

自膨胀管缝锚杆力学性能现场试验研究

杨正明¹, 徐帅¹, 纪旭波^{1,2}, 王瑞强^{1,2}

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 山东恒邦冶炼股份有限公司, 山东 烟台 264100)

摘要: 管缝锚杆的锚固力受管径差、岩体条件等因素影响, 导致输出锚固力波动较大。自膨胀管缝锚杆可改善常规管缝锚杆的锚固性能, 成倍提高锚杆的负载能力和吸能能力, 但其在不同岩性区域和不同安装角度下的锚固力学特性尚不明确。采用锚杆智能拉拔测试系统, 开展了在破碎软岩和完整硬岩两种极端工况下, 不同安装角度和药卷长度对自膨胀管缝锚杆力学特性的影响规律研究。结果表明: 锚杆锚固力与药卷长度线性正相关, 围岩强度越高, 锚固力增长速率越快; 相同工况下, 锚杆锚固力与安装角度正相关, 垂直安装时锚固力最大, 且围岩强度越低, 锚固力受安装角度影响越大。在两种极端岩体条件下, 与常规管缝锚杆相比, 自膨胀管缝锚杆锚固力分别提高1.88倍和3.15倍, 吸能能力分别提高143.7%和259.6%, 在滑移变形的基础上显著提高锚固效果。

关键词: 自膨胀药卷; 锚固力; 安装角度; 吸能能力; 现场拉拔

中图分类号: TD 353

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2024)07-1020-08

Field Experimental Study on Mechanical Properties of Self-swelling Split-Set

YANG Zheng-ming¹, XU Shuai¹, JI Xu-bo^{1,2}, WANG Rui-qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shandong Humon Smelting Co., Ltd., Yantai 264100, China. Corresponding author: XU Shuai, E-mail: xushuai@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The anchoring force of the split-set is affected by factors such as hole diameter difference and rock mass conditions, resulting in large fluctuations of the output anchoring force. The self-swelling split-set can improve the anchoring performance of the conventional split-set, and increase the load capacity and energy absorption capacity of the anchor. In this paper, the intelligent rockbolt pull-out test system is used to study the influence of different installation angles and roll lengths on the mechanical properties of self-swelling split-set under two extreme conditions: broken soft rock and intact hard rock. The results show that the anchoring force of the bolt is linearly and positively correlated with the length of the roll. The higher the strength of the surrounding rock, the faster the growth rate of the anchoring force. Under the same working condition, the anchoring force of the anchor is positively related to the installation angle, with the maximum anchoring force achieved when installed vertically. The lower the surrounding rock strength is, the greater the influence of the installation angle on the anchoring force is. Compared with conventional split-set, the self-swelling split-set can increase the anchoring force by 1.88 times and 3.15 times, and the energy absorption capacity by 143.7% and 259.6% under two extreme conditions, significantly improving the anchoring effect on the basis of sliding deformation.

Key words: self-swelling roll; anchoring force; installation angle; energy absorption capacity; pull-out on site

锚杆支护作为井巷工程主要支护方式,在国内外矿山被广泛应用^[1].管缝锚杆安装简单、成本低廉,安装后立即发挥作用,具有即时支护、安装高效和适应大变形等优点^[2],在金属矿山开采中被普遍采用.常规管缝锚杆由钢板卷制而成,在锚杆前端焊接挡环起到承托托盘的作用,尾部呈锥形以便安装.管缝锚杆壁厚一般为2~3 mm,沿纵向开缝宽10~20 mm,杆体外径大于钻孔孔径1~5 mm^[3].当管缝锚杆安装在钻孔中时,杆体外径大于钻孔孔径,杆体受到挤压作用,从而产生径向压力,当杆体受拉时,与孔壁间产生摩擦锚固作用^[4].

管缝锚杆安装过程中需要严格控制管径差:管径差过小,则管缝锚杆无法提供足够的锚固力;管径差过大,则锚杆安装困难^[5],且会在杆体表面产生划痕,容易造成腐蚀失效^[6].随着开采深度增加,地应力不断升高,对锚杆支护的要求越来越高^[7];而管缝锚杆对施工工艺要求高,锚固效果受岩体质量和安装角度等影响大.因此,如何降低管缝锚杆对孔径的依赖,提高管缝锚杆安装质量与安装效率是管缝锚杆现场应用亟待解决的问题^[8].

为了提高管缝锚杆的锚固力,唐春安等^[9]将锥形塞插入已经安装的管缝锚杆,使杆体产生竹节式凸起,以增加摩擦力.此外,有学者通过在安装后的管缝锚杆中加入水泥砂浆^[10]、树脂药卷^[11]等锚固剂提高管缝锚杆的承载能力,但锚固剂安装过程繁琐、困难,安装后易使管缝锚杆失去变形能力.Dayakar等^[12]则在管缝锚杆和钻孔壁之间填充黏结材料,提高了管缝锚杆的拉伸强度和剪切强度.但相关学者发现,尽管黏结材料使管缝锚杆的锚固能力增加2~3倍,但是降低其变形能力和吸能能力^[13].

