

# 临空面对 TBM 楔刀贯入破岩效果影响试 验研究

---

汤胜旗 曾亚武 叶阳

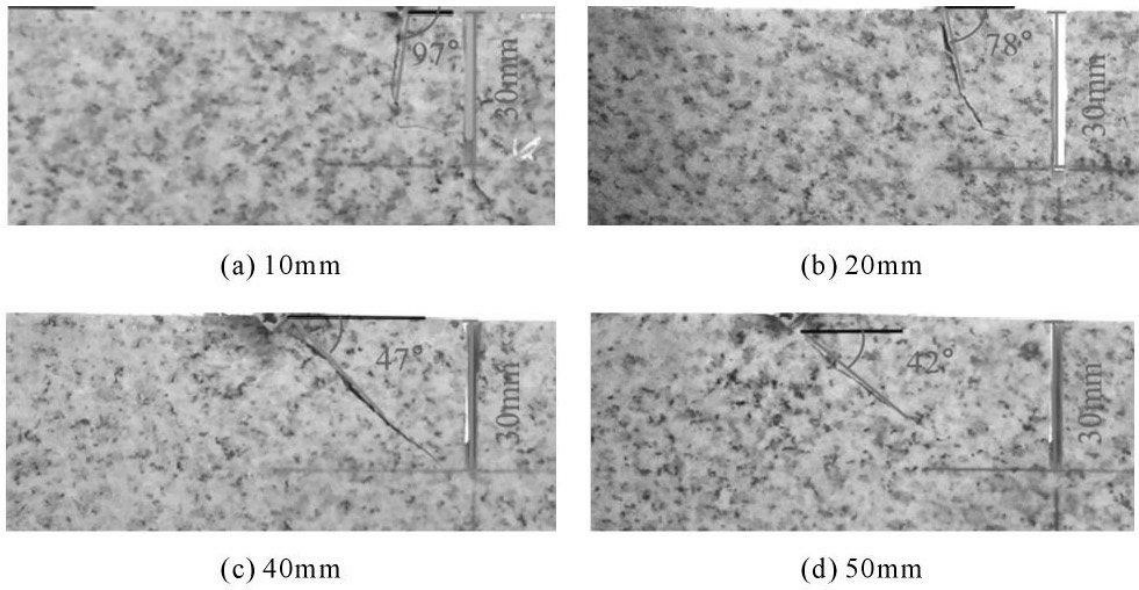


图 12 楔刀与临空面不同距离下裂纹贯通情况

Fig. 12 Crack penetration results at different distances between wedge cutter and free surface

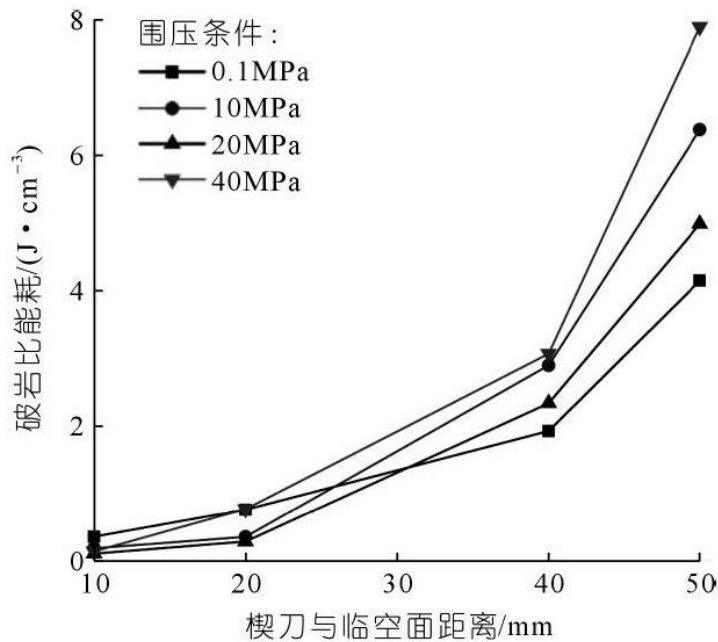


图 13 破岩比能耗随楔刀与临空面的距离变化曲线

Fig. 13 Specific energy consumption of rock breaking versus the distance between wedge cutter and free surface

