

套筒致裂法测试地应力 原理、技术与应用

经来旺 张 浩 郝朋伟 ● 著

中国科学技术大学出版社



套筒致裂法测试地应力 原理、技术与应用

经来旺 张 浩 郝朋伟 ● 著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书围绕“地应力测试原理与技术”展开研究。全书共包括 8 章具体内容,依次对原始地应力的基本特征、现有地应力测试方法、套筒致裂法的理论基础、套筒致裂法测试地应力的基本原理、套筒致裂法地应力测试的方法与步骤、孙疃煤矿原岩应力测试及结果分析、地应力对孙疃煤矿主要岩石巷道稳定性的影响等内容进行了较为详尽的介绍。全书理论与实践相互印证,内容丰富,题材鲜明,可作为煤矿工程技术人员、高校专业教师、专业设计人员施工、教学与设计等方面的重要参考材料。

图书在版编目(CIP)数据

套筒致裂法测试地应力原理、技术与应用/经来旺,张浩,郝朋伟著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2012. 2

ISBN 978-7-312-02961-5

I. 套… II. ①经…②张…③郝… III. 地应力测量—研究 IV. P315.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 265820 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
网址: <http://press.ustc.edu.cn>
印刷 中国科学技术大学印刷厂
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×1000 mm 1/16
印张 8.25
字数 180 千
版次 2012 年 2 月第 1 版
印次 2012 年 2 月第 1 次印刷
定价 18.00 元

前 言

长期以来,地应力测试是很多工农业、国防、水利等工程设计、施工的重要基础依据,对于诸如煤矿等地下工程而言,尤其重要。从科学采矿的角度而言,采区、巷道的设计与布置,除了应考虑断层分布和岩层分布规律外,还应该考虑地应力分布规律,否则,巷道支护的设计、煤层开采的方式及工艺就失去了一个重要的科学依据。

由于某些原因,很多现行的地应力测试方法难以适应煤矿等地下工程测试的要求,其中最为主要的原因是测试过程极难控制,致使测试结果的准确程度难以保证。基于这种情况,寻求一种操作简便、过程能够严格控制、理论科学准确的测试方法就显得十分必要。套筒致裂法及相关测试原理与设备就是在这样一种背景下诞生出来的。

套筒致裂法测试地应力的基本原理是利用测点处互相垂直的三方向致裂压力直接测出主地应力的大小、方位,即直接给出测点主单元体。测试过程中压力的变化采用智能压力计连续计数,计数频率最高可达 10~60 个/秒,依据两次致裂获得的连续变化的压力值即可直接确定套筒致裂压力。

该测试方法的最大优点在于可以直接获取主地应力大小、方位,不需要借助测点岩石的弹性常数,同时还可以对上覆岩层的重量进行准确的推算。此外,本书还详细地介绍了构造应力的求解方法及测点上下一定范围内各层岩层中构造应力及主地应力的大小与方位的计算原理,并通过具体实例给予了示范。

本书共分 8 章,其中第 1、2、3、4 章由经来旺、郝朋伟共同撰写,第 5、6、7、8 章以及附录 A、附录 B 由张浩撰写。全书由经来旺规划、整理。

本书在撰写过程中得到了淮北矿业集团的大力支持与帮助,在此深表感谢!

编 者

2011 年 8 月 26 日

目 录

前言	(I)
第 1 章 地应力的基本特征	(1)
1.1 与地应力相关的几个基本概念	(1)
1.2 地应力分布的若干规律	(2)
1.3 原始地应力基本特征分析	(2)
1.3.1 自重应力赋存特征分析	(2)
1.3.2 构造应力赋存特征分析	(4)
1.3.3 原始地应力的最终形态	(5)
第 2 章 现有地应力测试方法评述	(6)
2.1 现有地应力测试方法概况	(6)
2.1.1 应力恢复法	(6)
2.1.2 应力解除法	(7)
2.1.3 水压致裂法	(7)
2.1.4 地球物理方法	(8)
2.1.5 地质测绘法	(8)
2.2 已有测试方法总评	(9)
2.2.1 间接测试法	(9)
2.2.2 地质测绘法	(9)
2.2.3 直接测试法	(9)
2.3 套筒致裂法的基本特征	(10)
第 3 章 套筒致裂法的理论基础	(11)
3.1 弹性力学(平面问题)的基本方程	(11)
3.1.1 弹性力学中的主要符号	(11)
3.1.2 直角坐标系下的基本方程	(12)
3.1.3 极坐标系下的基本方程	(13)
3.1.4 应力分量的坐标变换式	(13)
3.2 轴对称应力和相应的位移	(14)
3.3 轴对称圆环或圆筒受均布压力情况	(16)

