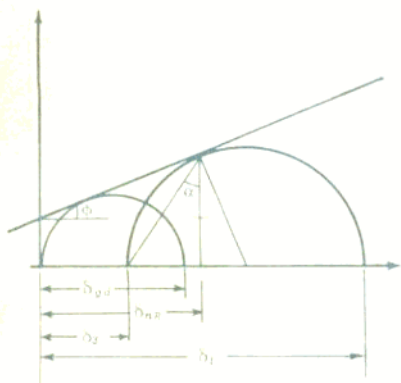


地下工程

喷锚支护原理和设计



王建宇编著

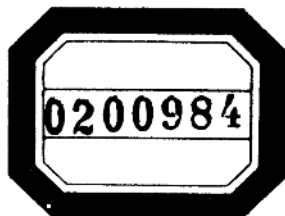
中国铁道出版社

水电部科技情报所	
图书总号	409921
分类号	TV672

 006515 水利部信息所	
分类号	TV672

地下工程喷锚支护 原理和设计

王 建 宇



中 国 铁 道 出 版 社

1980年·北京

内 容 简 介

本书根据近几年来我国铁路隧道喷锚支护工程实践和科研成果，并综合国内外有关资料，从围岩稳定性，洞室开挖后围岩力学形态变化过程及围岩自承能力的特点出发，对各类围岩条件下喷锚支护的作用原理进行了讨论，并介绍一些设计计算方法。

本书供从事隧道、井巷、水工隧洞和其他地下建筑工程的技术人员参考。

21151/33

地下工程喷锚支护原理和设计

王建宇 编著

中国铁道出版社出版

责任编辑 许虹进

封面设计 关乃平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{4}$ 印张：7 字数：154 千

1980年3月第1版 1980年3月第1次印刷

印数：0001—7,000 册

统一书号：15043·6211 定价：0.75 元

目 录

第一章 绪论.....	1
第二章 锚杆.....	5
§ 2—1 锚杆在地下工程中的使用.....	5
§ 2—2 灌浆锚杆.....	11
§ 2—3 巨型预应力锚索.....	18
第三章 喷射混凝土.....	23
§ 3—1 喷射混凝土技术的发展与工艺.....	23
§ 3—2 喷射混凝土的强度性能.....	24
第四章 围岩的自承能力和喷锚支护的作用特点.....	30
§ 4—1 对围岩压力的认识.....	30
§ 4—2 喷锚支护的作用特点——围岩自承 能力的进一步利用.....	35
第五章 围岩的稳定性特征.....	37
§ 5—1 岩体的地质结构.....	37
§ 5—2 岩体中的初始地应力.....	41
第六章 围岩应力的弹性分析与整体围岩中的喷锚 支护.....	49
§ 6—1 用弹性理论来分析围岩的二次应力 状态.....	49
§ 6—2 关于围岩局部应力集中和爆破松动 圈.....	67
§ 6—3 整体围岩中的拉裂区.....	69
第七章 围岩的块体平衡与块状围岩中的喷锚支护.....	76
§ 7—1 块状围岩的变形和破坏特点.....	76

§ 7—2	喷射混凝土层防止危石坍落的能力·····	79
§ 7—3	锚杆对块状围岩的支护作用·····	82
§ 7—4	不稳定块体位置和形状的确定·····	84
§ 7—5	块体平衡计算·····	98
§ 7—6	普遍分布的节理、层面等结构面所 形成的不稳定块体·····	107
§ 7—7	块状围岩中喷锚支护的设计原则·····	119
第八章	喷锚支护对软弱围岩的作用·····	121
§ 8—1	喷锚支护在软弱围岩中的采用·····	121
§ 8—2	喷射混凝土层的结构作用及喷射层 结构的荷载条件——兼论“形变压力”···	126
§ 8—3	软弱围岩的变形特点和圆形洞室围 岩应力的弹塑性分析·····	135
§ 8—4	圆形洞室等厚度喷层结构的刚度及 强度计算·····	144
§ 8—5	柔性支护结构的力学原理·····	147
§ 8—6	一般形状的小跨度洞室中喷层的破 坏形态和设计原则·····	157
§ 8—7	锚杆对软弱围岩的加固作用以及按 加固作用计算喷锚支护·····	163
§ 8—8	软弱围岩中喷锚支护的设计原则·····	173
第九章	层状围岩中的喷锚支护·····	175
§ 9—1	层状围岩的变形特点和破坏形态·····	175
§ 9—2	锚杆的组合梁作用·····	176
第十章	用工程类比的经验方法设计喷锚支护·····	190
§ 10—1	经验方法及其在喷锚支护设计中的 地位·····	190
§ 10—2	围岩分类和工程类比法·····	194

