

# 硬岩隧道掘进机滚刀破岩性能评价研究

翟强, 顾伟红

(兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 为了提高TBM的掘进效率和地质适应性,对TBM滚刀破岩性能评价指标选取及TBM滚刀破岩性能评价方法进行了研究。通过文献阅读及专家调查,最终选取影响TBM滚刀性能的13个指标建立滚刀破岩评价体系;用改进群层次分析法(IGAHP)和基于指标相关性法(CRITIC)对评价指标进行权重计算。基于文献分析确定了13个评价指标的隶属函数,运用模糊综合评判方法,计算TBM施工破岩性能隶属矩阵,确定TBM滚刀破岩性能等级。对新疆某引水隧道4个区段进行滚刀破岩性能评价并与实际施工情况进行对比分析。结果表明:该模型的评价结果基本符合实际情况,所提出的评价方法是可行的。该方法可为TBM选型和滚刀设计优化提供指导。

**关键词:** 硬岩隧道掘进机; 滚刀; 改进群层次分析法; 基于指标相关性法; 隶属度; 综合评价

中图分类号:TV53<sup>+</sup>4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)05-0225-10

## Evaluation of rock breaking performance of TBM cutter

ZHAI Qiang, GU Weihong

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to improve the excavation efficiency and geological adaptability of the tunnel boring machine (TBM), we studied the rock breaking performance of the TBM cutter and the selection of its evaluation indexes. Based on existing literature and expert opinions, we selected 13 indexes affecting the performance of TBM cutter to establish a rock breaking model. The weight of individual evaluation indexes was calculated using improved group analytic hierarchy process (IGAHP) and criteria improved through inter-criteria correlation (CRITIC). According to the literature analysis, the membership functions of the 13 evaluation indexes were determined. The membership matrix of rock breaking performance of TBM construction was calculated and the rock breaking performance grade of TBM cutter was determined using the fuzzy comprehensive evaluation method. In this paper, the rock breaking performance of the TBM cutter in four sections of a diversion tunnel in Xinjiang was evaluated using this model and then compared with the actual construction. The results show that the evaluation results of the model are basically in line with the actual situation, and the feasibility of the evaluation method is demonstrated. This method can provide some guidance for TBM selection and hob design optimization.

**Key words:** tunnel boring machine (TBM); cutter; improved group analytic hierarchy process (IGAHP); criteria improved through inter-criteria correlation (CRITIC); membership degree; comprehensive evaluation

## 1 研究背景

全断面硬岩掘进机(TBM)施工因其施工效率高、安全可靠、环保效益明显,成为大型隧道首选的施工方法。盘形滚刀作为TBM刀盘破岩的核心部件,其破岩性能与使用寿命决定了TBM掘进效率与

经济性。因此对滚刀破岩性能、原理、磨损等方面的研究成为该领域的热点<sup>[1]</sup>。

目前,许多的理论方法、实验测试、数据模拟和现场观察都是围绕TBM的破岩机理和破岩性能进行研究,例如刀间距、滚刀类型、掘进参数、围压、岩石节理等对TBM性能影响因素的研究。Farrokh

收稿日期:2019-11-05; 修回日期:2020-02-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51668037)

作者简介:翟强(1994-),男,甘肃平凉人,硕士研究生,主要从事土木工程管理研究工作。

等<sup>[2]</sup>基于超过 1 500 km 的隧道数据库,利用回归技术提出了一种先进的预测模型,大大提高了 TBM 性能预测的精确度。Entacher 等<sup>[3]</sup>研究了一个滚刀的破岩过程,观察发现中缝在低围压情况下发生扩张,但当围压增加的时候,裂缝被限制。毛红梅等<sup>[4]</sup>利用实验数据,从高效破岩机理和刀盘刀具与围岩耦合作用规律两个方面进行了研究,对单刀及多刀破岩理论体系进行了完善。程永亮<sup>[5]</sup>运用有限元理论,采用扩展的 Drucker - Prager 非线性弹塑性本构模型作为岩石的本构模型,研究了 TBM 盘形滚刀的破岩效率及其最优贯入度。马洪素等<sup>[6]</sup>通过实验,研究了不同围压条件滚刀的法向力、滚动力和掘进效率的影响曲线,结果表明围压极大地影响着 TBM 现场掘进速率。张旭辉等<sup>[7]</sup>采用颗粒离散元法建立不同节理特征下两种滚刀的破岩效率,并得出了双刀滚刀和单刀滚刀的最优刀间距。刘泉声等<sup>[8]</sup>总结了影响滚刀破岩效率的 35 种岩石脆弱指标,并通过实验表明了岩石单轴抗压强度可作为表征岩石脆弱指标的关键指标。刘洪斌等<sup>[9]</sup>建立了滚刀破碎岩石的动力学模型,模拟了滚刀在不同温度时的复杂变化过程,证明了切削温度对滚刀破岩效率有显著的影响。

上述研究为 TBM 滚刀的破岩性能研究提供了重要的理论基础,但研究大多只涉及单个因素,或者少许几个因素共同作用对破岩性能的影响,它们的优点是对所研究的单个因素分析的准确度高,但却难以综合分析多个因素对破岩性能的影响。本文针对以上问题,综合考虑施工环境、刀盘刀具的设计和 TBM 掘进参数对滚刀破岩性能的影响,建立了 TBM 滚刀破岩评价体系,采用了群层次分析法 - 基于指标相关性法确定各评价指标的权重,避免了主观误差,运用模糊综合评价理论确定破岩性能等级。依托新疆某引水隧道现场施工数据进行模拟应用,并与现场施工状况进行分析对比,应用结果表明,此方法评价 TBM 滚刀性能相对客观,可为 TBM 滚刀设计、TBM 适应性评价和 TBM 选型提供科学依据和新思路。

## 2 TBM 滚刀破岩评价指标体系

### 2.1 TBM 滚刀破岩评价指标

2.1.1 TBM 滚刀破岩原理 TBM 在掘进时,推进系统提供巨大的推力和扭矩,刀盘将推压力和扭矩施加给刀圈产生轴向力和滚动力。滚刀在沿岩石作用面圆周滚动的同时,会侵入岩石一定的贯入度,滚刀与岩石直接接触,通过挤压和剪切使岩石内部产

生裂纹,多条裂纹相互贯通,形成岩石碎片,进而达到破岩的目的。

2.1.2 TBM 滚刀破岩影响因素分析 为了筛选与确定 TBM 滚刀破岩性能评价指标,本文通过对 25 例 TBM 隧道施工案例统计分析和大量的文献汇总,归纳出影响 TBM 滚刀性能的因素主要可分为施工环境、刀盘刀具设计和掘进参数 3 大类共 21 个因素,见表 1。并对表 1 中 21 个因素按照对滚刀磨损影响程度进行问卷调查。具体步骤为:

(1)编制影响因素调查表,并按 1~5 分制进行打分,1~5 分别代表对 TBM 滚刀磨损影响程度“几乎无影响”、“影响程度小”、“影响程度中等”、“影响程度大”、“影响程度极大”。

(2)利用调查表对 20 个有 5 a 以上 TBM 施工经验的专家或技术人员进行调查,结果按公式(1)进行综合影响分数计算,最终计算结果见表 1。

$$U_i = \frac{\sum_{j=1}^n P_{ij}}{20} \quad (i = 1, 2, \dots, 21; j = 1, 2, \dots, 20) \quad (1)$$

式中:  $U_i$  为第  $i$  个影响因素的综合影响分数;  $P_{ij}$  为第  $j$  个专家就第  $i$  个影响因素所打的分数。

表 1 TBM 滚刀破岩性能影响因素统计表

| 分类     | 影响因素     | 综合分数 |
|--------|----------|------|
| 施工环境   | 岩石单轴抗压强度 | 4.2  |
|        | 岩石完整性系数  | 1.8  |
|        | 围岩等级     | 1.8  |
|        | 地应力      | 1.6  |
|        | 岩石温度     | 3.4  |
|        | 岩石湿度     | 1.2  |
|        | 节理倾角     | 3.8  |
|        | 围压       | 4.0  |
|        | 节理间距     | 3.8  |
|        | 裂隙       | 2.0  |
|        | 断层       | 1.8  |
|        | 滚刀间距     | 4.4  |
| 刀盘刀具设计 | 滚刀类型     | 3.0  |
|        | 滚刀贯入度    | 4.4  |
|        | 切削温度     | 4.0  |
|        | 滚刀受力     | 2.0  |
| 掘进参数   | 刀盘直径     | 1.6  |
|        | 推进速度     | 4.6  |
|        | 推力       | 4.4  |
|        | 刀盘转速     | 3.8  |
|        | 刀盘扭矩     | 3.6  |

表 2 TBM 破岩性能指标选取依据

| 影响因素   | 选取依据                                                                                                                    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 单轴抗压强度 | 单轴抗压强度是影响刀具切入深度最重要的因素,旋转刀具必须施加一个大于岩石强度的力,才能有效侵入岩石,这是滚刀切槽间形成岩片剥离的基础。以此它能作为 TBM 滚刀效率的主要指标。                                |
| 节理倾角   | 岩体节理特征是影响 TBM 滚刀破岩性能的重要因素之一 <sup>[10]</sup> 。节理倾角的变化直接影响着岩石的抗侵入能力,进而影响 TBM 的破岩性能。                                       |
| 岩石温度   | 温度会影响岩石的力学性能,进一步影响破岩性能。岩石在不同的温度下会表现出不同的力学特征和破碎方式。岩石温度的增加会增强滚刀间的协同能力,使滚刀破岩效率增高,这表明岩石温度是影响滚刀破岩特性的重要因素之一 <sup>[11]</sup> 。 |
| 节理间距   | 节理作为岩体的节理特征,对岩石裂纹的扩展起着控制作用,节理的间距大小直接决定对滚刀破岩有抑制作用或是有利作用。                                                                 |
| 围压     | 高地应力一方面会抑制 TBM 刀具破碎完整岩体,一方面会促进岩石裂隙的发展。围压直接影响着滚刀破岩的深度,从而影响滚刀的法向力,它是 TBM 破岩性能的关键指标。                                       |
| 滚刀刀间距  | 滚刀刀间距的合理设计直接影响滚刀的破岩效率。合适的刀间距不仅可以提高 TBM 掘进速度,而且可以使滚刀在破碎过程中所消耗的比能最小,最大限度发挥滚刀的破岩性能 <sup>[12]</sup> 。                       |
| 滚刀类型   | 滚刀类型决定着滚刀的强度和硬度,直接影响破岩性能。                                                                                               |
| 滚刀贯入度  | 滚刀的贯入度会影响滚刀的破岩深度和接触面积,当贯入度小时,滚刀作用力过小不足以达到破岩的目的,当贯入度过大时,会导致岩体过度破碎,消耗过多的能量。                                               |
| 切削温度   | 切削温度是衡量非开挖工程中滚刀破岩效率的主要指标 <sup>[9]</sup> 。切削温度不仅会导致滚刀的热力学性能发生改变,还会引起滚刀破岩过程中的受力变化,进而使岩石的强度、硬度发生改变,在岩体内部产生热应力,增大了岩石的破碎体积。  |
| 推进速度   | 推进速度是影响 TBM 破岩效率、地质适应性的关键因素 <sup>[13]</sup> 。推进速度过小会影响机械的掘进速度,推进速度过快,会导致刀盘大幅震动,前方土体隆起,加剧刀盘刀具的磨损。                        |
| 推力     | 刀盘推力为滚刀提供破岩的垂直力,是产生贯入度的主要因素之一。当推力增大时,在其岩石内部传播更广泛,压碎区面积更大,会产生更多的裂缝,更容易实现裂缝的贯通。但推力过大,会导致前方土体隆起,加剧刀盘刀具损坏。                  |
| 刀盘转速   | 刀盘转速和扭矩越大,滚刀所受的冲击力就越大,过大会导致刀圈崩刀,转速和扭矩控制不当,会影响土体的稳定性。刀盘的扭矩为滚刀提供滚动力,也是产生贯入度的另一因素。                                         |
| 刀盘扭矩   |                                                                                                                         |

2.1.3 TBM 滚刀破岩性能评价指标的选取 根据表 1 可以看出,岩石完整性系数、围岩等级、地应力、岩石湿度、裂隙、断层、滚刀受力、刀盘直径的综合分数处于 1~2 之间,即“几乎无影响”和“影响程度小”之间,本文不予考虑。最终选择单轴抗压强度、节理倾角、岩石温度、节理间距、围压、滚刀间距、滚刀类型(定性指标)、滚刀贯入度、切削温度、推进速度、推力、刀盘转速、刀盘扭矩 13 个评价指标,具体选取依据见表 2。确定指标后建立 TBM 破岩性能评价体系,用  $T$  代表目标层,  $P_1 \sim P_3$  代表准则层要素,  $X_1 \sim X_{12}$  和  $L_1$  为指标层各影响因素,如图 1 所示。

