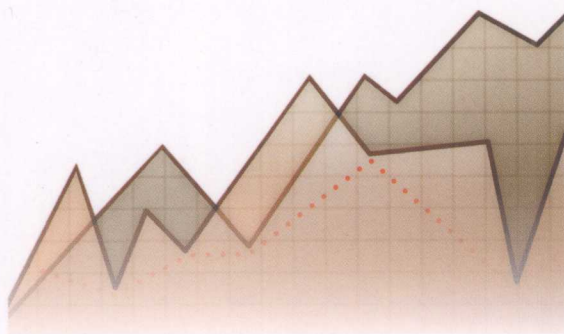


矿山岩石力学若干测试技术 及其分析方法

赵奎 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

KUANGSHAN YANSHI LIXUE
RUOGAN CESHU JISHU
JIQI FENXIFANGFA

矿山岩石力学若干测试 技术及其分析方法

赵 奎 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2009

内 容 提 要

本书针对矿山岩石力学测试中的光弹性应力监测、声波测试、声发射测量地应力、岩体结构面调查、测量及位移、应变等现场监测技术与分析方法中存在的问题,结合大量实验室和现场试验,力求通过测试、监测结果结合研究对象具体特点,发展能够揭示研究对象的内在机理和规律的分析方法。对光测、声测部分从理论上进行了较深入的探讨,并系统介绍了相应的分析方法。对岩体结构面调查、测量方面着重从理论上阐述了相应的分析方法,对位移、应变等现场监测部分着重从工程应用的角度论述了监测结果分析对工程实际指导价值。

本书可作为采矿工程、岩土工程领域从事测试、监测科研人员的参考用书,也可以作为相关专业研究生的学习教材或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

矿山岩石力学若干测试技术及其分析方法/赵奎著.
—北京:冶金工业出版社,2009.5
ISBN 978-7-5024-4925-4

I. 矿… II. 赵… III. ①矿山—岩石力学—测试技术 ②矿山—岩石力学—分析方法 IV. TD31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 070219 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4925-4

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 5 月第 1 版,2009 年 5 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 6.25 印张; 167 千字; 189 页; 1-2000 册

26.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

地应力状态、岩体结构面产状等有关采矿基础信息的获取是进行金属矿山采矿设计优化的前提条件，应力、位移等多手段现场监测则是实现金属矿山采矿设计优化的保证。为了最终实现金属矿山采矿设计优化这一目标，就必须加强这一目标的各个环节的研究。就有关测试技术而言，测试结果主要依靠仪器的先进性，如何正确利用测试结果指导工程实践，尤其是对于岩石力学这一复杂性问题，测试结果的科学分析就尤为重要了。

岩石力学有关测试技术及其计算、分析方法内容十分丰富，作者根据多年在科研工作中取得的一些研究成果，对部分测试技术理论、测试结果分析方法等进行了归纳、整理而编写了本书。本书内容仅仅是岩石力学测试技术、计算分析方法中的一部分内容。

测试、监测数据的分析通常需要建立一定的数学模型，以实测值与模型计算值之间的误差作为评价建模的效果。作者认为对于岩石力学测试、监测结果，最为重要的是通过客观测试、监测的结果揭示研究对象自身的内在规律或机理，因此，需要结合研究内容、研究对象的特点对测试、监测结果采用不同的计算分析方法，仅依靠数学建模是难以实现揭示内在规律、机理之目的。本书没有统一的数学建模模式，

这也是本书与其他相关图书文献资料的不同之处，也是本书的特点之一，这一特点贯穿全书所有章节。

本书注重工程实践应用，全书介绍的所有测量、测试、监测技术都有对应的工程应用实例，目的在于方便读者在实际工程中参考使用。对于依据测试、监测结果绘制的图表就能够揭示研究对象规律的，就不再进行不必要的测试数据处理或建模，比如第8章的有关内容。

需要说明的是，工程实践中岩体结构面调查、产状测量等是采矿工程设计优化的重要基础资料，如何对岩体结构面引起的稳定性问题进行科学分析是非常重要的，也是未完全解决好的问题，考虑到其过程也是“先测再分析”，因此，在本书最后一章增加了这一部分内容。