第一章 绪 论

地下洞室的开挖在岩体中形成了新的空间。这就破坏了岩体原有的相对平衡状态，使洞室周围那部分岩体（通常把这部分岩体称为“围岩”）的应力重新分布，引起围岩的变形、破坏和坍塌。

为了保证地下洞室开挖顺利和正常使用，必须采取一定的工程措施，有效地控制围岩的变形，防止其坍塌，或把可能坍塌下来的岩块支承住，不使落入洞内。我们把这种工程措施称为围岩的支护。

在地下工程中，通常是修筑一些形式不同的结构物来支护围岩的。例如，对于矿山巷道一类断面较小、使用年限不长的地下工程，一般用圆木或金属构件组成梯形或拱形的“支架”（也称“支撑”）来支护围岩；而对于一些断面较大、使用年限较长的永久性地下工程（例如铁路隧道，各种地下厂房等）则常常要灌注混凝土或钢筋混凝土的“衬砌”来作为支护结构物。

生产的发展和战备的需要对地下工程建设提出了越来越高的要求。传统采用的一些支护结构（如木支架或圬工衬砌）修筑费工费时，不能满足机械化快速施工的需要；而且在很多情况下难以保证其支护作用的可靠性。

锚杆和喷射混凝土的出现给围岩支护技术的发展开辟了一条新的途径。

在矿山生产的实践中，人们很早就发现：巷道开挖后可以在周壁钻凿岩孔，然后在岩孔中灌上水泥砂浆并插入一根钢筋，当砂浆凝结硬化后钢筋便锚固在围岩中；借助于这种

锚固在围岩中的钢筋能够有效地控制围岩的变形，防止坍塌。这种插入岩孔，锚固在围岩中从而对围岩起到支护作用的钢筋就被称为“锚杆”(Rock bolt)。

目前，锚杆已在各种不同的地下工程中得到了广泛的采用。与此同时，为了适应不同的使用条件，锚杆本身的结构形式和安装工艺亦日趋丰富和完善。

除去靠水泥砂浆(或用树脂)将杆体锚固在围岩中的“胶结型”锚杆外，还有靠杆端的一个锚头装置将杆体锚固在围岩中的“机械锚固式”锚杆。锚杆杆体除采用钢筋外，尚可采用钢丝绳、钢绞线等。为了增强锚杆的支护能力，在安装锚杆时，还可对杆体施加一定的预应力，使之成为“预应力锚杆”。

喷射混凝土是指用喷射方法制备的混凝土。一般是将砂石集料、水泥和水泥速凝剂等材料拌和在一起，借助于混凝土喷射机使拌和物在压缩空气的作用下，通过软管输送到喷咀处。然后，在喷咀处加水混合并形成料束，以高速喷敷在岩面上，即可形成喷射混凝土层，用以支护围岩。

喷射混凝土工艺将混凝土的搅拌、输送、浇捣等工序结合在一起，并且无须使用模板。这就大大地简化了施工过程，省工，省料。与模注混凝土相比，优越性是十分明显的。

同时，这种直接喷敷在岩面上的喷射混凝土层施作及时并紧贴岩面。因此，虽然它的厚度一般较模注混凝土衬砌为薄，但它用来支护围岩在很多情况下往往比一些传统的支护形式更为有效可靠。

