推荐阅读：

智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径

煤炭安全高效综采理论、技术与装备的创新和实践

智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析

异步测时矿井人员精确定位方法

煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支撑

大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理与控制

工作面支架液压系统仿真与稳压供液技术

采煤机惯性导航定位动态零速修正技术

采煤机概念设计生态学模型构建与实现

5G 技术在煤矿智能化中的应用展望

煤矿机器人体系及关键技术

智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术

智慧矿山边缘云协同计算技术架构与基础保障关键技术探讨

智慧煤矿信息逻辑模型及开采系统决策控制方法

基于残差神经网络的矿井图像重构方法

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

移动阅读

刘春生,李德根,袁昊. 碟盘刀具振动切削煤岩的理论力学模型与载荷特性[J]. 煤炭学报,2020,45(8):3015-3023.

LIU Chunsheng, LI Degen, YUAN Hao. Theoretical mechanical model and load characteristics of coal and rock vibration cutting with disc cutter[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 3015-3023.

碟盘刀具振动切削煤岩的理论力学模型与载荷特性

刘春生[1],李德根[1],袁 昊[2]

(1. 黑龙江科技大学,黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学 机械工程学院,黑龙江 哈尔滨 150022)

摘 要:针对煤岩机械刀具破碎煤岩寿命和效率低的问题,提出一种具有轴向振动与径向切削破碎煤岩的方法,为探明碟盘刀具在轴向振动与径向切削破碎煤岩的力学特性,通过分析煤岩崩落面积、当量崩落角、载荷的集中力及其作用位置角,以单位断裂面上受力极限强度和最小能量法的准则,构建碟盘刀具破碎煤岩力学模型。基于扩展线性 Drucker-Prager 塑性本构模型,采用 ABAQUS 软件模拟碟盘刀具破碎煤岩的应力云图和载荷特性,在振动切削试验台上通过设定振动频率和振幅等参数测试不同切削厚度下的碟盘刀具破碎煤岩的载荷谱,提取数值模拟和试验碟盘刀具破碎煤岩的载荷特征,对比分析理论模型计算值与数值模拟载荷峰值均值和数值模拟峰值的均值。结果表明:碟盘刀具破碎煤岩的破裂范围呈现月牙状,由中间向两侧递减;振动切削煤岩时其径向载荷明显小于单作用径向切削煤岩的载荷;碟盘刀具在轴向振动与径向切削时不同切削厚度径向载荷理论模型计算值与数值模拟载荷峰值均值的平均误差为 9.12%,与试验载荷峰值均值的平均误差为 4.88%;轴向载荷理论模型计算值与数值模拟载荷峰值均值的平均误差为 9.25%,与试验载荷峰值均值的平均误差为 8.34%。通过数值模拟和试验研究验证了碟盘刀具理论模型的准确性。

关键词:碟盘刀具;采掘机械;载荷特性;理论模型;振动与切削

中图分类号:TD421.54 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-9993(2020)08-3015-09

Theoretical mechanical model and load characteristics of coal and rock vibra-tion cutting with disc cutter

LIU Chunsheng[1], LI Degen[1], YUAN Hao[2]

(1. *Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin* 150022, *China*; 2. *School of Mechanical Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin* 150022, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of short life and low efficiency of coal rock cutting machine, a method of cutting coal and rock with axial vibration and radial cutting is proposed to investigate the mechanical properties of the disc cutter in the axial vibration and radial cutting of the fractured coal-rock, the mechanical model of breaking coal and rock with disc cutter is constructed according to the criterion of ultimate strength per unit fracture surface and minimum energy method based on the analysis of caving area and equivalent caving angle and the concentrated force of load and its action position angle. Based on the extended linear Drucker-Prager plastic constitutive model, the stress cloud and load characteristics of the disk rock crushed is simulated using the ABAQUS software. The discs under different cutting thicknesses are tested on the vibration cutting test bench by setting parameters such as vibration frequency and amplitude. The load spectrum of the broken coal rock of the disc cutter, the numerical simulation and the load characteristics

收稿日期:2019-05-09 **修回日期**:2019-09-09 **责任编辑**:郭晓炜 **DOI**:10.13225/j.cnki.jccs.2019.0614

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674106,51974111);黑龙江省省属本科高校基本科研业务费资助项目(Hkdqg201804)

作者简介:刘春生(1961—),男,山东牟平人,教授,博士生导师。E-mail:liu_chunsheng@163.com

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

of the crushed coal rock of the disc cutter are extracted. The average value of the theoretical model calculation value and the numerical simulation load peak mean value and numerical simulation peak value are compared and analyzed. The results show that the fracture range of coal-rock broken by disc cutter is crescent shape and decreases from middle to both sides. The radial load of the cutting coal-rock is obviously smaller than that of the single-acting radial cutting coal-rock. When the disc cutter is in axial vibration and radial cutting, the average error between the theoretical model of radial load with different cutting thickness and the mean value of peak value of simulated load is 9.12% and 4.88%. The average error between the theoretical model of axial load and the mean value of peak value of numerical simulation load is 9.25%, and the average error between the theoretical model of axial load and the mean value of peak value of experimental load is 8.34%. The accuracy of the theoretical model of the disc cutter is verified by numerical simulation and experiment.

Key words: disc cutter; mining machine; load characteristics; theoretical model; vibration and cutting

机械刀具破碎硬煤岩是实现煤矿安全绿色开采的重要途径,研制高效破碎硬煤岩的刀具是基础,而刀具破碎煤岩机理是设计高性能刀具的基础。EVANS[1]认为煤岩的断裂是由于拉应力造成的。ROXBOROUTH 等[2-3]考虑截齿与岩石之间的摩擦,改进了 EVANS 的截割力模型。BILGIN 等[4]在岩石直线截割试验的基础上,利用试验得出的数据和岩石强度、截割厚度等参数建立了其理论计算模型。BAO 等[5]考虑截齿侵入岩石过程中的能量耗散,基于断裂力学建立了力学模型。赵光明等[6]采用理论分析和数值模拟研究了巷道围岩承载结构特性。牛东民[7]以断裂力学的角度建立了刀具切削煤岩的破碎机理。梁运培等[8]试验研究了不同截割厚度、截线距下,镐型截齿破岩力学参数与截割厚度和截线距之间的关系。除刀型和镐型截齿机械破碎煤岩外,还有冲击破岩、冲击-切削破碎等方法在采煤和隧道掘进有广泛应用[9-12]。李润成等[13]通过试验证明有振动比无振动可以有效减少截割阻力。MURO[14]研究振动切削凝灰岩时,指出振动时与无振动时的水平切削阻力之比随振动频率增加呈双曲线下降、正弦波振动时的切削效率比三角波振动时的高。谢世勇等[15]指出随着冲击能的增大,岩石破碎深度及破碎体积均增大,破岩比能不是随冲击能的增加而减小,存在一个最佳破岩冲击能。李思琪等[16]基于有限元研究了复合荷载作用下冲击岩石的压痕效应。刘春生等[17-20]基于非对称截槽建立了镐型截齿破碎煤岩的力学模型,同时还建立了边缘牙齿刀盘单刀齿破碎煤岩的理论计算模型,得出在轴向振动与径向切削复合作用下比单作用具有更佳破岩效果。纪照生[21]基于岩石重力针对高频振动冲击技术进行了破碎机理的研究。

