

倾斜顶板锚索尾端剪切破坏特性及防控措施

康彦军¹,柳敬涛¹,詹家旺²,邹志鹏¹,张学东³,吴超^{3*}

(1.冀中能源峰峰集团 九龙煤矿,河北 邯郸 056000;2.中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院,北京 100083;
3.河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:为探究锚索尾端与钻孔的不同倾斜程度对锚索破断的影响,建立了锚索受托盘、钢带等构件剪切作用时的理论力学模型。研制了由调心锚具和抗剪钢管组成的抗剪锚具,并分别对不同倾斜程度(10°、20°、30°、40°)下使用普通锚具和抗剪锚具的锚索抗剪切性能进行了测试。结果表明,倾斜角度对锚索极限轴力的影响较大。使用普通锚具时,在10°、20°、30°、40°的倾斜角度下,锚索的锚固效率均未达到95%。在30°~40°时,锚索轴力下降幅度最大。随倾斜角度增大,锚索破坏形式逐渐由拉断破坏转变为切断破坏。使用抗剪锚具时,不同倾斜角度下的锚固效果均优于普通锚具。在10°、20°、30°的倾斜角度下,锚固效率均达到了95%以上。在40°的倾斜角度下锚固效果提升显著,三组试验所得峰值轴力的平均值提高了36%。由此可见,锚索尾端的倾斜角度对锚索性能的发挥影响较大,使用抗剪锚具可以有效防止锚索尾部受剪切而破断。

关键词:锚索失效;机械式锚具;倾斜顶板;抗剪锚具

中图分类号:TD353

文献标识码:A

Shear Failure Characteristics and Preventive Measures of Anchor Cable End Under Inclined Roof

KANG Yanjun¹, LIU Jingtao¹, ZHAN Jiawang², ZOU Zhipeng¹, ZHANG Xuedong³, WU Chao^{3*}

(1. Jiulong Coal Mine, Jizhong Energy Fengfeng Group, Handan, Hebei 056000, China;
2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
3. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: To explore the influence of different inclination angles between the tail end of the anchor cable and the drilling hole on the fracture of the anchor cable, a theoretical mechanical model of the anchor cable under the shear of the tray, steel strip and other components was established. An anti-shear anchorage composed of self-aligning anchorage and anti-shear steel pipe was developed. The anti-shear performance of anchor cables using ordinary anchorage and anti-shear anchorage under different inclination degrees (10°, 20°, 30° and 40°) was tested. The results show that the inclination angle has a great influence on the ultimate axial force of the anchor cable. When using ordinary anchorage, the anchor efficiency of anchor cable did not reach 95% at the inclination angle of 10°, 20°, 30° and 40°. At the angle from 30° to 40°, the axial force of the anchor cable decreases the most. With the increase of inclination angle, the failure mode of anchor cable gradually changes from tensile failure to cutting failure. When using anti-shear anchorage, the anchor efficiency at different inclination angles is greater than that of ordinary anchorage. At the inclination angle of 10°, 20° and 30°, the anchor efficiency reached more than 95%. The anchoring effect is also greatly improved at an inclination angle of 40°, and the average value of the peak axial force obtained by the three groups of tests is increased by 36%. The inclination

收稿日期:2024-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42377148)

第一作者:康彦军(1974—),男,河北邯郸人,硕士,工程师,从事深部煤矿巷道支护方面的研究。

* 通信作者:吴超(1981—),男,河北邯郸人,硕士,副教授,从事土木结构、煤矿开采方面的研究。

angle of the tail end of the anchor cable has a great influence on the performance of the anchor cable. The use of anti-shear anchorage can effectively prevent the tail of the anchor cable from being broken by shear. The research content of this paper can provide reference for similar anchor cable failure problems.

Key words: anchor cable failure; mechanical-type anchorage; inclined roof; anti-shear anchorage

软岩大变形问题是阻碍地下工程发展的难题。小孔径矿用锚索具有超高的抗拉强度,作为支护材料被广泛地应用于深部巷道的围岩大变形控制^[1-3],但由于锚索结构的复杂性以及煤矿巷道变形力学行为的非线性,锚索易发生非常规性破断,无法充分发挥其抗拉性能^[4-6]。目前的锚索通常采用树脂锚固剂和机械式锚具进行锚固。在围岩内部使用树脂锚固剂能够快速固定锚索^[7-9],在尾端使用机械式锚具可快速对锚索施加高预应力并确保锚索的锚固效果^[10-12]。为提高断面支护效果,锚索尾端通常由钢带、托盘、锚具三部分组成,锚索尾端的有效锚固是发挥锚索支护作用的前提。地质构造运动会影响部分地区煤层的形成过程,使其产生倾斜岩层。同时,随着煤矿开采深度不断增加,受“三高一扰动”的影响,巷道开挖后软岩的表现形式为大变形^[13]。

