

DOI: 10.7672/sgjs2024070029

沙特 NEOM 隧道项目 Q 系统围岩分类及支护体系研究*

方磊

(中国铁建国际集团有限公司, 北京 100039)

[摘要] 沙特 NEOM 隧道支洞项目采用挪威法施工,依据地质素描判定的 Q 值划分围岩类别,确定工程所需的支护结构参数。在对 Q 系统围岩分类法的各项参数及计算方法进行详细分析的基础上,从超前预测、掌子面判定、隐蔽工程记录等方面,形成了“超前探孔-地质素描-TDMS 隧道文件管理系统”的地质工作流程;同时,应用 Q 系统分类法划分围岩支护等级、选取相应支护参数,当围岩等级较好时可主要使用注浆锚杆+喷射混凝土的支护方式,当围岩等级较弱时,还需要借助格栅钢架/型钢钢架+钢筋网片的方式确保支护体系的安全。

[关键词] 隧道;支护;围岩;超前预测;地质素描

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)07-0029-06

Research on Surrounding Rock Classification and Support System by Q-system of Saudi Arabia NEOM Tunnel Project

FANG Lei

(China Railway Construction Corporation (International) Limited, Beijing 100039, China)

Abstract: The Norwegian Method of Tunneling is adopted in the branch tunnel project of the NEOM tunnel in Saudi Arabia. The surrounding rock category is divided according to the Q value determined by the geological sketch, and the supporting structure parameters required for the project are determined. Based on the detailed analysis of the parameters and calculation methods of the surrounding rock classification method of the Q system, the geological work flow of the “advanced exploration hole-geological sketch-TDMS tunnel file management system” is formed from the aspects of advanced prediction, tunnel face determination, hidden engineering record and so on. Meanwhile, the Q system classification method is used to divide the surrounding rock support grade and select the corresponding support parameters. The support method of grouting bolt + shotcrete can be mainly used when the surrounding rock grade is good. It is also necessary to use the grid steel frame/steel frame + steel mesh to ensure the safety of the support system when the surrounding rock grade is weak.

Keywords: tunnels; supports; surrounding rock; advanced prediction; geological sketch

0 引言

隧道围岩分类、支护类型和参数的选择是决定隧道结构设计、施工方案、工程造价和作业人员安全最重要的因素^[1]。 Q 系统分类法作为岩土工程领域应用最广的岩体质量评价方法之一,由 Barton 等于 1974 年提出,详尽阐述了节理蚀变度、节理粗糙度对围岩强度及稳定性的影响机制,以 Q 值来对围岩质量进行等级评价,从而确定各级围岩的支护类型与支护参数^[2]。

沙特 NEOM 隧道支洞项目设计标准高、工期要求紧、安全质量管理严格,对隧道支护提出了较高要求;同时,NEOM 新城位于沙漠地带,地质工作的研究基础薄弱,区域性工程地质资料相对缺失,缺少隧道施工案例。因此,准确判定隧道围岩级别,对隧道围岩进行分级分类,是保证项目安全生产和工程质量的重要先决条件。

针对海外项目在施工标准与管理流程方面的不同要求,本文基于挪威法隧道施工的工艺特点,对 Q 值围岩分级法进行深入研究,并根据围岩特征对不同支护类型的支护参数进行设计,建立了一套适用于不同围岩等级的支护体系,并在 NEOM 隧道

* 中国铁建股份有限公司科技研发计划(2020-B22)

[作者简介] 方磊,助理工程师,E-mail: Fang. lei@ crcc. cn

[收稿日期] 2024-01-30

支洞项目的应用中验证了其安全性和可行性。

1 工程概况

1.1 项目概况

NEOM 隧道支洞项目项目包括 6 条支洞,总长度为 8 415m(含明洞),设计为马蹄形断面,断面尺寸为 11.69m×8.62m,采用挪威法工艺,钻爆法施工。隧道埋深约 20~380m,洞身地层主要为元古代花岗岩和寒武系砂岩。本项目典型断面尺寸如图 1 所示。

