深地TBM双滚刀作用下岩体破碎能量特征研究*

高锋[1],刘小亮[2],赵强[3],邵静静[4]

(1.山西工程技术学院 科研工作部, 山西 阳泉市 045000;
2.山西工程技术学院 土木工程系, 山西 阳泉市 045000;
3.山西工程技术学院 机械工程系, 山西 阳泉市 045000;
4.山西工程技术学院 矿业工程系, 山西 阳泉市 045000)

摘要:针对全断面岩石掘进机(TBM)面临的深地高围压复杂条件下高效破岩技术与理论难题,系统探究了深地TBM双滚刀破岩能量演化与耗散特征。基于Abaqus非线性有限元软件构建双滚刀侵入破岩数值模型,分析变围压条件下岩体损伤破坏过程与能量演化特征,研究围压、岩石单轴抗压强度、刀刃宽度、刀间距对岩体能量耗散的影响。研究结果表明:围压会显著改变岩体损伤破坏模式,围压较小时,岩体以纵向损伤发育为主导,围压增大会促进侧向损伤发育,出现拉剪复合断裂;围压为25 MPa时,能量突变耗散速率达到峰值,最早进入能量稳定耗散阶段;岩石抗压强度与能量耗散呈非线性关联,贯入度大于1 mm时,岩石抗压强度为105 MPa能量耗散率最低,该条件下岩石易发生破碎;在高贯入度条件下,增加刀刃宽度和刀间距可以促进岩体内部能量释放,提高TBM掘进效率。研究成果可为深部工程TBM掘进节能增效提供理论依据。

关键词:深部掘进;能量耗散;围压;岩体破碎;滚刀参数

中图分类号:TD263.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)11-0029-09

Research on the Energy Characteristics of Rock Breaking Under the Action of Dual Disc Cutters of TBM in Deep Underground

GAO Feng[1], *LIU Xiaoliang*[2], *ZHAO Qiang*[3], *SHAO Jingjing*[4]

(1.Deparment of Scientific Research Work, Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi 045000, China;
2.School of Civil Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi 045000, China;
3.School of Mechanical Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi 045000, China;
4.School of Mining Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi 045000, China)

Abstract: Aiming at the efficient rock breaking technology and theoretical challenges faced by the full section tunnel boring machine (TBM) under complex conditions of deep underground high confining pressure, systematically explorations of the energy evolution and dissipation characteristics of TBM dual disc cutters for rock breaking in deep ground were obtained. Based on Abaqus nonlinear finite element software, a numerical model of dual disc cutters for intrusion rock breaking was constructed to analyze the damage and energy evolution characteristics of rock mass under variable confining pressure conditions. The effects of confining pressure, uniaxial compressive strength of rock, disc cutter blade width, and disc cutter spacing on energy dissipation of rock mass were studied. The research results indicate that confining pressure significantly changes the damage and failure mode of rock mass. When the confining pressure is low, longitudinal damage development is dominant in the rock mass, and increasing confining pressure promotes lateral damage development, resulting in tensile shear composite fracture. When the confining pressure is 25 MPa, the energy sudden change dissipation rate reaches its peak and enters the energy stable dissipation stage at the earliest. The compressive strength of rocks is nonlinearly correlated with energy dissipation. When the penetration is greater than 1 mm and the compressive strength of rocks is 105 MPa, the energy dissipation rate is the lowest. Under this condition, rocks are prone to breakage. Under high penetration conditions, increasing the disc cutter blade width and disc cutter spacing can promote energy release within the rock mass and improve TBM excavation efficiency. The research

* **收稿日期**:2025-04-12
基金项目:山西省基础研究计划资助项目(20210302124135)
作者简介:高锋(1988—),男,安徽淮北人,博士,副教授,主要研究方向为岩石破碎节能降耗工艺与理论。E-mail:gao7975498@163.com
通信作者:赵强(1995—),男,山西忻州人,硕士,助理教授,主要研究方向为机械结构优化设计。E-mail:zq1223710194zq@126.com

results can provide theoretical basis for energy-saving and efficiency improvement of TBM excavation in deep engineering.
Key words: Deep excavation, Energy dissipation, Confining pressure, Rock breaking, Parameter of disc cutter

0 引言

全断面岩石掘进机(Tunnel Boring Machine,TBM)是集破岩、出渣、支护、通风、排水等多功能于一体的隧道施工设备,易于实现智能化作业,在深部地下空间开发、深埋隧道掘进方面的应用逐渐增多[1-2]。随着浅部矿产资源日益减少,"向地球深部进军"已成为矿业开发的必然趋势,TBM 在矿业领域的应用也愈发普遍[3-4]。谢和平等[5]提出,以深部 TBM 为先导,结合深部矿产资源智能化、原位流态化开采技术,有望实现深井矿山无人化绿色安全高效采矿。滚刀破岩是 TBM 掘进的核心环节,但深地环境下滚刀破岩面临高地应力、高地温、高渗透压等复杂地质条件,TBM 滚刀作用下深部岩石与浅部岩石的破碎特征存在显著差异[6]。