在倾斜顶板条件下,围岩的大变形运动会造成锚索尾端与锚索钻孔之间的倾斜,这种倾斜进而导致锚索与钢带等支护材料发生剪切作用,最终造成锚索破断。目前,针对锚索破断失效的研究主要集中在锚索受岩层错动方面^[14-17]。而钢带等金属构件的强度远高于岩石,锚索在受钢带剪切时更易发生破坏。因此,有必要深入研究钢带等金属构件对锚索工作性能的影响。

本文运用力学分析法,建立了锚索尾部的剪切力学模型,阐明了锚索构件倾斜角度对支护性能的影响。同时,发明了一种抗剪切锚具,有效提升了锚索的抗剪切力学性能,解决了锚索受钢带、托盘剪切而提前破断的问题。研究内容可为类似的锚索失效问题提供参考。

1 研究背景

1.1 工程概况

本文依托项目为九龙煤矿的15240工作面,位于河北省邯郸市峰峰矿区,埋深为-625~-660 m,巷道直接顶为砂质泥岩,平均厚度为3.8 m;基本顶为粉砂岩,平均厚度为7.5 m;煤层平均厚度2.8 m,岩层倾角11°~17°。工作面地质情况如图

1所示。

顶板采用锚杆索组合支护方式,配合T型钢带及槽钢进行联合支护。锚索为1860级21.8 mm低松弛钢绞线,长度为6.2 m,间隔1.2 m;锚杆采用直径为20 mm的左旋螺纹钢锚杆,间距为0.85 m,如图2所示。

1.2 锚索失效形式

在倾斜顶板发生沉降的过程中,锚索尾端与锚索钻孔间会逐渐产生倾斜角度。随着锚索轴力的持续增大,托盘与钢带会对锚索尾端施加剪切作用力,进而导致锚索尾端被剪切破断。对某断面的锚索轴力开展监测工作后发现,大部分锚索在轴力达到350 kN左右便会发生失效,其失效形式如图3所示。

2 锚索尾部切断机制及抗剪切锚具介绍

2.1 锚索受剪切力学机理分析

为了探究锚索尾端倾斜角度与锚索轴力之间的关系,建立了如图4所示的力学模型。当锚索作用于倾斜顶板时,其自由段与锚索尾端部分受到轴向的拉伸作用,与托盘、钢带构件接触部分受到剪切作用。假设树脂锚固段完全固定, σ_T 为锚索轴向的拉伸强度, σ_τ 为锚索受托盘、钢带等支护构件作用的切向强度,角度垂直于尾端锚索的轴向。 α 为锚索尾端与锚索钻孔之间的倾斜角度。

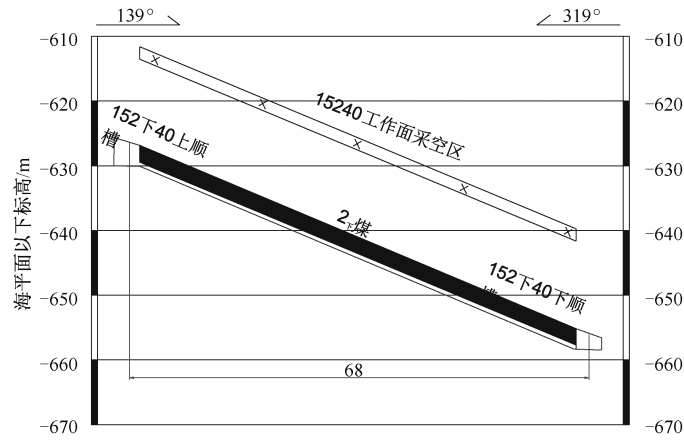
σ_T 与 σ_τ 之间的关系可以表示为

$$\sigma_\tau = -\sigma_T \tan \alpha \quad (1)$$

建立受到剪切作用部分的微单元体模型如图4(b)所示。为方便计算,假设受轴向强度的方向为1,受切向强度的方向为2。根据第三强度(最大剪切应力)理论,对锚索轴向强度 σ_T 和倾斜角度 α 之间的关系进行推导。

