

中文引用格式:荆德吉,董智斌,王德记,等. 截齿锥角对煤岩破碎产尘特征影响的试验及模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(5): 64-72.

英文引用格式:Jing Deji, Dong Zhibin, Wang Deji, et al. Experimental and simulation study on influence of pick cone angle on coal-rock fragmentation and dust-generation characteristics[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(5): 64-72.

截齿锥角对煤岩破碎产尘特征影响的试验 及模拟研究*

荆德吉^{1,2,3}教授, 董智斌^{1,3}, 王德记^{**1}, 李振⁴, 刘鸿威^{2,3}, 鲍春花^{2,3}

(1 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 3 辽宁工程技术大学 鄂尔多斯研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;
4 吉林化工大学 资源与环境工程学院, 吉林 吉林 132000)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.1249

基金项目:国家自然科学基金资助(52474229)。

【摘要】 为探究煤矿井下掘进过程中截齿锥角对煤岩的破碎产尘特征,基于试验与离散元仿真模拟(DEM)多尺度综合分析方法,以78°、92°、105°及118°锥角截齿为对象,通过掘进截割试验分析产生碎屑及粉尘粒度分布情况;采用颗粒流分析程序(PFC)软件中的平行黏结模型(PBM)进行仿真,准确模拟掘进中煤岩破碎产尘全过程;在截割头钻入和横摆2种工况下分析裂纹数量、种类以及最小离散颗粒数量、抛掷速度的发展变化趋势。结果表明:锥角增大时,煤壁碎屑粗糙度指数(CI)从728.92下降到696.91、粉尘占比从0.4%增至0.67%,煤壁破碎程度与产尘量随截齿锥角增大而提升;粉尘破碎指数上升、均匀性指数下降,表明产尘粒度分布范围扩大且小粒径粉尘比重增加;仿真模拟中煤壁裂纹总数从22 980条增长至27 272条,且拉伸裂纹占比均超73%;最小粒径游离颗粒数量从371个增至459个,平均初始抛掷速度从0.250 m/s减至0.221 m/s。综上,增大截齿锥角在一定程度上加剧了产尘,但有助于抑制粉尘扩散范围。

【关键词】 截齿锥角; 破碎产尘; 粒度分布; 平行黏结模型(PBM); 抛掷速度

Experimental and simulation study on influence of pick cone angle on coal-rock fragmentation and dust-generation characteristics

Jing Deji^{1,2,3}, Dong Zhibin^{1,3}, Wang Deji¹, Li Zhen⁴, Liu Hongwei^{2,3}, Bao Chunhua^{2,3}

(1 College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China;
2 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China;
3 Erdos Research Institute of Liaoning Technical University, Erdos Inner Mongolia 017000, China;
4 College of Resources and Environmental Engineering, Jilin University of Chemical Technology,
Jilin Jilin 132000, China)

Abstract: To investigate the influence of pick cone angle on coal-rock fragmentation and dust generation characteristics during underground roadheading operations, a multi-scale integrated approach combining

* 文章编号:1003-3033(2026)05-0064-09; 收稿日期:2025-12-11; 修稿日期:2026-03-20

** 通信作者:王德记(1984—),男,陕西神木人,博士研究生,主要研究方向为粉尘防治理论与技术。E-mail: wdj838133064@163.com。

experimental tests and discrete element method (DEM) simulations was adopted. Four picks with cone angles of 78, 92, 105 and 118° were selected as research objects. Roadheading cutting tests were conducted to analyze the particle size distribution of generated debris and dust. DEM simulations using the PBM in Particle Flow Code (PFC) software accurately reproduced the entire process of coal-rock fragmentation and dust generation during roadheading. The evolution trends of crack quantity, crack type, number of minimum-sized discrete particles, and ejection velocity were analyzed under two operational modes of the cutting head: penetration and slewing. The results indicate that as the cone angle increases, the coarseness index (CI) of coal wall debris decreases from 728.92 to 696.91, while the dust proportion increases from 0.4% to 0.67%, demonstrating that the degree of coal wall fragmentation and dust generation increases with pick cone angle. The fragmentation index rises and the uniformity index declines, indicating a broader dust particle size distribution and a higher proportion of fine dust particles. Simulation results show that the total number of cracks on the coal wall increases from 22 980 to 27 272, with tensile cracks consistently accounting for over 73% of the total. The number of minimum-sized free particles increases from 371 to 459, and their average initial ejection velocity decreases from 0.250 m/s to 0.221 m/s. In summary, increasing the pick cone angle intensifies dust generation to a certain extent, but helps suppress the dispersion range of dust.