Davison等^[14-15]开发出水胀式锚杆,该锚杆将钢管放入锚杆孔后用高压水使其膨胀,在膨胀过程中锚杆管壁与钻孔孔壁尽量贴合,产生了沿锚杆全长的摩擦力和自锁力,从而加固岩体.水胀式锚杆的锚固能力是传统管缝锚杆的2倍^[16],但其最大锚固力只能在安装10 d后达到,容易发生泄压失效现象,且安装工序繁琐,成本较高,限制了水胀式锚杆在现场的应用.

Xu等^[17]提出了一种自膨胀管缝锚杆.该锚杆是在常规的管缝锚杆中加入一些自膨胀药卷^[18],利用自膨胀药卷的水化反应产生径向膨胀压力,增强管缝锚杆与孔壁之间的摩擦,提高了

管缝锚杆的刚度、负载能力和能量吸收能力,起到了很好的锚固效果.但对于自膨胀管缝锚杆在不同岩性区域和不同安装角度下的锚固力学特性还未开展研究.

为了更好研究自膨胀管缝锚杆在极破碎软岩和完整硬岩两种极端工况下不同安装角度的锚固力学特性,本文依托恒邦公司腊子沟矿区极破碎矿体和辽上矿区完整硬岩中的井下支护工程,采用锚杆智能拉拔测试系统开展现场拉拔试验,研究药卷长度、安装角度、岩性对自膨胀管缝锚杆力学特性的影响规律,揭示自膨胀管缝锚杆在不同岩体质量环境和不同安装角度下的锚固力学特性,为自膨胀管缝锚杆在金属矿山支护工程应用提供理论支撑.

1 现场试验方法和方案

1.1 试验锚杆与方案

1.1.1 自膨胀管缝锚杆简介

自膨胀管缝锚杆主要由管缝杆体、挡环、自膨胀药卷、托盘及约束装置组成(图1).其中,自膨胀药卷是由热塑性材质的圆筒内部填充膨胀锚固剂制成,圆筒两端通过丝杆、垫片和螺母组成的约束装置进行约束.膨胀锚固剂主要成分包括CaO、吸水剂、缓凝剂等,在与水接触后会发生水化反应生成致密的Ca(OH)₂晶体^[19].完全反应后,在约束装置的轴向约束下,自膨胀药卷能够沿径向膨胀1.5~1.8倍^[20].

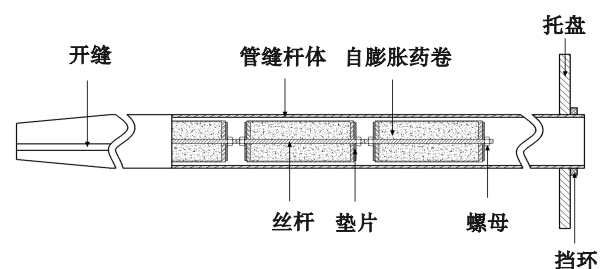


图1 自膨胀管缝锚杆结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of self-swelling split-set

在使用自膨胀管缝锚杆时,先将自膨胀药卷浸泡10~15 min,而后将自膨胀药卷装入管缝杆体内.在安装2 h后,自膨胀药卷开始逐渐反应并输出径向膨胀压力,在具有轴向约束的钻孔中,膨胀压力可以达到20~50 MPa^[18].

自膨胀管缝锚杆在安装后,利用管缝杆体提供初始锚固力,在自膨胀药卷反应后可以显著增强管壁与钻孔壁间的挤压作用,进而提供高锚固

力,并可根据实际情况调节药卷长度,使其在保证高锚固力的同时仍可发挥较强的变形能力。

1.1.2 试验方案

为了检验常规管缝锚杆锚固力,并对比分析自膨胀管缝锚杆的力学特性,研究岩体质量、药卷长度、安装角度三个因素对自膨胀锚杆锚固力的影响规律,本文测试的影响因素和水平方案如表1所示。

表1 不同影响因素测试方案

影响因素	水平
药卷长度/cm	0, 10, 20, 30, 40
安装角度/(°)	30, 45, 60, 90
岩石强度	破碎软岩、完整硬岩

测试过程中首先确定最佳药卷长度,之后选用该长度的自膨胀管缝锚杆进行不同安装角度

的影响规律试验。为了控制单一变量,在测试药卷长度对锚固力影响规律时,保持安装角度均为90°。设计完整硬岩和破碎软岩区域分别测试药卷长度试验5组、安装角度试验3组,相同工况下每组重复3次,共计测试锚杆48根。

