DOI: 10.11883/1001-1455(2015)03-0442-07

高压水射流冲击煤体的力学特征*

穆朝民,韩 靖
(安徽理工大学能源与安全学院,安徽 淮南 232001)

摘要:以质量守恒与动量守恒定律为基础,建立了高压水射流冲击煤体的力学模型。运用此模型分析了高压水射流在冲击煤体的过程中,未破水体、破碎水体、煤体的破碎区与扩孔区的力学特征,利用严格的力学守恒关系得出高压水射流冲击煤体的简化常微分方程组。将理论计算结果与现场实验和数值模拟结果进行对比,结果表明:理论计算结果与数值模拟结果和实验结果基本一致。此模型具有明确的力学意义,且能够反映真实的冲击过程。

关键词:流体力学;水射流;高压;煤体;冲击
中图分类号:O358 **国标学科代码**:13025 **文献标志码**:A

高压水射流破碎煤体是高压水射流的一项具体应用,提高水射流冲击破碎煤体效率在水力采煤和水力冲孔治理瓦斯等领域具有重要的研究价值。若要提高水射流破碎煤岩的效率,必须首先在理论上掌握煤体在高压水射流作用下的力学特征。因此,在高压水射流破煤过程中,水体与煤体的力学特征一直是高压水射流破煤研究的重点。倪红坚等[1-2]、王瑞和等[3]、廖华林等[4-5]、卢义玉等[6]、田方宝等[7]对高压水射流冲击岩石的基本力学特性进行了深入的研究,在高压水射流冲击岩石的破孔过程、岩石表面与内部的应力分布、岩石破碎的门槛压力等方面得出一系列有价值的研究成果,为高压水射流破岩提供了理论与实验方面有益的参考。穆朝民等对于煤体在高压水射流作用下的动态损伤机理[8]、临界破煤强度[9]及高压磨料射流破煤体的过程和数值计算方法[10]进行了探讨,得出了在高压水射流作用下煤体的损伤形式和临界破煤压力。

目前高压水射流破岩机理大多为实验和数值分析结果,没有涉及高压水射流破煤的力学特征,即尚未建立高压水射流在冲击煤体的过程中,未破水体、破碎水体、煤体的破碎区与扩孔区完整的力学方程,因此对于高压水射流破煤的力学机理很难形成有效的指导。本文中,拟在李永池等[11]关于长杆弹高速侵彻混凝土相关研究(主要是弹体蘑菇头系数和混凝土刚性破碎流体介质假设)的基础上得出高压水射流冲击煤体的基本力学特征。

1 基本力学分析与假设

高压水射流冲击煤体的力学分析如图 1 所示[11],A_0-A_0 以左为高压水射流未变形破裂部分(未变形区),面积为 S_{A_0},长度为 l;$A_0A_0A_1A_1$ 为高压水射流的变形蘑菇头区,A_1-A_1 为高压水射流破碎前阵面,面积为 S_{A_1},未变形区与变形蘑菇头区合称为未破碎高压水射流区;$A_1A_1B_1A_2A_2B_1A_1$ 为高压水射流的破碎反射水射流区,其中 B_1-A_2 为破碎高压水扩孔终止界面,A_1-B_1 为高压水反射界面,高压水形成的总体环形面积为 S_{B_1},A_2-A_2 为反射高压水前沿和煤渣后沿的交界面,即冲击交界面,其面积为 S_{A_2};$A_2B_2A_3A_3B_2A_2$ 为煤的破碎和扩孔区,A_3-A_3 为煤的破碎前阵面,面积为 S_{A_3},B_2A_3 为煤渣与实体煤的交界面,即扩孔界面其总体环形面积为 S,图中 $KB_2A_2B_1$ 称为煤渣的反向运动区,边界 A_2B_2 上的

* **收稿日期**:2013-11-13;**修回日期**:2014-08-20
基金项目:国家自然科学基金项目(51204007,11472007,51474010);
安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(ZY285)
第一作者:穆朝民(1977—),男,博士,教授,chmmu@mail.ustc.edu.cn。

