

第一章 概 论

一、隧道的定义及其用途

隧道 (tunnel) 一般指作为地下通道的工程建筑物,有道路隧道、水底隧道、城市道路隧道、地下铁道、铁路隧道和航运隧道、引水隧道等。按照常规隧道可分为两大类:一类是修建在岩层中的,称为岩石隧道;一类是修建在土层中的,称为软土隧道。岩石隧道修建在山体中的较多,故又称山岭隧道;软土隧道常常修建在水底和城市立交,故称为水底隧道和城市道路隧道。埋置较深的隧道则多采用暗挖法施工。

公路隧道作为汽车通行的隧道工程,分为山岭公路隧道、水下公路隧道和城市公路立交隧道。

在山岭地区,修建隧道可以有效地克服地形或高程障碍,改善路线线形,提高路线等级,缩短行车里程,节约能源和时间,减少对地貌的破坏,保护生态环境;同时又有利于减少开挖路堑引起的落石、坍方、滑坡、雪崩等公路常见病害。在江河、海峡、港湾地区修建水底隧道可减少桥梁对水路交通的影响。城市公路隧道可以减少用地,实现立体交叉,对解决交叉口的拥挤阻塞、疏导交通有着十分重要的作用。隧道除了以上作用以外,还能增加隐蔽性、提高防护能力和不受恶劣天气对公路的影响,有利于国防的建设。

隧道是地下工程建筑物,为保持隧道四周岩体的稳定,确保行车安全,通常需要修筑主体建筑物和附属建筑物。即主体建筑物——洞门、洞身衬砌 附属建筑物——通风、照明、防排水、安全设备等。

洞身衬砌的作用是承受围岩压力、结构自重及其他荷载,防止围岩风化、崩塌和洞内的防水等。洞口的主要作用是防止洞口坍方落石、保持仰坡和边坡的稳定。通风照明、防排水、安全设备等的作用是确保行车安全、舒适。

根据上述对隧道仅有一个概念认识,而不同的隧道和不同设计方法和理论,使隧道的施工方法也不相同,本书将根据这些情况,对公路隧道的施工作一详细的论述。

二、隧道工程的发展简况

人类很早就是利用天然洞穴作为住处,当社会发展到能制造挖掘工具时,就出现了人工挖掘的隧道。

在我国最早有文字记载的地下建筑物即《左传》中有“……掘地及泉、隧而相见……”的记载,也就是“黄泉”的典故,它出现在东周初期公元前 700 年左右。最早用于交通的隧道为“石门”隧道,位于今陕西省汉中县褒谷口内,建于东汉明帝永平九年(公元 66 年)。用作通道的还有安徽毫县城内的古地下道,建于宋末元初(约 13 世纪)为我国最早的城市地下道。

在其它古代文明地区有很多著名的古隧道,如公元前 2180 ~ 2160 年前后,在古巴比伦城幼发拉底河下修筑的人行隧道,是迄今已知的最早用于交通的隧道,为砖砌构造物。古代最大的隧道建筑物可能是那不勒斯上普佐利(今意大利境内)之间的婆西里隧道,完成于公元前 36

年，至今仍可使用。它是在凝灰岩中凿成的垂直边墙无衬砌隧道。

约于公元 7 世纪 我国隋末唐初时代的孙思邈在《丹经》一书中记载了黑火药的制法，1225 年以后传入伊斯兰国家，13 世纪后期传到欧洲，17 世纪初，奥地利的工业家首先开始用于开矿。1866 年瑞典人诺贝尔发明黄色炸药，为开凿坚硬岩石提供了条件。

近代隧道兴起于运河时代，从 17 世纪起，欧洲陆续修建了许多运河隧道。其中法国的兰葵达克 languedoc 运河隧道 建于 1666~1681 年 长 157m，它可能是最早用火药开凿的公用隧道。1830 年前后，铁路成为新的运输工具。随着铁路运输事业的发展，隧道越来越多。1895~1906 年已出现了长 19.73km 穿越阿尔卑斯山的最大铁路隧道。目前代表铁路隧道建设水平的有连接英国与法国的穿过英吉利海峡的海底隧道，全长 50.50km，和日本横跨津轻海峡的青函隧道 全长 53.85km，我国最长的铁路隧道有西安安康铁路秦岭隧道，19.45km 长。公路隧道已在不断地增加。我国随着高等级公路的发展公路隧道也越来越多。

目前，世界上科技发展日新月异，有两个空间有待人类进一步开发，一个是宇宙空间，一个是地下空间，所以隧道工程也将会起到越来越重要的作用。

隧道工程的施工条件是极其恶劣的，体力劳动强度和施工难度都相当大。为减轻劳动强度，人们曾经经过长期坚持不懈的努力。古代一直使用“火焚法”和钢钎铁锤等原始工具进行开挖，直到上个世纪才开始采用钻爆作业，至今大约有一百多年的历史。随着现代文明的到来和工业化的发展，隧道机械的发展也在不断进步。首先发明了凿岩机，经过将近一个世纪的努力，工人们已经从繁重的体力劳动中解放出来了。和钻爆开挖法完全不同的还有两种机械方法，发展成今天的高效率大型多头摇臂钻机。一种是用于软土地层的盾构机，发明于 1818 年，经过一个半世纪的不断改进，已经从手工开挖式盾构，发展到半机械化乃至全机械化盾构，能广泛用于各种复杂的软土地层的掘进。另一种是用于中等坚硬岩石地层的岩石隧道掘进机。首次试掘成功的隧道掘进机，诞生于 1881~1883 年。目前，已经发展成断面（直径 10m 以上）的带有激光导向和随机支护装置的先进的掘进机，机械化程度大大提高，加上辅助的通风除尘装置，使工作环境得到很大改善。目前应用高压水的射流破岩技术已经过关，它能以很快速度在花岗岩中打出炮眼，再在隧道周边用高压水切槽，然后爆破破岩。优点是减少超挖，可以开凿任意断面形状的隧道，保护围岩，降低支护成本，并能增加自由面以降低炸药消耗和炮眼数量；但消耗功率较大，设备成本较高，技术上还未达到十分成熟的程度。

地层压力的研究开始于 14 世纪。此后随着采矿和隧道工程的发展，地层压力理论也在相应地发展着。这种研究基本上沿两个方向进行。一个是把地层视为松散构造的散粒体理论，另一种是把地层视为连续弹性体塑性理论。近百年来，从理论上和工程实践中对地层压力进行了较广泛的研究，获得了不少成果，但未得到系统、严密的理论，直到今天仍在不断地进行着新的探索和发展。

80 多年以前 普氏 (прогдьяконов) 以物质松散体为基础，提出了地层压力的计算方法。但他把岩石假定为松散体，并把复杂的岩体之间的联系用一个似摩擦系数描写，这种做法显然过于粗糙，在工程实践中也常常出现失败的情况。不过，直到现在普氏理论还在应用着，因为这个方法比较简单，即使对不熟悉地质或不了解现场地质条件的人 也能运用普氏系数来进行设计。但目前这种方法在设计理论上已大大落后，各设计单位已不用其对隧道进行设计。

我国著名学者陈宗基教授，在 1958 年首次把岩石力学作为一门边缘学科来对待。过去基本上是把岩石当作材料进行研究的，他强调必须用力学的观点，以地质为基础来解决工程实际提出的问题。在研究中，既要重视岩石的变形强度特性、结构关系的理论研究，又要解决工程