试验锚杆为当前金属矿山常用的外径41 mm管缝杆体,壁厚2.5 mm,长度1.6 m,钻孔孔径均为40 mm。

1.1.3 试验地点

本文选取恒邦公司辽上金矿-9 m中段作为完整硬岩试验地点,该中段以锚喷支护为主,破碎区域安装管缝锚杆,BQ分级结果属于II类岩体,岩石较坚硬;选取腊子沟金矿-175 m中段为极破碎软岩试验地点,该中段以锚杆+锚网支护为主,BQ分级结果属于IV类岩体,岩体质量较差,部分区域湿度较大,有明显的片帮垮落现象。试验地点具体岩石力学参数如表2所示。

表2 试验地点及其岩石力学参数

Table 2 Test site and rock mechanical parameters

试验地点	岩性	岩石单轴抗压强度/MPa	岩石内摩擦角/(°)	岩石内聚力/MPa	岩石弹性模量/GPa	泊松比
腊子沟矿区-175 m中段56线穿脉	煌斑岩	28.6	20	36.6	25.08	0.16
辽上矿区-9 m中段7线平巷	大理岩	133.0	36	23.6	42.73	0.12

1.2 试验装置与测试方法

锚杆现场拉拔装置采用东北大学自主研发的锚杆智能拉拔测试系统^[21],如图2所示。系统主要由采集模块、加载模块及相关接驳器配件构成。使用过程中利用加载模块中的高压油源带动千斤顶作为输出动力;采用压力传感器和激光位移传感器监测锚杆受力与变形信息;通过采集模块中的分析软件对力与变形数据进行全程记录与分析。锚杆智能拉拔测试系统可提供拉拔力0~30 t,加载位移0~200 mm,具备便捷高效、采集准确的特点。



图2 锚杆智能拉拔测试系统

Fig. 2 Intelligent rockbolt pull-out test system

管缝锚杆现场试验方法如图3所示,管缝锚杆安装前先将预置拉环套入管缝锚杆,使其位于

托盘与锚杆挡环之间;而后依次安装接驳器、螺纹拉杆、反力筒、千斤顶及压力传感器等。其中拉杆与接驳器通过螺纹紧密连接,拉杆外露端采用螺母进行紧固,以消除元件间缝隙。设备使用的螺纹拉杆、接驳器和反力筒均由高刚度金属材料制成,远高于锚杆杆体拉伸刚度,使设备受力元件产生的变形可忽略不计。

当垂直(90°)岩壁安装管缝锚杆测试时,反力筒与岩壁直接接触,通过拉杆直接对杆体施加拉拔力。测试带有一定角度的管缝锚杆时,则需在反力筒和岩壁之间安装角度调节装置。该角度调节装置由2个半圆形合金板固定在空心方形垫板上组成。在使用时,方形垫板紧贴岩壁,半圆形合金板支撑反力筒保持在不同的倾斜位置,使被测锚杆与千斤顶、反力筒等设备处于同一直线方向上,从而实现不同倾斜角度的拉拔测试。

自膨胀管缝锚杆现场安装测试过程如图4所示。首先采用钻机进行凿岩钻孔,为了确保锚杆安装的倾斜角度,采用3D打印技术制作角度模具,使钻杆沿固定角度打入岩体,如图5所示。

之后开始安装锚杆,锚杆打入钻孔前需将自膨胀药卷(外径 38 mm 略小于管壁内径、单个长度 10 cm)在水中浸泡 10 min,然后取出,并将固定长度的药卷连续安装在管缝锚杆内;最后,在安装完成 48 h 后,按照图 3 所示方法进行装置安装和拉拔测试。

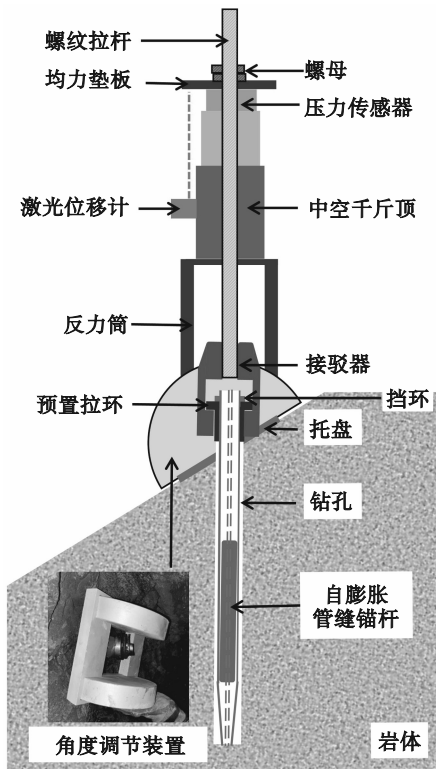


图 3 现场管缝锚杆测试方法
Fig. 3 Test method of split-set on site

现场拉拔测试过程中,通过按压油源“加载”键带动千斤顶活塞,进而对锚杆施加拉拔荷载。试验过程中,螺纹拉杆和均力垫板将载荷作用在压力传感器上,压力传感器实时采集传输锚杆所受荷载信息;位于千斤顶上的激光位移计通过监测均力垫板的位移,间接获取锚杆的变形信息。其中压力传感器精度可达 0.1 kN,激光位移传感器精度可达 0.1 mm。试验完成后,按压油源“卸载”键,收缩千斤顶。

