

双护盾 TBM 施工隧洞岩爆特征微震监测研究^{*}

姚林林, 赵明, 钟果

(中国电建集团 成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072)

摘要: 为了研究深埋隧洞在双护盾 TBM 施工环境下的岩爆特征, 以某公路隧道为例对微震监测成果进行了统计整理, 并在此基础上分析了微震事件与掌子面位置、岩体完整性以及隧洞埋深等之间的相关关系, 获取了该工程岩爆事件发生的规律。成果表明, 在隧洞采用双护盾 TBM 开挖过程中岩爆事件并非主要集中在掌子面附近, 岩爆存在一定的延迟性和超前性, 岩爆发生与开挖过程的时间效应及距离范围存在一定规律。同时, 岩爆的能量等级和发生频次与岩体结构及隧道埋深也存在关联性。深埋隧洞在双护盾 TBM 施工环境下的岩爆规律的研究对类似工程具有一定的借鉴意义。

关键词: 双护盾 TBM; 深埋隧洞; 岩爆特征; 微震监测

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)05-1352-07

Research on Characteristics of Rockburst in Tunnel Excavated by Double Shield TBM Based on Micro-seismic Monitoring

Yao Linlin, Zhao Ming, Zhong Guo

(Chengdu Engineering Co. Ltd., PowerChina, Chengdu 610072, P.R. China)

Abstract: In order to study the characteristics of rockburst in deep-buried tunnel cut by double-shield TBM, the results of micro-seismic monitoring were statistically analyzed by taking a road tunnel as an example. On this basis, the correlation between the micro-seismic event and the position of the tunnel face, the integrity of the rock mass and the depth of the tunnel were analyzed, and the law of the occurrence of the rock burst was obtained. The results show that the rock burst events are not mainly located near the tunnel face and are usually delayed and advanced during the construction progress excavated by double shield TBM. Time effect of rock burst occurrence and the excavation process and the distance from there is a certain rule. At the same time, the energy level and frequency of rock burst are related to the rock mass structure and tunnel burial depth. The study on the rock burst regularity in the construction environment of double shield TBM is of great significance to similar projects.

Keywords: double-shield TBM; deep-buried tunnel; characteristics of rockburst; microseismic monitoring

0 引言

在深埋隧洞及其他地下洞室的开挖过程中, 往往会伴随不同程度的岩爆事件的发生。岩爆是高地应力条件下地下洞室开挖过程中, 由于开挖卸荷

引起围岩应力重分布, 导致储存于围岩中的弹性应变能突然释放, 并产生爆裂、松脱、剥落、弹射甚至抛掷等破坏现象的一种动力失稳地质灾害^[1]。

隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)施工方法具有“掘进速度快、施工扰动小、成洞质量佳、

^{*} 收稿日期: 2018-04-21 (修改稿)

作者简介: 姚林林(1979-), 男, 河南宜阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水电工程地质和 TBM 施工地质的生产与科研工作。E-mail: 50126048@qq.com

自动一体化程度高、施工环境优、综合经济社会效益强”等显著优势,近几十年来国内、外越来越多的隧道工程采用掘进机进行施工。国、内外学者通过大量研究发现由于破岩方式的差异,TBM和钻爆法施工环境下岩爆发生的规律也有所差异。Rudajev等^[2]认为岩爆的发生与所采用的开挖方式密切相关;王彦辉等^[3]在分析钻爆法施工特点的基础上认为TBM施工方式减小了施工对围岩的振动,从而减少岩爆触发因素;张志强等^[4]在总结国内外许多地下工程岩爆发生的条件后也认为地质条件相同时,采用TBM施工的隧道可能不发生岩爆,而采用钻爆法施工时则会发生岩爆。但侯靖等^[5]基于锦屏二级水电站辅助洞和排水洞的岩爆对比分析指出在工程地质和隧洞断面尺寸相似条件下,TBM开挖发生的岩爆累计长度及等级均大于钻爆法开挖。同时,大量工程实践表明,对于埋深大、地应力高的地下岩石工程如锦屏二级水电站引水工程,TBM开挖也面临着频繁的岩爆灾害,甚至较钻爆法更严重。目前,TBM施工环境下深埋隧洞的岩爆特征还没有形成统一的认识。

