

锚喷加固设计方法

朱浮声 编著

冶金工业出版社

前 言

锚喷加固是各种土木工程和采矿工程中岩石开挖加固的一种最有效和最经济的方法之一。目前的工程实践已证明,除了在极软弱、破碎的岩体中开挖的岩石工程外,锚喷加固技术可以用于几乎全部岩土工程加固。

传统的锚喷加固设计方法主要是各种依赖于实际经验的经验方法,科学原理的应用仅是近几十年,特别是近十几年的事。随着现代岩石力学的发展,锚喷加固原理和设计方法有了越来越深厚的基础,各种先进的试验设备和现场监测仪器、技术的出现为得到可靠的岩体力学参数提供了条件,高速发展的电子计算机为模拟和设计各种条件下的锚喷加固系统提供了工具,因此,锚喷加固设计方法正在从经验、半经验方法逐渐成为建立在科学原理基础上的科学方法。本书的主要目的之一就是反映国内、外在锚喷加固设计方法上的这个进步。

由于学科发展的历史原因,有关锚喷加固设计方法的系统著作一直较少。为了给从事锚喷加固系统施工与设计的工程技术人员提供一些实用设计方法,本书试图从讲清基本原理和便于实际应用的角度组织材料,使读者既能搞通设计方法的原理,又不会陷入繁锁的公式推导和复杂的计算之中。

全书共分9章,第1章是关于锚喷加固基本情况的绪论。第2章介绍了目前常用的锚杆和锚索的结构组成、工作原理、技术性能和适用范围等,这是正确选择锚杆类型的前提。第3章针对三种不同类型锚杆以及锚索的安装和试验方法等进行了讨论,它们直接涉及对锚杆加固系统的施工质量和性态的了解,构成了锚喷加固设计中不容忽视的两个方面。在第4章中,讨论了喷射混凝

土的原料、配合比、工程特性和施工等方面问题，并对近年来发展起来的钢纤维和水泥裹砂喷射混凝土做了介绍。第5~8章详细讨论了锚喷加固设计的原则、基本原理和设计计算方法。书中首先介绍了锚杆与其它支护材料几种常见组合型式，以便适应各种岩体条件下锚杆加固系统的选择。接着，根据现代岩石力学原理，讨论了锚喷加固设计的基本原则、一般步骤和需要考虑的因素。第6章讨论了几个锚喷加固实用解析解，它们基本上反映了对锚喷加固作用机理认识的不同侧面，例如，组合拱原理、组合梁理论、悬吊理论和摩擦作用等，并提出了支架-围岩相互作用原理的应用以及不稳定岩块锚固分析与设计方法。对于锚杆桁架加固参数的校核部分，由于目前研究刚刚起步，只能作为校验设计的参考。第7章以岩体分类为目标，组织实践经验的资料，介绍了国内、外几种公认的岩体分类方法，例如，我国锚喷支护围岩分类法、地力学分类法、矿山岩体分类法和巷道岩石质量指标分类法等，并在此基础上提出了相应锚喷加固系统参数的建议，也对于低应力条件下的大跨度巷道经验设计方法做了介绍，目前，这些方法仍是锚喷系统设计的基本方法。作为小结，本章最后介绍了地下工程支护设计的工作程序。目前，锚喷加固设计的数值方法正被逐渐应用于锚喷加固设计，并且，在这个领域中有着十分广阔的应用前景。第8章重点讨论了工程岩石力学问题各种数值方法的基本特征和本质，指出了它们的应用条件，并着重讨论了几种锚喷加固系统的数值模拟方法，而忽略了对各种数值方法的原理和算法的讨论，本章还对数值计算中计算机程序的检验问题做了介绍。本书第9章叙述了锚喷加固的监测技术，在锚喷加固设计中，现场监测工作构成了整个设计的有机组成部分，通过监测检查施工质量、修改和完善支护系统设计是锚喷加固设计应遵循的方法。

近几年来，作者曾在锚喷加固及其计算机模拟方面进行了一些研究工作，并有机会接触到美国和澳大利亚等国锚喷加固的实

践和资料，本书就是在此基础上写成的。在本书出版之际，作者要特别向东北大学的郑雨天教授致以衷心感谢，他不仅阅读了本书大部分书稿，提出了宝贵修改意见，并提供了一部分参考资料。另外，作者还要感谢中国矿业大学陆士良教授和西安矿业学院刘听成教授，他们曾对本书部分初稿提出了有益建议。作者还要对于煤炭战线参加过本书部分稿件讨论的科研、教学和工程技术人员表示谢意，感谢他们的帮助和鼓励。

