



城市浅埋 隧道爆破 原理及设计

闫鸿浩 王小红 编著
李晓杰 主审

中国建筑工业出版社

城市浅埋隧道爆破原理及设计

闫鸿浩 王小红 编著
李晓杰 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

城市浅埋隧道爆破原理及设计/闫鸿浩, 王小红编著.
北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 4
ISBN 978-7-112-15218-6

I. ①城… II. ①闫…②王… III. ①城市隧道-
浅埋隧道-爆破施工 IV. ①U455. 41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 050202 号

本书结合实际施工, 对爆破振动指标给出更加合理的控制指标, 尤其对地下管线, 借鉴德国标准, 全线依据该指标控制, 达到了良好效果; 坚守单段药量最小化方向, 依据市场配备通用的第 1 系列毫秒导爆管雷管延时特性, 计算重炮概率, 实现孔内外综合微差方式控制爆破振动; 给出浅孔柱状装药爆破原理, 划分围岩破碎区、破裂区范围, 对围岩保护可以参考; 在施工工法上给出了台阶法、CD 法、CRD 法爆破设计; 区间常规段与复杂段 (过民房、管廊、购物长廊、管线、桥梁) 爆破设计; 车站上选用了拱盖法爆破设计; 风井选择了复杂地段 (过桥墩、交叉既有盾构隧道段) 设计等施工过程的各个阶段上给出安全管理各项措施, 提供了爆破安全检查表、爆破振动检查表、爆破振动监测日报表、爆破安全监理审批表以及爆破振动超标整改通知单等。所有这些对未来城市浅埋隧道爆破施工与管理具有指导意义。

本书适用于高校科研人员、研究生, 爆破工程技术人员, 隧道 (地下空间、人防) 设计、施工、监理人员等。

* * *

责任编辑: 田启铭 李玲洁
责任设计: 李志立
责任校对: 刘梦然 关 健

城市浅埋隧道爆破原理及设计

闫鸿浩 王小红 编著
李晓杰 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18 字数: 436 千字

2013 年 4 月第一版 2013 年 4 月第一次印刷

定价: 56.00 元

ISBN 978-7-112-15218-6

(23261)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

随着城市人口的快速增长和土地资源的日趋稀缺，土地开发利用的重点已由地面向地下空间发展，需要大量建设地下交通、停车场、体育文化设施和地下商业等，其中在城市市政、交通设施建设中，经常遇到浅埋隧道。

隧道开挖方法有传统的钻爆法和机械开挖隧道掘进法。钻爆法对地质条件适应性强，开挖成本低，特别适用于坚硬岩石隧道、破碎岩体隧道及大量中短隧道施工，是隧道开挖最常用的施工方法，在今后相当长的一段时间里，钻爆法仍将是岩石隧道掘进的主要手段。浅埋隧道爆破由于洞顶覆盖岩土层薄，一般基岩较破碎，工程地质条件较差，爆破开挖必须确保隧道围岩稳定；处于城镇地区，隧道上方往往建有厂房、民房等建筑物，爆破开挖必须确保隧道上方建筑物的安全；施工环境比较复杂，爆破振动对施工区域影响大，容易引起“扰民”和“民扰”。本书依据大连地铁爆破施工情况，重点介绍了浅埋隧道施工工法、柱状装药爆破原理、爆破振动控制指标选择、复杂条件下浅埋隧道爆破设计及爆破安全管理问题。

结合实际施工，对爆破振动指标给出更加合理的控制指标，尤其对地下管线借鉴德国标准，全线依据该指标控制，达到了良好效果；坚守单段药量最小化方向，依据市场配备通用的第1系列毫秒导爆管雷管延时特性，计算重炮概率，实现孔内外综合微差方式控制爆破振动；给出浅孔柱状装药爆破原理，划分围岩破碎区、破裂区范围，对围岩保护可以参考；在施工工法上给出了台阶法、CD法、CRD法爆破设计；区间常规段与复杂段（过民房、管廊、购物长廊、管线、桥梁）爆破设计；车站上选用了拱盖法爆破设计；风井选择了复杂地段（过桥墩、交叉既有盾构隧道段）设计等。对施工过程的各个阶段上给出安全管理各项措施，提供了爆破安全检查表、爆破振动检查表、爆破振动监测日报表、爆破安全监理审批表以及爆破振动超标整改通知单等。所有这些对未来城市浅埋隧道爆破施工与管理具有指导意义。

本书在编著过程中得到了我的老师大连理工大学李晓杰教授鼎力支持，在掌子面现场巡视、技术咨询、爆破方案的调制方面，大连地铁有限公司张军总经理、卢振勇部长、阎永鹏部长、李振永高级工程师以及各施工单位给予了大力配合，大连开盛爆破拆迁工程有限公司总工李文全高级工程师在岩石爆破破碎机理上进行技术指导，地铁隧道爆破振动监测、数据校对上得到了课题组博士生、硕士生的大力帮助。在此对于他们的辛苦劳动致谢。由于本人水平有限，书中有不当和错误之处，敬请批评指正。

