

江贝,王琦,魏华勇,等. 地下工程吸能锚杆研究现状与展望[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(5): 569-580. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2021.05.006

Jiang Bei, Wang Qi, Wei Huayong, et al. Recent development and prospects of energy-absorbing bolt in underground engineering[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(5): 569-580. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2021.05.006

## 地下工程吸能锚杆研究现状与展望

江贝<sup>1,2</sup>, 王琦<sup>1,2,3</sup>, 魏华勇<sup>1,2</sup>, 辛忠欣<sup>3</sup>, 何满潮<sup>1</sup>, 吴文瑞<sup>1,2</sup>, 马凤林<sup>1,2</sup>, 许硕<sup>1,2</sup>, 王业泰<sup>1,2</sup>

1. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;
3. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东济南 250061

**摘要:**锚杆是地下工程洞室的主体支护方式,为吸收围岩变形释放的能量,控制围岩变形,需要研发具有高恒阻力、高延伸率和高预应力的吸能锚杆。本文从吸能锚杆的研发历程、性能试验与现场应用3个方面进行了总结和分析。吸能锚杆通过结构滑移和材料变形2种方式吸收能量,按工作原理可分为结构型与材料型2种吸能锚杆。两者相比,材料型吸能锚杆结构相对简单,能够充分发挥材料力学性能。笔者团队研发了恒阻吸能新材料锚杆,开展了静力拉伸与动力冲击试验,结果表明该锚杆具备高强、高延伸率和高吸能特性,能够满足复杂条件下的围岩控制要求。未来应制定恒阻吸能锚杆的试验、设计、施工与验收标准,实现其在矿山、交通、市政、水利等不同领域地下工程中的推广和应用。

**关键词:**地下工程;吸能锚杆;工作原理;力学性能;现场应用

**中图分类号:**TD 35

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-2193(2021)05-0569-12

## Recent development and prospects of energy-absorbing bolt in underground engineering

Jiang Bei<sup>1,2</sup>, Wang Qi<sup>1,2,3</sup>, Wei Huayong<sup>1,2</sup>, Xin Zhongxin<sup>3</sup>, He Manchao<sup>1</sup>, Wu Wenrui<sup>1,2</sup>,  
Ma Fenglin<sup>1,2</sup>, Xu Shuo<sup>1,2</sup>, Wang Yetai<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China;
2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
3. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China

**Abstract:** There are many challenges in the process of underground engineering construction, such as high stress, extremely soft rock, strong mining and other complex conditions. The surrounding rock is difficult to control and its deformation is serious due to the stress concentration and energy accumulation, leading to frequent roof fall, collapse, rock burst and other accidents. Anchor bolt is the main support mode of underground engineering chamber. In order to absorb energy released by surrounding rock deformation and control the deformation of surrounding rock, it is necessary to develop energy-absorbing

收稿日期:2021-05-17 修回日期:2021-06-21

基金项目:国家自然科学基金(52074164,42077267,41941018);山东省杰出青年科学基金(ZR2020JQ23);山东省重大科技创新工程项目(2019SDZY04)

作者简介:江贝(1985—),女,山东济南人,博士,讲师,主要从事复杂条件地下工程围岩控制理论与方法等方面的研究工作。Tel:18253195766, E-mail:jiangbei519@163.com

通信作者:王琦(1983—),男,山东临沂人,博士,教授,主要从事地下工程围岩控制理论与无煤柱自成巷开采方法等方面的研究工作。Tel:13583120068, E-mail:chinawangqi@163.com

bolt with high constant resistance, high elongation and high prestress. This paper summarizes and analyzes the development process, performance test and field application of energy-absorbing bolt. Energy-absorbing bolt absorb energy by structural slip and material deformation. According to the working principle, the energy-absorbing bolt can be divided into three types: rod structure type, mechanical structure type and body material type. Compared with structural energy-absorbing bolt, the structure of material energy-absorbing bolt is relatively simple, which can give full play to the mechanical properties of material. The author's team developed a new constant resistance energy-absorbing bolt, and carried out static tensile and dynamic impact tests. The results show that the bolt has high strength, high elongation and high energy absorption characteristics, which can meet the requirements of surrounding rock control under complex conditions. In the future, the test, design, construction and acceptance standards of the constant resistance energy-absorbing bolt should be formulated to realize its application in underground engineering in different fields such as mine, traffic, municipal engineering and water conservancy.

**Key words:** underground engineering; energy-absorbing bolt; working principle; mechanical property; field application

随着地下工程的迅速发展,工程建设过程中经常面临高应力、极软岩、强采动等复杂条件<sup>[1-3]</sup>,极易出现软岩缓慢大变形、岩爆与冲击地压瞬时大变形等破坏现象<sup>[4-5]</sup>。缓慢和瞬时大变形是围岩能量积聚和释放的结果,解决上述问题的关键是利用支护体系吸收围岩释放的能量,减少能量积聚<sup>[6]</sup>。

锚杆作为锚网索、锚网喷等支护体系的核心<sup>[7-11]</sup>,被广泛应用于地下工程建设中。传统锚杆在复杂条件下易出现杆体破断等现象<sup>[12]</sup>,难以满足复杂条件下的吸能支护要求。因此,研发具有良好吸能效果的锚杆对于围岩大变形控制具有重要意义。相关研究表明,吸能锚杆应具备高恒阻力和大变形能力,一方面能够改善围岩本身的力学状态,提高围岩强度;另一方面吸收岩体变形能,使围岩中的能量得到释放<sup>[13]</sup>。同时,必须对开挖后的围岩施加尽可能高的预应力补偿支护,最大限度地恢复围岩强度,保持巷道围岩稳定<sup>[14]</sup>。

国内外学者对吸能锚杆进行了大量研究,研发了不同种类的吸能锚杆。根据工作机理吸能锚杆可分为结构型和材料型2种。其中,结构型锚杆又可分为杆体结构型和机械结构型。杆体结构型吸能锚杆是指通过杆体-锚固剂摩擦或杆体-围岩摩擦来实现其工作阻力,吸收围岩变形能量的锚杆,如 Swellex 锚杆<sup>[15]</sup>、Cone 锚杆<sup>[15-17]</sup>、Modified Cone 锚杆<sup>[18-19]</sup>、J型锚杆<sup>[20]</sup>等。机械结构型吸能锚杆是指通过杆体在机械结构中摩擦来实现其工作阻力,吸收围岩变形能量的锚杆,如 Garford 锚杆<sup>[21-22]</sup>、Roofex 锚杆<sup>[23]</sup>、恒阻大变形锚杆<sup>[24-25]</sup>等。材料型吸能锚杆是指通过杆体自身变形,吸收围岩变形能量的锚杆,如 D型锚杆<sup>[26]</sup>、BHRB 锚杆<sup>[27]</sup>、

