

© 常焕生 张柏山 范建章 编著

# 水利水电工程 S 锚喷支护施工

HUILI SHUIDIAN GONGCHENG  
MAOPEN ZHIHU SHIGONG



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

◎ 常焕生 张柏山 范建章 编著

# 水利水电工程 S 锚喷支护施工

HUILI SHU DIAN GONG CHENG  
MAOPEN ZHIHU SHIGONG



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书精要地、深入浅出地阐述了锚喷支护技术的理论和机理。全面、系统地总结了我国水利水电工程锚喷支护施工方面的新技术、新工艺,介绍了大量的锚喷支护新材料、新设备。同时引用了国内其他行业和国外的相关经验。对各种锚杆、预应力锚索、喷混凝土以及锚喷联合支护的材料、施工机具、设备、施工工艺、质量控制措施以及监控量测、安全技术和防尘作了系统的阐述,内容丰富,资料翔实,数据可靠,图文并茂。具有较好的实用价值和可操作性。

本书可作为水利水电行业和其他行业施工技术人员工具书查阅、使用,也可作为设计、科研和教学的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程锚喷支护施工/常焕生,张柏山,范建章编著. 北京:中国水利水电出版社,2006

ISBN 7-5084-3603-2

I. 水... II. ①常... ②张... ③范... III. 水利工程:隧道工程—锚喷支护 工程施工 IV. TV554

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第011649号

书 名	水利水电工程锚喷支护施工
作 者	常焕生 张柏山 范建章 编著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266(总机)、68331835(营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 14.5印张 400千字
版 次	2006年3月第1版 2006年3月第1次印刷
印 数	0001-4000册
定 价	39.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前言

锚喷支护是新奥法的基础。近十几年以来，随着我国水利水电工程史无前例的大开发，水利水电工程设计、施工技术取得了长足进步，其中，锚喷支护技术的进步尤其引人注目。主要是由于锚喷支护技术的进步，才使得新奥法被不断地注入新的活力，使其在地下工程中起着越来越大的作用。可以说，锚喷支护技术是现代水利水电工程设计和施工技术的主要支撑之一。

当前，无论是锚杆、预应力锚索，还是喷混凝土，新技术、新工艺、新材料、新设备大量涌现，更新速度之快，超过历史上任何时期。水利水电工程从设计到施工，需要密切配合，做锚喷支护技术进步的推动者、实践者和创造者。

编写本书的出发点，是尽可能全面、准确、详细地总结我国水利水电工程锚喷支护施工的新经验，期望对广大专业技术人员起到参考的作用。如能对锚喷支护施工技术起到一点点推动作用，那就是编著者的最大愿望了。为了使本书具有较好的实用价值和可操作性，编著者尽了最大努力，尽可能做到深入浅出，对锚喷支护技术的理论和机理进行精要阐述；除了把自己的实践经验和盘托出，还尽可能收集更多的、最新的、翔实的、可靠的、由工程实践总结出来的资料；尽可能做到图文并茂。书中的资料以国内水利水电行业的为主，同时引用了国内其他行业和国外的相关经验。书中列举了一些工程实例，都是比较先进的、有一定难度和代表性的。有关锚喷支护的国家标准和水利水电行业标准是本书编写的重要依据。

本书由常焕生、张柏山、范建章共同编著，参加本书编写的还有常鑫同志。

由于编著者水平有限，掌推资料、信息不够全面和及时，书中难免有不当之处，敬请读者批评、指教。

编著者

2006年2月

# 目 录

---

前 言	
第一章 综述	1
第二章 锚杆施工	13
第一节 概述	13
第二节 全长粘结型锚杆	20
第三节 张拉型锚杆	36
第四节 摩擦型锚杆	44
第五节 管式锚杆	49
第六节 自钻式注浆锚杆	51
第七节 土层锚杆	53
第三章 预应力锚索施工	54
第一节 概述	54
第二节 材料	57
第三节 施工机具、设备	62
第四节 施工工艺	64
第五节 质量控制	69
第六节 工程实例	70
第四章 喷射混凝土施工	72
第一节 概述	72
第二节 材料	73
第三节 施工机具、设备	79
第四节 施工工艺和施工方法	88
第五节 喷混凝土的质量控制	98
第六节 工程实例	103

<b>第五章 不良地质条件下的锚喷联合支护</b> .....	105
第一节 概述 .....	105
第二节 钢筋网喷射混凝土 .....	107
第三节 钢拱架、钢筋网喷射混凝土 .....	110
第四节 超前锚固施工 .....	113
<b>第六章 安全与防尘</b> .....	118
第一节 安全技术.....	118
第二节 防尘 .....	119
<b>附录</b> .....	122
附录一 锚杆喷射混凝土支护技术规范 (GB 50086-2001) .....	122
附录二 水电水利工程锚喷支护施工规范 (DL/T 5181-2003) .....	187
<b>参考文献</b> .....	224

# 第一章 综 述

## 一、锚喷支护是新奥法的基础

锚喷支护是通过锚杆、锚索及喷射混凝土等支护手段对不稳定岩体进行加固，使其达到稳定的工程措施。

对于地面工程，锚喷支护加固的不稳定岩体一般是高边坡的岩体，锚喷支护的作用机理主要是通过锚杆（锚索）将不稳定岩体锚固在稳定岩体上，防止不稳定岩体塌落或产生过大变形；喷混凝土的作用主要是防止表面岩石局部塌落和风化。