随着微震技术的不断进步,世界各国逐渐将之应用于地下工程岩爆预警监测领域,并进行相关微震活动研究^[6]。但大量微震监测工作主要在矿山领域应用较为广泛,针对地下深埋长大隧洞,锦屏二级水电站引水工程中采用加拿大ESG微震监测系统进行了相关监测和岩爆特征的分析研究^[7-9]。因此,通过微震监测技术,获取深埋隧洞TBM开挖的微震活动规律,进而掌握岩爆活动特征,采用相应防治措施,指导深埋隧洞工程TBM施工安全显得尤为重要^[10-11]。

本文以某公路隧道为例对微震监测成果进行了统计整理,并在此基础上分析了微震事件与掌子面位置、岩体完整性以及隧洞埋深等之间的相关关系,获取了该工程岩爆发生的规律。这对类似工程具有一定的借鉴和参考意义。

1 工程简介

该公路隧道位于青藏高原地区,为一越岭深埋隧道,全长约4.8 km,开挖洞径约9 m,隧道最大埋深约800 m,采用双护盾TBM施工。

隧道沿线属构造剥蚀、冰蚀作用强烈的高山峡

谷冰川地貌,隧道横穿某山体。穿越地层为元古界南迦巴瓦岩群,属喜马拉雅地层区,岩性单一,主要为条带状混合岩,新鲜岩块饱和单轴抗压强度为60~80 MPa,该地区位于喜马拉雅山隆升区,隧道埋深大,隧道地应力量级高,最大主应力约32 MPa。在开挖过程中深埋洞段出现大量岩壁剥落、劈裂及多次轻微~中等强度的岩爆事件。

2 微震监测实施方案

2.1 监测设备

微震监测系统主要包括记录微震信号的传感器和数据采集仪,微震传感器负责记录高质量波形信号,采集仪将波形信号通过A/D转换为数据信号。

微震传感器用于记录微震信号,作用非常关键,是整个系统的最基础部件。微震信号的特点是震级小,信号频率范围大,对采集信号的传感器性能要求非常高。本次采用的传感器的特点为:①单通道、三通道可选;②200 V/m/s灵敏度;③4.5 Hz自然频率;④钻孔安装。

微震数据采集仪是最重要部件,其处理后的波形信号的质量直接影响了后期的处理结果。本次选用的数据采集仪为Daqlink3-24。主要特性为:①高分辨率:24位A/D(Daqlink3-24);②高采样率:125、250、500、1 000、2 000和4 000 Hz(本次初步拟定2 000 Hz);③高触发精度: $\pm 1\mu\text{s}$ at all sample rates;④低本地噪音: $<0.2\mu\text{V RMS@2 ms}$;⑤时钟同步:GPS结合光纤的同步。

2.2 监测方案

隧道微震监测常见方案主要包括:隧道内台站方案和地表台阵辅助方案两种。考虑到该隧址区自然环境恶劣且地表沿线交通条件极差,同时,隧道埋深较大,不具备洞外地表布台监测的条件。因此,本次监测采用随洞内移动台网随开挖工程连续监测的方式记录数据。

2.2.1 传感器布设

传感器布置采用空间立体化布置方式。在隧道内距离掌子面最近的一环管片后方5 m、25 m、45 m处分别布置传感器扇形监测断面。每个监测断面,布置3个钻孔,钻孔深度为1 m左右,每个断面分别在钻孔内安装2个三轴传感器和1个单轴传感器(如图1所示)。随着隧道开挖掌子面的推

进,每掘进 20 m 左右,最后面的传感器拆下并安装到最前断面位置,监测断面交替前移。

2.2.2 数据采集仪布设

共布置 1 个 24 通道数据采集仪,随着掘进面的推进和传感器位置变化而进行位置调整。微震监测数据通过光缆从采集仪传输到数据采集服务器。

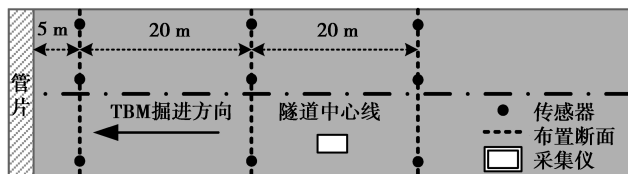


图1 微震监测系统布置方式示意图

Fig. 1 Diagram of micro-seismic monitoring system layout

2.3 监测成果

经过历时 7 个月的监测工作,对该公路隧道埋深大于 600 m 长度 1 800 m 的洞段进行了相应微震监测。期间共捕捉到 1 091 次震级 $ML \geq -1$ (对应能量为 402.72 NM) 相对强度较大的微震事件。其中监测过程中捕捉到最大的一次微震事件震级 ML 为 0.9,对应能量为 285 100 NM。