结合上述学者所提出的理论、数值模拟和试验等研究成果,笔者通过分析振动与切削复合作用的破碎方式和截割碟盘刀具的力学特点,通过研究其破碎煤岩的载荷特性,建立碟盘刀具破碎煤岩载荷理论计算的模型,通过与数值模拟和试验载荷峰值均值的对比分析,验证理论模型,为振动与切削复合作用破碎煤岩截割机构的研制提供载荷设计依据。

1 煤岩崩落面积与当量崩落角

1.1 煤岩崩裂面积

碟盘刀具破碎煤岩时,刀刃与楔面按先后顺序接触煤岩,煤岩的大块崩落是由楔面对煤岩产生的破坏作用,图 1 为碟盘刀具破碎煤岩时的崩裂面积和当量崩落角。其中,dS 为崩落面在水平投影的面积微元;l',l_x,l_m 分别为崩落面长度、任意位置崩落面水平投影和最大位置水平投影长度,mm;l'_m为最大位置崩落面的长度,mm;φ 为任意位置角变量,(°);R 为刀具的半径,mm;dS'为崩落面的面积微元;ψ,ψ_m 分别为任意位置和最大崩落角,(°);h_m,h_1 分别为切削厚度和刀具与煤岩接触厚度,$h_1=\frac{4h_m\sigma_1\sin\alpha}{\sigma_y\sin^2\psi_d}\left[\frac{1}{\sin\alpha}+\frac{3\cos(\alpha+\psi_d)}{\sin\psi_d}\right]^{-1}$,mm;$\sigma_1$ 为抗拉强度,MPa;σ_y 为抗压强度,MPa;α 为碟盘刀具楔面角度,(°);ψ_d 为当量崩落角。

由图 1 可知:

$$dS=\frac{[(R+l_x)^2-R^2]d\varphi}{2},dS'=\frac{dS}{\cos\psi} \tag{1}$$

式中,$l_x=l_m\cos\varphi$。

由式(1)可得

$$S'=\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{2Rl_m\cos\varphi+(l_m\cos\varphi)^2d\varphi}{2\cos\psi} \tag{2}$$

由图 1 可知,$\cos\psi=\frac{l_m\cos\varphi}{h_m}\left(1+\frac{\cos^2\varphi}{\tan^2\psi_m}\right)^{-\frac{1}{2}}$,

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

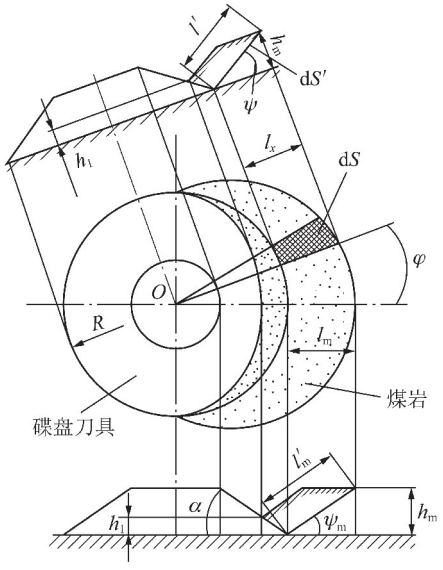

图 1　碟盘刀具崩落面积和当量崩落角

Fig. 1　Disc cutter caving area and equivalent caving angle

$l_m = \dfrac{h_m}{\tan\psi_m}$, 因此式(2)可写为

$$S' = \frac{Rh_m}{\tan\psi_m}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\sqrt{\tan^2\psi_m + \cos^2\varphi}\,\mathrm{d}\varphi + \frac{1}{4}l_m^2\left[\tan\psi_m + (\tan^2\psi_m + 1)\arcsin\frac{1}{\sqrt{\tan^2\psi_m + 1}}\right] \tag{3}$$

采用函数逼近论的方法,对式(3)中的 $\sqrt{\tan^2\psi_m + \cos^2\varphi}$ 进行简化,令

$$\Phi = a_0 + b\varphi^2 = \sqrt{\tan^2\psi_m + \cos^2\varphi} \tag{4}$$

当 $\varphi=0$ 时, $\Phi = \sqrt{\tan^2\psi_m + 1}$; 当 $\varphi=\pi/2$ 时, $\Phi = \tan\psi_m$, 求得 $a_0 = \sqrt{\tan^2\psi_m + 1}$, $b = -(2/\pi)^2(\sqrt{\tan^2\psi_m + 1} - \tan\psi_m)$。

整理可得

$$S' = \frac{(2\sqrt{\tan^2\psi_m + 1} + \tan\psi_m)\pi Rh_m}{6\tan\psi_m} + l_m^2\left[\tan\psi_m + (\tan^2\psi_m + 1)\arcsin\frac{1}{\sqrt{\tan^2\psi_m + 1}}\right]\Big/4 \tag{5}$$

1.2　煤岩当量崩落角

碟盘刀具楔面近似圆台,破碎煤岩时载荷由碟盘刀具中间向两侧逐渐递减,破碎煤岩的崩落角在刀具楔面与煤岩接触处也是逐渐变化的。因此,煤岩的当量崩落角及其位置角,是碟盘刀具切削煤岩的楔面集中作用力的前提。在 0 ~ π/2 内等效,由图 1 可得煤岩当量崩落角 ψ_d。

$$\sin\psi_d\int_0^{\frac{\pi}{2}} l'\mathrm{d}\varphi = \int_0^{\frac{\pi}{2}}\sin\psi l'\mathrm{d}\varphi \tag{6}$$