由于锚喷加固理论和设计方法正处于不断发展和完善阶段，受到作者水平的局限，书中一定有许多不妥之处，敬希读者批评指正。

朱浮声

1993. 7. 于东北大学

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 概 述	(1)
1.2 锚杆的分类	(3)
第2章 锚 杆	(5)
2.1 概 述	(5)
2.2 机械锚固式锚杆	(6)
2.3 粘结锚固式锚杆	(12)
2.4 摩擦锚固式锚杆	(21)
2.5 高承载力锚杆和锚索	(24)
2.6 锚杆垫板及其它部件	(32)
第3章 锚杆的安装与试验	(35)
3.1 锚杆安装	(35)
3.2 高承载力锚杆和锚索安装	(41)
3.3 锚杆试验	(44)
第4章 喷射混凝土	(57)
4.1 概 述	(57)
4.2 喷射混凝土原料与配合比	(58)
4.3 喷射混凝土工程特性	(61)

4.4	喷射混凝土施工	(68)
4.5	钢纤维和水泥裹砂喷射混凝土	(69)
4.6	喷射混凝土的应用	(75)
第5章	锚喷加固型式与设计原则	(79)
5.1	锚喷加固型式	(79)
5.2	锚喷加固设计原则	(95)
第6章	锚喷加固解析设计法	(105)
6.1	概 述	(105)
6.2	经典弹性解	(106)
6.3	组合拱理论分析	(115)
6.4	组合梁理论	(122)
6.5	锚杆悬吊作用与免压拱理论	(125)
6.6	锚杆加固单元体与锚杆轴力	(131)
6.7	不稳定岩块锚喷加固	(134)
6.8	锚杆桁架加固参数校核	(147)
6.9	高承载力锚杆和锚索设计的补充说明	(155)
第7章	锚喷加固经验设计法	(161)
7.1	概 述	(161)
7.2	我国锚喷加固经验设计法	(162)
7.3	岩体地力学分类与支护设计	(178)
7.4	矿山岩体分类法与支护建议	(186)
7.5	巷道岩石质量指标分类法与支护建议	(191)
7.6	低应力条件下大跨度巷道锚杆加固设计	(200)
7.7	有关支护设计方法的建议	(204)
7.8	简短结语	(206)

第 8 章 锚喷加固数值设计法	(209)
8.1 概 述	(209)
8.2 工程岩石力学问题数值方法	(211)
8.3 锚杆与喷层的数值模拟	(217)
8.4 计算机程序的检验	(228)
第 9 章 锚喷加固监测设计法	(230)
9.1 概 述	(230)
9.2 锚喷加固监测项目	(231)
9.3 位移量测及应用	(231)
9.4 围岩内部位移量测	(239)
9.5 锚杆量测	(241)
9.6 喷层应力与应变量测	(241)
9.7 围岩破碎带声测法	(243)
9.8 巷道围岩 p - u 曲线实测	(245)
9.9 新奥法	(250)
参考文献	(252)

第1章 绪 论

1.1 概 述

在岩体力学中，“岩层控制”(strata control)一词定义为岩上工程开挖和服务期间岩土(地层)特性的控制与预测。因此，岩层控制的目标应包括：

- (1) 正确认识岩体或地层在给定地质环境中的力学特征；
- (2) 确定在给定地质条件下岩层控制方法；
- (3) 确定在给定条件下预测岩体力学特征的方法；
- (4) 确定在现有知识水平下预知的地下工程环境改变时岩层控制方法。

按照现代岩体力学观点，岩层控制方法(技术)可以划分为两大类，即岩石支护和岩石加固技术。

岩石支护(support)是以人工结构物承受岩体不连续面切割的岩块或破碎带岩石自重荷载的岩层控制方法。为了承受破碎岩石重量，可以采用支撑方式，也可以采用吊挂方式。例如，常见的混凝土衬砌、各种金属支架、金属与木支柱、料石墙、木垛以及挡土墙等都属于前者，而无预紧力的锚杆、锚索以及无预张拉的锚杆桁架、锚杆钢带等，当它们是以悬吊破碎岩石重量为主要目的时，都是后者的应用实例。此时，由于支护系统要等岩石变形甚至支护构件与岩石接触后才起支护作用，也称之为被动支护。