在平面1—2中,微单元体所受的最大主应力 σ_{\max} 和最小主应力 σ_{\min} 可以表示为

$$\sigma_{\min}^{\max} = \frac{\sigma_T + \sigma_\tau}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_T - \sigma_\tau}{2}\right)^2} \quad (2)$$



(a) 工作面切眼预想剖面图(单位: m)



(b) 工作面综合柱状图(单位: m)

图 1 九龙矿 15240 工作面地质情况

Fig. 1 Geological conditions of 15240 working face in Jiulong Mine

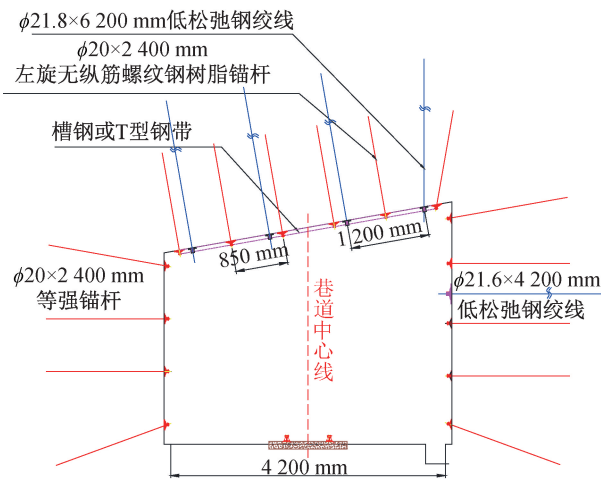
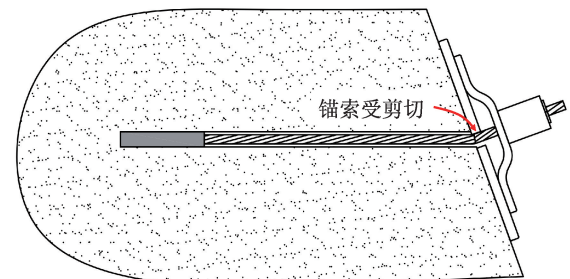


图 2 九龙矿 15240 工作面巷道支护设计

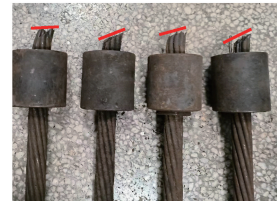
Fig. 2 Roadway support design of 15240 working face in Jiulong Mine



(a) 锚索受剪切示意图



(b) 钢带严重弯曲



(c) 锚索尾部切断

图 3 九龙矿锚索尾端剪切破坏

Fig. 3 Shear failure at the end of anchor cable in Jiulong Mine

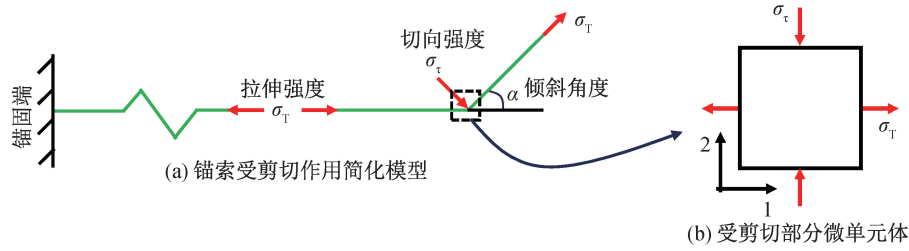


图4 锚索锚具端受剪切力学模型

Fig. 4 Mechanical model of anchor cable end subjected to shear force

则微单元体的剪切强度 σ 为

$$\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (3)$$

结合式(1)–(3)可以得到微单元体的剪切强度 σ_τ 与轴向拉伸强度 σ_T 、倾斜角度 α 的关系式为

$$\sigma_\tau = \sigma_T(1 + \tan\alpha) \quad (4)$$

则锚索轴力 P_T (kN) 和轴向拉伸强度 σ_T (MPa) 的关系式可表示为

$$P_T = \sigma_T \pi r^2 \quad (5)$$

式中: r 为锚索的半径, mm。

当 σ 小于等于锚索的屈服强度 σ_s 时, 锚索处于安全状态。此处可将 $\sigma = \sigma_s$ 时的状态视作锚索受切向应力时的极限状态, 此时的锚索轴力与倾斜角度 α 的关系式可以表示为

$$P_T = \frac{\sigma_s \pi r^2}{(1 + \tan\alpha)} \quad (6)$$

由式(6)可知, 极限状态下锚索的轴力与锚索半径 r 、倾斜角度 α 和锚索屈服强度 σ_s 有关。此处将锚索张拉过程中半径 r 的变化忽略不计, 则 $\sigma_s \pi r^2$ 为锚索达到屈服强度时的轴力, 取 592 kN。在本文中, 选取 1×19 股, 半径为 10.9 mm, 屈服强度为 1 860 MPa 的矿用锚索进行分析, 倾斜角度取 0~40°, 则极限状态下锚索轴力 P_T 随倾斜角度 α 的变化趋势如图 5 所示。

