

TBM 施工隧道围岩分级方法研究

何发亮 谷明成 王石春

(中铁西南科学研究院 成都 610031)

摘要 随着隧道工程建设的发展,全断面隧道掘进机(TBM)在隧道施工中必将占有越来越重要的地位,传统的隧道围岩分级难以满足 TBM 施工条件下的隧道施工需要。因此,研究 TBM 施工条件下的隧道围岩分级,是采用 TBM 进行隧道施工的需要。结合西(安)—安(康)铁路秦岭隧道 TBM 施工研究,提出了 TBM 施工条件下的隧道围岩分级方法。

关键词 TBM 隧道施工, 围岩, 分级

分类号 U 452.1⁺2

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)09-1350-05

1 前言

当今流行的隧道围岩分级(或称分类)方法,大多数乃是针对隧道围岩稳定性等级的划分而提出的,难以满足 TBM 施工条件下的隧道施工需要已是不争的事实。TBM 施工条件下的隧道围岩分级主要针对工程岩体的可掘进性,即根据围岩的主要地质因素与 TBM 工作效率的关系来划分。因此,纯粹套用以评估围岩稳定性为主的隧道围岩分级方法来进行 TBM 施工条件下的隧道围岩等级划分显然是不恰当的。目前,国内外尚未有一个公认的 TBM 施工条件下的隧道围岩分级方法。因此,作者结合我国目前最长的单线铁路隧道——秦岭特长隧道工程的施工,开展了 TBM 施工条件下的隧道围岩分级方法的研究。该研究无论是对隧道围岩分级方法的进一步拓展,还是对指导以后的 TBM 隧道工程施工,均将具有重要的科学技术价值和实用价值。

2 TBM 工作条件(工作效率)与隧道围岩地质因素间的关系

隧道掘进机(TBM)的设计制造及使用效率(工作条件或称工作效率)与隧道围岩的地质因素密切相关,这是国内外同行的共识。总的来说,地质因素对 TBM 工作条件的影响主要表现为两大方面:

首先是确定隧道围岩的总体地质环境是否适于采用 TBM 进行施工;其次是决定围岩稳定性及坚硬程度的主要地质参数对 TBM 工作效率的影响。前者属隧道工程项目规划和初步设计阶段应解决也即应作出选择的问题,而后者则是需要在 TBM 施工实施前和实施中应加以研究解决的问题,也即本文研究的重点。

TBM 施工能否尽可能高地发挥其应有的作用,并达到安全、快速掘进的目标,主要取决于 TBM 的工作条件,即取决于 TBM 的工作对象——隧道工程岩体(隧道围岩)的工程地质条件的好坏,以及人们对隧道围岩 TBM 开挖特性认识基础上所进行的与相应地质条件相适应的 TBM 配套机具的准备是否充分。

2.1 岩石的单轴抗压强度(R_c)

众所周知,TBM 是利用岩石的抗拉强度和抗剪强度明显小于其抗压强度这一特征而设计的。一般采用岩石的单轴抗压强度(R_c)来判断 TBM 工作条件下隧道围岩开挖的难易程度。图 1 是岩石的单轴抗压强度(R_c)与 TBM 掘进速度间的相关关系。

显然, R_c 越低,TBM 的掘进速度越高,则掘进越快; R_c 越高,TBM 的掘进速度越低,则掘进越慢。但是, R_c 太低,TBM 掘进后围岩的自稳时间极短,甚至不能自稳。 R_c 值在一定范围内时,TBM 的掘进既能保持一定的速度,又能使隧道围岩在一定时间内保持自稳,这就是当前大多数掘进机适用

