

DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0079

缩管式恒阻大变形锚杆抗冲击特性 及其治理岩爆潜力研究

赵明珠¹, 吴学震¹, 叶 青¹, 王 刚^{2,3}, 蒋宇静^{1,4}, 邓 涛¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建理工大学 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;
3. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 4. 长崎大学 工学研究科, 日本 长崎)

摘 要: 深部岩体非线性大变形特性引发的岩爆灾害一直是岩土工程的世界性难题, 严重制约了工程建设的施工进度和工程安全, 加强对岩爆防治措施的深入研究刻不容缓。基于钢管挤压变形原理, 提出了一种新型的缩管式恒阻大变形锚杆, 该种锚杆可在容许较大的变形量的同时提供较高的恒阻力。在前期研究的基础上, 通过落锤冲击试验探索了缩管式恒阻大变形锚杆的抗冲击性能。试验结果表明: 在整个冲击过程中, 缩管式恒阻大变形锚杆的工作阻力稳定在 150~180 kN 范围内, 恒阻特性显著; 缩管式恒阻大变形锚杆吸收能量大、效率高, 单次可吸收冲击能量为 53 kJ; 在冲击过程中, 试件压缩率仅减小了 0.54%~1.43%, 变形情况较为稳定。缩管式恒阻大变形锚杆具有良好的抗冲击特能, 可为地下工程建设过程中岩爆灾害的治理提供有力的技术支撑。

关 键 词: 缩管式恒阻大变形锚杆; 抗冲击特性; 岩爆; 恒阻力; 落锤冲击试验

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 11-3355-12

Impact resistance characteristics of steel pipe shrinkable energy-absorbing bolt and its potential for rockburst mitigation and control

ZHAO Ming-zhu¹, WU Xue-zhen¹, YE Qing¹, WANG Gang^{2,3}, JIANG Yu-jing^{1,4}, DENG Tao¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China;

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 4. Department of Engineering Research, Nagasaki University, Nagasaki, Japan)

Abstract: The rockburst disaster triggered by the nonlinear large-deformation characteristics of deep rock masses has been a worldwide problem in geotechnical engineering, severely constraining construction progress and safety in engineering projects. Therefore, it is imperative to intensify in-depth research on rockburst prevention measures. Based on the principle of steel pipe compressive deformation, a novel steel pipe shrinkable energy-absorbing bolt constant-resistance large-deformation bolt was proposed, which can provide a high constant resistance while accommodating a substantial amount of deformation. Building on previous research, the impact resistance of the steel pipe shrinkable energy-absorbing bolt constant-resistance large-deformation bolt was investigated through drop hammer impact tests. The test results indicate that: during the impact process, the working resistance of the steel pipe shrinkable energy-absorbing bolt constant-resistance large-deformation bolt remains stable within the range of 150 kN to 180 kN, demonstrating notable constant-resistance characteristics; the bolt absorbs a significant amount of energy with high efficiency, capable of absorbing up to 53 kJ of impact energy in a single instance; throughout the impact, the compression rate of the specimen only decreased by 0.54% to 1.43%, indicating relatively stable deformation. The steel pipe shrinkable energy-absorbing bolt constant-resistance large-deformation bolt exhibits excellent impact resistance, providing robust technical support for the prevention and control of rockburst disasters during underground engineering construction.

Keywords: steel pipe shrinkable energy-absorbing bolt; impact resistance characteristics; rockburst; constant resistance; drop-weight impact test

收稿日期: 2024-01-12

录用日期: 2024-03-03

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52179098, No.41907251)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52179098, 41907251).

第一作者简介: 赵明珠, 女, 1998 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 230510024@fzu.edu.cn

通讯作者: 吴学震, 男, 1988 年生, 博士, 研究员, 主要从事隧道与地下工程等方面的研究。E-mail: wu@fzu.edu.cn

1 引言

近年来,我国地下工程建设逐渐向地形地质条件复杂的中西部地区发展,工程建设规模和深度也不断增大,在水利工程、交通隧道、矿石开采等领域都面临千米以下施工带来的风险^[1-3]。在深部高地温、高地应力、高水压影响下,围岩呈现出强烈的非线性大变形破坏特征,极易产生大变形工程灾害,严重制约了施工进度和工程安全^[4-6]。围岩的大变形特性在硬岩中表现为岩爆,岩爆是在高地应力条件下的硬质脆性岩体中开挖隧洞时,因开挖卸荷而引发岩体中聚积的弹性应变能突然释放,发生爆裂松脱、剥离甚至弹射等突发性破坏的现象^[7-8]。川藏铁路拉萨—林芝段的桑珠岭隧道岩爆区长达 9.5 km,施工中共发生 16 000 多次岩爆^[9];巴玉隧道全长为 13.1 km,94%为岩爆区,是目前世界上岩爆最强的高原铁路隧道,其岩爆强度大、频率高,一般持续时间为 2~6 h,单次最长持续时间超过 20 h,由于岩爆发生的时间、位置、强度等难以预测,给施工人员与机械设备的安全带来了巨大的威胁,且显著加大施工成本、降低施工效率^[10]。引汉济渭工程横穿秦岭山脉,隧道全长为 98.3 km,岩爆段占总施工长度的 70%,累计发生岩爆 4 000 多次,中等强度以上的岩爆 3 000 多次;四川峨汉高速的大峡谷隧道最大埋深为 1 944 m,是目前世界上第一埋深高速公路隧道,岩爆段约占全长的 55%,岩爆弹射距离可达 50 m。其他国家也存在同样的问题,乌兹别克斯坦的卡姆奇克隧道全长为 19.2 km,岩爆段长约为 10 km,中等强度以上的岩爆超 3 000 次,给施工安全带来重大影响^[11]。1995 年南非矿区有 129 人在岩爆事故中丧生,仅卡尔顿维尔金矿区发生岩爆发生次数已达 41 次,2003 年仍有 37 人因岩爆死亡,目前南非深千米金矿数量众多,平均开采深度约为 2 500 m, Mponeng 金矿开采深度已超 4 000 m,导致南非面临极其频繁和严重的岩爆灾害^[12-13]。目前正在施工的雅安—林芝段隧道的岩爆段长度预计达到 169.88 km,其中中等岩爆段长 87.5 km,强烈岩爆段长 21.7 km^[14]。这对深部地下工程建设安全提出了严峻的挑战,加强对岩爆发生机制和防治措施的深入研究已经刻不容缓。

