



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

吸能锚杆支护设备研究现状及展望

肖晓春 徐政茂 樊玉峰 张文萍 李子阳 陈晓燕

引用本文:

肖晓春, 徐政茂, 樊玉峰, 等. 吸能锚杆支护设备研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 54–64.

XIAO Xiaochun, XU Zhengmao, FAN Yufeng. Research status and prospects of energy-absorbing anchor support equipment[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 54–64.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0443>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于能量计算的冲击地压巷道三级吸能支护参数确定

Determination of three-level energy absorbing support parameters in rockburst roadway based on energy calculation

煤炭科学技术. 2021, 49(6): 72–81 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/70954a33-dfbf-4be0-9cdc-52841bf37470>

高冲击韧性锚杆吸能减冲原理及应用研究

Study on principle application of energy absorption and bump reduction of high impact toughness rock bolt

煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4d9f9400-f59b-4fad-b21f-d3822db291b9>

基于光纤光栅技术的巷道支护锚杆受力监测

Stress monitoring of roadway supporting bolt based on fiber bragg grating technology

煤炭科学技术. 2022, 50(6): 61–67 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/cac4bb6d-a1c6-4140-a0f6-538c35dd0a36>

巷道防冲吸能钢管混凝土拱架支护性能研究

Study on the support performance of anti-impacting and energy-absorbing concrete-filled steel tube arches in roadways

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 53–62 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0487>

矿井火灾智能监测预警技术近20年研究进展及展望

Research progress and prospect of mine fire intelligent monitoring and early warning technology in recent 20 years

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 154–177 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-2016>

张拉预紧式锚杆支护系统高能强化锚固机理研究

Study on high-energy strengthening anchor mechanism of tension pre-tightening bolt support system

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 38–44 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

肖晓春, 徐政茂, 樊玉峰, 等. 吸能锚杆支护设备研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 54–64.

XIAO Xiaochun, XU Zhengmao, FAN Yufeng, *et al.* Research status and prospects of energy-absorbing anchor support equipment[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 54–64.

吸能锚杆支护设备研究现状及展望

肖晓春^{1,2}, 徐政茂^{1,2}, 樊玉峰^{1,2}, 张文萍^{1,2}, 李子阳^{1,2}, 陈晓燕^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 辽宁省矿山环境与灾害力学重点实验室, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 吸能支护是地下岩体工程领域中用于提高围岩稳定性和避免冲击地压等灾害发生的一种重要的防治技术。吸能支护技术的核心原理是通过特定的结构设计, 使支护体系在岩体发生位移或变形时能够有效吸收或消耗能量, 从而减少由冲击载荷引发的工程破坏和事故。吸能锚杆是吸能支护的一种常见形式, 此技术通过锚杆将表面围岩与深部稳定岩体相结合, 并在围岩内部产生预应力吸收或耗散能量从而避免矿山灾害的发生。吸能锚杆这种柔性支护方式适用于多种环境的巷道支护, 现已被广泛应用于矿山灾害的防治。综述自 1968 年以来 30 余种具有代表性意义的吸能锚杆设计方式, 以结构和材料 2 大类型为切入点进行划分, 着重分析 8 种典型吸能锚杆的工作原理与设计优势, 并以此指出现有吸能锚杆支护在应用中存在的安全性、智能性等方面的不足。结合前人研究成果与目前深部矿井支护高强度与智能化等需求, 提出一种智能预警负泊松比结构吸能锚杆。该锚杆利用负泊松比吸能结构实现增阻效果, 具有双向恒阻吸能与双向监测预警等特性, 能够满足复杂的非线性软岩巷道强阻支护、可视化预警等需求, 有助于加快支护体系一体化, 促进安全、智慧矿山的发展。最后, 对吸能锚杆支护设备的优化革新趋势进行了展望。

关键词: 矿山灾害; 巷道支护; 吸能锚杆; 监测预警; 智慧矿山

中图分类号: TD35

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)01-0054-11

Research status and prospects of energy-absorbing anchor support equipment

XIAO Xiaochun^{1,2}, XU Zhengmao^{1,2}, FAN Yufeng^{1,2}, ZHANG Wenping^{1,2}, LI Ziyang^{1,2}, CHEN Xiaoyan^{1,2}

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Mining Environment and Disaster Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Energy-absorbing support is an important prevention and control technology in underground rock engineering to enhance the stability of surrounding rock and prevent disasters such as rock burst. The core principle of energy-absorbing support technology is to effectively absorb or dissipate energy through specific structural designs when the rock mass undergoes displacement or deformation, thereby reducing engineering failure and accidents caused by impact loads. Energy-absorbing bolts are a common form of energy-absorbing support. This technology combines the surface surrounding rock with the deep stable rock mass through bolts and generates prestress within the surrounding rock to absorb or dissipate energy and prevent mine disasters. This flexible support method is suitable for the support of various environments in tunnel and has been widely used in the prevention and control of mine disasters. This investigation reviews over 30 representative energy-absorbing bolt designs since 1968, classifying them into two major types: structure and material. It focuses on analyzing the working principles and design advantages of eight typical energy-absorbing bolts and points out the deficiencies in the application of existing energy-absorbing bolt support in terms of safety and intelligence. Combining the valuable research results of predecessors with the current demands of high-strength and intelligent support in deep mines, an intelligent early warning negative Poisson's ratio structure energy-absorbing bolt is proposed. This bolt utilizes a negative Poisson's ratio energy-absorbing structure to achieve an increased resistance effect and has the characteristics of bidirectional constant resistance energy absorption and bidirectional monitoring and early warning. It can meet the demands of strong resistance support and visual early warning in complex nonlinear soft rock tunnel, which is conducive to accelerating the integration of support systems and promoting the development of safe and intelligent mines. Finally, this

收稿日期: 2024-04-09

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2024-0443

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274203, 51974186)

作者简介: 肖晓春(1979—), 男, 内蒙古化德人, 教授, 博士。E-mail: xxc7902@163.com

study provides an outlook on the optimization and innovation trends of energy-absorbing bolt support equipment.

Key words: mine disaster; tunnel support; energy absorbing anchors; monitoring and early warning; intelligent mine

0 引言

深部资源的开采对于国家能源安全具有深远意义。随着对能源需求量的增加,目前全球许多金属及煤炭矿山开采深度已经相继进入深部资源开采状态^[1-2]。其中瑞士、加拿大、澳大利亚、中国及南非等国家的金属矿开采深度很多已经超过 1 000 m,有的甚至超 3 000 m^[3]。随着矿产资源开采逐步向深部发展,地底各类岩体所处应力环境日趋复杂,高地应力与岩体滑移等现象导致各种工程灾害日益增多^[4-5],矿井冲击地压和软岩大变形等地质灾害对深部资源的安全高效开采造成了巨大威胁^[6-7]。