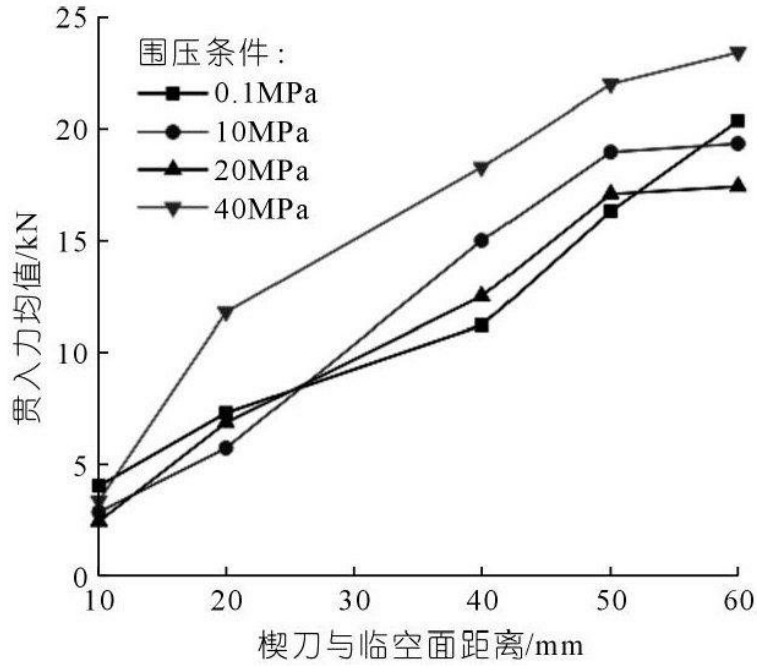


图 9 贯入力均值随楔刀与临空面的距离变化曲线  
 Fig. 9 Mean value of penetration force versus distance between wedge cutter and free surface

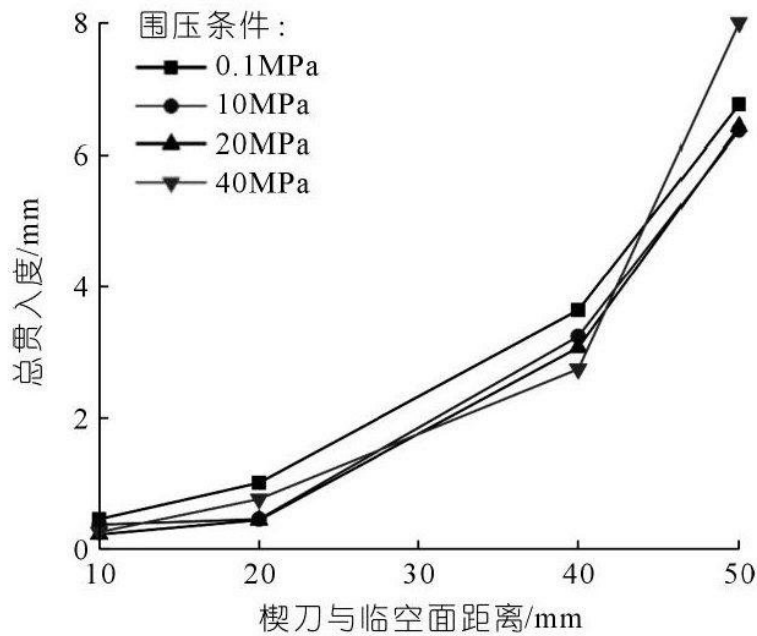


图 10 总贯入度随楔刀与临空面的距离变化曲线  
 Fig. 10 Total penetration in a single test versus distance between wedge cutter and free surface



