

刨刀刨削煤岩特性数值模拟研究

郭辰光^{1,2} 李 源¹ 胡 迪¹ 张利民^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学 机械工程学院 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 先进制造技术研究院 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为了探索薄煤层刨煤机刨刀刨削煤岩的破碎过程及其力学特性,基于有限元数值仿真分析方法分析煤岩截割过程的显示动力特性。依据煤岩三向应力测试试验,构建出基于 Drucker Prager 准则的煤岩本构模型。以煤岩刨削截深、煤岩刨削速度、刨刀前角为水平因素设计单因素仿真分析试验,实现煤岩破碎形态与刨刀煤岩截割力的研究。研究结果表明:煤屑块度与煤岩刨削截深有关,随着截深的增大,块度增大;随着刨削速度的增加,煤屑的块度变化趋势不明显,煤岩在 $\alpha = 30^\circ$ 刨刀作用下,截割剥离煤屑块度较大;刨刀煤岩截割负载随着截深的增大而增大;随着转速与截割深度的增加,前角为 30° 的刨刀负载呈线性上升趋势。

关键词: 刨削煤岩; 刨煤机; 破碎形态; 截割力

中图分类号: TD421; TH122 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2017)02-0141-05

Numerical simulation study on coal and rock ploughing and planing features of plough cutters

Guo Chenguang^{1,2}, Li Yuan¹, Hu Di¹, Zhang Limin^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Technology University, Fuxin 123000, China;

2. Research Institute of Advanced Manufacturing Technology, Liaoning Technology University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to discover the breaking process and the dynamics features of the coal and rock ploughing and planing by the plough cutters of the thin seam plough, based on the finite element numerical simulation analysis method, an analysis was conducted on the explicit dynamic during the coal and rock cutting process. According to the 3D stress measurement and test of the coal and rock, a coal and rock constitutive model was established based on the Drucker Prager criterion. An analysis and test of single factor simulation was designed with the coal and rock ploughing and planing depth, the coal and rock ploughing and planing speed and the front angle of the plough cutter as the horizontal factor and a study was realized on the coal and rock breaking mode and the coal and rock cutting force of the plough cutter. The study results showed that the coal cutting lump size was related to the coal and rock ploughing and planing depth and with the depth increased, the lump size would be increased. With the ploughing and planing speed increased, the variation tendency of the coal lump size was not obvious. Under the $\alpha = 30^\circ$ plough cutter role of the coal and rock, the coal cutting and planing lump size was large. The coal and rock cutting load of the plough cutter would be increased with the depth increased. With the rotary speed and cutting depth increased, the load of the plough with the front angle of 30° was in a linear rising tendency.

Key words: coal and rock ploughing and planing; plough; breaking mode; cutting force

0 引 言

我国煤炭资源储量从赋存条件看,薄煤层和极薄煤层可采储量为 61.5 亿 t,约占全国煤炭总可采

储量的 20%^[1]。然而,由于我国薄煤层开采条件复杂,机械化程度不高等原因,普遍存在着弃薄采厚的现象,其产量仅占煤炭总产量的 10%^[2]。薄煤层开采滞后的现象,造成我国煤炭资源采储比例失调,浪

收稿日期: 2016-07-09; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.02.023

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51304109); “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAF12B08); 辽宁省科技计划资助项目(20131043)

作者简介: 郭辰光(1982—),男,辽宁朝阳人,讲师,博士。Tel: 0418-3350200, E-mail: gchg_neu@163.com

引用格式: 郭辰光,李 源,胡 迪,等.刨刀刨削煤岩特性数值模拟研究[J].煤炭科学技术,2017,45(2): 141-145.

Guo Chenguang, Li Yuan, Hu Di, et al. Numerical simulation study on coal and rock ploughing and planing features of plough cutters[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 141-145.