围压会影响 TBM 深地工程掘进时的滚刀破岩特性,近年来,部分学者研究了高地应力或高围压条件下 TBM 滚刀破岩特征。雷天衢等[7]使用颗粒流离散元程序,研究得出双刃盘形滚刀作用下地应力增大时侧向限制作用明显,并建立了垂直力、破岩比能与地应力的定量关系。张蒙祺等[8]采用二维颗粒流离散元模型与物理试验方法,分析抗压强度存在显著差异的岩石中,滚刀侵入破坏过程与比能耗变化,研究得出围压为 10 MPa 时平头滚刀侵入破岩的比能高于圆弧滚刀。夏毅敏等[9]基于颗粒流离散元法建立了 1～25 MPa 围压条件下滚刀侵入破碎岩石的模型,认为围压和刀宽增加均会增大滚刀破岩阻力。谭青等[10]采用颗粒离散元法研究不同围压与节理特征下滚刀破岩特征,将三维的滚压问题简化为二维的侵入问题,得出当岩石节理倾角为 15°～75°时,比能耗随围压增大呈先增大后减小的变化特征。翟淑芳等[11]研究了水平方向围压为 0,5,10,15,20 MPa 条件下 TBM 滚刀的破岩过程及破岩模式。张旭辉等[12]运用颗粒离散元研究围压作用下 TBM 双刃中心滚刀破岩特性,发现随围压增加,最优刀间距呈增大趋势。温森等[13]使用 5 种强度岩石开展不同侧压系数条件下滚刀滚压破岩特性研究,发现侧压系数一定时,滚刀滚压破岩的比能耗随岩石强度的增大而显著增加。

岩石在外载荷作用下破坏的本质是能量传输、积聚、耗散和释放,通过分析岩石破坏过程的能量演化规律可以表征岩石破裂过程中的脆性特征,以及岩石失稳的内在机制[14-17]。谢良涛等[18]、蒋邦友等[19]研究了钻爆法与 TBM 开挖方式下围岩应变能积聚特性与损伤特征,揭示了深部隧洞在不同掘进方式下的岩爆孕育机理。深地环境下滚刀侵入破岩趋于复杂化,已有的文献对滚刀侵入破岩参数与破岩效果的关系进行了广泛的研究,但对深地 TBM 滚刀作用下岩体破坏能耗特征研究较少。

本文通过 Abaqus 数值模拟软件构建双滚刀侵入破岩数值模型,研究了深地不同围压条件下双滚刀侵入破岩过程中岩体能量的演化特征,重点考察了围压、岩石抗压强度、刀宽和刀间距对能量积聚、耗散的影响,从能耗的角度揭示了深地双滚刀侵入破岩的内在机理。研究成果可为提高深地 TBM 滚刀破岩效率提供新思路和理论依据。

1 TBM 滚刀侵入破岩模型与能量计算

1.1 TBM 双滚刀侵入破岩几何模型

TBM 掘进时,滚刀在巨大推力和扭矩作用下贯入切割岩石,垂直力主导了滚刀下方密实核形成和裂隙扩展,在多把滚刀共同作用下,裂纹交汇剥落岩块,此过程伴随岩石储能与释放。刘建琴等[20]将滚刀破岩简化为侵入破岩,选择适用范围最广的窄形平刃滚刀建立双滚刀侵入破岩模型。模型尺寸为 0.5 m×0.2 m,采用位移加载方式模拟滚刀贯入破岩,贯入速度为 0.5 mm/s,最大贯入度为 3 mm。约束模型底部边界,对模型左右边界施加围压,模型顶部边界为自由面。目前,我国多数煤矿的开采深度为 200～500 m,巷道围压为 5～10 MPa;而千米级深煤矿达到 60 处,围压范围为 20～50 MPa;此外,金川镍矿(采深 800～1 000 m)、锦屏二级水电站(埋深 2 400～2 520 m)、加拿大 Sudbury 矿区(采深 2 000～2 500 m)等深部工程围压处于 15～50 MPa。因此,本文对模型施加 5,15,25,35,45 MPa 的围压,分析围压对双滚刀侵入破岩过程中岩体能量耗散的影响。依次改变模型岩体力学性质、刀刃宽度和刀间距,系统研究深地高围压条件下双滚刀侵入破岩的能耗特征。深地环境下 TBM 掘进以硬岩为主,模型中岩体的力学性质见表 1,滚刀参

数见表 2,双滚刀侵入破岩模型如图 1 所示。

表 1 岩体力学性质

Table 1 Mechanical properties of rock mass

岩石类型	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/(kg/m³)	泊松比
石灰岩	80	5.40	28.50	2 350	0.35
砂岩	90	6.10	29.30	2 200	0.22
北山花岗岩	105	6.43	23.01	2 600	0.19
大理岩	120	8.00	39.60	2 700	0.25
花岗岩	146	9.75	58.10	2 640	0.20

表 2 TBM 滚刀模型参数

Table 2 Parameters of TBM disc cutter model

刀刃宽度/mm	刀间距/mm
5, 15, 20, 25, 30, 35	60, 80, 90, 100, 120

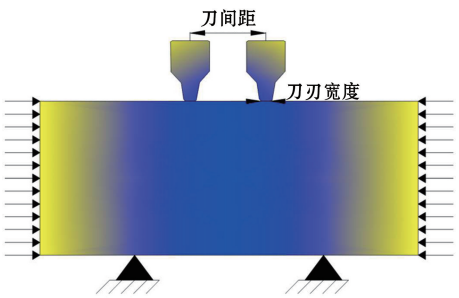


图 1 TBM 双滚刀侵入破岩模型

Fig.1 Penetration rock-breaking model of TBM dual disc cutters

1.2 TBM 双滚刀侵入破岩能量计算原理

Abaqus 是一款非线性有限元分析软件,可用于模拟岩石材料的力学响应及能量演化过程。基于内置的 Drucker-Prager 模型,采用显式动力学算法模拟深地高围压作用下双滚刀侵入破岩过程,计算岩体总变形能、弹性能与耗散能。

