

基于PFC2D的单齿直线切削破岩过程分析

柳洪杰¹, 凌雪^{*1,2}, 马俊涛¹, 范自立¹, 刘宝林¹

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 煤矿开采注浆技术创新基地, 北京 100040)

摘要:在石油钻井、隧道开挖等领域经常遇到关于岩石切削的问题, 岩石切削问题的研究成为提高机械开采效率的重要突破口。针对钻井过程中锥形齿切削岩石的塑-脆性破碎机理这一科学问题, 以提高钻进效率为最终目的, 通过实验测试岩石力学参数和离散单元法(PFC2D)建立了锥形齿平行切削岩石的数值模拟, 研究岩石切削过程中在不同切削深度下的切削形貌、切削力、破岩比功等。结果表明:(1)岩屑先产生宏观剪切裂纹形成半脱落岩屑, 后于薄弱处发生张拉失效导致岩屑弹出, 并且在切削深度较浅时产生小尺寸岩屑, 在切削深度较深时产生大尺寸岩屑。(2)研究了不同切削深度下产生岩屑时的切削峰值力, 发现与Nishimatsu的峰值力模型更加符合, 与切削深度呈线性增长的趋势。(3)切削力的峰值基本对应裂纹的激增, 随着切削深度的增加裂纹图中台阶数会随之减少; 破岩比功与切削深度在一定范围内呈正相关, 并可以根据 MSE_{2D} 与 $\log d$ 的关系图将切削过程划分出塑性破坏阶段、小碎屑阶段、脆性破坏3个阶段。

关键词:岩石切削; 离散元; 岩屑; 破岩比功; 钻进效率

中图分类号: P634.1; TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0156-07

Analysis of rock breaking process of single tooth straight cutting based on PFC2D

LIU Hongjie¹, LING Xue^{*1,2}, MA Juntao¹, FAN Zili¹, LIU Baolin¹

(1. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*

2. *Coal Mine Grouting Technology Innovation Base, Beijing 100040, China*)

Abstract: Problems about rock cutting are often encountered in the fields of oil drilling and tunnel excavation. The research of rock cutting problems has become an important breakthrough to improve the efficiency of mechanical mining. Aiming at the scientific problem of plastic-brittle fracture mechanism of rock cut by conical teeth during drilling, the numerical simulation of parallel rock cut by conical teeth was established through experimental testing of rock mechanics parameters and discrete element method (PFC2D) to study the cutting morphology, cutting force and rock break specific energy of rock cut at different cutting depths during rock cutting. The results show that: (1) the macro-shear crack is first generated in the cuttings to form semi-shedding cuttings, and then the tensioning failure occurs in the weak area to cause the cuttings to pop out, and the small size cuttings are generated when the cutting depth is shallow, and the large size cuttings are generated when the cutting depth is deep. (2) The peak cutting force that generates rock chips at different cutting depths was studied and found to be better in agreement with Nishimatsu's peak force model, showing a linear increase trend with cutting depth. (3) The peak value of cutting force corresponds to the surge of cracks, and the number of steps in the crack chart will decrease with the increase of cutting depth. The

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-08-09 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.023

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目“真空无水低功耗条件下碎岩机理研究”(编号: 41672365); 国家863计划“自动化智能化岩心钻探技术与设备研制”(编号: 2014AA06A614)

第一作者: 柳洪杰, 男, 朝鲜族, 2000年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 从事碎岩机理方面的研究工作, 北京市海淀区学院路29号, 1733501574@qq.com。

通信作者: 凌雪, 女, 汉族, 1988年生, 博士, 工程力学专业, 主要从事碎岩机理及井壁稳定性的研究工作, 北京市海淀区学院路29号, lingxue@cugb.edu.cn。

引用格式: 柳洪杰, 凌雪, 马俊涛, 等. 基于PFC2D的单齿直线切削破岩过程分析[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 156-162.

LIU Hongjie, LING Xue, MA Juntao, et al. Analysis of rock breaking process of single tooth straight cutting based on PFC2D[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 156-162.

specific energy of rock breaking is positively correlated with the cutting depth in a certain range, and the cutting process can be divided into plastic ductile stage, fragmentation stage and brittle failure stage according to the relationship diagram of MSE_{2D} and $\log d$.