由 $\tan\psi = \tan\psi_m/\cos\varphi$, 可得 $l' = \dfrac{h_m}{\sin\psi}$ 或 $\dfrac{h_m}{\tan\psi_m}\times\sqrt{\tan^2\psi_m + \cos^2\varphi}$, 代入式(6)得

$$\sin\psi_d = \frac{3}{2\sqrt{1 + \tan^{-2}\psi_m} + 1} \tag{7}$$

根据文献[17]中切削厚度与崩落角的关系可知 ψ_m 对应不同的 h_m,则由式(7)可求得不同切削厚度下的当量崩落角 ψ_d。

2　楔面破碎煤岩的作用力模型

2.1　集中力的作用点和位置角

碟盘刀具由刀刃和楔面两部分组成,在切削煤岩时,刀刃有助于刀具楔入煤岩,楔面部分则有助于煤岩的大块崩落。由碟盘刀具的结构特点计算出等效集中力的作用位置角度,碟盘刀具破碎煤岩楔面作用力学模型如图 2 所示,图中,h_{1d} 为刀具任意位置与煤岩的接触厚度,mm。

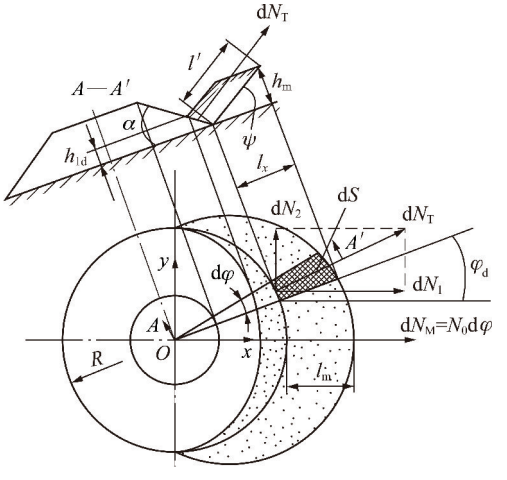

图 2　碟盘刀具破岩等效集中力学模型

Fig. 2　Equivalent concentrated mechanical model of disk cutter breaking rock

由图 2 可知,

$$\begin{cases}\mathrm{d}N_1 = \mathrm{d}N_T\cos\varphi \\ \mathrm{d}N_2 = \mathrm{d}N_T\sin\varphi\end{cases},\ \begin{cases}\mathrm{d}N_1 = N_0\cos\varphi\cos\varphi\mathrm{d}\varphi \\ \mathrm{d}N_2 = N_0\cos\varphi\sin\varphi\mathrm{d}\varphi\end{cases} \tag{8}$$

式中,N_1,N_2 为等效集中力分力,kN; $\mathrm{d}N_T$ 为单元等效集中力, $\mathrm{d}N_T = \mathrm{d}N_M\cos\varphi = N_0\cos\varphi\mathrm{d}\varphi$, kN, N_M 为单元位置角所对应的楔面载荷,kN; N_0 为破碎煤岩时的楔面载荷[16]:

$$N_0 = \frac{\tau_1 S'}{\sin(\alpha + \xi + \psi_d) - f_1\cos(\alpha + \xi + \psi_d)} \tag{9}$$

式中,f_1 为刀齿与煤岩之间的摩擦因数。

由式(8)可计算在 0 ~ π/2 内合力及作用点,可得

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

$$N_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \mathrm{d}N_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} N_0 \cos^2\varphi \mathrm{d}\varphi = \frac{\pi}{4} N_0 \quad (10)$$

$$N_2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \mathrm{d}N_2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} N_0 \sin\varphi\cos\varphi \mathrm{d}\varphi = \frac{1}{2} N_0 \quad (11)$$

则可得等效集中力和位置角分别为

$$N_{\mathrm{T}} = \sqrt{N_1^2 + N_2^2} = N_0 \sqrt{4 + \pi^2}/4 \quad (12)$$

$$\tan\psi_{\mathrm{d}} = N_2/N_1 = 2/\pi, \psi_{\mathrm{d}} = 32.5° \quad (13)$$

2.2 楔面破碎煤岩的准则

碟盘刀具在振动与径向切削复合运动破碎煤岩时,楔面逐渐进入煤岩体内,当达到一定楔入距离后,楔面逐渐起主导作用,完成对煤岩的大块崩落。碟盘刀具在轴向以正弦规律运动,在不同工况下煤岩破坏准则也不同,按煤岩单向受力状态即单轴受力,在计算碟盘刀具破碎煤岩时按照抗拉或抗剪强度条件分别建立碟盘刀具破碎煤岩的力学模型,按照达到最小能量法则来确定破碎煤岩准则。

图 3 为碟盘刀具在轴向向上振动与径向切削复合作用时 A—A'剖面楔面与煤岩的力学模型,图中,v_z 为轴向振动速度,m/s;v_j 为径向切削速度,m/;ΔL_1 为刀具运动合成速度与水平方向的夹角大于刀具对煤岩的正压力与水平运动方向的夹角时,O 点到楔面作用力的垂直距离相对于 O 点到刀齿齿尖作用力的垂直距离的增量,mm;L_1 为刀具运动合成速度与水平方向的夹角大于刀具对煤岩的正压力与水平运动方向的夹角时,O 点到刀齿齿尖作用力的垂直距离,mm;N_{T1} 为刀具与煤岩的摩擦力,kN;N_{T2} 为楔面对煤岩的作用力,kN;T_2 为刀具向上振动时刀头对煤岩的作用力,kN;T_3 为刀具径向切削时刀头对煤岩的作用力,kN;δ 为刀具向上振动时刀头对煤岩的作用力与水平方向的夹角,(°);β 为刀具径向切削时刀头对煤岩的作用力与水平方向的夹角,(°);ΔL_2 为刀具与煤岩未有相对运动时,O 点到楔面作用力的垂直距离相对与 O 点到刀齿齿尖作用力的垂直距离的增量,mm;L_2 为刀具与煤岩未有相对运动时,O 点到刀齿齿尖作用力的垂直距离,mm;α_{zj} 为刀具运动合成速度与水平方向的夹角;φ 为刀具对煤岩的正压力与水平运动方向的夹角,其中 $\varphi=\pi/2-\alpha$;ψ_{d} 为刀具破碎煤岩时的当量崩落角;ξ 为刀具与煤岩之间的摩擦角。

2.2.1 $\alpha_{\mathrm{zj}}>\varphi$ 结果分析

当 $\alpha_{\mathrm{zj}}>\varphi$ 时,碟盘刀具破碎煤岩的力学模型如图 3(a)所示,刀具与煤岩的摩擦力沿楔面向上。根据图 2 碟盘破碎煤岩的俯视图可计算出 1/2 煤岩崩落面的形心位置角 φ_{c},当计算面积时,将面积微元 $\mathrm{d}S$ 近似为矩形,因此其形心中点为矩形的中心位置,形心坐标为:$(x_{\mathrm{c}}, y_{\mathrm{c}}) = (S_y S^{-1}, S_x S^{-1})$,其中,$S_y$,$S_x$ 分别为崩裂面积对 y,x 轴的静矩;$S = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (R l_{\mathrm{m}} \cos\varphi + l_{\mathrm{m}}^2 \cos\varphi^2/2)\mathrm{d}\varphi$。

