

论 小 直 径 管 缝 式 锚 杆

郑雨天 朱浮声
(东北大学)

摘要 本文在阐述管缝式锚杆的力学模型与基本公式的基础上,指出目前广泛采用的 $\varnothing 38\sim 45$ 的管缝式锚杆存在着结构参数不合理,耗钢量大,成本较高等问题。文章详细分析了使用小直径锚杆($\varnothing 29\sim 32\text{mm}$)的优越性,与通常使用的大直径锚杆相比,不仅节约钢材、降低成本,而且可以加快钻孔速度和提高锚固力。文章给出了小直径管缝式锚杆结构参数的计算公式和最佳参数,并指出推广应用尚待解决的工艺和设备问题。小直径管缝式锚杆的推广应用,将是我国矿山支护技术的一项重大改革。

关键词 锚杆 管缝式锚杆 小直径锚杆

前 言

管缝式锚杆自 80 年代初引入我国以来,由于它的优越性能,在短期内迅速在我国矿山推广,国内煤矿每年用量已超过 200 万套^[1]。近年来,在大量推广应用,人们对这类锚杆的特点有更深入的了解,它不仅锚固力稳定可靠,安装迅速方便,而且由于它属全长锚固型,具有恒阻性能,安装后立即承压,给围岩以横向与纵向预紧力,随着时间的推移而锚固力增长,因而有广泛的适应性,特别适用于松软、破碎、大变形的围岩和动压巷道之中。

当前,我国矿山广泛使用的管缝式锚杆外径 $\varnothing 40\sim 45\text{mm}$,壁厚 $2.2\sim 3.0\text{mm}$,相应的钻孔直径为 $\varnothing 38\sim 42\text{mm}$ 。根据测定,初锚力 $30\sim 60\text{kN}$,长时锚固力 $50\sim 80\text{kN}$,锚杆杆体抗拉断力 120kN 以上,其锚固力与抗拉能力不匹配,造成钢材浪费,成本稍高于钢筋水泥卷。为了充分发挥锚杆钢材的潜力,降低锚杆成本,国内外已开始试用 $\varnothing 29\sim 32\text{mm}$,壁厚 $1.8\sim 2.2\text{mm}$ 的小直径管缝式锚杆,相应钻孔直径 $\varnothing 27\sim 30\text{mm}$ 。1992年初,东化工学院支护新材料开发中心先后在平庄矿务局红庙煤矿和铁法矿务局晓明煤矿的回采巷道中试用由 $\varnothing 30\text{mm}$

的小直径管缝式锚杆组成的锚杆桁架,取得了良好效果。

理论分析和工业试验都证明,这种小直径管缝式锚杆与以往的大直径管缝式锚杆相比,节约了钢材,降低了成本,加快了钻孔速度,减少了能耗和钻具磨耗,更重要的是锚固力不仅不降低而且有所提高。

一、管缝式锚杆的力学模型与基本公式

管缝式锚杆的受力分析曾有详细论述^[2],本文为分析方便,将锚杆横截面的力学模型简化为:悬臂等截面圆弧杆,在截面平面内受载,

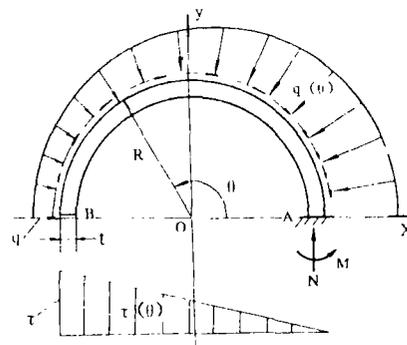


图 1 管缝式锚杆横截面力学模型

径向载荷和切向载荷均为线性分布,由于对称,仅取半圆弧,忽略管缝宽,如图1所示。

$$\text{假定: 切向剪力 } \tau(\theta) = \frac{\theta}{\pi} \tau \quad (1)$$

$$\text{径向压力 } q(\theta) = q[1 + \eta(1 - \frac{\theta}{\pi})] \quad (2)$$

式中 η ——压力分布系数,由内力平衡条件求得,其他符号见图1。

根据静力平衡条件:

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\int_0^{\pi} \tau(\theta) \sin \theta \cdot R d\theta - \int_0^{\pi} q(\theta) \cos \theta \cdot R d\theta = 0 \quad (3)$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$N - \int_0^{\pi} q(\theta) \sin \theta R d\theta - \int_0^{\pi} \tau(\theta) \cos \theta \cdot R d\theta = 0 \quad (4)$$

$$\Sigma M_0 = 0$$

$$M_A + \int_0^{\pi} \tau(\theta) R^2 - d\theta - NR = 0 \quad (5)$$

式中 R ——锚杆打入后平均半径。

将(1)、(2)式代入(3)式得 $\eta = \frac{\pi \tau}{2q}$, 代入(2)式得:

$$q(\theta) = q[1 + \frac{\pi \tau}{2q}(1 - \frac{\theta}{\pi})] = q + \frac{\tau}{2}(\pi - \theta) \quad (6)$$

(1)、(6)式代入(4)式得:

$$N = 2Rq + (\frac{\pi^2 - 4}{2\pi})\tau R \quad (7)$$

(1)、(6)、(7)式代入(5)式得:

$$M_A = 2(q - \frac{1}{\pi}\tau)R^2 \quad (8)$$

又知 $\tau = f \cdot q$, 摩擦系数 $f = 0.4$, 代入(7)、(8)式得:

$$N = 2.37qR, M_A = 1.75qR^2 \quad (9)$$

最大应力发生在支座A处,

$$\sigma_{\max} = \frac{M_A}{W} + \frac{N}{A} \quad (10)$$

式中 W ——截面系数, $W = \frac{1}{6}lt^2$;

A ——截面积, $A = lt$;

L ——锚杆有效长度;

t ——锚杆壁厚。

(9)式代入(10)式:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= 1.75qR^2 \frac{6}{lt^2} + 2.37qR \frac{1}{lt} \\ &= (10.5R^2 + 2.37Rt) \frac{q}{lt^2} \quad (11) \end{aligned}$$

管缝式锚杆是依靠钢材的弹性恢复力给围岩以压力,因此其最大应力应等于屈服极限 σ_s , 由(11)式即可得到B处的径向压力:

$$q = \frac{\sigma_s lt^2}{10.5R^2 + 2.37Rt} \quad (12)$$

锚杆单位长度上摩擦阻力应为:

$$F = f \left(\int_{-\pi}^{\pi} q(\theta) \cdot R d\theta \right) \quad (13)$$

将(6)式代入,并令 $f = 0.4$, 积分得:

$$F = 2Rqf \cdot (1.63\pi - 0.1\pi^2) = 3.3Rq \quad (14)$$

已经证明,全长锚固锚杆沿锚杆全长的锚固力分布存在中性点⁽³⁾,有托板和围岩大变形时中性点外移接近巷道表面⁽⁴⁾,如图2所示。对于管缝式锚杆的锚固力就是摩擦阻力,在极限状态下沿锚杆全长摩擦阻力均达到最大。因此,可用下式估算最大锚固力:

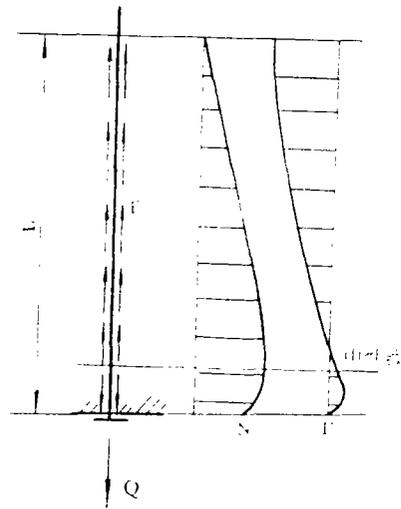


图2 有托板时轴力和锚固力分布图

$$Q = F \cdot l = 3.3Rql = \frac{3.36lt^2}{10.5R + 2.37t} \quad (15)$$

将我国常用的大直径锚杆参数代入(15)式,钢材为A3, $\sigma_s = 240\text{MPa}$, $l = 1600\text{mm}$, $t =$

