



移动扫码阅读

DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2021.11.025

分析·探讨

马雄伟,王兆丰,杨腾龙,等.淹没射流破碎含瓦斯煤效率主控因素敏感性分析[J].煤矿安全, 2021, 52(11): 147-153.

MA Xiongwei, WANG Zhaofeng, YANG Tenglong, et al. Sensitivity analysis of main control factors for efficiency of submerged jet crushing coal containing gas[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(11): 147-153.

# 淹没射流破碎含瓦斯煤效率主控因素 敏感性分析

马雄伟<sup>1</sup>,王兆丰<sup>1,2,3</sup>,杨腾龙<sup>1</sup>,陈金生<sup>1</sup>,李艳飞<sup>4</sup>,席杰<sup>1</sup>

(1.河南理工大学 安全科学与工程学院,河南 焦作 454000;2.煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心,河南 焦作 454000;3.煤矿灾害预防与抢险救灾教育部工程研究中心,河南 焦作 454000;  
4.河南焦煤能源有限公司 古汉山矿,河南 焦作 454000)

**摘要:**为了研究淹没射流条件下破碎含瓦斯煤效率的影响因素,展开了不同水射流冲击条件对破煤效率的影响研究,建立了水射流破碎含瓦斯煤流固耦合模型,以破煤深度、破煤体积为指标,考察了射流倾角、射流速度、喷嘴直径、初始靶距对破煤效率的影响。结果表明:淹没射流条件下,射流破煤过程初始阶段形成子弹状的破碎坑体,随着破煤的进行,破碎坑体直径增大,深度向下延伸;淹没射流条件下,破煤深度及破煤体积与射流速度、喷嘴直径变化成正相关,与初始靶距变化成负相关,煤体破碎坑体深度在射流与煤体相互垂直时达到最大值,破煤体积随射流倾角增加呈现先上升后下降再上升的趋势,在 90°达到最大值;基于正交试验,得到不同射流参数对淹没射流破煤效率影响程度的主次顺序依次为:射流倾角、射流速度、喷嘴直径、初始靶距。

**关键词:**淹没射流;数值模拟;破煤效率;主控因素;正交试验;敏感性分析;含瓦斯煤

中图分类号:TD713

文献标志码:A

文章编号:1003-496X(2021)11-0147-07

## Sensitivity analysis of main control factors for efficiency of submerged jet crushing coal containing gas

MA Xiongwei<sup>1</sup>, WANG Zhaofeng<sup>1,2,3</sup>, YANG Tenglong<sup>1</sup>, CHEN Jinsheng<sup>1</sup>, LI Yanfei<sup>4</sup>, XI Jie<sup>1</sup>

(1.School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;2.State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China;3.MOE Engineering Research Center of Coal Mine Disaster Prevention and Emergency Rescue, Jiaozuo 454000, China;4.Guhanshan Coal Mine, Henan Energy Coking Coal Company, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** In order to study the influencing factors of crushing efficiency of coal containing gas under submerged jet, the influence of different water jet impact conditions on coal crushing efficiency was studied, and the fluid solid coupling model of water jet crushing coal containing gas was established. Taking coal crushing depth and coal crushing volume as indexes, the effects of jet angle, jet velocity, nozzle diameter and initial target distance on coal crushing efficiency were investigated. The results show that: under the condition of submerged jet, bullet shaped crushing pit is formed in the initial stage of jet coal breaking process. With the process of coal breaking, the diameter of crushing pit increases and the depth extends downward; under the condition of submerged jet, the depth and volume of coal breaking are positively correlated with the change of jet velocity and nozzle diameter, and negatively correlated with the change of initial target distance, the depth of broken coal pit reaches the maximum value when the jet is perpendicular to the coal, and the broken coal volume increases first, then decreases and then rises with the increase of jet angle, reaching the maximum value at 90°; based on the orthogonal experiment, the primary and secondary order of the

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52074107);河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(17IRTSTHN030);河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地开放基金资助项目(WS2018B13)

influence of different jet parameters on the coal breaking efficiency of submerged jet is as follows: jet inclination angle, jet velocity, nozzle diameter and initial target distance.

