

锚杆锚固性能静载与动载试验方法及设备研究进展

赵同彬^{1,2}, 王学斌¹, 邢明录^{1,2}, 李龙飞¹, 李春林³, 张玉宝^{1,2}, 王 阁⁴, 公亚宁¹

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省深部矿井动力灾害智能防控重点实验室, 山东 青岛 266590;

3. 挪威科技大学 地质科学系, 挪威 特隆赫姆 7491;

4. 泰安泰烁岩层控制科技有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要:为测试锚杆对岩体的加固作用及评估锚固性能,国内外学者通过设计拉伸、剪切、拉剪组合静载及动载试验,对锚杆的静/动锚固性能开展了大量研究,形成了一系列测试技术和试验设备。文章综述了锚杆锚固性能试验方法与设备的发展现状,静载试验方面,重点介绍了岩体锚杆拉伸、剪切及拉剪组合试验的基本原理,讨论了锚杆静载试验设备功能,如裂隙岩体锚杆拉伸、剪切及拉-剪组合等应用场景;动载试验方面,介绍了动载拉伸(拉拔)及剪切试验方法与设备,重点探讨了裂隙岩体锚杆拉伸的自由落体冲击及动量转换冲击原理。研究讨论了现有锚杆静载试验在模拟拉-剪-扭复合载荷方面的局限性,以及动载试验在集成上述两类冲击方法时面临的技术挑战,指明未来应重点研发具备智能化控制、能够实现多因素(如应力、渗流、温度等)耦合加载的先进锚固试验设备,并重视静/动载锚固性能数据库的标准化建设,为锚杆性能研究提供新的技术支撑与设备保障。

关键词:锚杆支护;锚固性能;试验方法;设备;力学行为

中图分类号:TD315

文献标志码:A

Research progress on static and dynamic loading test methods and equipment for rockbolt anchorage performance

ZHAO Tongbin^{1,2}, WANG Xuebin¹, XING Minglu^{1,2}, LI Longfei¹,

LI Chunlin³, ZHANG Yubao^{1,2}, WANG Ge⁴, GONG Yaning¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Shandong Key Laboratory of Intelligent Prevention and Control of Dynamic Disaster in Deep Mines,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Department of Geoscience, Norwegian University of Science and Technology (NUTU), Trondheim 7491, Norway;

4. Tai'an Taishuo Strata Control Technology Co., Ltd., Tai'an 271000, China)

Abstract: To test the reinforcing effect of rockbolts on rock mass and assess their anchorage performance, scholars both at home and abroad have conducted extensive research through the design of static and dynamic load tests, including tensile, shear, and tension-shear combined tests. These studies have established a foundation for testing technologies and experimental equipment. This paper reviews the development of rockbolt anchorage testing methods and equipment. In terms of static load tests, it focuses on introducing the basic principles of rockbolt tensile, shear, and tension-shear combined tests, and discusses the function of static load testing equipment and its application scenarios including fractured rock mass rockbolt tension, shear, and tension-shear combinations. In

收稿日期:2025-03-31

基金项目:国家自然科学基金项目(52374097);山东省泰山学者工程项目(tstp20221126)

作者简介:赵同彬(1975—),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士,主要从事矿山岩石力学与巷道支护技术研究。

邢明录(1986—),男,山东菏泽人,实验师,博士,主要从事锚杆性能测试及锚固支护理论,本文通信作者。

E-mail:sixingziwei@163.com

terms of dynamic load tests, it presents the methods and equipment for dynamic tensile (pull-out) and shear tests, with the emphasis on the principles of free-fall impact and momentum transfer impact for fractured rock mass rockbolt tension. It also discusses the limitations of current static load tests in simulating tension-shear-torsion combined loads and the technical challenges faced in dynamic load tests that integrate these two types of impact methods. It suggests that future research should focus on developing advanced anchorage testing equipment with intelligent control, capable of multi-factor (e. g., stress, seepage, temperature) coupled loading, and emphasizes the standardization construction of static/dynamic anchorage performance databases, providing new technical support and equipment assurance for rockbolt performance research.

Key words: rockbolt support; anchorage performance; test method; equipment; mechanical behavior

锚杆支护作为巷(隧)道围岩加固的关键支护方法,对于维护地下岩体工程稳定性起着至关重要的作用^[1-2]。随着深部岩体工程开发建设的推进,高地应力引发的巷(隧)道冒顶、片帮滑移、岩爆、冲击地压等深部岩体破裂问题日益严峻,给地下工程及施工人员的安全带来严重威胁^[3-5]。锚杆锚固于含有节理、裂隙及结构面等不连续岩体中,承受岩体沿不连续面变形所产生的复杂载荷。通常,这些载荷为静载荷,但在矿震、岩爆或冲击地压等情况下,锚杆同时承受瞬时动态载荷。锚杆在静载及动载冲击作用下,极易在岩体裂隙处断裂^[6-8]。为合理评估锚杆在岩体中的工作性能,须借助室内试验设备,测试锚杆对岩体的加固效果及其适用性^[9]。

岩体加固工程中,锚杆主要承受轴向与横向载荷作用^[10-13],其破断行为与岩体不连续面处的拉伸及剪切载荷密切相关^[14-15]。鉴于此,国内外众多学者针对锚杆的拉伸、剪切承载性能开展了广泛的研究。在锚杆拉伸性能测试方面,Varden等^[16]、Wu等^[17]、Charette等^[18]分别对Garford锚杆、Yield-Lok锚杆、Roofex锚杆进行了静载拉伸试验和动载冲击试验,获得了锚杆的载荷-位移曲线,并对比了锚杆在静、动载荷下锚固性能和锚固岩体极限承载能力的差异。针对新型锚杆力学性能、锚固岩体内部载荷传递等力学行为,一些学者通过拉拔(拉伸)试验,揭示了锚杆在岩体中的轴向承载机制^[19-25]。在锚杆剪切性能测试方面,国内外学者针对锚固岩体系统中的不同变量,如锚杆种类^[26-27]、锚固尺寸^[28]、锚固角度^[29-31]、预紧力^[32]、裂隙形状^[33]、节理粗糙度^[34]等进行了锚固岩体剪切试验,结果表明,锚杆可通过有效传递外部载荷来增强岩体的抗剪能力,从而延缓或防止岩体的剪切破坏。即便岩体发生局部剪切破坏后,锚杆仍然能够持续变形,并继续提供抗力,防止岩体继续滑移或发生更大范围的破坏。上述成果的取得,有赖于室内测试技术的应用,主要包括锚杆静载及动载冲击试验设备。锚杆静载试验设备主要集中在控制加载系统、剪切试验机等设备的应用,以及锚固测试专用设备的研发,代表性试验设备包括:英国标准锚杆系统剪切试验装置^[35]、Grasselli^[36]研制的大型双剪试验机、Aziz等^[35, 37-38]研制的单剪、双剪试验装置及其他改良性简易装置、MIS-233-1-55-03型法向应力伺服控制剪切试验系统^[39-40]、挪威科技工业研究所/挪威科技大学(Science and Technology Research Institute/Norwegian University of Science and Technology, SINTEF/NTNU)的锚杆拉剪试验装置^[41-42]、东华理工大学的锚杆拉拔实验平台^[43]、煤炭智能开采与岩层控制国家重点实验室的锚杆性能多功能试验台^[44]、中南大学锚杆拉剪试验机^[45]、山东科技大学研制的RTR-3122型全尺寸锚杆锚固性能试验机^[46-47]等。动载冲击试验设备则涉及多种冲击载荷模拟系统,代表性试验设备包括:科廷大学西澳大利亚矿业学院(Western Australian School of Mines, WASM)研发的锚杆动量冲击试验机^[48]、无导轨自由落体试验设备^[49]、加拿大矿物和能源技术中心-采矿和矿物科学实验室(Canadian Mineral and Energy Technology Centre-Mining and Mineral Science Laboratory, CANMET-MMSL)的落锤冲击试验机^[50-51]、南非新概念采矿公司的动载冲击试验机(dynamic impact tester, DIT)^[52]、中煤科工开采研究院有限公司的30 000 J多功能落锤冲击试验机^[53]、Li等^[54]研制的锚固岩体双剪落锤冲击试验机、太原理工大学的DHR9401型落锤式冲击加载试验机^[55-56]等。

尽管当前锚杆锚固性能试验研究已经取得较为系统的成果,但在实际工程应用中,仍存在许多问题尚未得到妥善解决。例如,当前锚杆性能测试的室内试验研究主要集中于特定加载条件下,对于复杂地质条件和拉剪扭多载荷作用下的锚杆锚固性能研究尚不够深入,且许多研究使用的锚杆及锚固基体采用的是尺寸较

小的相似材料而并非真正的锚杆或属性相近的类岩体,对实际工程的指导作用较弱,因此本研究旨在对以大尺寸锚固基体及真实锚杆为试验对象的锚杆锚固性能静载与动载试验方法及设备发展进行综述,梳理不同阶段锚杆锚固性能静载试验方法的发展历程,涵盖试验原理、试验装置结构特点及主要技术参数;对冲击试验方法展开讨论,阐述不同冲击载荷模拟系统特点及适用范围,探究当前冲击试验在实际应用时的局限性。基于对静载与冲击试验设备比较分析,结合当前研究需求及发展现状,对该领域相关试验技术与设备研发予以展望,提出锚杆测试技术应用途径,以期提高锚杆设计与选型的准确性,为后续锚杆锚固性能评估及工程应用提供重要支撑,保障地下岩体工程的安全加固。

1 锚杆锚固岩体静载试验方法及设备

1.1 试验方法

锚杆通过产生的拉伸、剪切变形,能够有效地吸收和分散岩体的变形能,进而防止岩体破坏。室内锚杆静态拉、剪试验通过模拟岩体的力学行为以及锚杆的实际受力状态,对锚杆实施拉、剪加载作用,测试处于准静态变形状态下的岩体对锚杆施加拉、剪过程及破坏模式。锚杆在拉、剪作用下的破坏模式主要可归纳为三种:拉断破坏、剪切破坏以及混合破坏。为准确模拟锚杆受岩体静态拉、剪作用的力学行为,通常会进行裂隙岩体内的锚杆拉伸试验、剪切试验及拉剪组合试验。用于开展试验的锚固岩体试件,通常包括以下几个关键组成部分:锚固基体、锚杆、锚固剂、托盘和螺母。利用锚固剂将锚杆与锚固基体(含钻孔的模拟岩体)粘结,形成锚固试件,并在锚杆外露段安装托盘和螺母。其中,基体间不连续面用以模拟工程实际中锚杆所穿过的裂隙面。锚固基体的选择较为灵活,一般可采用金属套管或混凝土块。采用金属套管制作锚固基体试件,能够显著缩短试件制作及装配的时间;而混凝土块在性质上更接近实际岩体,具体选用应根据研究目标及试验内容确定。