Keywords: cone angle of pick; dust generation from fragmentation; particle size distribution; parallel bond model (PBM); ejection velocity

0 引言

煤矿井下生产过程中的产尘问题制约着行业的安全高效发展^[1-2]。掘进工作面作为煤矿生产的前沿环节,因其作业空间狭小、机械设备集中、工艺环节复杂等特点,成为矿井粉尘产生与扩散的核心区域。据统计,掘进工作面粉尘质量浓度达 1 000~3 000 mg/m³^[3],远超国家职业卫生标准限值(总粉尘质量浓度 ≤ 8 mg/m³),不仅严重威胁矿工职业健康,更易引发煤尘爆炸事故,造成重大人员伤亡和财产损失。随着煤矿智能化建设步伐加快,高效掘进设备的普及在提升生产效率的同时,也加剧了粉尘产生强度,传统粉尘治理技术面临严峻挑战^[4]。

为精准防控粉尘,国内外学者进行了大量研究,其中 Bhaskar 等^[5]研究了风流场中粒子的碰撞、分散、沉降、二次扬起等作用特性,建立了一维稳态流场下的粉尘扩散方程。Patankar 等^[6]开发了一套基于欧拉-拉格朗日的颗粒流数值模型,构建了煤矿粉尘运移的高精度多相流仿真体系。高建良等^[7]通过构建压入式通风系统的射流区、回流区与涡流区三维粉尘浓度数值模型,发现回流区与涡流区呈现显著的高浓度粉尘富集特征,其质量浓度分别达到理论峰值且空间分布呈现均质化趋势。目前,掘进工作面的粉尘防治技术主要有除尘器除尘^[8]、通风除尘^[9]、喷雾降尘^[10-12]等,实际应用时需要在生

产过程中实测产尘粒度分布特征后,才能对通风参数、喷雾工艺等进行针对性调整,难以在掘进工程设计时同步完成粉尘防治的优化布置。这种滞后性导致当前许多防尘措施的实际运行效率不高,为解决这一问题需从产尘源头入手。

源头处产尘为截割头破碎煤体产生的小粒径颗粒,受截割参数的影响较大。现有对截割参数的研究大多针对截割效率,即单位时间截割煤岩的体积或质量^[13-14],通常粉尘产生并不作为研究侧重点。鉴于此,笔者拟通过相似截割破碎产尘试验,采用不同锥角的截齿截割煤壁,分析煤岩破碎产尘过程中碎屑和粉尘的粒度分布特征;同时基于离散单元法(Discrete Element Method, DEM)构建掘进机截割头割煤过程的颗粒流数值模型,动态模拟相似截割试验中煤体微观结构的渐进破碎过程;通过试验和仿真模拟分析,揭示截齿锥角参数对煤岩破碎及产尘的影响,以为截齿几何优化和产尘控制提供理论支撑。

1 不同锥角截齿破碎产尘试验

1.1 截齿破煤产尘机制

煤岩受截齿压迫侵入时,破碎产尘过程大致分为如图 1 所示的 4 个阶段:①破碎区形成;②密实核形成;③裂纹产生与发展;④密实核释放煤粉。

齿尖接触煤岩表面时产生压力,煤岩浅表产生细微弹性形变,压力超过应力极限后发生塑性形变,

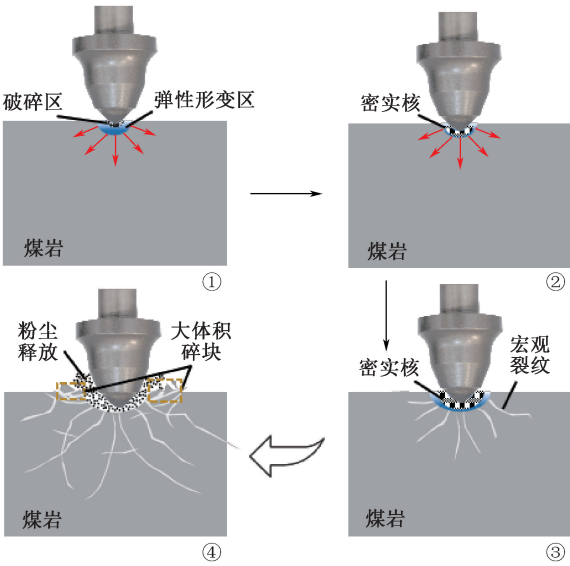


图1 截齿截割煤岩产尘过程

Fig.1 Pick cutting coal-rock dust generation process

形成破碎区。破碎区内持续传入能量,将破碎煤岩压缩成粉化核,能量继续输入导致相邻煤岩破碎粉化,致使粉化核密度不断升高、体积不断扩大。密实核扩大到一定程度后,截齿向煤岩体输入的能量开始向周围传递,密实核与其外部煤岩的交界处开始萌生微裂纹,煤岩的脆性使内部微裂纹迅速扩展、合并形成宏观裂纹。多条宏观裂纹迅速向外扩展,裂纹贯穿煤岩后大体积碎块开始崩落,密实核的应力约束状态被解除,积累的势能将密实核以很高速度沿着截齿锥角排出,密实核内所含的大量细微煤岩颗粒被释放,形成粉尘。

1.2 掘进机截割试验平台

图2为掘进机截割试验平台,该平台主要由截割系统、传感系统、测控系统等组成,截割头和截齿均可拆卸,转速和牵引力可通过操作系统调节。试验煤样选自宁夏某煤矿综掘工作面煤岩巷。

