莱斯瓦尔把它应用于实际工作。

这种方法是: 应力解除槽是由在一个圆周上钻许多稍微重叠的孔形成的, 因此这样形成的岩心与周围岩石完全分开, 当然, 岩心的末端除外 (图 7)。根据岩石抗张强度的高低, 岩心直径取 20 或 30 厘米。这些孔都钻过元件 20 到 30 厘米的距离。当钻完最后一个孔时, 根据元件在初始预加应力状态时的应力数值和在钻孔完成时的应力数值之差就得出在测量点和元件方向上的绝对应力值^①。每钻完一个新孔需研究岩心内应力的变化 (图 6)。应用元件孔内不同方向上的三个元件 (相隔几厘米) 有可能计算主应力, 不过由于这些测量不在同一点上, 所以这种计算只是近似的。

应补充的是: 当用一个普通的风钻来钻元件孔时, 孔的表面必须研磨光滑, 可用一个金钢石扩孔钻来完成。

金钢石钻孔法: 这种方法象接缝钻孔法一样, 给出一个连续的沟槽, 但它不是钻一系列孔, 而是逐渐加深一个环形掏槽来完成。图 8 示出金钢石钻的装置, 图 9(b) 示出有一个测量装置的元件孔。在这种过程中, 由于加深

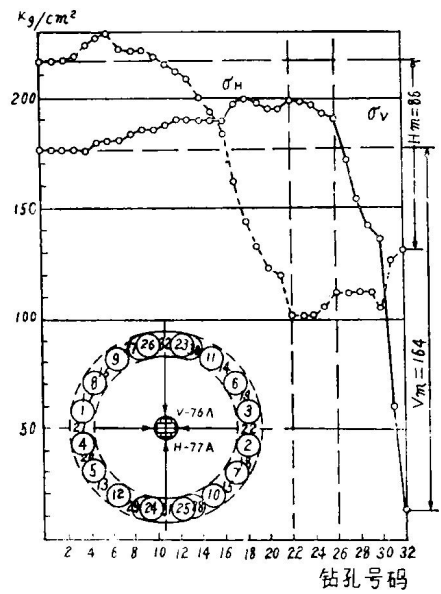
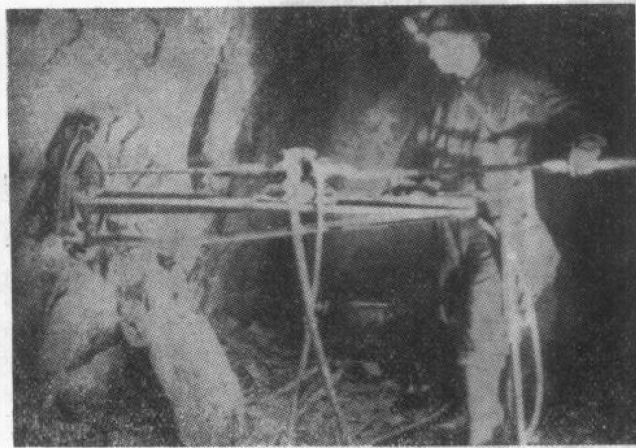
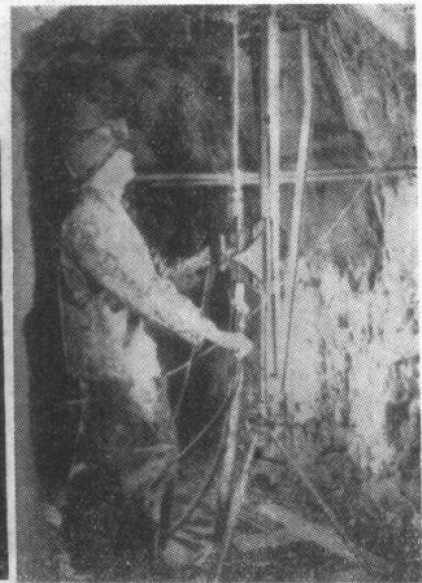


图 6 当用接缝钻孔法钻应力解除槽时, 两个邻近并且互相垂直的元件记录到的垂直应力 σ_v 和水平应力 σ_H 的变化。岩心里的数字表示钻孔的顺序。在 σ_H 曲线末端附近陡峭的上升是由于随 σ_v 迅速变化的岩心横向收缩; 在钻完应力解除槽时, V_m 和 H_m 便是记录应力值

