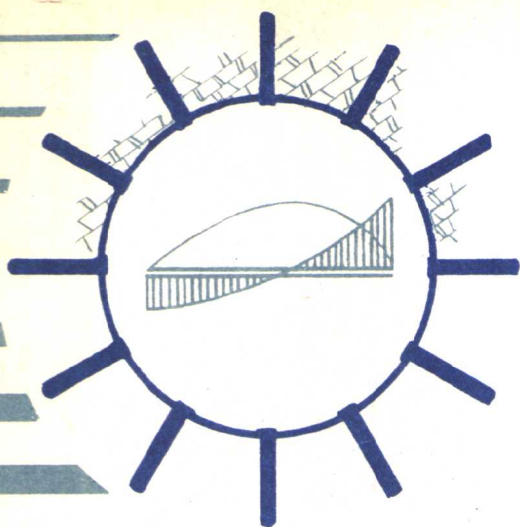


锚喷支护理论研究论文集

王明恕等著



东北工学院出版社

锚喷支护理论研究论文集

王明恕 等著

东北工学院出版社

锚喷支护理论论文集

王明恕 等著



东北工学院出版社出版 辽宁省新华书店发行
(沈阳 南湖) 沈阳市益华科技印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 8 字数: 199千字
1987年7月第1版 1987年7月第1次印刷
印数1~1500册

责任编辑: 车荫昌 封面设计: 赵殿泽

ISBN 7-81006-008-2/TD·1

统一书号: 15476·8 定价: 2.50元

前 言

锚喷支护在地下工程中已广泛应用，但是其理论还远落后于客观实际的要求。目前国内尚是以监测法或工程类比法进行设计和施工，严重影响锚喷支护技术的发展。本书汇集了作者和研究生近几年在各种刊物和学术会议上发表的论文共20篇，内容包括各类单根锚杆的工作机理；不同类型锚杆的适用条件；喷层和锚杆的联合作用；锚杆间距的理论计算和锚喷模拟试验方法等。其中一些重要观点曾引起同行们的热烈讨论，收集在一起的目的是为了便于和读者进一步讨论研究，去伪存真，以促进锚喷支护理论和实践的发展，企望读者和专家批评指正。

文集整理前，承蒙钱令希教授和于学馥教授对文章提出了宝贵意见和对中性点理论的肯定，这是对作者整理文集出版的鼓励，特向二位教授表示衷心感谢。

研究生许立珊协助本文集的描图和整理工作，在此一并表示感谢。

著者 1986年8月

ABA 15/02

目 录

全长锚固锚杆机理的探讨·····	王明恕 (1)
管缝式摩擦锚杆的设计原理·····	王明恕 (9)
地下洞室锚喷支护的锚杆设计·····	王明恕 (13)
全长锚固长短组合锚杆的联合作用·····	王明恕 (18)
全长锚固锚杆内力计算·····	王明恕 (22)
锚固大变形软岩的超塑型锚杆·····	王明恕 (29)
锚喷支护结构内力分析·····	王明恕 (34)
局部粘结锚杆内力计算·····	王明恕 (40)
锚喷支护锚杆的工作原理·····	王明恕 (45)
井巷工程锚喷支护锚杆设计·····	王明恕 (49)
锚喷支护的工作机理·····	王明恕 (54)
软岩复合支护结构·····	王明恕 (58)
地下工程围岩的积极作用·····	王明恕 (64)
全长锚固锚杆受力的数值分析及试验研究·····	胥志刚 王明恕 (68)
弹性岩体中全长锚固锚杆的计算·····	姜春旭 王明恕 刘之洋 (76)
全长锚固锚杆的工作原理·····	冯永恒 王明恕 (83)
考虑岩石流变的软岩巷道模拟试验研究·····	冯永恒 王明恕 (95)
全长锚固锚杆间距的理论探讨·····	胡永春 王明恕 (100)
全长锚固锚杆模拟试验研究·····	胡永春 王明恕 (106)
圆形巷道内全长粘结锚杆及端锚杆的数值模拟·····	冯永恒 王明恕 (110)

