预切缝辅助滚刀破岩的参数敏感性分析

王健，李明勇，金占军，张帅康，饶志勇
（中交石油天然气管道工程有限公司）

摘　要：为缓解全断面隧道掘进机(TBM)在磨蚀性硬岩中掘进效率低、刀具磨损严重的问题，提出并研究了预切缝辅助滚刀线性破岩技术。基于有限元方法构建了预切缝辅助滚刀破岩数值模型，系统分析了预切缝深度、预切缝间距、滚刀贯入度及围压对破岩效果的影响规律。通过单因素试验与三因素四水平正交试验，结合极差分析，量化了各参数对滚刀法向力、滚动力、可掘进指数及切削系数等性能指标的敏感性。结果表明：预切缝能显著降低滚刀受力，改善破岩效率；贯入度对法向力影响最大，预切缝深度对滚动力与可掘进指数影响最显著；预切缝参数与贯入度之间存在显著耦合效应。研究成果为预切缝辅助破岩技术的参数优化与工程应用提供了理论依据和技术支撑。

关键词：TBM；预切缝；滚刀破岩；参数敏感性；正交试验；数值模拟

0　引言

全断面隧道掘进机(TBM)因其安全、环保、高效等优势，已成为长大深埋隧洞不可替代的主流装备[1]。然而，在磨蚀性硬岩中，换刀与停机等刀具相关作业可占掘进总时间的 1/3，刀具费用亦达施工成本的 1/3[2]，严重制约工效与经济性。为缓解滚刀过量磨损，相关学者围绕刀圈材料[3]、磨损机理[4]及刀体结构[5]开展了大量优化研究，并取得阶段性进展。但上述工作均沿袭“滚刀直接压–剪破岩”的传统范式，未能突破高围压下岩石固有破碎阻抗的本质瓶颈，致使硬岩工况“掘不动、磨得快”的行业痛点依旧突出。

近年来，预切缝辅助破岩被视作有望重构破岩机制的革命性思路。通过在滚刀贯入前预先置入切缝，局部释放围压并诱导裂纹定向扩展，可显著降低刀–岩接触强度，实现“减载–增效–抑磨”的多重目标。2019 年，黄河勘测规划设计研究院联合中铁装备研制的世界首台高压水射流–滚刀协同掘进机“龙岩号”成功下线，并在万安溪引水隧洞实现工程应用[6]，首次验证了该技术在 TBM 场景的可行性。目前研究仍局限于可行性验证与定性效果评价，缺乏面向 TBM 破岩场景的切缝–滚刀耦合参数体系，导致预切缝深度、预切缝间距、围压与滚刀贯入度之间缺乏量化依据，严重阻碍该技术的规模化推广。

鉴于此，本文基于滚刀线性切割模型，系统开展单因素试验，总结预切缝深度、预切缝间距、贯入度及围压对滚刀破岩的影响规律；进一步构建三因素四水平正交试验，量化预切缝深度、间距与滚刀贯入度的敏感性次序。研究成果可为切缝参数选型与掘进控制提供直接依据，对推动硬岩隧道高效、低耗、智能建造具有重要理论价值与工程意义。

1　有限元模型的构建

1.1　材料模型的确定

1）滚刀材料参数模型的确定

盘形滚刀作为 TBM 刀盘上直接与岩石接触的核心部件，其质量的优劣会直接影响到破岩效果。为此，在滚刀刀圈材料选择时，要求其具有硬度高、韧性好的特点。硬度高一方面是为了能够承受住刀具侵入掌子面而受到的岩石的反作用荷载，另一方面是为了具有较强的耐磨能力，能够经受长时间与岩石的摩擦；韧性好是为了在岩渣撞击时不发生脆性断裂，同时减小在侧向荷载等因素作用下引起的振动。滚刀刀圈材料参数[7]如表 1 所示。因研究的重点是岩石的破碎效果，并不考虑滚刀的磨损与变形，因此在建模过程中把滚刀约束为刚体。