**Key words:** submerged jet; numerical simulation; breaking coal efficiency; main controlling factors; orthogonal experiment; sensitivity analysis; coal containing gas

水射流技术在水力冲孔<sup>[1]</sup>、水力割缝<sup>[2]</sup>、水力压裂<sup>[3]</sup>等水力化煤层增透措施中应用广泛,其原理是利用高压发生装置使水获得巨大能量后,通过喷嘴射出进而冲蚀破碎煤体,使煤体充分卸压<sup>[4]</sup>。水力化措施在应用中,经常会出现淹没射流条件,对射流破煤的效率具有削弱作用,这直接影响水力化措施的效果,为了提高煤矿井下水力化措施的效率,展开不同射流参数对破煤效率的影响研究。许多学者对淹没射流进行了深入研究。在实验方面,向文英<sup>[5]</sup>等人利用淹没射流装置与分析了淹没磨料射流对岩石的冲蚀性能,发现在冲蚀质量上存在最优靶距直径比;侯亚康<sup>[6]</sup>利用磨料水射流系统,结合淹没实验装置,研究了靶距、压力、进给速度和磨料粒度等因素对花岗岩的冲蚀性能的影响;黄小波<sup>[7]</sup>等人利用淹没射流旋转割缝技术对煤体进行卸压增透,优化了喷嘴直径等参数;刘佳亮<sup>[8]</sup>、廖华林<sup>[9]</sup>、王宗龙<sup>[10]</sup>等人进行了淹没条件下水射流破岩试验,得出了破岩效率的影响因素;杨腾龙<sup>[11]</sup>、蒋斌<sup>[12]</sup>等人分析对比了淹没射流与非淹没射流的效率差异,为现场工作提供了参考。在数值模拟方面,陈欣欣<sup>[13]</sup>研究了冲击角度对淹没冲击射流流场的影响;李世杰<sup>[14]</sup>建立了射流破土数值模型,反映了冲蚀坑的演化规律;司鹤<sup>[15]</sup>等人模拟了不同冲击速度下应力波在岩石中的传播和衰减过程,得出应力波的传播速度与冲击速度的关系,文献[16]中仿真分析了泥土和射流之间的相互作用机理,模拟了坑形变化。综上所述,前人淹没射流破碎的对象多是岩石或土壤,而对淹没破碎含瓦斯煤体鲜有报道,且未对特定地质条件下影响淹没射流破煤效率主控因素进行分析,并且破煤过程极为短暂;为此,采用数值模拟的手段,建立淹没状态下水射流破碎含瓦斯煤流固耦合模型,通过模拟不同射流条件下破煤效率的差异,得出淹没射流破煤的主控因素,以期煤矿水射流技术的高效应用提供指导。

### 1 数值模拟

采用 Ansys/Ls-dyna 进行数值模拟,内嵌的 ALE 算法具有计算网格不再固定、可以相对于坐标系作任意运动的优点,因此采用 ALE 算法计算分析淹没

射流破碎含瓦斯煤的过程。淹没射流破煤效率影响因素主要包括水射流冲击条件、煤体自身特性、环境介质 3 个方面<sup>[17]</sup>,但现场应用中针对的是特定地质条件下的煤体,煤体自身特性和环境介质相差不大,因此只研究不同水射流冲击条件下的破煤过程。

#### 1.1 模型建立及边界条件

淹没水射流冲击破碎煤体的过程是轴对称的,为了提高计算精度与速度,只需选取模型的 1/4 进行模拟分析。网格划分采用自由网格及映射网格相结合的方法,对射流源、水域和瓦斯域采用自由网格法划分,对煤体采用映射网格法划分,淹没射流三维模型建立及网格划分如图 1,模型参数设置见表 1。模型底面设置 ALL DOF 全约束限制底面移动;煤体、水域和瓦斯域各面为无反射边界,以模拟空间无限大的区域。