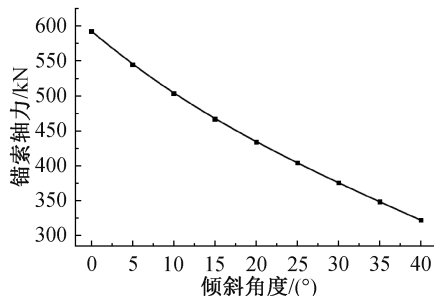


图5 锚索轴力与倾斜角度的关系

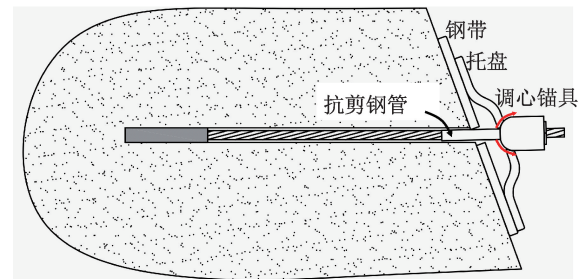
Fig. 5 The relationship between the axial force of anchor cable and the inclination angle

随倾斜角度的增大, 锚索在达到屈服状态时的轴力逐渐减小。当倾斜角度为 10° 时, 轴力达到 503 kN

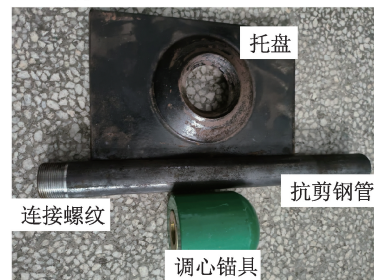
锚索即达到屈服; 在 20° 的倾斜角度下, 轴力为 434 kN 时锚索即达到屈服; 当倾斜角度为 30° 时, 轴力为 375 kN 时锚索即达到屈服; 当倾斜角度为 40° 时, 轴力为 322 kN 时锚索达到屈服。由此可见, 锚索尾部的倾斜角度对锚索性能的发 挥具有较大影响。

2.2 抗剪切锚具介绍

为了解决倾斜顶板下锚索尾端受剪切破坏的问题, 本研究研制了如图 6 所示抗剪切锚具, 该锚具由调心锚具、调心托盘、抗剪钢管组成。其中, 调心锚具的底部为半球形, 与调心托盘配合可对 0~20° 范围内的倾斜角度进行调整。抗剪钢管通过连接螺纹与调心锚具相连, 在受到钢带等构件剪切时, 抗剪钢管先与其接触, 从而起到保护锚索的作用。



(a) 抗剪切锚具工作示意图



(b) 抗剪切锚具实物图

图6 抗剪切锚具工作机制与实物图

Fig. 6 Anti-shear anchorage operation mechanism and physical diagram

锚具与抗剪切锚具的应用效果图如图 7 所示。可以看出, 普通锚具在 U 型钢带的作用下产生较大的剪切效应, 而抗剪切锚具具有一定的调心功能。

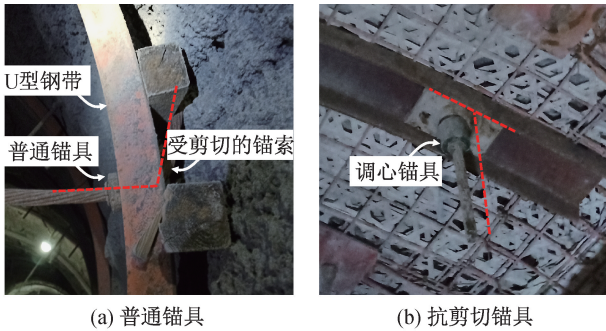


图 7 普通锚具及抗剪切锚具应用效果
Fig. 7 Application effect of ordinary anchorage and anti-shear anchorage