表 1　滚刀刀圈材料参数

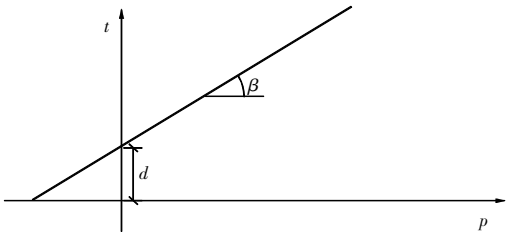
参数	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
数值	7 900	210	0.3

2）岩石本构模型的确定

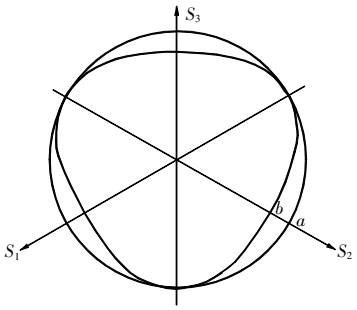
DP(Drucker–Prager)准则形式简单，参数物理意义明确，同时考虑了岩石的静水压力与中主应

力，已有众多国内外学者在滚刀破岩相关领域中使用此模型，并且取得了一系列良好的效果。线性 DP 模型的屈服面如图 1 所示，其中 S_1 为最大主应力；S_2 为中间主应力；S_3 为最小主应力；a、b 为 2 条曲线。本模型采用线性屈服准则为：

$$F=t-p\tan\beta-d \tag{1}$$



(a) t–p 平面上的屈服线



(b) π 平面上的屈服轨迹

图 1　线性 DP 模型的屈服面

3）岩石材料的力学参数确定

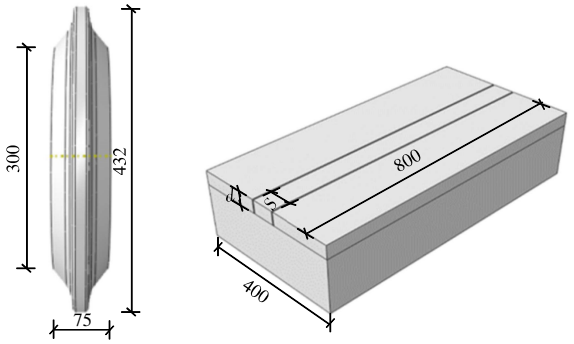
岩石模型的材料参数选自于驻马店花岗岩[8]，见表 2。

表 2　驻马店花岗岩试样的物理力学参数

参数	密度/(g·cm^{-3})	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
数值	2.60	120.47	10.78	23.81	0.22

1.2　模型的尺寸与网格划分

TBM 驱动刀盘通过滚刀破碎岩石，其中滚刀的刀圈是直接与岩石作用的部件，可以把滚刀简化为刀圈。滚刀刀圈与岩石模型图见图 2。



(a) 滚刀刀圈简化模型　(b) 岩石示意图

图 2　滚刀刀圈与岩石模型图(mm)

如图 2(a)所示，常见滚刀的具体参数如下：外径 432 mm，内径 300 mm，刀头直线段宽度为 13 mm，刀刃角 20°，刀圈厚度 75 mm，过渡半径 3.5 mm，采用六面体单元，减缩积分，单元类型为 C3D8R。

$$t=\frac{q}{2}\left[1+\frac{1}{k}-\left(1-\frac{1}{k}\right)\left(\frac{r}{q}\right)^3\right] \tag{2}$$

式中：F 为屈服函数；t 为偏应力，MPa；p 为等效压应力，MPa；β 为屈服面在应力空间上的倾角，(°)；d 为材料的黏聚力，MPa；k 为三轴拉伸强度与三轴压缩强度之比；q 为 Mises 等效应力，MPa；r 为偏应力第三不变量，MPa[3]。

