

采矿与井巷工程

木垫板对锚杆支护效果影响的试验研究

林 健^{1,2}, 周逸群^{1,2}, 王正胜^{1,2}, 石 垚^{1,2}

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013;

2. 煤炭科学研究总院 开采设计研究分院, 北京 100013)



摘 要: 针对我国煤矿很多矿区锚杆托盘下加木垫板比较普遍的现象, 采用实验室试验的方法, 利用自行研制的锚杆支护应力场试验台, 对木垫板作用下锚杆预紧力损失、预紧转矩转化以及支护预应力场分布情况进行了研究, 并与金属托盘进行对比分析, 揭示了木垫板对锚杆预应力的影响规律。研究结果表明: 在干燥环境下, 加木垫板锚杆预应力第 1 h 损失率高达 23%, 锚杆预紧转矩转化为预紧力的系数降低 23%, 锚杆支护在围岩中形成的预应力场范围大幅减小, 各应力等值线面积平均降低 27%, 预应力峰值降低 38%; 同时指出, 在井下湿度超过 90% 的环境中, 木垫板对锚杆工作荷载的影响将会大幅增加。

关键词: 锚杆支护; 预应力; 木垫板; 预紧力损失

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)11-0074-05

Experimental study on influencing effect of wooden plate on bolt support

LIN Jian^{1,2}, ZHOU Yiqun^{1,2}, WANG Zhengsheng^{1,2}, SHI Yao^{1,2}

(1. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. Coal Mining and Designing Research Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Aiming at the common phenomenon of adding wooden plate under the bolt trays of many mines in China, the laboratory test method was used to reveal the influence of wooden plate on the pre-stress of bolt by using the self-developed bolt support stress field test rig. The pre-stress loss, preload torque conversion and pre-stress distribution of the bolt under the action of the wooden plate were studied and compared with the metal trays. The results show that in the dry environment, the first hour loss rate of the bolt prestress of the wooden plate is up to 23%, and the coefficient of the preload torque convert to pre-stress of the bolt is reduced by 23%. The range of pre-stress fields formed by bolt support in the surrounding rock is greatly reduced, the area of each stress contour is reduced by 27% on average, and the peak of pre-stress is reduced by 38%. It is also pointed out that in the environment where the humidity of the mine exceeds 90%, the influence of the wooden plate on the working load of the bolt will be greatly increased.

Key words: bolt support; pre-stress; wooden plate; pre-stress loss

0 引 言

锚杆支护作为煤矿巷道支护的最主要形式在国内外煤矿得到广泛应用, 锚杆预应力对锚杆支护效果起着决定性作用^[1-2]。但是, 目前我国煤矿巷道锚杆支护实践中, 仍有很多工程技术人员对锚杆支护机理及预应力有效扩散的影响因素认识不清楚, 在锚杆支护应用过程中出现偏差, 导致巷道变形

量较大, 严重影响锚杆支护效果。为减缓锚杆破断或解决锚杆尾部螺纹外露过长的问题, 在锚杆托盘下加木垫板在现场普遍存在。为杜绝此类现象的发生, 新颁布的 GB/T 35056—2018《煤矿巷道锚杆支护技术规范》特规定: “在保证锚杆预紧力矩或预紧力达到设计值(螺纹未用完)的前提下, 锚杆外露长度可不作明确规定”、“在锚杆安装过程中出现煤岩体片冒的情况下, 锚杆托盘下方不允许加垫木板、橡

收稿日期: 2018-04-08; 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2018.12.012

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0603006); 煤炭科学研究总院基金资助项目(2016ZYQN003)

作者简介: 林 健(1969—), 男, 山东曹县人, 研究员, 硕士生导师。E-mail: linjian_w@163.com

引用格式: 林 健, 周逸群, 王正胜, 等. 木垫板对锚杆支护效果影响的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 74-78.

LIN Jian, ZHOU Yiqun, WANG Zhengsheng, et al. Experimental study on influencing effect of wooden plate on bolt support[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 74-78.