如图1所示,进行静载条件下的锚固岩体拉伸试验时,需使两个锚固基体出现方向相反的沿裂隙面法向的张开位移,直至锚杆拉断或滑移。根据剪切面数量的不同,剪切试验一般分为单剪试验(图2)和双剪试验(图3)。相较于单剪试验,双剪试验能够避免试件在加载时产生翻转趋势。然而,由于双剪试件具有两个剪切面,因此其试件制备过程相对复杂。在进行剪切试验时,通过外部加载机构,对试件表面施加均布载荷,使得相邻两个锚固基体发生方向相反的沿剪切面切向的相对位移。此时,位于剪切面之间的锚杆部分由于错动而产生横向剪力,锚杆轴向由于牵拉作用也会产生一定的轴力。此外,在某些试验中,为充分考虑剪切面之间摩擦、剪胀等情况,还会在锚固岩体试件两端施加法向力或刚度约束^[57-58]。针对锚杆在岩体中的受力过程,通常受到拉、剪等载荷组合作用,或者经历先拉再剪、先剪再拉、拉-剪-拉等不同的承载历程。另外,某些试验方法要求对锚固岩体进行同步拉-剪组合试验,例如Chen等^[59]提出的拉剪测试方法,即通过拉伸力与剪切力的叠加,模拟实际工程中锚杆与岩体节理存在一定夹角情况下的剪切行为。

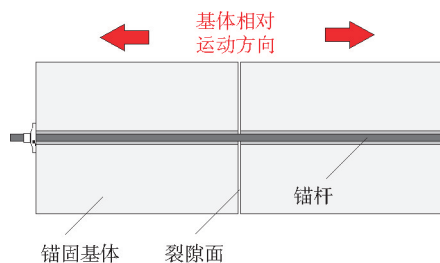


图1 静载条件下裂隙岩体锚杆拉伸试验原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rockbolt tension test on fractured rock mass under static loading

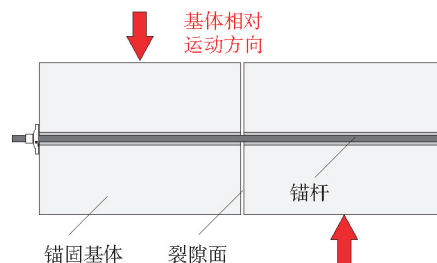


图2 静载条件下裂隙岩体锚杆单剪试验原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single shear test for rockbolt on fractured rock mass under static loading

由于锚固岩体拉伸试验与剪切试验加载方向正交,二者互不影响,且一般具备锚固岩体拉伸功能的试验机,通常也具备剪切功能。因此,后文将着重讨论含裂隙面岩体内锚杆的剪切和拉剪组合试验设备,不再对

锚固岩体拉伸试验设备进行单独论述。

1.2 静载剪切试验及设备

根据上述试验原理,改变锚固基体试件剪切面数量可以实现不同的试验目标。图 4 所示为 1996 年英国标准协会公布的锚杆锚固试件剪切试验装置^[35],该试验机为最原始的锚杆剪切试验机类型,主要由上下两个剪切箱组成,剪切箱内左右分别固定两段厚壁钢管,钢管壁厚不小于锚杆公称直径的一半,内部设有 1 mm 深的螺纹,用于强化钢管与锚固剂之间的接触作用,尽量避免两者之间的滑移失效。外部金属衬套起固定作用,根据锚杆及钢管直径不同更换相适应尺寸的衬套。试验时,上剪切箱固定,对下剪切箱进行应力加载,直到锚杆出现明显变形时停止加载。

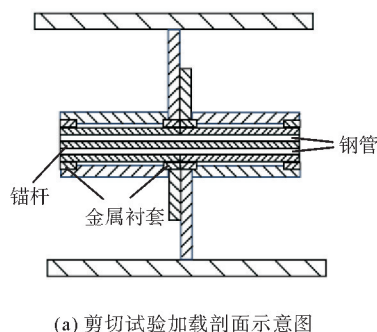


图 4 英国标准锚杆剪切试验装置^[35]

Fig. 4 British standard rockbolt shear instrument

由于安装时两段钢管管口直接对接,所以当注入锚固剂并插入锚杆后,锚固剂作为锚固材料充满了整个剪切界面,即试验机测试的是锚固剂和锚杆总体的剪切强度。且该试验机没有混凝土等类岩体试件,因此无法研究试验加载过程中岩体内部的应力变化及锚固剂与岩体间的力学行为。

2004 年,Grasselli^[36]采用一种大型双剪试验设备对不同锚固角节理岩体进行了双剪试验,研究了 Swellex 锚杆锚固性能,试验系统及双剪试验加载方法如图 5 所示。该试验机通过顶部油缸施加剪切力,且可在试件侧面施加法向载荷,剪切载荷及法向载荷均通过载荷传感器实时监测。该试验机对岩体试件尺寸要求较为宽松,且岩体内部锚杆数量可以根据需求灵活调整,而不仅限于单一锚杆试验。通过对多锚杆锚固体进行测试,可以充分考虑锚杆之间的相互作用,因此与实际工程中锚杆支护情况更加接近。此外,为避免剪切过程中岩体发生剪胀从而产生不可控的法向应力,试验前需要将三块岩石接触面进行平滑处理。同时,试件侧面设有拉杆及横梁,以保证剪切试验在恒定法向刚度条件下进行。

2014 年,Aziz 等^[37]使用组装式双剪装置对两种形态钢束组成的锚索进行了双剪试验,双剪试验加载方法及双剪试验系统如图 6(a)及图 6(b)所示。锚固岩体试件主要包括三块类岩石块体和一根锚索。试件的制作采用一体式浇筑,即在外金属框架内直接注入水泥砂浆,并在模具中央纵向放置一根塑料导管用来形成放入锚杆所用的预制孔。砂浆凝固后拔出塑料导管,放入锚杆后通过灌浆锚固并密封,防止灌浆渗出污染或损坏传感器。完成组装后,将双裂隙锚固试件放置在试验机上,固定两端的类岩体,试验机以 1 mm/min 的速率对中间类岩体施加压力,当该类岩体与两端类岩体相对位移达到 75 mm 或锚索被剪断时停止施力。试验过程中使用监测设备对试验机加载速率及试件位移速率进行监测。试验结果表明,螺旋股锚索外股的凹痕会降低锚索抗剪强度以及单根钢绞线抗拉强度,且当剪切力到达峰值时,螺旋股锚索较平股锚索更容易

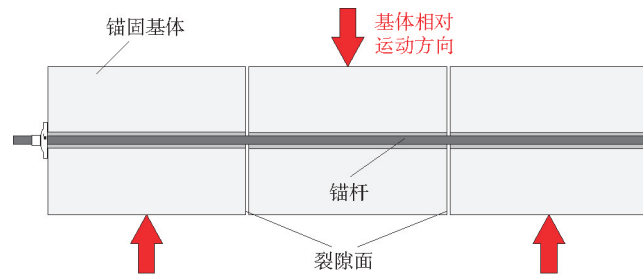


图 3 静载条件下裂隙岩体锚杆双剪试验原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of double shear test for rockbolt on fractured rock mass under static loading

发生断裂。之后,Aziz 等^[35]对试验机装配结构进行了改造,改造后试验机在两端岩体试件外侧各安装了一层金属板,并通过两个横向支架连接,以固定两侧岩体,当岩体之间存在缝隙时,可消除剪胀现象、节理面摩擦等试验影响因素,改造后试验系统如图 6(c)所示,该试验方案得到了锚索的纯抗剪强度,验证了提出的锚索抗剪强度计算公式。

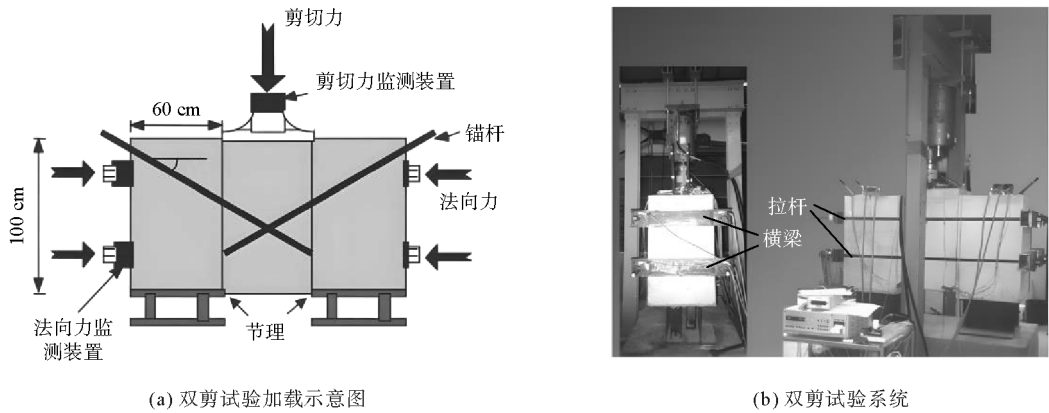


图 5 一种大型双剪试验机^[36]

Fig. 5 A large-scale double shear testing machine

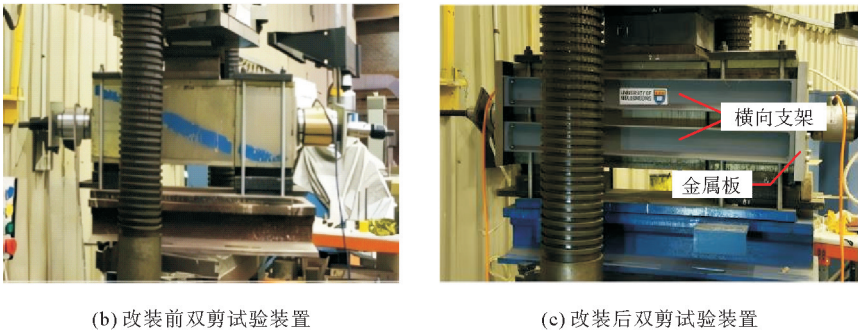
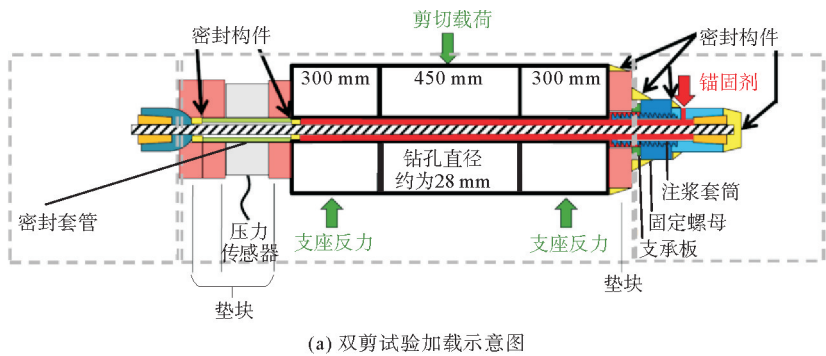


图 6 改装前后的组装式双剪试验装置及加载示意图^[35,37]

Fig. 6 Assembled double shear test device and loading schematic before and after modification

2017 年,Aziz 等^[38]使用 Megabolt 公司研发的全尺寸单剪试验装置对锚索进行了单剪试验,研究了不同类型锚索的抗剪性能,试验系统如图 7 所示。该装置由剪切装置和加载装置组成,与传统的锚杆剪切设备不同,该试验装置所用锚固试件由两块圆柱形混凝土锚固在一起组成,每块混凝土长 1.8 m、半径 125 mm,试验时通过钢架固定在剪切装置上,中心面即为剪切面。试验装置液压加载由手动油泵或其他适配的加载源控制,以保证通过某一特定的注油速率施加符合试验标准的恒定载荷,通过压力传感器和线性可变差动变