图 2 中岩石尺寸为 800 mm×400 mm×200 mm，由于滚刀滚压岩石时，与滚刀刀刃直接接触的及其临近一定范围的岩石所受影响较大，综合考虑计算时间与精度，将岩石模型分为上下 2 层，上层的厚度为 40 mm，预切缝出现在上层岩样中，预切缝间距为 S，预切缝深度为 d。网格划分上层尺寸为 4 mm，下层为 16 mm，均采用六面体单元减缩积分，单元类型为 C3D8R，允许单元删除，由于滚刀位于切缝之间的情况居多[8]，且破岩效率更高，因此采用异轨的破岩模式。

1.3　分析步及相互作用设定

滚刀破岩过程动态、接触行为复杂，ABAQUS/Explicit 显式动力学模块采用中心差分法进行时间显式积分，并能根据计算状态自适应调整步长，适用于复杂的非线性接触问题。分析步设置中，ABAQUS 默认初始分析步，用于设定岩石模型底部完全固定及长度方向两侧面的法向约束。此外，设置贯入分析步(模拟滚刀向下切入岩石，贯入时间 0.1 s)与滚动分析步(模拟滚刀达到指定贯入度后的滚压过程，滚动时间 1 s，线速度 800 mm/s，自转角速度 3.704 rad/s)。接触采用通用接触，法向为硬接触，切向为罚接触，摩擦系数取 0.3。

1.4　数值模型的验证

根据文献内容[9]，设置预切缝间距 S=70 mm，预切缝深度分别为 0 mm、4 mm、8 mm、12 mm，滚刀贯入度 P=2 mm，共计 4 个数值模型，得到的滚刀平均法向力与试验法向力对比曲线见图 3。

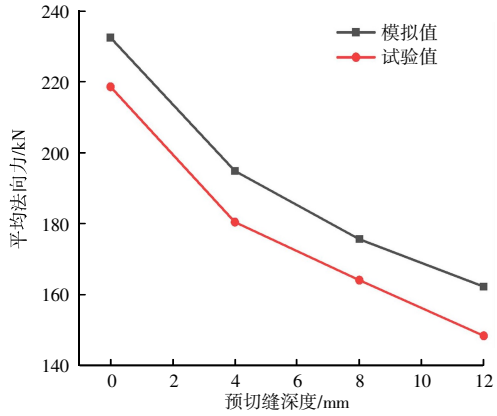


图 3　模拟与试验的平均法向力对比图

由图 3 可知，在异轨模式下(滚刀中置)，滚刀线性破岩过程中，滚刀所受的法向力明显降低，并随着预切缝深度的增加而逐渐减小。模拟数值变化趋势与试验数值变化取值较吻合，且误差在 10%以内，证明模型可行性较高，满足使用要求。