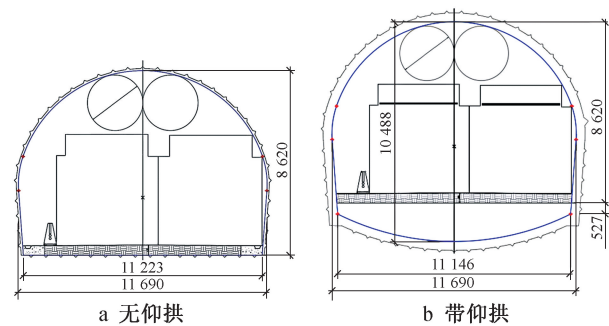


图 1 典型断面尺寸
Fig. 1 The typical section size

1.2 地质工作情况

在地质勘察阶段对基础地质资料工作的研究不足,设计文件中对不良地质体的判断不准确。挪威隧道施工法依据地质素描判定的 Q 值划分围岩类别,直接确定工程对应的支护结构参数,针对不良地质体的超前预测手段较为单一。为保证隧道安全生产及施工质量,从超前预测、掌子面判定、隐蔽工程记录等方面,形成了“超前探孔-地质素描-TDMS 隧道文件管理系统”的地质工作流程(见图 2)。针对超前探孔在爆破开挖前识别出的潜在不良地质体,采用 TSP 超前地质预报^[3],进一步确认掌子面前方的地质情况,必要时进行超前支护;重视隐蔽工程的记录工作,以 50m 为周期,绘制隧道纵向地质剖面图及节理极坐标图等,作为 Q 值判定的补充资料,收集汇总至 TDMS(tunnel data management system)中。

1.3 开挖支护工序分析

根据 Q 系统判定结果,围岩稳定性由强到弱,支护类型分为 AD-1~AD-5;其中施工占比较高的 AD-1~AD-3,无仰拱封闭,采用全断面爆破开挖法,单个爆破循环进尺 3~5m,主要采用喷射混凝土加注浆锚杆进行支护,混凝土喷射厚度为 50~100mm。爆破开挖的单循环时间为 20h 左右,爆破开挖与支护工序如图 3 所示。

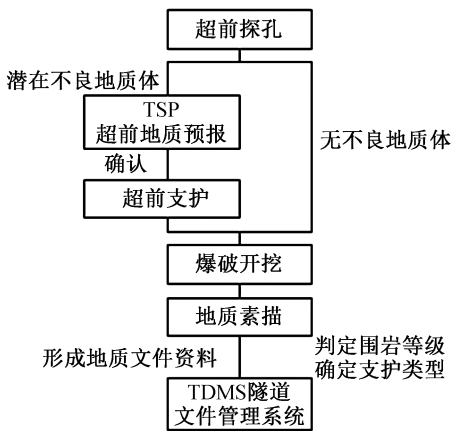


图 2 NEOM 隧道项目地质工作流程
Fig. 2 Geological workflow of NEOM tunnel

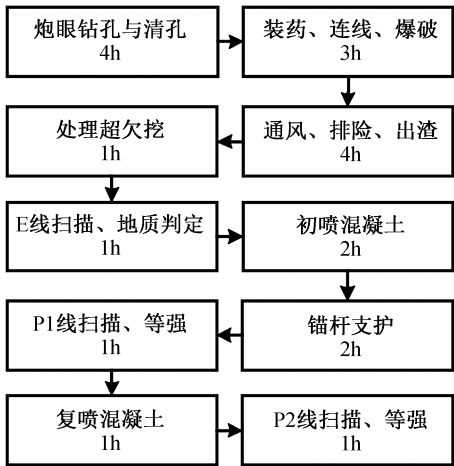


图 3 开挖支护工序
Fig. 3 Excavation support process

2 Q 值围岩分级法分析

2.1 计算方法

根据挪威岩土工程研究所发布的 2015 版 Q 系统使用手册, Q 值的计算包含 6 个取值参数,计算公式如下:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

式中: RQD 为岩体质量指标(钻探岩芯取样率); J_n 为节理组数; J_r 为节理粗糙系数; J_a 为节理蚀变系数; J_w 为节理水折减系数; SRF 为应力折减系数;其中, $\frac{RQD}{J_n}$ 代表了岩体完整性或尺寸, $\frac{J_r}{J_a}$ 代表了岩块间抗剪强度, $\frac{J_w}{SRF}$ 代表了岩体主动应力。