压器(linear variable differential transformer, LVDT)监测试验过程中的剪切力和剪切位移,并通过数据采集器记录数据。试验研究发现,预应力载荷增加与峰值剪切载荷和位移减少量之间成反比关系,同时,通过对比不同类型锚杆在剪切载荷下的抗脱粘能力发现,由光滑钢绞线和螺旋钢绞线组合而成的锚索具有更高抗脱粘能力。

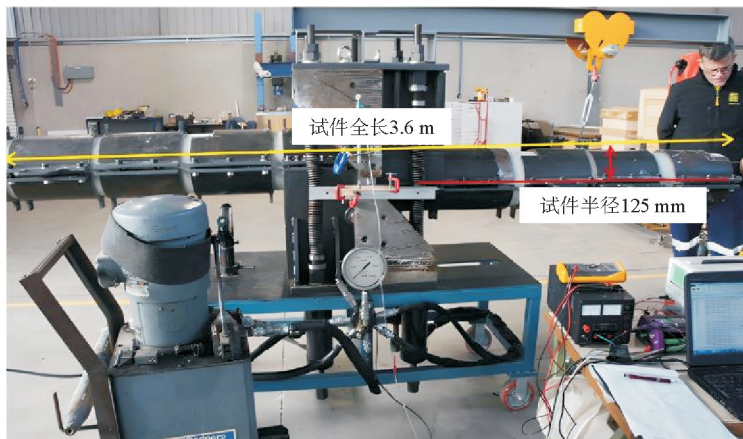


图 7 全尺寸锚杆(索)单剪试验装置^[38]

Fig. 7 Full-scale rockbolt (cable) single shear test device

2024 年,蒋宇静等^[39]采用自主研发的 MIS-233-1-55-03 型法向应力伺服控制剪切试验系统^[40],研究了全锚和端锚两种锚固方式对节理岩体的影响。试验系统如图 8 所示,可开展小尺寸锚杆剪切试验,其加载装置由三个加载油缸组成,其中竖直加载油缸用于施加法向力,水平加载油缸则用于施加剪切力。剪切试件被放置在一个分为上下两部分的剪切箱内,剪切力作用于下剪切箱,且下剪切箱仅允许在剪切方向发生位移,而上剪切箱则在剪切方向上固定。锚固试件在竖直方向的变形和剪切位移通过 LVDT 进行监测,法向力和剪切力则通过压力传感器进行测量。该试验机优点在于,剪切箱可以根据试验需求选择方形或圆形,具有较好的灵活性。此外,在剪切箱的上下两侧各增设了两个垫板,垫板之间空隙可容纳锚杆的伸出端,有效避免了锚杆伸出端在施加法向力时被损坏。试验结果表明,全锚在增强节理抗剪强度方面要优于端锚,锚杆与节理的相互作用也更为强烈,但由于全锚条件下锚杆自由度较低,吸能效果较差,因此更容易发生破断失效。

1.3 静载拉剪试验及设备

1995 年,挪威科技大学 Stjern 等^[41-42]研发了 SINTEF/NTNU 锚杆拉剪试验装置,如图 9(a)所示,该装置具备独立拉伸、独立剪切及拉剪组合测试功能。试验采用大尺寸混凝土块模拟岩体,试件包括剪切岩体块和拉伸岩体块,尺寸均为 950 mm×950 mm×950 mm,两部分岩体在不同的加载方向下可根据试验要求实现剪切或拉伸行为。由于直接作用于岩体上的结构是混凝土块外层金属框架,整个岩体试件受力均匀,因此在试件制作时,岩体试件内部往往可以钻设多个钻孔,如图 9(b)所示,每个钻孔都可以进行一次试验,按照试件及装置设计,一块试件可进行多次锚杆试验。对于靠近试件边缘的钻孔,考虑到剪切过程中可能会造成试件破坏,因此只能进行锚杆的拉伸试验。

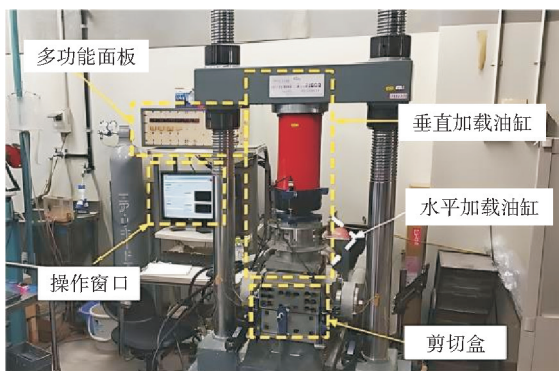


图 8 MIS-233-1-55-03 型法向应力伺服控制剪切试验系统^[39]

Fig. 8 MIS-233-1-55-03 normal stress servo controlled shear test system

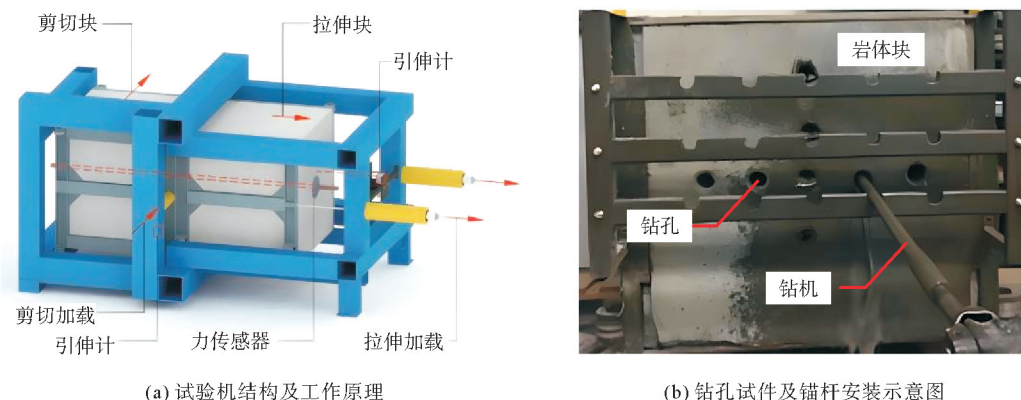
图9 SINTEF/NTNU 锚杆拉剪试验机^[42]

Fig. 9 SINTEF/NTNU rockbolt tension-shear test rig

2014年,查文华等^[43]开发设计了一种模拟锚固岩体围岩应力的锚杆拉拔试验加压装置,如图10所示。该装置主体部分由外部框架及千斤顶组成,分别固定在左右横梁上。试件由多块类岩体和一根锚杆组成,三块类岩体由锚杆部分锚固,其中前、后两块类岩体两侧设有垫板,并用千斤顶固定,限制其横向位移。锚杆自由端安装千斤顶及数据监测设备,用于施加拉拔力及记录载荷、位移等数据。试件前部千斤顶可用于施加拉拔载荷,而中部水平千斤顶可用于施加剪切载荷,具有结构简单、操作方便、加载效果好等优点。

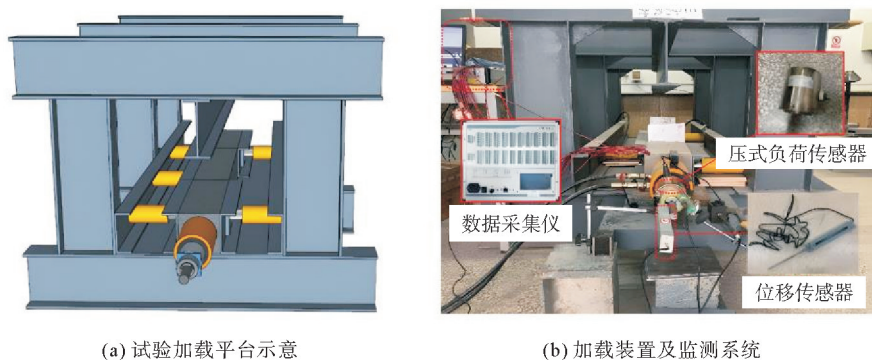
图10 立体框架锚杆拉拔试验平台^[43]

Fig. 10 Stereoscopic frame anchor rod pull-out test platform

2019年,煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室(原煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室)Kang等^[44]开发了一种结构更加复杂、功能更加齐全、集成程度更高的锚杆性能测试综合试验机。如图11所示,该设备由锚杆安装装置、加载装置、冲击摆、测量系统和控制台组成。锚固试件的混凝土块分为两部分,较长的一部分长1 m,另一部分长0.2 m,分别固定在两个圆形钢筒内,中间预留宽约5 mm的缝隙,避免剪切时块体之间发生接触。长试件通过锚固剂与锚杆锚固,短试件则不进行锚固,两部分分别模拟锚杆的锚固段和自由段,且剪切行为发生在两段的分界处。对称分布在锚杆上下侧油缸将施加的水平载荷通过锚杆端部固定装置传递至锚杆,完成对锚杆拉伸;位于试件锚固段底部油缸施加载荷推动圆形钢筒,完成对试件的剪切加载。除拉伸和剪切功能外,该试验机还具备预紧、扭转、弯曲、摆锤冲击等功能,可完成多种锚杆及锚固岩体试验。

2020年,中南大学(Central South University, CSU)参考挪威科技大学(NTNU)SINTEF/NTNU锚杆试验装置,设计了一套全尺寸岩石锚杆拉剪试验装置^[45]。如图12所示,该装置主要由拉伸块(1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm)、剪切块(1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm)、钢制框架、液压油泵、载荷控制系统及

高精度位移传感器组成。试验装置采用滚轮结构,有效消除了试块与钢制框架间的摩擦阻力,且两试块彼此独立设置,确保相互间无接触或摩擦作用存在。载荷控制系统通过将高精度位移传感器测得的实时位移角度与试验预设比例进行对比,动态调整油泵压力并向两个试块分配拉剪载荷。Chen 等^[45]利用该试验机对不同锚固倾角的锚固裂隙岩体试件进行了拉-剪试验,得到了与围岩裂隙面呈一定锚固倾角的锚杆拉剪载荷-位移曲线。

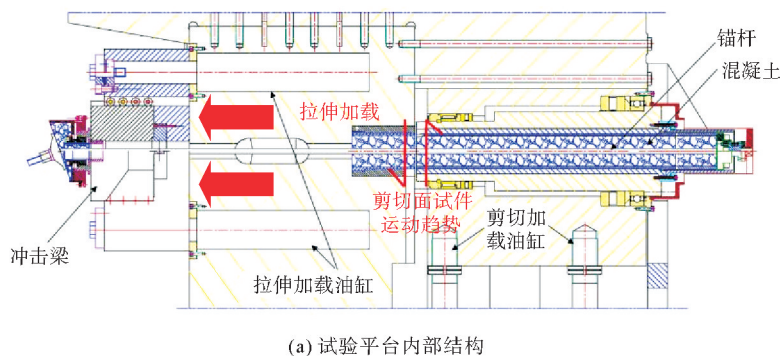


图 11 锚杆力学性能综合试验台^[44]

