

陶志刚, 赵军政, 胡杰, 等. 引汉济渭工程秦岭引水隧洞岩爆三维 NPR 支护技术[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1165-1173. TAO Z G, ZHAO J Z, HU J, et al. Three-dimensional NPR support technology for rockburst in the Qinling diversion tunnel of the Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1165-1173. (in Chinese)

# 引汉济渭工程秦岭引水隧洞岩爆三维 NPR 支护技术

陶志刚<sup>1,2</sup>, 赵军政<sup>1,2</sup>, 胡杰<sup>1,2,3</sup>, 孙滢滢<sup>1,2</sup>, 何满潮<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. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 针对引汉济渭工程秦岭引水隧洞岭北段频繁产生岩爆灾害、原支护结构破坏等问题, 对秦岭引水隧洞岭北段进行地质勘测调查, 分析隧道围岩岩爆破坏特征及破坏模式, 开展超深隧洞岩爆三维负泊松比(negative Poisson's ration, NPR)高应力补偿支护体系研究工作。采用现场勘查等方法, 对隧道地质条件及岩爆破坏成因进行分析, 并采用对比试验的思想设计出秦岭引水隧洞岭北段岩爆监测预警试验方案, 提出以微观 NPR 锚杆为核心的三维 NPR 高应力补偿支护体系; 通过现场试验分析新支护体系下围岩岩爆控制程度及其支护效果。结果表明: 以微观 NPR 锚杆为核心的三维 NPR 高应力补偿支护体系能有效控制隧道围岩岩爆灾害发生, 新支护体系试验段微震能量、频次均明显降低, 爆坑深度、钢拱架受力和变形量明显减小。研究成果可为超深隧洞岩爆灾害的防治提供参考。

**关键词:** 引汉济渭工程秦岭引水隧洞; 监测预警; 岩爆; 微观 NPR 锚杆; 对比试验; 支护体系

**中图分类号:** U458.2; TV16 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0115

岩爆是处于高地应力状态下的岩体, 在开挖工程中突然释放弹性应变能的动力失稳现象, 常伴有岩石弹射或抛出、强烈震动、巨大声响和气浪等现象<sup>[1-2]</sup>。交通、地下水电、隧道等领域频繁性发生岩爆灾害, 如秦岭终南山公路隧道、苍岭隧道、锦屏辅助洞引水隧道、关村坝水电站等工程均有岩爆发生<sup>[3-5]</sup>。近年来, 随着地下工程建设逐渐向地层深部拓展, 兴建了许多超大埋深的引水隧洞, 如雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞最大埋深 2 525 m、引汉济渭工程秦岭隧洞最大埋深 2 012 m 等。随着这些工程的逐步建设, 深部岩体开挖卸荷引发的岩爆问题将更加突出, 深埋隧洞施工将面临更多挑战<sup>[6]</sup>。因此, 开展有效的岩爆控制对策及灾害监测以防范、减轻及消除岩爆危害, 对保证深埋隧洞的安全稳定具有重要意义。

目前, 国内外许多深埋隧洞基于工程自身的特点, 在施工过程中采取了有针对性的岩爆防控技术,

并取得了一定效果<sup>[7-10]</sup>。在实际工程中, 与岩爆关联的客观影响因素包括地质条件、开挖方式、隧洞断面形状以及支护条件等, 因此衍生出诸多防控对策, 例如应力释放钻孔、超前应力解除爆破、锚杆锚索以及钢筋网等主动支护。经过长期的实验和研究, 国内外学者对现场岩爆防控提出了不同的解决方案: Moganedi 等<sup>[11]</sup>提出通过优化隧洞开挖布局、开挖几何结构和尺寸、开挖顺序等方面的设计, 采用卸压以及预处理等措施以减少岩爆发生; 赵周能等<sup>[12]</sup>结合现场实测的微震信息进行锦屏二级水电站深埋隧洞的动态岩爆调控, 同时结合优化隧洞开挖时采用的设计方案来降低能量聚集性、提前释放或者转移围岩能量、采用合理有效的支护来吸收能量的岩爆防控三步走策略以进行控制; 谢文清<sup>[13]</sup>提出超前性和及时性是岩爆防控重点的观点, 其中, 超前性可采用超前应力解除爆破、地应力释放钻孔以及爆破后洒水等措施, 确保及时性则可采用预应力锚

收稿日期: 2023-06-07 修回日期: 2023-10-09 网络出版时间: 2023-11-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231127.1737.014>

基金项目: 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金课题(SKLGDUK2217); 浙江省山体地质灾害防治协同创新中心开放研究基金项目(PCMGH-2022-03)

作者简介: 陶志刚(1981—), 男, 河北邯郸人, 教授, 博士, 主要从事岩体力学与工程灾害控制等方面的研究和教学工作。E-mail: [taozhigang1981@163.com](mailto:taozhigang1981@163.com)

通信作者: 胡杰(1992—), 男, 湖南长沙人, 博士, 主要从事岩土工程数值模拟方面研究工作。E-mail: [hi\\_hujie@163.com](mailto:hi_hujie@163.com)