对岩爆防治的研究可追溯到 18 世纪初期,至今已有诸多防治措施和经验,但岩爆仍是一个世界性难题^[15]。我国通常采用对掌子面超前钻孔并高压均匀注水的措施来防治岩爆,由此可以破坏岩层的应力结构、软化并降低围岩强度、释放应变能,从而

减小岩爆的范围和强度,但该方法在高地应力的坚硬岩体中,往往难以起到应有的软化围岩作用,防治效果有限。在围岩加固方面,传统锚杆能够承受较高的载荷,但无法应对深部工程支护中围岩的非线性大变形问题,在围岩裂隙附近杆体产生较小位移的情况下,该种锚杆即会发生局部拉断破坏^[16-19]。因此,在易发生岩爆的工程施工过程中,通常采用能够容许围岩一定变形量的水胀式锚杆、管缝式锚杆等大变形锚杆,但以上锚杆存在承载力较低且不稳定的问题,这对大变形吸能锚固技术提出了新要求。

类似冲击现象发生在煤矿中被称为冲击地压,是我国深部煤矿开采面临的主要动力灾害之一^[20-22]。我国已有学者开展了相关研究工作。比如,朱斯陶等^[23]对深厚煤层开采中冲击地压与大变形协调控制机制开展了研究;吴拥政等^[24]提出了深部开采冲击地压巷道“卸压—支护—防护”协同防控原理与技术;齐庆新等^[25]提出深部冲击地压巷道“三级”吸能支护思想与成套技术;潘一山等^[26]研发了系列液压防冲支架。然而,在大变形吸能锚固技术方面仍需进一步研究。

在此情况下,能够提供较高支护阻力且适应较大变形量的大变形锚杆应运而生。根据大变形锚杆的工作原理,可将它们分为机械滑动型大变形锚杆和屈服伸长型大变形锚杆。机械滑动型大变形锚杆设置特定的机械结构,并当杆体拉应力达到一定数值后,借助机械结构的滑动实现锚杆伸长,此类锚杆的支护阻力和延伸量由结构滑动的阻力和滑动量决定,主要包括锥型锚杆^[27]、树脂锚固锥型锚杆(modified cone bolt,简称 MCB)、Durabar 锚杆^[28]、Garford 锚杆^[29]、Roofex 锚杆^[30]和何满潮院士的恒阻大变形锚杆^[16]。锥型锚杆是由南非的 Jager 于 1922 年研发的,该锚杆通过扁平的锥型端头挤压锚固剂以达到滑动大变形的目的,但其恒阻性能不够稳定,且受锚固剂和围岩的强度影响较大。锥型锚杆起初仅设计用于水泥灌浆,而后在其基础上增加了一个用于搅拌树脂药卷的叶片,改进得到 MCB。1995 年,南非又提出了 Durabar 锚杆,该锚杆同样由锥型锚杆演变而来,通过波纹状杆体在锚固剂中滑移来提供支护阻力,且存在与锥型锚杆相同的问题。Garford 锚杆、Roofex 锚杆和恒阻大变形锚杆均通过材料之间的相互作用来提供支护阻力、实现锚杆大变形,锚杆性能较为稳定,但制作成本较高,且需要较粗的锚孔,有一定的施工难度。屈服伸长型大变形锚杆通过杆体材料本身的伸长来实现锚杆的延伸特性,其支护阻力和延伸量由材料的屈服强

度和延伸率提供, 主要以 D-bolt 为代表。D-bolt 是 Li^[31]提出的一种多点锚固锚杆, 杆体由光滑钢筋和多个锚节构成, 锚节与锚固剂黏结, 锚节之间的光滑部分可随围岩膨胀而变形, 破坏前最大可拉长约 20%, 以此吸收大量能量, 多个锚节的设置有效地避免了应力集中和因单个锚节失效引起的锚杆整体失效问题。然而, 该锚杆锚节的锚固效果难以保证, 且难以应用在需要施加预应力的深部围岩中^[32]。

为了深入了解大变形锚杆在动态冲击作用下的力学响应特性, 国内外学者对提出的大变形锚杆进行了大量冲击试验。Ansell^[33]对全长锚固的无套管吸能锚杆进行了自由落体试验, 试验显示, 当冲击速度达到 12 m/s 时, 锚杆在靠近螺母处发生破坏; Li^[31]对不同直径、长度的锚杆开展了 50 多次落锤冲击试验, 冲击能量为 10~60 kJ, 冲击力约为 200~300 kN^[18, 31]; 何满潮院士团队对恒阻大变形锚杆开展了动载冲击试验, 试验的最大冲击能量为 19.6 kJ, 锚杆冲击力在 0~300 kN 之间波动^[16, 34-37]。

针对上述问题, 笔者提出了一种自主研发的缩管式恒阻大变形锚索/锚杆, 该种锚索/锚杆可在容许较大的变形量的同时提供较高的恒阻力, 并通过室内试验验证了该锚索/锚杆良好的大变形特性^[38]。而本文在前期研究的基础上, 对新型的缩管式恒阻大变形锚杆其结构组成以及变形机制进行详细介绍, 并通过对新型恒阻器开展不同落锤高度、冲击次数、落锤重量的系列落锤冲击试验, 探索缩管式恒阻大变形锚杆的抗冲击性能。

2 缩管式恒阻大变形锚杆

缩管式恒阻大变形锚杆由新型恒阻器、杆体、螺母、托盘组成, 如图 1(a)所示。其中, 新型恒阻器包括约束环和压缩管, 压缩管为空心圆钢管, 约束环为内孔有一定锥度的圆环柱, 变形原理如图 1(b)所示。

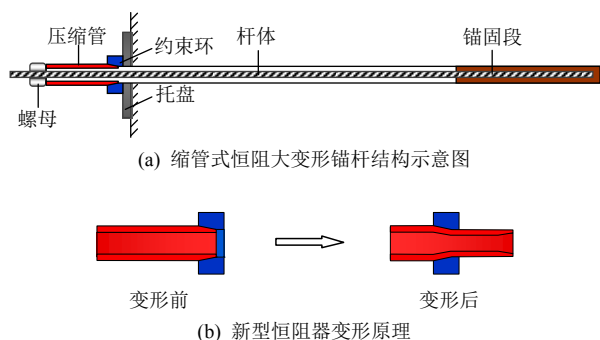


图 1 缩管式恒阻大变形锚杆

Fig.1 Steel pipe shrinkable energy-absorbing bolt

缩管式恒阻大变形锚杆的工作原理如下:

(1) 初始变形阶段: 当围岩变形能较小时, 杆体的拉力小于设定的恒阻力, 恒阻器基本无变形, 此阶段主要依靠杆体的弹性变形来抵抗围岩变形破坏。

(2) 结构变形阶段: 随着围岩变形增大, 杆体的拉力逐渐增大, 当达到设定的恒阻力时, 压缩管开始产生径向收缩变形和轴向位移, 逐渐进入约束环, 在此过程中大变形锚杆可提供稳定的支护阻力, 依靠恒阻器的结构变形来抵抗围岩变形破坏。

(3) 极限变形阶段: 当变形量大于压缩管极限长度时, 螺母直接接触约束环, 恒阻器卡死不再发生变形, 杆体的拉力不断增加, 直至达到其极限破断力, 杆体发生断裂, 此阶段依靠杆体材料的塑性变形来抵抗围岩变形破坏。

3 冲击试验

3.1 试验准备

为了测试缩管式恒阻大变形锚杆的抗冲击特性, 采用图 2 所示的落锤冲击试验系统开展系列冲击试验, 该系统主要由落锤冲击试验机和落锤信号调节仪组成。落锤的主要部件有锤头、配重板、夹具等, 下落方式为自由落体, 并可通过两条刚性轨道限定其下落位置。落锤高度范围为 0~10 m, 落锤重量范围为 30~1 030 kg, 可通过调节不同的落锤高度和落锤重量来实现不同的冲击能量。采用落锤信号调节仪采集冲击全过程的冲击力和位移数据, 并采用采集频率为 2 000 帧/s 的高速相机采集试验全过程的图像。

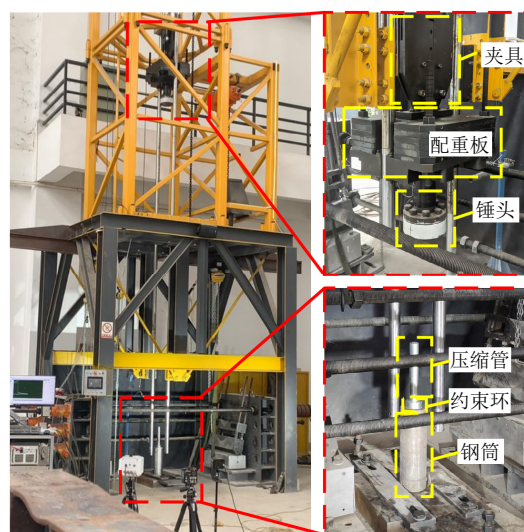
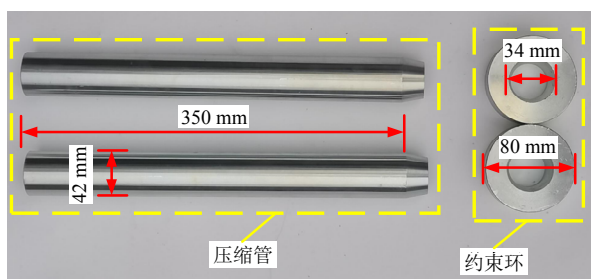


图 2 落锤冲击试验系统

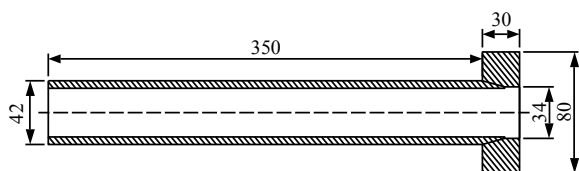
Fig.2 Drop-weight impact test system

3.2 试验方案

由于试验机空间限制, 本试验仅采用新型恒阻器进行试验研究, 如图 3(a)所示。恒阻器具体尺寸如图 3(b)所示, 其中, 压缩管外径为 42 mm, 约束环外径为 80 mm, 厚度为 30 mm。压缩管和约束环均采用 20 钢, 表面做防腐处理。该恒阻器为适用于锚杆的 16 t 级恒阻器, 其静力特性如图 4 所示(受试验空间限制, 恒阻器的最大变形量为 80 mm)。在试验过程中, 为了避免试件固定不牢可能造成测试结果不准确、损坏试验机等问题, 对试件采取稳定的固定方式。具体地, 将压缩管与约束环组装成的新型恒阻器放置在试验机中心的钢筒上, 采用试验机上的紧固压板夹紧钢筒, 再拧紧螺栓, 保证底部钢筒紧固无移动。



(a) 新型恒阻器试件



(b) 新型恒阻器截面图 (单位: mm)

图 3 冲击试验试件

Fig.3 Impact test specimens

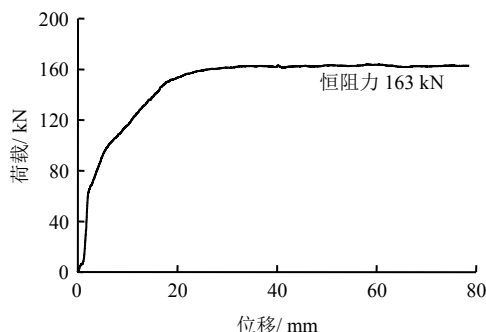


图 4 静力特性

Fig.4 Static mechanical characteristic

根据加拿大和南非岩爆现场的估计数据, 岩块最大弹射速度可达 10 m/s, 此时岩爆灾害对人员和设备会产生极大危害, 国内众多学者通过理论分析、

数值模拟也得出 10 m/s 已为一个较大的岩块弹射速度^[39-43]。本试验的落锤冲击速度参考该数据设置, 设置落锤高度为 2.5~10 m, 对应冲击速度为 7.07~14.14 m/s。

本试验共进行了 6 个新型恒阻器样品的 10 次落锤冲击试验, 研究不同落锤高度(冲击速度)、冲击次数、落锤重量等因素对其抗冲击特性的影响, 具体试验加载方案在表 1 中列出。其中, 试件 B2 和 B5、B4 和 B6、B3 和 N1 的冲击能量较为相近, 在设计试验与后续分析中均按照相等考虑。且由于压缩管位移量远小于落锤高度, 其产生的冲击能量不记录在内。试件 B1、B2、B3、B4 采用 530 kg 落锤和不同落锤高度, 试件 B5、B6 采用 1 030 kg 落锤和不同落锤高度, 可分别分析落锤高度(冲击速度)对恒阻器抗冲击特性的影响。试件 B1 冲击 4 次, 与 B3 对比, 可分析不同冲击次数的影响; 试件 B2 冲击 2 次, 与 B4 对比, 同样可分析不同冲击次数的影响。将试件 B2 和 B6 进行对比, 用于分析不同落锤重量的影响。对比试件 B2 和 B5、B4 和 B6, 可分别分析相同冲击能量下恒阻器的抗冲击特性。另外, 本试验设置一对对照组, 即落锤直接对钢筒进行冲击, 试件编号为 N1。