岩石加固(reinforcement)是通过人工手段调动和利用岩体固有强度实现岩体自支撑目的的岩层控制方法。岩石加固中最常用的办法是安装预应力锚杆和锚索，由于在安装的同时对岩体施加

作用力，又称这种加固方式为主动支护。以水泥砂浆和树脂等作为粘接剂安装的锚杆，虽然在安设时并未施加预应力，而是随岩体变形产生支护作用，由于它们的主要作用仍在于增加岩体自身强度，仍属于岩石加固方法，但它们介于两种主要类型之间。

在岩石发生显著变形和风化之前，在地下工程表面迅速喷射一层水泥砂浆，喷层会在短期内达到很高强度，使地下工程边界附近的高应力直接传递给喷层，因此，也可认为是一种岩石加固方法。与此相近的方法是通过钻孔等对岩体高压注浆，以便阻止地下水渗流并增加岩体的强度。

此外，由于各种液压支柱、液压支架或通过在支柱上安装扁千斤顶等方法是在岩体变形前施加预应力的，它们也属于岩石加固方法，但由于超出了本书范畴，在此不做讨论。

总之，锚喷加固方法将岩体作为结构材料，通过调动和增强岩体自身强度实现岩体自身支撑目的，是一种符合现代岩体力学理论的岩层控制方法。为了区别于依靠人工材料和构件支撑岩块重量的传统支护方法，本书采用了国际岩石力学界的习惯用法，统称之为岩石加固技术，在不与前述“岩石支护”概念混淆情况下，有时统称岩石支护与岩石加固为岩土工程支护，简称“支护”。

在岩土工程开挖期间或开挖之后，为给后继开挖顺利进行创造安全施工条件，通过控制开挖体边界位移、利用人为措施增加岩体强度等而安设的支护，称之为一次支护。一次支护（包括“支护”和“加固”两方面）可以是达到岩土工程稳定所需支护的一部分，也可能是其全部。在一次支护完成后施做的任何附加支护称之为二次支护。

锚喷加固技术尽管已有百年的历史，但锚喷加固的广泛应用仅是四、五十年的时间。它之所以能冲破根深蒂固的传统观念束缚，在岩土工程支护中，特别是土木工程和采矿工程的支护中，得到迅速发展和普遍应用，一方面依赖于岩石力学理论和实验设备、实测技术的长足进步，更主要的是由于它自身具有传统支护形式

不能媲美的优点，例如：

(1) 简便、灵活、易于使用，可以适应各种岩土工程开挖形状和用途；

(2) 价格便宜，节约钢材；

(3) 易于实现机械化作业；

(4) 可以与传统支护联合使用，也可以构成多种组合锚喷型式，以适应复杂地质条件。

在锚喷加固设计中，经验方法占有重要地位。但是，经验方法局限于取得经验的条件，只有当地质环境与得到该经验的条件基本一致时，依赖经验方法给出的锚喷加固设计才是有用的。随着岩石力学的发展，理论方法越来越起到不可忽视的作用。理论方法具有较普遍意义，并能对未经经验的条件及锚喷加固作用做出预测，但这种方法依赖于对现场岩体力学性质及各种影响因素的正确了解，对各种变量间相互关系的精确建立（力学模型），以及对各种可定量与不可定量因素的定量化。由于岩体性质的多变性与复杂性，针对每个现场条件进行的岩体力学性质研究以及锚喷加固系统的详细监测都成为锚喷加固设计的重要组成部分。相应地，各种量测仪器和技术，例如，在原岩应力、围岩二次应力、岩体力学性质、岩体变形及支护系统对围岩作用的响应等方面的量测设备和技术的发展，也成为影响锚喷加固技术发展和应用的重要因素。

1.2 锚杆的分类

目前，在我国和全世界范围内，适用于不同地质条件、具有不同功能和用途的锚杆有数百种，锚杆支架的分类方法也遵循不同原则和分类标志。但是，最常见和最基本的分类方法是按锚杆与被支护结构（岩体）的锚固方式将其划分为：