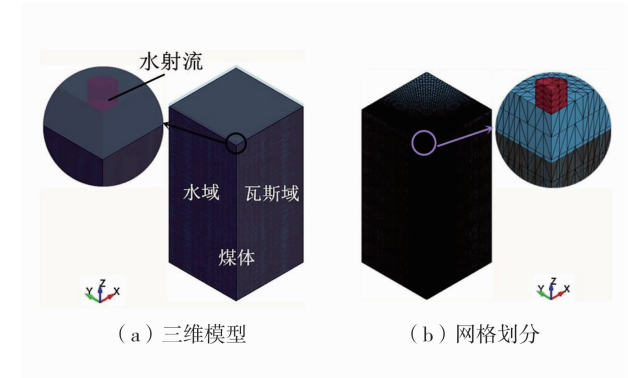


图 1 淹没射流三维模型建立及网格划分

Fig.1 Establishment of 3d model and mesh of submerged jet

表 1 模型参数设置

Table 1 Model parameters setting

参数	取值
射流时间/ $\mu\text{s}$	5 000
射流速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	180/190/200/210
初始靶距/cm	1.5/2.0/2.5/3.0
喷嘴直径/mm	1.0/1.5/2.0/2.5
射流倾角/ $^{\circ}$	30/45/60/90
水域(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)/(cm $\times$ cm $\times$ cm)	50 $\times$ 50 $\times$ (100+初始靶距)
瓦斯域(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)/(cm $\times$ cm $\times$ cm)	50 $\times$ 50 $\times$ 100
煤体(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)/(cm $\times$ cm $\times$ cm)	50 $\times$ 50 $\times$ 100

1.2 力学模型

连续性方程:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + w_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为介质密度, kg/m<sup>3</sup>;  $t$  为时间, s;  $v_i$  为物质速度分量, m/s;  $x_i$  为位移分量, m;  $w_i$  为相对速度分量, m/s。

动量方程:

$$v \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho w_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中:  $v$  为物质速度, m/s;  $\sigma_{ij}$  为应力张量对坐标的偏导数, Pa/m;  $b_i$  为体力, N;  $x_j$  为位移分量, m。

能量方程:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_i - \rho w_i \frac{\partial E}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中:  $E$  为内能密度, J/m<sup>3</sup>;  $v_j$  为物质速度分量, m/s;  $\sigma_{ij}$  为应力张量;  $v_{i,j}$  为物质速度对坐标的偏导数, s<sup>-1</sup>。

煤体本构方程: 选取 H-J-C 模型作为煤体的本构模型, 其规范化等效应力描述如下:

$$\sigma^* = [A(1-D) + Bp^{*N}](1+F \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (4)$$

式中:  $\sigma^*$  为实际等效应力  $\sigma$  与静态屈服强度  $f'_c$  之比,  $\sigma^* = \sigma/f'_c$ ;  $A$  为无量纲黏性力;  $B$  为规范化压缩系数;  $p^*$  为无量纲压力;  $N$  为硬化指数;  $F$  为应变率系数;  $\dot{\epsilon}^*$  为无量纲应变率,  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ ;  $\dot{\epsilon}$ 、 $\dot{\epsilon}_0$  分别为实际应变率和参考应变率;  $D$  为损伤因子。

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1(p^* + T^*)^{D_2}} \quad (0 \leq D \leq 1) \quad (5)$$

式中:  $\Delta \epsilon_p$  为等效塑性应变增量, 无量纲;  $\Delta \mu_p$  为等效体积应变增量, 无量纲;  $T^*$  为最大拉伸静水压力, MPa;  $D_1$ 、 $D_2$  为损伤常数。

瓦斯和水的本构方程: 选取 Gruneisen 状态方程表示, 当材料受压时表示为:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (6)$$

式中:  $\rho_0$  为初始密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C$  为冲击波速度  $\mu_s$  与质点速度  $\mu_p$  关系曲线的截距, m/s;  $\mu$  为黏性系数;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  为常数;  $\gamma_0$  为 Gruneisen 系数;  $\alpha$  为泊松比<sup>[12]</sup>;  $p$  为材料受压时的压力, Pa。

冲击波速度  $\mu_s$  与质点速度  $\mu_p$  可通过式(7)进行相关联:

$$\mu_s = C + S_1 \mu_p + S_2 \left( \frac{\mu_p}{\mu_s} \right)^2 \mu_p + S_3 \left( \frac{\mu_p}{\mu_s} \right)^3 \mu_p \quad (7)$$

1.3 模型材料参数

1) 煤体模型。建立 4 MPa 围压的煤体模型, 模型单元为持续应力固体单元, 边界为无反射边界, 恒定压力时间曲线的值为 4 MPa, 并调用此压力曲线后施加煤体各个面的节点上。煤体材料参数设置见表 2。

