

铁路隧道衬砌质量检测与评价

地质雷达技术 实用手册

薄会申 编著



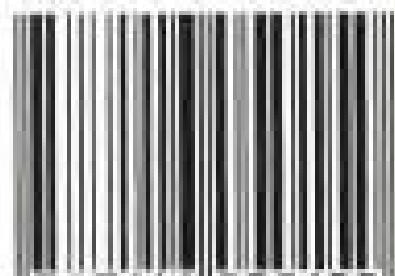
地质出版社

铁路隧道衬砌质量检测与评价

地质雷达技术实用手册

DEZHI LEIDA JISHU SHIYONG SHOUCHE

ISBN 7-116-05015-9



9 787116 050150 >

ISBN 7-116-05015-9

T·147 定价：15.00 元

铁路隧道衬砌质量检测与评价

地质雷达技术实用手册

薄会申 编著

地质出版社

·北京·

内 容 提 要

本书主要介绍地质雷达在铁路隧道衬砌质量检测中的应用,阐述了地质雷达技术理论知识和常用地质雷达仪器;着重介绍了铁路隧道衬砌知识和评价标准,隧道检测工作布置,以及雷达图像分析和质量评价。

本书可供从事地质勘查、工程质量检测的人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

铁路隧道衬砌质量检测与评价地质雷达技术实用手册/薄会申编著. —北京:地质出版社, 2006. 10

ISBN 7-116-05015-9

I. 铁… II. 薄… III. 雷达—应用—铁路隧道—隧道工程—衬砌—质量检验—技术手册 IV. U459.1—62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 118314 号

责任编辑: 祁向宙

责任校对: 李 攻

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324577 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zhs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京地大彩印厂

开 本: 889mm×1194mm^{1/32}

印 张: 4.125

字 数: 100 千字

印 数: 1-1000

版 次: 2006 年 10 月北京第一版·第 一 次印刷

定 价: 15.00 元

ISBN 7-116-05015-9/T·147

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

前 言

在铁路隧道建设中，地质雷达检测技术被大量采用，从运营隧道的病害检测，到新建隧道的施工质量监控，应用领域越来越广泛。实际工作中，由于知识结构和认识上的差异，对雷达图像的判释结果常常出现分歧，甚至造成检测结果脱离实际情况。

作者长期从事隧道检测工作，在学习前人成果的基础上，总结检测工作中积累的经验，编制本书，希望能对初学者有一定的指导作用。

由于作者水平有限，书中难免存在错误，欢迎指正。

薄会申

2006年10月

目 录

第一章 概述	1
第一节 铁路运营隧道现状	1
第二节 隧道衬砌检测和评价的技术依据	6
第三节 地质雷达技术应用前景	7
第二章 地质雷达技术理论知识	9
第一节 麦克斯韦电磁场理论简介	9
第二节 电磁波在介质中的传播规律	14
第三节 地质雷达资料解释	31
第四节 影响雷达测试精度的因素	38
第三章 常用地质雷达仪器介绍	44
第一节 硬件配置指标	44
第二节 雷达数据处理软件配置	47
第三节 其他型号地质雷达简介	49
第四章 隧道衬砌知识和评价标准	51
第一节 隧道衬砌设计知识	51
第二节 掘进方式和衬砌工艺对衬砌质量的影响	62

第三节	隧道常见质量通病和处理措施	65
第四节	铁路运营隧道安全等级评定标准	69
第五章	隧道检测工作布置	84
第一节	检测前的准备工作	84
第二节	选择雷达工作参数	87
第六章	雷达图像分析和衬砌质量评价	91
第一节	质量缺陷成因分析及其雷达图像特征	91
第二节	隧道衬砌质量评价分类	109
第三节	外界因素对雷达图像的影响	109
第七章	隧道衬砌检测的典型图像	113
第八章	“中长期铁路网规划”简介	124

第一章 概 述

第一节 铁路运营隧道现状

一、铁路隧道设备的重要性

铁路被誉为国民经济的先行官、火车头，是我国重要的交通工具，铁路建设长度也是一个国家经济发展的标志之一。近年来，我国铁路建设的增长速度很快。在2000年初，党中央、国务院批准了关于西部大开发战略的初步设想，拉开了西部铁路建设的序幕，洛湛铁路、渝怀铁路、青藏铁路、宜万铁路等相继开始建设。在2004年1月7日，国家《中长期铁路网规划》经国务院审议通过，这是进入新世纪后，我国第一个获准通过的中长期发展规划，标志着我国铁路新一轮大规模建设的展开。

隧道是保障铁路正常运营的重要设备，隧道施工质量直接影响到将来铁路运营是否通畅，隧道病害是困扰铁路快速发展的一个关键，更是影响国民经济发展的一个重要因素。因此，必须通过系统的研究，总结铁路隧道的病害特点，完善隧道病害检测评价手段，制定出符合我国铁路特点的一整套检测方法，形成从日常维护、病害检测、病害整治到质量跟踪的一整套技术体系，以适应信息化目标管理的需要，将运营隧道的日常维护和病害整治提高到一个新的水平。

二、铁路运营隧道存在的问题

我国铁路隧道建设已经有 110 余年的历史。中国第一座铁路隧道修建于 1887~1889 年，是台湾省台北至基隆窄轨铁路上的狮球岭隧道，长 261m。至 2002 年，我国铁路隧道已经达到 6876 座，总长 3670km，为世界第一。据铁道部统计资料显示，部分运营隧道的病害问题相当严重，甚至已危及到行车安全。据资料记载，宝中线、成昆线、贵昆线、襄渝线、宝成线等均发生过隧道衬砌掉块，特别是 2001 年达成铁路某隧道出现的 30m 大范围拱顶衬砌掉块，险些造成严重的行车事故。为此，铁路部门每年都投入大量的人力、物力和资金用于隧道病害的维修和整治，但隧道设备的状况仍然没有根本好转。



图 1.1 运营隧道衬砌开裂渗水病害

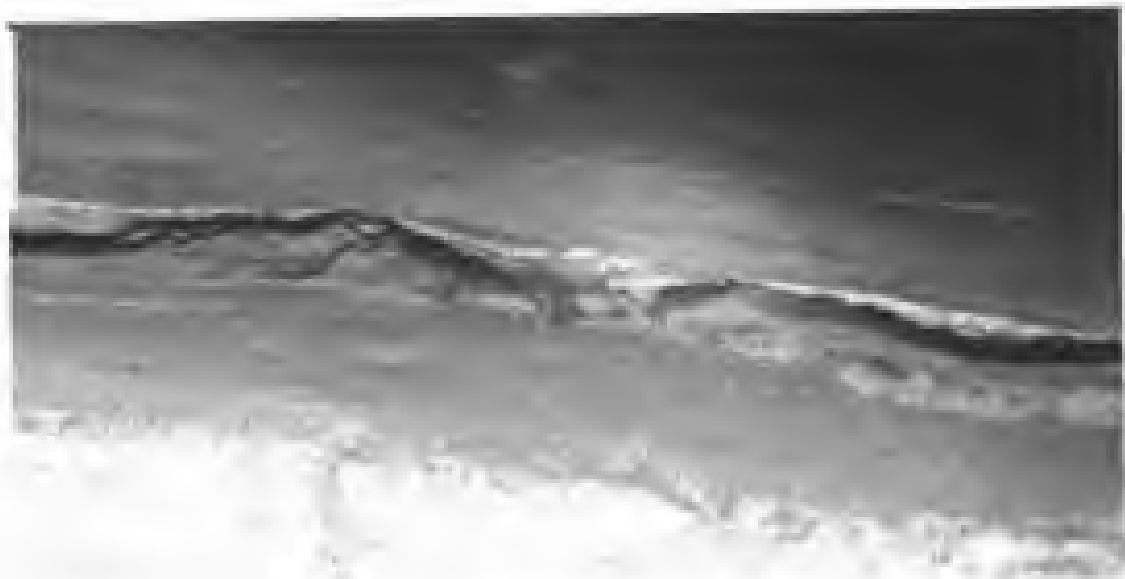


图 1.2 运营隧道衬砌开裂病害

石砭桥隧道（全长 832m，进口里程 K214+465，出口里程 K215+297），K214+580~600 范围内，右侧边墙自起拱线往下，出现大面积鼓包，混凝土开裂达到 5cm，出现“两层皮”现象，有脱落趋势。该图为仰视拍摄。

目前我国铁路运营隧道存在的主要问题是：

- (1)隧道病害数量大而且类型多，整治难度大，所需费用多，周期长，而且修理投资缺口较大；
- (2)由于年代不同，基础资料不完整，管理手段落后；
- (3)隧道病害检查和检测手段落后而且不够规范，早期病害难以发现，使某些可以早期整治的病害得以发展成严重的病害，彻底整治更加困难；
- (4)受施工环境恶劣及材料耐久性差的影响，一些隧道病害的整治效果不明显；

(5)在新建隧道的设计和施工遗留问题较多，某些隧道还相当严重。

由于上述种种原因，致使病害隧道的数量逐年增加，又加之投入不够，造成隧道病害的状况进一步恶化。事实上，隧道病害存在于其使用的全过程，有些隧道在使用之前病害就已经存在。隧道病害形成的原因很复杂，对隧道使用寿命的影响也存在较大差异。因此，对隧道病害及安全性问题的研究工作除了隧道的定期养护和防治以外，应该注重于从隧道检测评价出发，深入了解隧道病害机理，对某一类具体的病害及某一类具体的工程条件，提出的整治措施要具备较强的针对性和可操作性，逐步提高病害整治技术。

三、隧道检测评价的意义

隧道病害的发展具有一个过程，如果能在隧道病害恶化之前发现，并及时采取整治措施，则可大大提高铁路运营隧道的安全性。因此，进行隧道的检测评价是非常必要的。传统的检测评价一般都是依靠经验，采取定性化的方法，在实际的操作过程中很容易受人为因素的影响，不同的工程技术人员可能会根据各自的经验得出差别较大的判别结果；随着技术的进步，仅仅采用定性化指标对隧道病害状况进行描述分析已不能满足目前的使用和养

护要求。因此，采用一些仪器设备对隧道质量进行无损检测，通过科学的检测评价，利用定量化的指标来评价隧道的实际状况是非常必要的。通过无损检测，可以达到下面的目的：

(1)通过对隧道状况进行全面检测，得出隧道状况的检测评价报告，科学地查明隧道的实际状况；

(2)根据检测评价报告，为隧道的维修保养和整治提供系统完整的科学依据；

(3)通过检测评价报告获得必要的信息，正确掌握铁路运营隧道病害的实际状况，在此基础上逐步形成从日常维护、病害发现、病害检测到病害整治的一整套技术体系，建立隧道病害整治专家系统奠定基础，从而使现有隧道的运营管理技术提高到一个新的水平；

(4)新建铁路隧道施工阶段，作为施工过程控制手段，及早发现问题，为采取加固措施消除隐患提供依据，起到对隧道施工质量实时监控的作用。

四、检测评价的主要内容

隧道检测评价主要是通过对隧道衬砌、仰拱(或铺底)进行无损检测，查清隧道既有病害的规模，查找隐伏病害、可能造成病害的施工质量缺陷以及灾害性地质灾害。具体包括在表 1.1 中所列的 6 个方面：

表 1.1 隧道检测评价主要内容

序号	检测项目	内 容
1	初期支护和衬砌混凝土	在隧道不同部位布置测线,测出拱顶、拱腰、拱脚及边墙位置的衬砌厚度以及道床仰拱的厚度,同时还可沿隧道的横断面进行厚度探测。初期支护中的钢筋、钢拱架及格栅钢架等的数量和分布情况,并准确定位。初衬与二次衬砌之间的密实状况以及衬砌间空洞的分布情况
2	围岩状况	隧道周围 2m 范围(根据需要可进行调整)内的围岩状况。岩溶地区查找并确定溶洞的位置和范围
3	排水	隧道衬砌或围岩中排水盲沟的分布及畅通情况;高寒地区的冻融情况。隧道围岩或衬砌中的裂隙水分布及赋水情况
4	开挖断面	隧道围岩超挖部分的位置、超挖空间和回填情况(回填的性质);通过衬砌厚度确定隧道欠挖情况。
5	裂缝	衬砌中的裂隙分布,尤其是衬砌深部不为肉眼看出的裂隙分布和发展趋势;配合强度检测对衬砌状况作出全面的评价
6	状况评价	通过对检测结果进行解析,实现隧道病害状况的评价。评价成果包括衬砌强度值、衬砌结构厚度值、隧道裂隙水分布状况、围岩超欠挖情况、衬砌破损情况以及格栅拱架等的分布情况,通过这些定量化数据,直接反映隧道的病害状况

第二节 隧道衬砌检测和评价的技术依据

由于地质条件的复杂性,隧道设计和施工涉及到众多的技术专业和技术标准,隧道检测评价是以设计为依据检测施工质量,

同时查找在设计和施工阶段未能发现的隐蔽的灾害性地质病害，为隧道彻底整治提供依据。

铁路隧道检测评价主要依据以下中华人民共和国行业标准：

1. 《铁路工程地质勘察规范》(TB10012-2001, J117-2001)
2. 《铁路隧道设计规范》(TB10003-2005, J447-2005)
3. 《铁路隧道施工规范》(TB10204-2002)
4. 《铁路隧道喷锚构筑法技术规范》(TB210108-2002)
5. 《铁路混凝土与砌体工程施工规范》(TB10210-2001, J118-2001)
6. 《新建时速 200 公里客货共线铁路设计》(2003.10)
7. 《铁路桥隧建筑物劣化评定标准》(TB/T2820.2-1997)
8. 《铁路隧道工程施工质量验收标准》(TB10417-2003)
9. 《铁路混凝土与砌体工程施工质量验收标准》(TB10424-2003)
10. 《铁路工程结构混凝土强度检测规程》(TB10426-2004)

第三节 地质雷达技术应用前景

地质雷达技术是近年来应用于浅层地质构造、岩性检测的一项物探技术，其特点是快速、无损、连续检测，并以实时成像方式显示地下结构剖面，探测结果一目了然，分析、判读直观方便。

因其探测精度高、样点密、工作效率高而倍受一些行业的关注。

地质雷达在 20 世纪 70 年代开始应用于工程场地勘察，近 30 年来，其应用领域已经扩大到考古、建筑、铁路、公路、水利、水电、采矿、城市地下管网等各个方面。

工程场地勘察方面，主要应用于普查地下岩溶、确定基岩风化层厚度、研究地下水水位分布以及查找隐伏地质构造等，大多采用中低频天线，探测深度可以达到 50m 以上。

考古方面，主要用于探测古建筑群、地下洞室等，近年对乐山大佛进行修复前，也采用地质雷达检测，对大佛状况进行前期评估。

地下管网普查方面，由于地质雷达推出了高分辨率的三维探测系统，可以精确地确定各类地下管道的水平位置和深度，得到地下管网三维分布图。

工程质量检测方面，近年来广泛应用于铁路公路隧道衬砌、路基病害、高速公路路面、机场跑道以及地质超前预报工作中，并得到良好效果。隧道检测是其发展较为迅速的领域之一，铁路、公路交通以及水利部门均已经采用地质雷达技术检测评价既有隧道状况，并且在新建项目中开始大量应用，在施工阶段中对质量进行过程控制，及时发现质量缺陷，使地质雷达成为施工质量监控不可缺少的重要手段。

第二章 地质雷达技术理论知识

第一节 麦克斯韦电磁场理论简介

一、位移电流假设

恒定电路中，传导电流是连续的，满足恒定电流的安培环路定理：

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

式中的电流是穿过以闭合曲线 L 为边界的任意曲面 S 的传导电流（电荷的定向运动形成的电流）。

非恒定电路中，如图 2.1，由于传导电流不能通过电容的两个极板，所以恒定电流的安培环路定理不再适用。

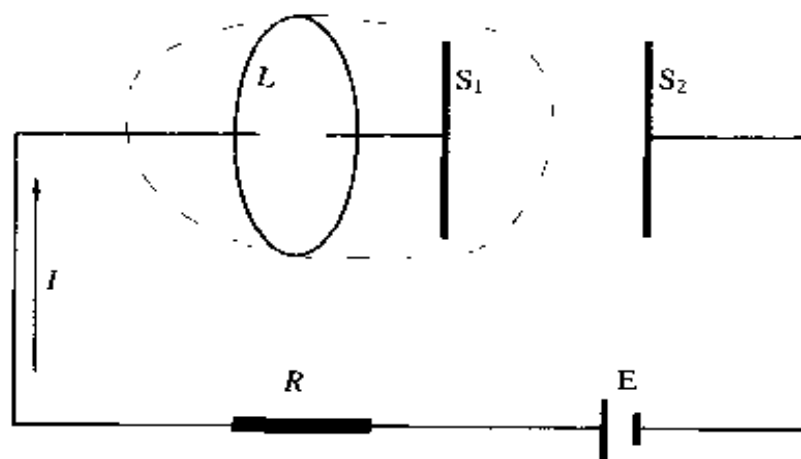


图 2.1 非恒定电路

对于非恒定电路，电流中断处必然发生电荷分布的变化，产生磁场。麦克斯韦电磁场理论认为，对于普遍的情况，在非恒定

电流的情况下，电位移的时间变化率与电流密度相当，变化的电场等效的也是一种“电流”，它也能产生磁场。这就是麦克斯韦提出的著名的位移电流假说，他将电位移通量的时间变化率称为位移电流，而把电位移 D 的时间变化率称为位移电流密度。基于上述假说，提出了全电流的概念，即传导电流和位移电流之和称为全电流，在电流非恒定情况下，将安培环路定理推广为：

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{\text{全}} = I_{\text{传导}} + I_{\text{位移}} = I_{\text{传导}} + \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

引入位移电流概念以后，非恒定电路中，中断的传导电流被位移电流接替，使电路中电流保持连续不断。在非闭合、电流不恒定的电路中，全电流是保持连续的。

位移电流与传导电流两者相比，唯一共同点仅在于都具有磁效应，都可以在空间激发磁场，但二者本质是不同的：

(1)产生机理不同：位移电流是变化的电场；传导电流是自由电荷的定向运动形成的。

(2)位移电流也即变化着的电场可以存在于真空、导体、电介质中，不需要导体；传导电流需要导体，只存在于导体中。

(3)位移电流没有热效应；传导电流在通过导体时会产生焦耳热。

二、麦克斯韦方程组的物理意义

借助于位移电流和全电流的概念，麦克斯韦把安培环路定理推广到变化的电磁场也适用的普遍形式，提出的涡旋电场和位移电流假说，其核心思想是：变化的磁场可以激发涡旋电场，变化的电场可以激发涡旋磁场；电场和磁场不是彼此孤立的，它们相互联系、相互激发组成一个统一的电磁场。麦克斯韦进一步将电场和磁场的所有规律综合起来，建立了完整的电磁场理论体系。

麦克斯韦电磁理论认为：在一般情况下，电场既包括自由电荷产生的静电场 $E^{(1)}$ 、 $D^{(1)}$ ，也包括变化磁场产生的有旋电场 $E^{(2)}$ 、 $D^{(2)}$ ，电场强度 E 和电位移 D 是两种电场的矢量和。即

$$E = E^{(1)} + E^{(2)} \quad D = D^{(1)} + D^{(2)}$$

同时，磁场既包括传导电流产生的磁场 $B^{(1)}$ 、 $H^{(1)}$ ，也包括位移电流（变化电场）产生的磁场 $B^{(2)}$ 、 $H^{(2)}$ ，磁感应强度 B 和磁场强度 H 是两种磁场的矢量和。即

$$B = B^{(1)} + B^{(2)} \quad H = H^{(1)} + H^{(2)}$$

在 1873 年前后，麦克斯韦提出了在一般情况下电磁场所满足的四个方程，称为麦克斯韦方程组，用以表述电磁场的普遍规律：

(1) 电场的高斯定理

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \oint_S (\vec{D}_1 + \vec{D}_2) \cdot d\vec{S} = \sum q_i + 0$$

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum q_i (= \int_V \rho dV)$$

电场的高斯定理描述了电场的性质。在一般情况下，电场可以是库仑电场(也称静电场，是有源场)，也可以是变化磁场激发的感应电场，而感应电场是涡旋场(是无源场)，它的电位移线是闭合的，对封闭曲面的通量无贡献。

(2) 磁场的高斯定理

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint_S (\vec{B}_1 + \vec{B}_2) \cdot d\vec{S} = 0$$

磁场的高斯定理描述了磁场的性质。磁场可以由传导电流激发，也可以由变化电场的位移电流所激发，它们的磁场都是涡旋场，磁感应线都是闭合线，对封闭曲面的通量无贡献。

(3) 电场的环路定理

法拉第电磁感应定律

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_L (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi}{dt} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

电场的环路定理描述了变化的磁场激发电场的规律，即静电场是保守场，变化磁场可以激发涡旋电场。

(4) 全电流安培环路定理

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_L (\vec{H}_1 + \vec{H}_2) \cdot d\vec{l} = \sum I_i + \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S (\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{S}$$

全电流安培环路定理描述了变化的电场激发磁场的规律，即传导电流和变化电场可以激发涡旋磁场。

三、电磁波的特点

电磁场以磁场和电场交替的形式传播，传播过程中电磁场场量满足波动方程：

$$\nabla^2 E = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 H = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

式中， c 是真空中电磁波的波速，等于真空中的光速(光波就是电磁波)。

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2.99799667 \times 10^8 \text{ m/s}$$

电磁波具有以下 6 个特点：

(1) 电矢量 E 、磁矢量 H 和都与波的传播方向 k 垂直，因此电磁波是横波。

(2) E 和 H 始终同频率，同相位。任意时刻 E 和 H 的幅值成比例，其关系如下式：

$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r} E = \sqrt{\mu_0 \mu_r} H$$

(3) E 和 H 分别在各自的平面内振动，这一特性称为偏振性。

(4) 电磁波的传播速度 v 的大小为：

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

(5) 电磁波的频率越高，相应的波长就越短。无线电波的频率最低（波长最长），而 γ 射线的频率最高（波长最短）。目前人类通过各种方式已产生或观测到的电磁波的最低频率为 10^2Hz ，其波长为地球半径的 5000 倍，而电磁波的最高频率为 10^{25}Hz ，它来自于宇宙的 γ 射线。

(6) 电磁场具有辐射能：由于电磁场具有能量，所以随着电磁波的传播，就有能量的传播。这种以电磁波形式传播出去的能量，叫做辐射能。

第二节 电磁波在介质中的传播规律

一、地质雷达检测原理

地质雷达技术（Ground Penetrating Radar，简称 GPR）利用主频为 $10^6 \text{Hz} \sim 10^9 \text{Hz}$ 波段的电磁波，以宽频带短脉冲的形式，由地面通过天线发射器发送至地下，经地下目的体或地层的界面反射

后返回地面，被雷达天线接收器所接收，通过对所接收的雷达信号进行处理和图像解译，达到探测前方目标体的目的。图 2.2 是地质雷达检测原理示意图。

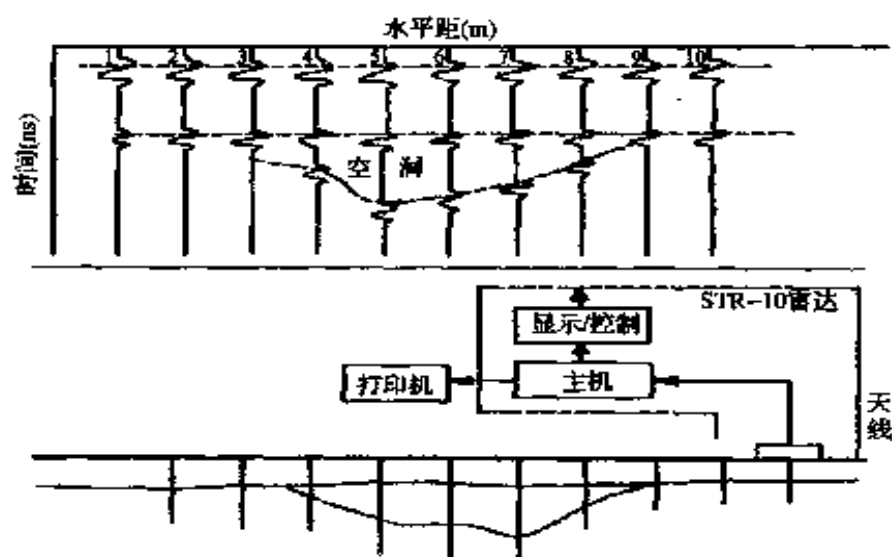


图 2.2 地质雷达检测原理示意图

地下介质相当于一个复杂的滤波器，介质对电磁波不同程度的吸收以及介质的不均匀性质，使得雷达发射出去的电磁脉冲在到达接收天线时，综合了地下不同介质的物理信息，表现为波幅减小、频率降低、相位和反射时间发生变化等，波形变得与原始发射波形有较大的差别，通过对这些改变了的波形进行处理分析，得到所需要的地下信息，建立地下介质的结构模型。

二、电磁波的传播规律

地质雷达是利用电磁波的发射和接收进行目标体的探测。地

质雷达发射的电磁波为线极化平面波。电场强度与入射面垂直的平面波称为垂直极化平面波，而电场强度与入射面平行的平面波称为平行极化平面波。

电磁波在介质中传播，其规律满足麦克斯韦方程，电场强度分量可用下面的关系式表示：

$$E_x = E_0 e^{-kx}$$

式中， E_x 为传播距离 $Z=x$ 处的电场强度； E_0 为传播距离 $Z=0$ 处的电场强度； $k = \alpha + j\beta$ ，为传播常数，其中 α 为衰减常数，表示每单位距离衰减程度的常数； β 为相移常数，表示每单位距离落后的相位。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2}} \times \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} - 1}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2}} \times \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} + 1}$$

式中， ω 为电磁波的角频率 ($\omega = 2\pi f$, f 为电磁波中心频率)； μ 为介质的磁导率； σ 为介质的电导率； ϵ 为介质的介电常数。

实际计算中，通常用相对磁导率 ($\mu_r = \mu / \mu_0$) 和相对介电常数 ($\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$) 计算介质的衰减常数 α 和相移常数 β 。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2 \mu_0 \epsilon_0}{2}} \times \sqrt{\sqrt{\epsilon_r^2 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}\right)^2} - \epsilon_r}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega^2 \mu_0 \epsilon_0}{2}} \times \sqrt{\sqrt{\epsilon_r^2 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}\right)^2} + \epsilon_r}$$

式中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, 为空气磁导率, $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{F/m}$,

为空气介电常数。

1. 在高阻介质中传播

电磁波在高阻介质中传播时, $(\sigma / \omega \epsilon_0) \ll 1$:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \times \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right] \approx \omega \sqrt{\mu \epsilon}$$