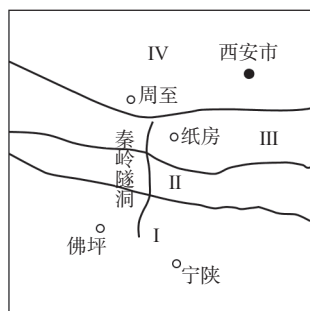
杆、喷射混凝土等被动措施。

本文以陕西省引汉济渭工程岭北隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)施工段为案例,针对其复杂工程地质环境,提出结合微观负泊松比(negative Poisson's ration, NPR)锚杆的三维 NPR 高应力补偿支护体系,同时搭配自主研发的监测平台结合现场反馈数据进行实时监测预警,进而达到对岩爆超前控制效果。

## 1 秦岭引水隧洞岭北段地质条件概况与破坏特征

### 1.1 工程概况

引汉济渭工程秦岭引水隧洞岭北段位于秦岭造山带的西秦岭山区,区内高低起伏,总体上呈北低南高,沟壑纵横,源远流流长<sup>[14]</sup>。隧道地质环境复杂,同时在施工过程中面临着高地应力、岩爆等工程地质灾害。秦岭引水隧洞工程具有埋深大、延伸长等特点,全长 81 779 m,最大埋深约 2 012 m,属于超深隧道<sup>[15]</sup>。隧洞穿越 3 条区域性大断层及 4 条次一级断层和 33 条地区性一般性断层及次级断层。隧洞位于秦岭褶皱系,褶皱、断裂构造都比较复杂。沉积巨厚,岩浆活动较为发育,变质作用相对复杂,主要为岩浆岩、变质岩,其分布受区域地质构造控制,围岩类别以 II、III、IV 类为主。受大气降水补给,地表水较发育,地下水主要为基岩裂隙水,水量较丰富。秦岭隧洞越岭段地貌分区见图 1。



I 秦岭岭南中低山区; II 秦岭岭脊高中山区;  
III 秦岭岭北中低山区; IV 渭河盆地  
图 1 秦岭隧洞越岭段地貌分区

Fig. 1 Landform zoning map of the trans-ridge section of the Qinling Tunnel

### 1.2 地层岩性与地质构造特性

根据工程地质分析,秦岭隧洞围岩区岩性主要为混合花岗岩、闪长岩、石英岩、碎裂岩等,据现场岩爆记录统计,隧洞岩爆灾害主要发生在混合花岗岩中,占 66.4%。岩石石英含量高(石英岩最高达

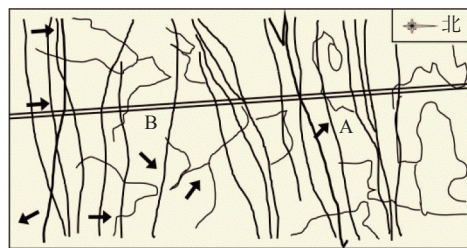
97%、混合花岗岩最高达 30%、闪长岩最高达 18%),围岩单轴抗压强度高(混合花岗岩最高达 242 MPa)。具体参数见表 1。

表 1 岭北 TBM 施工段主要岩性特征

Tab. 1 Main lithological characteristics of the TBM construction section in Lingbei

岩性	物理特征	长度/m
石英岩	灰白色,主要矿物成份为石英、长石等,细粒变晶结构、块状构造,岩体表层强风化,风化层厚度 1~3 m	545
混合花岗岩	灰白色,主要矿物成份为斜长石、钾长石、石英、黑云母及角闪石,粒状变晶结构、块状构造。岩体表层强风化,风化层厚度 1~3 m	13 750
闪长岩	灰色及灰白色,主要成份为斜长石、石英、普通角闪石、黑云母,中细粒、中粗粒结构,节理裂隙不发育,岩体完整,岩质坚硬,岩体表层强风化,风化层厚度 1~3 m	3 980
碎裂岩/糜棱岩	灰色及灰白色,原岩以花岗岩、闪长岩为主,块状构造,岩体较破碎,为断裂带物质,结构面较发育	220

秦岭隧洞主要断裂构造可分为近东西向、北西向及北东向 3 组,其中近东西向的 3 条区域性大断裂为控制区内构造格架的主要断裂带,均表现为压性断裂。断层多且规模大,主要表现为逆断层,呈现强烈挤压的特征,见图 2。断层带物质主要由碎裂岩、糜棱岩、断层角砾岩等构造岩类组成。秦岭隧洞区褶皱和断裂等构造较发育,区内发育一系列长大节理及节理密集带,主要节理方向为北西向和北东向,主要为密闭状态。



图中箭头表示水流方向;字母表示围岩类型:A 表示该区域为 II 类围岩,B 表示该区域为 III 类围岩

图 2 秦岭输水隧洞断层分布

Fig. 2 Qinling water transmission tunnel fault distribution plan

### 1.3 地应力分布特性

在处理隧道工程领域的岩石问题时,对地壳应力状态的认识尤为重要<sup>[16-17]</sup>。采用水压致裂法对岭北段隧洞地应力进行测量,测点为 2 个,结果如下:测试点 1 为 K46+190,测试段埋深为 1 130 m,岩性

为变砂岩。实测 ZK1 孔最大水平主应力主要集中在 52.4~65.5 MPa, ZK2 孔最大水平主应力主要集中在 44.8~70.1 MPa, ZK3 孔最大水平主应力主要集中在 30.7~48.3 MPa。三维地应力计算结果显示: 测试部位的最大水平主应力为 58.9 MPa, 最小水平主应力为 33.8 MPa, 垂直向主应力为 38.8 MPa。测试点 2 为 K38+850, 测试段埋深 1 268 m, 岩性为混合花岗岩, 布置了水平孔 ZK2、ZK3 及铅直孔 ZK1 进行传统水压致裂法地应力测试, 测试部位的最大水平主应力为 51.1 MPa, 最小水平主应力 33.2 MPa, 垂直向主应力为 41.2 MPa, 说明测试部位岩体应力以水平应力为主。