表 2 煤体材料参数设置

Table 2 Material parameters setting of coal

参数	取值	参数	取值
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.4	$p_c/GPa$	$1.6 \times 10^{-4}$
$G/GPa$	0.148 6	$\mu_c$	0.001
$A$	0.79	$p_l/GPa$	0.008
$B$	1.6	$\mu_l$	0.1
$C$	0.007	$D_1$	0.04
$N$	0.61	$D_2$	1.0
$f'_c/GPa$	$4.8 \times 10^{-4}$	$K_1/GPa$	0.85
$T/GPa$	$4 \times 10^{-5}$	$K_2/GPa$	-1.71
$E_{min}$	0.01	$K_3/GPa$	2.08
$S_{max}$	7	$E'$	35.7

注:  $T$  为最大静水拉伸强度;  $E_{min}$  为允许塑性应变;  $S_{max}$  为规范化最大强度;  $p_c$ 、 $\mu_c$  分别为单轴试验中的压应力和体积应变;  $p_l$ 、 $\mu_l$  分别为锁死压力和应变;  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别为材料常数;  $E'$  为弹性模量;  $G$  为剪切模量, GPa。

2) 瓦斯域模型。瓦斯气体采用 Mat\_Null 材料模型, 模型单元为 ALE 多物质单元, 边界为无反射边界, 瓦斯气体施加压力为 1 MPa。瓦斯域材料参数设置见表 3。

表 3 瓦斯域材料参数设置

Table 3 Material parameters setting of gas

参数	取值
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$1.29 \times 10^{-3}$
$p_c/GPa$	$8.5 \times 10^3$
$C$	0.033 1
$S_1$	2.56
$S_2$	0
$S_3$	0
$\gamma_0$	0
$\alpha$	0
$E'$	0

3) 水域及水射流模型。水域和水射流材料模型与模型单元同瓦斯域模型一样, 为保证射流先与水域中的水体耦合, 然后冲击煤体, 因此设置罚函数耦合的同时允许侵入煤体单元。水射流和水域材料参数设置见表 4。

表 4 水射流和水域材料参数设置  
Table 4 Material parameters setting of water jet and water area

参数	取值
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1
$P_c/GPa$	$-1 \times 10^{-5}$
$C$	0.149
$S_1$	2.56
$S_2$	1.986
$S_3$	0.226
$\gamma_0$	0.5
$\alpha$	0
$E'$	0

## 2 结果分析

### 2.1 淹没射流破煤瞬时过程分析

将图 1 中的淹没射流模型进行对称处理, 并将破碎形成的坑体处放大, 淹没射流破煤过坑形状图如图 2。在破煤的初始阶段, 射流破煤造成的坑体呈现出子弹形状, 随着破煤的进行, 破碎的坑体直径变大, 深度也向下延伸。这是因为射流体由喷嘴高速喷出, 其蕴含的大量动能与煤体发生交换, 射流体不断冲击煤体, 最终使破碎坑体直径变大, 深度向下延伸。通过与试验对比, 验证了数值模拟结果的可靠性。