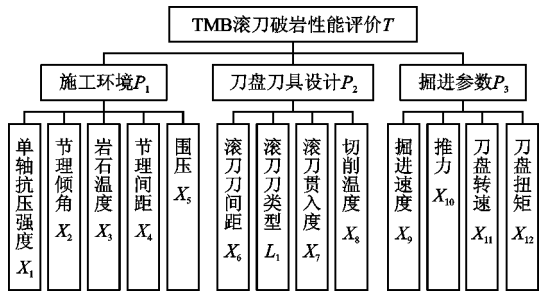


图 1 TBM 滚刀破岩性能评价体系

2.2 赋权模型

2.2.1 改进群层次分析法(IGAHP)主观赋权模型

传统的层次分析法(AHP)只进行了一致性检验,但没有考虑专家意见之间的差异性,由于专家的经验、年限和知识水平有差别,进行相似度判断,能很好地减小误差。具体计算步骤如下。

设第  $p$  个专家与第  $q$  个专家决策的相似程度用  $d_{pq}(p, q = 1, 2, \dots, T)$  距离表示,则

$$d_{pq} = d(Y^{(p)}, Y^{(q)}) = \left[ \sum_{i=1}^n (y_i^{(p)} - y_i^{(q)})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $Y^{(p)}$  和  $Y^{(q)}$  分别为专家  $p$  和专家  $q$  的决策值;  $y_i^{(p)}$  和  $y_i^{(q)}$  分别为专家  $p$  和专家  $q$  对第  $i$  指标的决策值。  $d_{pq}$  的值越小,说明两个专家的意见越统一。

设第  $t$  个专家与其他专家决策的相似程度用  $d_t$  表示,则:

$$d_t = \sum_{j=1}^T d_{tj} \quad j = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

由此可见,第  $t$  个专家的最终决策权重系数  $\lambda_t$  的计算式如公式(4)~(5):

$$\text{当 } d_{pq} = 0 \text{ 时:} \quad \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_T = \frac{1}{T} \quad (4)$$

当  $d_{pq} \neq 0$  时:

$$\lambda_i = \frac{1/d_i}{\sum_{j=1}^T (1/d_j)} \quad (5)$$

式中:  $T$  为专家的总人数,  $d_i$  越小表示该专家与其它专家的分歧越小, 反之亦然。

$$\bar{Y} = (\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_n), \text{ 则 } \bar{Y} = \sum_{i=1}^T \lambda_i Y^{(i)} \quad (6)$$

为了进一步确定指标的相对权重, 通过 3 位经验丰富的专家, 依靠现场勘测数据资料, 专家两两比较, 最终依据 3 位专家给出的判断矩阵, 通过 MATLAB 程序分别计算, 由于计算方法一样, 本文以准则层的权重计算为例, 通过公式(2)~(6)计算结果见表 3。

表 3 目标层  $T$  所含准则层指标影响权重分析

| 专家   | $T-P$ | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | 权重    | 一致检验                   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| 专家 1 | $P_1$ | 1     | 1/2   | 1/2   | 0.200 | $\lambda_{\max}=3.000$ |
|      | $P_2$ | 2     | 1     | 1     | 0.400 | $C.R.=0<0.1$           |
|      | $P_3$ | 2     | 1     | 1     | 0.400 | 一致                     |
| 专家 2 | $P_1$ | 1     | 1/2   | 1/2   | 0.196 | $\lambda_{\max}=3.507$ |
|      | $P_2$ | 2     | 1     | 1/2   | 0.311 | $C.R.=0.024<0.1$       |
|      | $P_3$ | 2     | 2     | 1     | 0.493 | 一致                     |
| 专家 3 | $P_1$ | 1     | 1/2   | 1/3   | 0.177 | $\lambda_{\max}=3.026$ |
|      | $P_2$ | 2     | 1     | 1/2   | 0.323 | $C.R.=0.013<0.1$       |
|      | $P_3$ | 3     | 2     | 1     | 0.500 | 一致                     |

### 2.2.2 基于指标相关性法 (CRITIC) 客观赋权模型

客观赋权法避免了主观赋权法赋权的人为因素, 根据真实数据判断数据提供的信息量的大小, 以此判断评价指标的重要性, 因此, CRITIC 法也能作为因素重要性的判断依据。

客观赋权法是用标准差反映相应指标的差异性, 也就是变异程度, 用相关系数表示不同指标的相关性, 然后用冲突量化公式判别某指标  $i$  与其他指标的冲突程度。对指标  $i$  与其余指标的冲突程度进行量化处理, 可得指标  $r_{ij}$  的冲突量化公式为:

$$c_i = \sum_{j=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (7)$$

式中:  $r_{ij}$  为指标  $i$  与指标  $j$  的相关系数, 其表达式为:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (\lambda_{ik} - \bar{\lambda}_i)(\lambda_{jk} - \bar{\lambda}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (\lambda_{ik} - \bar{\lambda}_i)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^m (\lambda_{jk} - \bar{\lambda}_j)^2}} \quad (8)$$

式中:  $\lambda_{ik}$  和  $\lambda_{jk}$  分别为第  $k$  个对象在第  $i$  个指标和第  $j$  个指标下的归一化值;  $\bar{\lambda}_i$  和  $\bar{\lambda}_j$  分别为指标  $i$  和指标

$j$  的均值。

设  $C_i$  为指标  $i$  所提供的信息量, 其表达式为:

$$C_i = \sigma_i c_i \quad (9)$$

其中  $\sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\lambda_{ik} - \bar{\lambda}_i)^2 / (m-1)}$ 。  $C_i$  越大, 表示指标  $i$  提供信息量越多, 在评估过程中的作用越大, 故指标  $i$  的权重  $w_i$  可表示:

$$w_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i \quad (10)$$

2.2.3 乘法合成归一化综合权重 复合权重是客观数据与主观经验的耦合, 运用乘法合成归一化法计算出评价指标的综合权重, 即:

$$w_j = (\alpha_j \cdot \beta_j) / \sum_{j=1}^m (\alpha_j \cdot \beta_j) \quad (11)$$

式中:  $\alpha_j$  为第  $j$  个指标的主观权重;  $\beta_j$  为第  $j$  个指标的客观权重;  $w_j$  为第  $j$  个指标的综合权重;  $n$  为指标个数。