(1) 总应变能计算。

总应变能是岩石在变形过程中储存和耗散的总能量,包括弹性应变能、塑性耗散能和损伤耗散能,岩石塑性变形和损伤耗散的能量统称为耗散能,见式(1)。

$$U_t = U_e + (U_p + U_d) = U_e + U_s \tag{1}$$

式中:U_t 为岩石总应变能;U_e 为加载后岩石储存的弹性能;U_p 为岩石塑性耗散能;U_d 为岩石损伤耗散能;U_s 为岩石总耗散能。

总应变能计算公式如下:

$$U_t = \sum_N \left(\int_{V_e} \left(\frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}_{ij} \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{e} + \int_0^{\boldsymbol{\varepsilon}^p} \boldsymbol{\sigma}_{ij} \, \mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{p} \right) \mathrm{d}V \right) \tag{2}$$

式中:V_e 为单元体积;N 为单元数量;$\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ 为柯西应力张量;$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{e}$ 为弹性应变张量;$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{p}$ 为塑性应变张量;i、j 分别为单元格的行、列序号;上标 e、p 分别表示弹性应变、塑性应变。计算时通过场应变与应力计算局部能量密度,Abaqus 自动对单元积分点求和,得到总弹性应变能。

(2) 弹性变形能计算。

弹性变形能是岩石卸载后可恢复变形的能量,与弹性变形相关,计算公式如下:

$$U_e = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}_{ij} \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{e} \tag{3}$$

假设模型中岩体各项同性,弹性应变能计算可简化为:

$$U_e = \frac{1}{2} \left(\frac{(1+\upsilon)}{E} \boldsymbol{\sigma}_{ij}^{2} - \frac{\upsilon}{E} (\sigma_{kk})^2 \right) \tag{4}$$

式中:υ 为岩石泊松比;E 为岩石弹性模量;σ_{kk} 为连续介质中应力张量的迹,为静水应力的 3 倍,其平方值反映了静水压力对弹性变形能的贡献。

根据上述公式,岩石的总应变能减去弹性变形能,即可得到岩石破坏过程的耗散能。

2 TBM 双滚刀作用下深部岩体损伤破坏过程

图 2 为不同围压条件下深地双滚刀侵入破岩过程中岩体损伤云图(以岩石单轴抗压强度为 146 MPa 为例)。由图 2 可知,围压为 15 MPa 时,贯入度从 0.25 mm 增加到 0.5 mm,岩体损伤区域纵向扩展;贯入度继续增加到 0.75 mm 时,岩体出现侧向损伤;贯入度达到 1 mm 时,侧向损伤出现交接现象。围压为 25 MPa 时,较小贯入度下岩体纵向损伤发育受到抑制,滚刀下方出现小范围损伤积聚区,侧向损伤发育不显著;贯入度为 1 mm 时,岩体侧向损伤发育显著,滚刀之间出现断裂贯通,岩片剪切剥落。围压为 35 MPa 时,滚刀贯入岩体的初始阶段即出现明显的侧向损伤,但纵向损伤发育受到抑制;贯入度达到 0.75 mm 时,侧向损伤交接,形成拉伸断裂;贯入度进一步增加到 1 mm 时,岩体出现剪切和拉伸复合断裂。

上述结果表明,在一定围压范围内,围压增大会抑制滚刀下方纵向裂纹的扩展,但同时促进侧向损伤的发育,使岩体在较低贯入度下产生拉伸断裂。在高围压条件下,岩体表现出板裂倾向,侧向裂纹更易扩展并贯通,有利于滚刀间形成岩片。

3 不同围压作用下 TBM 双滚刀侵入破岩能量演化特征

3.1 不同围压作用下岩体能量随贯入度的变化

通过岩体能量演化分析不同围压条件下双滚刀侵入破岩机制。设定岩石单轴抗压强度为 146 MPa，刀间距为 80 mm，刀刃宽度为 15 mm。通过改变围压大小，开展了不同围压条件下双滚刀侵入破岩的数值模拟。统计岩体总变形能、弹性能和耗散能，并将耗散能与总变形能的比值定义为能量耗散率，绘制各能量指标随贯入度的变化曲线，如图 3 所示。由图 3 可以看出，随着贯入度的增大，岩体总应变能、耗散能先以较快速率增长，而弹性能近似呈线性增长。滚刀贯入岩体一定深度后，弹性能突然降低，耗散能急剧增加，能量耗散率出现跃升，此时岩体发生断裂，表面岩块开始剥离；之后三种能量逐渐趋于稳定，滚刀继续推进压碎下方岩石，直至达到表面岩块剥离后产生的新自由面。当围压为 5 MPa 时，岩体内部能量变化较为平缓；当岩体围压大于 15 MPa 时，岩体在滚刀作用下内部能量演化加剧，变形破坏活动更为剧烈。