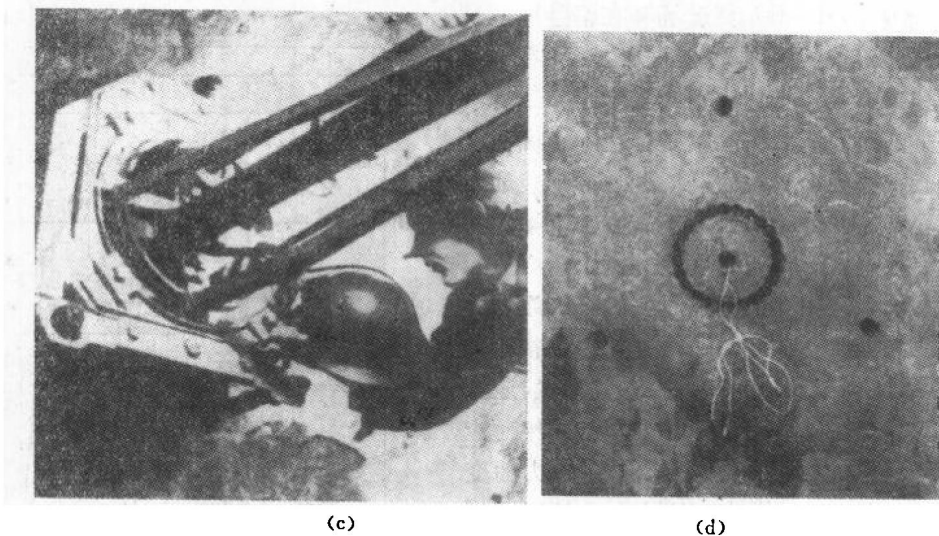


(a)



(b)

① 原文如此。这里的“绝对应力值”应改作“绝对记录应力值”为妥——译者注



(c)

(d)

图 7 接缝钻孔装置

- (a) 三脚架垂直固定于岩石表面。支架可以绕它的轴转动，并在刻度盘上读出角度。使用一个普通的风钻，这个风钻沿三脚架的一条腿滑动
- (b) 在顶部钻孔
- (c) 一种改进的装置，能在任何方向上进行横向调整钻孔装置。这样，可钻矩形接缝
- (d) 在元件孔周围全部钻完的应力解除槽，为了保证这些孔平行和邻接，当钻一个孔时，在邻近孔内放进一根铁棒

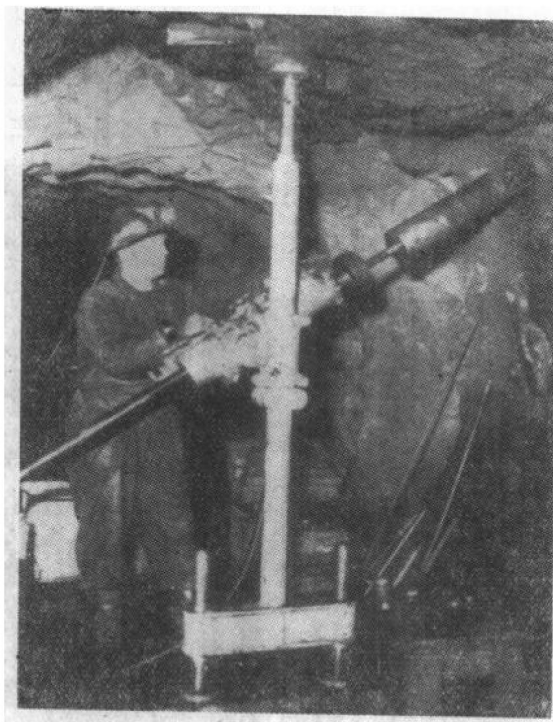


图 8 现在广泛使用的金钢石钻装置

槽A（图9b），岩心的应力逐渐消失。将元件孔钻到沟槽前面半米，这是使钻孔同心度达到足够精确的最大距离。以8—10厘米的间距依次向前放置元件，每次都在三个不同的角

度连续排列，然后加深应力解除槽，直到元件记录的负荷不再变化为止。这样测量三次或四次之后，元件孔再钻进半米左右，并重复整个过程。如果岩石压力太高或岩石刚性异乎寻常的低，那么元件测量的正常量程就不够大，因此，在钻岩心期间，可以对元件重新预加应力。在补加预加应力后，记下其数值，就可以继续钻应力解除槽和记录应力。

