

文章编号: 1000-7598-(2006)10-1800-05

基于可拓理论的围岩稳定分类方法的研究

黄祥志¹, 余成学²

(1. 宁波市水利水电规划设计研究院, 浙江 宁波 315192; 2. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072)

摘 要: 在双护盾 TBM (tunnel boring machine) 的隧洞施工中, 将可拓理论与洞室围岩稳定评价相结合。基于碴料和掘进参数的地质编录所提供的地质信息, 选取了能够反映围岩稳定综合特性的评价指标, 确定围岩稳定类型和预测前方岩体情况。在物元理论、可拓集合论和关联函数运算的基础上, 建立了隧洞围岩稳定分类的可拓评价方法, 其中引进了隶属度的概念和一种定量的指标权重的确定方法, 并在山西引黄工程的双护盾 TBM 隧洞施工中用此分类方法对某两段围岩进行了稳定分类, 得到的稳定分类结果与实际情况吻合。

关 键 词: 围岩稳定分类; 可拓; 隶属度; 物元; 关联函数

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Research on methods of surrounding rock masses stability classification based on extension theory

HUANG Xiang-zhi¹, SHE Cheng-xue²

(1. Ningbo Municipal Planning, Design and Research Institute of Water Resources and Hydropower, Ningbo 315192, China;

2. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Unifying the extension theory and evaluation methods of tunnel surrounding rock masses stability, the surrounding rock masses stability types are determined synthetically by selecting some synthetical characteristic parameters that can reflect the stability of surrounding rock masses on the basis of the geological documentation of muck and the boring parameters of the tunnel boring machine (TBM) during the tunnel construction of double-shield TBM. The concept of membership degree and one kind of method that can determinate the selected parameters weight introduced, the extension evaluation method of tunnel surrounding rock masses stability classification is set up based on the operation of matter-element theory, extension set and dependent function. The surrounding rock masses stability classification of two sections of tunnels is carried on by applying the method based on the extension theory during the construction of double-shield TBM in the Yellow River Diversion Project of Shanxi province; and the rational result is in conformity with the reality.

Key words: surrounding rock masses stability classification; extension; membership degree; matter-element; dependent function

1 引 言

随着长大、深埋隧洞工程建设的发展, 双护盾 TBM 在我国隧洞施工中得到了广泛应用, 诸如近年来采用其施工的主要有引大入秦 30A、38 号隧洞, 山西省万家寨引黄工程总干线 6~8 号隧洞和南干线 4~7 号隧洞^[1, 2]等。超前地质预报方法可以获得的围岩信息, 以研究双护盾 TBM 施工条件下的隧洞围岩稳定分类。通常用于 TBM 施工的超前地质预报方法有: 利用平导地质情况推断; 利用出露的岩石、出碴的情况以及 TBM 掘进参数等; 利用超

前地质预报系统 (简称 TSP) 以及利用 TBM 上配备的超前钻机, 其中利用碴料和 TBM 掘进参数的地质编录, 综合确定围岩类型, 预测前方岩体情况在山西引黄工程中得到了初步应用^[1, 3]。但是, 应际工程应用中带有很强的经验性, 即人为因素影响比较大, 根据碴料和 TBM 掘进参数的地质编录也难以获得传统分类方法所需要的评价指标。能否从碴料和 TBM 掘进参数中抽象出几个对围岩稳定起决定性作用的评价指标, 再根据这些评价指标建立一个评价分类标准, 如果能够实现这个评价标准, 在很大程度上可消除人为因素影响, 能更客观、快捷

地确定围岩类型。

本文综合考虑双护盾 TBM 施工中碴料和掘进参数的地质编录, 因地制宜地选取评价指标, 尝试把可拓学理论应用于双护盾 TBM 施工中的围岩稳定分类中。

2 可拓学基础理论

可拓学^[4]是由我国学者蔡文于 1983 年提出的, 它始于不相容问题的转化规律和解决方法, 通过引进物元 $R=(N, C, V)$ (物, 特征, 量值), 并对其进行变换和运算, 定性和定量研究和解决不相容问题的规律和方法。可拓学的物元理论和可拓集合理论是围岩稳定评价的基础。