3 静力拉伸试验

3.1 试验装备

采用如图 8 所示的 LE-1000 型卧式锚索张拉试验装备,对不同倾斜程度、不同锚固方式的锚索进行张拉试验。锚索一端采用锚具进行固定,使用轴力计及位移计对锚索的荷载-位移曲线进行实时监测。另一端放置倾斜工装与实验用托盘锁具。为保障实验效果,工装斜面面积稍大于托盘的面积。在进行加载时,首先对锚索进行 5 kN 左右的预紧,加载速率为 10 mm/min,然后以屈服载荷的 20%为梯度进行分阶段加载。在每个阶段中,保持荷载 20 min。达到屈服载荷后,直接加载至锚索失效。

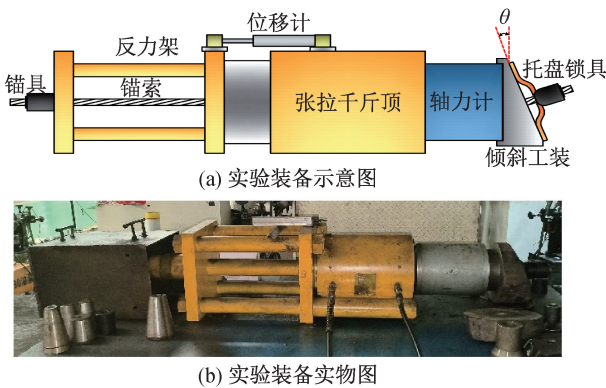


图 8 锚索抗剪切锚具试验装备
Fig. 8 Anchor cable anti-shear anchorage test equipment

3.2 材料参数

试验材料还原巷道真实施工情况,锚索采用 1860 级、直径为 21.8 mm 的 1×19 股矿用高强锚索,极限破断荷载为 592 kN。托盘锁具采用平托盘+普通锚具、调心托盘+抗剪切锚具两种进行试验,如图 9 所示。锁具型号均为矿用 K22 型,可保证锚索 95%的锚固效率,即能够保障锚索破断荷



图 9 不同锚具对比
Fig. 9 Comparison of different anchorages

载在 563 kN 以上。

为探究不同倾斜角度下使用普通锚具锚索的剪切失效特性,选用 10°、20°、30°、40°的锚具各 3 套。为测试抗剪切锚具的使用效果,取 10°、20°、30°的抗剪切锚具各 1 套,40°的抗剪切锚具 3 套进行试验,具体材料参数如表 1 所示。为保障试验结果的有效性,托盘、锚具、锚索均为一次性使用。

表 1 试验材料参数

角度 / (°)	数量		锚索长度 / mm
	普通锚具	抗剪切锚具	
10	3	1	1 300
20	3	1	1 300
30	3	1	1 300
40	3	3	1 400

4 试验结果

4.1 轴力-位移分析

对上述试验所输出的轴力-位移数据进行分析,如图 10 所示。使用抗剪切锚具时的峰值轴力均大于使用普通锚具时的峰值轴力。其中,在倾斜角度为 30°~40°的变化阶段,锚索峰值轴力的下降趋势最明显。使用普通锚具进行锚固,在 10°倾斜角度下,极限轴力分别为 572、557、504 kN,平均值为 544 kN;在 20°倾斜角度下,极限轴力分别为 512、534、559 kN,平均值为 535 kN;在 30°倾斜角度下,极限轴力分别为 519、521、539 kN,平均值为 526 kN;在 40°倾斜角度下,极限轴力分别为 364、388、429 kN,平均值为 394 kN。使用抗剪切锚具进行锚固时,10°、20°、30°倾斜角度下的极限轴力分别为 590、568、572 kN;40°倾斜角度下的极限轴力分别为 515、542、551 kN,平均值为 536 kN。由于调心托盘形状为凸型,在锚索受力时会产生一定的变形,从而增大拉伸位移,进而可延缓锚索的失效。