### 2.3 CRITIC-IGAHP 组合赋权

本文选取新疆某引水隧道 SD1、SD2、SD3、SD4 4 段施工里程为评估对象, 其选取样本类别信息和指标数据见表 4 和 5, 根据公式(1)~(6)计算主观权重, 公式(7)~(10)计算客观权重, 并采用乘法合成归一化公式确定综合权重, 其评价指标组合赋权结果见表 6。

表 4 新疆某引水隧道施工段选取样本类别统计

| 起讫桩号/m              | 代号  | 长度/m  | 围岩类别  | 岩性及构造描述     |
|---------------------|-----|-------|-------|-------------|
| 56+580.00~56+579.86 | SD1 | 22.29 | II    | 泥盆系凝灰质砂岩    |
| 56+543.09~56+513.00 | SD2 | 30.09 | III A | 凝灰质砂岩夹碳质凝灰岩 |
| 54+253.35~54+212.00 | SD3 | 41.35 | III B | 粉砂岩         |
| 62+475.00~62+511.00 | SD4 | 36.00 | IV    | 凝灰质砂砾岩      |

## 3 TBM 破岩性能的模糊综合评判

### 3.1 隶属函数的确定

本文拟采用模糊数学建立隶属函数, 对各个指标进行量化。隶属函数可以解决各评价指标的公度性, 使各个指标具有比较性。

当滚刀破岩性能较差时, 设定其隶属函数为 0, 则评价指标量化为 0。当滚刀破岩性能良好时, 其评价指标量化为 1,  $[0, 1]$  之间的某个数值就可以表示 TBM 滚刀性能与该因素之间不同的适应性。本文采用线性关系确定具体评价指标的隶属函数, 其

13 个因素的隶属函数分述如下。

3.1.1 岩石的单轴抗压强度 根据 TBM 施工现场的大量施工经验,目前普遍认为滚刀最适宜切削单轴抗压强度为 30 ~ 150 MPa 的中硬岩和硬岩<sup>[14]</sup>,而文献[8]指出滚刀不适宜切削单轴抗压强度小于 20 MPa 的软岩,有关研究表明滚刀不宜切削单轴抗压强度大于 180 MPa 的硬岩。所以构建如下的关于岩石单轴抗压强度的隶属函数:

表 5 TBM 破岩指标数据

| 准则层        | 指标代号     | 指标名称                                        | 指标数值  |       |       |      |
|------------|----------|---------------------------------------------|-------|-------|-------|------|
|            |          |                                             | SD1   | SD2   | SD3   | SD4  |
| 施工环境 $P_1$ | $X_1$    | 单轴抗压强度 /MPa                                 | 105   | 98    | 108   | 55   |
|            | $X_2$    | 节理倾角 /( $^{\circ}$ )                        | 34    | 62    | 55    | 36   |
|            | $X_3$    | 岩石温度 / $^{\circ}\text{C}$                   | 55    | 45    | 43    | 36   |
|            | $X_4$    | 节理间距 / mm                                   | 44    | 58    | 101   | 65   |
|            | $X_5$    | 围压 / MPa                                    | 10    | 5     | 10    | 5    |
| 刀盘设计 $P_2$ | $X_6$    | 滚刀刀间距 / mm                                  | 78    | 78    | 78    | 75   |
|            | $X_7$    | 滚刀贯入度 / mm                                  | 5     | 11.1  | 9.7   | 7.91 |
|            | $X_8$    | 切削温度 / $^{\circ}\text{C}$                   | 59    | 177   | 47    | 201  |
| 掘进参数 $P_3$ | $L_1$    | 滚刀类型                                        | 平刃    | 平刃    | 平刃    | 平刃   |
|            | $X_9$    | 掘进速度 / ( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )   | 3.09  | 4.66  | 3.81  | 2.86 |
|            | $X_{10}$ | 刀盘推力 / kN                                   | 16565 | 13180 | 10615 | 5458 |
|            | $X_{11}$ | 刀盘转速 / ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 7.2   | 7.0   | 7.0   | 6.13 |
|            | $X_{12}$ | 刀盘扭矩 / ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )       | 2517  | 2540  | 2009  | 809  |

表 6 组合赋权结果

| 指标       | 主观赋权   | 客观赋权   | 组合赋权   |
|----------|--------|--------|--------|
| $X_1$    | 0.1304 | 0.0921 | 0.1530 |
| $X_2$    | 0.0326 | 0.1024 | 0.0425 |
| $X_3$    | 0.0456 | 0.0686 | 0.0398 |
| $X_4$    | 0.0326 | 0.0562 | 0.0233 |
| $X_5$    | 0.0685 | 0.0588 | 0.0513 |
| $X_6$    | 0.0802 | 0.0556 | 0.0568 |
| $X_7$    | 0.0802 | 0.0722 | 0.0738 |
| $X_8$    | 0.0870 | 0.0626 | 0.0694 |
| $X_9$    | 0.1020 | 0.0659 | 0.0856 |
| $X_{10}$ | 0.1020 | 0.1522 | 0.1978 |
| $X_{11}$ | 0.0802 | 0.0656 | 0.0670 |
| $X_{12}$ | 0.0704 | 0.1166 | 0.1046 |
| $L_1$    | 0.0883 | 0.0312 | 0.0351 |

$$U_1(x) = \begin{cases} 0 & (x < 20) \\ \frac{x-20}{30-20} & (20 \leq x < 30) \\ 1 & (30 \leq x < 150) \\ \frac{180-x}{180-150} & (150 \leq x < 180) \\ 0 & (x \geq 180) \end{cases} \quad (12)$$

其对应的隶属函数图如图 2 所示。

3.1.2 节理倾角 破岩比能耗随着节理倾角  $\alpha$  的增加呈现一个逐渐减少然后增大的过程;对于同一节理倾角,其破岩比能耗随着节理间距增大而不断增大;节理对高强度岩体的破岩影响程度更大。当岩中节理倾角  $\alpha = 60^{\circ}$  时,盘形滚刀的破碎效率达到最高值<sup>[15-16]</sup>。根据文献[15-16]给出的节理倾角和节理间距对比耗能的影响曲线,近似得出如下关于节理倾角的隶属函数:

$$U_2(x) = \begin{cases} \frac{x}{60} & (0 \leq x < 60) \\ \frac{90-x}{90-60} & (60 \leq x < 90) \end{cases} \quad (13)$$