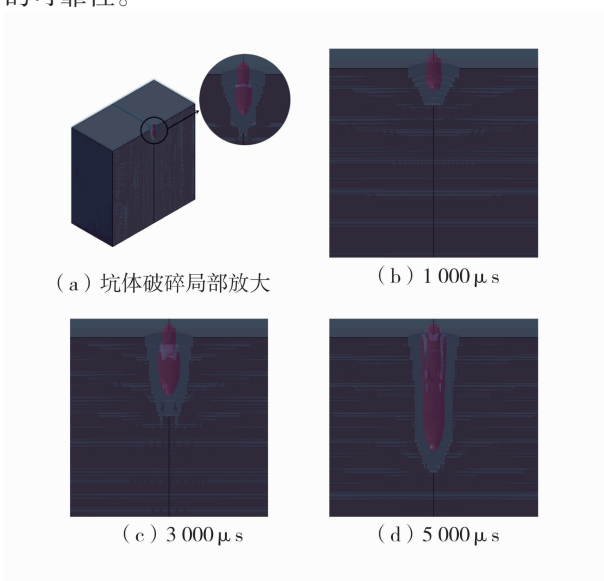


图 2 淹没射流破煤成坑形状图

Fig.2 Shape diagrams of coal pit formed by submerged jet

### 2.2 射流速度对破煤效率的影响

破煤深度、体积随射流速度的变化分别如图 3、图 4。

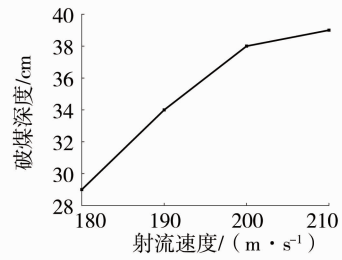


图 3 破煤深度随射流速度的变化

Fig.3 Variation of coal breaking depth with jet velocity

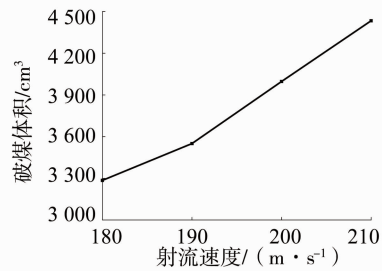


图 4 破煤体积随射流速度的变化

Fig.4 Variation of coal breaking volume with jet velocity

由图 3、图 4 可以看出, 破煤深度及破煤体积与射流速度  $v$  变化成正相关。当射流速度为 180 m/s 时破煤深度仅为 29 cm, 但 210 m/s 时便可达到 39 cm, 增幅为 34%, 同理破煤体积增幅为 33.9%。水射流速度的衰减是射流体与外界环境发生动量交换引起的, 射流速度越大, 动量就会越大, 射流沿程衰减到破煤临界速度的距离变远, 因而破煤效果越好。另外, 相对于直径不变的喷嘴, 射流速度的增大会直接导致流量随之越大, 单位时间内作用于煤体的射流体的总量增加, 因而会产生更大的坑体深度及坑体体积。

### 2.3 初始靶距对破煤效率的影响

破煤深度、体积随初始靶距的变化如图 5、图 6。

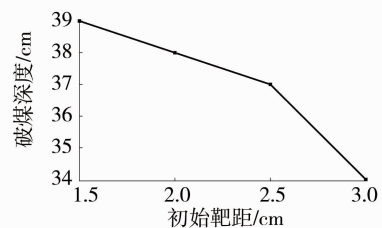


图 5 破煤深度随初始靶距的变化

Fig.5 Variation of coal breaking depth with initial target distance

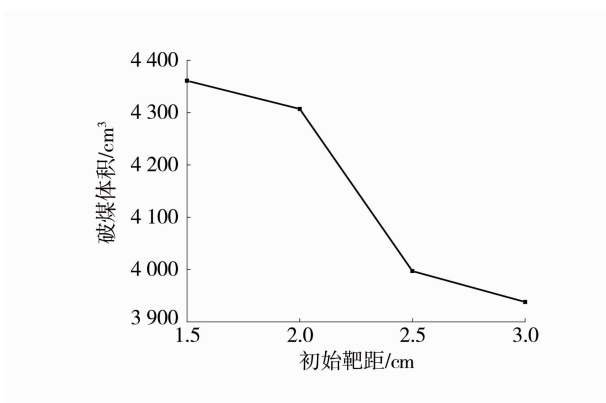


图 6 破煤体积随初始靶距的变化

Fig.6 Variation of coal breaking volume with initial target distance

由图 5、图 6 可以看出,破煤深度及破煤体积与初始靶距  $L$  变化成负相关。这是因为靶距越大,射流体与水域交换时间越长,速度衰减幅度越大,因而破煤能力越弱。井下水力冲孔、水力割缝等水力化措施中,射流体初始靶距不会太大。当初始靶距为 1.5 cm 时,破煤深度为 39 cm;当初始靶距为 3 cm 时破煤深度为 34 cm,减幅仅为 12.8%。同理,破煤体积衰减幅度仅为 1%。不同初始靶距下的破煤深度及破煤体积并未显现出较大差异,这是因为破煤过程处于全程的淹没条件,较小的初始靶距相对于最终形成的较深的破碎坑体,对破煤效率的影响程度并未太大。