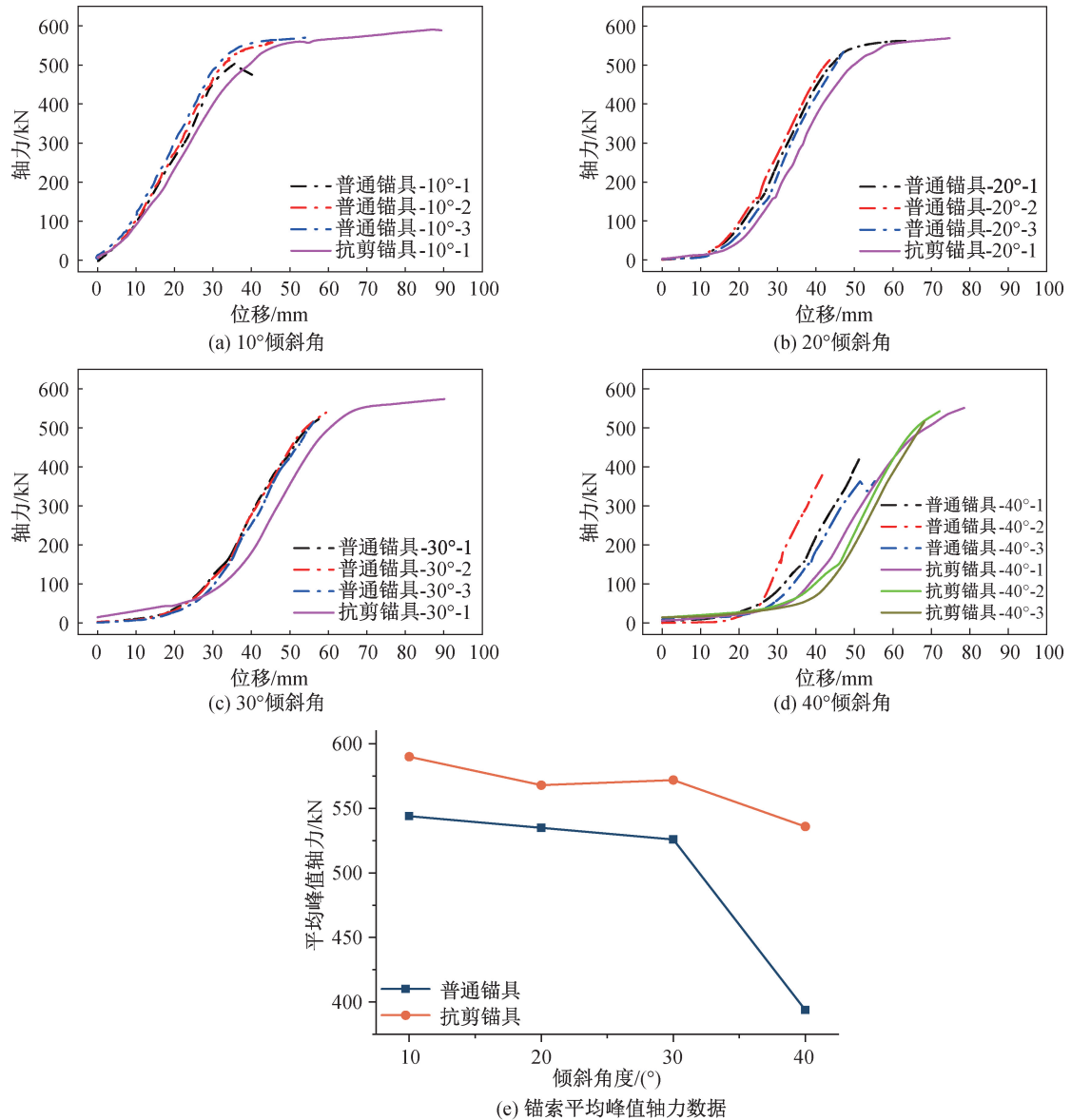


图 10 不同倾斜角度下荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves at different inclination angles

4.2 锚索破断特征

试验后锚索破断部位如图 11 所示,不同倾斜角度下的锚索破断形式分为两种。在较小倾角(10°、20°)条件下,锚索破断时轴力较大,表现形式以拉断破坏为主,大量的钢丝一起破断,呈现出炸丝破坏形式。随倾角增大,在 30°倾角时,仅有一根锚索呈现出多根钢丝同时破断的炸丝破坏形式,其他两根为少数钢丝破断导致的剪切破坏。在 40°倾角条件下,三根锚索均无炸丝现象,破坏形式为受剪切部位的钢丝被剪断,进而导致轴力消失。

为验证抗剪切锚具的调心作用,锚杯采用防腐涂层加工,在受到挤压后会留下痕迹,如图 12 所示。失效锚索的锚杯外表具有明显的调心痕迹。在 10°、20°倾斜角度下,抗剪钢管未发生明显剪切

痕迹,此时主要靠调心锚具的调心作用保障锚索安全。当倾斜角度达到 30°、40°时,抗剪钢管出现了明显的剪切痕迹,并发生明显弯曲,说明仅靠调心锚具的调心作用已不足以保障锚索正常使用,此时抗剪钢管发挥其抗剪切作用,保护锚索。