2.1 确定经典域

经典域可表示为

$$R_{ji} = (N_j, C_i, V_{ji}) = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & V_{j1} \\ & C_2 & V_{j2} \\ & \cdots & \cdots \\ & C_n & V_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \cdots & \cdots \\ & C_n & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, R_{ji} 为一个物元; N_j 为第 j 个评价类别 ($j=1, 2, \cdots, m$); C_i 为第 i 个评价指标 ($i=1, 2, \cdots, n$); V_{ji} 为第 j 个评价类别 N_j 关于第 i 个评价指标 C_i 所确定量值范围, 即经典域 $\langle a_{ji}, b_{ji} \rangle$ 。

2.2 确定节域

节域可表示为

$$R_{pi} = (N_p, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & V_{p1} \\ & C_2 & V_{p2} \\ & \cdots & \cdots \\ & C_n & V_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \cdots & \cdots \\ & C_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, p 为评价类别的全体; V_{pi} 为 p 关于 C_i 所取的量值范围, 即 $\langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 为评价指标 C_i 所确定取值范围, 为 p 的节域。

2.3 确定待评物元

对待评的事物, 将所收集到的数据用物元 R_t 表示, 即

$$R_t = (T, C_i, V_i) = \begin{bmatrix} T & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \cdots & \cdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 V_i 为 T 关于 C_i 的量值, 即待评事物的所有数据。

2.4 确定待评物元各评价指标关于各稳定类别的关联度

各单项评价指标关于各稳定类别的关联度为

$$K_j(V_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(V_i, V_{ji})}{|V_{ji}|}, & V_i \in V_{ji} \\ \frac{\rho(V_i, V_{ji})}{\rho(V_i, V_{pi}) - \rho(V_i, V_{ji})}, & V_i \notin V_{ji} \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$\rho(V_i, V_{ji}) = \left| V_i - \frac{a_{ji} + b_{ji}}{2} \right| - \frac{b_{ji} - a_{ji}}{2};$$

$$|V_{ji}| = |b_{ji} - a_{ji}|; \rho(V_i, V_{pi}) = \left| V_i - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2} \quad (5)$$

式中 V_{ji} 为 N_j 关于评价指标 C_i 所确定量值范围。

2.5 确定待评物元 T 关于稳定类别 j 的关联度

待评物元 T 关于稳定类别 j 的关联度为

$$K_j(T) = \sum_{i=1}^n W_i K_j(V_i) \quad (6)$$

式中 W_i 为各评价指标 i 的权重系数, 且 $\sum_{i=1}^n W_i = 1$ 。

2.6 确定待评物元 T 的稳定类别

若 $K_{j_0}(T) = \max(K_j(T))$, 则待评物元 T 属于类别 j_0 。令

$$\overline{K_j}(T) = \frac{K_j(T) - \min K_j(T)}{\max K_j(T) - \min K_j(T)}; j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \overline{K_j}(T)}{\sum_{j=1}^m \overline{K_j}(T)} \quad (7)$$

则称 j^* 为类别变量特征值。例如, $j_0=2$, 而 $j^*=2.3$, 则表示属于第 2 类偏向第 3 类 (严格讲应属于 2.3 类), 从 j^* 的数值可以看出待评事物偏向另一类的程度。

3 指标权重的确定

可拓学中的指标权重和模糊理论中的隶属度有着相似的概念和意义。为了反映各个评价指标对评价对象的重要性, 涉及到评价指标权重的概念。各评价指标对评价对象的作用一般来说不是相同的, 因此要根据实际情况对不同的评价指标赋以不同的权重。权重是反映评价指标重要程度的量化系数, 权重较大意味着重要程度高。

不少综合评判模型和识别模型对指标的权重是根据经验确定的, 难免带有一定的主观性。为避免这一偏差, 本文采用一种新的简单关联函数。设

$$r_{ji}(V_i, V_{ji}) = \begin{cases} \frac{2(V_i - a_{ji})}{b_{ji} - a_{ji}}, & V_i \geq \frac{a_{ji} + b_{ji}}{2} \\ \frac{2(b_{ji} - V_i)}{b_{ji} - a_{ji}}, & V_i \leq \frac{a_{ji} + b_{ji}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