以上两个公式表明, 在高阻介质中, 电磁波的衰减取决于电导率的大小, 而与天线角频率无关。在高阻介质中, 电磁波的传播速度 V 用下式表示:

$$V = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

式中， $C = 0.3\text{m/ns}$ 。

2. 在低阻介质中传播

电磁波在低阻介质中传播时 $(\sigma / \omega\epsilon_0) \gg 1$ ：

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$$

上面公式表明，衰减常数除与电导率成正比例关系外，还与电磁波角频率有关。不同的电磁波频率，衰减常数变化，探测能力亦不同，在相同介质中，地质雷达天线频率越高，探测深度越小。

低阻介质中，电磁波的传播速度 V 用下式表示：

$$V = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}$$

上面公式表明，在低阻介质中，电导率越大，电磁波速度越小。

三、电磁波的反射与接收

在介质中传播的平面电磁波波，在遇到不同的波阻抗（ η ）界面时将发生反射和透射，产生反射波和透射波。

垂直极化平面波的反射系数：

$$R_{\perp} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_n}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_n}$$

平行极化平面波的反射系数：

$$R_{\parallel} = \frac{\eta_1 \cos \theta_i - \eta_2 \cos \theta_n}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_n}$$

1. 高阻介质

波阻抗公式如下式表示：

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\omega}}$$

在垂直入射情况下， $\theta_i = \theta_n = 0$ ，则：

$$R_{\perp} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

$$R_{//} = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

公式表明，对于高阻介质，反射信号的大小主要取决于介质介电常数的差异。

2. 在低阻介质

波阻抗公式如下式表示：

$$\eta = \sqrt{\frac{\sigma}{2\omega\mu}}$$

在垂直入射情况下， $\theta_i = \theta_r = 0$ ，则：

$$R'_{\perp} = \frac{\sqrt{\sigma_1} - \sqrt{\sigma_2}}{\sqrt{\sigma_1} + \sqrt{\sigma_2}}$$

$$R'_{//} = \frac{\sqrt{\sigma_2} - \sqrt{\sigma_1}}{\sqrt{\sigma_1} + \sqrt{\sigma_2}}$$

公式表明，对于低阻介质，反射信号的大小主要取决于介质电导率的差异。

地质雷达采集的是来自介质界面的反射波信号，如果介质十

分单一均匀，则入射电磁波将继续向地下传播，没有明显的反射现象，从理论上说，接收不到反射信号。反之，介质组成成分、结构越复杂，介电常数或电导率差异越大，反射能量也越强，反射信号的信息也越丰富，通过分析其中包含的各种地质信息，可以充分了解介质的结构和成分。

四、地质雷达的适用条件和特点

地质雷达的解释可以简单归结为使用边界条件来求解麦克斯韦方程。如果准确了解介质的物理特性即确定了边界条件，就可以通过解麦克斯韦方程来得到答案。

(一)介质的电特性

介质的电特性决定了地质雷达是否适用及使用效果。在介质的诸多物性参数中，对地质雷达应用效果起决定作用的是介质的电导率 σ 和介电常数 ϵ 两个关键指标。其中，电导率决定了电磁波在该介质中的穿透深度，而介电常数则决定了电磁波在该介质中的传播速度，同时它还决定了两种不同介质的对比度(即两个介质的界面是否有反射)以及电磁波在介质中的“足印”(电磁波在介质中的覆盖范围)。

水对上述两个参数的影响是非常大的，因此用雷达进行地质勘探时，含水量会对探测结果有关键性的影响。

1. 电导率的概念和作用

地质雷达技术是通过分析电磁场在地下介质中的分布和传播规律来研究介质内部结构的。电磁场由磁场 H 和电场 E 构成，随时间变化。对地下介质来说，电场是影响雷达探测效果的主要因素。

当对介质施加电场时，就会使介质内的电荷移动而形成电流，其电流包括传导电流和位移电流，在任何一点，电磁波的电场、磁场和电磁波传播方向都是相互垂直的，见图 2.3。

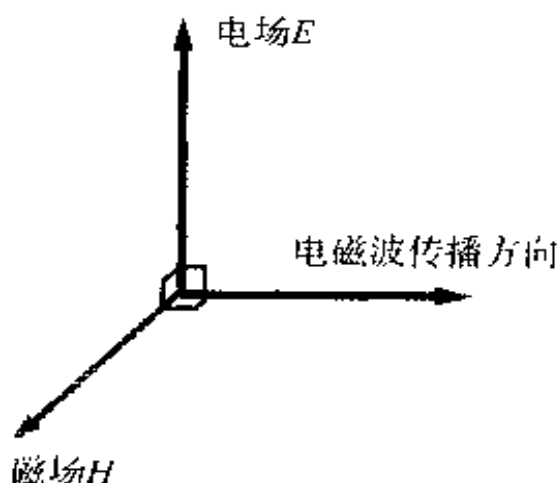


图 2.3 电场、磁场和电磁波传播方向相互垂直

传导电流的定义为：

$$J_c = \sigma E$$

式中， σ 是电导率(单位：S/m)， $\sigma = 1/\rho$ (ρ 为电阻率，单位： $\Omega \cdot m$)。

传导电流的运动过程见图 2.4

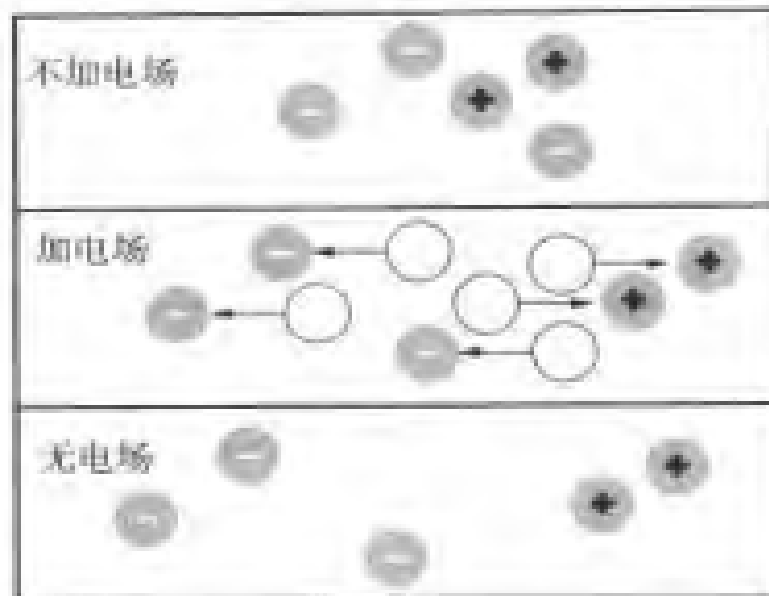


图 2.4 传导电流的运动过程

电导率可以理解为一个物体传导电流的能力或电荷在介质中流动的难易程度。如金属板内的电子、水中的电离子，它们的移动都是非常容易的，因此金属板和水的电导率都很高；相反，在岩石和干燥的土壤里，电子几乎无法移动，它们的电导率就很低。因此，电磁波在介质中的穿透深度与介质的电导率有关，其穿透深度随电导率的增加而减小(对金属物体来说，其穿透深度为 0，物理上称为“趋肤效应”)。如果知道了介质的电导率，就可以推算电磁波在该介质中的穿透深度。在土壤中，电磁波的穿透深度和电导率的关系如图 2.5。

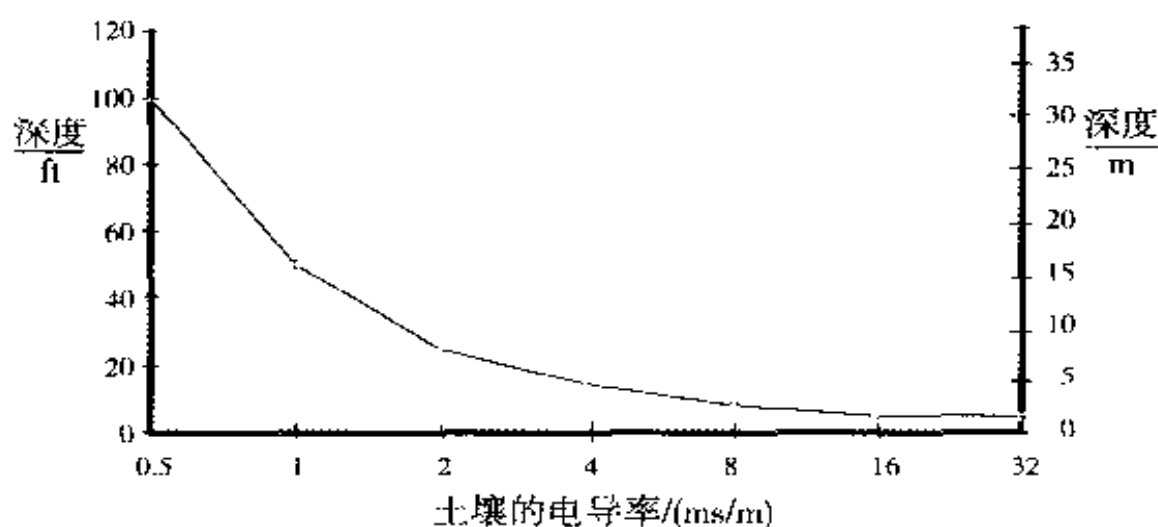


图 2.5 土壤中电磁波穿透深度和电导率的关系

另外，对土壤等介质来说，电导率和含水量有密切的关系。从图 2.6 可以看出，含水量达到一定比例后，电导率上升幅度下降，说明土体已经接近饱和或处于流塑状态。如果介质的电导率太大，则电磁波的穿透深度非常有限，雷达方法就不再适用。

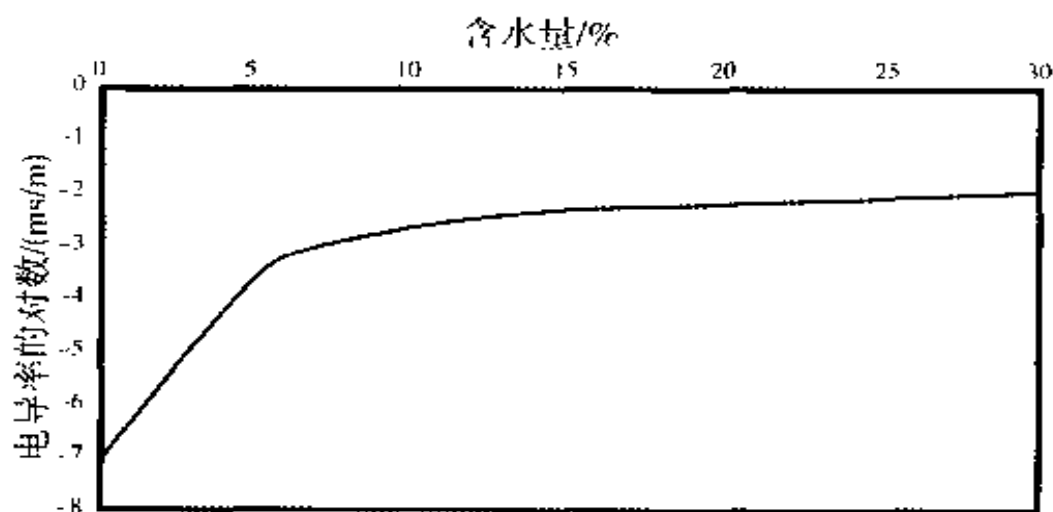


图 2.6 电导率和土壤含水量的关系

下面的两个雷达剖面可以直观地看出电导率对雷达探测深度

的影响。

图 2.7 是低电导率土壤(干燥石英砂)中得到的雷达剖面,其数据质量非常好,深部信息丰富。

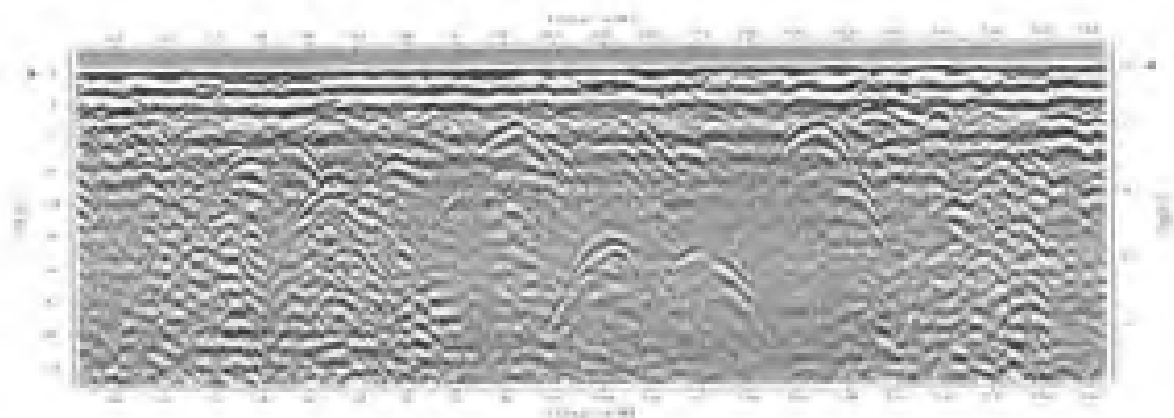


图 2.7 低电导率介质雷达剖面

图 2.8 是高电导率土壤(潮湿粘土)中得到的雷达剖面,信号的衰减非常强,没有深部信息。



图 2.8 高电导率介质雷达剖面

一般地说,低电导率条件($\sigma < (10 \sim 7) \text{ S/m}$) 是很好的雷达应用条件,如空气、干燥花岗岩、干燥石灰岩、混凝土等; $(10 \sim 7) \text{ S/m}$

$\sigma < (10 \sim 2) \text{ S/m}$ 为中等应用条件，如纯水、冰、雪、砂、干粘土等； $\sigma > (10 \sim 7) \text{ S/m}$ 为很差的应用条件，如湿粘土、湿的页岩、海水等。下面的经验性结论可以为雷达方法的适用条件提供参考：当介质的电导率大于 10 mS/m (或电阻率小于 $100 \Omega \text{ m}$) 时，雷达方法就不再适用。

2. 介电常数的概念和作用

电介质是电的绝缘体，它内部的自由电荷少到可以忽略的程度。由于分子内在力的约束，电介质分子中的带电粒子不能发生宏观的位移。然而在外电场的作用下，这些带电粒子仍然可以有微观的位移，即电介质可以被极化， χ_e 就表示电介质的极化率，它反映了电介质的性质。电介质中各点的 χ_e 都相同，真空中 $\chi_e = 0$ ，而除此之外任何介质的 $\chi_e > 0$ 。

物理学中，当电容器极板间充满电介质时，电容增大的倍数，叫做这种电介质的绝对介电常数，用 ϵ 表示，单位是 F/m 。对于各向同性的电介质，绝对介电常数只与反映该电介质性质的 χ_e 有关，反映了处于电场中的电介质存储电荷的能力。

电容器极板间充满电介质时，电容增大到的倍数，叫做这种电介质的相对电介常数，用 ϵ_r 表示。 ϵ_r 由电介质的性质决定，表征电介质本身的特性，表示将介质中电荷分开的力，在数值上等

于电容器两极板间充满电介质时的电容和两极板间为真空时的电容之比，没有单位。

因此，相对介电常数定义为 $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ ，其中， ϵ 是电介质的绝对介电常数， ϵ_0 是真空中介电常数，数值约为 $8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 。

电磁波在介质中的传播速度完全由相对介电常数决定，相对介电常数与含水量有密切的关系。

对大多数干燥的地下介质来说，其相对介电常数小于 10。纯水的相对介电常数为 81，空气的相对介电常数为 1。

图 2.9 是相对介电常数和含水量的关系曲线，可以看出，相对介电常数与含水量近似的成正比例关系。

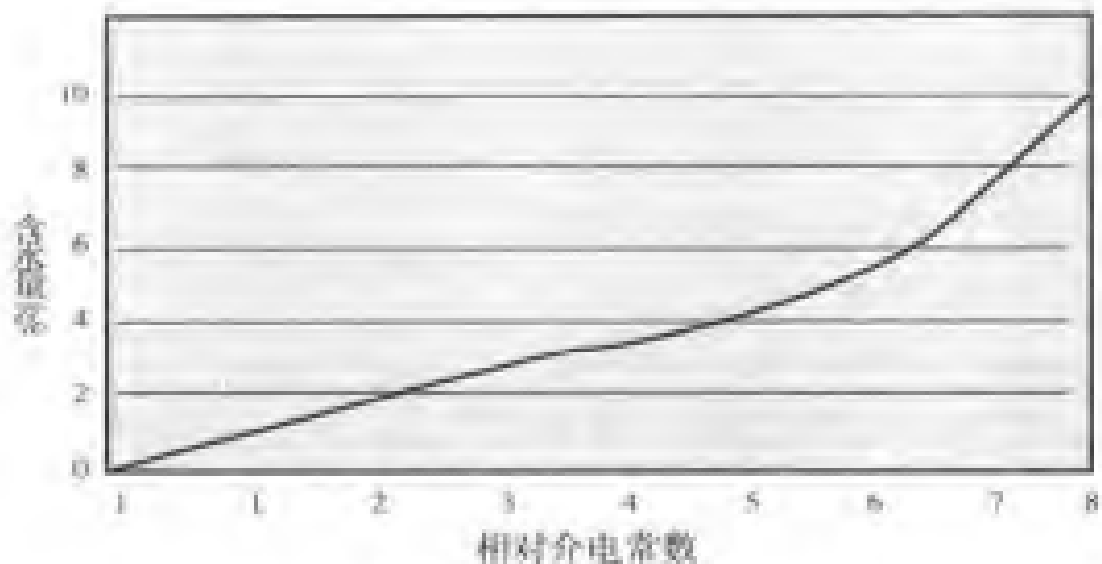


图 2.9 相对介电常数和含水量的关系

3. 常见介质的电导率、相对介电常数和电磁波速度值

表 2.1 列出了常见介质的电导率、相对介电常数和电磁波速度值，供参考。

表 2.1 常见介质的电导率、相对介电常数和电磁波速度

介质	电导率/(S/m)	相对介电常数	电磁波速度 /(m/ μ s)
空气	0	1	300
干沥青	0.01~0.1	2~4	212~150
湿沥青	0.001~0.1	6~12	122~86
干粘土	0.1~1	2~6	212~122
湿粘土	0.1~1	5~40	134~47
干煤	0.001~0.01	3.5	160
湿煤	0.001~0.1	8	106
干混凝土	0.001~0.01	4~40	150~47
湿混凝土	0.01~0.1	10~20	95~67
淡水	10^{-6} ~0.01	81	33
淡水冰	10^{-4} ~ 10^{-3}	4	150
干花岗岩	10^{-8} ~ 10^{-6}	5	134
湿花岗岩	0.001~0.01	7	113
干灰岩	10^{-4} ~ 10^{-3}	7	113
湿灰岩	0.01~0.1	8	106
永久冻土	10^{-5} ~0.01	4~8	150~106
干结晶盐	10^{-4} ~0.01	4~7	150~113
干沙	10^{-7} ~0.001	2~6	212~122
湿沙	0.001~0.01	10~30	95~54
干砂岩	10^{-6} ~ 10^{-5}	2~5	212~134

续表

湿砂岩	$10^{-4} \sim 0.01$	5~10	134--95
海水	100	81	33
海水冰	0.01~0.1	4~8	150~106
干页岩	0.001~0.01	4~9	150~100
饱和页岩	0.001~0.1	9~16	100~75
硬雪	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	6~12	122~86
粘性干土	0.01~0.1	4~10	150~95
粘性湿土	0.001~1	10~30	95~54
干壤土	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	4~10	150~95
湿壤土	0.01~0.1	10~30	95~54
干沙土	$10^{-4} \sim 0.01$	4~10	150~95
湿沙土	0.01~0.1	10~30	95~54

(二)电磁波在介质中的传播方式

电磁波在地下介质的半无限空间中呈球面传播，应用惠更斯原理来描述电磁波的反射、折射和衍射，见图 2.10。

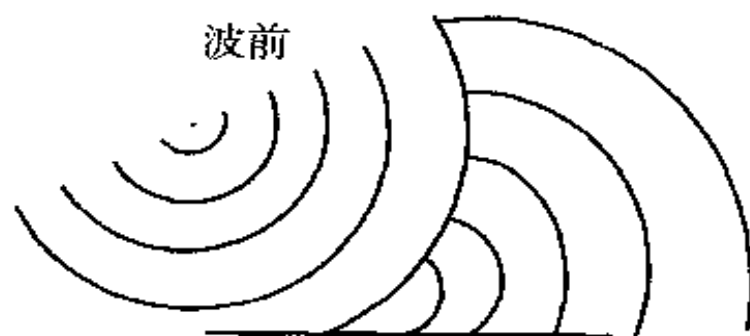


图 2.10 电磁波传播方式

当雷达剖面垂直于地下管线走向布置时，得到的管线图像是抛物线形。如图 2.11。

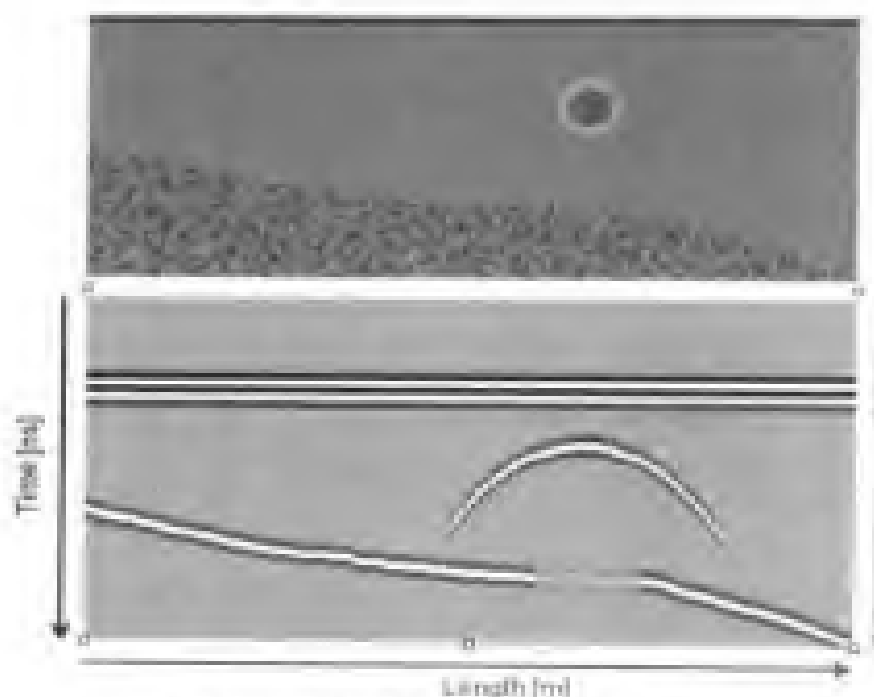


图 2.11 地下管线雷达图像示意图

雷达在探测时探测到的地下反射物，并不一定是在天线的正下方，在雷达探测的有效区域，如果地下有反射界面或反射体存在，雷达也会探测到。雷达的探测范围与相对介电常数有直接的关系。相对介电常数和“足印”（即探测的有效范围）的关系为：