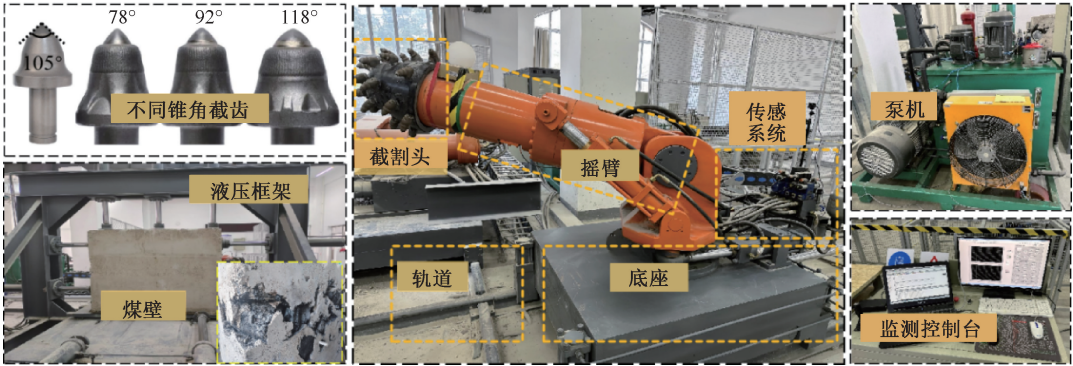


图2 掘进截割试验平台

Fig.2 Tunneling cutting experimental platform

1.3 不同锥角截齿割煤产尘试验方案

利用掘进机截割试验平台,研究4种不同锥角截齿对煤壁的破碎及产尘特征。一次试验设置总时长为35 s,包含2种工况,其中,钻入工况、横摆工况时长各为17.5 s。试验将截割头移动至煤壁中心处,设置旋转速度为46 r/min,牵引速度为20 mm/s,顺序为先钻入后横摆。依次置换78、92、105和118°锥角截齿截割煤岩。待粉尘完全沉降后,收集煤岩碎屑。将收集到的碎屑分别筛分,筛分试验选用20、10、0.85(20目)、0.30(50目)、0.18 mm(80目)和125(120目)、75 μm(200目)的标准筛,筛分后测量所有筛上碎屑质量,再通过激光粒度分析仪分析直径小于75 μm的粉尘颗粒。

1.4 截齿锥角对碎屑及粉尘占比的影响

为分析截割破煤程度及碎屑粒径分布特征,引

入粗糙度指数(Coarseness Index, CI)^[15]作为评价指标,它是一个无量纲常数,可由筛分后的碎屑粒径分布数据算出不同网筛的筛余率,将筛余率累加即可得出。具体表达式为^[16]:

$$D_i = \frac{W_i}{W} \times 100\% \quad (1)$$

$$CI = \sum_n^1 D_i \quad (2)$$

式中: D_i 为筛余率,即某孔径区间内碎屑质量占比; i 为筛分粒径区间序号(i 为正整数,从1开始计数); W_i 为筛分试验后大于某一粒径尺寸的煤壁碎屑质量; W 为所筛分碎屑总质量; n 为筛分粒径区间的总数量。图3为截割后碎屑筛分结果,表1为不同锥角截齿割煤碎屑情况。

通过试验数据得出,4种锥角截齿在相同的截割条件下截割产生碎屑的CI从728.92下降到696.91,

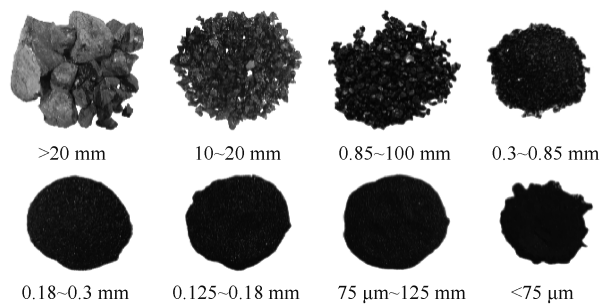


图 3 碎屑筛分结果
Fig. 3 Debris screening results

表 1 不同锥角截齿割煤碎屑分析 Table 1 Analysis of coal fragmentation by picks with different cone angles				
粒径	筛余率/%			
	78°	92°	105°	118°
>20 mm	60.30	54.36	54.58	48.89
10~20 mm	82.19	76.87	77.59	71.56
0.85~10 mm	93.17	91.13	86.85	89.33
0.3~0.85 mm	96.54	96.02	92.91	93.46
0.18~0.3 mm	98.07	97.88	96.98	96.24
0.125~0.18 mm	99.05	98.77	98.50	98.10
75~125 μm	99.60	99.53	99.46	99.33
<75 μm	100.00	100.00	100.00	100.00
CI	728.92	714.56	706.87	696.91

CI 随着锥角的增大而减小,即锥角越大,截齿对煤壁的破碎程度越高。75 μm 以下粉尘颗粒占比从 0.4% 增加到 0.67%,反映出产尘量随锥角的增大而增大。

1.5 截齿锥角对粉尘粒度分布的影响

煤体为脆性材料,脆性材料破碎产生的粉尘粒度分布通常呈现偏态分布,对数正态分布函数可以近似表征。但不同材料所产生粉尘的偏倚系数往往不同,且脆性材料粉尘偏倚系数一般较大,故选用 Rosin-Rammler 分布函数。为避免对量纲直接取对数,引入无量纲粒径 $D=d/d_0$,其中, $d_0=1\text{ }\mu\text{m}$,则分布函数具体表达式为:

$$r = \exp(-aD^s) \tag{3}$$

线性化处理式(3),可得:
$$\ln[-\ln(r)] = \ln a + s \lg D \tag{4}$$

式中: r 为累计质量分数的小数形式, $r=R/100$,其中, R 为累计质量分数,%; D 为无量纲粒径; d 为粉尘粒径, μm ; a 为破碎程度指标; s 为均匀性指数。