当 $V_i \in V_{pi}$ (节域) ($i=1, 2, \dots, n$), 则

$$r_{ji\max}(V_i, V_{ji}) = \max_{j=1}^m \{r_{ji}(V_i, V_{ji})\} \quad (9)$$

如果指标 i 的数据落入的类别越大, 该指标应赋予越大的权重, 则取

$$r_i = \begin{cases} j_{\max} \times \{1 + r_{ji\max}(V_i, V_{ji})\}, & r_{ji\max}(V_i, V_{ji}) \geq -0.5 \\ j_{\max} \times 0.5, & r_{ji\max}(V_i, V_{ji}) < -0.5 \end{cases} \quad (10)$$

否则, 如果指标 i 的数据落入的类别越大, 该指标应赋予越小的权重, 则取

$$r_i = \begin{cases} (m - j_{\max} + 1) \times (1 + r_{ji\max}(V_i, V_{ji})), & r_{ji\max}(V_i, V_{ji}) \geq -0.5 \\ (m - j_{\max} + 1) \times 0.5, & r_{ji\max}(V_i, V_{ji}) < -0.5 \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{指标 } i \text{ 的权重: } W_i = r_i / \sum_{i=1}^n r_i \quad (12)$$

4 工程应用

4.1 评价指标的选取

评价指标的选取应根据实际工程地质环境以及工程施工方法的特点等来综合选定。本文中涉及的是双护盾 TBM 隧洞施工过程, 根据皮带机上碴料和 TBM 掘进参数的地质编录获得的地质信息, 快速对掌子面前方围岩的稳定情况作出评判。文[1, 3, 5]指出, 通过对碴料和 TBM 掘进参数的编录可以获得岩性、岩石软硬、围岩构造、风化特征和地下水等情况, 这些文献根据《水利水电工程地质勘察规范》将围岩划分为 5 类, 即稳定 (I 类围岩)、基本稳定 (II 类围岩)、稳定性差 (III 类围岩)、不稳定 (IV 类围岩)、极不稳定 (V 类围岩), 并总结出碴料、TBM 掘进参数与围岩稳定类别的对应关系。本文选取以下 5 个参数作为分类的评价指标: (1) TBM 刀头推力 C_1 (kN), 是根据文[6]TBM 掘进参数是隧洞围岩地质条件的综合反映, 必须成为工程地质评价的基本依据之一; (2) 片状岩碴含量 C_2 (%), 节理密度可根据渣料中岩块形状、粒径含量等综合分析得出^[1, 3], 可见选取片状岩碴含量在很大程度上可以反映围岩的节理密度; (3) 节理状况参数 C_3 , 其分类标准见表 1^[7]。(4) 为了反映围岩风化程度

的影响, 选取了风化系数 C_4 , 依次为新鲜、微风化或弱风化、中等风化、全风化或强风化^[8]; (5) 地下水流量参数 C_5 (L/min · 10 m), 该指标反映了地下水的影响程度 (该指标的分类标准参考了 Bieniawski 地质力学分类法 (RMR))。各指标的分类标准见表 2。

表 1 节理状况分类标准

Table 1 Standard for joint condition classification		
围岩类别	节理状况	分值
I、II	节理面很粗糙, 节理闭合, 节理面岩石坚硬, 节理不连续	7~10
	节理面稍粗糙, 节理张开宽度小于 1 mm, 节理面岩石坚硬。	
III	节理面稍粗糙, 节理张开宽度小于 1 mm, 节理面岩石软弱	4~7
IV	节理面光滑或含厚度 < 5 mm 的软弱夹层, 节理张开宽 1~5 mm, 节理连续。	2~4
	含厚度大于 5 mm 的软弱夹层, 节理张开宽度大于 5 mm, 节理连续。	
V		0~2

表 2 围岩稳定分类标准

Table 2 Standard for surrounding rock masses stability classification					
评价指标	稳定类别				
	I, II	III	IV	V	
TBM 刀头推力 C_1 /kN	100~120	80~100	50~80	0~50	
片状岩碴含量 C_2 /%	80~100	50~80	10~50	0~10	
节理状况参数 C_3	7~10	4~7	2~4	0~2	
风化系数 C_4	0.9~1	0.75~0.9	0.4~0.75	0~0.4	
地下水流量 C_5	0~10	10~25	25~125	125~250	
/L · (min · 10 m) ⁻¹					