闫鸣浩

2012年12月28日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 隧道爆破	1
1.2 浅埋隧道爆破	2
1.3 大连地铁隧道爆破	3
1.4 浅埋隧道减震技术	5
1.5 本书结构及宗旨	7
1.6 隧道爆破基本术语	7
第 2 章 隧道围岩概述	9
2.1 岩石成因分类	9
2.2 岩石坚硬程度分类	10
2.3 岩石完整程度分类	10
2.4 岩石基本质量等级分类	11
2.5 岩石风化程度分类	11
2.6 岩石质量指标分类	12
2.7 土石普氏分级	12
2.8 围岩分级	15
2.9 超前地质预报	16
第 3 章 浅埋隧道施工工法	18
3.1 隧道施工方法概述	18
3.2 浅埋暗挖	19
3.3 浅埋暗挖施工方针	19
3.4 施工工法	21
3.5 全断面法	23
3.6 台阶法	24
3.7 分部开挖法	26
3.8 大断面法	30
3.9 施工工法与监控量测	37
3.10 爆破设计与工法关系	43

第 4 章 爆破器材及起爆网路	44
4.1 爆破器材	44
4.2 起爆方法及起爆网路	57
4.3 雷管段别的选用	62
第 5 章 柱状装药爆破及岩石破碎规律	66
5.1 一维压缩波模型	66
5.2 柱面压缩波模型	74
5.3 有限长柱形装药爆炸压缩波模型	87
5.4 柱形装药岩石破坏规律	104
第 6 章 爆破环境影响控制	115
6.1 爆破噪声	115
6.2 爆破振动控制	115
6.3 建筑物爆破振动安全标准	121
6.4 地下管线的爆破振动控制	124
6.5 城市隧道控制指标选择	126
6.6 城市浅埋隧道爆破振动监测	127
6.7 爆破振动规律监测方法	129
第 7 章 隧道爆破设计	146
7.1 爆破设计基本事项	146
7.2 设计程序	147
7.3 掏槽爆破技术	151
7.4 周边孔爆破技术	156
7.5 主要减震措施	158
7.6 白云质灰岩(Ⅳ级)爆破设计	165
7.7 中风化板岩区间爆破设计	173
7.8 浅埋段爆破设计	175
7.9 过管廊、铁路爆破设计	179
7.10 下穿魏台桥爆破设计	185
7.11 下穿购物长廊爆破设计	191
7.12 过危房分次起爆爆破设计	197
7.13 下穿民宅、防空洞的爆破设计	201
7.14 无感爆破设计	210
7.15 下穿购物长廊人防段 CRD 爆破设计	220
7.16 风井、竖井、横通道爆破设计	227
7.17 双侧壁洞法爆破设计	242
7.18 拱盖法爆破设计	245

第 8 章 爆破安全管理..... 251

8.1 施工前调研 251

8.2 爆破施工管理 252

8.3 隧道爆破安全技术 258

8.4 爆破振动监测及其管理 265

8.5 爆破安全管理制度汇编 268

附件..... 273

附件 1 爆破施工作业审批表 273

附件 2 ×××工程爆破监测检查评分表 274

附件 3 ×××工程爆破安全检查评分表 275

附件 4 爆破参数整改通知单 276

附件 5 隧道×××号线土建××××标爆破监测××××站（区间）监测
日报表 277

附件 6 爆破振动测试日报表 278

附件 7 振动图谱、布点图 279

参考文献..... 281

第 1 章 绪论

1.1 隧道爆破

隧道通常是指修建在地层中的地下通道等建筑物。它被广泛地应用于公路、铁路、矿山、水利、市政和国防等方面,也可扩大到地下空间利用的各个方面,即也可以把各种用途的地下通道和硐室都称之为隧道。1970 年,国际经济合作与发展组织 (Organization for Economic Cooperation and Development, 简称 OECD) 隧道会议中定义隧道为以某种用途在地面下用任何方法按规定形状和尺寸修筑的断面积大于 2m^2 的条形建筑物。

隧道建筑在 21 世纪以前,大多是交通运输、水工隧道。由于隧道的修建使用,克服了平面、高程、江河等障碍,改善了运输条件,缩短了里程,节省了运费,提高了运输能力,使线路更加平缓顺直,从而能更好地满足高速行车的要求,大大提高经济效益。随着大量铁路和公路等建设需要,单座隧道的长度越来越长,已成为当前发展的趋势。目前世界各国铁路上已建成的特长隧道有 50 多条,世界上最长的隧道为日本青函海底隧道 (53.85km),第二长的是英、法海底隧道 (50.5km)。我国有长梁山双线隧道 (12.782km)、秦岭两座单线隧道 (18.46km)、兰武铁路乌鞘岭单线铁路隧道 (左、右线隧道各长 20.05km)、渝怀铁路圆梁山单线隧道 (11.07km)、石太客运专线太行山隧道 (左、右线隧道各长 27.84km)、武广客运专线大瑶山隧道群 (大瑶山 1 号隧道 10.08km,大瑶山 2 号隧道 6.03km,大瑶山 3 号隧道 8.39km)。还有,近二十年来大家热议的跨渤海海峡通道工程,从旅顺老铁山到山东蓬莱,如果采用南桥北隧的方式进行建设,其中隧道全长将近 48~60km。