Fig. 11 Comprehensive test bench for mechanical properties of rockbolts

2023 年,山东科技大学成功研制出 RTR-3122 型全尺寸锚杆锚固性能试验机^[46-47],如图 13 所示。该试验机的主要特点在于以驱动岩体的形式加载锚杆,模拟锚杆在复杂岩体中承受拉伸、剪切、扭转等载荷的力学行为。该试验机集成化程度高,能够完成多类试验,一方面能够测试锚杆及其构件的材料力学性能及匹配性,包括锚杆杆体、托盘、锚网等;另一方面能够测试锚固岩体的力学性能,主要为锚杆在裂隙岩体中的压缩、拉伸(或拔出)、剪切及拉-剪-扭等任意组合加载条件下的锚固性能。试验机最大拉伸载荷为 1 000 kN,拉伸位移可达 600 mm;最大剪切载荷为

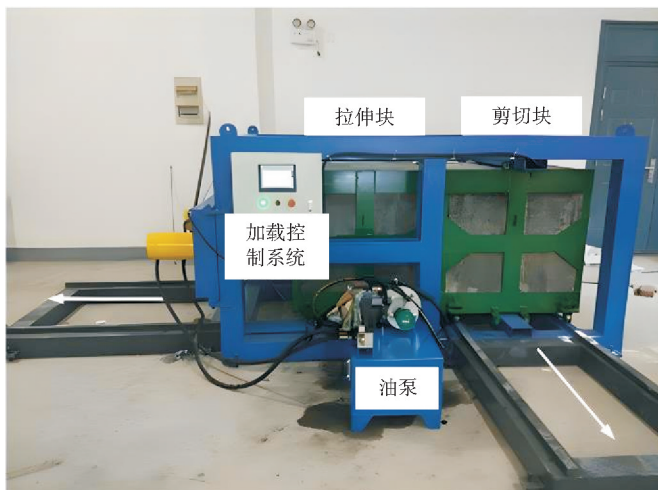


图 12 中南大学锚杆拉剪试验机^[45]

Fig. 12 CSU rockbolt tension-shear test rig

2 000 kN,剪切位移达 200 mm;最大扭矩载荷为 2 000 N·m,且具有无限扭转角度。该试验机对试件类型及尺寸要求较为灵活,能够满足多种试验要求,进行不同强度、不同尺寸的混凝土锚固基体或钢管锚固基体下的锚固性能测试,方便与其他试验机测试结果进行横向对比。该试验机能够测试的锚杆直径为 18~30 mm,锚杆长度最大可达 3 000 mm,且试验机改进之后能够实现围压功能,从而更真实地模拟工程现场环境。

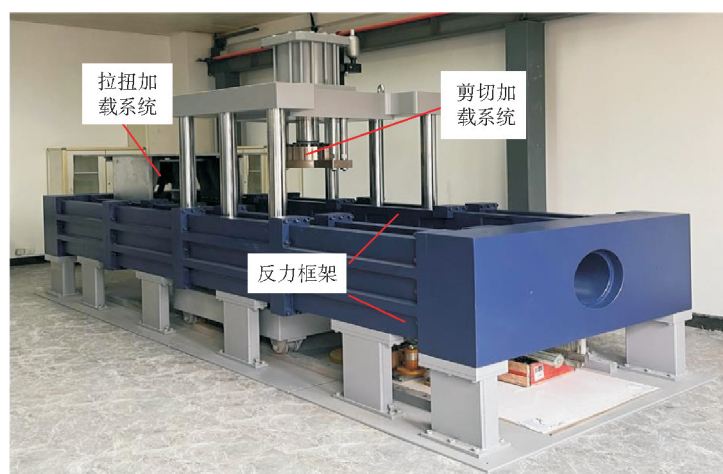


图 13 RTR-3122 全尺寸锚杆锚固性能试验机^[46-47]

Fig. 13 RTR-3122 full-scale rockbolting test rig

2 锚杆锚固岩体动载试验方法及设备

2.1 试验方法

静载试验主要研究锚杆在准静态加载下的锚固性能及渐进损伤机制,但工程中锚杆常受动态冲击载荷作用。相较于静态载荷的均匀应力分布与恒定加载速率,动态冲击载荷具有显著差异,其瞬时高应变率诱发材料动态强度强化与应力梯度,同时应力波反射叠加形成多向复合应力场,导致拉-剪-扭耦合破坏及脆性断裂-能量耗散特征,而静态工况下此类现象不可复现。需进行锚杆高能冲击与多维度响应试验,以揭示动态载荷下锚杆力学行为异同,支撑动载支护设计及方法优化。

锚杆锚固岩体动载试验一般包括锚固体冲击拉伸试验和锚固体冲击剪切试验。图 14 所示为锚固裂隙岩体锚杆冲击拉伸试验原理图,试验方法包括落锤-锚杆自由落体冲击法^[60]和落锤自由落体冲击法^[61]。两种方法所采用的锚固试件均含有不连续面,通过不连续面的张开对锚杆施加轴向拉伸载荷。图 14(a)所示的落锤-锚杆自由落体冲击法,也称动量转换法。该方法中的锚杆锚固岩体与落锤一起运动,在试验开始前,将锚固岩体固定在落锤与横梁之间,试验开始时,通过解除外部约束,使锚固岩体、横梁和落锤同时自由落体。当系统下降一定高度时,横梁与止落机构接触,动量传递到锚杆和横梁,导致锚杆及锚固界面产生较大应力^[62-63]。图 14(b)所示为落锤自由落体冲击法,以下简称为直接冲击法,即锚杆锚固岩体不动,落锤与锚固岩体保持一定高度差。试验中落锤自由落体,当与冲击板接触时,其动能通过一系列传递最终达到锚杆。在落锤-锚杆自由落体冲击法试验中,落锤与锚固基体共同代表锚杆周围的围岩,整个系统在冲击发生时始终保持相对位置不变,系统内部无能量传递。因此,该试验模拟的是岩爆发生前,深部岩体力源释放能量传递至锚固岩体时所产生的力学响应。而采用落锤自由落体冲击法时,落锤与锚杆附近岩体直接接触,模拟的是围岩浅层发生动态冲击破坏时,锚固岩体及锚杆的力学行为。除了落锤加载法,也有学者使用摆锤进行锚杆系统的冲击拉拔加载,例如司林坡^[64]在锚杆综合试验台内使用摆锤进行冲击试验,但这种方法的摆锤质量和最大冲击速度有限,提供的冲击能量也较小。

锚固岩体冲击剪切试验的试件装配结构与静载双剪试验相同,这是由于冲击试验机载荷量级高,为保障试件受力稳定,采用双剪切面模式以避免受力不均使试件发生翻转和弯曲破坏的情况,确保试验数据精准可

靠,试验原理如图 15 所示。试验时,将两端锚固基体固定,底部提供稳定支撑,中间底部预留空间,以容纳冲击后的位移,使其自由响应,防止底部受限引入额外约束,干扰结果真实性。此外,由于冲击载荷能量密度高,瞬间能量远超静态加载,若直接冲击锚固基体,易引发局部应力集中,无法反映真实力学行为,因此,试验前要对中间基体上侧及两端基体下侧采取防护措施,如覆盖金属垫板等。

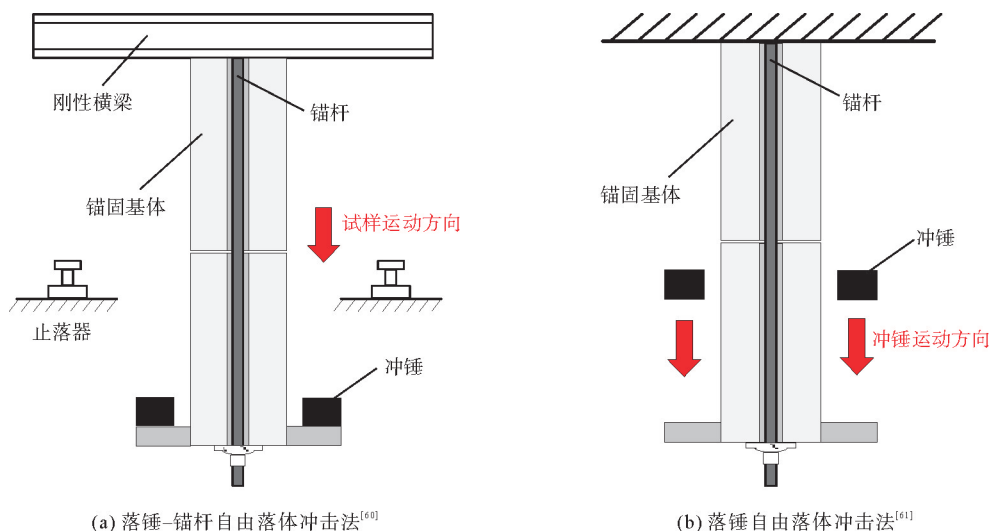


图 14 锚固裂隙岩体冲击拉伸试验原理示意图

Fig. 14 Diagram of rockbolt impact tension test principle in fractured rock mass

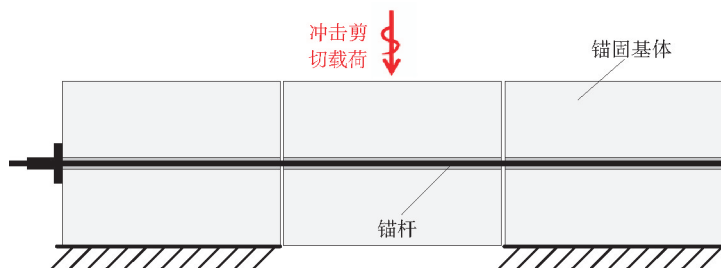


图 15 锚固裂隙岩体冲击剪切试验原理示意图

Fig. 15 Diagram of rockbolt impact shear test principle in fractured rock mass

2.2 锚杆系统冲击拉伸试验设备

2004 年,澳大利亚科廷大学西澳大利亚矿业学院 Player 等^[48]研制出可进行动量冲击的试验机,如图 16 所示。该试验机主要由金属框架、刚性横梁和缓冲器组成。锚固岩体包括两个金属套筒和一根锚杆,并通过锚固剂将锚杆锚固在套筒内部,立柱内侧有导轨,可限制横梁的前后位移。试验前,将锚固岩体试件上管的顶端通过垫板固定在横梁上,并将相应重量的金属板通过托盘及钢圈固定在试件的下管,钢板之间通过金属杆和螺母夹紧。试验时,横梁顶部约束,使横梁、锚固岩体试件和金属板沿立柱内侧的导轨进行自由落体运动,当横梁与缓冲器接触且缓冲器静止后结束试验。横梁与锚固岩体顶部垫板之间及试件底部固定螺母与托盘之间均安装压力传感器,横梁顶部设置加速度传感器,刚性横梁上设置应变计,所有数据可输入同一数据监测系统。该试验机最大落锤质量为 4 500 kg,最大冲击速度为 10 m/s,最大能量输出为 225 kJ。

利用试验机进行冲击试验时,冲击瞬间部分冲击能量会被试验机吸收造成损耗,因此需在试验机表面设置大量载荷及应变监测装置,试验复杂度较高。考虑到上述情况,在特定的试验要求下,某些学者进行了试验方案更改,如 2005 年 Ansell^[49]在对其研发的新型吸能锚杆进行试验时,采用无导轨自由落体方式