Q 值范围为 0.001~1 000,划分为 9 个质量等级^[4], Q 值由小到大,分别代表围岩质量从极差的膨胀性岩石到极好的坚硬完整岩体,如表 1 所示。

表 1 Q 系统围岩分级
Table 1 Q-system rock classification

Q 值	0.01	0.1	1	4	10	40	100	400	1 000
围岩等级	特别差	极差	非常差	差	一般	好	非常好	极好	特别好

2.2 分类参数取值

2.2.1 岩体质量指标 RQD

岩体质量指标 RQD 定义为钻进回次中大于 10cm 的柱状岩芯长度之和与当次进尺的百分比,通常以 5 为间隔取值。在野外环境下,常采用单位岩体的节理数目进行计算^[5]:

$$RQD = 115 - 3.3J_v \tag{2}$$

式中: J_v 为单位岩体的节理数目。RQD 取值如表 2 所示。

表 2 RQD 取值标准
Table 2 Standard of RQD value

等级	质量等级	判定标准	RQD 值
A	很差	>27 个节理/m ³	0~25
B	差	20~27 个节理/m ³	25~50
C	一般	13~19 个节理/m ³	50~75
D	好	8~12 个节理/m ³	79~90
E	很好	0~7 个节理/m ³	90~100

2.2.2 节理组数 J_n

相同时期内由同一构造作用所形成的相互平行或近于平行的节理,称为节理组;无规律出现间隔数米的节理称为随机节理^[6]。在隧道施工中,节理组数 J_n 的取值,根据掌子面及拱顶的节理组数量确定, J_n 的取值并不简单等于节理组的数量,在隧道交叉口取 $3J_n$,在隧道洞口取 $2J_n$,具体取值标准如表 3 所示。

2.2.3 节理粗糙系数 J_r

节理的形状、节理壁的光滑程度、节理间的接触方式,将影响岩体的整体强度。节理摩擦特性取决于节理壁的特征,通常使用“粗糙”“光滑”等术语,对节理在小尺度(mm,cm)的粗糙度进行描述;使用“起伏”“平直”等术语,对节理在大尺度(m)的粗糙度进行描述。

在计算 Q 值时,需选择与开挖稳定性相关的最不利节理组的 J_r 值(考虑节理组走向与洞室轴线间的关系,并不一定为最小值),即此时节理剪切最可能发生。如果相关节理组的平均间距大于 3m,则 J_r 取值可增加 1.0,平直、光滑的线状节理抗剪强度低, J_r 可取 0.5,具体取值标准如表 4 所示。

2.2.4 节理蚀变系数 J_a

除节理粗糙度外,节理充填物的特性对岩块间抗剪强度的影响也尤为重要^[7],分类取决于填充物

表 3 J_n 取值标准
Table 3 Standard of J_n value

等级	判定标准	J_n
A	整体块状,无节理或极少节理	0.5~1
B	1 组节理	2
C	1 组节理并有随机节理	3
D	2 组节理	4
E	2 组节理并有随机节理	6
F	3 组节理	9
G	3 组节理并有随机节理	12
H	4 组节理以上,严重节理化,岩石呈碎块状等	15
J	碎裂岩石,似土状	20

表 4 J_r 取值标准
Table 4 Standard of J_r value

节理壁接触类别	判定标准	J_r
a 节理壁直接接 触 或 b 错动 10cm 前 节理壁 能直接接 触	A 不连续节理	4.0
	B 粗糙或不规则的,起伏的	3.0
	C 平滑的,起伏的	2.0
	D 光滑的,起伏的	1.5
	E 粗糙或不规则的,平直的	1.5
	F 平滑的,平直的	1.0
	G 光滑的,平直的	0.5
c 错动时节理壁 不能直接接 触	H 含有厚度足以阻碍节理壁接 触的黏土带	1.0
	J 含有厚度足以阻碍节理壁接触 的砂质、砾质或碎裂带	1.0

