

软岩巷道桁架锚索支护参数优化

武剑,冯涛,余伟健,马平原,李瑞豪

(湖南科技大学 能源与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为了合理确定软岩巷道桁架锚索支护参数设计,通过理论分析,FLAC^{3D}数值模拟和SPSS 差分析正交试验等方法,结合木孔煤矿实际地质环境,对软岩巷道的预应力桁架锚索支护参数进行优化分析,使桁架锚索组合支护能力充分发挥,避免支护材料浪费和支护成本偏高,现场观测结果显示:两帮水平位移最大值为260 mm,顶板最大下沉量为163 mm,巷道围岩的收敛率在有效控制范围内,预应力桁架锚索支护对提高巷道围岩的整体稳定性有良好效果。

关键词:数值模拟;正交试验;桁架锚索;参数设计

中图分类号:TD353.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2014)03-0011-05

On optimization of support parameters of truss and anchor rope in soft rock roadway

WU Jian, FENG Tao, YU Weijian, MA Pingyuan, LI Ruihao

(School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to determine the reasonable design of truss and anchor rope parameters in soft rock roadway, this paper, based on the theoretical analysis, the FLAC^{3D} numerical simulation and the SPSS orthogonal experiment method, together with the practical Mukong Coal Mine geological environment, has optimized the prestressed truss and anchor rope in soft rock roadway support parameter, which can give a full play to truss anchor cable combined supporting ability and avoid supporting material waste and the high cost of supporting. Field observations indicate that the largest value of the two sides moving closer is 145 mm. The roof subsidence maximum is 166 mm. Roadway surrounding rock convergence rate is within the valid range. Support of truss and anchor rope can improve the overall stability of roadway surrounding rock with good results.

Key words: numerical simulation; orthogonal experiment; truss and anchor rope; parameter design

由于多年的开采,煤矿浅部易开采的煤炭资源日益减少,转向开采深部煤炭资源,随着开采深度的增加,巷道围岩表现出了非线性大变形、大地压、难支护以及巷道围岩变形速度快、塑形变形增大等特征^[1-3]。软岩巷道支护问题制约了煤炭高产高效以及矿井的安全生产。预应力桁架锚索是将处于受压状态的巷道两肩窝深部岩体作为锚固点,专用张拉机具通过桁架连接器将高强度的预应力钢绞线锁紧,并传递张拉力,实现对顶板浅部围岩的兜护和对顶板结构的加固,控制顶板的离层、防止顶板加固区

整体垮冒^[4,5]。它由预应力桁架连接器、高强度钢绞线、锚具等组成^[6]。是一种能在巷道顶板的铅直和水平方向同时提供挤压应力,改善顶板受力状态,形成锚索桁架主动支护结构^[7]。但桁架锚索支护仍然存在以下几点问题:(1)锚索的长度和直径对锚索桁架支护系统的影响;(2)在不同的煤矿地质环境中,桁架锚索支护中的锚索安装角度和整体支护的关系如何;(3)锚索预应力对支护效果的影响;(4)桁架锚索孔口与帮部距离的影响。本文通过计算机数值

模拟和正交试验将针对上述桁架锚索支护参数的确定和优化进行相应的研究^[8].

1 工程概况

木孔煤矿 1301 工作面运输顺槽(运输巷)起于 +700 m 进风石门,止于 1301 综采工作面切眼. 1301 综采工作面南面靠小桥煤矿边界. 该巷道从 +700 m 进风石门起至工作面切眼按照设计方位角 N66°E,长度 647 m,沿着煤层掘进. 该巷主要为

1301 综采工作面回采期间的运输,进风等所用,服务年限为 1 a. 巷道位于木孔煤矿东井井田内,在安底(大顶坡)背斜与金沙向斜之间,煤层厚度最大为 2.87 m,最小为 0.27 m,平均为 1.35 m;煤层倾角 12°~18°,倾向北西. 局部含一层透镜状夹矸,结构简单,煤类单一,煤质变化中等. 煤层顶板岩石质量劣等,岩体完整性差,稳定性差. 表现出煤岩体强度低、易风化、松散破碎、遇水膨胀、易崩解等特性. 煤岩层综合柱状图如图 1 所示.