Key words: rock cutting; discrete element; rock fragment; mechanical specific energy; drilling efficiency

0 引言

岩石切削是机械破岩的重要手段,对岩石切削进行研究能提高破岩效率,减少施工周期和施工成本,对提高生产效益有巨大作用^[1]。早期岩石切削研究是围绕大型钻机的破岩性能,以现场实验的方法研究其不同深度不同齿形下的破岩效率^[2]。

大量的试验和研究证明,岩石的基本破坏方式有塑性破坏(ductile)与脆性破坏(brittle)2种形式^[3-4],对于岩石切削,当切削深度较浅时,岩石破坏为塑性模式,随着切削深度的增加,破坏转变为脆性模式。在岩石切削造成的脆性破坏中,通常认为岩屑的大小与切削深度直接相关,这一点在Zhou和Lin^[5-6]的研究中得以证实。Zhang等^[7]使用了砂岩、白云石和花岗岩进行薄片岩石的PDC齿切削实验,研究了塑性阶段、小碎屑阶段和脆性阶段。也有许多学者对岩石切削的力学模型进行研究,如Tetiana等^[8]提出了PDC齿切削的静力平衡模型,Serdar^[9]将以往的岩石切削锥型齿相关实验数据进行汇总分析并得出一个具有普适性的PCF模型。

在数值模拟研究方面,Menezes等^[10]利用LS-DYNA有限元软件分析了不同实验条件下的切削力、岩屑形态以及破碎过程,研究表明岩石切削的深度时切削力和岩屑形态的主要影响因素。祝效华团队^[11-13]对岩石切削相关理论与数值模拟作了研究。在有限元的数值模拟方面,使用Voronoi建模方法建立了花岗岩的有限元模型^[11],并使用了平头齿、锥形齿、屋脊齿等10种形状的PDC齿进行切削实验,研究了不同齿形的切削力与破岩效果对围压的反应,并分析了各种齿形在不同切削深度下的破岩效率。

岩石切削相关研究中对裂纹扩展的形式和岩屑剥落的细观机理研究较少,多集中于岩石破坏过程中的塑脆性破坏的本质与塑-脆性转变的机制上^[14]。本文将结合一些前人实验方法和理论成果,通过实验测试岩石力学参数和离散单元法(PFC2D)建立了锥形齿平行切削岩石的数值模拟,研究了岩石切削过程中在不同切削深度下的切削形貌、切削力、破

岩比功及其破碎机理。选择PFC2D来进行仿真可以更好地表征岩石切削中裂纹萌生和扩展的过程,可为钻掘岩体工程提高钻速提供理论指导。

1 数值模型的建立与参数标定

1.1 参数标定

1.1.1 岩石的宏观参数

为了更好地确定砂岩模型参数,挑选的均质砂岩,其强度和硬度均高于普通砂岩。

首先进行了岩样强度测定试验,加工制成尺寸为 $\text{O}50 \times 100 \text{ mm}$ 和 $\text{O}50 \times 25 \text{ mm}$ 的标准岩样,单轴压缩试验与巴西劈裂试验各进行3组,整理并绘制获得了如图1所示的拉伸及压缩曲线。后使用AE声发射系统测岩样的纵波波速和横波波速,并计算得泊松比。通过计算得到了岩样基本力学参数(表1)。

表1 岩石基本力学属性

实验组	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	泊松比	密度/(g/cm ³)
1	137.357	19.2	7.953	0.267	2.421
2	134.564	19.5	8.130	0.255	2.279
3	132.636	19.4	6.685	0.267	2.261
平均值	135.15±3	19.37±0.2	7.59±0.6	0.263	2.32±0.1

1.1.2 岩石的细观参数

PFC2D中加胶结的目的是为了用散体颗粒材料来模拟具有强度的材料,故参数标定步骤不仅需要颗粒本身的细观参数标定,还需要对所添加的粘结键进行参数标定。所得细观参数与宏观参数之间的关系进行参数标定,并不断微调之后得到了一套能较精确模拟所需岩石属性的细观颗粒参数见表2。