对于地下工程，锚喷支护是新奥法的基础。新奥法是新奥地利隧洞工程方法（New Austria Tunnelling Method）的简称，最早是由奥地利学者 L. V. Rabcewicz 教授在总结以往隧洞施工经验的基础上于 1948 年提出来的。后来，又与其他学者合作，经过进一步研究和实践，于 1963 年正式命名。新奥法的基本原理是：

(1) 根据岩体具有的粘性、弹性、塑性的物理性质，研究洞室开挖后围岩的应力重分布和变形过程，监控变形发展，及时施作支护，以保持围岩稳定。

(2) 充分利用围岩自身承载能力，把围岩作为支护结构的基本组成部分，施作的支护与围岩共同作用，形成承载环或承载拱。为此，洞室开挖爆破和施作支护时，均应采取措施尽量减少对围岩的破坏和扰动，保持围岩强度。而且要尽量减少超、欠挖和起伏差，以利于喷混凝土层受力均匀，避免应力集中。

(3) 施作的支护结构应与围岩紧密结合，既要具有一定刚度，以限制围岩变形自由发展，防止围岩松散破坏；又要具有一定柔性，以适应围岩适当的变形，使作用在支护结构上的变形压力不致过大。

(4) 设置观测系统，对围岩及锚喷支护进行监控量测，根据监控量测的结果对设计和施工参数进行优化。

对于地下洞室围岩，锚杆起到悬吊、挤压、楔固等作用，使沿径向挤压的围岩压力转变成切向压力，防止围岩松动范围进一步扩展，从而使围岩径向应力减小到仅用较小支护力就能维护围岩长期处于稳定状态。锚杆注浆能够加固围岩，可以增大岩体的内聚力和内摩擦角，提高岩体的强度，使围岩胶结成拱形连续体加固圈，成为支护结构的一部分。

喷射混凝土的水泥和集料以高速（速度可达 70m/s）反复连续撞击而使混凝土密实，可以采用较小的水灰比（0.4~0.5）以获得较高的强度和良好的耐久性。喷混凝土对于任何形状受喷面都能与围岩紧密粘结，起到薄拱的作用，既能对围岩提供抗力，抵抗危石的剪切，又可提高围岩的承载能力，使围岩处于三维应力状态，抵抗围岩整体变形。喷混

凝土拌和料中加入速凝剂后可使水泥在 10min 内终凝, 并很快具有强度, 能够承受荷载、约束围岩变形。喷混凝土可以充填张开的节理、裂隙, 固结岩体, 增强岩体的整体性和稳定性。喷混凝土可填平围岩软弱带塌落处, 与两侧硬岩粘结, 起到加固软弱带的作用。喷混凝土还能够封闭岩体表面, 防止围岩风化、漏水, 避免大裂隙、断层、挤压破碎带的充填物流失。

钢拱架与喷混凝土、锚杆联合作用, 承受危岩压力。钢拱架可以采用型钢制作, 也可以采用钢筋制作成格构式拱架。格构式拱架一般由 3~4 根直径 18~22mm 的热轧带肋钢筋作主筋、由直径 12~14mm 的光圆钢筋作连结筋焊接而成, 由于其具有重量轻、便于制作、运输和安装等优点, 所以在工程中越来越多地被采用。无论采用哪种类型钢拱架, 安装时都要尽量靠近岩面, 并加楔子使其与岩面紧密接触; 钢拱架必须被喷混凝土完全覆盖, 以使钢拱架与喷混凝土共同作用, 充分发挥其承载能力。

预应力锚索利用预应力钢材具有较高的抗拉强度和一定程度的抗剪强度来加固岩层; 能够锁紧围岩介质, 提高岩块之间的摩擦阻力, 通过咬合作用, 使表层不稳定岩块与深层受开挖影响较小、承载力较高的稳定岩体形成整体, 达到支护目的。

新奥法从理论上强调锚喷支护应“适时”进行, 即对于有一定自稳能力的围岩, 应充分利用其自稳能力, 待其变形趋于稳定时进行支护, 可以减少锚喷支护结构承受由于围岩变形产生的荷载, 从而减少锚喷支护工程量。但在工程实践中很难做到“适时”支护。实际上, 锚喷支护设计一般采用类比法, 不能等到通过监测得出围岩变形特性才作设计。实际施工中, 锚喷支护应及时进行, 围岩自稳能力差的情况是如此, 围岩有一定自稳能力的情况也是如此。因为, 所谓围岩自稳能力, 包括其整体稳定和局部稳定。整体稳定差的围岩, 是整体性差、松散的围岩, 例如断层、破碎带、松散地层等 IV、V 类围岩。局部稳定差的围岩, 是整体性不差、但有被节理、裂隙切割的局部不稳定岩块, 即在 II、III 类围岩中, 整体稳定没有问题, 但也经常有不稳定岩块, 对于这种情况, 也必须及时支护, 一般采用随机锚杆和喷混凝土。还必须考虑到地下工程开挖施工爆破振动对已经暴露的围岩的影响, 这是影响围岩稳定的一个至关重要的因素。有的部位的围岩, 处于临界稳定状态, 如果不受外界扰动, 可能长期稳定, 但由于爆破振动的影响, 可能瞬间失稳。这类工程实例比比皆是。所以, 无论围岩自稳能力如何, 需要进行的锚喷支护越早施作越好, 以便使支护结构与围岩尽早共同作用, 承受由于山岩压力及爆破振动产生的荷载, 充分发挥支护结构的承载作用。一旦发生支护结构破坏, 说明支护结构需要加强。而且支护结构一般来说不会突然全部破坏, 而是逐渐显现破坏迹象, 有足够时间采取补强措施。当然, 对于自稳能力强的围岩, 支护可以适当滞后, 以便使支护作业不影响掘进作业, 不占直线工期。在此原则下, 应尽早进行支护。对于完整性好的围岩进行的系统、全面的支护, 实际上是围岩结构的安全储备, 可以延后进行, 而不致影响围岩结构稳定。