全长锚固锚杆机理的探讨

王 明 恕

在地下工程中,锚喷支护是一种经济有效的支护形式,它施工速度快,掘进断面小,能充分利用原岩承重,加固圈以外的岩体也因原始状态的连续性,不只是传给加固圈以荷载,也因变形协调,随着加固圈的变形过程,自身承受一定的荷载,所以锚喷支护比其它形式的支护所受的荷载小。但是全长锚固的锚杆锚固后,它内部应力大小、锚杆与孔壁的粘结剪应力分布规律、锚杆适合的控制变形量、锚杆长度与直径的关系等等,目前都没有理论计算公式,因而在一定程度上阻碍着锚喷支护的发展。本文对均质岩体中全长锚固锚杆的工作机理进行了探讨,并对锚杆设计给出理论计算方法。

一、锚喷支护的工作原理

一般认为锚杆的支护作用就是将分散的岩石组合成整体,成为承担着自重和作用在它上面的压力的一个岩石结构。这种概念只有对预应力锚杆是正确的,而对于全长锚固的非预应力锚杆来说是不够确切的。因为由锚杆组合成的岩石圈,不同于地面结构,地面结构是先建成以后再承受荷载,而锚杆组合成的岩石圈是在未锚固之前就已负满载。井巷开挖后,贮存在原岩内的弹性变形能会很快消失,所以在弹性状态的硬岩中施加非预应力锚杆,只能悬吊临界状态的岩块,基本上不能起组合作用。全长锚固的非预应力锚杆,主要用于变形大的软弱岩体中,以控制岩石的塑性变形。被控制变形量的大小由计算决定。若控制变形量过大,锚杆与孔壁间产生的剪应力超过粘结剂的抗剪强度时,岩石与锚杆发生滑动,岩块脱落,锚杆失去锚固作用。

锚杆控制变形量的大小,与锚杆长度有关。锚杆越长控制变形量越大,因此锚杆长度应根据粘结剂强度算得的允许控制变形量来决定。锚杆内力大小也与长度有关,锚杆直径可根据材料强度和内力大小计算,因此设计锚喷支护时,必须根据确定的控制变形量计算所需的锚杆尺寸。

二、全长锚固锚杆受力状态分析

全长锚固锚杆是靠锚杆与孔壁之间的粘结(包括摩擦)剪应力来阻止岩石向自由面变形的。剪应力大小与岩石和锚杆之间的相对位移成正比。锚杆锚固变形后,剪应力的大小和分布情况,目前还未研究清楚。有的资料^{1,2}把锚杆与孔壁之间的剪应力表示成指向同一个方向;有的文章³认为锚杆轴向应变与周围岩体同一方向的应变符号相同。这些都是不正确的,不符合锚固后静态锚杆的静力平衡关系。实际情况是靠近井巷的一段锚杆,因阻止围岩径向变形,锚杆表面产生指向围岩自由面的剪应力。其余一段锚杆因受该段的拉拔作用,锚杆表面的剪应力必指向岩体内部。指向相反的分界点,即为锚杆与孔壁岩石相对位移为零的中性点。此点剪应力为零。锚杆的轴向力在中性点处为最大,向两端逐渐减少为零。实测资料⁴⁻⁷(图1~4)说明,锚杆的最大轴向拉力在锚杆长度中间部分。因此,全长锚固的

三、锚杆内力计算

井筒或巷道开挖以后,围岩表面部分的弹性变形能很快消失,相继的变形随着围岩塑性区的扩展而发展,直至塑性圈能承受弹性区的挤压力时停止扩展。因此,开挖后处于瞬时临界稳定状态的围岩,并不一定能够保持长期稳定。全长锚固锚杆就是用来控制开挖后围岩的继续变形的。

围岩的径向变形值可用量测法测定,也可用理论计算。对于均质岩层,径向均匀荷载作用下的圆断面井筒或巷道可用下式计算,即

$$u_r = A \frac{1}{r} \quad (1)$$

式中, u_r ——围岩的径向变形值; r ——任意点的径向半径; A ——系数,对于塑性区 $A_1 = \frac{1+\mu}{E} R^2 (P \sin \varphi + C \cos \varphi)$, 对于弹性区, $A_2 = \frac{1+\mu}{E} R^2 (P - \sigma_R)$; P ——原岩应力; σ_R ——弹塑性界面处的径向应力; E, μ, C, φ ——岩石的弹性模量、泊松比、粘聚力、内摩擦角; R ——塑性区半径,

$$R = a \left[\frac{(P + C \operatorname{ctg} \varphi)}{C \operatorname{ctg} \varphi} (1 - \sin \varphi) \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (2)$$