综上, 隧洞区域内最大水平主应力占主导地位, 属于极高地应力区。三向主应力的关系表现为最大水平主应力>垂直向主应力>最小水平主应力, 由此表明较强水平构造应力作用的特点。最大水平主应力方位为北西向(N73°W), 与隧洞轴向(N7°E)呈最大角度相交, 故对隧道稳定性有较强影响, 见图 3。

#### 1.4 岭北段隧洞原岩爆控制设计方案

据现场监测数据统计所得, 引汉济渭秦岭输水隧洞于 2020 年 1 月 6 日至 2022 年 1 月 18 日发生

的 8 012 次岩爆部位中, 拱顶 10 点到 2 点的 120°区域内共发生 6 500 余次岩爆, 占总岩爆次数的 81.8%; 分析同时期内 979 处岩爆爆坑部位和深度数据可知, 隧洞岩爆爆坑深度多集中在 0.5~1.5 m, 拱顶 11 点到 1 点的 60°区域为岩爆爆坑的集中区。以上为引汉济渭秦岭输水隧洞岩爆的高发区域, 见图 4。

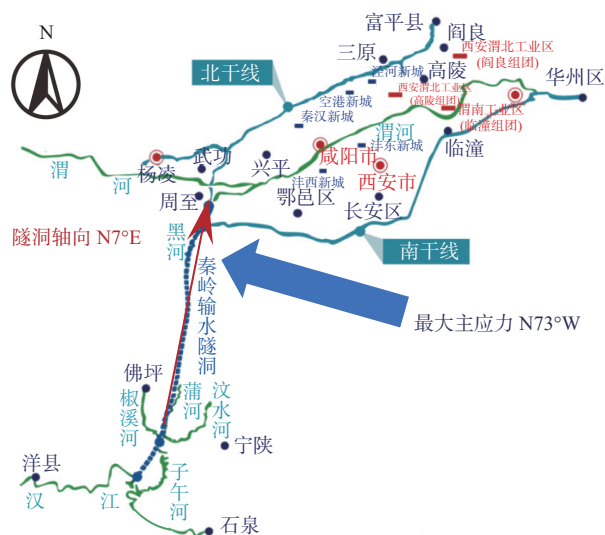


图 3 隧洞轴向与水平主应力关系

Fig. 3 Relationship between axial and horizontal principal stresses in the tunnel

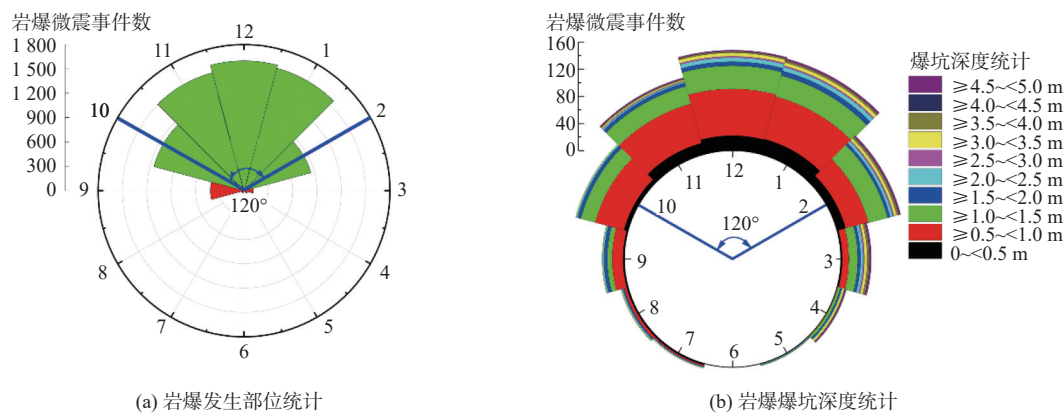


图 4 岩爆灾害统计

Fig. 4 Rock explosion disaster statistics

隧洞的支护施工要根据围岩的类别分类管理, 做到安全、快速<sup>[18-20]</sup>。岭北段隧洞断面按 II 类围岩组织开挖, 断面大小在 47~58 m<sup>2</sup>, 属于中断面<sup>[21]</sup>。岭北段隧洞采取了“光面爆、全断面、短进尺、紧支护”的开挖方式, 并未分台阶开挖, 实践证明效果良好。综上, 结合隧洞内岩爆灾害发生规律及新奥法的支护思想, 岭北段隧洞支护方式及参数详见表 2 及图 5。

#### 1.5 岭北段隧洞围岩破坏特征

采用原支护方案对岭北段隧洞进行支护发现:

距 1 倍洞径左右范围(刀盘至盾尾 3 m)内多发生轻微岩爆, 该类岩爆主要集中在拱部, 一般出现于掘进后 12 h 内, 岩爆剥落后塌腔深度一般在 0.5 m 以内, 部分地段两侧仰拱处有岩体鼓起呈鱼鳞状剥落, 且声音清脆, 类似于鞭炮声。2 倍洞径范围(掌子面至撑靴段)内多发生中等及强烈岩爆, 该类岩爆主要集中在拱部及右侧拱部范围, 岩爆剥落后塌腔深度 1.0~5.7 m, 最大达到 10.0 m, 一般出现于掘进后 0~24 h, 且伴有闷雷声响, 震感强烈。见图 6。

