

DOI: 10.11779/CJGE201501017

拉压耦合大变形锚杆作用机理及其试验研究

吴学震^{1,3}, 王刚^{1,2*}, 蒋宇静^{1,3}, 公彬¹, 李博³

(1. 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 2. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室
(山东科技大学), 山东 青岛 266590; 3. 长崎大学工学研究科, 日本 长崎 852-8521)

摘要: 在高应力作用下, 围岩发生大变形破坏的现象非常普遍, 硬岩常常产生严重的岩爆灾害, 软岩则会表现出挤压大变形问题, 严重影响深部工程安全。在这种条件下采用的支护体系不仅要具有较高的承载力, 而且要能够适应较大的围岩变形而本身不发生破坏。提出了一种拉压耦合大变形锚杆, 并详细介绍了它与围岩之间的相互作用机理。新型锚杆通过改善锚固结构, 优化锚杆受力状态, 提高了锚固结构的极限承载力, 使锚杆杆体的变形性能得到充分的发挥, 避免了传统锚杆因杆体不均匀变形导致的破坏问题。因而, 高应力大变形条件下新型锚杆的锚固性能更优, 更有利于保持围岩稳定。室内实验研究证实, 在同等条件下拉压耦合锚杆的极限承载力明显大于传统锚杆, 并且具有良好的大变形特性。针对矿山深部开采中遇到的软岩大变形和硬岩岩爆等灾害, 新型锚杆将实现更优的加固效应。

关键词: 高应力; 拉压耦合大变形锚杆; 静态拉拔实验; 极限承载力; 变形特性

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)01-0139-09

作者简介: 吴学震(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事深部岩石力学与工程等方面研究。E-mail: sdkdwxz@gmail.com。

Mechanism of CTC-yield bolts and its experimental research

WU Xue-zhen^{1,3}, WANG Gang^{1,2}, JIANG Yu-jing^{1,3}, GONG Bin¹, LI Bo³

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan)

Abstract: The high stresses acting on rock masses in deep underground can cause serious stability problems such as squeezing of soft rocks and rock burst in hard rocks. The support system applied under high in-situ stress condition should be able to bear high loads and accommodate large deformation of rock masses without experiencing serious damage. A specifically designed rockbolt, called combination of tension and compression type yield bolt (CTC-yield bolt), is proposed. The inner thread segment and anchor compose the inner anchorage section of the bolt that is firmly fixed at the bottom of the borehole, while the smooth section of the bolt will elongate in response to rock deformation when the load exceeds its capacity. Such special structure can help avoid premature bolt failure due to the stress concentrations caused by fracture/joint opening. The static pull tests show that the new bolt has larger ultimate bearing capacity and better deformation property than the conventional rock bolt. The stress distribution at bolt-grout-rock interface is effectively optimized by the combined state of tension and compression of the grout inside and outside the anchor, thereby improving the anchorage force significantly. The deformation capacity of this new bolt is closely related to the length of its smooth section between the two anchors. The new bolt is expected to provide support for both the squeezing and the rock burst encountered in tunneling and mining engineering.

Key words: high stress; CTC-yield bolt; static pull test; ultimate bearing capacity; deformation characteristic

0 引言

随着对能源需求量的增加和开采强度的不断加大, 浅部资源日益减少, 国内外矿山都相继进入深部资源开采状态^[1-2]。如在中国、南非、德国和俄罗斯等很多国家, 采矿深度都达到 1000 m 以下^[3-4]。

在浅部开采过程中, 主要围岩稳定性问题是在重

力作用下危石掉落, 一般通过安装锚杆等岩体加固装置即可维持松散岩体的稳定性^[5]。这种情况要求锚杆

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279097, 51379117, 51479108)

收稿日期: 2014-06-13

*通讯作者

有足够的强度来支撑松散岩体的自重，因此锚杆的强度是支护设计过程中最重要的参数。为了达到这一目的，传统钢筋锚杆是最好的选择，因为它充分利用了锚杆材料的强度。

深部开采与浅部开采的基本区别在于围岩应力的大幅增加。在这种高应力作用下，围岩产生大变形破坏的现象非常普遍，硬岩会产生严重的岩爆现象，软岩则会表现出挤压大变形问题^[6-7]。当围岩变形量较大，超过锚杆所能够承受的范围时，将导致锚杆破坏失效，进而造成地下工程失稳破坏事故。全长锚固钢筋锚杆的过早破坏是由于这种锚杆刚度太大，不能承受高应力条件下的围岩大变形^[8-9]。基于传统支护材料的锚杆支护技术已经很难控制深部隧洞围岩大变形问题。

本文首先介绍了大变形锚杆的研究现状，然后详细介绍了拉压耦合大变形锚杆的结构和作用机理，并通过理论分析和室内实验证实了该锚杆拉压耦合式锚固结构的优势，验证了其良好的大变形特性。

1 大变形锚杆研究现状

1968 年，Cook 等首先提出了可屈服支护设备的概念，并将其用于南非的深部金矿巷道支护^[10]。1992 年，Windsor 等提出理想的锚固装置的概念，如图 1 所示，理想的锚固装置应该既有足够的强度，又有良好的变形特性^[11]。在高应力作用下，随围岩变形锚杆迅速达到等于或接近材料本身强度的荷载，在保持高荷载的情况下，变形距离可以达到足够长。在此过程中，不断吸收围岩的变形能量，所以也称为能量吸收锚杆。