3.4	钻孔内压所引起的孔壁切向应力	(18)
3.5	围岩应力作用下圆孔周边应力分布	(20)
3.5.1	力学模型的建立	(20)
3.5.2	问题一的求解	(22)
3.5.3	问题二的求解	(22)
3.5.4	圆孔孔口应力集中问题的最终解答	(24)
3.6	围岩应力及孔壁内压共同作用下圆孔周边应力分布	(24)
3.7	套筒致裂理论依据概述	(25)
第4章	套筒致裂法地应力测试的基本原理	(28)
4.1	三孔致裂测试法基本步骤及结果分析	(28)
4.1.1	竖直孔致裂结果分析	(29)
4.1.2	首次水平钻孔致裂测试分析	(30)
4.1.3	第二次水平钻孔致裂测试分析	(30)
4.1.4	三孔致裂测试结果整理	(31)
4.2	地应力测试的单孔致裂法	(33)
4.2.1	单孔致裂法基本原理	(33)
4.2.2	地应力构成分析	(34)
4.2.3	单孔致裂法总结	(38)
第5章	套筒致裂法地应力测试的方法及步骤	(39)
5.1	测试仪器	(39)
5.2	测试步骤	(40)
5.2.1	选择合适的测试地点	(40)
5.2.2	竖直孔致裂测试	(41)
5.2.3	水平孔致裂测试	(42)
5.2.4	第二个水平钻孔的测试分析	(44)
第6章	孙疃煤矿原岩应力测试结果分析	(45)
6.1	孙疃煤矿地质构造特征	(45)
6.1.1	淮北煤田总体构造特征	(45)
6.1.2	孙疃煤矿地质构造特征	(45)
6.1.3	孙疃煤矿局部构造应力场分析	(47)
6.2	孙疃煤矿主采煤层岩性特征分析	(47)
6.2.1	7 ₂ 煤	(47)
6.2.2	8 ₂ 煤	(48)
6.2.3	10煤	(48)
6.2.4	可采煤层顶底板岩性特征	(49)

6.3 测试地点选择及测试钻孔施工要求	(49)
6.4 测试结果处理	(52)
6.4.1 南轨道大巷 N84 测点测试结果处理	(52)
6.4.2 南轨道大巷停头位置测试结果处理	(65)
6.5 测试结果综合分析	(75)
6.5.1 自重应力分析	(75)
6.5.2 构造应力分析	(76)
6.5.3 上下各岩层构造应力分析	(79)
6.5.4 上下各岩层原始地应力分析	(84)
第 7 章 孙疃煤矿竖直测孔岩性测试报告	(86)
7.1 测试内容	(86)
7.1.1 取样地点	(86)
7.1.2 主要测定内容	(86)
7.2 采样的基本要求	(86)
7.3 试件的加工与测试	(87)
7.3.1 试件加工	(87)
7.3.2 试件数量	(87)
7.3.3 试验设备与试验方法	(87)
7.4 测试系统及部分测试前后的试件	(88)
7.5 测试结构报告	(90)
7.6 部分试件测试曲线	(91)
第 8 章 地应力对孙疃煤矿主要巷道及工作面的影响	(95)
8.1 孙疃煤矿原始地应力特征分析	(95)
8.1.1 地应力数值特征	(95)
8.1.2 地应力分布特征	(95)
8.2 地应力分布对孙疃煤矿主要巷道与采煤工作面的影响	(96)
8.2.1 对采煤工作面的影响	(96)
8.2.2 对主要巷道的影响	(97)
附录 A 孙疃矿区上覆岩层容重计算依据	(100)
附录 B 钻孔设备及使用方法简介	(120)
参考文献	(124)