表 2 岭北段隧洞原支护设计参数

Tab. 2 Design parameters of the original support of the tunnel in Lingbei section

围岩类别	预留变形量/mm	喷层		φ22砂浆锚杆及φ25中空注浆锚杆			钢筋网		钢拱架
		位置	厚度/cm	位置	长度/m	间排距	位置	间距/cm	
II	-	拱墙	8	拱部90°φ22	2.5	0.9 m×0.9 m	-	-	-
III	500	拱墙	10	拱部33°φ25 拱部90°φ22	3.5	0.9 m×0.9 m	拱部	25	H150/0.9 m
IV	600	拱墙	15	拱部33°φ25 拱部90°φ22	3.5	0.9 m×0.9 m	拱墙	20	H150/0.6 m

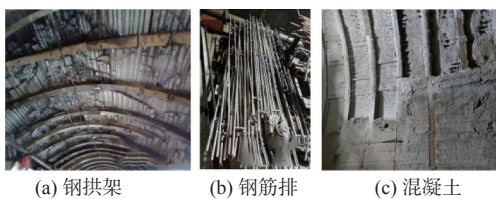


图 5 原有初期支护系统  
Fig. 5 Original initial support system



(a) 完整岩体振裂垮塌



(b) 顶板围岩崩裂

图 6 施工段中等及强烈岩爆典型案例  
Fig. 6 Typical cases of moderate and strong rock bursts in construction sections

因此,继续采用原支护方案无法继续深化岩爆灾害的治理作用,设计新型支护方式对于岭北段隧洞岩爆防治具有重要意义。

## 2 秦岭引水隧洞岭北段支护关键技术方法

### 2.1 开挖应力补偿理论

传统围岩控制方法只适用于中浅部岩体开挖,无法满足地下工程建设向深部发展的需求。陶志刚等<sup>[22-23]</sup>和何满潮等<sup>[24]</sup>针对此问题提出了开挖补

偿理论。未开挖前,深部围岩处于稳定状态,此时岩体的应力状态位于摩尔-库伦强度包络线下。地下洞室及隧道开挖后,破坏了围岩原本的应力平衡状态,导致径向应力降低为 0 且切向应力升高并集中,围岩发生了单面卸荷,进而引发岩体应力莫尔圆的扩张,导致围岩体变形、失稳,从而引发岩爆灾害。开挖应力补偿模型见图 7。

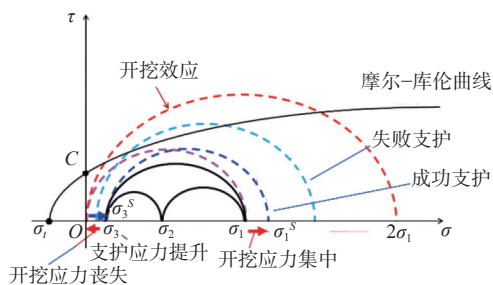


图 7 开挖应力补偿模型

Fig. 7 Excavation stress compensation model

低应力补偿技术或者常规支护方案中,支护体施加给围岩的反向约束力不足以补偿由于开挖产生的不平衡力,因此支护体仍然会发生失效<sup>[23-24]</sup>。因此,解决围岩失稳变形及系列灾害的核心问题在于采用高效的支护措施以实现高应力补偿,选用微观 NPR 锚杆新材料并设计新型支护方案可有效满足岩爆防控的安全需求,对解决岩体大变形控制等地质灾害问题具有重要意义。

### 2.2 微观 NPR 锚杆岩爆控制设计方案

锚杆/索是隧道支护的核心材料,其对改善围岩应力状态、提高围岩自承能力等具有重要作用<sup>[25-28]</sup>。但随着隧道工程逐渐向深部发展,深部岩体呈现高应力、大变形和强时间效应等特征<sup>[29]</sup>。泊松比 (Poisson's ration, PR) 定义为材料纵向受拉或受压时负的横向应变与纵向应变之比, NPR 为正的横向应变和纵向应变之比<sup>[30]</sup>。第 2 代微观 NPR 锚杆是一种新型高强高韧合金钢材料,该锚杆具有良好的 NPR 效应,且在拉伸过程中全程均匀变形,断后基

本能够克服传统材料颈缩的现象。同时,该锚杆具有良好的防爆、抗冲击性能及高吸能性,在适应岩体结构大变形方面具有更优性能。试验表明,直径为 18 mm 的微观 NPR 锚杆最大拉伸变形量可达 316.58 mm,恒阻力平均值范围 203.9~240.7 kN,平均伸长率可达 34.68%<sup>[30]</sup>。第 2 代微观 NPR 锚杆新材料元件见图 8。

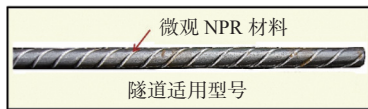


图 8 第 2 代微观 NPR 锚杆新材料

Fig. 8 New material for 2nd generation microscopic NPR anchors

为控制岭北段隧洞岩爆灾害,基于开挖应力补偿理论并结合工程实况,采用具有高恒阻、大变形、高吸能性等优良力学特性的微观 NPR 锚杆为核心材料的新型支护方案对岭北段隧洞进行支护,提出了“径向微观 NPR 锚杆+轴向柔性网+环向 W 钢带”的三维 NPR 高应力补偿支护体系以控制岩爆灾害。支护体系及方案关键参数见图 9。