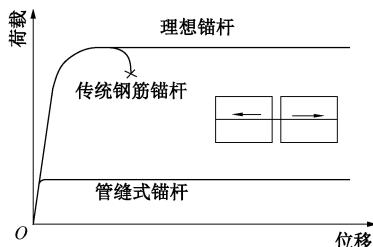


图 1 理想锚杆的概念

Fig. 1 Concept of ideal bolt

目前国内外已有几十种大变形锚杆，按工作原理可将它们归纳为杆体可伸长锚杆和结构元件滑动可伸长锚杆两大类：①第一类是设计某些机械结构，当围岩变形传递给杆体时，杆体内拉应力达到一定数值后可借助于特定的机械结构发生滑动伸长，杆体滑动的阻力和滑动量即为锚杆的工作阻力和延伸量；②第二类是依靠锚杆材料本身的屈服强度和延伸率提供锚杆

的支护阻力和延伸量。

机械滑动式大变形锚杆主要包括管缝式锚杆、Cone bolt^[12]、Roofex^[13]和恒阻大变形锚杆。管缝式锚杆是最早的大变形锚杆，但是其承载能力较低，一般只有 50 kN 左右，而且当围岩特别松散时很容易失效。由于其稳定性差，目前一般只用于临时支护。Cone Bolt 是 Jager 于 1990 年提出的，获得了广泛的应用。这种锚杆通过一个扁平锥形端头与锚固剂相互挤压滑动达到大变形的目的。这种锚杆存在的问题是恒阻性能不够稳定，它对锚固剂和围岩的强度非常敏感，强度过大时在锥头开始滑动前杆体已经屈服破坏，在围岩松散的情况下锚固剂又很容易被压裂，导致锚杆承载力较低。在复杂的现场条件下，锚固剂的拌合效果无法完全保证，锚固剂的不均匀性会引起锚杆在让压过程中承载力大幅变化。Roofex 和恒阻大变形锚杆都是通过钢材之间的相互滑动来实现锚杆的大变形，优点是静载变形特性稳定，缺点在于制作成本较高，锚孔较粗给施工带来一定困难。

屈服伸长型锚杆以 D Bolt 为代表。它是一种多节点锚固锚杆^[14]。其杆体由多个自由段和多个锚固单元组成，锚固单元和锚固剂相黏结，通过自由段的塑性变形实现对围岩变形能的吸收。钢材破坏前，最大塑性变形量约为原长度的 20%。现场应用发现，此类锚杆锚固单元的锚固效果难以保证^[15]，相邻锚固单元之间可发生的变形量较小，且不能施加预应力。上述缺点限制了它的支护效果和应用范围。

由于在极限锚固力、最大变形量、稳定性和制作成本等方面存在的各种问题，上述锚杆还难以完全适应高应力条件下岩爆及围岩大变形的特点，不能满足现代地下工程支护需求。为此，笔者提出了一种拉压耦合大变形锚杆，有望在深部地下工程支护中起到积极的作用。

2 拉压耦合大变形锚杆的作用机理

在锚杆支护工程中主要面临两个问题：①杆体—锚固剂—围岩界面剪应力集中导致的剪切破坏问题；②在围岩发生大变形的情况下如何实现让压吸能的问题。

2.1 拉压耦合型大变形锚杆的结构

拉压耦合型高强大变形锚杆设计理念是希望通过结构改善，优化锚杆在现场应用时的受力状态，提高锚固结构的极限承载力，并使钢材本身的变形特性得到更好的发挥，防止杆体不均匀变形导致的破坏，并在大变形的过程中不断吸收岩体变形能，在高应力大变形极端条件保持围岩稳定性。

如图2所示, 拉压耦合大变形锚杆主要由锚杆体、锚节、托盘和螺母组成。锚杆体由一段圆钢加工而成, 其底端表面加工为粗糙状, 外端通过螺纹与螺母相连, 中间为光圆段, 在光圆段的内外两端各设有一个锚节, 采用的锚固剂既可以是树脂锚固剂, 也可以是砂浆锚固剂。锚孔中充满锚固剂后, 粗糙段和内侧锚节被固定在孔底, 外侧锚节和托盘对围岩起支护作用, 在围岩发生大变形时, 中间光圆段可以让压伸长。

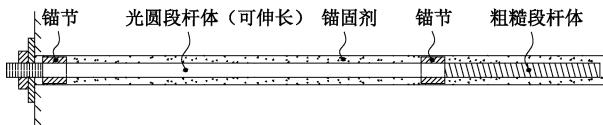


图2 拉压耦合大变形锚杆示意图

Fig. 2 Layout of CTC-yield bolt

该锚杆的一种优选应用方法是: ①首先在待支护岩体中打锚孔; ②在锚孔中依次放入速凝树脂锚固药卷和缓凝锚固药卷, 使锚杆插入后锚节内侧的为速凝锚固剂, 锚节外侧的为缓凝锚固剂; ③通过锚杆安装机将锚杆旋转压入锚孔, 锚固药卷受挤压破裂并均匀拌合; ④待孔底速凝锚固剂凝固后, 对锚杆施加一定的预应力, 并拧紧螺母固定外锚段; ⑤外侧缓凝锚固剂慢慢凝固, 对锚杆起到二次加固作用。

2.2 拉压耦合锚固机理

根据锚固体所处的应力状态, 现有锚杆采用的锚固结构可分为两大类, 即拉力型结构^[16-17]和压力型结构^[18]。这两种锚固结构都存在不同程度的锚杆-锚固剂-围岩界面剪应力集中问题。在锚索领域, 为了降低界面的应力集中现象, 通过多根索体之间的配合发展出了拉力分散型、压力分散型两种锚固结构。但是, 由于锚杆属于单一杆体结构, 上述应力分散的方法无法应用于锚杆领域。