其对应的隶属函数图如图 3 所示。

3.1.3 岩石温度 岩石温度的升高能增强滚刀之间的协同作用,从而提高滚刀的破岩效率<sup>[17-18]</sup>,为了量化,构造以下关于岩石温度隶属函数:

$$U_3(x) = \begin{cases} 0 & (x < 25) \\ \frac{x-25}{100-25} & (25 \leq x < 100) \\ 1 & (x \geq 100) \end{cases} \quad (14)$$

其对应的隶属函数图如图 4 所示。

3.1.4 节理间距 根据孙建中等<sup>[12]</sup>的研究可知,当节理间距小于 50 mm 时,节理的存在不利于滚刀破岩,随着节理间距的增加,这种不利影响逐渐消

失;当节理间距不小于 100 mm 时,节理的存在几乎对滚刀破岩无影响。所以构建如下的关于节理间距的隶属函数:

$$U_4(x) = \begin{cases} 1 - \frac{x}{50} & (0 \leq x < 50) \\ \frac{x}{50} - 1 & (50 \leq x < 100) \\ 1 & (x \geq 100) \end{cases} \quad (15)$$

其对应的隶属函数图如图 5 所示。

3.1.5 围压 张流等<sup>[19]</sup>采用以铅为围压介质的三轴试验绘制应力-应变曲线,得到岩石单轴抗压强度与围压的关系式为:

$$R_c = 233 + 714c^{0.51} \quad (16)$$

式中:  $c$  为围压,MPa。因此构建关于围压的隶属函数:

$$U_5(x) = \begin{cases} \frac{x}{c} & (0 \leq x < c) \\ 1 & (x \geq c) \end{cases} \quad (17)$$

其对应的隶属函数图如图 6 所示。

3.1.6 刀间距 根据文献[20]所得到的刀间距与贯入度的拟合公式为:

$$S = -0.062p^2 + 9.35p + 9.4 \quad (18)$$

式中:  $S$  为刀间距,mm;  $p$  为贯入度,mm。

因此构建关于刀间距的隶属函数:

$$U_6(x) = \begin{cases} \frac{x}{S} & (0 \leq x < S) \\ 1 & (x \geq S) \end{cases} \quad (19)$$

其对应的隶属函数图如图 7 所示。

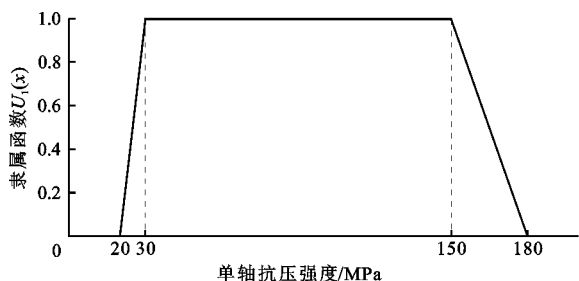


图2 单轴抗压强度隶属函数图

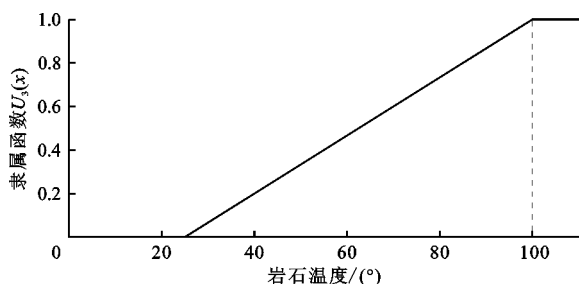


图4 岩石温度隶属函数图

3.1.7 贯入度 从线性破岩试验对试验岩样的破岩效率来看,贯入度为 2.5 mm 是破岩的转折点。当贯入度小于 2.5 mm 时,随着贯入度增加,破岩的效率不断提高。但随着贯入度的增大,平均滚动力大幅度增加,破岩效率降低<sup>[21]</sup>。当滚刀贯入度较大时 ( $p \geq 8$  mm),相邻滚刀间岩体将会随着贯入度的增加而出现过度破碎,此时,比能耗随着贯入度的增加急剧增大<sup>[22-23]</sup>。

因此构建关于贯入度的隶属函数:

$$U_7(x) = \begin{cases} \frac{x}{2.5} & (0 \leq x < 2.5) \\ \frac{8-x}{8-2.5} & (2.5 \leq x < 8) \\ 0 & (x \geq 8) \end{cases} \quad (20)$$

其对应的隶属函数图如图 8 所示。

3.1.8 切削温度 根据刘洪斌等<sup>[9]</sup>的研究,在 50 ~ 300℃ 范围内,随着温度的升高,滚刀和岩石的力学性能发生改变。滚刀受力先减小后增大,岩石破碎体积持续增大,导致滚刀破岩比能先减小后增大。155℃ 为滚刀理想切削温度,破岩效率最高。所以构建如下的关于切削温度的隶属函数:

$$U_8(x) = \begin{cases} \frac{x}{155} & (0 \leq x < 155) \\ \frac{300-x}{300-155} & (155 \leq x < 300) \\ 0 & (x \geq 300) \end{cases} \quad (21)$$

