
长大隧道穿越富水变粒岩断层带的 超前固结与掌子面高温控制技术研究

——以五老山隧道为例

谢飞鸿 李占先 冯国森 周宝龙 编著

西南交通大学出版社

• 成 都 •

前 言

地下空间开发利用是我国 21 世纪经济建设的重点，也是关系到我国经济和工程建设可持续发展的关键问题。隧道是高速公路快速发展不可或缺的地下工程，而近年来我国加快了基础设施的建设速度，与此伴随的是高速公路里程的增加，长大隧道的增多。长大隧道涉及的工程地质情况复杂多变，当前的设计施工理论尚不完备，建设过程带有较强的不确定性，是一项复杂的高风险性系统工程，需在方案设计上做到随情况及时调整。地下工程的核心环节是地下洞室的开挖，隧道穿越软弱破碎围岩时，开挖扰动会引起较大的围岩变形，如果初期支护施作不及时，围岩变形可能超过其容许范围，严重时引起掌子面失稳、隧道塌方，造成生命财产损失。而在隧道整个施工作业过程中，由于机械设备、爆破、人员等释放出的热量难以排出，在长大上行隧道中极易形成高温积热现象，对施工进度、工人人身安全造成重大影响。为了改善长大隧道作业面的工作环境，施工单位多采用竖井这种通风方式，而传统施工方法的不足和缺陷在通风竖井的应用中也愈益明显。传统施工方法不仅施工效率低，施工安全性也无法得到保证。

本书从具体的工程实际出发，依托中缅国际大通道——墨临高速公路五老山隧道施工段，对其亟待解决的围岩稳定性、穿越破碎带、高温施工以及爆破问题和竖井施工岩石稳定性问题进行研究。本书采用定性和定量两种研究方法，通过地球物理勘探手段和室内试验对项目隧道段变质岩进行岩石特性研究，对隧道穿越断层破碎带及富水破碎带进行不同进程的开挖和支护模拟，结合定性和定量方法的分析结果，设计出隧道断层带专项施工方案；对长大隧道掌子面高温环境的温度场进行了模拟研究，并结合模拟结果提出隧道降温设计方案；利用有限差分法对隧道大高差通风竖井进行开挖进程的模拟，并对反井钻井法的疑难点进行优化，提出隧道通风竖井施工方案。

本书研究成果已在云南临沧五老山隧道施工中得到了推广应用，在隧道施工安

全、建造成本、施工进度和整体项目质量的控制方面做出了突出贡献，取得了显著的社会、经济效益，有力支撑了国家相关的重大战略交通工程建设。其中的主要创新点如下：

(1) 通过现场调查、室内试验以及数值分析研究，明确不同开挖进程所需的支护反力，从而提出合理经济的隧道断层带超前支护方案。

(2) 基于工程实际对隧道热环境的形成机理进行了综合分析，对长大上行隧道的积热高温现象以及隧道降温后的温度场进行模拟，得到了隧道内空气温度场分布和变化规律，并由此提出经济适宜的隧道降温方案。

(3) 通过对隧道大高差通风竖井开挖进程的模拟，明确了竖井开挖过程中的井壁围岩的应力位移变化以及断层破碎带对竖井施工的影响，发明了高速公路长大隧道竖井围护破碎围岩井壁预防塌方的施工方法。

本书的撰写分工如下：第 1 章由中铁十四局集团建筑工程有限公司冯国森高级工程师、成都大学谢飞鸿教授撰写；第 2 章由中铁十四局集团建筑工程有限公司李占先教授级高级工程师、冯国森高级工程师撰写；第 3 章由成都大学谢飞鸿教授、中铁十四局集团建筑工程有限公司周宝龙高级工程师撰写；第 4 章由成都大学谢飞鸿教授、中铁十四局集团建筑工程有限公司冯国森高级工程师撰写；第 5 章由成都大学谢飞鸿教授、中铁十四局集团建筑工程有限公司李占先教授级高级工程师撰写；第 6 章由成都大学谢飞鸿教授、中铁十四局集团建筑工程有限公司周宝龙高级工程师撰写；全书由成都大学董建辉教授校稿。

在本项目研究的现场测试和室内外试验、数据处理和资料收集整理过程中，成都理工大学邱茂博士、董阳丹、冯霖，成都大学张华副教授、赵蒙博士，重庆交通大学李涛硕士，中铁十四局集团建筑工程有限公司王孝波、王伟伟、朱礼臣、田动动、李帅，中铁西北科学研究院有限公司朱兆荣高级工程师等提供了很多帮助，在此表示衷心的感谢。

书中引用了部分国内外著作、文章、规范等的成果，在此向作者及相关单位表示感谢；特别感谢中铁十四局集团建筑工程有限公司协助完成本项目的现场测试工作。

由于作者水平所限，书中难免存在疏漏之处，请读者批评指正。

作者

2022 年 6 月

目 录

1	工程概要	001
2	高速公路隧道变质岩性研究	005
2.1	隧道地球物理勘探	005
2.2	隧道岩石耐崩解性试验	019
2.3	隧道岩石电镜扫描试验	026
2.4	结 论	031
3	高速公路隧道穿越断层破碎带数值模拟	033
3.1	UDEC 数值模型建立	033
3.2	穿越破碎带工况分析	035
3.3	工况分析总结	080
4	穿越高速公路隧道富水破碎带数值模拟	085
4.1	数值模型建立	085
4.2	穿越破碎带工况分析	086
4.3	工况分析总结	132

4.4	隧道富水断层专项施工方案	136
5	高速公路隧道高温积热环境研究	152
5.1	隧道施工通风基本理论	152
5.2	隧道热环境的模型建立及参数设置	155
5.3	公路隧道高温环境下降温设计	167
5.4	隧道高温研究结论	179
5.5	上行隧道热源分析及热值计算	179
5.6	隧道的数值模拟工况	181
5.7	上行隧道高温研究结论与未来展望	191

6	高速公路隧道竖井研究	192
6.1	高速公路隧道正井施工研究	192
6.2	高速公路隧道竖井反井施工研究	234
6.3	隧道通风竖井专项施工方案	284
	参考文献	321

工程概要

五老山隧道(图 1.1)位于云南省西南部的临沧市,隧道岩温为 28 ℃,水温为 26 ℃。隧道右幅起点里程为 K260+450,止点里程为 K267+300,全长为 6 850 m,最大埋深为 541.5 m;左幅起点里程为 K260+440,止点里程为 K267+380,全长为 6 940 m,最大埋深为 543.9 m。隧址海拔介于 1 667.45~2 263.10 m,相对高差 595.65 m。隧道区域属亚热带低纬度山地季风气候区,四季温差较小,年平均气温为 16.8~17.7 ℃,现场实测夏季室外最高温度为 27 ℃。工程现场卫星图如图 1.2 所示。

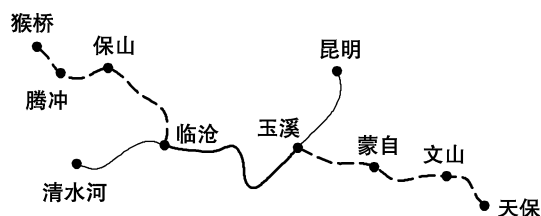


图 1.1 五老山隧道在公路网中的位置示意图



图 1.2 工程现场卫星图

云南省西南部大部分地区气候温和宜人，日照多，霜期短。由于地形高差起伏大，该区域气候垂直分带现象较为显著：低海拔和河谷地区气候炎热，全年无霜；高海拔山区气候较冷，霜期在 50 d 以上，常遭云雾笼罩和冰雹侵袭，年平均气温在 15 ℃ 左右，最低气温在 0 ℃ 以下，偶有霜雪，属温带气候；海拔在 800 ~ 1 700 m 的广大地区，年平均气温在 18 ℃ 左右，属亚热带气候。全区年平均气温一般在 16.4 ~ 21.5 ℃，最高极值达 42.3 ℃，最低极值为 -0.2 ℃；雨量充沛，旱雨季分明，年平均降雨量为 1 112.0 ~ 1 964.4 mm，年平均相对湿度为 70% ~ 80%，绝对湿度在 1.3 ~ 2.1 kPa；80% 的雨量集中在 6 ~ 9 月，且多雾而潮湿，连续降雨日可达 20 d，11 月至次年 4 月为干季，降雨量极少，气候干燥多风。

根据实地走访调查与收集查阅资料得知，隧道区发育有一断层，为一逆断层，长约 8.5 km，走向 345°。隧道于 K261+360 附近与该断层大角度相交，相交段倾向南西，倾角 67°。断裂两侧岩体破碎，构造片状岩较发育，对隧道围岩稳定性不利。隧道区范围内主要地层为第四系坡残积 (Q^{dl+el}) 层、第四系坡洪积 (Q^{dl+pl}) 层、元古宇 (PR) 岩层、印支期 (γ_{m5}^1) 岩层。以上各地层按照工程力学性能并结合工程特征共划分为 ① ~ ⑥ 六个工程地质单元层。

隧址区进口外侧有那杏河发育，常年流水，河床纵坡较小，具有山区河谷暴涨暴跌的特征，最高洪水水位涨幅约 1 m。河流宽度为 2 ~ 3 m，水深 0.2 ~ 0.5 m，调查期间流速约 1 m/s。

隧道洞身段及出口均有季节性冲沟呈树枝状发育，水量大小不一，总体水量均不大，水流量 $Q = 0.03 \sim 5 \text{ L/s}$ 不等。隧址区降雨充沛，植被茂密，地表水系较发育，地表水主要接受大气降雨的补给，汇水面积较大，径流量受区内降雨量和季节控制。

路线左 K263+880 左侧约 100 m 处为一水塘，面积约 900 m^2 ，水深 $0.5 \sim 2 \text{ m}$ ，周边无流水补给，主要接受大气降雨的补给。左 K264+300 左侧约 300 m 为一水库，调查期间水位面积约 0.01 km^2 ，水深 $3 \sim 8 \text{ m}$ ，水库北东侧有两股地表水汇入，流量 $Q = 1.5 \text{ L/s}$ 左右。库区水主要用于彭家村农用灌溉。

隧道区地下水为第四系孔隙水类型及基岩裂隙水类型：第四系孔隙水多赋存于第四系松散土体中，多以潜水形式出现，水量甚微；基岩裂隙水埋藏于变粒岩、片麻岩的构造裂隙和风化裂隙中，受地形地层岩性、地貌、气候及风化裂隙和构造裂隙发育程度的控制，水量相对较小。隧址区沟谷地带均有泉点出露。

隧道路线原有断层上下两盘的相对运动，常使断层面附近岩石破碎成碎石和粉末状，形成断层破碎带（图 1.3）。其岩体一般自稳性极差，且常伴有地下水。左、右幅围岩目前进入 F_{47} 大生地断层施工带，围岩以糜棱岩（mylonite）为主。糜棱岩是颗粒很细、呈条带状分布的动力变质岩。岩石中大部分矿物不能用肉眼分辨。原来的粗粒岩石（花岗岩等）受到强烈的定向压力，被破碎成粉末状（断层泥），强度低，易引起渗漏和形成软弱夹层，对岩体稳定不利，自稳能力较差，开挖后存在塑性流动变形；且该段物探显示为相对低阻区，岩体富水性较强，开挖时存在较大量的滴水、流水，施工极为困难。本书主要研究的是穿越隧道工程的 9 m 宽超长破碎带，其主断层及次生断层厚度超过 650 m。破碎带周围岩类多为花岗岩；在破碎带

内，岩类多为糜棱岩和变质花岗岩。

在隧道段施工中，所遇到的工程问题分别有主洞施工中的围岩稳定性、穿越破碎带、高温施工以及爆破和竖井施工中的竖井施工岩石稳定性等。

主洞围岩多为Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级：Ⅲ级围岩稳定性较好，不易出现坍塌现象；对于稳定性较差的Ⅳ级、Ⅴ级围岩以及破碎带地段，由于危险性较高，在实际工程中，Ⅴ级围岩及破碎带地段均采用三级台阶开挖方式，如图 1.4 和图 1.5 所示，在进行一定程度的评估后才能着手施工。故对Ⅳ级、Ⅴ级围岩、破碎带地段的围岩情况以及支护后的围岩稳定性分析，采用根据离散元原理设计的 UDEC 软件分别进行数值模拟与计算。