拉力型锚杆包括端锚式锚杆和全长锚固式锚杆, 其应力分布规律大体相似, 现以端锚式锚杆为例进行受力分析。如图3所示, 锚杆的内锚固段受到向外的拉力时, 该处锚固剂处于受拉状态。杆体-锚固剂-围岩之间的剪应力沿轴向分布十分不均匀, 在锚固段的外端, 即图3中a点处存在严重的应力集中现象, 从而容易导致此处锚固体破坏。当a点处锚固体破坏后, 其内侧临近的b点又出现剪应力集中, 这样周而复始, 导致锚固体产生渐进式破坏, 最终导致锚杆整体失效。

压力型锚杆如图4所示, 锚杆体受到向外的拉力时, 由于隔层的作用锚杆与锚固剂没有粘结作用, 拉力直接由锚杆体传至底端承载体, 通过承载体与锚固体之间的相互压力 S_3 提供锚杆所需的承载力。这种锚杆受荷时, 低端承载体前方的锚固剂处于受压状态。在锚杆低端存在严重的应力集中现象, 锚杆的承载力

受到锚固剂本身抗压强度以及锚固剂与孔壁间抗剪强度的限制, 同样难以达到较高的承载力。

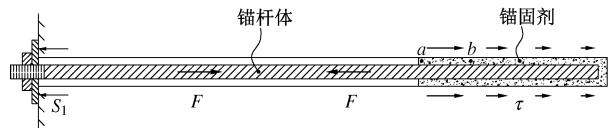


图3 拉力型锚杆受力示意图

Fig. 3 Forces acting on a tension-type bolt

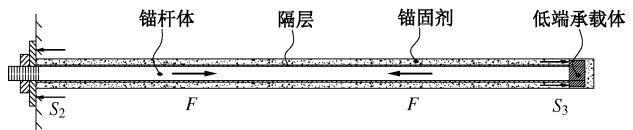


图4 压力型锚杆受力示意图

Fig. 4 Forces acting on a pressure-type bolt

拉压耦合型大变形锚杆受力分析如图5所示。围岩变形时会对锚杆产生向外的拉力, 锚杆光圆段受泊松效应的影响, 在拉力作用下直径有所减小, 从而与锚固剂分离, 锚杆拉力可以直接传递到锚节。由于锚节外侧锚固剂阻挡其向外运动, 给其一个朝向锚孔内侧的压力 S_5 可抵消一部分拉力。另一部分拉力则传递到锚节内侧的粗糙段, 粗糙段周围的锚固剂会对其有朝向锚孔内侧的拉力(剪应力)。锚节右侧锚固剂处于受拉状态, 而左侧锚固剂处于受压状态, 这样就形成了拉力和压力的耦合作用效果, 提高了锚固结构所能提供的极限承载力。同时, 锚节外侧锚固剂的阻挡作用还可以缓解由于剪应力集中导致的内侧锚固体渐进式破坏问题。另外, 通过调整锚节外径的大小和粗糙段杆体的长度, 还可以协调分配给锚节和粗糙段杆体拉力的大小, 防止任意一个过早破坏。

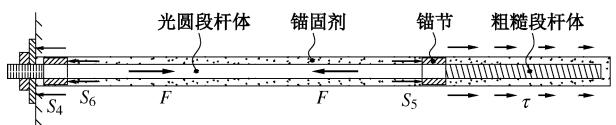


图5 拉压耦合锚杆受力示意图

Fig. 5 Forces acting on a CTC-yield bolt

拉压耦合大变形锚杆将拉力型锚杆和压力型锚杆的锚固结构耦合在一起, 克服了两者的缺点, 通过光圆段、锚节和粗糙段的相互配合, 使锚固界面应力得到了更合理的分布, 提高了锚杆的极限承载力。

2.3 锚杆大变形作用机理

自然界中的岩体一般包含很多裂隙, 在构造应力或者工程施工影响下, 这些裂隙可能会产生一定程度的错动或张开。现场观测发现, 在岩体裂隙部位产生较小的剪切或张开位移的情况下, 传统岩石锚杆即会发生破坏, 如图6所示^[9]。

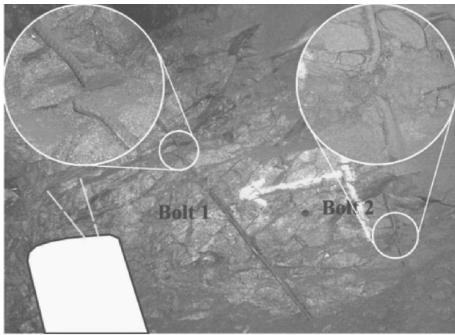


图 6 全长锚固锚杆的破坏现象

Fig. 6 Failure of two cement-encapsulated rebar bolts

传统锚杆破坏的机理如图 7 (a) 所示。由于传统锚杆锚固段杆体表面粗糙，与锚固剂紧密结合而不易分离，在围岩裂隙张开的情况下，传统锚杆在裂隙附近仅有长度 300 mm 左右（取决于锚杆和锚固剂的强度比值）的杆体与锚固剂分离，从而发挥伸长作用，按照延伸率 20% 计算，破坏前变形量一般在 60 mm 左右，当围岩变形超过这个值的时候，锚杆即会产生拉断破坏。由此可知，由于裂隙附近杆体可发挥变形的长度不足导致杆体应力集中和应变量超限，从而引起锚杆破坏。