厚度 / m	柱状图	岩性描述
3.2~16.0		灰色薄至中厚层状细砂岩、粉砂质粘土岩,中上部含煤,煤层厚度 0.05~0.69 m,均不可采.
1.50		灰黑色砂质页岩,夹条带状泥质灰岩,下部含菱铁质结核,节理面呈白色.
1.35		3# 煤层,呈金属光泽,含少量黄铁矿结核,煤质较好.
0.40		灰白色粘土质泥岩.
3.00		灰黑色砂质页岩,下部含菱铁质结核.
1.50		4# 煤层,呈金属光泽,含少量黄铁矿结核,煤质较好.

图 1 煤层综合柱状图

运输巷道所在的地质条件复杂,巷道主要受地质构造应力影响,围岩属于高应力软岩,已掘进的巷道在原有支护条件下严重变形,并多次返修,支护效果依然不理想. 在原有支护条件下,实验巷道段变形曲线如图 2 所示. 其顶板最大变形量超过了 1.1 m,且变形速度没有停止的趋势.

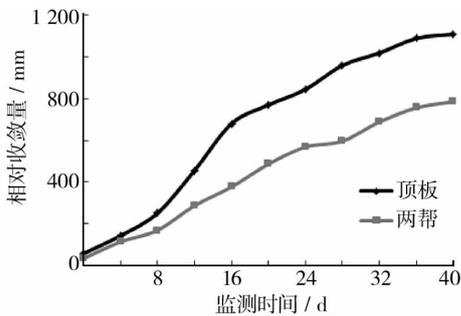


图 2 原有巷道支护下围岩变形曲线图

2 桁架锚索支护参数的正交试验优化

正交试验设计也称正交设计,是用来科学设计多种因素水平试验的一种方法. 其通过一套规格化的正交表安排多因素多水平的试验,得到的结果再通过不同的统计方法进行分析处理,使之

得出科学结论. 主要优势在于多种随机试验条件下选出具有代表性的少数方案,然后过对这些少数试验方案进行分析处理,从中找出最佳条件或最优方案,从而得到比试验结果本身还要多的有关于因素的信息.

通过 FLAC 数值模拟软件对桁架的参数(锚索的长度、角度、直径、锚索预应力和孔口帮距)进行数值模拟,然后利用 SPSS 软件正交优化,合理的确定锚索支护参数优化方案.

2.1 SPSS 正交试验设计

SPSS 软件是通用的统计软件之一,它被广泛用于社会科学和自然科学的领域中,实现数据分析和统计功能. 经实际应用,SPSS 软件处理正交试验设计数据分析简单,只需输入参数和结果,即可获得因素水平方差分析表、变量表、单因素统计量表. 利用 SPSS 统计软件,对桁架锚索的参数进行随机区组设计分析.

1) 明确实验目标,确定实验指标要求. 通过选取巷道顶板的最大下沉量以及巷道两帮的最大位移量作为衡量正交实验的参考要求.

2) 通过正交实验,确实关键因素. 实验的前提是在保持其他支护不变得情况下,通过对锚索支护参数的改变和调整,得出不同的支护参数对支护效

果的影响大小,本实验中,主要分析的因素有:桁架锚索的长度和直径,锚索和垂直方向的夹角,及锚索的预应力和孔口帮距。

3)确定各个因素的水平,在正交实验中,锚索的长度 A ,直径 B ,和垂直方向的夹角 C ,预应力 D 以及孔口帮距 E ,具体参数见表 1 所示。

表 1 预应力桁架锚索正交实验因素水平表

水平	锚索的长度 A/mm	锚索直径 B/mm	和垂直方向的夹角 $C/(^\circ)$	锚索预应力 D/kN	孔口帮距 E/mm
1	6 900	12.70	25	130	700
2	7 000	14.26	35	140	800
3	7 100	15.24	45	150	900
4	7 200	17.80	55	160	1 000