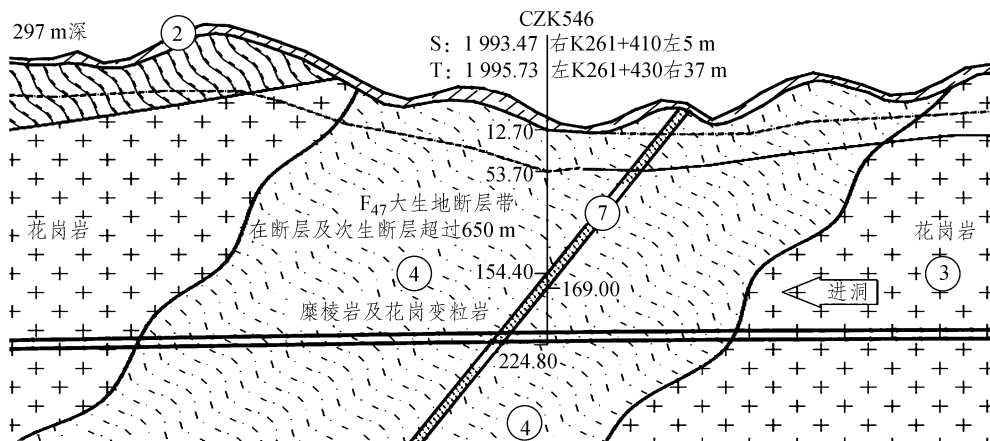


图 1.3 破碎带位置

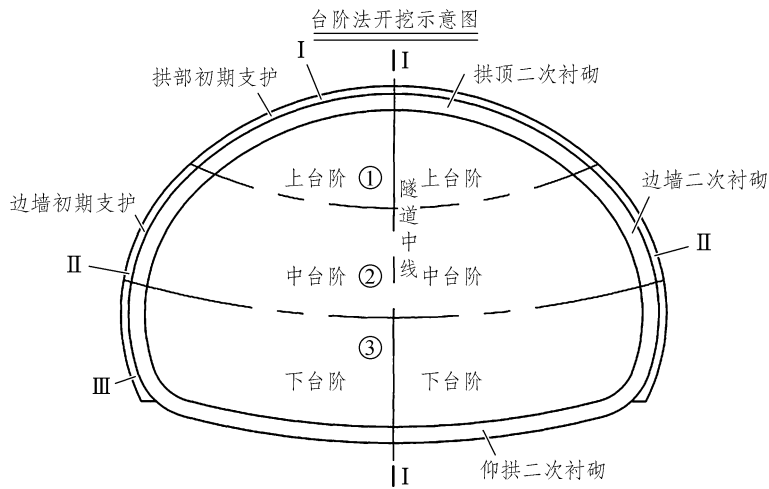


图 1.4 隧道分台阶开挖横断面大样图

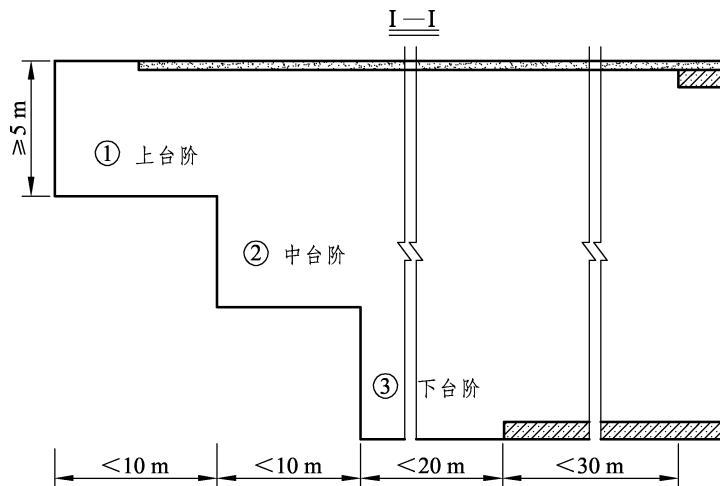


图 1.5 隧道分台阶开挖纵断面大样图

隧道中的高温问题主要由于隧道中各类机械大量散热，通风、降温条件较差，使掌子面温度最高可达 45 ℃。为解决高温带来的施工困难问题，采用计算流体力学 (CFD, Computational Fluid Dynamics) 软件对隧道内的温度场进行模拟研究，然后利用软件模拟结果进一步对隧道热环境的主要影响因素进行分析。竖井施工涉及正井施工和反井施工问题。竖井施工的危险性较大，为优化、完善施工方案，采用 FLAC^{3D} 的显式拉格朗日算法和混合-离散分区技术，模拟竖井在开挖过程中可能遇到的各类坍塌问题，并采取相应的措施予以规避。

高速公路隧道变质岩性研究

2.1 隧道地球物理勘探

2.1.1 声波法

1. 岩体测试方法及原理

单孔声波测试是采用单发双收井下换能器（发射至接收一间距 0.5 cm，接收一至接收二间距 20 cm），在钻孔（赋存井液的裸孔）内沿井壁发射、接收声波信息^[1]。测井时将换能器下至井底或置于井口，按测井点距向上或向下测试，由计算机完成波列数据采集与数据存储，室内通过回放和资料处理拾取纵波，在仪器采集的波形中根据波形起跳点确定纵波初至走时，计算纵波波速。

声波测井首先是测定声波在钻孔岩壁上传播一定距离所需要的时间，然后运用公式 (2.1) 计算岩体声波波速，以及通过其他多种方法对岩体波速进行分析整理，取得多种岩体动力学属性参数。它主要是由井下探管、地面控制仪器和记录处理系统等三部分组成，如图 2.1 所示。其所反映的地质特性为钻孔周围一定范围内垂直方向上的岩体质量。

$$V_p = \frac{\Delta L}{\Delta T_2} \quad (2.1)$$

式中： ΔL —— 两接收换能器间的距离 (m)；

ΔT_2 —— 第一接收换能器外第二接收换能器之间的时间差 (s)。

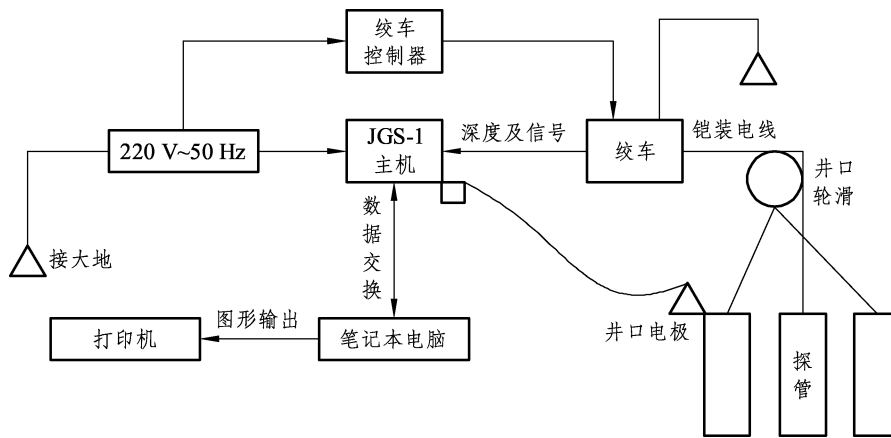


图 2.1 智能工程测井系统构成及连接图

实际工作时，接通电源电子线路即开始工作。时序电路 1D10 的 6 脚输出约 106 ms 周期的同步信号，加外发射线路，使可控硅 SCR1 导通储能电容 5C2-5 放电，经脉冲变压器升压后加外发射换能器 BT，使发射换能器产生一族 20 kHz 左右的声波射向井壁。

在发射换能器发出声波信号的同时，同步信号打开门 I（1D5-1、1D7-1 脚）见图 2.1 和图 2.2。计数器 I（2D3-10）开始计数，计数频率为 1.225 MHz，当第一道接收换能器 BR1 接收到声波的首波后，经放大鉴别电路 I（1D8-9）产生一个 90 μs 的信号防止鉴别电路产生误关门，此时计数器 I 所计的数为发射换能器外第一接收换能器之间的时间 ΔT_1 。在关闭门 I 的同时，打开门 II（1D5-2、1D7-1 脚），计数器 II 开始计数（2D5-10）。当第二接收换能器 BP2 接收外声波的首波时，通过放大鉴别电路 II 关闭门 II，为了防止误关门，延时电路 II 在关闭门 I 的同时延时 20 μs。计数器 II 所计的数为第一接收换能器外第二接收换能器之间的时间差 ΔT_2 。

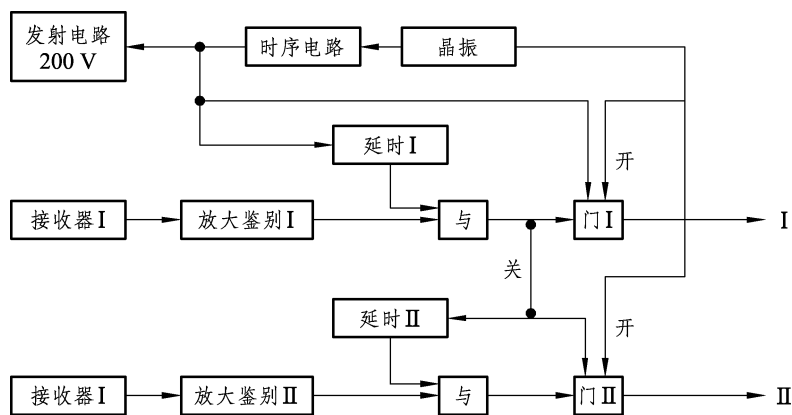


图 2.2 探管工作原理图

由于水是不可压缩、不可剪切的液体，因而采用此套声波测井系统无法测读到岩体的横波波速，一般采用钻孔岩芯试件测试纵波、横波速度。

在实际观测时，通常是将一发双收换能器置于孔底，由下往上进行测试，遇到波速异常地段，需进行多次复检测试。

2. 实验室岩块测试方法

采用中国科学院武汉岩土力学研究所生产的 RSM-SY5 型智能声波仪外加纵、横波换能器测试出检测岩块在饱水状态下的纵波波速、横波波速、密度。可以根据《工程地质手册》(第 4 版) 10-5-5 规范公式计算出岩块的泊松比、动弹性模量、动剪切模量；同时也可以据此计算出相应部位岩块的纵波波速平均值。

3. 岩体完整性系数 K_v

通过计算出岩体平均纵波波速 (V_{pm}) 与室内饱水状态相对应的岩块纵波平均波速 (V_{pr})，由岩体完整性系数公式 (2.2) 可得出各层岩体的完整性系数。

$$K_v = \left(\frac{V_{pm}}{V_{pr}} \right)^2 \tag{2.2}$$

式中： K_v ——岩体完整性指数；

V_{pm} ——岩体纵波速度 (m/s)；

V_{pr} ——室内岩石（块）纵波速度 (m/s)。

4. 检测结果

根据 6 个钻孔的声波测井综合计算结果，本场地：

钻孔右 K259+800 左 5 m：测试深度为 9 ~ 41.8 m 全风化变粒岩岩体完整性系数为 0.45，完整程度为较破碎；测试深度为 41.8 ~ 52.8 m 强风化变粒岩岩体完整性系数为 0.55，完整程度为较破碎；测试深度为 52.8 ~ 115 m 强风化变粒岩岩体完整性系数为 0.59，完整程度为较完整。

钻孔左 K260+770 左 5 m：测试深度为 11.6 ~ 27 m 强风化变粒岩岩体完整性系数为 0.53，完整程度为较破碎；测试深度为 27 ~ 153.6 m 中风化变粒岩岩体完整性系数为 0.60，完整程度为较完整。

钻孔右 K261+410 左 5 m：测试深度为 12 ~ 54 m 强风化变粒岩岩体完整性系数为 0.53，完整程度为较破碎；测试深度为 54 ~ 155 m 中风化变粒岩岩体完整性系数为 0.58，完整程度为较完整；测试深度为 155 ~ 169 m 糜棱岩岩体完整性系数为 0.55，完整程度为较完整；测试深度为 169 ~ 225 m 中风化变粒岩岩体完整性系数为 0.63，完整程度为较完整。

钻孔右 K263+775 左 5 m：测试深度为 1 ~ 22 m 全风化花岗片麻岩岩体完整性系数为 0.41，完整程度为较破碎；测试深度为 22 ~ 95.5 m 中风化花岗片麻岩岩体完整性系数为 0.44，完整程度为较破碎；测试深度为 95.5 ~ 185.3 m 中风化花岗片麻岩岩体完整性系数为 0.61，完整程度为较完整；测试深度为 185.3 ~ 442.8 m 混合花岗岩岩体完整性系数为 0.74，完整程度为较完整。

钻孔左 K264+670 右 5 m：测试深度为 17 ~ 76 m 强风化花岗片麻岩岩体完整性系数为 0.46，

完整程度为较破碎；测试深度为 76 ~ 220 m 中风化花岗片麻岩岩体完整性系数为 0.64，完整程度为较完整；测试深度为 220 ~ 316 m 混合花岗岩岩体完整性系数为 0.66，完整程度为较完整。

钻孔右 K265+550 左 5 m：测试深度为 10 ~ 89 m 中风化混合花岗岩岩体完整性系数为 0.58，完整程度为较完整。

2.1.2 高密度电阻率法

1. 工作方法与仪器设备

本次实地物探工作采用天然源高频大地电磁 (EH-4) 法和高密度电法 (WDJD-3) 相结合进行。

天然源高频大地电磁 (EH-4) 法设备采用进口 EH-4 连续电导率剖面仪，它与传统的 MT 法一样，在一个宽频带上观测电场和磁场信息，并由此计算出视电阻率和相位，便可确定出大地的地电特征和地下构造。其在工程勘察、地下水勘探、断裂勘探方面效果尤其显著^[2]。

高密度电法 (WDJD-3) 设备采用重庆奔腾数控技术研究所研制的 WDJD-3 型电法仪器，仪器系统主要由数字采集仪、多路电极转换开关、电缆线及铜电极组成，输入阻抗 $\leq 50 \Omega$ ，SP 补偿范围为 $\pm 1 \text{ V}$ ，干扰压制优于 80 dB，供电脉冲宽度 1 ~ 60 s，在一个宽频带上观测电场信息，并由此计算出视电阻率和相位，便可确定出大地的地电特征和地下构造^[3]。