的粗糙度和厚度。对于光滑的节理,填充 1mm 就足以防止岩壁接触;然而,对于粗糙和起伏的节理,可能需要几毫米甚至几厘米。

填充矿物的类型及其特性对于 J_a 值的推导具有决定性作用。水是否会软化矿物质填充物也很重要,可以通过将矿物质样品放入水中进行测试。由于在某些黏土中只需要少量的水即可引起膨胀,因此通常会给出高 J_a 值。

必须评估给定位置所有节理组的 J_a 值。在计算 Q 值时,必须使用对开挖稳定性最不利节理组的 J_a 值(考虑节理组走向与洞室轴线间的关系,并不一定为最大值),即最有可能发生剪切的节理组。 J_a 的具体取值标准如表 5 所示。

2.2.5 节理水折减系数 J_w

节理裂隙水的存在会软化或冲掉节理间的矿物充填物,减少节理面上的摩擦,从而降低围岩强度。水压可以降低节理壁上的法向应力,使岩块更容易剪切^[8]。Q 系统通过节理裂隙水折减系数 J_w ,描述地下水对围岩质量的影响,根据掌子面的渗水、滴水的流量及流速确定,在判定 J_w 时,应综合考虑地面降水、隧道埋深、封闭方法和排水措施等,具体取值标准如表 6 所示。

表 5 J_a 取值标准
Table 5 Standard of J_a value

节理壁接触类别	节理充填特性	残余摩擦角 $\Phi_r/(\circ)$	J_a
I 节理面接触良好	A 节理紧密接触,充填物未软化	—	0.75
	B 节理壁未变质,仅有色变	25~35	1
	C 节理面轻微蚀变,无软化矿物盖层、砂粒、松散黏土等充填	25~30	2
	D 泥质或砂质薄层,黏土碎屑	20~25	3
	E 软化或低摩擦黏土矿物覆盖层	8~16	4
II 节理受剪面存在 10cm 位移,且节理面相接触	F 砂质颗粒、无黏土及岩石碎屑	25~30	4
	G 强超固结、非软化黏土充填物	16~24	6
	H 中、低超固结黏土充填物	12~16	8
	J 膨胀黏土充填物	6~12	8~12
	K 碎裂或破碎岩石,强烈超固结的	16~24	6
III 受剪节理面不接触或破碎带	L 黏土、碎裂或破碎岩石的区域或带,中/低度超固结的或软化填充物	12~16	8
	M 膨胀性黏土, J_a 取决于膨胀黏土大小颗粒的百分比	6~12	8~12
	N 厚的连续区域或黏土带,强烈超固结的	12~16	10
	O 厚的连续区域或黏土带,中/低度超固结的	12~16	13
	P 厚的连续区域或黏土带, J_a 取决于膨胀黏土大小颗粒的百分比	6~12	13~20

表 6 J_w 取值标准
Table 6 Standard of J_w value

等级	判定标准	J_w
A	开挖时干燥或有局部小水流(潮湿或极少水滴)	1
B	中等水流,偶有冲出节理充填物(许多水滴或“雨”);集中的水流从钻孔中流出	0.66
C	含未充填节理的坚硬岩石中有大水流或高压水	0.5
D	大水流或高压水,节理填充物大量流出	0.33
E	特大水流或高压水,随时间递减,导致材料流失并可能塌陷	0.2~0.1
F	特大水流或高压水持续存在而没有明显的衰减,导致材料流失并可能塌陷	0.1~0.05

2.2.6 应力折减系数 SRF

一般来说,SRF 描述了地下岩壁周围的应力和岩石强度之间的关系。应力的影响通常可以在掌子面直接观察得到,如剥落、板裂、变形、挤压和块体释放等。然而,在压力现象可见之前可能会经过一些时间。可以测量岩体的应力和强度,然后根据岩石单轴抗压强度 σ_c 与主应力 σ_1 之间的关系或最大切向应力 σ_θ 与 σ_c 之间的关系来计算 SRF。在地质勘察阶段,SRF 可以根据覆盖层和地形特征或区域性地质构造的经验来规定。SRF 取值标准如表 7 所示。