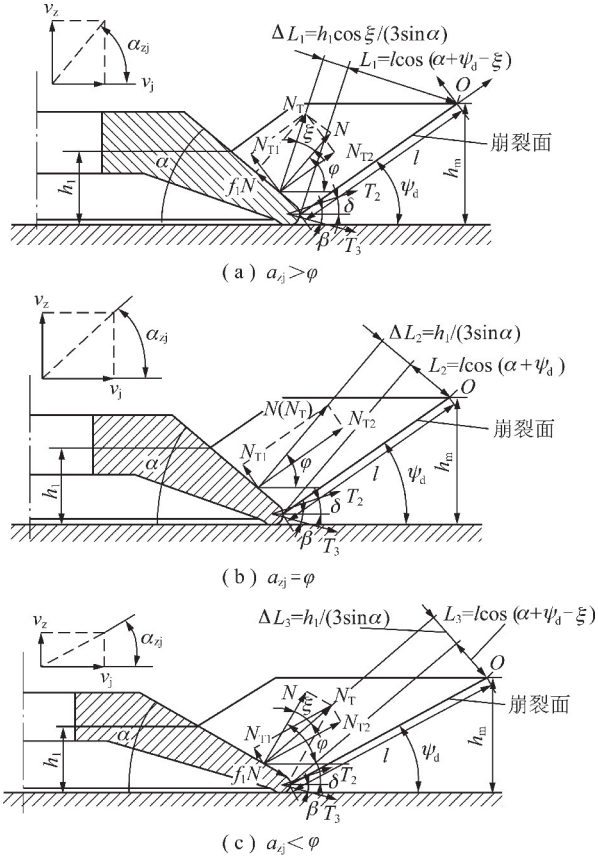

图 3 A—A'碟盘刀具破碎煤岩等效位置

Fig. 3 A—A' Disk cutter broken coal rock equivalent position

由图 3 并且根据假设条件可计算对 y 轴的静矩为

$$S_y = \int_0^{\frac{\pi}{2}} x\mathrm{d}S = \frac{\pi}{4} R^2 l_{\mathrm{m}} + \frac{2}{3} R l_{\mathrm{m}}^2 + \frac{3\pi}{64} l_{\mathrm{m}}^3 \quad (14)$$

同理,可求得对 x 轴的静矩为

$$S_x = \int_0^{\frac{\pi}{2}} y\mathrm{d}S = \frac{1}{2} R^2 l_{\mathrm{m}} + \frac{1}{3} R l_{\mathrm{m}}^2 + \frac{1}{16} l_{\mathrm{m}}^3 \quad (15)$$

由式(14),(15)可得出形心位置为

$$\tan\varphi_{\mathrm{c}} = \frac{S_x}{S_y}\tan\frac{2\left(1 + \dfrac{2l_{\mathrm{m}}}{3R} + \dfrac{1}{8R^2} l_{\mathrm{m}}^2\right)}{\pi\left(1 + \dfrac{8l_{\mathrm{m}}}{3R} + \dfrac{3\pi}{16R^2} l_{\mathrm{m}}^2\right)} \quad (16)$$

式中,$l_{\mathrm{m}} = h_{\mathrm{m}}/\tan\psi_{\mathrm{m}}$,$h_{\mathrm{m}}$ 为 14 ~ 30 mm,参见文献[18]切削厚度与崩落角之间的关系,可知每一个切削厚度对应相应的 ψ_{m},分别为 30.8°,34.0°,36.7°,39.0°和41.0°,由式(16)可知,当 l_{m}/R 的值比较小时

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

可得到 $\varphi_c \approx \arctan(2/\pi)$,因此由式(16)可得出在给定的参数计算出不同切削厚度下图形水平投影的形心位置角度 φ_c 近似为 32.5°,与式(13)求得的位置角一致。

根据图 3 所示的力学模型,在计算刀具破碎煤岩载荷(与对煤岩的作用力方向相反)时,建立碟盘刀具与煤岩作用的力学平衡方程:

$$N_{T\sigma 1}(L_1 + \Delta L_1) + T_2 \sin\delta \frac{h_m}{\tan\psi_d} = l\sigma_1 S'/2 + T_3 \sin\beta \frac{h_m}{\tan\psi_d} \tag{17}$$

$$N_{T\tau_t}\sin(\alpha + \psi_d - \xi) + T_3\cos\beta\cos\psi_d + T_2\cos(\psi_d - d) = \tau_t S' + f_1 T_3 \cos b\cos\psi_d + f_1 T_2 \sin(\psi_d - d) - f_1 N_{T\tau_t}\cos(a + \psi_d - x) \tag{18}$$

式中,$N_{T\sigma 1}$ 为达到抗拉强度时刀具的载荷,kN;$N_{T\tau_t}$ 为达到抗剪强度时刀具的载荷,kN;σ_1 为抗拉强度;τ_t 为抗剪强度,MPa;l 为等效集中力下崩裂面长度,$l = h_m/\sin\psi_d$,mm;T_1 为刀具向下振动时刀刃的载荷,文中未分析刀具向下振动时对煤岩的破坏作用,因此不予计算;T_2 为向上振动时刀刃的载荷,$T_2 = \dfrac{KR r\tau_t}{\cos\gamma - \mu_1\sin\gamma}\sqrt{1 + \pi^2/4}$,kN,其中 K 为惯性力影响系数,由试验确定;γ 为密实核锥体半锥角,(°);μ_1 为煤岩内摩擦因数;R 为碟盘刀具半径,mm;r 为刀头圆弧半径,mm;T_3 为径向切削时刀刃的载荷,$T_3 = \dfrac{Rr\tau_t\cos\beta}{(\cos\gamma - \mu_1\sin\gamma)\sin\gamma}\sqrt{1 + (\pi/2)^2}$,kN。

由式(17),(18)可得

$$N_{T\sigma_1} = \frac{\sigma_1 S'/2 - (T_2\sin\delta - T_3\sin\beta)\cos\psi_d}{\Delta L_1 l^{-1} + \cos(\alpha + \psi_d - \xi)} \tag{19}$$

$$N_{T\tau_t} = \frac{\tau_t S' + T_3\cos\beta(f_1\sin\psi_d - \cos\psi_d)}{\sin(\alpha + \psi_d - \xi) + f_1\cos(\alpha + \psi_d - \xi)} + \frac{T_2[f_1\sin(\psi_d - \delta) - \cos(\psi_d - \delta)]}{\sin(\alpha + \psi_d - \xi) + f_1\cos(\alpha + \psi_d - \xi)} \tag{20}$$