表 1 试验加载方案

Table 1 Test loading schemes

试件编号	落锤高度 / m	落锤重量 / kg	冲击能量 / kJ	冲击次数 / 次
B1	3.3	530	17.5	4
B2	5.0	530	26.5	2
B3	6.6	530	35.0	1
B4	10.0	530	53.0	1
B5	2.5	1 030	25.8	1
B6	5.0	1 030	51.5	1
N1	3.3	1 030	34.0	1

4 试验结果

图 5、6 列出了试件 B4 和对照组 N1 的冲击过程, 试验视频可见附件。高速相机和落锤信号调节仪均在落锤与试件撞击前 1 ms 开始记录数据(0 ms)。当落锤接触试件后(1 ms), 压缩管获得动能, 二者之间的应力急剧增加, 达到设定冲击力后, 压缩管与落锤共同向下运动, 运动过程中压缩管发生径向收缩变形, 进入约束环, 落锤动能不断被消耗, 落锤速度也逐渐减小, 当速度下降为 0 m/s 时(36 ms), 压缩管达到最大位移, 此后冲击力急剧减小, 压缩管不再变形, 而落锤将脱离压缩管轻微向上回弹。从落锤与试件接触到落锤开始

回弹的时间为冲击持续时间。而落锤接触钢筒后（1 ms），二者之间的冲击力骤增，随后在短时间

内骤降，落锤速度下降为 0 m/s 后（3 ms），落锤与钢筒均大幅向上回弹。

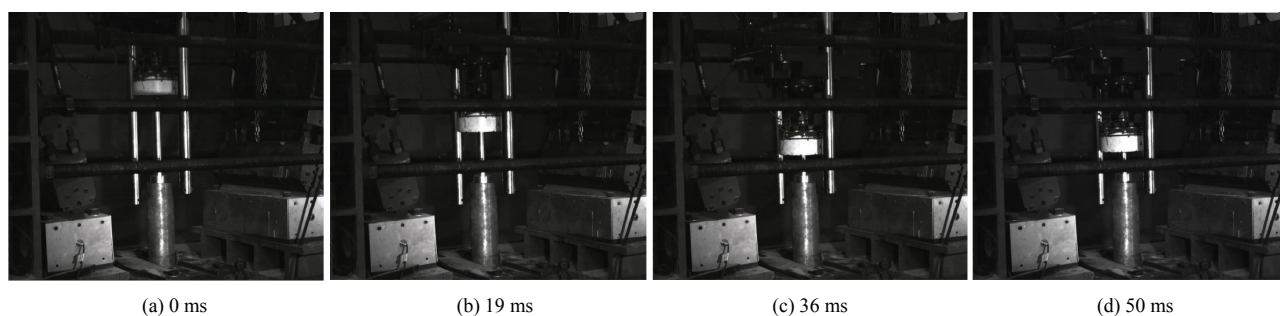


图 5 试件 B4 冲击试验过程图

Fig.5 Diagrams of the impact test procedure for specimen B4

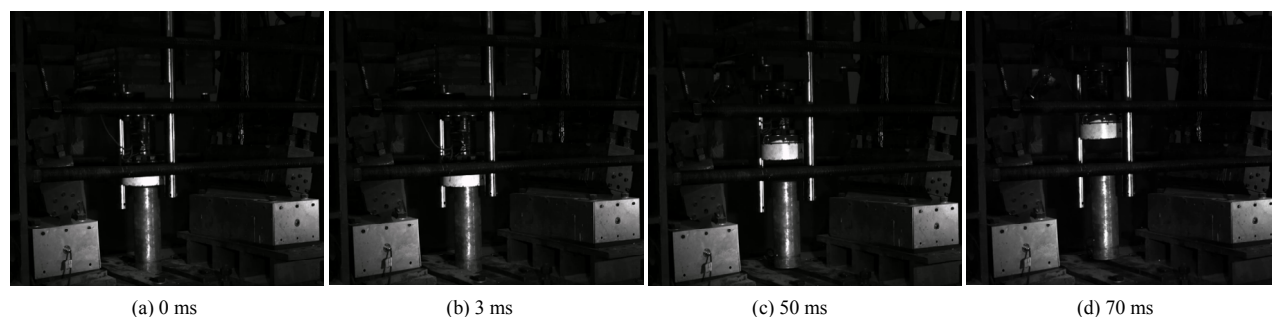


图 6 对照组 N1 冲击试验过程图

Fig.6 Diagrams of the shock test procedure for control group N1

大变形锚杆的抗冲击特性可以通过冲击力时程曲线、位移时程曲线和冲击力-位移曲线来描述。图 7 列出了试件 B1~B6 的冲击力与位移时程曲线和对照组 N1 的冲击力时程曲线，红色线代表冲击力时程曲线，蓝色线为位移时程曲线。由于试件 B1 的第 3 次冲击（B1-3）试验未及时记录，导致各项数据及曲线缺失。对照组 N1 无位移时程曲线，因该试验仅对钢筒进行冲击，未设置压缩管，试验机无法对位移数据进行捕捉。对试验数据进行统计，可得到试件冲击能量 E 、冲击力峰值 $P_{\max}$ 、冲击力平均值 P_a 以及压缩管最大位移量 $D_{\max}$ 。图 8 绘制出了试件 B1~B6 的冲击力-位移曲线。

将以上试验结果进行总结，列于表 2 中。其中，试件冲击能量之和与压缩管最大位移量之和的比值为该试件的单位位移能量吸收量。

5 试验分析

5.1 影响因素分析

不同落锤高度（冲击速度）/落锤重量：本试验通过改变落锤高度得到不同落锤冲击速度，试件 B1~B4 的冲击速度在 8.12~14.14 m/s 范围内，压

缩管最大位移量在 77~256 mm 范围内；而对于不同落锤重量的冲击试验，试件 B2 和 B6 的位移量分别为 130 mm 和 249 mm。从表观上看，冲击速度和落锤重量对压缩管位移量的影响显著，而本质上是冲击能量的影响，冲击能量越大，消散所需要的时间越长，则冲击持续时间越长，压缩管位移量越大。分别对比试件 B2 和 B5、B4 和 B6 可以看出，在相同冲击能量的情况下，压缩管位移量大致相等，当落锤重量较大时，冲击持续时间则明显更长。从图 7 可以看出，不同冲击能量（冲击速度和落锤重量）下试件冲击力基本稳定在 150~180 kN 之间。因此，冲击力是由恒阻器本身决定的，冲击能量对其并无显著影响。