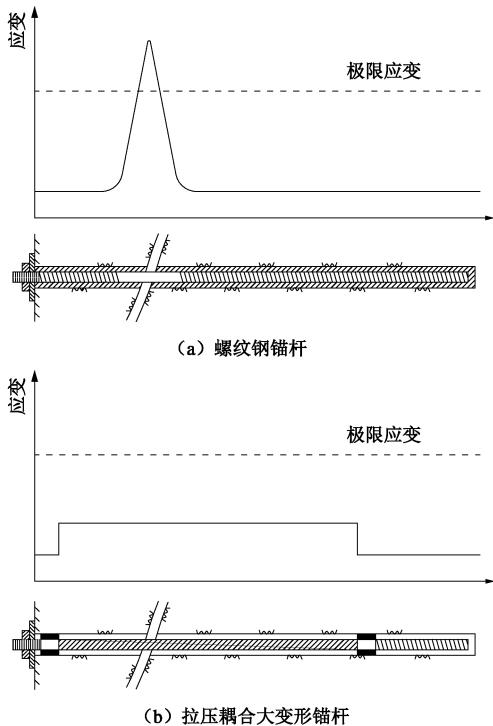


图 7 岩体裂隙张开时锚杆变形分析图

Fig. 7 Sketches illustrating strain induced in bolts subjected to opening of single fracture: a) rebar, b) CTC-yield bolt

为了克服传统锚杆不能适应围岩大变形的问题，拉压耦合大变形锚杆靠近孔口的一段杆体表面为光圆状。围岩开裂时，在拉力作用下光圆段杆体可以轻易的与锚固剂分离，该段整体都可以发挥变形作用，从

而保证杆体应变处于较低水平，故不会发生破坏，如图 7 (b) 所示。

为了使光圆段杆体的大变形特性能够充分发挥出来，还必须保证光圆段外侧连接螺母的螺纹段以及锚节内侧粗糙段不能在光圆段开始伸长前发生破坏。这就要求螺纹段和粗糙段的杆体强度高于光圆段，或者应力低于光圆段。虽然热处理可以提高这两段杆体的强度，但是热处理不光增加了锚杆加工的复杂程度，更重要的是使杆体的韧性大大降低。当围岩表面不平整的时候（尤其在椭圆形巷道中，很难保证围岩表面与锚杆轴向垂直），会导致托盘附近杆体受到扭曲作用力。在锚杆螺纹段承受较大拉力，且本身韧性较低的情况下，锚杆尾部很容易被扭断，从而导致锚杆整体失效。

由于锚节的应力分散作用，拉压耦合大变形锚杆成功克服了上述问题。当锚杆拉力传递到锚节处时，锚节将一部分力传递到围岩中，另一部分力传递到内侧粗糙段，从而使粗糙段杆体的受力低于光圆段杆体。同理，外侧锚节的应力分散作用也可以大大降低托盘处螺纹段杆体的拉力。由此可知，拉压耦合大变形锚杆通过降低相应杆体受力的方式，防止内锚固段在自由段伸长前发生破坏，保证自由段变形性质的发挥。

综上所述，拉压耦合大变形锚杆通过改善锚固结构，不仅提高锚固体的极限承载力，还使钢材自身的伸长性能充分发挥出来。在围岩发生大变形时，新型锚杆可以受拉伸长而本身不发生破坏，而锚杆伸长的过程即为吸收围岩变形能量的过程，有利于保持围岩的稳定。

3 拉压耦合特性的试验验证

3.1 试验准备与结果

本试验的目的是验证拉压耦合锚杆内锚固段良好的承载性能，故采用模拟内锚固段的局部试件进行试验。由于锚杆所能提供的最大锚固力取决于内锚固段的锚固性能，所以本研究取锚杆的局部试件进行试验是合理的。

试验在一个特制的锚杆拉拔装置上进行，实验布置如图 8 所示，此装置包括一个 460 mm 长的钢管，内外直径分别为 54, 74 mm，钢管的内表面设置了适量的螺纹来模拟锚孔的粗糙度。

试验时，首先向钢管中灌注混凝土用于模拟围岩，待其固化后 (7 d)，通过冲击钻在混凝土中钻孔，孔径 30 mm，然后将锚杆安装到锚孔中，如图 9 所示。本实验很好的模拟了锚杆-锚固剂-围岩之间的两个界面，相对于直接向钢管中灌浆更为切合实际。

锚杆材料的钢材牌号为 16 Mn, 为了确保所购买材料的准确性, 首先对其进行了 3 组标准拉伸试验。试件两端直径为 30 mm, 中间拉伸段直径为 20 mm, 长度为 120 mm, 实验结果如图 10 所示, 其屈服强度为 368 MPa, 抗拉强度为 570 MPa, 标准伸长率为 23%, 拉伸过程中的最大伸长率为 27%, 与预期的材料属性相符。

本研究包括 4 组试件, 试件 BS1 和 BS2 为传统锚杆试件, 其主体直径为 22 mm, 总长度 50 cm, 锚固段长度为 20 cm。试件 BS3 和 BS4 为拉压耦合锚杆试件, 其主体直径为 22 mm, 锚节直径 26 mm, 锚节内侧长度同样是 20 cm。与传统锚杆试件的唯一区别是在锚固段外端处增加了锚节, 以研究锚节对锚固特性的影响, 图 11 为试验采用的传统锚杆和拉压耦合锚杆试件。

试验采用的砂浆锚固剂的参数如下: 水泥采用强度等级为 42.5R 的普通硅酸盐水泥, 沙采用粒径小于 2 mm 的细沙, 灰砂比 1:1, 水灰比 0.25, 减水剂掺量为水泥的 0.5%。经测试, 该配比砂浆的流动性符合实验要求, 养护条件下 7 d 单轴抗压强度为 50~60 MPa。