2.5mm, R=20mm

$$Q=36.7\text{kN}$$

实测初锚力30~60kN,理论估算与实测初锚力相符。长期锚固力50~80kN,锚固力的增长是由于围岩错动,锚杆与围岩摩擦系数增加的结果。

二、大、小直径管缝式锚杆对比

根据以上理论公式,对大、小直径管缝式锚杆进行对比如下。

1. 锚固力:由(15)式可知,锚固力不仅取决于钢材质(σ_s)、锚杆管壁厚(t)、锚杆有效长度(l),而且与锚杆半径(R)大致成反比。令管壁厚为2.3mm,其他条件相同。外径为30mm的锚杆比外径为43mm的锚杆(安装后平均半径分别为13.5mm和19.5mm)的锚固力大1.43倍。

2. 钢材用量:锚杆的用量包括杆体、托板和挡箍,就杆体而言,用量与管径成正比。在同等壁厚条件下, $\varnothing 30\text{mm}$ 锚杆比 $\varnothing 43\text{mm}$ 锚杆杆体用量减少31%。在相同锚固力条件下,由(15)式可求得,与 $\varnothing 43\text{mm}$, $t=2.5\text{mm}$ 锚杆相同锚固力的 $\varnothing 30\text{mm}$ 锚杆,厚度可减为 $t=2.1\text{mm}$,因而减少用量42%。

3. 钻孔速度:钻孔速度 C 与钻孔直径 d 的关系为:

$$C = \frac{1}{d^n} \quad (16)$$

式中 n ——系数, $n=1.4\sim 1.9$ 。

$\varnothing 30\text{mm}$ 锚杆钻孔直径为 $\varnothing 28\text{mm}$, $\varnothing 43\text{mm}$ 锚杆钻孔直径为 $\varnothing 40\text{mm}$,两者相比,小直径锚杆钻孔速度提高1.65~1.97倍。

4. 钻具消耗与能耗: $\varnothing 43\text{mm}$ 锚杆配用B22六角中空钢钎, $\varnothing 30\text{mm}$ 锚杆配用B19六角中空钢钎,后者体积比前者减少24%。由于减小了钻孔直径,从而降低了钻孔冲击功,相应地也减少了钻头磨损与钻孔能耗,带来较好的经济效益。

5. 锚杆成本:当前推广使用管缝式锚杆的主要障碍是锚杆成本偏高,因此降低成本对于推广管缝式锚杆具有决定性意义。仅就钢材用量而言,锚杆成本60%来自杆体钢材用量,小

直径锚杆钢材用量比大直径减少31%~42%,因而成本可降低18.6%~25.2%,这样按市场价格,管缝式锚杆每套可降到10元以内,与树脂钢筋锚杆或水泥卷钢筋锚杆处同一水平。而其适应性和可靠性大为提高,损耗率大为降低。

此外,在钻具、能耗等方面,以及由于提高了工效而加快了支护速度等,都必然使巷道支护成本降低。

根据徐州矿务局1991年试验资料^[1],使用小直径锚杆比大直径锚杆,平均每米巷道节省钢材10.68kg,节约材料费用36.6%。

三、小直径管缝式锚杆结构参数

管缝式锚杆结构参数包括:锚杆直径、壁厚、长度、缝宽和管孔径差等。

合理的锚杆直径和壁厚应保证锚杆钢材的充分利用,即管截面的抗拉力应等于锚固力,而不应相差太大,即

$$p = Q \quad (17)$$

式中 p ——锚杆的抗拉力

$$p = 2\pi R\sigma_s \cdot t \quad (18)$$

将(15)、(18)式代入(17)式,得:

$$2\pi R\sigma_s t = \frac{3.36lt^2}{10.5R + 2.37t}$$

$$R = \frac{-2.37 + \sqrt{(2.37t)^2 + 22.1lt}}{2 \times 10.5} \quad (19)$$

锚杆合理外径:

$$d_1 = 2R + t + \Delta \quad (20)$$

式中 Δ ——锚杆外径与钻孔径之差,取2mm。

由(19)、(20)式可得到不同锚杆长度和壁厚条件下的合理锚杆外径 d_1 ,见表1。

合理的锚杆外径(mm) 表1

锚杆有效长度 (mm)	壁 厚 (mm)		
	2.0	2.3	2.5
1300	26.6	28.5	29.8
1500	28.3	30.4	31.7
1700	29.9	32.0	33.4
1900	31.4	33.6	35.1

由表1可见,在常用的锚杆长度1.6~1.8m

(有效长1.5~1.7m),和管壁厚2.3mm情况下,合理的管径应为30~32mm。

管缝式锚杆的最小缝宽和最小管孔径差应根据杆体在孔内围岩反力作用下最大的弹性位移量求出。

计算的力学模型如图1所示。由于 $t/R > 1/5$, 可按小曲率梁计算,因此在曲梁悬壁端 B 点上切向和径向位移分别是:

$$V = \int_0^\pi \frac{M(\theta)M_1^0(\theta)}{EI} R d\theta \quad (21)$$

$$W = \int_0^\pi \frac{M(\theta)M_2^0(\theta)}{EI} R d\theta \quad (22)$$

式中 $M(\theta)$ —— 载荷引起的弯矩;

$M_1^0(\theta)$, $M_2^0(\theta)$, —— 虚拟弯矩。

$$\begin{aligned} M(\theta) = & M^A - NR(1 - \cos\theta) \\ & + \int_0^\theta q(\theta)\sin(\theta - \varphi)R^2 d\varphi \\ & + \int_0^\theta \tau(\theta)[1 - \cos(\theta - \varphi)]R^2 d\varphi k \end{aligned} \quad (23)$$

$$M_1^0(\theta) = R[1 - \cos(\pi - \theta)] = R(1 + \cos\theta) \quad (24)$$

$$M_2^0(\theta) = R\sin(\pi - \theta) = R\sin\theta \quad (25)$$

将 (23)、(24) 式代入 (21) 式, (23)、(25) 式代入 (22) 式, 并应用 (1)、(6) 式, 令 $f = 0.4$, 得 B 点的位移为:

$$V = 5.35 \frac{qR^4}{EI} \quad (26)$$

$$W = 1.644 \frac{qR^4}{EI} \quad (27)$$

式中 E —— 钢材平面应变弹性模量:

$$E = \frac{E'}{1 - \nu^2} \quad (28)$$

E' —— 钢材弹性模量,

$$E' = 2.1 \times 10^5 \text{MPa};$$

ν —— 钢材泊松比, $\nu = 0.25$;

I —— 截面惯性矩。

$$I = \frac{1}{12} t^3 \quad (29)$$

将 (28)、(29) 和 (12) 式代入 (26)、(27) 式可得到不同 q 、 t 、 R 条件下的 V 和 W 。以 20MnSi 钢 $q = 340 \text{MPa}$, $t = 2.3$, $R = 13.5 \text{mm}$ 为例。

$$V = 0.7 \text{mm}, W = 0.22 \text{mm}$$

锚杆管缝宽度应大于两倍的 B 点切向位移 ($2V$), 孔管径差应大于 B 点的径向位移 (W)。由于锚杆在孔内截面轮廓并非圆形, 因此缝宽和孔管径差还应取大些。