煤渣是和冲击界面 A_2-A_2 一起以冲击速度 u 运动的，并且 A_2-A_2 上的压力为冲击压力 p。KB_2 为煤渣最终成孔的截面。

高压水射流冲击煤体很复杂，为简化问题，假定[11]：(1)煤体为刚性破碎流体介质，当 p(冲击压力)$<R_t$(煤体破碎强度)时，煤体为刚体；当 $p\geqslant R_t$ 时，煤破碎区与实体煤交界面 A_3-A_3、B_2-A_3 上的压力为 R_t。(2)高压水射流未变形部分与变形蘑菇头区以共同速度 v 运动。(3)高压水射流蘑菇头区、高压水射流破裂反射水射流区、煤破碎和扩孔区都极薄，因此蘑菇头区质量和动量很小。以上假设适用于形状完整较坚硬的煤体，对松散煤体不适用，当水射流冲击压力小于煤体破碎强度时不发生破煤现象。

未破碎高压水射流(未变形区和蘑菇头区)具有共同的质点速度 $V=v$(瞬时高压水射流速度)，高压水射流破碎前阵面 A_1-A_1 上的速度 v 下降到冲击界面 A_2-A_2 上的速度 u，$V\in(v,u)$，压应力则由 A_1-A_1 上的 0 提高到冲击界面 A_2-A_2 的 p，即 $\sigma\in(0,p)$。煤破碎区中质点速度由 A_2-A_2 上的 u 降到煤破碎界面 A_3-A_3 处的 0，$V\in(u,0)$，而压应力则由 A_2-A_2 上的 p 降到 A_3-A_3 处的 R_t，$\sigma\in(p,R_t)$。高压水射流未破碎区、破碎区、煤破碎区中质点速度变化分别为 $V=v$，$V\in(v,u)$，$V\in(u,0)$。水体从 A_1-B_1 相对于与冲击界面一起运动的坐标系向左的反射水射流的速度为 u_f，则在绝对坐标系中水体向左喷出的速度为 u_f-u。

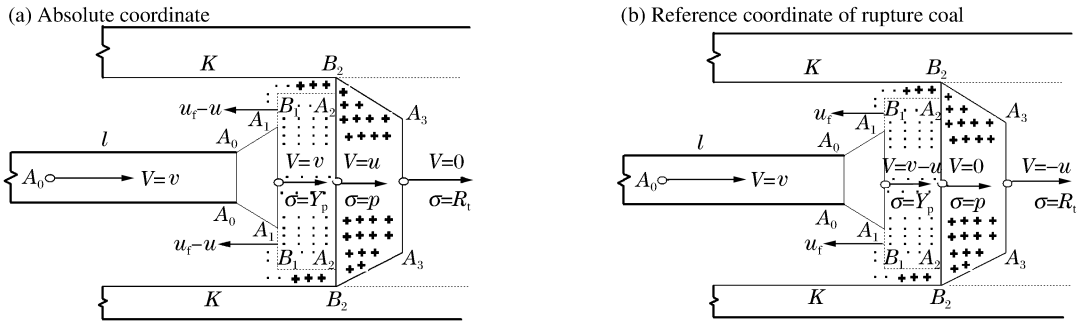

图 1　高压水射流冲击煤体的力学模型

Fig. 1　The mechanical models for water jet impinging on coal

2　基本方程组

2.1　未破碎高压水射流的质量与动量守恒

在忽略蘑菇头区质量时，未破碎高压水射流的质量守恒条件，即高压水射流的消蚀方程为：

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}=-(v-u),\qquad \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}=u \tag{1}$$

式中：$l(t)$、$v(t)$、$u(t)$ 和 $h(t)$ 分别为高压水射流的长度(忽略蘑菇头区的质量，此时水射流近似等于未破碎水射流的长度)、速度、冲击界面速度和冲击深度。

将坐标系建立在冲击界面 A_2-A_2 上，建立动量守恒方程为：

$$\rho_p S_{A_0}\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}(v-u)+\rho_p S_{A_0}l\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(v-u)+M\frac{\mathrm{d}(v-u)}{\mathrm{d}t}+(v-u)\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t}=$$

$$-\rho_p S_{A_1}(v-u)^2-(\rho_p S_{A_0}l+M)\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中：M 为蘑菇头区的质量，$\rho_p S_{A_1}(v-u)^2$ 为高压水射流反射流出开口体系引起的动量损失，ρ_p 为水射流的密度，$-(\rho_p S_{A_0}l\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}+M)$ 为冲击坐标系引起的惯性力。