4)根据因素的个数,各因素水平个数,允许做试验次数,选择适当的正交表.选取了如表 2 所示的 5 因素 4 水平的正交试验表.假设个因素之间没

有交互影响,对所确定的 5 因素 4 水平选择 $L_{16}(4^5)$ 正交试验表安排试验分析,即对于桁架锚索支护参数的合理优化设计。

表 2 正交试验结果分析表

试验号 列号	1(A)	2(B)	3(C)	4(D)	5(E)	试验指标	
						顶板中心下沉量/mm	两帮最大移近量/mm
1	2	2	2	2	1	136.50	281.4
2	2	4	3	1	3	135.00	279.3
3	1	2	3	4	2	133.40	279.6
4	3	3	3	3	1	134.10	278.3
5	1	1	1	1	1	138.20	283.2
6	1	4	2	3	4	135.30	279.5
7	3	1	2	4	3	134.00	279.4
8	1	3	4	2	3	135.00	280.3
9	4	3	2	1	2	134.90	279.5
10	2	3	1	4	4	134.60	279.9
11	3	4	1	2	2	134.60	279.7
12	2	1	4	3	2	135.30	280.3
13	4	1	3	2	4	134.10	279.1
14	3	2	4	1	4	135.20	280.5
15	4	4	4	4	1	133.00	278.8
16	4	2	1	3	3	135.30	280.1

5)正交试验数值模型以贵州木孔煤矿的地质条件为参考原型,岩石力学参数来自有关参考资料和实验数据.模型的主要计算参数见表 3 所示.为了进行桁架锚索支护参数对支护效果的影响,实验在巷道原有的锚杆锚索支护不变得情况下,进行 FLAC 数值模拟计算,并将得出的结果填入实验结

果分析表(表 2)中。

6)表 2 中的 FLAC 数值模拟表明,预应力桁架锚索支护能够有效的改善围岩力学性质,与原支护相比,使巷道的两帮和顶板位移下沉量大大减小,提高了围岩的稳定性,但在正交试验表中不同的桁架锚索支护参数对巷道变形的影响有明显差异。

表 3 岩层力学计算参数

围岩	容重/(g/cm^3)	单轴抗压强度 /MPa	单轴抗拉强度 /MPa	粘聚力 /MPa	内摩擦角 /($^\circ$)	弹性模量 /GPa	泊松比	
老顶	粘土泥岩	2.30	12.09	0.47	3.34	20	1.26	0.34
直接顶	粉砂岩、粘土泥岩	2.65	8.28	0.31	4.25	31	11.65	0.21
伪顶	砂页岩	2.50	14.00	1.12	0.52	30	4.38	0.32
3号煤层	煤	1.60	12.00	1.43	1.50	18	0.45	0.42
直接底	粘土泥岩	2.30	12.09	0.47	3.34	20	1.26	0.34
老底	砂页岩	2.50	14.00	1.12	0.52	30	4.38	0.32

2.2 SPSS 正交试验结果分析

差分析法能把因素各水平的变化所导致的试验结果间的误差和差异的波动所引起的试验结果间的不同差异区分开,并能给出数量估计.利用 SPSS 软件进行正交试验方差分析,系统会自动生成统计分析的结果,且分析结果可靠准确.

通过正交试验表的因素水平随机组合,利用 FLAC 软件模拟计算,获取不同参数支护组合方案下顶板中心最大下沉量和两帮水平位移移近量,在此基础上,通过 SPSS 软件,对上述试验结果进行差分析法,结果见表 4 和表 5.

首先,分别对不同的指标进行分析,选出各个指标中较优的条件,然后再将各个指标较优的条件进行综合比较分析,服从煤矿实际生产需要,选出经济合理的指标条件.对顶板中心下沉量进行分析,通过分析找出对单个指标有主要影响的因素,并确定因素的优水平,绘制因素和顶板中心下沉量的趋势图,以各因素水平作为横坐标,估算边际均值为纵坐标.如图 3 所示,趋势图可以直观明了的分析试验指标随着因素不同水平的变化趋势.