$$a = \frac{\lambda}{4} + \frac{d}{\sqrt{(\epsilon - 1)}}$$

式中， ϵ 为相对介电常数， λ 为电磁波波长， d 为深度。

图 2.12 是雷达有效探测范围示意图，与极化方向垂直的方向

上，范围 $b=a/2$ 。

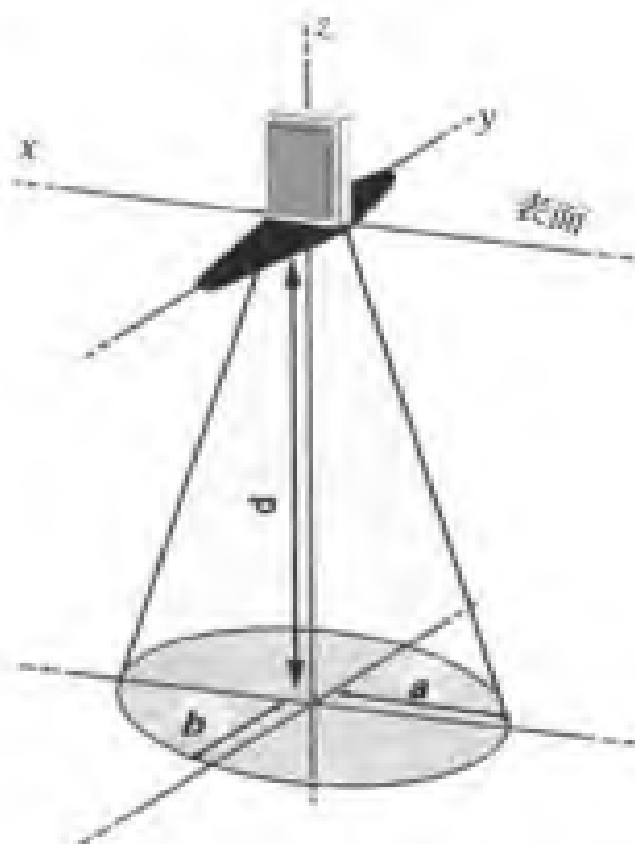


图 2.12 雷达有效探测范围示意图

由此可见，用雷达探测时得到信息并不仅仅是天线正下方物体的反射。

实际应用中，人们常常采用几何光学的原理来描述和计算电磁波，这样计算起来会比较方便。

第三节 地质雷达资料解释

一、地质雷达的探测图像

地质雷达的探测图像是雷达扫描道在屏幕上形成连续剖面，

如图 2.13。

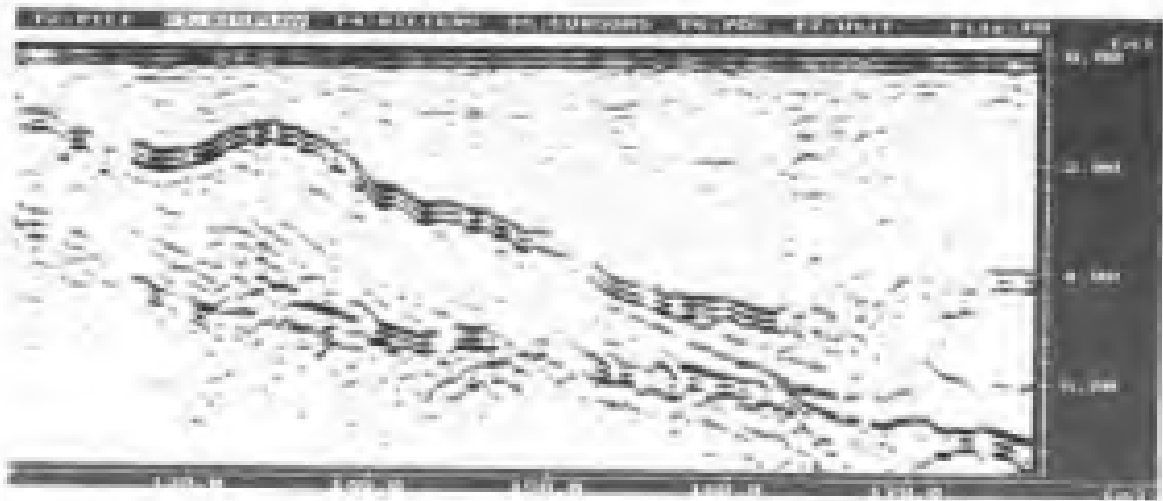


图 2.13 雷达测试剖面

剖面横坐标是测试距离，即探测剖面的地面位置；纵坐标是电磁波在介质中的双程走时，是时间坐标，单位 ns。

图 2.14 是隧道检测中的一幅雷达图形，右侧是虚线处的一道扫描记录，图中标明了入射波和反射波的相位特征。由于混凝土

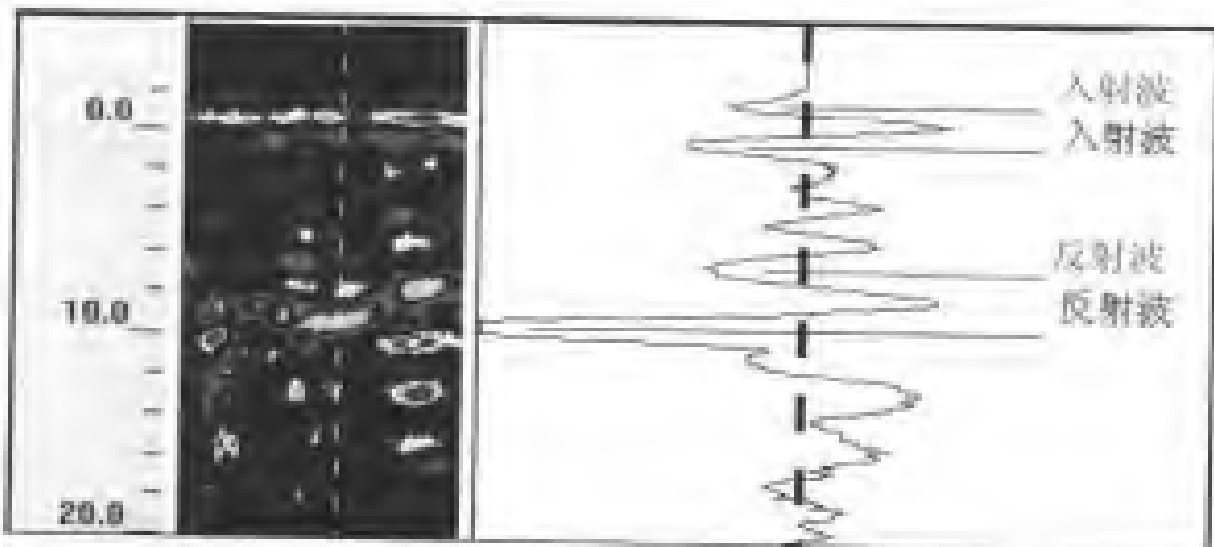


图 2.14 雷达波形特征

的滤波作用，反射波频率略有降低。

雷达图像有色阶显示和波形显示两种显示模式，色阶模式信息更丰富一些。

图 2.15 是同一幅图像的两显示模式。

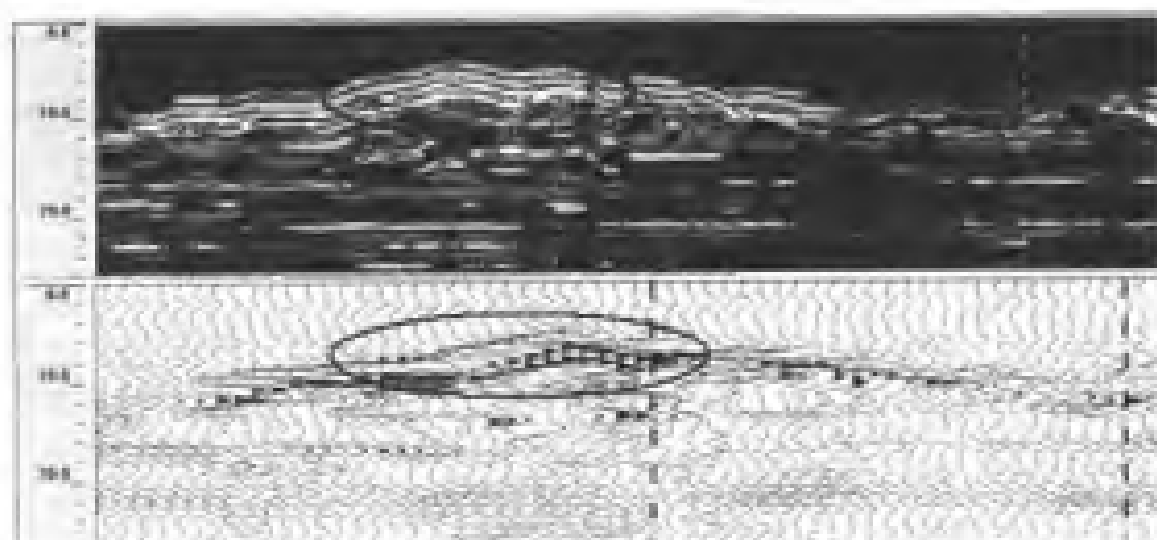


图 2.15 雷达图像显示模式

二、数据处理

雷达资料的解释过程就是通过对雷达剖面的分析解析，择取有用的地质信息。

数据处理的目的是抑制随机的和有规律的干扰，最大限度地提高雷达图像剖面上的分辨能力，通过提取电磁回波的各种有用参数，来解释不同介质的物理特征。如基于不同频率的各种反褶积技术，确定性反演滤波、递归滤波、最小平方滤波

和子波处理等。数据处理的另一目的是将数据元素重置以补偿由于来自不同方向的反射迭加产生的空间畸变，如偏移处理等。

数字分析处理是雷达剖面图像解译的关键步骤。

根据检测目的，选择合理的数字处理方法，突出目的层。常用处理方法一般有静校正、去直流、道均衡、道间平滑、反褶积、增益调节以及插值等，目的在于以下几个方面：

(1)取多次重复测量平均以抑制随机噪声；

(2)取邻近不同位置的多次测量平均以压低非目的体杂乱回波，改善背景；

(3)自动时变增益或控制增益以补偿介质吸收和抑制杂波；

(4)滤波处理或时频变换以除去高频杂波或突出目的体，降低背景噪声和余振影响；

(5)时域的一维、二维空间滤波；

(6)做与目的体有关的三维处理等等。

雷达数据处理的一般步骤见图 2.16。

三、拾取反射层

地质雷达资料的地质解释就是通过对波形进行处理，拾取反射层，识别各地质结构层的反射波组特征，主要判断依据如下。

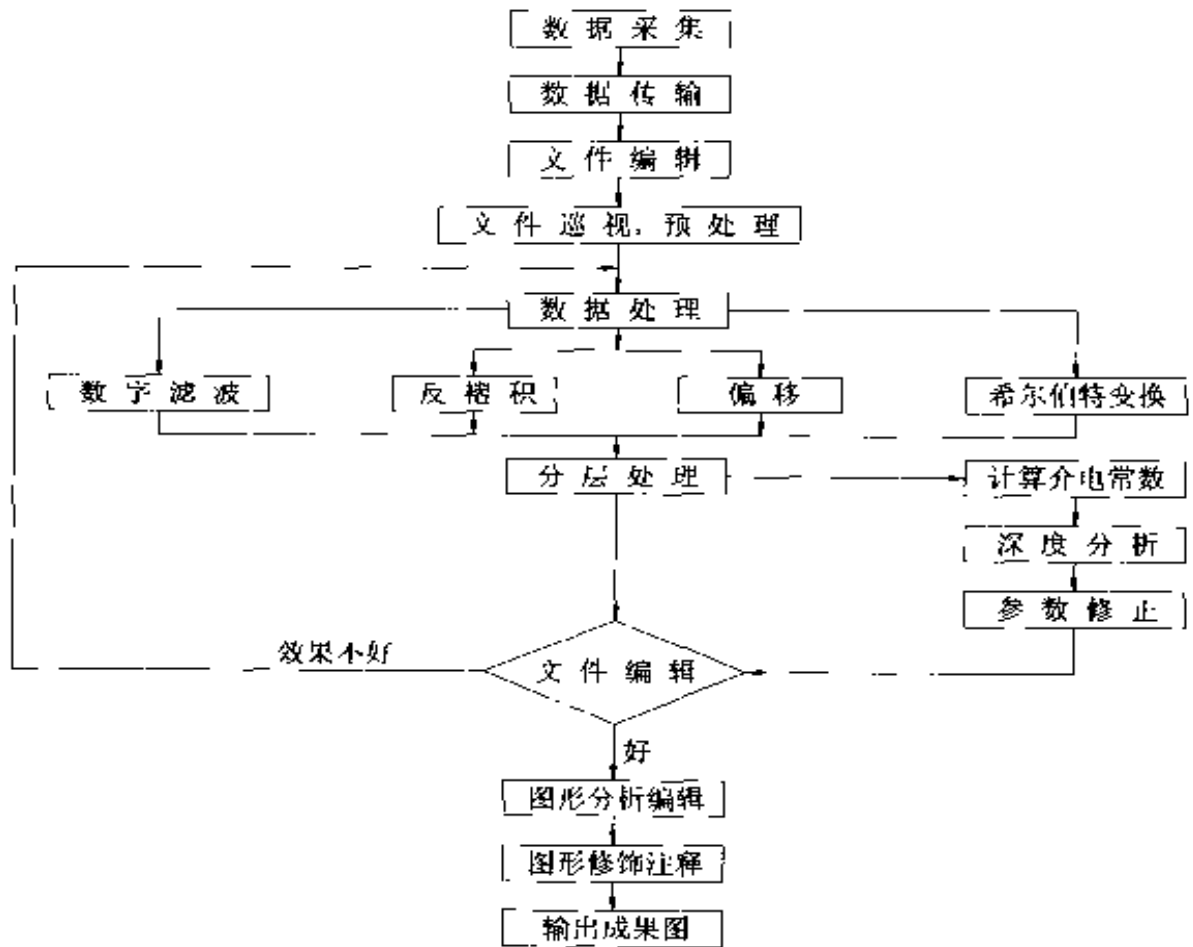


图 2.16 地质雷达数据资料处理流程图

1. 反射波组的相同性

只要地下介质中存在电性差异，就可以在雷达影像剖面中找到相应的反射波与之对应，同一个波组的相位特征，即波峰、波谷的位置沿测线基本上不变化或以缓慢的视速度传播，因此同一个反射体往往有一组光滑平行的同相轴与之对应。

2. 反射波形的相似性

相邻记录道上同一反射波组形态的主要特征保持不变。

3.反射波组形态特征

同一地层反射波组的波形、波幅、周期（频率）及其包络线形态等有一定特征，不同地层的反射波组形态将有差异。

4.地下介质电性及几何形态决定波组的形态特征

确定具有一定形态特征的反射波组是反射层识别的基础，而反射波组的同相性和相似性为反射层的追踪提供了依据。

地质雷达工作频率高，在地质介质中以位移电流为主。因此，高频宽频带电磁波传播过程中很少频散，速度基本上由介质的介电性质决定。电磁波传播理论与弹性波的传播理论有许多相似之处，两者遵循同一形式的波动方程，只是波动方程中变量代表的物理意义不同。雷达波与地震波在运动学上的相似性，可以在资料处理中加以利用。

四、判释图像，定量解释

根据反射层建立检测目标体的结构模型，判定目标体的性质，定量计算目标体的规模。

解释过程中，需要将时间剖面进行“时深转换”，形成深度剖面。要得到探测物体的深度，必须知道电磁波在介质中的传播速度。

确定电磁波在介质中的传播速度的有以下几种方法：

(1)直接测量介质介电特性，并计算速度（不常用）。

(2)用单稳态天线来测量、计算。

(3)用双稳态天线来测量、计算(CDP法)。

(4)根据已知点的深度计算速度:在剖面上确定一点,采用开挖、钻孔的方法或根据已知资料确定该点被探测目标体的深度(或厚度),然后用公式计算出速度,再用该速度计算整个剖面的深度。

在隧道检测中常用第4种方法。



图 2.17 隧道衬砌钻孔确定混凝土厚度

计算探测目标体深度(或厚度)的计算公式为:

$$h = \frac{1}{2} \times V \times t$$

第四节 影响雷达测试精度的因素

地质雷达是依靠发射和接收宽频带、短脉冲的电磁波来进行检测，其精度的影响因素主要表现在以下几个方面。

一、高频特性

雷达发射电磁波的主频越高，其波长越短，因此它的空间分辨率越高。例如：采用 500MHz 主频的天线进行探测，如果电磁波在某介质中的传播速度为 10cm/ns，其波长为 20cm，若取波长的八分之一作为其分辨率，那么从理论上说主频 500MHz 电磁波的分辨率为 2.5cm。同样如果采用 1000MHz 主频的天线进行探测，它的理论分辨率可以达到 1.25cm。

二、宽频特性

雷达发射电磁波的主频越宽，它的空间分辨率越高。在实际工作中，希望在空间域和时间域上，能够发射和接收单一脉冲的电磁波信号，从信号分析的理论可以知道，频率越宽，相应的空间和时间域上的信号越窄，越窄的信号具有越强的空间和时间上的分辨率。单一频率信号在空间和时间上表现为一种该频率的正旋或余旋等振幅的振荡信号，其在空间和时间上的分辨率几乎为零。

三、雷达测试的干扰因素

从上面分析可以知道，电磁波在介质中传播呈指数规律衰减。因此，电磁波在介质中传播时，能量损耗很大。尤其深部反射的有效信号微弱，微弱的信号极易受到干扰信号的影响。

雷达设备接受到的干扰信号主要有仪器内部干扰和外界干扰两种。

仪器内部干扰主要表现为天线盒震荡信号干扰、天线控制电路之间干扰、发射与接收天线的直接耦合干扰等。

仪器的内部干扰相对稳定，但是当气候发生变化时，其内部干扰也会产生不稳定的变化。首先主要表现为天线与发射器、接收器的阻抗的不匹配，在此间进行能量的反射，这种能量的发射不仅减小了天线的发射功率，同时在此间产生的振荡信号对有效波也是一种很大的干扰。其次表现为天线尾部端的反射振荡干扰。

仪器的外界干扰主要有电线杆与电缆线干扰、通讯设施、大型机械设备启动干扰、天线在测量过程中的抖动干扰等等。

四、能量衰减

电磁波在介质中的传播过程是极其复杂的。这种高频、宽频信号在介质中的传播是一种有损耗的传播过程，它的反射、透射等现象不仅与介质的导电率有关、还和介质的介电常数相关。

从电磁场理论可以知道，当电磁波在无限线性变化的导电介质中传播时，在电磁场的作用下，使导电介质中的自由电荷作宏观移动，激起传导电流，必然有一部分电磁能转换为焦耳热能，引起能量损耗，这种能量损耗除了与导电介质的电磁性质相关外，还与电磁波的频率有密切关系。损耗使电磁场随传播距离衰减，使得离探测点远的目标引起的散射场很小，从而损失了信息；由于高频信号信息损失多，低频信号损失少，所以远处目标体散射的细节信息损失较大，这就影响了对细节的分辨效果。

五、合成波速度带来的误差

高频、宽频信号在导电介质传播过程中存在频散现象，即不同频率成分的波，其传播速度不一样，因此深部的雷达反射信号不能凭借单一的频率信号来进行描述，必须用合成波波速度来描述，但这样做必然影响深部距离的判别精度。

六、隧道衬砌检测中雷达解释精度分析

隧道衬砌检测必须采用屏蔽天线。仰拱混凝土厚度较大，一般在 1.5m 以上，需要选择中心频率 200MHz 以下的天线，拱部衬砌厚度一般小于 80cm，可以根据厚度选择中心频率在 400MHz~1GHz 的天线。

隧道衬砌检测中，最关心的是混凝土的厚度和空洞的尺寸，

表 2.2 中列出了使用不同频率时雷达的探测精度,表中“穿透深度”是指该天线在隧道衬砌检测中的最大探测深度。通过表中数据可以了解,在隧道衬砌检测中,雷达对于厚度的探测精度误差在 5%左右。

表 2.2 雷达探测精度误差

中心频率	混凝土速度	波长 λ (cm)	纵向分辨率 $\lambda/8$	穿透深度	精度 误差
100MHz	12cm/ns	120.0	15.0cm	400cm	3.8%
200MHz	12cm/ns	60.0	7.5cm	250cm	3.0%
250MHz	12cm/ns	48.0	6.0cm	150cm	4.0%
400MHz	12cm/ns	30.0	3.8cm	100cm	3.8%
500MHz	12cm/ns	24.0	3.0cm	100cm	3.0%
900MHz	12cm/ns	13.3	1.7cm	40cm	4.3%
1.0GHz	12cm/ns	12.0	1.5cm	30cm	5.0%
1.5GHz	12cm/ns	8.0	1.0cm	20cm	5.0%
2.0GHz	12cm/ns	6.0	0.8cm	15cm	5.3%

雷达的反射波能量与介电常数的差异成正比例关系,如果衬砌背后存在空洞、钢筋、溶洞等缺陷,将引起强烈反射,这种情况下,即使缺陷的径向尺寸小于雷达的纵向分辨率,缺陷波形也能够容易的被区分出来,我们可以通过在缺陷处开孔的方法确定混凝土厚度,修正电磁波速度,这样,雷达对于厚度的探测精度将大大提高。

需要注意的是,由于单一频率天线的分辨率是固定值,探测

精度和探测厚度密切相关。表 2.3 是西南某新建铁路部分隧道的验证数据，采用的是 400MHz 屏蔽天线。由于采用单一频率的天线进行检测，表中误差值偏大。实际上，在衬砌混凝土厚度为检测 30cm 时，可以考虑采用 900MHz 天线。

表 2.3 西南某新建铁路隧道衬砌检测混凝土厚度钻孔验证误差统计表

序号	上建标段	隧道名称	钻孔里程	钻孔位置	设计厚度 cm	计算厚度 cm	实际厚度 cm	空洞尺寸 cm	误差 %	
1	19	沙坝隧道	DK293+844.5	拱顶	30	42	45	10	6.7	
2			DK300+640	拱顶	35	33	31	11	6.5	
3			DK300+865	拱顶	40	30	35	2	14.3	
4		核桃园 隧道	DK303+432	拱顶	35	35	38	8	7.9	
5			DK303+488	拱顶	30	36	40	9	10.0	
6		大石板隧道	DK303+980	拱顶	45	35	32	16	9.4	
7			DK303+995	拱顶	45	39	37	12	5.4	
8			DK305+274.6	拱顶	40	46	42	15	9.5	
9			DK305+275.4	拱顶	40	38	37	11	2.7	
10			DK305+080	拱顶	50	35	32	10	9.4	
11			坡上户隧道	DK306+019.5	拱顶	45	30	33	12	9.1
12				DK306+020	拱顶	45	42	45	--	6.7
13		DK306+020.5		拱顶	45	40	38	8	5.3	
14		DK306+200		拱顶	45	38	36	6	5.6	
15		上家坡隧道	DK306+825	拱顶	45	42	44	10	4.5	
16			DK307+164	拱顶	40	42	40	10	5.0	
17		杉树边隧道	DK308+148	拱顶	45	28	25	20	12.0	
18			DK308+183	拱顶	45	22	20	22	10.0	

续表

19	21	金洞隧道	DK336+380	拱顶	25	30	31	8	3.2
20			DK336+368	拱顶	25	18	20	10	10.0
21			DK336+446	拱顶	25	26	28	5	7.1
22			DK336+495	拱顶	25	33	31	4	6.5
23	22	旗号岭隧道	DK350+625	拱顶	30	36	32	3	12.5
24			DK350+460	拱顶	30	30	35	--	14.3
25			DKA350+278	拱顶	25	32	29	5	10.3
26	24	两河溪隧道	DK366+220	拱顶	25	18	15	25	20.0
27			DK366+610	拱顶	25	21	23	7	8.7
28	24	新屋隧道	DK372+225	拱顶	25	22	25	17	12.0
29		黄桐溪隧道	DK367+360	左边墙	40	22	25	6	12.0
30		龙洞塘隧道	DK370+576	拱顶	25	21	25	10	16.0
31		徐家沟隧道	DK368+576	拱顶	40	35	40	12	12.5
32	26	白岩隧道	DK405+372	拱顶	45	35	40	7	12.5
33			DK405+506	拱顶	45	39	42	5	7.1
34		弯弓田隧道	DK414+335	拱顶	50	40	45	6	11.1
35			DK414+405	拱顶	45	39	41	7	4.9
36		龙田隧道	DK407+045	拱顶	45	40	42	5	4.8
37		糯米坪隧道	DK416+386	拱顶	45	46	50	5	8.0

雷达的反射波能量与介电常数的差异成正比例关系，如果衬砌背后存在空洞、钢筋、溶洞等缺陷，将引起强烈反射，在这种情况下，即使缺陷的径向尺寸小于雷达理论上的纵向分辨率，缺陷波形也能够容易的被区分出来，我们可以通过在缺陷处开孔的方法确定混凝土厚度，修正电磁波速度，这样，将提高雷达的实际探测精度。

第三章 常用地质雷达仪器介绍

目前国内应用较为广泛的地质雷达主要有瑞典 MALA 公司的 RAMAC 系列, 美国 GSSI 公司的 SIR 系列, 加拿大的 Pulse EKKO 系列, 日本的 GEORADAR 系列, 中国的 LLD 系列等型号。下面以瑞典 MALA 公司的 RAMAC 系列雷达为例, 介绍雷达的主要技术指标和硬件、软件的配置情况。

第一节 硬件配置指标

RAMAC/GPR 多道系统是由 CUII 主机和多道模块构成(图 3.1), 其中, MC-4 模块有 4 个记录通道, MC-16 模块有 16 个记录通道。MC-16 连接 4 个接收机和 4 个发射机, 任何一个发射机发射的信号都可以用所有的接收机来接收, 因此它是真正的三维雷达。多道系统可以使用相同频率的天线, 也可以使用不同频率的天线。



图 3.1 CUII 主机, MC-4 模块和 MC-16 多道模块

一、RAMAC 型地质雷达通用型主机 CUII 主要技术指标

表 3.1 主机和模块配置

指标	配置		
	CUII 主机	MC-4 模块	MC-16 模块
最大记录道数	1	4	16
最大物理道数	1	2 (2 发, 2 收)	4 (4 发, 4 收)
尺寸	230 mm×200 mm×120mm	225 mm×85 mm×25mm	220 mm×85 mm×25mm
重量	2.4kg	0.7kg	0.7kg

表 3.2 基本指标

指标	配置	指标	配置
脉冲重复频率	10~200kHz(标准 100kHz)	A/D 转换	16
样点数/道	128~8192	叠加次数	1~32768 (自动叠加)
采样频率	0.4~100GHz	信号稳定性	< 100ps
通讯方式	ECP	通讯速度	>700kByte/s
数据传输率	40~400kB/s	触发方式	距离/时间/手动
内置计算机	摩托罗拉 683xx	功耗	25W
工作温度	-20℃ ~ +50℃	环境标准	IP67
供电	8V RAMAC/GPR 标准电池或 12V 适配器	天线兼容性	所有 RAMAC/GPR 天线

二、RAMAC 系列雷达的天线配置

RAMAC 系列雷达的所有天线都与 CUII 主机兼容，其天线系列包括：

(1)屏蔽天线：100MHz，250MHz，500MHz，800MHz，1000MHz，1200MHz，1600MHz。

(2)不屏蔽天线：10MHz，25MHz，50MHz，100MHz，200MHz，超强地面耦合天线 RTA。

(3)孔中天线：250MHz，100MHz。

三、RAMAC 系列雷达的主要特点

(1)高集成化、真数字式、高速、轻便，是当今世界上唯一可以单人操作的地质雷达。

系统集成化程度高，体积小、重量轻（主机重量仅为 2.4kg）。

(2)功耗低，主机功耗仅为 25W；系统耗电量低，不需电瓶供电，为野外工作提供方便。

(3)天线与主机之间采用光纤连接，频带宽、速度快、数据质量好、抗干扰能力强，发射机、接收机及主机之间不会相互干扰。

(4)采用高压窄脉冲技术，其发射脉冲源与天线一一对应，穿透能力强。

(5)100MHz、250MHz、500MHz、800MHz 及 1000MHz 天线采用屏蔽方式，抗干扰能力强。

(6)主机与计算机之间采用 ECP 并口传输方式,数据传输速度快。

(7)主机可与低频、中频、高频天线全部兼容,同时也能与孔中天线兼容,性价比高,为用户添置新天线节约资金。

(8)显示方式采用外接笔记本计算机方式,不会由于计算机技术的飞速发展而导致设备很快落后。

第二节 雷达数据处理软件配置

雷达数据处理软件要求必须具备去直流漂移、增益调节、水平滤波(删除平均道)以及带通滤波等功能。

RAMAC 型地质雷达,提供采集处理软件和后处理软件两套解释软件。

一、GroundVision 采集处理软件主要有如下几个功能

(1)DC Removal: 去直流漂移,作用是去零漂。

(2)Automatic gain control: 自动增益控制,作用是对深部信号放大。

(3)Subtract mean trace: 抽取平均道,作用是水平滤波,即去除直达波和其它水平的固有信号。

(4)Band pass: 带通滤波,作用是去除不需要的低频和高分成分。

(5)Running average: 滑动平均,作用是对图像做平滑。

二、REFLEXW 雷达数据处理及解释软件包

该软件为欧洲权威性的雷达数据处理软件，在 WINDOWS 环境下的运行，为模块式组合，可以根据不同需要选购二维数据分析及解释、三维数据分析及解释、三维立体显示、正演、层析成像、CMP 数据处理、孔中数据处理及解释等模块。

其中二维数据分析模块的主要有以下功能：

(1)可以拾取初至波，做速度分析。

(2)有批处理及打印功能，同时显示处理前后的剖面。

(3)彩色及波形方式显示剖面，可显示每一道的实际波形。

(4)具有编辑功能，可以进行删道、抽道、切除、叠加、增减剖面等。

(5)手动及自动改变比例尺，剖面反向。

(6)静校正，各种增益，自动道均衡。

(7)各种滤波功能，反褶积，合成道分析，背景去除，削波恢复，时间-深度转换。

(8)谱分析，FK 分析。

(9)偏移，去除平均值，平均压缩及扩展等。

基本的处理命令有：

(1)数字 D-Filter/Subtract-DC-Shift: 一维滤波/去直流漂移。

(2)Static Correction/Movc start time: 静校正/移动开始时间。

(3)Gain/Energy decay: 增益/能量衰减。

(4)2D-Filter/Subtracting average: 二维滤波/抽取平均道。

(5)1D-Filter/bandpassbutterworth: 一维滤波/巴特沃斯带通滤波。

(6)2D-Filter/Running average: 二维滤波/滑动平均。

第三节 其他型号地质雷达简介

一、美国 SIR-20 型地质雷达技术指标



图 3.2 SIR-20 雷达主机和电池照片

表 3.3 SIR-20 型地质雷达基本技术指标

指标	配置	指标	配置
脉冲重复频率	64kHz	A/D 转换	16
样点数/道	128~2048	叠加次数	1~4096(自动叠加)
扫描速率	400 扫描/秒(500 扫描/秒, 双通道)	系统增益	160dB
时间窗宽度	0~8000ns	触发方式	距离/时间/手动
供电	12V 直流电源	天线兼容性	所有 SIR 系列天线