如果不需补加预加应力，则沿着孔的适当距离，可以同时放进许多元件。这些元件全部预加应力，然后就可以不停地钻完整个应力解除槽，记录这些元件的预加应力。

图9(a)表示一个实际的金钢石钻孔操作期间所得到的元件读数。把元件放在岩壁里钻好的元件孔内334厘米的深处。与此孔同轴，用金钢石钻头钻应力解除槽A，这样，钻头便逐渐接近放元件的地点。当应力解除槽到达离岩石表面329厘米的深度时，元件的预加应力值为600公斤/厘米²。然后，在钻解除槽期间，这条槽越是接近元件，预加应力值就降得越低，元件周围的岩石应力逐渐被解除。在334厘米处通过元件，但仅在解除槽前沿超过元件约5厘米之后——即于339厘米——元件记录值就保持不变。为了测定应力，要求总的钻孔距离为339 - 329 = 10厘米——近似地等于这个试验的岩心直径。应力集中于应力解除槽的底部，和孔轴成45°角。

金钢石钻孔法不象接缝钻孔法暂时产生大的应力增加，因此可以减小岩柱直径，外径

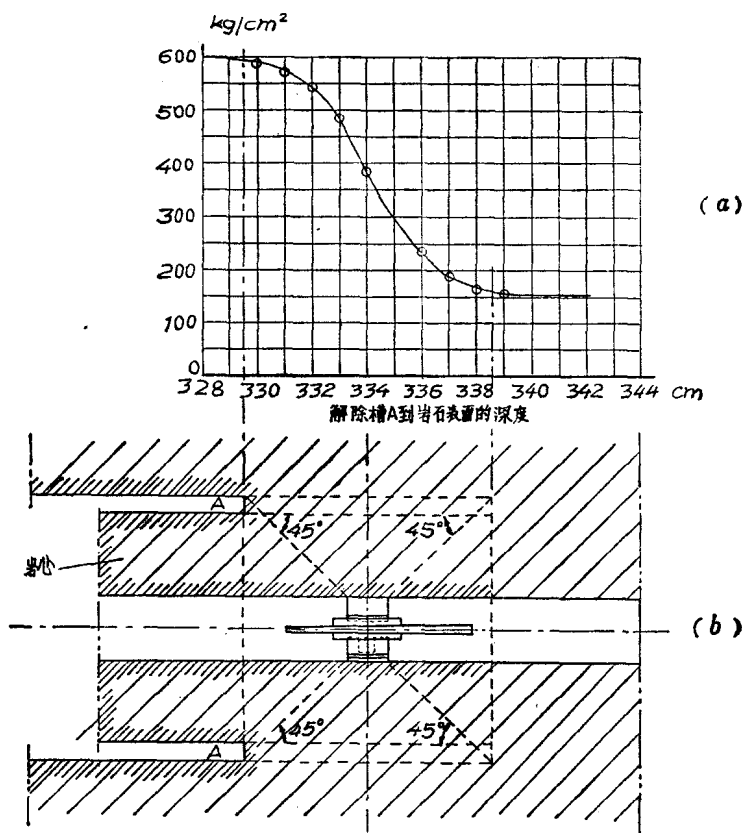


图 9

- (a)表示用金钢石钻孔法正在钻应力解除槽时，元件记录的岩石应力的变化，
 (b)是通过测量孔的一个纵向截面，正在钻岩心。当解除槽底部离元件4—5厘米时，元件开始记录到应力变化，而槽底部超过元件4厘米时，应力几乎不再变化

为101和140毫米的标准金钢石钻头是适合的，这两种钻头钻出的岩心直径分别约为87和132毫米。通常用较小直径的钻头。

四、主应力的测定

1. 计算

在受应力的岩石内钻一个孔，同应力场的范围相比，孔径是小的。把元件放到孔内一定深度，并预加应力，因而它就沿径向顶在孔壁的对应点上。孔的形状随岩石应力的改变而发生弹性变化。（当钻应力解除槽时，这种变化可以迅速发生；而当岩石应力本身变化时——例如在矿井里向前挖掘时，也可缓慢发生。）由于孔的形状变化，所以，在受预加应力的元件上的负荷就发生变化，并可读出数值。