Rosin-Rammler 分布函数与特定的粒度频数分布密切相关,式(4)中,系数和指数通过激光粒度仪测定数据求出,拟合测定数据,得到拟合曲线 $Y =$

$sX + c$ 。其中, $X = \lg d, Y = \lg(2 - \lg R), c = \lg(a/\ln 10)$ 。根据拟合激光粒度分析仪所得数据(表 2)绘制不同锥角截齿产尘的 Rosin-Rammler 曲线,如图 4 所示(图 4 中,横、纵坐标分别表示粒径和筛余率的相应对数变换)。

表 2 不同锥角截齿产尘的累计质量分数
Table 2 Cumulative mass fraction of dust generated by picks with different cone angles

粒径/ μm	78°	92°	105°	118°
0	100.00	100.00	100.00	100.00
15	94.20	93.55	92.75	92.07
25	80.06	82.92	83.00	81.21
35	73.19	70.04	69.22	71.07
45	58.48	61.84	57.36	56.64
55	46.39	47.32	50.79	46.18
65	33.70	32.55	31.47	31.66
75	0.00	0.00	0.00	0.00

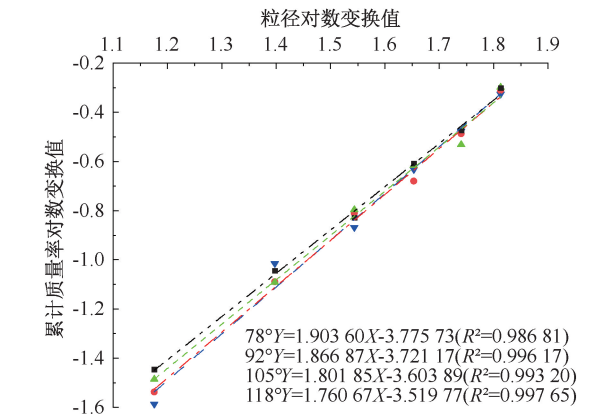


图 4 Rosin-Rammler 拟合曲线
Fig. 4 Rosin-Rammler fitting curve

图 4 中,所有拟合曲线的决定系数 R^2 均大于 0.98,具有较高可靠度。将拟合得到的 s 值和 a 值计入表 3 中。 a 值越大,表示产生的小粒径颗粒越多,即破碎程度高、产尘量大; s 表示粒径的均一程度, s 值越大,表示粒径分布范围越小,即破碎程度低、产尘量小。

表 3 不同锥角截齿产尘拟合曲线 a 、 s 值
Table 3 Fitting parameters a and s of dust generation for picks with different cone angles

锥角/(°)	a	s
78	0.000 386 172	1.903 60
92	0.000 437 865	1.866 87
105	0.000 573 615	1.801 85
118	0.000 696 210	1.760 67

由表 3 可知:截割试验中, a 值随截齿锥角的增大而增大, s 值随锥角的增大而减小,说明锥角的增

大对煤壁的截割破碎程度越高,产生量越大。

2 不同锥角截齿破碎产尘数值模型

2.1 颗粒接触模型选取

DEM 将材料离散为刚性颗粒集合,基于牛顿运动定律(力-位移关系)计算每个颗粒的平动与转动。颗粒间通过接触传递力,具体计算方式由所采用的接触模型定义,而不同的接触模型会导致颗粒系统表现出不同的宏观力学行为。通过调整颗粒的细观力学参数,使模型整体的宏观力学响应贴近真实材料。依据不同的接触模型计算颗粒间的接触力,包括法向力和切向力,接触力的大小和方向取决于颗粒的相对位置、相对运动以及材料属性。计算时常采用较小的时间步长,在每个时间步长内重复进行运动方程求解和接触力计算,逐步推进颗粒系统的演化,从而模拟材料的力学行为。

天然胶结材料因颗粒尺寸、胶结分布及矿物组成的差异呈现强度各项异性和非均质性,平行黏结模型(Parallel Bond Model,PBM)通过力与力矩的传

递,较好地模拟煤岩中的天然胶结效应,如图 5 所示。煤岩中的胶结作用限制颗粒旋转,PBM 可通过力矩传递机制自然刻画这种现象。模型中的黏结被赋予有限面积,真实模拟胶结接触面的应力分布。黏结处的拉应力或剪应力超过预设强度时,黏结断裂,符合煤岩的脆性破坏特征。模拟煤岩的破碎过程时,需要兼顾煤的脆性破坏特性、动态加载响应以及计算效率,故选取 PBM,图 6 为 PBM 本构关系图。