- | | |
|-------------|---------|
| | 胀壳式锚杆 |
| (1) 机械锚固式锚杆 | 倒楔式锚杆 |
| | 楔缝式锚杆 |
| | 树脂锚杆 |
| (2) 粘结锚固式锚杆 | 快硬水泥卷锚杆 |
| | 水泥砂浆锚杆 |
| (3) 摩擦锚固式锚杆 | 管缝式锚杆 |
| | 水胀式管状锚杆 |

根据锚杆锚固部分大小也可细分为端部锚固式与全长锚固式锚杆两类，而这两类锚杆有不同的受力特征。按照制造锚杆杆体的材料可以划分出木锚杆、竹锚杆、金属锚杆、(钢筋)混凝土锚杆以及聚酯锚杆等。根据锚杆的组合方式又可区分出单体锚杆与组合锚杆加固。

按照锚杆作用特点可以将其分为主动式锚杆与被动式锚杆。主动式锚杆安装后被施以预应力，用以提高围岩完整性，使不同岩层间摩擦作用增大，同时将锚固范围内岩层夹紧，形成梁和拱形式的承载结构，提高了巷道稳定性。安装被动式锚杆时不给杆体施加预应力，为了达到相同支护效果，所需锚杆密度要高于主动式锚杆。

按照锚杆工作特性可以将其划分为刚性、有限可缩性及可缩性锚杆。如果考察图 1.1 的锚杆特性曲线，可以看到，具有可缩性的锚杆又可区分为增阻可缩性和恒阻可缩性。可缩性锚杆与刚性锚杆的基本区别在于前者的支护特性曲线没有斜率突变点。

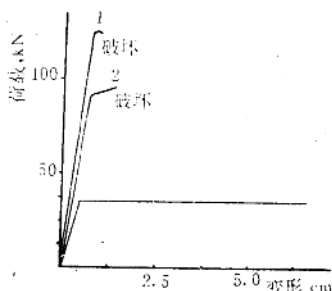


图 1.1 典型锚杆支护特性曲线
1—粘结式锚杆； 2—机械式锚杆；
3—管缝式锚杆

第2章 锚 杆

2.1 概 述

在地下工程围岩稳定维护中，如果以锚杆作为加固系统的主要构件，就形成一个锚杆加固系统。

单体锚杆由锚头、杆体及垫板组成。例如，对于以机械或化学方式锚固的端部锚固式锚杆，位于锚杆钻孔内部、用于在锚杆和岩体之间传递力的作用部分就是内锚头，位于锚杆孔外、用于产生锚杆预应力的部分就是外锚头。垫板的作用是将锚杆拉力转化为对围岩压力。锚杆的主体—杆体通常由钢筋和钢管等制成，用于承受张拉作用。

锚杆的基本力学参数包括抗拔力、握裹力、粘结力和拉断力等，它们分别定义为：

抗拔力——锚杆在拉拔试验中承受的极限拉力，即锚固力；

握裹力——锚杆杆体与粘结材料间的最大抗剪力；

粘结力——锚杆粘结材料与孔壁岩石之间的最大抗剪力；

拉断力——锚杆极限抗拉强度。

目前，正在使用的锚杆类型繁多，很难在一本书里全面介绍各种锚杆的各方面特性。另一方面，很多不同结构的锚杆在受力特征、加固作用、设计原理和分析方法等方面基本是相同的，有可能按照一定的分类原则将锚杆分成不同类型。正如本书 1.2 节指出的，目前广泛采用的一种锚杆分类法如下：

(1) 机械锚固式锚杆；

(2) 粘结锚固式锚杆；

- (3) 摩擦锚固式锚杆；
- (4) 高承载力锚杆和锚索。

本章将按上述分类对各种锚杆的组成、工作原理、技术性能和适用范围等各方面做一简要介绍。

2.2 机械锚固式锚杆

机械锚固式锚杆一般属于端部锚固式锚杆，锚固特性依赖于机械锚头，并且，金属机械锚固式锚杆的安装一般需要施加预应力，属于主动式锚杆。常见锚头类型包括胀壳式、倒楔式和楔缝式等，常用金属杆体直径14~22mm，也有30~32mm的，杆体长度0.65~5.25m，直径较大的锚杆一般用于金属矿山。