a ——井筒(或巷道)荒半径。

式(1)中,当 $r = a$ 时,得围岩表面的径向位移为

$$u_a = A \frac{1}{a} \quad (3)$$

在弹塑性边界的径向位移为

$$u_R = A \frac{1}{R} \quad (4)$$

根据弹塑性边界处变形的连续条件,式(4)中 $A = A_1 = A_2$ 。

以上是围岩不支护时求得的理想塑性区,而实际弹塑性区是逐渐过渡的,围岩锚固后又在一定程度上影响塑性区深度的发展。

分析式(1)可以看出,围岩径向变形沿深度呈双曲线型变化,围岩表面变形最大,向岩体内部逐渐减小。在无限远处($r = \infty$)变形为零。

全长锚固的锚杆,可能有两种不同的锚固深度:①长度等于或小于塑性区;②长度大于塑性区,部分伸入弹性区内。但岩体的径向变形是连续的,下面分别加以讨论。

围岩锚固后,锚杆也随着围岩径向位移而移动。但由于沿深度各点的径向位移量不同,所以使锚杆与孔壁之间产生相对位移而引起粘结剪应力。剪应力的大小与相对位移成正比,以下式表示,

$$\tau_r = K(u_i - \delta_r), \quad (5)$$

式中, K ——剪移比例系数, kN/m^3 ;
 $u\tau$ ——岩石与锚杆的相对剪移变形量;
 $u_i = u_r - u_n$; u_n ——中性点处岩石的径向位移量; δ_r ——锚杆在 r 点的伸长量。

约束岩石变形的一段锚杆上, 产生指向自由面的剪应力; 另一段锚杆上的剪应力指向岩体内部。根据内力平衡关系(图5), 可求得剪应力为零的中性点。

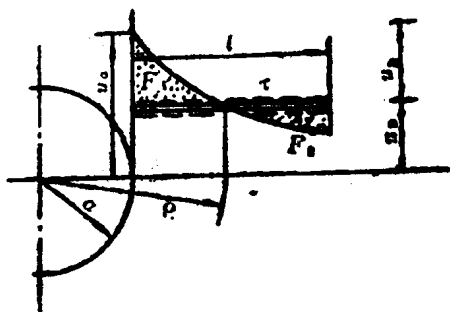


图5 锚杆受力简图

由于 $F_1 = F_2$, 故锚杆位于塑性区时

$$u_n l = \int_a^{l+a} A_1 \frac{1}{r} dr. \quad (6)$$

又知 $u_n = A_1 \frac{1}{\rho}$, 因此 $\frac{l}{\rho} = \int_a^{l+a} \frac{dr}{r} = \ln \frac{l+a}{a}$, 得

$$\rho = \frac{l}{\ln \frac{l+a}{a}} \quad (7)$$

当锚杆位于弹塑性区时

$$u_n l = \int_a^R A_1 \frac{dr}{r} + \int_R^{a+l} A_2 \frac{dr}{r}, \quad (8)$$

得

$$\rho = \frac{A_1 l}{A_1 \ln \frac{R}{a} + A_2 \ln \frac{a+l}{R}}, \quad (9)$$

式中, ρ ——中性点半径, l ——锚杆长度。

根据弹塑性边界变形的连续条件 $A = A_1 = A_2$, 所以式(9)与式(7)相同。

上式的推证中忽略了锚杆伸长对剪应力的影响。因为全长锚固锚杆, 主要适用于大变形的软岩中, 锚杆伸长量相对来说很小, 同时中性点两侧的影响又互相抵消一部分, 所以影响很小(2m长的钢杆, $\sigma = 200\text{MPa}$ 时, 变形 $\delta = 200 \times 200 / 2.1 \times 10^5 = 1.9\text{mm}$ 。锚杆内的应力不均匀, 且多低于 200MPa , 约束段长度也常小于2m), 因此完全能满足工程实用的要求。

根据以上假定, 锚杆的内力表达式为

$$N_r = \int_a^r \tau_r U dr_1 \quad (10)$$

式中, τ_{r1} ——锚杆周边任一 r_1 点处的剪应力; U ——锚杆周长。

最大轴向力为

$$N_{max} = \int_a^\rho \tau_r U dr \quad (11)$$

根据式(5)得

$$N_r = \int_a^r K(u_i - \delta_{r1}) U dr_1, \quad (12)$$

$$u_i = u_{r1} - u_n. \quad (13)$$

式(12)中锚杆伸长量 δ_{r1} 是轴向力 N_r 的函数, 为了简化, 可用迭代法进行计算, 即第一次取

$\delta_{r,1} = 0$ 计算 N_r 值, 再以 N_r 求算 δ_r 值, 得

$$\delta_r = \frac{N_r}{EF} (\rho - r) + \int_r^\rho \frac{U}{EF} (\rho - r) \tau_r dr, \quad (14)$$