至于二次支护最好待围岩变形趋于稳定后再进行, 不属于本书的内容。

## 二、地质分析与判断的极端重要性

正确分析和判断地质构造, 对支护设计提出明确的建议, 对于锚喷支护的效果极其重要。围岩内部的地质构造对于施工人员来说往往不是那么一目了然的, 需要地质专业人员



及时地根据已经揭露的地质情况进行准确的分析和判断，设计人员据此进行可靠的支护设计。工程实践中，围岩失稳（塌方事故）的原因往往是施工人员对于已经暴露的地质构造不甚明白，因而熟视无睹；地质人员未进行认真的调查、分析研究，不能得出准确的判断；设计人员因围岩的暂时稳定认为可以长期稳定，抱侥幸心理，不作相应的支护设计。等到围岩塌下来，大家才看清楚是怎么回事。所以说，只要在施工过程中地质、设计和施工人员密切配合，认真对待所遇到的地质构造，及时采取可靠的支护措施，绝大部分围岩塌方事故是可以避免的。

### 三、锚喷支护技术在我国水利水电工程的应用

在锚喷支护技术应用到水利水电工程之前，地下工程的支护采用传统支护方式，即钢或木支撑结构，其理论基础是普氏理论的松动围岩压力（山岩压力）。这种支撑结构是等待支撑松动围岩荷载，是完全被动受力的结构，承载能力较小。再者，由于其受力不均衡、传力（靠楔子楔紧支撑排架与围岩的间隙）不可靠、结构刚度受限制等原因，当围岩压力（变形）较大时，支撑结构容易破坏或产生过大的变形。遇到特别破碎的围岩（Ⅳ、Ⅴ类围岩），尤其是较大断面洞室，这种支护方式往往无效，所以不能考虑在特别破碎的围岩中建造大型洞室。实践证明，这种传统支护方式既不经济，又不安全。

我国水利水电工程自 20 世纪 60 年代初开始大量采用锚喷支护技术。40 年来，尤其是近十几年以来，随着我国水利水电工程史无前例的大开发，水利水电工程设计、施工技术取得了长足进步，其中，锚喷支护技术的进步尤其引人注目。主要是由于锚喷支护技术的进步，才使新奥法被不断注入新的活力，使其在地下工程中起着越来越大的作用。可以说，锚喷支护技术是现代水利水电工程设计和施工技术的主要支撑之一。现在，锚喷支护技术已经发展到较高水平，无论多么差的地质条件，通过采用锚喷支护等技术，都可以建造洞室。例如：

小湾水电站进场公路的新地基隧洞，长 365m，隧洞设计净宽 9.5m，净高 7.0m。该隧洞处于深变质软弱岩组中，受区域性地质构造影响，围岩裂隙、层间锚动面、小褶曲、小断层发育。围岩在构造挤压力及地下水作用下，原结晶构造已被破坏。同时新地基隧洞处于三个滑坡体上，滑坡体本身富集地下水，开挖时有大量渗水，局部涌水。由于围岩极为破碎，整个隧洞开挖未采用爆破作业。开挖采用 PC200 挖掘机开挖中间，人工开挖修整周边。在施工中，采用小管棚超前支护，短进尺、多循环、强支护，上半洞开挖支护先行、下半洞开挖支护跟进、二次衬砌紧跟的施工方法，使一次支护与二次衬砌共同承载以上综合支护措施确保了隧洞施工安全地完成。

深圳东部引水工程引水隧洞工程，断面为城门洞形，衬砌后净宽 4.2m，净高 5.3m，其进口段 542m 属于Ⅴ类围岩，一期支护采用  $\phi 12$  小管棚、 $\phi 18$ 、 $L=2.5$ m 系统锚杆、网喷 15cm 厚 C20 混凝土、格构式钢拱架联合支护；二期支护为模筑 30cm 厚 C25W6 混凝土；开挖采取“先上半洞、后下半洞”的台阶式推进方式，台阶长度 5m 左右。上半洞施工顺序：拱顶 150°范围内施作小管棚→注浆→开挖出安装→榀钢拱架宽度→初喷混凝土（厚 5cm）→安装一榀钢拱架→焊连接筋、挂钢筋网、打锚杆→复喷混凝土达到设计要求厚度→开挖第二个钢拱架宽度……按此顺序循环进行施工。下半洞施工顺序：机械二期开