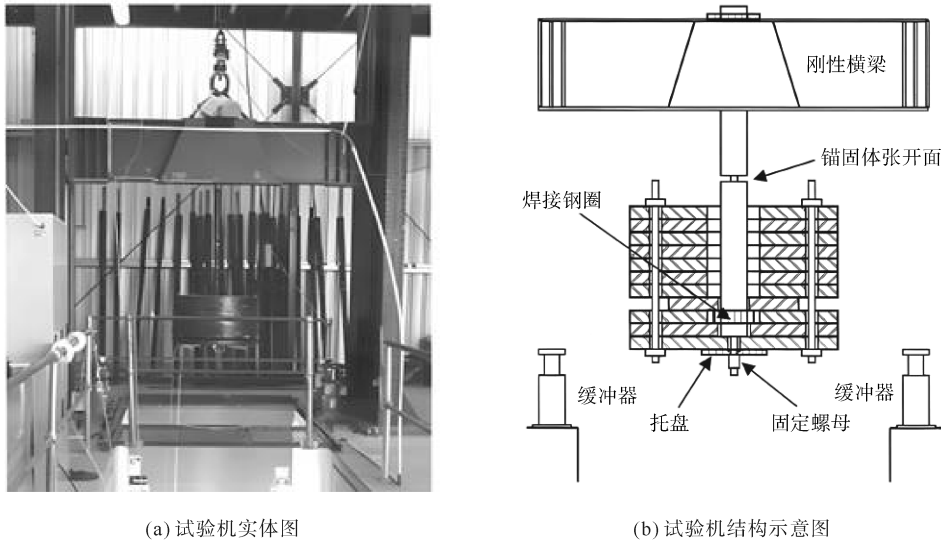


图 16 WASM 冲击试验机^[48]
Fig. 16 WASM impact testing machine

进行了锚固岩体冲击拉拔试验,试验前将混凝土试件吊起至一定高度,之后松开启动吊钩使试件自由下落,当试件顶部横梁与竖井口旁的工字钢梁接触时,由于重力作用试件内的锚杆将受到冲击拉拔载荷,以完成对锚杆的冲击加载。试件装配及试验原理如图 17 所示。该试验无真正落锤结构,而是将试件本身作为落锤,通过圆筒内部混凝土重量的不同实现改变冲击载荷大小,试验前在锚杆表面进行等长标记,以观察试验后锚杆伸长率,锚固岩体顶部安装加速度计,用于测量发生冲击时试件加速度及载荷。

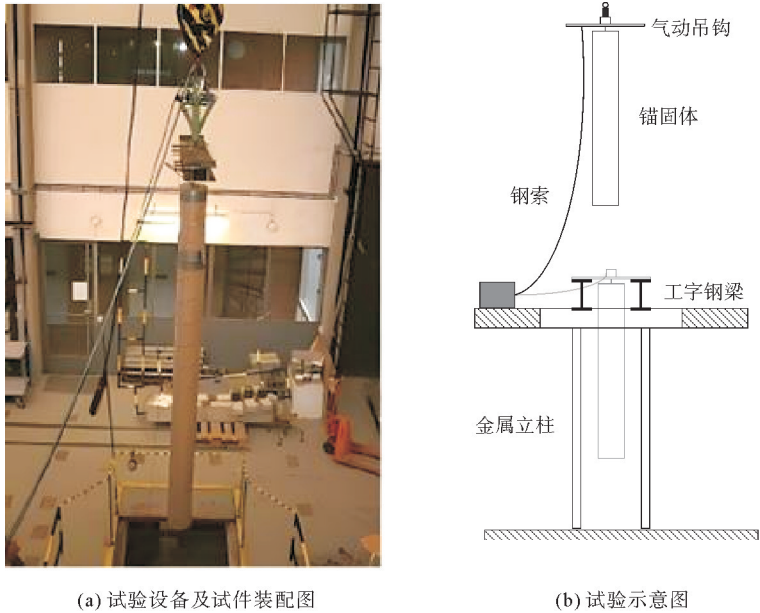


图 17 无导轨自由落体试验^[49]
Fig. 17 Free fall test without guide rails

2007 年,加拿大 CANMET-MMSL^[50] 研发了落锤冲击试验机,试验机实物及结构如图 18 所示。该试验机最初由 Gaudreau 等^[51] 开发,被 CANMET-MMSL 收购后进行了优化。试验机由外框架、试件固定管及落锤组成,外框架包括两根立柱和顶部横梁,锚固岩体试件一般由金属套筒及锚固在套筒内侧的锚杆组成,套筒底部通过连接销与试验机上的试件固定管连接,在横梁上侧及立柱表面分别安装了压力传感器及应变仪,以监测每次试验对试验机局部的影响。锚杆所承受的拉伸载荷通过试件底部压力传感器进行监测,位移则利用试件底部的线扫描摄像机进行记录。落锤重量及下落高度可调节,最大重量为 1 500 kg,最大高度为 1.5 m,最大下落速度为 5.4 m/s,最大能量输出为 22 kJ。基于落锤自由落体冲击法,采用含不连续面的锚固试件,该试验机还可开展锚固裂隙岩体冲击拉伸试验。

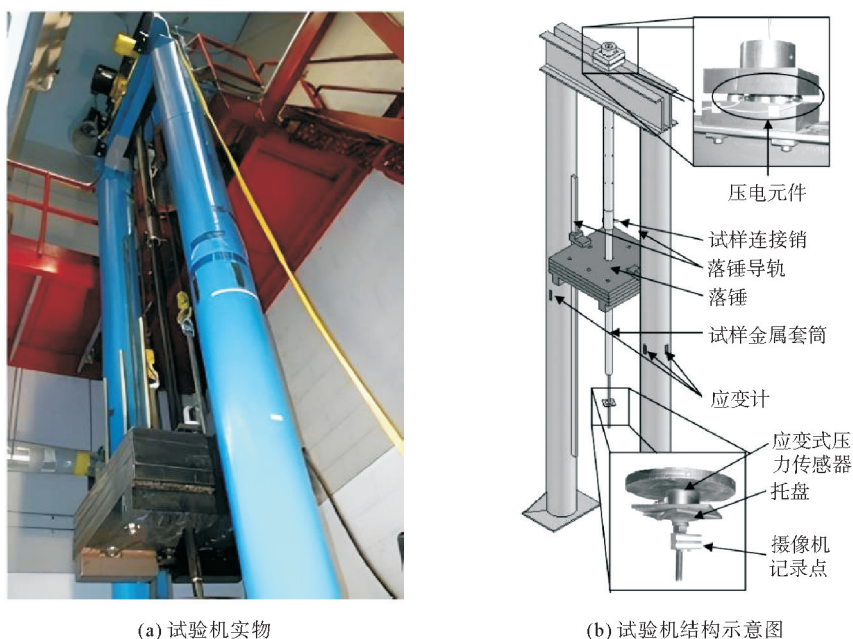
图 18 CANMET-MMSL 试验机^[50]

Fig. 18 CANMET-MMSL test rig

2018 年,南非新概念采矿公司研发了动载冲击试验机^[52],该试验机采用落锤自由落体法对试件进行冲击,如图 19 所示。该试验机在锚固岩体试件下端设置了导向小车,可进一步减小由于落锤不平衡下落导致的载荷偏心问题,但同时可能增加系统的能量耗散,造成试验数据误差增大。在试验机底部安装的减震器,可以很好地保护试验设备。该试验机总高度为 8.2 m,最大落锤高度为 2.1 m,最大能量输出可达 65 kJ。

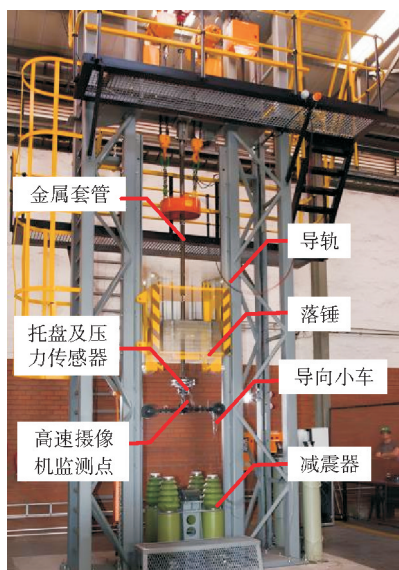
图 19 南非动载冲击试验机^[52]

Fig. 19 South African dynamic load impact testing machine

图 20 30 kJ 多功能落锤冲击试验机^[53]

Fig. 20 30 kJ multifunctional drop hammer impact testing machine

2023 年,中煤科工开采研究院有限公司^[53]自主研发了多功能落锤冲击试验机,试验机结构如图 20 所示。该试验机主体结构和数据监测方式与 CANMET-MMSL 试验机基本类似,最大有效冲击高度为 4 m,

最大落锤质量为 1 000 kg,最大输出能量为 30 kJ。为充分利用冲击高度,可通过接长锚杆或安装套筒的方式对试件进行处理,处理后的试件可适应最大冲击高度达 3 m 以上。目前,该试验机仅进行过锚杆(锚索)冲击拉拔及托盘等构件的冲击试验,由于该试验机可装配模拟岩体的套筒,因此对试验机夹具进行改造或设计锚固岩体冲击专用试件后,该试验机也具备进行锚固裂隙岩体冲击拉伸试验功能。

2.3 裂隙岩体锚杆冲击剪切试验设备

2018 年,Li 等^[54]采用澳大利亚新南威尔士大学的落锤试验机,如图 21 所示,通过设计双剪装置,开展了锚固岩体双剪冲击试验,探究了安装角度、落锤高度、锚杆直径与锚固体剪切承载性能之间的关系。该试验机配备了高速摄像机,可用于监测落锤与试件接触瞬间的碰撞过程,同时还增设了位移计及加速度计,并提出试验分析方法:其一,在试验进程中观测到落锤下落之后的极短时段内会出现反弹现象,引发二次冲击,但二次冲击阶段的数据无法精准反映锚固体抗冲击性能,因此仅需针对首次冲击过程中的位移与加速度数据予以剖析;其二,考虑锚固岩体受到冲击时,外层混凝土可能在锚杆尚未充分承载之前便破坏,为此需预先对加速度计以及位移监测装置实施了精细标定,以确保测量数据的可靠性与有效性。该试验机最大落锤质量为 185 kg,最大下落速度为 7.67 m/s,最大能量输出为 5.439 kJ。

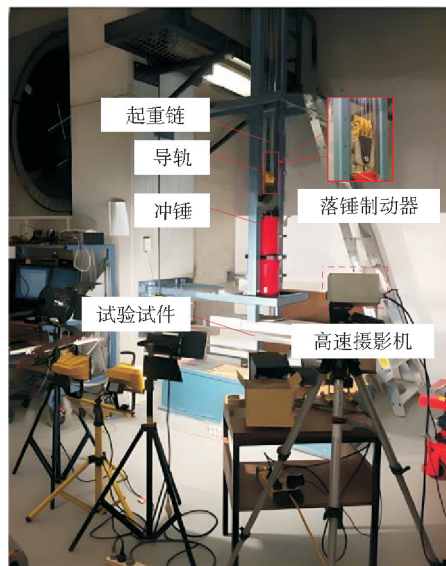


图 21 冲击剪切试验机^[54]