忽略蘑菇头区的质量和动量，则式(2)可以转化为：

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-\frac{(v-u)^2}{l}(\gamma-1) \tag{3}$$

式中：$\gamma=S_{A_1}/S_{A_0}$，γ 为蘑菇头面积因数；当 $\gamma=1$ 时，式(3)与 Tate[11] 给出的结果一致。

2.2 破碎高压水射流的质量与动量守恒

高压水射流破碎和反射水射流区质量守恒方程为：

$$\frac{\mathrm{d}M_1}{\mathrm{d}t}=\rho_{\mathrm{p}}S_{A_1}(v-u)-\rho_{\mathrm{p}}S_{B_1}u_{\mathrm{f}} \tag{4}$$

式中：M_1为高压水射流的破碎和反射水射流区的质量，S_{B_1}为反射水射流界面 A_1B_1 的面积，u_{f}为反射压水射流相对于冲击坐标系的平均反射水射流速度；$\rho_{\mathrm{p}}S_{A_1}(v-u)$ 为单位时间内通过 A_1A_1 面流入体系高压水的质量，$\rho_{\mathrm{p}}S_{B_1}u_{\mathrm{f}}$ 为单位时间内通过 A_1B_1 面流出体系反射水射流的质量。

因为$\frac{\mathrm{d}M_1}{\mathrm{d}t}\approx 0$，式(4)可以转化为：

$$u_{\mathrm{f}}=(v-u)/\beta \tag{5}$$

式中：$\beta=S_{B_1}/S_{A_1}$为水射流反射水射流区面积与蘑菇头面积之比，称为反射水射流面积因数。

高压水射流破碎和反射水射流区动量守恒方程为：

$$M_1\frac{\mathrm{d}(u_1-u)}{\mathrm{d}t}+(u_1-u)\frac{\mathrm{d}M_1}{\mathrm{d}t}=-(S_{A_1}+S_{B_1})p+\rho_{\mathrm{p}}S_{A_1}(v-u)^2+\rho_{\mathrm{p}}S_{B_1}u_{\mathrm{f}}(-u_{\mathrm{f}})-M_1\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

方程(6)最后 4 项分别 A_2-A_2面上的外力、水射流通过 A_1-A_1面流入的动量、水射流通过 A_1-B_1面流出的动量、惯性力。根据式(4)～(5)，式(6)可以转化为：

$$p=\frac{1}{\beta}\rho_{\mathrm{p}}(v-u)^2 \tag{7}$$

2.3 煤体破碎和扩孔区的质量与动量守恒

以 M_2为煤的破碎和扩孔区的质量，B_2-A_3面上破碎粒相对于冲击坐标系的速度为 $\boldsymbol{u}$，煤破碎区质量守恒方程为：

$$\frac{\mathrm{d}M_2}{\mathrm{d}t}=\rho_t S_{A_3}u-\int_S \boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{n}\,\mathrm{d}s \tag{8}$$

式中：$\rho_t S_{A_3}u$ 为破碎煤介质通过 A_3-A_3截面流入的质量，ρ_t 为破碎煤介质密度；$\int_S \boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{n}\,\mathrm{d}s$ 为通过截面 B_2-A_3流出的质量。因为 $\frac{\mathrm{d}M_1}{\mathrm{d}t}\approx 0$，式(8)可以转化为：

$$\int_S \boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{n}\,\mathrm{d}s=\rho_t S_{A_3}u \tag{9}$$

煤破碎区质量守恒方程为：

$$M_2\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(u_2-u)+(u_2-u)\frac{\mathrm{d}M_2}{\mathrm{d}t}=S_{B_2}p-R_t(S_{A_3}+S\cos\theta)-\rho_t S_{A_3}u^2-(u_2-u)\int_S \boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{n}\,\mathrm{d}s-M_2\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