#### 2.4 喷嘴直径对破煤效率的影响

破煤深度、体积随喷嘴直径的变化分别如图 7、图 8。

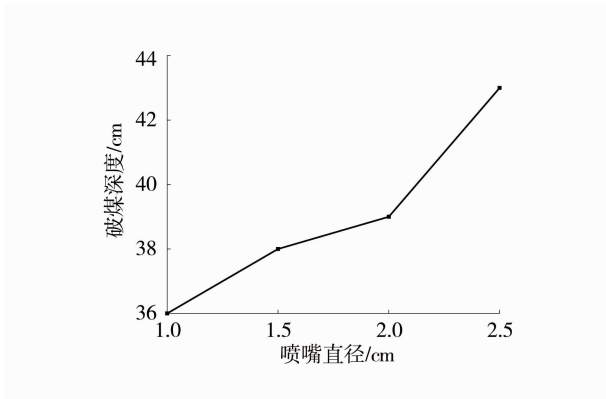


图 7 破煤深度随喷嘴直径的变化

Fig.7 Variation of coal breaking depth with nozzle diameter

由图 7、图 8 可以看出,破煤深度及破煤体积与喷嘴直径变化成正相关,射流速度不变的情况下,喷嘴直径越大,射流从喷嘴喷出时截面越大,流量就会越大,单位时间内作用于煤体的射流体会越

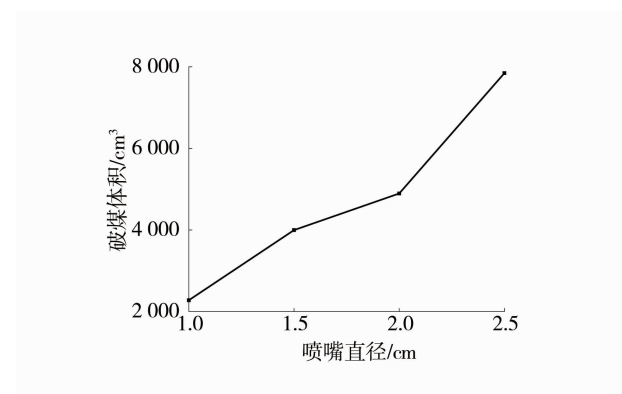


图 8 破煤体积随喷嘴直径的变化

Fig.8 Variation of coal breaking volume with nozzle diameter

多,形成的破碎坑体体积就越大。当喷嘴直径从 1 mm 增至 2.5 mm 时,破煤体积增幅为 263.6%,但破煤深度增幅仅为 19.4%,由此可以看出,喷嘴直径对破煤效率的影响主要体现在破煤体积上。

#### 2.5 射流倾角对破煤效率的影响

破煤深度随射流倾角的变化如图 9,破煤体积随射流倾角的变化如图 10。

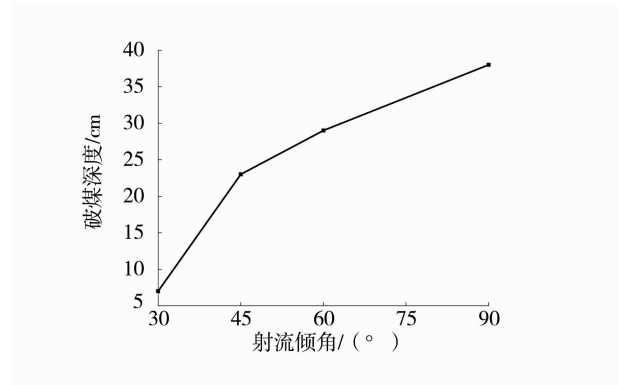


图 9 破煤深度随射流倾角的变化

Fig.9 Variation of coal breaking depth with jet angle

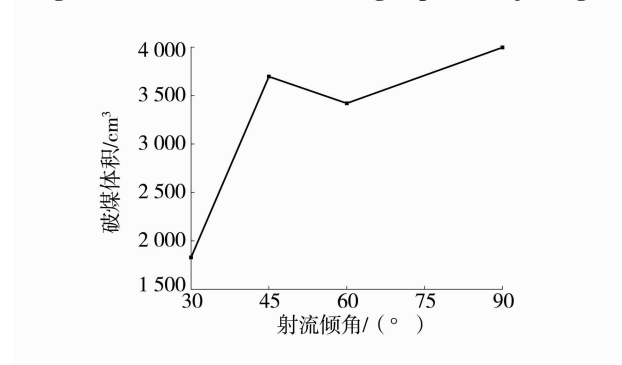


图 10 破煤体积随射流倾角的变化

Fig.10 Variation of coal breaking volume with jet angle

由图 9、图 10 可以看出,破煤段深度与射流倾角  $\alpha$  变化成正相关,当射流倾角为 30°时,破煤深度仅为 6 cm,90°时便可达到 38 cm,增幅为 533.3%,