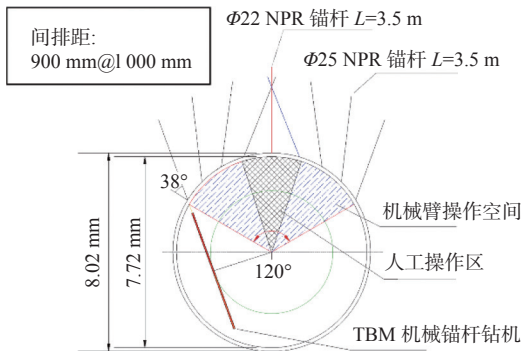


图 9 微观 NPR 锚杆支护设计方案

Fig. 9 Microscopic NPR anchor support design scheme

### 2.3 秦岭引水隧洞岭北段岩爆试验数据监测方案

监控量测区域总长度 350 m(桩号 K43+1000~K43+650),其中微观 NPR 锚杆岩爆防控技术的试验段为 50 m(桩号 K43+865~K43+815)。为全面分析三维 NPR 高应力补偿支护体系对岩爆灾害的控制效果,在试验段内共设置 6 个监测断面进行监测,断面间距为 10 m。监测内容包括沉降收敛监测、微观 NPR 锚杆轴力监测、钢拱架受力监测、隧洞振动监测。根据秦岭输水隧洞围岩特性,隧洞拱肩部分于微观 NPR 锚杆端部布置安装 2 台锚杆轴力动态传感器监测设备及 2 台钢拱架受力监测设备,拱顶布置 1 台锚杆轴力动态传感器监测设备、1 台钢拱

架受力监测设备及 1 台振动监测传感器(振动监测布置中断面间距为 20 m)。监测点设置位置见图 10。

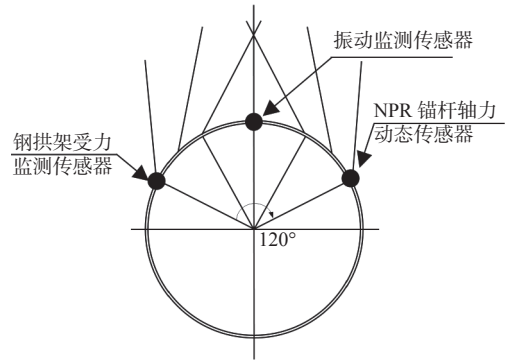


图 10 监测点布设位置

Fig. 10 Monitoring point layout cross section map

本次试验监测采用自主研发的隧道智能远程多元监测系统进行收集监测。该系统由数据采集子系统、ZigBee 通信子系统、数据传输子系统及云平台子系统构成。该系统数据传输稳定性强,安全性可靠,及可与各种云产品实现对接,可拓展性良好,对隧道岩爆灾害的监测及现场试验数据采集起到了重要作用。见图 11。



图 11 监测系统

Fig. 11 Monitoring system

### 3 现场支护效果分析

由图 12 可知,距离 NPR 锚杆试验段前 10 m 未施作 NPR 锚杆的区域岩爆严重,拱顶区域塌腔严重,

实测右肩岩爆爆坑达 1.53 m。施作微观 NPR 锚杆(图 13)后,拱顶和左拱肩围岩光滑,无爆坑,仅右拱肩存在岩爆爆坑;随着施作三维 NPR 支护体系(径向微观 NPR 锚杆+轴向柔性网+环向 W 钢带),围岩全断面均光滑无爆坑。NPR 锚杆岩爆防控试验段结束后的 35 m 处接连发生强烈岩爆,连续 16 榀钢拱架下沉侵限,最大侵限量达 350 mm。根据 NPR 锚杆试验段前后的围岩完整性对比可知,施作微观 NPR 锚杆进行支护具有及时性、高应力补偿及快预紧的特点,且能够有效降低隧道岩爆烈度和频次,见图 12。