经过参数标定过程后得到一套能较好模拟试样的颗粒模型属性,使用颗粒参数进行抗压、抗拉和抗剪模拟(见图2),所得强度属性值与弹性模量即为此套颗粒参数的基本力学属性,用于接下来的单齿岩石直线切削模拟,详细的岩石与模型参数见表3。

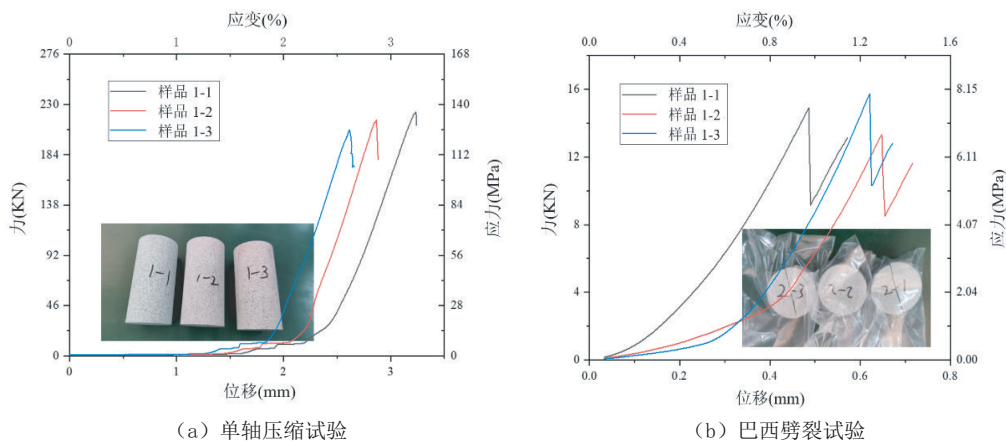


图1 岩石属性测试试验力-位移与应力-应变

表2 模型颗粒属性

颗粒参数	颗粒模量/GPa	刚度比	摩擦因子	密度/(g·cm ⁻³)	最大粒径/mm	最小粒径/mm
	3.5	1.5	0.5	2.566	0.3	0.2
平行粘结键参数	粘结键模量/GPa	粘结刚度比	摩擦角/(°)	粘结内聚力/MPa	粘结抗拉强度/MPa	粘结生成间隙/mm
	14.616	1.5	40	55.852	90.000	0.04

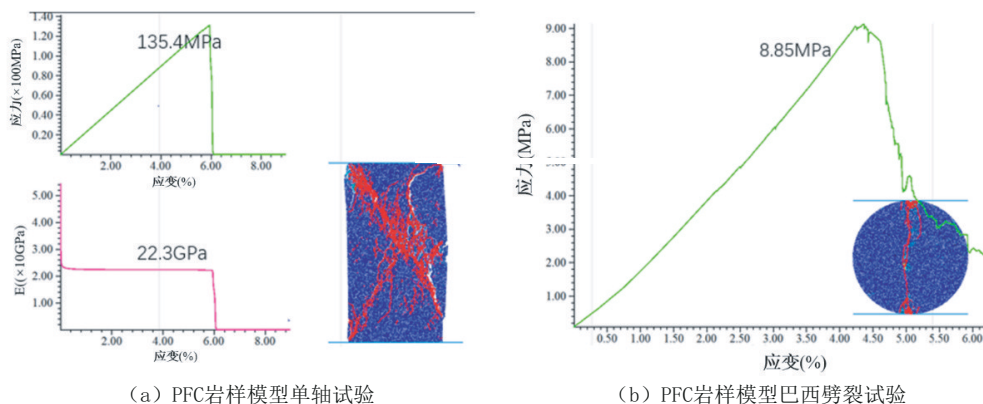


图2 颗粒模型抗压试验、抗拉试验

表3 岩石与模型颗粒属性对比

颗粒	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
岩石	135.15±3	19.37±0.6	8.02±0.2	0.26	2.32±0.1
模型	135.4	22.3	8.85	0.25	2.31

1.2 数值模型的建立

采用参数标定获得的颗粒参数进行岩石切削数值模拟,岩样设计为 $\varnothing 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的2D散体颗粒加平行粘结键胶结样本,岩石切削仿真实验以平行切削的方式进行连续加载,切削方案设计如图3所示,样本颗粒数为22606,刀具加载速度恒为1 m/s。