数据结果显示射流倾角对破煤效果的影响极为显著, 煤体破碎坑体深度在射流与煤体相互垂直时达到最大值, 因为当入射水流与煤体存在夹角时, 射流速度可分解为垂直和平行于煤体表面 2 个方向, 射流倾角越大, 垂直于煤体方向的冲击动量就越大, 因而破碎坑体越深。破煤体积随射流倾角的增加呈现先上升后下降再上升的趋势, 在 90°达到最大值, 因此从淹没射流破煤整体效率来看, 射流倾角 90°时最为适宜。

### 2.6 射流参数影响程度主次顺序分析

利用 Ansys/Ls-dyna 数值模拟软件, 按照正交试验方案对淹没射流破煤效率进行模拟计算, 以破煤深度作为破煤效率的评价指标, 对淹没射流破煤效率主控因素的极差进行求解, 设置 1 个空列作为试验误差以衡量试验的可靠性。采用极差分析法判断各因素对结果影响的主次顺序。极差分析见表 5。

表 5 极差分析  
Table 5 Range analysis

试验编号	射流速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	初始靶距/cm	喷嘴直径/mm	射流倾角/(°)	空列	破煤深度/cm
1	180	2.0	2.0	60	2	30
2	190	3.0	1.0	45	2	22
3	200	3.0	2.0	90	3	37
4	210	2.0	1.0	30	3	10
5	180	2.5	1.0	90	4	35
6	190	1.5	2.0	30	4	14
7	200	1.5	1.0	60	1	37
8	210	2.5	2.0	45	1	33
9	180	1.5	2.5	45	3	29
10	190	2.5	1.5	60	3	33
11	200	2.5	2.5	30	2	20
12	210	1.5	1.5	90	2	49
13	180	3.0	1.5	30	1	3
14	190	2.0	2.5	90	1	48
15	200	2.0	1.5	45	4	32
16	210	3.0	2.5	60	4	40
极差	8.75	6.75	8.25	30.50	3	

从极差分析结果可以看出, 各个因素对淹没射流破煤效率的影响程度按大小依次为: 射流倾角>射流速度>喷嘴直径>初始靶距。

### 3 结 论

1) 淹没射流条件下, 射流破煤过程初始阶段形成子弹状的破碎坑体, 随着射流破煤的进行, 射流体不断冲击煤体, 其动能转移到煤体内部, 致使破碎坑体直径变大, 深度呈向下延伸。

2) 淹没射流条件下, 破煤深度及破煤体积与射流速度、喷嘴直径变化成正相关, 与初始靶距变化成负相关, 煤体破碎坑体深度在射流与煤体相互垂直时达到最大值, 破碎坑体体积随射流倾角增加呈现先上升后下降再上升的趋势, 在 90°达到最大值。

3) 运用极差分析法, 得到不同射流参数对淹没射流破煤效率影响程度主次顺序依次为: 射流倾角、射流速度、喷嘴直径、初始靶距。因此, 井下淹没环境下水射流技术应用过程中, 要想取得较好的破煤效率, 参数选择上应首先保证射流倾角, 其次应关注射流速度, 然后是喷嘴直径和初始靶距。

### 参考文献(References):

[1] 王恩元, 汪皓, 刘晓斐, 等. 水力冲孔孔洞周围煤体地应力和瓦斯时空演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 39-45.  
WANG Enyuan, WANG Hao, LIU Xiaofei, et al. Spatio-temporal evolution of geostress and gas field around hydraulic punching borehole in coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 39-45.

[2] 曹建军. 超高压水力割缝卸压抽采区域防突技术应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 88-94.  
CAO Jianjun. Application research on regional outburst prevention technology of ultra-high pressure hydraulic slot pressure in relief drainage area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 88-94.

[3] 贾进章, 葛佳琪, 甄纹浩, 等. 水力压裂增透技术及应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(10): 63-68.  
JIA Jinzhang, GE Jiaqi, ZHEN Wenhao, et al. Research and application of anti-reflection technology of hydraulic fracturing[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10): 63-68.