二、长春地质仪器厂生产的“桑德 12-C 型地质雷达”技术指标

表 3.4 桑德 12-C 型地质雷达基本技术指标

指标	配置	指标	配置
脉冲重复频率	115kHz	A/D 转换	16
样点数/道	128~512	迭加次数	1~4096 (自动叠加)
扫描速率	14 扫描/秒	系统增益	0~80dB
时间窗宽度	25~2000ns	供电	12V 直流电源

三、中国矿业大学(北京校区)生产的“GR 型地质雷达”技术指标

表 3.5 GR 型地质雷达基本技术指标

指标	配置	指标	配置
脉冲重复频率	100kHz	A/D 转换	16
样点数/道	128~2048	迭加次数	1~4096 (自动叠加)
扫描速率	128 扫描/秒	系统增益	150dB
时间窗宽度	6~1800ns	供电	12V 直流电源

四、中国电波传播研究所青岛分所生产的“LTD 系列地质雷达”技术指标

表 3.6 LTD 系列地质雷达基本技术指标

指标	配置	指标	配置
脉冲重复频率	64kHz	A/D 转换	12 或 16
样点数/道	128~2048	迭加次数	1~4096 (自动叠加)
扫描速率	8~128 扫描/秒	系统增益	160dB
时间窗宽度	25~5000ns	供电	12V 直流电源

第四章 隧道衬砌知识和评价标准

第一节 隧道衬砌设计知识

一、隧道衬砌类型

《铁路隧道设计规范》(TB10003—2005)第 7.1.1 条规定：“隧道应设衬砌，并应优先采用复合式衬砌，地下水不发育的 I、II 级围岩的短隧道，可采用喷锚衬砌。”

《京沪高速铁路设计暂行规定》(铁建设[2004]157号通知，2004年12月30日发布、实施)中，为保证隧道结构的耐久性，适当提高了隧道衬砌混凝土强度等级标准，并对高速铁路隧道衬砌做出了以下修订：

(1)应优先采用复合式衬砌，不得采用喷锚衬砌。

(2)隧道均应采用曲墙式衬砌，其中边墙与仰拱内轮廓的连接宜采用顺接断面。

(3)III~VI级围岩应采用曲墙带仰拱的衬砌，I、II级围岩地段可采用曲墙式加底板衬砌。

(4)各级围岩隧道衬砌结构混凝土强度等级不应低于 C₂₅，钢筋混凝土强度等级不应低于 C₃₀。

(5)仰拱填充混凝土强度等级不应低于 C_{25} 。I、II级围岩隧道衬砌结构底板厚度，双线隧道不应小于 30cm，单线隧道断面不应小于 25cm，混凝土强度等级不应低于 C_{30} ，并应配置钢筋。仰拱与仰拱填充混凝土应分开施工。

(6)采用复合式衬砌隧道，初期支护与二次衬砌之间应铺设防水板，防水板厚度不得小于 1.2mm。后期施作的隧道洞内埋设件，埋设深度应以不穿透二次衬砌为原则，以保护防水板。

复合式衬砌是指外层用喷锚作初期支护，内层用模筑混凝土作二次衬砌的永久结构。复合式衬砌中喷锚支护是柔性结构，充分利用围岩的自承能力和围岩密贴，共同变形。喷锚支护作为初期支护（当然也作临时支护用），和二次模筑混凝土都是永久结构受力的部分，且在设计上认为，复合式衬砌中的初期支护是受力的主要部分，承担了结构受力的 70%~80%。

喷锚衬砌是指以喷锚支护作永久性衬砌的通称，喷锚支护作为永久结构。

在《铁路隧道设计规范》中，围岩分为 I~VI级。在表 4.1 中，综合考虑了岩石坚硬程度、岩体完整程度与围岩基本分级的关系。

表 4.1 铁路隧道围岩基本分级

级别	围岩主要工程地质条件		围岩开挖后的 稳定状态(单线)	围岩弹性 波速 Vp(km/s)
	主要工程地质特征	结构特征和 完整状态		
I	硬质岩石 (饱和极限抗压强度 $R_b > 60\text{MPa}$): 受地质构造影响轻微, 节理不发育, 无软弱面 (或夹层); 层状岩层为厚层, 层间结合良好	呈巨块状整体结构	围岩稳定, 无坍塌, 可能产生岩爆	>4.5
	硬质岩石 ($R_b > 30\text{MPa}$): 受地质构造影响较重, 节理较发育, 有少量软弱面 (或夹层) 和贯通微张节理, 但其产状及组合关系不致产生滑动; 层状岩层为中层或厚层, 层间结合一般, 很少有分离现象; 或为硬质岩石偶夹软质岩石	呈大块状砌体结构	暴露时间长, 可能会出现局部小坍塌, 侧壁稳定, 层间结合差的半缓岩层, 顶板易塌落	$3.5 \sim 4.5$
II	软质岩石 ($R_b \approx 30\text{MPa}$): 受地质构造影响轻微, 节理不发育; 层状岩层为厚层, 层间结合良好	呈巨块状整体结构		

III	<p>硬质岩石 ($R_b > 30\text{MPa}$): 受地质构造影响较重, 节理发育, 有层状软弱面 (或夹层), 但其产状及组合关系尚不致产生滑动; 层状岩层为薄层或中层, 层间结合差, 多有分离现象; 或为硬、软质岩石互层</p>	<p>呈块 (石) 碎 (石) 状镶嵌结构</p>	<p>拱部无支护时可产生小坍塌, 侧壁基本稳定, 爆破震动过大易坍塌</p>	<p>2.5~4.0</p>
	<p>软质岩石 [$5\text{MPa} < R_b \leq 30\text{MPa}$]: 受地质构造影响较重, 节理发育; 层状岩层为薄层、中层或厚层, 层间结合一般</p>	<p>呈大块状砌体结构</p>		
IV	<p>硬质岩石 ($R_b > 30\text{MPa}$): 受地质构造影响严重, 节理很发育; 层状软弱面 (或夹层) 已基本被破坏</p>	<p>呈碎石状压碎结构</p>	<p>拱部无支护时可产生较大的坍塌, 侧壁有时失去稳定</p>	<p>1.5~3.0</p>
	<p>软质岩石 ($5\text{MPa} < R_b \leq 30\text{MPa}$): 受地质构造影响较重, 节理发育</p>	<p>呈块 (石) 碎 (石) 状镶嵌结构</p>		
	<p>1. 略具压密或成岩作用的粘性土及砂类土 2. 黄土 (Q_1、Q_2) 3. 一般钙质或铁质胶结的碎、卵石土、大块石土</p>	<p>1、2 呈大块状压密结构; 3 呈巨块状整体结构</p>		

续表

V	石质围岩位于挤压强烈的断裂带内, 裂隙杂乱, 呈石夹土或土夹石状	呈角(砾)碎(石)状松散结构	围岩易坍塌, 处理不当会出现大坍塌, 侧壁经常小坍塌, 浅埋时易出现地表下沉(陷)或坍塌至地表	1.0~2.0
	一般第四系的半干硬至硬塑的粘性土及稍湿至潮湿的一般碎、卵石土、圆砾、角砾土及黄土(Q ₃ 、Q ₄)	呈松散或松软状		
VI	石质围岩位于挤压极强烈的断裂带内, 呈角砾、砂、泥松软体	呈松软状	围岩极易坍塌变形, 有水时土、砂常与水一齐涌出, 浅埋时易坍塌至地表	<1.0 饱和状态的土<1.5
	软塑状粘性土及潮湿的粉细砂等	粘性土易蠕动, 砂性土潮湿松散		

注: 层状岩层的层厚划分标准为: 厚层>0.5m; 中厚层 0.1~0.5m; 薄层<0.1m。

根据隧道内围岩基本分级, 设计上采用不同的支护方式和衬砌类型。表 4.2~4.5 是铁路隧道衬砌设计的执行标准。

表 4.2 预留变形量

围岩级别	单线隧道	双线隧道
II	--	10~30mm
III	10~30mm	30~50mm
IV	30~50mm	50~80mm
V	50~80mm	80~120mm
VI	由设计确定	由设计确定

注: ①深埋、软岩隧道取大值; 浅埋、硬岩隧道取小值; ②有明显流变、原岩应力较大和膨胀性围岩, 应根据量测数据反馈分析数据确定。

表 4.3 单线隧道复合式衬砌的设计参数

围岩级别	初期支护						二次衬砌厚度/cm		
	喷射混凝土厚度/cm		位置	锚杆		钢筋网/cm	钢架	拱、墙	仰拱
	拱、墙	仰拱		长度/m	间距/m				
II	5	—	—	—	—	—	—	25	—
III	7	—	局部设置	2.0	1.2~1.5	—	—	25	—
IV	10	—	拱、墙	2.0~2.5	1.0~1.2	必要时设置 25×25	—	30	40
V	15~22	15~22	拱、墙	2.5~3.0	0.8~1.0	拱、墙、仰拱 20×20	必要时设置	35	40
VI	通过试验确定								

表 4.4 双线隧道复合式衬砌的设计参数

围岩级别	初期支护						二次衬砌厚度/cm		
	喷射混凝土厚度/cm		位置	锚杆		钢筋网/cm	钢架	拱、墙	仰拱
	拱、墙	仰拱		长度/m	间距/m				
II	5~8	—	局部设置	2.0~2.5	1.5	—	—	30	—

III	8~ 10	--	拱、 墙	2.0~ 2.5	1.2~ 1.5	必要 时设 置 25 ×25	—	35	45
IV	15~ 22	--	拱、 墙	2.5~ 3.0	1.0~ 1.2	拱、 墙、仰 拱 25 ×25	必要 时设 置	40	45
V	20~ 25	20~ 25	拱、 墙	3.0~ 3.5	0.8~ 1.0	拱、 墙、仰 拱 20 ×20	拱、 墙、 仰拱	45	45
VI	通过试验确定								

注：①采用钢架时，宜选用格栅钢架，钢架设置间距宜为 0.5~1.5m；
 ②对于 IV、V 级围岩，可视情况采用钢筋束支护，喷射混凝土厚度可取小值；
 ③钢架与围岩之间的喷射混凝土保护层厚度不应小于 4cm；临空一侧的混凝土保护层厚度不应小于 3cm。

表 4.5 喷锚衬砌的设计参数

围岩级 别	单线隧道	双线隧道
I	喷射混凝土厚度 5cm	喷射混凝土厚度 8cm，必要时设置锚杆，锚杆长 1.5~2.0m，间距 1.2~1.5m
II	喷射混凝土厚度 8cm，必要时设置锚杆，锚杆长 1.5~2.0m，间距 1.2~1.5m	喷射混凝土厚度 10cm，锚杆长 2.0~2.5m，间距 1.0~1.2m，必要时设置局部钢筋网

注：①边墙喷射混凝土厚度可略低于表列数值，当边墙围岩稳定时，可

不设置锚杆和钢筋网；②钢筋网的网格间距宜为 15~30cm，钢筋网保护层厚度不应小于 3cm

由于隧道衬砌类型的多样化，检测时需要向施工单位搜集被检测隧道的衬砌断面图，做为资料解释的依据。

图 4.1 和图 4.2 分别是 III 级围岩和 V 级围岩的一种设计断面图。

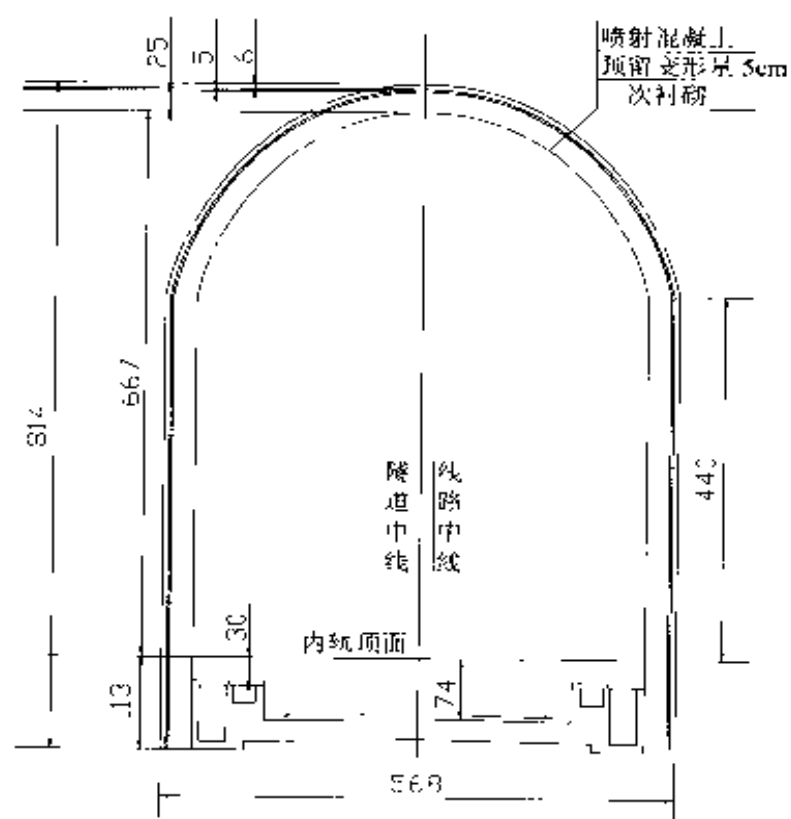


图 4.1 专隧(01)0014-9 的 III 级围岩直墙(双侧沟)复合式衬砌断面
单位(mm)

专隧(01)0014-9 设计图的参数为：初期支护喷射混凝土 6cm；
预留变形量 5cm；二次衬砌 25cm；隧道铺底 33cm。

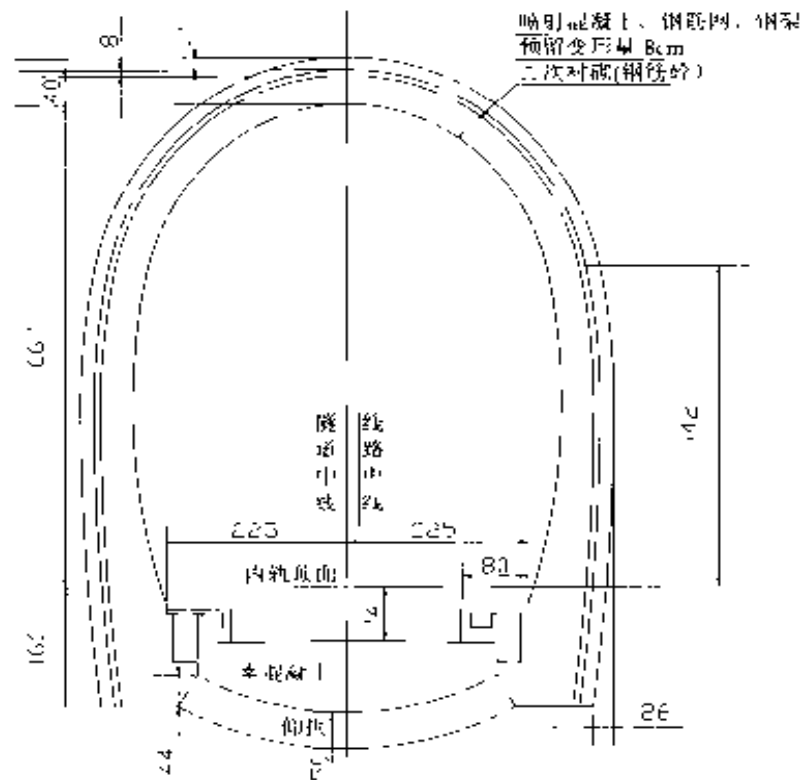


图 4.2 专隧(01)0014-13 的 V 级围岩曲墙(双侧沟)复合式衬砌断面
单位(mm)

专隧(01)0014-13 设计图的参数为：初期支护喷射混凝土 17cm，含钢筋网和钢架；预留变形量 8cm；二次衬砌拱顶 40cm，其他位置混凝土厚度需要计算；隧道仰拱 50cm，上面填充素混凝土最厚处 92cm。

二、隧道分部工程、分项工程设计要求

在隧道分部工程、分项工程设计要求中,对隧道的开挖、支护和衬砌有明确的要求,严格控制了超挖、欠挖的尺寸和面积,以及对出现问题的处理办法。表 4.6 列出了与隧道衬砌检测有关的几

项内容。

表 4.6 隧道分部工程、分项工程设计要求(部分)

分部工程	分项工程	设计要求												
洞口工程	1 开挖	<p>开挖范围及尺寸, (端墙、翼墙、挡土墙) 基底地基承载力</p> <p>欠挖: 隧道不应欠挖。当围岩完整、石质坚硬时, 方允许岩石个别突出部分(每 1m^2 不大于 0.1m^2) 侵入衬砌, 整体式衬砌应小于 10cm, 其他衬砌不应大于 5cm。拱脚和墙脚以上 1m 内断面严禁欠挖。</p> <p>超挖: 隧道开挖断面允许超挖值应符合下表的规定:</p> <table border="1" data-bbox="539 981 1417 1585"> <thead> <tr> <th rowspan="2">开挖部位 \ 围岩级别</th> <th>I</th> <th>II、III、IV</th> <th>V、VI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>拱部</td> <td>平均线性超挖 10cm 最大超挖值 20cm</td> <td>平均线性超挖 15cm 最大超挖值 25cm</td> <td>平均线性超挖 10cm 最大超挖值 15cm</td> </tr> <tr> <td>边墙</td> <td>平均 10cm</td> <td>平均 10cm</td> <td>平均 10cm</td> </tr> </tbody> </table>	开挖部位 \ 围岩级别	I	II、III、IV	V、VI	拱部	平均线性超挖 10cm 最大超挖值 20cm	平均线性超挖 15cm 最大超挖值 25cm	平均线性超挖 10cm 最大超挖值 15cm	边墙	平均 10cm	平均 10cm	平均 10cm
开挖部位 \ 围岩级别	I	II、III、IV		V、VI										
	拱部	平均线性超挖 10cm 最大超挖值 20cm	平均线性超挖 15cm 最大超挖值 25cm	平均线性超挖 10cm 最大超挖值 15cm										
边墙	平均 10cm	平均 10cm	平均 10cm											
洞身开挖	1 洞身开挖	<p>注: ①平均线性超挖值=超挖横断面积/爆破设计开挖断面周长(不包括隧底);</p> <p>②最大超挖值: 指最大超挖处至设计开挖轮廓切线距离;</p> <p>③炮眼深度大于 3m 时, 允许超挖值可根据实际情况另行规定</p>												

支护	2 隧底开挖	隧底开挖底部高程应符合设计要求。隧底范围岩石局部突出每平方米内不应大于 0.1m^2 ，侵入断面不大于 5cm 。隧底轮廓符合设计要求，隧底允许最大平均超挖值为 10cm
	1 喷射混凝土	喷射混凝土强度必须符合设计要求。混凝土的厚度应符合下列要求：平均厚度大于设计厚度；检查点数的 60% 及以上大于设计厚度；最小厚度不小于设计厚度的 $1/2$ ，且不小于 3cm
	2 锚杆	锚杆规格、安装数量、锚杆孔灌注效果
	3 钢筋网	规格、数量、结构尺寸达到设计要求
	4 钢架	规格、数量、结构尺寸达到设计要求
衬砌	1 混凝土	隧道衬砌厚度和超挖回填必须符合设计要求。墙脚以上 1m 范围内超挖部分应采用同级混凝土回填
	2 喷射混凝土	喷射混凝土强度必须符合设计要求。混凝土的厚度应符合下列要求：平均厚度大于设计厚度；检查点数的 60% 及以上大于设计厚度；最小厚度不小于设计厚度的 $1/2$ ，且不小于 3cm
	3 底板	底板厚度应符合设计要求。施作底板混凝土前应清除隧底虚碴、杂物和积水，当底板有超挖时，超挖部分必须按设计要求及时回填
	4 仰拱	仰拱厚度及各部尺寸应符合设计要求。施作仰拱
	5 仰拱充填	混凝土前应清除隧底虚碴、杂物和积水，超挖部分应采用同级混凝土回填
	6 回填注浆	采用无损检测、钻心、压水等验证注浆回填密实情况

第二节 掘进方式和衬砌工艺对衬砌质量的影响

一、铁路隧道的掘进方式

隧道掘进方式一般有整体掘进(TBM 隧道掘进机)和钻爆法掘进, 铁路隧道最常用的掘进方式是钻爆法。

钻爆法掘进采取分部开挖方式, 分台阶或全断面开挖, 掘进过程中采用爆破施工, 通过光面爆破控制洞身尺寸。

光面爆破(简称光爆)是现阶段铁路隧道广泛采用的开挖方式。先爆除主体开挖部分的岩体, 然后再起爆布置在设计轮廓线上的周边孔药包, 将光爆层炸除, 形成一个平整的开挖面, 通过岩壁上的炮孔痕迹率(也称半孔率)和围岩壁面不平整度(也称起伏差, 允许值 $\pm 15\text{cm}$)来评价其质量控制效果。

图 4.3 是光爆质量好的一个隧道段落, 照片中炮孔半孔率高, 壁面平整, 没有超挖、欠挖现象, 隧道洞身尺寸规则。

如果炸药量和孔位控制不好, 光爆效果差, 超挖、欠挖现象频繁出现, 会造成隧道断而出现锯齿状的起伏, 需要在初期支护时采用同级喷射混凝土喷平。



图 4.3 光爆质量好的隧道

二、隧道衬砌施工工艺对衬砌质量的影响

目前，常见的衬砌台车有拼装模板台车和整体模板台车。

1. 拼装模板台车

一般用于长度小于 1000m 的隧道。拼装模板台车长 7.2m，模板尺寸 1.2m×0.3m，采用人工输送混凝土或泵送混凝土方式，先墙后拱，边衬砌边振捣，一般 30cm 振捣一次。振捣质量靠人为控制，容易造成脱空。由于短小隧道围岩级别相对较差，加之施工时间短造成光爆经验欠缺，隧道的光爆效果一般难以控制，容易

出现超挖、欠挖现象。



图 4.4 拼装模板台车

2. 整体模板台车

一般用于长度超过 1000m 的隧道。整体模板台车长 9m 或 12m，衬砌采用高压泵输送混凝土方式，先墙后拱，分层振捣，一般每 50cm 振捣一次，在边墙、拱脚和拱顶设置振捣孔。由于台车本身有自振系统，衬砌混凝土能够振捣密实，只是在拱顶部位由于混凝土收缩拱顶容易出现脱空，但空隙一般小于 5cm。长、大隧道一般光爆效果好，较少出现超挖、欠挖的现象。



图 4.5 整体模板台车

第三节 隧道常见质量通病和处理措施

隧道施工过程中，超挖、欠挖、渗水等质量问题一直难以彻底根除，是隧道常见的质量通病，需要在隧道施工进行期间进行治理，同时，检测质量通病和评价治理效果也是地质雷达检测的一项主要内容。表 4.7 列出了施工阶段质量通病中与检测有关的几项内容。

表 4.7 隧道常见质量通病、产生原因和处理措施

序号	质量通病	产生原因	处理措施
1	开挖轮廓不好,超、欠挖严重	<ol style="list-style-type: none"> 1.没有根据围岩变化及时调整爆破参数。 2.周边眼位置不准确,外插角偏大或不一致 	<ol style="list-style-type: none"> 1.根据围岩情况进行爆破设计,并根据围岩变化及时调整爆破参数。 2.炮眼定位一定要准确,周边炮眼应平直、平行,数量应合适。 3.软弱围岩边墙宜采用预裂爆破,拱部宜采用光面爆破,并预留沉落量。 4.控制超、欠挖,欠挖应凿除,超挖部分应在初砌的同时用同级砼回填
2	偏压隧道初期支护开裂甚至发生位移,侵入限界	<ol style="list-style-type: none"> 1.施工前未对地质、地形进行认真调查分析,对偏压认识不足。 2.未对偏压进行预处理,盲目进洞。 3.未对地表裂隙进行封闭防水处理 	<ol style="list-style-type: none"> 1.施工前应对地质、地形进行充分调查分析,了解偏压力的大小并制定相应的措施。 2.做好地表的防水、排水工作。 3.提高对偏压隧道的认识,切忌盲目进洞、追求进度的思想
3	断层、破碎带坍塌	<ol style="list-style-type: none"> 1.未进行超前地质预报,对断层破碎带未做预处理。 2.未及时改变开挖及支护方法,盲目求进度 	加强超前地质预报,及时分析断层的特征,制定相应对策,如改变开挖方法、支护方法,调整爆破参数、增加超前预支护等措施,防止坍塌

4	衬砌渗水、漏水	<ol style="list-style-type: none"> 1.衬砌开裂。 2.防水排水引水设施不完善。 3.环保施工缝、变形缝处理有质量缺陷,止水条、止水带安设不规范。 4.防水板破损、穿孔、焊缝不严密。 5.衬砌衬砌不密实,存在空洞或蜂窝。 6.防水材料不合格 	<ol style="list-style-type: none"> 1.严格按设计和规范要求对防、排水工程实施质量监控。 2.铺设防水板前应将基面钢筋头、尖锐突出物进行清理,基面基本找平;防水板铺设应适当留有松弛度,防止浇筑砼时挤裂;防水板焊接要牢固,并对焊缝进行充气检查,确保质量达标。钢筋绑扎、焊接时应对防水板进行保护,发现破损及时修补。 3.加强防水材料质量控制,确保各项指标符合规范要求。 4.严格按施工规范处理施工缝、加强初砌浇筑过程控制。 5.加强变形缝、施工缝防水工程质量控制,衬砌端头衬砌中部应预留 1/2 止水条厚度的凹槽,确保止水条在施工缝的中间;变形缝止水带安装必须使用定位筋固定。 6.因地制宜地采取附加排水措施(暗沟、盲沟)。 7.必要时对洞身地层、衬砌背后实施防水或注浆处理
5	拱脚、墙脚以上1m范围内的超挖回填材料使用不当	未采用与初砌相同的同级混凝土回填,有的采用浆砌片石甚至采用干砌片石	加强监理旁站,对拱、墙脚1m范围内的超挖必须采用同级混凝土回填
6	初期支护或二	1.对超挖未按施工规范进行	1.加强质量意识教育,加大监理旁站力度,确保监控到位。