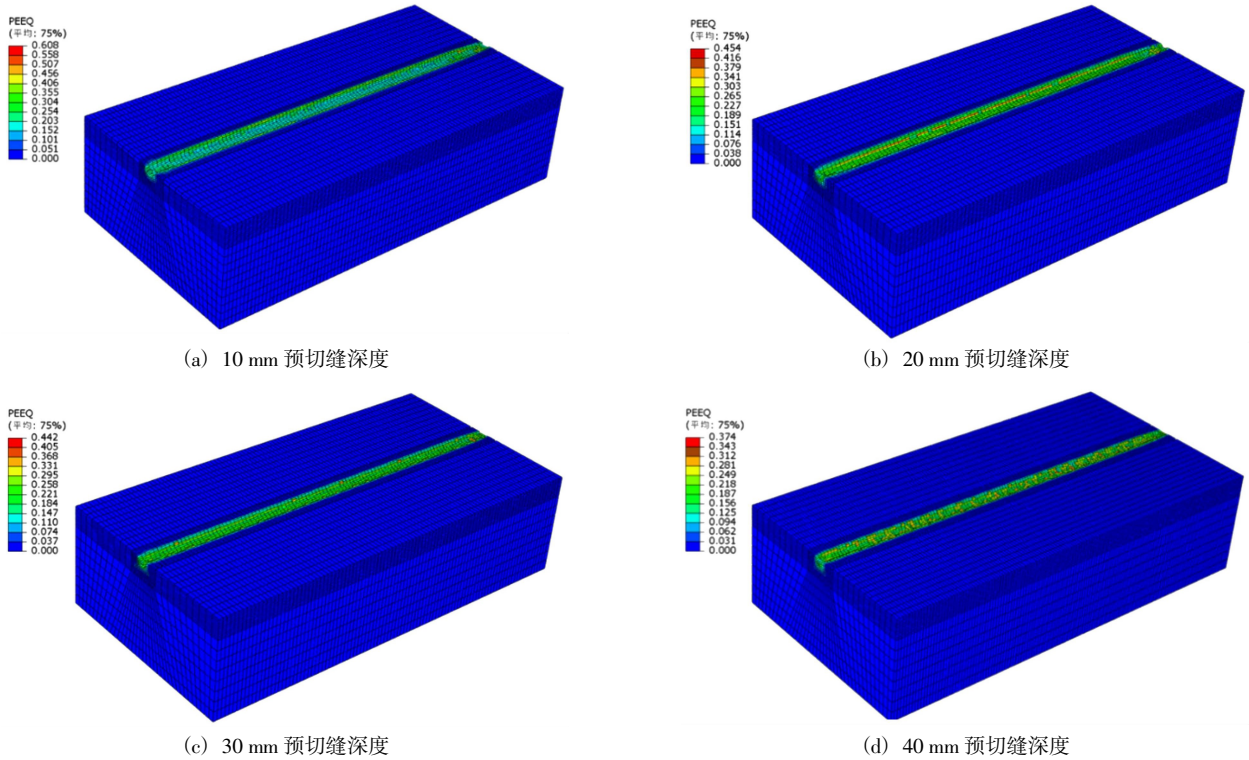
2　结果分析

2.1　预切缝对滚刀线性破岩效果的影响

为了研究预切缝条件下，单因素(预切缝间距、预切缝深度、贯入度、围压)对滚刀破岩的影响，设计了试验方案(见表 3，其余参数与 1.3 节一致)，共计 16 个数值模型，分别对其进行滚压切割破岩。以方案 2 为例，不同预切缝深度的岩石破碎状况如图 4 所示。

表 3　单因素下滚刀破岩试验方案

序号	预切缝间距/mm	预切缝深度/mm	贯入度/mm	围压/MPa
方案 1	40，60，80，100	20	2	—
方案 2	60	10，20，30，40	2	—
方案 3	60	20	2，4，6，8	—
方案 4	60	20	2	10，20，30，40



(a) 10 mm 预切缝深度　　(b) 20 mm 预切缝深度

(c) 30 mm 预切缝深度　　(d) 40 mm 预切缝深度

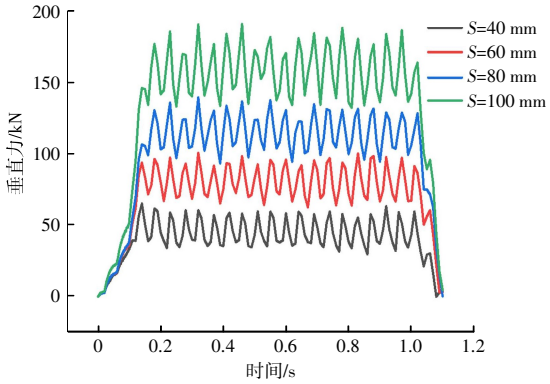
图 4　不同预切缝深度的岩石破碎状况

由等效塑性应变云图可以看出：随着预切缝深度的增加，俯视图上观察到的岩石损伤区域的等效塑性应变具有变小的趋势(图 4(a)、图 4(b))，但当预切缝深度超过 20 mm 后，岩石损伤区域的等效塑性应变基本保持不变，说明预切缝深度对岩石损伤的作用有限。其原因是当预切缝间距一定时(60 mm)，随着预切缝深度的增加，滚刀刀头下方的岩石单元受到的周围岩石单元的直接或