2. 质量评价

本次工作质量的保障依据为 ISO9001: 2015 质量管理体系文件及《水利水电工程物探规程》(SL 326—2005)。测量前后, 均对仪器设备进行系统的检查, 仪器各项指标均符合说明书规定的使用要求。在测量过程中, 实时对采样数据进行控制, 发现数据异常时, 除检查线缆及电极、检波器外, 还对异常段进行 100% 的重复观测, 重复计数相对误差均小于 5%。本次共对 1 435 个物理点进行了检查, 检查物理点占总工作量的 31.5%, 检查点的相对均方差为 2.18, 符合规程的要求。

3. 数据处理与资料解释

高密度电测深数据按图 2.3 流程进行:

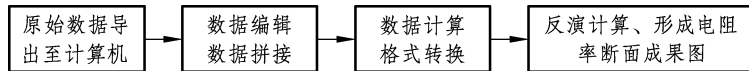


图 2.3 成果图形成步骤

利用反演计算形成的电阻率断面图, 并结合测区的地质条件、电性特征及实地测绘资料, 对资料进行综合分析解释。

4. 结论分析

依据测区的岩性、构造及隧道工程特点, 隧道区岩性及可能出现的物理异常体, 其在电性方面的地球物理特征如下:

1) 隧道进口

(1) 隧道进口左幅:

① 低阻区: 电阻率值一般小于 $200 \Omega \cdot m$, 表层及局部略高, 推测为第四系覆盖层及全至强风化基岩, 厚 $5 \sim 66 m$ 。

② 高阻区：电阻率值一般大于 $500 \Omega \cdot m$ ，推测为元古宇（PR）中风化黑云变粒岩、花岗质混合片麻岩等，岩体完整。

③ 相对低阻区：电阻率值一般为 $200 \sim 500 \Omega \cdot m$ ，部分地段更低，推测为：元古宇（PR）中风化片麻岩，岩体较完整；或者为黑云变粒岩、花岗质混合片麻岩等，富水，岩体较破碎。

隧道进口左幅电阻区分布和高密度电法成果如图 2.4 和图 2.5 所示。

(2) 隧道进口右幅：

① 低阻区：电阻率值一般小于 $200 \Omega \cdot m$ ，表层及局部略高，推测为第四系覆盖层及全至强风化基岩，厚 $5 \sim 66 m$ 。

② 高阻区：电阻率值一般大于 $500 \Omega \cdot m$ ，推测为元古宇（PR）中风化黑云变粒岩、花岗质混合片麻岩等，岩体完整。

③ 相对低阻区：电阻率值一般为 $200 \sim 500 \Omega \cdot m$ ，部分地段更低，推测为：元古宇（PR）中风化片麻岩，岩体较完整；或者为黑云变粒岩、花岗质混合片麻岩等，富水，岩体较破碎。

隧道进口右幅电阻区分布和高密度电法成果如图 2.6 和图 2.7 所示。

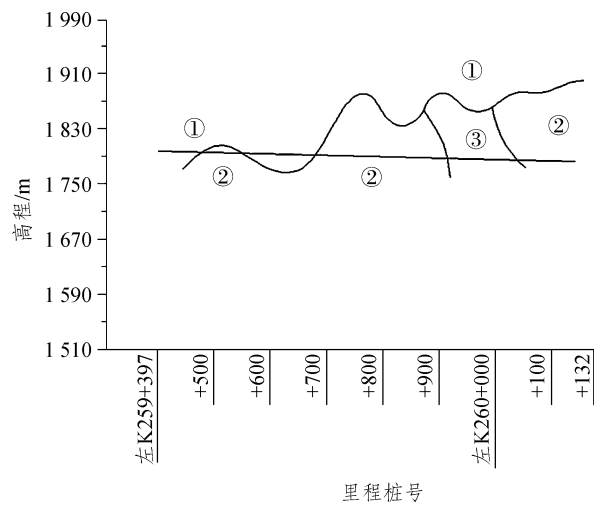


图 2.4 隧道进口左幅电阻区分布

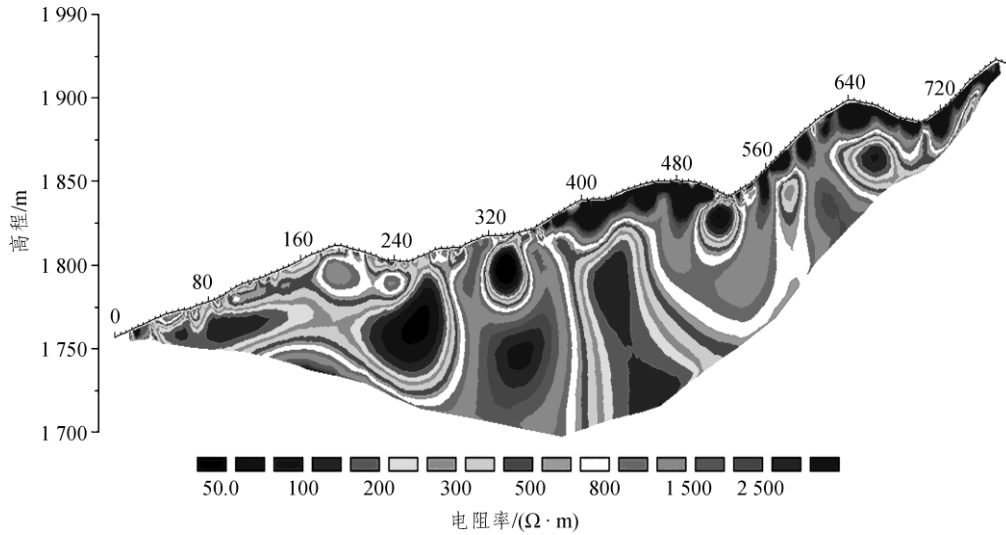


图 2.5 隧道进口左幅高密度电法成果

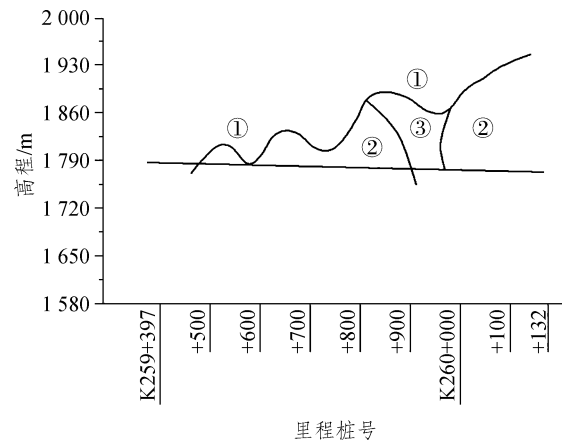


图 2.6 隧道进口右幅电阻区分布

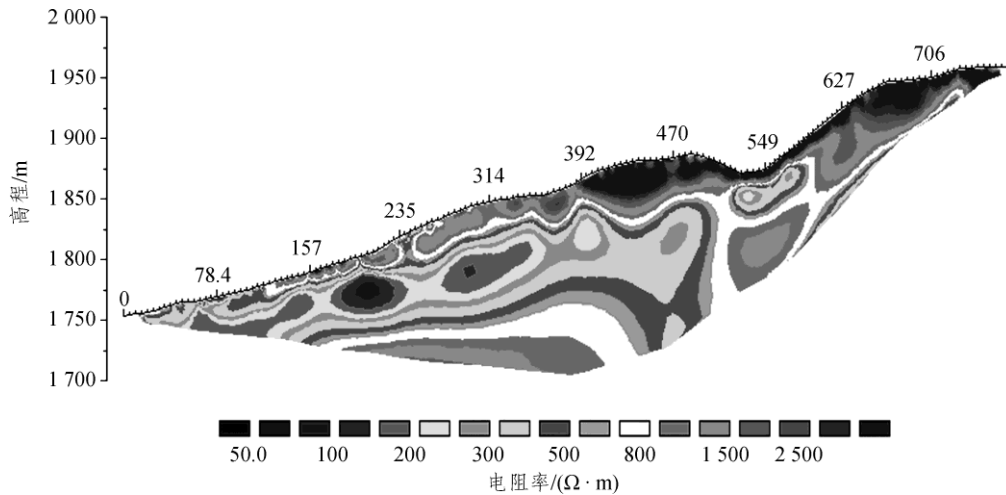


图 2.7 隧道进口右幅高密度电法成果

2) 隧道出口

(1) 隧道出口左幅:

① 低阻区: 电阻率值一般小于 $200 \Omega \cdot m$, 表层及局部为高阻, 推测为第四系覆盖层及全至强风化基岩, 厚 $4 \sim 80 m$ 。

② 高阻区: 电阻率值一般大于 $1000 \Omega \cdot m$, 推测为印支期侵入岩 (γ_m), 岩性为黑云混合花岗岩、黑云二长混合花岗岩, 中风化, 岩体完整。

③ 相对低阻区: 电阻率一般为 $200 \sim 500 \Omega \cdot m$, 部分地段更低, 推测为黑云混合花岗岩、黑云二长混合花岗岩, 强风化, 呈砂状, 富水, 岩体破碎。花岗岩球状风化的特征明显。

隧道出口左幅电阻区分布和高密度电法成果如图 2.8 和图 2.9 所示。

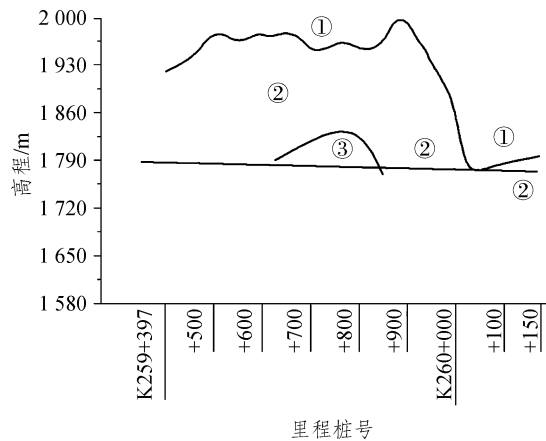


图 2.8 隧道出口左幅电阻区分布

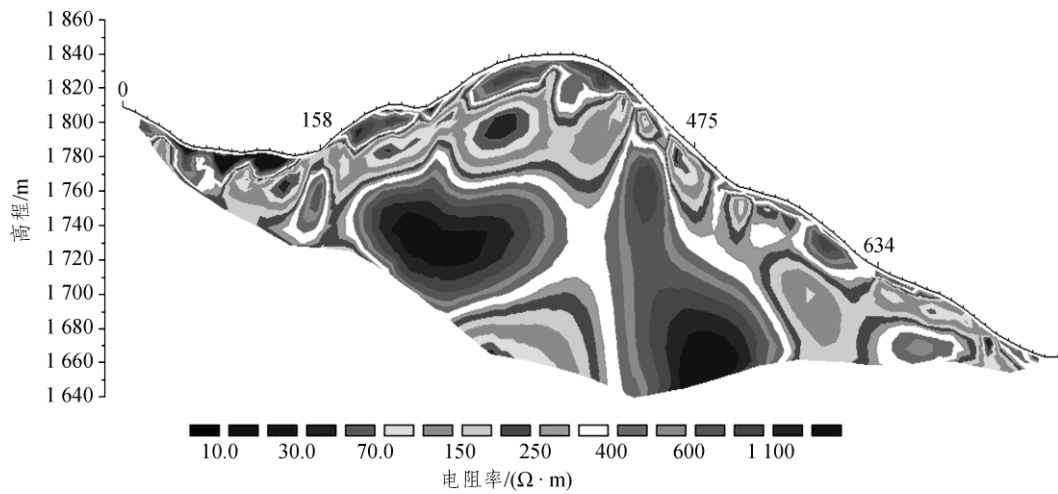


图 2.9 隧道左幅高密度电法成果

(2) 隧道出口右幅:

- ① 低阻区: 电阻率值一般小于 $200 \Omega \cdot m$, 表层及局部为高阻, 推测为第四系覆盖层及全至强风化基岩, 厚 $4 \sim 80 \text{ m}$ 。
- ② 高阻区: 电阻率值一般大于 $1000 \Omega \cdot m$, 推测为印支期侵入岩 (γ_m), 岩性为黑云混合花岗岩、黑云二长混合花岗岩, 中风化, 岩体完整。
- ③ 相对低阻区: 电阻率一般为 $200 \sim 500 \Omega \cdot m$, 部分地段更低, 推测为黑云混合花岗岩、黑云二长混合花岗岩, 强风化, 呈砂状, 富水, 岩体破碎。花岗岩球状风化的特征明显。