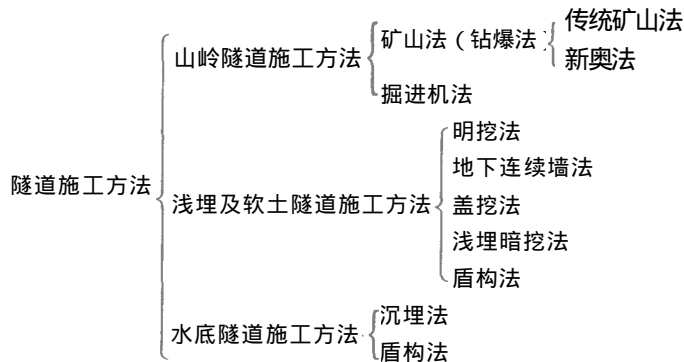
实际提出的各种问题，并指出现场试验与室内试验是相辅相成和不可分割的，强调问题的关键在于要有正确的概念。他最先引用流变理论研究岩石的流变特性，指出即使在坚硬岩石中修建地下洞室，也要考虑流变对长期稳定的影响。还从板块运动、地应力的产生，分析了流变对高地应力地区工程建设的影响，用封闭地应力的概念解释了工程中如岩爆等各种特殊现象，还从微观结构分析了膨胀岩的破坏机制等等。所有这些都给地下工程的研究、设计和施工以巨大的推动，并提供了新的理论依据。

新奥法是本世纪 40 年代开始发展起来的，它是以喷射混凝土和锚钎为主要支护手段的一种设计施工方法，这种支护起到加固围岩的作用，在确保坑道稳定的基础上，使设计更加合理经济。新奥法与传统的矿山法相比，更能结合实际地质条件。随着隧道理论的日臻完善，已在地下工程中得到广泛的应用。

三、隧道施工基本概念

隧道施工是指修建隧道及地下洞室内的施工方法、施工技术和施工管理的总称。

隧道施工方法的选择主要依据工程地质和水文地质条件并结合隧道断面尺寸、长度、衬砌类型、隧道的使用功能和施工技术水平等因素综合考虑研究确定。根据隧道穿越地层的不同情况和目前隧道施工方法的发展，隧道施工方法可按以下方式分类：



隧道施工技术主要研究解决上述各种隧道施工方法所需的技术方案和措施（如开挖、掘进、支护和衬砌施工方案和措施）隧道穿越特殊地段时（如膨胀土、黄土、溶洞、塌方、流沙、高地温、岩爆、瓦斯地层等）的施工手段 隧道施工过程中的通风、防尘、防有害气体及照明、风水电作业的方式方法和对围岩变化的量测监控方法。

隧道施工管理主要解决施工组织设计（如施工方案的选择、施工技术措施、场地布置、进度控制、材料供应、劳动力及机具安排等）和施工中的技术管理、计划管理、质量管理、经济管理、安全管理等问题。

这里要指出的是地质的好坏关系到隧道的成败，左右着工程的造价、施工的难易、施工的安全。地质的好坏是隧道成败的直接因素，但不是决定因素。由于地质勘探的局限性和地质条件的复杂性及多变性，隧道施工过程中经常会遇到突然变化的地质条件、意外情况（如塌方、涌水等），原制定的施工方案、施工技术措施和施工进度计划也要随之调整，因此，作为一个隧道施工技术人员，不能仅凭书本上的知识，更重要的是将所学知识丰富的工程实践经验相结合，详细制定出灵活多变的施工方案以适应客观条件的变化。

四、岩体的工程分级

选择掘进方式时，不仅要考虑围岩的稳定性，而且应考虑坑道范围内岩体的坚固性，即挖

掘岩体的难易程度。我国隧道工程直接借用土石方工程的分级方法，将岩体挖掘的难易程度按六级分类 见表 1-1。

岩体工程分级

表 1-1

等级	类别	岩体名称	$\gamma(\text{KN}/\text{m}^3)$	ϕ	掘进方式		
一	松土	砂类土,种植土,软塑的粘砂土,砂粘土,弃土,未经压实的填土	15 ~ 16	9° ~ 27°	可用人工掘进	宜用单臂掘进机	可用盾构加单臂掘进机并拼装衬砌
二	普通土	半干硬的、硬塑的粘砂土和砂粘土,可塑的粘土,可塑的膨胀土(裂土),新黄土,中密的碎石类土(不包括块石土、漂石土),压实的填土,风积砂	15 ~ 18	30° ~ 40°			
三	硬土	半干硬的粘土,半干硬的膨胀土(裂土),老黄土,含块石、漂石 $\geq 30\%$ 并 $< 50\%$ 的土及其它密实的碎石类土,各种风化或土状的岩石	18 ~ 20	56° ~ 60°			
四	软石	块石土,漂石土,岩盐。各种软质岩石:泥岩,泥质页岩,泥质砂岩,泥质砾岩,煤,泥灰岩,凝灰岩,云母片岩,千枚岩等	22 ~ 26	65° ~ 70°	可用全断面掘进机		
五	次坚石	各种硬质岩:硅质页岩,钙质砂岩,钙质砾岩,白云岩,石灰岩,坚实的泥灰岩,软玄武岩,片岩,片麻岩,正长岩,花岗岩	24 ~ 28	70° ~ 80°			
六	坚石	各种极硬岩:硅质砂岩,硅质砾岩石,致密的石灰岩,大理岩,石英岩,硬玄武岩,闪长岩,正长岩,细粒花岗岩	25 ~ 30	80° ~ 87°			

第二章 隧道施工

第一节 施工准备

施工准备就是根据隧道的不同情况，做好现场调查研究，核对设计文件和具体编制施工组织设计等工作。应做好以下几方面工作。

一、施工的技术准备

在一条隧道的施工之前，施工的技术准备特别重要，它是开工后施工的指导，技术准备越充分，以后的施工就越顺利。

（一）深入工地调查

主要调查和预测隧道施工可能对地表和地下已设结构物的影响；对交通运输条件和施工运输便道进行方案比选 施工场地布置与洞口相邻工程、弃渣利用、农田水利、征地的关系 建筑物、道路工程、水利工程和电力、电讯线等设施的拆迁情况和数量 调查和测试水源、水质并拟定供水方案 天然筑路和衬砌材料 石料、砂土 的产地、质量、数量的多少和供应方案 可利用的电源、动力、通信、机具车辆维修、物资消防、劳动力、生活供应及医疗卫生条件 当地气象、水文资料及居民点的社会状况；施工中和营运后对自然环境、生活环境的影响及需要采取的保护措施。

（二）全面熟悉设计文件

要安排技术人员会同设计单位对现场核对，掌握工程的重点和难点，了解隧道方案的选定及设计经过；重点复查对隧道施工和环境保护影响较大的地形、地貌、工程地质及水文地质条件是否符合实际、保护措施是否恰当；核对隧道平面、纵断面设计、了解隧道与所在区段的总平面、纵断面设计的关系；核对洞口位置、式样、衬砌类型是否与洞口周围环境相适应；核对设计文件中确定的施工方法、技术措施与实际条件是否相符合；核对洞外排水系统和设施的布置是否与地形、地貌、水文气象等条件相适应；交接和复查测量控制点、施工的基准点及水准点，并定期进行复核。

（三）编制施工组织设计

首先根据现场调查和合同设计单位对设计文件的熟悉与了解，选择施工方法。施工方法应根据地质条件 结合隧道长度、断面、结构类型、工期要求、施工技术力量、安全生产、机械设备、材料、劳动力组合等情况合理确定，并依此编制进度计划。

施工方法特别重要。这里简单介绍一下山岭隧道的常规施工方法——矿山法，它因最早应用于采矿坑道而得名。矿山法多数情况下都需要采用钻眼爆破进行开挖，故又称为钻爆法。从隧道工程的发展趋势来看，钻爆法仍将是今后山岭隧道施工最常用的方法。