实际选取时还应考虑钻孔时孔直径的误差。岩石愈软误差愈大, 冲击凿岩比旋转钻孔误差大, 因此常取缝宽 5~10mm, 孔管径差 1.5~3.0mm。

四、推广中的机具问题

随着小直径管缝式锚杆的推广使用, 必然带来钻孔机具的改革。当前, 国内普遍用于钻锚杆孔的钻机仍然是气腿凿岩机 (对于中硬以上岩石) 和手持式煤电钻 (对于煤和软岩), 与之配套的钎头、钎杆、钻头和麻花钻杆仍然是适用于大直径锚杆的。虽然国内已开始生产钻小直径的向上式液压钻机 MZ 型和 QYM 型系列, 以及支腿式 TYZ 型液压钻机, 但价格昂贵, 矿山尚缺乏维修能力。近年又生产了 MFC 和 ZQM 系列向上式小直径风动锚杆钻机, 但不能钻硬岩, 也不能钻倾角小于 60° 的钻孔, 安装锚杆还需另配凿岩机。电钻只能钻孔不能安装锚杆, 为安装锚杆尚须另备一路压风动力。此外, 小直径钻杆、钎杆、钻孔的钎头等的供应与产品质量方面都满足不了要求。

为了最大限度降低成本, 提高锚固力和工效, 锚杆直径的改革应一步到位, 即采用 $\varnothing 30 \text{mm}$ 管缝式锚杆。为此, 在钻孔和安装机具方面需解决以下问题:

1. 指定定点厂家加工生产小直径钻孔的钻具。

2. 研制轻型全方位小直径气腿凿岩机, 在研制成功以前, 先改制现有凿岩机的机头套筒, 使内孔适用 B19×108mm 针尾。

3. 研制电动冲击锤, 以便在使用电钻的工作面安装管缝式锚杆, 避免动力不单一。

此外, 为了减少掘进工作面机械设备, 简

化工序,还应研究和推广小直径炸药包和爆破技术。

参 考 文 献

- [1] 王继良主编, 矿井支护技术手册, 江苏科学技术出版社, 1991年, P515~172
 [2] 许建平, 缝管式锚杆受力分析与结构设计, 岩石力学在工程中的应用, 知识出版社, 1989年, P532~540

- [3] 王明恕, 锚喷支护理论论文集, 东北工学院出版社, 1987
 [4] 杨更社、何唐镛, 全长锚固锚杆的托板效应, 岩石力学与工程学报, 1991, VOL10 NO. 3, P203

(收稿日期 1992年7月30日)

作者简介: 郑雨天 东北大学教授

朱浮声 东北大学副教授

A NOTE ON THE FRICTION ANCHORED DOWEL WITH SMALLER DIAMETER

Zheng Yutian Zhu Fusheng

(Northeast University of Technology)

ABSTRACT

In this paper, the disadvantages of the common friction anchored dowel with 38~45mm diameter, such as the unreasonable parameters of its structure, a larger drain on steel material and higher cost, have been discussed based on the mechanical model and the analytical solutions of this type of bolt. Comparison with those disadvantages, the friction anchored dowel with smaller diameter (29~32mm) has appropriate advantages, such as saving steel material, cutting down cost, picking up the speed of drilling holes and increasing the anchorage of the bolts. The formulations for the structure parameter of a friction anchored dowel with smaller diameter have been developed, and the problems on the technological requirements and the equipments in application of the bolt, which should be solved, have been discussed carefully.

KEYWORDS: Bolt, Friction anchored dowel, Friction anchored dowel with smaller diameter

第四次全国采矿学术会议

全国采矿学术会议是我国矿业界最广泛、最具有权威性的学术活动。会议系由中国金属学会、中国煤炭学会、中国有色金属学会、中国化工学会、中国地质学会、中国黄金学会、中国硅酸盐学会、中国核学会、中国轻工协会联合举办。

第四次全国采矿学术会议由中国化工

学会牵头主办。

本次会议的主题是矿山效益与技术进步。分题是: 矿山技术改造; 矿业政策与管理; 矿山地质工作与资源保护; 矿山环境保护与土地复垦; 采矿新设备应用与发展; 采矿节能与降耗; 计算机技术在矿业方面的应用。