隧道出口右幅电阻区分布和高密度电法成果如图 2.10 和图 2.11 所示。

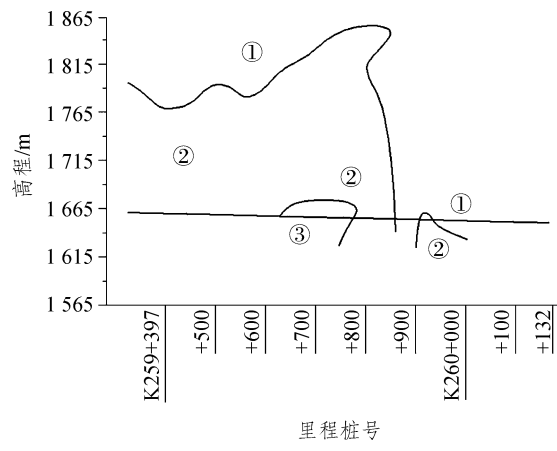


图 2.10 隧道出口右幅电阻区分布

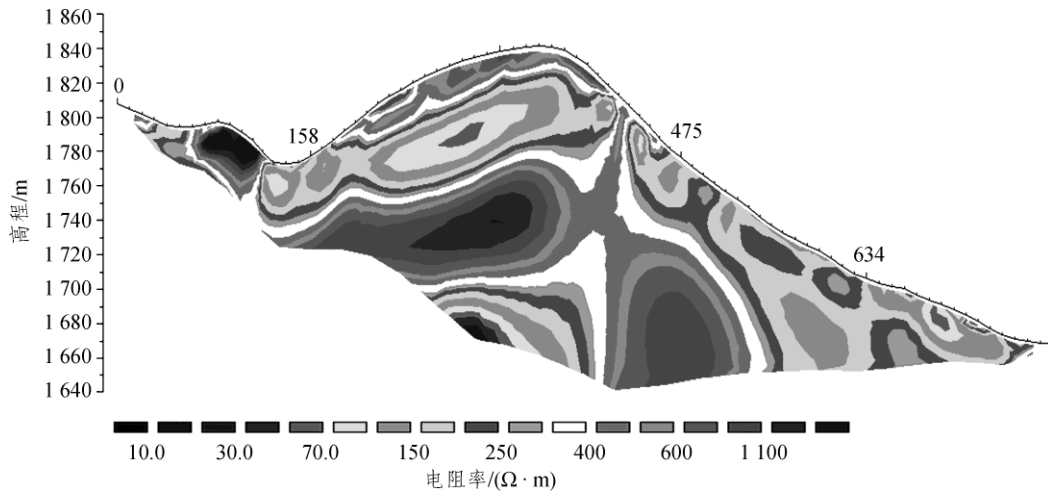


图 2.11 隧道右幅高密度电法成果

2.1.3 瞬变电磁法

1. 基本原理

瞬变电磁法或称时间域电磁法 (Time domain electromagnetic methods, TEM), 是利用不接地回线或接地线源向地下发射一次脉冲电磁场, 在一次脉冲磁场间歇期间, 利用不接地线圈或接地电极观测二次涡流场的方法^[4]。其基本工作原理是: 设置通以一定波形电流的发射线圈, 从而在其周围空间产生一次磁场, 并在地下导电岩矿体中产生感应电流。断电后, 感应电流由于热损耗而随时间衰减。衰减过程一般分为早、中和晚期。早期的电磁场相当于频率域中的高频成分, 衰减快, 趋肤深度小; 而晚期成分则相当于频率域中的低频成分, 衰减慢, 趋肤深度大。通过测量断电后各个时间段的二次场随时间变化规律, 可得到不同深度的地电特征。在导电率为 σ 、导磁率为 μ_0 的均匀各向同性大地表面铺设面积为 S 的矩形发射回线, 在回线中供以阶跃脉冲电流 $I(t)$, 其中:

$$I(t) = \begin{cases} I, & t < 0 \\ 0, & t \geq 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

在电流断开之前，发射电流在回线周围的大地和空间中建立起一个稳定的磁场，如图 2.12 所示。在 $t=0$ 时刻，将电流突然断开，由该电流产生的磁场也立即消失。一次磁场的这一剧烈变化通过空气和地下导电介质传至回线周围的大地中，并在大地中激发出感应电流以维持发射电流断开之前存在的磁场，使空间的磁场不会即刻消失。由于介质的热损耗，该磁场直到将磁场能量消耗完毕才消失，如图 2.13 所示。

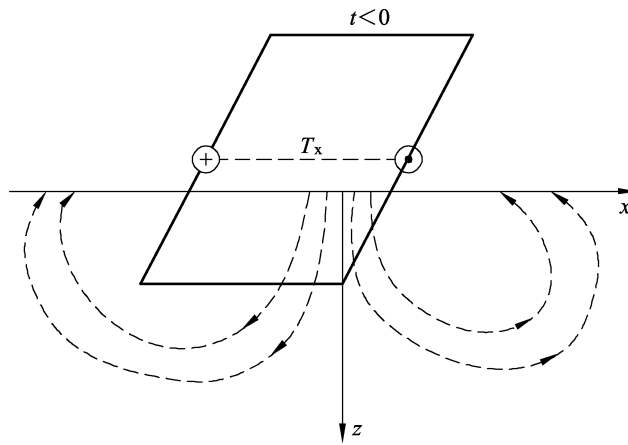


图 2.12 瞬变电磁工作原理

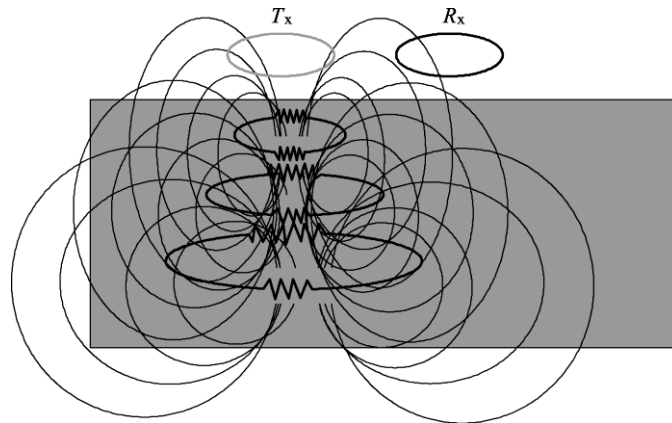


图 2.13 感应电磁场转换原理

电磁场在空气中传播的速度比在导电介质中传播的速度大得多，当一次电流断开时，一次磁场的剧烈变化首先传播到发射回线周围地表各点，因此，最初激发的感应电流局限于地表。地表各处感应电流的分布也是不均匀的，在紧靠发射回线一次磁场最强的地表处感应电流最强。随着时间的推移，地下的感应电流便逐渐向下、向外扩散，其强度逐渐减弱，分布趋于均匀。研究表明，任一时刻地下涡旋电流在地表产生的磁场可以等效为一个水平环

状线电流的磁场。在发射电流刚关断时，该环状线电流紧挨发射回线，与发射回线具有相同的形状。随着时间的推移，该电流环向下、向外扩散，并逐渐变形为圆电流环。等效电流环像从发射回线中“吹”出来的一系列“烟圈”，因此，人们将地下涡旋电流向下、向外扩散的过程形象地称为“烟圈效应”，如图 2.14 所示。

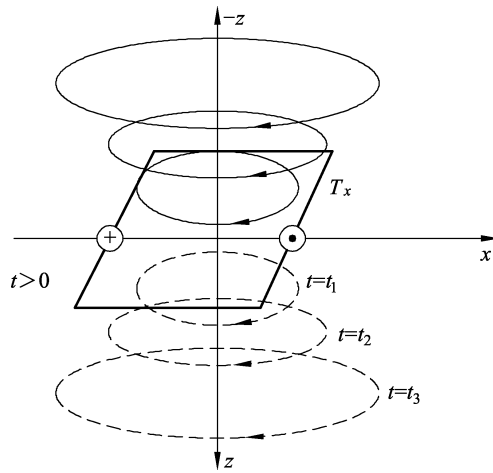


图 2.14 “烟圈效应”

“烟圈”的半径 r 和深度 d 的表达式如下所示：

$$r = \sqrt{8c_2 \cdot t / (\sigma\mu_0 + a^2)}, \text{ 其中 } c_2 = \frac{8}{\pi} - 2 \quad (2.4)$$

$$d = 4\sqrt{t / \pi\sigma\mu_0} \quad (2.5)$$

式中： a —— 发射线圈半径 (cm)。

当发射线圈半径相对于“烟圈”半径很小时，可得 $\tan\theta = \frac{d}{r} \approx 1.07$ ， $\theta \approx 47^\circ$ ，故“烟圈”将沿 47° 倾斜锥面扩散，其向下传播的速度如式 (2.6) 所示：

$$v = \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma\mu_0 t}} \quad (2.6)$$

从“烟圈效应”的观点看，早期瞬变电磁场是由近地表的感应电流产生的，反映浅部电性分布；根据晚期瞬变电磁场随时间的变化规律，可以探测大地电性的垂向变化。

由于工程隧道瞬变电磁法勘探环境的限制，测量线圈大小有限，其勘探深度不如地面深，一般深度在 100 m 左右。地面瞬变电磁法为半空间瞬变响应，这种瞬变响应来自地表以下半空间地层；而工程隧道瞬变电磁法为全空间瞬变响应，这种瞬变响应来自回线平面上下或两侧的地层，给确定异常体的位置带来了困难。总结起来，工程隧道瞬变电磁法与地面瞬变电

磁法相比具有以下几个方面的特点:

(1) 由于隧道测量环境不同于地表, 不可能采用地表测量时边长大于 50 m 的大线圈装置, 只能采用边长小于 3 m 的多匝小线框, 因此与地面瞬变电磁法相比具有数据采集工作量小、测量设备轻便、工作效率高、成本低等优点。

(2) 由于采用小线圈测量, 点距更密 (一般为 2~10 m), 降低了体积效应的影响, 提高了勘探分辨率, 特别是横向分辨率。

(3) 工程隧道测量装置距离异常体更近, 大大提高了测量信号的信噪比。实际测量结果说明, 工程隧道测量信号的强度比地面同样有效面积的同装置测量的信号强 10~100 倍。工程隧道的干扰信号相对有用信号近似等于零 (大于 30 ms 时间段), 而地面测量信号在衰减到一定时间段后 (一般小于 15 ms) 就被干扰信号覆盖, 无法识别有用异常信号。

(4) 地面瞬变电磁法勘探一般只能将线圈平置于地面测量, 而工程隧道瞬变电磁法可以将线圈置于掌子面下部, 探测下部一定深度内含水异常体垂向和横向发育规律, 也可以将线圈直立于巷道内, 当线圈面平行置于掌子面掘进前方时, 可进行超前探测。

(5) 由于瞬变电磁法关断时间的影响, 与其他物探方法相比, 无法探测到更浅部的异常体 (距探测线圈所处工作面 15 m 以内)。关于探测线圈所处工作面 15 m 以内的工作条件, 可采用测量装置小、轻便的工程隧道瞬变电磁法探测。

(6) 工程隧道瞬变电磁法勘探从数据采集、资料处理到成图和定量解释工作均可在计算机上实现, 无须手工作业。因此, 工程隧道瞬变电磁法勘探是一种高自动化程度的勘探系统^[5]。

2. 测点布置及施工方法

由图 2.13 中的瞬变电磁“双烟圈效应”理论可知，其电磁场等效电流环即“烟圈”将沿 47° 倾斜锥面向线圈平面上下扩散，因此，一次电磁场向远处传播范围为一个锥体，如图 2.15 所示，其中箭头所指方向为探测方向。在巷道内布置探测方向倾角主要是依据探测距离和煤层倾角来确定线框的布置，同时根据仪器的探测深度范围来确定测点相隔距离，在保证勘探精度的同时尽量减少工作量。图 2.15 为探测锥体切面示意图，箭头所指方向为探测方向，虚线部分为探测范围，其有效探测范围边界与探测方向为 47° 夹角。

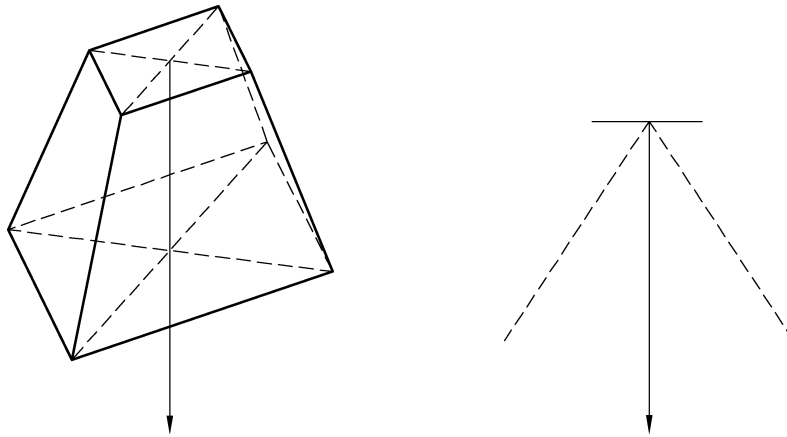


图 2.15 探测锥体

超前探测主要是在掘进掌子面利用直接或间接的方法向掌子面掘进方向进行探测，探测前方是否存在地质构造或富水体及导水通道，为安全掘进提供详细的地质资料^[6]。目前用于工程隧道超前探测的直接方法为钻探方法，钻探结果比较可靠，但施工周期较长，费用较高，对隧道的正常掘进生产影响较大。超前探测的间接方法即物探方法，其中常用的方法包括工程隧道瞬变电磁法。