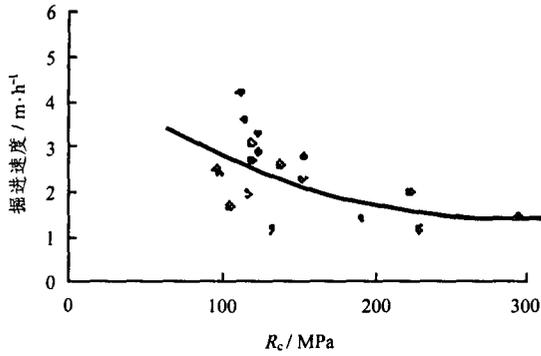


图1 岩石的单轴抗压强度(R_c)与 TBM 掘进速度间的相关关系

Fig.1 Relationship between R_c and TBM cutting velocity

于岩石的单轴抗压强度 R_c 值为 30~150 MPa 的中等坚硬岩石和坚硬岩石的主要原因。

2.2 岩石的硬度和耐磨性

一般来说, 岩石的硬度越高, 其耐磨性越好, 对 TBM 刀具的磨损就越大。图 2 揭示了 TBM 刀具磨损与 NCB 锥体硬度计指数间的关系。

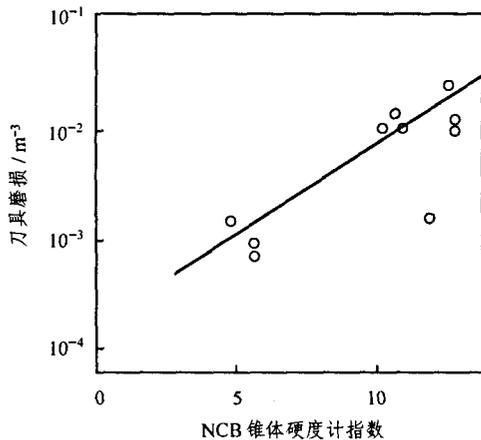


图2 TBM 刀具磨损与 NCB 锥体硬度计指数间的关系

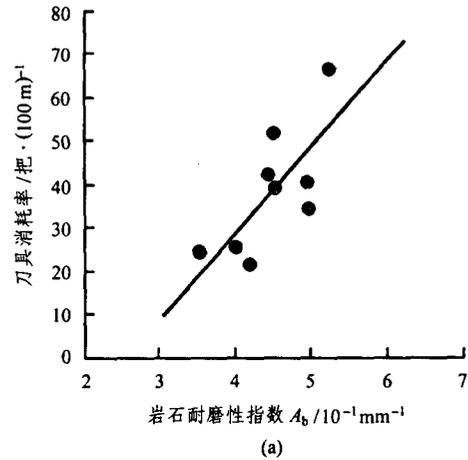
Fig.2 Relationship between TBM cutting tool loss and NCB index

图 3(a)和(b)分别为秦岭隧道进口端混合片麻岩和出口端含绿色矿物混合花岗岩掘进 TBM 刀具消耗率与岩石耐磨性指数 A_b 间的相关关系。

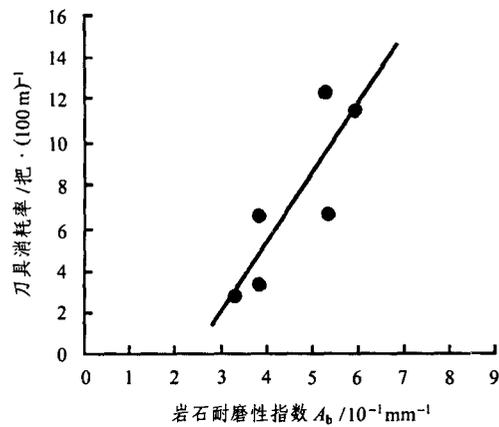
2.3 岩体结构面发育程度(完整程度)

岩体中的结构面(节理、层理、片理、大小断层)的发育程度, 即岩体的裂隙化程度或岩体的完整程度是影响 TBM 工作效率的又一重要的地质因素。

纵观各表征岩体完整程度的指标, 较普遍选用的有岩体完整性系数 K_v 、岩体体积节理数 J_v 、节理平均间距 d_p 等。



(a)



(b)

图3 TBM 刀具消耗率与岩石耐磨性指数 A_b 间的相关关系
Fig.3 Relationship between TBM cutting tool consumption and wear-resistant index