3 监测成果分析

测试成果分析工作主要是基于对捕捉到的 1 091 次的微震事件进行统计整理,并在此基础上分析了微震事件与掘进过程、岩体完整性以及隧洞埋深等之间的相关关系,并在此基础上得出了该工程岩爆事件的活动规律。

3.1 微震事件与掘进过程的时空关系

隧洞开挖时,微震事件的发生过程实质上是受开挖卸荷作用影响围岩应力重分布造成岩体发生(微)破裂的过程。应力调整区主要分布于掌子面周围一定的范围内,并随开挖掌子面的不断向前推进随之不断变化。掌子面位置的不断改变引起周围围岩应力调整变化的过程也就决定了微震事件的空间展布特征,微震事件与掘进过具有相关性。

对微震事件发生时间、位置进行统计,并与掘进进度曲线进行对比,成果如图 2 所示。

微震监测工作于累计开挖第 134 d 时开始实施,因此最先监测到的微震事件发生时间也是始于第 134 d。由于在施工过程中,受特殊原因影响于累计开挖 121 d 时在 K10+240 附近长时间停机,停机一直持续至累计开挖天数为 177 d 时,共累计停机 56 d。

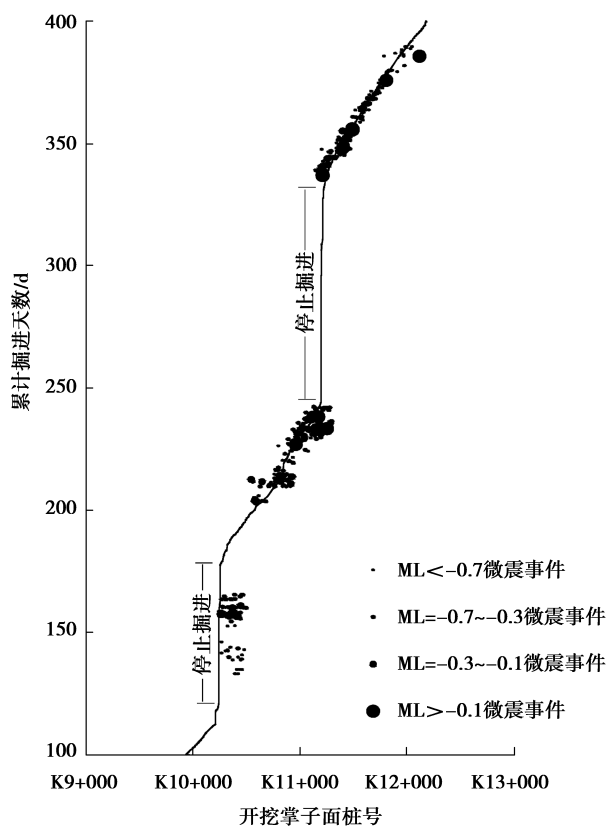


图2 微震事件分布特征与掘进曲线对比关系图

Fig. 2 Distribution characteristics of micro-seismic events compared with the progress curve

从图 2 可以看出:长时间停机段与正常掘进时微震发生特征也存在差异,正常掘进段则在掌子面前后一定范围内均有分布,即超前和滞后的微震事件均有发育,而长时间停机段微震事件主要分布于掌子面前方,这可能于微震监测工作滞后于停机发生时刻,漏掉停机刚开始的数据造成,但也表明长时间停机经历 13 d 后微震事件和围岩应力调整区域主要分布于掌子面前方,掌子面后侧的围岩应力调整已经基本区域稳定;长时间停机一段时间后,微震事件等级随时间推迟略有增加,由原来以震级 $ML < -0.7$ (能量小于 1 000 NM) 微震事件为主变化为以 $ML = -0.7 \sim -0.3$ (能量 1 000 ~ 5 000 NM) 微震事件为主,并有 $ML = -0.3 \sim -0.1$ (能量 5 000 ~ 10 000 NM) 微震事件出现。