在矿山法中，坑道开挖后的支护方法，大致可分为钢木支撑和锚杆喷射混凝土支护两类。

作为施工方法，人们习惯上将采用钻爆开挖加钢木构件支撑的施工方法称为“传统的矿山法”而将采用钻爆法开挖加锚喷支护的施工方法称之为“新奥法”。

二、施工设备的准备

在施工的技术准备完成之后，也就可以按照施工组织设计的要求，根据不同的施工方法，对施工的设备进行准备。

(一) 一般钻眼机具

隧道工程中常使用的凿岩机有风动凿岩机和液压凿岩机，另有电动凿岩机和内燃凿岩机，但较少采用。其工作原理都是利用镶嵌在钻头体前端的凿刃反复冲击并转动破碎岩石而成孔。有的可通过调节冲击功大小和转动速度以适应不同硬度的石质，达到最佳成孔效果。

1. 钻头和钻杆

钻头直接连接在钻杆前端(整体式)或套装在钻杆前端(组合式)钻杆尾则套装在凿岩机的机头上，钻头前端则镶入硬质高强耐磨合金钢凿刃。

凿刃起着直接破碎岩石的作用，它的形状、结构、材质、加工工艺是否合理都直接影响凿岩效率和其本身的磨损。

凿刃的种类按其形状可分为片状连续刃及柱齿刃(不连续)两类。片状连续刃又有一字形、十字形等几种布置形式。柱齿刃又有球齿、锥形齿、楔形齿等形状之分。

一字形片状连续刃钻头的制造和修磨简单，对岩性的适应能力较强，适用于功率较小的风动凿岩机在中硬以下岩石中钻眼，但钻眼速度较慢，且在节理裂隙发育的岩石中容易卡钻。

十字形片状连续刃钻头和柱齿刃钻头的制造和修磨较复杂，适用于功率较大和冲击频率较高的重型风动或液压凿岩在各种岩石中钻眼，尤其在高硬度岩石中或节理裂隙发育的岩石中钻眼效果良好，速度也快。

常用钻头的钻孔直径有 38mm、40mm、42mm、45mm、48mm 等，用于钻中空孔眼的钻头直径可达 102mm，甚至更大。钻头和钻杆均有射水孔，压力水即可通过此孔清洗岩粉。钻头构造见图 2-1。

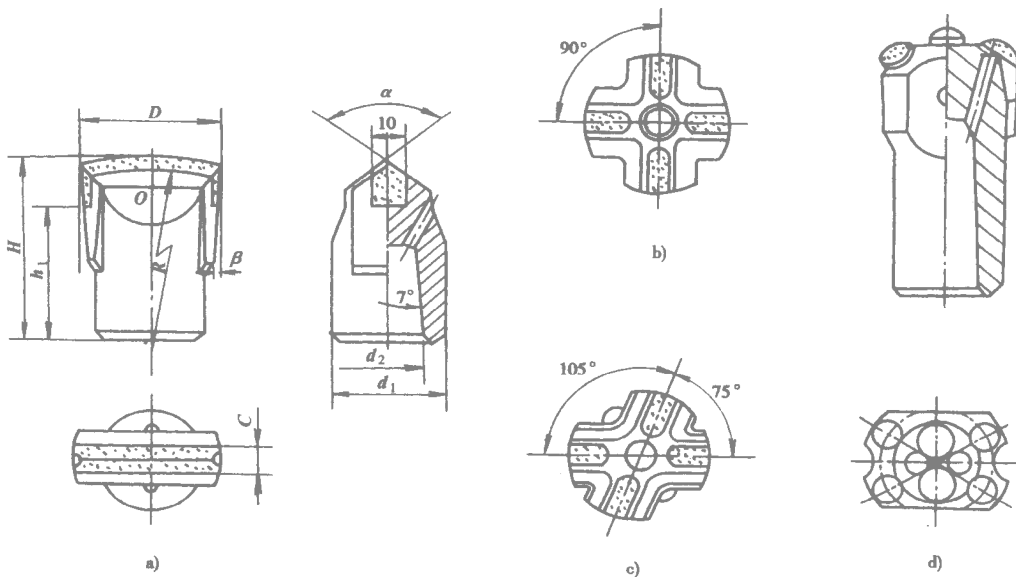


图 2-1 钻头形式

a)一字形钻头 b)十字形钻头 c)X形钻头 d)柱齿刃钻头

钻眼速度受以下几个因素的影响：冲击频率；冲击功；钻头形式；钻孔直径；钻孔深度及岩石质量等。另外钻头与钻杆、钻杆与机头的套装紧密程度和钻杆的质量、粗细则影响冲击功的传递。若套装不紧密、钻杆轴线与机头轴线重合不好或钻杆硬度小，钻杆较粗，都会损耗冲击功而降低钻眼速度。

2. 风动凿岩机

风动凿岩机俗称风钻，它是以压缩空气为驱动力。它具有结构简单，制造维修简便，操作方便，使用安全的优点。见图 2-2。但压缩空气的供应设备比较复杂，能耗大，凿岩速度比液压凿岩机低。

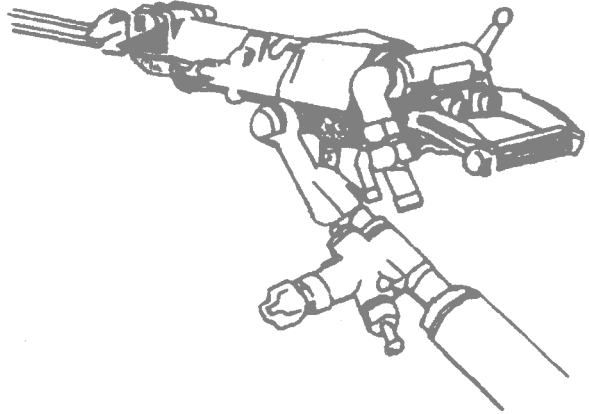


图 2-2 风动凿岩机

3. 液压凿岩机

液压凿岩机是以电力带动高压油泵，通过改变油路，使活塞往复运动，实现冲击作用。其工作原理见图 2-3。

液压凿岩机与风动凿岩机比较，具有以下主要特点。

(1) 动力消耗少，能量利用率高。液压凿岩机动力消耗仅为风动凿岩机的 $1/3 \sim 1/2$ ，能量利用率，液压的可达 $30\% \sim 40\%$ ，风动的仅有 15% 。

(2) 凿岩速度快。液压凿岩机比风动凿岩机的凿岩速度快 $50\% \sim 150\%$ 。在花岗岩中纯钻进速度可达 $170 \sim 200 \text{ cm/min}$ 。

(3) 液压凿岩机的液压系统设计配套合理，能自动调节冲击频率、扭矩、转速和推力等参数，适应不同性质的岩石，以提高凿岩功效，且润滑条件好，各主要零件使用寿命较长。

(4) 环境保护较好。液压钻的噪声比风钻降低 $10 \sim 15 \text{ dB}$ ；液压钻也没有像风钻那样的排

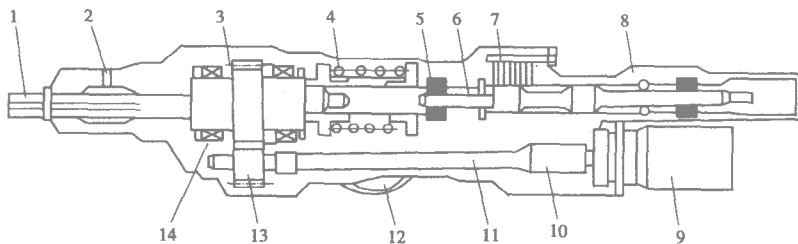


图 2-3 液压凿岩机工作原理

1-杆尾 2-旁侧供水口 3-转动齿轮套 4-缓冲弹簧 5-密封 6-冲击活塞 7-油压流量调节器 8-流量调节螺钉 9-油马达；
10-花键连接套；11-传动轴；12-蓄能器；13-驱动齿轮；14-滚动轴承