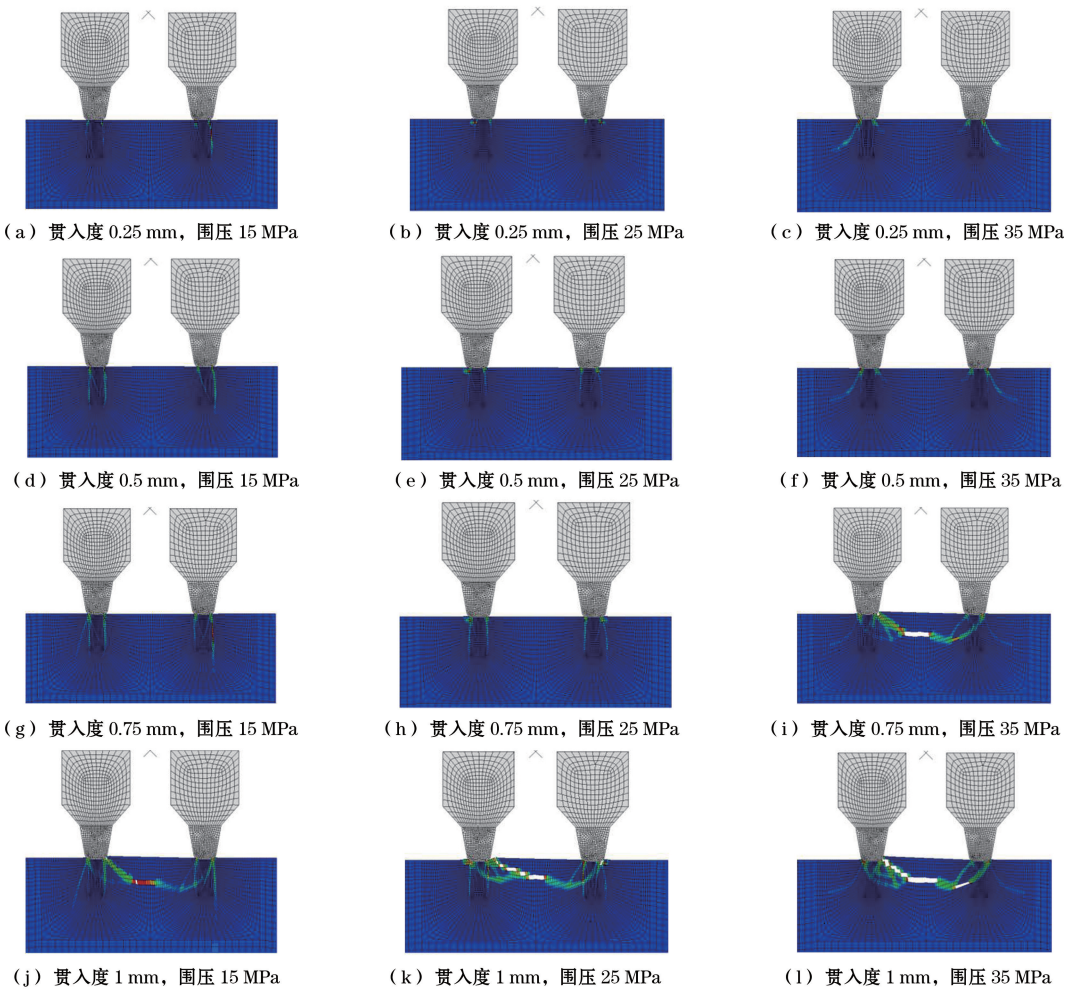


图 2 深地不同围压下双滚刀侵入破岩损伤过程

Fig.2 Damage process of rock mass under dual disc cutter penetration with different confining pressures in deep underground

3.2 围压对岩体能量耗散的影响

将单位贯入度的能量耗散定义为能量耗散速率，该指标反映了岩体破坏的剧烈程度。统计岩体能量发生突变和趋于稳定时的贯入度，计算能量突变耗散率、能量突变耗散速率，以及能量稳定耗散率、能量稳定耗散速率，分析围压对岩体能量耗散的影响，如图 4 所示。图 4(a)显示，随着围压的增大，岩体能量发生突变时的贯入度与能量耗散率、能量耗散速率总体上呈先增大后减小的变化趋势。围压为 25 MPa 时，能量突变耗散率与耗散速率最高，岩体内部损伤贯通速度快，宏观断裂具有突发性；围压为 15 MPa 时，能量发生突变时的贯入度最大，岩体断裂需要更大的侵入深度，积聚更多的能量转化为耗散能，此时 TBM 需要施加更多的掘进功。图 4

(b)显示,随着围压的增大,能量稳定耗散时达到的贯入度、能量稳定耗散速率呈先减小后增大的变化趋势,能量稳定耗散率则逐渐降低。围压为 25 MPa 时,能量稳定耗散的贯入度最低,为 1.36 mm,此时能量耗散速率最小,为 0.276 J/mm,此时的岩体能量比其他围压条件下最早进入稳定耗散阶段。围压越大,岩体应变能稳定耗散的比例越低,说明围压对岩体破坏后期的能量转化起到了一定的抑制作用。