从图 2 可以看出微震事件都是发生在掌子面前后的一定范围内,微震事件超前或滞后掌子面分布范围特征,往往对施工指导意义重大,尤其是滞后岩爆事件的发生,会对施工安全造成重大风险,确定微震事件发生位置与掌子面的距离特征,可以为施工过程中确定岩爆防范重点区域具有指导意

义。本文针对长时间停机段和正常掘进段不同震级微震发生位置与掌子面的距离关系进行了统计分析,如表 1、2 所示。

表 1 长时间停机段微震事件分布情况
Table 1 Distribution of micro-seismic events during long downtime

震级 (ML)	掌子面前方不同距离范围内微震事件数量			
	>9 倍洞径	6~9 倍洞径	3~6 倍洞径	<3 倍洞径
-1 ~ -0.7	25	7	1	2
-0.7 ~ -0.3	51	7	20	20
-0.3 ~ -0.1	7	0	0	0
合计	83	14	21	22
比例/%	59.3	10.0	15.0	15.7

从表 1 可以看出停机一段时间后,超前的微震

事件普遍距掌子面较远,主要分布在 9 倍洞径之外,微震监测数据显示最大可达 250 m (27 倍洞径)左右,平均在 100 m (10 倍洞径)左右。

从表 2 可以看出:双护盾 TBM 正常施工条件下,滞后微震事件占总事件的比例为 56%,略高于超前微震事件;50.3%的微震事件距掌子面的距离主要集中于 3 倍洞径之内,约 75%的微震事件距掌子面的距离主要集中于 6 倍洞径之内;ML 震级小于-0.1 的微震事件(能量低于 10 000 NM)主要分布在 3 倍洞径范围之内,ML 震级大于-0.1 的微震事件(能量高于 10 000 NM)主要分布在 3~6 倍洞径范围之间。因此,掌子面附近 3~6 倍洞径即 27~54 m 范围内 ML=-0.1~0.2 级微震事件和 ML=0.2~1 级微震事件多发,施工中也相应发生了轻微-中等岩爆现象。

表 2 正常掘进段掌子面不同距离范围内微震事件分布情况
Table 2 Distribution of micro-seismic events during normal tunneling

震级与能量分级 (ML/KNM)	距掌子面间不同距离范围内微震事件数量							
	滞后				超前			
	<9 倍洞径	6~9 倍洞径	3~6 倍洞径	<3 倍洞径	>9 倍洞径	6~9 倍洞径	3~6 倍洞径	<3 倍洞径
-1 ~ -0.7 (<1)	22	51	81	206	15	29	65	174
-0.7~-0.3(1~5)	26	36	57	36	19	15	24	50
-0.3~-0.1(5~10)	3	6	4	4	2	3	3	5
-0.1~0.2(10~20)	0	0	4	0	1	2	6	1
0.9(>200)	0	0	1	0	0	0	0	0
合计	51	93	147	246	37	49	96	232
比例/%	5.36	9.78	15.46	25.87	3.89	5.15	10.09	24.40

3.2 微震事件与岩体完整性关系

围岩中的弹性应变能突然释放,从而引起岩爆并伴随微震事件的发生,岩体完整性则决定了应变能的蓄积和储存条件。因此,岩体的完整程度与微震事件的发生概率和能量规模等级密切相关。

根据岩体完整性差异,选取连续监测的 10 段洞段作为代表性洞段,其中岩体较完整洞段和完整性差~较破碎洞段各 5 段。针对代表性洞段,对各段微震事件发生的总数和段内所以微震事件的能量总和进行了统计,并分析了不同岩体完整性情况下微震事件发生的频率及单位长度内平均释放能量的大小,结果如表 3 所示。

表 3 岩体不同完整性情况下的微震事件发育特征

Table 3 Characteristics of micro-seismic events in different integrity of rock mass