全书分为9章，第1~3章比较全面系统地介绍了光弹性应力计原理、现场应用情况，率定试验的数值模拟方法，条纹图像识别方法，以及根据监测结果划分稳定性等级、确定关键承载点等实用分析方法，并具体介绍了在两个矿山的应用实例；第4章首先从理论上介绍了岩石声速、损伤、声发射之间的关系，并通过试验验证所建立的关系，为准确把握岩石声波测试奠定了一定的理论基础；其次，从理论上详细论述了岩石、岩体、充填体的强度与其声速的关系；第5章以第4章内容为基础，详细介绍了基于声速的稳定性分析方法；第6章列举了声波测试的3个工程应用实例；第7章详细介绍了作者近年来进行岩石声发射测量地应力的一些研究成果，同时介绍了最大主应力与围岩性质关系，最后列举了工程应用实例；第8章介绍了位移、应变、应力等现场监测

技术与工程应用实例，重点阐述了监测时注意事项，通过监测结果得到的具有工程应用价值的结论；第9章简要说明了岩体结构面调查、测量的基本内容，重点介绍由岩体揭露面测量得到的结构面长度推算实际长度的理论和方法，由测量得到的小型结构面产状计算可能构成块体的概率，并列举了工程应用实例，考虑到块体稳定性影响因素的不确定性，最后详细介绍了大型结构面构成块体的稳定性、可靠性分析方法和工程应用实例。为了方便读者对有关测试技术和分析方法有更深入的认识，在每一章的最后部分着重对研究成果进行归纳总结，提出今后进一步深入研究的方向或现场应用中注意事项等。

本书是作者多年科研成果的汇总，研究内容先后得到了国家“十一五”科技支撑计划课题（编号2008BAB32B03）、国家自然科学基金项目（编号50464002）、江西省科技攻关重点项目（赣科发计字〔2007〕189号）、江西省教育厅项目（编号2005-151、GJJ09250）以及江西铜业股份有限公司、江西钨业公司、金堆城钼业汝阳有限责任公司、浙江省遂昌金矿有限公司等20多个项目的资助。研究工作得到了作者的导师北京科技大学蔡美峰教授的悉心指导，江西理工大学采矿工程教研室相关老师、矿山岩石力学与安全工程学术团队成员及作者指导的20多名研究生为本书涉及的研究内容都作出了相应的贡献。江西铜业公司武山铜矿、银山铅锌矿，江西钨业集团有限公司下垄钨矿、荡坪钨矿，金堆城钼业汝阳有限责任公司东沟钼矿，浙江省遂昌金矿、铜陵有色金属集团公司凤凰山铜矿等为现场试验研究提供了大力帮助，有关工

程技术人员付出了辛勤劳动。作者对上述单位和个人表示衷心的感谢，同时对本书引用的文献作者致以诚挚的谢意。

由于岩石力学自身的复杂性，岩石力学测试、监测及其分析方法涉及到许多学科，本书一些研究内容还有待于不断充实、完善，同时由于作者的学识水平所限，书中不当之处衷心期望读者批评指正。

作 者
2009 年 2 月

目 录

1	光弹性应力计	1
1.1	基本构造与测量原理	1
1.2	测孔布置与安装	5
1.3	观测与记录	6
1.4	光弹性应力计率定试验的数值模拟	8
1.4.1	模型的建立	9
1.4.2	计算结果分析	10
1.4.3	条纹级数等值线与云纹图	13
1.5	基于 Matlab 的条纹图像处理与识别	16
1.5.1	图像处理	16
1.5.2	图像特征提取	18
1.5.3	图像识别	21
2	光弹性应力计监测结果分析方法	26
2.1	稳定性等级与关键承载点	26
2.1.1	相似性度量	27
2.1.2	FCM 聚类算法	27
2.1.3	参数的选取	28
2.1.4	聚类有效性检验	28
2.1.5	稳定性等级与关键承载点的确定	29
2.2	用应力增量进行矿柱稳定性分析	31
2.2.1	矿柱强度与平均应力	31
2.2.2	极限状态方程与分析	33

3 光弹性应力计监测工程应用实例	36
3.1 工程实例一	36
3.1.1 测点布置与监测结果	36
3.1.2 结果分析	38
3.2 工程实例二	42
3.2.1 测点布置与监测结果	42
3.2.2 结果分析	44
4 声波测试	47
4.1 概述	47
4.1.1 基本原理	47
4.1.2 换能器布置与工程应用	49
4.2 岩石声速与其损伤及声发射关系	50
4.2.1 研究意义	50
4.2.2 公式的建立与分析	51
4.2.3 单轴压缩全程声波测试试验	56
4.2.4 岩石声速与 Kaiser 点的关系	61
4.2.5 岩体稳定性简易判断法	61
4.3 材料声速与其强度的关系	62
4.3.1 岩体声速与其抗压强度的关系	62
4.3.2 充填材料声速与其抗压强度的关系	68
5 声波测试分析矿柱稳定性	70
5.1 矿柱波速变化及其分布特点	70
5.1.1 矿柱波速变化与压力的关系	70
5.1.2 矿柱波速分布特点	72
5.2 矿柱稳定性模糊推理系统的建立	73
5.2.1 采用模糊推理的原因及依据	73
5.2.2 模糊推理系统的建立	75