式中：S_{B_2}为截面 B_2-B_2的面积，$-\rho_t S_{A_3}u^2$ 为通过截面 A_3-A_3流入体系的动量，$(u_2-u)\int_S \boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{n}\,\mathrm{d}s$ 为通过截面 B_2-A_3流出体系的动量，$M_2\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$ 为惯性力，θ 为 B_2-A_3面与冲击轴线的夹角。显然有：

$$-R_t(S_{A_3}+S\cos\theta)=-R_t S_{B_2} \tag{11}$$

将方程(9)和(11)代入(10)，可将方程(10)化为：

$$p=R_t+\alpha\rho_t u_2 u \tag{12}$$

式中：$\alpha=S_{B_2}/S_{A_3}$为煤体的扩孔因数。煤体破碎和扩孔区质点平均速度 u_2 近似为冲击速度的一半[11]：

$$u_2=u/2 \tag{13}$$

将式(13)代入式(12)，则式(12)可以转化为：

$$p=R_t+\frac{\alpha}{2}\rho_t u^2 \tag{14}$$

结合式(7)、(14)，可得：

$$\frac{1}{\beta}\rho_p\ (v-u)^2 = p = R_t + \frac{\alpha}{2}\rho_t u^2 \tag{15}$$

可见发生高压水射流破煤介质的最小临界冲击压力是 $p=R_t$。当撞击速度足够高，既产生水射流的破坏又产生对靶板的冲击时，由式(15)可得冲击速度 u 和水射流速度 v 间的关系：

$$u = u(v) \equiv \frac{v-\mu\ (v^2+\lambda)^{\frac{1}{2}}}{1-\mu^2} \tag{16}$$

$$\mu \equiv \left(\frac{\alpha\rho_t}{2\rho_p/\beta}\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad \lambda \equiv \frac{2R_t(1-\mu^2)}{\alpha\rho_t} \tag{17}$$

根据穆朝民等[9]关于破碎强度参数 R_t 的确定，可得：

$$R_t = Y\left[\frac{E/(3Y)}{1-\sqrt{\frac{\sigma_t}{Y}}\ \frac{1-\mu}{\sqrt{2}}}\right]^{\frac{2\eta}{3}} \tag{18}$$

式中：E 为弹性模量，σ_t 为抗拉强度，Y 为抗压强度，μ 为泊松比，$\eta=\frac{6k}{3+4k}$，k 为压剪因数。

2.4　高压水射流冲击煤体的力学分析

在同时发生水的破碎和煤的冲击破坏的一般情况下，联立式(1)、(3)、(16)、(18)，即高压水射流冲击煤体问题的常微分方程组如下：

$$\begin{cases} v(0)=v_0,\ l(0)=l_0,\ h(0)=0 & t=0 \\ \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{(\gamma-1)}{l}\ [v-u(v)\ ]^2 = -\dfrac{f(v)}{l} \\ \dfrac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} = -(v-u) \\ \dfrac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t} = u \end{cases} \tag{19}$$

由式(15)知，当冲击速度 $u>0$，则 p(冲击界面压力)$>R_t$(煤的破坏强度)，高压水射流可破煤；当冲击速度 $u=0$，水射流终止破煤，此时，$p\leqslant R_t$。

当 $u=0$，得：

$$v = \sqrt{\frac{\beta R_t}{\rho_p}} \equiv v_c \tag{20}$$

高压水射流冲击煤体过程如下：

(1)当 $v_0\leqslant v_c$，则不会产生高压水射流破煤效应，其间 $l\sim v$ 之间的关系可令式(19)中 $u=0$ 而得到：

$$l = l_0 \exp\left\{\int_{v_0}^{v} \frac{v}{f(v)}\mathrm{d}v\right\} \tag{21}$$

(2)如果 $v_0>v_c$，则产生高压水射流破煤效应，总冲击深度可令式(19)中 $v=v_c$ 得出：

$$h_0 = -\int_{v_0}^{v_c} \frac{u(v)\,l(v)}{f(v)}\mathrm{d}v = h(v_c) \tag{22}$$

此时高压水射流的剩余长度 l_c 可由式(21)给出：

$$l_c = l(v_c) = l_0\ \exp\left[\int_{v_0}^{v_c} \frac{v-u(v)}{f(v)}\mathrm{d}v\right] \tag{23}$$