第 1 章 地应力的基本特征

1.1 与地应力相关的几个基本概念

岩石是地球表层的物质,在漫长的地质年代里,由于自身重力、地质构造运动等原因使地壳物质产生了内应力效应,这种应力称为地应力。

由于影响因素众多,地下应力状态也异常复杂,为了描述各种条件下的应力状态,不得不采用较多的术语。遗憾的是,对各个术语的用法至今尚无一个公认的约定,为避免混淆,在此先阐明本测试方案所用术语的涵义。

本方案认为,原始地应力是存在于地层中的未受工程扰动的天然应力,也称岩体的初始应力、绝对应力、原始地应力或原岩应力。它是由自重应力、构造应力等天然因素形成的,并未受到任何人为因素的影响。

原始地应力主要有两个构成部分:(1) 因地球引力的作用形成的地应力,可称为静态地应力,或称自重应力;(2) 因各种地壳运动的影响而产生的地应力,称为构造应力。构造应力又可分为基本应力和附加应力。前者是构成地壳构造应力的基础应力,属一级构造力,地球自转引起的应力即属于此类。附加应力则是由地质构造活动产生,如板块挤压、变形、断裂均会导致局部区域内产生较大的附加应力,这部分应力是煤矿巷道支护和生产过程中导致巷道破坏、引发安全事故的主要因素之一。

地下工程施工后,开挖体附近围岩的应力场将重新分布,重新分布后的应力称为围岩应力或次生应力。围岩应力与原岩应力有着直接的关系,同时又受到开挖体几何尺寸、围岩性质、结构面特征、支护特征等因素的影响,可以依据原岩应力通过一定的手段计算获得。

对于深入岩层的钻孔来说,如果它位于开挖体附近的围岩中,则钻孔周边的应力是在开挖体和原岩应力共同作用下形成的;如果钻孔所在位置已超出开挖工程的影响范围,那么钻孔周边的应力则完全由原岩应力作用而形成。

1.2 地应力分布的若干规律

形成地应力的因素极为复杂,包括板块边界之间的相互挤压、地幔热对流、地质构造运动和地球旋转、重力、温度不均、岩浆侵入和地壳非均匀扩容、水压梯度等。要把这么多种因素完全搞清楚是十分困难的,但从岩土工程角度来看,由于工程涉及的范围是有限的,因此相对应的区域性地应力的形成因素并不是太复杂。

对于近水平的岩层而言,通常情况下,在局部构造影响范围之外的区域,地应力在空间上可分为垂向主应力和水平最大主应力及水平最小主应力,垂向主应力是由静岩压力所引起的,而两个水平主应力则是由构造运动引起的基础应力和重力引发的水平侧压力构成。

在局部构造带,地应力则比较复杂,很多情况下,主地应力的方位并非沿着垂直与水平方向,往往与岩层的走向密切相关。

近 30 年来的国内外大量实测资料证明:地应力是一个相对稳定的应力场,它的分布具有以下规律:

- ① 地壳中主应力为压应力,方向基本上是铅直和水平的。
- ② 在一定深度内,垂直应力随深度呈线性增长,且基本等于上覆岩层的重量。
- ③ 水平应力分布比较复杂,具有下列特征:最大水平应力分量绝大多数大于垂直应力分量,地壳中的第一主应力方向接近水平,两个水平主应力分量并不相等,但均表现出随深度呈线性增长的规律。
- ④ 一个相当大的区域内,最大主应力方向是相对稳定的。
- ⑤ 区域构造常常决定局部点的主应力。

1.3 原始地应力基本特征分析

原始地应力有两个构成部分:自重应力和构造应力。它们的成因不同,赋存方式也不同。分析原始地应力时不妨对这两种应力分别进行分析,而后将结果进行叠加,最终还原原始地应力的本来面目。这样可以使原始地应力的分析变得较为简单。

1.3.1 自重应力赋存特征分析

如图 1-1 所示,试想用 6 个平面从地壳中截取一个正六面体的单元体做为研

究对象,该单元体势必受到周围岩体的作用。根据弹性力学的规定,单元体的6个外表面分别用其外法线方向定义:正 x 面、正 y 面、正 z 面、负 x 面、负 y 面、负 z 面。 x 、 y 、 z 三个方向的正应力分别记为 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 。