1)通过表 4,由 III 型平方和比较可知, D 因素对顶板中心下沉量的影响较大, B 和 E 相对较

小,其因素主次顺序为 $D > C > A > B > E$,因为顶板中心下沉量越小越好,因此,较优的水平为 $D_4C_3A_4B_4E_2$,但是从估算边际均值表 5 和趋势图 4 中,可以看出因素 B (锚索直径)从 B_1 水平到 B_2 水平比 B_2 到 B_3 水平变化的要大得多,而且 B 因素处于次要因素,说明锚索直径的增加对顶板下沉量的影响效果是有限的,过大的增加锚索直径并不能取得更加显著的支护效果,反而会增加投入的经济成本,故因选择 B_3 .同理因素 A (锚索长度)选择 A_3 .

表 4 桁架锚索参数正交试验主体间效应的检验分析

源	III 型平方和	df	均方
校正模型	22.169	15	1.478
截距	291 195.141	1	291 195.141
锚索的长度 A	4.177	3	1.392
锚索直径 B	2.132	3	0.711
和垂直方向向的夹角 C	5.257	3	1.752
锚索预应力 D	8.842	3	2.947
孔口帮距 E	1.762	3	0.587
误差	0.000	0	
总计	291 217.310	16	
校正的总计	22.169	15	

表 5 桁架锚索参数估算边际均值

锚索的 长度 A/mm	估算边际 均值 /mm	锚索 直径 B /(°)	估算 边际均值 /mm	和垂直 方向向的 夹角 C/(°)	估算边际 均值 /mm	锚索预 应力 D /kN	估算边际 均值 /mm	孔口 帮距 E /mm	估算边际 均值 /mm
6 900	135.475	12.7	135.400	25	135.675	130	135.825	700	135.450
7 000	135.350	14.26	135.100	35	135.175	140	135.050	800	134.550
7 100	134.475	15.24	134.650	45	134.150	150	135.000	850	134.825
7 200	134.325	17.80	134.475	55	134.625	160	133.750	900	134.800

2)按照以上原理对两帮水平位移进行分析,同理得到最佳水平 $C_3A_3B_3D_4E_4$,绘制因素趋势图,如图 5 所示.

3)在本实验中,对于两项指标的较优水平分别为 $D_4C_3A_3B_3E_2$ 和 $C_3A_3B_3D_4E_4$,对于因素 E 其 2 项指标都属于次要因素,孔口帮距越大,桁架锚索钢梁越小,选用 E_4 在经济上合理,但是顶板在 E_2 到 E_4 要比两帮变化大,且从巷道安全角度出发选择 E_2 ,在巷道施工中顶板控制尤为重要,综合考虑选择 E_2 ,因此最优组合为 $A_3B_3C_3D_4E_2$.

3 优化方案的工程实践

根据本试验数值模拟选择的优化参数方案,桁架锚索长度为 7.1 m,锚索与垂直方向的夹角为 45° ,锚索的直径为 15.24 mm,孔口距离为 800 mm,

其支护方案如图 3 所示.为了研究桁架锚索在巷道的支护效果以及其支护参数的合理性,在巷道采用十字交叉法对两帮、顶板下沉量进行监测.

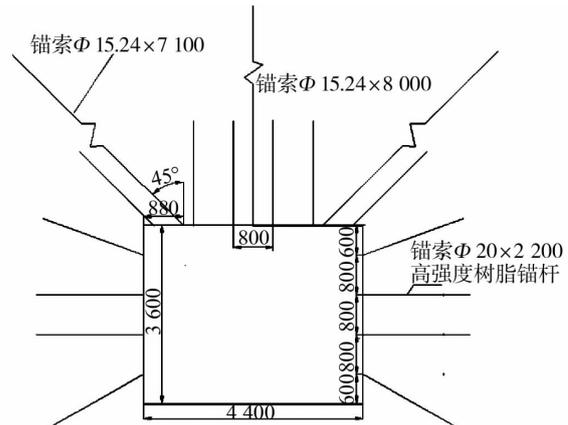


图 3 支护优化方案巷道布置图

3.1 巷道围岩表面位移

在实验巷通过十字交叉法监测出巷道顶板和两帮的变形量,即在底板和顶板中间位置的竖直方向和两帮的中部水平方向钻孔,钻孔的规格为 $\phi 22 \text{ mm} \times L500 \text{ mm}$,沿实验巷道安装2个测点.将测点1,2安排在新设计的支护断面,经过60 d左右的观测效果如图4和5所示.