2.3 Q 值算例

以 4 号支洞第 405 循环为例,进行 Q 值计算。

1) 岩体质量指标 RQD

根据地质素描及计算结果,单位岩体的节理数目 $J_v=18.75$,因此, $RQD=110-2.5J_v=63.125$ 。

2) 节理组数 J_n

根据地质素描结果,出现 J1,J2,J3 3 组节理及 JR1,JR2 随机节理,根据取值标准,节理组数 $J_n=12$ 。

3) 节理粗糙系数 J_r

根据现场地质素描,地质情况为第 2 类,根据“b 错动 10cm 前节理壁能直接接触;E 粗糙或不规则的,平直的”,节理粗糙系数 $J_r=1.5$ 。

4) 节理蚀变系数 J_a

根据现场地质素描,地质情况应归为第 1 类节理壁直接接触(无矿物充填或只有薄膜覆盖),节理壁轻微变质,无软化矿物盖层、砂粒、松散黏土等充填,节理蚀变系数 $J_a=2$ 。

5) 节理水折减系数 J_w

根据现场地质素描,为开挖时干燥或有局部小水流(潮湿或极少水滴),节理水折减系数 $J_w=1$ 。

6) 应力折减系数 SRF

根据现场地质素描,属于坚硬岩石,主要是岩石应力问题,故应力折减系数 SRF 取值为 1。综上可得 Q 值:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} = 3.93 < 10$$

支护类型属于 AD-3,可细分为 AD-3A。

3 围岩支护体系设计

3.1 围岩支护类型划分

每个循环处理完欠挖后,由专业地质工程师进行地质素描,对 Q 系统中的各分类参数进行赋值并计算 Q 值,根据地质素描报告和 Q 值确定支护类型与参数。本项目根据 Q 值划分的支护类型及占比如表 8 所示,各支护类型的支护参数如表 9 所示。

3.2 典型支护类型与支护参数

由表 8 可知,本项目最常见的支护类型为 AD-2 和 AD-3,如图 4,5 所示。支护类型 AD-2,单循环设计进尺为 5m,全断面开挖,喷射混凝土厚度为

表 7 SRF 取值标准

Table 7 Standard of SRF value

压力情况类别	节理充填特性	σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	SRF
I 软弱带穿切开挖体,隧洞开挖时可能引起岩体松动	A 含黏土或化学分解岩屑的软弱带,围岩非常松散			10
	B 在具有松散围岩(任意深度)的合格无黏土岩石中的短截面内的多个剪切带			7.5
	C 具有或不具有黏土或化学分解岩石的单个薄弱区域(深度 $\leq 50\text{m}$)			5
	D 松动张开的节理,在任何深度上,严重节理化或呈小块状等			5
	E 具有或不具有黏土或化学分解岩石的单个薄弱区域(深度 $>50\text{m}$)			2.5
II 坚固岩体的岩石应力	F 低应力,近地表,张开节理	>200	<0.01	2.5
	G 中等应力,最利于稳定	$200\sim 10$	$0.01\sim 0.3$	1
	H 高应力,非常紧密结构,一般利于稳定	$10\sim 5$	$0.3\sim 0.4$	$0.5\sim 2$ $2\sim 5^*$
	J 块状岩体,1h 后产生中度剥落或板裂	$5\sim 3$	$0.5\sim 0.65$	$5\sim 50$
	K 块状岩体,几分钟内产生板裂或岩爆	$3\sim 2$	$0.65\sim 1$	$50\sim 200$
	L 块状岩体,严重岩爆,产生直接的动力变形	<2	>1	$200\sim 400$
III 挤压性岩石,高应力影响下塑性流动	M 轻度性挤压		$1\sim 5$	$5\sim 10$
	N 严重性挤压		>5	$10\sim 20$
IV 膨胀性岩石,化学膨胀活动	O 轻度性膨胀			$5\sim 10$
	P 严重性膨胀			$10\sim 15$