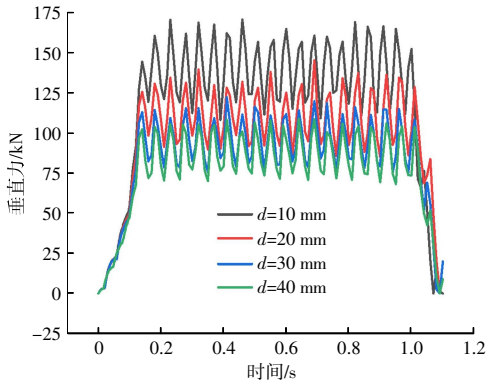
间接约束削弱，即自由面效应进一步加强。在此种情况下，滚刀贯入岩石后，传递给岩石单元的能量，一部分以应变能的形式存储在岩石单元中，另一部分用以裂纹萌生扩展，而随着预切缝深度的增加，预切缝自由面效应不断增强，裂纹更容易扩展，该空间可以被破碎的岩石单元挤压掉，能量也随之耗散一部分，表现为滚刀刀头下方的等效塑性应变变小，即较小的塑性应变就能够产生好的破岩效果。

单因素下，预切缝辅助滚刀破岩过程中，滚刀法向力时程曲线如图 5 所示。

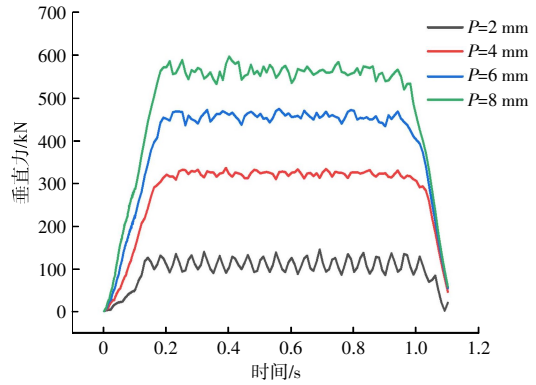
如图 5(a)所示，随着预切缝间距的增大，滚



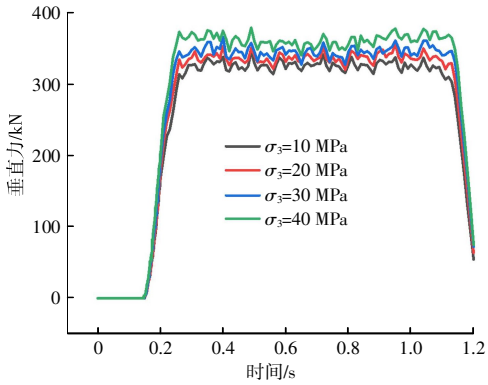
(a) 不同预切缝间距下滚刀垂直力的时程曲线



(b) 不同预切缝深度下滚刀垂直力的时程曲线



(c) 不同贯入度下滚刀垂直力的时程曲线



(d) 不同围压下滚刀垂直力的时程曲线

图 5　单因素下滚刀法向力时程曲线

刀所受的垂直力随之增大，垂直力从 55.89 kN 依次递增 94.54%，17.96%，8.14%直至 138.70 kN。

如图 5(b)所示，随着预切缝深度的增加，垂直力均随之降低，从预切缝深度为 10 mm 时的 119.12 kN，依次降低 17.52%、13.87%、8.34%直至 77.57 kN，降低趋势减缓。

如图 5(c)所示，垂直力对贯入度这一参数的敏感度较大，如从贯入度 P=2 mm 时垂直力为 98.25 kN 依次增加 186.11%、40.59%、22.82%直至 485.39 kN。

如图 5(d)所示，随着围压的增加，滚刀平均垂直力逐渐增加，从围压为 10 MPa 时的 298.98 kN 分别增加 4.02%、3.25%、5.02%直至 337.23 kN，增涨幅度较小。