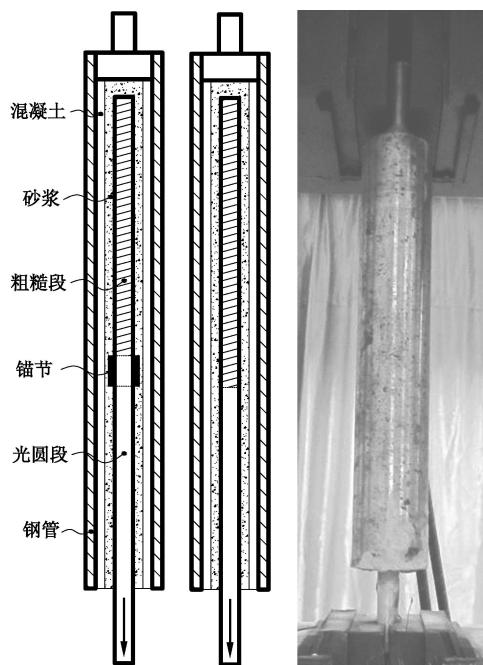


图 8 拉拔试验装置及原理

Fig. 8 Arrangement of pull tests



图 9 试样准备

Fig. 9 Preparation of test specimens

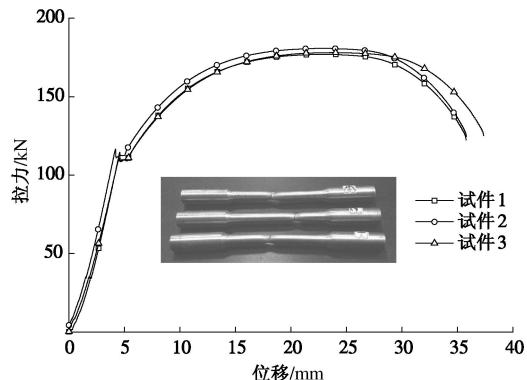


图 10 材料特性试验

Fig. 10 Behavior of steel materials



图 11 试验中采用的两类试件

Fig. 11 Two samples used in tests

试验过程中, 钢管的一端被固定, 试件由另一端伸出。通过万能试验机进行拉拔, 实验加载速度为 2 mm/min。试件所承受的拉力以及发生的位移通过数据自动采集系统记录。

实验结果显示, 两类试件会产生不同的破坏模式, 如图 12 所示。相应的锚杆拉力 - 位移曲线见图 13。常规锚杆锚固段承载力为 130~140 kN, 破坏模式为锚杆-砂浆界面破坏, 锚固段承载力不足。拉压耦合锚杆锚固段承载力大于 200 kN, 破坏模式为钢材本身被拉断, 说明锚固结构持力性能良好。

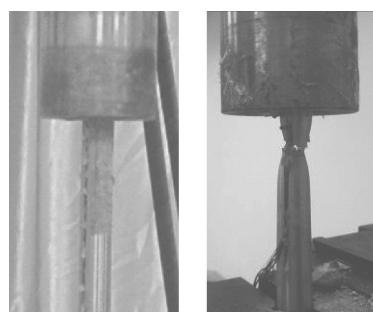


图 12 两种试件不同的破坏模式

Fig. 12 Different failure modes in tests

3.2 实验分析与讨论

如图 13 所示, 传统锚杆到达拉力峰值 130~140 kN 后, 承载力迅速降低。拉压耦合试件在拉力值达到 145 kN 时, 拉力-位移曲线产生较大变化, 这实质上是光圆段钢材本身达到屈服荷载引起的, 之后锚杆轴力逐渐增大到极限抗拉强度 200 kN 左右, 随后发生破坏。拉压耦合试件表现出典型的钢材的拉伸特性, 说明内锚固段锚固效果较好, 没有发生剪切破坏。

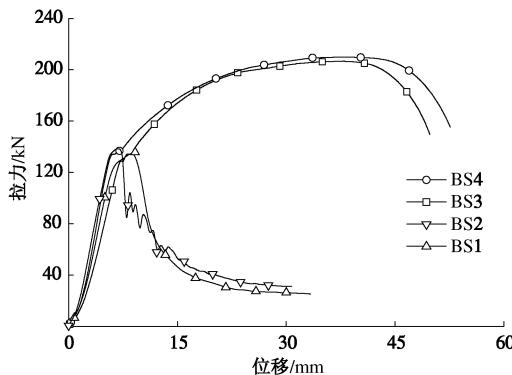


图 13 不同锚固件的拉力 - 位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of different samples

传统试件由于锚杆-锚固剂界面破坏而失效，而拉压耦合锚杆试件则是锚杆本身被拉断，说明其承载力远大于传统锚杆，拉压耦合锚结构可以起到良好的作用。拉压耦合锚杆的极限承载力包括两部分：①外侧锚固剂对锚节向内的挤压作用；②内侧锚固剂对粗糙段向内的剪应力作用，在内侧锚节和螺纹段的耦合作用下，锚固段的极限承载力和稳定性大大提高，与前述理论分析结果一致。

4 大变形特性的试验验证

4.1 试验准备和结果

本试验的目的是验证大变形锚杆的伸长特性。由于试验机拉拔空间的限制，所以采用较短试件进行试验。因为锚杆钢材可以认为是均质材料，其力学和变形特性没有明显的尺寸效应，因此采用短试件进行试验是合理可行的。