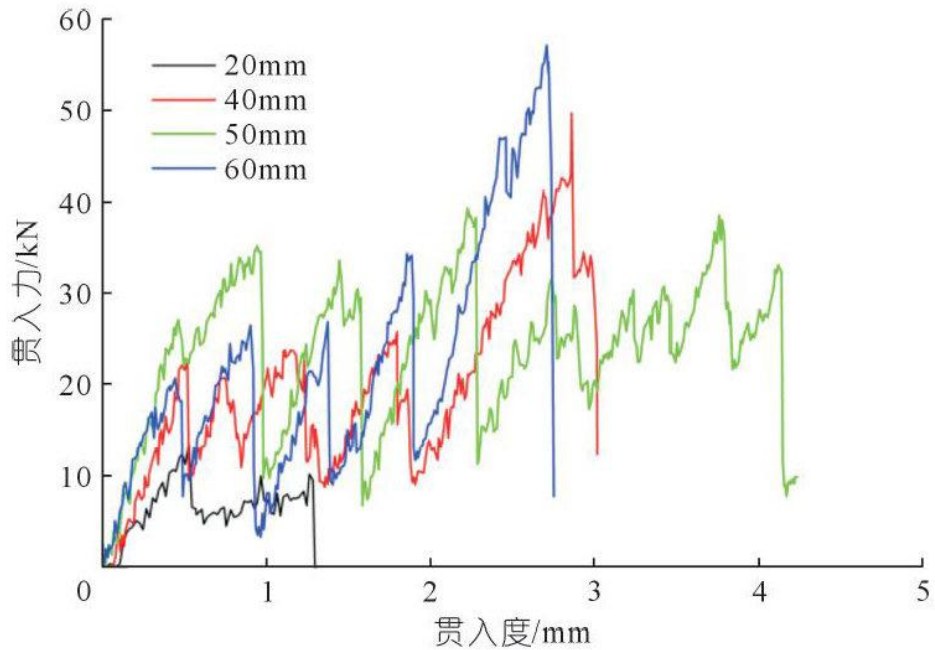


图 8 楔刀与临空面不同距离下的贯入力 - 贯入度曲线

Fig. 8 Penetration force versus penetration at different distances between wedge cutter and free surface

摘要：为提高深部地下高地应力硬岩掘进效率，对有、无中间临空面的板状花岗岩试样进行了楔刀垂直贯入破岩试验，以探究临空面辅助作用下不同围压、不同楔刀与临空面的距离、不同临空面深度等对楔刀破岩效果的影响。试验结果表明：临空面辅助破岩可大幅降低破岩比能耗；在临空面辅助作用下，楔刀下主裂纹向下延伸后朝向临空面发展贯通，形成三角形大粒径块体岩渣，减小了岩屑的产生；围压对破岩效率具有重要影响，在最优围压时破岩比能耗最低；主裂纹贯通至临空面底部时，伴随楔刀与临空面的距离增大，破岩比能耗呈现非线性增长；临空面深度控制主裂纹朝向临空面发展贯穿，从而影响破岩比能耗。研究结果为 TBM 高效破岩提供了新思路。

关键词：临空面；楔刀破岩；超前导洞；TBM；围压；破岩比能耗

中图法分类号： TV39

文献标志码： A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.11.029

## 0 引言

在深部地下围岩开挖掘进中，高地应力硬岩会显著加剧全断面隧道掘进机 TBM (Tunnel Boring Machine) 刀具的磨损量，降低滚刀破岩效率，增加工程造价 [1-4]。超前开挖导洞 TBM 扩挖成孔能有效改善这种缺陷 [5]，该工法开挖面沿导洞轴线呈对称状态，导洞边缘在掌子面待掘进岩体中形成临空面，使临近岩体产生卸压效应，显著降低破岩力，提高破岩效率 [6]。目前，关于该方面的研究还较少。因此，开展深地高地应力硬岩中 TBM 掘进时临空面辅助破岩效果研究，对提高深地高地应力硬岩 TBM 掘进效率、降低造价具有重要的工程实用价值。

Zhang 等 [7] 研究表明侧向临空面的存在能够显著提高滚刀破岩效率。陈昊博 [8] 研究液压破碎锤破岩证明了临空面辅助作用能提升破岩效率。莫振泽等 [9-10] 的数值模拟试验发现破碎坑临空面有助于裂纹扩展并提高滚刀破岩效率。Geng 等 [6] 通过试验发现在临空面辅助作用下，岩石破坏以张拉破坏为主，并可显著提升破岩效率。上述研究中，临空面对提升破岩效率具有显著促进作用，但是研究中没有考虑围压的影响，且其临空面存在形式与开挖导洞形成的临空面差异较大。