挖→人工保护层Ⅲ期开挖→初喷混凝土→安装边钢拱架→打锚杆→挂钢筋网→复喷混凝土→底板素喷混凝土→养护。下半洞每次开挖支护长度为2~3榀钢拱架。拱顶部150°范围内支护采用的小管棚为直径42mm、长3.5m的普通钢管，沿洞周边间距40cm，外插角5'~9'。施工中利用手风钻改装的气锤将 $\phi 42$ 钢管（前端削成尖角）直接顶入围岩或沿 $\phi 38$ 手风钻孔顶入围岩。当围岩特别破碎时，向管内注浆加固围岩。通过采取这些联合支护措施，保证了施工顺利进行。

#### 四、锚喷支护施工技术的发展

初期采用较多的楔缝式锚杆以及随后出现的倒楔式锚杆和胀壳式锚杆，均为机械式内锚头张拉型锚杆，其长度和直径一般较小，锚固力一般不超过5t，只适用于临时支护。

这些机械式内锚头锚杆很快被全长粘结式锚杆代替，粘结材料也由水泥砂浆扩展到水泥卷、普通树脂卷。

现在的张拉型锚杆一般采用粘结式内锚头，粘结材料一般采用速凝树脂卷、快硬水泥卷等。现在用于永久支护的预应力锚杆最大直径达36mm，最大长度达25m，设计张拉力达500kN。

缝管锚杆及楔管锚杆是从煤炭系统引进的两种摩擦型锚杆；另一种摩擦型锚杆——水胀式锚杆则是由国外引进的技术。摩擦型锚杆一般应用于临时支护。

管式锚杆是由钢筋锚杆派生出来的。短的管式锚杆一般称为小导管，用于隧洞开挖的超前支护，并可通过小导管对围岩进行注浆。长的管式锚杆一般称为长管棚，用于不良地质条件的隧洞洞口顶拱支护，并注浆固结围岩。

近几年研制出来一种集造孔、注浆、锚固功能为一体的新型锚杆——自钻式注浆锚杆，适用于地质条件特别差、易于塌孔部位。

喷混凝土的技术进步是最明显的。早期的喷混凝土仅有干喷，采用的设备是双罐式混凝土喷射机，效率较低，粉尘较大。后来，出现了潮喷法、水泥裹砂法等比较先进的工艺，喷射机也改进为可连续喷射的转子式喷射机，喷射效率大大提高，回弹率和粉尘浓度明显降低。20世纪80年代中期，外国承包商在我国施工中采用湿喷混凝土技术，从此在我国的水利水电工程施工中越来越多地采用这种技术。湿喷混凝土采用液态速凝剂，靠电脑自动控制液态速凝剂泵的运行，从而控制液态速凝剂的掺量。喷射机械手是机械、电子技术的综合产物，可以成倍地提高工作效率，降低工人劳动强度，改善工作条件。钢纤维喷混凝土用于国内水利水电工程，是近十来年的事。钢纤维喷混凝土比素喷混凝土具有更好的性能，抗拉强度较高，韧性较高，抗裂性能及抗冲击性能较好。近几年又有几个工程试验采用聚丙烯纤维喷混凝土，其性能类似于钢纤维喷混凝土，而施工工艺比钢纤维喷混凝土简单。

##### （一）纤维喷混凝土

未加筋喷混凝土与未加钢筋的常规混凝土一样，是一种脆性材料，当承受拉应力或应变时，容易出现开裂和变形。给喷混凝土混合物加纤维可以增加材料的延展性以及能量吸收容量和抗冲击力。这种复合材料能够在开裂后继续支持荷载，常常具有更高的最终强度，特别是抗拉强度。喷混凝土中可以使用的纤维为以下三种形式：钢纤维、玻璃纤维和

其他合成纤维。

自 20 世纪 50 年代后期以来, 钢纤维的使用发展迅速, 目前的第三代钢纤维大大优于以前的纤维。阻碍纤维在混合物中均匀分布的早期拌和处理问题, 通过制造低纵横比(长度与直径之比)、表面变形和改进形状的纤维而大为减少。钢纤维喷混凝土的典型应用是隧洞衬砌、岩石和土壤边坡、建筑物、堤坝或其他可能遭受大的变形的建筑物或需要控制开裂的地方的表面覆盖包层。在高水灰比的喷射混凝土中加入钢纤维, 腐蚀是影响其功能的主要问题; 钢纤维增加了混凝土导电性, 因而加剧了电解化学腐蚀。

玻璃纤维筋喷混凝土是为了适应使用切碎的纤维和树脂粘接剂的技术。喷射玻璃纤维筋混凝土的设备和方法不是常规喷混凝土作业, 但是需要一种专用喷射机和输料系统。纤维是用专门的高抗碱玻璃制造, 以防止在高碱性的硅酸盐水泥环境中变质。

其他合成纤维包括尼龙、聚丙烯、聚乙烯、聚酯和人造粘胶纤维。使用于喷混凝土的主要纤维是聚丙烯纤维。在喷混凝土中添加合成纤维的主要作用是减小这种材料中收缩裂缝的宽度。