岩体完整性	洞段编号	洞段长度/m	事件总数/次	释放能量总和/NM	平均次数/(次·m ⁻¹)	平均释放能量/(NM·m ⁻¹)
较完整	1	114	79	152 000	0.69	1 327.73
	2	44	26	42 400	0.59	956.83
	3	117	72	114 000	0.61	970.30
	4	86	61	86 400	0.71	1 004.03
	5	285	384	858 000	1.35	3 009.97
平均					0.79	1 453.77

续表 3

岩体完整性	洞段编号	洞段长度/m	事件总数/次	释放能量总和/NM	平均次数/(次·m ⁻¹)	平均释放能量/(NM·m ⁻¹)
完整性差~较破碎	1	51	20	31 800	0.39	621.17
	2	36	15	25 700	0.42	721.09
	3	77	28	32 700	0.36	424.16
	4	52	27	57 400	0.52	1 105.02
	5	132	64	151 000	0.49	1 144.97
平均					0.44	803.28

由表 3 可以看出,岩体较完整洞段每米长度内平均发生微震事件数量在 0.61~1.35 之间,平均值为 0.79,每米长度内平均微震释放能量为 1 454 NM;而

岩体完整性差~较破碎洞段每米长度内平均发生微震事件数量在 0.36~0.52 之间,平均值为 0.44,每米长度内平均微震释放能量为 803 NM。通过比较可以发现,在围岩完整性较好的情况下发生微震的频率以及微震事件的能量要高,且约为岩体完整性较差条件下的 1.8 倍。

3.3 微震事件与埋深关系

微震事件尤其是高震级的微震事件及岩爆的发生往往与高地应力密切相关,而高埋深环境下普遍地应力相对较高,因此,微震事件与埋深之间存在关联性。

监测数据的埋深分布在 660~820 m 之间,根据埋深的差异,选取完整性较好洞段分别对不同埋深梯度下的微震事件数量、震级特征和微震事件的释放能量进行了统计,结果如表 4 所示。

表 4 不同埋深下的微震事件发育特征

Table 4 Characteristics of micro-seismic event under different burial depth

埋深/m	洞段编号	段长/m	平均埋深/m	不同震级微震事件数量/次					释放能量总和/NM	平均次数/(次·m ⁻¹)	平均释放能量/(NM·m ⁻¹)
				<-0.7	-0.7~-0.3	-0.3~-0.1	>-0.1	总计			
650~700	1	106	680	19	37	0	0	56	71596	0.52	670
	1	110	703	31	37	2	0	70	109 590	0.63	990
700~750	2	60	738	25	15	0	0	40	54 483	0.67	910
	1	24	757	10	10	1	0	21	31 949	0.89	1 350
750~800	2	20	780	12	3	0	0	15	12 250	0.76	617
	3	52	773	33	0	0	2	35	54 145	0.67	1 043
800~820	1	119	815	64	46	6	7	123	563 961	1.03	4 721
	2	116	809	129	12	0	0	141	83 196	1.21	715

通过表 4 可以看出,随着埋深的增加每米长度内平均发生微震事件数量和平均释放能量大小都整体呈增长趋势;同时随着埋深增加震级较大的微震事件出现的次数也整体性呈上升趋势,震级 ML>-0.1 的微震事件在 750~800 m 埋深洞段逐渐出现,在 800 m 以上洞段呈大幅度提升。

3.4 工程实例分析

由于该隧道是采用双护盾 TBM 进行施工,施工空间封闭,受施工工艺影响开挖岩壁受盾体和管片阻挡无法全面准确地进行观察。岩爆后的爆坑深度、大小及岩爆后岩体的特征无法直接观

察和分析。这对分析岩爆特征和规律带来制约和干扰。为了分析上述研究成果的可靠性和准确性,本文主要对该公路隧道 TBM 施工过程中可以了解到的岩爆声响强度以及通过刀盘内和观测窗可见岩壁的洞壁剥离、岩体劈裂等高地应力现象(如图 3、4 所示)进行汇总分析,并将上述现象出现的次数、程度和与滞后距离、岩体完整性和埋深情况进行对比分析。上述信息虽然有限,但仍可利用这些有限的直接和间接的综合地应力现象信息来初步验证和评价研究成果在具体工程中的表现效果。