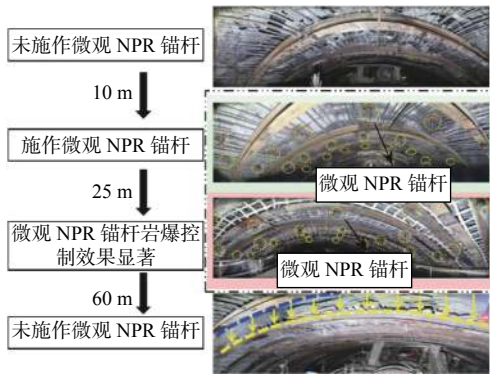


图 12 微观 NPR 锚杆试验段岩爆控制效果

Fig. 12 Microscopic NPR anchor test section rockburst control effect

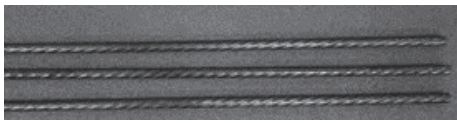


图 13 微观 NPR 锚杆

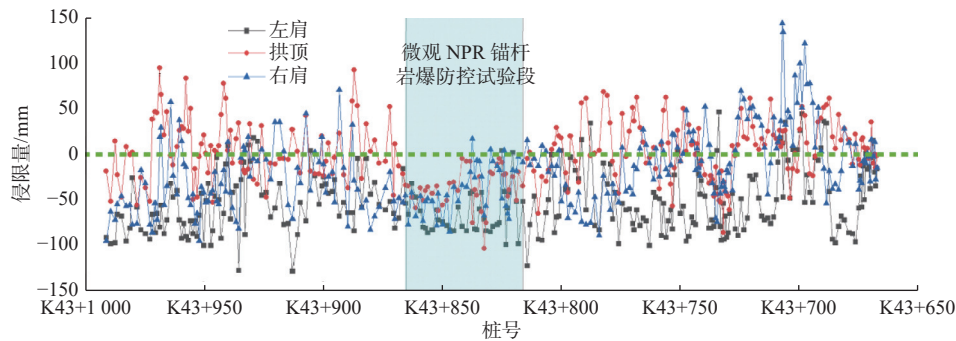
Fig. 13 Microscopic NPR anchor

由图 14(a)可知,微观 NPR 锚杆试验段前后的围岩沉降收敛变形均较大,最大变形为右拱肩达近

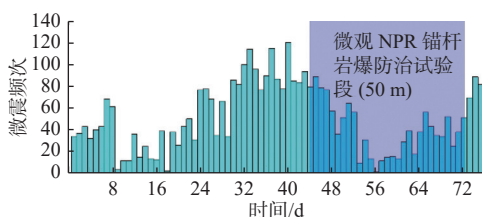
150 mm,拱顶变形量最大达近 100 mm,左拱肩的变形量最大达 25 mm。随着三维 NPR 高应力补偿支护体系的施作,50 m 试验段内围岩变形量显著降低,最大变形位于右拱肩处且仅为 15 mm。由此可见,随着三维 NPR 高应力补偿支护体系的灵活施作,钢拱架变形量显著减小,岩爆防治效果显著。

试验段微震能量分布和频次分布见图 14(b)和图 14(c)。基于试验段微震监测结果可知,试验段前后微震活跃水平较强,掌子面至护盾尾均有岩爆发生,岩爆发生频繁且烈度大,岩体破坏塌腔深度通常超过 1.5 m,大多数在 2 m 左右,多数岩体破坏分布于拱顶及偏右侧区域。实施 NPR 锚杆岩爆防控技术试验段内微震能量和频次均显著降低,掌子面至护盾尾偶有零星岩爆发生,岩体破坏塌腔深度通常不超过 0.2 m,大多数在 0.1 m 以下,多数岩体破坏分布于偏右拱肩区域,说明三维 NPR 高应力补偿支护体系能够有效控制隧洞微震能量及频次。

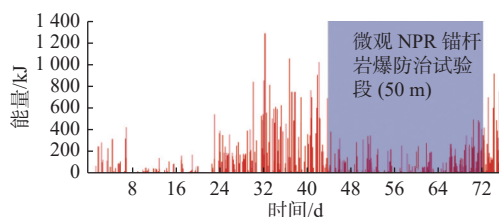
人工实测全断面围岩岩爆爆坑深度见图 14(d)<sup>[20]</sup>。由图 14(d)可知,NPR 锚杆岩爆防控技术试验段前岩爆发生频繁且烈度大,隧洞围岩较为破碎,遍布岩爆爆坑,以右拱肩岩爆爆坑最为密集,爆坑平均深度为 0.95 m,右拱肩处最大岩爆爆坑深度为 1.53 m。NPR 锚杆岩爆防控技术试验段偶有零星岩爆发生,隧洞围岩较为光滑;右拱肩偶有岩爆发生,平均爆坑深度为 0.42 m,右拱肩处最大岩爆爆坑深度为 0.68 m。NPR 锚杆岩爆防控技术试验段后岩爆发生频率和烈度显著增大,隧洞围岩较为破碎,岩爆爆坑分布广,以右拱肩岩爆爆坑最为密集,爆坑平均深度为 0.99 m,右拱肩处最大岩爆爆坑深度为 1.40 m。