倘若该单元体所属区域没有构造应力存在,而且单元体的三对外表面中有一对是水平平面,另外两对是竖直平面,那么无论图1-1中的单元体在水平方向上的方位如何,它的6个外表面上都不会有切应力存在。

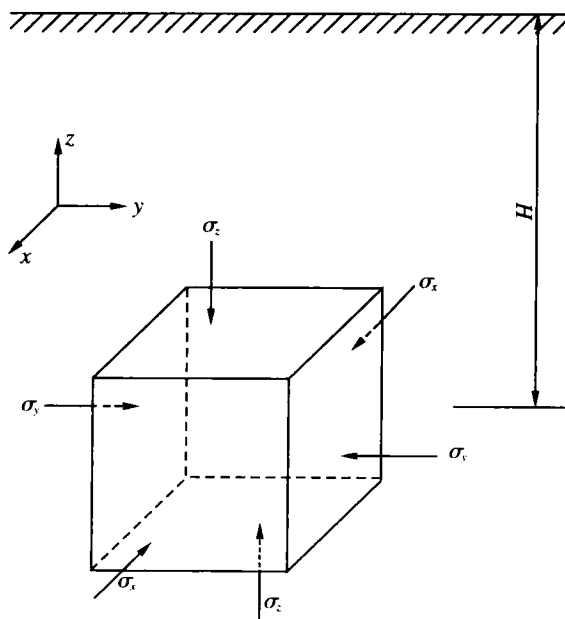


图1-1 无构造应力时取自岩层的六面体单元体受力情况示意图

图1-1中, z 方向上的应力 σ_z 代表着竖直方向的应力,它是由上覆岩层的重力引起的;其余的两个方向上的应力,也就是 x 、 y 方向上的应力 σ_x 、 σ_y 是由 σ_z 引起的侧向应力。

σ_x 、 σ_y 和 σ_z 都会随着单元体埋藏深度 H 的增加而增大,如果单元体上覆岩层的容重基本一致,岩体内的自重应力就会呈现如图1-2所示的赋存状态。

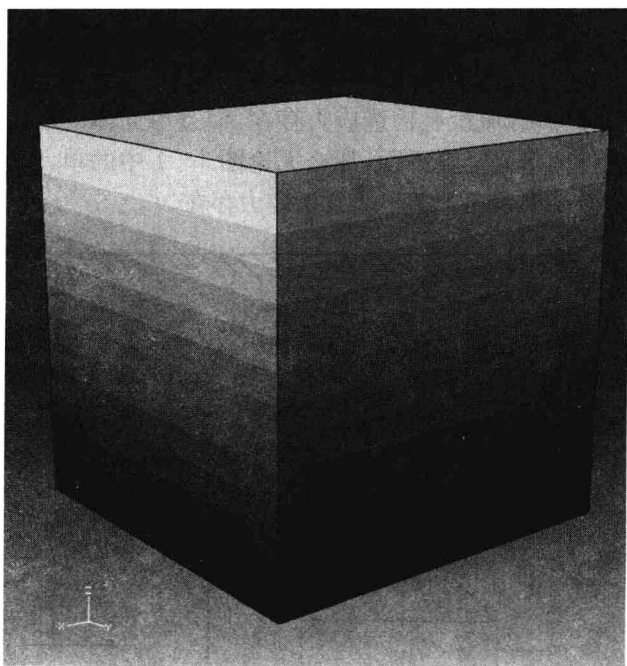


图 1-2 自重应力赋存状态示意图

1.3.2 构造应力赋存特征分析

构造应力场是各种地壳运动对岩层作用效果的最终显现,显现的形式包括板块边界挤压造成的应力场、地幔热对流引起的应力场、温度不均引起的应力场、岩浆侵入和地壳非均匀扩容引起的应力场、水压梯度引起的应力场等。

构造应力的传播方向可以是任意的,但对于以沉积岩层为主的煤矿矿区来说,板块挤压所造成的应力场是最主要的,热对流应力场、温度应力场等的影响无疑是微小的。因而煤矿矿区的构造应力势必在岩层内沿着岩层层面传播,如果岩层面是近水平的,构造应力也会是近水平的。