胶等塑性材料”。

我国学者对锚杆支护作用机理及锚杆支护预应力场及其作用方面的研究很多。康红普等^[3]在分析复杂困难巷道锚杆支护存在问题的基础上,论述了预应力对支护效果的重要性,提出了锚杆主动支护系数、强度利用系数、预应力长度系数、有效压应力区、预应力扩散系数、有效压应力区骨架网状结构及临界支护刚度等概念,并对锚杆支护构件力学性能及匹配性进行了深入研究,对锚杆托板的力学性能与支护效果进行了详细分析^[4-6],提出了锚杆支护应力场的概念,同时对锚杆支护应力场在实验室进行了模拟研究和测试^[7-8];文献^[9-10]通过实验室相似模拟研究了单根锚杆不同工作载荷下支护应力场特征、端部锚固锚杆预应力场分布特征,并开发了提高锚杆预紧力的高效减磨垫片^[11];范明建^[12]研究了锚杆预应力与巷道支护效果的关系,指出巷道变形量随锚杆预应力的增大而减小;石垚^[13]通过大型相似材料试验台模拟研究了不同组合构件对锚杆支护应力场影响,得出了不同锚杆组合构件对锚杆预应力场扩散效果的影响规律,并给出了优劣排序;周逸群等^[14-15]分别采用大型物理模拟和数值模拟的方法研究了复合岩层锚杆支护预应力场分布规律,并得出了软-硬、硬-软复合岩层锚杆预应力传递规律的差异;杨建威^[16]利用大型真三轴试验机模拟研究了井下真实巷道开挖、支护应力路径条件下不同埋深巷道所需的支护应力;王晓卿等^[17]通过数值模拟研究了黏结刚度对预应力锚杆的支护效用。

以上研究成果对我国锚杆支护的大面积推广起到了显著的推动作用,但锚杆支护的精细化研究还需不断完善和发展。例如,为了方便和节约成本,我国煤矿井下锚杆施工时经常在锚杆托盘下加垫木垫板,但对于木垫板的支护效果尚未进行过足够的探讨和研究。笔者主要针对目前我国煤矿普遍存在的锚杆托盘下加木垫板的问题,通过实验室试验揭示木垫板对锚杆支护效果的影响规律,以期对锚杆支护的有效应用提供帮助。

1 应力场测试设备

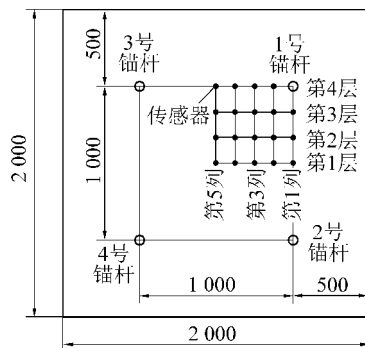
相比于数值模拟,相似模拟试验由于其物理模型为真实的物理实体,在基本满足相似原理的条件下,可以较为准确的反映地下工程的现场情况,且可给出更为直观的试验结果。随着相似材料的进一步

发展以及监测手段的进步,相似模拟试验已成为岩土工程问题,特别是地下工程问题必不可少的研究手段^[18-20]。采用自行研制的锚杆支护应力场试验台进行试验。试验台的几何参数为长×宽×高=3 000 mm×2 000 mm×2 000 mm,在试验台的中部可布置 4 根锚杆,锚杆的间排距均为 1 000 mm,每根锚杆距离边界均为 500 mm。试验台实物图和传感器布置方式如图 1 和图 2 所示。数据采集系统包括 2 部分:①锚杆施加预紧力的应力采集系统,②试验台内部的应力采集系统。锚杆预紧力采用 ZHC-35 载荷传感器采集,试验台内部应力采用 XYJ-2 型振弦式传感器采集。

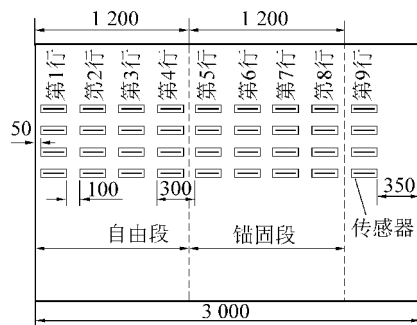


图 1 锚杆支护应力场测试试验台

Fig. 1 Bolt prestressed field test bench



(a) 主视



(b) 侧视

图 2 传感器布置

Fig. 2 Sensors layout

2 应力场测试试验方案

在锚杆支护应力场试验台上安装 1 根锚杆,对

比分析金属托盘和金属托盘+木垫板2种情况下锚杆预紧力损失、转矩转化、支护预应力场分布。锚杆采用现场采取的长度2 400 mm、直径22 mm的左旋无纵肋螺纹钢锚杆。锚固方式为加长锚固,锚固长度1 200 mm。为了更好地模拟井下实际工作状态,使用井下常用的金属网作为护表构件,安装结果如图3所示。