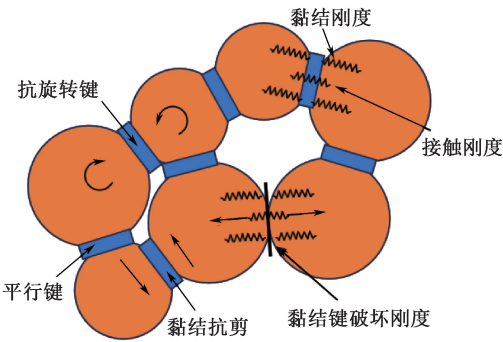


图 5 PBM
Fig. 5 PBM

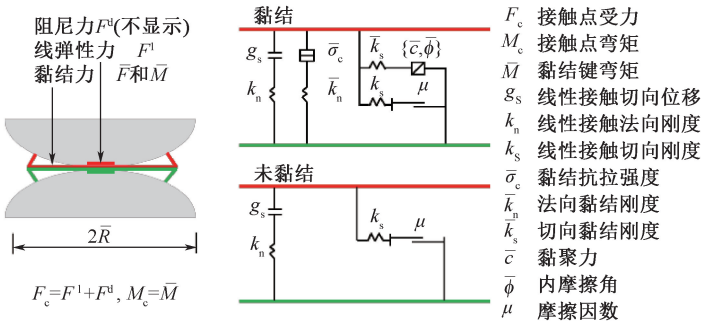


图 6 PBM 本构关系

Fig. 6 Constitutive relation diagram of PBM

2.2 模型参数标定及校准

参数标定是构建真实物理模型的核心步骤,需将煤岩宏观力学特性转化为细观颗粒接触参数。煤岩宏观参数通过相关力学试验得出(表 4)。宏观参数是标定的目标值,确保模型与实质煤岩力学行为一致。通过颗粒流分析程序(Particle Flow Code, PFC)3D 离散元分析软件建立单轴压缩和巴西劈裂模型,采用“试错法”反复调整细观参数仿真,直至得出数据与宏观参数差值最小,所得颗粒流模型细观力学参数见表 5。

2.3 PFC3D 建模

掘进割煤破碎产生过程如图 7 所示,图 7 中,煤壁仿真模型为长 1.5 m、高 1.2 m、厚 0.6 m 的长方

表 4 煤岩宏观参数及标定结果

Table 4 Macroscopic parameters and calibration results of coal-rock

类别	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
物理试验	19.39	2.35	2.74
仿真标定	19.55	2.50	2.82

表 5 煤壁细观参数

Table 5 Microscopic parameters of coal wall

黏结弹性模量/GPa	黏结抗拉强度/MPa	黏结刚度比	摩擦因数	黏结摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
3.41	4.03	1.5	0.67	36.5	6.46

体,与试验保持一致。若考虑将煤岩离散成微观尺

度下的颗粒,其仿真颗粒数量将远远超过现有计算能力范围,因此选择一定宏观尺度定性分析煤岩截割过程,建成后的煤壁模型由 67 491 个半径为 9 ~ 15 mm 区间内的球体颗粒随机生成,颗粒间最大半径与最小半径比值为 1.66。为保证仿真煤壁不崩落及模拟过程顺利进行,需在模拟时固定除开挖面外的其他平面。掘进过程,模拟无风流条件下截齿

割煤产生的自由颗粒运动,与试验的室内环境保持一致。截割头使用 Rhinoceros 三维建模软件建模,共建立 4 种不同截齿锥角的截割头。掘进过程中不考虑截齿磨损,设定截割头为刚性体,将其定义为刚性墙体。设置掘进过程中截割头的牵引速度为 0.02 m/s,旋转速度为 46 r/min。

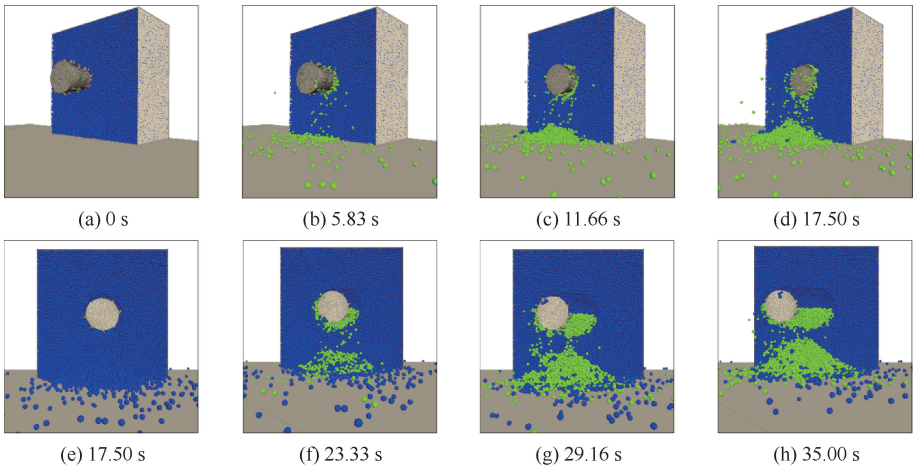


图 7 掘进割煤过程
Fig. 7 Coal cutting process in tunneling

3 截齿锥角对破碎产生尘影响的模拟结果分析

3.1 截割头割煤产尘过程

截割头向前移动时,前端圆头处截齿接触煤岩,截齿尖端侵入煤岩内部,对煤岩颗粒施加力的作用,迫使颗粒产生位移从而导致黏结键断裂,进一步形成裂纹。颗粒相对位移方位的不同导致形成拉伸、剪切 2 种不同类型的裂纹。图 7b 中,此时与煤壁接触的有效截齿数量较少,形成的裂纹数量和范围较小,即密实核和自由面的形成较少,故而剥离颗粒较少。截割头向前钻入煤壁,与煤壁接触的有效截齿数量增加,对煤壁内部应力增大,造成更多煤颗粒间黏结键断裂,更多颗粒被剥离煤壁。由于截割头向前运动,大量自由煤颗粒聚集在截割头前段,无法释放。后续截割过程中,更多截齿的参与导致更多能量的传入,能量的积累使密实核数量激增,同时裂纹的不断扩展使大体积碎块脱落煤壁产生新自由面,截割头前段处颗粒积蓄的势能使大量颗粒得到快速释放(图 7c)。