再将 δ_r 代入式 (12) 第二次计算 N_r 值, 这样反复进行修正。

实际工程中, 岩体径向相对变形值 (u_i) 远大于锚杆伸长量 (δ_r), 为了简化计算, 可忽略锚杆变形的影响, 则式 (12) 为

$$N_r = \int_a^r \tau_{r,1} U dr_1 = \int_a^r KU (u_{r,1} - u_a) dr_1 = KUA \left[\ln \frac{r}{a} - \frac{r}{\rho} + \frac{a}{\rho} \right] \quad (15)$$

当 $r = \rho$ 时, 得锚杆的最大轴向力为

$$N_{max} = KUA \left[\ln \frac{\rho}{a} + \frac{a}{\rho} - 1 \right]. \quad (16)$$

锚杆长度不同 (其它条件相同) 时, 锚杆轴向力 N_r 和表面剪应力 τ_r 的变化规律见图 6。

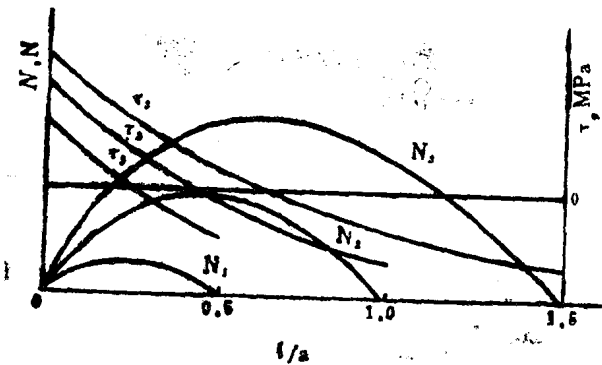


图 6 锚杆轴向力和剪应力分布规律

从图 6 可看出, 锚杆轴向力的增长比锚杆长度增长的快, 而剪应力的增长则比锚杆长度增长慢, 锚杆最大轴向力在中性点处, 最大剪应力在自由面处的锚杆端点。设计锚杆时最大拉应力不应超过锚杆材料的许可抗拉强度; 最大剪应力不应超过锚杆与孔壁的粘结抗剪强度。如果岩石较软 (变形较大), 而需要加固的厚度较大, 允许的控制变形量与所需的锚杆长度不能同时满足要求时, 可采用长短组合锚杆。其中, 短锚杆按抗剪强度算得的允许

控制变形量计算所需的长度和直径; 长锚杆按加固圈的厚度来设计所需要的锚杆尺寸。在长短锚杆重叠处, 长锚杆上的剪应力也不应超过锚杆与孔壁之间的粘结抗剪强度。

四、全长锚固锚杆的设计

以上讨论的锚杆受力基本原理和内力的计算方法, 可归纳为以下步骤:

几点假定

- ① 全长锚固锚杆, 主要用于大变形的软岩中, 设计时忽略锚杆伸长的影响;
- ② 锚杆位于均质的岩体中;
- ③ 锚杆任一点与孔壁之间不产生相对滑动;
- ④ 锚杆内最大拉应力不超过锚杆材料的允许抗拉强度。

设计步骤

- ① 利用式 (2) 计算塑性区半径 R ;
- ② 利用式 (3) 计算围岩最大径向变形量 u_a ;
- ③ 计算允许控制变形量 $[n_k]$, $[n_k] = \frac{[\tau]}{K}$;

④确定设计控制变形量 u_k , $u_k \leq (u_k)$;

⑤按下面表2计算锚杆长度 l ;

⑥计算锚杆直径 d , $d = \sqrt{\frac{4N_{max}}{\pi(\sigma)}}$;

⑦ 验算加固效果 (当量支护力 P_k)。

围岩自由状态时的塑性区半径如式 (2) 所示, 当受支护控制作用时, 塑性区半径为

$$R_k = a \left[\frac{(P + C \operatorname{ctg} \varphi)(1 - \sin \varphi)}{P_k + C \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (17)$$