人们使用锚杆的最初目的是想“用钉子把东西钉住”一样的方法,防止煤矿层状地层的顶板沉降^[8]。锚杆支护是以锚杆为主体的支护结构的总称,主要包括锚杆、锚喷、锚喷网等支护形式,其作为一种柔性支护方式在避免井下巷道冲击地压事件发生的工作中发挥着重要作用。锚杆支护以结构简单,施工方便、成本低和对工程适应性强等特点^[9-10],目前已被广泛用于我国矿山巷道支护^[11],在一些矿区的锚杆支护巷道比例达到 90% 以上,有些矿井甚至达到了 100%,我国煤炭行业每年地下锚杆用量约 2 亿根^[12]。

通过深入研究吸能锚杆支护设备的演变历史和工作机理,综合分析了不同类型锚杆的工作原理与优势。基于这些分析,笔者提出了一种新型的智能预警负泊松比结构吸能锚杆,该新型锚杆适用于环境复杂的非线性软岩巷道支护,具备双向恒阻吸能和双向监测预警的能力,对于矿山巷道支护和预警系统的集成发展具有重要意义。

1 吸能锚杆发展历程与分类

1.1 吸能锚杆发展历程

1872 年,英国北威尔士一家采石场首次使用锚杆支护解决巷道变形问题,此技术因其安全性、经济性和便利性而逐渐在全球得到广泛应用^[9]。1968 年,COOK 等^[13]提出屈服锚杆的概念,并将其用于南非金矿,取得了较好的支护效果。1982 年,CHARETTE 等^[14]研发了一种 Swellex 锚杆,其工作原理是通过高压注水使杆体发生膨胀,从而使杆体和围岩密切贴合吸收围岩变形能量,Swellex 锚杆成功应用于澳大利亚 Big Bell 矿并取得良好的支护效益。1992 年,

WINDSOR^[15]首次提出理想锚固装置的概念,理想的锚固装置应该既有足够的强度,又有良好的变形特性,为后人的锚杆研发工作提供了良好的指导性意义与规范性标准。1995 年,Garford Pty 公司研发了一种 Garford 锚杆,锚箍的内径小于光滑杆柄的直径,利用锚杆杆体与锚箍之间的摩擦提供工作阻力,吸收围岩变形能量^[16]。

1956 年,我国开始引入锚杆支护技术用于巷道支护,但由于煤层巷道围岩松软、变形量大,支护技术要求高,且相关理论、设计、材料、机具和检测手段不完善,导致发展缓慢^[17]。1987 年,何亚男等^[18]研发了一种挤压式可拉伸吸能锚杆,利用杆体拉力将压缩筒压缩和挤出套筒收缩部,从而使锚杆既具有一定的锚固力又能拉伸一定距离。1991 年,孙钧院士等^[19]为解决马鞍山铁矿尾矿开采中的支护难题,研究了一种屈服锚索和屈服锚杆,以供在不同的地质情况下选用,并在实际应用中取得了良好的支护效果。同年,何亚男等^[20]针对锚杆螺纹段强度低而经常发生破坏的问题,提出应用 Q235 圆钢加工 H 型杆体可延伸增强锚杆,该 H 型锚杆主要特点是杆体、锚头和锚尾由同规格、同材质且延伸率较大的圆钢制成,具有更加出色的锚固性能和支护能力。1993 年,高延法等^[21]提出一种用于软岩巷道支护的柔刚性可伸缩锚杆,杆体与锚固管之间发生相对位移,通过压缩弹簧提供支护反力与大变形能力,特点是结构简单,伸缩量大,锚固力大。1994 年,冯志刚等^[22]提出一种可伸缩胀管式锚杆,具有随岩壁变形在一定范围内自由伸缩的性质,起到了释放一定量应变能的作用。1999 年,葛修润院士等^[23]研发了一种砂固结内锚头预应力锚杆,该锚杆采用天然砂作为锚固材料,锚固力来源于砂膨胀后与岩壁产生的磨擦力,安装后可快速、及时地施加预应力,初锚力大,能够在早期及时地控制围岩变形。

2000 年以后随着矿山开采逐步向地底深部发展,锚杆支护设备的研究迎来热潮,表 1 为 16 种 2000 年后较典型的吸能锚杆支护设备。

由表 1 可知,吸能锚杆的吸能方式主要来源于 2 个方面:依靠杆体机械结构的摩擦、压缩或杆体材料自身强度。结构方面主要通过杆体与摩擦套筒、吸能衬里管、波纹管或高强弹簧等吸能构件之间的摩擦或压缩来实现吸能,工作时杆体发生相对位移与吸能构件间产生摩擦效果或使吸能构件压缩变形

表 1 2000 年后典型吸能锚杆
Table 1 Typical energy-absorbing anchors after 2000

发明人	功能类型	吸能原理	吸能类型
CHARETTE等 ^[24]	Roofex锚杆	利用能量吸收部件中的销钉与杆体间的摩擦提供工作阻力	结构摩擦型
李铀等 ^[25]	一种适用于大变形支护的新型锚杆	通过一种锥形楔体在锚杆伸长时提升锚杆的拉拔力	
何满潮等 ^[6]	HMG型恒阻大变形锚杆	不但可以提供较大的支护阻力和结构变形量，而且具有恒阻力学特性	
潘一山等 ^[26]	一种矿用让位摩擦式吸能防冲锚杆	用波纹管与杆体摩擦吸能，并设置杆端挡块，施工结束后挡块未损坏可继续使用	
王斌等 ^[27]	可用于岩爆灾害的动静组合锚杆	对可伸长杆体两端进行锚固，将可伸长构件置于弹性区和破裂区边界附近，锚杆既能提供一定的变形空间，破裂区全长锚固的锚杆又能够对层裂岩体提供补强作用	结构压缩型
韩军等 ^[28]	一种大变形螺纹钢锚杆	通过优化设计螺纹钢锚杆肋间距参数，提高了锚杆-锚固剂界面受平行剪切和剪胀滑移作用下的吸能峰值	
唐治等 ^[29]	一种让位缓冲吸能防冲锚杆	防冲构件通过塑性变形直接耗散一部分围岩冲击能量，其变形空间给煤岩提供了一定的能量释放空间，间接耗散其余围岩冲击能量	
齐永正等 ^[30]	一种负泊松比锚杆支护装置	三段锚杆伸长变形带动波形板-圆柱钢管结构从水波形渐渐伸平，波形板-圆柱钢管结构比未伸平时的高度高，达到结构的拉胀负泊松比效应	
王阁 ^[31]	一种可延伸锚杆	锚杆尾部增加一种让压管，通过让压管的变形使锚杆适应围岩变形	结构摩擦与压缩型
赵宝友等 ^[32]	一种扩径挤压摩擦锚杆锚索结构	通过锚杆胀管器或锚索胀管器与套管扩径挤压、摩擦产生恒阻力，通过锚杆胀管器或锚索胀管器的相对滑移提供变形量	
CHEN等 ^[33]	一种用于地底深部围岩变形控制的恒阻大变形锚杆	利用材料负泊松比效应实现杆体结构大变形达到恒阻支护作用	
钟紫蓝等 ^[34]	一种基于负泊松比结构理论的锚杆装置	利用了负泊松比结构理论，在波纹管中加入撑杆，使得在钢绞线在支护工作受到轴向拉力时，其撑杆可以推动波纹管上下分离，以此增加波纹管与岩层内土体间的压力，增加锚杆切向摩擦力，达到更好的支护增阻效果	
LI等 ^[35]	D型锚杆(D-bolt)	利用锚固结构间杆体的伸长来吸收围岩变形能	杆体材料型
KNOX等 ^[36]	一种消能锚杆	由杆体、梨形锚固结构、托盘等组成，利用杆体的变形来吸收围岩能量	
李鹏 ^[37]	一种吸能-抗震锚杆	通过拉直吸能段弯曲杆体来吸收围岩变形的能量	
唐治等 ^[38]	一种大变形玻璃钢锚杆	在易折断部位增加金属大变形吸能构件以增加玻璃钢锚杆的延长率	