5 结论

1) 锚索尾部的倾斜对锚索抗拉性能的发挥具有重要影响。由理论分析可知,随着倾斜角度增大,锚索在达到屈服状态时的轴力逐渐减小。

2) 调心锚具配合托盘可以对锚索进行 0°~20°的调心,抗剪钢管可以承受钢带的横向剪切,从而保护锚索。该锚具已在现场应用,效果良好。

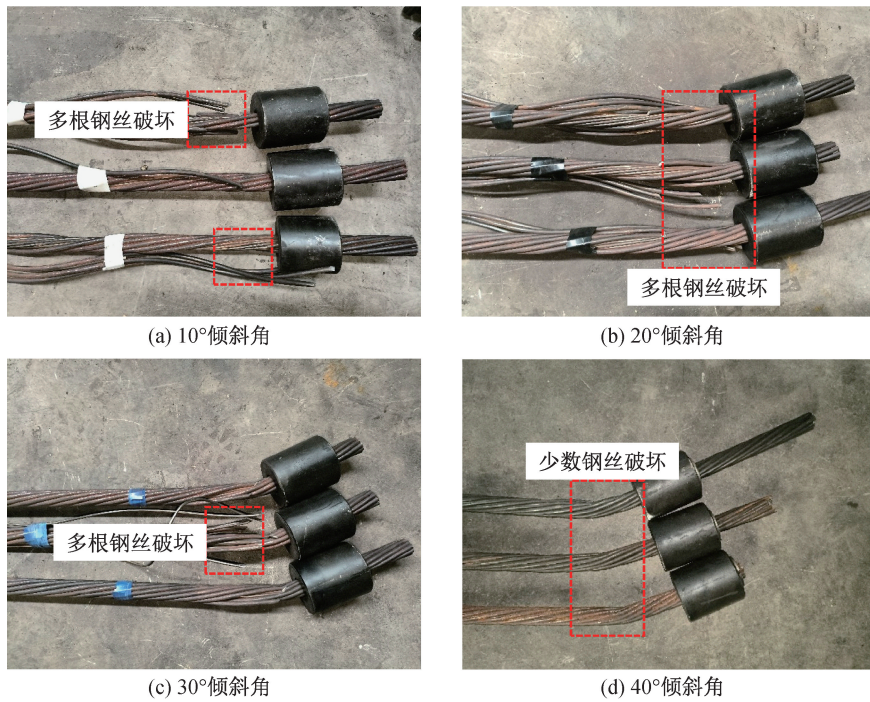


图 11 不同倾斜角下普通锚具锚索破坏形式

Fig. 11 Failure modes of common anchor cable at different inclination angles

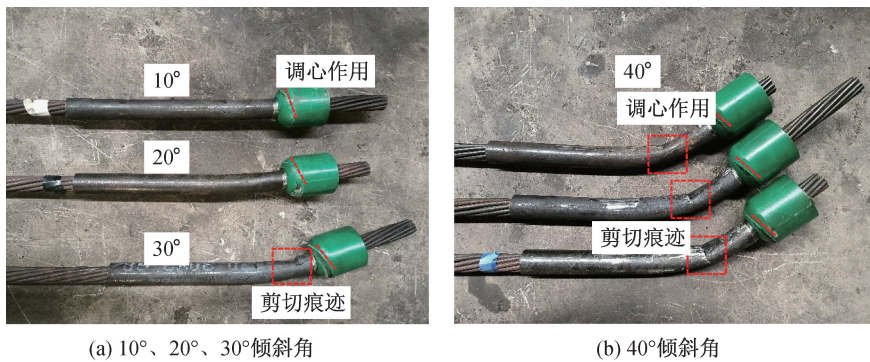


图 12 不同倾斜角下抗剪切锚具锚索破坏形式

Fig. 12 Failure modes of anti-shear anchorage cable at different inclination angles

3)使用普通锚具时,锚索轴力随倾斜角度的增大而减小,10°、20°、30°的倾斜角度下锚索轴力减小趋势较小,平均峰值轴力分别为 544、535、526 kN。在 30°~40°的变化过程中,轴力减小幅度最大。平均峰值轴力由 526 kN 减小至 394 kN。随倾斜角度增大,锚索破坏形式逐渐由拉断破坏转变为切断破坏。

4)使用抗剪切锚具时,不同倾斜角度下的锚索峰值轴力均大于使用普通锚具时的情况。在 10°、20°、30°的倾斜角度下,锚索峰值轴力为 590、568、572 kN,均达到了 95%的锚固效率。在 40°的倾斜角度下,三组试验所得峰值轴力的平均值由 394 kN 提高至 536 kN,提升了 36%。在 10°、20°的倾斜角度下,调心锚具起主要作用,抗剪钢管痕迹

不明显。在 30°、40°的倾斜角度下,调心锚具达到极限,此时抗剪钢管发挥作用,受剪切痕迹明显。

参考文献:

[1] 何满潮. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1996.
HE M C. Theory and practice of soft rock roadway support in Chinese coal mines[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1996.