不同冲击次数：试件 B1 两次冲击的能量之和与试件 B3 单次冲击的能量相等，而两者位移量仅相差 7%，因此单次冲击对压缩管变形量的影响是叠加的。而从图 7(a)~7(e)中可以看出，在同一试件不同冲击次数的情况下，吸收相同冲击能量所需的压缩管位移量以及所消耗的时间均大致相等，考虑到试件存在加工误差，则认为冲击次数对恒阻器的抗冲击特性并无影响。

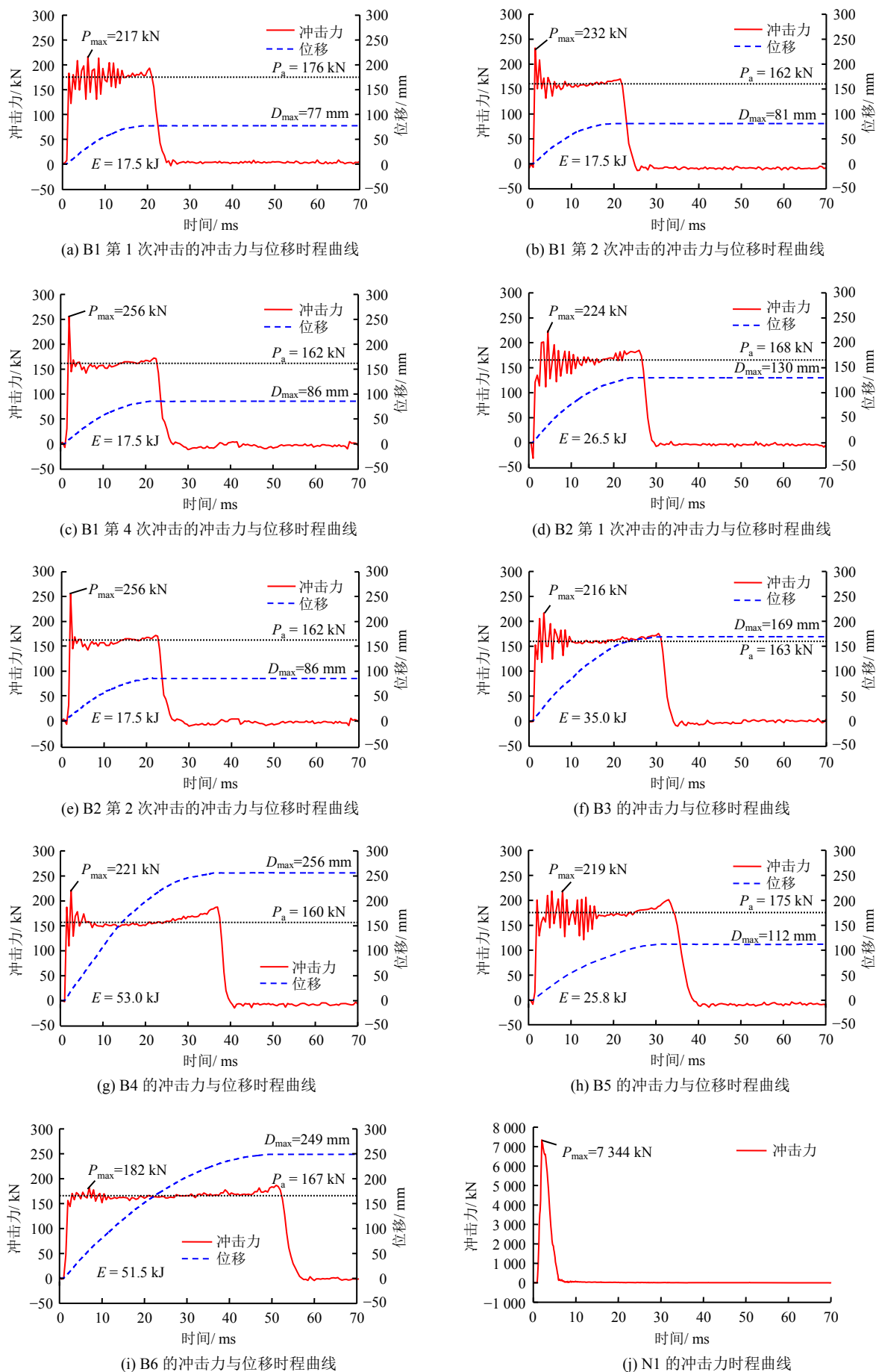


图 7 冲击力位移、时间曲线图

Fig.7 Impact force-time and displacement-time curves

5.2 冲击力分析

从图 7、8 中可以看出, 当试件 B1~B6 受到冲击后, 在极短的时间内冲击力骤增至第 1 峰值, 而在 50 ms 的时间内该恒阻器发挥作用致使冲击力迅速归 0, 在此过程中, 冲击力基本稳定在 150~180 kN 之间; 对照组 N1 未设置恒阻器, 最大峰值冲击力可达 7 344 kN, 显著高于试验组的峰值冲击力。对比可知, 本文新型恒阻器的恒阻特性显著, 具有较好的抗冲击能力。由表 2 计算可得, 试件 B1~B6 在冲击荷载作用下的平均工作阻力为 166 kN, 与静力试验结果大致相等, 表明了其恒阻性能的稳定。

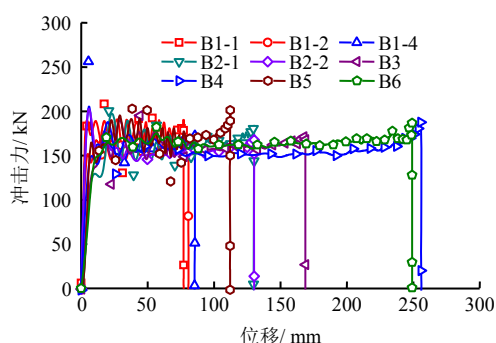


图 8 冲击力-位移曲线图
Fig.8 Impact force-displacement curves

表 2 冲击试验结果
Table 2 Impact test results

试验 编号	冲击力 峰值 / kN	冲击力 平均值 / kN	压缩管 最大位移量 / mm	冲击持续 时间 / ms	单位位移 能量吸收量 / (kJ · m ⁻¹)
B1	217	176	77	19	215
	232	162	81	20	
	256	162	86	21	
B2	224	168	130	25	204
	256	160	130	25	
B3	216	163	169	29	207
B4	221	160	256	35	207
B5	219	175	112	32	230
B6	182	167	249	50	207