PAR1 锚杆<sup>[28]</sup>等。吸能锚杆分类及典型锚杆如图1所示。

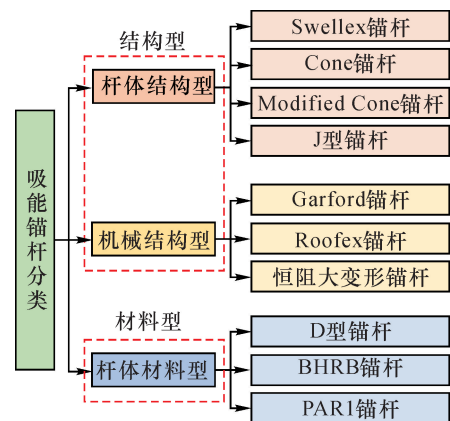


图1 吸能锚杆分类

Fig. 1 Classification of energy-absorbing bolt

本文总结了吸能锚杆的构件组成、工作原理、室内试验、现场应用等研究内容,同时对吸能锚杆试验、设计、施工与验收标准以及在不同领域的推广和应用进行展望。

## 1 吸能锚杆研发历程

自20世纪80年代吸能锚杆问世以来,众多学者不断对吸能锚杆进行优化与创新,取得了一系列成果。

### 1.1 杆体结构型吸能锚杆

1982年,瑞典Atlas Copco公司的Hoek等<sup>[15]</sup>研发了一种水胀式锚杆——Swellex锚杆,由带有凹槽的无缝钢管杆体和托盘等组成,高压注水使杆体膨胀,从而利用杆体和围岩之间的摩擦提供工作

阻力,吸收围岩变形能量;1987年,Chamber of Mines Research Organization<sup>[15-17]</sup>研发了Cone锚杆,由金属杆体和锥形端头等组成,在锚杆尾部添加锥形体,利用锥形体与锚固剂之间的摩擦提供工作阻力,吸收围岩变形能量;2000年,Noranda公司在Cone锚杆的基础上增加了树脂锚固剂搅拌装置,研发了Modified Cone锚杆<sup>[18-19]</sup>;此后,针对杆体结构型锚杆的研究多以Cone锚杆为基础进行改进,2020年,赵兴东等<sup>[20]</sup>研发了具有多点锚固作用和整体滑移释能能力的J型锚杆,由搅拌模块、变形模块和锚固模块等组成,能够同时利用锚杆锥形体-锚固剂的摩擦做功和杆体变形吸收围岩变形能量。

### 1.2 机械结构型吸能锚杆

1995年,澳大利亚Garford Pty公司<sup>[21-22]</sup>研发了Garford锚杆,由光滑杆柄、锚箍和树脂搅拌器等组成,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。此后,针对机械结构型锚杆的研究较少,直至2009年,Atlas Copco公司Plouffe等<sup>[23]</sup>研发了Roofex锚杆,由杆体、能量吸收部件以及弹性套筒等组成,利用能量吸收部件中销钉与杆体的摩擦提供工作阻力,吸收围岩变形能量。同年,何满潮等<sup>[24-25]</sup>研发了具有负泊松比效应的恒阻大变形(Constant resistance large deformation, CRLD)锚杆,由锥体、杆体、套管、托盘等组成,利用锥体与套管之间的摩擦提供工作阻力,吸收围岩变形能量,具有高恒阻力和大变形能力。

### 1.3 杆体材料型吸能锚杆

2006年,Li<sup>[26]</sup>研发了D型锚杆,由多个分布不均匀的锚固结构和杆体等组成,利用锚固结构间杆体的伸长来吸收围岩变形能,部分杆体破断并不会导致整个锚杆的失效;2010年,康红普等<sup>[27]</sup>研发了BHRB锚杆,由杆体、托盘、减摩垫圈、螺母等组成,通过优化杆体材料提高了锚杆杆体物理力学性能,从而提高了锚杆的吸能能力;2018年,New Concept Mining公司<sup>[28]</sup>研发了PAR1锚杆,由杆体、浆形锚固结构、托盘等组成,利用浆形锚固结构间杆体的变形来吸收围岩变形能。

将典型吸能锚杆的研发时间、构件组成、技术革新等进行总结,汇总至表1。

分析表1可知:机械结构型锚杆利用杆体与机械装置摩擦做功吸收能量,相比于利用杆体-围岩或杆体-锚固剂摩擦做功吸收能量的杆体结构型

锚杆,机械装置提供的摩擦力更加稳定,能够更好地控制围岩变形。

材料型吸能锚杆通过杆体自身变形吸收围岩变形能量,相比于利用摩擦滑移做功吸收能量的结构型锚杆,施工工艺简单,能够充分发挥杆体材料本身的力学性能。

## 2 吸能锚杆力学性能研究

为研究吸能锚杆在围岩缓慢变形和瞬时变形时的力学性能,众多学者开展了吸能锚杆的静力拉伸与动力冲击试验。

### 2.1 吸能锚杆静力试验研究进展

#### 2.1.1 杆体结构型吸能锚杆

Xu等<sup>[29]</sup>对Swellex锚杆进行了静力学试验,得到其极限荷载为235 kN,伸长量为153 mm;Ortlepp<sup>[17]</sup>开展了Cone锚杆的静力学试验,得到其屈服荷载为181~253 kN,伸长量大于30 mm;Cai等<sup>[30]</sup>对Modified Cone锚杆进行了静力学试验,得到其极限荷载约为150 kN,伸长量大于150 mm;赵兴东等<sup>[20]</sup>利用静力拉伸试验机对J型锚杆进行了静力拉伸试验,得到其屈服荷载为172 kN,极限荷载为196 kN,伸长量为15 mm。杆体结构型吸能锚杆试验结果见表2序号1-1~1-4。


#### 2.1.2 机械结构型吸能锚杆

Sengani<sup>[31]</sup>对Garford锚杆进行了静力学试验,得到其屈服荷载为153~165 kN,极限荷载为184~233 kN,伸长量为252~280 mm;Ozbay等<sup>[23]</sup>对Roofex锚杆进行了静力拉伸试验,得到其屈服荷载为80 kN,极限荷载为100 kN,伸长量为300 mm;何满潮等<sup>[13]</sup>利用锚杆静力拉伸试验机对恒阻大变形锚杆进行了静力学试验,得到其屈服荷载约为150 kN,极限荷载为160 kN,伸长量为627 mm。机械结构型吸能锚杆试验结果见表2序号2-1~2-3。