仿真模拟一共进行8组实验,切削变量为切削

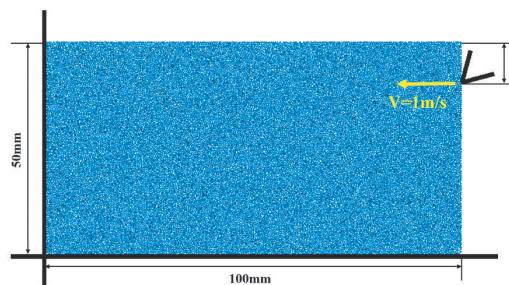


图3 岩石切削数值模拟示意

深度 DOC (depth of cut), 分别设置 h1~h8 进行实验,对应切削深度分别为 1D~8D (D 为颗粒平均直径, D=0.5 mm), 如表 4。

表4 岩石切削模拟实验方案

实验组	切削深度(实验变量)/mm	裂纹数(粘结键断裂数)	总碎屑体积(颗粒数)
h1	0.5	171	133
h2	1.0	390	469
h3	1.5	414	525
h4	2.0	296	622
h5	2.5	325	932
h6	3.0	482	1100
h7	3.5	334	1615
h8	4.0	325	1256

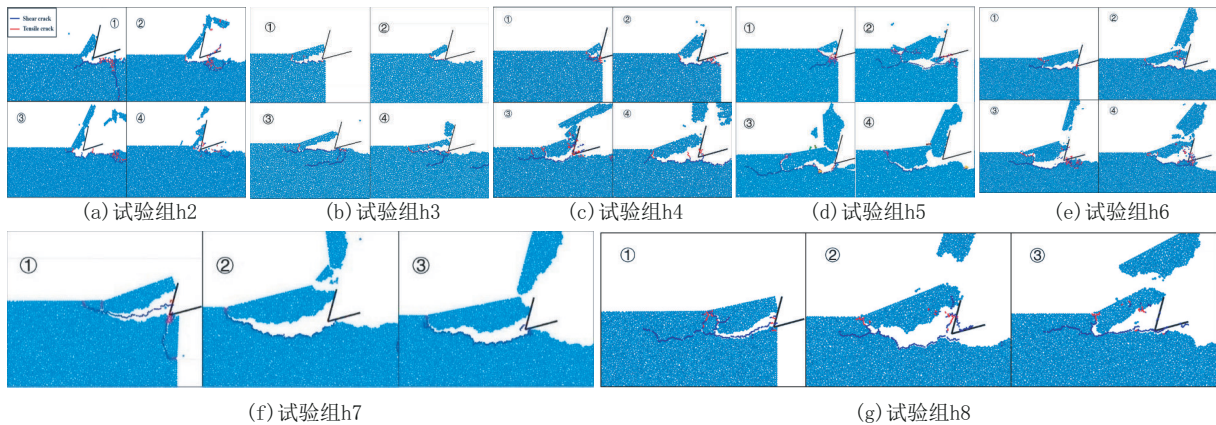


图4 切削岩屑形貌与裂纹扩展

从岩屑形貌来看,是小岩屑大切屑不断交替产生的循环过程^[15]。在由浅至深切削的过程中,生成的岩屑块体的颗粒数明显增多,且都是以大块岩屑的形式脱落。h5、h6、h7组和h8组生成的岩屑体积均明显大于前几组生成的岩屑。还可以发现,刀具尖与岩石接触产生的破碎区除了萌生出主裂纹外,还会伴随产生较多的次生裂纹对岩石内部造成损伤。

2.2 不同深度下切削力的分析

通过岩石切削数值模拟得到了切削峰值力PCF,其中单次峰值力容易受到前一次岩屑附带的损伤裂纹和损伤区域的影响不稳定,故使用同组实验的不同较大尺寸岩屑对应的峰值力进行切削力的分析。选择了以下3种峰值力数学模型进行分析。