煤岩之间的抗拉强度、抗剪强度与抗压强度存在一定的关系,岩石的抗剪强度约为其抗压强度的 0.09 ~ 0.20,岩石的抗拉强为抗压强度的 0.07 ~ 0.10,抗拉与抗剪强度为:$\sigma_1 = k\tau$,其中 k 为比例系数,$k \in (0.50 \sim 0.73)$。

2.2.2　$\alpha_{zj} = \varphi$ 结果分析

当 $\alpha_{zj} = \varphi$ 时,由图 3(b)的力学模型可知,刀具与煤岩没有相对运动,因此刀具给煤岩的正压力即为刀具作用于煤岩的合力。同理,按照抗拉和抗剪强度准则及刀具与煤岩的力学平衡方程,此时煤岩所受拉力为式(19)中 ξ 取 0,所受剪力为式(20)中 ξ 取 0。

2.2.3　$\alpha_{zj} < \varphi$ 结果分析

当 $\alpha_{zj} < \varphi$ 时,由图 3(c)力学模型可知,刀具对煤岩的摩擦力沿楔面向下。煤岩所受拉力为式(19)中 ξ 取 $-\xi$,所受剪力为式(20)中 ξ 取 $-\xi$。

由式(19),(20)进行计算对比由最小能量原则可得,当楔面角度为 35°、切削厚度为 18 ~ 26 mm,$N_{T\sigma_1} < N_{T\tau_t}$,说明碟盘刀具破碎煤岩时以达到抗拉强度为破坏准则,当楔面角度为 40° ~ 55°、切削厚度在 14 ~ 30 mm 内 $N_{T\sigma_1} > N_{T\tau_t}$ 说明达到抗剪强度为破坏准则。因此根据以上的计算及最小能量原则可得 $N_m = \min(N_{T\sigma_1}, N_{T\tau_t})$,$N_m$ 为根据最小能量原则得出的楔面作用力。

3　破碎煤岩载荷的理论模型

研究碟盘刀具破碎煤岩的载荷特性及破碎煤岩的理论模型显得尤为重要,煤岩破碎理论是对煤岩破碎机构和采掘机械装备、受力分析以及截割参数确定的重要依据。

当碟盘刀具轴向振动与径向切削复合破碎煤岩时,根据煤岩破碎准则,分别在 $\alpha_{zj} > \varphi$,$\alpha_{zj} = \varphi$ 和 $\alpha_{zj} < \varphi$ 的 3 种情况下不同的破碎煤岩准则给出碟盘刀具破碎煤岩的载荷模型。

由式(18),(19)结果可知,楔面角度为 35° ~ 55°,切削厚度在 30 mm 以内时按所计算达到的破坏强度准则,对刀具楔面的作用力与刀刃的作用力进行矢量叠加算碟盘刀具破碎煤岩径向 F_{ji} 与轴向载荷 F_{zi},可得

$$\begin{cases} F_{ji} = 2(N_{mi}\sin\omega_i\cos\varphi_d + T_3\cos\varphi_d\cos\beta + T_2\cos\delta\cos\varphi_d - f_1 T_3\sin\beta) \\ F_{zi} = 2(N_{mi}\cos\omega_i + T_2\sin\delta - T_3\sin\beta) \end{cases} \tag{21}$$

式中,N_{mi} 为不同刀具作用力与水平方向夹角下所对应的最小能量原则得出的楔面作用力,kN;ω_i 为刀具作用力与水平方向的夹角,当 $i=1$ 时为 $\alpha_{zj} > \varphi$,此时 $\omega_1 = \alpha - \xi$;当 $i=2$ 时为 $\alpha_{zj} = \varphi$,此时 $\omega_2 = \alpha$;当 $i=3$ 时为 $\alpha_{zj} < \varphi$,此时 $\omega_3 = \alpha + \xi$。

4　载荷理论模型的验证

碟盘刀具破碎煤岩时,碟盘刀具和煤岩的参数见表 1,表中,f 为振动频率,Hz;A 为振动幅值,mm;γ_1 为径向切削齿尖压力锥体合力与水平面之间夹角的 2 倍,(°)。

限于篇幅,文中以碟盘楔面角度为 50°时,煤岩切削厚度 9,14,18 和 27 mm 为例进行数值模拟和试

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

验,验证理论模型的准确性。文中理论模型建立了碟盘刀具远离煤岩工况(碟盘向上振动)的载荷模型,由于理论模型计算载荷值是煤岩大块崩落时载荷,因此对应的数值模拟和试验的载荷峰值均值。

表 1 碟盘刀具与煤岩参数

Table 1 Disc cutter and coal rock parameters

α/(°)	ψ_m/(°)	θ/(°)	γ/(°)	β/(°)	ξ/(°)	δ/(°)	γ_1/(°)	f_1	μ_1	r/mm	R/mm	A/mm	f/Hz	σ_y/MPa	τ_t/MPa	σ_1/MPa
50	30.8~41.0	30	30	10	8.5	30	30	0.15	0.58	3	125	2	45	10	2.7~6	1.9~3

4.1 数值模拟

为分析碟盘刀具切削煤岩的载荷特性,利用 ABAQUS 有限元软件在碟盘刀具在轴向振动与径向切削复合作用下破碎煤岩的数值模拟,模拟时在 ABAQUS 中选用扩展的线性 Drucker-Prager 塑性本构模型,模拟时碟盘刀具设置为刚体,碟盘刀具和煤岩体采用六面体 C3D8R 的单元网格类型[19]。碟盘刀具破碎煤岩应力云图,如图 4 所示。

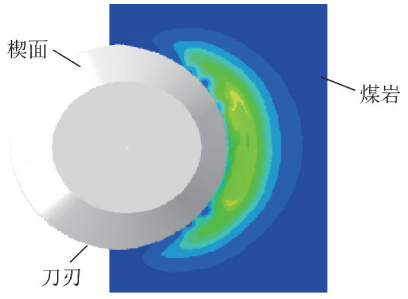

图 4 碟盘刀具破碎煤岩应力云图

Fig. 4 Stress cloud of broken coal rock in disc cutter

由图 4 可以看出,应力的影响范围呈现出月牙状[19],由中间向两边递减。

图 5 为振动切削下,不同切削厚度的碟盘刀具的模拟载荷。

由图 5 可知,随着切削厚度的增加,径向载荷逐渐增大,径向载荷和轴向载荷随着振动位移呈周期性变化。

4.2 振动切削煤岩试验

碟盘刀具振动切削煤岩的试验系统如图 6 所示。该系统包括破岩系统和检测系统,碟盘刀具轴向振动由液压马达驱动振动系统实现碟盘振动破碎煤岩,同时在径向方向液压缸推动截割结构径向切削煤岩。