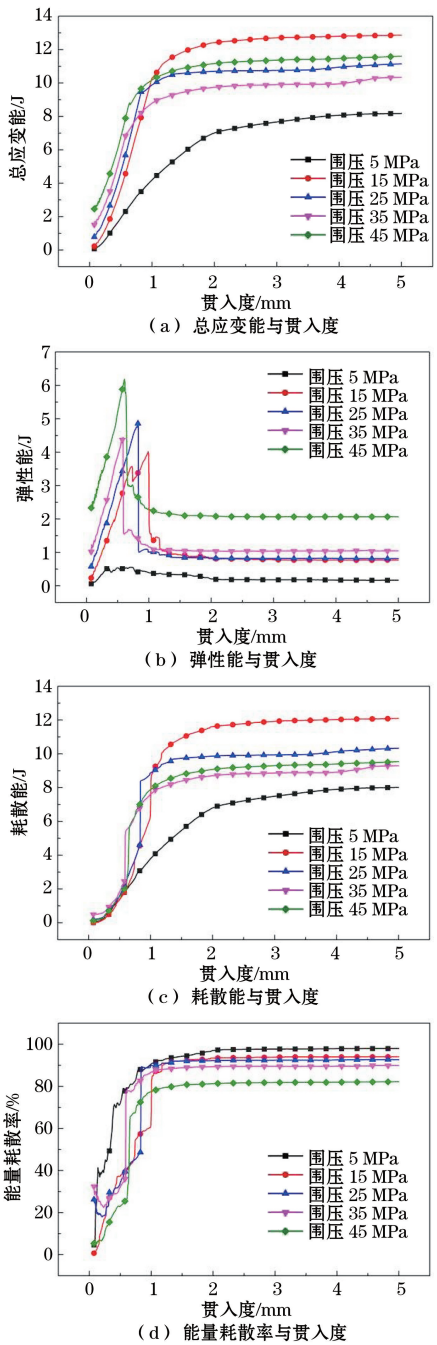


图 3 不同围压下双滚刀侵入破岩岩体能量演化

Fig.3 Energy evolution of rock mass under dual disc cutter penetration with different confining pressures

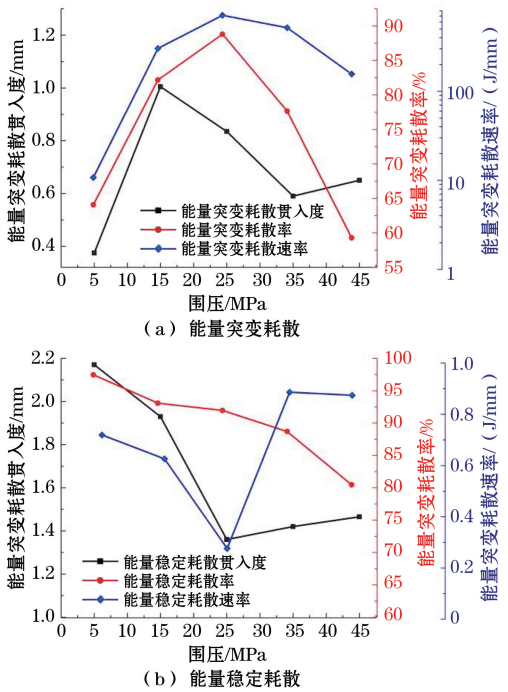


图 4 岩体能量耗散与围压的变化关系

Fig.4 Variation relationship between rock mass energy dissipation and confining pressure

4 岩石单轴抗压强度对岩体能量耗散的影响

为揭示高围压条件下岩石单轴抗压强度对 TBM 双滚刀破岩过程中岩体能量的影响,以围压为 25 MPa 为例,控制滚刀参数与贯入速度不变,分析不同贯入度情况下岩体总应变能、耗散能、能量耗散率与岩石单轴抗压强度之间关系的变化规律,如图 5 所示。由图 5 可知,随着岩石单轴抗压强度的增大,不同贯入度下的岩体表现出不同的变化趋势。贯入度为 0.25 mm 时,岩体总应变能、耗散能、能量耗散率总体呈减小的变化特征。该现象表明,在滚刀压入岩体初期,岩石的抵抗能力增强,总应变能降低。贯入度为 0.5 mm 时,岩体总应变能、耗散能出现小幅度增加,能量耗散率呈先增大后减小的变化趋势。贯入度为 0.75～1 mm 时,岩体应变能与耗散能先减小后增大,能量耗散率变化呈不稳定现象。此阶段为岩体损伤快速累积到宏观断裂的过渡阶段。贯入度大于 1 mm 时,随着岩石单轴抗压强度增大,岩体应变能与耗散能均呈现先减小后增大的变化规律。同时,高强度岩石在高围压作用下脆性提高,能量耗散显著增强,能量耗散率总体也表现为先减小后增大,此时岩体发生宏观断裂。当岩石抗压强度为 105 MPa 时,能量耗散率最低,这与岩石

弹性模量有关(此时岩石弹性模量为 23.01 GPa,最小),弹性模量越小,岩石越容易发生破碎,在较低的耗散能作用下岩体即发生破坏。岩石抗压强度从 120 MPa 增加到 146 MPa 时,能量耗散变化幅度很小,其值稳定在 91.3%～93.8%,表明在此强度区间内,岩石的能量耗散机制趋于稳定。