由于受掌子面空间的限制，工程隧道瞬变电磁法的发射和接收线圈的几何尺寸，只能采用多匝小回线的发射和接收装置形式，即边长为 $2 \sim 3$ m。测点布置在巷道外侧，在实际工作

过程中对于每个发射点，也可调整发射和接收线圈的法线与掌子面上下部的夹角大小，以掌子面上部、前方的围岩变化情况，在多个角度采集数据，从而获得尽可能完整的前方空间信息。其探测方向如图 2.16 所示。

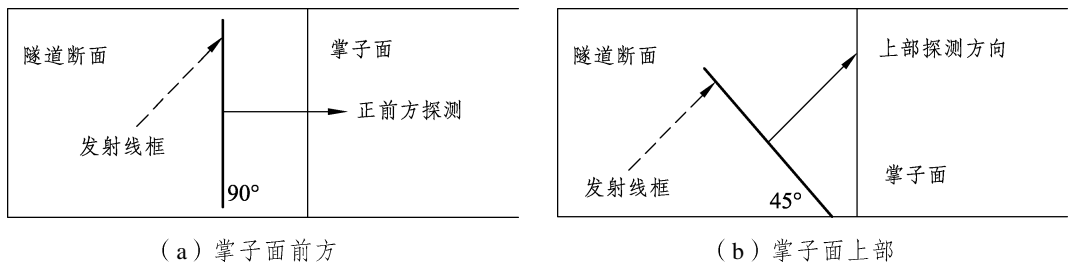


图 2.16 探测方向

探测测线布置在掌子面及两侧帮，共布置测点 15 个，每个点测 2 个方向，共 $2 \times 15 = 30$ 个数据，如图 2.17 所示。设计探测方向分别是与掌子面前方所在岩层呈 45° 左右夹角向上探测、向掌子面正前方探测。为了探测到掌子面斜向上部、前方岩层内赋水性，采用多匝线圈、小回线测量，并尽量让发射和接收线圈靠近掌子面。

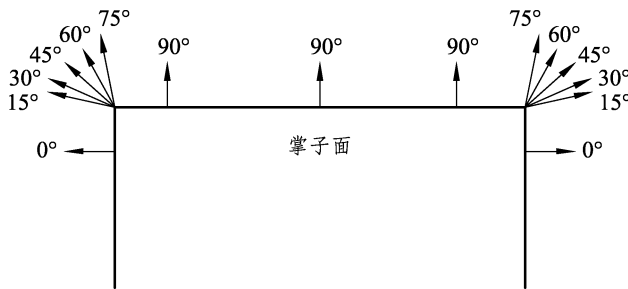


图 2.17 掌子面瞬变电磁探测方向布置

3. 隧道工程地质分析

当前掌子面采用台阶法开挖，出露围岩以灰白色强~中风化变粒岩夹杂粉质黏体、泥屑充填物为主。掌子面整体完整性差，节理裂隙发育，呈裂隙块状结构或镶嵌碎裂状结构，裂隙间充填物被裂隙水冲刷，掌子面中部滑塌形成空洞，围岩强度较高，锤击声较清脆，较难

击碎，浸水后有轻微吸水反应，判定为较坚硬岩。岩体基岩裂隙水发育，掌子面整体呈股状水出水，左侧出水量一般，中部及右侧出水量较大，掌子面前方有积水；总体上掌子面围岩完整性及自稳能力差。现场工作情况如图 2.18 所示。



图 2.18 现场工作照片

4. 瞬变电磁法资料解释

隧道瞬变电磁探查 (TEM) 视电阻率拟断面图及扇形图如图 2.19 所示，横坐标代表左右侧帮方向，纵坐标为沿探查方向探查距离；根据 TEM 视电阻率拟断面图及扇形图，综合地质和水文地质资料，可确定横向、水平深度和垂向深度电性变化情况。

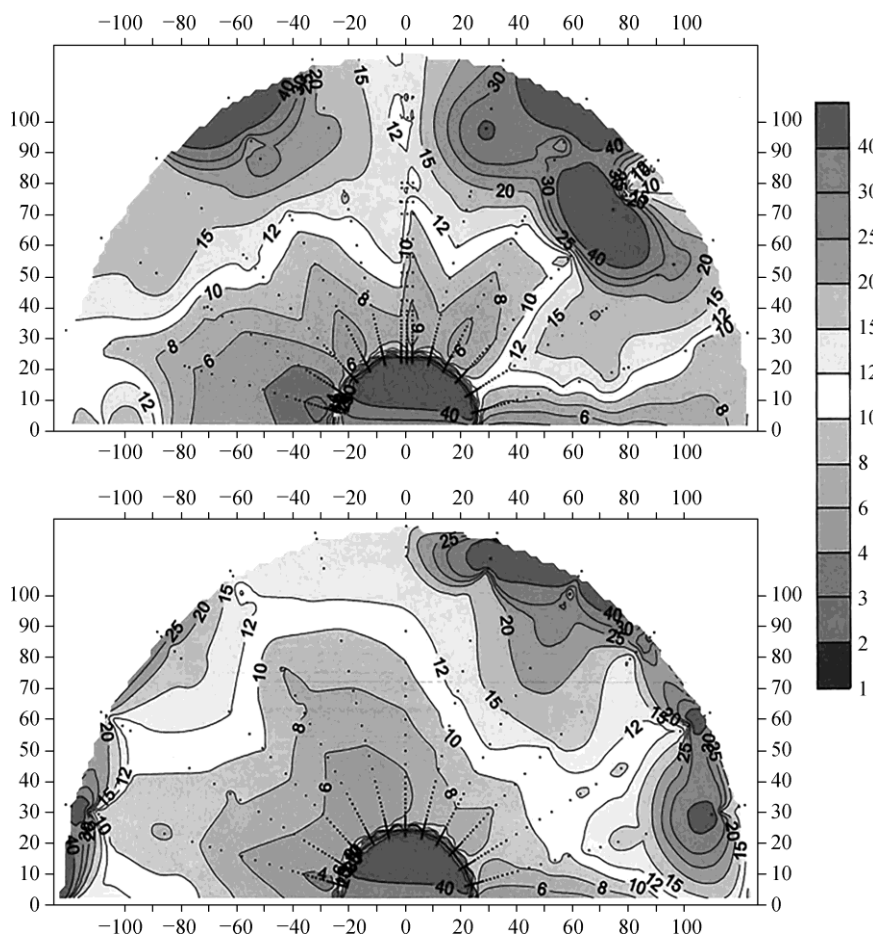


图 2.19 视电阻率等值线

工程隧道瞬变电磁法数据处理与解释系统（以下简称系统）是处理工程隧道瞬变电磁法勘探测量数据的操作平台，集文件管理、数据处理、资料解释、图形绘制功能于一体，具有简单、直观的特点，为用户提供了方便、快捷的矿井瞬变电磁数据处理解释工具。

文件管理：读取 YCS400 矿用本安型瞬变电磁仪格式数据并进行视电阻率计算；对测线文件进行合并，形成三维观测数据体。

数字滤波：根据井下噪声环境复杂的特点，对数据中强干扰点进行剔除、圆滑等处理；提供常用的数字滤波技术，消除瞬变电磁数据中的常见噪声，提高数据质量。

后沿改正：工程隧道采集的瞬变电磁数据，由于关断时间较大，造成了很大的探测盲区，该模块通过多种方法的相互配合，缩短了关断时间，缩小了探测盲区。

处理：该软件的核心模块，能形成断面数据文件和深度反演，并根据工程隧道瞬变电磁法的原理，对反演的深度进行校正；为方便对井下瞬变电磁超前探测数据进行处理，本模块特增加了超前探测坐标转换功能；同窗口数据提取功能则可任意提取数据点进行分析。

人文噪声校正：结合全空间模拟试验和工程隧道试验的结论，对工程隧道常见的金属人文设施产生的干扰进行校正，提高数据处理的质量。

图件绘制：该模块的功能主要是直观地显示各处理阶段的成果和最终成果图件。

除以上功能外，为提高操作软件的便捷性，系统增加了一些辅助项，如图件缩放、图件保存、系统帮助、视图分割窗口等。上述部分介绍了系统的功能特点，并简要说明了系统的组成部分。图 2.20 为系统操作流程图。本系统是基于 Windows 的单文档 (SDI) 应用程序，具有 Windows 程序的标准组件，如菜单、工具栏、窗口等。为了操作方便，系统界面窗口被分割成两个部分，主窗口进行图形和操作等步骤的显示，分割部分则添加常用的功能按键。

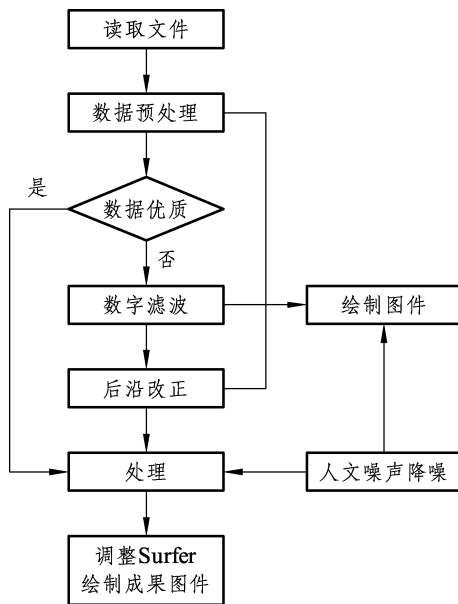


图 2.20 数据处理与解释系统流程

5. 探测成果

图 2.19 为五老山隧道进口右幅 YK261+810 里程工程隧道瞬变电磁法超前探测视电阻率等值线拟扇形图，上图为掌子面上部 45° 方向探测结果，下图为掌子面正前方向探测结果。图中横坐标 0 点对应掌子面正前中心位置，纵坐标为掘进方向探测距离，x 坐标轴负坐标方向对应掌子面位置左侧帮，正坐标方向代表掌子面位置右侧帮。向上部探测时，设计探测方向与岩层呈 45° 坐标夹角向上探测。图中不同颜色线区域分界线上的数值代表地下岩层导电性强弱：数值愈大，导电性愈弱；数值愈小，导电性愈强，对应岩层富水性愈强。

分析图 2.18 掌子面正前上部探测结果视电阻率等值线变化特征，可以看出，掌子面左前方 0~30°，沿探测方向距离 30~50 m 范围内，等值线数值小于 42 Ω·m，为相对低阻反映，说明掌子面上部对应位置裂隙水发育，富水性较强。掌子面右前方 0~10°，沿探测方向距离 30~90 m 范围内，等值线数值小于 8 Ω·m，为相对低阻反映，说明掌子面上部对应位置裂隙

水发育，富水性稍强。其他探测范围较此处相比视电阻率较低，说明富水性一般。

2.2 隧道岩石耐崩解性试验

2.2.1 研究对象

根据地质调查、钻孔测井成果及高密度电法成果综合分析后，将本隧道区围岩分级按里程分段划分为Ⅲ~Ⅳ级。其中：右幅 K262+500~K262+700 段围岩分级划分为Ⅳ级，围岩以混合花岗岩为主，多呈中风化，岩体较破碎，呈碎石状碎裂结构；物探显示为相对高阻区；岩体富水性较强，开挖时可能存在一定量的滴水、渗水等现象。

在右幅 K261+560 处附近取 5 种岩样进行耐崩解性试验，以此研究此处围岩的耐崩解特性，即岩样在承受干燥和湿润两个标准循环后抵抗崩解作用及软化的能力。岩石的破坏崩解是因为干燥的岩石在吸附水溶液后，其表面裂隙的吸附效应产生了对裂隙的楔裂压力。5 种岩样原始状态如图 2.21，取样相对位置图如图 2.22 所示。



1—中风化混合花岗岩；2—中风化黑云变粒岩；3—中风化花岗片麻岩；
4—中风化花岗片麻岩；5—强风化糜棱岩。

图 2.21 岩样天然状态

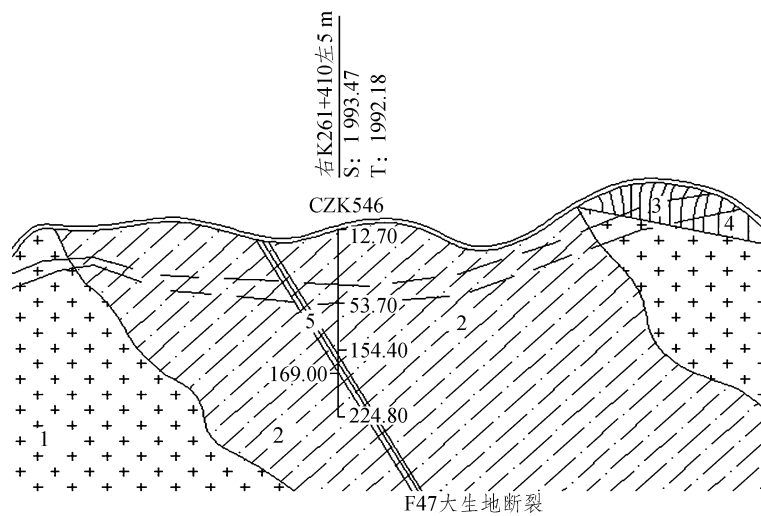


图 2.22 岩石取样相对位置

2.2.2 试验方法与试样

1. 耐崩解性试验仪

(1) 传动装置：由蜗轮、轴承、涡轮、大轴、电机组成，该装置应能使圆筒以 20 r/min 的转速旋转，10 min 内转速不变。

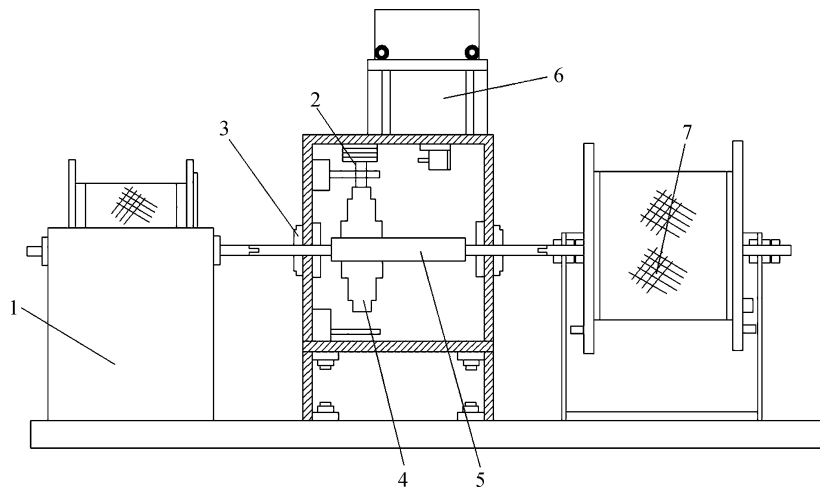
(2) 圆柱形筛筒：直径为 140 mm，长 100 mm，筛孔直径为 2 mm。