从而产生支护效果。材料方面主要通过使用玻璃钢、碳纤维等高强度复合材料使杆体具有较强的受载性能与抵抗屈服变形的能力,并且通过改变杆体形状成波浪状等方式使高强度锚杆具有一定的伸长空间,

以增加其吸能效果。

对现有锚杆设计及工作原理进行整合,选取并排列 8 种较典型的锚杆以更好突出锚杆支护设计方式的发展趋势(图 1)。由图 1 可知,随着开采深度的

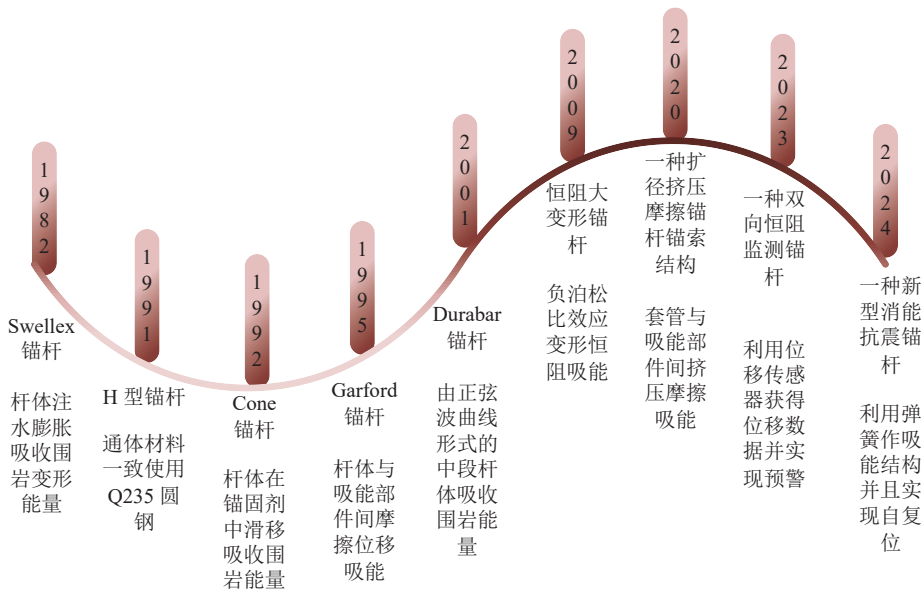


图 1 典型锚杆发展历程
Fig.1 Typical anchors development history

增加,围岩变形速度加快,应力增加,变形形态趋于复杂,导致支护难度增强,一种新型负泊松比结构由于其出色的力学性能开始被应用于吸能锚杆,负泊松比结构具有很高的韧性和强度,能够在受到外力作用时产生较大的变形,吸收更多的能量。此外,具有监测预警作用的吸能锚杆也得到了广泛关注,目前主要的预警方式是通过目测托盘或杆体的变形情况来判断锚杆受力情况,达到预警的目的,预警锚杆在提供支护能力的同时还可以监测巷道内部围岩的应力变化,提前预警潜在的危险,促进了矿山开采的安全发展。

1.2 吸能锚杆的分类

根据现存吸能锚杆的工作原理,可以大致将其分为 2 类:结构型吸能锚杆与材料型吸能锚杆。其中,结构型吸能锚杆按吸能方式的不同又可分为结构摩擦型吸能锚杆、结构压缩型吸能锚杆、结构摩擦与压缩型吸能锚杆。

1.2.1 结构摩擦型吸能锚杆

1992 年 JAGER 等^[39]研发了 Conebolt,它是首个用于实际的让压吸能锚杆,同年 Conebolt 被用于南非的矿山支护,标志着锚杆技术向着能够适应复杂地质条件,提供更为安全和高效的方向发展。Conebolt 由杆体和垫板 2 部分组成,杆体锚固端被设计成锥形,在受到围岩压力时,锥形末端在锚固剂中犁动吸收围岩变形带来的能量,同时锚杆杆体变形伸长来减缓围岩变形(图 2)。2007 年 DURASET 等^[40]的锚杆静力学试验中,直径 22 mm 的 Conebolt 最大变形量达到 600 mm,最大支护阻力为 150 kN;直径 16 mm 的 Conebolt 最大变形量达到 500 mm,最大支护阻力为 100 kN,静力学曲线如图 3 所示。但是, TANNANT 和 BUSS^[41]在试验中发现其在高强度注浆体中的最大变形量只有 100 mm。Conebolt 所提供的支护阻力略显不足且性能不够稳定,在后来的实际应用中,需要根据不同的地质情况对其进行改进。

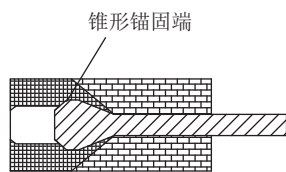


图 2 Conebolt 结构示意图^[42]
Fig.2 Conebolt structure schematic^[42]

2009 年何满潮院士等^[43]研发了恒阻大变形锚杆,是首个利用负泊松比效应的锚杆,主要利用锥体

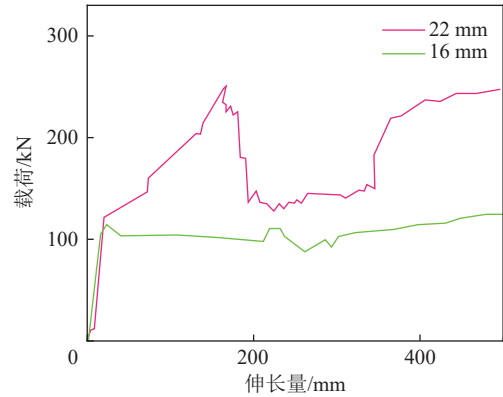


图 3 Conebolt 静力学曲线^[40]

Fig.3 Conebolt hydrostatic curves^[40]

结构与套管间的摩擦做功吸收能量,依靠恒阻装置的结构变形来抵抗岩体的变形破坏,其在静力学试验中最大伸长量可达 1 050 mm(图 4)。恒阻大变形锚杆在轴向伸长的同时,套管内锥体结构横截面会产生膨胀现象,提高了锚杆的支护能力,具有高恒阻力、大变形能力。诸多学者的试验研究结果表明^[44],恒阻大变形锚杆的技术参数达到恒阻力 150 kN,可适应围岩变形量在 0.3 ~ 1.0 m,其静力学曲线如图 5 所示。恒阻大变形锚杆于 2011 年在四川省开始推