锚杆和喷射混凝土这两种支护手段经常相互配合，相互补充，联合使用。这就大大地增强了它们对围岩的支护能力，可以适应多种围岩条件。锚杆和喷射混凝土的配合使用在地下工程中产生了一种新型的支护形式即“锚杆-喷射混凝土支护”，通常简称“喷锚支护”。

喷锚支护的出现是地下工程围岩支护技术的一个重要发展，它引起了地下工程设计、施工技术方面的一系列改革。

目前，在我国各种不同类型的地下工程中大量地采用了喷锚支护。这引起了人们深入地思考两个问题：一是这种支护的作用究竟是否有效可靠，二是如何更科学地使用它，设计它。

关于喷锚支护的有效可靠问题，对现有工程的调查、观测结果证明了不论是小跨度的矿山巷道，还是跨度20米以上的大型洞室；不论是作为施工中的临时支护，还是作为永久支护；不论是在山体“静荷载”的作用下，还是在震动、爆破等“动荷载”的作用下，喷锚支护都能有效可靠地发挥其作用，在某些方面还具有比旧式支护（如模注混凝土衬砌或木支架）更强的支护能力，能解决一些旧式支护难以解决的问题（例如可以用喷射混凝土处理坍方；用大型预应力锚索与喷射混凝土配合支护大跨度洞室等）。

喷锚支护的推广使我们积累了关于这种支护形式有效性和可靠性的感性认识，但是，我们的认识还有待于深化：喷锚支护为什么能有效、可靠地支护围岩？薄薄的一层喷射混凝土（或加上一些锚杆）为什么就能代替原来那么厚的模注混凝土或钢筋混凝土衬砌？这就要求我们把对喷锚支护的认识提高到理性阶段，对这种支护的作用原理有较为透彻的了解。

长期以来，在地下工程的设计中一般认为支护结构物应当承受围岩“坍落拱”范围内全部岩石的重量所引起的荷载。所谓“坍落拱”乃是洞室开挖后在不加支护的情况下围岩可能坍塌的范围。这种坍塌的范围大小显然与支护结构物本身无关。因此，这种概念实质上是认为支护结构物对于控制围岩的变形松散和坍塌是不起作用的。支护的作用仅仅在于“消极地”将洞室开挖后可能坍塌下来的全部岩块支承起

来，使之不落入洞内。

工程实践表明，即使是对于传统的旧式支护，这种概念也很难反映围岩同支护结构物间的相互关系和支护结构物的真实工作状态。至于锚杆和喷射混凝土，它和围岩紧密结合在一起，是在同围岩共同变形的过程中及时、有效地控制围岩的变形和松散，防止坍塌，发挥围岩的自承能力，从而保持围岩稳定性的。在这一点上，它和一些传统的旧式支护结构有很大区别。因此，不能把它看成是一种“消极地”承受可能坍落下来的岩块重量的结构物。在认识喷锚支护对围岩的作用时，应着眼于洞室开挖后围岩力学形态的变化过程和破坏机理而不是局限于围岩在不加支护情况下可能坍塌下来的重量这一点上。

不同的地质条件下的各种地下工程，其围岩的变形和破坏呈现着不同的形态，喷锚支护也相应以不同的方式和特点对其起到支护作用。因此，在分析喷锚支护的作用特点时，必须从具体围岩的变形、破坏和稳定性出发，来进行分析。

为了进一步认识喷锚支护对围岩支护作用的实质，寻求合理、科学的设计计算方法，近年来在国内外都进行了一些试验研究和理论分析。我国很多单位针对这一问题曾进行过不少现场观察和仪表量测、加载试验和模拟试验。在此基础上提出的一些观点、理论和设计计算方法从各个不同的侧面揭示了喷锚支护对围岩的作用实质。