其对应的隶属函数图如图 9 所示。

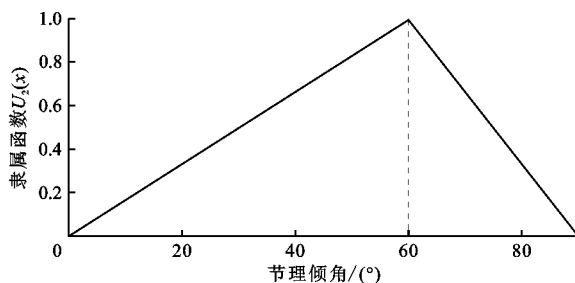


图3 节理倾角隶属函数图

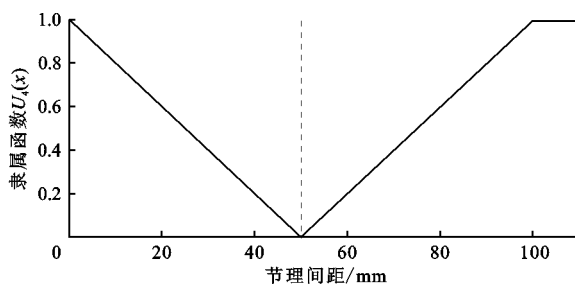


图5 节理间距隶属函数图

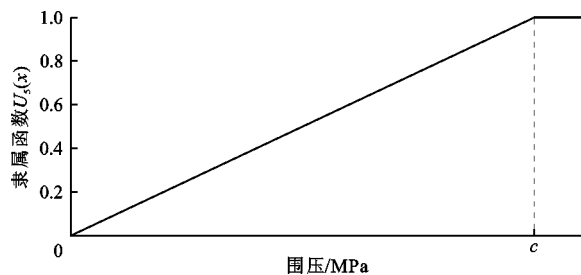


图6 围压隶属函数图

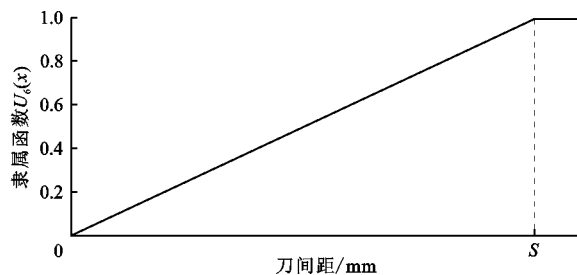


图7 刀间距隶属函数图

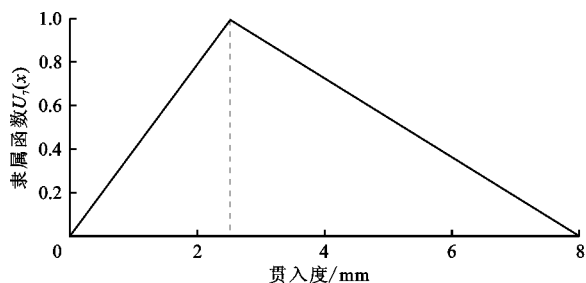


图8 贯入度隶属函数图

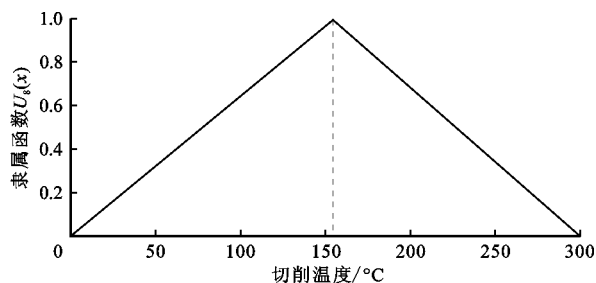


图9 切削温度隶属函数图

3.1.9 掘进速度 掘进速度是TBM的一项综合参数,结合国内外的工程经验,岩石的单轴抗压强度和速度的拟合公式为:

当  $15 \text{ MPa} \leq R_c < 40 \text{ MPa}$  时

$$v_c = 0.7134e^{0.0336R_c} \quad (22)$$

当  $40 \text{ MPa} \leq R_c < 180 \text{ MPa}$  时

$$v_c = -1.036 \ln R_c + 6.8749 \quad (23)$$

式中:  $R_c$  为单轴抗压强度,MPa;  $v_c$  为掘进速度, m/h。

因此构建关于TBM掘进速度的隶属函数:

$$U_9(x) = \begin{cases} \frac{x}{v_c} & (0 \leq x < v_c) \\ 1 & (x \geq v_c) \end{cases} \quad (24)$$

其对应的隶属函数图如图10所示。

3.1.10 刀盘推力 刀盘的推力与掘进速度、刀盘扭矩、贯入度和岩石的完整性等参数密切相关。根据罗华等<sup>[24]</sup>的研究,当刀盘贯入度  $p_r = 1 \text{ mm/r}$  时,刀盘推力与单轴饱和抗压强度的关系为:

$$F_1 = 1647.61 \ln R_c - 443.96 \quad (25)$$

因此构建关于刀盘推力的隶属函数:

$$U_{10}(x) = \begin{cases} \frac{x}{F_1} & (0 \leq x < F_1) \\ 1 & (x \geq F_1) \end{cases} \quad (26)$$

其对应的隶属函数图如图11所示。

3.1.11 刀盘转速 TBM的滚刀破岩效率随着刀盘转速的增大而逐渐增高,根据文献[25]的研究,为了不影响排渣和避免刀具损坏,刀盘转速  $n \leq$

$42.6D^{-0.5}$  ( $D$  为刀盘直径, m), 其实目前TBM施工都没有超过允许值。由于一般刀盘的线速度  $v = 2.4 \sim 2.6 \text{ m/s}$ , 换算为角速  $n = 144/\pi D \sim 156/\pi D$ 。

因此构建关于刀盘转速的隶属函数:

$$U_{11}(x) = \begin{cases} \frac{x\pi D}{144} & (0 \leq x < \frac{\pi D}{144}) \\ 1 & (x \geq \frac{\pi D}{144}) \end{cases} \quad (27)$$

其对应的隶属函数图如图12所示。

3.1.12 刀盘扭矩 合理地设计扭矩既能保证滚刀的破岩效率,又能优化TBM的结构和装机功率。刀盘扭矩设计不当,不仅影响TBM施工的掘进效率,严重时还会引发工程事故。刀盘的扭矩一般以刀盘直径  $D$  的二次方而增加的关系来考虑<sup>[26]</sup>:  $M_d = k_m D^2$ ,  $k_m$  为扭矩系数,通常取45,但由于更高的刀具荷载可达到60。

因此构造关于刀盘扭矩隶属函数:

$$U_{12}(x) = \begin{cases} 0 & (x < 45D^2) \\ \frac{x - 45D^2}{60D^2 - 45D^2} & (45D^2 \leq x < 60D^2) \\ 1 & (x \geq 60D^2) \end{cases} \quad (28)$$

其对应的隶属函数图如图13所示。

3.1.13 滚刀类型 滚刀类型是影响TBM破岩性能最大的一个因素,滚刀的刃形有楔刀和平刀两种,楔形刀圈容易侵入岩体,但随着磨损量的增大,与掌子面的接触面积也逐渐增大,需要更大的推力,会造成TBM的不稳定。平刀滚刀在与掌子面的磨损过