截割头向左横移时,其右侧与煤壁之间产生大量自由面,右侧处颗粒完全释放。横移过程中被剥

离颗粒大部分被抛掷在煤壁前侧,少量存于截割过后的空腔内。

3.2 锥角对黏结断裂及裂纹演化特征的影响

图 8 为 4 种锥角截齿破碎煤壁的模拟结果,图中绿色圆盘表示此处颗粒在被截割时颗粒间黏结键断裂方式为拉伸破坏,断裂同时标记为形成一处拉伸微裂纹,蓝色圆盘则表示颗粒间黏结键发生剪切破坏,相应记为一处剪切微裂纹。4 种锥角截齿截割时,裂纹均为从截割头处萌生而后扩展到周围煤壁。拉伸、剪切微裂纹数量和总裂纹数的增长模式相似,数量随截齿锥角的增大而增加。锥角 78°时钻入(10 049 条)和横移(12 931 条)产生的总裂纹数均为最少,118°锥角时钻入(12 859 条)和横移(14 413 条)均为最多。且 4 种锥角在 2 种工况下产生的拉裂纹占比均在 73%以上。

在截割参数如牵引力、截割头转速等条件相同时,截齿结构参数的改变导致同一时刻下与截齿接触的颗粒数量和面积不同。根据平行黏结特性,大锥角截齿与煤壁颗粒接触时,接触面积增大,应力场覆盖范围更广,能使更多的黏结键达到临界状态,导致更大体积的煤体进入塑性形变阶段,促进更多裂纹萌生。同时大锥角截齿的宽接触面使主裂纹前段

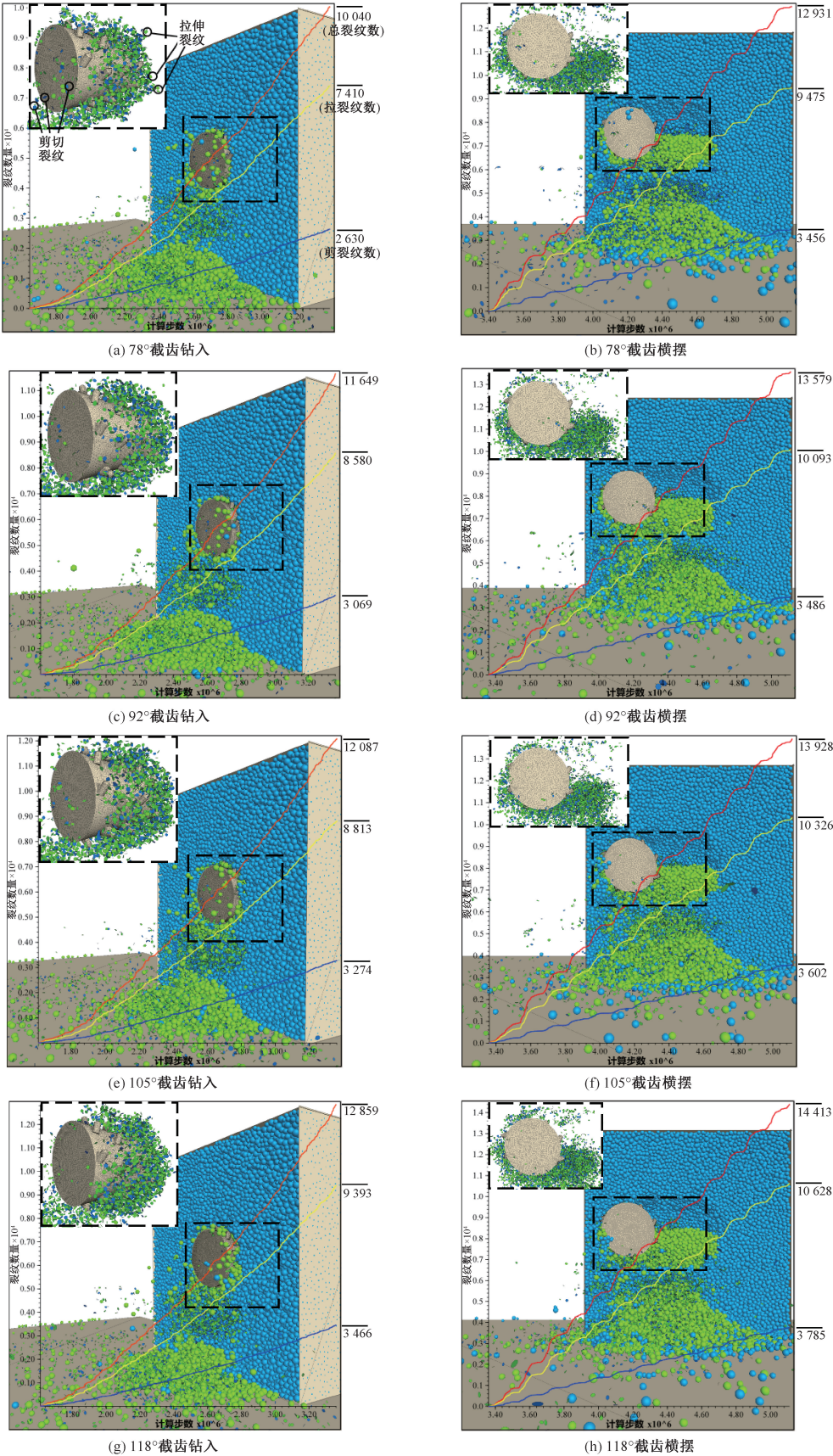


图 8 2 种工况后颗粒分布及黏结键破坏方式 (微裂纹)