	次衬砌背后存在空洞	<p>回填。</p> <p>2. 衬砌时灌注砼不饱满, 振捣不够。</p> <p>3. 泵送砼在输送管口远端由于压力损失, 坡度等原因造成空洞。</p>	<p>2. 严格按施工规范对超挖部分实施背后回填 (同级砼、浆砌片石回填并注浆)。</p> <p>3. 尽可能挖掘好隧道超挖量。</p> <p>4. 衬砌时拱顶设溢浆管, 检查拱顶砼的饱满度。</p> <p>5. 适当增加拱部砼灌注口, 保证砼灌注饱满、密实</p>
7	支护和初砌厚度不足	<p>1. 承包人质量管理不严, 监理单位监控不到位。</p> <p>2. 开挖断面偏小或预留沉落量不足, 为满足净空而减少支护和衬砌厚度。</p> <p>3. 对欠挖部分未作处理</p>	<p>1. 加强开挖净空检查, 严格按设计和规范预留沉落量。</p> <p>2. 加强初期支护和初砌过程旁站监理。</p> <p>3. 对欠挖部分严格按规范要求进行处理, 达标后方可初支或实砌。</p> <p>4. 适时开孔检查支护和衬砌厚度, 对衬砌厚度不足部分应开天窗, 凿除欠挖部分围岩, 用同级砼回填或注浆回填</p>
8	初砌砼开裂	<p>1. 温差和砼干缩。</p> <p>2. 碱性骨料化学反应。</p> <p>3. 边墙基础下沉。</p> <p>4. 洞身偏压。</p> <p>5. 仰拱与边墙结合部位因应</p>	<p>1. 砼加入合理的外加剂。选择合适的骨料。</p> <p>2. 采取隔离措施, 减少初期支护对二衬的约束。</p> <p>3. 改进砼浇筑工艺, 加强振捣和养护。</p> <p>4. 在易开裂部位植筋。</p> <p>5. 放慢边墙砼灌注速度, 并分段分层灌注, 待边墙稳定后再浇筑拱部砼。</p> <p>6. 必要时对围岩实施锚杆、注浆等措施预加固, 以防止围岩蠕变过大而使衬砌砼受</p>

		力集中而开裂。 6.拱部砼滞中 断而引起开裂。 7.拆模时间太 早,衬砌砼强度 不足以支撑自 身重量而开裂	力,导致开裂。 7.边墙基础浮渣必须清理干净,使边墙底部 与隧底紧密结合。 8.结构交叉部位(如避车洞、横洞)应做加 强处理,防止因应力集中而引起开裂。 9.控制拆模时间:对不受围岩应力的衬砌, 砼的强度达到 2.5MPa,承受围岩应力较小 的应达到设计强度的 70%、对承受围岩 应力的砼应达到设计强度的 100%方可拆 模。 10.偏压隧道应对偏压进行预处理后再实施 衬砌
--	--	---	---

第四节 铁路运营隧道安全等级评定标准

隧道质量缺陷发展到隧道病害,并对铁路运营造成影响,需要一定的时间和环境,因此,现阶段,对于新建隧道质量缺陷的严重程度尚没有统一的规定。运营隧道检测质量评价主要依据以下两个标准。

一、“铁路桥隧建筑物劣化评定标准”的内容

对于运营隧道,在铁道部 1997 年的推广标准《铁路桥隧建筑物劣化评定标准》(TB/T 2820.2-1997)中,根据不同病害的发育程度和对运营造成的影响,将隧道劣化、劣损以及各种病害按照发展程度划分为 A、B、C、D 四个等级。表 4.8~表 4.17 列出了隧道劣化、劣损等级评定标准和具体病害内容,供参考。

1. 隧道劣化等级划分

表 4.8 隧道劣化等级划分

劣化等级		对结构功能和行车安全的影响	措施
A	AA(极严重)	结构功能严重劣化, 危及行车安全	立即采取措施
	A1(严重)	结构功能严重劣化, 进一步发展危及行车安全	尽快采取措施
B(较重)		劣化继续发展会升至 A 级	加强监视, 必要时采取措施
C(中等)		影响较小	加强检查, 正常维修
D(轻微)		无影响	正常保养及巡检

2. 隧道衬砌裂损劣化评定

表 4.9 隧道衬砌裂损类型

衬砌裂损类型		形成原因
变形	横向变形	衬砌由于受力原因而引起拱轴形状的改变, 是主要变形
	纵向变形	---
移动	横向移动	衬砌的整体或其中一部分出现转动(倾斜)、平移和下沉(或上抬)等变化。有横向移动和纵向移动之分, 对于大多数已经发生裂损的衬砌, 两种情况往往同时出现
	纵向移动	
开裂	张裂	弯曲受拉和偏心受拉引起的裂损。裂缝、裂面与应力方向正交, 缝宽由表及里逐渐变窄
	压溃	弯曲或偏心受压引起的衬砌裂损, 裂缝边缘呈压碎状, 严重时受压区表面产生碎片剥落、掉块等现象
	错台	由剪切力引起的裂缝。裂缝宽度在表面与深处大致相同, 衬砌在裂缝两侧沿剪切方向有错动, 形成错台

表 4.10 隧道衬砌裂损劣化评定等级

裂损等级		裂损类型		
		变形或移动	开裂、错台	压溃
A	AA(极严重)	滑坡滑动使衬砌移动加速; 衬砌变形、移动、下沉发展迅速, 威胁行车安全	开裂或错台长度 $L > 10\text{m}$, 宽度 $\delta > 5\text{mm}$, 且变形继续发展; 拱部开裂呈块状, 有可能掉落	拱顶压溃范围 $S > 3\text{m}^2$; 或衬砌剥落最大厚度大于衬砌厚度的 $1/4$, 发生时可能危及行车安全
	A1(严重)	变形或移动速率 $V > 10\text{mm}/\text{年}$	开裂或错台长度 $10\text{m} \geq L \geq 5\text{m}$, 但宽度 $\delta > 5\text{mm}$; 开裂或错台使衬砌呈块状, 在外力作用下有可能崩坍或剥落	压溃范围 $3\text{m}^2 \geq S \geq 1\text{m}^2$; 或有可能掉块
B(较重)		变形或移动速度在 $10\text{mm}/\text{年} \geq V \geq 3\text{mm}/\text{年}$, 而且有新的变形出现	开裂或错台长度 $L < 5\text{m}$ 且宽度 $5\text{mm} \geq \delta \geq 3\text{mm}$; 裂缝有发展, 但速度不快	剥落规模较小, 但可能对列车造成威胁; 拱顶压溃范围 $S < 1\text{m}^2$. 剥落块体厚度大于 3cm
C(中等)		有变形, 但速率 $V < 3\text{mm}/\text{年}$	开裂或错台长度 $L < 5\text{m}$ 且宽度 $\delta < 3\text{mm}$. 一般龟裂或无发展状态	压溃范围很小
D(轻微)		有变形, 但不发展, 而且对使用无影响。	一般龟裂或无发展状态	个别地方被压溃

3. 隧道结构渗漏水劣化评定

表 4.11 隧道渗漏水类型

渗漏水类型	形成原因
漏水和涌水	隧道围岩的地下水, 或洞顶地表水直接地(无衬砌)和间接地(通过衬砌的薄弱环节)以渗、滴、漏、淌、涌等形式进入隧道内所造成的危害, 是隧道中最常见的一种病害
衬砌周围积水	隧道建成后, 地表水或地下水向隧道周围渗流汇集, 如不能及时排走将引起隧道出现病害, 称为积水
潜流冲刷	由于地下水渗流和流动对隧道衬砌或围岩产生的冲刷和溶蚀作用而引起的隧道病害
水蚀	围岩中地下水因含有盐类、酸类和碱类等化学成分, 对混凝土衬砌起腐蚀作用而形成的病害(水蚀病害)

表 4.12 pH 值与隧道衬砌腐蚀程度等级

等级		pH 值	对混凝土的作用
A	AA(极严重)	---	---
	A1(严重)	<4.0	水泥被溶解, 混凝土可能会出现崩裂
B(较重)		4.1~5.0	在短时间内混凝土表面凹凸不平
C(中等)		5.1~6.0	混凝土表面容易变酥、起毛
D(轻微)		6.1~7.9	目视混凝土表面有轻微腐蚀现象

表 4.13 渗漏水对隧道功能影响程度的评定

漏水或涌水的危害等级		隧道状态
A	AA(极严重)	水突然涌入隧道, 淹没轨面, 危及行车安全; 电力牵引区段, 拱部漏水直接传至接触网。

	A1(严重)	隧底冒水、拱部滴水成线，严寒地区边墙滴水，造成严重翻浆冒泥、道床下沉，不能保持正常轨道的几何状态，危害正常运行
	B(较重)	隧道滴水、淌水、渗水及排水不良引起洞内局部道床翻浆冒泥
	C(中等)	漏水使基床状态恶化，钢轨腐蚀，养护周期缩短，继续发展将来会升至 B 级
	D(轻微)	有漏水，但对列车运行及旅客安全无威胁，并且不影响隧道的使用功能

4. 隧道冻害劣化评定

在严寒地区，地下水或地表水进入隧道后，冻结成冰，造成隧道功能损害，称为冻害。

表 4.14 隧道冻害类型

冻害类型	形成原因
挂冰	衬砌背后的地下水，从衬砌漏出过程中逐渐冻结，形成挂冰，悬挂的叫冰溜(多发生在拱顶范围)，如漏水沿衬砌表面漫流而下，在边墙上形成冰柱或侧冰
冰锥	衬砌漏水落在道床上，逐渐冻结，生成丘状冰锥；如衬砌漏水和涌水沿隧底流淌，逐渐冻结，形成冰漫型冰锥
冰塞	隧道内排水设备如果没有可靠的防冻措施，就可能在某一处先行结冰，逐渐造成堵塞，这种现象称冰塞
冰楔	衬砌背后积水，冻结后体积膨胀，对衬砌产生冰劈作用或冰压力，使之变形破坏，称为冰楔病害
围岩冻胀	隧道周围围岩具有冻胀性，受冻后自身体积膨胀，挤压衬砌使衬砌变形开裂，使线路存融翻浆，洞门墙、翼墙前倾开裂，洞

	口边、仰坡冻融坍塌，这些病害称为围岩冻胀病害
衬砌材质冻融破坏	衬砌的孔隙和裂隙被围岩地下水充满，经反复冻融，材质结构遭受破坏作用，变得酥松、酥碎、剥落而破坏。这种病害在蒸汽机车牵引地段的隧道内，拱顶特别严重
衬砌冷缩开裂	隧道衬砌修筑和合拢时的气温一般在0℃以上，修成后遇低温作用，衬砌会产生明显的冷缩环向裂纹，称为衬砌冷缩开裂。一般产生在洞口比较多

表 4.15 冻害对隧道功能影响程度的等级评定

冻害等级		隧道状态
A	AA(极严重)	冰溜、冰柱、冰锥等不断发展，侵入限界，危及行车安全；接触网及电力、通讯、信号的架线上挂冰，危及行车安全和洞内作业人员安全；道床结冰(丘状冰锥)，覆盖轨面，严重影响行车安全
	A1(严重)	避车洞结冰不能使用，严重影响洞内作业人员的安全；冰楔和围岩冰胀的反复作用使衬砌变形、开裂并构成纵横交错的裂缝
B(较重)		冻融使衬砌破坏比较严重；冻融使道床翻浆冒泥、轨道几何尺寸恶化
C(中等)		冻害造成衬砌变形、开裂，但裂缝未形成纵横交错；冻融使衬砌破坏，但不十分严重；冻害使洞内排水设备破坏；冻融使线路的养护周期缩短
D(轻微)		有冻害，但对行车安全无影响，对隧道使用功能影响轻微

5. 隧道衬砌材料劣化评定

隧道衬砌材料劣化是指修建衬砌的材料(砖、石块、混凝土等)在大气、水、烟、盐等侵蚀介质作用下发生的劣化现象。

表 4.16 铁路隧道衬砌材料劣化类型

劣化类型		形成原因
混凝土衬砌的腐蚀		混凝土衬砌由于长时间使用，当受到侵蚀介质经常作用时，会出现混凝土强度降低、起毛、酥松、麻面蜂窝、起鼓剥落、孔洞露石、骨料分离等材质破坏。有的用手可捏成粉末，严重者呈豆腐渣状
砌块衬砌的腐蚀	灰缝腐蚀	灰缝失去粘结力和抗压强度，因而发生灰缝脱落、砌块松动，严重的可导致衬砌变形，沿灰缝开裂和掉块，失去支护围岩的能力
	砌块腐蚀	用砖、石块修建的衬砌风华剥落的现象

表 4.17 衬砌材料劣化等级评定

衬砌材料劣化等级		衬砌材料劣化类型	
		混凝土衬砌腐蚀	砌块衬砌腐蚀
A	AA(极严重)	衬砌材料劣化严重，经常发生剥落，危及行车安全；厚度为原设计厚度的 3/5，混凝土强度大大下降	拱部接缝劣化严重，拱部衬砌有可能掉落大块体(与砌块大小一样)
	AI(严重)	衬砌材料劣化，稍有外力或震动，即会崩塌或剥落，对行车产生重大影响；腐蚀深度 10mm，面积达 0.3m ² ；衬砌有效厚度为设计厚度约 2/3	接缝开裂，其深度 ≥ 10cm，砌块错落大于 1cm
B(较重)		衬砌剥落，材质劣化，衬砌厚度减少，混凝土强度有一定的降低	接缝开裂，但深度 < 10cm 或砌块有剥落，但剥落体在 40mm 以下
C(中等)		衬砌有剥落，材质劣化，但发展较慢	接缝开裂，但深度不大，或砌块有风化剥落，但块体很小
D(轻微)		衬砌有起毛或麻面蜂窝现象，但不严重	砌块有轻微风化

二、《铁路运营隧道衬砌安全等级评定暂行规定》的内容

《铁路运营隧道衬砌安全等级评定暂行规定》(铁运函[2004]174号发布,2004年6月1日起试行)中,规定了适用于行车时速160km以下的单线铁路运营隧道评定标准,双线或多线铁路隧道可参照执行,新建铁路隧道竣工交验时衬砌质量评定亦可参照执行。

1.基本术语

隧道衬砌状态:作为隧道主要承载结构的衬砌(包括仰拱、底板)的状态。

内部结构:衬砌内部钢筋及钢架的分布情况。

内部缺陷:衬砌内部的空洞、蜂窝、疏松等缺陷。

基床:仰拱(含回填混凝土)、底板的通称。

基底:基床底部与围岩连接处,简称基底。

基底不密实:基底有虚碴、淤泥或吊空充泥充水。

净空不足:衬砌内部实际拥有的空间不能满足隧道建筑限界的要求,习称限界不足。

2.衬砌安全等级评定程序

衬砌安全等级评定按照表4.18的步骤进行。

表 4.18 衬砌安全等级评定程序

步骤	评定程序	工作内容
1	搜集资料	①隧道修建资料：工程地质及水文地质资料、隧道设计图、竣工图、施工记录、工程日志、工程总结等。②隧道运营资料：检查记录，抽检评定记录，状态报告，大修及技改记录，病害观测记录及隧道设备图表等
2	病害调查与观测	采用目视、摄影或仪器量测等方法，内容包括：衬砌渗漏水、衬砌裂纹、衬砌位移或变形、衬砌净空变化、衬砌腐蚀、衬砌压溃或剥落、整体道床裂损、仰拱或底板裂损、基床软化及翻浆等病害情况。必要时调查山顶变形开裂、塌陷资料
3	衬砌状态检测	①衬砌厚度及内部钢筋、钢架设置情况；②衬砌混凝土强度；③衬砌内部缺陷情况；④衬砌背后有空洞及回填状况(按不密实、密实分类)；⑤仰拱、底板裂损及基底密实情况；⑥衬砌背后及基底地下水状况(地下水是否发育，水质有无腐蚀性)
4	资料分析	数据处理、解释成图
5	安全等级评定	评价隧道安全等级

3. 隧道衬砌状态分类

根据保证隧道衬砌正常使用和行车安全的要求，衬砌状态分为完好、缺陷、病害三类(表 4.19)。

表 4.19 隧道衬砌状态分类

隧道衬砌状态	说明
完好	隧道衬砌结构状态符合设计要求，无任何缺陷或病害
缺陷	隧道交付运营时业已存在的可见的或隐蔽的质量缺陷，主要指衬砌厚度不足、衬砌混凝土强度不足、衬砌背后有空洞或回填不密实、基底不密实等

病害	隧道交付运营时业已存在的或运营期间出现的影响衬砌使用寿命或行车安全的劣化状态, 主要指衬砌漏水、衬砌位移或裂纹、衬砌变形、净空不足、衬砌压溃或剥落、衬砌腐蚀、整体道床裂损、仰拱或底板裂损、基床软化及翻浆等
----	--

4. 隧道衬砌厚度及混凝土强度缺陷的量化指标

隧道衬砌存在缺陷及病害时, 为了病害整治与工程质量评定的需要, 可按隧道衬砌缺陷与病害项目以及严重程度划分为轻微、较严重、严重、极严重四个等级(表 4.20)。

表 4.20 隧道衬砌厚度及混凝土强度缺陷的量化指标

缺陷项目	严重程度	缺陷等级			
		1	2	3	4
		轻微	较严重	严重	极严重
衬砌混凝土厚度不足	$1 > h_1/h \geq 0.90$	L_c 不限	---	---	---
	$0.90 > h_1/h \geq 0.75$	$L_c < 5$	$L_c \geq 5$	---	---
	$0.75 > h_1/h \geq 0.60$	---	$L_c < 5$	$L_c \geq 5$	---
	$h_1/h < 0.60$	---	---	$L_c < 5$	$L_c \geq 5$
衬砌混凝土强度不足	$1 > q_1/q \geq 0.85$	L_q 不限	---	---	---
	$0.85 > q_1/q \geq 0.75$	$L_q < 5$	$L_q \geq 5$	---	---
	$0.75 > q_1/q \geq 0.65$	---	$L_q < 5$	$L_q \geq 5$	---
	$q_1/q < 0.65$	---	---	$L_q < 5$	$L_q \geq 5$

注: 1. 检测衬砌厚度当相邻测线 3 条及以上均连续不足时, 其缺陷等级应提高一级。

2. 检测断面衬砌混凝土的最低强度当低于平均值的 0.85 时, 其缺陷等级应提高一级。

3. 表中数据用于双线及多线铁路隧道时, 应适当修正测线连续长度。

4. 符号说明: h -设计衬砌厚度; h_1 -检测衬砌厚度, 当衬砌混凝土存在内

部缺陷时，检测衬砌厚度应换算为有效衬砌厚度，即将检测衬砌厚度减去内部缺陷削弱的一部分厚度； q -设计衬砌混凝土强度； q_1 -检测断面衬砌混凝土测点的平均强度； L_c -检测衬砌厚度不足地段的测线连续长度； L_q -检测衬砌混凝土强度不足地段的测线连续长度。

5. 隧道衬砌背后有空洞或回填不密实、基底不密实的量化指标(表 4.21)。

表 4.21 隧道衬砌背后有空洞或回填不密实、基底不密实的量化指标

缺陷项目	测线连续长度/m	缺陷等级			
		1	2	3	4
		轻微	较严重	严重	极严重
衬砌背后空洞	有空洞	$kL_c \leq 1$	$1 < kL_c \leq 3$	$3 < kL_c \leq 5$	$kL_c > 5$
回填不密实	不密实	$sL_c \leq 3$	$3 < kL_c \leq 9$	$9 < kL_c \leq 15$	$kL_c > 15$
基底不密实	不密实	$dL_c \leq 3$	$3 < kL_c \leq 9$	$9 < kL_c \leq 15$	$kL_c > 15$

注：1.衬砌背后未回填深度及直径大于 10cm，即属于有空洞。

2.衬砌背后有空洞或回填不密实，当位于拱脚以上 1m 范围内时，其缺陷等级应提高一级。

3.表中数据用于双线及多线铁路隧道时，应适当修正测线连续长度。

4.符号说明： kL_c -衬砌背后回填有空洞地段的测线连续长度； sL_c -衬砌背后回填不密实地段的测线连续长度； dL_c -基底不密实地段的测线连续长度。

6. 隧道衬砌病害的量化指标(表 4.22)。

表 4.22 隧道衬砌病害的量化指标

序号	病害项目	病害等级			
		轻微	较严重	严重	极严重
1	衬砌漏水	拱部有季节性滴水，边墙有季节性滴水	拱部有滴水，边墙有滴水	拱部滴水成线、边墙有滴水流泥、隧底涌水、结冰侵限	拱部漏水直击接触网，影响正常运营

2	衬砌裂纹	衬砌有收缩裂纹或环向裂纹	裂纹多于3条、有交叉; 裂纹长度小于5m、宽度小于3mm	裂纹呈网状、有剥落掉块可能; 裂纹长度5~10m, 宽度3~5mm; 裂纹错位长度小于5m、宽度小于3mm	裂纹呈网状、有剥落掉块; 裂纹长度大于10m, 宽度大于5mm; 裂纹错位长度大于5m、宽度大于3mm
3	衬砌位移或变形(以速度V计)	---	$V < 3\text{mm/年}$	$3\text{mm/年} \leq V \leq 10\text{mm/年}$	$V > 10\text{mm/年}$
4	净空不足	---	侵入隧道建筑限界	侵入直线建筑, 接近限界	侵入超级超限货物装载限界
5	衬砌压溃或剥落	衬砌有局部风化剥落	拱部压溃范围小于 1m^2 , 剥落掉块厚度小于30mm	拱部压溃范围大于 1m^2 、小于 3m^2 , 剥落掉块厚度30~50mm	拱部压溃范围大于 3m^2 , 剥落掉块厚度大于衬砌设计厚度的1/4
6	衬砌腐蚀	---	衬砌腐蚀厚度小于设计厚度的1/5	衬砌腐蚀厚度大于设计厚度的1/5, 小于或等于2/5	衬砌腐蚀厚度大于设计厚度的2/5
7	整体道床破损	整体道床有局部轻微裂损	整体道床变形、错牙、下沉小于3mm	整体道床变形、错牙、下沉小于3~5mm, 可能影响轨道稳定	整体道床变形、错牙、下沉大于5mm, 已经影响轨道稳定
8	仰拱或底板裂损	连续长度小于或等于1m	连续长度大于1m、小于或等于3m	连续长度大于3m、小于或等于5m	连续长度大于5m

9	基床软化、翻浆	基床局部软化、翻浆	基床软化、翻浆，轨道几何尺寸变化较小	基床软化、翻浆较严重，轨道几何尺寸变化较大	基床软化、翻浆严重，轨道几何尺寸变化异常
---	---------	-----------	--------------------	-----------------------	----------------------

注：1.衬砌裂纹均指尚在发育中的裂纹。当裂纹已经稳定，其病害程度应降低一级；当裂纹发展较快，其病害程度应提高一级。

2.衬砌裂纹呈密集状态，平行裂纹多余3条或出现大量环向非施工缝裂纹时，其病害等级应提高一级。衬砌裂纹如以斜向受力裂纹为主，其病害等级应提高一级。

3.发现衬砌有位移或变形时，用净空位移计量测其发展速度；当衬砌位移或变形发展趋势呈加速趋势时，其病害等级应提高一级。衬砌位移或变形发展速度 V 的变形值，是基于直边墙无仰拱的衬砌结构，当为曲边墙有仰拱的衬砌结构时，其病害等级应提高一级。

4.在仰拱或底板裂损病害项目中，其裂损连续长度值是基于底板结构，当为仰拱结构时，其病害等级应提高一级。

5.因滑坡或其他原因增加外力引起的衬砌裂纹、变形或轨道中线位移，其病害量化指标应另行确定。

7. 隧道衬砌安全等级评定标准

隧道衬砌的安全等级，可按衬砌状态及危及行车安全的程度划分为完好(D)、轻微(C)、较严重(B)、严重(AI)、极严重(AA)五类(表4.23)。

表 4.23 隧道衬砌安全等级评定标准

项目	安全等级										
	D	C	B			AI			AA		
	完好	轻微	较严重			严重			极严重		
衬砌病害等级	无病害	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4

续表

衬砌缺陷等级	无缺陷	1	2	1	1* 3* 4*	3	2	1* 2* 4*	4	3	1* 2* 3*
围岩级别	--	--	--	IV ~ VI	--	--	IV ~ VI	--	--	IV ~ VI	--
地下水状况	--	--	--	发育	--	--	发育	--	--	发育	--
对行车安全的影响	--	对行车安全无影响	病害有发展,对行车安全尚未产生影响			病害发展较快,存在危及行车安全的可能			病害已经危及行车安全		

注:表中当衬砌缺陷等级为注有“*”者的等级时,该段衬砌安全等级应通过综合判释确定。

8. 其他说明

(1)根据隧道衬砌缺陷及病害的分布情况,应分段评定隧道衬砌缺陷及病害的等级。当同一地段有多项缺陷或病害项目时,应按严重程度最高的项目判定其等级。

(2)隧道衬砌安全等级分段评定时,其每段的长度不宜小于隧道内净空最大宽度。否则,应视为相邻段病害等级中高等级地段。

(3)隧道衬砌安全等级不仅与竣工时衬砌的状态有关,而且与运营期间通过的机车车辆轴重、运量及养护维修是否到位有关。推定隧道衬砌状态的变异原因时,除应充分考虑各种因素的影响外,尤应注意具有主导性的因素。

(4)对照隧道衬砌的量化指标及衬砌病害的量化指标，分段评定隧道衬砌缺陷及隧道衬砌病害等级。依据分段评定的衬砌病害及缺陷等级，结合隧道工程地质、水文地质及对行车安全的影响，按评定标准综合评定该段隧道衬砌的安全等级。一座隧道衬砌的安全等级，应在分段评定的基础上，按各段中病害最严重地段的安全等级确定。

(5)仰拱或底板是隧道衬砌的重要组成部分，在运营条件下，作为道床的基础直接承受来自机车车辆的冲击荷载。隧道仰拱或底板底部不密实，会使基床破损、道床下沉、轨道几何尺寸变化异常，影响正常运输和行车安全。

在隧道施工过程中，仰拱或底板总是最后一个施工环节(目前已有仰拱先行或隧道衬砌一次灌注成环的新工艺)，基底往往留有虚碴、淤泥或杂物，难以保证仰拱或底板与基底围岩密贴，给以后运营留下隐患。在运营隧道病害中，隧道基底病害始终为诸病害之首，影响运输最为严重。

隧道基底病害只能从道床翻浆变形现象推断基底病害情况，再通过少量的挖探坑进行研究，难以对隧道仰拱或底板整体状况做出正确判释，不能对病害进行全面的彻底根治。如果在发生病害之前采用地质雷达方法，探明整个隧道隧底的整体状况，再和挖探相结合，查明隐伏病害性质和规模，有针对性的进行治疗，则能够达到事半功倍的效果。