气，工作面没有雾气，空气较清晰。目前液压钻已广泛应用于隧道工程中。

(5) 液压凿岩机构造复杂，造价较高，重量大，附属装置较多，多安装在台车上使用。

4. 凿岩台车

将多台凿岩机安装在一个专门的移动设备上，实现多机同时作业，集中控制，称为凿岩台车。

凿岩台车按其走行方式可分为轨道走行式、轮胎走行式及履带走行式；按其结构形式可分

为实腹式、门架式两种。图 2-4 是工程中应用较多的实腹结构轮胎走行的全液压凿岩台车。

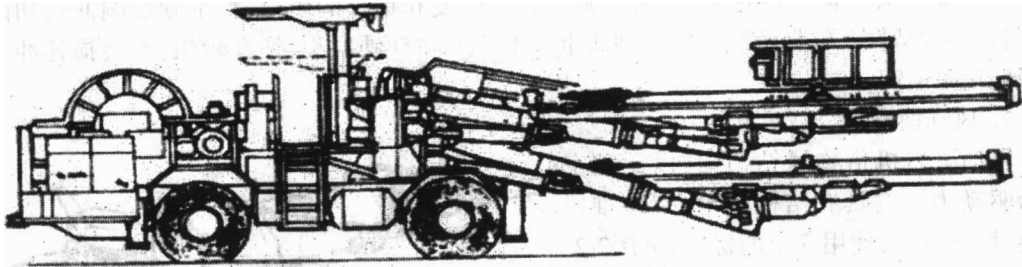


图 2-4 凿岩台车(实腹、轮行)

实腹式凿岩台车通常为轮胎走行,可以安装 1~4 台凿岩机及二支工作平台臂。其立定工作范围可以达到宽 10~15m 高 7~12m,分别可适用不同断面的隧道中。但实腹式凿岩台车占用坑道空间较大,需与出渣运输车辆交会避让,占用循环时间,尤其是在隧道断面不大时,机械避让占用的非工作时间就更长,故实腹式凿岩台车多应用于断面较大的隧道中。

门架式凿岩台车的腹部可以通行出渣运输车辆,可以大量减少机械避让时间。门架式凿岩台车通常为轨道走行,安装 2~3 台凿岩机。门架式凿岩台车多用于中等断面(20~80m²)的隧道开挖,开挖断面过小或过大则多不采用。

若按其控制的自动化程度来分,凿岩车可以分为人工控制、电脑控制、电脑导向三种。

人工控制是由人工控制操纵杆来实现钻机的定位、定向和钻进的。钻眼位置由工程师标出,钻眼方向则由操作手按经验目测确定。

电脑控制凿岩台车的所有动作都在电脑的控制下进行,必要时可由操作手进行干预。

电脑导向凿岩台车不仅具有电脑控制功能,而且可以在隧道定位、导向、激光束的帮助下,进行自动定位和定向,因此能进一步缩短钻眼作业时间,提高钻眼精度,减少超欠挖量。

(二) 爆破材料

1. 炸药的性能

炸药爆炸是一种高速化学反应过程。在这个过程中炸药物质成分发生改变,生成大量的气体物质并释放大量的热能,表现为对周围介质的冲击、压缩、破坏和抛掷作用。炸药的性能取决于所含化学成分。掌握炸药等爆破材料的性能,对正确使用、储存、运输,确保安全和提高爆破效果,具有重要意义。炸药的主要性能如下。

(1) 敏感度

炸药的敏感度简称感度,是指炸药在外界起爆能作用下发生爆炸反应的难易程度,也就是炸药爆炸对外能的需要程度。根据外能形式的不同,炸药感度主要有:

热敏感度 亦称爆点,即使炸药爆炸的最低温度,它表示炸药对热的敏感度。工程中几种常用炸药的爆点见表 2-1。

几种炸药的爆点

表 2-1

炸药名称	爆点(℃)	炸药名称	爆点(℃)	炸药名称	爆点(℃)	炸药名称	爆点(℃)
EL 系列乳化炸药	330	梯恩梯	290~295	2 号岩石硝铵炸药	186~230	硝化甘油	200
2 号煤矿硝铵炸药	180~188	黑索金	230	黑火药	290~310	特屈儿	195~200

② 火焰感度 表示炸药对火焰(明火星)的敏感度。有些炸药虽然对温度比较钝感,但对火焰却很敏感,如黑火药一接触明火星便易燃烧爆炸。

机械感度 是指炸药对机械能(撞击、摩擦)作用的敏感程度。一般来说,对于撞击比较

敏感的炸药，对摩擦也比较敏感。一般以试验次数的爆炸百分率来表示，见表 2-2。

几种炸药的撞击、摩擦感度

表 2-2

炸药名称	EL 系列 乳化炸药	2 号岩石硝酸 炸药	硝化 甘油	黑索金	特屈儿	黑火药	梯恩梯
撞击感度(%)	≤8	20	100	70~75	40~60	50	4~8
摩擦感度(%)	0			90	24		0

爆轰感度 是指炸药对爆炸能的敏感程度。通常在起爆作用下，炸药的爆炸是由冲击波、爆炸产物流或高速运动的介质颗粒的作用而激发的。不同的炸药所需的起爆能也不同。爆轰感度一般用极限起爆药量表示。

(2) 爆速

炸药爆炸时爆轰在炸药内部的传播速度称为爆速。不同成分的炸药有不同的爆速，但一般来说密度越大的炸药其爆速也越高。同一种成分的炸药其爆速还受装填密实程度、药量多少、含水量大小和包装材料等因素的影响。几种炸药的爆速见表 2-3。

几种炸药的爆速

表 2-3

炸药名称	铵梯炸药	硝化甘油	梯恩梯	特屈儿	黑索金	太安
密度(g/cm ³)	1.40	1.60	1.60	1.59	1.76	1.72
爆速(m/s)	5200	7450	6850	7334	8660	8083

(3) 爆力(威力)

炸药爆炸时对周围介质做功的能力称为爆力(或威力)。炸药的爆力越大，其破坏能力越强，破坏的范围及体积也越大。一般爆炸产生的气体物质越多，或爆温越高，则其爆力越大。炸药的爆力通常用铅柱扩孔实验法测定。铅柱扩孔容积等于 280cm³ 时的爆力称为标准爆力。几种炸药的爆力见表 2-4。

几种炸药的爆力

表 2-4

炸药名称	2 号铵梯岩石炸药	硝化甘油	梯恩梯	特屈儿	黑索金	太安
密度(g/cm ³)	1.0~1.1	1.60	1.50	1.60	1.70	
爆力(cm ³)	320	600	285	300	600	580

(4) 猛度

炸药爆炸后对与之接触的固体介质的局部破坏能力称为猛度。这种局部破坏表现为固体介质的粉碎性破坏程度和范围大小。一般炸药的爆速越高，则其猛度也越大。炸药的猛度通常用铅柱压缩法测定，以铅柱被爆炸压缩的数值表示，见表 2-5。