在城市轨道交通中,地下铁道是解决大城市中繁忙的地面交通运输问题的重要手段之一。全世界已有 100 多座城市开通了 300 多条地铁线路,总长度超过 6000km。世界上地铁线网总长最长的城市是伦敦,有 12 条线路,总长 408km。全球排名第 8 的是上海地铁,8 条线路,总长 228.4km。单条线路最长的是北京地铁 1 号线 (含延伸线八通线),全长 49.404km。

随着我国城市化进程的进一步加快,人口的快速增长和土地资源的日趋稀缺,土地开发利用的重点已由地面向地下空间发展,需要大量建设地下交通、停车场、体育文化和地下商业等。总之,随着人们生活、生产需要,今后多用途、多功能的隧道,将会越来越多地修建。

岩石隧道开挖方法有传统的钻爆法和机械开挖隧道掘进机法。钻爆法又称矿山法,是以钻孔和爆破破碎岩石为主要工序的隧道断面开挖施工方法。钻爆法对地质条件适应性强,开挖成本低,特别适于坚硬岩石隧道、破碎岩体隧道及大量中短隧道施工,是隧道开

挖最常用的施工方法。尽管盾构机已经在国内外很多大长隧道中获得了应用，但在今后相当长的一段时间里，钻爆法仍将是岩石隧道掘进的主要手段，特别是在坚硬岩石隧道、破碎岩石隧道和大量的中、短隧道的掘进施工中。目前的隧道爆破，尤其城市浅埋隧道的爆破具有以下特点：

(1) 由于隧道断面尺寸大，其高度和跨度一般超过 6.0m，双线铁路和高速公路隧道跨度以大断面和超大断面为主，爆破中更加重视对围岩保护。

(2) 地质条件复杂，尤其浅埋隧道（埋深小于 2.0 倍隧道跨度）岩石风化破碎，受地表水、裂隙水影响较大，岩石节理、裂隙、软弱夹层、滴漏水直接影响钻孔和爆破效果。

(3) 隧道施工中重、大型施工设备相对较多，隧道内施工场地相对狭小，作业受到较多的限制。

(4) 城市隧道服务年限长，造价昂贵。为了在运营中减少维修，避免中断交通，施工中必须保证良好的质量。

(5) 城市隧道爆破钻孔质量和精度要求高，孔位、方向和深度要准确，超、欠挖在允许范围之内，确保隧道方向的准确性。因此，隧道爆破除了要求循环进尺、炮孔利用率、炸药消耗等指标外，对岩石破碎块度、爆堆形状、抛掷距离、隧道围岩稳定性影响、周边成形和爆破振动控制等均有更高的要求。

1.2 浅埋隧道爆破

一般情况下是以隧道上方岩层是否能形成天然拱为深埋隧道和浅埋隧道的分界原则，但具体值较难确定，目前在铁路隧道设计中是以实际统计资料值来确定的。

$$H_p = (2 \sim 2.5) h_q \quad (1-2-1)$$

式中 H_p ——深埋隧道与浅埋隧道的分界埋深；

h_q ——载荷等效高度，按下式计算：

$$h_q = q / \gamma \quad (1-2-2)$$

式中 γ ——围岩重度， kN/m^3 ；

q ——隧道垂直均布压力， kN/m^2 。

$$q = 0.45 \times 2^{S-1} \gamma \omega \quad (1-2-3)$$

式中 S ——围岩等级；

$\omega = 1 + i(B-5)$ ——宽度影响系数；

B ——隧道宽度，m；

i —— $B=5\text{m}$ 的围岩均布压力基准增减 1m 时的增减率；当 $B < 5$ 时，取 0.2；当 $B = 5 \sim 15\text{m}$ 时，取 0.1。