岩体结构面越发育, 密度越大, 节理间距越小, 完整性系数越小, TBM 掘进速度就越高。但当岩体结构面特别发育, 结构面密度极大, 也即结构面间距极小, 岩体完整性系数很小时, 岩体已呈碎裂状或松散状, 岩体强度极低, 作为隧道工程岩体已不具自稳能力, 在此类围岩中进行 TBM 的施工, 其掘进速度非但不会提高, 反会因对不稳定围岩进行的大量加固处理而大大降低(如图 4 所示)。

2.4 其他因素

除上述影响 TBM 工作效率的主要地质因素外, 岩体主要结构面或称优势结构面的产状与隧道轴线间的组合关系、围岩的初始地应力状态、岩体的含水、出水状态等对 TBM 工作效率也有一定的影响。岩体主要结构面或称优势结构面的产状与隧道轴线间的组合关系对 TBM 工作效率的影响, 主要表现为组合关系对围岩稳定性的影响, 进而影响 TBM 的工作效率。

当围岩处于高地应力状态下, 且围岩为坚硬、

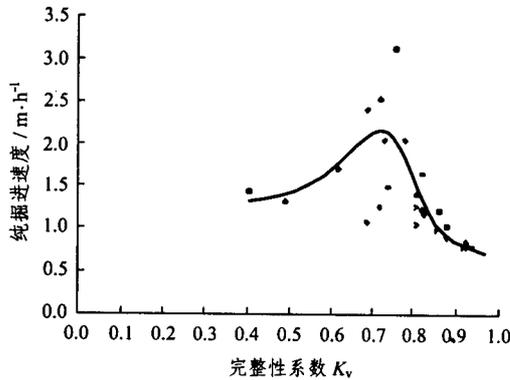


图4 秦岭隧道I线进口端岩体完整性系数 K_v 与TBM纯掘进速度的关系

Fig.4 Relationship between K_v and TBM cutting velocity in the entrance of line I of Qingling tunnel

脆性、较完整或完整岩体时，极有可能发生岩爆灾害，灾害严重时，将危及TBM及施工人员的安全；若围岩为软岩，则围岩将产生较大的变形。二者均将给TBM的掘进施工带来极大的困难。

岩体的含水、出水状态对TBM工作效率的影响视含水量和出水量的大小及含、出水围岩的范围和含、出水围岩是硬质岩还是软质岩而定。一般来说，富含水和涌漏水地段的围岩强度会有不同程度的降低，特别是软质岩的强度要降低很多，致使围岩的稳定性降低，影响TBM的工作效率。此外，大量的隧道涌漏水，必将恶化TBM的工作环境，降低TBM的工作效率。

3 TBM 施工条件下的隧道围岩分级方法与步骤

3.1 分级地质参数的确定

如前所述，作者选取岩石的单轴抗压强度、岩体的完整程度(裂隙化程度)、岩石的耐磨性和岩石的硬度等4个地质参数来进行TBM工作条件下的隧道围岩的分级。

3.2 隧道围岩等级划分方法

如前所述，TBM施工条件下隧道围岩等级的划分，目前在国内外尚未有较为成熟和统一的方法，多数国家采用在围岩稳定性分级的基础上再按影响TBM工作条件的主要地质参数指标进行详细划分。因此，作者采用围岩稳定性等级与TBM工作条件等级相结合的方法来进行TBM施工条件下的隧道围岩分级，即在进行隧道围岩稳定性分级的基础上，将每个围岩等级的TBM工作条件予以划定。

参照文[1]的五级划分法，作者根据工程岩体基本质量 BQ (或 CQ) 值，将岩体划分成五个级别，再根据岩石的单轴抗压强度、完整程度(裂隙化程度)、耐磨性和硬度这4个影响TBM工作条件(工作效率)的主要地质参数指标，将TBM施工条件下的隧道围岩由好到极差分成A~D共4级(A——工作条件好，B——工作条件一般，C——工作条件差，D——工作条件极差或称不宜采用TBM施工)，如表1所示。