程中,推力变化不大,相对较稳定,本文选用的案例

都用的是同一类型的滚刀,则默认隶属度均为 1。

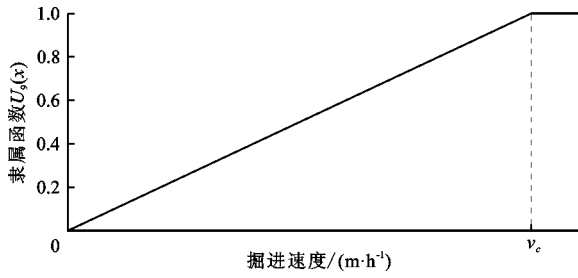


图 10 掘进速度隶属函数图

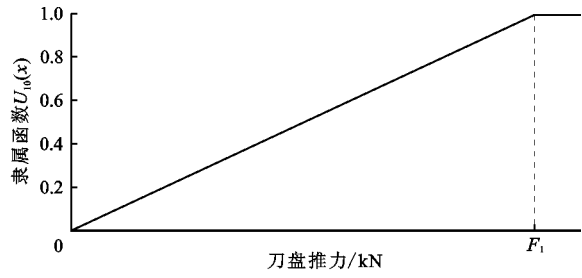


图 11 刀盘推力隶属函数图

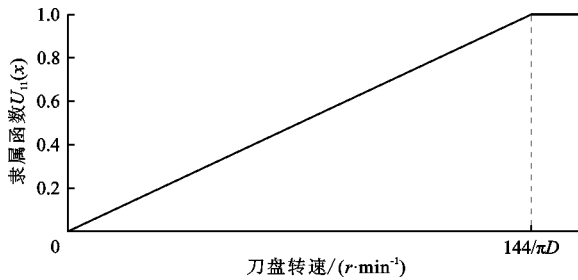


图 12 刀盘转速隶属函数图

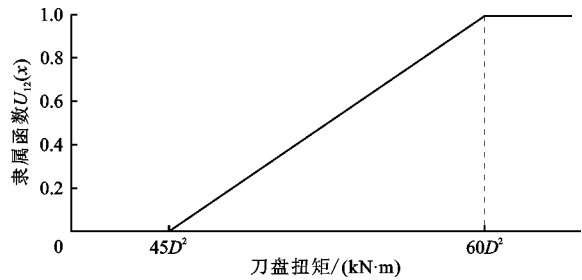


图 13 刀盘扭矩隶属函数图

3.2 模糊综合评判

根据第 2 节所得的组合权重和第 3 节计算所得的隶属度,评判综合值向量计算公式为:

$$T = \bar{U} \times \lambda^* = \begin{bmatrix} \lambda_1^* \\ \lambda_2^* \\ \vdots \\ \lambda_n^* \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nm} \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中:  $\lambda_i^*$  为第  $i$  个指标的组合权重;  $u_{ik}$  为第  $k$  个对象第  $i$  个指标的隶属度。

根据 TBM 隧道施工的现场施工条件、数据资料,有关专家建议采用与其关联较紧密的 TBM 适应性分级标准值作为 TBM 滚刀分级标准,即采用广泛使用的 4 级划分,见表 7。

表 7 TBM 滚刀评价等级表

| 等级  | 评判综合值   | 描述 |
|-----|---------|----|
| I   | 0~0.4   | 差  |
| II  | 0.4~0.6 | 中等 |
| III | 0.6~0.8 | 良好 |
| IV  | 0.8~1.0 | 优  |

4 工程案例

4.1 评价指标数据

以新疆某供水隧道 IV 标段 4 段比较典型里程

段为评估对象,其具体地质、桩号和围岩类别见表 4,采用综合平均取值和取不利情况下分析原则,列出该工程 TBM 滚刀破岩评价指标数据,见表 5。

4.2 TBM 滚刀的破岩性能评价

采用上述评价方法,根据已经建立的各评价指标隶属函数,得到 TBM 各个施工段各评价指标的隶属度,见表 8。

表 8 各施工段各评价指标对应隶属函数的隶属度

| 评价指标     |        | 隶属度 $U(x)$ |       |       |       |
|----------|--------|------------|-------|-------|-------|
| 指标代号     | 指标名称   | SD1        | SD2   | SD3   | SD4   |
| $X_1$    | 单轴抗压强度 | 1          | 1     | 1     | 1     |
| $X_2$    | 节理倾角   | 0.567      | 0.933 | 0.917 | 0.600 |
| $X_3$    | 岩石温度   | 0.400      | 0.160 | 0.144 | 0.088 |
| $X_4$    | 节理间距   | 0.120      | 0.160 | 1     | 0.300 |
| $X_5$    | 围压     | 1          | 1     | 1     | 1     |
| $X_6$    | 滚刀刀间距  | 1          | 0.722 | 0.827 | 0.944 |
| $X_7$    | 滚刀贯入度  | 0.545      | 0     | 0     | 0.016 |
| $X_8$    | 切削温度   | 0.380      | 0.848 | 0.302 | 0.680 |
| $X_9$    | 掘进速度   | 1          | 1     | 1     | 1     |
| $X_{10}$ | 刀盘推力   | 1          | 1     | 1     | 0.886 |
| $X_{11}$ | 刀盘转速   | 0.868      | 0.844 | 0.844 | 0.739 |
| $X_{12}$ | 刀盘扭矩   | 1          | 1     | 1     | 0     |
| $L_1$    | 滚刀类型   | 1          | 1     | 1     | 1     |

基于以上 4 个评估对象的模糊隶属度和相应指标的组赋权重,采用模糊综合评判的基本模型

对4个评估对象的滚刀破岩性能进行评价,其计算结果如下:

$$T = \bar{U} \times R =$$

|        |       |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 0.1530 | 1     | 1     | 1     | 1     |
| 0.0425 | 0.567 | 0.933 | 0.917 | 0.600 |
| 0.0398 | 0.400 | 0.160 | 0.144 | 0.088 |
| 0.0233 | 0.120 | 0.160 | 1     | 0.300 |
| 0.0513 | 1     | 1     | 1     | 1     |
| 0.0568 | 1     | 0.722 | 0.827 | 0.944 |
| 0.0738 | 0.545 | 0     | 0     | 0.016 |
| 0.0694 | 0.380 | 0.848 | 0.302 | 0.680 |
| 0.0856 | 1     | 1     | 1     | 1     |
| 0.1978 | 1     | 1     | 1     | 0.866 |
| 0.0670 | 0.868 | 0.844 | 0.844 | 0.739 |
| 0.1046 | 1     | 1     | 1     | 0     |
| 0.0351 | 1     | 1     | 1     | 1     |