当埋深 $h > H_p$ 时，隧道为深埋，当 $h < H_p$ 时，隧道为浅埋。一般在松软的围岩中取高限，在较坚硬的围岩中取低限，其他情况视具体情况而定。

另外，根据《铁路隧道喷锚构筑法技术规范》TB 10108—2002，浅埋隧道划分依据表 1-2-1。

浅埋隧道划分依据

表 1-2-1

围岩等级	覆盖层厚度
Ⅲ	≤ 1.0 倍隧道开挖宽度
Ⅳ	≤ 2.0 倍隧道开挖宽度
Ⅴ	≤ 3.5 倍隧道开挖宽度

在城市市政、交通、水利等设施建设中，经常遇到浅埋隧道。大连地铁大部分区间与车站是典型的浅埋隧道，其爆破开挖。且有以下特点：

(1) 由于洞顶覆盖岩土层薄，一般基岩较破碎，工程地质条件较差，爆破开挖必须确保隧道围岩稳定；

(2) 隧道一般处于城镇地区，隧道上方往往有在用厂房、民房等建筑物，爆破开挖必须确保隧道上方建筑物的安全；

(3) 浅埋段施工周边环境一般比较复杂，爆破振动对施工区域影响大，容易引起“扰民”和“民扰”，必须认真重视爆破施工对环境的影响；

(4) 工期紧、降震与开挖进度矛盾突出，安全条件下快速开挖方法，钻爆是关键。

国内关于浅埋隧道在不良地质条件下实施爆破开挖的成功案例很多，在爆破开挖施工方面积累了许多有益的经验，可以归纳为以下三点：

(1) 以爆破施工全过程的安全实时监测为依托，全面、超前掌握围岩和应保护建筑物的安全动态，指导施工安全；

(2) 以降低爆破振动、爆破对围岩的损伤为重点，制定科学、合理的施工方案，采取有效的综合措施，确保隧道上方建筑物的安全，保证工程的顺利进展；

(3) 以实施信息化施工为手段，加快反馈速度，及时调整爆破参数，优化设计，有效地控制爆破对环境的影响。

对于浅埋隧道“短进尺，弱爆破，多循环，强支护、早封闭、勤量测”是爆破开挖施工的基本原则。采用控制爆破技术和控制炸药单耗实现降低爆破振动强度，减少对爆破施工区段建筑物的影响，尽量减轻对围岩扰动，充分利用围岩自有强度维持隧道的稳定性，有效地控制地表沉降，控制隧道围岩的超、欠挖，达到规则的轮廓成形。对于城市浅埋隧道，采用轮廓光面爆破和先进的掏槽减振技术是前提；实施毫秒延时，降低单响药量爆破是关键；控制爆破规模，即控制一次起爆药量也是降低爆破振动的保证，还可以采用低爆速炸药或采用小直径炸药，布置减振干扰孔等辅助技术措施等进一步解决。

1.3 大连地铁隧道爆破

大连市轨道交通建设始于 1907 年，到 1950 年有轨电车线路达到 11 条，长度约 95.9km。进入 20 世纪 90 年代中后期，仅保留了 201、202、203 三条有轨电车，总长度约 15.9km。

随着城市的发展，路线较短的有轨电车已经无法满足人们出行需求，对城市有轨电车系统进行改造，建设连接新市区与老市区的快速轨道交通系统。2000 年，快速轨道交通 3 号线开工建设，其中一期工程由香炉礁到金石滩，二期工程由香炉礁到火车站，线路全长 49.1km。2005 年，建设快速轨道交通 3 号线开发区到金州九里续建工程，全长 14km。

虽然大连轨道交通建设已有丰硕的成绩,但随着城市经济建设和社会文明的不断提升,也开始规划建设快捷地铁交通。

大连地铁交通项目可追溯到1982年,2009年7月,国家发改委批准建设地铁,2012年10月,批复新增地铁1、2号线二期工程,其中1号线二期工程自会展中心到河口站,线路全长10.3km;2号线二期工程,北段自辛寨子到南关岭,东段自港湾广场到东海公园,线路全长15.9km。自此,1、2号线一、二期工程线路共计总长65.1km,共设车站48座(南关岭、西安路换乘站为两条线共用)。其中,1号线由姚家经会展中心至河口,线路长28.6km,共设车站22座;2号线由东海公园经辛寨子至南关岭,线路长36.5km,共设车站28座。

为了减小地铁施工对周围环境的影响和合理利用地下空间,大连地铁1、2号线许多车站与区间采用浅埋暗挖法施工。针对大连地区地质条件的特殊情况,绝大多数地段采用钻爆法施工,其爆破施工有五大特点:

(1) 涉爆时间长、爆破次数多。以地铁1号线为例,将持续4年时间,扣除地面明挖区间和盾构段,1号线工程约折合总长度33.4km的隧道爆破量,简单按每次爆破进尺1m计,涉及爆破次数高达3万余次,采用台阶法进行爆破开挖,爆破次数将成倍上升到6~12万余次。

(2) 爆破作业单位多。为不影响地铁爆破施工进度,打破爆破施工常规管理模式尽可能的增大施工单位的自主性,经主管部门审核后,在中标单位中符合从事爆破作业相关条件的有20多家。

(3) 地铁爆破作业区域被保护目标多、爆破点距离保护目标近。开挖区上方有大量的各种建筑物与管线。建筑物为人们的日常生活与工作环境,各种管网设施均与人们的生活和城市安全相关。由于爆破持续时间长,爆破次数多,除部分特殊区段外,不可能停止交通,截断水、电、气,从建筑物中撤离人群。再者,大连地铁区间的隧道埋深平均在14m左右,部分区间距地面仅5m左右,是典型的浅埋隧道,所以爆破安全问题十分突出。

(4) 地质情况复杂。大连三面环海,地下地质条件、地表地形复杂多变,加上大连建市百年来,城市建设和人防工程对原有地形地貌改变较大,部分原有的冲沟、河谷和浅海已经回填,一些地下的人防洞已经废弃,形成暗沟、暗河及地下人防空洞,增加了地形地质条件的复杂程度。据大连市勘察设计院提供的有关大连地铁工程前期地质普查资料显示,大连在建地铁沿线土层共有20多种,空间分布变化大,工程性质差别较大,稳定性差,地铁施工需要加强支护措施;沿线底层地质时代跨度大,有不同时代的10余种岩性;沿线岩溶多,充填物性质多变。严格意义上讲,大连地铁还属于软岩爆破。在软弱围岩隧道施工时,为了采用凿岩台车等高效的施工机械,提高隧道施工速度,更重要的是为了能应用新奥法施工技术开挖和支护隧道,采用控制爆破,减少爆破振动对围岩扰动,目的是尽可能减轻对围岩的扰动,维护围岩自身的稳定性,达到规则的轮廓成形。