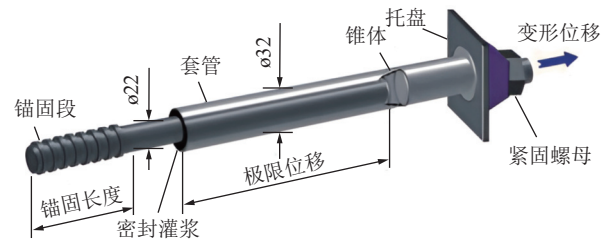


图 4 恒阻大变形锚杆结构示意图^[45]

Fig.4 Constant resistance large deformation anchor structure schematic diagram^[45]

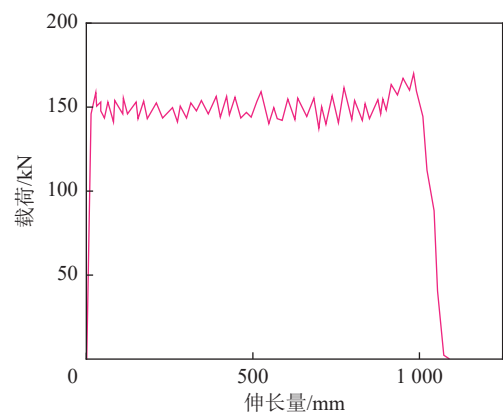


图 5 恒阻大变形锚杆静力学曲线^[44]

Fig.5 Constant resistance large deformation anchor static curve^[44]

广,为后来的负泊松比吸能锚杆研发提供了良好的指导性意义。

1.2.2 结构压缩型吸能锚杆

2004 年中科院武汉岩土力学研究所的郑是立等^[46]研发了一种增阻高强预应力锚杆,该锚杆的设计特点是在螺母和托板之间设置 1 组增阻装置,增阻装置由管状壳体和可楔入管状壳体的柱状楔块构成,柱状楔块楔入一端的壳体侧壁上设有胀缝,结构示意图如图 6 所示。该锚杆工作原理简单,通过增阻套筒的压缩变形起到增阻延伸的效果,改善了因杆体强度提高而延伸率不足带来的缺陷。

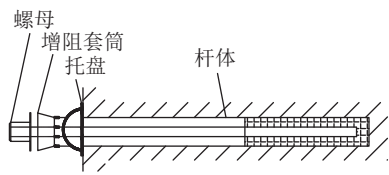


图 6 一种增阻高强预应力锚杆结构示意图^[46]

Fig.6 Schematic diagram of structure of a kind of resistance-enhancing high-strength prestressing anchor^[46]

2024 年,石振明教授等^[47]研发了一种新型消能抗震锚杆,锚杆结构主要包括螺母、锚杆、杆体、托盘、垫板、消能部件以及锥形锚固结构,如图 7 所示。新型消能抗震锚杆运用弹簧结构实现自复位,具有阶段性变形消能和变形恢复的特性,并且该锚杆使用了 2 段杆体,使其具备了抗拉和抗压 2 种性能,为双向恒阻的锚杆研发提供了新的设计思路。

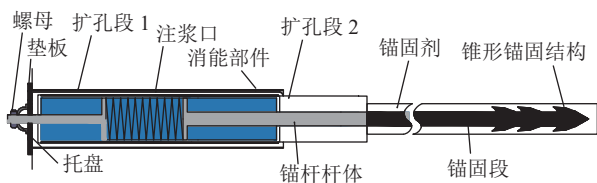


图 7 一种新型消能抗震锚杆结构示意图^[47]

Fig.7 Schematic diagram of structure of a new type of energy dissipating anti-seismic anchor^[47]

1.2.3 结构摩擦与压缩型吸能锚杆

2016 年,潘一山院士团队^[48]研发了一种挤压、摩擦式吸能锚杆,其结构主要包括锚杆体和套筒,套筒内设置吸能衬里管,套筒的末端固定连接末端卡,结构示意图如图 8 所示。这种锚杆运用杆体移动中与恒阻吸能构件间发生挤压变形实现高效吸能,具有结构压缩型和结构摩擦型吸能锚杆 2 种特征,解决了现有套筒式可伸长锚杆承载力低、恒阻与大变形功能不均衡的问题。这种挤压、摩擦式吸能锚杆可适应巷道围岩大变形的特点,能够在围岩变形过程

中实现动态平衡,从而有效防止围岩的进一步变形和破坏。

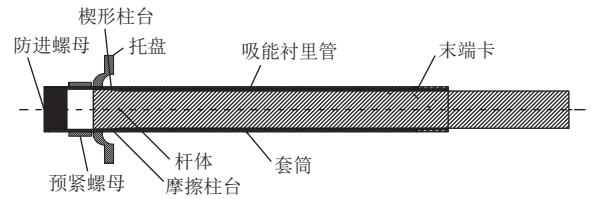


图 8 一种挤压、摩擦式吸能锚杆结构示意图^[48]

Fig.8 Schematic diagram of structure of an extruded, friction-type energy-absorbing anchor^[48]

2023 年,张杰等^[49]研发了一种应用于巷道围岩大变形的双向恒阻监测锚杆,锚杆结构主要包括检测仪、第一杆体、螺母、垫圈、托盘、恒阻套管、恒阻体、限位器、位移传感器、电阻应变片、连接套管、第二杆体以及锚固端(图 9)。此锚杆使用了 2 段杆体,具有双向恒阻的特性,工作原理是锚杆受力后,杆体与恒阻体间摩擦挤压产生位移,锚杆整体被压缩或伸长,位移传感器获得位移数据,达到检测预警的目的。

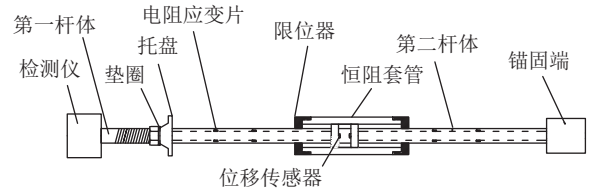


图 9 一种双向恒阻监测锚杆结构示意图^[49]

Fig.9 Schematic diagram of structure of a bi-directional constant resistance monitoring anchor^[49]

1.2.4 材料型吸能锚杆

2001 年 ORTLEAP 等^[50]研发了一种 Durabar 锚杆,该锚杆由正弦波曲线形式的碳素钢中段杆体和首尾两端光滑杆体以及托盘、螺母组成,通过锚杆波形锚固单元在锚固剂中滑移达到吸收围岩能量的作用(图 10)。宋战平教授等^[42]在 2023 年通过锚杆静力学试验发现:直径 16 mm 的 Durabar 锚杆可以提供 450 mm 以上的位移量,但是其恒阻力仅在 70 kN 左右,与其他吸能锚杆相比较小。在高地应力情况下,围岩压力很容易就达到其设计的恒阻力,从而使

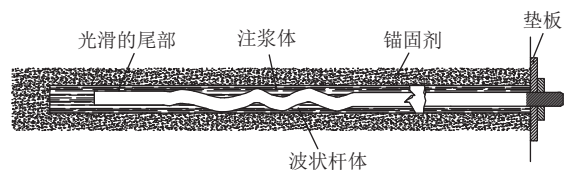


图 10 Durabar 锚杆结构示意图^[50]