上式结果分别表示该隧道4个段的TBM滚刀破岩性能的综合值,其中SD1段综合值为0.8517,SD2段综合值为0.8336,SD3段综合值0.8199,破岩等级为优(Ⅳ)。根据施工报告,这3段施工段的岩性大部分为泥盆系凝灰质和砂岩,岩体较为完整、新鲜,呈厚层状,围岩稳定条件较好。局部杂砾岩与硅化凝灰质砾岩为中硬岩,岩石坚硬,岩体完整,适合TBM破岩掘进,现场施工情况与评价结果一致;SD4段综合值为0.6877,岩等级为良好(Ⅲ)。该区段岩石抗压强度较低,局部地段存在小断层,破碎带宽度一般为3~15cm,以炭质页岩、碎裂岩为主,炭质页岩薄层状,强度较低,层理较发育,遇水易软化,围岩稳定性较差,为Ⅳ类围岩,对TBM掘进有一定影响。现场施工情况也与评价结果相一致。

## 5 结 论

(1)本文对通常影响TBM滚刀破岩的指标因素进行了比较和论证,确定了对TBM滚刀破岩影响较大的因素为单轴抗压强度、节理倾角、岩石温度、节理间距、围压、滚刀刀间距、滚刀贯入度、切削温度、掘进速度、刀盘推力、刀盘转速、刀盘扭矩、滚刀类型;并通过文献分析,建立了相应的隶属函数,可以为今后的TBM滚刀性能评价工作提供参考。

(2)将建立的基于IGAHP-CRITIC和模糊综合评价TBM滚刀破岩性能评价模型运用于具体实例,通过评价结果与实际的对比分析,验证了该评价模型的合理性。

(3)建立的评价体系和方法较有效地反映了滚

刀的综合破岩性能,可为今后滚刀设计、降低设备故障率和提高设备掘进效率提供一定的理论基础。

(4)本文的研究没有考虑滚刀自身的力学性能,存在一定的局限性,今后的研究可综合考虑岩石和滚刀的力学性能展开研究。

## 参考文献:

- [1] ENTACHER M, ROSTAMI J. TBM performance prediction model with a linear base function and adjustment factors obtained from rock cutting and indentation tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 93: 203-215.
- [2] FARROKH E, ROSTOMI J, LAUGHTON C. Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 30:110-123.
- [3] ENTACHER M, LORENZ S, GALLER R. Tunnel boring machine performance prediction with scaled rock cutting tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 450-459.
- [4] 毛红梅,陈 馈,冯欢欢. 不同刀具配置下隧道掘进机高效破岩机理与推力预估[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1627-1633.
- [5] 程永亮. TBM盘形滚刀破岩最优贯入度的数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(4): 936-943.
- [6] 马洪素,龚秋明,王 驹,等. 围压对TBM滚刀破岩影响规律的线性切割试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 346-355.
- [7] 张旭辉,夏毅敏,谭 青,等. 节理岩体下TBM单刃和双刃滚刀破岩特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(10): 1424-1431.
- [8] 刘泉声,刘建平,时 凯,等. 评价岩石脆性指标对滚刀破岩效率的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 498-510.
- [9] 刘洪斌,穆伟涛,肖慧娜,等. TBM滚刀切削温度对破岩效率影响的研究[J]. 机械设计与制造, 2017(2): 207-209.
- [10] 邹 飞,李海波,周青春,等. 岩石节理倾角和间距对隧道掘进机破岩特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1640-1646.
- [11] 张桂菊,谭 青,夏毅敏,等. 岩石温度对盘形滚刀掘进参数破岩特性的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(4): 40-47.
- [12] 孙建中,杨圣奇,温 森. 深部节理岩体TBM滚刀破岩效果及最优刀间距研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 126-131.
- [13] 韩美东,蔡宗熙,曲传咏. 基于动力稳定性的全断面岩石隧道掘进机刀盘临界推进速度研究[J]. 机械工程学, 2014, 50(21): 10-16.
- [14] 何发亮,谷明成,王石春. TBM施工隧道围岩分级方法研

- 究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1350 - 1354.
- [15] 谭青, 朱逸, 夏毅敏, 等. 节理特征对 TBM 盘形滚刀破岩特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10): 4040 - 4046.
- [16] 马洪素, 纪洪广. 节理倾向对 TBM 滚刀破岩模式及掘进速率影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 155 - 163.
- [17] 张桂菊, 谭青, 夏毅敏, 等. 岩石温度对盘形滚刀掘进参数破岩特性的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(4): 40 - 47.
- [18] WANG Feng, LUO Feiyu, HUANG Yubing, et al. Thermal analysis and air temperature prediction in TBM construction tunnels [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 158: 113822.
- [19] 张流, 王绳祖, 施良骥. 我国六种岩石在高围压下的强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1985, 4(1): 10 - 19.
- [20] 曹平, 林奇斌, 李凯辉, 等. 节理倾角和间距对 TBM 双刃盘形滚刀破岩效率的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1293 - 1299.
- [21] 龚秋明, 何冠文, 赵晓豹, 等. 不同贯入度对掘进机滚刀破岩效率的影响[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 62 - 68.
- [22] CHANG Yushuo, YUE Jianfeng, GUO Rui, et al. Penetration quality prediction of asymmetrical fillet root welding based on optimized BP neural network [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 247 - 254.
- [23] 邓志鑫, 晏启祥. 不同贯入度下铁路隧道 TBM 盘形滚刀的破岩效率分析[J]. 路基工程, 2017(3): 49 - 54.
- [24] 罗华, 陈祖煜, 龚国芳, 等. 基于现场数据的 TBM 掘进速率研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(8): 1566 - 1574.
- [25] 宋克志, 袁大军, 王梦恕. 基于盾构掘进参数分析的隧道围岩模糊判别[J]. 土木工程学报, 2009, 42(1): 107 - 113.
- [26] 谭青, 易念恩, 夏毅敏, 等. 全断面岩石掘进机滚刀最优刀间距计算公式研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 883 - 892.

(上接第 224 页)

- [14] 刘胜. 基于同位素 - 水文地球化学法的防渗帷幕可靠性分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [15] 张文兵, 任杰, 杨杰, 等. 基于正交试验土石坝热 - 流耦合模型参数的敏感性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 147 - 154.
- [16] 姜媛媛. 饱和 - 非饱和渗流影响下非连续性岩体边坡稳定分析方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [17] REN Jie, SHEN Zhenzhong, YANG Jie, et al. Back analysis of the 3 D seepage problem and its engineering applications [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(2): 113.
- [18] 沈振中, 江沅, 沈长松. 复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和 - 非饱和渗流有限元模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1091 - 1095.
- [19] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892 - 898.