围岩的径向变形与塑性区半径的平方成正比, 因而控制变形后与控制变形前的塑性区半径的关系为 $R_k = R \sqrt{\frac{u_a - u_k}{u_a}}$, 由式 (2) 和式 (17) 得

$$P_k = C \operatorname{ctg} \varphi \left[\frac{1}{\left(\frac{u_a - u_k}{u_a} \right)^{\frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 1} \right] \quad (18)$$

为设计使用方便, 按以上有关公式, 作成下列图表 (图7, 表1、2)。

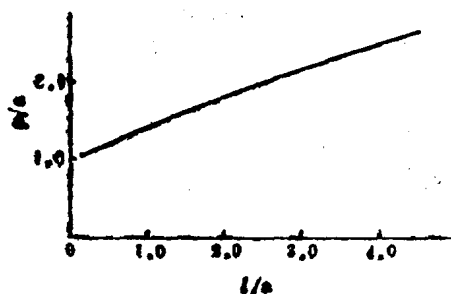


图7 锚杆长度与中性点半径的关系

表1 控制变形量 (u_k) 与中性点半径 (ρ) 的关系

$\frac{u_k}{u_a}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$
$\frac{u_k}{u_a}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{4}{5}$
$\frac{\rho}{a}$	3	2	$\frac{3}{2}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{5}{4}$

表2

锚杆长度 (l) 与中性点半径 (ρ) 的关系

$\frac{l}{a}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	1	$\frac{3}{2}$	2
$\frac{a+l}{a}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	2	$\frac{5}{2}$	3
$\ln \frac{a+l}{a}$	0.22314	0.28768	0.40547	0.51083	0.69315	0.91629	1.09861
$\frac{\rho}{l}$	4.48142	3.47606	2.46630	1.95762	1.44270	1.09136	0.91024
$\frac{\rho}{a}$	1.12036	1.15869	1.23315	1.30508	1.44270	1.63704	1.82048

例 已知岩石的 $C = 0.5 \text{ MPa}$, $\varphi = 40^\circ$, $\mu = 0.35$, $K = 1.5 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$, $E = 1.2 \times 10^3 \text{ MPa}$, 井筒荒半径 $a = 3.5 \text{ m}$, 锚杆允许抗拉强度 $[\sigma] = 170 \text{ MPa}$, 锚杆与岩石的粘结抗剪强度 $[\tau] = 2 \text{ MPa}$, 原岩应力 $P = 7 \text{ MPa}$, 设计锚杆尺寸。

解: ①按式 (2) 求塑性区半径 R

$$R = a \left[\frac{P + C \operatorname{ctg} \varphi}{C \operatorname{ctg} \varphi} (1 - \sin \varphi) \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}}$$

$$= 350 \left[\frac{7 + 0.5 \operatorname{ctg} 40^\circ}{0.5 \operatorname{ctg} 40^\circ} (1 - \sin 40^\circ) \right] \frac{1 - \sin 40^\circ}{2 \sin 40^\circ} = 533.3 \text{ cm}.$$

② 由式 (3) 计算最大变形量 u_a .

$$u_a = \frac{R^2 \sin \varphi (P + C \operatorname{ctg} \varphi) (1 + \mu)}{a E}$$

$$= \frac{533.3^2 \sin 40^\circ (7 + 0.5 \operatorname{ctg} 40^\circ) (1 + 0.35)}{1.2 \times 10^8 \times 350} = 4.5 \text{ cm}.$$

③ 计算允许控制变形量 $[u_K]$

$$[u_K] = \frac{[\tau]}{K} = \frac{2}{15} = 1.33.$$

④ 取设计控制变形量 $u_k = 1.0 \text{ cm} (u_k \leq [u_K])$.

⑤ 根据 $\frac{u_k}{u_a} = \frac{1}{4.5}$, 由表 1 查得 $\frac{\rho}{a} = \frac{31}{24}$, 又由表 2 查得 $l = 0.63557a = 222.4 \text{ cm}$.

⑥ 求锚杆直径 d

由式 (3) 知 $A = u_a a = 4.5 \times 350 = 1575 \text{ cm}$.