#### 2.1.3 杆体材料型吸能锚杆

Li<sup>[26]</sup>利用静力拉伸试验机对D型锚杆进行了静力学试验,得到其屈服荷载为51 kN,极限荷载为69 kN,伸长量为22 mm;王爱文等<sup>[32]</sup>对BHRB锚杆进行了静力学试验,得到其屈服荷载为200~210 kN,极限荷载为360~370 kN,伸长量为360~370 mm;New Concept Mining公司<sup>[33]</sup>对PAR1锚杆进行了静力学试验,得到其极限荷载为210 kN,伸长量为185 mm。杆体材料型吸能锚杆试验结果见表2序号3-1~3-3。

表1 吸能锚杆研发历程  
Tab.1 Research and development history of energy-absorbing bolt

序号	时间	锚杆名称	锚杆类型	构件组成	单位/人员	技术革新
1-1	1982年	Swellex 锚杆 <sup>[15]</sup>			Atlas Copco 公司	利用高压注水使杆体膨胀,利用杆体-围岩的摩擦做功吸收能量
1-2	1987年	Cone 锚杆 <sup>[15-17]</sup>	杆体 结构型		Chamber of Mines Research Organization	在锚杆尾部添加锥形体,利用锥形体-锚固剂的摩擦做功吸收能量
1-3	2000年	Modified Cone 锚杆 <sup>[18-19]</sup>			Noranda 公司	在 Cone 锚杆的基础上添加了树脂搅拌装置,利用锥形体-锚固剂的摩擦做功吸收能量
1-4	2020年	J型锚杆 <sup>[20]</sup>			赵兴东等	将 Cone 锚杆和 D 型锚杆的功能结合,同时利用锚杆锥形体-锚固剂的摩擦做功和杆体变形吸收能量
2-1	1995年	Garford 锚杆 <sup>[15,21-22]</sup>			Garford Pty 公司	利用锚箍对杆体的挤压变形和杆体-锚箍的摩擦做功吸收能量
2-2	2009年	Roofex 锚杆 <sup>[23]</sup>	机械 结构型		Atlas Copco 公司	利用销钉-杆体的摩擦做功吸收能量
2-3	2009年	恒阻大变形锚杆 <sup>[24-25]</sup>			何满潮等	研发负泊松比结构装置,利用锥体-套管的摩擦做功吸收能量,具有高恒阻力、大变形能力
3-1	2006年	D 型锚杆 <sup>[26]</sup>			Li	研发能够多点锚固的锚杆,利用锚固单元间的变形单元吸收能量,部分变形单元失效不会影响其他部分工作
3-2	2010年	BHRB 锚杆 <sup>[27]</sup>	杆体 材料型		康红普等	通过优化杆体材料使锚杆达到高强和超高强级别,利用锚杆杆体变形吸收能量
3-3	2018年	PARI 锚杆 <sup>[28]</sup>			New Concept Mining 公司	在 D 型锚杆基础上,优化了浆形锚固结构,采用两点锚固方式,利用锚固单元间的变形单元吸收能量

典型吸能锚杆静力学试验具体参数与相关结果汇总至表2,对比分析得到如下结论:

(1) 在承载能力方面,BHRB 锚杆的极限承载能力最高,属于材料型吸能锚杆,其承载能力可达

370 kN,是结构型吸能锚杆的1.57~3.70倍,表明材料型吸能锚杆能够具有更强的承载能力。

(2)在变形能力方面,恒阻大变形锚杆的变形

能力最强,属于结构型吸能锚杆,其伸长量可达627 mm,是材料型吸能锚杆的1.69~28.50倍,表明结构型吸能锚杆能够具有更强的变形能力。

表2 典型吸能锚杆静力学试验统计

Tab. 2 Static test statistics of typical energy-absorbing bolt

序号	锚杆类型	锚杆分类	研究人员/单位	杆体直径/mm	杆体长度/mm	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	伸长量/mm
1-1	Swellex 锚杆 <sup>[29]</sup>		Xu 等	20	2 200	—	235	153
1-2	Cone 锚杆 <sup>[17]</sup>	杆体	Ortlepp	22	2 000~2 300	181~253	—	>30
1-3	Modified Cone 锚杆 <sup>[30]</sup>	结构型	Cai 等	17	—	—	150	>150
1-4	J型锚杆 <sup>[20]</sup>		赵兴东等	22	2 229	172	196	15
2-1	Garford 锚杆 <sup>[31]</sup>		Sengani	22	—	153~165	184~233	252~280
2-2	Roofex 锚杆 <sup>[23]</sup>	机械	Ozbay 等	13	1 800	80	100	300
2-3	恒阻大变 形锚杆 <sup>[13]</sup>	结构型	何满潮等	22	1 459	150	160	627
3-1	D型锚杆 <sup>[26]</sup>		Li	12	90	51	69	22
3-2	BHRB 锚杆 <sup>[32]</sup>	杆体	王爱文等	22	2 200	200~210	360~370	360~370
3-3	PAR1 锚杆 <sup>[33]</sup>	材料型	New Concept Mining 公司	20	2 400	—	210	185

## 2.2 吸能锚杆动力试验研究进展

### 2.2.1 杆体结构型吸能锚杆

Charette<sup>[34]</sup>开展了 Swellex 锚杆的动力冲击试验,得到其伸长量为80 mm,吸收的能量为 $2.9 \times 10^4$  J;Ortlepp<sup>[35]</sup>开展了 Cone 锚杆的爆炸冲击试验,炸药质量为1.0 kg,得到其吸收的能量为 $3.9 \times 10^4$  J;St-Pierre 等<sup>[36]</sup>开展了 Modified Cone 锚杆的落锤冲击试验,落锤高度为0.5 m,落锤质量为1 016 kg,得到其伸长量为250 mm,吸收的能量为 $3.0 \times 10^4$  J;赵兴东等<sup>[20]</sup>开展了J型锚杆的落锤冲击试验,落锤高度为1.5 m,落锤质量为2 006 kg,得到其伸长量为184 mm,吸收的能量为 $4.7 \times 10^4$  J。杆体结构型吸能锚杆试验结果见表3序号1-1~1-4。