[2] 康红普,林健,张冰川. 小孔径预应力锚索加固困难巷道的研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(3):387-390.
KANG H P, LIN J, ZHANG B C. Study and application of small-diameter prestressed anchor cables for reinforcing difficult roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics

- and Engineering, 2003, 22(3): 387-390.
- [3] 康红普,王金华,林健.高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J].煤炭学报,2007(12):1233-1238.
KANG H P, WANG J H, LIN J. High pretensioned stress an intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2007(12): 1233-1238.
- [4] 吕岩,郭延华,吴超,等.唐山开滦某深部煤矿综采面顶板破断及控制研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2025,42(2):80-88.
LYV Y, GUO Y H, WU C, et al. Research on roof breakage and control of the fully mechanized mining face in a deep coal mine in Kailuan, Tangshan[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2025,42(2):80-88.
- [5] 康红普,林健,吴拥政.全断面高预应力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用[J].煤炭学报,2009,34(9):1153-1159.
KANG H P, LIN J, WU Y Z. High pretensioned stress and intensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1153-1159.
- [6] 杨军辉,赵祥,朱明.锚网索支架联合支护技术在深井巷道维修中的应用[J].河北工程大学学报(自然科学版),2009,26(3):93-96.
YANG J H, ZHAO X, ZHU M. Research on combining support technology of roadway[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2009, 26(3):93-96.
- [7] 黄乃炯,范世平. CK型速凝树脂锚固剂的锚固机理及性能[J].煤炭科学技术,1995,23(12):29-32.
HUANG N J, FAN S P. Anchoring mechanism and performance of CK type rapid-setting resin anchorage agents [J]. Coal Science and Technology, 1995, 23(12): 29-32.
- [8] 康红普.我国煤矿巷道锚杆支护技术发展60年及展望[J].中国矿业大学学报,2016,45(6):1071-1081.
KANG H P. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016,45(6):1071-1081.
- [9] 刘少伟,何亚飞,付孟雄,等.矿用树脂锚固剂固胶比与锚固性能关系[J].煤炭学报,2021,46(12):3819-3832.
LIU S W, HE Y F, FU M X, et al. Relationship between catalyst-resin mastic ratio and anchoring performance of mineral resin grout[J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(12):3819-3832.
- [10] SCHMIDT J W, BENNITZ A, TALJSTEN B, et al. Mechanical anchorage of FRP tendons—a literature review [J]. Construction and Building Materials, 2012, 32: 110-121.
- [11] 马振乾,姜耀东,杨英明,等.动力扰动下单孔夹片式锚具滑移机制研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S1):3042-3050.
MA Z Q, JIANG Y D, YANG Y M, et al. Slip mechanism of wedge and barrel anchorages under dynamic disturbance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(S1):3042-3050.
- [12] 康红普,吴拥政,褚晓威,等.小孔径锚索预应力损失影响因素的试验研究[J].煤炭学报,2011,36(8):1245-1251.
KANG H P, WU Y Z, CHU X W, et al. Tests on affecting factors for pretension loss of cables with small borehole[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8):1245-1251.
- [13] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
HE M C, XIE H P, PENG S P, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [14] CHEN Y. Experimental study and stress analysis of rock bolt anchorage performance [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(5): 428-437.
- [15] 杨仁树,李永亮,王茂盛,等.预应力锚索剪切力学特性试验研究[J].中国矿业大学学报,2018,47(6):1166-1174.
YANG R S, LI Y L, WANG M S, et al. Experimental study of shear mechanical properties of prestressed cable bolts [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018,47(6):1166-1174.
- [16] 单仁亮,全潇,黄鹏程,等.管索组合结构及其力学性能研究[J].岩土力学,2022,43(3):602-614.
SHAN R L, TONG X, HUANG P C, et al. Study on cable-pipe composite structure and its mechanical properties [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(3): 602-614.
- [17] 王卫军,罗立强,黄文忠,等.高应力厚层软弱顶板煤巷锚索支护失效机理及合理长度研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(1):17-21.
WANG W J, LUO L Q, HUANG W Z, et al. Study on supporting failure mechanism and reasonable length of anchor cable in thick soft-weak roof of high-stress coal roadway [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014,31(1):17-21.