试件 B1~B6 中存在部分试件冲击力第 1 峰值略高, 这可能是由于在压缩管进入约束环的瞬间有轻微卡顿, 也可能是由于试件存在加工误差, 压缩管并不严格垂直, 在冲击的第 1 时间压缩管没有发生径向收缩, 进入约束环, 而是发生了侧向弯曲。

5.3 恒阻器变形形态分析

为分析试件在冲击荷载作用下的变形形态及稳定性, 对冲击后试件的变形情况进行了量测, 包括压缩管的长度、外径以及约束环外径等参数。压缩

管原长均为 350 mm, 冲击后压缩管伸长量为 12~43 mm, 伸长率为 3.43%~12.29%, 这是由于冲击后压缩管发生了径向收缩变形, 因此在轴向略有伸长。图 9 以试件 B5 为例, 列出了冲击后试件的塑性变形情况, 图中黄色箭头所指方向即为压缩管位移方向。

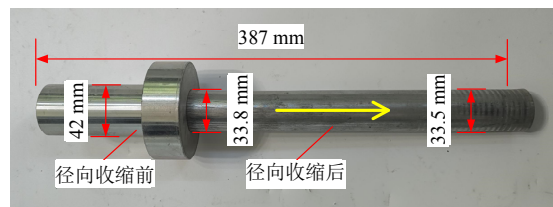


图 9 试件 B5 冲击后的塑性变形情况
Fig.9 Plastic deformation of specimen B5 after impact

新型恒阻器是否有良好的恒阻特性由压缩管径向收缩变形的稳定性决定, 将压缩管外径的径向收缩量与外径的比值定义为压缩率, 该值在很大程度上决定了恒阻器的工作阻力。试件压缩管外径均为 42 mm, 受到冲击后会发生径向收缩变形进入约束环, 但由于在冲击过程中约束环会略有胀大, 压缩管变形后在轴向上的外径会有所不同, 先变形的部分外径可缩小至 33.4~33.5 mm, 压缩率为 20.24%~20.48%, 压缩管后变形的部分外径可缩小为 33.8~34.1 mm, 试件的压缩率减小 0.54%~1.43%。由此可以看出, 恒阻器在冲击过程中的承载力降低甚微, 表现为缩管式恒阻大变形锚杆良好的恒阻特性。从图 7 的位移时程曲线中也可以看出, 在冲击过程中, 压缩管无明显突变, 变形情况较为稳定。在冲击荷载作用下, 恒阻器均可稳定变形, 这表明大变形锚杆可以满足硬岩大变形支护的基本要求。

5.4 能量分析

由表 2 可得, 试件 B1~B6 的单位位移能量吸收量为 204~230 kJ/m; 试件 B4 在 35 ms 内可吸收 53 kJ 的冲击能量, 试件 B6 在 50 ms 内可吸收 51.5 kJ 的冲击能量。因此, 本文缩管式恒阻大变形锚杆可在发生小位移后且在短时间内吸收大量冲击能量, 吸能效果好、效率高, 能量吸收性能较好。

对照组 N1 受到冲击后, 冲击力骤增至 7 344 kN, 随后下降至 0 kN 附近波动, 冲击持续时间约 6 ms, 该部分冲击能量较大, 传统锚杆在受到该冲击荷载时, 冲击能量均需由杆体自身吸收, 锚杆因此发生破断失效。而试件 B1~B6 的冲击力达到第 1 峰值后, 会在极短的时间内大幅下降, 该部分的冲击能量较小, 本文缩管式恒阻大变形锚杆在实际工作时

可以由恒阻器和锚杆杆体共同将其吸收,因此锚杆并不会产生断裂破坏,该特性同样体现了本文大变形锚杆在抗冲击荷载方面的优越性。

5.5 与其他大变形锚杆的对比分析

何满潮院士提出了恒阻大变形锚杆,并针对其动力性能开展了大量冲击试验,与本文缩管式恒阻大变形锚杆相同,该锚杆同样通过恒阻装置的塑性变形吸收能量,故将两者试验结果进行对比分析^[16,34-37]。何院士恒阻大变形锚杆冲击试验的单次冲击能量在 5.0~19.6 kJ 之间,即最大落锤重量为 1 000 kg,落锤高度为 0.5~2.0 m,对应冲击速度为 3.16~6.32 m/s,冲击力在 0~300 kN 之间波动;本文试验的单次冲击能量在 17.5~53.0 kJ 之间,即落锤重量为 530 kg 和 1 030 kg,落锤高度最大为 10 m,对应冲击速度 8.12~14.14 m/s,冲击力基本稳定在 150~180 kN。由此可以看出,本文缩管式恒阻大变形锚杆有良好的抗冲击性能。

6 新型锚杆抗岩爆特性分析

6.1 岩爆的发生规律

岩爆灾害具有很强的突发性、不确定性和危害性,岩爆发生时,岩块携带大量能量向临空面弹射或抛射,造成设备财产损失和施工人员安全威胁,影响工程进展^[44-45]。岩爆等级一般划分为轻微岩爆、中等岩爆、强烈岩爆和极强岩爆。在隧道施工过程中,轻微和中等岩爆基本不会或仅会在一定程度上影响施工;而强烈和极强岩爆则会严重施工人员与机械设备的安全带来巨大威胁。

在引汉济渭工程中,岩爆破坏形式多以剥落、崩塌或爆裂掉块为主,发生强烈岩爆时拱顶或拱壁会有岩片、岩块弹射,强烈岩爆的塌腔深度可达 2.5~3.5 m,最大深度可达 10 m^[46]。根据 2011—2017 年施工期间秦岭引水隧洞 246 次岩爆记录^[47],该隧洞主要以连续岩爆为主,岩爆发生在拱肩和边墙处的次数较多,强烈岩爆主要发生在花岗岩和变粒岩中;地应力大于 20 MPa 的洞段较容易发生岩爆,且地应力越大,岩爆发生的频率和烈度等级也随之增大。

在川藏铁路拉萨—林芝段的桑珠岭隧道中,根据现场部分岩爆的实际记录^[48],岩爆大多发生在拱腰、边墙和掌子面,拱顶岩爆次数较少,但多以中等、强烈岩爆为主。强烈岩爆发生时,大块径岩石弹射距离可达数十米,可将隧道施工现场的台车等设备砸毁。在极高地应力区段,如 DK183+000 断面处,岩爆发生时有大块径岩石弹射、抛射,并伴