Fig.10 Schematic diagram of Durabar anchor structure^[50]

杆体产生的拉伸变形量过大,不能有效地限制围岩的变形,静力学曲线如图 11 所示。Durabar 锚杆耐腐蚀性较强且结构简单,但由于材料的硬度和强度较高导致加工困难,限制了其应用空间。

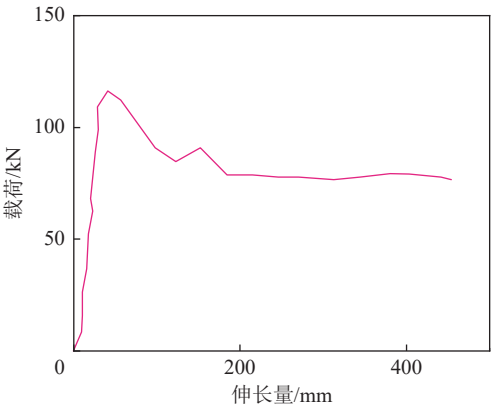


图 11 Durabar 锚杆静力学曲线^[42]
Fig.11 Durabar anchor hydrostatic curve^[42]

2010 年康红普院士等^[51]研发了一种 BHRB 热轧螺纹钢锚杆,该锚杆通过优化杆体材料使锚杆达到超高强级别,使其具有较高的支护阻力和变形性能(图 12)。BHRB 锚杆在 2015 年应用于塔山煤矿中并展现了较好的支护能力,有效控制了巷道围岩变形。2018 年王爱文教授等^[52]对直径为 18、20、22 mm 的 BHRB 锚杆做了静力学试验,经过数据对比后发现直径为 22 mm 的 BHRB 锚杆支护性能更加优异,最大受载可达 210 kN,伸长量也达到了 370 mm 以上,静力学曲线如图 13 所示。该锚杆结构简单,锚固效果明显,具有很好的应用前景。

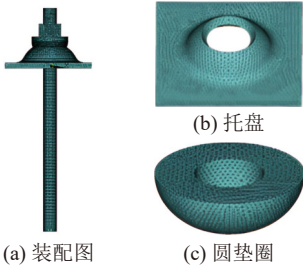


图 12 BHRB 锚杆结构示意图^[51]
Fig.12 Schematic diagram of BHRB anchor structure^[51]

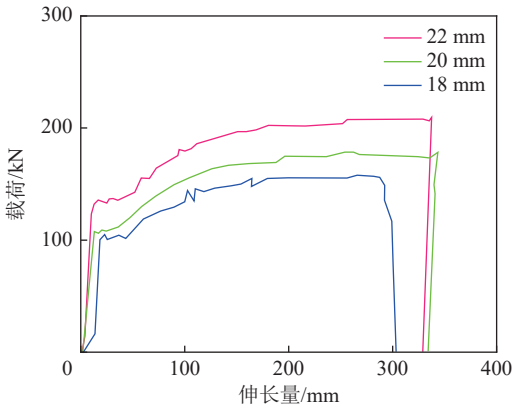


图 13 BHRB 锚杆静力学曲线^[51]
Fig.13 BHRB anchor hydrostatic curves^[51]

1.3 存在的问题

无论是结构型吸能锚杆还是材料型吸能锚杆,目的均是提高锚杆的支护性能,应对地下工程中冲击地压等灾害的问题。结合对现有锚杆的调查研究,总结现有 10 种锚杆优势,见表 2。

由表 2 可见:结构摩擦型吸能锚杆普遍存在结构简单、安装方便等优点,但面对不同的井下巷道环

表 2 典型锚杆优势总结
Table 2 Summary of typical anchors advantages

类型	名称	直径/mm	最大静载/kN	伸长量/mm	吸收能量/10 ⁴ J	优势
结构摩擦型吸能锚杆	Conebolt	16	100	500	4.79	结构简单,对材料没有过高要求,便于制造
		22	150	600	10.86	
结构压缩型吸能锚杆	恒阻大变形锚杆	22	150	1 050	13.61	锚固性强,具有高恒阻力、大变形能力
	一种增阻高强预应力锚杆	—	—	—	—	结构简单,易于实施,具有恒阻特性
	一种新型消能抗震锚杆	—	—	—	—	双向恒阻,具有阶段性变形消能和变形恢复的特性
结构摩擦与压缩型吸能锚杆	一种挤压、摩擦式吸能锚杆	—	—	—	—	锚杆承载力较高,能够在围岩变形过程中实现动态平衡
	一种双向恒阻监测锚杆	—	—	—	—	双向恒阻,监测预警
材料型吸能锚杆	Durabar锚杆	16	70	450	3.77	耐腐蚀性强于普通锚杆,结构简单
	BHRB锚杆	18	150	342	4.73	结构简单,锚固性能明显,具有较高的支护阻力和变形性能
		20	170	375	6.12	
		22	205	370	7.10	

境,尤其是高地与软岩巷道,仍存在支护能力不足或不稳定的缺陷;结构压缩型吸能锚杆的支护阻力较强,可以在围岩变形过程中实现动态平衡,但压缩吸能装置大多需要考虑局部应力集中等问题,且缺乏具体的试验数据,实用性需要进一步研究;结构摩擦与压缩型吸能锚杆支护性能较好,但结构普遍较为复杂,不易制造;材料型吸能锚杆由于使用超高性能材料使杆体具有较高强度与变形能力、不易被破坏且具有一定的抗腐蚀性,但由于不易加工或价格昂贵,难以得到广泛推广用于实际。

基于上述研究可以发现:不同类型的吸能锚杆在具体应用过程中,仍存在一定的不足,尤其是监测预警功能发展较为落后。随着深地资源的开采,巷道变形的监测预警成为矿山开采中的重点工作,现

如今依赖人工检查的方法费时费力,急需研发具有自动化与云系统的监测预警机制。为了进一步提高吸能锚杆的支护性能,满足复杂巷道环境的支护需求,还需要在结构优化、材料研发与智慧支护等方向不断探索。

2 一种智能预警负泊松比结构吸能锚杆

基于前人研究提出一种适用于软岩巷道支护的智能预警负泊松比结构吸能锚杆,该锚杆利用负泊松比效应结构特殊的压缩变形机理可以触发受拉与受压预警并传递预警信号,具备了双向恒阻吸能与双向可视化预警的特性,并在锚杆锚固端增加 1 组抗拔装置,增加了锚杆的居中性、抗拔与抗拉性能,锚杆结构如图 14 所示。