本书综合了国内外有关资料和我们近几年来在这方面所做的一些工作，从围岩自身的稳定性特点出发，对各类围岩条件下喷锚支护的作用原理进行一番讨论，并针对各类围岩条件介绍一些设计计算方法，以供参考。

本书在编写期间，承倪成禄工程师审校，在这里表示感谢。

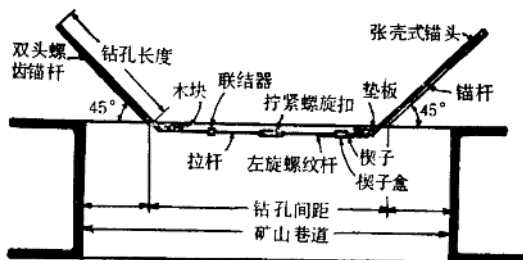
第二章 锚 杆

§ 2—1 锚杆在地下工程中的使用

锚杆是喷锚支护中的一个重要组成部分。有时在喷锚联合支护中锚杆起着主要作用。

锚杆除去与喷射混凝土联合使用外也可以单独使用。在隧道开挖的过程中用锚杆作为保证施工安全的临时支护是很方便的。在一些小跨度的矿山巷道，为了简化工序，节省材料，也常常单独用锚杆来支护。在这些情况下，为了防止两根锚杆之间岩块的掉落可辅以铁丝网、横梁、背板等。在矿山工程中国外曾采用过一种“顶板桁架”（roof truss）来支护巷道的顶板。所谓“顶板桁架”乃指在顶板安装两根呈倒八字形的倾斜方向的锚杆，将锚杆的外露部分用一根水平拉杆联结在一起，安设木楔块，然后通过拧紧螺旋扣将拉杆拉紧。这样，锚杆、拉杆、楔块和岩石组合在一起，形成一种类似桁架的结构，以支护地层。顶板桁架的结构形式及作用原理分别示于图 2—1 及图 2—2。

锚杆的种类很多，可根据具体工程对象、围岩条件和支



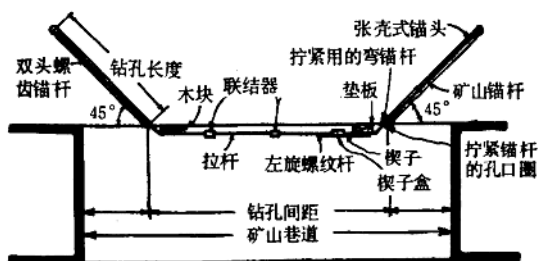


图 2—1 顶板桁架

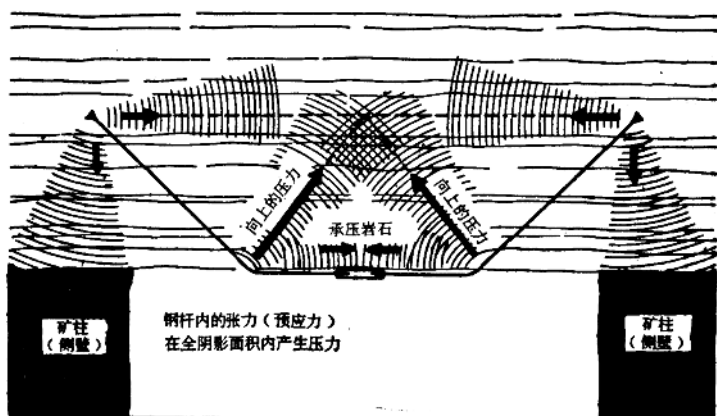


图 2—2 顶板桁架作用原理示意图

护要求加以选用。

按对围岩的作用方式，可把锚杆分为“点状锚固”及“沿全长锚固”两种。

一、点状锚固锚杆

各种类型的机械锚固的锚杆按其对围岩作用的方式而论均属于“点状锚固”锚杆。这类锚杆通过端部的锚头（或称“锚锁”）锚固在围岩中，在杆体另一端则由垫板同岩面接

触，并通过拧紧螺栓使垫板与岩面贴紧。

很明显，“点状锚固”的锚杆仅仅在两端同围岩联结在一起，当围岩变形时，锚杆的变形在锚头和垫板这两点上与之协调。在这种变形过程中，锚杆通过垫板对围岩提供一个集中的支护抗力，与此同时在锚头处也对岩体作用一相应集中力，从而对围岩产生支护作用。相应地，锚杆自身也在两端受到两个集中力的张拉。因此，在点状锚固锚杆的杆体中应力是均匀分布的（见图 2—3 a）。