假定在不受应力的岩石内，有一个半径为 a 的圆孔（图10a）。如果用一个均匀分布的负荷在 $A-A$ 方向上建立一个单轴的张应力状态，则这个孔就变成椭圆。当除去负荷时，孔便恢复圆形。如果岩石受一个负荷 P 作用时，把元件放在孔内并对元件预加应力，以便沿径向顶在孔的对应点—— f_1 和 f_2 上，则改变负荷 P 时，元件将记录 $A-A$ 方向上孔变形的总变化；实际上，在受力状态的岩石中，于元件孔周围钻解除槽时就出现这种现象。若岩石处于压应力状态，则元件上的负荷就减小；若岩石处在张应力之下，则元件上的应力就增加。

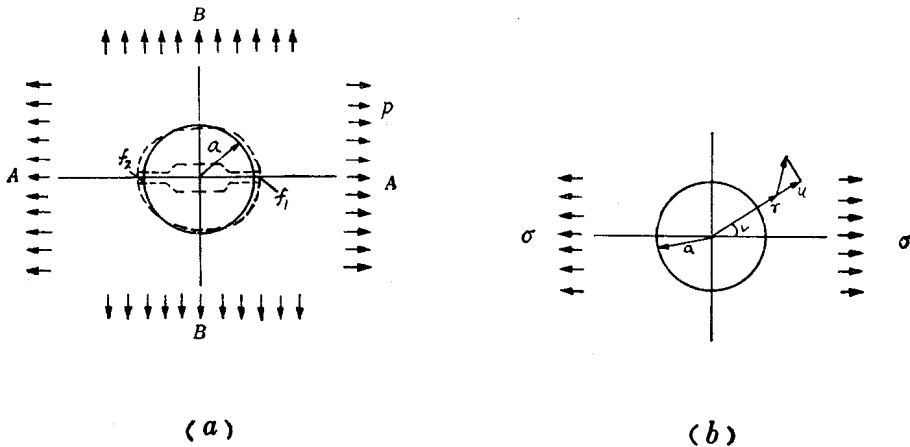


图 10

- (a) 在弹性物质内圆孔周围的应力场。在物质处于受力状态时，把一个元件放在孔内
(b) 在有单向应力场 σ 的弹性物质内，一个圆孔周围的变形

可以把一个大小和方向未知的应力场分解成两个垂直的分量 $A-A$ 和 $B-B$ ，假定这个应力场位于图象的平面内——就是说位于和元件孔轴垂直的平面内。当岩石应力状态变化时，位于此平面内任意位置的一个元件将分量场 A 和 B 引起的相应变形之和记录下来。把元件放在测量平面的三个方向上，可以从下面给出的公式确定未知的应力场。如同钻出岩心时所发生的那样，应力场被完全解除时，则得到应力的绝对值。仅仅通过观测三个元件读数的变化，就能记录未知应力场在一段时期发生的变化。由于采用的元件没有性能随时间而变坏的活动部件，所以适合于长期观测。在需要监视应力场可能是逐渐变化的

地方,譬如,矿井里某一部分岩石,这种形式的观测可能有意义。然而应该提到,当观测时间非常长时,最好是每隔一定的时间就做岩石压力的绝对测定,据此,就明显地得到应力场的变化。

位于均匀应力场内横截面为圆形的单孔附近应力状态扰动问题的解是基尔希(Kirsch)给出的,可以表示为:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma}{2} \left\{ \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \left(1 - \frac{3a^2}{r^2} \right) \cos 2v \right\} \\ \sigma_v &= \frac{\sigma}{2} \left\{ \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2v \right\} \\ \tau_{rv} &= - \frac{\sigma}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \cdot \left(1 + \frac{3a^2}{r^2} \right) \cdot \sin 2v\end{aligned}$$

式中 σ_r ——是径向应力

σ_v ——是切向应力

τ_{rv} ——是剪应力

r ——是从孔的中心到材料内一给定点的距离

a ——是孔半径

v ——是应力场方向和测量方向之间的夹角。

由这些公式,可以确定孔周围岩石的变形状态(图10b)。若取元件材料的弹性模量为零,则作为一种特殊情形,我们考察孔壁的径向变形 u ——即元件所记录的变形。

径向变形 u 由下式给出

$$u = \frac{a \cdot \sigma}{E} (1 + 2 \cos 2v)$$

E 是钻孔的材料的杨氏弹性模量。

如果两个互相垂直的单向应力(例如某一未知应力场的分量)作用于紧邻孔的岩石里(图10a),其径向变形为:

$$u = (\sigma_1 + \sigma_2) \frac{a}{E} + (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{2a}{E} \cdot \cos 2v$$

式中 σ_1 和 σ_2 是所要求的应力场的主应力, v 是主应力 σ_1 的方向和测量方向之间的夹角。在三个不同方向上测量 u (已知三个方向相互间的角度关系),就足以解这个方程。