图 3 劈裂现象

Fig. 3 Fracturing phenomenon

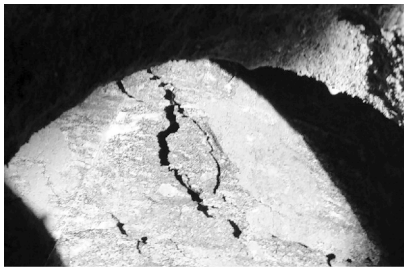


图 4 剥离现象

Fig. 4 Stripping phenomenon

该公路隧道施工中出现的高地应力下的岩爆、岩体劈裂、洞壁剥离现象等高地应力迹象的滞后距离、岩体完整性和埋深情况统计汇总情况如表 5 所示。

表 5 不同情况下高地应力事件特征

Table 5 Characteristics of high ground-stress events under different conditions

对应不同状况		不同类型高地应力现象出现次数/次			
		岩爆声响		岩壁剥离	岩体劈裂
		轻微	较强		
滞后距离 /m	0~10	1	0	23	10
	10~30	1	1	8	5
	30~60	7	6	无法观察	无法观察
	合计	9	7	31	15
岩体 完整性	较完整	7	7	25	6
	完整性差- 较破碎	2	0	6	9
	合计	9	7	31	15
垂直 埋深/m	400~600	4	0	6	0
	600~800	2	2	10	2
	大于 800	3	5	15	13
	合计	9	7	31	15

由表 5 可以看出,在滞后性来看无论是岩爆声响轻微还是较强的事件主要分布于掌子面后方 30~60 m(约 3~6 倍洞径)范围内,岩壁的剥离现象和岩体劈裂现象受双护盾 TBM 设备特点限制只能对掌子面后方 12 m 范围内利用盾体的窗口和缝隙出岩壁出露部位进行观察,因此,据此难以对滞后性做出评价。但仅就听到岩爆声响事件的分布情况与 ML 震级大于-0.1 的微震事件主要分布在 3~6 倍洞径范围之间的结论基本一致;在岩体完整性上来看无论是岩爆声响轻微还是较强的事件还是岩壁剥离现象主要发生于岩体完整性较好的洞段,这与在围岩完整性较好的情况下发生微震的频率以及微震事件的能量要高的结论一致,从岩体的劈裂现象上来看在岩体完整性差或较破碎洞段也出现次数较多的劈裂现象,这主要是由于劈裂作用裂隙增加开裂而造成岩体完整性变差所致;从埋深上看在埋深大于 400 m 后逐渐出现岩爆、剥离、劈裂等高地应力事件而造成微震事件的发生,岩爆声响轻微及剥离等较弱的地应力事件在不同埋深范围内均匀分布,数量相当,但岩爆声响较强、岩体劈裂等较强的地应力现象随埋深增加事件数量明显增加,这与随着埋深增加震级较大的微震事件出现的次数也整体性呈上升趋势的分析结论一致。

4 结论

(1)双护盾 TBM 正常施工条件下,滞后微震事件占总事件的比例为 56%,略高于超前微震事件;50.3%的微震事件距掌子面的距离主要集中于 3 倍洞径之内,约 75%的微震事件距掌子面的距离主要集中于 6 倍洞径之内。

(2)ML 震级小于-0.1 的微震事件主要分布在 3 倍洞径范围之内,ML 震级大于-0.1 的微震事件主要分布在 3~6 倍洞径范围之间。

(3)在围岩完整性较好的情况下发生微震的频率以及微震事件的能量要高,且约为岩体完整性较差条件下的 1.8 倍。

(4)随着埋深的增加每米长度内平均发生微震事件数量和平均释放能量大小都整体呈增长趋势;同时随着埋深增加震级较大的微震事件出现的次数也整体性呈上升趋势。

上述结论在该公路隧道中进行了成功应用,根据微震事件主要出现在 6 倍洞径范围内的规律要求施工中掌子面后方 50 m 范围内减少人员通行次数并加强对该段衬砌管片的巡视工作,一旦出现异常及时撤离并对衬砌管片进行加固;根据微震事