Evans^[16]提出的基于最大抗拉强度准则的预测锥型齿切削力的理论模型,认为岩屑的形成是张拉破坏导致的。如式(1):

$$PCF_{EV} = 16\pi\sigma_t^2 d^2 / (\cos^2\alpha * \sigma_c) \quad (1)$$

式中:PCF_{EV}——Evans模型的峰值力,N;t——破

2 结果与讨论

2.1 不同切削深度下切削形貌分析

综合图4中岩屑形貌与裂纹扩展形式来看,可以发现裂纹的萌生主要由2种原因产生,一种是由刀具侵入产生剪切裂纹,另一种是由刀具侵入产生的破碎区萌生出剪切裂纹,而后剪切裂纹沿刀具的移动方向扩展,形成宏观裂纹,发生剪切失效。此时岩屑为条带形的半脱落状,半脱落岩屑受刀具与岩石基体的压力产生张拉裂纹,发生张拉失效,而后岩屑在弹力的作用下弹出。

岩工具的宽度,m; α ——工具的半锥角,rad; σ_c 和 σ_t ——岩石的单轴抗压强度和单轴抗拉强度,MPa。

Gunes等^[17]对Evans的模型进行修改,考虑了岩石和刀具之间的摩擦。如式(2):

$$PCF_{GO} = 4\pi\sigma_t d^2 \sin^2(\alpha + f) / [\cos(\alpha + f)] \quad (2)$$

式中:PCF_{GO}——Goktan模型的峰值力,N; f ——岩石和破岩工具之间的摩擦因子。

Nishimatsu^[18]认为岩石在钻齿挤压作用下产生剪切裂纹导致的岩石破坏并基于摩尔-库伦理论提出岩石切削模型。并指出,理论适用于脆性断裂裂纹扩展产生大岩屑的情况。如式(3):

$$PCF_{NISH} = \frac{2t\sigma_s d}{12.3 - 0.18\beta} * \frac{\cos\gamma}{1 - \sin(\gamma - \beta + f)} \quad (3)$$

式中:PCF_{NISH}——Nishimatsu模型的峰值力,N; σ_s ——岩石的抗剪强度,Pa; γ ——岩石的内摩擦角,rad; β ——破岩工具的后角,(°)。

上式中除抗剪强度外,所需因素已经从参数标定环节获得,抗剪强度测试实验如图5示。

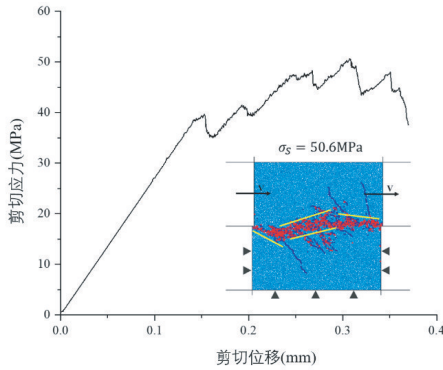


图5 抗剪强度试验

测得抗剪强度为 $\sigma_s = 50.6 \text{ MPa}$, 将以上几种峰值力模型所用到的参数汇总得到表5。

表5 岩石模型参数与对应值

模型参数	对应值	模型参数	对应值
σ_c	135.4 MPa	α	30°
σ_t	8.85 MPa	β	15°
σ_s	50.6 MPa	f	26.57°
t	1 m	γ	40°

从表5中所得参数代入到式(1)至(3)中计算得到3种不同模型的切削力, 但考虑到PFC2D软件中颗粒的单位厚度属性, 需要将切削力转化为2D的结果, 如下式:

$$PCF_{2D} = PCF/t \quad (4)$$

式中: PCF_{2D} ——单位厚度下的峰值力, N/mm。

将不同深度下产生的较大岩屑对应的峰值力与计算得到的峰值力模型绘制如图6所示。

图6中以散点形式展示了实验获得的峰值力和3种不同的切削力模型。对比发现实验数据与Nishimatsu的模型相关性更好, 与切削深度呈线性

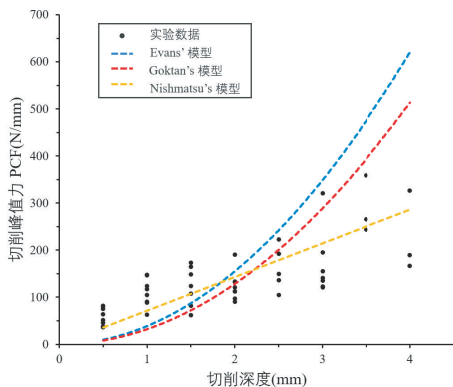


图6 实验峰值力与模型峰值力对比

增长的趋势。在Nishimatsu的理论中认为初始宏观裂纹为剪切裂纹, 出现宏观的剪切裂纹后发生剪切失效, 从而引起力的陡降, 这与2.1分析的结果相符。

2.3 不同切削深度下破岩比功分析

PFC2D模拟的岩石切削与实际切削不同, 要对仿真中由加载刀具产生的能量消耗进行计算则只需对其接触力荷载对加载路径进行积分。

对于平行切削, 其 y 向位移为0, y 向不消耗能量, 故仅需计算 x 向耗能, 则平行切削耗能为:

$$\epsilon_x = \int F_x dx \quad (5)$$

式中: ϵ_x ——岩石切削过程中系统消耗能量, J; F_x ——刀具水平方向切削力, N。

考虑到在PFC2D中, 创建的工具、颗粒和粘结键都具有单位厚度 t , 因此进行计算时除去单位厚度 t , 得到2D的结果:

$$\epsilon_{x-2D} = \int F_x dx/t = \int F_{x-2D} dx \quad (6)$$

式中: ϵ_{x-2D} ——岩石切削过程中系统所消耗的单位厚度能量, J/mm; F_{x-2D} ——刀具水平方向单位厚度切削力, N/mm; t ——单位厚度, mm。

对切削实验的8组数据中的切削力对位移进行积分后得到如图7所示的结果。

从裂纹的角度分析, 在h1实验组中, 产生的岩屑基本都是小尺寸的形式, 对应的裂纹数也是非常少, 而在h2~h4实验组中则是有多组切削力峰值, 裂纹激增段也大于h1实验组, 从裂纹台阶的形式上能看出有小尺寸的岩屑伴随着较大尺寸岩屑产生, 而在h5~h8实验组就很少出现小尺寸岩屑, 以大尺寸岩屑为主。裂纹激增的时刻和切削能量消耗增多的时刻基本一致, 从裂纹角度探寻与切削破岩消耗的能量或有可行性。

在图8(a)中的破岩体积是以PFC中排除岩石基体之后所有的岩屑, 从图中能看出破岩体积与破岩能量大体是呈正相关, 最后h8组呈现下降的原因是由于切削深度深导致只生成了大岩屑的脱落且损伤裂纹较少, 之后使用2D破岩比功方法将破岩能量与消耗体积进行比值:

$$MSE_{2D} = \frac{\text{破岩能量}}{\text{破岩体积}} = \frac{\epsilon_{x-2D}}{V} \quad (7)$$