几种炸药的猛度值

表 2-5

炸药名称	2 号铵梯 岩石炸药	EL 系列 乳化炸药	RJ 系列 乳化炸药	硝化 甘油	梯恩梯	特屈儿	黑索金	太安
密度(g/cm ³)	0.9~1.0	1.1~1.2	1.1~1.25		1.0	1.6	1.7	
猛度(mm)	12~14	16~19	15~19	22.5~23.5	16~17	21~22	25	23~25

(5) 爆炸稳定性和临界直径、最佳密度、管道效应

爆炸稳定性是指炸药经起爆后，能否连续、完全爆炸的能力。它主要受炸药的化学性质、爆轰感度以及装药密度、药包大小(或药卷直径)起爆能量等因素的影响。

临界直径

工程爆破采用柱状装药时，常用药卷的“临界直径”，来表示炸药的爆炸稳定性。临界直径是在柱状装药时被动药卷能发生殉爆的最小直径。临界直径越小，则其爆炸稳定性越好。如铵梯炸药的爆炸稳定性较好，其临界直径为 15mm。浆状炸药的爆炸稳定性较差，其临界直径为 100mm 但加入敏化剂后其临界直径降为 32mm，也能稳定爆炸。

工程爆破中，为保证装药能稳定爆炸而不发生断爆，在选择药卷直径时应注意以下两点。

药卷直径应不小于炸药的临界直径。装药直径越大，其爆炸越稳定。但当药卷直径超过某值（极限直径）后，爆炸稳定性即不随药卷直径而变化。

若因需减少炸药用量而缩小装药（药卷）直径时，则应相应选用爆轰感度较高的炸药或加入敏化剂以降低其临界直径。

最佳密度

对于单质猛炸药，其装药密度越大，则其爆速越大，爆炸越稳定。对于工程用混合炸药，在一定密度范围内，也有以上关系。炸药爆炸稳定，且爆速最大时的装药密度称为“最佳密度”。如硝铵类炸药的最佳密度为 $0.9 \sim 1.19 \text{ g/cm}^3$ 乳化炸药一般为 $1.05 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ 。但随后爆速又随着密度的增加而下降，直至某一密度时，爆炸不稳定，甚至拒爆，这时炸药的密度称为“临界密度”。

管道效应

工程爆破中，常采用钻孔柱状药卷装药，若药卷直径较钻孔直径小，则在药卷与孔壁之间有一个径向空气间隙。药卷起爆后，爆轰波使间隙中的空气产生强烈的空气冲击波，这股空气冲击波速度比爆轰波速度更高，它在爆轰波未到达之前，即将未爆炸的炸药压缩，当炸药被压缩到临界密度以上时就会导致爆速下降，甚至断爆，这种现象称为管道效应。为减少管道效应，可减小间隙或采用高感度、高爆速的炸药。

(6) 殉爆距离

一个药包爆炸（主动药包）后能引起与它不接触的邻近药包爆炸（被动药包）这种现象称为被动药包的“殉爆”。发生殉爆的原因是主动药包爆炸产生冲击波和高速物流，使邻近药包在其作用下而爆炸。是否会发生殉爆，则主要取决于主动药包的药量和爆力、被动药包的爆轰感度、主动与被动药包之间的距离和介质性质。当主动、被动药包采用同性质炸药的等直径药卷时，则用被动药包能发生殉爆的最大距离来表示被动药包的殉爆能力，称为“殉爆距离”。当然它也反映了主动药包的致爆能力。

工程爆破中，常采用柱状间隔（不连续）装药来减少炸药用量和调整装药集中度。但应注意使药卷间距不大于殉爆距离。实际殉爆距离应作现场试验确定。

(7) 安定性

炸药的安定性是指其物理化学性质的安定性，主要表现为吸湿、结块、挥发、渗油、老化、冻结和化学分解等。如硝铵炸药吸湿性很强，也容易结块。遇此须人工解潮和碾碎后再使用。胶质炸药易老化和冻结。老化的胶质炸药敏感度和爆速降低，威力减小；冻结的胶质炸药敏感度高，使用危险，必须解冻后才允许使用。硝铵炸药的安定性差，易分解，运输存放中应通风避光，不宜堆放过高。

2. 隧道工程常用的炸药

工程用炸药一般以某种或几种单质炸药为主要成分，另加一些外加剂混合而成。目前在隧道爆破施工中使用最广的是硝铵类炸药。硝铵类炸药品种较多，但其主要成分是硝酸铵，占 60% 以上，其次是梯恩梯或硝酸钷（钾）占 10% ~ 15%。

(1) 铵梯炸药。在无瓦斯坑道中使用的铵梯炸药，简称岩石炸药，其中 2 号岩石炸药是最常用的一种；在有瓦斯坑道中使用的炸药，简称煤矿炸药，它是在岩石炸药的基础上外加一定比例食盐作为消焰剂的煤矿用安全炸药。

(2) 浆状（水胶）炸药。它是近十年发展起来的新型安全炸药。由于这类炸药含水量较大，爆温较低，比较安全，发展前景良好。浆状炸药是由氧化剂水溶液、敏化剂和胶凝剂为基本成分组成的混合炸药。水胶炸药是在浆状炸药的基础上应用交联技术，使之形成塑性凝胶状态，进一步提高了炸药的化学稳定性和抗水性，炸药结构更均一，提高了传爆性能。浆状（水胶）炸药具有抗水性强、密度高、爆炸威力较大、原料广、成本低和安全等优点，常用在露天有水深孔爆破中。

(3) 乳化炸药。通常是以硝酸铵、硝酸钠水溶液与碳质燃料通过乳化作用形成的乳脂状混合炸药，亦称为乳胶炸药。其外观随制作工艺不同而呈白色、淡黄色、浅褐色或银灰色。乳化炸药具有爆炸性能好、抗水性能强、安全性能好、环境污染小、原料来源广和生产成本低、爆破效率比浆状及水胶炸药更高等优点。有资料表明，在地下开挖中保持原使用 2 号岩石炸药孔网参数不变的情况下，乳化炸药可使平均炮孔利用率稳定在 90% 以上，平均炸药单耗较 2 号岩石炸药下降 1.35%。在露天爆破中，使用乳化炸药每立方米岩石炸药耗量比混合炸药（浆状炸药 70%~80% 铵油炸药 20%~30%）降低 23.1% 延米炮孔爆破量增加 18.2% 石渣大块率从 0.97%~1.0% 下降到 0.6%~0.7% 尤其适用于硬岩爆破。

(4) 硝化甘油炸药。又称胶质炸药，是一种高猛度炸药，它的主要成分是硝化甘油（或硝化甘油与二硝化乙二醇的混合物）。硝化甘油炸药抗水性强、密度高、爆炸威力大，因此适用于有水和坚硬岩石的爆破。但它对撞击摩擦的敏感度高，安全性差，价格昂贵；保存期不能过长，容易老化而性能降低甚至失去爆炸性能。一般只在水下爆破中使用。

隧道爆破使用的炸药一般均由厂制或现场加工成药卷，药卷直径有 22mm、25mm、32mm、35mm、40mm 等 甚至 165~500mm，可按爆破设计的装药结构和用药量来选择使用。隧道工程中常用的几种炸药成分性能见表 2-6。各系列炸药的成分、性能详见有关资料及产品说明书。