件与岩体完整性和埋深之间的规律,提高了埋深800 m以上洞段的支护等级,统一采用重型管片,采用重型管片后在深埋洞段没有出现明显的管片开裂现象;同时也根据微震事件次数随深埋增加呈现明显上升的趋势间接反映地应力随埋深不断增加的情况,为了避免地应力加剧造成岩体变形过大从而引起卡机的情况,该施工中针对大埋深进行扩挖工作,从而降低了卡机的风险,采用扩挖后在埋深大于700 m洞段没有发生卡机现象,仅出现一次推力急剧增加,掘进困难的情况,正是根据微震研究成果建议加大了扩挖,成果避免了卡机情况的出现。同时,在该地区相应的工程前期设计工作中针对减小岩爆灾害、预防卡机方面也对该成果进行了参考和应用。

致谢

本文的微震监测数据由清华大学刘晓丽老师带领的微震监测技术团队所提供,在此对全体团队成员表示感谢!同时,在论文编写过程中也得到了该隧道项目工程建设单位大量人员的帮助和支持,在此一并表示感谢!

参考文献(References)

- [1] 徐林生,王兰生,李天斌,等.二郎山公路隧道岩爆特征预测研究[J].地质灾害与环境保护,1999(2): 55-59. (Xu Linsheng, Wang Lansheng, Li Tianbin, et al. Study on the character of rockburst and its forecasting in the Erlang Mountain tunnel[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1999(2): 55-59. (in Chinese))
- [2] Rudajev V, Sileny J. Seismic events with non-shear component: II rock bursts with implosive source component[J]. Pure and Applied Geophysics, 1985, 123(1): 17-25.
- [3] 张志强,关宝树.岩爆发生条件的基本分析[J].铁道学报,1998,20(4): 82-85. (Zhang Zhiqiang, Guan Baoshu. Basic analysis of rock bursting occurrence condition[J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20(4): 82-85. (in Chinese))
- [4] 王彦辉,东兆星.隧道施工中岩爆的成因及预防研究[J].河北交通科技,2010,7(2): 27-29. (Wang Yanhui, Dong Zhaoxing. Study on rock burst mechanism and prevention in tunnel[J]. Hebei Jiaotong Science and Technology, 2010, 7(2): 27-29. (in Chinese))
- [5] 侯靖,张春生,单治钢.锦屏级水电站深埋引水隧洞岩爆特征及防治措施[J].地下空间与工程学报,2011,7(6): 1251-1257. (Hou Jing, Zhang Chunsheng, Shan Zhigang. Rockburst characteristics and the control measures in the deep diversion tunnel of Jinping II Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1251-1257. (in Chinese))
- [6] 李庶林.试论微震监测技术在地下工程中的应用[J].地下空间与工程学报,2009,5(1): 122-128. (Li Shulin. Discussion on microseismic monitoring technology and its applications to underground projects[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 122-128. (in Chinese))
- [7] 于群,唐春安,李连崇,等.基于微震监测的锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆孕育过程分析[J].岩土工程学报,2014,36(12): 2315-2322. (Yu Qun, Tang Chunan, Li Lianchong, et al. Nucleation process of rockbursts based on microseismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2315-2322. (in Chinese))
- [8] 张文东,马天辉,唐春安,等.锦屏二级水电站引水隧洞岩爆特征及微震监测规律研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2): 339-348. (Zhang Wendong, Ma Tianhui, Tang Chunan, et al. Research on characteristics of rockburst and rules of microseismic monitoring at diversion tunnels in Jinping II Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 339-348. (in Chinese))
- [9] 赵周能,冯夏庭,丰光亮,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. (Zhao Zhouneng, Feng Xiating, Feng Gangliang, et al. Study on relativity between rockburst and microseismic activity zone in deep-buried tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 491-497. (in Chinese))
- [10] 陈炳瑞,冯夏庭,曾雄辉,等.深埋隧洞TBM掘进微震实时监测与特征分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(2): 275-283. (Chen Bingrui, Feng Xiating, Zeng Xionghui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-buried tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 275-283. (in Chinese))
- [11] 张照太.大直径TBM通过深埋强岩爆洞段的岩爆防治方法[J].煤炭学报,2011,36(2): 431-435. (Zhang Zhaotai. TBM construction method in the large overburden and intensive rockburst zone[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 431-435. (in Chinese))