(5) 爆破参数动态调整及时性要求高。这些对于爆破方案的动态调整提出要求,应做到随围岩、周边环境的变化,适时调整爆破参数。其中爆破振动允许指标不仅满足《爆破安全规程》GB 6722—2003,还制定更严格的指标控制,实现人性化的爆破控制,避免不必要的“民扰”问题,甚至个别区段采纳无感爆破理念。

1.4 浅埋隧道减震技术

目前,在地下进行的巷道爆破没有严格的数学模型,评估爆破振动效应大小都使用经验公式,使用较频繁的是速度和加速度,即萨道夫斯基经验公式。萨道夫斯基公式描述了爆破地震波强度随传播距离的增加而呈幂函数衰减的规律:在爆破近区,波阵面上的压力、密度很大,致使地震波强度(能量)衰减很快,随着传播距离的增加,能量衰减速度减慢。当爆破源(包括药量、孔网参数、装药结构、起爆方法、自由面条件等)和爆心距相等,而岩体地质地形条件变化时,振动速度值将随之变化,从而使爆破地震波能量的衰减具有不同的特征。从萨道夫斯基公式上可以看出爆破振速和爆破药量、传播的距离、传播介质等条件有关,要想使振速降低,就要降低起爆的药量,而传播介质和传播距离对于地表建筑来说是无法选择的,只有设法控制最大齐爆炸药量大小,或通过人为调整掏槽位置,适当增加有效距离,对相关控制研究,广大学者做了大量的、卓有成效的工作,比如:

(1)在广州地铁5号线中,朱赞成等人采用传统微振控制爆破技术,控制单段最大药量来降低爆破振动,使工程顺利通过了城市复杂地段。根据地质特点,拱部墙部分别采用光面爆破和预裂爆破,核心掏槽采用抛掷爆破。该方案充分利用围岩自稳能力,尽可能减轻围岩扰动,能有效控制地表沉降以及超、欠挖,形成规则的轮廓。在围岩软弱、埋深浅的环境下,采用CRD(交叉隔壁法)施工,预裂爆破时先预裂后掏槽,然后辅助眼。光面爆破相反,先从掏槽眼,由里而外层层进行,最后周边光面爆破。

(2)在青岛地铁青纺医院段的施工中,中铁十六局朱春华运用控制爆破技术,成功通过了浅埋地段。先用明挖法清除地表的回填土,然后爆破开挖花岗岩。由于要保证建筑物和管线的安全,要控制爆破时产生的地震效应,为此,循环进尺控制在1m,爆破设计采用多钻眼,少装药,分多段按顺序起爆,爆破顺序是先掏槽眼,再底部,最后拱部。

(3)李俊桢等人成功利用多级小楔形掏槽爆破掘进技术,使施工快速而顺利地通过了济南开元寺复杂地段。提出了“多级复式楔形掏槽”的爆破方案,该方案使大楔形掏槽转为小楔形掏槽。该方案一来使爆破药量减少,二来使前一级掏槽为后一级掏槽创造更好临空面,可以使爆破夹制作用减弱,减轻爆破振动。再经过两步优化,第一步,为了使下一级临空面改善在掏槽中心增加2个浅直眼炮孔作为第一段爆破掏槽,第二步,为了实现同排掏槽斜眼微差延时错峰,保证成对斜眼同时起爆,确保减振和高效掏槽,利用高精度孔外延时雷管。

(4)在辽宁省本溪八盘岭和吉林延吉小盘岭公路隧道掘进中,杨惠林等人成功地运用了双光面层及双光面层导向孔爆破法,使施工顺利通过。为保证拱部围岩稳定且得到光滑平整面,采用双光面层导向孔爆破法。该法即在两个正常光面爆破孔中加一个孔,中空不装药,起导向作用。两种光爆法的成功运用取得较好的效果,对光面爆破及预裂爆破的发展,为以后在松软围岩和第四纪地层中运用,起到了很好的借鉴作用。

(5)在重庆轻轨大坪车站隧道施工中,中铁十一局的朱泽兵等人采用增设减振孔的光面爆破等一系列技术,控制了爆破带来的地震效应,保护了地标建筑物,使得工程安全顺利通过。选择上下台阶法开挖,由于拱部特别脆弱,且一般掏槽孔爆破振动最大,所以在

上半断面采用双楔形掏槽，对掏槽部位岩体分部爆破，这样既能方便掏槽又能减少单段药量，便于减震。爆破大拱脚时，为了减少爆破振动，在周边孔之间增加一个空孔，在特别困难地段采用预裂爆破，这样可以最大限度地达到减震目的。