费严重。刨煤机是薄煤层机械化开采的主要装备,它集采煤和运煤于一体,具有结构简单、自动化程度高、操作方便、无人工作面开采、块煤产出率高等特点,被广泛应用于国内外薄煤层开采作业中。我国于 20 世纪 60 年代引进刨煤机综采设备进行薄煤层开采应用,经历 50 余年的应用与发展,以张家口煤机和三一重装为代表的国内诸多生产企业已成功生产出井下应用的刨煤机成套机组。刨头系统是刨煤机井下作业的主要执行机构。

刨刀的刨削性能直接影响着煤岩截割的效率,决定着刨煤机整机工作性能。诸多学者开展了刨刀截割煤岩的试验研究,文献[3-4]开展了抗压强度 19~44 MPa 的硬质煤岩与夹杂火山岩煤岩截割适刨性的研究,为煤岩截割机械系统的选型提供支撑;文献[5-6]开展了刀形截齿的截割性能研究,通过截割试验与结果分析,指出根据煤岩特性,适当选取切削厚度,可以增大块煤率;对于较软煤岩,应适当提高截割速度,对于较硬煤岩,宜采用较低的截割速度;在相同的截割参数下,使用不同结构尺寸的截齿,截割阻力相差较大等结论;刘春生^[7]分析了镐型截齿安装角对其受力和截煤的影响,提出齿身与煤体不发生干涉的理论设计条件;王琦等^[8-9]对镐型齿截煤机理进行了研究,认为煤体在刀具作用下的碎裂,主要是其内部缺陷—原生裂隙在拉、剪应力共同作用下的结果,且截割力与切削深度基本呈线

性关系;赵丽娟^[10]基于 LS-DYNA 软件,对刨煤机 2 种典型结构的刨刀截割煤壁的过程进行了数值模拟,得到了刨刀的截槽形状,刨刀与煤壁的接触载荷谱及刨刀的应力应变等参数的时间历程曲线。上述学者的研究对刨刀破煤过程的研究具有指导意义。然而,随着刨煤机的不断发展,刨刀截深、刨削速度、刨刀结构也发生了诸多变化,笔者应用有限元方法开展刨刀破岩过程研究,分析煤岩刨削截深、煤岩刨削速度、刨刀前角对煤岩破碎块度和刨刀煤岩截割力的影响,为刨煤机刨头系统的设计提供必要的理论基础数据。

1 数值仿真模型建立

1.1 仿真模型特性参数

基于相似理论^[11-12],实验室配制煤岩试件,并经由单轴抗压试验、单轴抗拉试验、单轴抗剪试验及三轴试验获得煤岩力学特性参数^[13],相关参数见表 1。研究过程中建立二维煤岩截割仿真模型。膨胀角为控制煤岩体积膨胀变化的参数,若采用恒定的参数将导致煤岩刨削过程中产生无限制的体积膨胀现象,为简化计算,笔者采用非关联流动法则,即忽略煤岩的体积膨胀,使煤岩膨胀角为 0°。将刨刀材料定义为硬质合金材料 YG11C 钨钢,煤岩与刨刀材料特性参数见表 1。

表 1 有限元模型中的材料力学参数

Table 1 Material mechanical parameters of FEA model

项目	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗剪强度/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	煤岩-刨刀 摩擦因数
煤岩	1 400	2 375	0.26	26.8	3.98	7.92	2.76	47.73	0.32
刨刀	14 600	610 000	0.22	—	—	—	—	—	—

1.2 煤岩本构方程

煤岩材料具有弹塑性,其屈服特性与静水压力状态或体积变形量相关,在本文中采用修正的线性 Drucker-Prager 模型^[14]构建煤岩本构关系。直线型修正 Drucker-Prager 模型屈服函数表达式为^[15-17]

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (1)$$

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

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

式中: F 为屈服应力, MPa; t 为偏应力, MPa; p 为等效应力, MPa; β 为线性屈服面在 p - t 应力空间上的倾角,即煤岩内摩擦角 ($^{\circ}$); d 为屈服面在 p - t 应力

空间 t 轴上的截距,即煤岩黏聚力, MPa; q 为 Mises 等效应力, MPa; k 为三轴试验测得拉伸强度与压缩强度比值, $0.778 \leq k \leq 1$; r 为第三应力不变量与应力不变量比值。 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为模型主应力面作用的大主应力、中主应力和小主应力在单轴压缩条件下,当单轴压缩屈服应力 σ_c 已知时,则

$$d = \left(1 - \frac{1}{3} \tan \beta \right) \sigma_c \quad (4)$$

煤岩截割失效准则对于仿真分析至关重要,多用于完成切屑在何种条件下实现失效分离的判断,同时失效准则也决定了煤岩截割破碎后煤屑块度。shear failure 剪切失效准则^[18]以等效塑性应变作为