图 1-3 中,以地理北极、正东方向和竖直向上方向为轴建立的直角坐标系“割取”了某岩层的一部分。岩层的走向、倾向、倾角都可以在坐标系中清楚地表示出来,岩层中的构造应力也可以用一个“构造应力的主单元体”清楚地表示出来。该单元体表明,构造应力可由两个均沿岩层层面分布且相互垂直的应力 σ_{T1} 和 σ_{T2} 表示。

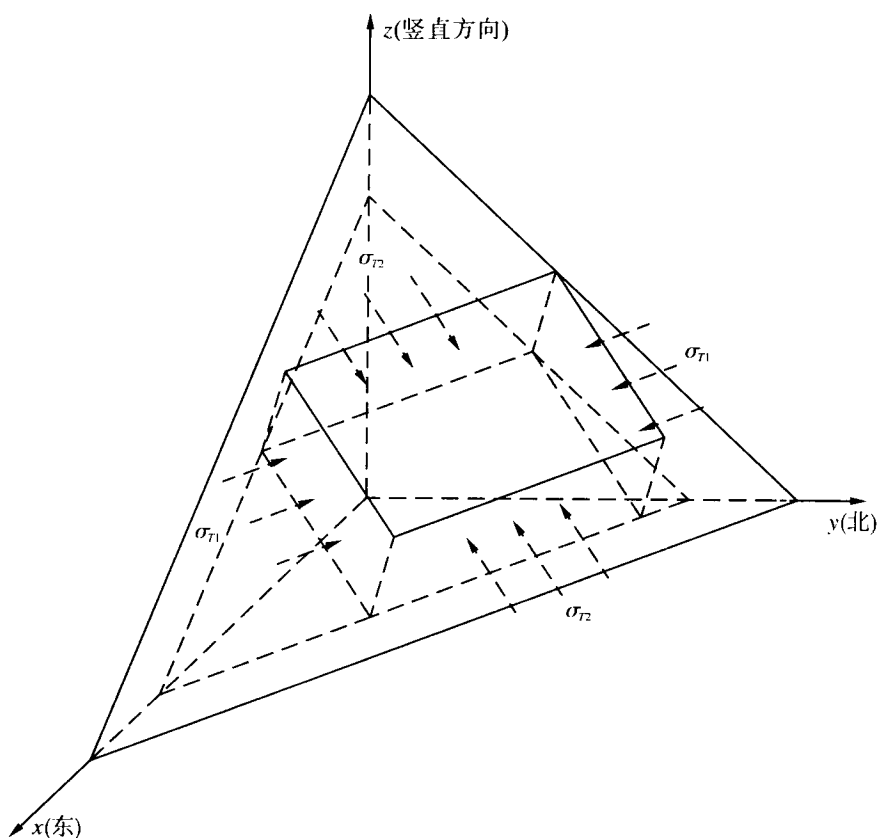


图 1-3 构造应力主单元体示意图

1.3.3 原始地应力的最终形态

图 1-1 和图 1-3 中单元体的方位、倾角各不相同,但其上的应力是可以根据弹性力学的基本知识合成的,合成的最终结果也就反映了原始地应力的最终形态。关于两个单元体上应力的计算及合成方法将在后文详细介绍。