注: * 表示当高应力岩石与薄弱平面结合,是否稳定取决于应力的方向,若应力方向不利于稳定,SRF 取值为 2.5

表 8 Q 值划分支护类型及占比

Table 8 Support type of Q value and percentage

支护类型	Q 值	1 号洞/m	2 号洞/m	3 号洞/m	4 号洞/m	5 号洞/m	6 号洞/m	暗洞长度/m	占比/%
AD-1	>40	207	200	375	565	307	115	1 769	21.0
AD-2	$10\sim 40$	225	252	512	668	389	410	2 456	29.2
AD-3	$0.4\sim 10$	367	415	827	1 168	674	244	3 695	43.9
AD-4	$0.05\sim 0.4$	20	52	205	104	23	0	404	4.8
AD-5	<0.05	12	14	35	18	12	10	101	1.2
合计		831	933	1 954	2 523	1 405	779	8 425	100.0

表 9 各支护类型的支护参数

Table 9 Support parameters for each support type

支护类型	Q 值	开挖方式	最大进尺/m	封闭仰拱	混凝土初喷厚度/mm	锚杆长度与间距	格栅钢架/型钢钢架	预留收敛量/mm		钢筋网
								覆盖层 $<150\text{m}$	覆盖层 $\geq 150\text{m}$	
AD-1	>40	全断面	5	无	50	点锚杆		10	30	
AD-2A	$20\sim 40$		5		75	$3\ 000\text{mm}@2.5\text{m}$		25	95	
AD-2	$10\sim 20$		5		75	$3\ 000\text{mm}@2.1\text{m}$	—	25	95	—
AD-3A	$2\sim 10$		5		100	$3\ 000\text{mm}@1.9\text{m}$		35	155	
AD-3	$0.4\sim 2$		3		100	$3\ 000\text{mm}@1.5\text{m}$		35	155	
AD-4A	$0.05\sim 0.4$	环形开挖	1.5	临时仰拱	250	—	格栅钢架	25	—	—
AD-4B		预留核心土				$3\ 000\text{mm}@1.5\text{m}$	P95-25-30	—	30	单层 A393
AD-4C		上下台阶法				$3\ 000\text{mm}@1.5\text{m}$	@ 1 500mm	—	75	双层 A393
AD-5A	<0.05	环形开挖	1	临时仰拱	300	—	型钢钢架	100	—	—
AD-5B		预留核心土					245UC107			
							@ 1 000mm			
AD-5C	<0.05	上下台阶法	1	有	300	$3\ 000\text{mm}@1.5\text{m}$	格栅钢架		30	双层 $\phi 12$
AD-5D						$6\ 000\text{mm}@1.0\text{m}$	P95-25-30	—	40	钢筋间距
AD-5E						$6\ 000\text{mm}@1.0\text{m}$	@ 1 000mm		50	100mm

75mm,锚杆间距 2.1m;支护类型 AD-3,单循环设计进尺为 3m,全断面开挖,喷射混凝土厚度为 100mm,锚杆间距 1.5m。

此外,针对软弱岩土体或局部超挖量过大的情况,采用 L 形钢筋固定钢筋网片的方法,防止岩体掉块、崩落。

4 结语

Q 系统分类法能够对隧道围岩质量进行定量综合分析,在实际项目应用中具有较高的适用性和可操作性。同时,支护等级的划分与支护参数的选择与 Q 值密切相关,当围岩等级较好时可主要使用“注浆锚杆+喷射混凝土”的支护方式;当围岩等级

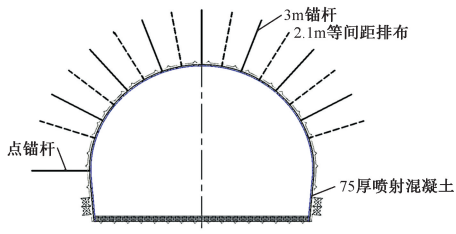


图 4 AD-2 支护类型
Fig. 4 Support type AD-2

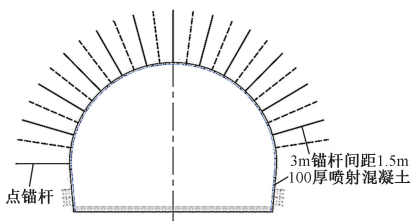


图 5 AD-3 支护类型
Fig. 5 Support type of AD-3

较弱时,还需要借助“格栅/型钢钢架+钢筋网片”的方式确保支护体系的安全。

随着中国企业越来越多地在海外承建隧道项目,沙特 NEOM 隧道支洞项目对 Q 系统分类法围岩判定与支护体系的探索和创新,不仅有力保证了项目的施工安全与施工质量,也为今后同类项目的顺利实施积累了宝贵经验。

参考文献:

[1] 马伟斌. 铁路山岭隧道钻爆法关键技术发展及展望[J]. 铁道学报,2022,44(3):64-85.
MA W B . Development and prospects of key technologies for drilling and blasting of railway mountain tunnels[J]. Journal of the China railway society, 2022, 44 (3) : 64-85.