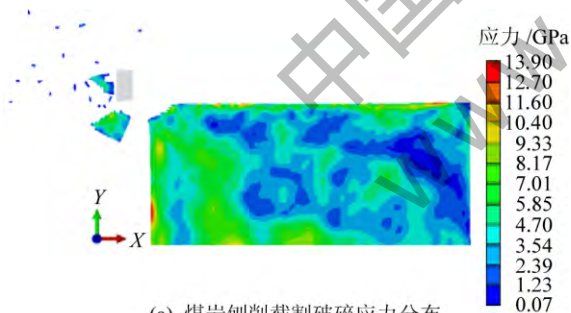
切削分离标准的物理准则,它根据单元积分点处的等效塑性应变是否到达预设值来判断材料是否失效。给定等效塑性应变值定义损伤初始值,采用能量损伤控制煤岩损伤演化过程。由于刨刀截割煤岩过程中,有限元网格将发生很大的畸变,在构建仿真模型过程中,采用网格自适应(ALE)实现网格畸变重划分。

二维煤岩截割动力学显示有限元仿真模型由煤岩壁和刨刀组成。煤岩壁长度1 000 mm,宽度500 mm;刨刀后刀角为 8° 。目前,刨煤机的刨刀截深已由早期的50 mm逐步增加到150 mm,刨速也由420 mm/s提升到1 700 mm/s,可根据不同的煤岩赋存特性,设置不同的刨煤工艺实现薄煤层的开采。为了进行煤岩破碎形态与刨刀煤岩截割力的仿真分析,笔者以刨刀截深、刨削速度、刨刀前角作为水平因素,设计单因素仿真分析试验。刨刀刨削煤岩截深设定为50、100、150 mm,刨削速度设定为420、1 000、1 700 mm/s,刨刀前角为 0° 、 30° 。忽略刨刀的弹塑性变形,将刨刀视为刚性体实现煤岩的切割。

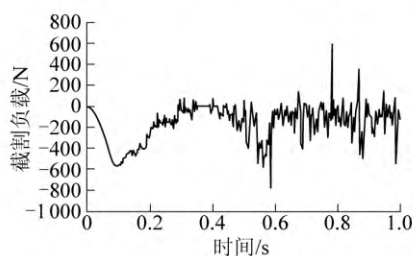
2 仿真结果讨论

2.1 煤岩截深的影响

图1a为前角 0° 、刨速1 000 mm/s、截深50 mm的煤岩刨削截割过程应力分布云图。仿真分析过程



(a) 煤岩刨削截割破碎应力分布



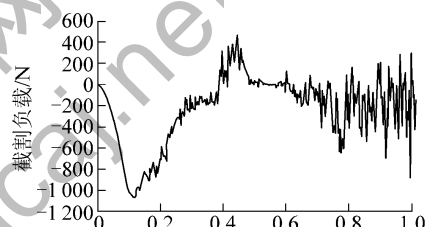
(b) 刨刀煤岩截割负载

图1 煤岩截割仿真分析(前角 $\alpha=0^{\circ}$, 刨速1 000 mm/s, 截深50 mm)

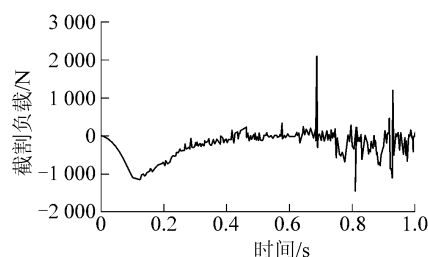
Fig. 1 Cutting force of coal ploughing (rake angle $\alpha=0^{\circ}$, coal cutting velocity 1 000 mm/s, coal cutting depth 50 mm)

中,应力集中区域出现在刀具煤岩接触前刀面附近,且截割过程中应力最大值达到13.95 GPa。煤岩碎屑多为20~50 mm,且最大煤屑块度达到150 mm左右,煤屑随着刀具刨削侵入不断产生,且初始截割剥落煤岩的块度较大。图1b为相应的刨刀截割负载受力,可见刨刀截割煤岩的过程为强烈的断续切削过程,其平均煤岩截割力为208.79 N,最大煤岩截割力为791.2 N。