隧道内常用炸药的规格性能及其它

表 2-6

序号	炸药名称	药卷规格			药卷性能							适用范围	备注
		直径 (mm)	长度 (mm)	质量 (g)	密度 (g/cm ³)	爆速 (m/s)	猛度 (mm)	爆力 (mL)	殉爆 (cm)	有害气体 (L/kg)	保存期 (月)		
1	二号岩石 硝铵炸药 (标准型)	35	165	150	0.95	3050	12	320	7	<43	6	适用于一般岩石隧道，孔径 40mm 以下的炮眼爆破；大孔径的光爆	属常用的标准炸药类，且为铵梯炸药，韶关 309 厂产品
2	二号岩石 小药卷	22	270	105	0.84	2200		329	3	<43	6	适用于一般岩石隧道的周边光爆	曾在大瑶山隧道使用过，309 厂产品
3	一号抗水 岩石硝铵 (大直径)	42	500	450	0.95	3850	14	320	12	<45	6	适用于一般有水的岩石隧道，孔径 42mm 的深孔炮眼爆破	专为大瑶山隧道爆破而研制的，309 厂产品

续上表

序号	炸药名称	药卷规格			药卷性能							适用范围	备注
		直径 (mm)	长度 (mm)	质量 (g)	密度 (g/cm ³)	爆速 (m/s)	猛度 (mm)	爆力 (mL)	殉爆 (cm)	有害气体 (L/kg)	保存期 (月)		
4	一号抗水岩石硝铵(小直径)	25	165	80	0.96	2400	12	320	6	<45	6	适用于一般有水岩石隧道的周边光面爆破	曾在太瑶山隧道使用过 309 厂产品
5	RJ-2 乳胶炸药(大直径)	40	330	490	1.20	4100	13~16	340	13	<42	6	适用于坚硬岩石隧道,孔径 48mm 的深炮眼爆破;且适用于有水隧道	20 世纪 70 年代才问世的一种新型乳胶状抗水炸药,南岭化工厂产品
6	RJ-2 乳胶炸药(标准型)	32	200	190	1.20	3600	12	340	9	<42	6	适用于一般有水岩石隧道,孔径 40mm 以下的炮眼爆破,大孔径光爆	属新型乳胶抗水炸药,也属一般炮眼法爆破标准型的炸药,南岭化工厂产品
7	粉状硝化甘油炸药(标准型)	32	200	170	1.10	4200	16	380~410	15	<40	8	适用有一定涌水量的隧道、竖井、斜井掘进爆破中	用的不多,因为有毒,避免皮肤直接接触,其次机械感度高一些,注意安全,庆阳化工厂产品
8	粉状硝化甘油炸药(2号光爆)	22	500	152	1.10	2300~2700	13.7	410	10	<40	8	适用于岩石隧道的周边光面爆破	属庆阳化工厂专为光面爆破研制的光爆炸药
9	SHJ-K 型水胶炸药	35	400	650	1.05~1.30	3200~3500		340	3~5			适用于岩石隧道,孔径 48mm 的深炮眼爆破,且属防水型炸药	国营兴安化学材料厂生产
10	EJ-102 乳化炸药(标准型)	32	200	170	1.15~1.35	4000	15~9	88~143	10~12	22~29		适用于一般有水岩石隧道的炮眼爆破	龙烟铁矿 201 厂产品属新型抗水型炸药
11	EJ-102 乳化炸药(小直径)	20	500	190	1.15~1.35	4000	15~9	88~143	2	22~29		适用于一般有水岩石隧道的周边光面爆破	龙烟铁矿 201 厂产品,属新型抗水型炸药

3. 起爆材料(系统)

设置传爆起爆系统的目的是在装药(药包或药卷)以外的安全距离处通过发爆(点火、通电或激发枪)和传递使安在药包或药卷中的雷管起爆,并引发药包或药卷爆炸,从而爆破岩石。

(1) 导火索与火雷管

导火索是用来传递火焰给火雷管,并使火雷管在火焰作用下爆炸的传爆材料之一。

导火索的燃烧速度取决于索芯黑火药的成分和配比,一般在 110~130 s/m 范围内 缓燃导火索为 180~210 s/m 或 240~350 s/m。导火索具有一定的防潮耐水能力,在 1m 深常温静水

中浸 2h 后，其燃烧速度和燃烧性能不变。普通导火索不能在有瓦斯或有矿尘爆炸危险的场所使用。

火雷管是最简单的一种雷管，见图 2-5。火雷管成本低，使用比较简单灵活，不受杂散电流的影响，应用广泛。但受撞击、摩擦和火花等作用时能引起爆炸。火雷管全部是即发雷管（一点火就爆炸）

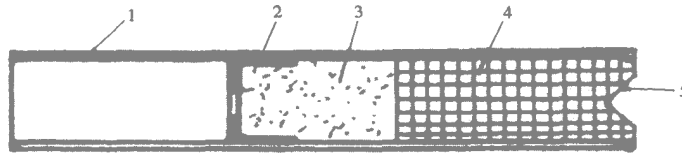


图 2-5 火雷管

1-管壳;2-加强帽;3-正起爆药;4-副起爆药;5-聚能穴

雷管号数按其起爆能量的大小分为 10 个等级，号数愈大，起爆能力愈强。隧道工程中常用的是 8 号和 6 号雷管。其它雷管的号数亦同此划分。

(2)电雷管

电雷管是在火雷管中加设电发火装置而成的。它是用导线传输电流使装在雷管中的电阻发热而引起雷管爆炸的。

电雷管可分为即发电雷管和迟发电雷管。即发电雷管见图 2-6。

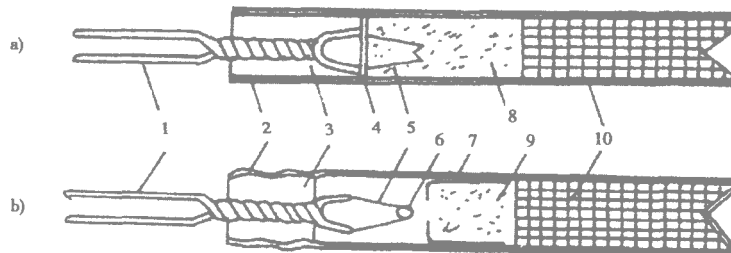


图 2-6 即发电雷管

a)直插式;b)引火头式

1-脚线;2-管壳;3-密封塞;4-纸垫;5-桥丝;6-引火头;7-加强帽;8-起爆药;9-副起爆药

为实现延期起爆，迟发电雷管的延期时间是在即发电雷管中加装延期药来实现的（图 2-7）。延期时间的长短均用段数来表示。

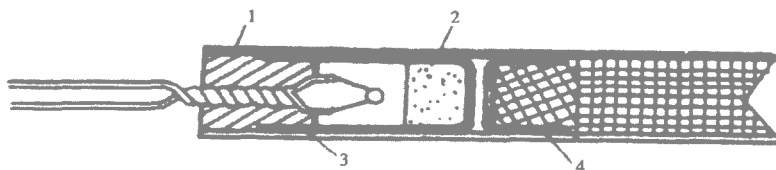


图 2-7 迟发电雷管

1-塑料塞;2-延期药;3-延期内管;4-加强帽

迟发电雷管按其延期时间差可分为秒迟发和毫秒迟发系列。

国产秒迟发电雷管按延期时间的长短分为 7 段，段数越大，延期时间越长。最长延期时间为 $(7.0 + 1.0)s$ 见表 2-7。

秒迟发电雷管的延期时间

表 2-7

段别	1	2	3	4	5	6	7
延期时间(s)	<0.1	1.0+0.5	2.0+0.6	3.1+0.7	4.3+0.8	5.6+0.9	7.0+1.0
脚线颜色	灰蓝	灰白	灰红	灰绿	灰黄	黑蓝	黑白

国产毫秒迟发电雷管,有 5 个系列。其中第二系列是工程中常用的一个时间系列;第一、第五系列为高精度系列;第三、第四系列的延期时间间隔分别为 100ms 和 300ms。