在机械锚固式锚杆中，木锚杆、竹锚杆及其它人工合成材料锚杆在矿山中得到一定应用。由于这些锚杆具有结构简单、成本低、制造容易等优点，成为矿山小断面和服务年限短的巷道一种最经济的支护型式。

2.2.1 胀壳式锚杆

结构组成

胀壳式锚杆种类繁多，常见胀壳式锚杆由胀壳、锥形螺母、杆体、垫板及螺帽等组成（图2.1）。

标准胀壳式锚头为一沿纵向分割为两瓣或四瓣的短管，另一端为未分割的刚性部分。胀壳外表面加工成锯齿状，胀壳内插入一个有内丝扣的锥形空心螺母（图2.2a）。筒形锚头的胀壳一般沿全长分为二等份，用钐状钢箍连在一起，防止壳体下滑（图2.2b）。

工作原理

组装好的锚杆送入孔底后，旋转杆体，使锥形螺母向下滑动，迫使胀壳张开，嵌入孔壁，使锚杆锚固在岩石中。

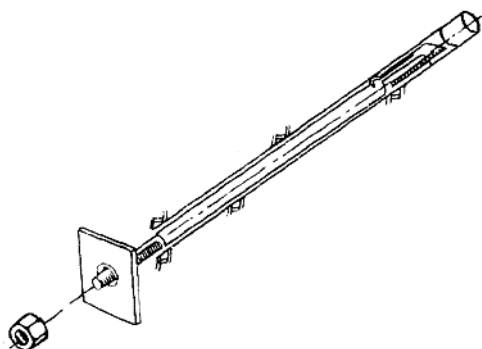


图 2.1 胀壳式锚杆

技术性能

胀壳式锚杆的锚固力主要取决于胀壳与孔壁的接触情况、岩石类型及锚固点附近岩石完整性。由于锚头与孔壁接触情况较楔缝式或倒楔式锚杆良好，锚固可靠，锚固力较大，设计锚固力一般取 50kN，实测锚固力可达 40~130kN。杆体可以回收复用。但当岩体质量较差时，锚固点附近岩石局部破碎将引起锚杆滑移。

适用范围

在国外，曾在采矿及土木工程中得到了广泛应用，但在地下永久性工程中安装后往往要注浆。目前，用量正在逐渐减小。

2.2.2 倒楔式锚杆

结构组成

金属倒楔式锚杆由固定楔、活动楔、杆体、垫板和螺帽等组成(图 2.3)。

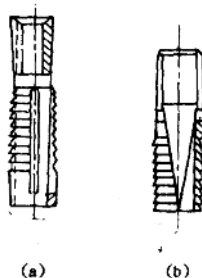


图 2.2 胀壳锚头

(a) 两瓣胀壳; (b) 筒型胀壳

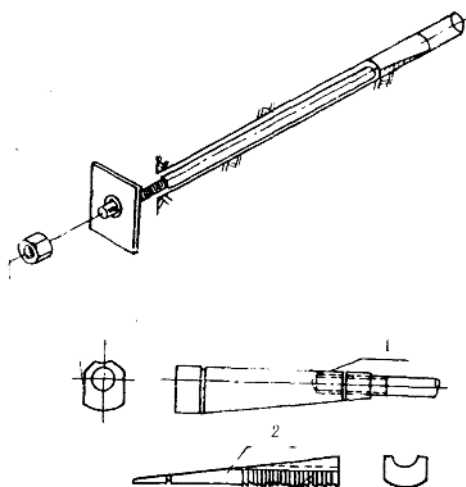


图 2.3 金属倒楔式锚杆

1—上楔； 2—下楔

锚头

倒楔式锚杆的锚头由固定楔和活动楔组成，如果固定楔为铸铁的，则与杆体浇铸为一体，相应活动楔也是铸铁的；如果固定楔是钢制的，则与杆体螺丝连接，相应活动楔也是钢制的。楔子的尺寸和锥度对于锚固力大小影响甚大。

工作原理

先将活动楔与装有由橡筋固定的固定楔的杆体同时送入孔底，顶住活动楔，将固定楔随杆体向钻孔外拉，造成沿活动楔斜面的滑动，使楔体横截面增大，并嵌入孔壁。此后，装上垫板和螺母，使围岩处于受压状态。