图2为前角 0° 、刨速1 000 mm/s,截深分别为100、150 mm刨刀截割负载受力示意。当截深为100 mm时截割负载最大为1 067.62 N,且煤屑块度较大,为280 mm;当截深为150 mm时截割负载最大为2 105.87 N,煤屑块度为300 mm。可见,煤屑块度与煤岩刨削截深有关,随着截深的增大,块度增大。刨刀煤岩截割负载随着截深的增大而增大。



(a) 截深100 mm



(b) 截深150 mm

图2 刨刀煤岩截割负载(前角 $\alpha=0^{\circ}$, 刨速1 000 mm/s)

Fig. 2 Cutting force of coal ploughing (rake angle $\alpha=0^{\circ}$, coal cutting velocity 1 000 mm/s)

2.2 刨削速度的影响

前角 0° 、截深100 mm的煤岩刨刀在截割速度为420、1 000、1 700 mm/s时的瞬时应力云图如图3所示。随着刨削速度的增加,煤屑的块度变化趋势并不明显,伴随着刨力截割,小粒度块煤在煤壁应力集中作用区域出现裂隙扩展并撕裂,而大块度煤屑多出现在刨刀切入、切出煤岩过程,且在煤岩切出阶段自由面较多,极易形成块度较大煤屑,最大煤屑块度尺寸可达340 mm。图4为前角 0° 、截深100 mm的煤岩刨刀,在截割速度为420、1 000、1 700 mm/s

时的截割最大负载,可见截割负载随着刨削速度的递增变化不大,当刨刀刨速由 420 mm/s 递增至 1 700 mm/s 时,其截割负载仅由 1 046.99 N 上升至 1 086.01 N。

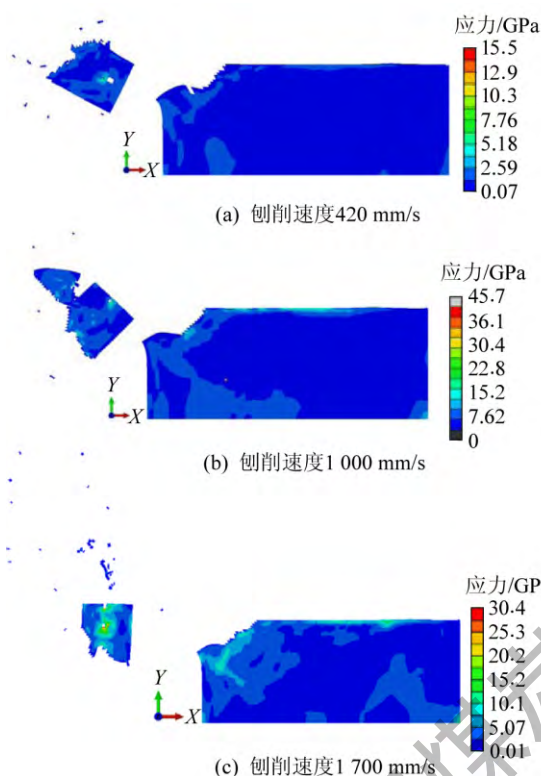


图3 煤岩刨削应力云图(前角 $\alpha=0^\circ$, 截深 100 mm)

Fig. 3 Stress of coal ploughing (rake angle $\alpha=0^\circ$, coal cutting depth 100 mm)

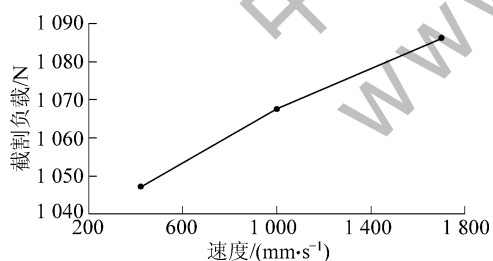


图4 刨刀煤岩截割负载(前角 $\alpha=0^\circ$, 截深 100 mm)

Fig. 4 Cutting force of coal ploughing (rake angle $\alpha=0^\circ$, coal cutting depth 100 mm)