随岩粉喷射,岩爆发生后形成大面积空腔。

6.2 新型锚杆抗岩爆能力分析

在支护是岩爆防治的重要一环,其设计原则为表面围岩封闭支护、内部能量吸收支护,支护系统应尽可能多吸收岩体破裂所释放的能量,降低能量释放速率,也应尽可能提高围岩强度,保持岩爆后支护系统的完整性^[49-50]。传统锚杆杆体在岩体断裂面处发挥变形的长度不足,极易产生应力集中和应变超限,破坏前变形量约为 60 mm^[6];而且传统锚杆在冲击荷载作用下杆体破断处的颈缩现象并不明显,表现出明显的脆断特征^[51]。因此,轻微和中等岩爆的锚杆支护可选用传统锚杆,当岩爆等级为强烈和极强时,宜选用具有高吸能特性的锚杆^[49]。

本文缩管式恒阻大变形锚杆能够适应岩块不同的弹射速度,其工作阻力基本维持在 150~180 kN,恒阻性能较好;该种锚杆可以主动吸能,能够更好地消耗岩爆巨大的冲击能量,单根锚杆单次即可消耗 53 kJ 的冲击能量,在此过程中位移为 256 mm,单位位移能量吸收量为 207 kJ/m,能量吸收效率较高、效果好,且可以根据工程需要设计压缩管长度以调整变形量,在提供较高承载力的同时也可允许围岩较大的变形量,抗岩爆能力较强。比如,桑珠岭隧道在里程 DK185+385~DK185+421、DK185+490~DK185+500 等强烈岩爆段,弹射、抛射岩块的最大块径可达 70 cm^[48],强烈岩爆的岩块速度约为 5~10 m/s,可计算得到该区段最大块径岩块约携带动能 12.9~51.5 kJ,而本文缩管式恒阻大变形锚杆单次可吸收 53 kJ 冲击能量,有望对该区段岩爆进行有效防治。

7 结 论

本文提出了一种新型的缩管式恒阻大变形锚杆,并对其结构组成以及变形机制进行了详细介绍,通过开展不同落锤高度、冲击次数、落锤重量的落锤冲击试验,研究了缩管式恒阻大变形锚杆的抗冲击特性,得出如下结论:

(1) 缩管式恒阻大变形锚杆能够适应不同冲击速度,当冲击速度在 8.12~14.14 m/s 的范围内,冲击力基本稳定在 150~180 kN 之间,研究不同落锤重量也可得到相同结论,锚杆恒阻特性显著。因此,冲击力的大小是由恒阻器本身决定的,不会受到冲击块的速度和重量的显著影响。

(2) 在整个冲击过程中,试件的压缩率仅减小了 0.54%~1.43%,变形情况较为稳定,这表明恒阻器在冲击荷载作用下具有较好的恒阻特性,本文缩

管式恒阻大变形锚杆可以满足硬岩大变形支护的基本要求。

(3) 缩管式恒阻大变形锚杆具有良好的抗冲击特性, 单次吸收能量可达 53 kJ, 且单位位移的能量吸收量大, 吸能效果好、效率高, 且吸能性能稳定, 可为地下工程建设过程中岩爆灾害的治理提供有力的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(10): 1945-1956.
- [2] 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 Man-chao. Progress and challenges of soft rock engineering in depth[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(8): 1409-1417.
- [3] 陈祖煜, 程耿东, 杨春和. 关于我国重大基础设施工程安全相关科研工作的思考[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3): 1-5.
CHEN Zu-yu, CHENG Geng-dong, YANG Chun-he. Research work on construction safety of major infrastructures in China: overview and a forward look[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2016, 49(3): 1-5.
- [4] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE He-ping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [5] 侯朝炯, 王襄禹, 柏建彪, 等. 深部巷道围岩稳定性控制的基本理论与技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(1): 1-12.
HOU Chao-jiong, WANG Xiang-yu, BAI Jian-biao, et al. Basic theory and technology study of stability control for surrounding rock in deep roadway[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2021, 50(1): 1-12.
- [6] 吴学震, 王刚, 蒋宇静, 等. 拉压耦合大变形锚杆作用机制及其试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 139-147.
WU Xue-zhen, WANG Gang, JIANG Yu-jing, et al. Mechanism of CTC-yield bolts and its experimental research[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(1): 139-147.
- [7] 徐林生. 二郎山公路隧道岩爆特征与防治措施的研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 61-64.
XU Lin-sheng. Research of rockburst character and prevention measure in erlang mountain highway tunnel[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2004, 37(1): 61-64.
- [8] 陈祥, 孙进忠, 张杰坤, 等. 岩爆的判别指标和分级标准及可拓综合判别方法[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 82-88.
CHEN Xiang, SUN Jin-zhong, ZHANG Jie-kun, et al. Judgment indexes and classification criteria of rock-burst with the extension judgment method[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2009, 42(9): 82-88.
- [9] 郭长宝, 吴瑞安, 蒋良文, 等. 川藏铁路雅安—林芝段典型地质灾害与工程地质问题[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 1-17.
GUO Chang-bao, WU Rui-an, JIANG Liang-wen, et al. Typical geohazards and engineering geological problems along the Ya'an—Linzhi section of the Sichuan—Tibet railway, China[J]. **Geoscience**, 2021, 35(1): 1-17.
- [10] 赵勇, 石少帅, 田四明, 等. 川藏铁路雅安至林芝段隧道建造面临的主要工程技术难题与对策建议[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(7): 1079-1090.
ZHAO Yong, SHI Shao-shuai, TIAN Si-ming, et al. Technical difficulties and countermeasure suggestions in tunnel construction of Ya'an—Linzhi section of Sichuan—Tibet Railway[J]. **Tunnel Construction**, 2021, 41(7): 1079-1090.
- [11] 刘成禹, 李红军, 吴吟. 卡姆奇克隧道岩爆的力学机制及主动防控技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5): 961-970.
LIU Cheng-yu, LI Hong-jun, WU Yin, et al. Mechanical mechanism and active control technology of rockbursts in Kamchik tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(5): 961-970.
- [12] ORTLEPP W D. RaSiM comes of age—a review of the contribution to the understanding and control of mine rockbursts[C]//Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2005.
- [13] KENETI A, SAINSBURY B A. Review of published rockburst events and their contributing factors[J]. **Engineering Geology**, 2018, 246(1): 361-373.
- [14] 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑