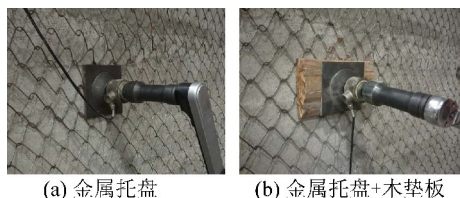


图3 木垫板安装位置示意

Fig. 3 Wooden plate installation position

3 应力场测试试验结果分析

3.1 托盘加木垫板条件下锚杆预紧力损失

通过ZHC-35载荷传感器监测得出27 h内金属托盘与金属托盘+木垫板2种情况下预紧力变化情况,并根据监测数据绘制出二者预紧力随时间的变化规律曲线,如图4所示。

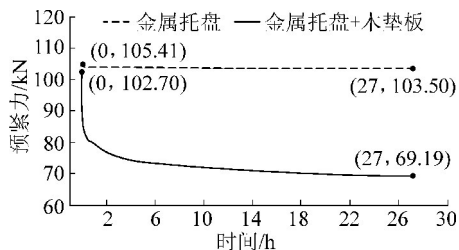


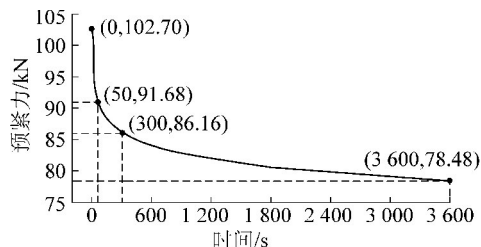
图4 加木垫板前后锚杆预紧力变化曲线

Fig. 4 Curve of bolt pre-stress before and after adding wooden plate

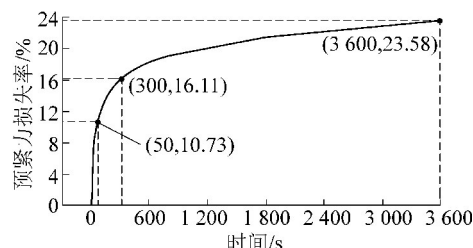
由图4可看出,在单独使用金属托盘情况下,锚杆预紧力随时间变化极小,在27 h内预紧力由105.41 kN降低至103.50 kN,损失率仅为1.9%,且损失主要集中在预紧力施加后的30 min内,30 min后预紧力趋于稳定。在金属托盘+木垫板情况下,预紧力随时间增加出现持续的降低,且降低幅度较大,16 h左右损失率即达30%以上,27 h内预紧力由102.70 kN降低至69.19 kN,损失率高达32.63%,且随时间仍有持续降低趋势。

在使用金属托盘+木垫板的情况下,预紧力损失主要集中在预紧力施加后1 h内,因此对1 h内金属托盘+木垫板的预紧力变化情况进行进一步分析。预紧力施加1 h内金属托盘+木垫板预紧力变

化情况如图5所示。预紧力在施加之后迅速降低,在50 s时预紧力损失率达10.73%,5 min时预紧力损失率达到16.11%,1 h后预紧力损失率达23.58%。综上所述,在使用木垫板的情况下,锚杆预紧力存在持续损失且损失比例远高于金属托盘,因此井下使用木垫板会较大幅度降低锚杆支护效果,难以实现锚杆支护对高预紧力的要求。



(a) 预紧力变化曲线



(b) 预紧力损失率曲线

图5 金属托盘+木垫板1 h内预紧力变化情况

Fig. 5 Curves of bolt pre-stress with wooden plate in 1 hour

3.2 锚杆预紧转矩转化为预紧力的对比试验

采用同一锚杆在干燥的实验室环境下分别对金属托盘与金属托盘+木垫板进行转矩转化试验,试验结果见表1,根据试验结果绘制预紧转矩-预紧力转化关系曲线,如图6所示。

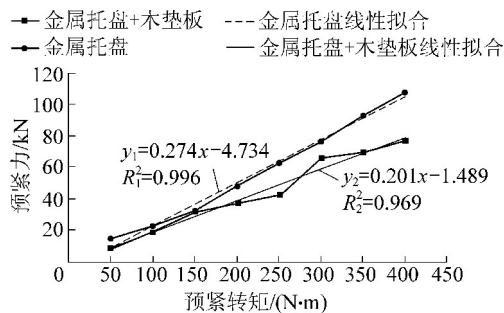


图6 预紧转矩-预紧力转化曲线

Fig. 6 Preload torque-prestress conversion curves

根据图6和表1可得出,金属托盘作用下,锚杆预紧转矩与预紧力基本呈线性关系,线性拟合度 R_1^2 达到0.996,转矩转化系数平均为0.25。加木垫板后,预紧力矩与预紧力线性拟合度 R_2^2 为0.969,相比