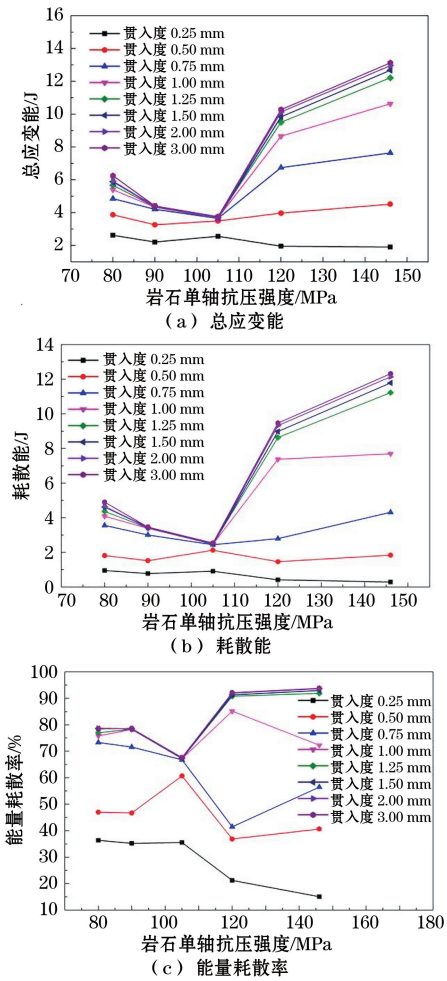


图 5 岩体能量耗散与岩石单轴抗压强度的变化关系

Fig.5 Variation relationship between rock mass energy dissipation and rock uniaxial compressive strength

5 滚刀参数对岩体能量耗散的影响

TBM 滚刀参数是影响掘进效率的重要参数,为研究高围压条件下刀刃宽度与刀间距对岩体能量耗散的影响,以围压为 25 MPa 为例,采用控制变量法,分析岩体总应变能、耗散能、能量耗散率随刀刃宽度、刀间距的变化特征。

5.1 刀刃宽度对岩体能量耗散的影响

图 6 为双滚刀作用下岩体总应变能、耗散能、能量耗散率随刀刃宽度的变化曲线。由图 6 可知,随着刀刃宽度的增大,贯入度不大于 0.75 mm 时,岩体总应变能近似呈线性增大,耗散能变化不显著,能量耗散率以负指数的形式降低;贯入度为 1 mm 时,岩体总应变能保持线性增大,耗散能及能量耗散率则先增大后降低再小幅度增大,刀刃宽度为 15 mm 时能量耗散率最大;贯入度大于等于 1.25 mm 时,岩体总应变能、耗散能先增大后降低,刀刃宽度为 30 mm 时总应变能、耗散能达到最大值,但能量耗散率整体变化幅度很小。因此,可以认为岩体发生稳定破碎时的最优刀刃宽度为 15 mm。在较低贯入度条件下,增加刀刃宽度可以促进岩体内部能量积聚;而当贯入度增加至岩体断裂深度时,增加刀刃宽度可以加快岩体内部能量释放,加剧岩体断裂。

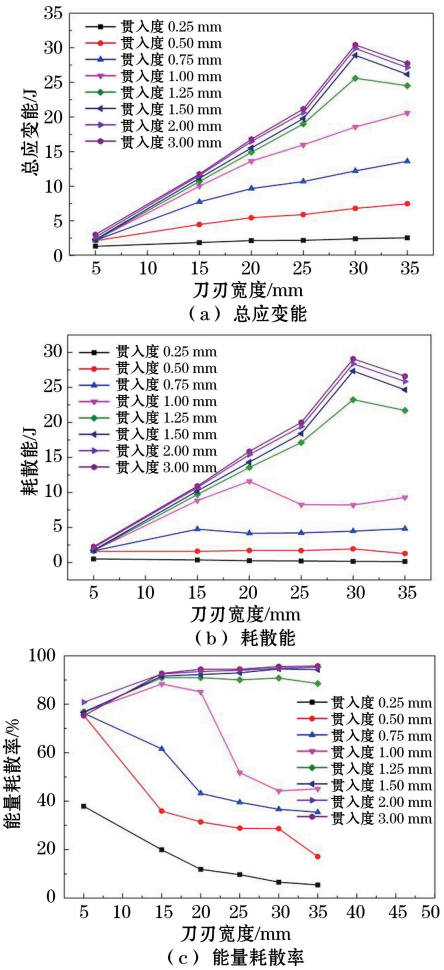


图 6 岩体能量耗散与刀刃宽度的变化关系

Fig.6 Variation relationship between rock mass energy dissipation and disc cutter blade width

5.2 刀间距对岩体能量耗散的影响

图 7 为滚刀间距与岩体总应变能、耗散能、能量耗散率的关系曲线。由图 7 可以看出,贯入度小于

等于 0.5 mm 时,总应变能在刀间距小于 90 mm 范围内基本保持不变;在刀间距大于等于 90 mm 的范围内随着刀间距的增大逐渐增大,但耗散能基本不变,随刀间距的增大能量耗散率总体上降低。该现象表明,滚刀贯入岩体的初始阶段,刀间距对岩体能量耗散的影响不显著。滚刀贯入度为 0.75 mm 时,岩体总应变能、耗散能、能量耗散率随刀间距的增大呈现先增大后减小再增大的变化规律,且刀间距为 80 mm 达到最大值。滚刀贯入度为 1 mm 时,岩体总应变能随刀间距的增大先增大后减小,耗散能及能量耗散率则出现不稳定变化,并在刀间距为 100 mm 时总应变能与耗散能达到最大值。滚刀贯入度大于等于 1.25 mm 时,岩体总应变能、耗散能、能量耗散率随着刀间距的增大均先增大后减小,且在刀间距为 100 mm 时达到最大值。上述结果表明,在高贯入度条件下,适当增加刀间距可以提高 TBM 掘进的能量利用率。