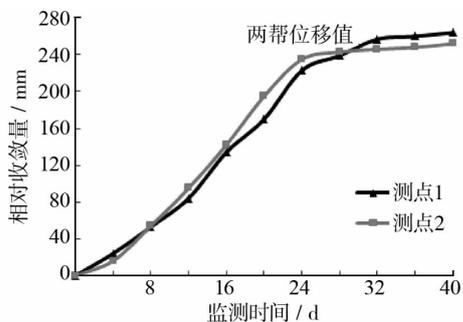


图4 两帮位移变化曲线图

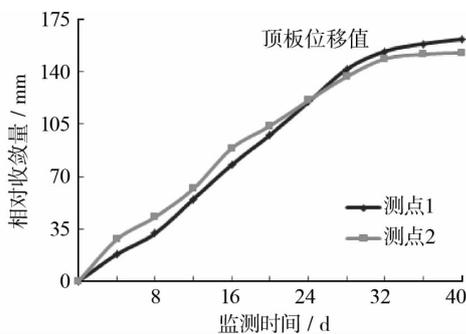


图5 顶板位移变化曲线图

1)由图4和图5可知,在巷道矿压观测期间,采用的桁架锚索支护的巷道断面收敛率比较小,两帮移近量最大都不超过260 mm,顶板的最大下沉量最大不超过163 mm,桁架支护对巷道围岩控制效果看,围岩变形控制效果较好.

2)从围岩的变形速率看,巷道掘进初期围岩收敛速率较大,但是在24 d左右的巷道围岩收敛率趋于相对于稳定,巷道顶板围岩的收敛率在32 d左右,趋于稳定,所需时间相对两帮要长.

3)从顶板离层的监测结果看,巷道顶板离层值很小,巷道处于稳定状态.

4 结论

1)对于地应力较大,巷道围岩力学性质差,地质条件复杂,桁架锚索能在巷道围岩变形初期给与及时承载,在巷道围岩的变形过程中,桁架的支护强度又能有效抑制围岩的破坏,从而使巷道处于稳定的状态.

2)通过SPSS正交试验的方法来对桁架锚索支护参数的优化是合理可行的,利用数值模拟对比分析结果,得到的结论对工程设计有重要的参考价值,从而避免了工程类比为人为确定参数的理论不足,使桁架锚索参数的确定更具有合理性和科学性.

3)正交试验分析出的支护方案,能够有效的抑制巷道两帮的变形,控制深部巷道围岩变形,在工程实践上取得了理想的支护效果,而且满足了工程安全要求,经济合理.

参考文献:

- [1] 何满朝,孙晓明.中国煤矿软岩巷道工程支护设计与施工指南[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] 何满朝,景海涛,孙晓明.软岩工程力学[M].北京:科学出版社,2002.
- [3] 钱鸣高,刘听成.矿山压力及其控制[M].北京:煤炭工业出版社,1991.
- [4] 张农,高明仕,徐兴亮.煤巷预拉力支护体系及其工程应用[J].矿山压力与顶板管理,2002(4):1-6.
- [5] 何富连,殷东平,严红,等.采动跨冒型顶板煤巷强力锚索桁架支护系统试验[J].煤炭科学技术.2011,39(2):1-5.
- [6] 李树清.深部煤巷围岩控制内、外承载结构耦合稳定原理的研究[D].长沙:中南大学,2008.
- [7] 韩磊,孟祥瑞,曹怀健.大采高开切眼桁架锚索支护参数优化研究[J]采矿与安全工程学报,2013,699-705.
- [8] 张波,何富连.基于正交试验的桁架锚索巷道支护参数研究[J]煤矿安全,2008(2):18-22.