夏毅敏等 [11] 研究发现：低围压时，裂纹垂直方向的发展受到抑制，而向水平方向和自由面扩展；围压较大时 ( $>20$  MPa)，裂纹各向发展均受到抑制。Liu

等[12-13]通过数值模拟和室内试验得到类似结论。翟淑芳等[14]和刘琪[15]的数值模拟试验表明：岩体围压一方面抑制滚刀下中央主裂纹向下扩展，同时导致裂纹趋向于水平方向发展；另一方面，地应力足够高（20 MPa）时，岩体表面的板裂化现象有助于岩石破碎。综上，合理围压条件对滚刀破岩有一定促进作用。

Roxborough 等[16]、闫长斌等[17]统计 TBM 破岩岩渣发现大粒径岩渣比例越大，即粗糙度指数越大，破岩效率越高。龚秋明等[18]统计了滚刀切割试验中的岩渣粒径分布，也具有相同规律。可见，破岩时提高大粒径岩渣比例有利于高效破岩。

滚刀破岩时的各分力中，垂直作用力最大并主导岩石的破坏以及内部裂纹的扩展。Innaurato 等[19]认为将滚刀破岩简化为二维的侵入破岩进行试验研究是可行的。开挖超前导洞 TBM 扩挖成孔，导洞形成的临空面边缘岩石径向破坏呈现轴对称性，以二维楔刀破岩研究临空面对于滚刀破岩效果的影响是便捷可行的。

基于上述研究和理论，本文将超前导洞形成的临空面辅助滚刀破岩三维模型简化为二维应力模型进行试验研究。采用坚硬花岗岩制作岩石板状试样，中间预制缝隙形成临空面，在两侧垂直临空面处施加围压，利用楔刀垂直贯入破岩探究临空面对滚刀破岩效果的影响。

## 1 试验设置

### 1.1 试验装置

本次研究采用的试验装置是刘琪[15]自行设计加工的岩石二维楔刀贯入试验装置，该装置可以对试样施加横向约束以模拟围压。如图 1 (a) 所示，主要构件包括凹形侧向约束框架，内部放置矩形岩石试样，试样两侧和下侧置承压板，利用横向液压千斤顶水平加载来施加围压。本次试验采用 90° 刃角的楔形刀头，该楔刀宽度和刃角长度均为 40 mm，楔形刀头洛氏硬度[20]为 HRC64，相对于岩石材料可视作刚体。

采用 RMT-301 电液伺服刚性试验机作为本次试验的加载系统进行竖向贯入试验。试验控制方式为垂直行程控制，位移加载速率为 0.005 mm/s，可视为准静态加载过程。试验中贯入荷载和贯入度由内置传感器进行测量和采集，并可以实时记录和显示。该试验机采集数据精度较高，可自动记录荷载曲线峰值前后的加载全过程。

## 1.2 试样准备

本次试验采用的是芝麻白坚硬花岗岩，产地为湖北省。试样从同一花岗岩岩块上利用岩石切割机进行切割，如图 1 (b) 所示，加工成尺寸为 190 mm×150 mm×23 mm (长×高×厚) 的板状，试样厚度误差控制在 0.5 mm 以内，采用磨石机对试样侧面和两底面进行打磨，平整度在 0.05 mm 以下。在岩石试样中间预制一定深度缝隙，宽度为 3 mm。试样正面设置辅助线和分组标号等，便于后续精准放置刀头等操作。制作完成后的试样表面平整光滑，无任何节理和裂隙等缺陷。

按照国际岩石力学学会推荐的试验方法进行了单轴压缩试验和巴西劈裂试验，测定了试验用花岗岩的主要力学参数，如表 1 所列。可知该花岗岩弹性模量和单轴抗压强度均较高，且压拉强度比较大，为典型的高强度脆性岩石。

