

锚注支护机理及参数优化研究

王以功¹, 林登阁¹, 柴天星²

(1. 山东科技大学, 泰安 271021; 2. 中条山有色公司工程公司, 恒曲 043700)

[摘要]对锚注支护机理进行了分析, 得出巷道锚注支护可改善锚杆、裂隙面及围岩的力学性能, 减小围岩塑性区及巷道位移, 提高围岩的稳定性。并运用正交设计方法对锚注支护参数进行优化, 确定了主要影响因素, 提出了可供参考的支护方案。

[关键词]锚注支护 支护机理 参数优化

[中图分类号]TU472 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2002)03-0084-03

1 巷道锚注支护机理

1.1 锚注支护提高了锚杆结构强度和锚固力

普通锚杆轴向受力和侧面剪应力过分集中于孔口端部, 当围岩发生较大变形时, 锚杆轴向力和侧面剪应力也随之增大, 易使锚杆与围岩之间发生剪切破坏或锚杆被拉断, 锚杆在轴向力或侧表面剪应力集中部位失去支承作用, 从而使这部分围岩因失去锚杆锚固支承而脱落。随着围岩变形的继续发展, 锚杆侧表面剪应力最大部位将不断向围岩深部转移, 最终导致锚杆全长丧失支承作用。究其原因, 普通锚杆失效主要是因为其强度和变形与围岩不相适应。锚注支护则克服这一缺陷, 锚注支护首先安设锚杆, 锚杆迅速提供锚固力, 限制围岩变形。待围岩变形达一定值时实施锚杆注浆, 以注浆提高锚杆自身强度, 改善其受力状态, 增加锚杆的锚固作用。

围岩变形迫使注浆锚杆轴向受拉应力作用和侧表面受剪应力作用, 根据锚杆钢管与其内部浆体的变形协调条件, 应用组合杆件受力原理可导出锚杆钢管和浆体轴向应力^[1]:

$$\sigma_g = \frac{E_g \cdot N}{E_g F_g + E_s F_s} \quad \sigma_s = \frac{E_s \cdot N}{E_g F_g + E_s F_s} \quad (1)$$

式中 σ_g 、 σ_s ——锚杆钢管、浆体的轴向应力;

E_g 、 E_s ——锚杆钢管、浆体的弹性模量;

F_g 、 F_s ——锚杆钢管、浆体的横截面积;

N ——注浆锚杆轴向拉力。

由于锚杆内部浆体凝固收缩而引起钢管受压和浆体受拉, 发生在钢管中的收缩压应力可以抵消一

部分围岩变形对钢管所产生的拉应力, 这有利于改善注浆锚杆的受力状态。

注浆锚杆初次受拉时处于弹性状态, 轴向拉力直接由钢管和浆体共同承担, 二者变形较小, 浆体处于完整状态; 随着围岩变形的继续, 注浆锚杆所受轴向拉力越来越大, 由于钢管刚度比浆体小, 抗拉强度比浆体大, 当轴向拉力 N 一定时, 由(1)式知, $\sigma_g < \sigma_s$, 所以浆体首先进入弹塑性状态, 出现浆体微裂隙。随着时间的增长, 围岩变形量增加, 注浆锚杆的轴向拉力继续增加, 导致浆体因微裂隙扩张而受拉破坏, 此时注浆锚杆的轴向力全部转移到钢管上由钢管承担。但是, 由于钢管的横向收缩变形, 又增大了管壁作用于浆体上的侧向力, 迫使浆体与钢管又一次共同承担轴向拉力, 从而增大了钢管的变形阻力, 提高了注浆锚杆的结构强度和锚固力。

1.2 锚注支护提高了裂隙面变形刚度和抗剪强度

裂隙面的变形特征可由法向刚度 K_n 和切向刚度 K_s 表示^[2]:

$$K_n = (K_{n0} + \delta/m)^2 \cdot K_{n0} \\ K_s = K_{s0} \left(1 - \frac{\tau}{c + f\delta}\right)^2 \quad (2)$$

式中 δ 、 τ ——裂隙面的正应力、剪应力;

K_{n0} 、 K_{s0} ——裂隙面的初始法向刚度、切向刚度;

c 、 f ——裂隙面的内聚力、内摩擦系数;

m ——试验常数。

由莫尔—库仑理论知, 裂隙面的正应力 δ 与最大剪应力 τ_{max} 有下列关系式:

$$\tau_m = c + f\delta \quad (3)$$

[收稿日期]2001-07-26; [修订日期]2002-02-01; [责任编辑]李石梦。

[第一作者简介]王以功(1962年-),男,1982年毕业于山东矿业学院,副教授,现主要从事矿井建设与采矿工程的教学与科研工作。

根据二滩堤坝注浆试验资料得出注浆前后裂隙的初始刚度 K_{so} 、切向刚度 K_s 及最大剪应力为:

注浆前:

$$K_{soq} = 450\sigma^{0.64}$$

$$K_{sq} = 450\sigma^{0.64} \left(1 - \frac{\tau}{1.2 + 0.6\sigma}\right)^2$$

$$\tau_{mq} = 1.2 + 0.6\sigma$$

注浆后:

$$K_{soh} = 1700\sigma^{0.78}$$

$$K_{sh} = 1700\sigma^{0.78} \left(1 - \frac{\tau}{1.8 + 0.7\sigma}\right)^2$$

$$\tau_{mh} = 1.8 + 0.7\sigma$$

注浆后裂隙面初始切向刚度提高了 $(3.78\sigma^{0.14} - 1)$ 倍,抗剪强度提高了 $(0.6 + 0.1\sigma)$ 。

由上述分析知,注浆后裂隙面的刚度和抗剪强度明显提高。注浆后裂隙面的刚度和强度等力学性能的改善可极大地提高围岩的整体承载能力。

1.3 锚注支护使巷道围岩物理力学性能得到明显改善

工程实践表明^①:锚注支护使巷道围岩物理力学性能得到明显改善(表1)。

表1 锚注加固前后围岩物理力学性能参数测试结果

名称	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 ($\times 10^4$ MPa)	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (ϕ)	泊松比 (μ)	容重 (t/m^3)	取芯率 (%)
中粒砂岩	54.2	3.01	4.00	2.0	30	0.18	2.58	53
泥岩	注浆前	33.7	1.21	1.05	0.4	25.4	0.28	41
	注浆后	49.2	1.83	1.37	1.0	31.5	0.22	69
铝质泥岩	注浆前	42.8	1.39	0.95	0.45	28.3	0.25	46
	注浆后	51.7	2.04	1.25	1.12	34.7	0.20	76
紫斑泥岩	注浆前	38.7	1.24	1.10	0.6	26.7	0.27	49
	注浆后	60.4	2.52	1.53	1.5	32.9	0.21	84

1)现场岩样钻取表明,锚注加固后,岩芯裂隙被水泥浆液充填,岩芯完整性较好,其围岩取芯率由41%~49%增加到69%~84%。

2)锚注加固后,巷道围岩中不同岩性的物理力学性能均得到不同程度的改善。由表1知,单轴抗压强度由33.7~42.8 MPa增加到49.2~60.4 MPa;抗拉强度由1.21~1.39 MPa增加到1.83~2.52 MPa;弹性模量由 $(0.95 \sim 1.10) \times 10^4$ MPa增加到 $(1.25 \sim 1.53) \times 10^4$ MPa;内聚力由0.4~0.6 MPa增加到1.0~1.5 MPa,提高66%~275%;内摩擦角由25.4°~26.7°增加到31.5°~34.7°;泊松比由0.25~0.28降低到0.20~0.22。

2 锚注支护参数优化

锚注支护的影响因素较多,各因素对锚注支护效果的影响程度不尽一致。这里采用正交设计方法对各影响因素对支护效果的作用进行分析,以确定出最优的支护参数。

2.1 正交设计方案的确定

本设计主要考虑注浆锚杆的初锚力、间排距、锚杆长度和浆液扩散半径等四个因素,各因素取4个水平进行正交设计(表2)。

根据选定的因素水平表,选用 $L_{16}(4^4)$ 正交表,则试验方案为四水平表(表3)。

表2 正交设计因素水平表

水平	初锚力 N/kN	间排距 W/m × m	锚杆长度 L/m	浆液扩散半径 R/m
1	10	0.6 × 0.6	1.8	0.6
2	20	0.8 × 0.8	2.0	0.9
3	25	1.0 × 1.0	2.4	1.2
4	35	1.2 × 1.2	2.8	1.5

表3 试验方案表

水平	A(N)	B(空)	C(W)	D(L)	E(R)
1	1(10)	1	1(0.6 × 0.6)	1(1.8)	1(0.6)
2	1(10)	2	2(0.8 × 0.8)	2(2.0)	2(0.9)
3	1(10)	3	3(1.0 × 1.0)	3(2.4)	3(1.2)
4	1(10)	4	4(1.2 × 1.2)	4(2.8)	4(1.5)
5	2(20)	1	2(0.8 × 0.8)	3(2.4)	4(1.5)
6	2(20)	2	1(0.6 × 0.6)	4(2.8)	3(1.2)
7	2(20)	3	4(1.2 × 1.2)	1(1.8)	2(0.9)
8	2(20)	4	3(1.0 × 1.0)	2(2.0)	1(0.6)
9	3(25)	1	3(1.0 × 1.0)	4(2.8)	2(0.9)
10	3(25)	2	4(1.2 × 1.2)	3(2.4)	1(0.6)
11	3(25)	3	1(0.6 × 0.6)	2(2.0)	4(1.5)
12	3(25)	4	2(0.8 × 0.8)	1(1.8)	3(1.2)
13	4(35)	1	4(1.2 × 1.2)	2(2.0)	3(1.2)
14	4(35)	2	3(1.0 × 1.0)	1(1.8)	4(1.5)
15	4(35)	3	2(0.8 × 0.8)	4(2.8)	1(0.6)
16	4(35)	4	1(0.6 × 0.6)	3(2.4)	2(0.9)