(3) 水槽：尺寸为 150 mm×150 mm×120 mm，内装有水平轴，支撑能自由转动的筛筒。

实物图及示意图分别如图 2.23 及图 2.24。



图 2.23 耐崩解性试验仪实物图



1—水槽；2—蜗轮；3—轴承；4—涡轮；5—大轴；6—电机；7—筛筒。

图 2.24 耐崩解性试验仪示意图

2. 试样要求

- (1) 在现场采取保持天然含水量的试样并密封。
- (2) 将试样制成单块质量为 40 ~ 60 g 的浑圆状岩块。
- (3) 每组试验试样总质量控制在 450 ~ 550 g，且试样的数量不少于 10 块。
- (4) 试样中的颗粒最大尺寸应小于 3 mm。

3. 试验方法

根据《公路工程岩石试验规程》(JTG E41—2005)，试验步骤如下：

- (1) 将 5 种岩样按照规范要求制成单块质量为 40 ~ 60 g 的浑圆状岩块试样，将制好的试样放入清洁的圆柱形筛筒内，并一起置入 105 ~ 110 °C 温度下的干燥箱中烘干至恒重，在干燥器内冷却至室温称重。
- (2) 将装有试样的圆柱形筛筒放在水槽内，并连接转动装置，向水槽内注入纯水，使水位在转动轴下约 20 mm。使筛筒以 20 r/min 的转速转动 10 min。
- (3) 将圆柱形筛筒从水槽中取出，置入 105 ~ 110 °C 温度下的干燥箱中烘干至恒重，在干

燥器内冷却至室温，称量圆柱形筛筒加残留试样的质量。

(4) 重复步骤 (2) 和 (3)，测定第二次循环后圆柱形筛筒加残留试样的质量，计算岩样的耐崩解性指数。

(5) 在试验过程中，水温应保持在 (20 ± 2) °C 范围内。

(6) 称量精确至 0.1 g。

试验步骤简图如图 2.25 所示。

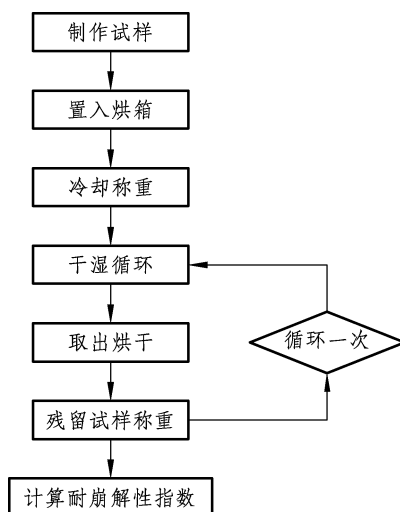


图 2.25 耐崩解性试验流程

各组岩样的质量变化如表 2.1、图 2.26 所示。

表 2.1 混合花岗岩损失情况

岩石类别	循环前岩样质量/g	第一次循环后质量/g	第二次循环后质量/g	第一次损失量/g	第二次损失量/g	第一次损失率/%	第二次损失率/%
混合花岗岩	122.71	122.58	122.21	0.13	0.37	0.11	0.30
黑云变粒岩	87.42	87.36	87.24	0.06	0.12	0.07	0.14
花岗片麻岩	117.88	117.64	117.38	0.24	0.26	0.20	0.22
花岗片麻岩	114.98	114.95	114.88	0.03	0.07	0.03	0.06
糜棱岩	186.80	12.47	11.93	174.33	0.54	93.32	4.33

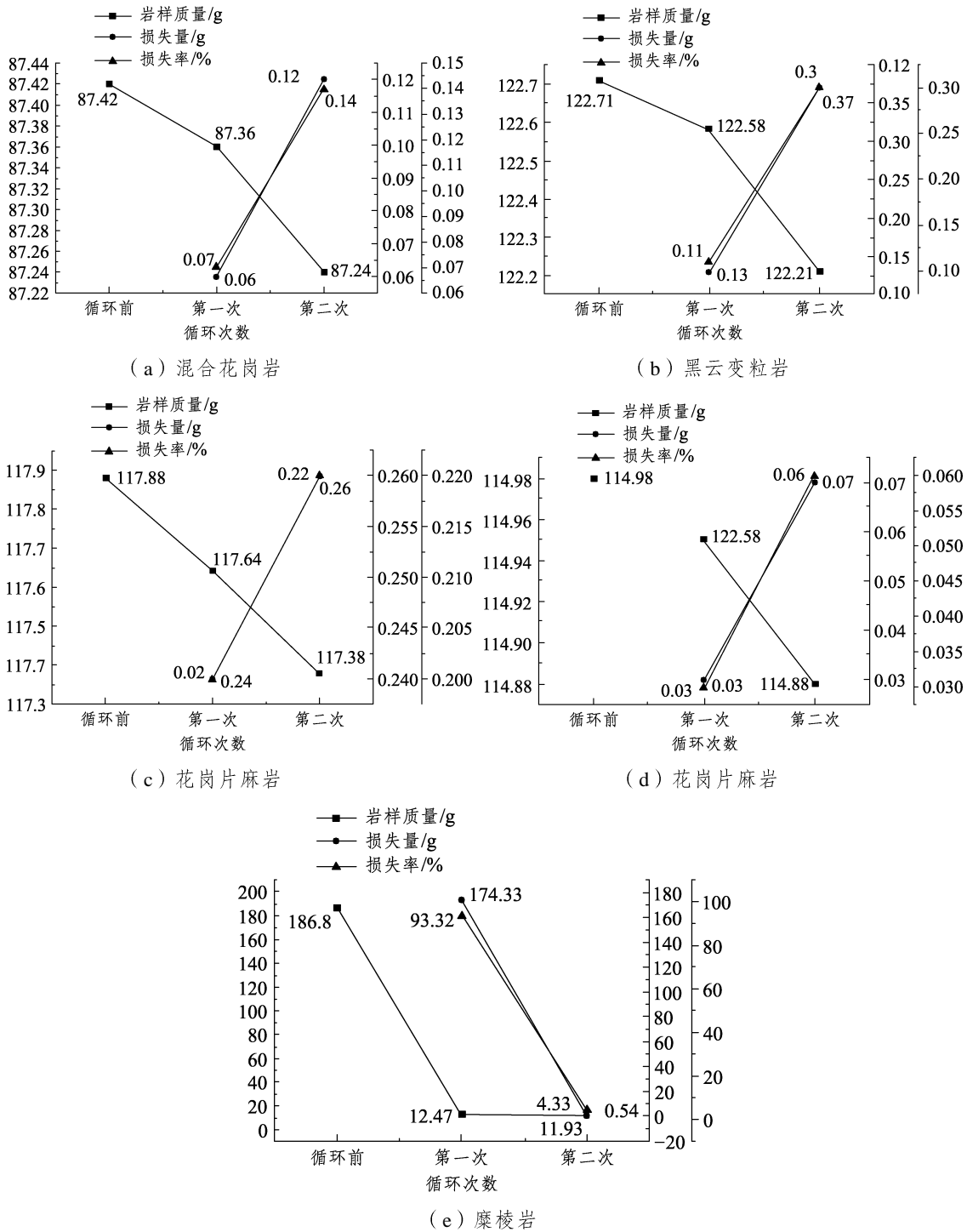


图 2.26 岩样质量变化折线

岩石试样经过干燥和湿润两个标准循环之后，残留的质量与原质量之比为耐崩解性指数，以百分数表示。计算公式如式 (2.7) 和式 (2.8)。

$$I_{d1} = \frac{m_{r1}}{m_d} \times 100\% \tag{2.7}$$

$$I_{d2} = \frac{m_{r2}}{m_d} \times 100\% \tag{2.8}$$

式中： I_{d1} ——岩石一次循环耐崩解性指数 (%)；

I_{d2} ——岩石二次循环耐崩解性指数 (%)；

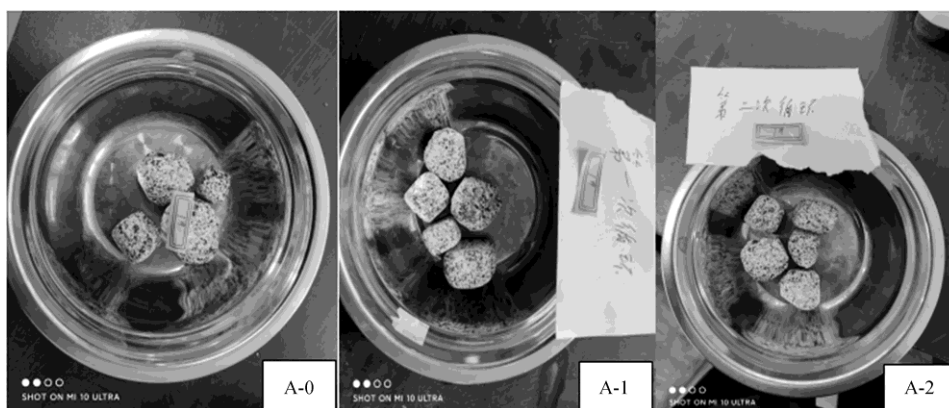
m_{r1} ——岩石一次循环后残留试样烘干质量 (g)；

m_{r2} ——岩石二次循环后残留试样烘干质量 (g)；

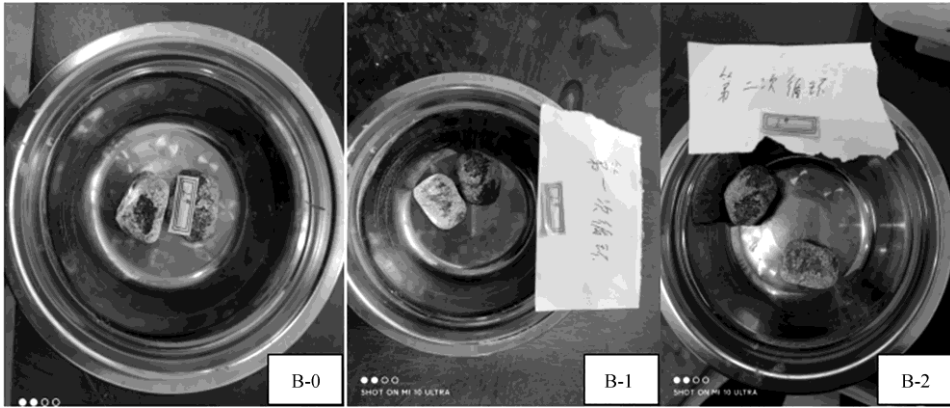
m_d ——原试样烘干质量 (g)。

2.2.3 岩样形态变化与结果分析

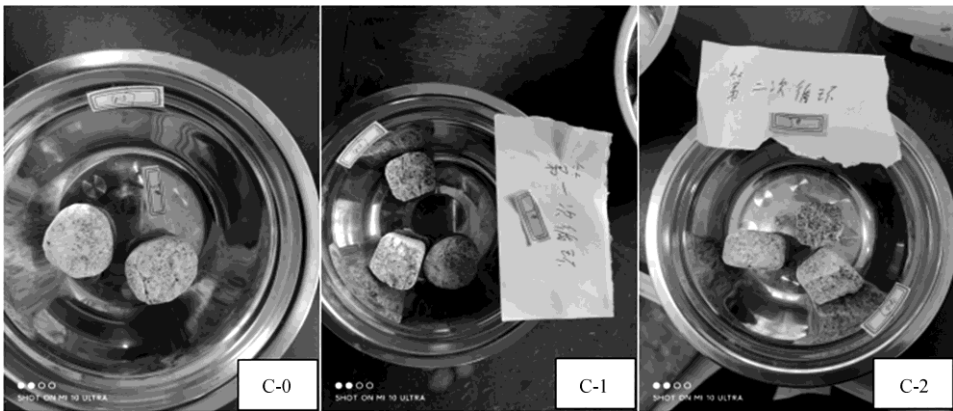
5 组岩样经过 2 个标准干湿循环后，其岩样形态变化如图 2.27 所示。图中字母分别依次对应 1~5 号岩样，数字代表干湿循环次数，下同。岩样质量、质量损失量、质量损失率变化趋势分别如图 2.28~图 2.30 所示。