### 1.3 试验及测试方案

本次试验主要针对围压、临空面深度、刀头与临空面的距离等影响楔刀破岩效果的因素，设置了若干试验变量，设置情况如表 2 所列。

主要试验步骤：将试样置于承压板中心位置，并使试样中心与横向液压千斤顶中心位于同一平面上；利用横向液压千斤顶施加设定围压；装置刀头并设定好刀刃方向，平移凹型侧向约束框架，使刀头精确定位；启动竖向加载，静托刀头与试样接触时松开。试验过程中观察记录主要破岩试验现象。单次试样贯入试验停止后，取下刀头，释放千斤顶油压，收集岩渣至塑封袋内，并贴好标签。清理场地后进行下次试验。

单次试样贯入试验停止判别标准为：当出现主裂纹发展造成岩块劈裂；或者在较大贯入度下贯入力达到峰值后以较低贯入力平稳波动，对应破岩现象为有细碎岩渣生成但是无主裂纹形成时停止试验；取大粒径岩渣形成时贯入度为单次试样试验总贯入度。

### 2 试验结果分析

对试样在试验前后称重，以质量变化计算岩渣总体积，以大粒径岩渣的质量换算其体积。采集楔刀贯入试验数据后，绘制贯入力-贯入度变化曲线，并获得从试验开始到停止时的贯入力峰值，计算贯入力均值（曲线 x 轴所围成面积/底边）[21]和破岩比能耗等参数。破岩比能耗定义为刀具贯入破坏单位体积岩石所消耗的能量[22]，参见式（1）。根据试验现象和参数值定性定量评价各因素对临空面辅助条件下楔刀破岩的影响。

比能耗=贯入力均值×总贯入度岩渣总体积



## 2.1 无临空面条件下楔刀劈裂试验

为比较临空面对楔刀破岩效率的影响, 本文首先进行了无临空面情况下楔刀劈裂岩石的对照试验, 即楔刀从试样中间贯入无预制缝隙岩石试样试验。

围压为 0.1 MPa 时, 楔刀贯入试验中, 楔刀下部出现纵向主裂纹并迅速贯通至岩石试样底部, 如图 2 (a) 所示。由于侧向围压较小, 侧边缘仍可以产生一定变形, 可近似认为存在一侧临空面, 且脆性岩石的纵向裂纹扩展能力较强 [23], 楔刀贯入一定深度后劈裂作用造成楔刀下部岩石出现拉裂破坏并迅速形成主裂纹贯通至试样底部; 随着侧向围压逐步增大 (10, 20 MPa 和 30 MPa), 楔刀下仅局部岩石被挤压崩裂, 造成少量岩石粉碎和岩屑产生, 整体破坏形态呈现长轴水平的半椭圆形, 没有纵向主裂纹产生, 如图 2 (b) ~ (d) 所示。这是由于施加了围压, 楔刀下裂纹向下发展受到抑制, 横向裂纹萌生、发展并延伸至上表面, 故试样表面呈现长轴水平的半椭圆破坏区域, 这与围压限制纵向主裂纹扩展的结论相一致 [14]。楔刀下部为密实平整状态, 这也与滚刀下部密实核现象一致 [10]。试验中楔刀下岩石出现崩裂, 响声较大, 这与岩石试样为脆性岩石、强度较高的特点也相一致。

图 3 绘制了无临空面存在时楔刀贯入力-贯入度变化曲线。图 4 绘制了贯入力峰值和均值随围压变化的曲线。由图 3 可以看出, 贯入力随贯入度增加呈现锯齿状波动并间断性“跃进”上升, 这与实际工程 TBM 掘进时推力曲线变化特征相似, 说明本文试验装置能够模拟滚刀破岩的受力特征。伴随围压增高, 贯入力波动幅度明显增大, 说明高围压下滚刀磨损更严重, 与相关文献研究结果一致 [2]。由图 4 可以看出, 随着围压增大, 贯入力峰值和均值两者均呈现先增大、后一定程度减小的趋势, 且 0.1 MPa 围压下二者均最小。围压为 20 MPa 时贯入

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/29715416500006153>