3.3 TBM 施工条件下隧道围岩等级划分步骤

首先，按《工程岩体分级标准》(GB50218-94)，根据工程岩体基本质量 BQ (或 CQ) 值，将岩体划分成五个级别。

工程岩体基本质量 BQ 指标由下式计算：

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v$$

式中： BQ 为工程岩体基本质量， R_c 为岩石单轴抗压强度(MPa)， K_v 为岩体完整性系数。

当 $R_c > 90K_v + 30$ 时，以 $R_c = 90K_v + 30$ 和 K_v 求 BQ ；当 $K_v > 0.04R_c + 0.4$ 时，以 $K_v = 0.04R_c + 0.4$ 和 R_c 求 BQ 。

在施工阶段，根据地下水状态(K_1)、初始地应力状态(K_2)、隧道轴线与主要结构面产状的组合关系(K_3)等影响因素对 BQ 进行修正^[2~4]，具体修正方法按《工程岩体分级标准》(GB50218-94)正文的附录D进行，具体见下式：

$$[BQ] = BQ - 100(K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n)$$

第二步，在围岩基本质量级别的基础上，根据岩石的单轴抗压强度、岩体的完整程度(裂隙化程度)、岩石的耐磨性和岩石的硬度这4个影响TBM工作条件(工作效率)的主要地质参数指标，将TBM工作条件下的隧道围岩由好到坏分为4个级别，如表1所示。

根据《工程岩体分级标准》(国标GB50218-94)，岩石单轴抗压强度可分为坚硬岩、较硬岩、较软岩、极软岩和软岩等五级。对TBM的掘进而言，极坚硬岩和极软岩是不利的。前者的可掘进性差，对机具的磨损严重，纯掘进速度慢；而后者则因掌子面及支垫层强度不足，围岩极易掉块、坍塌，使TBM掘进受阻，掘进速度慢。岩石单轴抗压强度 R_c 在30~200 MPa时，有利于TBM的掘进。经试验研究，作者将 $R_c > 200$ MPa 的岩石划分为极坚硬岩石。

采用《工程岩体分级标准》(国标GB50218-94)，根据岩体的完整性系数 K_v 或岩体体积节理数 J_v 值

表 1 TBM 施工条件下的隧道围岩分级表
Table 1 Classification of tunnel rockmass under TBM construction condition

围岩分级	分级主要参数指标				TBM 工作条件下的围岩等级
	岩石单轴抗压强度 R_c / MPa	岩体完整性系数 K_v	岩石耐磨性指数 A_b / $10^{-1}mm^{-1}$	岩石凿碎比功 a / $N \cdot m \cdot cm^{-3}$	
I	80~200	0.75~0.85	<5	<700	I _B
		>0.85	—	—	I _C
	≥200	>0.75	—	—	
II	80~200	0.55~0.75	<5	<600	II _A
			5~6	600~700	II _B
	≥6		≥700	II _C	
III	60~120	0.45~0.65	<5	<600	III _A
			5~6	600~700	III _B
	≥6		≥700	III _C	
IV	30~60	0.40~0.45	—	—	IV _B
	16~60	0.25~0.40	—	—	IV _C
V	<15	<0.25	—	—	V _D

的大小, 将隧道围岩岩体完整程度(或称岩体节理裂隙发育程度或岩体裂隙化程度^[5])分成完整、较完整、较破碎、破碎和极破碎等五级。试验研究表明, $K_v \geq 0.85$, 且岩石 $R_c > 100$ MPa 时, TBM 的掘进速度明显降低, 特别当岩石 $R_c > 200$ MPa 时, TBM 的掘进速度更慢; 当 K_v 值为 0.40~0.45 或 $K_v \leq 0.40$ 时, TBM 均难于掘进; $K_v = 0.40 \sim 0.85$, 且岩石 $R_c = 30 \sim 200$ MPa 时, 较有利于 TBM 的掘进施工。