### (二) 聚丙烯纤维喷混凝土

聚丙烯合成纤维网纤维作为混凝土微加强筋系统, 是 20 世纪 80 年代中期产品。目前, 已在 60 多个国家和地区推广使用, 以其良好的效益引起各国的高度重视。纤维网适用于任何混凝土工程。自 80 年代以来, 聚丙烯纤维网纤维喷射混凝土之所以能在世界各国很快推广, 主要是因为采用纤维网能够大大提高工程质量和降低总成本。其具体优点包括: 能形成更厚的喷射混凝土层; 具有更高的粘稠性、能大幅度降低混凝土回弹, 降低成本; 能阻止收缩龟裂; 增大抗冲击能力; 明显提高弯曲强度; 疲劳强度能提高 3 倍; 该喷射混凝土的射流初速度仅为使用其他材料时的 70%~80%, 减小了对已喷混凝土的冲击, 有利于提高混凝土的强度; 泵送容易, 不会损伤机械设备; 纤维能抗酸碱腐蚀, 没有锈蚀、老化问题; 能改善混凝土的水密性, 故能对主筋结构形成最佳保护, 对延长混凝土的寿命有重要意义; 不需改变原来的混凝土配合比; 同金属丝网相比, 纤维网纤维更易于储存、运输和使用; 纤维网以三维方式均匀自动地分布在混凝土中。

聚丙烯纤维是非腐蚀的化学填充物, 它对矿物质、酸碱基质和无机盐有很好的化学阻抗作用, 故聚丙烯纤维有效地阻止了混凝土的塑性收缩和龟裂。有纤维和无纤维的喷射混凝土抗压强度的区别是明显的, 但更令人关注的是在抗弯强度方面的区别。加有聚丙烯纤维的混凝土试件同加玻璃纤维的试件相比, 其 7 天和 28 天抗压及抗弯强度要高出很多; 与加钢纤维的试件相比, 其抗弯强度更高, 但抗压强度低于钢纤维的试件。

### (三) 硅粉喷混凝土

硅粉是一种极细的非晶状火山灰材料, 主要由硅组成。硅粉用于混凝土和喷混凝土中可以增加强度, 减小渗透性, 并提高粘聚力和附着力。硅粉在喷混凝土中的具体优点是提高喷混凝土与底层表面的粘结强度, 提高喷混凝土的粘聚力, 并使其具有在垂直面和顶板表面一次喷射更厚层的能力。在新鲜喷混凝土受到流水作用的地方, 这种材料更抗“冲刷”, 而且回弹显著减少。含硅粉的喷混凝土可以提高对化学物质侵蚀的能力。

硅粉喷混凝土产生非硬化的和硬化的材料特性。在其他应用中, 这些特性可使其适合作改性聚合物喷混凝土和速凝喷混凝土的替代品。对目前因为考虑粘结强度特性而采用常

规喷混凝土的许多场合，应该考虑采用硅粉喷混凝土。

硅粉喷混凝土已被广泛应用于隧道建设中，常常加进纤维以控制收缩裂缝。

#### (四) 聚合物改进喷混凝土

聚合物以两种方式加进喷混凝土中。一种方法，全部粘接剂都是由一种聚合物组成。这并不是一种水加水泥的产品，而是一种聚合物喷混凝土。另一种方法，是将一种聚合物乳化液加进水和水泥的混合物，部分取代拌和用水或全部替代拌和用水，扩散在整个混合物中，形成一种连续一致的聚合物基质体。这就是所谓的聚合物硅酸盐水泥喷混凝土。

用于喷混凝土的乳化聚合物常常是苯乙烯丁二烯。改性聚合物喷混凝土的优点是改进抗弯和抗拉强度，改善粘结强度，并且因渗透性小而减小了吸水率。

#### (五) 喷混凝土植生技术边坡防护

如何使裸露的坡面尽快覆盖，并达到长期有效的恢复生态环境的目的，已经成为全球关注的问题。边坡植生防护技术是随着铁路、公路等工程建设和生物技术的发展而逐渐形成的一项新兴综合技术。它的做法是通过各种种植手段，强制绿化铁路、公路的裸露坡面，使植被迅速覆盖，恢复其生态功能，重建特定地域植物群落的种类多样性和层次结构的复杂性，保持水土，避免雨水对坡面的冲刷和侵蚀，做到绿化、美化环境，同时降低噪音、眩光、振动和吸尘。国外从 20 世纪 50 年代开始，利用绿化工程达到边坡稳定，已形成了比较成熟的理论和施工方法，其中应用最为广泛的就是挂网喷射植被混凝土技术。在气候、生长环境允许时，在技术上用植草复原都是可行的，同时也能保证边坡的稳定性。对于坡度大于 1:0.5 的边坡，仅靠植被工程、预制混凝土网格或塑料网加播种工程等，都无法确保边坡稳定。为保证边坡的稳定，可采用喷射混凝土等边坡表面防水或采用挡土墙等结构物及（挂网）锚固工程等工程措施予以加强。

