绪　　言

一、概述

钻孔水泥灌浆一般分为用浆液充填地基中的缝隙而形成阻水帷幕，以降低作用在建筑物底部的渗透压力或减少渗漏量的帷幕灌浆；用浆液加固裂隙的地基以增强其整体承载能力的固结灌浆；用浆液加固建筑物或建筑物与地基或围岩间的结合能力，以提高接触面上的物理力学性能的接触灌浆等几种；此外，还有回填灌浆。

国内外传统灌浆和排水孔的布置以及灌浆方法，大体上不外有四种：一是不论何种灌浆、排水类型，几乎都是用“对分法”按孔口等距离布置钻孔；二是不论岩体裂隙面陡缓及其发育状况，几乎都是把钻孔布置成固定方向，即钻孔轴向与岩体天然地面或开挖面成垂直方向；三是认为无论何种岩体都是可灌的，而且是可以达到预期要求的；四是认为只有稀浆才容易灌入岩体内，其成功率比较高等。

当我们全面搜集和研究了国内外现行水工建筑物水泥灌浆施工技术规范以后发现，它们主要是对以下五个方面的灌浆内容进行了具体的规定或要求：

岩体透水率　用铅直钻孔进行压水试验，所求得的岩体透水率 q 值，用以代表岩体的透水性。

灌浆标准　岩体透水率 q 值，若小于 1～5Lu 时，可以不进行灌浆，否则，应进行灌浆防渗。

灌浆孔间距　用分期加密方法进行灌浆试验，钻孔加密到孔距 1.5～2m 仍达不到防渗要求时，则设置多排帷幕。

帷幕灌浆孔排数（帷幕宽度）决定于被灌岩体允许水头梯度。

灌浆压力　无论是灌浆压力大于 3MPa 的高压灌浆，还是灌浆压力低于 3MPa 的低压灌浆，其压力都是由灌浆试验确定的。

二、四个研究阶段

水利水电工程灌浆与地下水排水工程都是在岩体内进行的，若不详细调查岩体的透水透浆结构面，便不会知道它们具有各向异性的透水透浆特性；或者仅仅用铅直钻孔进行压水试验，用所求得的透水率 q 值代表岩体的透水性，实际上它并不具有代表性，因为裂隙透水性是各向异性的；在前两个前提下所开展的任何灌浆与排水工作都是有问题的。为解决或查清这些问题，我们开展了以下四个阶段的工作：

第一阶段　为了对小浪底水利枢纽左岸单薄分水岭山体的边坡稳定性及渗控工程的合理性进行评价，需要预测水库蓄水后山体中的地下水分布情况，水利部黄河水利委员会（以下简称黄委会）勘测规划设计研究院于 1985 年，先后与中国地质大学（北京）、黄委会水科所合作，通过野外裂隙测量、水文地质调查和水力试验，研究了岩性、断层和风化卸

需要全本请访问 www.ertongbook.com

荷等因素对裂隙发育及渗透性的控制作用，揭示了岩体渗透性的空间分布具有层状、带状、壳状渗透结构的三大规律。应用“三段”压水试验、交叉孔压水试验、抽水试验和竖井注水试验的理论和方法，确定了裂隙岩体各向异性渗透张量。在前述研究的基础上，提出了确定研究区内各区域各透水层渗透张量的隙宽类比法。在建立地下水运动数学模型的基础上，利用三维有限单元渗流计算方法，预测了水库蓄水后山体内的稳定流地下水分布情况并对渗控工程设计方案提出了用斜孔进行帷幕灌浆与排水的建议，于 1990年 4月编写了“黄河小浪底水利枢纽工程左岸单薄分水岭裂隙岩体渗流及工程水文地质研究”报告。该报告经潘家铮、贾福海、张宗祜三位中国科学院院士和 10位教授评审，认为“本成果已达国际先进水平，有些内容在国际上也是首见的，”并于 1993年 4月 27 日，获得了水利部科技进步二等奖。

第二阶段　一般来说，岩石是不透水的，岩体的透水性主要由裂隙的透水性来决定，透水性大多是各向异性的。岩体的透水透浆结构面是多种多样的，那种“以不变应万变”的传统灌浆、排水方法是不科学的，或至少说它存在着不切合实际的盲目性。这些问题早已被不少专家发现，由于种种原因，至今尚未有人提出一套切实可行的特别是针对陡倾角裂隙地层的灌浆与排水方法。田开铭、马国彦和万力等人于 1991年曾提出用斜孔灌浆与排水的设想，但究竟如何确定斜孔灌浆与排水斜孔方向和倾角，在国内外文献中都查不到可供借鉴或作为研究起步的范例性资料。马国彦等人利用国内外已取得的大量铅直孔灌浆与排水资料，根据小浪底工程对各类岩体裂隙的大量调查资料，花了将近 5年时间，终于在 1995年 5月，在世界上首次研究出了解决斜孔灌浆与排水设计的优化方法。

第三阶段　1994年 9月 13 日小浪底工程正式全面开工，各类灌浆、排水工程即将开始，为慎重使用和补充完善新的科学研究成果，并鉴于小浪底工程的灌浆、排水工作量十分浩大（约 80万 m），其质量能否保证又特别重要，黄委会勘测规划设计研究院在黄委会黄河防汛科技研究经费的资助下，成立了以马国彦、林秀山为课题研究负责人，包括勘察、设计、科研和施工多学科在内的“黄河小浪底水利枢纽斜孔灌浆、排水技术研究”攻关小组，在以往大量基本地质资料的基础上，结合现场施工，于 1996年 3月 28日开始，全面开展了试验研究。本课题涉及到灌浆与地下水排水工程的勘察、设计、科研与施工的几乎所有内容。为起步于国内外的先进水平，我们广泛收集了国内外先进的灌浆与排水方法、技术及措施，发现它们大多不适合、不满足小浪底工程水文地质条件和许多工程施工要求。为解决这些问题，课题组投入了大量的人力、物力和时间，进行了全面调查、多次试验，研究提出了一系列新的调查方法、试验技术和地基灌浆以及地下水排水措施，并对经过施工和观测资料证明是正确的方法、技术和措施进行了总结，编写了“黄河小浪底水利枢纽斜孔灌浆与地下水排水技术研究”报告，于 1999 年 9月 16 日，河南省科学技术委员会组织陈德基、许百立、朱建业、林伯铣、赵长海、姚传江、罗鲁生、吴熹、孙国维和董保华等 10位教授和教授级高级工程师进行了鉴定，认为该项目密切结合实际工程，进行了大量系统的研究和应用，其成果在国内外具有开创性，有重要的学术意义和重大的经济效益，对我国水利水电工程灌浆与排水的地质勘察、设计和施工等有重要的促进作用和推广价值，研究成果总体上达到了国际先进水平。在斜孔灌浆、排水设计的优化方法上，具有国际领先水平。

第四阶段　许多国内知名专家的建议，把小浪底工程 15 年来的研究成果写成专著，在全国发行推广。但同时又考虑到，虽然小浪底工程灌浆与排水的科研报告，对其它地区的工程来说，有‘触类旁通’的性质，但毕竟小浪底工程有它自身的特殊性，其它工程不能‘如法炮制”。为了在全国推广小浪底水利枢纽的灌浆与排水的研究成果，我们从 1999 年 9 月 16 日以后至今又广泛搜集、使用了世界灌浆与排水的信息资源，对国内外灌浆与排水工作中普遍存在的问题进行了归纳、分析与研究，并对我们在山西省垣曲后河水库、河南省南阳回龙抽水蓄能电站和吉林省敦化市上沟水利枢纽进行灌浆与排水设计取得的经验进行了总结，编写了可直接使用于全国水利水电灌溉与排水工作的本书的第二章、第六章、第九章、第十二章、第二十二章和第二十三章，并编写了本书所使用的术语。本书其余章节，主要是论述小浪底工程的研究成果。因此，本书内容既包括了解决一般灌浆、排水工作存在的常规问题，也包括了当今世界上最先进的灌浆与排水方法，使本书更具有广泛的参考价值。