以后便只发生水射流的撞击破碎，其间水射流的瞬时剩余长度 l 和其瞬时速度 v 间的关系可将方程(23)中的 l_0 和 v_0 分别代之以 l_c 和 v_c 而得出，而水射流的最终残余长度 l_f 则为水射流速度下降为 0 时水射流长度：

$$l = l_c\ \exp\left[\int_{v_c}^{v} \frac{v}{f(v)}\mathrm{d}v\right], \qquad l_f = l_c\ \exp\left[\int_{v_c}^{0} \frac{v}{f(v)}\mathrm{d}v\right] \tag{24}$$

3 高压水射流冲击煤体的数值模拟

3.1 模型和材料参数

运用固流耦合的方法对煤体在高压水射流作用下的力学特征进行数值分析，水射流冲击煤体的具体尺寸如图 2 所示[8]。煤体采用含损伤 J-H-C 本构模型，煤体力学参数见表 1，其中 ρ 为密度，G 为剪切模量，E 为杨氏模量，ν 为泊松比，A、B、C、N、D_1、D_2、K_1、K_2 为材料常数，f_c 为单轴压缩强调，T 为极限拉伸静水压力，$\varepsilon_{f,min}$ 为损伤常数，S_{max} 为量刚一强度，p_{crush} 破碎静水压力，μ_{loc} 为最大体应变，μ_{crush} 为破碎体应变；p_{lock} 为最大静水压力。对水射流采用状态方程：

$$p=(p_0+B)\left(\frac{\rho}{\rho^*}\right)^{k_1}-B \tag{25}$$

式中：p 为压力，ρ 为密度，B、p_0、ρ^*、k_1 为常数，$B=30.5$ GPa，$p_0=103.3$ kPa，$k_1=7.147$，$\rho^*=1$ t/m^3。

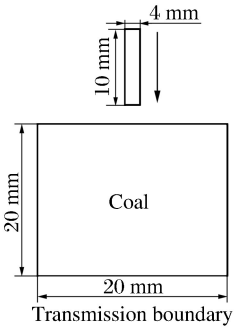

图 2 高压水射流冲击煤体模型

Fig. 2 The model for high-pressure water jet impinging on coal

表 1 煤体材料参数

Table 1 Material parameters for coal

ρ_0/(g·cm^{-3})	E/GPa	ν	G/GPa	A	B	C	N	f_c/GPa	T/GPa	ε_{fmin}
1.2	1.2	0.3	1.40	0.78	1.61	0.007	0.62	0.049	0.003	0.01
S_{max}	p_{crush}/GPa	μ_{crush}	p_{lock}/GPa	μ_{lock}	D_1	D_2	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	
7.1	0.001	0.001	0.002	0.11	0.041	1.0	85.0	−171.5	208.5	

3.2 数值模拟结果

在 30 MPa 高压水射流作用下，7.5、24.3、29.2 和 36.7 μs 时的破煤深度分别为 0.7、2.2、3.5 和 4.0 mm，水射流的剩余长度分别为 7.48、4.34、3.26、1.60 mm，如图 3 所示[8]。将水射流出口水压 30 MPa换算成水射流冲击煤体的初速度，并和表 1 所列的煤体参数一起代入式(22)～(23)，得出 7.5、24.3、29.2、36.7 μs时高压水射流的破煤深度分别为 0.74、2.80、4.20 和 5.10 mm，水射流的剩余长度分别为 7.41、4.17、2.93、2.15 mm。这与数值计算结果基本符合，反映了本次理论计算的正确性。

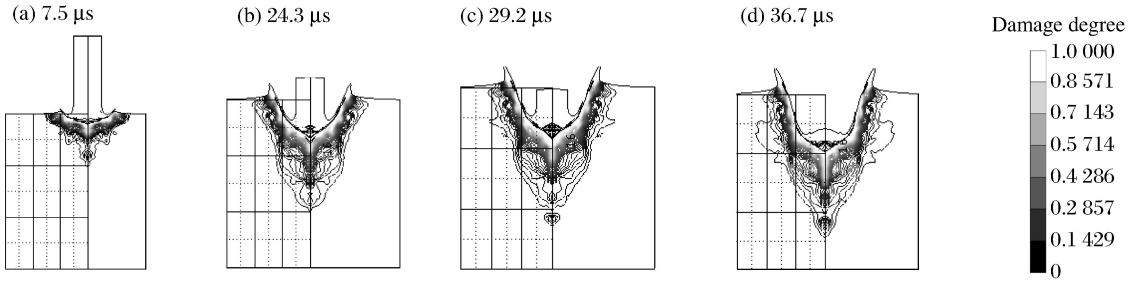

图 3 在 30 MPa 高压水射流作用下不同时刻的破煤深度

Fig. 3 Penetration depths of coal by 30-MPa water jet at different times

20、30、35 MPa 高压水射流作用下的破煤深度如图 4 所示[8]。高压水射流出口压力分别为 20、30、35 MPa 时的破煤深度分别为 2.1、4.0 和 4.2 mm，水射流剩余长度分别为 2.1、1.6 和 1.4 mm。