2 完整硬岩中自膨胀锚杆锚固特性

2.1 药卷长度与锚杆锚固力关系

对辽上矿区完整硬岩范围内常规管缝锚杆(药卷长度为 0 cm)和安装 10, 20, 30, 40 cm 长度的自膨胀管缝锚杆进行现场拉拔测试,试验结果如图 6 所示。

药卷长度为 0, 10, 20 cm, 锚杆拉拔力-位移曲线均出现在前期拉拔力呈线性增长的现象,在分别达到 16, 37, 50 kN 时拉拔力略微下降,之后拉拔力趋于平缓,表明锚杆杆体已经克服了与钻孔壁间的最大静摩擦力开始发生滑移。测试结果显示,辽上矿区完整硬岩中常规管缝锚杆平均锚固力为 13.9 kN, 安装药卷长度分别为 10, 20 cm 时,锚杆平均锚固力分别增长至 26, 40 kN, 锚固力分别提高了 0.87, 1.88 倍。可见,自膨胀药卷提高了锚杆锚固能力,并仍保留了管缝锚杆的变形能力。

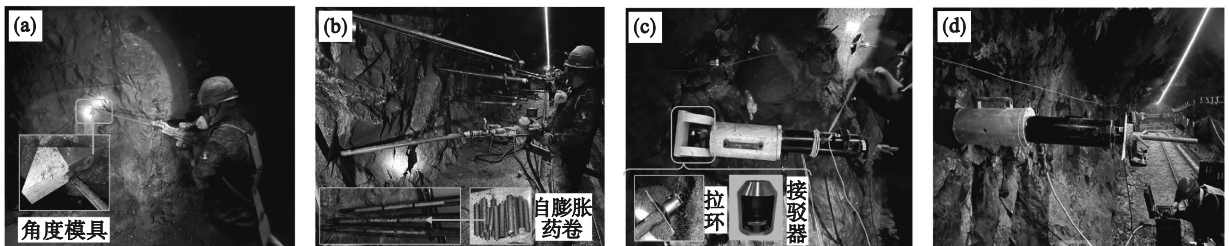


图 4 现场管缝锚杆安装测试过程
Fig. 4 Installation and test process of split-set on site
(a) — 凿岩钻孔; (b) — 锚杆安装; (c) — 装置安装; (d) — 现场拉拔测试。

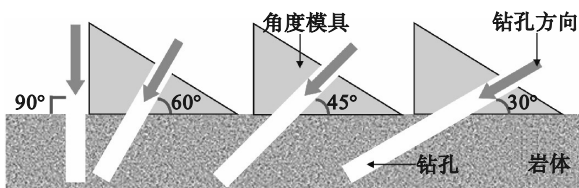


图 5 不同钻孔角度示意图
Fig. 5 Schematic diagram of different drilling angles

安装 30, 40 cm 长度药卷时,拉拔力-位移曲线同样出现在一定位移范围内拉拔力呈线性增

长的现象,但当拉拔力达到 60~70 kN 之间时,锚固力急剧下降为 0 kN,表明拉拔力达到了锚杆杆体的强度极限。此时,锚杆由滑动失效转变为断裂失效,拉力由杆体的抗拉强度控制。

图 7 显示了安装不同自膨胀药卷长度与锚杆吸收能量之间的关系。锚杆吸收的能量通过式 (1) 计算得到。

$$E = \int_0^x F(l)dl. \quad (1)$$

式中: E 为锚杆吸能总量; $F(l)$ 为锚杆的滑移阻力; X 为锚杆总位移量.