三、最主要的研究成果

本书主要研究成果可以概括成以下七个方面：

1. 岩体透水、透浆水文地质条件的调查方法

一般来说，勘探初期在水工建筑物的钻孔内就要开展大量的每 5m 一段的压水试验。这部分工作量要花去很大一部分勘察资金。实际上，应该首先对天然地质露头，钻孔岩芯、坑槽洞岩壁等人工露头进行岩体透水、透浆水文地质条件的调查。或者也可以说，在勘察初期，不要急于做钻孔压水试验，而是先作前期资料收集工作。在此基础上，对岩体渗透结构类型、亚类和亚段进行划分，然后对每一亚段进行地质结构面主要是裂隙面的倾向、倾角、间距、密度、张开宽度、走向长度和倾向长度进行测量。岩体的透水、透浆条件的决定因素之一是岩体裂隙宽度，而裂隙宽度又决定于处于不同构造部位的裂隙岩体强度。

除断层错动面以外的断层带及其强烈影响岩体和强烈风化卸荷带岩体，具有近各向同性渗透性，裂隙宽大，对普遍硅酸岩水泥有可灌性；断层的一般影响带岩体；一般风化卸荷带岩体，远离大断层深埋岩体，除了它们之间包含的单轴抗压强度低于 25MPa 的较软岩体以外，那些中硬和坚硬岩体，有各向异性渗透性，裂隙宽度大多在 0.050～0.10mm 之间变化，对#525 普通硅酸岩水泥有可灌性；断层错动面和各亚段内的较软岩，为相对不透水或不透水岩体，裂隙微细，对任何标号的水泥都不具可灌性。在此研究基础上，选择一些具有代表性的岩体对可灌性尚不确定的岩体进行压水试验，以确定其透水、透浆性能，而不是勘察一开始就大量使用复杂的手段去普遍探查岩体的透水性和可灌性。用测量各类岩体裂隙宽度以确定岩体相对透水性和可灌性的方法，不仅应用于勘察初期，而是要贯彻于全部勘察阶段的始终。

2. 原始透水率

在现行压水试验规程中，把压水试验方法分为单点法和多（五）点法两种。在单点法压水试验中把试验压力规定为 1MPa；在多（五）点压水试验中把三级压力的最大压力也规定为 1MPa。大量压水试验资料表明，有不少岩体的水力劈裂的临界压力只有 0.3MPa。（当然也有些坚硬层状岩体和块状岩体，甚至在 5MPa 的高压下也不会发生水力劈裂）。因此现行的两种压水试验方法所得到的透水率有可能不是原始透水率，而是比原始透水率大

许多倍的岩体劈裂性透水率。用这样的透水率去评价岩体的透水性，可能存在着不合理性，它有可能把不透水岩体错误地划为强透水岩体。

研究资料表明，用单点法压水试验，压力 0.3MPa 比较合适。用多（五）点法压水试验既可以了解岩体的临界压力，也可以调查岩体的原始透水率，但要对试验岩性了解清楚，如含有软弱结构面，其试验压力可以规定为 0.3、0.6、0.9、1.2、0.9、0.6MPa 和 0.3MPa；如果不含软弱结构面，其试验压力规定为 2、4、6、4、2MPa。只有这样，才能正确评价岩体的透水性和正确选定灌浆容许压力。

3. 原始透浆率

岩体在 0.3MPa 压力作用下，每分钟每米灌段的最大压入灰量为原始透浆率（q_m）。用该项指标可以正确评价岩体的可灌性。当 q_m 值小于 10kg/(m·min·0.3MPa) 时，为不具可灌性岩体；当 q_m 值为 10～50kg/(m·min·0.3MPa ）时，为弱可灌性岩体；当 q_m 值为 50～100kg/(m·min·0.3MPa）时，为中等可灌性岩体；q_m 值大于 100kg/(m·min·0.3MPa) 时，为强可灌性岩体。用该指标评价岩体的可灌性，是代表岩体在原始状态下的可灌性，是真实的、客观的。它可以避免用超过各种岩体固有的临界压力去进行灌浆试验，当然也就可能避免了比透浆率大许多倍的浆力劈裂后岩体劈裂性透浆率的出现。

4. 临界灌浆压力

岩体内常夹有软岩、泥化夹层、层面等，当浆力超过其抗拉力时，沿着这些软弱带发生浆力劈裂，浆液流失，压力下降。在这样低压力作用下，宽大裂隙内可以压入浆液，而那些中等宽度的裂隙就可能得不到浆液，使残余岩体透水性超过要求。如进行补灌，当灌浆压力超过各岩体固有的临界压力时，仍会发生再次劈裂。在风化卸荷带内的临界压力大小，决定于灌段上覆岩体的重量；在深埋岩体内的临界压力大小，决定于灌段岩体的强度。临界压力需要用灌浆试验来确定。

在灌浆试验之前，应对灌段的岩体水文地质特性进行调查：试段位于何种渗透结构类型内，浆径的浆力特征如何。对试验成果，特别是对 $P\sim Q$ 图解要及时整理。这个图解对分析资料是极为宝贵的。它的曲线形式主要有以下三种：

（1）$P\sim Q$ 曲线呈线性分布，灌浆压力抬高不起来，它大多代表着宽大裂隙和岩溶裂隙的压浆情况。

（2）$P\sim Q$ 曲线先呈线性分布而后发生向左拐（纵坐标为 Q 轴，横坐标为 P 轴）或向右拐的浆力劈裂、裂隙扩张和冲蚀的非线性曲线。比线性段与非线性段之间的拐点处的压力还要低的压力为岩体破坏压力，相应的浆液压入量为劈裂性浆液压入量。

（3）$P\sim Q$ 曲线不通过坐标原点，当灌浆压力达到某一数据后，岩体开始吃浆。吃浆时的压力为浆力劈裂压力，吃浆量为浆力劈裂吃浆量。

在灌浆试验过程中，所采用的或大或小的压力都为试验压力。破坏压力包含浆力劈裂压力、浆力裂隙扩张压力和冲蚀压力。在 $P\sim Q$ 曲线上，浆液流量急剧增加之前的压力为临界压力，大于临界压力的压力为破坏压力。临界压力除以大于 1 的系数后所得压力值为灌浆容许压力。在灌浆工程中，应该采用灌浆容许压力作为灌浆压力。

5. 可防止浆力劈裂的高压灌浆

在承受非常高的运行水头压力的竖井下部和引水隧洞围岩中，在高拱坝的坝肩，都要

求进行高压灌浆。但高压灌浆有可能使含有软弱地质结构面的岩体，不仅发生浆力劈裂，而且使整个灌段的灌浆遭致失败。对不含泥的硬质地质结构面，用先进行接触灌浆、固结灌浆，而后再进行高压灌浆的方法，常常可以防止浆力劈裂现象的发生；对于含泥的软质地质结构面，高压浆液与其接触，就必然发生浆力劈裂，当开挖遇到这种情况时，应将其挖除后回填混凝土，当钻孔内遇到它时，应用扩孔法将其扫除，回填混凝土后再用常规钻头将混凝土钻穿，使高压浆液与其隔离，也可避免浆力劈裂现象的发生。