### 2.2.2 机械结构型吸能锚杆

Varden 等<sup>[37]</sup>开展了 Garford 锚杆的落锤冲击试验,冲击速度分别为6 m/s和8 m/s,得到其伸长量为180 mm,吸收的能量为 $(6.5 \sim 7.0) \times 10^4$  J;Charette 等<sup>[38]</sup>开展了 Roofex 锚杆的动力冲击试验,得到其伸长量为200 mm,吸收的能量为 $2.7 \times 10^4$  J;何满潮团队<sup>[13,39]</sup>开展了恒阻大变形锚杆的落锤冲击试验,落锤高度为700~1 000 mm,落锤质量为1 000 kg,得到其伸长量为580 mm,吸收的

能量为 $5.4 \times 10^4$  J。机械结构型吸能锚杆试验结果见表3序号2-1~2-3。

### 2.2.3 杆体材料型吸能锚杆

Li<sup>[26,40]</sup>开展了D型锚杆的落锤冲击试验,落锤高度为1.5 m,落锤质量为2 006 kg,得到其伸长量为140 mm,吸收的能量为 $(2.0 \sim 3.7) \times 10^4$  J;王爱文等<sup>[32]</sup>对BHRB锚杆开展了高能量一次冲击加载方式下的动力冲击研究,得到其伸长量为385 mm,吸收的能量为 $6.0 \times 10^4$  J;Knox 等<sup>[41]</sup>开展了PAR1锚杆的落锤冲击试验,落锤高度为1.5 m,落锤质量为2 071 kg,得到其伸长量为254 mm,吸收的能量为 $(9.8 \sim 10.2) \times 10^4$  J。杆体材料型吸能锚杆试验结果见表3序号3-1~3-3。

典型吸能锚杆动力学试验具体参数与相关结果汇总至表3,对比分析得到如下结论:

(1)在变形能力方面,恒阻大变形锚杆的变形能力最强,属于结构型吸能锚杆,其伸长量最高可达580 mm,是材料型吸能锚杆的1.51~4.06倍,表明结构型吸能锚杆能够具有更强的变形能力。

(2)在吸能能力方面,PAR1锚杆的吸能能力最强,属于材料型吸能锚杆,其吸收能量最高可达 $10.2 \times 10^4$  J,是结构型吸能锚杆的1.46~3.78倍,表明材料型吸能锚杆能够具有更强的吸能能力。

表3 典型吸能锚杆动力学试验统计

Tab. 3 Dynamic test statistics of typical energy-absorbing bolt

序号	锚杆名称	锚杆类型	研究人员	杆体直径/mm	杆体长度/mm	伸长量/mm	吸收能量/ $10^4$ J
1-1	Swellex 锚杆 <sup>[34]</sup>		Charette 等	28	—	80	2.9
1-2	Cone 锚杆 <sup>[35]</sup>	杆体 结构型	Ortlepp 等	22	2 000 ~ 2 300	—	3.9
1-3	Modified Cone 锚杆 <sup>[36]</sup>		St-Pierre 等	17	2 200	250	3.0
1-4	J 型锚杆 <sup>[20]</sup>		赵兴东等	22	1 985 ~ 1 991	184	4.7
2-1	Garford 锚杆 <sup>[37]</sup>		Varden 等	20	350	180	6.5 ~ 7.0
2-2	Roofex 锚杆 <sup>[38]</sup>	机械	Charette 等	20	—	200	2.7
2-3	恒阻大变形 锚杆 <sup>[13,39]</sup>	结构型	何满潮等	22	2 400	580	5.4
3-1	D 型锚杆 <sup>[26,40]</sup>	杆体 材料型	Li	22	900	143	2.0 ~ 3.7
3-2	BHRB 锚杆 <sup>[32]</sup>		王爱文等	22	2 200	385	6.0
3-3	PAR1 锚杆 <sup>[41]</sup>		Knox 等	25	2 400	254	9.8 ~ 10.2

### 2.3 恒阻吸能新材料锚杆试验研究

在已有试验研究中,材料型吸能锚杆具有较高的承载能力和动力吸能能力,但与结构型吸能锚杆中的恒阻大变形(CRLD)锚杆相比,其变形能力相对不足。为使材料型吸能锚杆同时具有高强、高延伸率和高吸能特性,笔者团队研发了恒阻吸能(Constant Resistance Energy Absorption, CREA)新材料锚杆<sup>[42-44]</sup>,通过开展室内试验,研究该类锚杆的静力学与动力学特性。

#### 2.3.1 试验方案

选取 CRLD 锚杆作为对比对象,开展 CREA 锚杆与 CRLD 锚杆的静力拉伸与动力冲击对比试验,CRLD 锚杆的恒阻器长度为 400 mm,试验方案见表 4。

表4 静力拉伸与动力冲击试验方案

Tab. 4 Static tensile and dynamic impact test scheme

试验编号	试验类型	试件类型	杆体直径/mm	杆体 长度/mm
CREA-S	静力拉伸	CREA 锚杆	18	1 500
CRLD-S	试验	CRLD 锚杆	22	
CREA-D	动力冲击	CREA 锚杆	18	3 000
CRLD-D	试验	CRLD 锚杆	22	

静力拉伸试验系统由加载系统、控制系统、夹持系统和力-位移监测系统 4 部分组成。试验采用匀速拉伸的加载方式,拉伸速率取 10 mm/min,试验系统如图 2 所示。

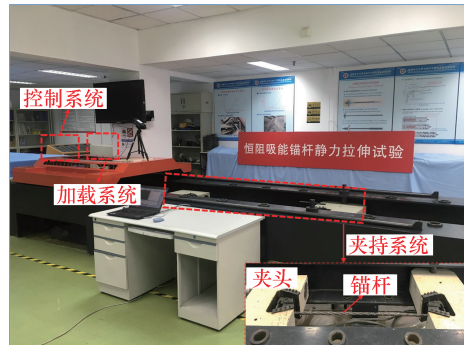


图2 静力拉伸试验系统

Fig. 2 Static tensile test system

落锤冲击试验系统由高强主体框架、加载控制系统、落锤和冲击加载单元 4 部分组成,如图 3 所示。试验采用等质量、等高度落锤冲击,落锤高度为 0.8 m,落锤质量为 1 000 kg。