[4] 刘萍, 黄扬烛. 水射流技术的现状及发展前景[J]. 煤矿机械, 2009, 30(9): 10-12.  
LIU Ping, HUANG Yangzhu. Application and development of water jet technology[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(9): 10-12.

[5] 向文英, 李晓红, 卢义玉, 等. 淹没磨料射流的岩石冲蚀实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(2): 240-243.  
XIANG Wenying, LI Xiaohong, LU Yiyu, et al. Experimental study of rock erosion with submerged abrasive water jets[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(2): 240-243.

[6] 侯亚康, 毛桂庭, 阳宁. 淹没磨料水射流对花岗岩的冲蚀研究[J]. 矿冶工程, 2011, 31(3): 18.  
HOU Yakang, MAO Guiting, YANG Ning. Study of

- granite erosion due to submerged abrasive water jet[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(3): 18.
- [7] 黄小波, 卢义玉, 夏彬伟, 等. 淹没射流旋转割缝技术在突出煤层掘进中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(3): 70-73.  
HUANG Xiaobo, LU Yiyu, XIA Binwei, et al. Application of flooded water jet rotary slotting technology to gateway driving in outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(3): 70-73.
- [8] 刘佳亮, 司鹤, 张宏. 淹没状态下高压水射流破岩效率分析[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(11): 23-29.  
LIU Jialiang, SI Hu, ZHANG Hong. Study on breaking rock efficiency of submerged water jet[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(11): 23-29.
- [9] 廖华林, 李根生. 淹没条件下超高压水射流冲蚀切割破岩实验研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(5): 61.  
LIAO Hualin, LI Gensheng. Experiment on rock breakdown by super-high-pressure water jet in submerged environment[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(5): 61.
- [10] 王宗龙, 胡寿根, 姚文龙. 淹没条件下超高压磨料水射流切割岩石的实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(2): 150-155.  
WANG Zonglong, HU Shougen, YAO Wenlong. Experimental research of ultra-high pressure abrasive water jet cutting rock in submerged environment[J]. Chinese Journal of Hydrodynamic, 2009, 24(2): 150-155.
- [11] 杨腾龙, 王兆丰, 陈金生, 等. 淹没条件对连续射流破碎含瓦斯煤效率影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(1): 100-106.  
YANG Tenglong, WANG Zhaofeng, CHEN Jinsheng, et al. Study on influence of submerged conditions on efficiency of breaking coal containing gas by continuous jet[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(1): 100-106.
- [12] 蒋斌, 王艾伦, 王计划. 基于 ALE 方法淹没条件下水射流破土数值模拟与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(8): 196-203.  
JIANG Bin, WANG Ailun, WANG Jihua. Numerical simulation and experiment of beaking soil by jet under submerged condition based on ALE method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(8): 196-203.
- [13] 陈欣欣, 王川, 施卫东, 等. 不同冲击角度下淹没冲击水射流的数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(7): 658.  
CHEN Xinxin, WANG Chuan, SHI Weidong, et al. Numerical simulation of submerged impinging water jet at different impact angles[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(7): 658.
- [14] 李世杰, 王艾伦, 刘向军, 等. 基于 SPH 算法土壤水射流冲击演化数值仿真研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(3): 243-247.  
LI Shijie, WANG Ailun, LIU Xiangjun, et al. Numerical simulation of soil water jet impact evolution based on SPH algorithm[J]. Computer Simulation, 2019, 36(3): 243-247.
- [15] 司鹤, 王丹丹, 李晓红. 高压水射流破岩应力波效应的数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(8): 942.  
SI Hu, WANG Dandan, LI Xiaohong. Stress wave effect in numerical simulation on rock breaking under high-pressure water jet[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(8): 942-945.
- [16] 吴昊, 夏俊芳, 张国忠, 等. 基于 EDEM-Fluent 仿真的自旋射流式挖藕机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 9-14.  
WU Hao, XIA Junfang, ZHANG Guozhong, et al. Design and experiment of spin-jet flow type lotus root digging machine based on EDEM-Fluent[J]. Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 9-14.
- [17] 薛胜雄. 高压水射流技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- 
- 作者简介: 马雄伟(1995—), 山西晋城人, 在读硕士研究生, 研究方向为瓦斯灾害预测与防治。
- 
- (收稿日期: 2021-01-08; 责任编辑: 兰莹)