第 2 章 现有地应力测试方法评述

2.1 现有地应力测试方法概况

目前,用于煤矿地应力测试的方法较多,具体如图 2-1 所示,下面分别进行评述。

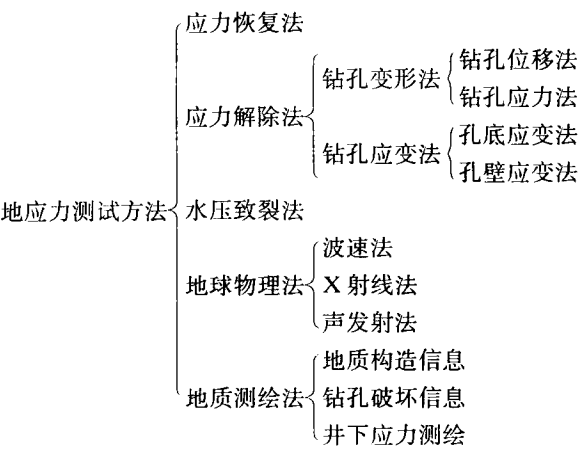


图 2-1 地应力测试方法汇总

2.1.1 应力恢复法

应力恢复法是较早的测量地应力的方法,其实质是将已解除了应力的岩石,用平面千斤顶使其恢复到初始应力状态。该方法能直接测读应力,可以避免使用岩石弹性模量换算所带来的误差,而且测试方便。但由于在岩壁上开槽深度受到限制,测量深度小,测出的是围岩的二次应力,且只能测已知主应力方向的应力大小,因此适用范围很小。

2.1.2 应力解除法

应力解除法又称套芯法。它是目前应用最广的一种应力测量方法。这一方法是在岩石中先钻一测量孔,将测量传感器安装在测孔中并观测读数,然后在测量孔外同心套钻钻取岩芯,使岩芯与围岩脱离。岩芯因应力被解除而产生弹性恢复。根据应力解除前后仪器所测得的差值,计算出应力值的大小和方向。目前世界各国用于应力解除的测量传感器有近百种,但从测量原理上基本可分为两大类:钻孔变形法和钻孔应变法。

钻孔变形法是通过测量应力解除前后钻孔孔径的变化来反演计算应力。按所使用传感器的刚度不同,又分为钻孔位移法和钻孔应力法。钻孔位移法是直接测量应力解除前后的钻孔孔径变化,从而计算应力。钻孔应力法是把一种刚性钻孔变形计安装在测量孔内,通过测量应力解除前后变形计上的压力变化来计算应力。

钻孔应变法可分为孔底应变法和孔壁应变法。孔底应变法是通过测量应力解除前后钻孔端部的应变变化来计算应力。孔壁应变法是通过测量应力解除前后钻孔孔壁表面的应变变化来计算应力。

总的来说,钻孔应变法使用方便,费用较低,可实现单孔三维应力测量,这是它的显著优点。但钻孔应变法容易受岩石晶粒尺寸及微裂隙的影响,应变计读数的漂移量太大,应变计的粘贴和防潮技术也比较复杂,尤其是在有水钻孔中测量更为困难。

2.1.3 水压致裂法

水压致裂法测量钻孔中的应力,是利用一对可膨胀的橡胶封隔器,在选定的测量深度封隔一段裸露的岩孔,然后通过泵入流体对这段钻孔增压,压力持续增高直至钻孔围岩产生破裂,继续加压使破裂扩展,压裂过程中记录压力、流量随时间的变化,根据压力—时间曲线即可求出主应力的大小。主应力方位可根据印模确定的破裂方位而定。水压致裂法不需要套芯,也不需要精密复杂的井下仪器,操作方便,无需知道岩石的弹性参量。

水压致裂法作为一种很有发展前途的地应力测试方法,主要用于地面深井测量,现已得到国内外比较广泛的应用。美国、德国、日本等发达国家水压致裂设备和仪器比较先进,最大测量深度达 5100 m。我国水电系统、国家地震局地壳应力研究所也在 1980 年开始引进和研制这套技术,并应用于水电站和地震预测等方面,取得了可喜的成果,目前最大测量深度达 800 m。但水压致裂法所需设备庞大,钻孔孔径大,测量仪器昂贵,测试费用极高,只能适用于地面大型工程,无法用于井下巷道地应力的快速测量。目前国内还没有用于煤矿井下巷道地应力快速测

量的水压致裂测量装置。

2.1.4 地球物理方法

地球物理方法包括光弹性应力测定法、波速法、X 射线法、声发射法等。

光弹性应力测定法是利用光弹性学原理测定岩体表面或钻孔中的应力变化,这种方法的灵敏度较低。

波速法是利用超声波或地震波在岩石中的传播速度的变化来测量应力。应用原理是岩石受到应力作用时会影响到波的传播速度。但是,波速法测定应力在理论上存在问题,波速与应力张量之间不存在明确的线性关系,这种方法目前应用还不广泛。