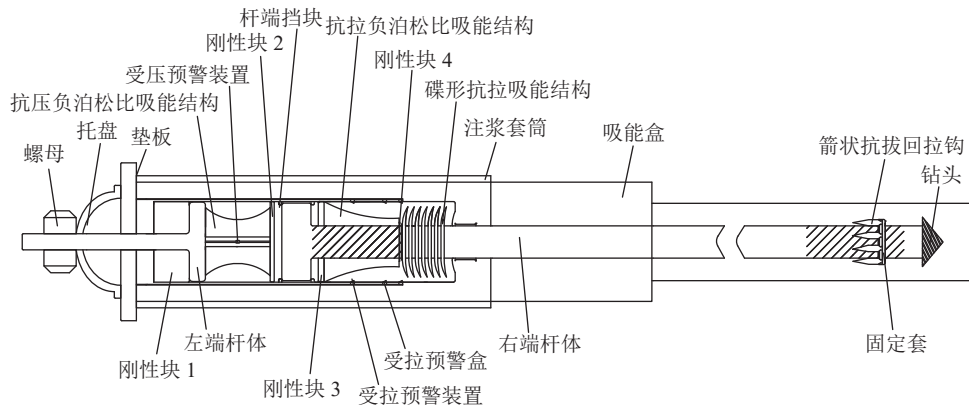


图 14 一种具有负泊松比效应的吸能预警锚杆结构示意图

Fig.14 Schematic structure of an energy-absorbing warning anchor with negative Poisson's ratio effect

2.1 工作原理

锚杆外接受拉与受压预警显示器,由锚杆内部形变后传递信号至巷道内完成可视化预警。锚杆工作中,围岩变形牵动尾端形变,右端杆体受到拉应力,在杆体破坏杆端挡块后首先由碟形吸能结构开始分级吸能,在碟形吸能结构压缩套管消耗完毕后恰好抗拉负泊松比吸能结构左端到达受拉一级预警装置

的位置,如图 15a 所示,此时对应图 16 中 a 点位置。触发受拉一级预警外部受拉预警显示器预警颜色由白色变为绿色,并且此时抗拉负泊松比吸能装置开始继续吸能变形。随着受力变化,变形量逐渐增加,经过受拉二级预警装置的位置触发受拉二级预警,如图 15b 所示,此时对应图 16 中 b 点位置,预警颜色由绿色变为黄色。当抗拉负泊松比吸能构件大

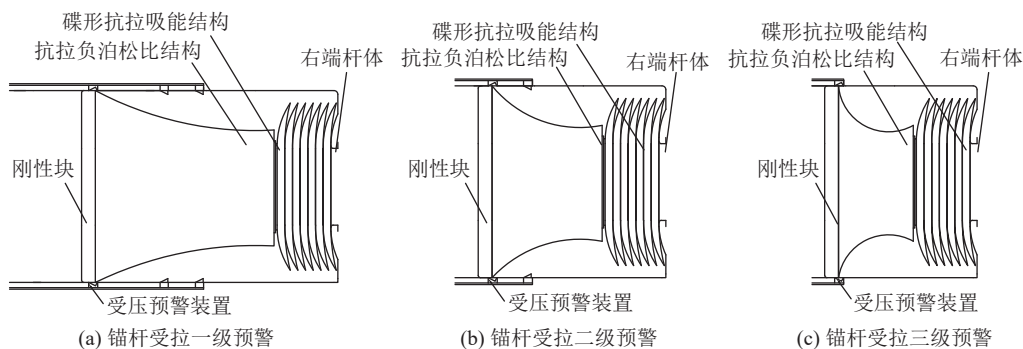


图 15 锚杆受拉预警

Fig.15 Early warning of anchors under tension

端到达受拉三级预警位置,触发受拉三级预警,如图 15c 所示,同时对应图 16 中 *c* 点位置,预警颜色由黄色变为红色,并且此时抗拉负泊松比吸能装置变形达到最大,外部工作人员需要注意巷道变化情况,对锚杆进行检修或者及时撤离。当围岩对锚杆带来压力时,由尾部抗拔装置吸收一部分能量分散到周围岩层,剩余压力轴向传递到杆体,当杆端挡块破坏后抗压负泊松比吸能装置开始工作,随着受压增大,抗压负泊松比吸能结构变形量逐渐增大,直至触发受压预警装置,如图 17 所示,同时对应图 16 中 *d* 点位置,外部外接受压预警显示仪器警示颜色由白色变化为红色,代表此时锚杆内部抗压吸能结构已有较大变形,围岩帮顶已发生较大沉降或收缩,外部工作人员需要注意巷道变化情况,对锚杆进行检修或者及时撤离。

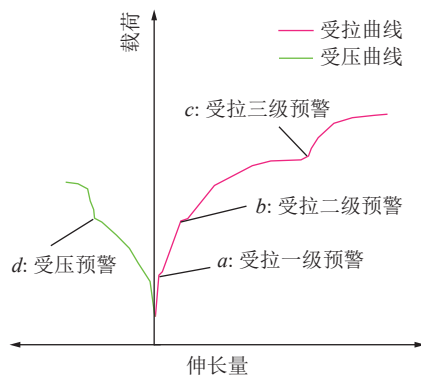


图 16 新型锚杆理想工作曲线
Fig.16 New anchor ideal working curves

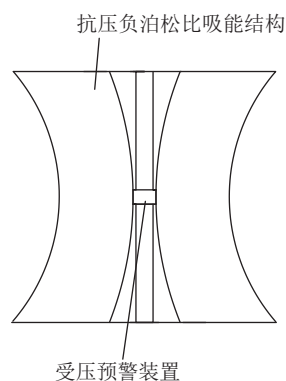


图 17 锚杆受压预警
Fig.17 Anchor pressure warning

2.2 锚杆特性

2.2.1 结构特性

1) 负泊松比结构。负泊松比结构受到外部压力时会发生横向收缩,而在纵向则会出现扩张的现象,这种现象被称为负泊松比效应。利用负泊松比结构

的变形特征,运用重入型单体组成正弦曲边负泊松比结构,如图 18 所示。在负泊松比结构受压时,重入型单体结构微观孔壁横向向内传递载荷,致使其横向收缩,采用了正弦曲边设计的边缘部分也会产生相应的负泊松比变形,横向收缩直至触发内部的预警装置,既达到了变形吸能的需要又具有检测预警功能。

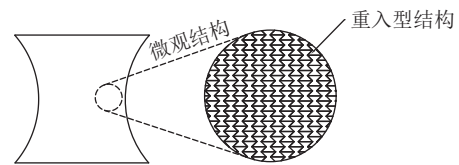


图 18 正弦曲边负泊松比结构
Fig.18 Negative Poisson's ratio structures with sinusoidal curved edges

2) 锚固端抗拔装置。抗拔装置螺接在锚杆锚固端,在锚杆杆体到达预定位置后加速旋转通过离心力克服回拉钩与固定套间的摩擦力使回拉钩展开,回拉钩尖端部分刺入岩层形成额外的固定点,从而起到定心与抗拔作用,如图 19 所示。此抗拔装置的设计可以提高锚杆在极端条件下的稳定性,尤其是在面对高负荷、高振动或软岩层等不利条件下。这种抗拔装置的安装和操作相对简单,容易实施,并且可以在不破坏原有锚固结构的情况下进行单独的更换或维修,提供了更高的灵活性和便利性。