将 $N_{\max} = \frac{\pi d^2}{4} (\sigma)$ 代入式 (16) 求得

$$d = \frac{4KA}{[\sigma]} \left[\ln \frac{\rho}{a} + \frac{a}{\rho} - 1 \right] = \frac{4 \times 1.5 \times 1575}{170} \left(\ln \frac{31}{24} + \frac{24}{31} - 1 \right) = 1.675 \text{ cm}.$$

⑦ 验算锚固效果, 由式 (18) 得当量支护力 P_K 为

$$P_k = C \operatorname{ctg} \varphi \left[\frac{1}{\left(\frac{n_a - u_k}{u_a} \right) \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 1 \right] = 0.5 \operatorname{ctg} 40^\circ \left[\frac{1}{\left(\frac{3.5}{4.5} \right) \frac{\sin 40^\circ}{1 - \sin 40^\circ}} - 1 \right] = 0.34 \text{ MPa}$$

五、结 语

1. 全长锚固锚杆, 靠锚固后岩石变形才能起锚固作用。若锚固后岩石不变形, 或变形完了再锚固, 锚杆就不能发挥作用。所以它适用于塑性变形的软岩中, 而且必须在塑性变形完了之前锚固。

2. 设计全长锚固锚杆, 必须求得岩石的塑性极限变形值, 以及变形和时间的关系, 以便按设计的控制变形量在适当时间进行锚固。

3. 设计控制变形量不能超过允许控制变形量, 否则锚杆将与岩石滑脱而失掉锚固作用。

4. 全长锚固锚杆的中性点以外部分, 约束着岩石向自由面变形, 其余一段锚杆又将中性点以外被约束的岩石圈与其内部组合在一起, 共同支承着自重和它上面的压力。

5. 当要求的控制变形量较大, 超过按粘结剂强度算得的允许控制变形量时, 可采用长短成组的锚杆来满足所要求的控制变形量。

以上讨论, 对全长锚固锚杆受力状态的认识仅仅是开始, 为了充实完善计算理论, 必须进行试验研究, 积累资料, 以便推证的公式能在工程设计中普遍推广应用, 使锚喷支护理论得到进一步发展。

参 考 文 献

- 〔1〕 高磊等：矿山岩体力学，冶金工业出版社，1979，142页。
- 〔2〕 林韵梅等：地压讲座，煤炭工业出版社。1981。
- 〔3〕 王敦子：均匀岩体中全长粘结式非预应力锚杆长度的探讨，煤炭学报，1982年第1期，75—82页。
- 〔4〕 冶金部马鞍山矿山研究院：冶金部张家洼工程指挥部，张家洼矿区蚀变闪长岩巷道喷锚支护试验与应用总结，1982年。
- 〔5〕 陕西省水利水电勘测设计院：冯家山水库工程溢洪洞喷锚支护整体加载试验报告，1976年。
- 〔6〕 吉村恒等：东北新干线第一广谷地隧道，トンネルと地下，1980，№.6，7。
- 〔7〕 高山昭等：NATM（新奥法）（4），トンネルと地下，1981，№.4，74。
- 〔8〕 南昌有色冶金设计院：冶金矿山井巷设计参考资料，下册，冶金工业出版社，1977，118页。
- 〔9〕 史维汾：软弱岩层中孔洞围岩应力、应变、位移分析及喷锚支护的设计与计算，1981，（未发表）。

管缝式摩擦锚杆的设计原理

王明恕

管缝式锚杆是靠自身胀力与孔壁之间的摩擦阻止岩石的变形,它与全长粘结式锚杆约束岩石变形的工作原理一样。但在大变形岩层中,如果要求加固圈的厚度较大,用的锚杆较长,那么粘结式锚杆在岩帮处的端点,就有可能因变形过大而产生的剪应力,超过粘结剂的抗剪强度而滑脱,这时锚杆虽未全部失效,但岩帮已失掉稳定(掉块)。如果采用摩擦式锚杆,则锚杆孔壁与锚杆之间虽然产生滑移,但摩擦阻力仍然存在,还在起控制岩石变形的作用,不受设计控制变形量的限制,所以管缝摩擦式锚杆在大变形岩层中,比粘结式锚杆优越。现对其工作原理和设计计算方法讨论如下。