随着我国的的城市交通发展，浅埋隧道的爆破施工法案例不胜枚举，这里仅仅选出近期具有代表性的来介绍，浅埋隧道爆破减震技术归纳总结为以下几点：

(1) 控制药量。质点振速与最大一段药量成正比，而一般掏槽孔爆破产生的振动最大，可得出，降低单段最大药量能有效减震。

(2) 控制爆破顺序。将一次爆破分为多组按一定顺序爆破，设计合理的时差间隔，让振动波错开，达到降震目的。

(3) 选择合适掏槽方式。一般有倾斜掏槽和垂直掏槽两种。其中倾斜掏槽又可分为单向掏槽、锥形掏槽和楔形掏槽。浅埋隧道爆破中，掏槽孔形式非常关键，常常关系到爆破效果的好坏，要根据不同的施工要求和地质条件选择不同的掏槽模式。如“多级复式楔形掏槽”的掏槽方式。

(4) 初期防护。要根据建筑物的特点和周边自然环境，采用必要的加固减震措施。

(5) 缩小循环进尺，缩小爆破规模。在一些复杂且难度大的地段，缩小循环进尺，以便控制药量，来保证建筑物的安全。

(6) 根据现场条件选择恰当的开挖方式。采用合理的开挖方式对减震很有帮助，一般来说，有中壁法（CD法、CRD法）、双侧导坑开挖法（双侧导坑超前开挖法，眼镜法）、上下台阶法等。

(7) 选择合适的爆破参数。很多施工项目中，爆破参数（如炸药单耗）是通过现场测算出来的，为了更加准确地控制药量。

(8) 设计合理的炮孔布置方法和爆破顺序。根据不同的现场条件和开挖方式设计恰当的炮孔布置图与合理的爆破顺序有助于减震。

(9) 爆破方法的综合运用。根据不同的现场条件，有时候不能采用单一的爆破方式，要综合运用，如广州地铁5号线中，就采用了抛掷爆破、预裂爆破和光面爆破的综合作技术。

(10) 现场监测。除了以上几点，现场振动监测是至关重要，及时反馈振动数据有助于规范施工，优化爆破数据，更加确保施工的安全。

如今，随着城市化进程加快，交通制约着人们的出行和经济的发展，越来越多的城市修建了地铁，其中浅埋隧道占了很大比重，而在繁华的都市中，如何既能保证建筑物和市民的安全、又能保证工期的问题日益受到关注。

结合实际施工，对爆破振动指标给出更加合理的控制指标，尤其对地下管线借鉴德国标准，全线依据该指标控制，达到了良好效果；坚守单段药量最小化方向，依据市场配备通用的第一系列毫秒导爆管雷管延时特性，计算重炮概率，实现孔内外综合微差方式控制爆破振动；给出浅孔柱状装药爆破原理，划分围岩破碎区、破裂区范围，对围岩保护可以参考，同时也给出飞石计算公式；在施工工法上给出了台阶法、CD法、CRD法爆破设计，区间常规段与复杂段（过民房、管廊、购物长廊、管线、桥梁）爆破设计，车站上选用了PBA法、拱盖法、中洞法三个设计，风井选择了复杂地段（过桥墩、交叉既有盾构隧道段）设计等。对施工过程的各个阶段上给出安全管理措施，提供了爆破安全检查表

格、爆破振动检查表格、爆破振动监测日报表、爆破安全监理审批表以及爆破振动超标整改通知单等。所有这些对于未来城市浅埋隧道爆破施工具有指导意义。

1.5 本书结构及宗旨

浅埋隧道爆破由于洞顶覆盖岩土层薄，一般基岩较破碎，工程地质条件较差，爆破开挖必须确保隧道围岩稳定；处于城镇地区，隧道上方往往建有厂房、民房等建筑物，爆破开挖必须确保隧道上方建筑物的安全；施工环境比较复杂，爆破振动对施工区域影响大，容易引起“扰民”和“民扰”。本书依据大连地铁爆破施工情况，重点介绍了浅埋隧道施工工法、柱状装药爆破原理及岩石破碎规律、爆破振动控制指标选择、复杂条件下浅埋隧道爆破设计及爆破安全管理问题。

1.6 隧道爆破基本术语

隧道开挖常用方法有全断面法、台阶法、CD法、CRD法、双侧壁导坑法（眼镜法）、中导洞超前预留光爆层法。根据隧道的断面大小、地质情况、围岩性质和施工队伍素质等综合考虑选取开挖方法。一般情况下，在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级围岩地段采用全断面方法，在Ⅳ、Ⅴ级围岩地段采用台阶法。在比较破碎围岩地段，隧道断面特大地段或超浅埋地段，采用CD法、CRD法或双侧壁导坑法。在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级围岩地段，隧道断面较大时，采用中导洞超前预留光爆层法。