发爆电源可用交、直流照明或动力电源,也可以用各种类型的专用电起爆器。对于康钢丝电雷管,一般要求在 10 ms 的传导时间内,其发火冲量 $K = I^2 t$ 最小不低于 $25A^2 \cdot ms$ 最大不超过 $45A^2 \cdot ms$ 。

在有杂散电流条件下,应采用抗杂散电流电雷管。目前,电线、电雷管起爆系统在隧道工程中已较少采用。

(3) 塑料导爆管与非电雷管

塑料导爆管是用来传递微弱爆轰给非电雷管,使之爆炸的传爆材料之一,因其是由瑞典科学家诺雷尔(Nonel)首创的一种新型传爆材料,故又称诺雷尔管。它是在聚乙烯塑料管[外径 2.95 ± 0.15 mm,内径 1.4 ± 0.10 mm]的内壁涂有一层高能炸药[主要成分是奥托金, $(16 \pm 2)mg/m$],管壁上的高能炸药在冲击波作用下可以沿着管道方向连续稳定爆轰,从而将爆轰传播到非电雷管使雷管起爆。弱爆轰在管内的传播速度为 1600~2000 m/s 但因其爆轰能量微弱,不至于炸坏塑料管。

塑料导爆管有以下优点 抗电、抗火、抗冲击性能好 起爆传爆性能稳定 甚至扭结、180 对折 局部断药 管端对接均能正常传爆 它不能直接起爆炸药 应与非电毫秒雷管配合使用 运输和使用过程中抗破坏能力强 安装简单 使用方便 价格便宜等 且可作为非危险品运输。因而在隧道工程中尤其是在有电条件和炮眼数较多时被广泛应用。

非电雷管的构造及延期时间系列。

非电雷管须与塑料导爆管配合使用,其构造见图 2-8。

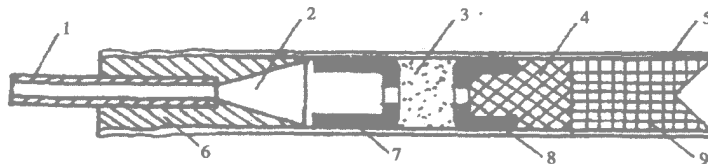


图 2-8 迟发非电雷管

1-塑料导爆管;2-消爆空腔;3-延期药;4-正起爆药;5-金属壳;6-塑料连接套;7-空信帽;8-加强帽;9-副起爆药

国产非电雷管的延期时间也分为毫秒、半秒、秒迟发三个系列 见表 2-8。

迟发非电雷管的段别及延期时间

表 2-8

毫秒迟发雷管(第二系列)				半秒迟发雷管		秒迟发雷管	
段别	延期时间(ms)	段别	延期时间(ms)	段别	延期时间(ms)	段别	延期时间(ms)
1	≥ 13	11	460 ± 40	1	≤ 0.13	1	≤ 1.0
2	25 ± 10	12	550 ± 45	2	0.5 ± 0.15	2	2.0 ± 0.5
3	50 ± 10	13	650 ± 50	3	1.0 ± 0.15	3	4.0 ± 0.6
4	75 ± 15	14	760 ± 55	4	1.5 ± 0.20	4	6.0 ± 0.8
5	110 ± 15	15	880 ± 60	5	2.0 ± 0.20	5	8.0 ± 0.9

续上表

毫秒迟发雷管(第二系列)				半秒迟发雷管		秒迟发雷管	
段别	延期时间(ms)	段别	延期时间(ms)	段别	延期时间(ms)	段别	延期时间(ms)
6	150 ± 20	16	1020 ± 70	6	2.5 ± 0.20	6	10.0 ± 1.0
7	200 ± 20 ~ 25	17	1200 ± 90	7	3.0 ± 0.20	7	14.0 ± 2.0 1.0
8	250 ± 25	18	1400 ± 100	8	3.5 ± 0.20	8	19.0 ± 2.0
9	310 ± 30	19	1700 ± 130	9	3.8 ~ 4.5	9	25.0 ± 2.5
10	380 ± 35	20	2000 ± 150	10	4.5 ~ 5.3	10	32.0 ± 3.0

导爆管的发爆及连接网络

导爆管可用 8 号火雷管、导爆索、击发枪、专用激发器发爆。其连接和分枝可集束捆扎雷管继爆 也可以用连通器连接继爆 图 2-9、图 2-10)。

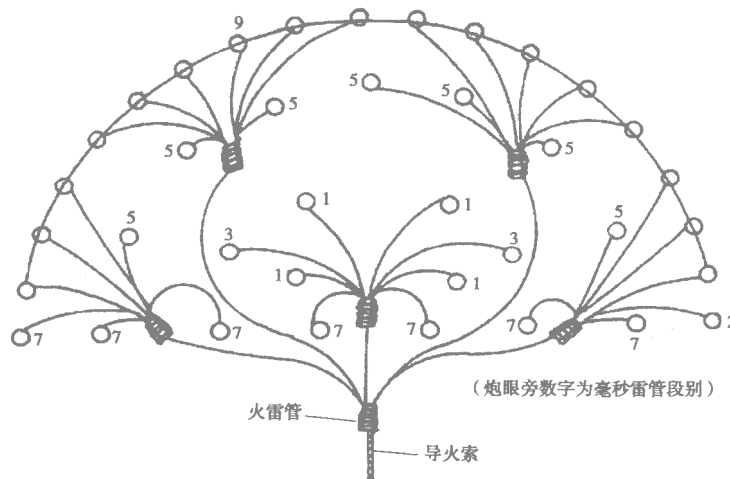


图 2-9 导爆管-非电雷管起爆网络之一

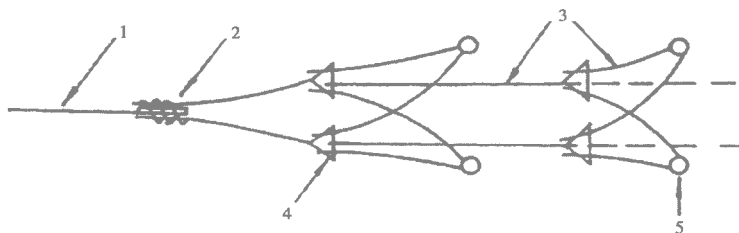


图 2-10 导爆管-非电雷管起爆网络之二

1-导爆索; 2-8号雷管及胶布; 3-导爆管; 4-连接块; 5-炮眼

(4) 导爆索与继爆管

导爆索是以单质猛炸药黑索金或太安作为索芯的传爆材料。它经雷管起爆后，可以直接引爆其它炸药。根据适用条件不同，导爆索主要分为普通导爆索和安全导爆索两种。

普通导爆索是以前生产和使用较多的一种，它具有一定的防水性能和耐热性能。但在爆轰传播过程中火焰强烈，所以只能用于露天爆破和没有瓦斯的地下爆破作业。其爆速不小于 6500m/s。

安全导爆索是在普通导爆索的药芯或外壳内加了适量的消焰剂，使爆轰过程中产生的火焰小，温度低，不会引爆瓦斯或矿尘，专供有瓦斯或矿尘爆炸危险的地下爆破作业使用。其爆速不小于 6000 m/s。

因导爆索能直接引爆炸药，故在隧道工程中，若采用小直径药卷间隔装药时，常用导爆索将各被动药卷与主动药卷相连接，以使被动药卷均能连续爆炸，从而减少了雷管数量和简化了装药结构，实现减少装药量，达到有控制的弱爆破目的。在装药量计算时，应将导爆索的爆力计入炸药用量中。