Fig. 8 Particle distribution and bonding failure modes (microcracks) after two working conditions

产生更高的应力强度因子,当强度因子大于等于断裂韧度时,裂纹分叉概率增加,易形成多级微裂纹网络。裂纹数量增多即煤体内部破碎程度提高,同时更多的裂纹形成更多自由面,造成更多煤块崩落及煤粉释放,与试验得出的结论一致。从图 8 得出,4 种锥角截割时产生的拉裂纹数量要远远大于剪切裂纹数量,表明裂纹的扩展主要是由拉伸损伤引起的。煤壁的抗拉强度远低于抗压强度,符合张拉主导破坏的基本条件。

3.3 锥角对最细颗粒数量及抛掷速度的影响

仿真模拟中,最小离散单元呈现出高弹射速度、优先分离等动力学特征,这与真实粉尘行为高度一致,能够反映截割过程中的能量传递与破碎机制。通过统计最小半径游离颗粒的数量变化与速度分布,有效评估粉尘产生发展趋势。

记录被截割头从煤岩剥离且所受黏结完全破坏的最小半径颗粒数量,数据见表 6。

表 6 游离最小离散颗粒数

Table 6 Number of minimum-sized free discrete particles

锥角/(°)	工况	数量/颗	总计
78	钻入	171	371
	横摆	200	
92	钻入	193	424
	横摆	231	
105	钻入	208	453
	横摆	245	
118	钻入	212	459
	横摆	247	

由表 6 可知:截割产生的最小颗粒数量同截齿角度成正相关,试验所得不同锥角截齿产尘占比从 0.4%增长到 0.67%,模拟结果同试验一致。

被剥离颗粒的初始抛掷速度决定了颗粒脱离煤体后的动能及运动轨迹。高速度颗粒具备更大动能克服空气阻力及重力沉降,延长悬浮时间,扩大弥散范围;低速度颗粒更易在近处沉降,形成局部高浓度堆积。初始速度源于截齿-煤体相互作用引发的动态断裂过程,在 PFC 中表现为截齿冲击荷载在煤体内形成应力场,当局部应力场超过黏结键强度时释放的能量转化为颗粒动能。黏结断裂瞬间原约束力的突然卸载导致颗粒获得加速度。记录剥离出所有最小颗粒的抛掷速度,得到其平均初始抛掷速度的变化情况,如图 9 所示。

由图 9 可知:钻入截割开始后的第 1~4 s 内,最小颗粒的平均初始抛掷速度剧增,达到最大值后,呈

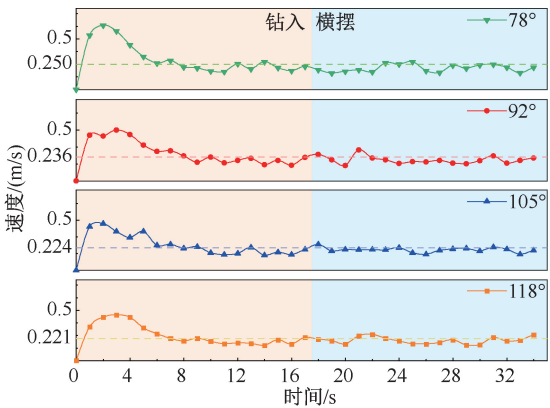


图 9 最小离散颗粒平均抛掷速度变化趋势

Fig. 9 Change trend of average ejection velocity of minimum-sized discrete particles

波动式下降且逐渐平缓;横摆截割时颗粒平均初始抛掷速度变化幅度较小,始终围绕均值波动。4 种截齿剥离煤壁颗粒的最大平均初始抛掷速度在 0.45~0.65 m/s 内,整个截割过程中的平均抛掷速度在 78° 时最大,为 0.250 m/s;118° 时最小,为 0.221 m/s。

小锥角截齿具有更尖锐的几何特征,这种“锐”接触使切向应力分量增大,促使更多煤体从压碎转变为剪切滑移破坏。一方面,剪切破坏所伴随的剪胀效应使颗粒沿剪切面法向获得附加速度增量;另一方面,剪切带内颗粒间协同运动增强,动量传递效率提高。同时,小锥角截齿在接触区域形成的压碎区范围较小,即形成塑性变形的比例较低。因此,机械能更多地转化为颗粒动能,表现为更高的抛掷速度。与之相反,大锥角截齿的“钝”接触扩大了应力作用面积,部分能量在更大的接触区内通过摩擦、挤压等形式耗散,同时产生更多自由面,塑性变形占比增加,转化为颗粒动能占比相应减少,从而导致其抛掷速度较低。

4 结 论

1) 相似截割试验得出,截齿锥角按 78、92、105 和 118° 依次增大时,截割产生碎屑的 CI 从 728.92 下降到 696.91;75 μm 以下粉尘颗粒占比从 0.4%增加到 0.67%。表明在此范围内截齿锥角增大造成煤壁破碎程度和产生尘量提高。Rosin-Rammler 拟合曲线中破碎指数从 0.000 386 172 增大到 0.000 696 210、均匀性指数从 1.903 60 下降到 1.760 67,表明锥角的增大产生更多小粒径粉尘且粉尘粒度分布范围变广。