隧道爆破是单自由面条件下的岩石爆破，其关键技术是掏槽爆破，其次是周边光面爆破。隧道爆破的原则是：先做出设计，在掌子面上布置炮眼，而后根据设计的炮眼深度和方向钻眼，然后根据设计装药量及起爆顺序将炸药及不同段别的雷管装入炮眼，待做好安全防护工作后，连接网路并起爆。按照爆破顺序，最初的掏槽爆破要形成一个槽腔，破岩深度取决于掏槽效果。成功的隧道爆破，应该是达到预定的进尺，掌子面较平整，岩碴块度适宜装运，轮廓壁面平顺，超、欠挖在预定的范围之内，围岩稳定。

主要名词解释

掏槽——即在开挖面的中下部，钻一定数量的眼，并且超量装药，以破碎并抛掷岩石，首先形成一个槽腔，增加自由面为其他炮眼的爆破创造临空条件。

光面爆破——即在开挖轮廓线上比普通爆破较为密集的炮眼，采用特殊装药结构，周边眼间距与抵抗线之比大致为0.8，宜在主爆体爆破后同时起爆，使岩体沿开挖轮廓线解除，围岩最大限度少受损伤的爆破技术。

预裂爆破——与光面爆破相比，炮眼还要密一些，装药量也要多一些，爆破从开挖断面轮廓线开始，即是周边炮眼在断面上的所有其他炮眼爆破之前首先同时起爆，其工艺与光面爆破基本一样。当装药量和间距选择适当时，在各炮眼的爆破作用力相互作用下，使周边炮眼之间形成连续的预裂破裂面，成为随后其余炮眼爆破所产生的爆破冲击波的屏障，使传到破裂面外侧围岩处的爆破作用力减到最小，以使围岩所受到的扰动和破坏达到最小程度。

循环进尺——单次开挖爆破的隧道进尺。

炮眼间距——同段号爆破两相邻炮眼的中心距离。

抵抗线——药包中心至自由面的最小距离。

炸药单耗——爆破 1m^3 岩石所需要的炸药量。

炮眼利用率——实际循环进尺与炮眼深度之比。

掏槽眼——开挖断面中下部，最先起爆的部分炮眼。

扩槽眼（掘进眼）——随掏槽眼之后爆破的一部分炮眼。

周边眼——周边轮廓线上的炮眼。

内圈眼——紧挨周边眼的二圈眼。

底板眼——隧道底边上的炮眼。

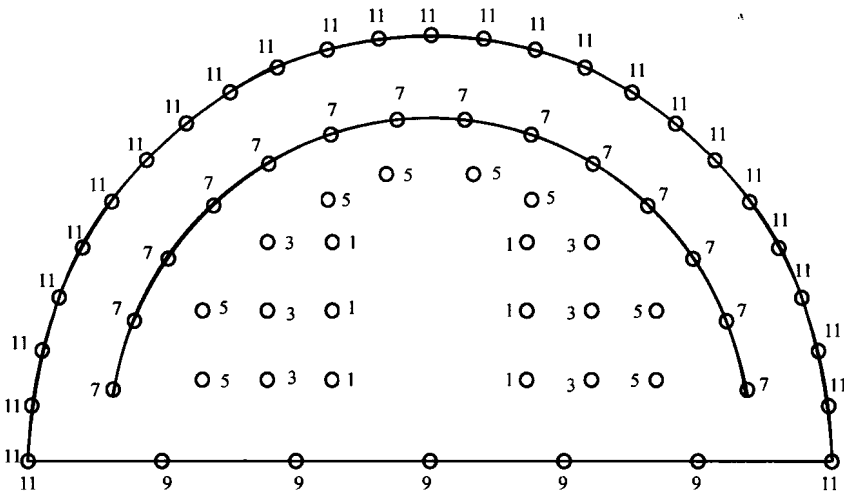


图 1-6-1 炮眼类别划分

备注：1—掏槽眼；3、5—掘进眼；7—内圈眼；9—底板眼；11—周边眼

第 2 章 隧道围岩概述

隧道爆破与围岩有着密切的关系。为使爆破工程达到预期的目的，就必须掌握围岩一般知识，了解围岩的种类、成分、分级、可爆性，分析地形、地质、水文地质及物理地质等自然条件，全面考虑这些条件与爆破作用的关系问题。采取合理的爆破参数，适宜的炸药品种。并尽可能地减小爆破对隧道围岩的破坏，保证围岩的稳定性。

围岩稳定性是指在地下工程开挖过程中，围岩原有压力状态改变、重新分布后，仍能自然成拱、依靠自然强度保持平衡、抵抗破坏性变形的能力，主要包括围岩的承载能力和变形特性，围岩的稳定性一般通过围岩的分级来表征。

2.1 岩石成因分类

所谓岩石，就是由一种或数种矿物聚集而成的集合物。地壳上每一种岩石都有自己的物理性质和化学成分。通常按成因将岩石分为三大类，即：火成岩、沉积岩、变质岩。

2.1.1 火成岩

火成岩是由埋藏在地壳下部深处的岩浆（熔融物质）上升冷凝喷出地表形成的。火成岩的产状由岩浆凝结的环境所决定，可分为喷出的和侵入的。结构、构造结构是指岩石的质地，是由组成岩石的矿物的结晶程度、形状、大小以及互相排列的情况所决定的。结晶程度有全晶质的、半晶质的和非晶质的。晶类有显晶的（斑粒、粗粒、中粒、细粒）和隐晶的。构造是指岩石的外表形态，是由组成岩石的矿物集合体的结合方式所决定的。化学成分一般按岩石中含 SiO_2 的成分分成酸性的（含石英为主），中性的（含长石为主），基性的（含辉石、斜长石、角闪石）和超基性的（含深色矿物、如橄榄石、辉石、角闪石）。常见的火成岩有花岗岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、流纹岩、火山角砾岩。