2.3 刨刀前角的影响

前角 $\alpha=30^\circ$ 的刨刀刨削煤岩应力如图 5 所示,煤岩在 30° 刨刀作用下,截割剥离煤屑块度较大,随着刨削速度的增加,煤屑的块度变化趋势不明显。图 6 为 18 组仿真分析刨刀煤岩截割负载受力情况,相同截深 ($d=50$ 或 100 mm) 下,相同煤岩截割速度 ($v=420$ 或 1 000 mm/s) 下,前角为 30° 的刨刀负载小于前角为 0° 的刨刀;当截深达到 150 mm 时,且煤

岩截割速度为 1 700 mm/s 时,前角为 30° 的刨刀负载大于前角为 0° 的刨刀。随着转速与截割深度的增加,前角为 30° 的刨刀负载呈线性上升趋势。

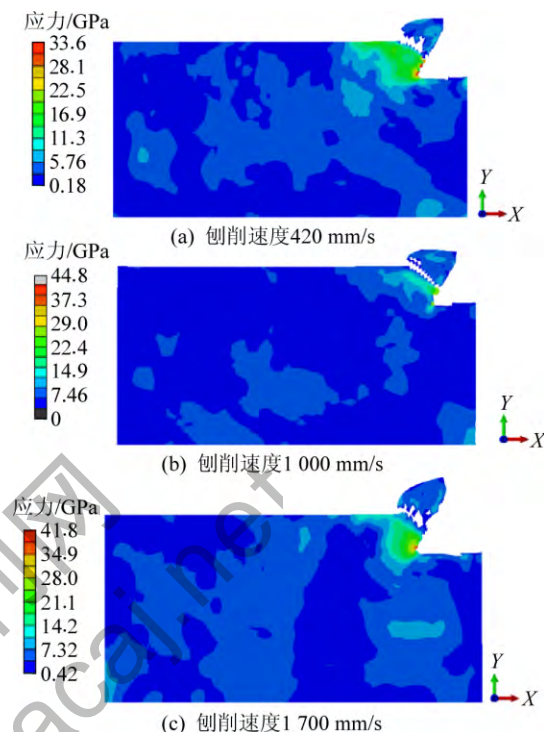


图5 煤岩刨削应力云图(前角 $\alpha=30^\circ$, 截深 100 mm)

Fig. 5 Stress of coal ploughing (rake angle $\alpha=30^\circ$, coal cutting depth 100 mm)

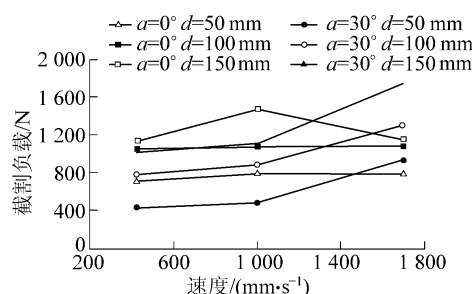


图6 刨刀煤岩截割负载曲线

Fig. 6 Cutting force curves of coal ploughing

3 结 论

1) 刨刀截割煤岩的过程为强烈的断续切削过程,随着刨削速度的增加,煤屑的块度变化趋势并不明显;随着刨刀刨削截深的增加,煤屑块度增大,最大块煤尺寸可达 340 mm,出现于刨刀前角 $\alpha=0^\circ$,截深 150 mm 的不同刨速下煤岩截割过程;在 $\alpha=30^\circ$ 刨刀作用下,煤岩截割剥离煤屑块度普遍大于 $\alpha=0^\circ$ 刨刀截割过程。伴随刨刀前进,小粒度块煤产生于煤岩应力集中作用区域裂隙扩展、撕裂,大块度煤

屑多出现在刨刀切入、切出煤岩过程,且在煤岩切出阶段自由面较多,极易形成块度较大煤屑。

2) 刨刀煤岩截割负载随着截深的增大而增大。当截深分别为 50 或 100 mm 时,前角为 30° 刨刀所受截割负载小于前角为 0° 刨刀;当截深为 150 mm 时,前角为 30° 刨刀所受截割负载大于前角为 0° 刨刀;在截深为 150 mm 时,前角为 30° 刨刀负载最大达到 1 741.67 N。随着转速与截割深度的增加,前角为 30° 的刨刀负载线性上升,且随着截深加大,上升趋势显著。

参考文献(References):