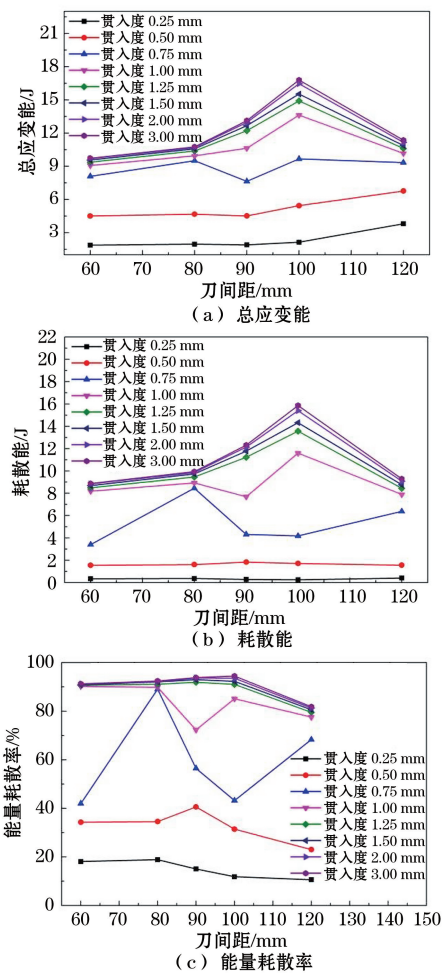


图 7 岩体能量耗散与刀间距的变化关系

Fig.7 Variation relationship between rock mass energy dissipation and disc cutter spacing

6 结论与展望

通过 Abaqus 非线性有限元软件开展深地高围压条件下 TBM 双滚刀侵入破岩数值模拟分析,研究了岩体损伤破坏过程、能量演化与耗散特征,分析围压、岩石单轴抗压强度、刀刃宽度、刀间距对能量积聚与耗散的影响,得到以下主要结论。

(1) 围压的增大会显著抑制滚刀下方纵向损伤发育,围压增大到一定程度时,促进损伤区域由垂直向水平方向扩展,加快侧向裂隙延伸交接,出现拉剪复合断裂,使岩体表面层状岩块剥落。

(2) 随着围压增大,岩体能量发生突变时的贯入度、能量耗散率、能量耗散速率总体呈先增大后减小的变化趋势;能量稳定耗散时的贯入度、能量耗散速率先减小后增大,能量耗散率逐渐降低。岩体围压大于 15 MPa 时,岩体内部能量积聚与耗散速度加快;围压为 25 MPa 时,岩体断裂的突发性最强,最先进入稳定破碎阶段。

(3) 岩石单轴抗压强度与能量耗散呈非线性关联。保持围压不变,随着岩石单轴抗压强度的增大,滚刀侵入岩体难度越大,贯入度小于 1 mm 时,岩体能量耗散不稳定;贯入度大于等于 1.25 mm 时,岩体应变能与耗散能均呈现先减小后增大的变化规律,岩石抗压强度为 105 MPa 时能量耗散率最低。

(4) 贯入度小于 1 mm 时,刀刃宽度增加可以促进岩体变形能积聚;贯入度大于等于 1.25 mm 时,刀刃宽度增加会促进岩体变形能稳定释放;刀刃宽度大于等于 15 mm 时,岩体能量耗散率基本保持恒定,是岩体发生稳定破碎时的最优刀刃宽度。

(5) 滚刀贯入岩体的初始阶段,刀间距对岩体能量耗散的影响不显著,高贯入度条件下,适当增加刀间距有助于提高破岩效率。贯入度大于等于 1 mm 时,岩体能量有效耗散的最优刀间距为 100 mm。

研究成果从岩体能量演化与耗散的角度探索了深地 TBM 双滚刀侵入破岩的内在机制,为 TBM 滚刀破岩机理研究提供了新思路。岩体能量耗散特征是多因素影响下 TBM 滚刀破岩效果的综合反应,可用于指导岩体条件与掘进参数的耦合优化,提高破岩效率。在今后的研究中还需建立 TBM 做功与岩体能量耗散特征的关系,基于功能转化理论系统研究滚刀破岩影响因素,促进深地 TBM 掘进节能增效。

参考文献(References):

[1] 刘泉声,黄兴,潘玉丛,等.TBM在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展[J].煤炭科学技术,2023,51(1):242-259.
LIU Quansheng, HUANG Xing, PAN Yucong, et al. Application and research progress of TBM tunneling in coal mine roadway[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1):242-259.

[2] 刘泉声,潘玉丛,余宏淦,等.深部金属矿山巷道TBM掘进技术应用现状及研究进展[J].有色金属(矿山部分),2024,76(6):25-41.
LIU Quansheng, PAN Yucong, YU Honggan, et al. Application status and research progress of TBM tunneling technology in deep metal mine roadways[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(6):25-41.

[3] 张洪伟,胡兆锋,程敬义,等.深部高温矿井大断面岩巷TBM智能掘进技术:以"新矿1号"TBM为例[J].煤炭学报,2021,46(7):2174-2185.
ZHANG Hongwei, HU Zhaofeng, CHENG Jingyi, et al. TBM techniques for intelligent excavating large-section rock roadway in the deep high-temperature coal mines:application of TBM in Xinkuang No. 1[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(7):2174-2185.