金属托盘线性关系较差,转矩转化系数平均为 0.19,锚杆预紧转矩转化为预紧力的系数平均降低 23.21%,在预紧力矩为 400 N·m(井下施工常用预紧转矩)时,木垫板比金属托盘预紧力转化系数降低了 28.64%。综上所述,加木垫板后锚杆转矩转化系数明显低于金属托盘,在同样的施工机具预紧转矩下,井下施工时的初始预紧力较低。

表 1 预紧转矩-预紧力转化试验

Table 1 Preload torque-pre-stress conversion test

转矩/ (N·m)	预紧力/kN		转化系数	
	无木垫板	加木垫板	无木垫板	加木垫板
50	14.38	7.89	0.29	0.16
100	22.27	18.81	0.22	0.19
150	32.00	31.46	0.21	0.21
200	47.89	37.08	0.24	0.19
250	62.81	41.95	0.25	0.17
300	76.32	65.95	0.25	0.22
350	92.65	69.19	0.26	0.20
400	107.57	76.76	0.27	0.19

3.3 锚杆支护预应力场对比分析

由于预紧力损失和护表情况的不同,加木垫板后锚杆支护预应力场的峰值与扩散范围与金属托盘相比出现一定差异。以 100 kN 预紧力下加木垫板前后锚杆支护预应力场为例,锚杆支护预应力场沿对称面切片分布情况如图 7 所示。其中,0~1 200 mm 为自由段,1 200~2 400 mm 为锚固段。

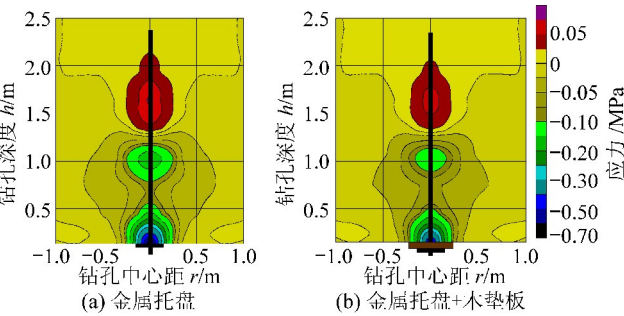


图 7 100 kN 预紧力加木垫板前后锚杆支护预应力分布

Fig. 7 Pre-stress distribution of bolt support before and after adding wooden plate under 100 kN pre-stress

锚杆支护预应力场压应力主要分布在锚杆的自由段范围内,对压应力区域锚杆支护预应力场的峰值和扩散范围进行比对:压应力峰值主要位于围岩表面,金属托盘压应力峰值为-0.72 MPa,加木垫板后压应力峰值为-0.44 MPa,相比降低 38.89%;通过对锚杆预应力场各应力等值线面积进行测量,使用

金属托盘时,-0.1、-0.05、-0.02 MPa 应力等值面面积分别为 0.285、0.666、1.287 m²;加木垫板后应力等值面面积分别为 0.175、0.503、1.035 m²,相比分别降低了 38.60%、24.47%、19.58%,平均降低 27.55%。综上所述,在加木垫板后,锚杆支护预应力场的压应力峰值的压应力扩散范围都出现明显降低。

4 结论及建议

1)在使用木垫板的情况下,锚杆预紧力存在持续损失的现象且损失比例远高于金属托盘,施加预紧力 1 h 内预紧力损失率达 23%,在 27 h 内预紧力损失率达 32%以上且仍存在持续降低的趋势,而同等条件下金属托盘预紧力损失率仅为 1.9%。

2)加木垫板时锚杆预紧转矩转化为预紧力的系数平均为 0.19,相比金属托盘降低 23%,且预紧力矩与预紧力之间的线性关系较差。当预紧转矩为 400 N·m(井下施工常用预紧转矩)时,金属托盘预紧力为 107.57 kN,加木垫板后仅为 76.76 kN,相比降低了 28%。

3)在加木垫板后,锚杆支护预应力场压应力区峰值和压应力扩散范围都出现明显降低。应力峰值降低 38%,-0.10、-0.08、-0.02 MPa 等各应力等值面面积平均降低 27%。

4)以上试验均为在干燥的实验室环境下完成,在井下湿度超过 90%的环境中,木垫板对锚杆工作荷载的影响将会大幅增加,可进一步进行井下现场环境下的试验研究。

5)综合木垫板对锚杆预紧力损失、转矩转化效率、预应力扩散效果影响的研究结论,建议在井下锚杆托盘下尽量不使用木垫板,以免大幅度降低支护效果。

参考文献(References):

[1] 康红普,王金华.煤巷锚杆支护理论与成套技术[M].北京:煤炭工业出版社,2007.

[2] 鞠文君.我国煤矿锚杆支护技术的发展与展望[J].煤矿开采,2014,19(6):1-6.