[2] 杨先全. 铁路隧道围岩国标 BQ 与挪威 Q 值分级法对比与工程实践[J]. 施工技术,2020,49(S2):183-187.
YANG X Q. Comparison and engineering practice between the national standard BQ and Norwegian Q-value classification method for railway tunnel surrounding rock [J]. Construction technology,2020,49(S2):183-187.

[3] 王楷翔,宫亮. 碳酸盐岩地区隧道综合超前地质预报方法研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52 (10) : 83-89.
WANG K X, GONG L. Study on comprehensive advanced geological prediction method of tunnel in carbonate rock area[J]. Construction technology,2023, 52 (10) : 83-89.

[4] 汪志涛,李晓昭,章杨松,等. 基于岩体质量指标 Q 分类系统的风险分析方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(3): 274-279.
WANG Z T, LI X Z, ZHANG Y S, et al. Risk analysis method based on rock mass quality index Q classification system [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2008, 28(3):274-279.

[5] 胡修文,胡盛明,卢阳,等. 岩体体积节理数的统计方法及其在围岩分级中的应用[J]. 长江科学院院报, 2010, 27

(6) :30-34.
HU X W, HU S M, LU Y, et al. Statistical method for the number of volume joints in rock mass and its application in rock mass classification [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2010, 27(6) :30-34.

[6] 金立平. 中国公路隧道围岩分级法和挪威 Q 值法及南非 RMR 法对应关系探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2013(3) :203-205,224.
JIN L P. Discussion on the corresponding relationship between China's highway tunnel surrounding rock classification method, Norway's Q-value method, and South Africa's RMR method [J]. Urban roads bridges & flood control, 2013 (3) : 203-205,224.

[7] 赵勇,刘大刚. 特殊地质条件下隧道工程高性能支护体系[J]. 中国铁路,2020(12) :20-34.
ZHAO Y, LIU D G. High performance support system for tunnel engineering under special geological conditions [J]. China railways, 2020(12):20-34.

[8] 康小兵,许模,陈旭. 岩体质量 Q 系统分类法及其应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(4):91-95.
KANG X B, XU M, CHEN X . Q-system classification method for rock mass quality and its application [J]. The Chinese journal of geological hazard and control, 2008, 19(4):91-95.

(上接第 28 页)

[4] KONONENKO M, KHOMENKO O, SAVCHENKO M, et al. Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives [J]. Mining of mineral deposits, 2019, 13(3): 22-30.

[5] 邵晓宁. 炮孔水压爆破孔壁压力计算[J]. 煤矿爆破, 2005 (4) : 10-12.
SHAO X N. The calculation on hole wall shock pressures of water-pressure blasting [J]. Coal mine blasting, 2005 (4) : 10-12.

[6] 卢文波,周创兵,陈明,等. 开挖卸荷的瞬态特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2184-2192.
LU W B, ZHOU C B, CHEN M, et al. Research on transient characteristics of excavation unloading [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(11): 2184-2192.

[7] 张宝平,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京:兵器工业出版社,2009.
ZHANG B P, ZHANG Q M, HUANG F L. Theory of detonation physics [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2009.

[8] 刘磊,汪旭光,杨溢,等. 不同敏化材料的乳化炸药抗深水压力性能的实验研究[J]. 爆破, 2010, 27(2): 10-13.
LIU L, WANG X G, YANG Y, et al. Experimental study on compression resistance characteristic of emulsion explosives with different sensitizer in deep water [J]. Blasting, 2010, 27(2) : 10-13.

[9] LEE Y H, LEE S C, LEE E S. The effect of performance on loading impact of emulsion explosive in long vertical borehole [J]. Explosives and blasting, 2007, 25(1) : 45-52.