6 声波测试在工程中应用实例	80
6.1 工程实例一	80
6.1.1 声波监测点布置与监测结果	80
6.1.2 模糊推理结果与分析	82
6.2 工程实例二	84
6.2.1 保护墩稳定性简易判断法与结果分析	84
6.2.2 保护墩稳定性分析	86
6.3 工程实例三	92
6.3.1 充填体强度测试	92
6.3.2 测试结果与分析	95
7 地应力测量	97
7.1 概述	97
7.2 岩石声发射 Kaiser 效应测量地应力若干研究	98
7.2.1 研究意义	98
7.2.2 小波基与阈值的确定	99
7.2.3 小波去噪试验与结果分析	104
7.2.4 Kaiser 点信号能量特征	108
7.2.5 信号频谱分析	118
7.2.6 Kaiser 点信号分形特征	122
7.3 最大主应力与围岩性质关系的识别	128
7.3.1 计算与识别方法	129
7.3.2 工程实例	132
8 位移、应变、压力等现场监测	135
8.1 位移监测	135
8.1.1 常用仪器及用途	135
8.1.2 工程实例	136
8.2 应变监测	138

8.2.1	常用仪器及用途	138
8.2.2	工程实例	138
8.3	拉、压力的监测	145
8.3.1	液压枕	145
8.3.2	压力计	148
8.3.3	钢筋测力计	151
9	结构面调查、测量结果定量分析岩体稳定性方法	159
9.1	概述	159
9.1.1	结构面调查、测量的重要性	159
9.1.2	调查、测量及分析方法	160
9.2	岩体节理面延展性的概率分析	161
9.2.1	节理迹长的概率分布特征	162
9.2.2	节理面延展性概率密度函数的建立	163
9.3	节理面构成块体的概率公式及其工程应用	167
9.3.1	公式的建立与分析	168
9.3.2	工程实例	172
9.4	大型结构面构成块体稳定性可靠性分析 及其工程应用	176
9.4.1	问题的提出	176
9.4.2	不确定性因素与模糊概率测度	177
9.4.3	工程实例	181
参考文献		184

1 光弹性应力计

作为光测弹性力学的一种应力分析手段的光弹性应力计（简称光应力计）是监测矿岩体应力变化的一种简便实用的方法，它是一种测量应力的刚性包体应力计，该方法由 M. M. Frocht 提出，后经平松良雄、Barron、Roberts 及 Dhir 等人的努力，使其在理论和实践上得到进一步发展。实际应用中，光弹应力计可作为围岩应力的一种转换器，能显示出明显的应力条纹（等差线图），用光弹仪进行观测。

与其他应力电测方法相比，光应力计具有价格便宜、观测方便的优点，且不受井下恶劣环境（如十分潮湿的环境）条件的影响，能够进行长期稳定观测的突出优越性。实践表明：除弹性模量很低的粉矿和类似的土体外，绝大部分矿岩体均可以采用光应力计进行应力变化监测，可以广泛埋设在巷道、矿柱、矿壁及采场内，对矿岩体稳定性进行长期监测，因而在金属矿山岩体应力变化监测中得到了较广泛的应用，例如广西大厂长坡锡矿、铜坑锡矿、湖北铜录山矿、云南大姚铜矿、江西荡坪钨矿、铁山笼钨矿、安徽安庆铜矿、冬瓜山铜矿、甘肃白银小铁山矿、银山铅锌矿、武山铜矿、浙江遂昌金矿、辽宁红透山铜矿等。

1.1 基本构造与测量原理

光应力计一般多用玻璃制成，它是一个带中心孔的短圆柱体，用普通玻璃制成的光应力计具有价格低廉、刚性大、灵敏度稳定等优点。R-50 型光应力计是目前国内普遍推广使用的一