综上可知，预切缝作用下，围压的因素对滚刀破岩荷载的影响较小，这是因为预切缝的存在改变了岩石的结构场，预切缝之间岩石不再处于三向受压状态，围压施加在岩石模型周围，对预切缝外部岩石单元影响较大，当围压引起的应力传递给预切缝之间的凸起的岩柱较为困难，因此围压对这部分岩石的影响较小。

由此可知，尤其在长大深埋的高应力区进行 TBM 掘进施工时，在滚刀滚压之前，通过预制预切缝的方式可以大幅度的提高正常掘进效率，结合本文预切缝间距与深度的研究，不难推断把握好这几个影响因素，择取合适的预切缝间距、预切缝深度、贯入度等掘进参数既可以提高掘进速度又可以大幅降低滚刀的受力与磨损，可行性较

高，具有巨大的应用前景。

2.2　多因素作用下的正交试验及极差分析

2.2.1　多因素下正交试验及其结果

本文研究了单一因素下掘进参数变化对滚刀受力的影响，但实际工程中，影响滚刀破岩受力的因素多为多因素共同作用，因此开展多因素影响研究十分必要。正交试验是研究多因素多水平问题的重要统计方法，在保证正交性的基础上选取部分试验，既能反映总体特征、保证可靠性，又可减少试验次数、省时省力，同时可分析不同因素对试验指标的敏感程度，明确其主次关系。本文针对预切缝间距、预切缝深度、贯入度 3 个因素对滚刀破岩性能的影响程度，开展三因素四水平正交数值试验，共 16 组仿真分析，选取平均法向力、平均滚动力及可掘进指数等作为评价指标，试验设计及分析结果见表 4。

表 4　正交试验结果

序号	预切缝间距/mm	预切缝深度/mm	贯入度/mm	平均法向力/kN	平均滚动力/kN	可掘进指数/(kN·mm^{-1})	切削系数/%
1	40	10	2	221.60	27.95	119.85	12.61
2	40	20	4	271.74	25.82	74.43	9.50
3	40	30	6	239.61	25.75	44.30	10.75
4	40	40	8	271.68	40.66	38.43	14.97
5	60	10	4	471.87	66.00	130.93	13.99
6	60	20	2	98.25	39.30	68.55	40.00
7	60	30	8	426.62	46.25	59.75	10.84
8	60	40	6	215.10	13.97	43.68	6.49
9	80	10	6	657.60	87.19	124.39	13.26
10	80	20	8	726.92	79.47	103.69	10.93
11	80	30	2	195.65	24.63	106.99	12.59
12	80	40	4	257.00	31.13	70.83	12.11
13	100	10	8	862.21	90.99	124.89	10.55
14	100	20	6	594.82	67.10	111.86	11.28
15	100	30	4	371.90	48.15	202.61	12.95
16	100	40	2	134.47	48.90	42.81	36.36

2.2.2　极差分析

正交试验具有均匀分散的特点，无法直观体现试验结果，为了研究掘进参数因素对 TBM 盘形滚刀破岩性能的影响，对正交试验的结果进行极差分析，可以更直观地分析出预切缝的间距、预切缝深度与滚刀贯入度对岩石破碎效果的影响规律。分别对表 4 中平均法向力、平均滚动力、可掘进指数、切削系数 4 种评价指标结果进行极差分析，极差分析结果见表 5。

其中 k_i 为相同影响因素下所有水平破岩性能

表 5　极差分析结果表

评价指标	因素	k_1	k_2	k_3	k_4	极差 R	备注
平均法向力/kN	预切缝间距	251.16	303.64	459.29	490.85	239.69	第 3 位
	预切缝深度	553.32	422.93	309.12	219.56	333.76	第 2 位
	贯入度	162.49	343.13	426.78	572.53	410.04	第 1 位
平均滚动力/kN	预切缝间距	30.05	41.38	55.61	63.79	33.74	第 2 位
	预切缝深度	68.03	52.92	36.2	33.67	34.37	第 1 位
	贯入度	35.2	42.78	48.5	64.34	29.15	第 3 位
可掘进指数/(kN·mm^{-1})	预切缝间距	69.25	75.73	101.48	120.54	51.29	第 2 位
	预切缝深度	125.02	89.63	103.41	48.94	76.08	第 1 位
	贯入度	84.55	119.7	81.06	81.69	38.64	第 3 位
切削系数/%	预切缝间距	12.00	17.80	12.20	17.80	5.8	第 3 位
	预切缝深度	12.60	17.90	11.80	17.50	6.1	第 2 位
	贯入度	25.40	12.10	10.40	11.80	15	第 1 位