在高压灌浆之前，一般要进行水力劈裂试验和原位地应力试验。高压灌浆后，应进行高压透水率试验和物探试验，对高压引水隧洞还要安装衬砌应力计，以便综合评价高压灌浆的效果。

6. 优选灌浆与地下水排水斜孔产状

目前，国内外都是把灌浆钻孔布置成与岩体天然地面或开挖面成垂直方向，谁也不管这样的钻孔会不会遇到裂隙或遇到多少条裂隙。大量试验表明，这种灌浆的效果是很差的。为此，我们编制了相对均质区的灌浆与排水斜孔产状的计算软件，其主要功能如下：

（1）斜孔灌浆。可以计算防渗灌浆、固结灌浆、隧洞环形灌浆等工程的任意方向的斜孔比用铅直孔多穿多少倍的裂隙。

（2）斜孔排水。可以计算排水洞的最优方向，计算地下厂房、排水隧洞等系统的任意方向的斜孔比用铅直孔能提高多少倍的排水能力。

（3）图形绘制。可绘制裂隙的极点图、分组图、等密度图和斜直孔效益系数图等一整套与分析最佳灌排效果相关图件。

（4）参数计算。可以计算浆液扩散半径，最大容许灌浆容量，编制灌浆强度限制曲线、裂隙自动分组以及最小排水影响半径等参数。

7. 稳定浆液

我国目前仍是用七个比级的水灰比浆液进行灌浆的。这种浆液在制浆、灌浆、浆液变换等方面是非常麻烦的。 90 年代以后，国际上开始用一种比级的稳定浆液进行灌浆。我们在小浪底工地不仅使用了稳定浆液，而且又进一步研究了水泥细度与裂隙宽度之间的关系，奠定了稳定浆液使用范围的理论基础。

岩体使用稳定浆液的可灌性，决定于裂隙宽度、水泥细度和稳定浆液的流动厚度。如水泥颗粒很细，浆液密度为 $1.64g/cm^3$，当凝聚力分别为 $2、1N/m^2$ 和 $0.51N/m^2$ 时，它们的流动厚度分别为 0.122、0.061mm 和 0.031mm 。欲把浆液压入裂隙中，其裂隙宽度至少应大于浆液的流动厚度。

用本书所介绍的岩体透水透浆水文地质条件的调查方法、原始透水率、原始透浆率、临界灌浆压力、优选斜孔产状、配制稳定浆液和可防止浆力劈裂的高压灌浆方法等调查研究所获得的成果，完全可以解决除灌浆与排水施工工艺以外的几乎所有灌浆与排水工作中所遇到的问题。本书所提及的新技术、新方法，在小浪底枢纽的六项工程和其它三项工程中得到了应用，取得了可以提高灌浆与排水质量，缩短工期，节约投资的显著效果。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第一篇

灌浆与地下水排水水文地质勘察

第一章　裂隙调查方法

岩体由岩块和裂隙组成。岩块的渗透系数约在 10^{-14}cm/s 以下，实际上是不透水的。岩体的渗透性大小主要是由裂隙的渗透性大小来决定的。水工建筑物地基的灌浆与排水的目的主要是封堵不连续面（主要包括裂隙、断层等）使其透水性降低到设计要求的程度；排除不连续面中的地下水位，使其降低到设计要求的标准。欲做好水工建筑物地基的灌浆与排水设计工作，应对不连续面特别是裂隙的渗透性进行调查，而它们的渗透性大小又与不连续面产状、迹长、间距、密度、张开宽度以及空间的几何组成形态特征有关。其中，裂隙面的倾向、倾角、张开宽度、平均迹长和密度五指标，是决定其渗透性大小的关键因素，是灌浆、排水设计工作中所必需的参数。以下各节将分别论述五项指标的调查研究方法。

第一节　取样窗内裂隙调查

现场描述和测量裂隙就是一个采样的过程，由此而获得的一系列有关裂隙的数据被称之为观测值。为了便于用计算机从不同的方面处理裂隙的数据，在数据采样过程中一般要求在规则露头上进行。这种露头可以是水平面（建筑物开挖地基），可以是任意斜面（槽探壁、路堑、天然露头），也可以是铅直面（平硐、竖井壁）等。在这些面上取一定的宽度 w、一定高（长）度 h 的平面构成一矩形窗，称之为取样窗口或简称为窗口。

一、相对均质区的确定

基岩裂隙的各种几何参数曾多次受到过各个地质年代的内力作用、表生作用以及其它随机因素的影响，它们在平面上及剖面上的分布通常是非均质的。岩体中裂隙空间分布是变化的，在一个工程岩体中，从一个单元到另一个单元的水文地质性质是不同的。因此在调查裂隙之前，确定结构相似的岩体单元——取样窗的大小是首要的。在这个取样窗内，裂隙系统的各种几何参数在统计上可大致认为是相对均质的。只有这样，我们才有可能应用相应的数字特征值表示各种几何参数值的大小。

目前，划分岩体结构统计均质区的方法，国外的有陈剑平[1]教授介绍的 Stanley M. Miller 方法，M. A. Mahtab 方法；国内的有田开铭方法和马国彦的方法。由于国外的方法较复杂，所以本章只介绍比较简单的后两种方法。

（一）田开铭[2]方法

这个方法是引用典型单位体积的方法来确定测量面积的大小。所谓典型单位体积是指被测定的参数在这个选定的体积内，统计上是相对均质的，稍微增大或减少这个体积，参数值不会发生大的变化。

为评价岩体的渗透性，确定测量面积大小的具体步骤如下：应用计算裂隙介质渗透张量的公式，代入从不同大小面积内测得的裂隙系统各种几何参数，逐个计算出相应面积内的裂隙介质的渗透张量，直至发现测量面积稍微增大或减小时都不会引起渗透张量数值产生大的变化时为止。选定这个面积即为该测点的测量面积。如果测区内裂隙系统的隙间距没有很大变化，可先在某一个具有代表性的测点确定出测量面积的大小，把它作为整个测区各个测点测量面积的尺寸。反之，必须在新的测点上重新确定测量面积的大小。

（二）马国彦方法

在某一定面积的取样窗内，对所测一定数量的裂隙系统的裂隙倾向、倾角和宽度等指标，利用作者所编制的 GJMZ 程序，计算灌、排斜孔倾角为一定值时（$<90°$）所穿越的裂隙量比用铅直灌、排钻孔所穿越的裂隙多若干倍数，即所谓的斜孔效益系数[3]。计算面积由小逐次增大，直至发现测量面积稍微增大或减小时都不会引起最佳斜孔效益系数值有显著变化为止。此时的计算面积，即为具有相对均质区性质的取样窗面积。

二、产状测量及其数据的统计处理

在现场调查中，裂隙面的大小及空间的组合特征目前还没有直接获取的办法。用罗盘只能获得裂隙面的产状特征值。一般认为，对工程岩体而言，抓住了裂隙面的产状特征，从某种程度上说就是抓住了岩体裂隙面特征的本质。无论从理论的角度，还是从实际应用的角度来分析，产状测量都是非常重要的。

（一）裂隙产状分组

在某一个地区内，对裂隙产状都会进行大量测量工作。应首先把裂隙产状的所有信息汇聚起来。

1. 裂隙极点图[4]