将水射流出口水压换算成水射流冲击煤体的初速度，并和表 1 所列的煤体参数一起代入式(22)～(23)，得出高压水射流在出口压力为 20、30、35 MPa 时的破煤深度分别为 3.30、5.10 和 5.17 mm，剩余

长度分别为 2.96、2.15、1.93 mm。这与数值计算结果基本符合。

比较理论分析结果和数值模拟结果可以看出：当水射流出口压力越大（水射流初速度越大），理论计算结果与数值模拟结果的误差越小。这主要是由于水射流出口压力越大，高压水射流蘑菇头区、高压水射流破裂反射水射流区、煤破碎和扩孔区越薄，具有的质量和动量越小，越接近本次理论计算的假设。由图 3 可知：高压水射流在冲击煤体的过程中可以分成高压水射流未变形破裂部分（未变形区）和高压水射流的破碎反射水射流区，这与理论假设基本符合。

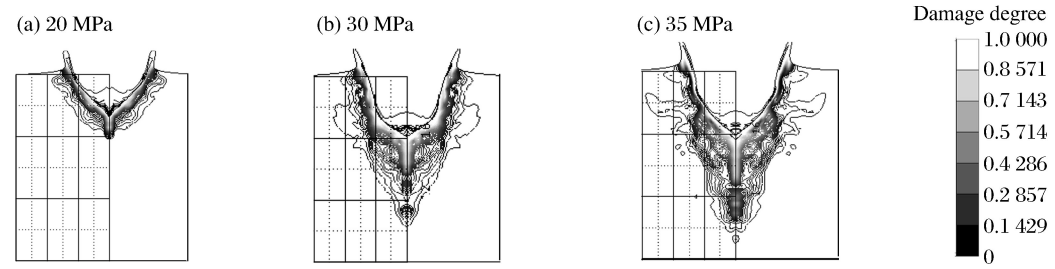

图 4　不同水压水射流作用下煤体的破煤深度

Fig. 4　Penetration depths of coal by water jet with different pressures

4　高压水射流冲击煤体的现场实验

实验地点选择在淮南矿业集团潘三煤矿 1792(3)底板巷联巷。实验区域平均煤厚 3.94 m，煤层倾角 5°～9°。2010 年 4 月进行了 4 次高压水射流冲击煤体的实验，高压水射流出口压力为 30 MPa，潘三矿 13-1 煤体力学参数见表 1，现场水射流冲击煤体实验情况见表 2，高压水射流对煤体冲击入射角为 θ。由于现场对煤体进行高压水射流水力扩孔实验，高压水射流可以反复冲击煤体，因此理论计算时将水射流重复冲击煤体的深度进行累积计算，对比现场和理论计算数值可以看出，理论计算结果与现场实验基本一致。

表 2　不同冲击角度下水射流的破煤深度

Table 2　Penetration depths of coal by water jet at different impact angles

爆破孔编号	θ/(°)	h/mm	
		理论	实验
1	45	280	297.3
2	45	260	297.3
3	20	290	312.5
4	45	285	297.3

5　结　论

建立了高压水射流冲击煤体的力学模型，分析了高压水射流的变形蘑菇头区和破碎反射水射流区、煤的破碎和扩孔区对高压水射流冲击煤体的影响。引入蘑菇头面积因数、反射水射流面积因数、煤体的扩孔因数，利用力学守恒关系导出了高压水射流冲击煤体的简化常微分方程组。理论计算结果与数值模拟和现场实验结果吻合较好，可见建立的力学模型能够较好地反映高压水射流冲击煤体的相关规律。

参考文献：

[1]　倪红坚，王瑞和，张延庆. 高压水射流作用下岩石破碎机理及过程的数值模拟研究[J]. 应用数学和力学，2005，26(12)：1445-1452.