本研究进行了两个系列的试验：①第一系列的试验主要是对比研究围岩裂隙开裂时，传统锚杆和大变形锚杆的力学响应和变形特性；②第二系列的试验针对不同光圆段长度的试件进行拉伸试验，目的在于证明采用短试件进行实验的合理性，并提出预测不同长度锚杆伸长量的方法。

第一系列试验布置如图 14 所示，本试验采用间接拉拔试验法，即通过一个中间带有通缝的钢管来模拟围岩，通过两段钢管的分离来模拟围岩裂隙的张开，这种试验方法相对于通常采用的直接拉拔实验更切合实际。此试验装置包括一个 445 mm 长的钢管和一个 700 mm 长的钢管，两者通过镶嵌的凸台对接，钢管两端受拉时可以自由分离。实验时，同样首先向钢管中灌注混凝土，然后钻孔，通过砂浆将锚杆锚固在锚孔中。

本试验共包括 4 组试件 BS5~BS8，部分试件如图 15 所示，其中 BS5 和 BS6 为传统的全长锚固锚杆试件，其长度为 1150 mm，直径为 20 mm；BS5 和 BS6

为拉压耦合大变形锚杆试件，总长度同样是 1150 mm，其中内锚固段长度 300 mm，自由段长度 760 mm，外侧螺纹段长度 90 mm，锚杆主体直径 22 mm，锚节直径 26 mm。

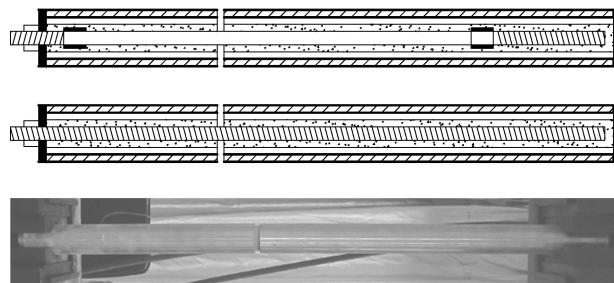


图 14 锚杆大变形拉拔试验装置及原理

Fig. 14 Arrangement of large-deformation pull tests

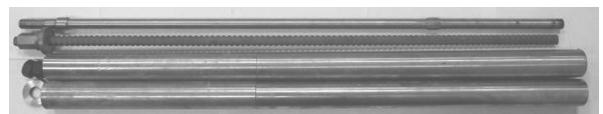
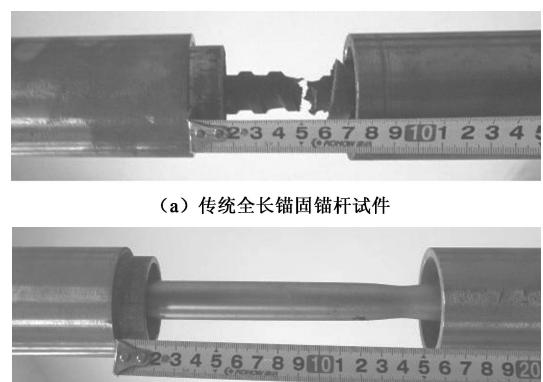


图 15 试验试件

Fig. 15 Samples used in tests

如图 16, 17 所示，在破坏发生前，传统全长锚固锚杆试件产生的最大变形量为 70 mm 左右，拉压耦合大变形锚杆试件产生的最大变形量达到 160 mm 左右。



(a) 传统全长锚固锚杆试件

(b) 拉压耦合大变形锚杆试件

图 16 试件的破坏形式

Fig. 16 Failure modes of two different specimens

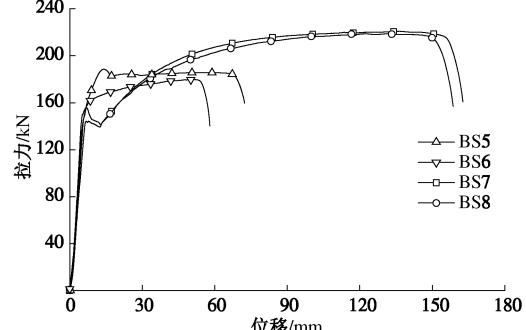


图 17 不同锚杆试件的拉力 - 位移曲线

Fig. 17 Load-displacement curves of different specimens

由上述实验可知, 当拉压耦合大变形锚杆光圆段长度为 760 mm 时, 伸长量为 160 mm 左右。但是, 实际应用的时候, 锚杆的长度一般是 2000~4000 mm, 相应的光圆段长度为 1500~3200 mm, 显然锚杆的光圆段越长, 其所能提供的最大变形量也越大。

钢材加工领域所用的标准伸长率是指某种钢材在特定长度和直径条件下(主要是 δ_5 和 δ_{10})的伸长率, 通过断裂后的试件长度和原长度计算得到。①拉压耦合大变形锚杆的光圆段外形不符合标准伸长率的要求; ②锚杆最大变形量是指其在破坏前承力状态下的伸长量, 相对于破坏后伸长量, 还包含一部分拉力导致的杆体弹性伸长, 因此相对于破坏后伸长率稍大。所以, 预测和计算锚杆伸长性能不能简单的套用钢材的标准伸长率公式, 需要总结一种专门预测拉压耦合大变形锚杆伸长量的方法。

为了确定不同长度锚杆的最大变形量, 进行第二系列的实验。采用光圆段长度分别为 110, 220, 440, 440, 660, 660 mm 的试件进行实验, 结果得到的光圆段拉力 - 位移曲线如图 18 所示。