4.2 确定评价围岩类别的隶属度

由于各定量评价指标的计量单位各不相同, 不具有可比性, 无法进行归纳, 因此在确定指标实际值之后, 还必须解决指标间的可综合性问题, 即进行指标的无量纲化处理, 通过一定的数值变换来消除指标间的量纲影响。从本质上讲, 指标无量纲化过程也就是求解隶属函数的过程, 各种无量纲化公式, 也就是指标的隶属函数。求定量指标隶属度的无量纲化方法多种多样, 应根据各个指标本身的性质确定其隶属函数公式, 但依次确定每个指标隶属函数关系式非常困难。在确定隶属函数公式时, 一般要综合若干专家组成的群体的判定结果^[9], 以最大限度地减少个人可能出现的片面性影响, 但还是带来了判定周期长和不可避免的主观影响。根据双护盾 TBM 隧洞施工中碴料和掘进参数地质编录的特点及可操作性, 为便于计算, 本文选择线性无量纲化方法把量纲不同的指标进行无量纲化处理。处理方法如下:

效益型, 即指标值越大越好的指标:

$$y = \begin{cases} 1 & , x \geq x_{\max} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & , x_{\min} < x < x_{\max} \\ 0 & , x \leq x_{\min} \end{cases} \quad (13)$$

成本型, 即指标值越小越好的指标:

$$y = \begin{cases} 1 & , x \leq x_{\min} \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} & , x_{\min} < x < x_{\max} \\ 0 & , x \geq x_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中, y 为评价指标评价度 (隶属度); x 为有量纲评价指标实际值; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为有量纲评价指标最大值、最小值。评价体系中的 5 个指标中, C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 属于效益型, 即值越大围岩越稳定, 故选取效益型公式, 而 C_5 属于成本型, 即值越小围岩越稳定, 故选取成本型公式。

4.3 建立可拓围岩稳定分类标准

对表 2 利用式 (13)、式 (14) 进行无量纲化处理后, 建立可拓围岩分类标准见表 3。

表 3 围岩可拓分类标准

Table 3 Standard based on extension theory for surrounding rock masses stability classification

评价指标	围岩稳定类别				
	I, II	III	IV	V	
C_1 /kN	0.83~1.0	0.67~0.83	0.42~0.67	0~0.42	
C_2 /%	0.80~1.0	0.50~0.80	0.10~0.50	0~0.10	
C_3	0.70~1.0	0.40~0.70	0.20~0.40	0~0.20	
C_4	0.90~1.0	0.75~0.90	0.40~0.75	0~0.40	
C_5 /L·(min·10 m) ⁻¹	0.96~1.0	0.90~0.96	0.50~0.90	0~0.50	

4.4 物元构造

根据表 3 中的评价标准数据构造出围岩经典域物元、节域物元。

(1) 围岩经典域物元

围岩稳定类别 I, II 类 ($j=1$) 物元:

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1 & C_1 & \langle 0.83, 1.0 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.80, 1.0 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.70, 1.0 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.90, 1.0 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.96, 1.0 \rangle \end{bmatrix} \quad (15)$$

围岩稳定类别 III 类 ($j=2$) 物元:

$$R_2 = \begin{bmatrix} N_2 & C_1 & \langle 0.67, 0.83 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.50, 0.80 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.40, 0.70 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.75, 0.90 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.90, 0.96 \rangle \end{bmatrix} \quad (16)$$

围岩稳定类别 IV 类 ($j=3$) 物元:

$$R_3 = \begin{bmatrix} N_3 & C_1 & \langle 0.42, 0.67 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.10, 0.50 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.20, 0.40 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.40, 0.75 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.50, 0.90 \rangle \end{bmatrix} \quad (17)$$

围岩稳定类别 V 类 ($j=4$) 物元:

$$R_4 = \begin{bmatrix} N_4 & C_1 & \langle 0, 0.42 \rangle \\ & C_2 & \langle 0, 0.10 \rangle \\ & C_3 & \langle 0, 0.20 \rangle \\ & C_4 & \langle 0, 0.40 \rangle \\ & C_5 & \langle 0, 0.50 \rangle \end{bmatrix} \quad (18)$$

(2) 围岩节域物元

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & \langle 0, 1.0 \rangle \\ & C_2 & \langle 0, 1.0 \rangle \\ & C_3 & \langle 0, 1.0 \rangle \\ & C_4 & \langle 0, 1.0 \rangle \\ & C_5 & \langle 0, 1.0 \rangle \end{bmatrix} \quad (19)$$