Ni Hong-jian, Wang Rui-he, Zhang Yan-qing. Numerical simulation study on rock breaking mechanism and process under high pressure water jet[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2005, 26(12): 1445-1452.

[2]　倪红坚，王瑞和. 高压水射流射孔过程及机理研究[J]. 岩土力学，2004，25(增)：29-32.

Ni Hong-jian, Wang Rui-he. Study on progress and mechanism of high pressure water jet perforation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Suppl): 29-32.

[3]　王瑞和，倪红坚. 高压水射流破岩机理研究[J]. 石油大学学报：自然科学版，2002，26(4)：118-121.

Wang Rui-he, Ni Hong-jian. Study on mechanism breaking rock with high pressure water jet[J]. Journal of Uni-

versity of Petroleum, China: Natural Science Edition, 2002,26(4):118-121.

[4] 廖华林,李根生,牛继磊.淹没条件下超高压水射流破岩影响因素与机制分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(6):523-528.
Liao Hua-lin, Li Gen-sheng, Niu Ji-lei. Influential factors and mechanism analysis of rock breakage by ultra-high pressure water jet under submerged condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(6):523-528.

[5] 廖华林,李根生.超高压水射流冲击岩石的流固耦合分析[J].水动力学研究与进展,2004,19(4):452-457.
Liao Hua-lin, Li Gen-sheng. Fluid-structure interaction of high pressure water jets impinging on rock[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004,19(4):452-457.

[6] 卢义玉,冯欣艳,李晓红,等.高压空化水射流破碎岩石的试验分析[J].重庆大学学报:自然科学版,2006,29(5):87-91.
Lu Yi-yu, Feng Xin-yan, Li Xiao-hong, et al. Experiments on breaking rock with high-pressure cavitation water jets[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006,29(5):87-91.

[7] 田方宝,林缅.水射流辅助破岩机理研究(1):气泡空蚀[J].力学与实践,2007,29(1):29-33.
Tian Fang-bao, Lin Mian. Study on mechanism of rock breaking with ressure water jet (1): Cavitation bubble[J]. Mechanics and Practice, 2007,29(1):29-33.

[8] 穆朝民,王海露.煤体在高压水射流作用下的损伤机制[J].岩土力学,2013,34(5):1515-1520.
Mu Chao-min, Wang Hai-lu. Damage mechanism of coal under high pressure water jetting[J]. Rock and Soils Mechanics, 2013,34(5):1515-1520.

[9] 穆朝民,吴阳阳.高压水射流冲击下煤体破碎强度的确定[J].应用力学学报,2013,30(3):451-456.
Mu Chao-min, Wu Yang-yang. Crushing strength of the coal against high pressure water penetration[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013,30(3):451-456.

[10] 穆朝民,戎立帆.磨料射流冲击岩石损伤机制的数值分析[J].岩土力学,2014,35(5):1475-1481.
Mu Chao-min, Rong Li-fan. Numerical simulation of damage mechanism of abrasive water jet impaction on rock [J]. Rock and Soils Mechanics, 2014,35(5):1475-1481.

[11] 李永池,于少娟,罗春涛,等.高速侵彻力学中改进的 Tate 工程分析方法[C]// 材料和结构的动态响应.合肥:中国科学技术大学出版社,2005:132-139.

Mechanical characteristics of high-pressure water jets impinging on coal

Mu Chao-min, Han Jing

(*School of Energy Resources and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan* 23001, *Anhui*, *China*)

Abstract: On the basis of conservation of mass and momentum, a mechanical model was established for high-pressure water jets impinging on coal. By using this model, the mechanical characteristics were analyzed for the intact water jet, cracked water jet, and the crushing zone and crater expansion zone of the coal. The system of ordinary differential equations was obtained to describe the process of high-pressure water jets impinging on coal. And the theoretical values were compared with the numerical simulation and the experimental results. The theoretical values are consistent with the numerical simulation and the experimental results. So the established mechanical model can reflect the actual process of high-pressure water jets impinging on coal.

Key words: fluid mechanics; water jet; high pressure; coal; impinging

(责任编辑 张凌云)