第一步，首先准备好直径约 10cm 的裂隙极点投影图（图 1-1）。该图有圆周方位刻度，以放射线的方位（即圆周刻度）表示裂隙的倾向，以同心圆（即半径的刻度）表示倾角。第二步，在裂隙极点投影图上蒙盖一层透明纸，在透明纸上画上圆周线、圆心和 E、W、S、N 方向，然后把每条裂隙极点投影到图上，遇有数条相同产状的裂隙极点时，可在点旁注以条数，把全部裂隙的极点都投到图上后，就构成了一幅极点图（图 1-2）。第三步，做等面积裂隙极点图或裂隙极点等密度图：首先是制作中央密度计和边缘密度计（图 1-3），用纸片、硬纸板、有机

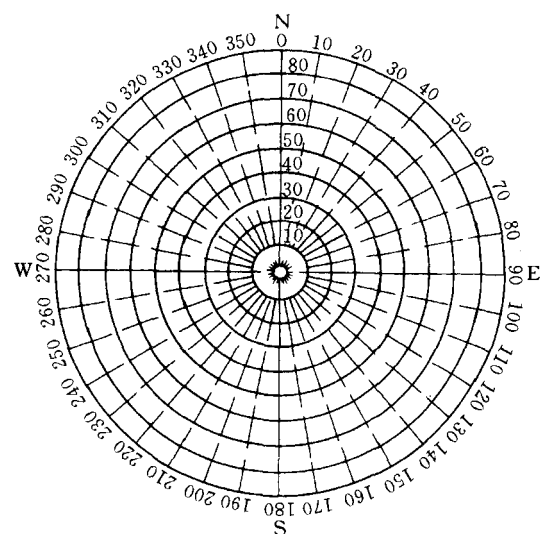

图 1-1 裂隙极点投影图

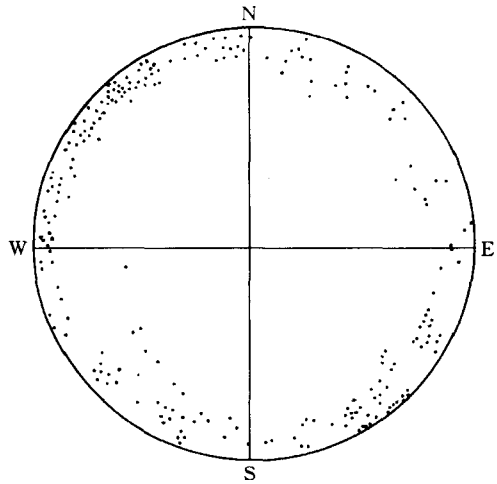

图 1-2 裂隙极点图

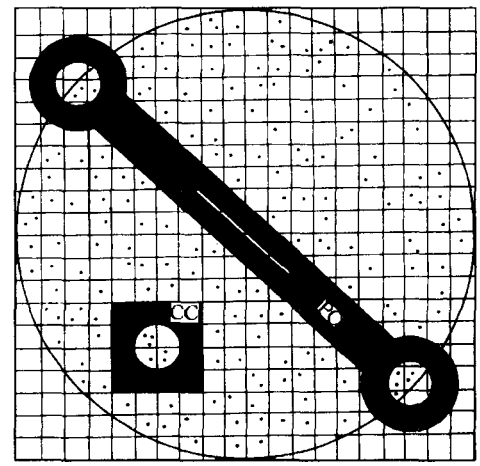

图 1-3 绘制等密图解计算点数的方法
CC—中央密度计；PC—边缘密度计

玻璃或任何适用的材料制成每边 2cm 的正方形小块，在其中心挖一直径 1cm 的小圆后即成为中央密度计，用上述同样材料制成如图 1-3 所示的边缘密度计，其两端之小圆（直径亦为 1cm）均应有一半达于点图解上的大圆周之外；其次是把透明方格纸盖在作好的极点图上，并使方格纸中心的纵横线交点与圆心重合，使纵、横线分别与极点图上的 SN 线及 EW 线重合，把方格纸固定下来，把中心密度计放在透明纸上，使中心密度计的四边和透明纸的纵、横线重合，从接近圆周的左方最上一格起，从左到右，从上到下，一格一格地进行统计，每次移动一格（1cm）。统计时，查出中心密度计小圆中的极点数目，并将其注记在小圆中心内，分布在圆周上及圆周附近的极点，则使用边缘密度计统计。统计时先使其中心与极点图的中心重合，并把大头针插在中心，使其可以旋转，又可适量平移，使其一端的小圆中心依次与圆周附近或圆周上方格纸的“＋”交点重合。当“＋”交点位于圆周附近而不位于圆周上，仅有一端小圆不一定在“＋”交点上，这时把两端小圆内的极点数加起来，注在“＋”交点与圆心重合的那个点上，若“＋”交点正好位于圆周上，当一端的小圆中心与之重合时，另一端的小圆中心上必然与“＋”交点重合，这时应将两端小圆内的极点数加起来，同时注到两个圆心上。如两个小圆中的点数相加为 8，8 个点等于总数 200 个点的 4%，于是应在边缘密度计两端两个小圆的中心，各记下一个“4”字，最后，计算完毕，图上满列代表点数百分比的数目字时，便可像由已知高度之各点连接地形等高线一样，画出等值（密）线来，这就是等面积裂隙极点图或裂隙极点等密度图。

这类等面积裂隙极点图在地学界是使用最广泛的一类分析图。它是把地球上半球或下半球的经纬线投影到赤道平面上，所以在投影图上的等面积，并不是经纬线圈定的地球表面的等面积。

2. 等球表面积的极点图

1983 年美国怀俄明大学土木工程系的 Stanley M. Miller 在数学地质杂志上发表了题为“结构体均质区统计评价法”的文章。其中谈到把施米特图（裂隙极点投影图）分割成由若干个小块构成网格的方法。分割时是将下半球分成多个小区（patches），并使下半球表

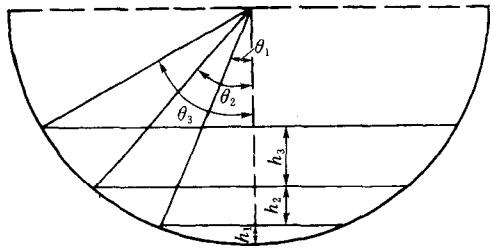

图 1-4　下半球倾角带划分

面上的各个小区具有相同的面积[1]

在一个半球上确定等面积小四角块的一个简便方法是将半球划分为 n 个倾角带（如图 1-4），每一个带的表面积由下式得出：

$$A_i = 2\pi R h_i = 2\pi h_i \qquad (1\text{-}1)$$

推导如下：$\mathrm{d}A = 2\pi\ (R\sin\theta)\ R\mathrm{d}\theta$

其中：

$$h_i = R\cos\theta_{i-1} - R\cos\theta_i$$

$$2\pi R^2 \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \sin\theta \mathrm{d}\theta = 2\pi R^2(\cos\theta_{i-1} - \cos\theta_i) = 2\pi h_i R$$

式中　R——下半球之半径（在这里，$R=1$）；

h_i——第 i 个倾角带的高度。

选取了所需的倾角带数（n）和每一个带上方格的数量（b_i）之后，则每一个带的高度由下式给出：

$$\left.\begin{aligned} h_1 &= R\cos 0° - R\cos\theta_1 = 1 - \cos\theta_1 \\ h_2 &= R\cos\theta_1 - R\cos\theta_2 = \cos\theta_1 - \cos\theta_2 \\ h_3 &= R\cos\theta_2 - R\cos\theta_3 = \cos\theta_2 - \cos\theta_3 \\ &\vdots \\ h_n &= R\cos\theta_{n-1} - R\cos 90° = \cos\theta_{n-1} \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}2)$$