由图 6 可见,振动切削破岩测试系统可测试碟盘刀具径向切削和轴向载荷、液压马达的转速、液压缸的压力以及碟盘刀具的振幅。其中,碟盘刀具振动切削煤岩载荷通过与刀盘连接的弹性轴上的应变片测得,应变片信号经过 INV1861D 应变调理器处理后输入到 INV3060S 信号采集分析仪进行采集与处理。碟盘刀具单作用切削的试验载荷如图 7 所示。碟盘

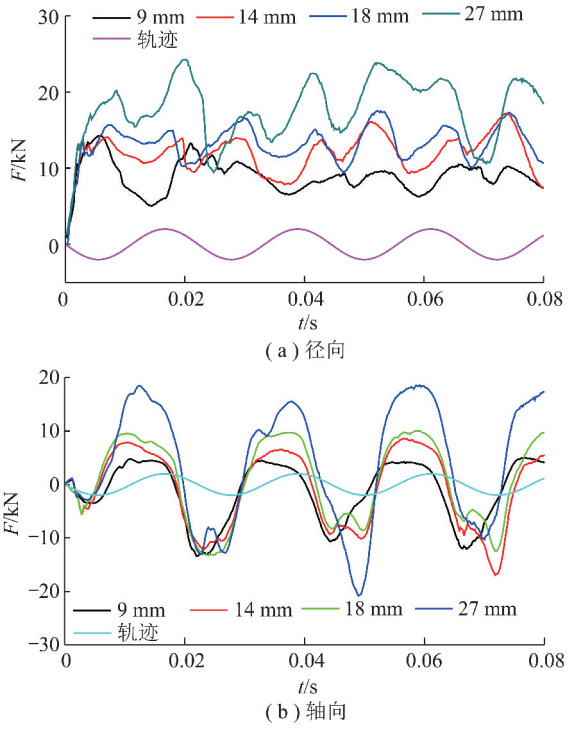

图 5 不同切削厚度碟盘刀具的模拟载荷

Fig. 5 Simulated load of disc cutters of different cutting thicknesses

图 6 碟盘刀具振动切削煤岩试验

Fig. 6 Disk cutter vibration cutting coal rock experiment

刀具在振动切削时,不同切削厚度的试验径向载荷和轴向载荷分别如图 8,9 所示。

由图 7 和图 8(a)可知,单作用径向切削试验载荷峰值均值为 3.78 kN,振动与切削复合作用下试验载荷峰值均值为 27.04 kN,单作用切削载荷约是振

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

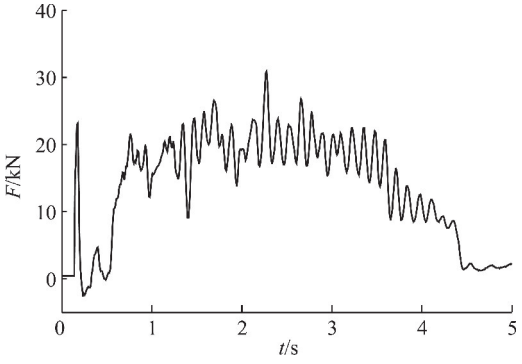

图 7　9 mm 碟盘刀具切削试验载荷

Fig. 7　9 mm disc cutter cutting test load

动与切削下径向载荷的 7 倍,说明振动与切削可以明显提升碟盘刀具的破岩能力。由图 8 可知,随着切削厚度的增加,切削载荷逐渐增大,切削厚度较小时,碟盘刀具的载荷的波动比较小。由图 9 可见,随着碟盘刀具的轴向往复运动,碟盘刀具向煤壁振动与切削所受的轴向载荷比较大,碟盘刀具远离煤壁时的载荷比较小,“0”线以上为碟盘刀具远离煤壁的振动载荷,“0”线以下为碟盘刀具振动切削煤岩,由于受惯性力等因素影响,轴向载荷较大,呈周期性,文中仅分析“0”线以上部分,对其载荷特性,在其他文章进行详细阐述。

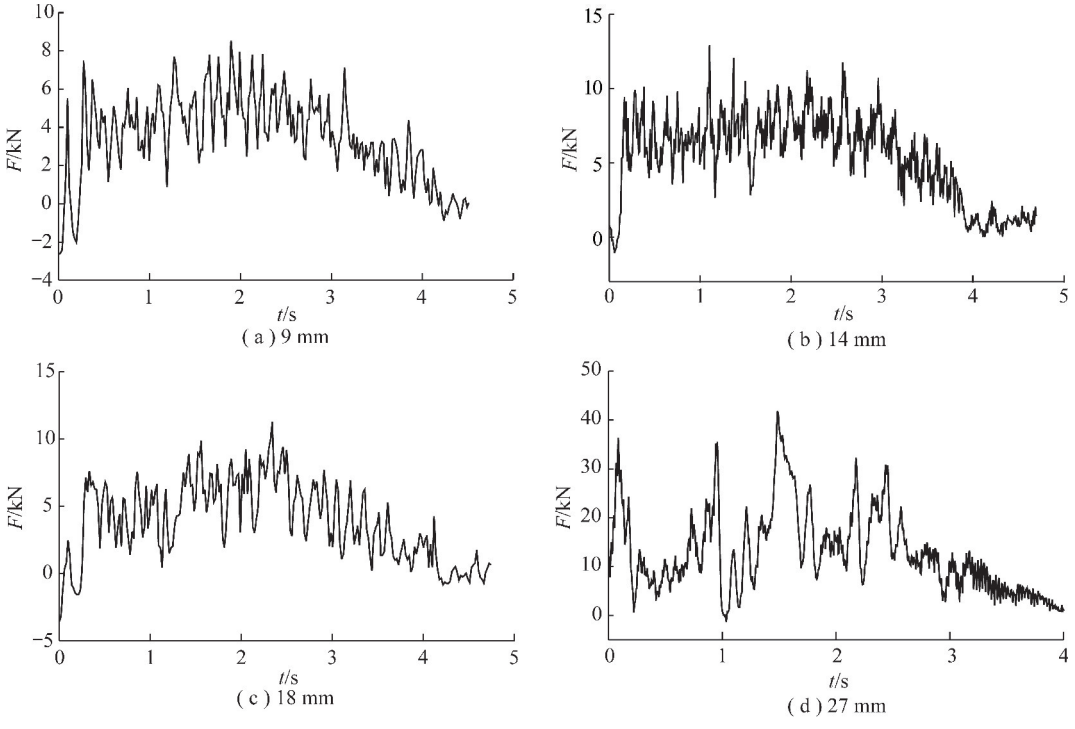

图 8　不同切削厚度下碟盘刀具试验径向载荷

Fig. 8　Test radial load of disc cutters under different cutting thicknesses

4.3　载荷的对比分析

根据文中的煤岩破坏准则与给出径向和轴向的载荷计算数学模型,结合式(21)及表 1 所给的参数计算出碟盘刀具在轴向振动与径向切削复合作用下破碎煤岩的载荷理论值,由于理论分析的是碟盘刀具远离煤壁,该工况下惯性系数 K 取 1。对比分析在数值模拟和试验等效条件下碟盘刀具载荷理论模型计算值与数值模拟载荷峰值均值,理论模型计算值与试验载荷峰值均值的关系,如图 10 所示。