式中: MSE_{2D} ——2D条件下的破岩比功; V ——岩屑的体积; ϵ_x ——平行切削所消耗的能量。

在以生成较大岩屑为主的仿真实验组h2~h7

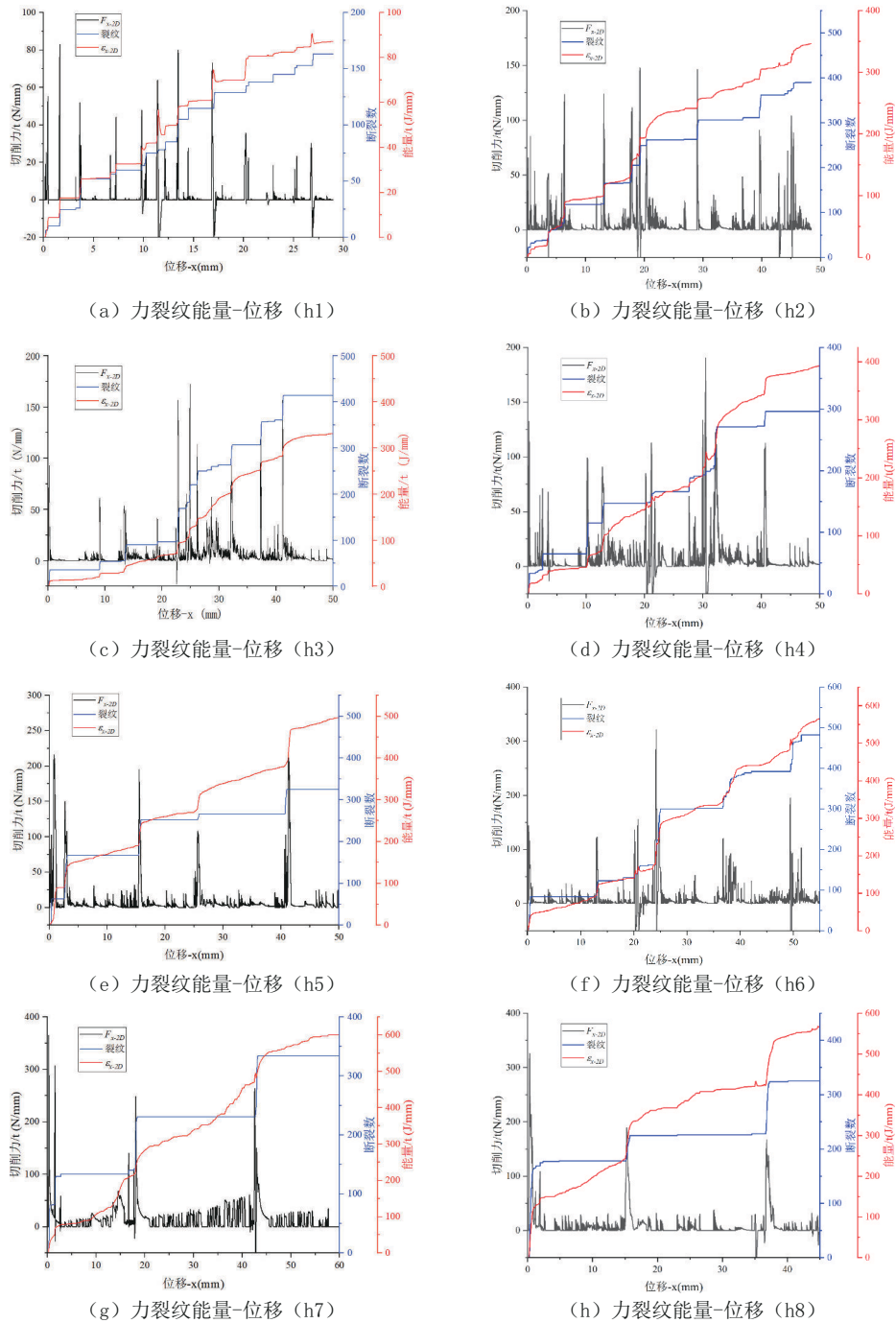


图 7 平行切削切削力对位移积分

中,其破岩比功与切削深度呈正相关,但 h1 深度下的实验组以小尺寸岩屑为主,且局部存在损伤和重复压碎等情况,其破岩比功较低,与以往研究中表明浅切削深度下破岩效率低的结论相符,即破岩比功在一定切削深度范围内呈正相关。

根据 $MSE_{2D} \sim \log d$ 的关系图,如图 8(b)中可以将

切削过程划分出 3 个阶段:第一阶段为塑性破坏阶段,破岩比功与切削深度的关系为 $MSE_{2D} \sim d^0$,与切削深度关系不大;第二段为小碎屑阶段,破岩比功与切削深度关系为 $MSE_{2D} \sim d^{-1/2}$;第三阶段为脆性破坏阶段,破岩比功与切削深度关系为 $MSE_{2D} \sim d^{-1}$,这一规律在许多实验研究中也有体现^[7]。