Fig. 21 Impact shear testing machine

目前,锚固裂隙岩体剪切冲击试验通常通过对常规落锤试验机的落锤形状及结构进行改装来完成。2021 年,山世昌等^[55]依托太原理工大学研发的 DHR9401 落锤式冲击加载试验机^[56]对 HRB500 和 CRM700 锚杆与混凝土制作而成的锚固岩体进行了冲击双剪试验,得到了冲击载荷-时间曲线,研究了冲击过程中锚杆及混凝土的力学行为演化过程,锚固双剪试件装配如图 22 所示。试验所用混凝土块的尺寸为 150 mm×150 mm×300 mm,锚杆长度为 1 100 mm。载荷传感器设置在锤头上侧,用于检测冲击过程中载荷变化,同时,试验时采用高速摄像机对冲击过程进行记录。试验机最大冲击高度为 12 m,落锤质量约 261 kg。

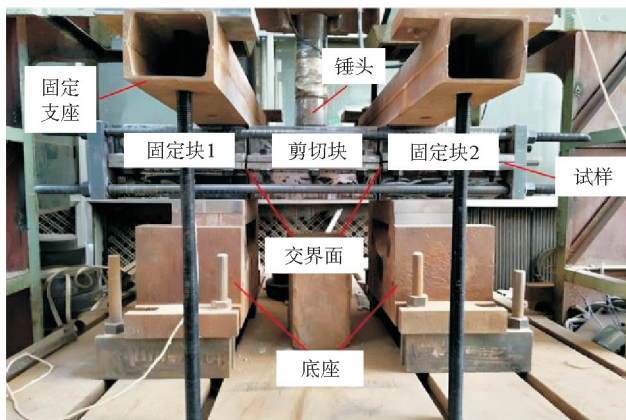


图 22 试验机配套试件装配图^[55]

Fig. 22 Assembly drawing of test specimens

3 锚固试验设备总结分析

基于上述试验方法与设备调研,对锚杆锚固静载与动载性能测试的代表性设备进行信息统计,不包括改装后可用于锚杆材料拉伸(锚杆杆体、杆件系统等)、压缩(让压环、托盘等)等常规力学性能测试的试验设备^[65-67],统计结果见表 1 及表 2。

现有锚杆静载试验设备能够较好地完成锚固岩体的单剪、双剪、拉剪组合试验,为锚杆锚固性能研究和评估提供了基础支撑。对比不同设备的参数,在最大载荷方面,伍伦贡大学的试验设备可实现 5 000 kN 的

法向载荷,适用于群锚加载;在试件尺寸方面,挪威科技大学与中南大学的设备可测试接近 1 m^3 的试件,适合进行全尺寸测试;在加载功能方面,挪威科技大学、中南大学和煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室的设备具备岩体裂隙面处锚杆的拉伸与剪切加载功能,并且煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室的设备还可进行岩体内锚杆的拉拔及冲击扰动性能测试。在此基础上,山东科技大学成功研制了 RTR-3122 型锚杆锚固性能试验机。该设备采用驱动岩体位移以加载锚杆的模式,复现了现场锚杆在岩体裂隙面处的拉剪扭复合受力,可测试岩体裂隙面处锚杆的拉、剪、扭、拉扭、拉剪、扭剪及拉剪扭锚固性能,最大拉/剪/扭复合载荷分别达到 $1\ 000\text{ kN}/2\ 000\text{ kN}/2\ 000\text{ N}\cdot\text{m}$ 。尽管锚杆静载试验设备已有显著进展,但目前在设备要求、锚固试样(如钢管、混凝土块)尺寸设计等方面缺乏统一标准,导致试验结果难以进行横向对比,从而制约了大规模、标准化试验测试分析的开展。

表 1 主要锚固静载试验设备统计

Table 1 Statistics of major anchor static load testing equipment

加载功能	所属单位	锚固基体	锚固试件尺寸	功能及技术参数说明
剪切加载	英国标准协会 (British Standard Institution)	钢管	—	可进行钢管锚固体单剪试验
	英国帝国理工学院 (Imperial College London)	混凝土块	$1\ 000\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 600\text{ mm}$	可进行群锚试件的剪切试验
	伍伦贡大学(The University of Wollongong)	混凝土块	$600\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 450\text{ mm}$	可施加最高 $5\ 000\text{ kN}$ 的法向载荷,改装后可避免混凝土之间的摩擦力及剪胀效应
	Megabolt 公司	混凝土块	$\Phi 250\text{ mm}\times 3\ 600\text{ mm}$	可进行全尺寸锚固岩体试验,最大剪切载荷约 $1\ 200\text{ kN}$
	长崎大学(Nagasaki University)	混凝土块	$100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ $125\text{ mm}\times 130\text{ mm}\times 200\text{ mm}$	剪切方式为剪切箱剪切,可施加法向载荷,最大剪切载荷及法向载荷均为 400 kN
拉-剪加载	挪威科技大学(NTNU)	混凝土块	$950\text{ mm}\times 950\text{ mm}\times 950\text{ mm}$	可进行全尺寸锚固岩体拉伸、剪切同步加载,最大拉伸载荷 600 kN ,最大剪切载荷 500 kN
	安徽理工大学	混凝土块	$200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 1\ 800\text{ mm}$	可进行全尺寸锚固岩体拉伸、剪切试验
	煤炭智能开采与岩层 控制全国重点实验室	混凝土块、 钢管混凝土	$\Phi 120\text{ mm}\times 1\ 200\text{ mm}$	可进行全尺寸锚固岩体试验,模拟锚杆伸出端与巷道边墙不垂直的情况,最大轴向拉伸载荷 610 kN ,最大径向剪切载荷 $1\ 100\text{ kN}$
	中南大学	混凝土块	$1\ 000\text{ mm}\times 1\ 000\text{ mm}\times 1\ 000\text{ mm}$	可进行全尺寸锚固岩体拉伸、剪切同步加载
	山东科技大学	混凝土块、钢管	$300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 600\text{ mm}$	可进行岩体裂隙面处全尺寸锚杆的拉、剪、扭、拉扭、拉剪、扭剪及拉剪扭组合加载条件下的锚固性能测试,以及锚杆杆体材料、锚固构件、锚网喷结构等的力学性能测试,最大拉伸载荷 $1\ 000\text{ kN}$,剪切载荷 $2\ 000\text{ kN}$,扭转载荷 $2\ 000\text{ N}\cdot\text{m}$

针对锚杆冲击试验设备,科廷大学的试验设备在冲击能量方面表现突出,其冲击能量最高可达 225 kJ (落锤 $4\ 500\text{ kg}$),而新南威尔士大学的设备则为 5.439 kJ (落锤 185 kg),两者差异显著;在冲击方式方面,现有设备仅能单独进行裂隙岩体锚杆的动量冲击或直接冲击试验;在锚固基体方面,大多数锚杆冲击拉伸试验以钢管为基体(如 CANMET 和中煤科工等),而冲击剪切试验则多采用混凝土基体。总体来看,目前尚缺乏高性能、综合性的锚杆拉伸与剪切冲击专用试验设备,这导致在不同试验中需要使用多种设备,不仅增加了试验的工作量和成本,还可能由于设备差异影响试验数据的一致性和可靠性。尤其是现有设备尚无法有效耦合裂隙岩体锚杆的直接冲击法和动量冲击法。作为两种不同的冲击试验方法,直接冲击法和动量冲击法各具优势和适用场景,但现有设备无法在同一平台上实现这两种功能,从而在面对复杂多样的工程实际问题时,难以灵活调整冲击试验方法。在此背景下,山东科技大学正在研发集成机械储能与落锤释能的双能级锚

杆动载冲击设备,旨在突破直接冲击法与动量冲击法难以耦合的技术瓶颈,为复杂地质条件下锚杆的静/动态耦合损伤机制研究提供先进平台。同时,锚固冲击试样的标准化设计与高速动态监测技术亟待进一步突破,以实现锚杆冲击响应的精准测试与高效分析。

表 2 主要锚固动载冲击试验设备统计

Table 2 Statistics of major anchor dynamic load impact testing equipment

加载功能	所属单位	锚固基体	冲击试验方法	功能及技术参数说明
冲击拉伸	瑞典皇家理工学院(KTH Royal Institute of Technology)	钢筒混凝土	锚杆冲击拉伸(拉拔),无落锤,无导轨自由落体冲击法(动量冲击)	下落高度不小于 7 m,最大冲击速度约 12 m/s
	CANMET-MMSL 研究实验室	钢管	锚杆冲击拉伸,落锤自由落体冲击法	最大落锤重量 1 500 kg,最大下落高度 1.5 m,最大冲击速度 5.4 m/s,最大冲击能量约 22 kJ
	中煤科工开采研究院有限公司	钢管	锚杆冲击拉伸,落锤自由落体冲击法	最大落锤重量 1 000 kg,最大下落高度 4 m,最大冲击能量 30 kJ
	科廷大学西澳大利亚矿业学院(Western Australian School of Mines, Curtin University)	钢管	锚杆冲击拉伸,落锤-锚杆自由落体冲击法(动量冲击)	最大落锤重量 4 500 kg,最大冲击速度 10 m/s,最大冲击能量 225 kJ
	南非新概念采矿公司(New Concept Mining)	钢管	锚杆冲击拉伸,落锤自由落体冲击法	最大落锤重量 3 171 kg,最大下落高度 2.1 m,最大冲击速度 6.4 m/s,最大冲击能量 65 kJ
冲击剪切	澳大利亚新南威尔士大学采矿工程学院(School of Mining Engineering, UNSW Australia)	混凝土	锚杆冲击剪切,落锤自由落体冲击法	最大落锤重量 185 kg,最大下落高度 3 m,最大冲击速度 7.67 m/s,最大冲击能量约 5.439 kJ
	太原理工大学	混凝土	锚杆冲击剪切,落锤自由落体冲击法	最大冲击高度约 12 m,最大落锤重量 240 kg,最大冲击速度 15.7 m/s,最大冲击能量约 30 kJ

4 锚杆试验数据应用策略探讨

在当前锚杆试验技术快速发展的背景下,如何实现多源试验数据的有效整合与可靠性转化,成为突破锚杆支护工程经验依赖瓶颈的关键。针对深部复杂地质条件下精准支护需求,亟需将静/动载试验数据、室内测试设备及历史积累数据系统整合,构建锚固性能数据库与智能评估模型,为支护设计提供科学依据。基于此,可通过如图 23 图所示“基础库-数据库-评估模型-应用”四层架构,逐步建立融合全尺寸试验数据与多元评估模型的锚杆选型决策系统,实现锚杆性能量化评估与支护设计优化,推动试验成果向工程实践的精准转化,具体包括:

- 1) 基础数据接口开发。该部分包括锚杆类型数据接口、支护设计方法接口及工程现场条件接口。锚杆类型数据接口兼容不同厂商锚杆参数(材质、直径、锚固剂类型等);支护设计方法接口集成经典支护设计理论模型(悬吊理论、组合拱理论等)、校验公式(载荷、能量等)与数值模拟工具(如 FLAC^{3D}、PFC^{3D}),构建统一输入输出规范;工程现场条件接口则建立开采-岩体-应力数据通道、支撑试验与数值计算方案设计,从而为后续数据库的动态更新与多因素耦合提供基础数据。
- 2) 数据库动态维护平台开发。采用原始层、特征层、应用层三分层动态存储架构。原始层负责存储海量非结构化数据,包括原始试验数据、高速摄像图片、试验监测日志等;特征层基于原始层提取关键指标,具体为力学特征参数(如极限载荷、极限变形、能量吸收等)、失效模式标签(如基于图像分类模型识别锚杆断口形貌)、环境关联因子(如岩体围压与锚杆载荷响应特性的关联性规律等);应用层则构建现场支护案例检索系统,重点检索提取不同工程条件下的锚杆支护方案、支护效果等信息,支持工程决策过程中快速、精确的信

息查找与决策优化。

3) 锚杆选型及支护设计决策系统开发。首先在动态更新的试验数据库基础之上,形成典型锚杆选型图谱,构建锚杆锚固性能多元评估模型。然后,进行多模态数据融合建模,联合试验数据(如挪威科技大学、山东科技大学等锚杆拉剪试验数据集)进行模型训练,增强模型的适应性与准确性;其次,建立多目标决策优化算法,结合强化学习模型动态调整支护参数(如锚杆选型、预紧力、支护密度等);最后,与实验室数据、现场数据、仿真数据进行动态交叉验证,实时调整算法与优化模型参数,以实现锚固性能评估与最优选型的自动化决策。

4) 应用效果动态反馈系统开发。集成光纤光栅传感器与声发射监测系统,实时采集锚杆轴力、围岩变形数据,并将其上传至云端进行分析与处理。基于强化学习与数字孪生模型,通过对实时监测数据的分析,动态修正支护方案(如调整锚杆选型、支护密度、预紧力等),实现“设计-施工-监测-优化”闭环。在长期应用过程中,基于现场反馈数据持续优化模型参数,更新数据库与算法版本,形成一个适应性强、实时反馈的闭环系统,为深部复杂地质条件下的锚固设计提供可靠的技术支撑与决策依据。

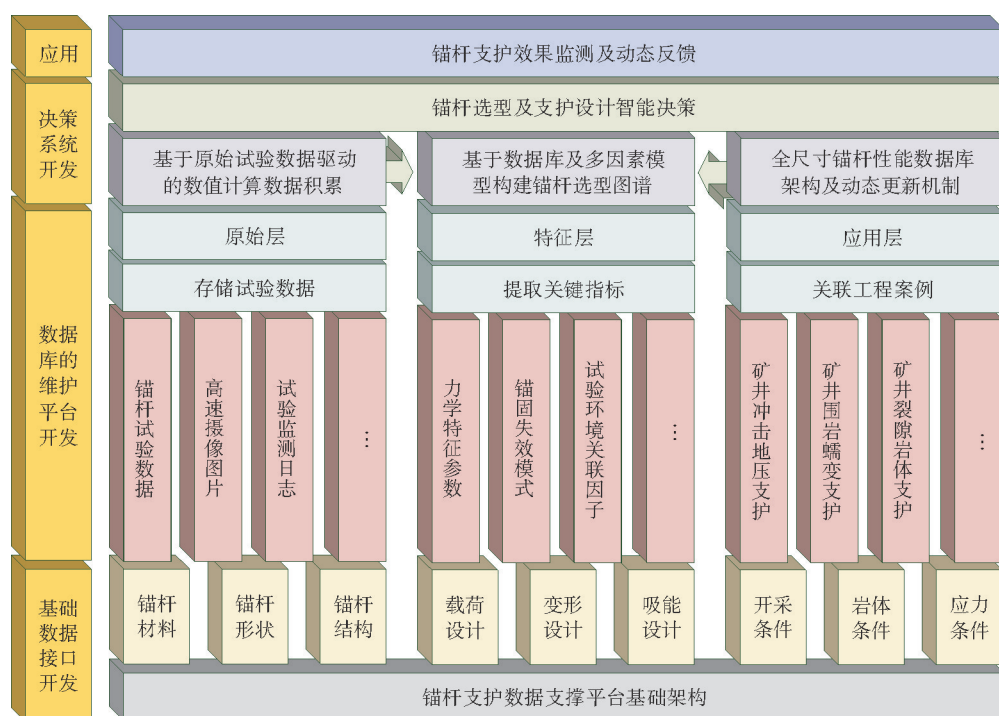


图 23 基于室内试验数据库的锚杆支护决策系统构建方案

Fig. 23 A proposal for the construction of a rockbolt support decision-making system based on an indoor testing database

5 结论与展望

1) 锚杆锚固性能静载试验方法与设备的研究表明,目前已建立了拉伸、剪切及拉剪组合加载的基本方法框架,并且多台设备能够实现岩体裂隙张开与滑移等准静态力学行为的测试。然而,大多数设备在拉剪扭多载荷同步控制及加载能力方面存在不足,难以真实还原地下复杂岩体环境中锚杆拉-剪-扭复合承载的叠加作用。此外,锚固裂隙岩体内部应力演化及多介质破坏的同步监测技术尚不成熟,仍需加强深部工程锚固系统长期稳定性的精准评估研究。

2) 在动载冲击试验方面,目前已形成了落锤自由落体冲击法(直接冲击法)和落锤-锚杆自由落体冲击法(动量转换法)两种核心技术路径。前者通过外部冲量模拟浅部岩体突发动载作用,后者侧重模拟深部应力释放过程的整体能量传递。然而,现有试验设备无法有效耦合这两类冲击方法,且国内外动载设备在能量

输出范围(约 5 ~225 kJ)及动态响应频率等关键参数上差异较大。此外,锚杆在冲击作用下的动态损伤及能量瞬时耗散的实时表征方法仍待突破。

3) 分析当前锚杆锚固性能试验方法与设备的发展现状与技术瓶颈,今后锚杆锚固静载试验设备应聚焦于克服现有设备在“拉-剪-扭-围压”多场耦合条件下的模拟局限性,探索多轴伺服加载与真三轴应力模拟技术的结合,以更真实地还原复杂地质环境中的锚杆受力状态。同时,在动载冲击试验中,应加强对锚杆瞬态损伤过程的动态监测,引入高速数字图像相关技术与声发射监测系统,以有效捕捉动态破坏过程,实现锚杆动态冲击响应精准捕捉与失效机制解析。

4) 全尺寸锚杆试验是衔接室内研究与工程实践的核心桥梁,其核心优势在于直接输出工程可用的关键参数,未来应持续研发该类试验设备及开展试验研究。通过全尺寸试验直接获取锚杆极限载荷、能量吸收及失效模式等关键工程参数,构建标准化全尺寸试验数据库,推动支护设计从“经验类比”向“数据驱动”转型,为巷道锚杆支护选型、支护设计优化等工程决策提供定量支撑,显著降低因小尺寸试验失真导致的支护安全冗余或失效风险。

参考文献:

- [1] JIANG Y J, ZHANG S H, LUAN H J, et al. Numerical modelling of the performance of bolted rough joint subjected to shear load[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(5): 1-21.
- [2] 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 Hongpu. 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.
- [3] ZHAO T B, XING M L, GUO W Y, et al. Anchoring effect and energy-absorbing support mechanism of large deformation bolt[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(2): 572-581.
- [4] 谷雪斌, 郭伟耀, 赵同彬, 等. 侧压影响下圆形洞室岩爆双轴物理模拟试验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(1): 46-52.
GU Xuebin, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Biaxial physical simulation test of rock burst in circular tunnel under influence of lateral pressure[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2020, 39(1): 46-52.
- [5] 马兴印, 公绪飞, 卞立国, 等. 双轴加载条件下红砂岩基本力学特性及破坏机制[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(3): 58-65.
MA Xingyin, GONG Xufei, BIAN Liguang, et al. Basic mechanical properties and failure mechanism of red sandstone under biaxial loading condition[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2022, 41(3): 58-65.
- [6] 韩军, 张明, 张怀东, 等. 大变形巷道螺纹钢锚杆优化设计及应用研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(4): 727-734.
HAN Jun, ZHANG Ming, ZHANG Huaidong, et al. Rebar bolt optimization for large deformational roadways with application case[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2019, 48(4): 727-734.
- [7] 康红普. 煤巷锚杆支护成套技术研究与实践[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(21): 161-166.
KANG Hongpu. Study and application of complete rock bolting technology to coal roadway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(21): 161-166.
- [8] 柏建彪, 侯朝炯, 杜木民, 等. 复合顶板极软煤层巷道锚杆支护技术研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(1): 53-56.
BAI Jianbiao, HOU Chaojiong, DU Mumin, et al. On bolting support of roadway in extremely soft seam of coal mine with complex roof[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(1): 53-56.
- [9] 张豪, 徐帅, 纪旭波, 等. 全尺寸锚杆剪切试验装置研究现状及发展趋势[J]. *金属矿山*, 2022, 51(10): 1-9.
ZHANG Hao, XU Shuai, JI Xubo, et al. Research status and development trend of full-size rockbolt shear test device[J]. *Metal Mine*, 2022, 51(10): 1-9.
- [10] LIU C H, LI Y Z. Analytical study of the mechanical behavior of fully grouted bolts in bedding rock slopes[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(9): 2413-2423.
- [11] RANJBARIA M, RASHEDI M, DIAS D. Analytical and numerical simulations to investigate effective parameters on pre-