(a) 中风化混合花岗岩



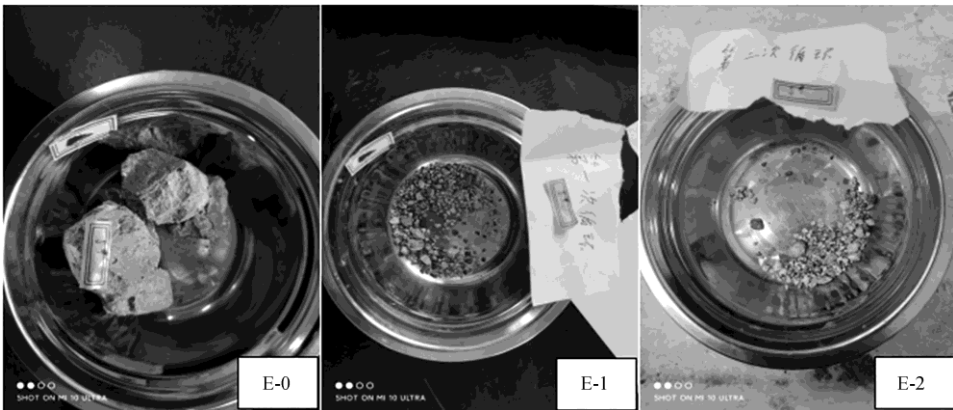
(b) 中风化黑云变粒岩



(c) 中风化花岗片麻岩



(d) 中风化花岗片麻岩



(e) 强风化糜棱岩

图 2.27 不同循环次数下岩样形态演变

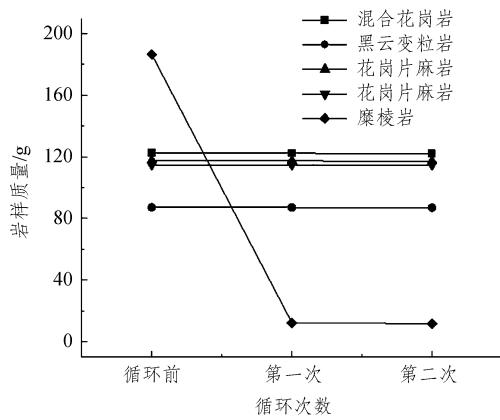


图 2.28 岩样质量变化趋势分析

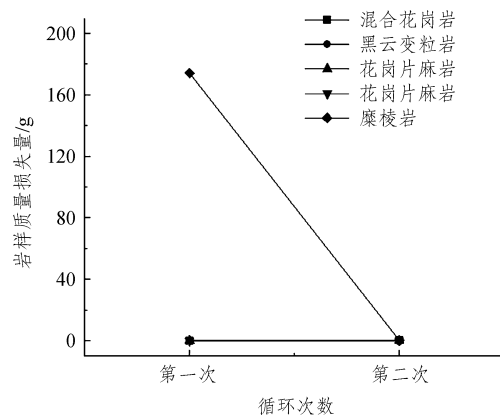


图 2.29 岩样质量损失量变化趋势分析

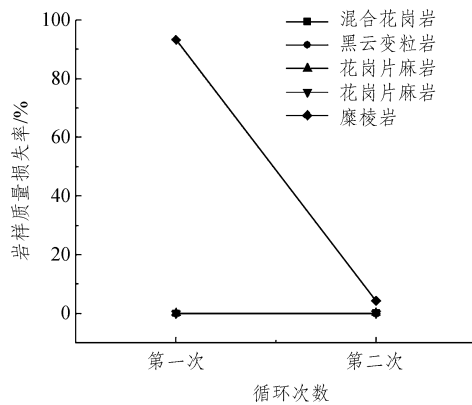


图 2.30 岩样质量损失率变化趋势分析

根据试验过程记录数据,可以得到表 2.2 所示试验过程中各组岩样质量在两次干湿循环后减少的质量。

表 2.2 试验过程岩样质量减少量

岩样种类	干湿循环 I	干湿循环 II
混合花岗岩	0.13	1.36
黑云变粒岩	0.06	0.12
花岗片麻岩	0.24	0.26
花岗片麻岩	0.03	0.07
糜棱岩	174.33	0.54

注: ① I、II 分别表示第一次干湿循环后和第二次干湿循环后。

② 表中数据单位为克 (g)。

对比图 2.27 各组图片, 根据折线图 2.28 ~ 图 2.30 以及表 2.2 可以得出以下结论:

(1) 5 组岩石试样随着干湿循环次数的增多, 其粒径均有所减小, 岩样棱角出现钝化效果, 伴随有磨圆现象, 前 4 组变化较不明显, 第 5 组变化明显。

(2) 第 5 组岩样经过 1 次循环后, 整块岩样基本上完全破碎崩解, 表现出极低的耐崩解性, 第 2 次循环后只使得崩解颗粒粒径略有减小, 且变化较不明显, 减小速度趋于均匀, 粒径集中在 2 ~ 10 mm。

(3) 第 3 组岩样在经过 1 次循环后, 其中一块岩样解体为 2 块, 经过 2 次循环后无明显变化, 不易崩解部分出现磨圆和粒径减小现象, 但并未解体, 表现出较强的耐崩解性。

(4) 第 1、2、4 组岩样在经过 2 次循环后均仅出现磨圆现象, 耐崩解性能较强。

(5) 各组岩样在经过两次干湿循环后质量均成减少趋势, 前 4 组趋势不明显, 最后一组在第一次干湿循环后质量骤减, 呈现出与前 4 组截然不同的性质。

综上, 经过室内试验测定, 5 组岩样的耐崩解指数依次为 98.8%、99.8%、99.6%、99.9% 以及 6.39%, 说明前 4 组岩样耐崩解性极强, 而最后一组岩样耐崩解性最差, 这与各岩样矿物组成有一定相关性, 同时也与图片所呈现内容在定性分析上相符。

2.3 隧道岩石电镜扫描试验

2.3.1 电镜扫描试验仪器与原理

扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 是一种用于高分辨率微区形貌分析的大型精密仪器, 是一种介于透射电子显微镜和光学显微镜之间的一种观察手段, 具有景深大、分辨率高、成像直观、立体感强、放大倍数范围宽以及待测样品可在三维空间内进行

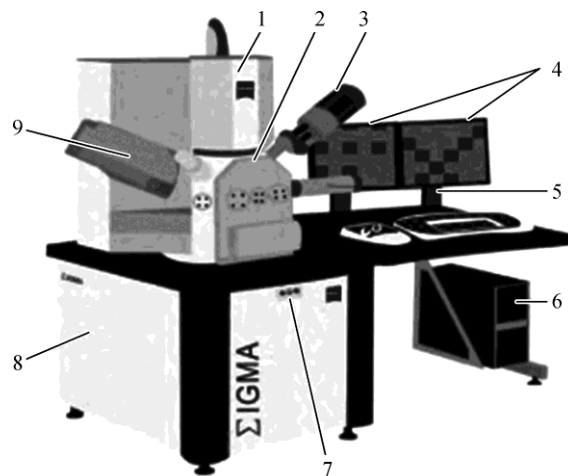
旋转和倾斜等特点^[7]。

扫描电镜实物图及其基本结构分别如图 2.31 及图 2.32 所示。

扫描电子显微镜电子枪发射出的电子束经过聚焦后汇聚成点光源，点光源在加速电压下形成高能电子束，高能电子束经由两个电磁透镜被聚焦成直径微小的光点，在透过最后一组带有扫描线圈的电磁透镜后，电子束以光栅状扫描的方式逐点轰击到样品表面，同时激发出不同深度的电子信号。此时，电子信号会被样品上方不同信号接收器的探头接收，通过放大器同步传送到电脑显示屏，形成实时成像记录，如图 2.33 所示为扫描电镜原理图。



图 2.31 扫描电镜实物图



1—镜筒；2—样品室；3—EDS 探测器；4—监控器；5—EBSD 探测器；6—计算机主机；
7—开机/待机/关机按钮；8—底座；9—WDS 探测器。

图 2.32 扫描电镜基本结构

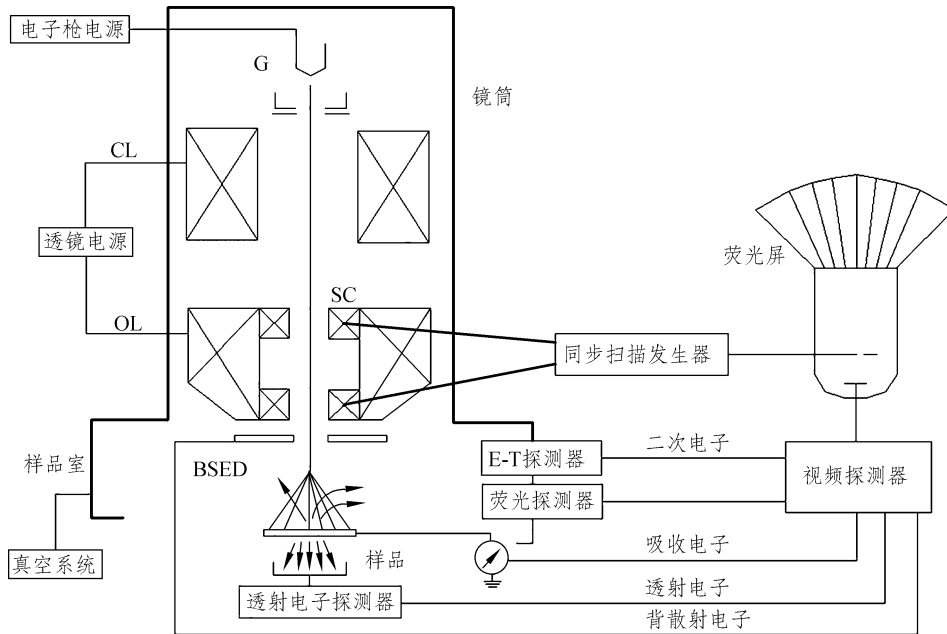


图 2.33 扫描电镜原理图

2.3.2 试验要求与步骤

根据试验要求，开展电镜扫描试验的步骤与注意事项如下：

1. 安装样品

打磨岩样至约小拇指甲盖大小且厚 1 mm，一面切平，吹净粉尘后贴上导电胶，将样品置于载物台上紧，按“Vent”直至灯闪，对样品交换室放氮气，直至灯亮。

松开样品交换室锁扣，打开样品交换室，取下原有的样品台，将已固定好样品的样品台放到送样杆末端的卡爪内，此时注意样品高度不能超过样品台高度，并且样品台下面的螺丝不能超过样品台下部凹槽的平面。

关闭样品交换室门，扣好锁扣。

按“EVAC”按钮，开始抽真空，“EVAC”闪烁，待真空达到一定程度，“EVAC”点亮。

将送样杆放下至水平，向前轻推至送样杆完全进入样品室，无法再推动为止，确认“Hold”灯点亮，将送样杆向后轻轻拉回直至末端台阶露出导板外将送样杆竖起卡好，此时注意推拉送样杆时用力必须沿送样杆轴线方向，以防损坏送样杆。

2. 试样的观察

(1) 观察样品室的真空“PVG”值，当真空达到 9.0×10^{-5} Pa 时，打开“Maintenance”，加高压 5 kV，软件上扫描的发射电流为 10 μ A，工作距离“WD”为 8 mm，扫描模式为“Lei”。此时注意，为减少干扰，有磁性样品时，工作距离一般为 15 mm 左右。

(2) 在操作键盘上按“Quick View”，将放大倍率调至最低，点击“Stage Map”，对样品进行标记，按顺序对样品进行观察。

(3) 取消“Low Mag”，先看图像是否清楚，不清楚则调节聚焦旋钮，直至图像清楚；再旋转放大倍率旋钮，聚焦图像，直至图像清楚，再放大直到放大到所需要的图。

(4) 聚焦到图像的边界一致，如果边界清晰，说明图像已选好；如果边界模糊，则调节操作键盘上的“X、Y”两个消像散旋钮，直至图像边界清晰。如果图像太亮或太暗，可以调节对比度和亮度，旋钮分别为“Contrast”和“Brightness”；也可以按“ACB”按钮，自动调整图像的亮度和对比度。

(5) 按“Fine View”键，进行慢扫描，同时按“Freeze”键，锁定扫描图像。

(6) 扫描完图像后，打开软件上的“Save”窗口，按“Save”键，填好图像名称，选择图像保存格式，然后确定，保存图像。

(7) 按“Freeze”解除锁定后，继续进行样品下一个部位或者下一个样品的观察。

3. 取出样品

(1) 检查高压是否处于关闭状态，如“HT”键为绿色，点击“HT”键，关闭高压，“HT”键为蓝色或灰色后即关闭高压。

(2) 检查样品台是否归位，工作距离为 8 mm，点击样品台按钮，按“Exchange”键，“Exchange”灯亮。

(3) 将送样杆放至水平，轻推送样杆到样品室，停顿 1 s 后，抽出送样杆并将送样杆竖起卡好，注意观察“Hold”，“Hold”状态显示为关闭表示样品台离开样品室。电镜扫描试验步骤如图 2.34 所示。