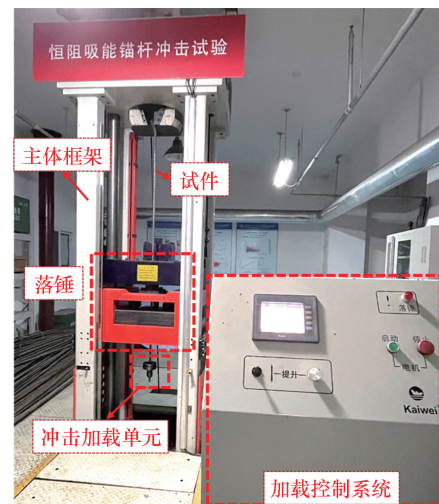


图3 落锤冲击试验系统

Fig. 3 Drop hammer impact test system

2.3.2 静力学试验结果分析

CREA 锚杆与 CRLD 锚杆的荷载-延伸率曲线如图 4 所示,锚杆静力学特性对比分析如图 5 所示。

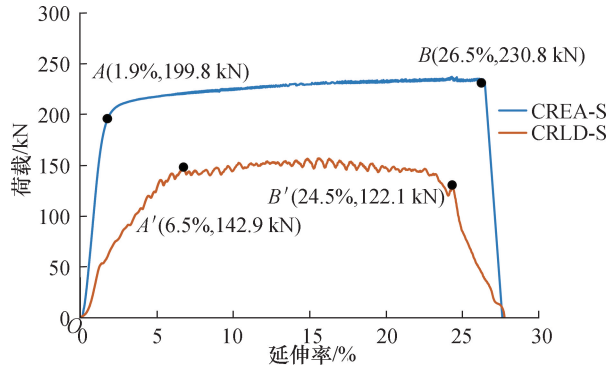


图 4 荷载-延伸率曲线  
Fig. 4 Load-elongation curves

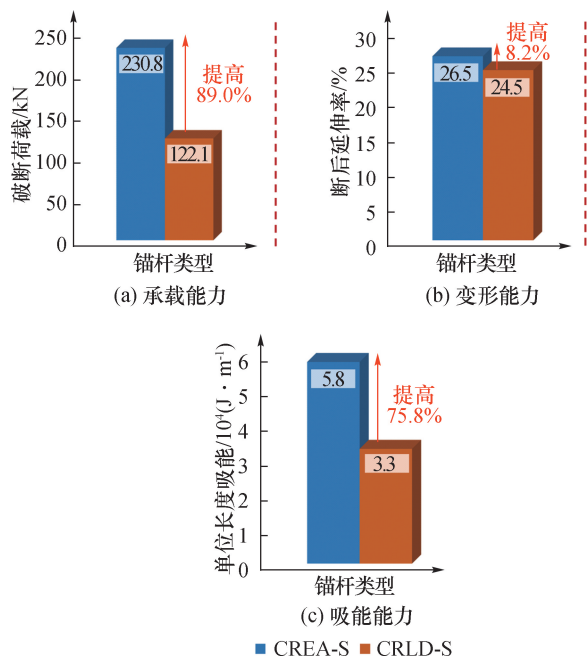


图 5 静力学特性对比  
Fig. 5 Comparison of static characteristics

由图 4 和图 5 分析可知：

(1) 静力承载能力。CREA-S 的屈服荷载为 199.8 kN,破断荷载为 230.8 kN;CRLD-S 的屈服荷载为 142.9 kN,破断荷载为 122.1 kN。CREA-S 的屈服荷载为 CRLD-S 的 1.40 倍,破断荷载为 CRLD-S 的 1.89 倍,表明 CREA 锚杆在承载能力方面具有明显优势。

(2) 静力变形能力。CREA-S 的屈服延伸率为 1.9%,CRLD-S 的屈服延伸率为 6.5%,前者相

比后者降低了 70.8%,表明 CREA-S 在受力初始阶段,能够通过较小变形量提供较高的支护阻力。CREA-S 的断后延伸率为 26.5%,CRLD-S 的断后延伸率为 24.5%,前者相比后者断后延伸率提高了 8.2%,表明 CREA 锚杆的变形能力优于 CRLD 锚杆。

(3) 静力吸能能力。通过对锚杆荷载-延伸率曲线进行积分得到其单位长度能够吸收的能量,可知 CREA-S 的单位长度吸收能量为  $5.8 \times 10^4$  J/m,CRLD-S 的单位长度吸收能量为  $3.3 \times 10^4$  J/m,前者为后者的 1.76 倍,表明 CREA 锚杆在吸收围岩变形能量方面具有明显优势。

综上所述,在静力学特性研究中,CREA 锚杆的破断荷载为 230.8 kN,延伸率为 26.5%,单位长度吸收能量为  $5.8 \times 10^4$  J/m,分别是 CRLD 锚杆的 1.89、1.08、1.76 倍,表明 CREA 锚杆具有良好的承载能力、变形能力和吸能特性。

2.3.3 动力学试验结果分析

各试件的单次冲击位移-冲击次数曲线及破坏形态如图 6 所示。单次冲击能量为落锤质量、下落高度与重力加速度的乘积,单次冲击能量为  $8 \times 10^3$  J。各试件动力学特性对比如图 7 所示。

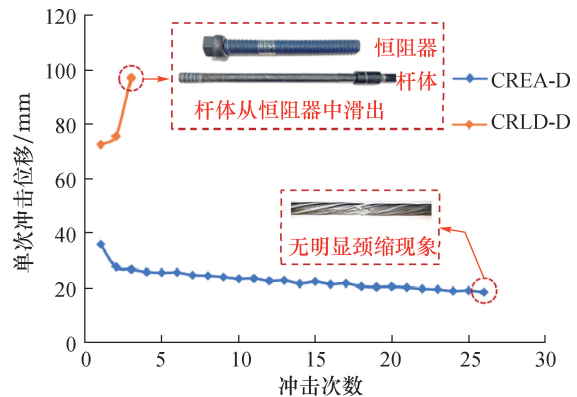


图 6 锚杆单次冲击位移-冲击次数曲线  
Fig. 6 Bolt single impact displacement-impact times curves

由图 6 和图 7 分析可知：

(1) 动力抗冲击性能。CREA-D 与 CRLD-D 单次冲击的平均位移量为 23.0 mm 与 74.2 mm,定义抗冲击指标为单次冲击能量与单次冲击平均位移的比值,CREA-D 与 CRLD-D 的抗冲击指标分别为 347.8 J/mm 和 107.8 J/mm,前者是后者的 3.23 倍,表明 CREA 锚杆在动力冲击作用下具有良好的抗冲击能力。