从图 10(a)可以看出,切削厚度为 9,14,18 和 27 mm 时碟盘刀具径向载荷的理论模型计算值与模拟载荷峰值的均值误差分别为 12.65%,12.85%,3.27% 和 7.69%,理论模型计算值与数值模拟载荷峰值均值的平均误差为 9.12%;切削厚度为 9,14,18 和 27 mm 时轴向载荷的理论模型计算值与试验载荷峰值的均值误差分别为 4.39%,9.76%,4.56% 和 0.79%,理论模型计算值与试验载荷峰值均值的平均误差为 4.88%。

从图 10(b)可以看出,切削厚度为 9,14,18 和 27 mm 时轴向载荷的理论模型计算值与模拟载荷峰值的均值误差分别为 6.82%,8.27%,7.08% 和 14.80%,理论模型计算值与数值模拟载荷峰值均值的平均误差为 9.25%;切削厚度为 9,14,18 和 27 mm 时轴向载荷的理论模型计算值与试验载荷峰值的均值误差分别为 22.73%,5.67%,1.89% 和 5.45%,理论模型计算值与试验载荷峰值均值的平

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

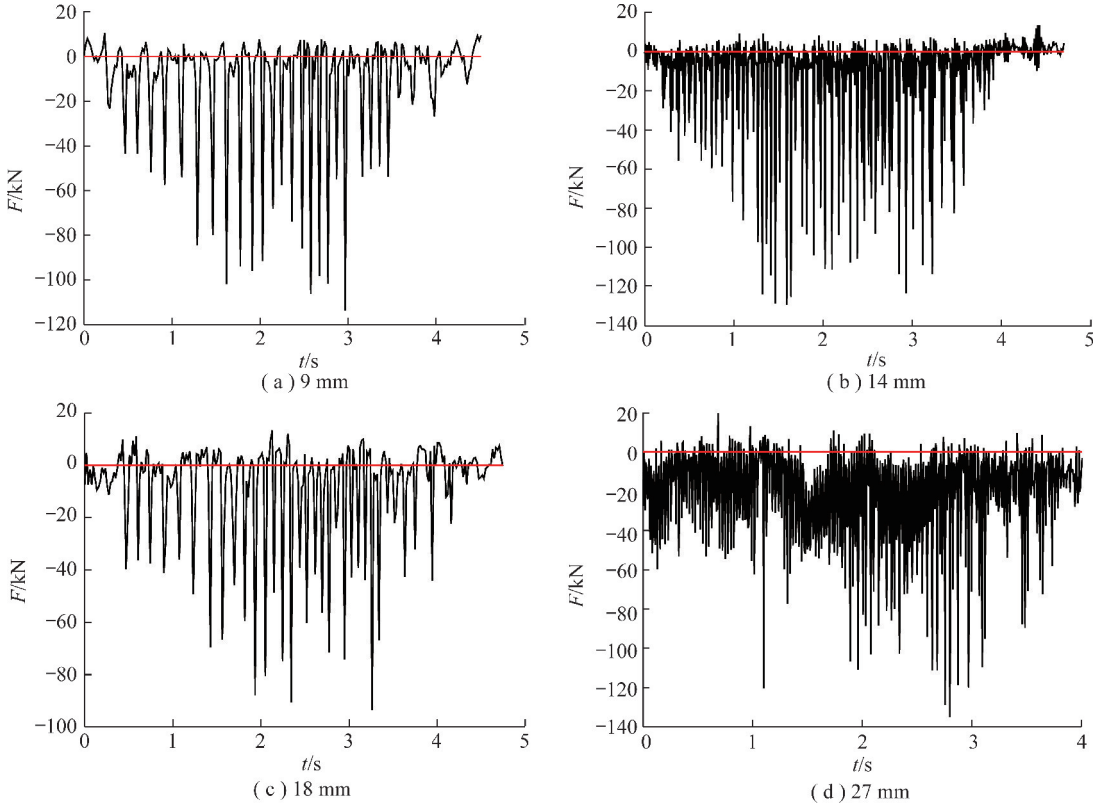

图 9 不同切削厚度下碟盘刀具的试验轴向载荷

Fig. 9 Test axial load of disc cutters under different cutting thicknesses

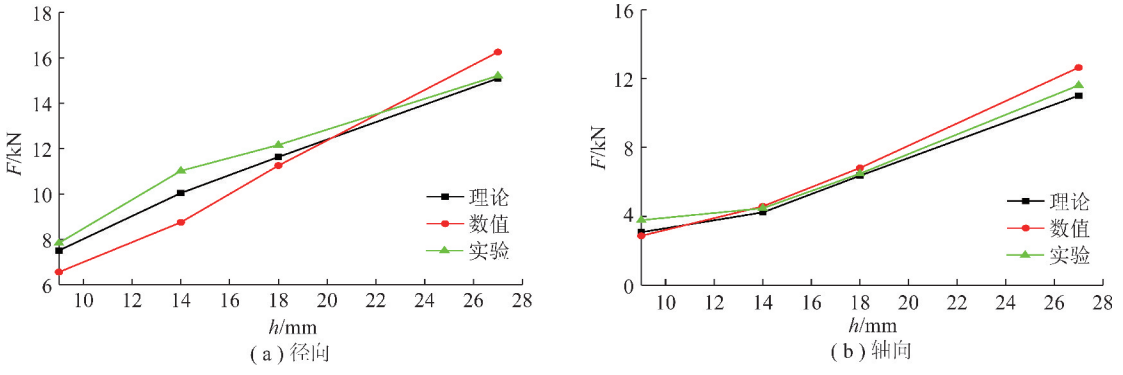

图 10 不同切削厚度载荷值的对比

Fig. 10 Comparison of load spectra of different cutting thicknesses

均误差为 8.34%。

5 结 论

(1)通过分析碟盘刀具的结构特点与楔面对煤岩的作用力,给出了碟盘楔面在不同工况下煤岩的破坏准则,结合碟盘刀刃对煤岩的作用,采用矢量叠加的方法建立了碟盘刀具在轴向振动与径向切削复合作用下破碎煤岩的径向载荷和轴向载荷理论计算模型。