第五章 隧道检测工作布置

第一节 检测前的准备工作

在开始检测前，需要进行前期准备工作，具体有以下几项内容。

一、隧道踏勘，检查工作条件

检测前需要对隧道进行踏勘，了解工作条件，保障检测工作能够得以顺利进行。

(1)了解隧道高度，运营线路量测隧道拱顶到轨面的高度，新建线路量测隧道拱顶到隧底的高度，为搭建检测台车提供尺寸数据。

(2)用明显标记，按照 5m 点距在边墙上标明隧道里程或洞身标。

(3)搜集衬砌设计资料和竣工资料，了解施工过程中出现的灾害地质情况和处理方法，并记录其准确位置。

(4)记录隧道中避车洞、下锚段、电缆位置，统计隧底积水段落，对衬砌表面潮湿或有凝结水珠的部位进行统计，记录已发病害的位置和类型。

(5)制订对可能影响到检测台车行进的障碍物的处理办法。

(6)查明附近是否有对雷达产生影响的电磁干扰源。

(7)运营隧道检测需要明确天窗时间。

二、确定测线位置，搭建检测台车

隧道检测一般在拱顶、拱腰、边墙和仰拱位置布置 6 条测线，如图 5.1。拱腰测线在拱脚上方 0.5~1.0m 位置，边墙测线在边沟盖板上方 1.5~2.0m 位置，拱顶和仰拱测线布置在正中间。

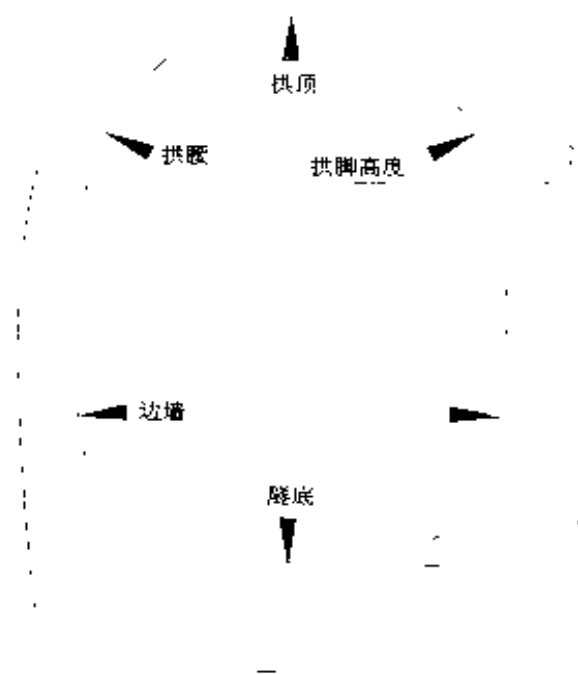


图 5.1 雷达测线布置图

根据测线位置，确定检测平台高度，一般上层平台离拱顶 1.8~2.0m，中间平台与拱脚等高，平台整体不能侵限。同时，台车要求运行平稳，台架稳固。

图 5.2 是检测新建铁路隧道时搭建的检测台车，用于在建隧道衬砌检测。台车双层平台铺满木板，便于人员工作。



图 5.2 新建隧道搭建简易检测台车

图 5.3 是利用工程检修车做为平台检测运营隧道。



图 5.3 运营隧道检测

第二节 选择雷达工作参数

进行现场数据采集时，需将发射和接收天线与隧道衬砌表面密贴，沿测线滑动，由雷达主机高速发射电磁波脉冲，进行快速连续采集。雷达时间剖面上的各测点的位置要和隧道里程相联系。

一、工作参数选择

测量参数选择合适与否关系到数据采集质量的好坏。测量参数包括天线中心频率、时窗、采样率、测点点距、距离校准方式以及发射、接收天线间距(对不屏蔽天线而言)等。

1. 天线中心频率

天线中心频率选择需兼顾目标体最小尺寸和天线尺寸是否符合场所需要。在满足分辨率和场所条件又许可时，应该尽量使用中心频率低的天线。如果探测深度小于目标深度，需降低频率以获得适宜的探测深度。

衬砌检测中，由于隧道内存在台车、机械等铁磁性物品，需要采用屏蔽天线。一般来讲，衬砌厚度小于 30cm 时采用 900MHz 天线，衬砌厚度 30~70cm 时采用 400MHz 或 500MHz 天线，衬砌厚度大于 70cm 要考虑选用 250MHz 或更低频率的天线。

2. 时窗

时窗选择主要取决于最大探测深度 d (单位: cm) 与混凝土的

电磁波速度 V (单位:cm/ns)。时窗 W (单位: ns)可由下式结算:

$$W=2d/V$$

实际工作中,时窗的选用值要增加 50%,做为混凝土速度与目的层深度变化所留出的余量,一般将主要目的层的反射相位放在图像上方三分之一的部位。

确定时窗后,根据时间窗大小调节采样率(或采样间隔)和采样点数。

3.采样率、采样频率和采样点数

采样率是记录的反射波采样点之间的时间间隔。采样抽取的原则应满足尼奎斯特(Nyquist)采样定律,即采样频率应大于信号频率的两倍($f_s \geq 2f_a$)。

以混凝土为例,假定电磁波速度 12cm/ns,如果存在纵向 6cm 空隙,那么信号频率 2GHz,要求采样频率大于(或等于)4GHz,此时的采样率应小于(或等于)0.25ns。如果时间窗口为 100ns,那么采样点数应不小于 400 点。

4.测点点距

测点点距根据需要解决的地质问题决定,一般每个异常体必须有 5 条以上的扫描道通过。

考虑到解决问题的精度,隧道衬砌检测中,采用 400MHz 屏蔽

天线时，一般两个扫描线之间距离为 3~6cm 时，在雷达记录上横向尺寸 20cm 的缺陷肉眼可以识别，过大或过小都影响记录面貌。

5. 距离记录方式

隧道检测一般采用时间记录方式，手动打标记，在检测运营隧道时，可以结合测量轮进行距离校准。不论采用什么记录方式，都要求 5m 做一个标记，并每隔 100m 进行一次距离校准。

6. 天线发射、接收间距选择

当使用分离式发射，接收天线时，适当选取发射天线与接收天线之间的距离，可使来自目标体的回波信号增强。对于偶极天线，接收方向增益在临界角方向最强，因此天线间距的选择应使最深目标体相对接收天线与发射天线的张角为临界角的 2 倍。

7. 天线的取向

天线的取向要保证电场的极化方向平行于目标体的长轴或走向方向(天线上已经用箭头标出)。

二、数据采集中的注意事项

仪器参数确定后，就可以开始检测工作。检测过程中，必须注意以下几点，以保证检测数据的合理性和真实性：

(1)密切注意雷达图像的变化，对图像异常段做好记录，必要时进行复检。

(2)控制天线耦合情况，保证天线密贴检测面，减少晃动。

(3)保证检测车平稳匀速直线行进，中间尽量减少停顿，并记录停顿位置。



图 5.4 检测隧道拱腰部位

图 5.4 是检测运营隧道拱腰部位时，利用三个人扶持天线，保证天线处于正常的行进工作状态。

第六章 雷达图像分析和衬砌质量评价

第一节 质量缺陷成因分析及其雷达图像特征

从地质雷达检测评价的角度来看，隧道衬砌质量合格的标准包括开挖断面达到设计要求，初期支护数量达到设计标准，围岩、初喷混凝土、二衬混凝土间结合紧密等几项内容，如果达到上述标准，由于混凝土和围岩的电特性相似，介电常数接近，雷达图像是难以分辨出衬砌界面的，这也是隧道边墙资料分析困难的原因。实际情况是，大部分隧道衬砌质量不能全部满足上述合格标准，缺陷类型多种多样，由此产生的雷达图像也是千差万别。图 6.1 是某隧道的一段衬砌质量合格的雷达图像，光爆效果好，没有超挖和欠挖。由于混凝土收缩形成小于 2cm 的空隙，雷达反映界面清晰(白色亮线)。

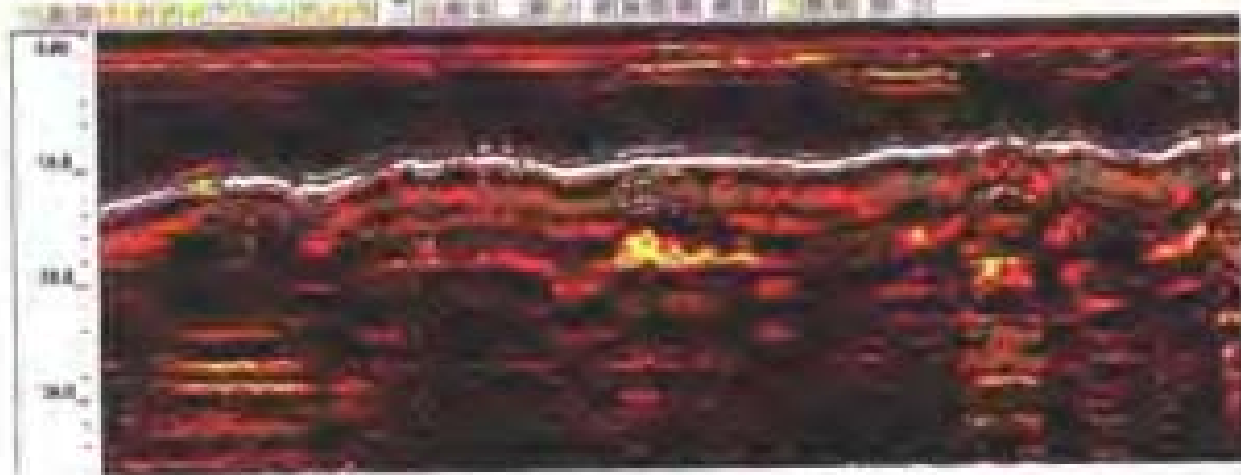


图 6.1 衬砌界面平滑，混凝土密实

下面结合雷达图像特征，从初期支护、二次衬砌、尖害地质以及仰拱等几个方面，分析造成质量缺陷的原因，并对缺陷雷达

图像的特征进行说明。

一、衬砌空洞的图像特征

1. 光爆效果不好和防水板悬挂不当造成的空洞

光面爆破控制不好，超挖，欠挖现象频繁出现，造成隧道断面出现锯齿状的起伏，这种情况下规范规定在初期支护时采用同级喷射混凝土找平。但一些施工单位则采用偷工减料的方法，喷射混凝土前，在拱部钢筋网背后垫片石，之后喷射混凝土，在喷射层背后留下面积不大但连续出现的小空洞，形成质量隐患。

防水板是隧道防水的重要手段，防水板悬挂过紧或过松都会造成背后脱空，并且空洞出现的频率与光爆质量密切相关。图 6.2 是防水板悬挂过松的照片，图 6.3 是光爆不好，造成防水板上部脱空的雷达图像，图像中空洞规模小且不连续。



图 6.2 隧道悬挂防水板

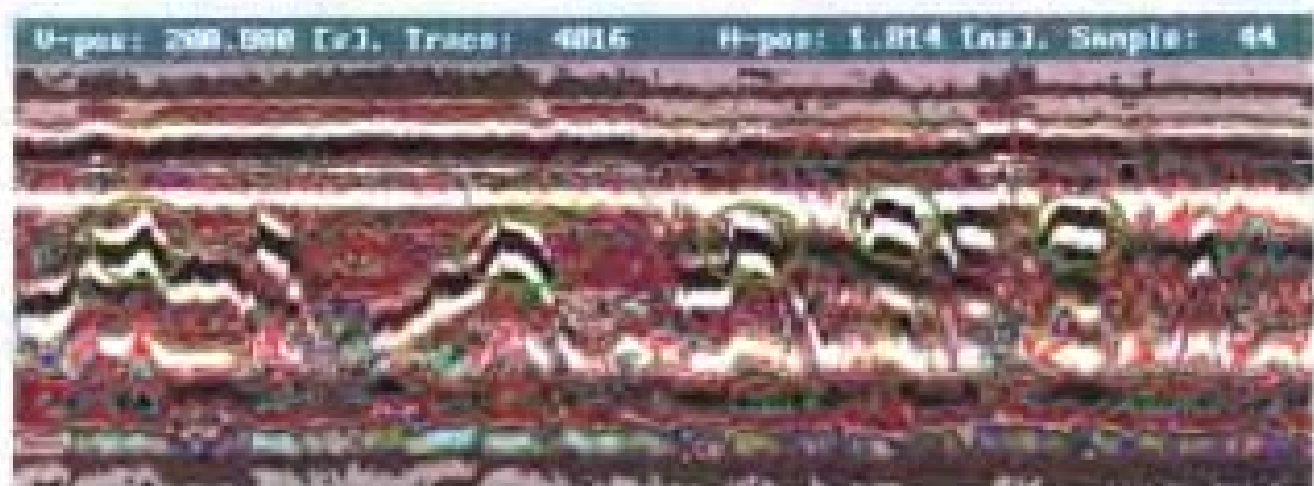


图 6.3 光爆效果差，防水板上部脱空

2. 施工过程中形成的空洞

(1)在拼装台车衬砌的隧道中，采用人工输送混凝土时，由于人员疲劳造成混凝土输送量不足，导致工程质量下降，衬砌中形成空洞。空洞一般表现出连续性，且纵向尺寸大。图 6.4 是衬砌中的空洞，二衬混凝土厚度 33cm，最薄处混凝土厚度 22cm，空洞竖向尺寸最大达到 55cm。挡头模板位置混凝土密实，造成空洞断续存在。



图 6.4 衬砌连续脱空

(2)挡头模板位置处的空洞。在泵送混凝土衬砌时，两个衬砌循环的衬砌连接处，后一循环的挡头模板位置形成空洞，图 6.5 是空洞形成的示意图，其雷达图像如图 6.6，清晰的反映了分界处两侧的衬砌状态。

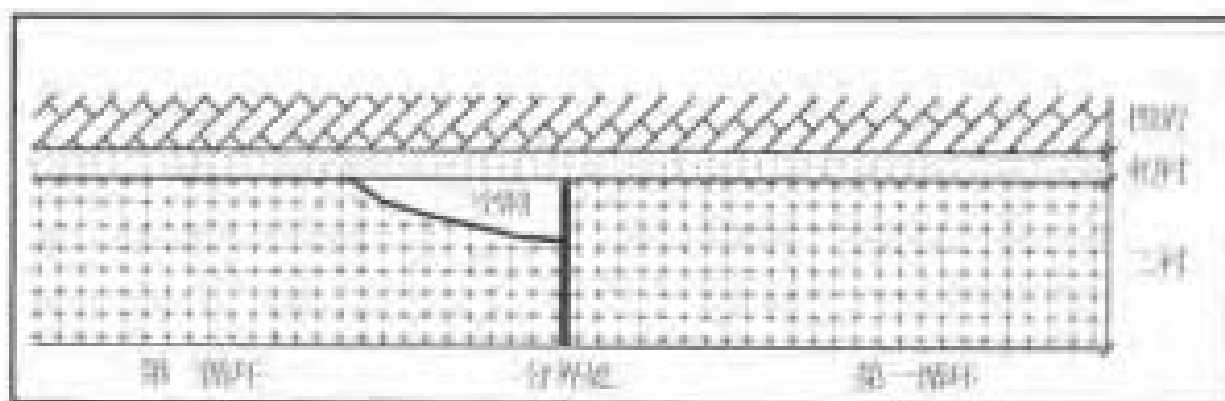


图 6.5 模板位置处的形成空洞示意图



图 6.6 模板位置处的空洞

3.大塌方或大溶洞形成空洞

塌方是开挖时出现较大面积坍塌，一般沿隧道中线方向延续长度在 2m 以上，有时可达 10m 以上，较大溶洞的尺寸还要大于塌方。对隧道内大的塌方或溶洞，不能完全回填满，以免超过衬砌的承载能力，而是用喷锚支护稳定岩体，再利用厚片石加固。

必要时设置钢筋混凝土衬砌。这样虽然在塌方或溶洞处仍然存在空洞，但衬砌质量是合格的。

图 6.7 是 5m 以上的较大溶洞的一种处理方式，顶部喷射混凝土，设立钢拱架，拱架背后铺设钢筋网，钢筋网后是 30~50cm 的降砌片石层，顶部预留喷砂孔，喷射细砂做为缓冲层，保护隧道衬砌。

图 6.8 是拱部溶洞处理后的雷达图像，溶洞位置由于是钢筋混凝土加固，雷达信号出现强烈反射波组，衬砌混凝土后面依然是空洞反映，深度达到 2.4m 以上。

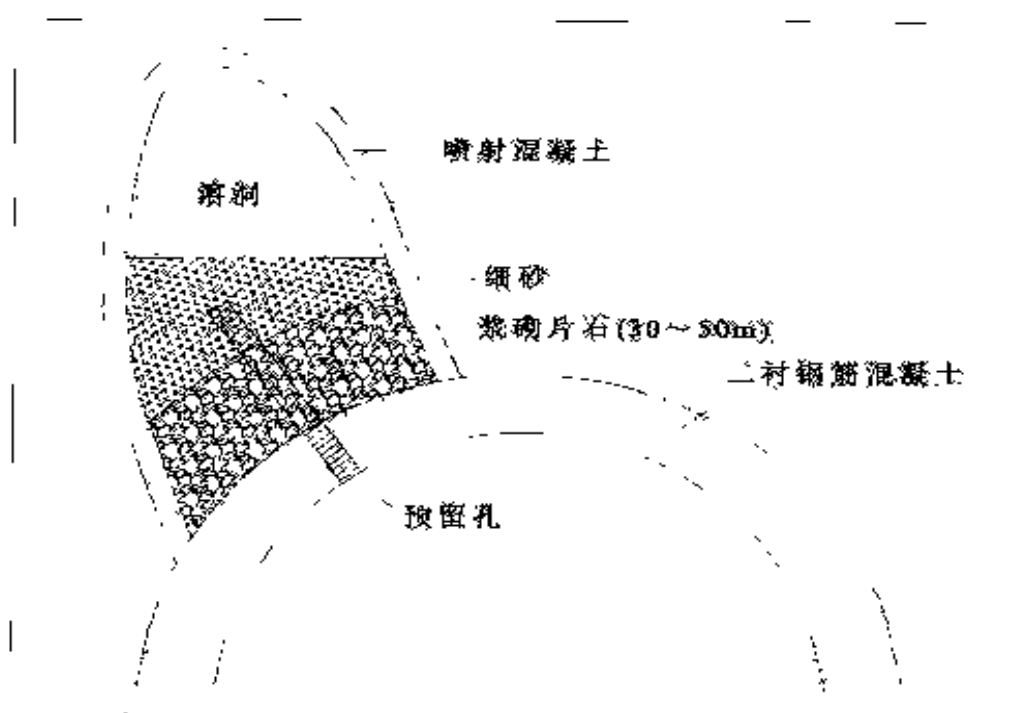


图 6.7 较大溶洞处理示意图



图 6.8 衬砌背后的溶洞，图像显示大的空洞

二、衬砌不密实的图像特征

1. 超挖回填造成的不密实缺陷

当隧道的超挖尺寸过大时，如果不采用同级混凝土回填，而采用片石回填，并且用灌浆法或干砌法施工，片石间空隙不能充满混凝土，造成不密实缺陷，这在工程中是不允许的。

图 6.9 中左侧是不密实缺陷。衬砌设计厚度 25cm，检测厚度 20cm，混凝土厚度没有达到设计要求。背后混凝土不密实。由于不密实缺陷处的空隙小且不连续，给后期处理带来很大麻烦，单纯的注浆处理往往难以达到预期效果。



图 6.9 超挖形成不密实缺陷

2. 塌方回填造成的不密实缺陷

对小规模的塌方(增高 1m 左右)处理要求和超挖相同, 如果用浆砌片石填充, 要求片石竖向摆放, 用挤浆法施工, 保证砂浆饱满, 不允许片石横向搁置或用灌浆法、干砌法施工, 否则片石间空隙不能填充混凝土, 造成不密实缺陷。

图 6.10 是小规模塌方处回填片石的图像。衬砌设计厚度 45cm, 检测混凝土厚度 55cm, 混凝土厚度达到设计要求。背后回填片石砂浆基本饱满, 局部片石间存在少量空隙。这种缺陷如果在水量不丰富的隧道中, 一般不用做特别处理。



图 6.10 塌方回填片石，局部存在空隙

三、隧道欠挖的图像特征

规范要求每平方米内欠挖面积不能超过 0.1m^2 (10%)，欠挖尺寸不大于 5cm；拱脚、边墙基础(内轨顶以上 1.5m)位置不允许欠挖。欠挖超出部分必须清除到位，否则由于欠挖位置混凝土厚度不足，将出现裂缝或掉块病害，影响隧道安全。

图 6.11 是一处欠挖缺陷的雷达图像。设计衬砌厚度 55cm，检测最薄处混凝土 30cm，背后有 4cm 的空隙，最大欠挖 21cm。

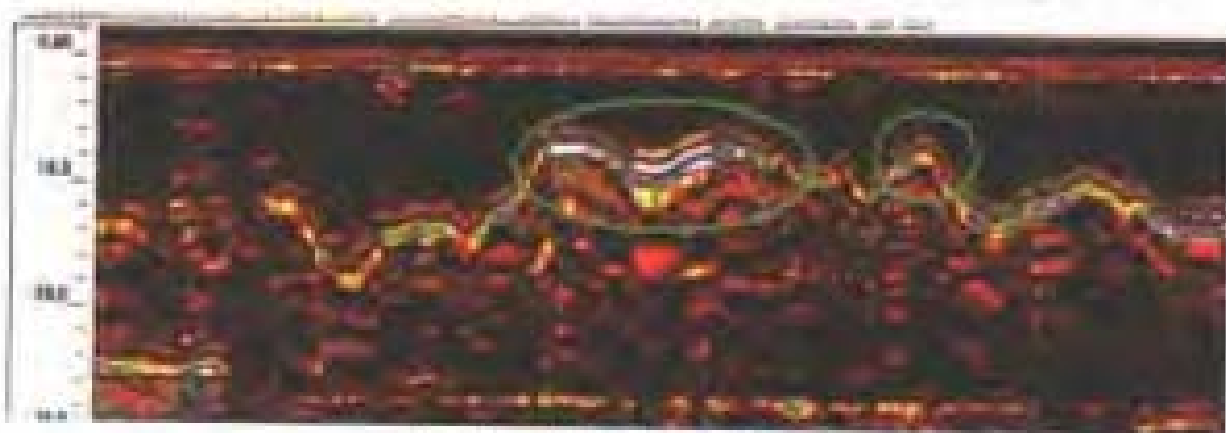


图 6.11 界面显示欠挖位置

隧道欠挖属于工程质量通病，应该在二衬施工之前进行处理，二衬结束后，欠挖缺陷只能采取破坏手段进行修复，如果保留，容易发生衬砌开裂病害。图 6.12 是某运营铁路由于隧道欠挖造成衬砌开裂的照片，该段衬砌设计厚度 30cm，实际厚度 8cm。



图 6.12 欠挖缺陷发展到衬砌开裂，形成病害

四、溶洞的图像特征

(1)小溶洞的处理方法和塌方类似，雷达图像特征基本相同。图 6.13 是溶洞回填片石不密实的图像，衬砌厚度达到设计要求。

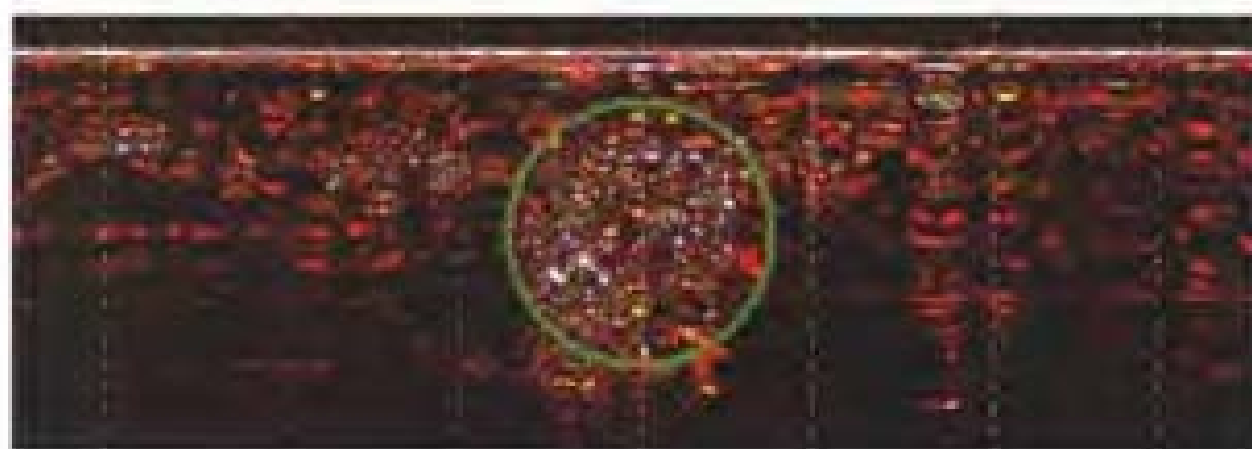


图 6.13 溶洞回填片石不密实图像

(2)较大溶洞一般采用喷锚支护，稳定溶洞处的岩体，再用浆砌片石回填洞穴。

图 6.14 是溶洞回填后的图像。在施工过程中隧道边墙发现溶洞，采用浆砌片石回填后，在溶洞处采用钢纤维混凝土衬砌，图中钢纤维混凝土造成界面强烈反射。

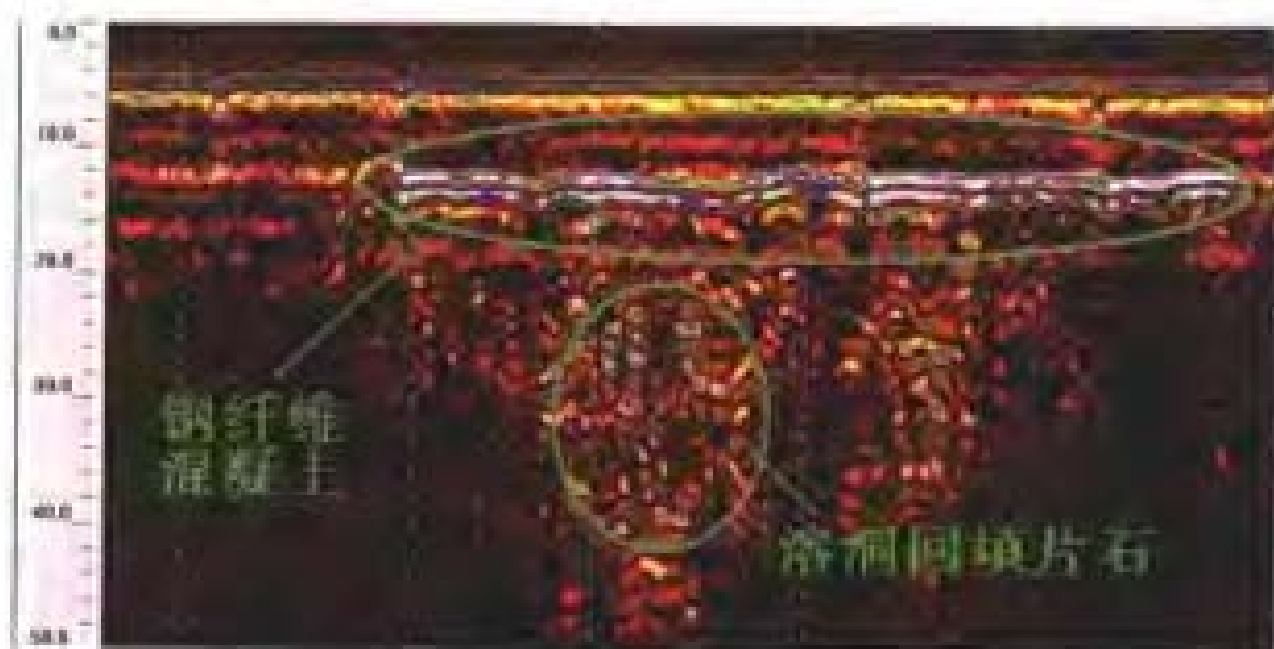


图 6.14 溶洞段采用钢纤维混凝土衬砌

(3)隐伏溶洞指在设计和施工过程中都没有发现的溶洞，一般在短时间内不会产生影响，但如果隧道围岩水量丰富或有水腐蚀性时，会逐渐发展成渗水、漏水等病害，在北方冬季会形成冻害。