评价指标的均值，极差 R 为 k_i 中最大值与均值的差值，然后根据极差 R 的相对大小，得到各影响因素对滚刀破岩性能指标影响大小的主次顺序。

极差 R 可以理解为影响因素(自变量)在不同水平方向上变动时，试验性能评价指标(因变量)的幅度变化程度，性能评价指标越大，表明该因素对其影响程度越大。由此可知，对于平均法向力而言，贯入度对其影响程度最大，预切缝深度的影响次之，预切缝间距的影响最小；对于平均滚动力与可掘进指数而言：预切缝深度对其影响程度最大，预切缝间距的影响次之，贯入度的影响最小；对于切削系数而言：贯入度对其影响程度最大，预切缝深度的影响次之，预切缝间距的影响程度最小。

3　结语

本文围绕预切缝辅助滚刀线性破岩技术，开展了系统的数值模拟与参数敏感性分析，主要结论如下：

1）通过预先在岩体中设置切缝，可有效释放围压、诱导裂纹扩展，降低滚刀法向力与滚动力，提升破岩效率。

2）在单因素与多因素耦合作用下，贯入度对滚刀法向力影响最大，预切缝深度对滚动力与可掘进指数影响最显著，预切缝间距的影响相对较小。各因素之间存在明显的耦合效应，需综合考虑优化。

3）当预切缝深度超过 20 mm 后，继续增加深度对破岩效果的提升趋于平缓，表明存在合理预切缝深度范围，避免过度切割造成能量浪费。

4）预切缝改变了岩体结构，削弱了围压对破岩过程的影响，使得该技术在高地应力环境中仍能保持较高的掘进效率。

参考文献：

[1] 俞琚. 中国全断面隧道掘进机械行业现状和发展[J]. 隧道建设，2016，36(11)：1401.

[2] Su W L，Li X G，Jin D L，et al. Analysis and prediction of TBM disc cutter wear when tunneling in hard rock strata：A case study of a metro tunnel excavation in Shenzhen，China[J]. Wear，2020，446/447：203190.

[3] 尚勇，贾希贝，孙靖东，等. 新型 TBM 刀圈材料 7Cr5Mo2MnVSi 钢的回火硬度预测模型研究[J]. 机械工程学报，2025，61(12)：83-92.

[4] 刘建琴，魏琛，郭伟. 基于离散元方法的 TBM 刀盘磨损研究及优化设计[J]. 铁道工程学报，2020，37(9)：85-90.

[5] 张皓诣，张蒙祺，莫继良，等. 不同刃型 TBM 滚刀载荷与振动特性实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2024，55(4)：1340-1350.

[6] Zheng Y L，He L. TBM tunneling in extremely hard and abrasive rocks：Problems solutions and assisting methods[J]. Journal of Central South Untversity，2021，28(2)：454-480.

[7] 王华伟，康正阳，王英才，等. 极硬岩条件下盾构滚刀掘进过程数值模拟[J]. 油气储运，2024，43(7)：819-826，832.

[8] Li B，Zhang B，Hu M M，et al. Full-scale linear cutting tests to study the influence of pre-groove depth on rock-cutting performance by TBM disc cutter[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2022，122：104366.

[9] 张宏图，杨耀浦，刘勇，等. 低压磨料空气射流切槽辅助 TBM 滚刀破岩规律研究[J]. 煤炭学报，2024，49(11)：4429-4440.