2.3.3 岩样微观结构分析

1. 光学显微镜成像

为对岩样的微观结构进行分析，首先对 5 种岩样进行光学照片的拍摄，所得部分照片如图 2.35 所示。

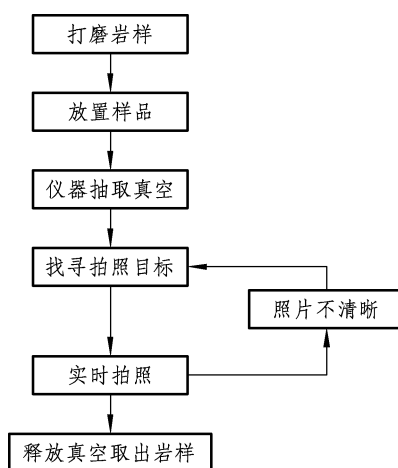
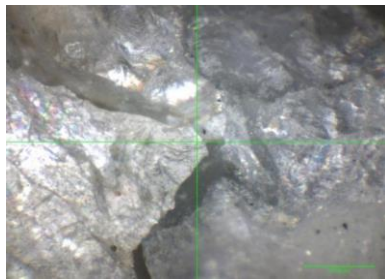
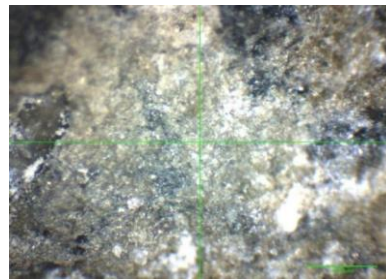


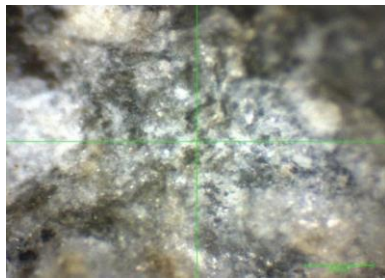
图 2.34 电镜扫描试验步骤



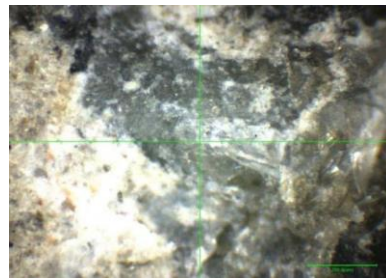
(a) 混合花岗岩



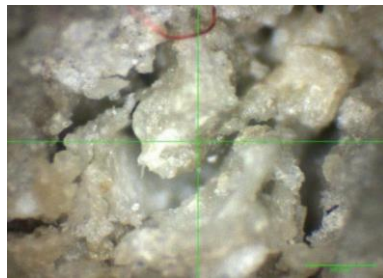
(b) 黑云变粒岩



(c) 花岗片麻岩



(d) 花岗片麻岩



(e) 糜棱岩

图 2.35 岩样光学显微镜成像

由光学照片可以看出表 2.3 所示内容：

表 2.3 岩样颜色及矿物组成

岩样种类	颜色	矿物组成
混合花岗岩	灰色、灰白色	黑云母、石英、斜长石、钾长石及部分副矿物等
黑云变粒岩	灰白色、灰褐色及杂色	黑云母、白云母、石英、斜长石、钾长石等
花岗片麻岩	灰褐色、杂色	黑云母、斜长石、石英及少量钾长石等
花岗片麻岩	灰褐色、杂色	黑云母、斜长石、石英及少量钾长石等
糜棱岩	杂色	长英质碎斑及基质

从表 2.3 可以看出，混合花岗岩、黑云变粒岩以及花岗片麻岩在矿物组成上大致相同，均主要含有黑云母、石英、斜长石和钾长石，糜棱岩所含长英质碎斑主要成分为斜长石和石英，

与其他岩样有所不同。

2. 电镜扫描成像

对隧道区不同位置采集到的 5 种岩样进行电镜扫描试验，部分岩样微观结构如图 2.36 所

示。由电镜成像分析岩样结构构造及破碎程度如表 2.4 所示。

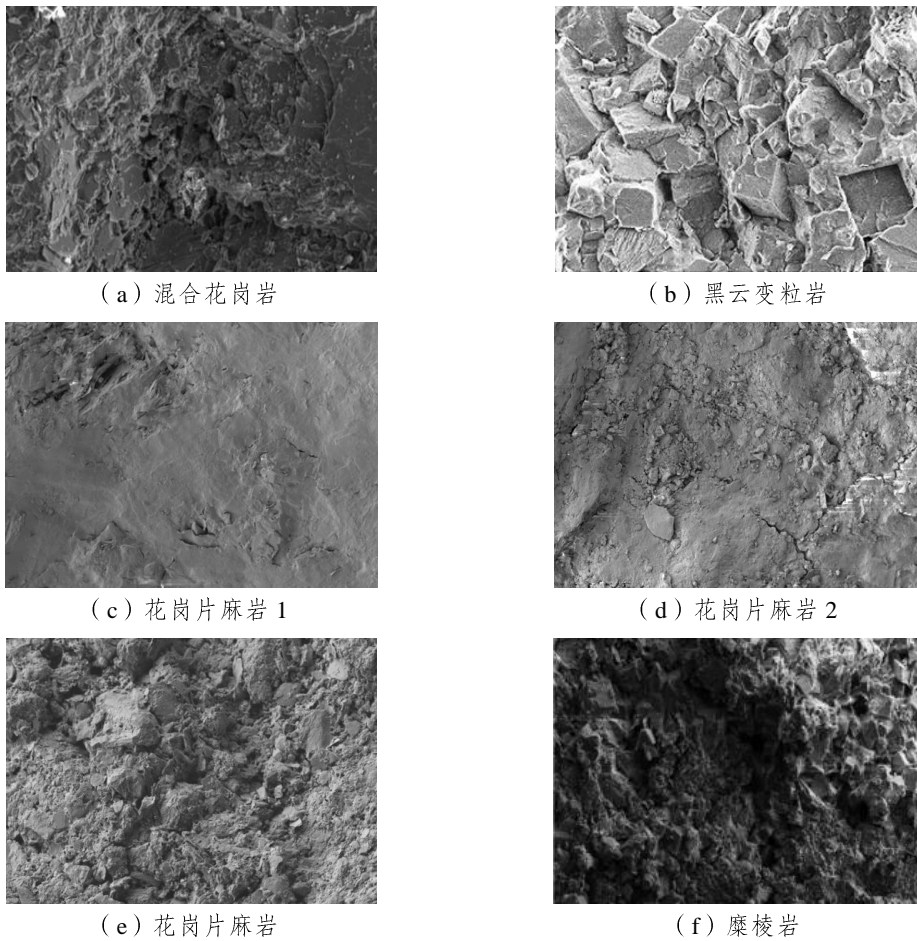


图 2.36 岩样电镜扫描成像

表 2.4 岩样结构构造及破碎程度

岩样种类	结构构造	破碎程度
花岗片麻岩	粒状变晶结构以及片麻状构造	部分结构面平整，部分伴有裂隙
混合花岗岩	中~细粒结构、斑状结构以及块状构造	孔隙类型复杂、形态多样、连通性较差
黑云变粒岩	粒状变晶结构和块状构造	结构面较为平滑完整，颗粒间黏结紧密

花岗片麻岩	粒状变晶结构以及片麻状构造	部分微观颗粒排列有序，部分结构面不平整
糜棱岩	糜棱结构	较破碎，局部结构较致密，微裂隙较发育

3. 成像结果分析

对岩样天然状态下的肉眼观察及对岩样开展的光学显微镜成像以及扫描电镜成像所得照片进行分析，可以比较出 5 种岩样在颜色、结构构造、矿物组成、破碎程度、裂隙发展趋势等方面的异同。具体分析结果如下：

(1) ① 混合花岗岩颜色呈灰色、灰白色，具中~细粒结构、斑状结构以及块状构造，组成矿物主要有黑云母、石英、斜长石、钾长石及部分副矿物等。② 黑云变粒岩颜色呈灰白色、灰褐色以及杂色，具粒状变晶结构和块状构造，主要由黑云母、白云母、石英、斜长石、钾长石等矿物组成。③、④ 花岗片麻岩颜色呈灰褐色、杂色，具粒状变晶结构以及片麻状构造，主要由黑云母、斜长石、石英及少量钾长石等矿物组成。⑤ 糜棱岩颜色呈杂色，主要由长英质碎斑及基质组成，具糜棱结构，岩体较破碎，局部结构较致密，定向构造。

(2) ① 混合花岗岩质地致密，颗粒分布均匀，内部含有墨水瓶状孔、平行板状孔等多种孔隙，孔隙以微孔、过渡孔、中孔为主，孔隙类型复杂，孔隙形态多样，且孔隙之间的连通性较差。② 黑云变粒岩结构较紧密，矿物具有一定方向性，不同深度岩样风化程度不同，微观结构排列有序，形状大多呈规则多面体，整体结构面较为平滑完整，颗粒间黏结紧密。③、④ 花岗片麻岩部分微观颗粒排列有序、紧密，结构面比较平滑、完整，无孔洞和微裂隙，部分结构面不平整，颗粒间由一些晶体连接为一个整体且相对紧密，但结构面也伴有裂隙和孔洞的出现。⑤ 糜棱岩微观颗粒的大小及形状均不规则，颗粒排列呈现出明显的定向分布，整体结构面较粗糙且不成整体，微裂隙较为发育，颗粒间结构松散甚至有孔洞。

2.4 结论

以云南省玉临高速五老山隧道为对象，首先对工程所在地开展地球物理勘探，得出隧道区地层岩性构成和岩体完整性，再对工程某处所取变质岩岩样进行耐崩解性试验，对岩样的耐崩解性做出定性和定量的分析并比较异同，同时对岩样展开电镜扫描试验，着重研究其微观结构。所得结论主要如下：

(1) 隧道区范围内主要地层为第四系坡残积 (Q^{dl+el}) 层、第四系坡洪积 (Q^{dl+pl}) 层、元古宇 (PR) 岩层、印支期 (γ_{m5}^I) 岩层，主要岩体为黑云变粒岩、花岗质混合片麻岩、均质混合岩夹片麻岩、糜棱岩、少量斜长角闪岩、透辉变粒岩以及云母片岩等。接近地表岩体完整程度较差，岩体较为破碎，平均 50 m 以下岩体完整程度均较好。隧道进口可分为低阻区、高阻区和相对低阻区，低阻区电阻率值一般小于 $200 \Omega \cdot m$ ，高阻区电阻率值一般大于 $500 \Omega \cdot m$ ，相对低阻区电阻率值一般为 $200 \sim 500 \Omega \cdot m$ 。隧道出口可分为低阻区、高阻区和相对低阻区，低阻区电阻率值一般小于 $200 \Omega \cdot m$ ，高阻区电阻率值一般大于 $1000 \Omega \cdot m$ ，相对低阻区电阻率值一般为 $200 \sim 500 \Omega \cdot m$ 。掌子面正前探测左前方 $0 \sim 30^\circ$ 和掌子面右前方 $0 \sim 10^\circ$ 为相对低阻反映，上部对应位置含裂隙水发育，富水性稍强，其他探测范围较此两处相比视电阻率较低，富水性一般。掌子面正前上部探测左前方 $0 \sim 90^\circ$ 和掌子面右前方 $0 \sim 10^\circ$ 为相对低阻反映，上部对应位置含裂隙水发育，富水性稍强，其他探测范围较此两处相比视电阻率较低，富水性一般。

(2) 针对耐崩解性试验可以得出，工程所在地变质岩中，5 组岩样的耐崩解指数依次为 98.8%、99.8%、99.6%、99.9% 以及 6.39%，所取混合花岗岩、黑云变粒岩及花岗片麻岩岩样耐崩解性十分接近，耐崩解性均较好，而糜棱岩岩样耐崩解性最差，呈现出与其他岩样截然不同的耐崩解性。

(3) 从电镜扫描试验可以看出, 隧道区不同位置所取岩样结构构造主要有块状构造、片麻状构造以及糜棱结构。块状结构较紧密, 矿物具有一定方向性, 不同深度岩样风化程度不同, 微观结构排列有序, 伴有一定的裂隙; 片麻状构造部分微观颗粒排列有序、紧密, 结构面比较平滑、完整, 无孔洞和微裂隙, 部分结构面不平整, 颗粒间由一些晶体连接为一个整体且相对紧密, 但结构面也伴有裂隙和孔洞的出现; 糜棱结构微观颗粒呈现出明显的定向分布, 整体结构面较粗糙且不成整体, 微裂隙较为发育, 颗粒间结构松散甚至有孔洞。

综上, 本章通过研究云南省玉临高速五老山隧道变质岩特性这一具体案例, 经过区域地质调查和收集相关研究资料, 进行地球物理勘探、岩石耐崩解性试验以及扫描电镜试验, 得到了针对这一工程实例的相关研究结果。