X 射线法测定岩石的应力是测量接近抛光的定向石英晶片样品原子间的间距 d ,把所得的原子间距 d 与无应变的石英原子间距相比较就可以计算出应力。这种方法的明显困难是如何将其应用于测量岩体中的应力,而不是测量岩石表面的应力。

近年来,有的学者研究了利用声发射方法研究岩石的应力历史,以确定岩石中的应力。凯瑟(Kaiser)在 1957 年发现,脆性材料在单调增加的应力作用下,当应力达到已承受过的最大应力时声发射活动性开始显著增加,利用此效应可以估计材料曾经承受过的最大应力。用声发射法研究岩体应力历史的工作在理论上和实际上都还有待进一步研究。

2.1.5 地质测绘法

1. 地质构造信息法

现在的地应力状态与现存的地质构造有密切关系,通过观察这些构造,可以获得主应力方向(只有最新的地质构造才能提供比较可靠的地应力信息)。它可以与现场原岩应力实测结果相比较,证实其可靠性。主应力方向可由大规模的断层、褶皱走向判断。在小范围内,可根据节理、裂隙的方向判断。

2. 钻孔破坏信息法

大量实践表明,钻孔的破坏主要由集中在孔壁上的压剪裂纹形成,其方向垂直于最小主应力。目前测量钻孔破坏的仪器主要是四臂测斜仪,此外也可用六臂测斜仪或钻孔电视等仪器。由于钻孔费用极高,所以这种方法只能用于为其他目的而打的钻孔中。同时,此法只能提供地应力的方向,而不能确定其大小。

3. 井下应力测绘

观测资料表明,在大偏应力场中,煤层顶板中产生的水平应力将会引起低角度剪切裂纹产生。如果顶板岩层暴露在外面,则在井下很容易测绘。在矩形巷道中,

当主应力方向近似水平和垂直时,裂纹走向将垂直于最小水平主应力的方向。当矩形巷道与最大水平主应力成一定角度时,在掘进工作面一侧将产生严重的应力集中现象,巷道一侧出现“槽沟破坏”。当巷道与最大水平主应力方向平行时,巷道受力状况最好。

2.2 已有测试方法总评

2.2.1 间接测试法

上述几种地应力测试方法中,应力解除法、应力恢复法和地球物理法均属于间接测试方法。间接测试有完备的理论依据,比较成熟且精确的测试仪器也很多,但整个测试过程中存在很多难以精确控制的因素,即便是非常精确的测试仪器也难以保证测试结果的准确,而且间接测试需要借助岩体的物理力学参数才能最终反算出地应力的大小及方向。

众所周知,岩石的物理力学参数中,除了密度可以精确测定外,其余参数如弹性模量等都很难精确测定。岩块的全应力应变曲线就表明岩块的变形曲线并不是线性的,也就是说,岩石的弹性模量随着外荷载的改变而改变。而且岩层中三维应力场作用下岩体的物理力学参数与实验室测试结果并不能完全吻合。

所有这些因素都使得间接测试法的测试结果的准确性难以保证。阅读现有文献可以发现,很多科研机构利用间接测试方法,如应力解除法,进行地应力测试时往往只进行一个钻孔的测试,测试结果不符合数理统计的基本要求,其准确性也就可想而知了。试想,如果让同一组测试者应用同样的方法在原测试钻孔附近重新打孔再进行3次以上测试,测试结果会收敛吗?因此寻求更为精准的地应力测试方法和研制相应的仪器是目前该领域的一个研究发展方向。

2.2.2 地质测绘法

地质测绘法包括三种主要的测试方法,测试结果都只能是定性的,对矿井、巷道、采场的基本设计有一定的参考价值,但由于测试结果不是定量的,故参考价值有限。

2.2.3 直接测试法

与间接测试法不同,直接测试法,如水压致裂法,可以做到以力测力,而避免岩

石物理力学参数的“干扰”。但目前的直接测试法,如最常用的水压致裂法也有其致命弱点。目前,水压致裂法可以直接测出最大、最小水平地应力,但无法测出构造应力,并获取测试点的主单元体。

2.3 套筒致裂法的基本特征

套筒致裂法与水压致裂法的基本理论相类似,但它的可操作性更强。该测试方法代表着地应力测试方面的较为先进的水平。