预应力锚索在国内水利水电工程的应用大概从 20 世纪 60 年代后期开始。随着锚固技术的发展，对预应力锚索的要求越来越高，越来越精。对外锚头，要求有可靠的锚固效果，避免预应力损失。对锚索体要求具有高强、低松弛以及高防护性能。对锚固段，要求能提供更高、更稳定的锚固力。较早的预应力锚索的内锚头是机械式的，加工精度要求高，对钻孔直径及岩石强度要求也高，承受张拉力较小（不越过 1000kN）。后来经过改进，内锚固段采用注浆（水泥浆或水泥砂浆），施工方便，锚固力大，一般可达数千 kN，最大已达 10000kN。锚固对象已不限于大块岩体，也包括土层和堆积体。预应力锚索的施工工艺随着锚索材料的推陈出新而不断更新。由于无粘结钢绞线的应用，产生了无粘结预应力锚索施工工艺，进而开发出来压力型和压力分散型预应力锚索。压力型锚索受力合理，克服了传统的拉力型锚索在锚固段外端拉应力集中以致浆体开裂、影响锚固效果及耐久性的不足，能够提供更高、更稳定的锚固力。压力分散型预应力锚索则可将荷载分散为几部分传递给钻孔，能更有效地利用天然地层强度，提高锚固力，特别适用于土层及软弱破碎岩层的锚固。

## 五、现场监控量测

### (一) 现场监控量测的重要性

现场监控量测是锚喷支护施工的一个重要环节。现场监测结果是指导优化设计和安全

施工的重要依据。如前所述，锚喷支护设计一般采用类比法，其设计参数是否合理，需要通过现场监测的结果进行验证。施工工艺的效果也需要通过现场监测的结果进行验证。不合适的设计参数和不合适的施工工艺根据现场监测的结果进行优化和改进。无论是对于地下工程还是高边坡工程的锚喷支护施工，均应按设计要求进行现场监控量测。本节侧重于地下工程的现场监控量测。

通过监控量测，可以监视围岩应力和变形情况，掌握围岩达到稳定的变形发展规律，保证安全施工。没有监控量测，就难以真正了解和掌握围岩变形和支护结构的受力情况，就难以保证施工安全。许多隧洞在进行了锚喷支护以后仍然发生塌方，往往与没有进行必要的监控量测有很大关系。

通过实践，已研究出了一批精度高、性能稳定、操作简便的监测仪器，例如收敛计、多点位移计、应力计、测斜仪等。形成了一整套观测方法、分析方法和信息反馈方法，形成了行之有效的反分析技术，促进了锚喷支护技术的发展。

(二) 现场监控量测的内容与方法

1. 简述

对隧洞的地质条件和支护状况进行观察和分析，是最直接、最容易、也是最重要的监控量测工作。开挖工作面揭露出来的工程地质和水文地质条件，是判断围岩稳定性和预测开挖前方地质条件的重要依据。支护结构状况的观察和裂缝描述，对于判断围岩和支护结构的稳定性及支护参数的合理性是必不可少的。

采用仪器对隧洞周边位移（即收敛变形）和拱顶下沉进行监控量测，对于围岩地质条件较差或大跨度（直径）的地下洞室（井），是必须做的主要监控量测项目。

对于有特殊要求的隧洞还应进行围岩内部位移和松动区范围、围岩压力及两层支护间接触应力、钢架结构受力、支护结构内力及锚杆等项监控量测。

现场监控量测仪器的布置和安装数量根据工程重要程度、围岩地质条件、地下洞室断面大小及施工条件来决定。

国家标准《锚杆喷射混凝土支护施工技术规范》中，对地下工程监控量测断面的布置做了规定，见表 1-1。对于有特殊要求的工程，应采取加强观测措施。

表 1-1 隧洞进行现场监控量测的选定表

围岩分级 \ 跨度 B (m)	跨度 B (m)				
	B ≤ 5	5 < B ≤ 10	10 < B ≤ 15	15 < B ≤ 20	20 < B ≤ 25
I				∠	∠
II		-	∧	∠	∠
III			∠	∠	∠
IV		√	√	∠	∠
V	∠	√	∠	∠	∠

注 1. “√”者为应进行现场监控量测的隧洞。  
 2. “∠”者为选择局部地段进行现场监控量测的隧洞。

隧洞现场监控量测项目及方法见表 1-2。量测点布置见图 1-1。

表 1-2 隧洞现场监控量测项目及方法表

项目名称	方法及工具	布 置	量测间隔时间				
			1~15 天	16 天~ 1 个月	1~3 个月	3 个月以后	
必测项目	地质和初期支护观察	岩性、结构面产状及支护裂隙观察	开挖后及初期支护后进行 每次爆破后进行				
	水平净空收敛	收敛仪	每 10~50m 一个断面，每断面 2 对测点	1~2 次/天	1~2 次/2 天	1~2 次/周	1~3 次/月
	拱顶下沉	水平仪、钢尺或测杆	每 10~50m 一个断面，每断面 3 对测点	1~2 次/天	1 次/2 天	1~2 次/周	1~3 次/月
	锚杆抗拔力	拉拔器	每 10~50m 一个断面，每断面至少 3 根锚杆	1~2 次/周		1~2 次/月	
选测项目	地表下沉	精密水准仪、水准尺	每 5~50m 一个断面，每断面至少 3 个测点	开挖面距量测断面前后 < 2B 时，1~2 次/天 开挖面距量测断面前后 < 5B 时，1 次/2 天 开挖面距量测断面前后 > 2B 时，1 次/周			
	围岩内部位移（洞内设点）	洞内钻孔安设单点、多点式位移计	每 30~100m 一个断面，每断面 2~11 对测点	1~2 次/天	1 次/2 天	1~2 次/周	1~3 次/月
	支护、衬砌内应力、表面应力及裂隙量测	混凝土内应变计、应力计、压力计	代表性地段量测、每断面宜为 11 个测点	1 次/天	1 次/2 天	1~2 次/周	1~3 次/月
	钢支撑内力及外力	支柱压力计或其他测力计	每 10~50 根钢支撑一对测力计	1 次/天	1 次/2 天	1~2 次/周	1~3 次/月