2) 掘进仿真模型研究表明:截割过程中煤壁内部产生裂纹的类型和扩展方式不受截齿锥角的变化而影响,裂纹从截齿尖端萌生并向截割头周围扩展。裂纹总数从78°时22 980个增长到118°时的27 272个,颗粒间黏结键的破坏方式以拉伸破坏为主,拉裂纹占比均在73%以上。密实核的形成和扩展产生裂纹,较多的裂纹促使更多煤块崩落,产生的自由面进一步导致更多的密实核释放煤粉,这解释了较大锥角截齿产尘量更高的现象,与试验结果相互印证。

3) 截齿锥角增大时,被剥离的最小离散颗粒数量从371增加到459,与试验结果一致。平均抛掷速度的变化趋势不发生改变,在钻入时均为先剧增到最高点后呈周期性减小,后逐渐平缓,横摆时速度变化不大。最大平均抛掷速度为0.45~0.65 m/s。随着截齿锥角从78°增大到118°,颗粒平均抛掷速度从0.250 m/s减小到0.221 m/s。抛掷速度增大扬尘规模相应扩大,因此,在此范围内增大截齿锥角可控制扬尘规模缩小,有利于集中治理截割源头处粉尘。

参考文献

- [1] 袁亮. 煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1):1-7.
Yuan Liang. Scientific conception of coal mine dust control and occupational safety[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1):1-7.
- [2] 程卫民, 周刚, 陈连军, 等. 我国煤矿粉尘防治理论与技术20年研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2):1-20.
Cheng Weimin, Zhou Gang, Chen Lianjun, et al. Research progress and prospect of dust control theory and technology in China's coal mines in the past 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2):1-20.
- [3] Nie Wen, Jiang Chenwang, Sun Ning, et al. Analysis of multi-factor ventilation parameters for reducing energy air pollution in coal mines[J]. Energy, 2023, 278:DOI: 10.1016/J.ENERGY.2023.127732.
- [4] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1):1-15.
Liu Feng, Cao Wenjun, Zhang Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1):1-15.
- [5] Bhaskar R, Ramani R V. Behavior of dust clouds in mine air-ways[J]. SME Transactions, 1986, 280:31-40.
- [6] Patankar N A, Joseph D D. Modeling and numerical simulation of particulate flows by the Eulerian-Lagrangian approach[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(10):1 659-1 684.
- [7] 高建良, 张生华. 压入式局部通风工作面风流分布数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(1):96-99.
Gao Jianliang, Zhang Shenghua. Numerical simulation of airflow pattern at working face with forced auxiliary ventilation[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(1):96-99.
- [8] Hu Shengyong, Gao Yang, Feng Guorui, et al. Experimental study of the dust-removal performance of a wet scrubber[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 8(2):228-239.
- [9] 蒋仲安, 杨斌, 张国梁, 等. 高原矿井掘进工作面截割粉尘污染效应及通风控尘参数分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7):2 146-2 157.
Jiang Zhong'an, Yang Bin, Zhang Guoliang, et al. Analysis of dust pollution effect of cutting dust and ventilation control parameters at the heading face in plateau mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7):2 146-2 157.
- [10] 江丙友, 王一凡, 林汉毅, 等. 煤矿综掘工作面长压短抽除尘性能与尘源移动路径关系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7):2 973-2 985.
Jiang Bingyou, Wang Yifan, Lin Hanyi, et al. Relationship between long pressure short extraction dust removal performance and dust source movement path in comprehensive heading face of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7):2 973-2 985.
- [11] 荆德吉, 王志恒, 葛少成, 等. 超细螺旋雾化喷头降尘技术及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(11):82-89.
Jing Deji, Wang Zhiheng, Ge Shaocheng, et al. Ultrafine spiral atomized nozzle dust technology and its application[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(11):82-89.
- [12] Muddapur A, Srikrishna S, Sundararajan T. Spray dynamics simulations for pulsatile injection at different ambient pressure and temperature conditions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2020, 234(4):500-519.
- [13] 贺安民. 基于单截齿的液压冲击与截割联合破煤岩过程研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(8):119-124.
He Anmin. Study on the process of breaking coal based on single pick hydraulic impact and cutting[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(8):119-124.
- [14] Wang Zhiwen, Zeng Qingliang, Wan Lirong, et al. Investigation of the influence of cutting parameters on conical pick cutting performance and rock damage[J]. Machines, 2022, 10(11):DOI:10.3390/machines10111034.
- [15] Roxborough F F, Rispin A. The mechanical cutting characteristics of the lower chalk[J]. Tunnels, 1973, 5(1):45-67.
- [16] 闫长斌, 李高留, 陈健, 等. 基于新表面理论的TBM破岩效率评价指标[J]. 岩土力学, 2023, 44(4):1 153-1 164.
Yan Changbin, Li Gaoliu, Chen Jian, et al. A novel evaluation index of TBM rock-breaking efficiency based on newly added surfaces theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(4):1 153-1 164.

作者简介: 荆德吉 (1984—),男,辽宁抚顺人,博士,教授,主要从事粉尘防治理论与技术、矿井通风与职业安全健康等方面的研究。E-mail: jingdeji@lntu.edu.cn。