点状锚固的锚杆按锚头形式的不同有楔缝式、涨壳式、倒楔式等。其中楔缝式锚头制作简单，锚固较为可靠，在工程中用得最多。

点状锚固的锚杆的特点是安装容易、工艺简单、安装后立即起到支护作用。缺点是由于在岩孔中杆体与岩壁间存在间隙，所以在地下水的作用下杆体容易锈蚀。而且，时间久了锚头容易滑动，特别是在软岩中，锚头的锚固是不可靠的。因此，这种类型的锚杆一般宜于用作施工中的临时支护或用于服务年限不太长的矿山巷道中。楔缝式锚杆的杆体除用圆钢（或钢筋）加工外，也可采用硬杂木制作。

二、沿全长锚固的锚杆

各种类型的灌浆锚杆例如水泥砂浆锚杆、树脂锚杆*等按对围岩的作用方式而论均属“沿全长锚固”的锚杆。这种锚杆的特点是安装时必须在岩孔中灌浆，使杆体与孔壁间的空隙用水泥砂浆（或树脂等其他材料）填充，当其凝结、硬化后，杆体就“沿全长”锚固在围岩中。这种锚杆同围岩的联结通过灌浆材料硬化后所产生的岩壁与杆体之间的粘结力，

* 系指沿全长灌树脂的锚杆。有的树脂锚杆仅在锚头处灌有树脂，这种锚杆仍属“点状锚固”式锚杆。

因此一般无须用锚头和垫板，用一段钢筋作为杆体即可。但因水泥砂浆的凝结、硬化需要一定时间，故采用水泥砂浆锚杆兼作临时支护或需对锚杆施加预应力时，杆体常常仍做成带锚头和垫板的形式，采用“先锚后灌”的工艺安装锚杆。

沿全长锚固的灌浆锚杆与点状锚固锚杆相比，防止了杆体的锈蚀，锚固作用耐久可靠。同时由于这种锚杆沿全长同围岩结合在一起，当围岩变形时，锚杆的变形将沿全长与之协调。如果说点状锚固锚杆的安装相当于在围岩中的两点之间增加了一根拉杆（二力构件），那么沿全长锚固的锚杆的安装相当于在岩体中配置了一根沿全长与之结合在一起的钢筋。后者对围岩的支护显然更为有效。

兹举例说明之：如图 2—3 所示，围岩顶板中有一节理面，为了阻止顶板的离层安设了 2.5 米长的锚杆。当顶板在该节理面发生离层时锚杆受到张拉，同时对围岩产生作用力，防止离层的进一步发展。如果安装的是点状锚固的锚杆（如图 2—3 a），则离层时整根杆体都产生均匀拉伸，当离层位移 $\Delta = 1$ 毫米时，锚杆中产生的应变：

$$\varepsilon = \Delta / l = \frac{0.1}{250} = 0.4 \times 10^{-3}$$

锚杆中的应力：

$$\sigma = E\varepsilon = 2.1 \times 10^6 \times 0.4 \times 10^{-3} = 840 \text{ 公斤/厘米}^2$$