注 B 为隧洞开挖宽度。

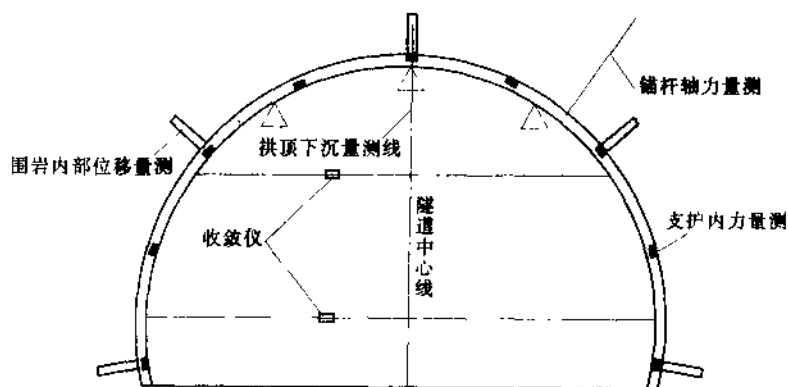


图 1-1 测点布置示意图

## 2. 隧洞收敛量测

收敛量测是测量隧洞周边相对应的两点之间距离的变化。为了及时掌握隧洞开挖后围岩变形情况，应紧跟开挖工作面设置收敛量测测点，定时测定收敛值，计算分析收敛速率，据以判定围岩及支护结构的稳定性。

工程中常用的收敛量测元件为位移测杆及收敛计。

位移测杆由数节可伸缩异径金属管组成，管上装有游标卡尺或百分表，用来测量测杆两端点之间的相对位移，适用于小断面隧洞的收敛量测。位移测杆构造示意图见图 1-2。

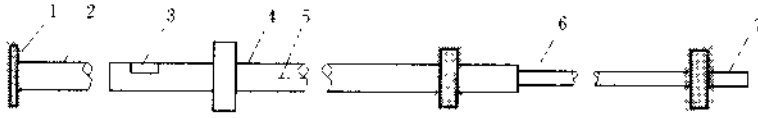


图 1-2 位移测杆构造示意图

1 平面接触端；2 杆身；3 游标；4 活动杆；5 读尺；6 接杆；7 球形接触端

收敛计的种类有单向重锤式、万向弹簧式、万向应力环式等。单向重锤式收敛计主要由支架、百分表、钢尺、连接销、测杆、重锤等部件组成，其构造示意图见图 1-3。

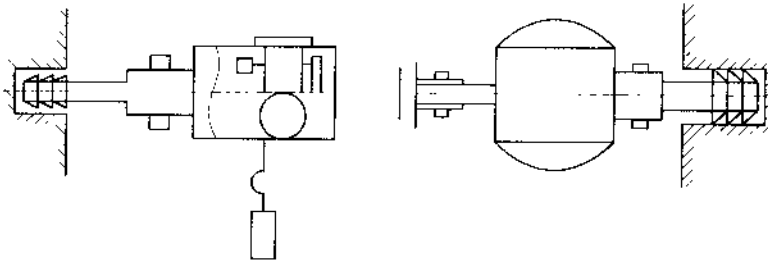


图 1-3 单向重锤式收敛计构造示意图

万向弹簧式收敛计主要由支架、百分表、钢尺、弹簧、连接球铰、测杆等部分组成。万向应力环式收敛计主要由应力环、钢尺、球铰、测杆等部分组成。每个收敛量测观测断面宜设 5 个测点、6 条测线，至少不能少于 3 个测点、3 条测线。

隧洞收敛量测记录表见表 1-3。

### 3. 隧洞围岩内部位移量测

隧洞围岩内部位移量测是量测围岩表面与内部各测点之间距离的变化，据以了解岩体扰动与松动范围，判断围岩与支护结构的稳定状态。

工程中常用的隧洞围岩内部位移量测元件有机械式位移计和电测式位移计。

机械式位移计结构简单，稳定可靠，价格较低，但精度偏低，观测不方便，一般适用于小断面、干扰小的隧洞的监测。

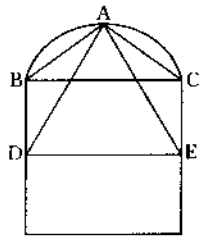
机械式位移计又分为单点式、两点式和多点式等几种。单点式机械位移计由楔缝式内锚头、圆钢位移传递杆及孔口测读部分（百分表与外锚头）组成。两点式机械位移计有两个锚头，两根金属测杆分别与两个锚头连接，用百分表分别量测两根测杆外端测点与孔口端面（观测基准面）之间的相对位移值，即两测点（锚固点）与孔口之间的相对位移值。多点机械式位移计是在同一钻孔中设多个锚头（测点），通过相应的位移传递，了解位于不同孔深处的各测点与孔口端面之间的相对位移。