技术性能

倒楔式锚杆构造简单，安装方便，易于回收，安装后可立即发挥加固作用。金属倒楔式锚杆锚固力一般可达 $30\sim 50\text{kN}$ 。

适用范围

用于矿山开挖在中硬岩石中的永久性工程或采区主要巷道和洞室，或用于矿山及土木工程临时加固中。用量正在减少。

2.2.3 楔缝式锚杆

结构组成

楔缝式锚杆可以按其材质分为金属锚杆、木锚杆和竹锚杆等。楔缝式锚杆由杆体、楔块、垫板和螺母等组成（图2.4）。

金属楔缝式锚杆杆体一般用 3" 或 5" 钢制成，直径 $14\sim 25\text{mm}$ ，长度 $1.5\sim 2.0\text{m}$ ，内锚头为开在杆体端部 $2\sim 5\text{mm}$ 宽、 $150\sim 200\text{mm}$ 长的纵向楔缝，外锚头为 $100\sim 150\text{mm}$ 的标准螺纹。楔子一般用铸铁制成，较楔缝短 $10\sim 20\text{mm}$ ，楔头厚 $1.5\sim 2\text{mm}$ ，楔尾厚 $20\sim 25\text{mm}$ ，楔宽与杆体直径相同。

工作原理

将楔子装入楔缝并送入孔底，冲击锚杆外锚头使楔子撑开楔缝将内锚头紧压孔壁，产生所需锚固力。安装垫板使锚杆进入工

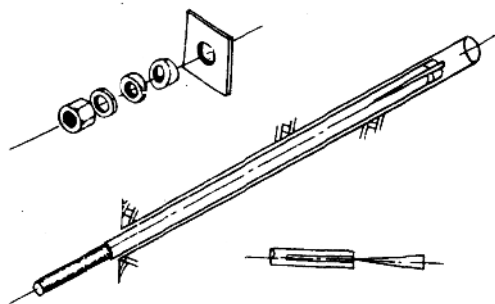


图 2.4 楔缝式锚杆

作状态。

技术性能

锚杆的锚固力受很多因素影响,如杆体直径、楔缝宽度、楔子长度、楔子端部厚度、楔子锥度以及钻孔直径、岩体性质等。

金属楔缝式锚杆的设计锚固力为 40kN ,若在中硬以上岩体中使用,并加大锚头,锚固力可达 $60\text{kN}\sim 80\text{kN}$ 。不宜在软岩中使用。

总之,楔缝式锚杆结构简单、制造容易,成本低,易于安装。但由于对眼深及孔径要求严格,对软弱破碎岩体锚固力差,未灌浆的锚杆抗震能力差,且回收复用困难等,限制了它的广泛应用。

适用范围

金属楔缝式锚杆适用于中硬以上岩层中的永久性地下工程或采区主要巷道和硐室,但其用量已很少。

2.2.4 木锚杆和竹锚杆

木锚杆是矿山巷道最经济的加固型式,主要被用于小断面和服务年限短的准备巷道,特别是用于对巷道两帮的加固。在某些情况下,木锚杆也可以用来防止回采工作面的片帮。在我国南方,毛竹资源丰富,生产出了矿用竹锚杆。竹锚杆具有木锚杆相同的作用。木、竹锚杆可以分为机械锚固式与粘结锚固式两种。此外,还有压缩木锚杆。

木楔缝式锚杆杆体由优质杂木制成,直径一般为 38mm ,长度 $1.2\sim 1.8\text{m}$,杆体上、下端均加工成 250mm 左右长度的纵向缝。楔子长 $150\sim 200\text{mm}$,厚 $20\sim 25\text{mm}$ 。

竹楔缝式锚杆一般由两根竹片制成直径 $38\sim 40\text{mm}$ 的杆体,其长度为 $1.2\sim 1.6\text{m}$,内锚头采用与金属锚杆或木锚杆类似的楔缝和硬杂木楔子。外锚头可以采用与木锚杆类似的楔缝和硬杂木楔子,也可以采用金属结构(图 2.5)。

竹倒楔式锚杆的固定楔和活动楔均由硬木或竹子做成,杆体