2.1.2 沉积岩

地壳上面存在的岩石受外力作用后遭到破坏而成碎小物质风化产物，风化产物经搬运沉积或堆积原地叫沉积岩。沉积物在常温常压下经过石化固结后就成了沉积岩。地面上沉积岩的分布约占大陆面积的 75%。沉积岩有其如下特点：

（1）层理。沉积岩的重要特点就是具有层状构造。这是由于沉积物在长时期内一层复一层堆积起来的结果，相邻两个层的接触面叫做层理面。两层理面间的厚度就是岩层厚度。多数沉积岩在沉积初期层理面积是水平的（也有交错的），后来由于地壳的变动则可变成倾斜的或弯曲的。

（2）化石或痕迹。沉积岩中可保存有古生物的遗骸，这也是沉积岩的一个特点。由于沉积的环境不同，有的沉积岩具有不同的痕迹，如波痕、泥裂、雨痕、足印或结核等。

（3）结构。沉积岩的结构指沉积物颗粒的粗细、均匀性、滚圆度和松散或致密程度。它与沉积物的成分和沉积环境有关。按颗粒的大小可分砾状、巨粒、粗粒、中粒、细粒、

微粒和泥质等。滚圆度分棱角状半滚圆和滚圆。松散或致密度颗粒间的结合程度，常由一种细腻物质胶结起来（有硅质、钙质、铁质、泥质等胶结物）。

（4）沉积岩的分类。一般按岩石的成因和物质组成为三大类。碎屑沉积岩，如砾岩、砂岩、页岩。化学沉积岩，如岩盐、石膏、石灰岩、白云、赤铁矿、褐铁矿、磁铁矿等。生物沉积岩，如煤、硅藻土等。

2.1.3 变质岩

变质岩是由火成岩或沉积岩经过强烈变化（由高温高压或岩浆的热液热气的作用）而形成的。

（1）构造。变质岩多数具片理构造。片理是指岩石可以顺着与含片状或长条状矿物方向相平行的面揭开来的一种性质。由于变质程度的深浅，矿物结晶颗粒的大小和排列情况的不同，变质岩的构造可分为：片麻状、片状、千枚状、眼球状，块状或层状等构造类型。

（2）结构。在变质作用过程中，一般晶体都经过重新安排，所以变质岩的晶体结构称为变晶结构。按晶粒大小可分为等粒、不等粒、斑状等结构。按颗粒形状可分为鳞片状、角岩状、碎斑状、纤维状、摩棱状等结晶结构。

（3）种类。按变质作用分为自变质、接触变质、动力变质、区域变质、进化变质和退类。常见的变质岩有：片麻岩、片岩、千枚岩、板岩、大理岩、石英岩等。

2.2 岩石坚硬程度分类

岩石坚硬程度按下表分为极硬岩、硬岩、较软岩、软岩和极软岩。根据单轴饱和抗压强度 R_c 的大小可将岩石分为硬质岩和软质岩两类，见表 2-2-1。

岩石坚硬程度的划分表 表 2-2-1

岩石类别		单轴饱和抗压强度 R_c (MPa)	代表性岩石
硬质岩	极硬岩	$R_c > 60$	未风化或微风化的花岗岩、片麻岩、闪长岩、石英岩、硅质灰岩、钙质胶结的砂岩或砾岩等
	硬岩	$30 < R_c \leq 60$	弱风化的极硬岩；未风化或微风化的熔结凝灰岩、大理岩、板岩、白云岩、灰岩、钙质胶结的砂岩、结晶颗粒较粗的岩浆岩等
软质岩	较软岩	$15 < R_c \leq 30$	强风化的极硬岩；弱风化的硬岩；未风化或微风化的云母片岩、千枚岩、砂质泥岩、钙泥质胶结的砂岩和砾岩、泥灰岩、泥岩、凝灰岩等
	软岩	$5 < R_c \leq 15$	强风化的极硬岩；弱风化至强风化的硬岩；弱风化的较软岩和未风化或微风化的泥质岩类；泥岩、煤、泥质胶结的砂岩和砾岩等
	极软岩	$R_c \leq 5$	全风化的各类岩石和成岩作用差的岩石

注：1. 当无法取得饱和单轴抗压强度数据时，可用点荷载试验强度换算，换算方法按现行国家标准《工程岩体分级标准》GB 50218—1994 执行；
2. 当岩体完整程度为极破碎时，可不进行坚硬程度分类。

2.3 岩石完整程度分类

按岩体完整程度可将岩石划分为完整、较完整、较破碎、破碎、极破碎五类，见表 2-3-1。