②继爆管是一种专门与导爆索配合使用的，具有毫秒延期作用的起爆器材（图 2-11）。

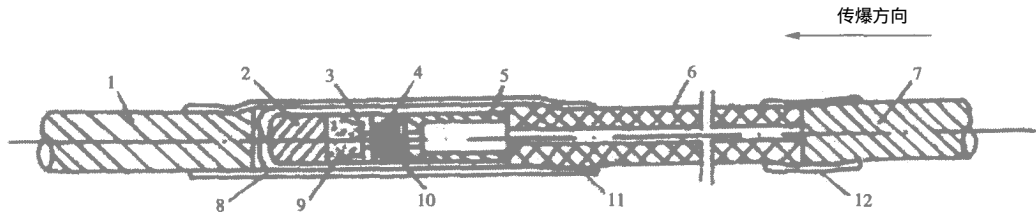


图 2-11 导爆索与继爆管

1:导爆索;2:副起爆药;3:加强帽;4:缓冲剂;5:大内管;6:消爆管;7:导爆索;8:雷管壳;9:正起爆药;10:纸垫;11:外套管;12:连接管

导爆索与继爆管具有抵抗杂散电流和静电引起爆炸危害的能力，装药时可不停电，增加了纯作业时间，所以导爆索-继爆管起爆系统在矿山和其它工程爆破中得到了应用。缺点是成本比毫秒电雷管系统高，且在有瓦斯环境中危险性高，网络中的导爆索不能交叉。

有些资料表明，以上三种起爆系统的费用比为，导爆管系统：电力系统：导爆索系统 = 1:1.2:3.0。

（三）喷射混凝土机械设备

在新奥法施工中，喷射混凝土机械设备是必不可少的，因为使用混凝土喷射机可按一定的混合程序将掺速凝剂的细石混凝土喷射到岩壁表面上，并迅速固结成一层支护结构，从而对围岩起到支护作用。

1. 喷射机

它是喷射混凝土的主要设备 国内已有多种鉴定定型产品 且各有特点 可以由施工的具体情况选用。但要以保证喷射混凝土的质量 减少回弹和粉尘 控制施工成本 提高工作效率为前提。

常用的干式喷射机有 双罐式喷射机 转体式喷射机 转盘式喷射机。其工作原理见图 2-12。

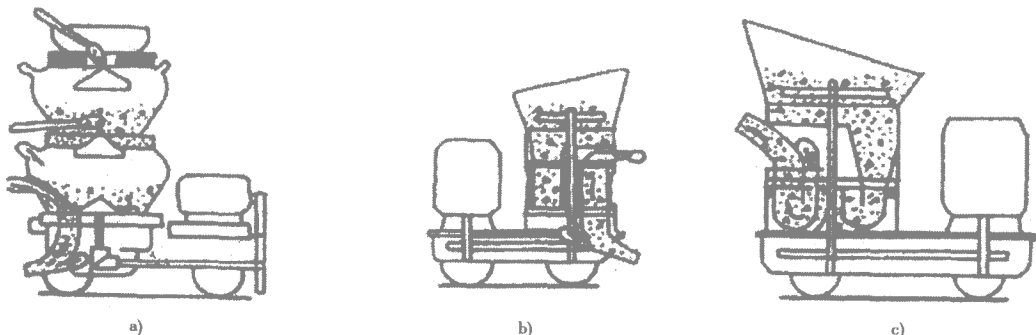


图 2-12 干式喷射机

a)双罐式喷射机 .b)转体式喷射机 .c)转盘式喷射机

新研制的湿式喷射机有挤压泵式、转体活塞泵式、螺杆泵式喷射机。这些泵式喷射机均要求混凝土具有较大的流动性（水灰比大于 0.5，砂率大于 20%）。其机械构造较为复杂，易损件使用寿命短、机械使用费高，机械清洗和故障处理较麻烦，目前现场使用较少，有待进一步改进推广。

2. 机械手

喷头的移动和喷射方向、距离的控制可采用人力直接控制或机械手控制。人力直接控制一般只用于解决少量的和局部喷敷。机械手控制方便灵活，工作范围大，可覆盖 140m^2 （图 2-13）。

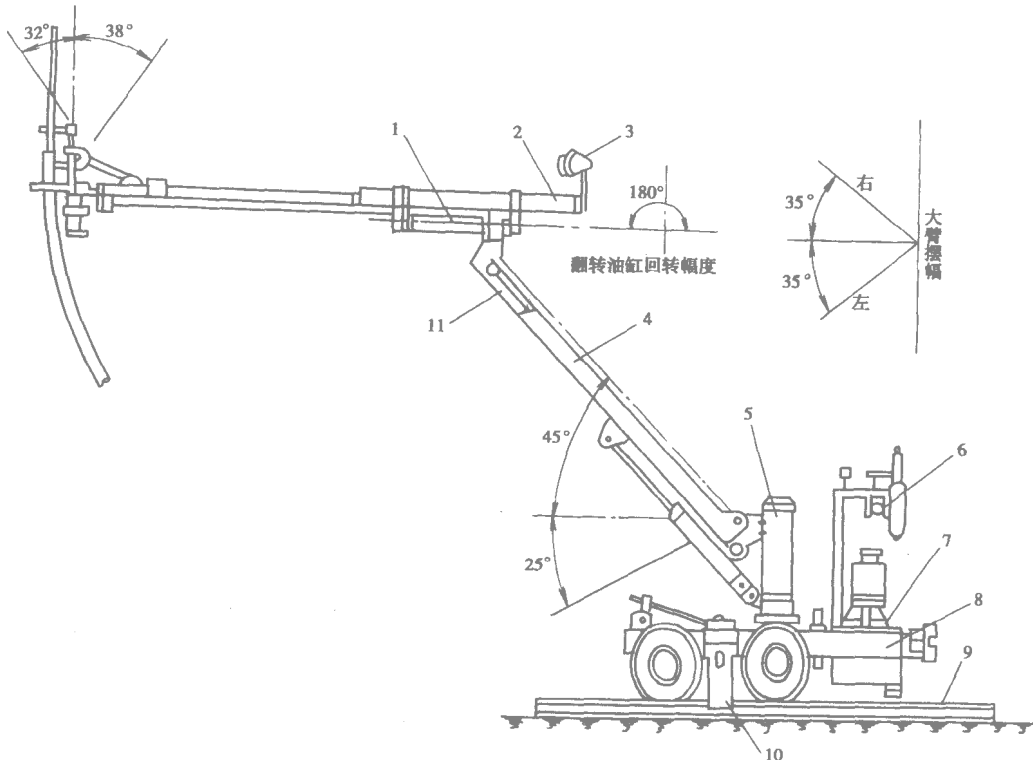


图 2-13 喷射机械手

1. 翻转油缸；2. 伸缩油缸；3. 探照灯；4. 大臂；5. 转筒；6. 风水系统；7. 液压系数；8. 车架；9. 钢轨；10. 卡轨器；11. 拉杆

三、施工测量

施工测量是贯穿于施工全过程的一项重要工作，这项工作的好坏关系到隧道施工的好坏和成败。因为一般隧道施工从两个点以上相对施工，只有把测量工作做好才能使隧道准确地贯通。这项工作不只是施工前的准备，也是施工中的一项特别重要的工作，之所以在施工准备这一节中介绍是因为其前期的重要性，是准备工作的一个重要方面。

（一）施工前的复测

在施工前，施工人员要按控制测量的精度，做好控制点、基准点、水准点的交接和复核工作，并规定通过三角网或精密导线网对各点进行校核，以确保隧道施工精度。

为了方便施工可按精度要求重新布设三角点、导线点，它们的布设要设在视野开阔、通视