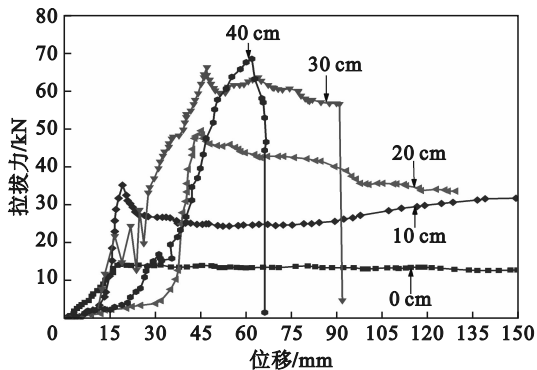


图6 辽上矿区不同装药长度现场拉拔测试结果

Fig. 6 Field pull-out test results of different charge lengths in Liaoshang mining area

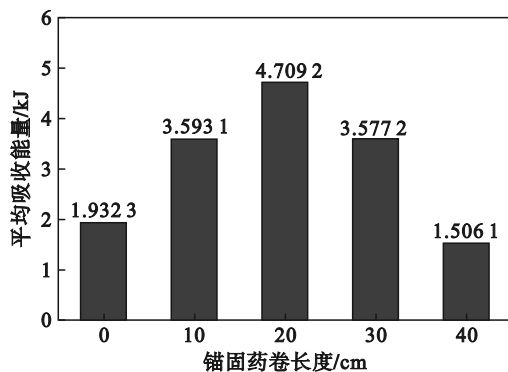


图7 辽上矿区不同药卷长度吸收能量

Fig. 7 Absorbed energy of different roll lengths in Liaoshang mining area

当药卷长度小于30 cm时,吸收能量随药卷长度逐渐增加.当药卷长度为20 cm时,锚杆吸收能量达到最大值4.7 kJ.一旦药卷长度超过20 cm,吸能能力就会随着药卷长度的增加而迅速下降.原因是长度超过20 cm后锚杆虽然发挥了较高的锚固力,但也丧失了变形能力,而只有较大的位移和较高的荷载才能最大限度吸收能量.

综上所述,辽上矿区完整硬岩中自膨胀管缝锚杆的最优药卷长度为20 cm.

2.2 安装角度与锚杆锚固力关系

在确定辽上矿区完整硬岩中最佳药卷长度20 cm基础上,对不同安装角度的自膨胀管缝锚杆进行拉拔试验,结果如图8所示.在安装角度分别为30°,45°,60°时,其平均锚固力分别为33.2,33.6,35.1 kN.随着安装角度的逐渐增大,自膨胀管缝锚杆的拉拔力呈现逐渐上升的趋势.

在安装角度为30°和45°时,锚杆锚固力基本相同.而在安装角度为60°,90°时锚固力相较于

30°分别提高了5.7%,22.5%,可见,垂直安装可以保证锚杆发挥较高的锚固作用.

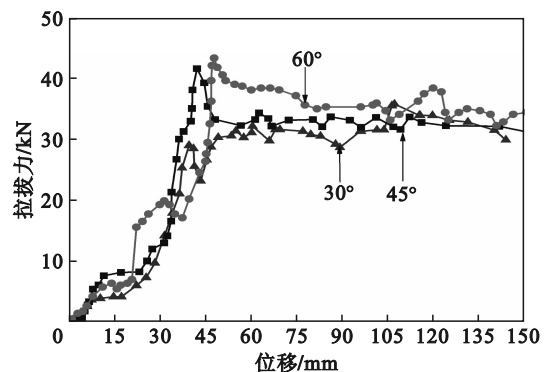


图8 辽上矿区不同安装角度拉拔试验结果

Fig. 8 Pull-out results of different installation angles in Liaoshang mining area

3 极破碎软岩中自膨胀管缝锚杆锚固特性

3.1 药卷长度与锚杆锚固力关系

腊子沟矿区极破碎岩体区域内测试不同药卷长度自膨胀管缝锚杆拉拔力,结果如图9所示.常规管缝锚杆平均锚固力仅为9.2 kN,而在安装自膨胀药卷10,20,30 cm后,锚固力分别增长至15.6,21.3,38.2 kN,锚固力分别提高了0.69,1.31,3.15倍.因此,自膨胀药卷的存在可以显著增强锚杆的锚固性能.而在药卷长度为40 cm时,拉拔力在达到60~70 kN时急剧下降为零,不再出现拉拔力随位移增加保持恒定的现象,此时锚杆杆体发生撕裂破断的现象,表明自膨胀药卷提供的锚固力达到了锚杆杆体极限荷载.

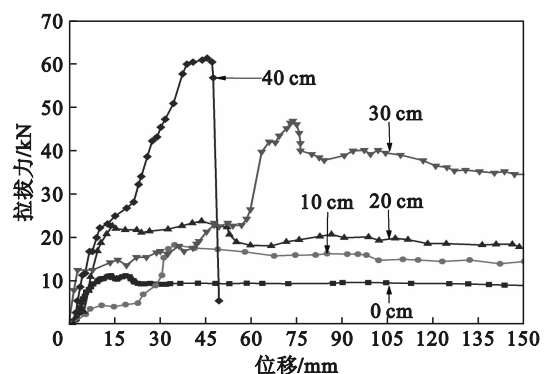


图9 腊子沟矿区不同药卷长度自膨胀管缝锚杆测试结果

Fig. 9 Test results of self-swelling split-set with different roll lengths in Lazigou mining area

图10显示了腊子沟矿区安装不同自膨胀锚固药卷长度与锚杆吸收能量之间的关系.当药卷

长度小于 40 cm 时,吸收能量随药卷长度逐渐增加.当药卷长度为 30 cm 时,锚杆的吸收能量达到最大值 4.420 4 kJ.一旦药卷长度超过 30 cm,吸能能力就会随着药卷长度的增加而迅速下降,在 40 cm 时杆体发生破断失效.