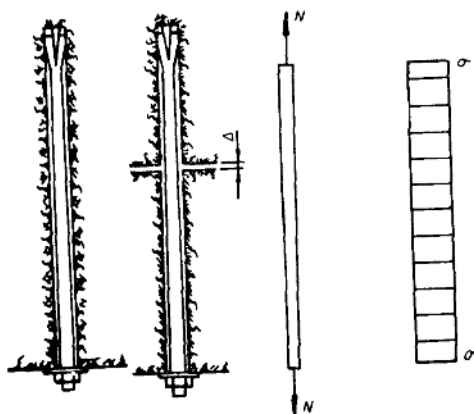
锚杆所提供的防止围岩离层的支护抗力：

$$F = \sigma s = 840 \times 3.14 = 2640 \text{ 公斤}$$

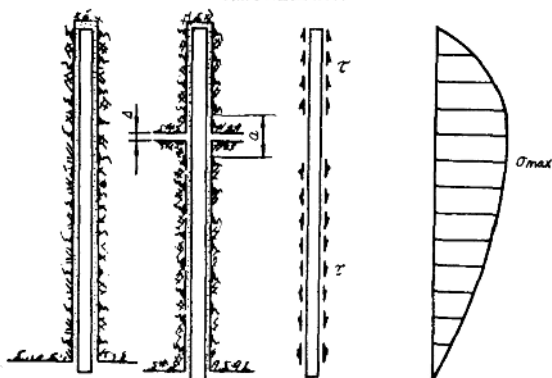
式中 F ——支护抗力；

s ——杆体截面积，取 $s = 3.14 \text{ 厘米}^2$ 。

若采用沿全长锚固的灌浆锚杆（如图 2—3 b），则顶板离层时杆体的变形主要集中在节理面附近处。该处由于离层时杆体的拉伸，有一部分砂浆粘结强度被破坏。假定粘结



a. 点状锚固锚杆



b. 沿全长锚固锚杆

图 2—3 防止顶板沿节理面离层时两种锚杆支护作用的对比

强度被破坏的长度 $a = 25$ 厘米，则当岩层产生离层位移 $\Delta = 1$ 毫米时，该处杆体中的应变为：

$$\varepsilon = \frac{0.1}{25} = 0.4 \times 10^{-2}$$

应力 $\sigma = E\varepsilon = 2.1 \times 10^6 \times 0.4 \times 10^{-2} = 8400$ 公斤/厘米²

锚杆所提供的支护抗力

$$F = \sigma s = 8.4 \times 10^3 \times 3.14 = 26400 \text{ 公斤}$$

从此例可见沿全长锚固的灌浆锚杆所提供的支护抗力比点状锚固锚杆大10倍。当然，沿全长锚固锚杆粘结强度被破坏的砂浆长度 a 是根据砂浆粘结强度的不同而变的，所以不能说沿全长锚固锚杆所提供的抗力正好是点状锚固锚杆的10倍。但可以肯定，沿全长锚固锚杆所提供的抗力比点状锚固的锚杆大得多。

此外，当围岩中各层岩体沿层面错动时，灌浆锚杆可以借杆体的抗剪能力阻止这种错动，尤如木结构中板销结合梁中的销子一样。而点状锚固的锚杆则由于杆体与岩孔壁之间有孔隙，因而杆体本身不能起到销子作用，只能依靠压紧层面增加层面的摩擦阻力来防止岩体沿层面的错动。

因此，同喷射混凝土联合使用，作为永久支护的锚杆一般都采用沿全长锚固的灌浆锚杆。

灌浆锚杆安装后要待灌浆材料凝结硬化，具有一定强度时才能起到支护作用。一般水泥砂浆的硬化需要一个较长的过程，而某些稳定性较差的围岩则往往要求在开挖后立即进行支护。为了解决这个问题，除可在水泥中掺加早强剂外，还可采用树脂作为灌浆材料。实践证明这种树脂锚杆使用方便，硬化迅速，尤其适用于软弱围岩。

除去各种类型的灌浆锚杆外，在我国的一些煤矿中还使用过一种压缩木锚杆。这种锚杆的杆体系将木材经过压缩后制成，端部有楔缝式锚头，在工厂制成后密封包装运至工地。安装后，杆体吸收大气中的水分后即产生膨胀，使之同岩孔壁贴紧。因之，这种锚杆从作用原理上看也属于沿全长锚固形式。