一、工 作 原 理

全长锚固的锚杆锚固以后,岩石若继续变形,它约束岩石变形而起锚固作用,所以全长锚固的锚杆,最适于控制变形地压。锚杆约束岩石变形的静力状态见图1。锚杆锚固完的一瞬间,岩石尚未变形时,锚杆中无应力。岩石变形后,锚杆周边与岩石之间产生约束变形的剪应力,自锚杆某一点,与剪应力方向相反地指向两端,该剪应力为零的0点称为中性点。此处的孔壁岩石与锚杆之间的相对剪移变形为零。在平巷的直线形侧帮上,中性点在锚杆长度的中点。在径向均匀受压的井筒或巷道里,中性点在偏向岩帮自由面的锚杆长度中点附近。其位置可由理论计算决定。而目前一些书籍^[1,2]和文献^[3],把锚杆周边的剪应力描绘成指向一个方向是错误的。施工现场用抗拔力来衡量锚杆的锚固效果,对全长锚固的锚杆来说也是不正确的^[4]。因此就影响了锚杆计算理论的发展。

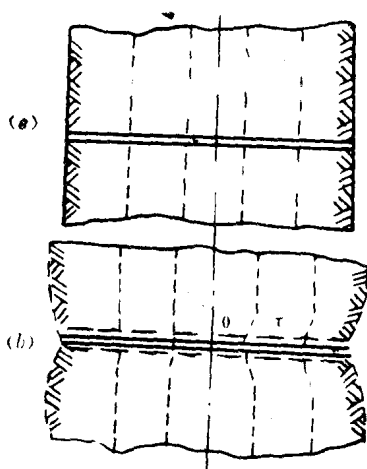


图1 岩石变形的静力状态

(a) — 锚固瞬间未变形 (b) — 锚固以后已变形

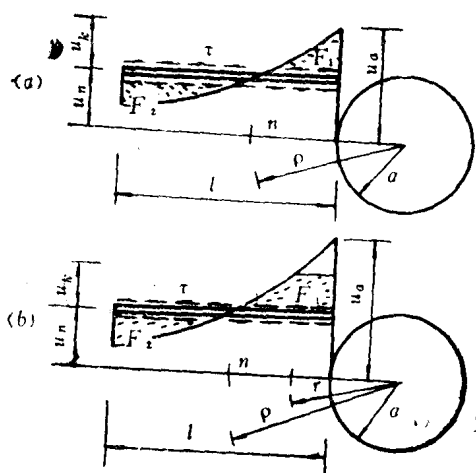


图2 全长锚固锚杆的计算简图

图2是径向均匀受压圆断面井筒(或巷道)全长锚固锚杆的计算简图。图2(a)所示围

岩变形不太大, 锚杆端围岩变形量不超过最大摩擦阻力时的变形量, 锚杆全长各点都未发生相互滑动。图2(b)所示是岩帮的最大变形量已经超过摩擦阻力能够约束的变形量, 锚杆端点部分的岩石已经与锚杆产生滑移, 但仍因摩擦阻力起约束作用。锚杆周边摩擦阻剪应力的 大小, 与相对剪移位移成正比, 以公式表示:

$$\tau = k u_i \quad (1)$$

式中 k —— 比例系数 (kN/m^3)

u_i —— 相对位移;

$$u_i = u_r - u_n \quad (2)$$

u_r —— 围岩 r 点的径向变形;

u_n —— 中性点的径向变形

$$u_r = A \frac{1}{r} \quad (3)$$

塑性区: $A_1 = \frac{1+\mu}{E} R^2 (P \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi)$

弹性区: $A_2 = \frac{1+\mu}{E} R^2 (P - \sigma_R)$

式中 P —— 原岩应力 (参见图3);

σ_R —— 弹塑性界面处的径向应力;

E, μ, c, φ —— 岩石的弹性模量、泊桑系数、粘聚力和内摩擦角;

R —— 塑性区半径 (参见图3);

$$R = a \left[\frac{(P + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)(1 - \sin \varphi)}{c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{\sin \varphi}} \quad (4)$$

a —— 井筒荒半径。

根据变形连续条件, 在弹塑性边界处, 弹性区的变形等于塑性区的变形, 即 $A_1 = A_2 = A$ 。

按静力平衡关系, 在图2(b)中, 必须

$$F_1 = F_2 \quad (5)$$

$$F_1 = (u_r - u_n)_{r=\rho} (\rho - a) + \int_r^\rho (u_r - u_n) dr \quad (6)$$

$$F_2 = \int_\rho^{l+a} (u_n - u_r) dr \quad (7)$$

又知, $u_r = A \frac{1}{r}$, $u_n = A \frac{1}{\rho}$, $u_a = A \frac{1}{a}$, 代入式 (6) 和式 (7) 中得:

$$F_1 = A \left[\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho} \right) (\rho - a) + \ln \frac{\rho}{r} + \frac{r}{\rho} - 1 \right] \quad (8)$$

$$F_2 = A \left[\frac{l+a}{\rho} - 1 - \ln \frac{l+a}{\rho} \right] \quad (9)$$

再代入式 (5) 中整理得:

$$\rho = \frac{l}{1 - \frac{a}{r} + \ln \frac{l+a}{r}} \quad (10)$$

当 $r=a$ 时 (即图2(a)) 得:

$$\rho = \frac{l}{\ln \frac{l+a}{a}} \quad (11)$$

即最大变形剪应力未超过控制变形的摩阻剪应力,孔壁岩石沿锚杆全长未产生滑脱现象。此公式也适于计算全长粘结式锚杆之用,但这时的最大剪应力不得超过粘结剂的抗剪强度。

分析式(10)可看出,其中 ρ 和 r 互为函数关系,当 r 确定以后,就得一确定的中性点半径 ρ 值。但是二者的条件解是唯一的。即最大摩阻剪应力为:

$$\tau = ku_i = k(u_r - u_n) = k \cdot A \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho} \right); \quad (12)$$

联立解式(10)和式(12),用试算法可得同时满足式(10)和式(12)的 r 和 ρ 值,于是得锚杆最大轴向拉力为:

$$\begin{aligned} N_{max} &= \int_{\rho}^{l+a} K U (u_n - u_r) dr \\ &= \int_{\rho}^{l+a} K U A \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r} \right) dr \\ &= K U A \left(\frac{l+a}{\rho} - \ln \frac{l+a}{\rho} - 1 \right) \end{aligned} \quad (13)$$

式中 l ——锚杆长度;
 U ——锚杆周长;
 a ——井筒荒半径;
 K ——剪移比例系数;
 A ——系数,与式(3)中相同。

锚杆轴力求得后,可根据锚杆材料的抗拉强度,计算所需锚杆的断面积。即:

$$F = \frac{N_{max}}{[\sigma]} \quad (14)$$

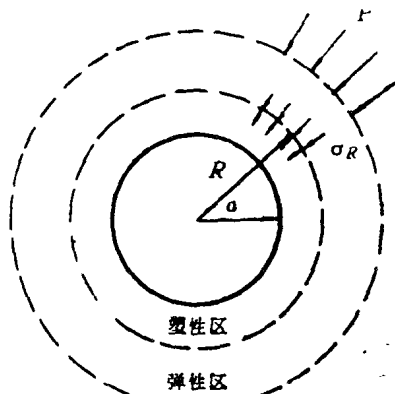


图3 井筒横截面

二、结 语

1. 全长摩擦式锚杆(与全长粘结式锚杆相比)的优点是不受控制变形量的约束,当变形产生的剪应力超过摩阻剪应力时,锚杆靠摩擦力仍可约束岩石的变形,因此锚杆长度不受限制。

2. 摩擦式锚杆的摩阻剪应力与锚杆的膨胀压力成正比,因此孔眼的成形率好坏直接影响锚固效果。当锚杆内部充填膨胀剂时,可提高锚杆的锚固效果。

3. 摩擦式锚杆锚固后立时生效,可紧跟掌子面进行。

4. 摩擦式锚杆的适应性广,不论岩石变形如何皆可应用。

参 考 资 料

- [1] 林韵梅等编著:地压讲座煤炭工业出版社,1981年
- [2] 高磊等编:矿山岩体力学,冶金工业出版社,1979年

-
- 〔8〕王敦子：均匀岩体中全长粘结式非预应力锚杆长度的探讨，煤炭学报，1982年1期 75～82页
- 〔4〕南昌有色冶金设计院编：冶金矿山井巷设计参考资料，冶金工业出版社 1977年 118页
- 〔5〕王明恕：全长锚固锚杆机理的探讨，煤炭学报，1983年1期 40～47页
- 〔6〕吴玉山：地下洞室的现场观测，岩土力学，1982年3卷1期 14页
- 〔7〕高山昭：NATM(15) トソネルと地下 1982年13卷4期 69页
- 〔8〕北京建筑研究院、湘东铁矿务局联合研制组：井下支护新发展—开缝式摩擦锚杆的研制与应用，矿山技术，1981年6期 31页