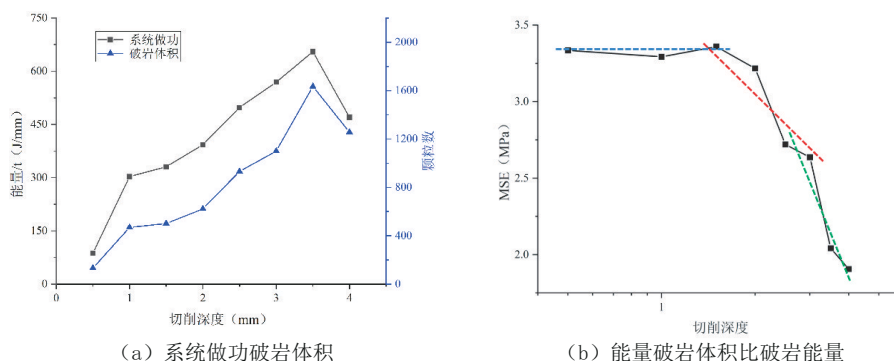


图8 平行切削能量-颗粒数关系

3 结论

(1) 裂纹的萌生主要由2种原因产生,一种是由刀具侵入产生剪切裂纹,另一种是由刀具侵入产生的破碎区萌生出剪切裂纹,而后剪切裂纹沿刀具的移动方向扩展,形成宏观裂纹,发生剪切失效。此时岩屑为条带形的半脱落状,半脱落岩屑受刀具与岩石基体的压力产生张拉裂纹,发生张拉失效,而后岩屑在弹力的作用下弹出。

(2) 通过仿真获得的不同深度下产生岩屑时的切削峰值力PCF与3种不同的切削力模型进行了对比,发现实验数据与Nishimatsu的模型相关性较好,与切削深度呈线性增长的趋势。

(3) 切削力的峰值基本对应裂纹的激增,并且裂纹激增的时刻和切削能量消耗增多的时刻基本一致,从裂纹角度探寻与切削破岩消耗的能量或有可行性。破岩比功与切削深度在一定范围内呈正相关,并可以根据 $MSE_{2D} \sim \log d$ 的关系图将切削过程划分出3个阶段:第一阶段为塑性破坏阶段,破岩比功与切削深度的关系为 $MSE_{2D} \sim d^0$,与切削深度关系不大;第二段为小碎屑阶段,破岩比功与切削深度关系为 $MSE_{2D} \sim d^{-1/2}$;第三阶段为脆性破坏阶段,破岩比功与切削深度关系为 $MSE_{2D} \sim d^{-1}$ 。

参考文献:

[1] 赵研,张丛珊,高科,等.超声波辅助PDC切削齿振动破岩仿真分析[J].钻探工程,2021,48(4):11-20.

[2] Barker J. S. A laboratory investigation of rock cutting using large picks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1964,1(4):519-534.

[3] Richard T. Determination of rock strength from cutting tests [D]. Minneapolis, MN: University of Minnesota, 1999.

[4] Huang H, Detournay E. Intrinsic length scales in tool-rock interaction[J]. International journal of geomechanics, 2008,8:39-44.

[5] Zhou Y, Lin J-S. On the critical failure mode transition depth for rock cutting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013,62:131-137.

[6] Lin J-S, Zhou Y. Can scratch tests give fracture toughness[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013,109:161-168.

[7] Zhang H, Le J L, Detournay E. An experimental investigation of brittle failure mechanisms in scratch tests of rock[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022,275:108827.

[8] Tetiana O., Pryhorovska. Study on rock reaction force depending on PDC cutter placement[J]. Machining Science and Technology, 2017,21(1):37-66.

[9] Serdar Yasar. A general semi-theoretical model for conical picks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020,53:1-23.

[10] Menezes P L, Lovell M R, Avdeev I V, et al. Studies on the formation of discontinuous chips during rock cutting using an explicit finite element model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014,70:635-648.

[11] Zhu X, Luo Y, Liu W, et al. Rock cutting mechanism of special-shaped PDC cutter in heterogeneous granite formation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022,210:110020.

[12] Weiji Liu, Xiaohua Zhu. Experimental study of the force response and chip formation in rock cutting[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019,12(15):1-12.

[13] 祝效华,刘伟吉,贺显群.基于离散单元方法的岩石切削数值模拟分析[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(3):509-520.

[14] 刘伟吉.井底岩石脆性破碎机理及其影响因素研究[D].成都:西南石油大学,2017.

[15] 何录忠,周琴,李斌斌,等.岩石切削机理模型分析及实验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):85-88.

[16] Evans I. A theory of the cutting force for point-attack picks[J]. International Journal of Mining Engineering, 1984,2(1):63-71.

[17] N. Gunes Yilmaz, M. Yurdakul, R.M. Goktan. Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007,44(6):962-970.

[18] Nishimatsu Y. The mechanics of rock cutting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1972,9(2):261-270.