§ 2—2 灌 浆 锚 杆

灌浆材料为水泥砂浆的锚杆按其安装时灌浆方法的不同可分为“先灌后锚”和“先锚后灌”两种。

一、“先灌后锚”的灌浆锚杆

“先灌后锚”的锚杆的安装方法是钻孔以后首先用一个风动的灌浆器向岩孔中灌水泥砂浆,然后再插入锚杆。杆体可由16毫米到25毫米直径的钢筋做成。为了增加砂浆的粘结力可尽量选用螺纹钢筋。这种锚杆不带锚头,钻孔的直径应比杆体直径大15毫米左右(即使用25毫米直径的钢筋时选用40毫米左右的钻头),保证杆体周围有足够的砂浆保护层。砂浆的标号应不低于200~300公斤/厘米²。砂子的颗粒不宜大于3毫米。这种形式的灌浆锚杆构造简单,制作容易,使用方便,为矿山巷道及一些隧道工程所大量采用。但是,当锚杆较长时(大于2.0米),用这种方法灌浆则有困难。此时可采用“先锚后灌”的灌浆锚杆。

二、“先锚后灌”的灌浆锚杆

这种锚杆一般可带有一个楔缝式的锚头。钻孔后先利用楔缝式的锚头将锚杆安装在岩孔中,然后将孔口用一个密封垫堵住并插入注灌管和排气管,再用灰浆泵通过注浆管向岩孔中注浆,待砂浆凝结硬化后拆除密封垫即可。其构造如图2—4所示。

采用“先锚后灌”的锚杆时,孔口的密封垫的设计是个关键。密封垫必须结构简单,密封可靠,安装容易,拆除方便。一般可用快凝砂浆、橡胶等材料制成。图2—5所示为一种灌浆密封垫的构造。

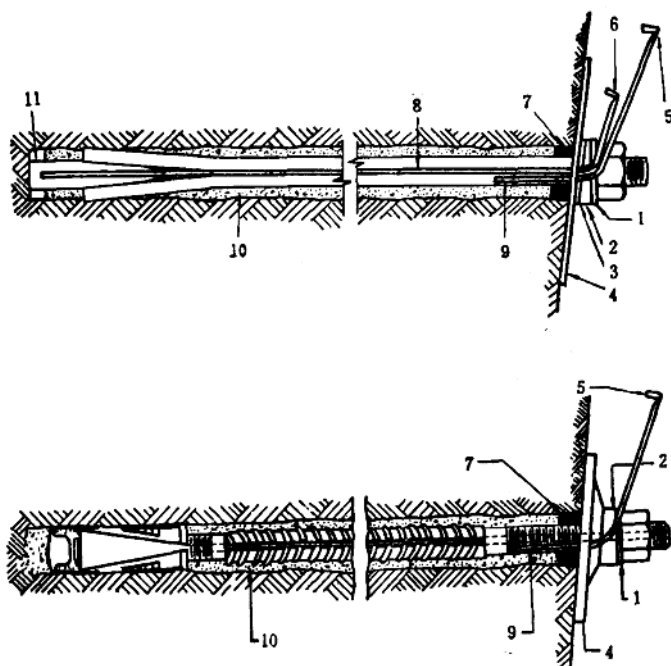


图 2—4 先锚后灌的锚杆构造图

1——拧紧垫板；2——结合垫板；3——加力垫板；4——承托垫板；5——灌浆管尾端；6——排气管尾端；7——塞子；8——排气管；9——灌浆管；10——砂浆；11——砂浆收缩后留下之空间。

图 2—6 为用真空灌浆法来进行锚杆灌浆。这种方法在往岩孔中压注砂浆时不是消极地通过排气管排出空气，而是主动地用一个真空泵将岩孔中的空气抽去，使岩孔中形成一定的真空，这样，排气管不必插到孔底，并能保证灌浆质量。

采用“先锚后灌”的灌浆工艺时，砂浆是用灰浆泵来压