迫使每一个小方块的表面积相等则用下式：

$$\frac{A_1}{b_1} = \frac{A_2}{b_2} = \frac{A_3}{b_3} = \cdots = \frac{A_n}{b_n} \qquad (1\text{-}3)$$

将方程式（1-1）代入方程式（1-3）给出：

$$\frac{h_1}{b_1} = \frac{h_2}{b_2} = \frac{h_3}{b_3} = \cdots = \frac{h_n}{b_n}$$

或

$$\frac{\cos\theta_1 - \cos\theta_2}{b_2} = \cdots = \frac{\cos\theta_{n-2} - \cos\theta_{n-1}}{b_{n-1}} = \frac{\cos\theta_{n-1}}{b_n} \qquad (1\text{-}4)$$

因为小方块具有相同的面积，则每一个小方块的面积等于 1 被小方块总数之和（$\sum b_i$）除，所以，方程式（1-4）中的每一项比率等于 $1/\sum b_i$；并且 θ_i 的值可容易地确定，例如：

$$\theta_1 = \arccos\left[1 - \left(\frac{b_1}{\sum b_i}\right)\right]$$

和

$$\theta_{n-1} = \arccos\left(\frac{b_n}{\sum b_i}\right)$$

由上述公式的推导可以看出，在下半球或上半球上，可以划分出若干数量的等面积小区。

1984 年美国哥伦比亚大学矿业学院的 M. A. Mahtab 在全美第 25 届岩石力学会议上发表了题为“岩石力学中产状数据相似性检验”的文章，它指出：不连续面产状数据可以用不连续面的法向极点在与单位圆上半球被划分为 100 个等面积四角形小区的交点来代表

(图 1-5).

作者根据 M. A. Mahtab 所提出的分割上半球等表面积的原理，利用裂隙极点投影图的制图方法，制出了作者称之为地球上半球等球表面积投影图（图 1-6)。该图的具体作法是：在图 1-1 上，通过圆心画出 SN 线作为基准线；通过圆心向 S 画出 9 个倾向带（表 1-1）按表列数据，由 180° 经线向右，按小区的纬度间隔角度分出各小区。在该图上分出了 100 个小区，每个小区从地球表面上来说都是等面积的，而投影到平面图上的 100 个小区并不是等面积的。图 1-6 与图 1-1 恰恰相反。图 1-6 真正体现出了球表面的等面积，在此底图上作出的极点疏密程度，可以代表实际上的疏密程度，它是研究裂隙极点分布的有效分析工具图。

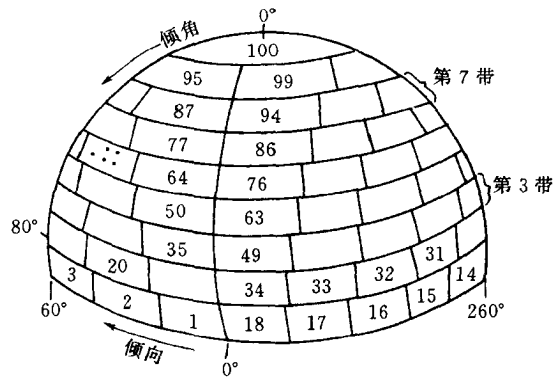

图 1-5 上半球划分为 100 个等面积小格

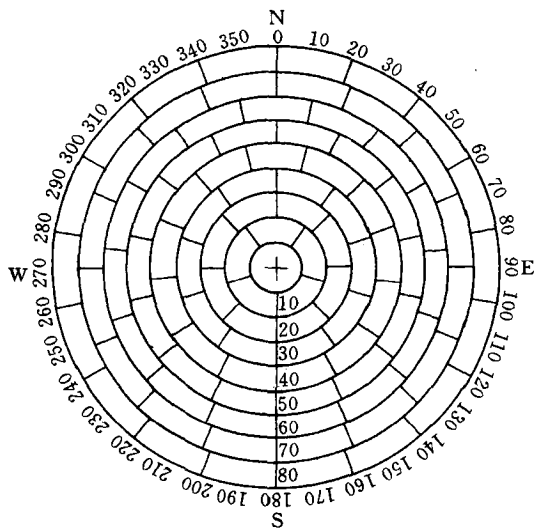

图 1-6 等球面积投影图

表 1-1 上半球划分为 100 个等面积小格的制图参数表

倾向带序号	每带的小区数（个）	倾向范围值	小区的纬度间隔角度
		(°)	
1	1	0～10	360
2	5	10～20	72
3	8	20～30	45
4	10	30～40	36
5	13	40～50	27.69
6	14	50～60	25.71
7	15	60～70	24
8	16	70～80	22.5
9	18	80～90	20

3. 裂隙极点分组

在图 1-1 上，蒙上透明纸，把中心点和 N. E. S. W 或 0、90、180、270 标在圆周上。然后，以不连续面的倾向方位按图的方位首先找出来（按顺时针方向旋转，圆周为 360°)，而后以图的径向由中心向圆周分割成 90°，把倾角用点标上，该点即为不连面的产状极点（用倾向、倾角表示），将所测知的相对均质区内的产状都分别点上去即成了裂隙极点图。

将等球面积分区透明图（图 1-6）蒙在极点图上，把各极点描在图上，或将极点数直接标在图的小区内，然后将多于 1 个极点的小区，以经、纬线为边界，把各小区圈出来，圈出来的大区即为裂隙分组图。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

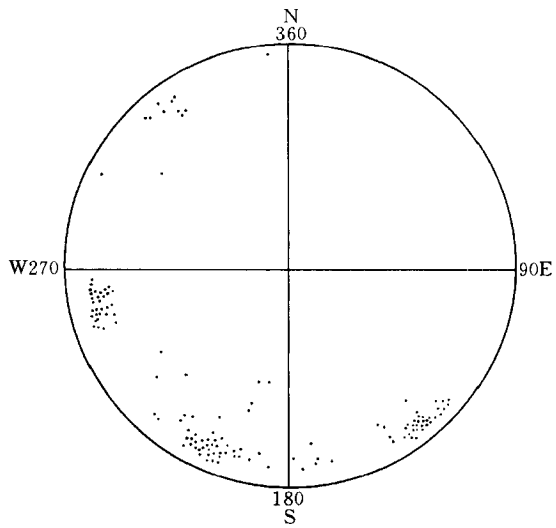

图 1-7 小浪底进水塔架地基裂隙极点分布图

每个组内的极点数为 n，各组极点数之和为 N，$\frac{n}{N}\times\frac{100}{100}=x\%$，这个百分数即为各组裂隙所占总裂隙的百分数，用 C_m 表示。

通过各组裂隙极点百分数的多少，可以看出各组裂隙的发育程度。发育程度如何，在工程地质、水文地质评价方面具有重要的意义。

各组极点所分布的小区数即为图 1-6 面积的百分数（图 1-6 内共分 100 个小区）。用 C_n 表示。C_m/C_n 为极点密度系数。用 C 表示，分布系数 C 值愈大，裂隙分布的愈集中。换句话说，C 值与离散系数相反，C 值愈大，极点的离散程度就愈差，C 值的大小在工程水文地质评价方面也具有重要意义。

【例 1-1】 黄河小浪底水利枢纽进水塔架地基要进行固结灌浆，作者对地基的裂隙进行了全面编录，作出了如图 1-7 所示的裂隙极点分布图。用如上所述的方法作出如图 1-8 所示的裂隙分组图。从图内可以看出，本区裂隙分为 4 组：