4.2 实验分析与讨论

(1) 变形特性分析

根据第一系列实验结果可知, 传统全长锚固锚杆受拉时, 轴力先是迅速增加, 达到一定值后轴力趋于稳定, 变形量则会有一定的增加。分析认为这个阶段是由于锚杆钢材屈服和锚杆-锚固剂剪切破坏长度不断发展两方面作用导致的。但最终破坏时产生的最大变形量仅有 70 mm 左右, 不能满足高应力条件下围岩大变形的需求。

如图 17 所示, 当拉压耦合大变形锚杆的光圆段长度为 760 mm 时, 其伸长量为 160 mm 左右, 远大于同样长度的全长锚固锚杆, 说明其大变形特性可以良好的发挥出来。该图中拉力 - 位移曲线与 x 轴间的面积代表锚杆所能吸收的能量, 大变形锚杆(即使光圆段长度为 760 mm 时)所能吸收的能量显然大于传统锚杆。

本实验一方面验证了传统全长锚固锚杆在围岩裂隙张开时破坏的机理, 另一方面证实拉压耦合大变形锚杆的大变形机制的合理性, 即能够在锚杆-围岩相互作用的过程中充分发挥钢材的伸长性能。

(2) 锚杆伸长量预测方法

分析图 18 可知, 钢材的弹性阶段、屈服阶段和强化阶段的长度与其自身长度成正比例关系, 而缩颈阶段的长度则几乎保持不变。由此可推理在钢材牌号和材料直径确定的情况下, 锚杆光圆段伸长量与其本身的长度呈一次函数关系。

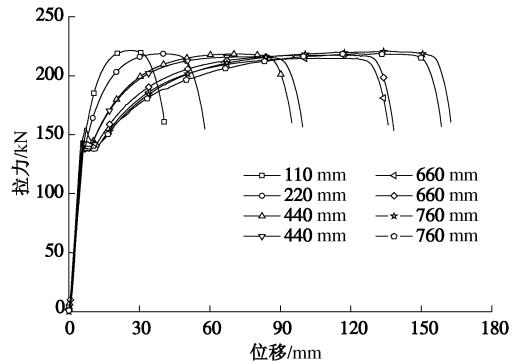


图 18 钢筋光圆段拉力 - 位移曲线

Fig. 18 Load-displacement curves of plain round bar

如图 19 所示, 列出了第一系列实验中的拉压耦合试件和第二系列实验中的所有试件的数据, 其光圆段长度与锚杆伸长量之间的相对关系证实了上述推理。从而, 锚杆伸长量和光圆段长度之间的关系可以简单表达如下:

$$D = aL + b \quad , \quad (1)$$

式中, D 为锚杆伸长量, L 为锚杆光圆段长度, a 和 b 是与钢材本身性质和锚杆直径有关的参数, 可以通过实验确定。根据试验结果, 通过线性回归方法可以得到, 本次试验钢材 16 Mn 在直径大小为 22 mm 时, 对应的 a 和 b 为 0.184 和 17.76, 拟合度 R^2 的值为 0.996, 说明结果足够精确可信。

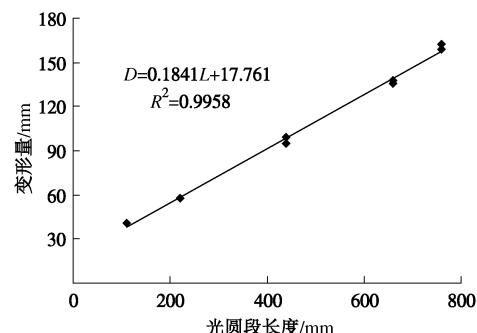


图 19 锚杆最大变形量与其光圆段长度的关系

Fig. 19 Relationship between maximum deformation and length of plain round bar

根据上述公式可知, 当锚杆长度为 2~4 m 时, 对应的光圆段长度为 1.5~3.2 m, 锚杆最大伸长量可达到 350~750 mm, 很好地满足了高应力条件下围岩大变形的要求。

(3) 与其他大变形锚杆的对比分析

拉压耦合大变形锚杆与机械滑动型大变形锚杆相比, 不仅结构简单, 而且充分利用了钢材的抗拉性能。它提供的最大锚固力等于钢材本身的极限承载力, 而机械滑动式锚杆承载力即滑动临界值必然小于其材料本身强度。

相对于其他屈服伸长型锚杆，拉压耦合大变形锚杆具有更为稳定的锚固结构，并且通过锚节的应力分散作用防止了内侧锚固段和外侧螺纹段先于光圆段发生屈服，保证了大变形性能的充分发挥。

(4) 其他问题

除了内侧锚节具有应力分散作用外，外侧锚节同样可分担锚杆托盘、螺母的承受的拉力，有效降低锚杆体在托盘位置处所受荷载，防止现场经常发生的端头破坏现象。

在第一系列试验中，通过应变片法对试件 BS7 托盘处锚杆轴力进行了测试，试件安装如图 20 所示。实验结果如图 21 所示，外侧锚节可以将托盘处杆体受力降低 40%左右，拉力分散作用效果非常显著。