(3) 围岩待评物元

以文[1]中给出的以山西引黄工程南干线某隧洞段 (1 365~1 383 m 洞段, 记为 N1 段) 为例, 根据碴料和掘进参数得出刀头推力在 300~400 kN, 片状岩碴含量为 10 %~20 %, 围岩为裂隙极发育的灰岩, 裂隙大部分张开, 部分裂隙充填红黏土, 岩体呈层状碎裂结构, 结构体大多小于 20 cm, 沿裂隙风化 (中等风化), 无地下水。依据上述描述, 依次取 $C_1=350$ kN, $C_2=15$ %, $C_3=1$, $C_4=0.55$, $C_5=5$ (L/min·10 m), 无量纲化后依次为: $C_1=0.29$, $C_2=0.15$, $C_3=0.10$, $C_4=0.55$, $C_5=0.98$, 得出待评物元如下:

$$R_t = \begin{bmatrix} N_t & C_1 & 0.29 \\ & C_2 & 0.15 \\ & C_3 & 0.10 \\ & C_4 & 0.55 \\ & C_5 & 0.98 \end{bmatrix} \quad (20)$$

同样, 文[5]中给出的山西引黄南干线某段隧洞

(记为 N2 段), 围岩主要由中、细粒砂岩和泥质砂岩组成, 微风化, 中等强度, 节理发育, 张开 3~5 mm, 地下水活动强烈, 碴料以块状为主, 约占 55%, 片状占 10%, 粉状占 35%, TBM 刀头推力为 600 kN, 马达电流消耗率平均为 46%, 油缸压力为 460 Mpa, 依次有 $C_1=600$ kN, $C_2=10\%$, $C_3=3$, $C_4=0.82$, $C_5=120$ L/(min·10 m), 无量纲化后依次为: $C_1=0.50$, $C_2=0.10$, $C_3=0.30$, $C_4=0.82$, $C_5=0.52$, 得出待评物元如下:

$$R_i = \begin{bmatrix} N_i & C_1 & 0.50 \\ & C_2 & 0.10 \\ & C_3 & 0.30 \\ & C_4 & 0.82 \\ & C_5 & 0.52 \end{bmatrix} \quad (21)$$

(4) 待评围岩评价指标的关联度计算

以 N1 段为例, 根据式(4)计算其评价指标 C_i 关于各围岩稳定类别的关联度如下: $K_{11}(C_1)=-0.6506$, $K_{21}(C_1)=-0.5672$, $K_{31}(C_1)=-0.3095$, $K_{41}(C_1)=0.3095$ 。类似地, 可以得到 N1 段因素 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 关于各稳定类别的关联度, 其结果见表 4。

表 4 N1 段 $K_{ji}(c_i)$ 计算结果
Table 4 Section N1 $K_{ji}(c_i)$ computed result

洞段	评价指标	围岩稳定类别			
		I、II	III	IV	V
N1	C_1	-0.6506	-0.5672	-0.3095	0.3095
	C_2	-0.8125	-0.7000	0.1250	-0.2500
	C_3	-0.8571	-0.7500	-0.5000	0.5000
	C_4	-0.4375	-0.3077	0.4286	-0.2500
	C_5	0.5000	-0.5000	-0.8000	-0.9600

(5) 待评围岩稳定类别的判定

将 N1 段 $C_1 \sim C_5$ 的数据代入(8)~(12)得到该段各评价指标的权重: $W_1=0.2510$, $W_2=0.1454$, $W_3=0.3101$, $W_4=0.2160$, $W_5=0.0775$ 。根据式(7)得到待评 N1 段围岩关于各稳定类别 j 的关联度分别为: $K_1(N1)=-0.6030$, $K_2(N1)=-0.5819$, $K_3(N1)=-0.1840$, $K_4(N1)=0.0680$ 。N1 段围岩的稳定类别为: $K_{j_0}(N1)=\max_{j=1}^4(K_j(N1))=\max(-0.6030, -0.5819, -0.1840, 0.0680)=0.0680$, 即 $j_0=4$, N1 段围岩属于第 V 类, 这个判定结果与实际开挖得出的结果相吻合。为了更准确地描述该段围岩的稳定类别, 根据式(7)算出该段围岩的变量特征值 j^* , 得 $j^*=3.5850$ 。从 j^* 的数值可以看出, 待评围岩段