Ⅰ组：倾向 180°～240°，倾角 ∠60°～90°，占 38.9%，$C_{Ⅰ}=5.56$；

Ⅱ组：倾向 120°～180°，倾角 ∠70°～90°，占 29.7%，$C_{Ⅱ}=7.43$；

Ⅲ组：倾向 240°～280°，倾角 ∠70°～90°，占 23%，$C_{Ⅲ}=7.66$；

Ⅳ组：倾向 300°～340°，倾角 ∠70°～90°，占 6.5%，$C_{Ⅳ}=2.17$。

从裂隙的分布密度来看，$C_{Ⅲ}$、$C_{Ⅱ}$、$C_{Ⅰ}$ 和 $C_{Ⅳ}$ 是裂隙发育程度的高低顺序。

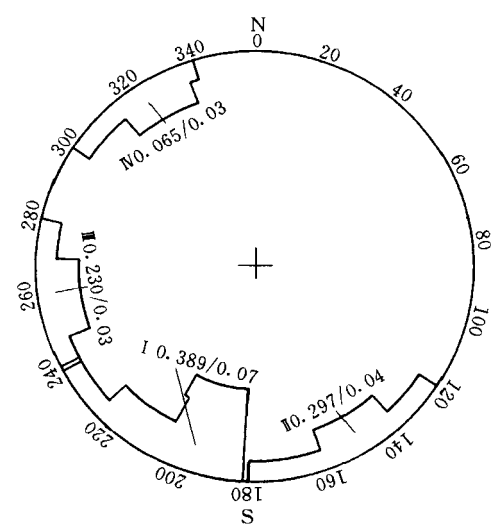

图 1-8 小浪底进口塔架地基裂隙（138 条）分组图

Ⅰ～Ⅳ—裂隙分组编号；0.389—分式的分子为该组裂隙所占百分比；0.07—分式的分母为该组裂隙所占的百分块数的比值；0.389/0.07—分式的商为裂隙密度系数

【例 1-2】 为了对裂隙产状分布系数的变化情况进行对比分析，作者引用长江三峡的资料，制作了三峡大坝Ⅰ～Ⅳ号坝段裂隙产状极点图（图 1-9）。用前述方法制作了不连续面产状分组图（图 1-10）。对比图 1-8 与图 1-10 后可以看出，图 1-8 所示裂隙产状的分布要比图 1-10 所示裂隙产状的分布要集中得多，产状变化范围小得多。

通过上述对作者制作的等球面积投影

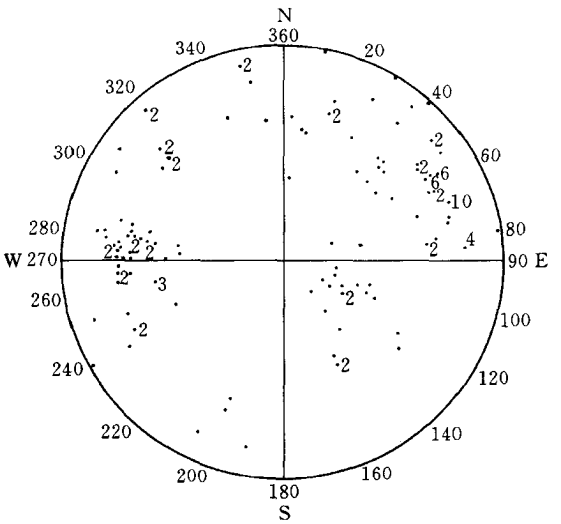

图 1-9　三峡大坝＃Ⅰ～＃Ⅳ坝段裂隙（150 条）极点图

图的使用，发现该图比传统使用的裂隙极点图有以下优点：

（1）制图简单，勿需用中心密度计和边缘密度计逐块（1 cm^2）查点数，也勿需繁琐地制作等密度线。

（2）理论根据充分，传统的等面积密度图并不是球面的等密度，而是把球表面投影到赤平面上以后，按投影面等面积数点；新方法是实际的等面积，因此后者能真实地反映裂隙产状的分布情况。

（3）新方法真实地反映了上半球等球面积内裂隙产状的分布情况，因而它可供裂隙分组和评价其产状分布特征（密度分布）。

【例 1-3】为了对黄河小浪底水利枢纽工程的地下厂房进行排水设计，对平行地下厂房长轴方向和垂直长轴方向的地下水排水廊道的围岩分别进行了地质编录。对排水区内的裂隙进行大量研究后发现，排水区是一个相对均质区，但由于被编录的探洞方向与裂隙面的交割方向不同，使裂隙分组和裂隙分布密度有较大的差别，其中最明显的差别是，与洞向平行的或与洞向交角较小的裂隙编录漏编了许多。对这种误差的修正，除了要纵、横、深三向上进行裂隙调查外，还要详细地研究如何消除产状测量中的一系列误差。

（二）产状测量误差分析

在野外搜集裂隙产状数据的过程中，通常是根据裂隙与测线或取样窗相交部分（如钻孔、露头等）进行的。所以，野外测得数据只具有二维的分布性质。二维的裂隙产状观测值存在着取样偏差，在使用这些产状资料之前，更重要的是在测量这些产状资料之前，必须了解可能产生误差的因素以及尽可能采取减少误差的措施。通常一组裂隙多由相近产状的极点构成，产状极点的观测频率将不同于真实频率，这样所产生的误差称之为产状取样偏差。构成取样偏差的因素有以下两个方面。

1. 裂隙面与取样面的交角太小所引起的误差（自然误差）

裂隙面与取样面的交角大小直接决定着裂隙的出现频率的大小。由图 1-11 上可

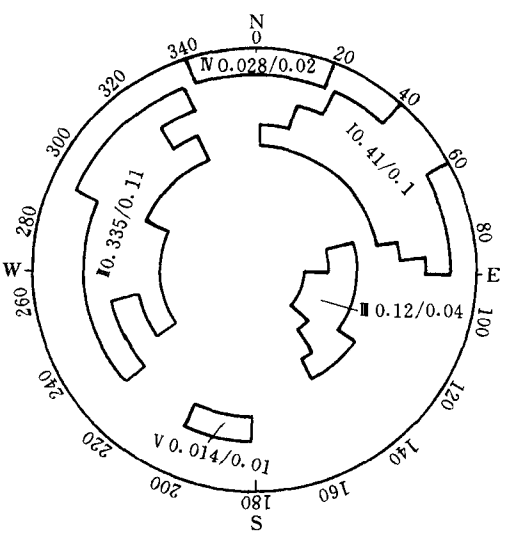

图 1-10　三峡大坝＃Ⅰ～＃Ⅳ坝段裂隙（150 条）分组图

Ⅰ～Ⅳ—裂隙分组编号；0.014—分式的分子为该组裂隙所占百分比；0.01—分式的分母为该组裂隙所占的百分块数的比值（每一块为 0.01）；0.014/0.01 的商为裂隙密度系数