种应力计，其主要传感元件是玻璃测片，测片是一个带轴向中心圆孔的扁圆柱体，其外径 D 为 50mm，内径（中心圆孔） d 为 10mm，厚度为 20mm。在测片的一面镀上反射层，其后粘一厚 2mm 的玻璃片，用于保护反射层，为了便于安装，在玻璃片后粘结一木锥陀，光应力计组装结构如图 1-1 所示。

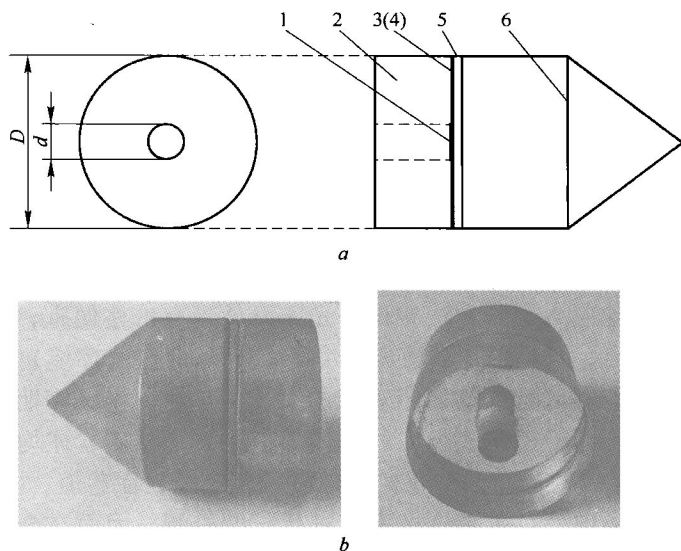


图 1-1 光应力计组装结构

a—光应力计组装结构示意图；b—加工好的光应力计

1—石蜡；2—测片；3—反射镀层；4—冷凝剂；

5—护片；6—木锥陀

光应力计是一个具有双折射特性的带有轴向圆孔的弹性玻璃圆柱体，将它埋设到岩体钻孔内，若不计水泥砂浆胶结层的厚度，则可视为无限大岩石平板中嵌入一个同心圆环的平面应力问题，如图 1-2 所示。

应用弹性力学公式，可以得出应力计中 A 、 B 两点的最大剪应力与岩体次主应力 p 、 q 之间的关系式：

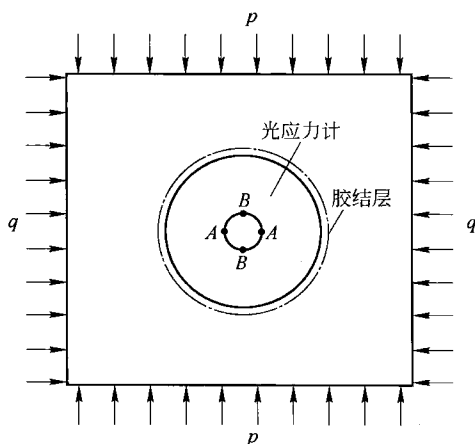


图 1-2 光应力计受力示意图
A、B—条纹图对称轴与中心圆孔交点

$$\tau_{\max}(A) = \frac{K_1}{4}(p + q) + \frac{K_2}{4}(p - q) \quad (1-1)$$

$$\tau_{\max}(B) = \frac{K_1}{4}(p + q) - \frac{K_2}{4}(p - q) \quad (1-2)$$

式中， K_1 、 K_2 为两个与岩体及应力计有关的系数。令：

$$X_1 = E(1 + \mu_1) - E_1(1 + \mu) \quad X_2 = E(3 - \mu_1) + E_1(1 + \mu)$$

$$X_3 = E(1 + \mu_1) + E_1(3 - \mu) \quad X_4 = E(3 - \mu_1) - E_1(3 - \mu)$$

(1-3)

则 K_1 、 K_2 的表达式为：

$$K_1 = \frac{4R^2 E_1}{E[(1 + R^2) + (1 - R^2)\mu_1] - E_1(1 - R^2)(1 + \mu)} \quad (1-4)$$

$$K_2 = \frac{16R^2 E_1 [(3R^2 - 2)X_1^* + R^6 X_2]}{[(3R^6 - 6R^4 + 4R^2)X_1 + R^8 X_2]X_3 + (X_1 + R^6 X_2)X_4} \quad (1-5)$$