图 6.15 中衬砌背后清晰的反映出隐伏溶洞的位置。该段衬砌混凝土设计厚度 30cm，溶洞处在施工时已经发现有溶蚀现象，采用了钢拱架加固，衬砌界面反射强烈。溶洞长度约 5m，深度 1.2~2.4m。



图 6.15 没有揭露的隐伏溶洞

五、初期支护

1. 喷射混凝土厚度

初期支护中，锚杆支护、喷射混凝土支护和现场量测是“新奥法”施工的三大支柱，初期支护和二衬混凝土共同承担荷载。喷射混凝土厚度一般在 5~15cm 左右，二衬混凝土一般在 30cm 以上，由于隧道衬砌检测一般安排在二衬完成之后，如果二者之间没有空隙，检测的混凝土厚度是喷射混凝土和二衬混凝土的综合厚度；如果二者之间存在空隙，检测的混凝土厚度是二衬混凝土的厚度，喷射混凝土的厚度可以通过分析钢筋网、格棚拱架以及衬砌背后脱空等缺陷的特征来综合判定。

准确检测喷射混凝土厚度要在二衬混凝土施作前进行，喷射

混凝土厚度一般小于 25cm，检测时必须采用 900MHz 或以上的高频屏蔽天线。

2. 初衬中的钢筋网和钢拱架

V 级围岩、局部 IV 级围岩或大的塌方、溶洞段，需要采用钢筋网或钢拱架做为初期支护，加强衬砌的承载能力。钢筋网和钢拱架的数量直接影响到隧道的安全，因此需要对其数量和位置进行检测。

(1) 钢筋网一般采用 $\phi 8\text{mm}$ 圆钢，绑扎成网格 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 、面积 $1.0\text{m} \times 1.2\text{m}$ 大小的网片，用于对超挖、塌方段的处理，必要时多块连接使用。

图 6.16 是钢筋网布置示意图。

图 6.17 和图 6.18 是钢筋网雷达图像，钢筋表现为尖锐的抛物线形态，信号能量强，可以直观地统计出钢筋数量。

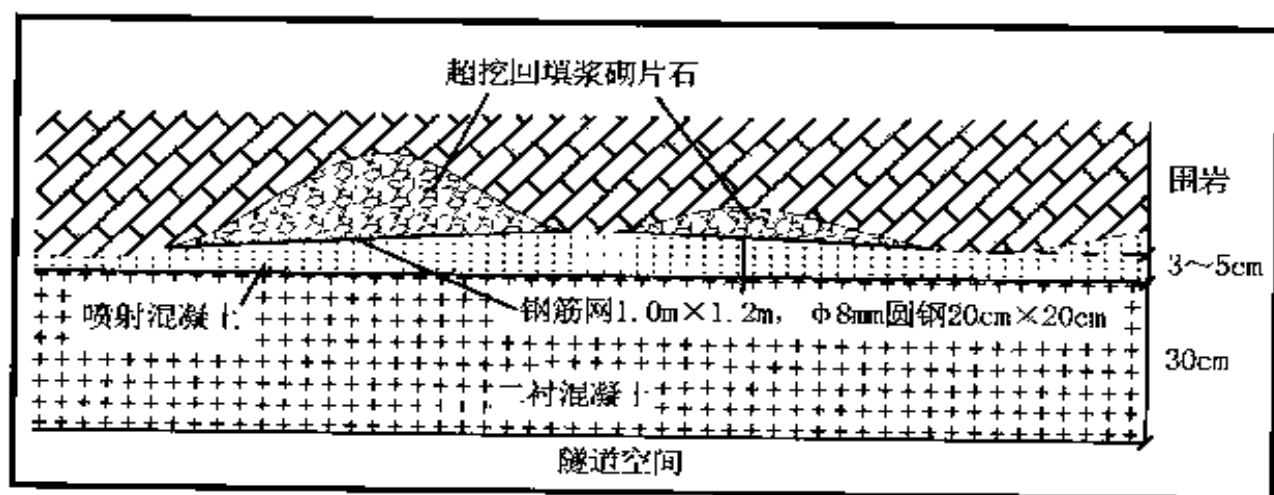


图 6.16 钢筋网布置示意图

图 6.17 中，中部钢筋网背后浆砌回填片石不密实，存在空洞。右侧钢筋网缺失，衬砌背后存在空洞。图 6.18 中，钢筋网在中间错断，左侧钢筋网突起位置衬砌混凝土厚度 15cm，钢筋网背后没有空洞，该段设计衬砌厚度 42cm，属于严重欠挖缺陷。

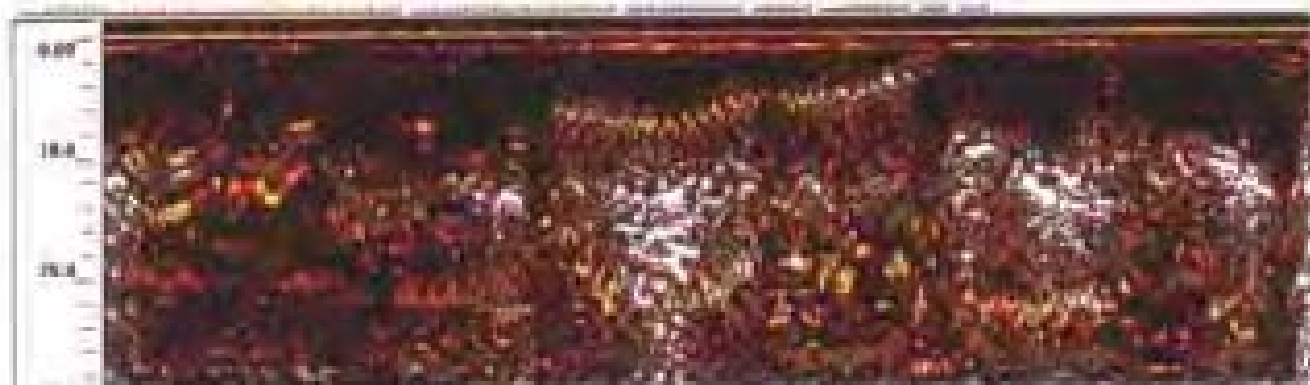


图 6.17 钢筋网缺失，回填片石不密实

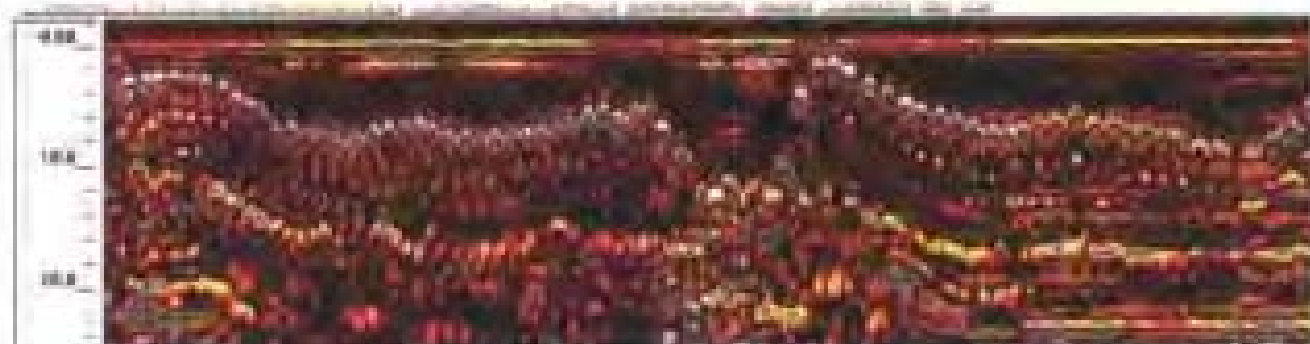


图 6.18 钢筋网错断

(2) 钢拱架一般分两种，一是采用不小于 16# 的工字钢(或 16B 型槽钢)制作，二是采用 4 根 $\phi 22\text{mm}$ 的螺纹钢做主筋，制成 $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 的格栅拱架。铁路隧道中钢拱架大多采用第三种方式。

钢拱架分拱墙局部设置和全环设置两种情况。在隧道拱部和

边墙安装钢拱架，称为拱墙局部设置，拱部、边墙和仰拱都安装钢拱架，称为全环设置。

图 6.19 是钢拱架安装示意图，图 6.20 是工字钢钢拱架安装照片。

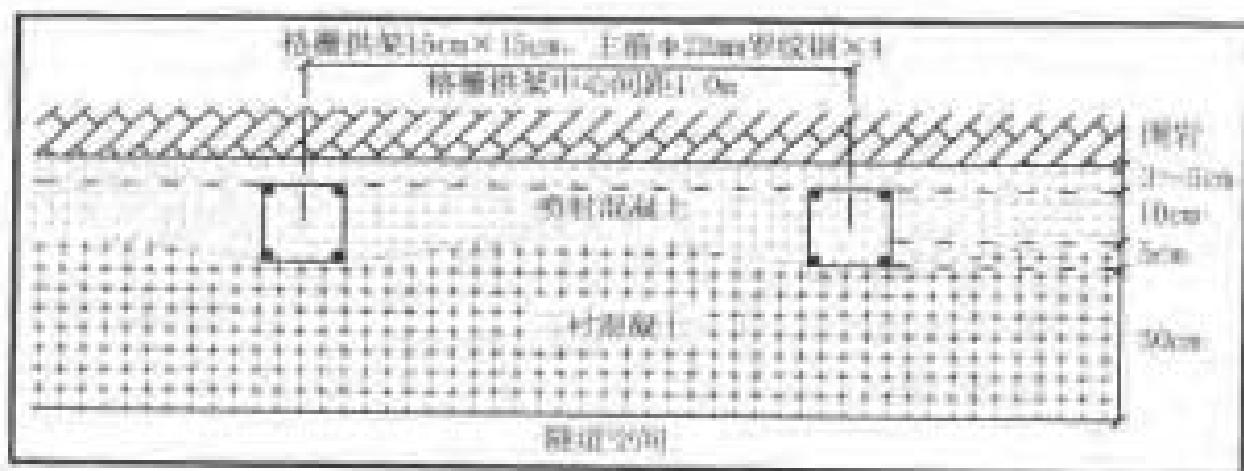


图 6.19 钢拱架安装示意图



图 6.20 钢拱架照片

图 6.21 是二衬施工结束后的钢拱架雷达检测图像。钢拱架间距 0.8m，排列整齐，表现为抛物线形式，但宽度和幅度远大于钢筋的反映。右侧起第 6 根钢拱架前混凝土不密实，图像中衬砌混

凝土厚度难以确定，可以先确定钢拱架处的混凝土厚度，再加上钢拱架的厚度来间接计算混凝土衬砌厚度。

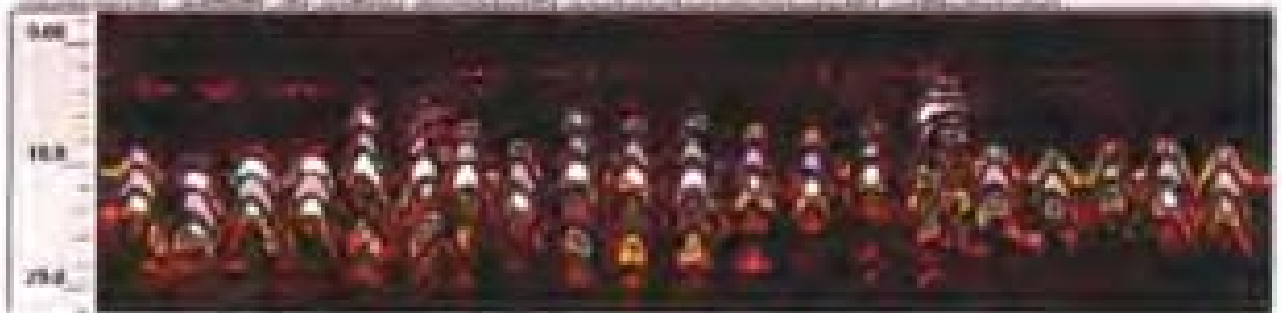


图 6.21 钢拱架雷达图像

六、钢筋混凝土衬砌

隧道洞口以及特殊段落需要设置钢筋混凝土衬砌，一般采用 $\phi 12\text{mm}$ 螺纹钢，制成 $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ 的钢筋网，安置于二衬混凝土中，形成钢筋混凝土衬砌。

图 6.22 是钢筋混凝土衬砌中的钢筋分布示意图，图 6.23 是二衬中钢筋网的照片。

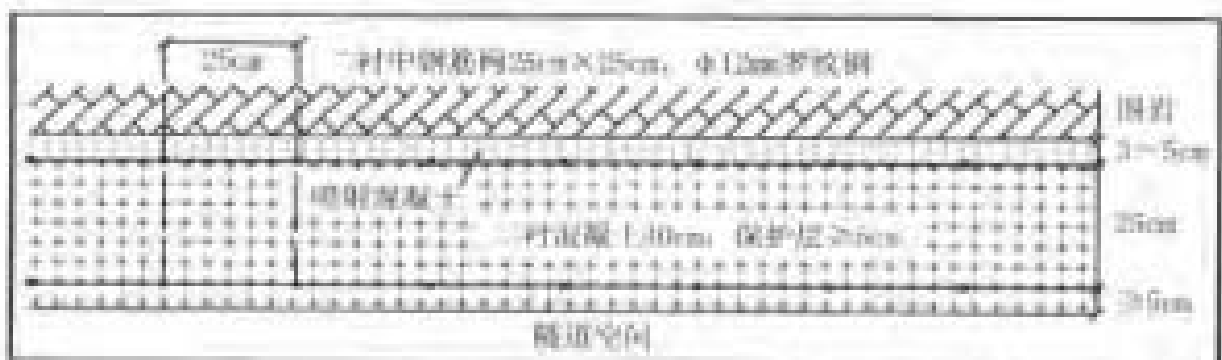


图 6.22 钢筋混凝土衬砌钢筋分布示意图



图 6.23 二衬中的钢筋网、背后防水板

图 6.24 是钢筋混凝土衬砌的雷达图像。

图像左侧衬砌混凝土中由于存在钢筋造成强烈反射，信号反映明显。右侧素混凝土衬砌设计厚度 42cm，衬砌混凝土与围岩界面清晰。两段不同衬砌的分界面十分明显。



图 6.24 钢筋混凝土的雷达图像

七、隧道基床

隧道基床出现缺陷主要基于以下原因：

(1)基底清渣不彻底，造成仰拱底部混凝土不密实。

(2)按照设计规范，仰拱施工要求分步施工，先成拱后填充，上部填充素混凝土。施工单位在具体施工过程中往往一次成型，

致使混凝土因体积太大而水化热无法散出，产生温度裂缝，或者在填充混凝土中加入片石甚至工程弃渣等其他成分，使仰拱混凝土强度降低。

(3) 基底开挖深度达不到设计标准，仰拱深度偏小。

图 6.25 是基床结构示意图。

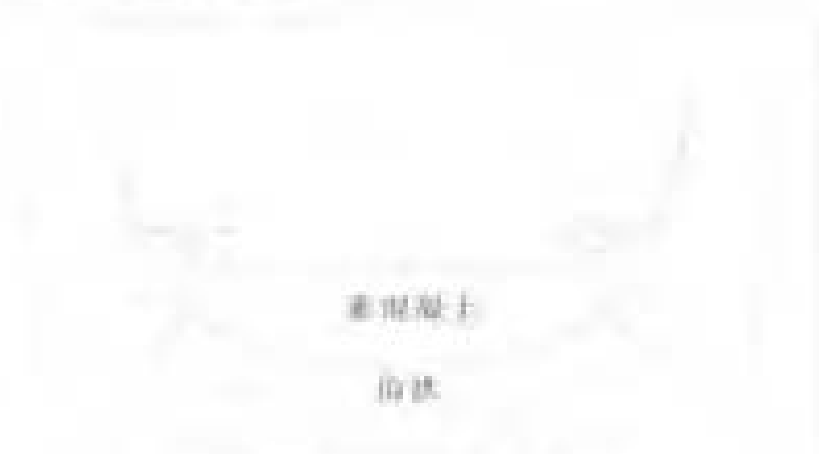


图 6.25 基床结构示意图

图 6.26 是隧道基底铺设钢筋的照片，已经形成拱型。



图 6.26 基底铺设钢筋

一般情况下，雷达检测基床图像反映的是仰拱、回填素混凝土和底板的综合厚度，雷达图像特征与二衬钢筋混凝土的相似。

图 6.27 是隧道基底的雷达图像，仰拱设计深度 1.10m，反射时间约 18ns。代表仰拱连续轴相位的上方出现强反射信号，表明隧道基底虚碴清除不彻底，回填素混凝土中填加了片石，且混凝土中存在空洞缺陷。

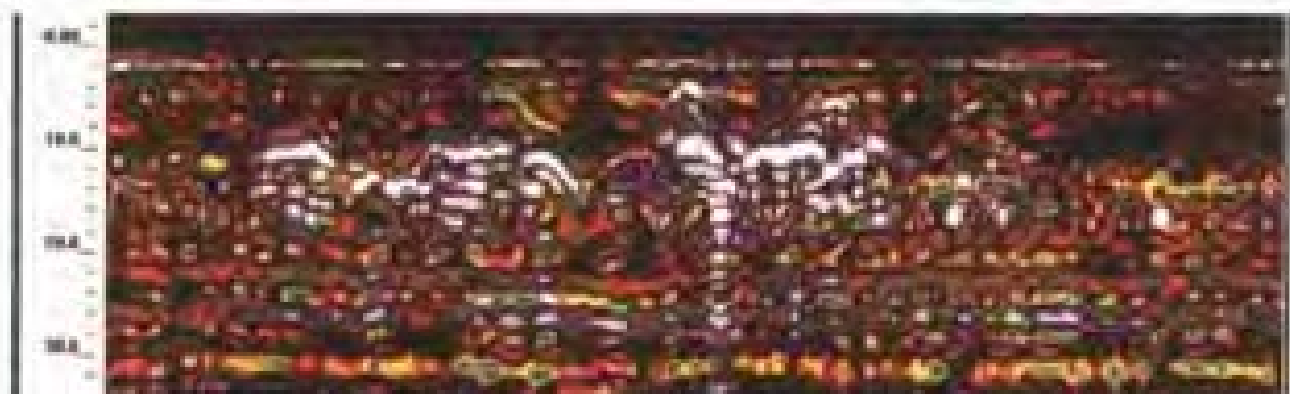


图 6.27 隧道仰拱雷达图像

图 2.28 是隧道底板的检测照片，底板混凝土设计厚度 30cm。

检测底板界面深度在 70cm 以上，严重超挖，上部 30cm 混凝土密实，界面清晰，底板下部混凝土中出现的强烈反射波组，表明隧道底部虚碴清除不彻底，混凝土中填有片石。



图 6.28 隧道底板雷达图像

第二节 隧道衬砌质量评价分类

总结前面的内容,隧道衬砌质量(含仰拱)评价一般可以按照表 6.1 所列的 7 种类型进行划分:

表 6.1 隧道衬砌质量分类

序号	质量分类	评价标准
1	合格	隧道开挖断面符合设计要求,衬砌混凝土厚度达到设计标准,初期支护、二衬混凝土以及围岩之间结合紧密
2	空洞	衬砌混凝土厚度达到设计标准,由于断面超挖等原因,造成衬砌混凝土和围岩以及初期支护、二衬混凝土之间存在空隙
3	欠厚	隧道断面开挖尺寸符合设计要求,衬砌混凝土厚度小于设计标准,即衬砌混凝土背后有空洞。这种缺陷可以采用注浆方式治理
4	不密实	一是因振捣不够、漏浆或混凝土离析等造成的蜂窝状、松散状以及遭受意外损伤所产生的疏松状混凝土区域;二是隧道断面超挖,在回填混凝土中加入片石,片石之间砂浆不饱满,存在空隙
5	欠挖	隧道开挖断面未达到设计标准,造成衬砌混凝土厚度不足
6	钢支撑缺陷	钢筋格栅、型钢拱架错断变形或数量少于设计标准
7	灾害地质	围岩中存在的隐伏溶洞以及较大的裂隙

第三节 外界因素对雷达图像的影响

检测过程中,需要密切注意周围环境,对可能影响雷达检测

的外部因素进行详细记录，以便在资料处理时有目的地排除外部影响，降低误判几率。

一、大型机械设备和避车洞、下锚段的影响

大型机械设备为铁磁性介质，避车洞、下锚段处由于高度变化，天线离开混凝土表面，中间存在空气介质，铁磁性介质和空气介质相对于混凝土来说，介电常数差异很大，因此随着天线向它们靠近，雷达图像中会出现斜向波组，并且能量越来越强。

图 6.29 是通过避车洞时的一幅雷达图像，避车洞两侧洞壁形成交叉波组。



图 6.29 避车洞的雷达图像

二、天线的行进方向和耦合状态

检测过程中，要求行进平稳，直线前进，但在实际工作中，由于车辆颠簸，很难做到天线直线行进，加之受摩擦力的作用，

天线又常常倾斜，行进中常常出现如图 6.30 和图 6.31 的情况。

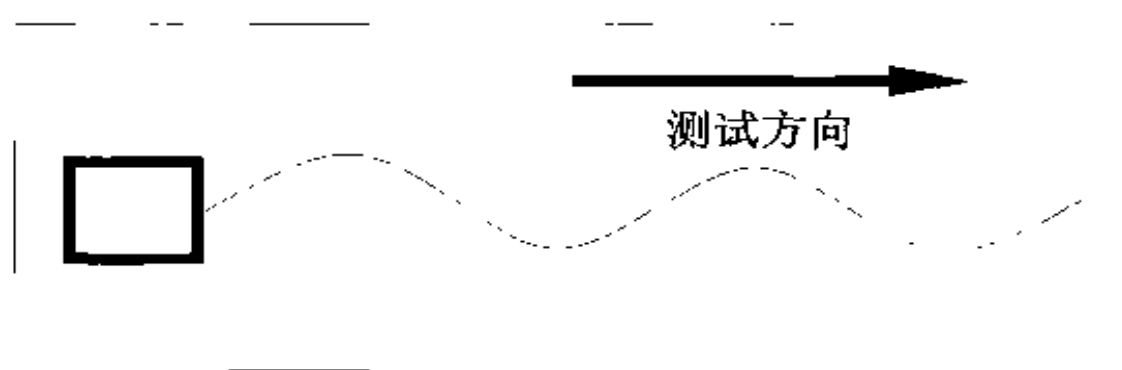


图 6.30 天线行进过程中发生摆动

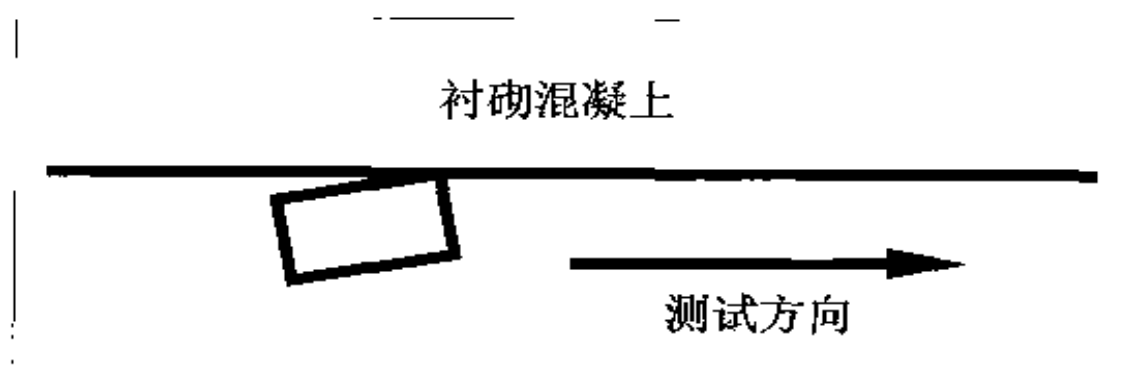


图 6.31 天线倾斜行进

天线曲线前进，相当于加大了测点点距，测点里程难以与实际里程对应，会给资料解释带来误差。天线倾斜时，由于没有完全密贴混凝土表面，会使雷达图像出现干扰。

图 6.32 是天线倾斜时的雷达图像。天线倾斜时形成强烈的多次反射波，反射波的能量随时间增长而增大，如果连续时间过长，资料将无法进行分析，必须进行复测。



图 6.32 天线倾斜时的雷达图像

三、外界电磁干扰

外界电磁干扰包括机械启动、对讲机通话等。图 6.33 是对讲机的电磁干扰，大型机械启动时的干扰特征与此相似。

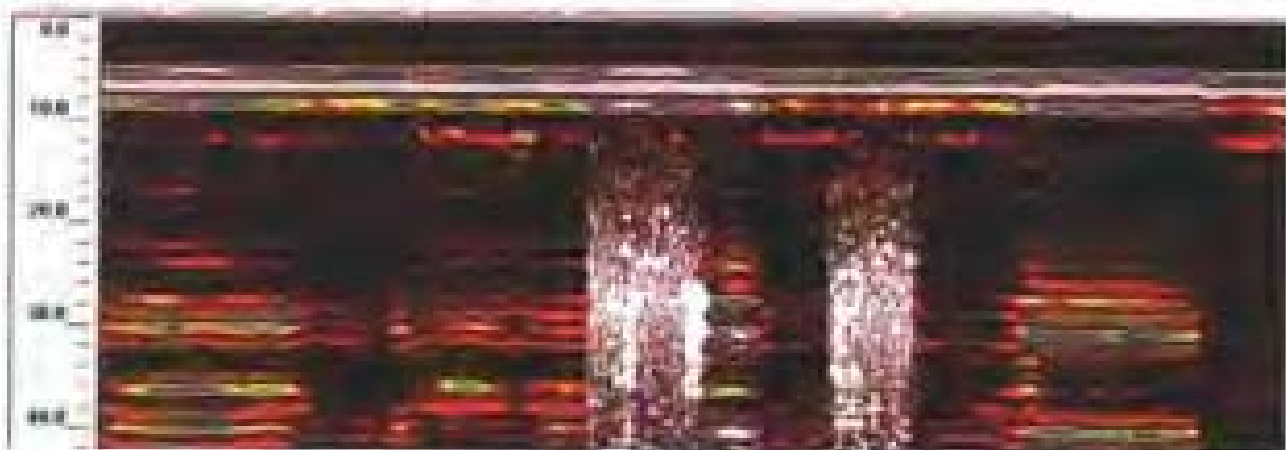


图 6.33 对讲机通话造成的电磁干扰

四、水的影响

隧道内部由于通风不畅，潮湿的空气常常在洞壁凝结成大量水珠，这种条件下进行检测，相当于在天线和混凝土之间多了一层耦合剂。由于水的介电常数远远大于空气和混凝土，致使采集信号初至时间增加，如果对这段衬砌的检测条件没有进行记录，分析过程中常常增大混凝土的厚度。