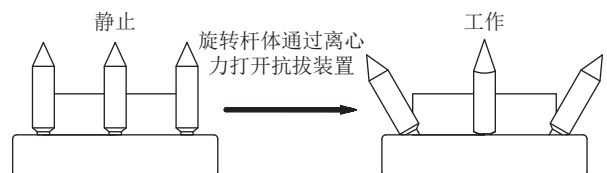


图 19 抗拔装置静止状态-工作状态
Fig.19 Anti-drawing device static state - working state

2.2.2 力学特性

1) 负泊松比效应吸能。负泊松比结构作为吸能结构使锚杆摆脱以往靠摩擦吸能的束缚,具有高能量吸收、高抗剪切与质量轻等特性。锚杆在遭遇地层变形或震动时,以新型结构的压缩变形可以均匀分散应力并且在瞬间获取极大的能量吸收能力,有效地减少了围岩形变对锚杆的破坏性,可以更好的应对地层变形和振动带来的能量冲击,极大的提高了锚杆支护阻力与支护稳定性。负泊松比结构的吸能锚杆不仅降低了材料成本,还减少了安装和施工的难度,提高了工程效率。利用负泊松比效应吸能使锚杆能够在复杂的地质环境中提供更为稳定和持久的支护效果。

2) 锚固端抗拔性能提升。此新型抗拔装置通过增加锚杆对围岩额外的固定点优化了锚杆的固定效果, 不仅可以解决锚杆偏心的问题, 便于注入锚固剂, 而且增加了吸能锚杆在岩层中的附着力, 确保了锚杆与围岩之间的稳固连接。此装置可以较大程度上增加锚杆的抗拔能力, 一定程度上增加杆体的抗拉能力, 并且使得支护结构在承受压力时, 能够更加均匀地分布应力, 整体增强了支护结构的稳定性, 有效防止因地质震动导致锚杆脱落等问题的发生, 确保了施工安全。

3 展 望

1) 结合智慧矿山发展趋势, 研发智能监测预警吸能锚杆和综合性支护体系。智能预警锚杆可与智慧矿山相结合, 预警信息上传云系统, 有助于实时掌握巷道围岩变形情况和配合整个支护体系完成自适应支护, 并及时做出灾害防治响应, 实现矿山开采的智能化发展。

2) 探索新型支护材料或适用于支护材料的材料强化技术。现有材料型吸能锚杆虽具有较高性能, 但是加工难度大, 价格较为昂贵, 应继续探索新型材料或材料加工方式。随着材料科学和工程技术发展, 巷道支护工作可以通过材料的优化来达到更好的支护效益。

3) 在吸能锚杆支护设备具有完备功能的基础上优化或精简其结构。锚杆的功能和支护性能在不断的完善和提高, 但结构日益趋向于复杂、难制造, 应对现有吸能锚杆支护设备进行研究、革新, 在提升或保持其现有性能的基础上, 对结构做优化, 寻找可代替复杂结构的简单方式, 以期早日推广应用。

参考文献(References):

- [1] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2854–2858.
HE Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2854–2858.
- [2] 姜福兴, 张翔, 朱斯陶. 煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 203–213.
JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in prevention and control system of coal mine rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 203–213.
- [3] GUO Z B, WANG Q, YIN S Y, et al. The creep compaction behavior of crushed mudstones under the step loading in underground mining[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2019, 6(3): 408–418.
- [4] 韩军, 李广汉, 郭宝龙, 等. 巷帮煤体整体滑脱型冲击地压锚杆防

冲支护原理及工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 117–125.

HAN Jun, LI Guanghan, GUO Baolong, et al. Design principle and engineering practice of rock bolting to prevent coal bump from rib coal massive slippage[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 117–125.

- [5] 肖晓春, 刘海燕, 丁鑫, 等. 单向卸载条件下组合煤岩力学特性及声发射演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 71–83.
XIAO Xiaochun, LIU Haiyan, DING Xin, et al. Mechanical properties and acoustic emission evolution of coal-rock combination under unidirectional unloading condition[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 71–83.
- [6] 何满潮, 郭志彪. 恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1297–1308.
HE Manchao, GUO Zhibiao. Mechanical property and engineering application of anchor bolt with constant resistance and large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1297–1308.
- [7] 肖晓春, 朱恒, 徐军, 等. 含泡沫铝填充多胞方管吸能立柱防冲特性数值研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 302–311.
XIAO Xiaochun, ZHU Heng, XU Jun, et al. Numerical study on anti-impact characteristics of energy absorbing column with multicellular square tube filled with aluminum foam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 302–311.
- [8] 曾奇. 我国煤巷机械化掘进机现状及锚杆支护技术[J]. 当代化工研究, 2021(14): 71–72.
ZENG Qi. Present situation and bolt support technology of mechanized roadheader in coal roadway in China[J]. Modern Chemical Research, 2021(14): 71–72.
- [9] 王贺, 陈何, 曹辉. 我国大变形锚杆研究现状及发展趋势[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(1): 112–123.
WANG He, CHEN He, CAO Hui. Research status and trends of large deformation rock bolts in China[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(1): 112–123.
- [10] 康红普. 煤矿巷道支护与加固材料的发展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 1–11.
KANG Hongpu. Development and prospects of support and reinforcement materials for coal mine roadways[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 1–11.
- [11] 郭泽洋, 王斌, 宁勇. 可伸长让压锚杆的研究现状及展望[J]. 采矿技术, 2019, 19(3): 38–42.
GUO Zeyang, WANG Bin, NING Yong. Research status and outlook of extendable letting pressure anchors[J]. Mining Technology, 2019, 19(3): 38–42.
- [12] 黄勇, 孙森, 王爱文, 等. 山西某矿 2#煤层锚网支护参数设计优化研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(5): 34–39.
HUANG Yong, SUN Miao, WANG Aiwen, et al. Research on design optimization of No. 2 coal seam bolt and mesh support parameters in a mine in Shanxi[J]. Coal Technology, 2023, 42(5): 34–39.
- [13] COOK N G W, ORTLEPP W D. A yielding rockbolt[J]. Chamber of Mines of South Africa. Research Organization Bulletin, 1968, 8(14): 19–24.