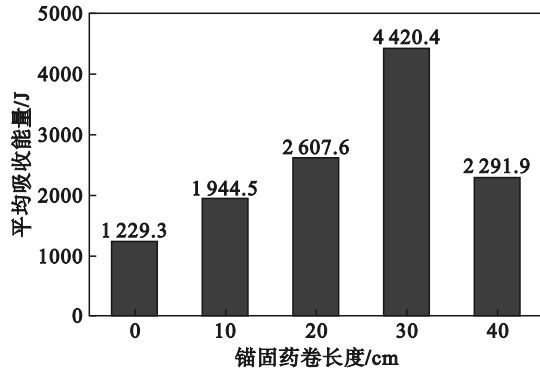


图 10 腊子沟矿区不同药卷长度吸收能量统计

Fig. 10 Statistics of absorbed energy of different roll lengths in Lazigou mining area

综上所述,腊子沟矿区自膨胀管缝锚杆的最优药卷长度为 30 cm.

3.2 安装角度与锚杆锚固力关系

腊子沟矿区在确定最优药卷长度 30 cm 基础上,开展不同安装角度对自膨胀管缝锚杆锚固力影响试验,结果如图 11 所示.在安装角度分别为 30°,45°,60°时,其平均锚固力分别为 26.9,29.3,31.9 kN.随着安装角度的逐渐增大,腊子沟矿区自膨胀管缝锚杆的拉拔力呈现逐渐增长的趋势.

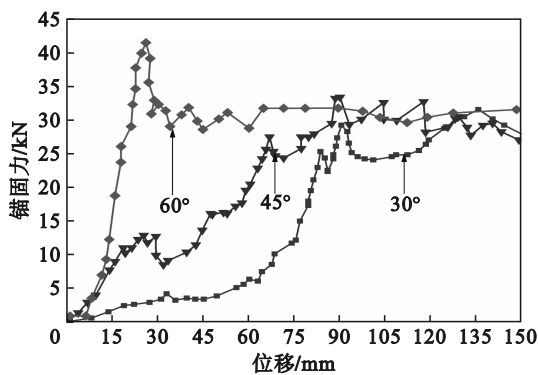


图 11 腊子沟矿区不同安装角度拉拔试验结果

Fig. 11 Pull-out results at different installation angles in Lazigou mining area

相较于安装角度为 30°时,在安装角度分别为 45°,60°,90°时,自膨胀管缝锚杆锚固力分别提高了 11.4%,18.5%,42.0%.因此,垂直安装更有利于锚杆锚固力的发挥.

4 讨论与分析

4.1 药卷长度对自膨胀管缝锚杆锚固力影响

不同药卷长度自膨胀管缝锚杆的锚固力 F 变化特征如图 12 所示.数据点的误差条表示同一工况下重复性试验数据的标准差,下文相同.

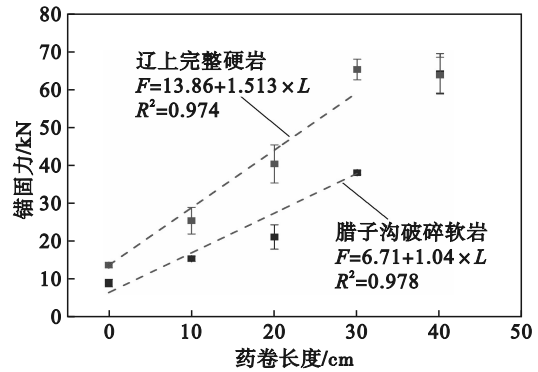


图 12 不同药卷长度拉拔试验结果分析

Fig. 12 Analysis of pull-out results with different roll lengths

由图 12 可知:随着锚固药卷长度 L 的增加,自膨胀管缝锚杆平均锚固力 F 逐渐增大.这是因为药卷长度越长,带有径向膨胀压力区域与围岩的接触范围越大,锚固界面的抗剪强度增大,拉拔过程中锚固系统整体承载力随之增大.