- tensioned rockbolt behavior in rock slopes[J/OL]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(2): 74. DOI:10.1007/s10064-021-02563-1.
- [12] 李育宗,刘才华.拉剪作用下节理岩体锚固力学分析模型[J].岩石力学与工程学报,2016,35(12):2471-2478.
LI Yuzong, LIU Caihua. An analytical model of jointed rock bolts under the combination of tensile and shear loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2471-2478.
- [13] 孟庆彬,宋子鸣,刘滨,等.FLAC^{3D}锚杆(索)拉伸-剪切破断单元的二次开发及数值实现[J].采矿与安全工程学报,2025,42(1):180-193.
MENG Qingbin, SONG Ziming, LIU Bin, et al. Secondary development and numerical realization of FLAC^{3D} bolt(cable) tensile-shear fracturing unit[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2025, 42(1): 180-193.
- [14] ZHAO T B, GUO W Y, YIN Y C, et al. Bolt pull-out tests of anchorage body under different loading rates[J/OL]. Shock and Vibration, 2015(1). DOI:10.1155/2015/121673.
- [15] 赵同彬,邹建超,傅知勇,等.双节理贯通岩石锚固机理试验研究[J].煤炭学报,2020,45(9):3065-3072.
ZHAO Tongbin, ZOU Jianchao, FU Zhiyong, et al. Experimental study on anchoring mechanism of double persistent jointed rock[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3065-3072.
- [16] 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. Launceston, 2008: 95-104.
- [17] WU Y K, OLSEN J. Development of a new yielding rock bolt: Yield-lok bolt[C/CD]//44th U. S. Rock Mechanics Symposium and 5th U. S. -Canada Rock Mechanics Symposium. Salt Lake City, 2010: 130530860.
- [18] CHARETTE F, PLOUFFE M. Roofex: Results of laboratory testing of a new concept of yieldable tendon[C]//Deep Mining 2007; Proceedings of the Fourth International Seminar on Deep and High Stress Mining. Perth, 2007: 395-404.
- [19] 何满潮,李晨,宫伟力,等.NPR锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1513-1529.
HE Manchao, LI Chen, GONG Weili, et al. Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1513-1529.
- [20] 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.
- [21] 靖洪文,朱谭谭,苏海健,等.节理岩体内砂浆锚杆锚固力演化特征试验研究[J].煤炭科学技术,2017,45(1):16-21.
JING Hongwen, ZHU Tantan, SU Haijian, et al. Experimental study on anchoring force evolution characteristics of mortar anchor in joint rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 16-21.
- [22] SHI H, SONG L, ZHANG H Q, et al. Experimental and numerical studies on progressive debonding of grouted rock bolts[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(1): 63-74.
- [23] 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.
- [24] 荣冠,朱焕春,周创兵.螺纹钢与圆钢锚杆工作机理对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):469-475.
RONG Guan, ZHU Huanchun, ZHOU Chuangbing. Testing study on working mechanism of fully grouted bolts of thread steel and smooth steel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 469-475.
- [25] 白晓宇,吴泽坤,王凤姣,等.BFRP抗浮锚杆抗拔性能现场试验与载荷传递特性[J].岩石力学与工程学报,2024,43(6):1335-1346.
BAI Xiaoyu, WU Zekun, WANG Fengjiao, et al. Load transfer behavior of BFRP anti-floating anchors based on field pull-out tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(6): 1335-1346.
- [26] 陶志刚,任树林,何满潮,等.地下工程微观NPR锚杆钢静力拉伸及锚固抗剪力学特性[J].煤炭学报,2022,47(2):683-694.
TAO Zhigang, REN Shulin, HE Manchao, et al. Static tensile and bolting shear mechanical properties of micro-NPR bolt steel in underground engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 683-694.
- [27] 张书博,王长盛,王刚,等.BFRP筋锚固节理岩体剪切行为试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(4):712-724.

- ZHANG Shubo, WANG Changsheng, WANG Gang, et al. Experimental study on the shear behaviors of bolted rock joints reinforced with BFRP bars[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(4): 712-724.
- [28] WU X Z, JIANG Y J, GONG B, et al. Behaviour of rock joint reinforced by energy-absorbing rock bolt under cyclic shear loading condition[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 110: 88-96.
- [29] 李青海, 柳昌涛, 史卫平, 等. 基于不同锚固角度的倾斜节理岩体剪切破坏特征研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(4): 5-16.
- LI Qinghai, LIU Changtao, SHI Weiping, et al. Study on shear failure characteristics of inclined jointed rock mass based on different anchorage angles[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(4): 5-16.
- [30] LI Y Z, TANNANT D D, PANG J Y, et al. Experimental and analytical investigation of the shear resistance of a rock joint held by a fully-grouted bolt and subject to large deformations[J/OL]. Transportation Geotechnics, 2021, 31. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100671.
- [31] 刘泉声, 雷广峰, 彭星新, 等. 锚杆锚固对节理岩体剪切性能影响试验研究及机制分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(增1): 27-35.
- LIU Quansheng, LEI Guangfeng, PENG Xingxin, et al. Experimental study and mechanism analysis of influence of bolt anchoring on shear properties of jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 27-35.
- [32] 刘爱卿, 鞠文君, 许海涛, 等. 锚杆预紧力对节理岩体抗剪性能影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 391-396.
- LIU Aiqing, JU Wenjun, XU Haitao, et al. Experimental study on the effect of bolt prestress on the shear behavior of jointed rockmass[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 391-396.
- [33] LIN H, SUN P H, CHEN Y F, et al. Shear behavior of bolt-reinforced joint rock under varying stress environment[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(6): 5755-5770.
- [34] 尹乾, 靖洪文, 孟波, 等. 恒定法向刚度条件下三维粗糙裂隙面剪切力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2213-2225.
- YIN Qian, JING Hongwen, MENG Bo, et al. Shear mechanical properties of 3D rough rock fracture surfaces under constant normal stiffness conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2213-2225.
- [35] AZIZ N, MIRZA A, NEMCIK J, et al. A follow up to study the behaviour of cable bolts in shear: Experimental study and mathematical modelling[C]//Proceedings of the 16th Coal Operators' Conference. Wollongong, 2016: 24-31.
- [36] GRASSELLI G. 3D behaviour of bolted rock joints: Experimental and numerical study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(1): 13-24.
- [37] AZIZ N, KAY J H. Shear strength properties of Hilti plain and indented strand cable bolts[C]//Coal Operators' Conference. Wollongong, 2014: 156-162.
- [38] AZIZ N, RINK O, RASEKH H, et al. Single shear testing of various cable bolts used in Australian mines[C]//Coal Operators' Conference. Wollongong, 2017: 222-230.
- [39] 蒋宇静, 张孙豪, 栾恒杰, 等. 锚固方式对岩石节理宏观剪切特性的影响及其机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(6): 1301-1315.
- JIANG Yujing, ZHANG Sunhao, LUAN Hengjie, et al. Study of the effect of anchorage modes on the macro and micro shear characteristics of rock joints and its mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(6): 1301-1315.
- [40] JIANG Y J, XIAO J, TANABASHI Y, et al. Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 275-286.
- [41] STJERN G. Practical performance of rock bolts[D]. Trondheim: Universitetet i Trondheim, 1995: 178.
- [42] HAGEN S A, LARSEN T, BERGHORST A, et al. Full-scale rock bolt testing in the laboratory: Analysis of recent results[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2020, 120(1): 1-6.
- [43] 查文华, 梁译文, 王澄菡, 等. 剪切作用下新型拉力分散型麻花锚杆承载性能研究[J]. 水利水电技术, 2023, 54(11): 40-52.
- ZHA Wenhua, LIANG Yiwen, WANG Chenghan, et al. Study on the bearing capacity of a new type of tension dispersed fried dough twists bolt under shear[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(11): 40-52.
- [44] KANG H P, YANG J H, GAO F Q, et al. Experimental study on the mechanical behavior of rock bolts subjected to com-

- plex static and dynamic loads[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(11): 4993-5004.
- [45] CHEN Y, WEN G P, HU J H. Analysis of deformation characteristics of fully grouted rock bolts under pull-and-shear loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(7): 2981-2993.
- [46] 邢明录. 锚杆-岩体粘结界面力学行为及拉剪扭锚固性能损伤机制研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2023.
- XING Minglu. Study on mechanical behavior of bolt-rock bonding interface and damage mechanism of anchorage performance under tension-shear-torsion[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2023.
- [47] LI L F, ZHAO T B, XING M L, et al. Load transfer law and bearing capacity of the anchorage interface based on the three-stage model[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2025, 63(1): 151-164.
- [48] PLAYER J, VILLAESCUSA E, THOMPSON A. Dynamic testing of rock reinforcement using the momentum transfer concept[C]//5th International Symposium on Rock Support and Reinforcement. London, 2004: 327-340.
- [49] ANSELL A. Laboratory testing of a new type of energy absorbing rock bolt[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 291-300.
- [50] ST-PIERRE L, HASSANI F P, OUELLET J, et al. An investigation on the dynamic testing, properties and responses of support systems[C]//11th International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering Congress. Lisbon, 2007: 175-178.
- [51] GAUDREAU D, AUBERTIN M, SIMON R. Performance assessment of tendon support systems submitted to dynamic loading[J]. Ground Support in Mining and Underground Construction, 2004, 1: 561-586.
- [52] 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]//Fourth Australasian Ground Control in Mining Conference. Sydney, 2018: 160-169.
- [53] 吴拥政, 付玉凯, 周鹏赫, 等. 30 000 J 多功能落锤冲击试验机研制及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 623-635.
- WU Yongzheng, FU Yukai, ZHOU Penghe, et al. Development and application of 30 000 J multi-function drop hammer impact tester[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 623-635.
- [54] LI L, HAGAN P C, SAYDAM S, et al. A laboratory study of shear behaviour of rockbolts under dynamic loading based on the drop test using a double shear system[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(9): 3413-3429.
- [55] 山世昌, 吴拥政, 付玉凯, 等. 冲击载荷下加锚岩体抗剪力学特性[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(4): 24-33.
- SHAN Shichang, WU Yongzheng, FU Yukai, et al. Experimental study on shear mechanical properties of anchored rock mass under impact load[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(4): 24-33.
- [56] 雷建平, 张善元. 落锤冲击加载实验装置及结构耐撞性实验研究[J]. 力学与实践, 1996, 18(5): 52-54.
- LEI Jianping, ZHANG Shanyuan. Impact loading experimental device and structural impact resistance test research[J]. Mechanics and Practice, 1996, 18(5): 52-54.
- [57] 刘才华, 李育宗. 考虑横向抗剪效应的节理岩体全长黏结型锚杆锚固机制研究及进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1856-1872.
- LIU Caihua, LI Yuzong. Research progress in bolting mechanism and theories of fully grouted bolts in jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(8): 1856-1872.
- [58] 韩观胜, 陈志靖, 李博, 等. 恒定法向刚度条件下吸能锚杆锚固节理岩体剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(4): 999-1012.
- HAN Guansheng, CHEN Zhijing, LI Bo, et al. Experimental study on shear characteristics of energy-absorbing bolt anchored jointed rock mass under constant normal stiffness condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(4): 999-1012.
- [59] CHEN Y, LI C C. Performance of fully encapsulated rebar bolts and D-bolts under combined pull-and-shear loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 45: 99-106.
- [60] PLOUFFE M, ANDERSON T, JUDGE K. Rock bolts testing under dynamic conditions at CANMET-MMSL[C]//6th International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction. Cape Town, 2008: 581-595.
- [61] VILLAESCUSA E, THOMPSON A, PLAYER J. A decade of ground support research at the WA School of Mines[C]//Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction. Perth, 2013: 233-245.
- [62] LI C C, MIKULA P, HADJIGEORGIOU J, et al. ISRM suggested method for determining the properties of rock bolt as-

- semblies by mass freefall impact testing in the laboratory[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2025, 58(1): 165-179.
- [63] ZHAO T B, ZHANG Y B, LI C C. Radial stiffness of rock bolt samples and required thickness of the steel tube in impact tests[J/OL]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 146. DOI: 10. 1016/J. IJRMMS. 2021. 104886
- [64] 司林坡. 动静载作用下锚杆力学响应特征及破坏机理研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2023.
SI Linpo. Research on the mechanical response characteristics and failure mechanism of rockbolts under static and dynamic loads[D]. Beijing: China Coal Science Research Institute, 2023.
- [65] 赵明珠, 吴学震, 叶青, 等. 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[J]. *岩土力学*, 2024, 45(11): 3355-3365.
ZHAO Mingzhu, WU Xuezheng, YE Qing, et al. Impact resistance characteristics of steel pipe shrinkable energy-absorbing bolt and its potential for rockburst mitigation and control[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(11): 3355-3365.
- [66] 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.
- [67] 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 Xuezheng, 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.

(责任编辑: 吕海亮)