(a) 微观 NPR 锚杆试验段围岩沉降收敛侵限量



(b) 微震监测能量分布图



(c) 微震频次分布结果

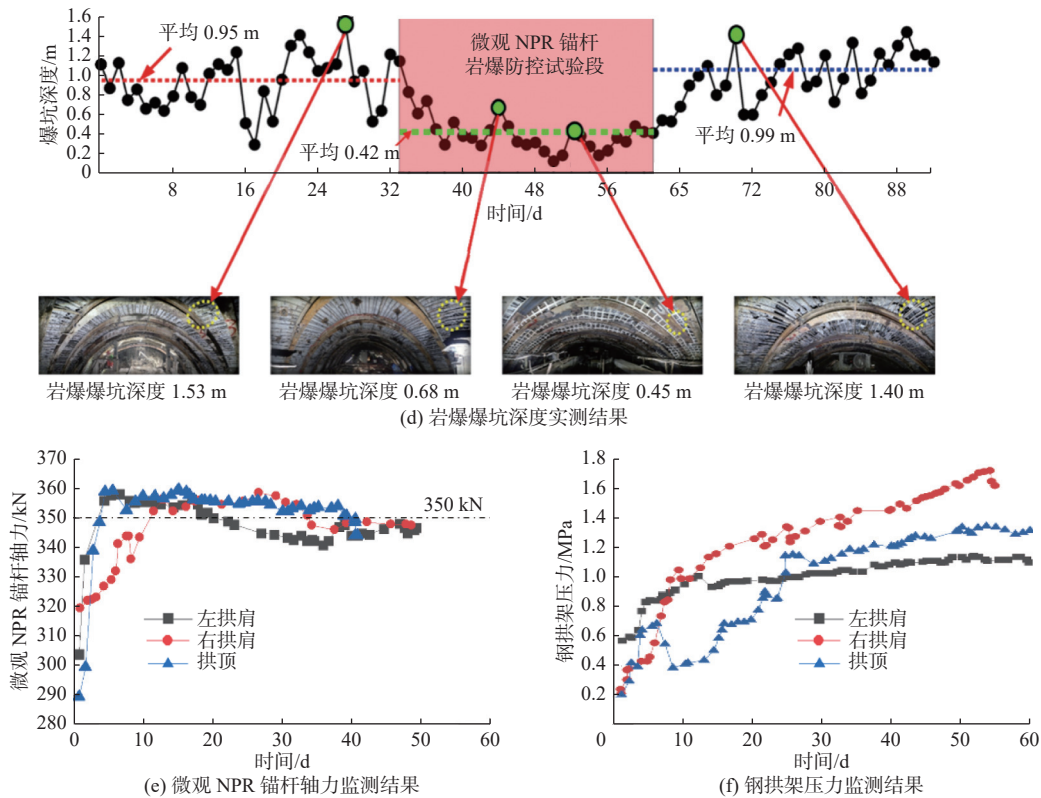


图 14 现场监测结果

Fig. 14 Field test monitoring results

微观 NPR 锚杆轴力传感器及钢拱架受力监测传感器监测结果见图 14(e)及图 14(f)。由于篇幅有限,只对 K43+835 断面监测结果进行分析。在支护监测的过程中,左肩、拱顶及右肩部分微观 NPR 锚杆稳定后的轴力维持在 350 kN 左右,总体均呈先增大后减小,最终趋近平稳的趋势,说明了三维支护体系对于围岩变形起到了一定的控制作用。在此期间,钢拱架压力右拱肩受力>拱顶受力>左拱肩受力,但均未超过钢拱架的屈服强度。总体看来趋于稳定,呈现受压状态,说明三维支护体系能够分担部分围岩压力,从而在一定程度上能够控制岩爆灾害。

综上所述,现场监测结果表明,以微观 NPR 锚杆为核心的三维 NPR 高应力补偿支护体系通过高恒阻应力补偿可迫使岭北段隧洞开挖围岩由二维应力状态重回三维应力状态。采用具有良好力学特性微观 NPR 锚杆对围岩进行高恒阻、快预紧的及时主动支护,致使施作微观 NPR 锚杆科研试验段的微震能量、频次均明显降低,爆坑数量及深度明显减小,围岩基本处于稳定状态,支护及岩爆控制效果显著。

#### 4 结论

通过现场勘探及相关试验可知,秦岭引水隧洞

岭北段属超深隧道,地质条件复杂,该处受构造应力影响剧烈,区内岩体易产生应力集中,易发生剥落、弹射及抛掷等岩爆现象。采用传统小变形锚杆和多层钢拱架的刚性初支体系无法有效防范岩爆灾害,导致岩爆频繁发生。

基于开挖应力补偿理论,提出以微观 NPR 锚杆为核心的三维 NPR 高应力补偿支护体系。由现场监测数据分析可知,岭北段隧洞 K43+865~K43+815 试验段在施作微观 NPR 锚杆后,微震能量、频次均明显降低,围岩完整性提高,爆坑深度、钢拱架受力和变形量减小,岩爆灾害得到有效控制,支护效果显著。

#### 参考文献:

- [1] 冯夏庭,肖亚勋,丰光亮,等. 岩爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 649-673. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0103.
- [2] 魏新江,陈涛涛,王霄,等. 岩爆灾害研究与进展[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(2): 1-12. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.02.001.
- [3] 陈万忠. 秦岭终南山特长公路隧道施工技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.