自膨胀管缝锚杆的锚固力与药卷长度总体表现为线性增大的关系,但由于试验段岩性的不同,其锚固性能和线性趋势存在差异.试验段分别为完整硬岩(辽上矿区岩性为大理岩与石英岩,单轴抗压强度为 133.0 MPa)与破碎软岩(腊子沟矿区岩性为煌斑岩与混合花岗岩,单轴抗压强度为 28.6 MPa)时,锚固力-药卷长度曲线的斜率分别为 1.513,1.04,表明在完整硬岩中自膨胀药卷对锚杆锚固力的提高能力优于破碎软岩.

4.2 安装角度对自膨胀管缝锚杆锚固力影响

选取辽上矿区和腊子沟矿区优化长度后的自膨胀管缝锚杆为对象,研究安装角度对锚固力的影响,得到不同安装角度下自膨胀管缝锚杆锚固力-位移曲线如图 13 所示.

由图 13 可知:1) 随着安装角度的逐渐增大,自膨胀管缝锚杆的锚固力逐渐增长,在安装角度为 90°时达到最大值.其中角度为 30°,45°和 60°时锚固力增长比例较小,在安装角度为 90°时,相比于 30°锚固力分别提高了 22.5%,42.0%.因此在锚杆安装过程中应当尽量保证 90°安装角,而在狭窄空间中应当保证较大的偏斜角度,从而保证

锚杆仍可提供较高的锚固力。

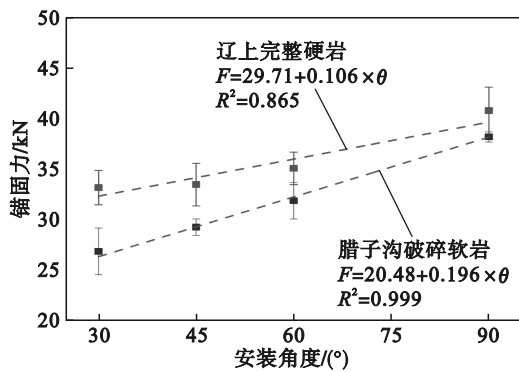


图 13 不同安装角度拉拔试验结果分析

Fig. 13 Analysis of pull-out test results at different installation angles

2) 在不同岩性区域,安装角度对锚杆锚固力的影响大小存在差异.在辽上矿区和腊子沟矿区锚固力-安装角度的线性斜率分别为 0.106, 0.196,表明在锚杆长度、直径等均相同条件下,安装角度对硬岩中的锚杆锚固力影响较小,对破碎软岩中锚杆锚固力影响较大。

4.3 试验锚杆破坏形式

锚杆拉拔试验前,采用红色喷漆标记杆体和岩壁的相对位置,在拉拔测试后观察、测量红色标记的位置.通过现场观测,在拉拔作用下自膨胀管缝锚杆在不同工况下的失效形式如图 14 所示,主要表现为以下 2 种情况:①锚杆杆体发生明显滑移,并持续提供锚固力,杆体保持完整,未发生破断现象;②杆体发生撕裂、破断,表现为在靠近挡环处呈环状破断或撕裂,挡环失去对托盘的承载作用。

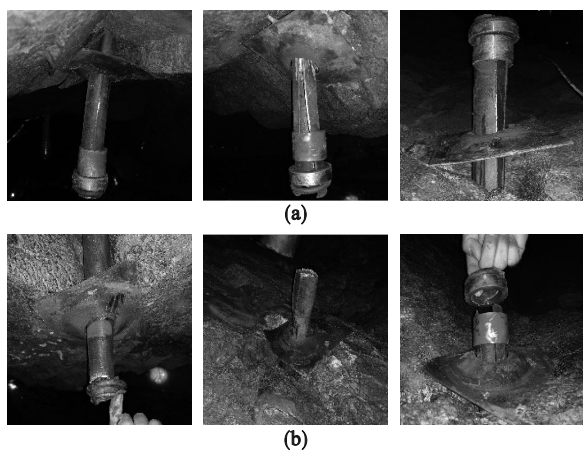


图 14 自膨胀管缝锚杆拉拔后现象

Fig. 14 Phenomenon of self-swelling split-set rock bolt after pull-out

- (a)一拉拔后的管缝锚杆开始发生滑移;
(b)一拉拔后的管缝锚杆挡环与杆体连接处断裂。

5 结 论

1) 随自膨胀药卷长度增加管缝锚杆锚固能力显著提升,在完整硬岩和极端软破岩体区域分别安装 20, 30 cm 长的药卷后,管缝锚杆的锚固力分别提高了 1.88 倍和 3.15 倍,吸能能力提高了 143.7% 和 259.6%。

2) 随锚杆安装角度增大,管缝锚杆的锚固力逐渐增大;当安装角度从 30° 增大为 90°,锚固力在辽上和腊子沟矿区可分别提高 22.5%, 42.0%, 垂直安装有利于锚杆锚固力的增强。