- [1] 黄盛初.2012 中国煤炭发展报告[M].北京:煤炭工业出版社,2012.
- [2] 袁树来,张立明,王克武,等.薄煤层高产高效开采技术[M].北京:煤炭工业出版社,2011.
- [3] Singh R, Singh J K, Singh T N. Cuttability assessment of hard coal seams[J]. Engineering Geology, 1995, 13(2): 63-78.
- [4] Rajendra Singh, Singh A K, Mandal P K. Cuttability of coal seams with igneous intrusions[J], Engineering Geology, 2002, 67(1/2): 127-137.
- [5] 李晓谿.刀形截齿的截割性能研究[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2000,19(5):526-529.
Li Xiaohu. Study of cutting performance for a flat pick[J]. Journal of Liaoning Technical University: Nature Science, 2000, 19(5): 526-529.
- [6] 王春华,李贵轩,姚宝恒.刀型截齿截割煤岩的实验研究[J].辽宁工程技术大学学报,2001,20(4):487-488.
Wang Chunhua, Li Guixuan, Yao Baoheng. The experiment study of flat pick cutting coal and rock[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2001, 20(4): 487-488.
- [7] 刘春生.采煤机镐型截齿安装角的研究[J].辽宁工程技术大学学报,2002,21(5):661-663.
Liu Chunsheng. Research on the installing angle of shearer pick shaped cutter[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(5): 661-663.
- [8] 王琦,李贵轩,王春华,等.镐型齿截煤机理研究[J].煤炭工程,2003(11):41-44.
Wang Qi, Li Guixuan, Wang Chunhua et al. Study of coal cutting mechanism of point-attack pick[J]. Coal Engineering, 2003(11): 41-44.
- [9] 王琦,李贵轩,王春华.镐齿截割煤断裂模式研究[J].辽宁工程技术大学学报,2004,23(2):247-249.
Wang Qi, Li Guixuan, Wang Chunhua. Study on coal break mode with point-attack pick cutting[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2004, 23(2): 247-249.
- [10] 赵丽娟,何景强,李发泉.刨煤机刨刀破煤过程的数值模拟[J].煤炭学报,2012,37(5):878-883.
Zhao Lijuan, He Jingqiang, Li Faquan. Numerical simulation of coal breaking process of plow bit[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 878-883.
- [11] 高学平,赵耀南,陈弘.水库分层取水水温模型试验的相似理论[J].水利学报,2009,40(11):1374-1380.
Gao Xueping, Zhao Yaonan, Chen Hong. Similarity theory of water temperature test model for selective withdrawal from reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1374-1380.
- [12] 车平,黄宏伟.相似理论在溶洞顶板稳定性数值分析中的应用[J].地下空间与工程学报,2007,3(4):617-622.
Che Ping, Huang Hongwei. Application of similarity theory to numerical analysis on roof stability of karst cave[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 617-622.
- [13] 张照煌,叶定海,袁昕.岩石在盘形滚刀作用下的性能研究[J].水利学报,2011,42(10):1247-1251.
Zhang Zhaohuang, Ye Dinghai, Yuan Xin. Study on rock mechanical properties under the effect of disc cutter head[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(10): 1247-1251.
- [14] 费康,张建伟.ABAQUS在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [15] 崔娟.盾构机切刀切削过程模拟及刀盘扭矩计算方法[D].大连:大连理工大学,2012.
- [16] 吴玉厚,田军兴,孙健,等.基于ABAQUS的岩石节理特征对滚刀破岩影响研究[J].沈阳建筑大学学报,2015,31(3):534-542.
Wu Yuhou, Tian Junxing, Sun Jian et al. Effects of joint characteristics on rock breaking with disk cutter based on ABAQUS[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2015, 31(3): 534-542.
- [17] 谭青,朱逸,夏毅敏,等.节理特征对TBM盘形滚刀破岩特性的影响[J].中南大学学报,2013,44(10):4041-4045.
Tan Qing, Zhu Yi, Xia Yimin et al. Influence of joint characteristics on rock fragmentation induced by TBM disc cutter[J]. Journal of Central South University, 2013, 44(10): 4041-4045.
- [18] 刘亚.铣刨机路面铣削过程的有限元仿真[D].湘潭:湘潭大学,2009.