表 1-3 收敛量测记录表

工程名称： 仪器编号： 仪器埋设日期： 年 月 日  
 项目名称： 桩号： 仪器距开挖面距离： m  
 工程部位： 测点位置： 监测起始日期： 年 月 日

监测日期	各测线实测相对位移值 (mm)												开挖桩号	
	A-B		A-C		B-C		A-D		A-E		D-E			
	测值	位移	测值	位移	测值	位移	测值	位移	测值	位移	测值	位移		

仪器埋设位置简图



简要地质素描：

观测： 记录： 计算： 校核：

电测式位移计的原理，是把非电量的位移量通过传感器的机械运动转换为电量变化信号输出，再由导线传送给接收仪接收并显示。这种仪器的优点是施测方便，操作安全，能够遥测，适应性强。缺点是易受外界影响，稳定性较差，价格较高。

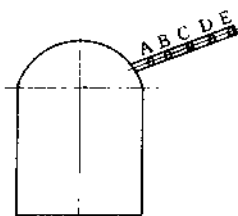
多点位移计量测记录表见表 1-4。

表 1-4 多点位移计量测记录表

工程名称： 仪器编号： 仪器埋设日期： 年 月 日  
 项目名称： 桩号： 仪器距开挖面距离： m  
 工程部位： 测点位置： 监测起始日期： 年 月 日

监测日期	各测线实测相对位移值 (mm)										开挖桩号	
	A		B		C		D		E			
	测值	位移	测值	位移	测值	位移	测值	位移	测值	位移		

仪器埋设位置简图



简要地质素描：

观测： 记录： 计算： 校核：



除隧洞收敛量测及围岩内部位移量测外，还有混凝土喷层应力量测、锚杆内力量测等，但在施工中较少采用，故不赘述。

### (三) 监控量测的实施

#### 1. 观察

隧洞开挖过程中，每次掘进爆破后，应立即进行围岩状况的观察和记录，并进行地质特征的描述。支护后应对支护结构表面进行观察和记录。

#### 2. 收敛计的应用

为监测地下洞室施工期围岩稳定和支护结构的安全程度，一般采用收敛计。

根据设计文件的要求设置收敛计量测断面，埋设观测元件。收敛量测断面一般应布置在工程的关键部位或围岩稳定性较差的部位。根据观测结果，地下洞室围岩的变形在开挖工作面处就开始发生了，而且已达到全部变形的 20% 左右。如果量测点距开挖工作面较远，则量测到的围岩变形较小，不能真实反映围岩的变形过程。因此，收敛量测断面应尽可能靠近开挖工作面设置，一般距开挖工作面不超过 1m。

#### 3. 多点位移计的应用

多点位移计主要应用于重要工程的关键部位，用来监测地下洞室在开挖过程中围岩表面及一定深度内的变形规律，配合收敛计使用。

多点位移计应埋设在距开挖工作面 2 倍洞径处。在同一观测断面上，视实际需要埋设 1~2 只多点位移计，每只仪器上可设 3~5 个观测点。为了量测围岩的最大相对变形，需确定洞室开挖后围岩相对不产生变形的最小深度，根据大量观测结果，这个最小深度为洞室开挖表面以内 1.5 倍洞径。因此，要求多点位移计最深观测点的埋设深度应不小于 1.5 倍洞径。埋设多点位移计的钻孔直径须满足仪器埋设的需要，钻孔方向允许偏差为  $\pm 2^\circ$ ，钻孔深度允许偏差为  $\pm 50\text{mm}$ 。要求各测点要锚固牢靠，测杆或钢丝能自由活动，否则将影响围岩变形的测定及分析。安装在孔口的传感器要与孔壁岩体紧密接触。初始读数调整后，孔口要封闭，为传感器设置防护罩，以防碰动。

#### 1. 注意事项

各类量测点均应布置在完整的岩体上，仪器安装要牢固。对测点要做好保护，防止爆破飞石或人为碰动造成测点损坏。如果测点埋设在松动的岩块上，所量测到的数据不能反映围岩的真实变形，对设计和施工会造成误导。

各类量测点安设完成后，均应在工作面开挖后 12h 内和下一次开挖之前测取初始读数，以便及时观测到围岩的早期变形。以后一般应在每一施工循环的开挖前、后进行观测，以掌握围岩变形的全过程。对围岩流变特性明显的地质地段，观测间隔时间不宜大于 4h。当围岩变形明显减少时，可适当延长监测的间隔时间。

同一地段的监测工作最好由专人自始至终负责，中途不宜换人，以便熟悉观测情况；确实需要换人时，应至少有两次交接性监测。同一地段的监测最好采用同一监测仪器，中途不宜更换监测仪器；确实需要更换监测仪器时，应同时采用原仪器和更换仪器测定同一时间变形后，方可使用更换的仪器进行观测，以便保证观测结果的连续性和准确性。当监测结果出现异常情况时，应查明原因，并重复观测 1~2 次。按表 1-3 或表 1-4 的格式和项目做好监测记录，不得漏项。