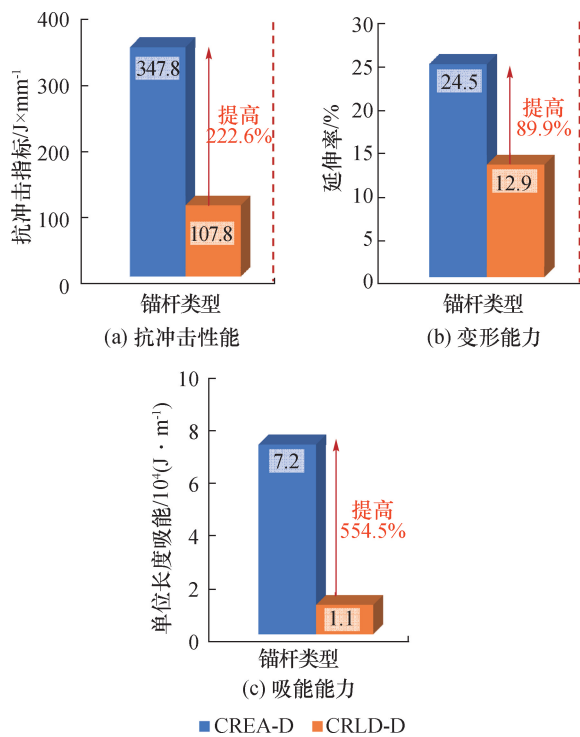


图7 动力学特性对比

Fig. 7 Comparison of dynamic characteristics

(2) 动力变形能力。在动力冲击作用下, CREA-D 与 CRLD-D 的伸长量分别为 736 mm 和

387 mm, CREA-D 与 CRLD-D 的延伸率分别为 24.5% 和 12.9%, 前者是后者的 1.90 倍。表明 CREA 锚杆在动力冲击作用下的变形能力优于 CRLD 锚杆。

(3) 动力吸能特性。CREA-D 在第 27 次发生破断, 断口处未出现明显颈缩, CRLD-D 在第 4 次发生破断, 杆体从恒阻器中滑出。锚杆单位长度吸收能量为冲击次数与单次冲击能量的乘积与锚杆长度的比值, CREA-D 与 CRLD-D 单位长度吸收的能量分别为  $7.2 \times 10^4 \text{ J/m}$  和  $1.1 \times 10^4 \text{ J/m}$ , 前者是后者的 6.55 倍, 表明 CREA 锚杆在吸收动能方面具有明显的优势。

综上所述, 在动力学特性研究中, CREA 锚杆的抗冲击指标为  $347.8 \text{ J/mm}$ 、伸长量为 736 mm、单位长度吸收能量为  $7.2 \times 10^4 \text{ J/m}$ , 分别是恒阻大变形锚杆的 3.23、1.90、3.55 倍。表明 CREA 锚杆在动力冲击作用下具有良好的抗冲击能力、变形能力和吸能特性。

### 3 吸能锚杆现场应用

通过前期大量的试验研究, 吸能锚杆支护技术得到了快速发展并应用于工程现场, 典型现场应用见表 5。

表5 吸能锚杆典型现场应用

Tab. 5 Typical field application of energy-absorbing bolt

时间	锚杆名称	锚杆类型	工程地点	工程特点	埋深/m	屈服荷载/kN	预紧力/kN	围岩控制效果
1999 年	Cone 锚杆 <sup>[45]</sup>		Dig Bell Mine	高应力 强冲击倾向性	410 ~ 535	—	—	在等级 $M = 1.7$ 的微震影响下, 围岩最大变形为 500 mm
2000 年	Modified Cone 锚杆 <sup>[19]</sup>	杆体 结构型	Brunswick Mine	高应力 强冲击倾向性	892	—	—	锚杆最大变形 180 mm, 有效吸收了围岩变形能量
2008 年	Modified Cone 锚杆 <sup>[18]</sup>		Vale Inco Copper Cliff North Mine	高应力 强冲击倾向性	—	—	—	在等级 $M_n = 2.9$ 的微震影响下, 锚杆未破断失效
2011 年	恒阻大变形锚杆 <sup>[25]</sup>		白皎煤矿	强动压扰动	482	120 ~ 150	60	顶底移近量 150 mm
2014 年	恒阻大变形锚杆 <sup>[46]</sup>	机械 结构型	新安煤矿	软弱围岩	750	—	100	顶底移近量 62 ~ 92 mm 两帮收敛量 98 ~ 110 mm
2018 年	Garford 锚杆 <sup>[31]</sup>		南非某金矿	强冲击倾向性	—	153 ~ 165	—	在 6 次等级 $M = 0.5 \sim 2.6$ 的微震影响下, 锚杆未破断失效
2012 年	D 型锚杆 <sup>[40]</sup>		瑞典某金属矿	高应力	—	171	—	支护区域巷道顶板稳定
2015 年	BHRB 锚杆 <sup>[47]</sup>	杆体 材料型	塔山煤矿	高应力	470 m	152.7	60	顶底移近量 252 mm 两帮收敛量 405 mm
2021 年	CREA 锚杆 <sup>[42]</sup>		赵楼煤矿	高应力 强冲击倾向性	1 037	199.8	130	顶底移近量 165 mm 两帮收敛量 128 mm



### 3.1 杆体结构型吸能锚杆

1999年,Turner等<sup>[45]</sup>将Cone锚杆在具有高应力和强冲击倾向性的Dig Bell矿中应用,在等级 $M=1.7$ (里氏震级)的微震影响下,该类锚杆支护区域围岩最大变形为500 mm,保证了巷道稳定;2000年,Simsen等<sup>[19]</sup>将Modified Cone锚杆在具有高应力和强冲击倾向性的Brunswick矿中应用,该类锚杆最大变形量为180 mm,有效吸收了围岩变形释放的能量;2008年,Yao等<sup>[18]</sup>将Modified Cone锚杆在Vale Inco Copper Cliff North矿中应用,在等级 $M_n=2.9$ (纳特里震级)的微震影响下,该类锚杆未发生破断失效。

上述锚杆施工工艺<sup>[18-19,45]</sup>为围岩钻孔、杆体润滑材料涂抹、锚固剂装填、杆体旋转安装、托盘及螺母安装。上述锚杆在施工时围岩钻孔直径较大,旋转安装锚杆时润滑涂层极易剥离杆体。

### 3.2 机械结构型吸能锚杆

2011年,张国锋等<sup>[25]</sup>将恒阻大变形锚杆在强动压扰动的芙蓉矿区白皎煤矿中应用,监测结果表明,巷道变形稳定时,顶底移近量150 mm,该类锚杆对强动压扰动的煤矿具有良好的围岩控制效果;2014年,杨晓杰等<sup>[46]</sup>将恒阻大变形锚杆在新安煤矿软岩巷道中应用,监测结果表明,巷道变形稳定时,巷道顶底移近量62~92 mm,两帮收敛量98~110 mm,有效控制了软弱围岩变形;2018年,Sengani等<sup>[31]</sup>将Garford锚杆在南非某深部金属矿中应用,结果表明,该类锚杆支护区域受6次微震影响,微震等级 $M=0.5\sim 2.6$ (里氏震级),锚杆未发生破断失效。