JU Wenjun.Development and prospect of anchored-bolt supporting technology in Chinese coal mine[J].Coal Mining Technology,2014,19(6):1-6.

[3] 康红普,姜铁明,高富强.预应力在锚杆支护中的作用[J].煤炭学报,2007,32(7):673-678.

KANG Hongpu,JIANG Tieming,GAO Fuqiang.Effect of pre-tensioned stress to rock bolting[J].Journal of China Coal Society,2007,32(7):673-678.

- [4] 康红普,林 健,吴拥政,等.锚杆构件力学性能及匹配性[J].煤炭学报,2015,40(1):11-23.
KANG Hongpu, LIN Jian, WU Yongzheng, *et al.* Mechanical performances and compatibility of rock bolt components[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 11-23.
- [5] 康红普,杨景贺.锚杆组合构件力学性能实验室试验及分析[J].煤矿开采,2016,21(3):1-6.
KANG Hongpu, YANG Jinghe. Laboratory experiment and analysis on mechanical performances of rock bolt components[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(3): 1-6.
- [6] 康红普,吴建星.锚杆托板的力学性能与支护效果分析[J].煤炭学报,2012,37(1):8-16.
KANG Hongpu, WU Jianxing. Analysis on mechanical performance and supporting function of rock bolt plates[J]. Journal of China Coal Society. 2012, 37(1): 8-16.
- [7] 康红普.煤矿井下应力场类型及相互作用分析[J].煤炭学报,2008,33(12):1329-1335.
KANG Hongpu. Analysis on types and interaction of stress fields in underground coal mines[J]. Journal of China Coal Society. 2008, 33(12): 1329-1335.
- [8] 康红普,姜鹏飞,蔡嘉芳.锚杆支护应力场测试与分析[J].煤炭学报,2014,39(8):1521-1529.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, CAI Jiafang. Test and analysis on stress fields caused by rock bolting[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1521-1529.
- [9] 林 健,石 垚,孙志勇,等.端部锚固锚杆预应力场分布特征的大型模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2237-2247.
LIN Jian, SHI Yao, SUN Zhiyong, *et al.* Large scale model test on the distribution characteristics of the prestressed field of end-anchored bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2237-2247.
- [10] 林 健,王 洋,杨景贺,等.单根锚杆不同工作载荷下支护应力场特征相似模拟研究[J].煤矿开采,2015,20(5):87-92,22.
LIN Jian, WANG Yang, YANG Jinghe, *et al.* Analogue simulation of supporting stress field characteristic of single anchored bolt under different working loads[J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(5): 87-92, 22.
- [11] 林 健.煤巷锚杆新型高效减摩垫片的研发[J].煤矿开采,2012,17(5):11-13.
LIN Jian. Development of new-style high-efficiency antifriction gasket for anchored bolt[J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(5): 11-13.
- [12] 范明建.锚杆预应力与巷道支护效果的关系研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2007.
- [13] 石 垚.不同组合构件对锚杆支护应力场影响的实验室研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2015.
- [14] 周逸群.复合岩层锚杆支护预应力场分布规律模拟研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2018.
- [15] 周逸群,林 健,王正胜,等.组合岩层端锚锚杆预应力场分布规律模拟研究[J].煤矿开采,2017,22(6):46-49,33.
ZHOU Yiqun, LIN Jian, WANG Zhengsheng, *et al.* Numerical simulation study on prestressed field characteristics of end-anchored bolt in composite rock[J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(6): 46-49, 33.
- [16] 杨建威.煤巷锚杆合理支护应力试验研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2017.
- [17] 王晓卿,康红普,赵 科,等.黏结刚度对预应力锚杆支护效用的数值分析[J].煤炭学报,2016,41(12):2999-3007.
WANG Xiaoqing, KANG Hongpu, ZHAO Ke, *et al.* Numerical analysis of bonding stiffness for support effectiveness of pre-stressed bolts[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 2999-3007.
- [18] 李仲奎,卢达溶,中山元,等.三维模型试验新技术及其在大型地下洞群研究中的应用[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1430-1436.
LI Zhongkui, LU Darong, ZHONG Yuanshan, *et al.* Development and application of new technology for 3D geomechanics model test of large underground houses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1430-1436.
- [19] HUDSON J A, HARRISON J P. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles[M].北京:科学出版社,2009.
- [20] 陈安敏,顾金才,沈 俊,等.地质力学模型试验技术应用研究.岩石力学与工程学报,2004,23(22):3785-3789.
CHEN Anmin, GU Jincai, SHEN Jun, *et al.* Application study on the geomechanical model experiment techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3785-3789.