假定有三个用这种元件记录的 u 值。三个测量方向之间的角度取为 60° 或 45° ,则得到 σ_1 、 σ_2 和角度的简单表达式,这个角度是主应力 σ_1 和一个任意方向所成的夹角。于是,据此可确定三个测量方向中的每一个方向的 v 角。通常最好是把一个测量方向选为这个任意方向。

因为这些元件紧紧跟随因钻孔材料里应力波动引起的元件孔表面的变形,所以预加应力应该这样高以至岩心周围的应力完全解除时,预加应力也不消失。在钻应力解除槽时,如果发现测量点的应力高于或接近元件的预加应力值,则可以暂停钻孔,而对元件追加“预加应力”。在应力比能安全地对元件施加的预加应力值高的情况下,可按同样方法处理。

作用于元件的负荷不仅使元件与孔壁的接触点 f_1 和 f_2 (图10a)产生变形,而且使元件

孔周围岩石里更深的点产生变形。由于岩石应力状态的变化，当孔的形状变化从而元件应力变化时， f_1 和 f_2 的接触压力也就变化，这又在这些点周围的孔壁上引起局部变形。因此，这些元件不是纯粹起形变计的作用，而宁可说是起应力计的作用，这样就使计算复杂化了。必须考虑元件本身的弹性以及 f_1 和 f_2 的接触压力所引起的二次弹性变形。

在 f_1 和 f_2 的接触面是圆形的情况下，后一分量可以从布斯西内斯格 (Boussinesq) 公式计算出来。

除了上述在 f_1 和 f_2 能以足够大的压力工作这个优点之外，应力计较之形变计具有另一个优点即测量系统不很灵敏——也就是说，在标定试件材料的弹性和钻孔周围实际岩石的弹性不相同的情况下，需要的校正较小。

在一个专用试件里 (第5页) 标定元件可以避免这些计算的困难并使整个方法简化，因为在标定过程中已自行计及元件的变形和因元件造成的孔壁凹陷。由于用做标定试件的材料和测量岩石具有大致相同的弹性模量，并使孔的直径和实际的直径一样，所以从上述 u 的公式可消去 a 和 E 。于是在各个情况下，可以选择弹性值合适的元件，而不需涉及变形计算。如果测量需要大量程，例如在岩石应力非常高的情况下，或岩石弹性模量低时，元件的弹性必须低。另一方面，如果要精度高●，可以使用刚性较大的元件。然而，如上所述，在实际测量过程中，通过对元件再次“预加应力”也能达到这些目的。后一种方法具有这样的优点，即在一个大量程内记录应力状态时，仍然允许使用灵敏的元件。

所述的测量岩石压力的方法和相关的标定方法，大大简化用记录值计算应力。如果标定试件和测定应力的岩石的弹性模量相等，则可以导出非常简单的公式。在测量方向之间的角度是 60° 和 45° 的场合，下式成立●。

测量方向之间的角度为 60° ：

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left\{ \sigma' + \sigma'' + \sigma''' + \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma' - \sigma'')^2 + (\sigma'' - \sigma''')^2 + (\sigma''' - \sigma')^2 \right]} \right\}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left\{ \sigma' + \sigma'' + \sigma''' - \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma' - \sigma'')^2 + (\sigma'' - \sigma''')^2 + (\sigma''' - \sigma')^2 \right]} \right\}$$

$$\tan 2w = \sqrt{3} \frac{\sigma'' - \sigma'''}{2\sigma' - (\sigma'' + \sigma''')}$$

而且

$$\frac{\sin 2w}{\sigma'' - \sigma'''} > 0$$

测量方向之间的角度为 45° ：

$$\sigma_1 = \frac{3}{4} \left\{ \sigma' + \sigma''' + \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma' - \sigma'')^2 + (\sigma'' - \sigma''')^2 \right]} \right\}$$

$$\sigma_2 = \frac{3}{4} \left\{ \sigma' + \sigma''' - \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma' - \sigma'')^2 + (\sigma'' - \sigma''')^2 \right]} \right\}$$

$$\tan 2w = \frac{2\sigma'' - (\sigma' + \sigma''')}{\sigma' - \sigma''}$$

● 高精度系指杨氏模量值对测量结果的影响较小些——译者注

● 这些表达式的简单形式是与詹·赫尔特 (Jan Hult) 先生合作导出的