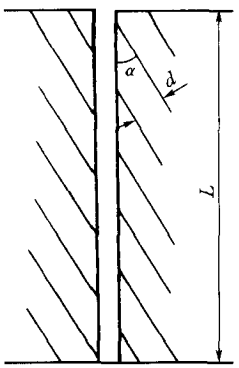

图 1-11　通过钻孔的铅直剖面示意图
L—铅直钻孔深度；d——组垂直于纸面的裂隙面间距；α——一组垂直于纸面的裂隙面与钻孔的交角

以看出，从岩芯上测得的裂隙面出现的频率决定于裂隙面与铅直钻孔交角 α 的大小；由图 1-12 上也可以看出，从水平露头上测得的裂隙面出现频率决定于裂隙面与水平面交角的大小。上述两图表明，无论何种情况，当 $\alpha=0$ 时，裂隙面与取样域（窗）相交的概率为零；而当 $\alpha=90°$ 时，两者相交频率为 1。图 1-11 中，与钻孔交割的裂隙面个数 N，可用下式表示：

$$N = L\sin\alpha/d \qquad (1\text{-}5)$$

由公式(1-5)可以看出，当 $\alpha=90°$ 时，即裂隙倾角为零时，$N=L/d$；当裂隙为铅直时，$N=0$。由此可见，N 随着 α 角的增加而增大。所以在编录过程中，在露头上获得的取样频率不能真实地反映不同方向上裂隙面的发育情况。

目前，在随机裂隙面三维网络计算模拟研究中，大多数研究者试图用数学模型对由于取样原因而导致观测频率的偏差进行校正。由于这些数学模型相当复杂且实践不多，大都处在探索阶段。作者认为，在充分了解产生偏差原因的情况下，应从改变取样域产状方面，找到减少偏差的办法是容易办到的。

要尽量使取样面与裂隙面的交角增大：取样面分为地表露头面、钻孔壁面、平硐竖井四壁和坑槽探的三或四壁面等四种。对于地表水平露头，如果调查对象中有水平裂隙时，应设法寻找剖面露头或人工剖面露头测量裂隙面产状；如果调查裂隙面的倾角陡峻时，不宜用铅直孔钻探，可改用有一定倾角的斜孔，这样就会收到“事半功倍”的效果；采用平硐和竖井调查裂隙面产状时，若勘探工程的轴线与裂隙面的交角太小，容易漏编其产状，易引起较大偏差，在这样情况下，除了对各岩壁露头的裂隙面进行认真测量外，还应对相隔一定距离的掌子面上出露的裂隙面产状进行仔细测量。同样，对于坑槽探的岩壁（含坑槽探底面）和相隔一定距离的掌子面，也应进行逐个测量。

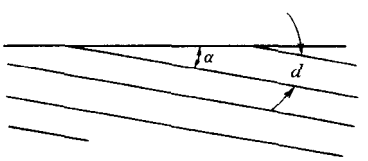

图 1-12　切割水平露头的铅直剖面示意图
d——组垂直于纸面的裂隙面的间距；α—组垂直于纸面的裂隙面与平面露头的交角

在初步设计或招标设计阶段的工程地质勘察，对于地下厂房、拱坝坝肩等重要部位的裂隙，要布置 T、工、干、F 和非字型勘探硐，以便全方位搜集裂隙产状，进而进行全面的、三维的分析裂隙产状的变化。

从上述论述中可以体会到一个最基本的精神，那就是要提高测量信息的可靠度，必须使取样面与被测裂隙面之间的夹角尽可能大。这是因为，取样面的产状和被测裂隙面的产状相同时，在取样面上是看不到与其相同产状的裂隙面的，当然也无法测其产状，这个点被称之为“盲点”。在进行裂隙调查时，要采用多个不同方向取样面的方法，以便不同方向的裂隙至少能和其中一个取样面呈高角度相交。极而言之，两者的相交的角度也不应小于 20°。夹角小于 20°的带，称之为“盲带”。作者在这里着重指出的是，在统计产状时，切不可把盲带的测量值与非盲带的测量值混为一体，否则，将严重降低非盲带内不连续面的真实频率。

此外，在裂隙极点测量中，还要注意取样面积的大小，因为取样面积较小时，容易引起较大的误差。例如，田开铭教授在山东金岭铁矿露天坑的某一个测点上的研究结果表明，当测量面积为 50 m^2 时，渗透张量的各渗透主值和主渗透方向均趋于稳定，也就是说，在这种情况下所测得的裂隙极点可反映实际情况。

2. 取样面上测量裂隙产状的条件太差而引起的误差（条件误差）

在天然取样面及人工取样面上，由于覆盖物或机械钻进岩粉粘糊而冲洗不净者，将会引起产状测量误差，特别对细小裂隙将会引起大的误差甚至会造成漏测。在钻孔岩芯上测量裂隙时，由于钻进方法不当而引起岩芯对磨现象者也将引起较大的误差，特别是对于缓倾角裂隙，由于“对磨”严重而将漏测。

对陡峭岩壁的上部和下部（距底 70 cm 以下的部分），平硐顶拱，坑槽、硐壁下部 70 cm 以下的范围，竖井的掌子面，通风不好的硐子，地质条件较差，有施工干扰和照明不良者等，都会引起较大的误差甚至会造成错误的结果。

为提高裂隙的测量精度和避免较大的误差，对于产生“条件误差”的取样面，除了积极改善工作条件外，还要对易于产生较大误差的取样面，采用较好的设备，如改进取芯钻具、数码照相等方法，以改善地质人员的不良工作条件。

此外，在测量裂隙的过程中，地质人员要注意剔除那些放射方向、新鲜破裂面的爆破裂隙。一个有经验的地质工程师，判断非自然的裂缝是很容易的事。

三、裂隙宽度的测量

无论是水工建筑物地基的灌浆，还是水工建筑物的排水，直接了当地说，这些工作之所以要开展，就是因为岩体中发育有多组裂隙。如果这些裂隙都是闭合的，也就是说它既不吃浆也不透水，那末我们对岩体裂隙就没有研究的必要了。岩体之所以吃浆和透水，就是因为它不都是闭合的，也有张开的。张开裂隙的隙宽是张开裂隙的重要特性。单条裂隙的透水量与其隙宽成立方关系，它对灌浆、排水工作影响最大，所以在野外对裂隙系统进行调查时，测量裂隙宽度要特别细致。

野外丈量裂隙宽度的实践表明，大于 1 mm 的宽度用钢卷尺是容易测量的。当其宽度小于 1 mm 时，用一般量具测量就相当困难了。田开铭教授[5]介绍了用金属塞尺测量裂隙宽度的方法。用塞尺可以测量隙宽大于 0.05 mm 的裂隙。这样量具的测缝量限精度，对于灌浆、排水计算精度来说已经足够了。

在选定的测量面积内，沿裂隙延伸方向，每隔一定距离测量一个隙宽，相当于获得一个随机变量的样本值，裂隙面间宽度沿其延伸方向变化大时，测距就要小些，反之大些，视具体情况而定。我们在小浪底和黄河碛口工地，一般是按短于 2 m 长的裂隙，在其中部测一次隙宽；隙长大于 2 m 时，每隔 2 m 测隙宽一次，最后算出一个平均值，以供计算使用。

第二节　　岩芯裂隙产状调查

目前，常用的工程地质勘探钻孔有铅直孔和倾斜孔。它们所采取的岩芯有铅直孔岩芯、定向岩芯和斜孔岩芯。测量岩芯裂隙产状是研究裂隙的一个重要手段，但它常常被工程地质人员由于没有合适的设备（手段）而被忽视掉。为此我们将详细介绍测量岩芯裂隙的两