属于第 V 类偏向第 IV 类, 通过该值可以看出待评围岩段偏向另一类的程度, 故用可拓方法评价的结果是很合理的。同样算 N2 段, 得出 $j_0=3$, N2 段围岩属于第 IV 类, 这个判定结果与实际情况吻合。该段围岩的变量特征值 $j^*=3.0209$, 从 j^* 的数值可以看出待评围岩段属于第 IV 类微偏向第 V 类。

5 结 论

(1) 可拓围岩稳定分类的结果符合实际的围岩稳定情况, 证实了双护盾 TBM 施工中基于可拓学的围岩稳定分类能够达到合理的结果。

(2) 引入了模糊理论隶属度的概念, 把不同量纲的参数线性无量纲化后, 进行归一处理, 简洁明了。

(3) 用简单关联函数确定权重, 避免了专家打分法在确定权重方面所带来的人为因素影响。

(4) 利用可拓理论可以因地制宜地考虑评价指标, 它所考虑的指标的种类和数量不受限制, 以选择最能反映围岩稳定性的参数进行评价, 克服了传统分类方法针对性差的缺点。

(5) 本文选用的评价因素为工程地质评判中的常规指标, 选用方便, 应用已编制好的程序, 将实测指标输入微机, 计算简捷, 结果正确, 便于在工程实践中推广。

(6) 可拓学的核心是把矛盾问题转化为相容问题, 所以这里采用其进行围岩稳定分类是合适的。但本文由于缺少一定的数据, 关于可拓理论在双护盾 TBM 施工中的稳定分类中的应用研究只是初步的, 特别是在关联度计算、评价指标选取及其组合方面以及可拓分类标准的建立方面尚待进一步完善。

参 考 文 献

- [1] 许建业, 梁晋平, 靳永久, 等. 隧洞 TBM 施工过程中的地质编录[J]. 水文地质工程地质, 2000, (6): 35-38.
XU Jian-ye, LIANG Jin-ping, JIN Yong-jiu, et al. The geological documentation of TBM construction[J]. *Hydrogeology And Engineering Geology*, 2000, (6): 35-38.
- [2] 任月宗. 施工地质工作方法的探讨[J]. 水利水电技术, 2002, (8): 23-24, 26.
REN Yue-zong. Geological Working Method in TBM Construction[J]. *Water Resources And Hydropower Engineering*, 2002 23-24, 26.

- [3] 靳永久, 许建业, 桑文才. TBM 施工中节理的编录[J]. 山西水利科技, 2001, (3): 72—74.
JIN Yong-jiu, XU Jian-ye, SANG Wen-cai. Mapping of Joints in TBM Construction[J]. **Shanxi Hydrotechnics**, 2001, (3): 72—74.
- [4] 蔡文, 杨春燕, 林初伟. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 1—10.
- [5] 刘跃丽, 郭峰, 田满义. 双护盾 TBM 开挖隧道围岩类型判别[J]. 同煤科技, 2003, (1): 27—28.
LIU Yue-li, GUO Feng, TIAN Man-yi. Assessment of the surrounding rock masses classification of double-shield TBM construction[J]. **Science and Technology of Datong Coal Mining Administration**, 2003, (1): 27—28.
- [6] 刘冀山, 苗挨发. 隧洞 TBM 地质编录软件系统的建立和开发[J]. 水利技术监督, 2003, (5): 58—60.
LIU Ji-shan, MIAO Aifa. Establishment and development of tunnel TBM geological cataloguing software system[J]. **Technical Supervision in Water Resources**, 2003, (5): 58—60.
- [7] 连建发, 慎乃齐, 张杰坤. 基于可拓方法的地下工程围岩评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, (23): 1 450—1 453.
LIAN Jian-fa, SHEN Nai-qi, ZHANG Jie-kun. Research on surrounding rock evaluation of underground engineering based on extension method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23 (9): 1 450—1 453.
- [8] 谢全敏, 夏元友. 岩体边坡稳定性的可拓聚类预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 438—441.
XIE Quan-min, XIA Yuan-you. Extension classification prediction method for the stability of rock-mass slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(3): 438—441.
- [9] 熊怡, 张家桢. 中国水文区划[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [10] Hock E Brown E T. Underground Excavation in Rock[M]. London: The Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
- [11] Dubois D, Prade H Fuzzy Sets, Systems. Theory and Application[M]. New York: Academic Press, 1998.
- [12] Thom R. Structural Stability and Morphogenesis[M]. [s.l.]: [s.n.], 1975. 1—50.