- [14] CHARETTE F. Performance of Swellex rock bolts under dynamic loading conditions[C]//Second International Seminar on Deep and High Stress Mining, Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004: 95–106.
- [15] WINDSOR C R. Cable bolting for underground and surface excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(6): 371–371.
- [16] HYETT A, BAWDEN W, HEDRICK N, et al. A laboratory evaluation of the 25 mm Garford bulb anchor for cable bolt reinforcement[J]. Cim Bulletin, 1995, 88: 54–59.
- [17] LI L, KONG X S, YANG W, et al. A study of anchor cable and C-shaped tube support for the roadway of Shuangliu coal mine[J]. Symmetry, 2023, 15(9): 1757.
- [18] 何亚男. 可拉伸锚杆的基本原理与设计[J]. 矿山压力, 1987, 4(2): 16–19, 2–65.
HE Yanan. Basic principles and design of tensile anchors[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 1987, 4(2): 16–19, 2–65.
- [19] 宋德彰, 孙钧. 锚喷支护力学机理的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(2): 197–204.
SONG Dezhang, SUN Jun. Study on the mechanical mechanism of shotcrete-rockbolt support system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(2): 197–204.
- [20] 何亚男, 侯朝炯. 改进型杆体可拉伸锚杆: CN2081884U[P]. 1991–07–31.
- [21] 高延法, 张文泉, 肖洪天, 等. 柔刚性可伸缩锚杆: CN2138193[P]. 1993–07–14.
- [22] 冯志刚, 李夕兵. 可伸缩胀管式锚杆在大变形巷道支护中的应用[J]. 湖南有色金属, 1994, 10(2): 65–67.
FENG Zhigang, LI Xibing. Application of expandable expansion tube anchor in the support of large deformation roadway[J]. Hunan Nonferrous Metals, 1994, 10(2): 65–67.
- [23] 覃卫民, 葛修润, 黄智慧, 等. 一种砂固结内锚头预应力锚杆及其锚固方法: CN1259499C[P]. 2006–06–14.
- [24] GALLER R, GSCHWANDTNER G, DOUCET C. Roofex bolt and its application in tunnelling by dealing with high stress ground conditions[C]// Helsinki: World Tunnel Congress 2011, 2011.
- [25] 李铀, 朱维申, 白世伟, 等. 一种适用于大变形支护的新型可伸长锚杆[J]. 中南公路工程, 2007, 32(2): 103–105, 127.
LI You, ZHU Weishen, BAI Shiwei, et al. New extensible bolt suitable for large deformation support[J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2007, 32(2): 103–105, 127.
- [26] 潘一山, 朱小景, 唐治, 等. 一种矿用让位摩擦式吸能防冲锚杆: CN105822332B[P]. 2018–01–30.
- [27] 王斌, 李夕兵, 马春德, 等. 岩爆灾害控制的动静组合支护原理及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1169–1178.
WANG Bin, LI Xibing, MA Chunde, et al. Principle and preliminary application of combined static-dynamic support to rock-burst disaster controlling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1169–1178.
- [28] 韩军, 王鑫, 马双文, 等. 适用于围岩大变形的螺纹钢锚杆设计及工程实践[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3745–3755.
HAN Jun, WANG Xin, MA Shuangwen, et al. Design and engineering practice of rebar bolt for large deformation roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3745–3755.
- [29] 唐治, 潘一山, 徐兴强, 等. 一种让位缓冲吸能防冲锚杆: CN108119175B[P]. 2019–11–05.
- [30] 齐永正, 杨子明, 金光球, 等. 一种负泊松比锚杆支护装置: CN115045699A[P]. 2022–09–13.
- [31] 王阔. 预应力让压锚杆的数值模拟研究及其应用[D]. 青岛: 山东科技大学, 2007.
WANG Ge. Numerical simulation of pre-stressed yield bolt support and its application[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2007.
- [32] 赵宝友, 李佳伟, 张立新, 等. 一种扩径挤压摩擦锚杆锚索结构: CN109026103B[P]. 2020–03–17.
- [33] 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.
- [34] 钟紫蓝, 赵鑫, 李锦强, 等. 一种基于负泊松比结构理论的锚杆装置及其应用: CN116145657A[P]. 2023–05–23.
- [35] CHUNLIN LI C. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3): 396–404.
- [36] KNOX G, BERGHORST A, CROMPTON B. The relationship between the magnitude of impact velocity per impulse and cumulative absorbed energy capacity of a rock bolt[C]// Sydney: Proceedings of the Fourth Australasian Ground Control in Mining Conference Proceedings, 2018.
- [37] 李鹏. 一种吸能-抗震锚杆: CN207609439U[P]. 2018–07–13.
- [38] 唐治, 吴志伟, 齐晓苗, 等. 一种大变形玻璃钢锚杆: CN218293629U[P]. 2023–01–13.
- [39] JAGER A J. Two new support units for the control of rock-burst damage[C] // Proceedings of the International Symposium on Rock Support. Rotterdam: A A Balkema Publishers, 1992.
- [40] 王炯. 唐口煤矿深部岩巷恒阻大变形支护机理与应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2011.
WANG Jiong. Large deformation with constant-resistance supporting mechanism and its application of deep rocky tunnel in Tangkou coal mine[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2011.
- [41] O·Γ·萨赫诺, 周蒲英. 一种新型的让压锚杆[J]. 中州煤炭, 1987, 9(5): 42–43.
O-Γ-Sakhno, ZHOU Puying. A new type of pressurized anchor[J]. Zhongzhou Coal, 1987, 9(5): 42–43.
- [42] 宋战平, 许晓静, 刘伟, 等. 吸能锚杆及其静动力试验方法研究综述[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(3): 1–13.
SONG Zhanping, XU Xiaojing, LIU Wei, et al. A review of study on energy-absorbing rockbolts and static/dynamic test methods[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(3): 1–13.
- [43] 何满潮. 工程地质力学的挑战与未来[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 543–556.
HE Manchao. The challenges and future of engineering geomechanics[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 543–556.

- [44] 陶志刚, 谢迪, 隋麒麟, 等. 复杂地质条件下隧道围岩大变形负泊松比锚索主动支护方法及控制效果研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(2): 275–286.
TAO Zhigang, XIE Di, SUI Qiru, et al. Study on active support method and control effect of NPR anchor cables for large deformation of tunnel surrounding rock under complex geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(2): 275–286.
- [45] 张明. 深部巷道新型螺纹钢锚杆吸能机理及锚固界面强化研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
ZHANG Ming. Study on energy-absorbing mechanism and anchorage interface strengthening of novel rebar bolt in deep roadway[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [46] 郑是立, 刘泉声, 薛俊华. 增阻高强预应力锚杆: CN2707966[P]. 2005–07–06.
- [47] 石振明, 谢可禄, 俞松波, 等. 消能抗震锚杆的研究进展与思考[J]. 地球科学, 2024, 49(2): 522–537.
SHI Zhenming, XIE Kelu, YU Songbo, et al. Research advance and thinking on energy dissipation and seismic bolts[J]. Earth Science, 2024, 49(2): 522–537.
- [48] 潘一山, 王爱文, 孟村影, 等. 一种挤压、摩擦式吸能锚杆: CN104265339B[P]. 2016–08–24.
- [49] 张杰, 荣传新, 曹祎, 等. 一种应用于巷道围岩大变形的双向恒阻监测锚杆: CN218581627U[P]. 2023–03–07.
- [50] ORTLEPP W D, BORNMAN J J, ERASMUS P N. The durabar-ayieldable support tendon-design rational and laboratory results[C] // Rockbursts and Seismicity in Mines(RaSiM5). Johannesburg: South African Institution of Mining and Metallurgy, 2001: 263–266.
- [51] KANG H P, YANG J H, MENG X Z. Tests and analysis of mechanical behaviours of rock bolt components for China's coal mine roadways[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(1): 14–26.
- [52] 王爱文, 高乾书, 代连朋, 等. 锚杆静-动力学特性及其冲击适用性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 2999–3006.
WANG Aiwen, GAO Qianshu, DAI Lianpeng, et al. Static and dynamic performance of rebar bolts and its adaptability under impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 2999–3006.