式中 E, E_1 ——分别为岩体与玻璃测片的弹性模量；

μ, μ_1 ——分别为岩体与玻璃测片的泊松比；

R ——光应力计内外径比值 (D/d)。

根据光测弹性力学中的应力光学定律，光应力计中任一点的最大剪应力与该点应力干涉条纹（等差线）的级数之间的关系为：

$$\tau_{\max} = Fn = \frac{f}{t}n = \frac{2f_1}{t}n \quad (1-6)$$

式中 F, f, f_1 ——分别为应力计的光学条纹值、材料条纹值和剪应力条纹值；

n ——条纹级数；

t ——光应力计厚度。

将观测的光应力计上 $A、B$ 两点条纹值 $n_A、n_B$ 或将观测确定的 q/p 值及式 (1-1)、式 (1-2) 代入式 (1-6)，整理后得岩体应力值：

$$p = \left(\frac{n_A + n_B}{K_1} + \frac{n_A - n_B}{K_2} \right) F \quad (1-7)$$

$$q = \left(\frac{n_A + n_B}{K_1} - \frac{n_A - n_B}{K_2} \right) F \quad (1-8)$$

$$p = \frac{4Fn}{(K_1 + K_2) + i(K_1 - K_2)} \quad (1-9)$$

式中， $i = p/q$ ，当 q 为垂直应力时， i 相当于侧压力系数。式 (1-7) ~ 式 (1-9) 应尽量同时使用，互为验证并进一步校核 i 值。

1.2 测孔布置与安装

测孔布置总的原则是布置测点的地段应在观测期内允许人员出入，测点处岩体较完整，如图 1-3 所示。避免布置在松软破碎带或节理发育地段，以免影响观测效果，如图 1-4 所示。工程实际中应根据研究目的确定具体的布置方案，按照地压监测总体方案的要求来进行布置。

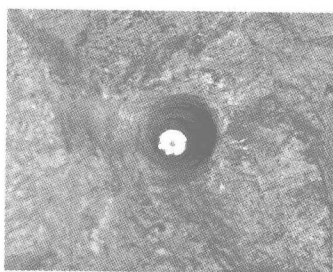


图 1-3 岩体完整性好的测孔

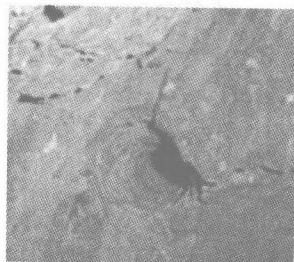


图 1-4 岩体破碎的测孔

对于地下矿山应力总体变化监测，布置测孔力求能够覆盖工程区域内不同的工程地质区域及主要矿岩体，一般要力求覆盖所有中段。对于个别采空区或矿柱应力变化监测，则尽量布置在应力集中和开采扰动影响较大的地段。

测孔、安装要求及其步骤如下：

(1) 在布置好的测点处打测孔钻，钻孔要尽量圆、平、直，高低适宜，孔深一般为 1.5 ~ 2.5m，孔径 56 ~ 60mm，开口孔径可增至 70 ~ 80mm，以便于安装和观测，埋设前清洗钻孔。

(2) 埋设光应力计前，用木杆将水泥砂浆填塞至孔底，注意水泥砂浆以捏之可成团状为宜，水泥砂浆要拌和均匀，避免填塞时出现蜂窝状，对水泥标号无特殊要求，但砂子要用细颗粒的，不能夹杂大块散颗粒，配比为水泥：砂：水 = 1：1：0.25，

孔底填塞水泥砂浆长度约 100mm。

(3) 将圆木制作成直径 50 ~ 55mm 安装杆，安装杆前端制成直径 7 ~ 8mm、长 15 ~ 18mm 安装头，以便将此安装头塞入光应力计中心小孔，进行安装，如图 1-5 所示。



图 1-5 光应力计安装杆

(4) 将多层柔软的纸包裹安装杆前端，用橡皮筋将多层柔软的纸固定在安装杆前端，将安装头露出包裹纸的外面，将光应力计中心小孔插入安装头，再将光应力计缓慢送入孔底，使木锥陀部分插入水泥砂浆，并尽量保持与粘贴面正交。

(5) 基本定位后用锤子轻轻敲打安装杆后端，直到灰浆全部充满光应力计与孔壁之间的空隙。

(6) 将安装杆缓慢拔出，观察应力计表面是否有水泥砂浆溢出污染，如有污染物则用包有干净软质垫层的木杆轻轻擦洗。

1.3 观测与记录

待水泥砂浆胶结层固化后即可采用矿山-2 型手持反射式光弹仪（如图 1-6 所示）或新型可拍摄图像的光弹仪（如图 1-7 所示）进行观测。

现场观测记录的内容包括：