3) 不同锚固区域的岩性对锚杆锚固力有一定影响;辽上矿区自膨胀锚固药卷在提高锚杆锚固强度方面的作用优于腊子沟矿区;辽上矿区锚杆锚固力受安装角度的影响不大,但安装角度对腊子沟矿区锚杆锚固力有很大的影响。

4) 基于自膨胀管缝锚杆装药长度和安装角度在完整硬岩和极软破碎岩体条件下的优化结果,可指导同类岩石质量下自膨胀管缝锚杆应用的技术参数选择.并根据具体使用环境适当调节药卷长度和锚杆安装角度,以保证自膨胀管缝锚杆在巷道支护中发挥更优的力学性能。

参考文献:

- [1] 康红普.我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):1-30.
(Kang Hong-pu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 1-30.)
- [2] He L, An X M, Zhao X B. Development of a unified rock bolt model in discontinuous deformation analysis [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51: 827-847.
- [3] Scott J J. Friction rock stabilizers: a new rock reinforcement method [C]//The 17th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Snow Bird, 1976: ARMA-76-0559.
- [4] 杨海清,周小平,张永兴.管缝式锚杆在拉拔荷载作用下受力分析模型[J].岩土力学,2007,28(sup1):236-240.
(Yang Hai-qing, Zhou Xiao-ping, Zhang Yong-xing. Analytical model for split-set rock bolt under pull-out force [J]. *Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28 (sup1): 236-240.)
- [5] Komurlu E, Demir S. Length effect on load bearing capacities of friction rock bolts [J]. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2019, 63(3): 718-725.
- [6] Davis R L. Split-set rock bolt analysis [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1979, 16(1): 1-10.
- [7] 靖洪文,苏海健,孟波,等.巷道锚杆锚固力学特性现场试验研究[J].中国矿业大学学报,2022,51(1):314-321.
(Jing Hong-wen, Su Hai-jian, Meng Bo, et al. Field test research on anchorage mechanical characteristics of

- roadway bolt [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2022, 51(1):314-321.)
- [8] Komurlu E, Celik A G, Gunes İ. Use of a new insertion apparatus for improving performances of the friction rock stabilizers [J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2022, 39(2):413-420.
- [9] 唐春安, 赵兴东, 王维纲, 等. 新型全长多点楔胀式管缝锚杆(竹节式锚杆)的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3):465-468.
(Tang Chun-an, Zhao Xing-dong, Wang Wei-gang, et al. Testing study on a new kind of fully-anchored and multi-wedge slotted tube bolt (bamboo-like bolt) researched in laboratory [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3):465-468.)
- [10] Thompson A G. Rock support and reinforcement practice in mining[M]. London: CRC Press, 1999.
- [11] Ciavatta A. Oblate friction rock stabilizer and installation lubricating cement utilized therewith: 4, 430, 025[P]. 1984-02-07.
- [12] Dayakar P, Raman K V, Raju K V B. Study on permeation grouting using cement grout in sandy soil[J]. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2012, 4:5-10.
- [13] Villaescusa E, Wright J. Permanent excavation support using cement grouted split set bolts[C]//Proceedings International Symposium on Rock Support. Lillehammer: Norwegian Society of Chartered Engineers, 1997:660-670.
- [14] Davison G R, Fuller P G. Investigation of expanding Split Sets[C]//Ground Support 2013: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013:163-170.
- [15] Davison G R. Development of industry-friendly rockbolts [C]//SHIRMS 2008: Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2008:579-587.
- [16] Li C C. Analysis of inflatable rock bolts[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(1):273-289.
- [17] Xu S, Yang Z M, Cai M, et al. An experimental study on the anchoring characteristics of an innovative self-swelling split-set[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 112:103919.
- [18] Xu S, Hou P Y, Li R R, et al. An experimental study on the mechanical properties and expansion characteristics of a novel self-swelling cartridge for rock breakage [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(2):819-832.
- [19] Kim K J, Cho H K, Sohn D W, et al. Prediction of the minimum required pressure of soundless chemical demolition agents for plain concrete demolition [J]. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 2018, 31:251-258.
- [20] De Silva V R S, Ranjith P G, Perera M S A, et al. The effect of saturation conditions on fracture performance of different soundless cracking demolition agents (SCDAs) in geological reservoir rock formations [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 62:157-170.
- [21] 徐帅, 郭玟志, 纪旭波, 等. 基于智能拉拔测试系统的锚杆锚固力现场高效评测方法[J]. *金属矿山*, 2022(5):56-61.
(Xu Shuai, Guo Wen-zhi, Ji Xu-bo, et al. Rapid field evaluation of bolt anchoring force based on intelligent pull-out test system [J]. *Chinese Journal of Metal Mine*, 2022(5):56-61.)