(2)单作用切削与复合振动切削试验发现,振动与切削煤岩时其径向载荷明显小于单作用径向切削煤岩的载荷,说明研究振动与切削煤岩对提高煤岩切削效率和刀具寿命具有很好的研究价值与应用前景。

(3)碟盘刀具破碎煤岩的径向载荷随切削厚度增加而增大,碟盘刀具在轴向振动与径向切削时不同切削厚度径向载荷理论模型计算值与数值模拟载荷峰值均值的平均误差为 9.12%,与试验载荷峰值均值的平均误差为 4.88%;不同切削厚度轴向载荷理论模型计算值与数值模拟载荷峰值均值的平均误差为 9.25%,与试验载荷峰值均值的平均误差为 8.34%,从模拟和试验验证说明所建立的碟盘刀具载荷模型可以满足实际工程需要,下一步继续通过试验研究有齿碟盘刀具的载荷模型。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

参考文献(References):

[1] EVANS I. A theory of the cutting force for point-attack picks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1984, 2(1):67-71.

[2] ROXBOROUGH F F, LIU Z C. Theoretical considerations on pick shape in rock and coal cutting[A]. Proceedings of the 6th Underground Operator's Conference[C]. Kalgoorlie:1995:189-193.

[3] GOKTAN R M. A suggested improvement on Evans cutting theory for conical picks[A]. Proceedings of the 4th International Symposium on Mine Mechanization and Automation[C]. Brisbane: 1997: 57-61.

[4] BILGIN N, DEMIRCIN M A, COPUR H, et al. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(1): 139-156.

[5] BAO R H, ZHANG L C, YAO Q Y, et al. Estimating the peak indentation force of the edge chipping of rocks using single point-attack pick[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, 44(3): 339-347.

[6] 赵光明,张小波,王超,等. 软弱破碎巷道围岩深浅承载结构力学分析及数值模拟[J]. 煤炭学报,2016,41(7):1632-1642.
ZHAO Guangming, ZHANG Xiaobo, WANG Chao, et al. Mechanical analysis and numerical simulation of deep and shallow bearing structure of surrounding rock in weak broken roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7):1632-1642.

[7] 牛东民. 刀具切削破煤机理研究[J]. 煤炭学报,1993(5):49-54.
NIU Dongmin. Study on the mechanism of cutting coal by cutter cutting[J]. Journal of China Coal Society, 1993(5):49-54.

[8] 梁运培,王想,王清峰. 截割厚度与截线距对镐型截齿破岩力学参数的影响[J]. 振动与冲击,2018,37(3):27-33.
LIANG Yunpei, WANG Xiang, WANG Qingfeng. The influence of cutting thickness and cutting distance on the mechanical parameters of pick-shaped cutter broen rock[J]. Vibration and Shock, 2018, 37(3):27 - 33.

[9] 陈才贤. 动静组合载荷作用下切削破岩的力学特性及试验研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2008.
CHEN Xiancai. Mechanical characters and experimental research on rock framentation under dynamic-static combined loads[D]. Xiangtan: Hunan University Science and Technology, 2008.

[10] LIU Shanjun, WANG Han, HUANG Jianwei, et al. High-resolution remote sensing image-based extensive deformation-induced landslide displacement field monitoring method[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(3):170-177.

[11] LIU Xiang, JIAO Chaoqun, YAO Aifen. Orthogonal experiment design of EMI of security monitoring system in coal mines[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(4):325-332.

[12] 吕晋英. 破岩方式与最佳破岩成孔方法探讨[J]. 矿业安全与环保,1996(6):21-24.
LÜ Jinying. Discussion on rock-breaking mode and optimum rock-breaking and pore-forming method[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 1996(6):21-24.

[13] 李润成,荆元昌. 振动切削截煤模拟试验台的研制[J]. 矿业世界,1997(4):15-19.
LI Runcheng, JING Yuanchang. Development of simulation test-bed for cutting coal by vibration cutting[J]. Mining World, 1997(4): 15-19.

[14] MURO T, TRAN D T. Regression analysis of the characteristics of vibrocutting blade for tuffaceous rock[J]. Journal of Terramechanics, 2004(40):191-219.

[15] 谢世勇,王艳霞,赵伏军. 冲击载荷作用下岩石破碎数值模拟及试验研究[J]. 中国钨业,2007,22(5):5-9.
XIE Shiyong, WANG Yanxia, ZHAO Fujun. Numerical simulation and experimental study on rock fragmentation under impact loading [J]. China Tungsten Industry, 2007, 22(5):5-9.

[16] 李思琪,李玮,闫铁,等. 复合载荷作用下钻头冲击破岩机理研究及现场应用[J]. 振动与冲击,2017,36(16):51-55,112.
LI Siqi, LI Wei, YAN Tie, et al. Study on the mechanism of bit impact rock breaking under combined load and its application[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16):51-55, 112.

[17] 刘春生,靳立红. 基于截槽非对称条件镐型截齿的截割力学模型[J]. 煤炭学报,2009,34(7):983-987.
LIU Chunsheng, JIN Lihong. Cutting mechanics model of pick-type cutter based on asymmetric condition of slotting[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7):983-987.

[18] 刘春生. 滚筒式采煤机理论设计基础[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003.

[19] 刘春生,徐玉芸,李德根,等. 边缘牙齿形碟盘破碎煤岩的力学机理及其模型[J]. 煤炭学报,2018,43(1):272-279.
LIU Chunsheng, XU Yuyun, LI Degen, et al. Mechanical mechanism and model of edge tooth disc crushing coal rock[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1):272-279.

[20] 刘春生,袁昊,张艳军,等. 不同楔面角度碟盘刀具切削煤岩的载荷与小波能量熵[J]. 黑龙江科技大学学报,2018,28(5):543-551.
LIU Chunsheng, YUAN Hao, ZHANG Yanjun, et al. Load and wavelet energy entropy of cutting coal and rock with disc cutters with different wedge angles[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2018, 28(5):543-551.

[21] 纪照生. 振动冲击下硬脆性岩石断裂机制研究[D]. 大庆:东北石油大学,2017.
JI Zhaosheng. Study on fracture mechanism of hard brittle rock under vibration[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.