- [4] 周卫滨. 苍岭隧道岩爆预测和防治研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [5] 蒋昱州, 王瑞红, 汪斌, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞围岩岩爆特性研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(4): 71-76.
- [6] 欧阳林, 张如九, 刘耀儒, 等. 深埋隧洞岩爆防控技术及典型工程应用现状综述[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(12): 161-170. DOI: 10.11988/ckyyb.20221050.
- [7] 胡泉光, 陈方明, 陈恩瑜. 深埋长引水隧洞TBM施工关键技术探讨[J]. 人民长江, 2015, 46(7): 19-21. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.07.005.
- [8] HES Y, LAI J X, ZHONG Y J, et al. Damage behaviors, prediction methods and prevention methods of rock-burst in 13 deep traffic tunnels in China[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 121(2021): 105178. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105178.
- [9] HAN X B, LIANG X M, YE F, et al. Statistics and construction methods for deep TBM tunnels with high geostress: A case study of Qinling Tunnel in Hanjiang-Weihe River Diversion Project[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 138(2022): 106301. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106301.
- [10] 汪珂. 深埋隧道岩爆预测及防治技术现状综述[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 212-224. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.02.007.
- [11] MOGANEDI K A, STACEY T R. Value creation as an approach to the management and control of rock-burst damage in tunnels[J]. *Tunnelling And Underground Space Technology*, 2019, 83: 545-551. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.023.
- [12] 赵周能, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 深埋隧洞微震活动区与岩爆的相关性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 491-497. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.02.037.
- [13] 谢文清. 地下工程施工中岩爆的形成机理及控制措施[J]. 现代隧道技术, 2008, 321(4): 8-13.
- [14] 张鹏. 引汉济渭工程秦岭引水隧洞岩爆发生机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [15] 徐则民, 黄润秋, 王士天. 隧道的埋深划分[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000(4): 8-13. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2000.04.002.
- [16] 孙峰伟, 乔栋磊, 安艳军, 等. 深埋公路隧道高地应力场特征分析及岩爆预测[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26): 11592-11600.
- [17] 杨晓芳, 李玉倩, 吴金刚. 某高速深埋隧道断层构造带围岩变形破坏分析与防控[J]. 公路交通科技, 2022, 39(6): 103-110, 118.
- [18] 刘贵雄. 引汉济渭工程隧洞施工若干技术问题探讨[J]. 水利水电技术, 2017, 48(8): 81-84. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2017.08.016.
- [19] 李元来, 王俊. 引汉济渭工程秦岭输水隧洞4#施工支洞岩爆预测及预防处理措施[J]. 水利水电技术, 2017, 48(8): 96-100. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2017.08.019.
- [20] 姚军, 王睿, 夏道洪, 等. 隧道围岩分级研究进展综述[J]. 公路, 2021, 66(8): 367-372.
- [21] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物地下开挖工程施工规范: SL 378—2007[S]北京: 中国水利水电出版社.
- [22] 陶志刚, 李梦楠, 张博, 等. 西南地区节理化薄层软岩隧道大变形力学机理及支护控制方法[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(4): 452-463. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2023.04.002.
- [23] 陶志刚, 杜志锋, 刘淞源, 等. NPR锚索支护下相交隧道围岩变形规律及破坏机理[J/OL]. 煤炭学报, 2023: 1-13. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1477
- [24] 何满潮, 任树林, 陶志刚. 深埋隧道灾变防控方法[J]. 工程地质学报, 2022, 30(6): 1777-1797. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2022-0703.
- [25] 李天斌, 孟陆波, 王兰生. 高地应力隧道稳定性及岩爆、大变形灾害防治 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [26] 刘泉声, 雷广峰, 彭星新. 深部裂隙岩体锚固机制研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 312-332. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0203.
- [27] 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. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0412.
- [28] 李涛, 刘瑞辉, 王万平, 等. 大跨度软岩隧道施工中双层初期支护施作时机优化分析[J]. 公路, 2023, 68(7): 58-62.
- [29] 曲宏略, 刘哲言, 陈爽, 等. 锚杆支护参数对岩爆防治效果的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(1): 326-333, 342.
- [30] 陶志刚, 郭爱鹏, 何满潮, 等. 微观负泊松比锚杆静力学特性及其工程应用研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 808-818. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0426.



## Three-dimensional NPR support technology for rockburst in the Qinling diversion tunnel of the Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project

TAO Zhigang<sup>1,2</sup>, ZHAO Junzheng<sup>1,2</sup>, HU Jie<sup>1,2,3</sup>, SUN Yingying<sup>1,2</sup>, HE Manchao<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. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project area has more tectonic development such as folds and ruptures, and a series of long joints and joint-intensive zones have been developed in the area, which are generally low in the north and high in the south, with gullies and ravines, so rockburst disasters and damage to the original support structure are frequently generated in this section. Therefore, the study on the water diversion project geological survey, analysis of the tunnel surrounding rock explosion damage characteristics and damage patterns is necessary to carry out ultra-deep tunnel rock explosion three-dimensional NPR high-stress compensation support system for early warning and prevention of rock explosion disaster.

Using on-site investigation and other methods, the geological conditions of the tunnel and the causes of rockburst damage were analyzed, and comparative testing was carried out to design a rockburst monitoring and early warning test scheme for the northern section of the project area, and a three-dimensional NPR high-stress compensatory support system with the microscopic NPR anchors as the core was put forward. The degree of rockburst control of the surrounding rocks under the new support system and its support effect were analyzed through on-site testing.

Field test results show that the three-dimensional NPR high-stress compensation support system with microscopic NPR anchors as the core can force the excavated surrounding rock in the north section of the tunnel to return to the three-dimensional stress state from the two-dimensional stress state employing high constant resistance stress compensation. The use of good mechanical properties of microscopic NPR anchors on the surrounding rock with high constant resistance, and fast pre-tensioning of timely active support, resulting in the application of microscopic NPR anchors in the research section of the micro-seismic energy, frequency are significantly reduced, the number and depth of the burst crater is significantly reduced, the surrounding rock is in a stable state, and the effect of the support and rock explosion control is remarkable.

Through on-site exploration and related experiments, it can be seen that the north section of the project area is a super-deep tunnel with complex geological conditions, which is affected by the tectonic stress, and the rock in the area is prone to stress concentration and rockburst phenomena, such as spalling, ejecting, and throwing. The use of traditional small deformation anchors and multi-layer steel arch rigid primary support systems can not effectively prevent the rock explosion disaster, resulting in the frequent occurrence of rock explosions. Based on the theory of excavation stress compensation, put forward to the microscopic NPR anchors as the core of the three-dimensional NPR high-stress compensation support system, combined with on-site monitoring data analysis, the project section of the monitoring and early warning test section in the application of microscopic NPR anchors, micro-earthquake energy, frequency is significantly reduced. The integrity of the surrounding rock improves the depth of the explosion pit, the steel arch frame force and deformation are reduced, the rock explosion disaster has been effectively controlled, and the support effect is remarkable.

**Key words:** Qinling diversion tunnel of the Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project; monitoring and warning; rockburst; micro NPR anchor; comparative test; support system