- 战[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2377-2389.
- PENG Jian-bing, CUI Peng, ZHUANG Jian-qi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(12): 2377-2389.
- [15] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2034-2042.
- ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Rockburst and its criteria and control[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2034-2042.
- [16] 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 Man-chao, GUO Zhi-biao. 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.
- [17] LI C C, STJERN G, MYRVANG A. A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2014, 6(4): 315-327.
- [18] LI C C, DOUCET C. Performance of D-bolts under dynamic loading[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2012, 45(2): 193-204.
- [19] 赵东平, 王卢伟, 喻渝, 等. 隧道系统锚杆研究现状与发展方向[J]. 土木工程学报, 2020, 53(8): 116-128.
- ZHAO Dong-ping, WANG Lu-wei, YU Yu, et al. Research status and development direction of tunnel system bolt[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2020, 53(8): 116-128.
- [20] 齐庆新, 李一哲, 赵善坤, 等. 我国煤矿冲击地压发展 70 年: 理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 1-40.
- QI Qing-xin, LI Yi-zhe, ZHAO Shan-kun, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. **Coal Science and Technology**, 2019, 47(9): 1-40.
- [21] 王凯兴, 薛佳琪, 潘一山, 等. 顶板-支护系统准共振诱发冲击地压机制研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 717-727.
- WANG Kai-xing, XUE Jia-qi, PAN Yi-shan, et al. Study on the mechanism of coal bursts induced by quasi-resonance of roof-support system[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(3): 717-727.
- [22] 姜福兴, 魏全德, 姚顺利, 等. 冲击地压防治关键理论与技术分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 6-9.
- JIANG Fu-xing, WEI Quan-de, YAO Shun-li, et al. Key theory and technical analysis on mine pressure bumping prevention and control[J]. **Coal Science and Technology**, 2013, 41(6): 6-9.
- [23] 朱斯陶, 姜福兴, 刘金海, 等. 深井厚煤层冲击地压与大变形协调控制机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 2): 4262-4268.
- ZHU Si-tao, JIANG Fu-xing, LIU Jin-hai, et al. Research on mechanism of rock burst and large deformation coordination controlling in thick coal seam of deep shaft[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Suppl.2): 4262-4268.
- [24] 吴拥政, 付玉凯, 何杰, 等. 深部冲击地压巷道“卸压-支护-防护”协同防控原理与技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 132-144.
- WU Yong-zheng, FU Yu-kai, HE Jie, et al. Principle and technology of “pressure relief-support-protection” collaborative prevention and control in deep rock burst roadway[J]. **Journal of China Coal Society**, 2021, 46(1): 132-144.
- [25] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1567-1584.
- QI Qing-xin, PAN Yi-shan, LI Hai-tao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(5): 1567-1584.
- [26] 潘一山, 肖永惠, 李国臻. 巷道防冲液压支架研究及应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 90-99.
- PAN Yi-shan, XIAO Yong-hui, LI Guo-zhen. Roadway hydraulic support for rockburst prevention in coal mine and its application[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(1): 90-99.
- [27] JAGER A J. Two new support units for the control of rockburst damage[J]. **Rock Support in Mining and Underground Construction**, 1992, 31(2): 621-631.
- [28] ORTLEPP W D, STACEY T R. Safety and cost implications in the spacing of support[J]. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, 1995, 95(3): 141-146.
- [29] VARDEN R, LACHENICHT R, PLAYER J, et al. Development and implementation of the Garford dynamic bolt at the Kanowna Belle mine[C]//10th Underground Operators' Conference. [S. l.]: Launceston, 2008.

- [30] CHARETTE F, PLOUFFE M. Roofex--results of laboratory testing of a new concept of yieldable tendon[C]//Fourth International Seminar on Deep and High Stress Mining. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2007, 395-404.
- [31] LI C C. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2010, 47(3): 396-404.
- [32] WU X Z, JIANG Y J, WANG G, et al. Performance of a new yielding rock bolt under pull and shear loading conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 52(9): 3401-3412.
- [33] ANSELL A. Laboratory testing of a new type of energy absorbing rock bolt[J]. **Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research**, 2005, 20(4): 291-300.
- [34] 陶志刚, 赵帅, 张明旭, 等. 恒阻大变形锚杆/索力学特性数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 40-48.
- TAO Zhi-gang, ZHAO Shuai, ZHANG Ming-xu, et al. Numerical simulation research on mechanical properties of constant resistance bolt/cable with large deformation[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2018, 35(1): 40-48.
- [35] 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 Wei-li, SUN Ya-xing, 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.
- [36] 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, 2022, 47(4): 1490-1500.
- WANG Qi, HE Man-chao, XU Shuo, et al. Mechanical properties and engineering application of constant resistance energy absorbing bolt[J]. **Journal of China Coal Society**, 2022, 47(4): 1490-1500.
- [37] 夏洪满. 高恒阻大变形锚索力学特性及现场防冲试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- XIA Hong-man. Mechanics characteristics of the large deformation anchor with high constant resistance and its field impact resistance test[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2013.
- [38] 吴学震, 叶青, 邓涛, 等. 新型缩管式恒阻大变形锚索动静力学特性及工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12): 2888-2897.
- WU Xue-zhen, YE Qing, DENG Tao, et al. Dynamic and static mechanical characteristics and engineering application of a novel steel pipe shrinkable energy-absorbing cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2023, 42(12): 2888-2897.
- [39] LINKOV A M. Rockbursts and the instability of rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1996, 33(7): 727-732.
- [40] OETLEPP W D, YOUNG R P. High ground displacement velocities associated with rockburst damage[C]//Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993: 101-106.
- [41] 秦剑峰, 卓家寿. 岩爆问题中块体速度探讨[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1365-1368.
- QIN Jian-feng, ZHOU Jia-shou. A discussion on rock velocity in rockburst[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1365-1368.
- [42] 陈滔, 黎立云, 邓建辉, 等. 岩爆问题中岩块弹射速度的数值计算与实验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(增刊 1): 26-31.
- CHRN Tao, LI Li-yun, DENG Jian-hui, et al. Numerical simulation and experimental research on rock ejection velocity in rockburst[J]. **Journal of Sichuan University (Medical Science Edition)**, 2014, 46(Suppl.1): 26-31.
- [43] 宫伟力, 汪虎, 何满潮, 等. 深部开采中岩爆岩块弹射速度的理论与实验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2269-2278.
- GONG Wei-li, WANG Hu, HE Man-chao, et al. Theoretical and experimental study on rock block ejection velocity for rock burst found in deep mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(10): 2269-2278.
- [44] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 1-6.
- QIAN Qi-hu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1): 1-6.
- [45] JIANG Q, FENG X T, XIANG T B, et al. Rockburst characteristics and numerical simulation based on a new energy index: a case study of a tunnel at 2 500 m depth[J]. **Bulletin of Engineering Geology & the Environment**, 2010, 69(3): 381-388.