① 山东科技大学.大构造应力区域软岩巷道支护技术研究与应用鉴定材料,1999。

2.2 方案评价指标

通常认为巷道周边位移及主应力越小锚注支护效果越好,故选巷道 X、Y 方向最大相对位移 X_d 、 Y_d 以及周边最大主应力 σ_{\max} 为评价指标。显然,指标小者为优。

2.3 试验方案分析

应用 FLAC 软件对正交设计各方案进行数值模拟计算,以求出各方案的评价指标,并计算每一因素在不同水平条件下的平均收率 I_j 、 II_j 、 III_j 、 IV_j 及极差 R_j 。计算结果如表 4。

表 4 锚注支护正交试验结果分析表

指 标	因 素	X_d (mm)				Y_d (mm)				σ_{\max} (MPa)			
		A	C	D	E	A	C	D	E	A	C	D	E
平均收率	I_j	100.25	81.17	134.73	118.5	69.42	55.88	86.28	73.74	17.69	14.53	17.82	19.41
	II_j	103.90	82.86	103.91	107.99	66.21	62.88	73.40	74.58	17.53	15.92	16.90	17.05
	III_j	81.22	88.25	63.68	73.02	64.53	69.23	51.19	63.56	16.21	17.24	16.18	16.86
	IV_j	79.27	108.36	58.33	61.07	61.80	73.99	51.12	50.11	14.74	18.46	15.30	12.84
极差	R_j	24.63	27.19	76.40	57.43	7.6	18.11	35.16	24.27	2.95	3.93	2.52	6.57

试验方案的评价标准是:对某一指标同一因素的各水平平均收率对指标的影响程度越小越好,而各因素极差对指标影响的显著程度则是极差越大越显著。对于指标 X_d ,由 $I_A > II_A > III_A > IV_A$ 知,A 因素 IV 水平对指标 X_d 为优;同理,C 因素 I 水平、D 因素 IV 水平、E 因素 IV 水平均对指标 X_d 为优,因此由指标 X_d 确定的优化方案为 $A_4C_1D_4E_4$ 。对指标 Y_d 、 σ_{\max} ,不难看出,其优化方案亦为 $A_4C_1D_4E_4$ 。

对各指标下的因素显著性,由极差大小可知,指标 X_d 的各因素显著性为 $D > E > C > A$,指标 Y_d 为 $D > E > C > A$,指标 σ_{\max} 为 $E > C > A > D$ 。因此可见,D、E 两因素对指标 X_d 、 Y_d 影响显著,E 因素对指标 σ_{\max} 影响显著,而因素 A 对各指标的影响显著性最差,因素 C 次之。即锚杆长度是决定锚注支护效果的关键因素,其次是浆液扩散半径,而锚杆初锚力与间排距对锚注效果影响不大,在工程应用中可选用较大的初锚力和适当的锚杆间排距。

3 结 论

1) 由锚注支护机理知,注浆可改善锚杆的受力状态,提高锚杆自身的刚度和强度,改善巷道围岩的物理力学性能。

2) 锚注支护工程测试表明,锚注支护能明显提高围岩的承载能力,减小围岩塑性区范围和巷道位移,提高巷道围岩的稳定性。

3) 运用正交设计方法和数值模拟计算手段优化锚注支护参数,既可省时、省力,又能比较直观地对比支护效果,分析支护参数,进而优化支护参数。

[参考文献]

- [1] 王纯祥. 巷道锚注固液耦合模型研究及加固效应分析[D]. 山东科技大学硕士学位论文,2000.
- [2] 周维垣,等. 二滩坝坝基弱风化岩体灌浆加固效果研究[J]. 岩石力学与工程学报,1996(2).

RESEARCH OF BOLT - GROUTING SUPPORTING MECHANISM AND PARAMETER OPTIMIZATION

WANG Yi - gong¹, LIN Deng - ge¹, CHAI Tian - xing²

(1. Shandong University of Science and Technology, Taian 271019;

2. Zhongtiaoshan Non - ferrous Metal Engineering Company, Huanqu 043700)

Abstract: The bolt - grouting supporting mechanisms are discussed. Conclusions can be drawn as follows: bolt - grouting supporting improves mechanic properties of blot, fracture and wallrocks, diminishes wallrock plastic zone and drift displacement, and increases wallrock stability. Using FLAC Program to compute the support schemes which are designed with orthogonal method, the parameter of bolt - grouting supporting are optimized and major affecting factors are defined. At last, the bolt - grouting supporting scheme is supported.

Key words: bolt - grouting supporting, supporting mechanism, parameter optimization