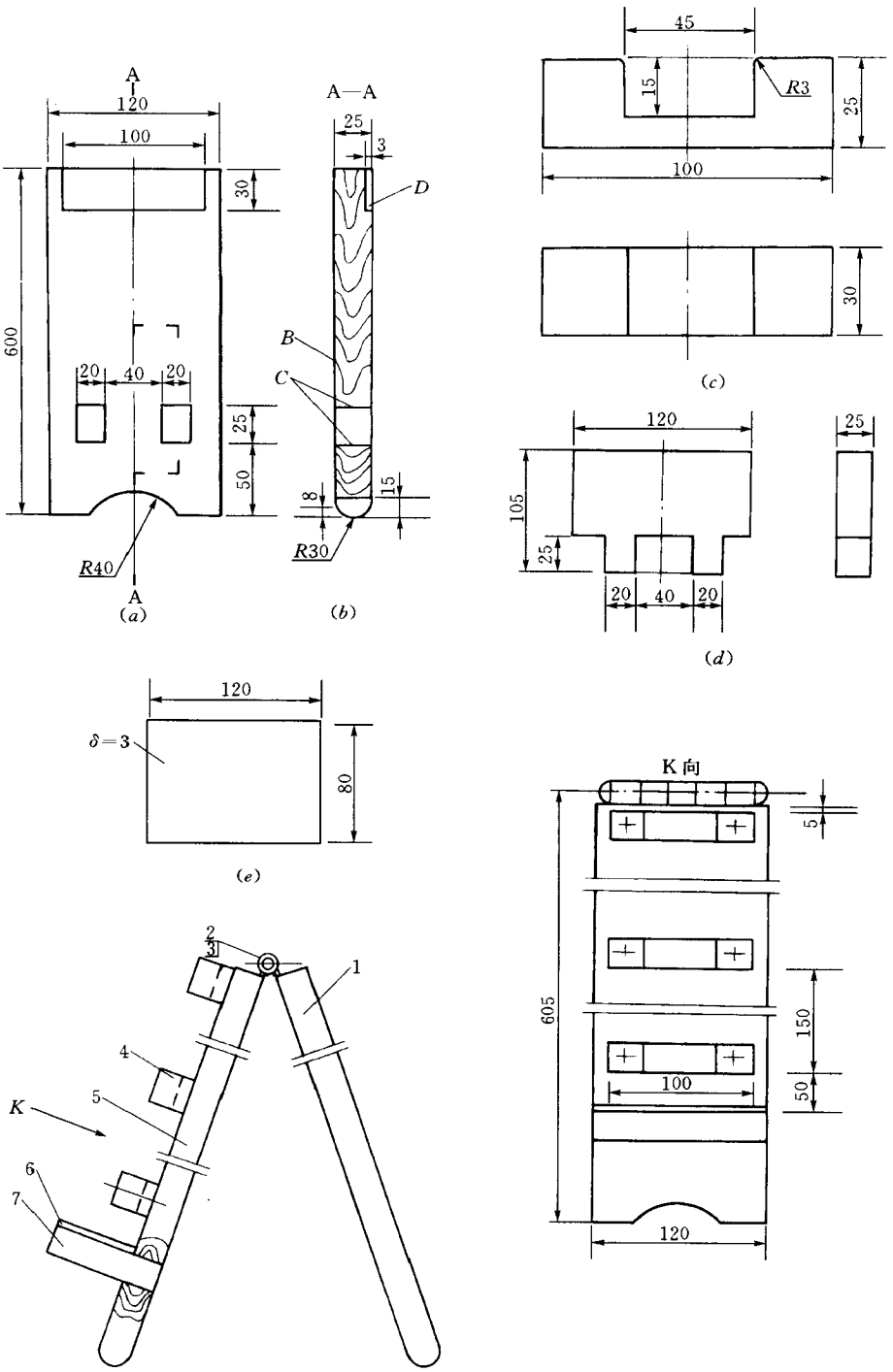

图 1-13 岩芯测量架总图（尺寸单位： mm

(a) 支撑板分图；(b) 架板分图；(c) 支撑块分图； (d) 撑块分图；(e) 橡胶垫分图

种方法。

一、定向岩芯裂隙产状测量

凡在岩芯上能识别出正北方向的岩芯，或在裂隙产状测量架上能够确定正北方向的岩芯，都统称为定向岩芯。

具体测量方法是，将定向器带有定位杆和珠室的部件卸下，放入作者设计的岩芯产状测量架上，将铝片上的印痕调整到岩芯圆周面上的最低位置（详见下节中述及的测量方法），将同一回尺取出的各段岩芯按上、下顺序调整到吻合程度，这样可使各段岩芯定向。

二、斜孔岩芯裂隙产状测量

作者根据斜孔产状已知的条件，利用斜孔岩芯裂隙产状测量架（简称测量架），把斜孔岩芯恢复到地下的原始状态，然后对裂隙进行测量。各类裂隙的倾向与斜孔轴向的最小夹角 α 变化于 0°～90°之间。当 $\alpha=90°$ 时，裂隙面为岩芯上的最小断面，即圆面；当 $0°<\alpha<90°$ 时，裂隙面一律为椭圆面，椭圆面的长轴方向即为裂隙面的倾向。据此可在测量架上直接测量裂隙的产状。

（一）测量架的制作方法

测量架的制作方法如图 1-13 所示。

对制作岩芯测量架的技术要求：①将件 4 用木用铁钉钉在件 5 上，务求三个支撑块槽轴线为一直线；②将件 6 用木用铁钉钉在件 7 上；③用件 7 的榫插入件 5，用乳胶粘牢，件 7 上面与件 5 表面垂直；④装上合页后，件 1 与件 5 可紧贴一起，侧面对齐；⑤用无色透明漆涂刷；⑥尺寸以 mm 计。

对制作支撑板、架板的技术要求：B 面必须平直，C 面还要与 B 面垂直，应与支撑板的榫相匹配，图 1-13（a）与（b）分图的差别在于前者不开榫槽 C。

对制作支撑块和撑板的技术要求：如图 1-13（c）图所示，槽应刻得左右对称，圆弧 R3 可用细砂布磨光，左右一致，三个支撑块应在同一块硬木板料上刻槽，然后锯成如图所示的尺寸。加工图 1-13（d）分图所示的撑块时，应与图 1-13（b）分图所示的榫孔相匹配。同时，制作如图 1-14 所示的测量板。

测量板可用硬纸板，最好用赛璐珞等适用的材料做成。

（二）岩芯裂隙产状的测量方法

（1）将测量工作面板置平，并使测量架的岩芯床倾向与钻孔倾向（即钻孔方位）保持一致。

（2）调整岩芯床使之与钻孔倾角一致后，固定岩芯床。

（3）用罗盘将测量板上的合页轴向固定成与已知地层面的走向线平行，或用罗盘将岩芯上的基线，固定成钻孔的倾斜方向。

（4）将带有层面的岩芯放在岩芯床上、并转动岩芯使椭圆形长轴线方向与已知的层面的倾向一致。

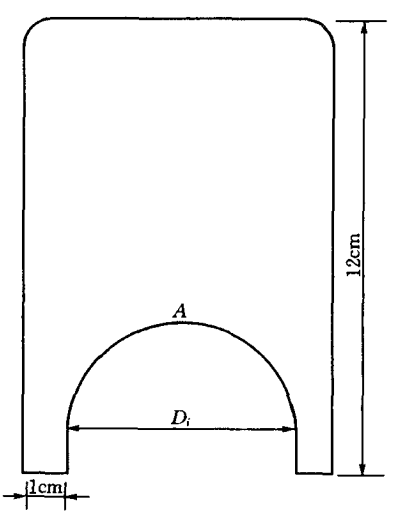

图 1-14 岩芯裂隙产状测量板

A—裂隙在岩芯上出露的最高点或最低点；

D_i—与系列岩芯直径相匹配的测量板插口直径

需要全本请访问 www.ertongbook.com