[4] 赵兴东.黄金矿山深井开采研究进展与发展趋势[J].黄金,2024,45(8):1-18.
ZHAO Xingdong. Research progress and development trends in deep gold mine[J]. Gold,2024,45(8):1-18.

[5] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J].工程科学与技术,2017,49(1):1-8.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J]. Advanced Engineering Sciences,2017,49(1):1-8.

[6] FARRORH E, ROSTAMI J. Effect of adverse geological condition on TBM operation in Ghomroud tunnel conveyance project[J]. Tunnelling Underground Space Technology, 2009,24(4):436-446.

[7] 雷天衢,杨立云,康一强,等.地应力对双刃盘形滚刀破岩效率的影响研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(增刊2):836-843.
LEI Tianqu, YANG Liyun, KANG Yiqiang, et al. Study on the effect of geostress on rock-breaking efficiency of double disc cutter[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2023,19(Suppl.2):836-843.

[8] 张蒙祺,王一博,章龙管,等.不同岩石和围压下刃形对滚刀破岩性能的影响[J].西南交通大学学报,2023,58(2):332-339.
ZHANG Mengqi, WANG Yibo, ZHANG Longguan, et al. Effects of TBM cutter profile on rock fragmentation under different rock type and confining pressure conditions[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(2):332-339.

[9] 夏毅敏,张旭辉,谭青,等.不同围压下刀宽对滚刀破岩特性的影响规律[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(3):636-645.
XIA Yimin, ZHANG Xuhui, TAN Qing, et al. Influence of rock breaking characteristics with disc cutter width under different confining pressure[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2017,25(3):636-645.

[10] 谭青,张旭辉,夏毅敏,等.不同围压与节理特征下盘形滚刀破岩数值研究[J].煤炭学报,2014,39(7):1220-1228.
TAN Qing, ZHANG Xuhui, XIA Yimin, et al. Numerical study on breaking rock by disc cutter at different confining pressure and joint characteristics case[J]. Journal of China Coal Society,2017,25(3):636-645.

[11] 翟淑芳,曹世豪,周小平,等.围压对TBM滚刀破岩影响的数值模拟研究[J].岩土工程学报,2019,41(1):154-160.
ZHAI Shufang, CAO Shihao, ZHOU Xiaoping, et al. Numerical study on effects of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(1):154-160.

[12] 张旭辉,夏毅敏,刘杰,等.围压作用下TBM双刃中心滚刀破岩特性研究[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(6):839-844.
ZHANG Xuhui, XIA Yimin, LIU Jie, et al. Study oncharacteristics of breaking rock by double edge central disc cutter under confining pressure[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2017,38(6):839-844.

[13] 温森,吴斐,李胜,等.不同侧压系数和岩石强度下TBM滚刀破岩效率的数值模拟[J].隧道与地下工程灾害防治,2021,3(4):9-19.
WEN Sen, WU Fei, LI Sheng, et al. Numerical simulation of rock fragmentation efficiency of TBM disc cutter under different lateral pressure coefficient and rock strength[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering,2021,3(4):9-19.

[14] 黎立云,谢和平,鞠杨,等.岩石可释放应变能及耗散能的实验研究[J].工程力学,2011,28(3):35-40.
LI Liyun, XIE Heping, JU Yang, et al. Experimental investigations on release energy and dissipative energy within rock[J]. Engineering Mechanics,2011,28(3):35-40.

[15] 张旗,张晓平,常鑫,等.岩石峰前和峰后能量演化特征及脆性评价研究[J].工程地质学报,2024,32(6):2110-2119.
ZHANG Qi, ZHANG Xiaoping, CHANG Xin, et al. Study on energy evolution characteristics at peak and post-peak stages and brittleness evaluation of rock[J]. Journal of Engineering Geology,2024,32(6):2110-2119.

[16] 许文松,张金栋,赵光明,等.不同加载刚度砂岩失稳破坏特征及能量演化规律[J].岩石力学与工程学报,2024,43(12):2908-2923.
XU Wensong, ZHANG Jindong, ZHAO Guangming, et al. Failure characteristics and energy evolution of sandstone with different loading stiffnesses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(12):2908-2923.

[17] LIU Zejing, MIAO Shengjun, LIANG Mingchun, et al. Characteristics and association mechanism of energy dissipation and crack development in siltstone under triaxial cyclic loading and unloading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2024,57(6):10399-10425.

[18] 谢良涛,严鹏,卢文波,等.不同开挖方式下深部岩体能量积聚特性[J].华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(1):120-125.
XIE Liangtao, YAN Peng, LU Wenbo, et al. Energy accumulation properties of deep rock under different excavation methods[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2018,46(1):120-125.

[19] 蒋邦友,王连国,顾士坦,等.基于能量原理的深埋隧洞 TBM 施工岩爆机理分析[J].采矿与安全工程学报,2017,34(6):1103-1109+1115.
JIANG Bangyou, WANG Lianguo, GU Shitan, et al. Study on rockburst mechanism of TBM excavation for deep tunnel based on energy principle[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(6):1103-1109+1115.

[20] 刘建琴,刘蒙蒙,郭伟.硬岩掘进机盘型滚刀回转破岩仿真研究[J].机械工程学报,2015,51(9):199-205.
LIU Jianqin, LIU Mengmeng, GUO Wei. Research on the simulation of cutting rock rotary by hard rock tunnel boring machine disc cutters[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015,51(9):199-205.