第七章 隧道衬砌检测的典型图像

隧道衬砌检测是地质雷达应用的一个新领域，由于个人经验和知识结构的差异，对图像的判别经常会产生分歧。下面选取几幅隧道衬砌中最常见的空洞、不密实以及钢筋、钢拱架图像进行简要说明，便于在工作中参考。

一、衬砌空洞图像

空洞缺陷发生在二衬混凝土和初期喷射混凝土之间或喷射混凝土背后，由于混凝土和空气(或水)的介电常数差异很大，空洞处会出现强烈的反射波。

图 7.1 是某隧道左拱腰位置孤立的空洞，是人工输送混凝土工艺的常见缺陷。该段衬砌设计厚度 45cm，利用冲击钻按照 0.5m 间距布置钻孔，共钻 4 个验证孔，空洞最薄处混凝土厚度 17cm，空洞径向最大尺寸 36cm，空洞位置衬砌混凝土厚度达不到设计要求，需要进行注浆处理。

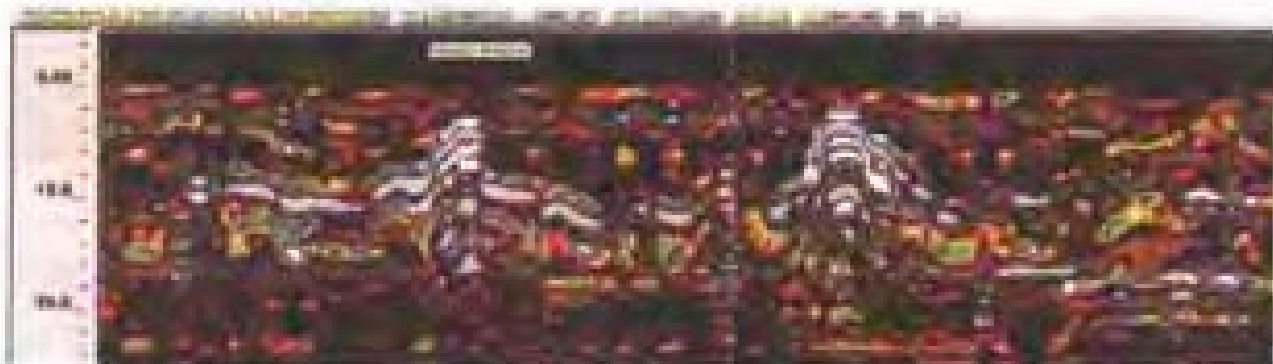


图 7.1 拱腰衬砌孤立空洞

图 7.2 是某隧道拱顶出现的连续空洞。衬砌混凝土设计厚度 30cm，钻孔验证，衬砌厚度 20cm，空洞径向最大尺寸 112cm。该段隧道严重超挖段，没有采取回填措施，需要进行注浆处理。



图 7.2 拱顶衬砌连续空洞

图 7.3 是某隧道拱部塌方，回填处理后的图像。衬砌厚度大于 60cm，达到设计的厚度要求，回填片石砂浆不饱满，片石之间存在空隙，形成空洞。

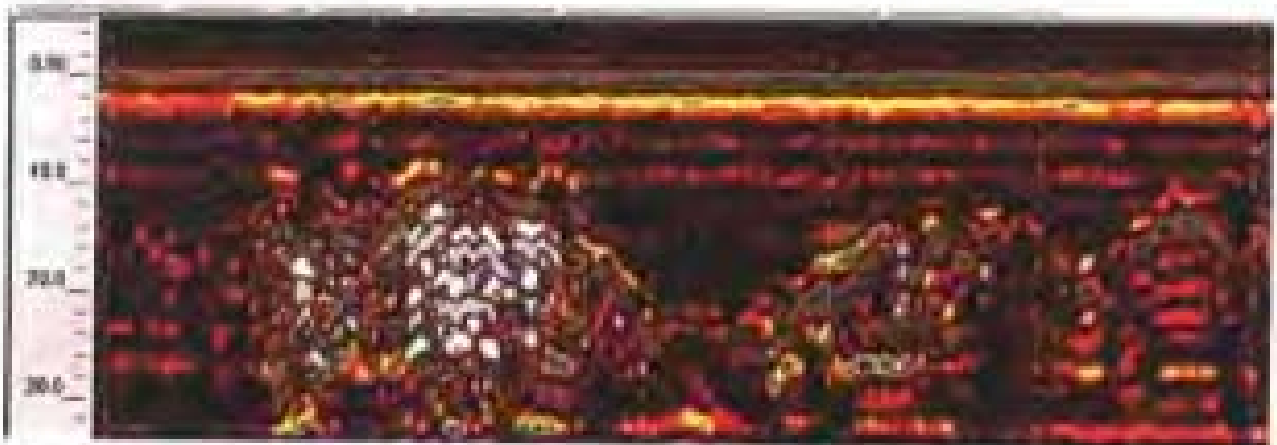


图 7.3 拱部塌方，回填处理后的空洞

图 7.4 是某隧道边墙超挖，采用片石回填处理，砂浆不饱满，片石之间存在空隙，形成空洞。

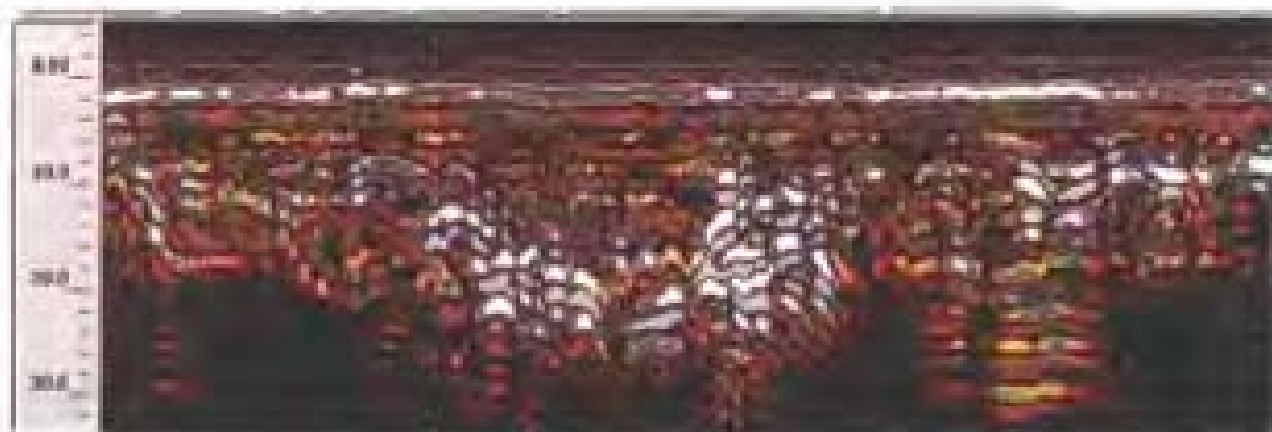


图 7.4 边墙超挖回填处理后的空洞

图 7.5 是某隧道空洞处理后的复测图像。进行注浆处理后，砂浆饱满，空洞缺陷消除，反射波相位难以追踪。

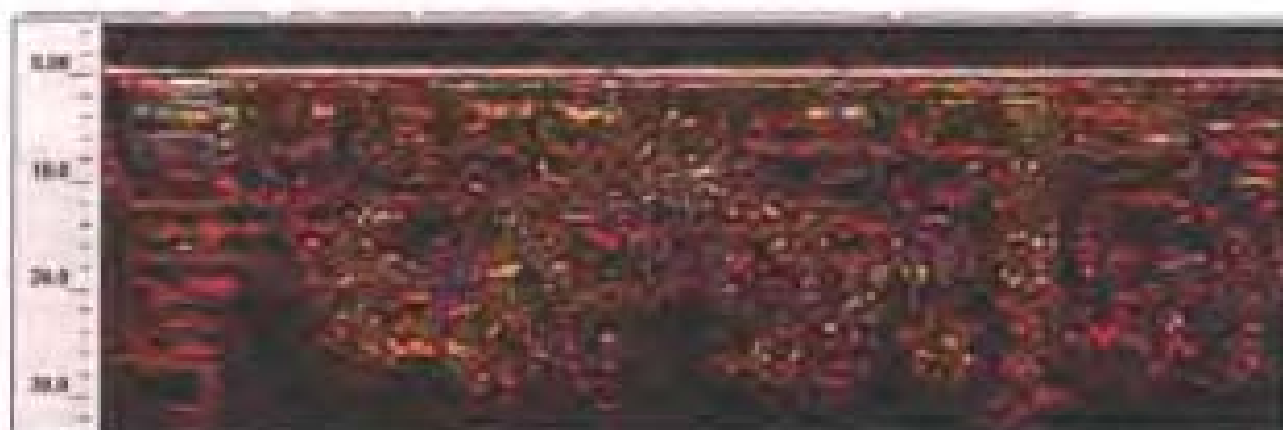


图 7.5 空洞处理后，砂浆饱满密实

二、不密实图像

不密实缺陷发生在衬砌混凝土和围岩之间，一般是由于回填片石处理后，灌注砂浆不饱满，片石之间存在微小空隙造成的，各个空隙之间不连续，图像特征和空洞相似，在相同增益条件下，反射波的强度不如空洞，并且反射波相位紊乱。

图 7.6 是某隧道拱部小塌方处的图像，回填浆砌片石，砂浆局

部不饱满，存在空隙，形成不密实缺陷。



图 7.6 拱部塌方浆砌片石处理，砂浆局部不饱满，不密实

图 7.7 是某隧道边墙图像。边墙大部分超挖，回填浆砌片石，砂浆不饱满，片石间存在空隙，形成不密实缺陷，大的空隙形成空洞。



图 7.7 边墙超挖回填片石间存在空隙，不密实

图 7.8 是衬砌混凝土背后存在不密实缺陷的图像。衬砌设计厚度 25cm，检测混凝土厚度 20cm，未达到设计要求。隧道光爆效果好，没有超挖、欠挖缺陷，衬砌混凝土和围岩之间存在的空隙形成不密实缺陷。



图 7.8 衬砌混凝土背后存在不密实缺陷

三、钢拱架和钢筋网图像

主要检测钢筋混凝土和初期支护中的钢拱架、钢筋网的位置和数量。

(1) 钢拱架图像

图 7.9 是工字钢拱架的雷达图像。衬砌混凝土设计厚度 30cm，拱架设计间距 0.8m/幅。图上可以看出，右侧起第 6 幅和第 7 幅之间距离偏大。

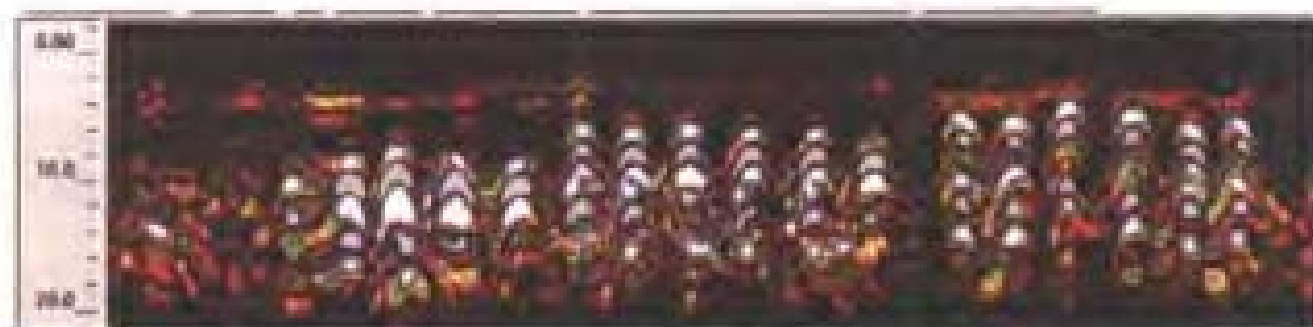


图 7.9 工字钢拱架，间距 0.8m

图 7.10 是钢筋绑扎的格栅拱架图像。衬砌混凝土设计厚度

55cm, 拱架设计间距 0.8m/幅。格栅拱架反射能量小于工字钢拱架。



图 7.10 钢筋绑扎的格栅拱架, 间距 0.8m

图 7.11 是拱架数量不足的图像。衬砌混凝土设计厚度 45cm, 拱架间距 1.0m/幅, 检测发现 10m 距离内有 7 幅拱架, 间距大于 1.5m, 数量达不到设计要求。



图 7.11 格栅拱架间距大于 1.5m, 设计 1.0m, 数量达不到设计要求

(2) 钢筋网图像

图 7.12 是初期支护中的钢筋网图像。衬砌混凝土设计厚度

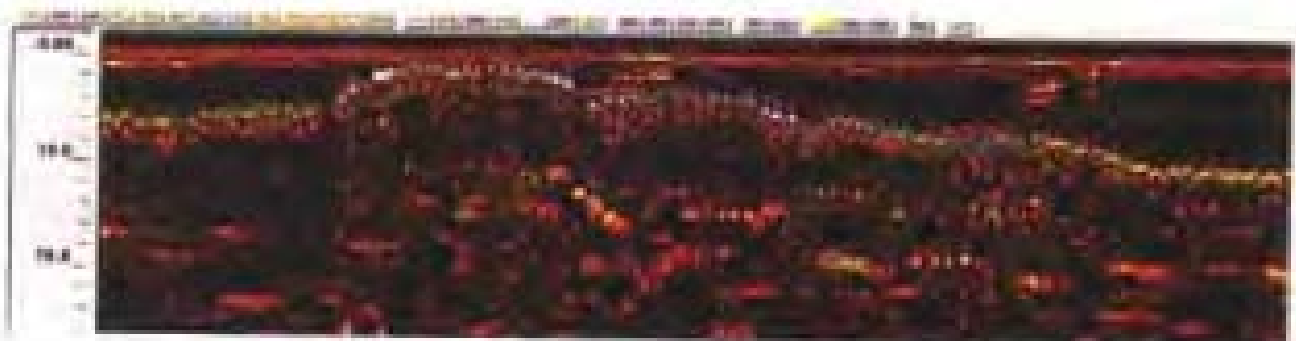


图 7.12 次挖造成钢筋网突起, 衬砌密实

35cm，图中钢筋网随围岩起伏，中间突起部分混凝土厚度 20cm，背后衬砌密实，说明该处存在欠挖缺陷，欠挖 15cm。由于检测是在二衬混凝土施工结束后进行的，所以这种缺陷如果进行处理，其难度和代价是非常大的。

图 7.13 是初期支护中设立钢筋网和素混凝土衬砌交界处的雷达图像，可以准确的判定钢筋网的设置里程。

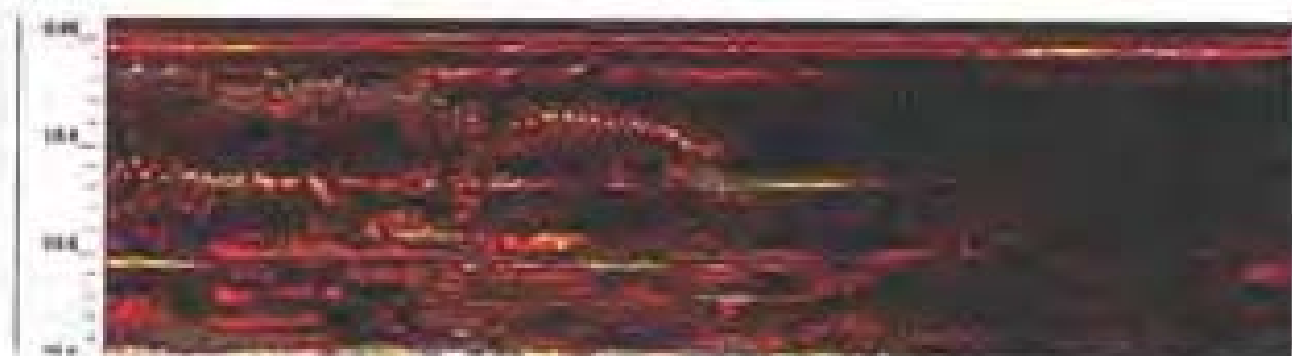


图 7.13 钢筋网和素混凝土衬砌交界处

图 7.14 是隧道洞口的钢筋混凝土衬砌检测图像，钢筋混凝土衬砌背后存在空洞缺陷。钢筋混凝土衬砌中的钢筋布置在二衬混凝土中，相对于初期支护中设立的钢筋网，起伏小，形态规则。



图 7.14 钢筋混凝土衬砌，背后空洞

图 7.15 钢筋混凝土衬砌背后存在的不密实缺陷，衬砌中设置双层钢筋。



图 7.15 钢筋混凝土衬砌，背后不密实

四、基床图像

隧道基床检测包括仰拱深度、回填混凝土厚度、底板厚度，基底混凝土和围岩接触是否密实以及基床部分的灌注质量等几个部分。

图 7.16 是某隧道的基床检测图像。仰拱设计深度 1.75m，上部回填素混凝土。



图 7.16 隧道基床检测图像

图中 30ns 处的界面反映了仰拱和围岩的接触，界面清晰，表明基底虚碴已经清除干净。

10ns 左右的反射波组表明存在电性界面，界面位于回填素混凝土中，说明上下混凝土介质存在电性差异，在右侧有一处多次反射波组存在，是小的空洞反映。造成上述情况的原因是在下方的回填混凝土中填入片石所致。

图 7.17 是某隧道的底板检测图像。底板设计厚度 30cm。

图中底板界面反射时间 6ns 左右，深度 35cm。反射相位清晰，底板下虚碴清除干净，隧底没有发现灾害地质。



图 7.17 隧道底板检测图像

图 7.18 是某隧道超挖的底板检测图像。底板设计厚度 30cm。

图中底板界面反射时间 10ns 左右，深度 55~60cm 之间变化，说明隧底超挖，回填素混凝土密实。反射相位清晰，基底虚碴清除不彻底，隧底没有发现灾害地质。



图 7.18 隧道超挖底板检测图像

图 7.19 是某隧道基床回填混凝土中填入大量片石检测图像。仰拱设计深度 1.2m。

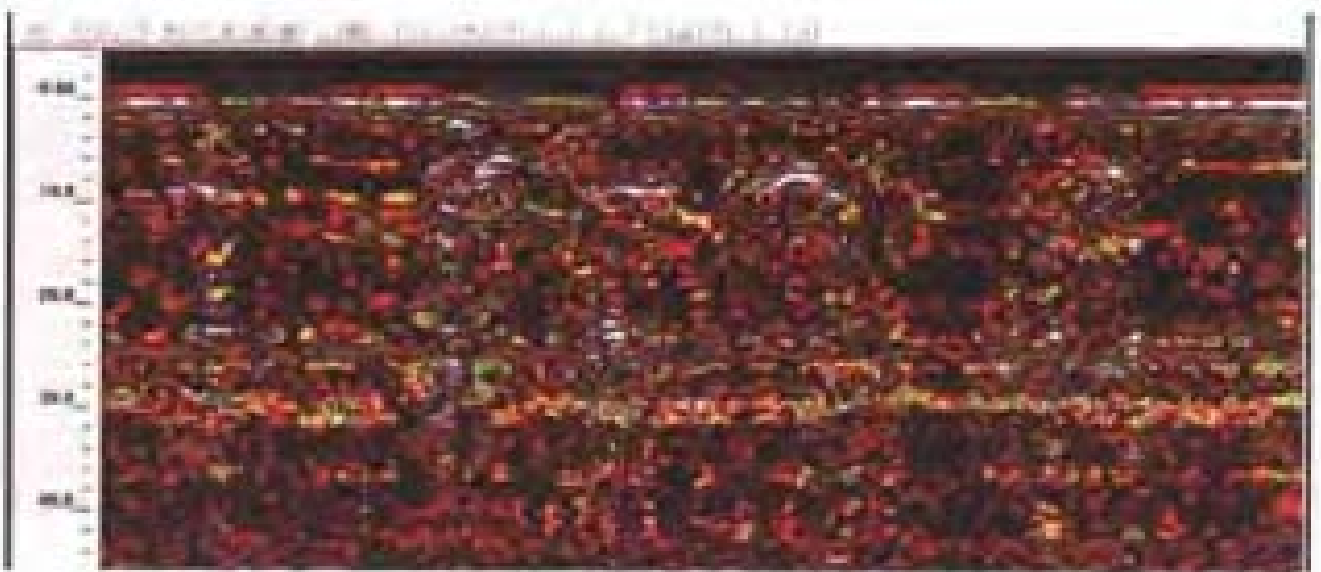


图 7.19 隧道基床回填混凝土中填入大量片石

图中仰拱界面反射时间 24ns 附近，深度 1.4~1.5m 之间变化，
隧底超挖。回填素混凝土中出现多组反射波信号，相位紊乱。35cm
以下回填混凝土中加入大量片石，片石间砂浆不饱满，存在空隙，

形成不密实缺陷。隧底没有灾害地质。

图 7.20 是某隧道基床回填混凝土中存在空洞缺陷的图像。仰拱设计深度 1.2m。



图 7.20 隧道基床中的空洞缺陷

图中仰拱界面反射时间 22ns 附近，深度 1.2~1.3m 之间变化，隧底超挖。回填素混凝土中出现多组强烈反射波信号，相位清晰，说明混凝土回填过程中加入了大量片石，片石间空隙较大，形成空洞。隧底没有灾害地质。

第八章 “中长期铁路网规划”简介

2004年1月7日，国家“中长期铁路网规划”经国务院审议通过，这是进入新世纪后，我国第一个获准通过的中长期发展规划。“中长期铁路网规划”的批准和实施，标志着我国铁路新一轮大规模建设即将展开，它对实现铁路跨越式发展，促进国民经济持续快速增长，满足全面建设小康社会目标的要求具有重要意义。

“中长期铁路网规划”制订的发展目标为：到2020年，全国铁路营业里程达到10万公里，主要繁忙干线实现客货分线，复线率和电化率均达到50%，运输能力满足国民经济和社会发展需要，主要技术装备达到或接近国际先进水平。其主要内容，包括建设客运专线、完善路网布局和西部开发性新线、路网既有线改造三部分，其中，建设客运专线1.2万公里以上，规划建设新线约1.6万公里，规划既有线增建二线1.3万公里，既有线电气化改造1.6万公里。为保证“中长期铁路网规划”的顺利实施，分成2005年和2010年两个阶段性目标。2005年目标是，铁路营业里程达到7.5万公里，其中复线铁路2.5万公里，电气化铁路2万公里以上；到2010年的阶段目标则是，铁路网营业里程达到8.5万公里左右，其中客运专线约5000公里，复线3.5万公里，电气化3.5万公里。

“中长期铁路网规划”内容简介

规划方案	建设内容	具体目标
客运专线	建设客运专线1.2万公里以上,客车速度目标值达到每小时200公里及以上	<p>1. “四纵”客运专线: ①北京-上海客运专线, 贯通京津至长江三角洲东部沿海经济发达地区; ②北京-武汉-广州-深圳客运专线, 连接华北和华南地区; ③北京-沈阳-哈尔滨(大连)客运专线, 连接东北和关内地区; ④杭州-宁波-福州-深圳客运专线, 连接长江、珠江三角洲和东南沿海地区。</p> <p>2. “四横”客运专线: ①徐州-郑州-兰州客运专线, 连接西北和华东地区; ②杭州-南昌-长沙客运专线, 连接华中和华东地区; ③青岛-石家庄-太原客运专线, 连接华北和华东地区; ④南京-武汉-重庆-成都客运专线, 连接西南和华东地区。</p> <p>3. 三个城际客运系统: 环渤海地区、长江三角洲地区、珠江三角洲地区城际客运系统, 覆盖区域内主要城镇。</p>
完善路网布局和西部开发性新线	规划建设新线约1.6万公里	<p>1. 新建中吉乌铁路喀什-吐尔尕特段, 改建中越通道昆明-河口段, 新建中老通道昆明-景洪-磨憨段、中缅通道大理-瑞丽段等, 形成西北、西南进出境国际铁路通道;</p> <p>2. 新建太原-中卫(银川)线、临河-哈密线, 形成西北至华北新通道;</p> <p>3. 新建兰州(或西宁)-重庆(或成都)线, 形成西北至西南新通道;</p> <p>4. 新建库尔勒-格尔木线、龙岗-敦煌-格尔木线, 形成新疆至青海、西藏的便捷通道;</p> <p>5. 新建精河-伊宁、奎屯-阿勒泰、林芝-拉萨-日喀则、大理-香格里拉、永州-玉林和茂名、合浦-河唇、西</p>

		<p>安-平凉、柳州-肇庆、桑根达来-张家口、准格尔-呼和浩特、集宁-张家口等西部区内铁路，完善西部地区铁路网络：</p> <p>6.新建铜陵-九江、九江-景德镇-衢州、赣州-韶关、龙岩-厦门、湖州-嘉兴-乍浦、金华-台州及东北东边道等铁路，完善东中部铁路网络。</p>
路网既有线	<p>规划既有线增建二线1.3万公里，既有线电气化1.6万公里</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.在建设客运专线的基础上，对既有线进行扩能改造，在大同(含蒙西地区)、神府、太原(含晋南地区)、晋东南、陕西、贵州、河南、兖州、两淮、黑龙江东部等十个煤炭外运基地，形成大能力煤运通道。近期要优先考虑大秦线扩能、北同蒲改造、黄骅至大港铁路建设和石太线扩能，实现客货分运，加大煤炭外运能力。 2.结合客运专线的建设，对既有京哈、京沪、京九、京广、陆桥、沪汉蓉和沪昆等七条主要干线进行复线建设和电气化改造。 3.以北京、上海、广州、武汉、成都、西安枢纽为重点，调整编组站，改造客运站，建设机车车辆检修基地，完善枢纽结构，使铁路点线能力协调发展。 4.建设集装箱中心站，改造集装箱运输集中的线路，开行双层集装箱列车。