上述锚杆施工工艺<sup>[25,31]</sup>为围岩钻孔及扩孔、锚固剂装填、杆体旋转安装、托盘及螺母安装。相比于传统锚杆,该施工工艺增加了围岩扩孔等步骤。

### 3.3 杆体材料型吸能锚杆

2012年,Li<sup>[40]</sup>将D型锚杆在瑞典某深部金属矿中应用,结果表明,D型锚杆支护区域巷道顶板稳定;2015年,康红普等<sup>[47]</sup>将BHRB锚杆应用于塔山煤矿中,监测结果表明,巷道顶底移近量252 mm,两帮收敛量405 mm,有效控制了巷道围岩变形;2021年,笔者团队<sup>[42]</sup>将CREA锚杆在千米深井赵楼煤矿中应用,监测结果表明,赵楼煤矿巷道最大顶底移近量165 mm,最大两帮收敛量128 mm,有效控制了深部高应力巷道围岩变形。

上述锚杆施工工艺<sup>[40,47-48]</sup>为围岩钻孔、锚固剂装填、杆体安装、托盘及锁具安装。该工艺与传

统锚杆基本一致,具有较高施工效率。

由上述分析及表5可知:

(1) 早期吸能锚杆的研究以结构型为主,与传统锚杆相比,结构型吸能锚杆施工需要围岩扩孔、润滑材料涂抹等工序,施工效率低,现场应用研究较少。材料型吸能锚杆施工工序与传统锚杆基本一致,工艺简单,施工效率更高,具有良好的现场应用前景,针对其现场应用的研究具有重要意义。

(2) 结构型吸能锚杆发展后期实现了预紧力施加并不断提高,可施加范围为60~100 kN,占屈服荷载的40%~50%。随着材料型吸能锚杆的出现,可施加的预紧力随之提高,其中CREA锚杆可施加的预紧力高达130 kN,占屈服荷载的65%,可更好地控制围岩变形与破坏,保持巷道围岩稳定。

## 4 总结与展望

(1) 传统支护体系在围岩大变形时易发生破断失效,导致冒顶、塌方、冲击地压等事故频发。为吸收围岩变形释放的能量,控制围岩变形,需要研发具有高恒阻力、高延伸率和高预应力的吸能锚杆。

(2) 吸能锚杆按工作机理可分为结构型吸能锚杆与材料型吸能锚杆,相比前者,材料型吸能锚杆结构相对简单,能够充分地发挥材料力学性能。笔者团队研发了恒阻吸能新材料锚杆,同时具备高强、高延伸率和高吸能特性,初步满足了复杂条件围岩控制要求。随着地下工程围岩条件越来越复杂,研发具有更高强度、高延伸率和高吸能特性的材料型吸能锚杆成为未来锚杆的发展趋势。

(3) 吸能锚杆的力学性能主要通过单轴拉伸试验和落锤冲击试验开展研究。由于锚杆在支护过程中受到拉、剪、扭、弯及高速冲击等多种荷载作用,现有试验难以模拟锚杆实际受力状态,下一步应开展吸能锚杆在多种荷载作用下的静力学性能研究和高应变率下的动力学性能研究。

(4) 吸能锚杆目前主要应用于矿山工程领域,形成了相应的施工工艺。但是已有文献对吸能锚杆现场应用的研究较少,下一步应对吸能锚杆在现场应用时的力学性能和围岩控制效果进行研究,制定吸能锚杆的设计、施工和验收标准,推广吸能锚杆在交通、市政、水利等不同领域地下工程中的应用。

## 参考文献

[1] 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 Manchao, Xie Heping, Peng Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] Wang Q, He M C, Yang J, et al. Study of a no-pillar mining technique with automatically formed gob-side entry retaining for longwall mining in coal mines [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 110: 1-8.
- [3] 王琦, 高红科, 蒋振华, 等. 地下工程围岩数字钻探测试系统研发与应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 301-310.  
Wang Qi, Gao Hongke, Jiang Zhenhua, et al. Development and application of a surrounding rock digital drilling test system of underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 301-310.
- [4] 张国锋, 王二雨, 许丽莹. 煤矿高恒阻大变形锚索受力特性、规律及应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2033-2043.  
Zhang Guofeng, Wang Eryu, Xu Liying. Mechanical characteristics of high constant resistance and large deformation anchor rope in coal mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2033-2043.
- [5] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1409-1417.  
He Manchao. Progress and challenges of soft rock engineering in depth [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1409-1417.
- [6] 潘一山, 齐庆新, 王爱文, 等. 煤矿冲击地压巷道三级支护理论与技术 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1585-1594.  
Pan Yishan, Qi Qingxin, Wang Aiwu, et al. Theory and technology of three levels support in bump-prone roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1585-1594.
- [7] Wang Q, Qin Q, Jiang B, et al. Mechanized construction of fabricated Arches for large-diameter tunnels [J]. Automation in Construction, 2021, 124: 103583.
- [8] Wang Q, Xin Z X, Jiang B, et al. Comparative experimental study on mechanical mechanism of combined Arches in large section tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99: 103386.
- [9] 王琦, 许硕, 江贝, 等. 地下工程约束混凝土支护理论与技术研究进展 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2760-2776.  
Wang Qi, Xu Shuo, Jiang Bei, et al. Research progress of confined concrete support theory and technology for underground engineering [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2760-2776.
- [10] 王琦, 江贝, 辛忠欣, 等. 无煤柱自成巷三维地质力学模型试验系统研制与工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1582-1594.  
Wang Qi, Jiang Bei, Xin Zhongxin, et al. Development of a 3D geomechanical model test system for non-pillar mining with automatically formed roadway and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1582-1594.
- [11] 王琦, 张朋, 蒋振华, 等. 深部高强锚注切顶自成巷方法与验证 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 382-397.  
Wang Qi, Zhang Peng, Jiang Zhenhua, et al. Automatic roadway formation method by roof cutting with high strength bolt-grouting in deep coal mine and its validation [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 382-397.
- [12] 张农, 阚甲广, 杨森. 锚杆(索)和U型钢支架支护失效形式与控制技术 [J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 41-47.  
Zhang Nong, Kan Jianguang, Yang Sen. Control technology and failure types of anchor bolt support and U-steel frame support [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 41-47.
- [13] 何满潮, 郭志飏. 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.
- [14] 何满潮. 深部建井力学研究进展 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 726-746.  
He Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 726-746.
- [15] Cai M, Kaiser P K. Rockburst support reference book-volume I: rockburst phenomenon and support characteristics [M]. Sudbury: Laurentian University, 2018: 284-285.
- [16] Jager A F. Two new support units for the control of rockburst damage [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract, 1994, 31(2): 621-631.
- [17] Ortlepp W D. Grouted rock-studs as rockburst support: A simple design approach and an effective test procedure [J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1994, 94(2): 47-63.