采用与岩石的单轴抗压强度相关性较好的专用钢针(CAI), 以其针头磨损值 A_b 的大小来表征隧道围岩的耐磨性, 根据专用钢针(CAI)针头的磨损值 A_b 的大小将岩石的耐磨性划分为五级, 如表 2 所示。

表 2 岩石的耐磨性等级划分
Table 2 Classification of rock wear-resistance

岩石耐磨性等级	$A_b / 10^{-1}mm^{-1}$
极低耐磨性	<3
低耐磨性	3~4
中等耐磨性	4~5
强耐磨性	5~6
特强耐磨性	>6

采用由凿击试验测定的凿碎比功 a 来评定岩石的坚硬度(表 3)。

$$a = A/V = NA_0 / (\pi d^2 H / 4)$$

式中: a 为凿碎单位体积的岩石所需要消耗的功 ($N \cdot m/cm^3$), A 为总冲击功 ($N \cdot m$), A_0 为单次冲击功 ($N \cdot m$), N 为冲击总次数, V 为破岩体积 (cm^3), d 为凿孔实际直径 (cm), H 为凿孔净深 (cm)。

表 3 岩石凿碎比功分级
Table 3 Classification of rock cutting effect

级别	凿碎比功 $a / N \cdot m \cdot cm^{-3}$	岩石的坚硬度
I	≤190	极软
II	200~290	较软
III	300~390	软
IV	400~490	硬
V	500~590	较硬
VI	600~690	很硬
VII	≥700	极硬

本围岩分级方案在秦岭特长隧道 I 线隧道围岩等级划分应用表明, 分级与实际情况基本吻合, 符合率达到 80% 以上, 起到了指导 TBM 隧道工程施

工的目的。

4 结 论

进行 TBM 施工条件下隧道围岩分级研究, 是指导 TBM 隧道工程施工的需要, 也是加快隧道施工速度、提高我国隧道修建技术水平的需要。

在围岩稳定性等级划分的基础上, 根据影响 TBM 工作条件的 4 个主要地质因素: 岩石的单轴抗压强度、岩体的完整程度(裂隙化程度)、岩石的耐磨性和岩石的硬度, 进行 TBM 施工条件下的隧道围岩分级, 符合 TBM 施工条件下隧道围岩分级主要应针对工程岩体可掘进性的原则要求。

随着采用 TBM 施工隧道的增多和 TBM 施工条件下的隧道围岩分级方案的不断完善, 其必将在今后的隧道 TBM 施工中起到越来越重要的作用。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国水利部. 工程岩体分级标准(GB50218-95)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995
- 2 Wang Shichun, Zhang Kecheng, Li Songrong. A proposal for rock classification in tunnel engineering[A]. In: Proc. IV Cony. IAEG[C]. New Delli: Springer, 1982, 2: 102~106
- 3 王石春, 陈光宗, 何发亮. 中国铁路隧道工程地质学的发展[J]. 铁道工程学报, 1996, (2): 48~54
- 4 尤大鑫, 黄成群, 刘厥森. 洞库爆破围岩分类[A]. 见: 中国地质学会工程地质专业委员会编. 全国第三次工程地质大会论文集[C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988, 545~550
- 5 张承娟. 水电工程声波围岩分类指标的探讨[A]. 见: 中国地质学会工程地质专业委员会编. 全国第三次工程地质大会论文集[C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988, 598~605

STUDY ON SURROUNDING ROCKMASS CLASSIFICATION OF TUNNEL CUT BY TBM

He Faliang, Gu Mingcheng, Wang Shichun

(Southwest Research Institute of China Railway Engineering, Chengdu 610031 China)

Abstract With the development of the tunneling engineering, the application of TBM will play a more important role in tunnel construction. As a matter of fact, the traditional surrounding rockmass classification can not meet the need of tunnel construction by TBM and the study of surrounding rockmass classification in tunnel excavation with TBM is necessary. Such a surrounding rockmass classification method is proposed with the practice in construction of Qinling tunnel and Xian—Ankang railway line.

Key words tunnel excavation by TBM, surrounding rockmass, classification