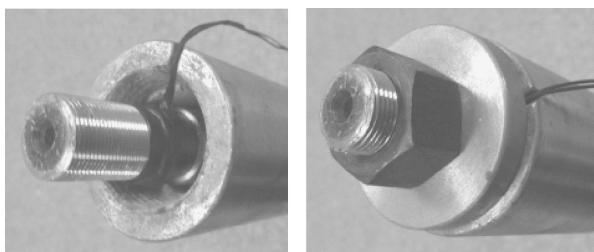


图 20 锚杆托盘处轴力测试

Fig. 20 Tests on axial force at plate of bolt

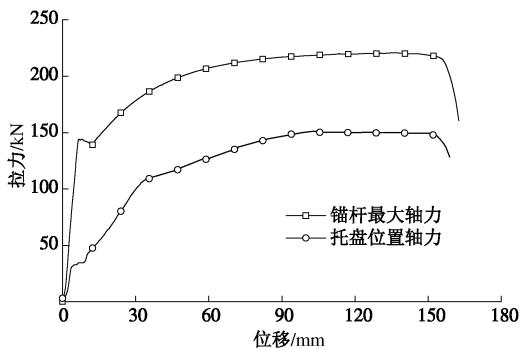


图 21 锚杆最大轴力和托盘处轴力变化规律

Fig. 21 Test results of load-displacement curves

5 结论与展望

本文提出了一种拉压耦合大变形锚杆，并详细介绍了新型锚杆与围岩之间的相互作用机理。新型锚杆通过改善锚固结构，优化锚杆受力状态，提高了锚固结构的极限承载力，使锚杆杆体的变形性能得到充分的发挥，避免了传统锚杆因杆体不均匀变形而导致的破坏问题。因而，高应力大变形条件下新型锚杆的锚固性能更优，更有利保持围岩稳定。

针对锚杆拉压耦合特性进行了试验验证，在同样受力条件下传统试件由于锚杆-锚固剂界面破坏而失效，而拉压耦合锚杆的锚固结构则保持完好直到锚杆

杆体本身被拉断。说明新型拉压耦合锚杆通过优化锚固结构，可以充分发挥锚杆杆体的抗拉性能，显著提高了其锚固效果。

大变形拉拔实验进一步验证了传统全长黏结锚杆在围岩裂隙张开时的破坏机理，并证实了新型锚杆在锚杆-围岩相互作用的过程中能够充分发挥钢材的伸长性能，实现大变形特征。根据实验数据还得到了一种可靠的锚杆伸长量预测方法。另外，实验还证实外侧锚节可以将托盘处杆体受力大大降低，有效防止工程现场常见的锚杆端头破坏现象。

拉压耦合大变形锚杆具有优良的承载能力和大变形特性。在强烈岩爆条件下，拉压耦合大变形锚杆可以大量吸收围岩的变形能，对深埋硬岩隧道提供有效支护作用。在动力环境条件下使用该锚杆时，拉压耦合大变形锚杆的受力特点相对静力拉伸更为复杂。因此，将来有必要进行大变形锚杆的冲击实验，研究该锚杆在冲击荷载作用下的受力和变形性能及其与围岩耦合作用机理。

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 Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803 - 2813. (in Chinese))
- [2] 卢兴利, 刘泉声, 苏培芳, 等. 潘二矿松软破碎巷道群大变形失稳机理及支护技术优化研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 97 - 102. (LU Xing-li, LIU Quan-sheng, SU Pei-fang, et al. Instability mechanism and bracing optimization for roadway groups with soft and fractured surrounding rock in Pan'er Coal Mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 97 - 102. (in Chinese))
- [3] AMUSIN B. Ground control and design of deep mine openings[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1998, 35: 1365 - 1609.
- [4] ORTLEPP W D. The behaviour of tunnels at great depth under large static and dynamic pressures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16: 41 - 48
- [5] EVERET HOEK. Practical rock engineering, Chapter 1, The development of rock engineering[OB/OL]. www.rocscience.com/hoek/Hoek.asp. 2007.
- [6] LI C C. Field observations of rock bolts in high stress rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43:

- 491 – 496.
- [7] ORTLEPP W D. Observation of mining-induced faults in an intact rock mass at depth[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, **37**: 423 – 436.
- [8] HOEK E, KAISER P K, BAWDEN W F. Support of underground excavation in hard rock[M]. Rotterdam: Balkema, 1995.
- [9] LI C C. Performance of d-bolts under static loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, **45**(2): 183 – 192.
- [10] COOK N G W, ORTLEPP W D. A yielding rock bolt. Chamber of Mines of South Africa[M]. South Africa: Research Organization Bulletin, 1968.
- [11] WINDSOR C R, THOMPSON A G. A new friction stabilizer assembly for rock and soil reinforcement applications[J]. Rock Support in Mining and Underground Construction, Rotterdam, 1992: 523 – 529.
- [12] JAGER A J. Two new support units for the control of rockburst damage[J]. Rock Support in Mining and Underground Construction, 1992: 621 – 631.
- [13] SALZBURG. In-situ pull testing of a yieldable rock bolt, Roofex[J]. Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines, 2009: 1081 – 1090.
- [14] 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**: 396 – 404.
- [15] CHANTALE Doucet, BENOIT VOYZELLE. Technical information data shifts[R]. Canada, Natural Resources, 2012.
- [16] 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(2): 188 – 192. (ZHANG Ji-ru, TANG Bao-fu. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(2): 188 – 192. (in Chinese))
- [17] 黄雪峰, 马龙, 陈帅强, 等. 预应力锚杆内力传递分布规律与时空效应[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1521 – 1525. (HUANG Xue-feng, MA Long, CHEN Shuai-qiang, et al. Distribution characteristics and time-space effects of internal force of prestressed anchor rod[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1521 – 1525. (in Chinese))
- [18] 张爱民, 胡毅夫. 压力型锚杆锚固段锚固效应特性分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(2): 271 – 275. (ZHANG Ai-min, HU Yi-fu. Anchoring effect of pressure-type anchor rods on anchored section[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(2): 271 – 275. (in Chinese))