- [18] Cai M, Champaigne D. The art of rock support in burst-prone ground [C]// RaSiM 7(2009): Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines. Paramus USA: Rinton Press, 2009: 33-46.
- [19] Simser B, Joughin W C, Ortlepp W D. The performance of Brunswick Mine's rockburst support system during a severe seismic episode [J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 2002, 102(4): 217-223.
- [20] 赵兴东, 朱乾坤, 牛佳安, 等. 一种新型 J 释能锚杆力学作用机制及其动力冲击实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 13-21.  
Zhao Xingdong, Zhu Qiankun, Niu Jiaan, et al. Mechanical mechanism analyses and dynamic impact experimental tests of a kind of novel J energy-releasing bolts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 13-21.
- [21] Hyett A J, Bawden W F, Hedrick N, et al. A laboratory evaluation of the 25 mm garford bulb anchor for cable bolt reinforcement [J]. Cim Bulletin, 1995, 88(992): 54-59.
- [22] Varden R P. Development and Implementation of the garford dynamic bolt at kanowna belle mine [C]// Tang C. Controlling seismic hazard and sustainable development of deep mines: 7th international symposium on rockburst and seismicity in mines (RASIM7). Paramus USA: Rinton Press, 2009: 215-222.
- [23] Ozbay U, Neugebauer E. In-situ pull testing of a yieldable rock bolt, roofex [C]// RaSiM 7 (2009): Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines. Paramus USA: Rinton Press, 2009: 1081-1090.
- [24] 李晨. NPR 锚杆冲击拉伸动力学特性研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- [25] 张国锋, 何满潮, 俞学平, 等. 白皎矿保护层沿空切顶成巷无煤柱开采技术研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 511-516.  
Zhang Guofeng, He Manchao, Yu Xueping, et al. Research on the technique of no-pillar mining with gob-side entry formed by advanced roof caving in the protective seam in baijiao coal mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4): 511-516.
- [26] Li C 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.
- [27] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649-664.  
Kang Hongpu, Wang Jinhua, Lin Jian. Case studies of rock bolting in coal mine roadways [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 649-664.
- [28] 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]// Proceedings of The Fourth Australasian Ground Control in Mining Conference Proceedings. Sydney Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2018: 160-169.
- [29] Xu S, Hou P Y, Cai M, et al. An experiment study on a novel self-swelling anchorage bolt [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(11): 4855-4862.
- [30] Cai M, Champaigne D, Kaiser P K. Development of a fully debonded cone bolt for rockburst support [C]// Deep Mining 2010. Perth Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2010: 329-342.
- [31] Sengani F. Trials of the Garford hybrid dynamic bolt reinforcement system at a deep-level gold mine in South Africa [J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2018, 118(3): 289-296.
- [32] 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.
- [33] Sharifzadeh M, Lou J F, Crompton B. Dynamic performance of energy-absorbing rockbolts based on laboratory test results. Part I: Evolution, deformation mechanisms, dynamic performance and classification [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2020, 105: 103510.
- [34] Charette F. Performance of Swellex rock bolts under dynamic loading conditions [C]// Second International Seminar on Deep and High Stress Mining, Johannesburg, South Africa: The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004: 95-106.
- [35] Ortlepp W D. The design of support for the containment of rockburst damage in tunnels-An engineering approach [C]// Proceedings of the International Symposium on Rock Support. Rotterdam: A A Balkema Publishers, 1992: 593-609.
- [36] St-Pierre L, Hassani F P, Radziszewski P H, et al. Development of a dynamic model for a cone bolt [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1): 107-114.
- [37] Varden R, Lachenicht R, Player J R, et al. Development and implementation of the garford dynamic bolt at the

- Kanowna belle mine [C]// Proceedings of the 10th Underground Operators Conference. Paramus USA: Rinton Press, 2008:95 - 104.
- [38] Charette F, Plouffe M. Roofex-results of laboratory testing of a new concept of yieldable tendon[C]// Proceedings of the 4th International Seminar on Deep and High Stress Mining. Perth Australian: Australian Centre for Geomechanics, 2007:395-404.
- [39] 宫伟力, 孙雅星, 高霞, 等. 基于落锤冲击试验的恒阻大变形锚杆动力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11):2498-2509.
- Gong Weili, Sun Yaxing, Gao Xia, et al. Dynamic characteristics of constant-resistance-large-deformation bolts based on weight-dropping tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11):2498-2509.
- [40] Li C C. Performance of D-bolts under static loading [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(2):183-192.
- [41] Knox G, Berghorst A, Bruin P D. An empirical comparison between new and existing laboratory-based dynamic sample configurations [C]// Caving 2018. Perth Australian: Australian Centre for Geomechanics, 2018:747-758.
- [42] 王琦, 何满潮, 许硕, 等. 恒阻吸能锚杆力学特性与工程应用[J]. 煤炭学报, 2021. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.0383.
- Wang Qi, He Manchao, Xu Shuo, et al. Mechanical Properties and Engineering Application of Constant Resistance Energy Absorbing Bolt [J]. Journal of China Coal Society, 2021. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2021.0383.
- [43] He M C, Wang Q, Wu Q Y. Innovation and future of mining rock mechanics[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(1):1-21.
- [44] 何满潮, 夏敏, 王琦, 等. NPR 锚索材料及其生产方法: 中国, CN202010544758. 7[P]. 2020-10-13.
- [45] Turner M H, Player J R. Seismicity at Big Bell Mine [C]// MASSMIN 2000 Conference, Brisbane, Australia, 2000:791-797.
- [46] 杨晓杰, 庞杰文, 张保童, 等. 回风石门软岩巷道变形破坏机理及其支护对策[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6):1000-1008.
- Yang Xiaojie, Pang Jiewen, Zhang Baotong, et al. Deformation and failure mechanism and support measures of the soft rock roadway in the air return laneway[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6):1000-1008.
- [47] 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.

(责任编辑:陈骏)