

引文格式:李孟博,高亚斌,张伟浩,等. 抽采钻孔变形对孔内淹没射流冲击特性的影响研究[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(4):845-853.

LI Mengbo, GAO Yabin, ZHANG Weihao, et al. Effects of deformation of extraction boreholes on impact characteristics of submerged jets in the boreholes[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4): 845-853.

抽采钻孔变形对孔内淹没射流冲击特性的影响研究

李孟博^{1,2}, 高亚斌^{1,2}, 张伟浩^{1,2}, 刘国强^{1,2}, 张少奇^{1,2}, 曹 敬^{1,2}

(1. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原; 2. 山西煤矿安全研究生教育创新中心, 山西 太原)

摘 要:【目的】钻孔是水射流增透技术直接作用对象, 具有易发生形变以及短时冲击即被淹没的特点。目前关于变形钻孔内淹没射流冲击特性尚不明确, 准确描述钻孔内淹没射流增透技术的作用特点和机制需要探明射流冲击特性。【方法】通过数值模拟手段, 分析了孔内淹没水射流在不同钻孔变形比($M=0.5、1.0、1.5、2.0、2.5$)和不同射流速度($v=120、140、160、180、200、220\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)下的流态特性以及冲击作用机理。【结果】结果显示: 淹没状态下改变钻孔变形比对水射流“壁面回流段”“充分发展段”影响显著, 对水射流“核心段”几乎没有影响, 但射流速度对水射流“核心段”影响较大, “核心段”长度随着射流速度增大而增大。随着钻孔变形比增大, 接触面中心压强逐渐减小, 但水射流对接触面中心的作用范围不断扩大, 当变形比增大到2.5时, 水射流对接触面作用范围扩大了2.3倍。M增大改变了射流对钻孔曲面的影响方式, 水射流经钻孔表面反射形成会涡旋, 使壁面冲击压应力转变为拉应力。孔内淹没水射流破坏煤岩是由剪应力和主应力作用、空蚀作用以及孔内涡旋共同作用的结果。

关键词: 增透钻孔; 淹没射流; 冲击特性; 变形比

中图分类号: TD712.68 **文献标识码:** A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240302

文章编号: 1007-9432(2026)04-0845-09

Effects of Deformation of Extraction Boreholes on Impact Characteristics of Submerged Jets in the Boreholes

LI Mengbo^{1,2}, GAO Yabin^{1,2}, ZHANG Weihao^{1,2}, LIU Guoqiang^{1,2},
ZHANG Shaoqi^{1,2}, CAO Jing^{1,2}

(1. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China; 2. Graduate Education Innovation Center for Shanxi Coal Mine Safety, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract:【Purposes】Borehole is the direct object of water jet penetration enhancement technology, which is characterized by shape deformation and being flooded with short-term impact. Currently, there is a lack of clarity regarding the impact of submerged jets in deformed boreholes. Accurately characterizing the action and mechanisms of water jet penetration enhancement techniques in boreholes requires understanding the impact characteristics. 【Methods】The flow characteristics and impact mecha-

收稿日期: 2024-04-14; 修回日期: 2024-07-08

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(202303021221010); 山西省留学人员科研资助项目(2023-057); 山西省研究生教育改革课题(2022YJJG039)

通信作者: 李孟博, 硕士, 研究方向: 灾害防治理论与技术, (E-mail)903721472@qq.com

nism of in-bore submerged water jets were analyzed by means of numerical simulation under different borehole deformation ratios ($M=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$, and 2.5) and different jet velocities ($v=120, 140, 160, 180, 200$, and $220 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). **【Results】** The results show that changing the deformation ratio of borehole in the submerged state has a significant effect on the “wall reflux section” and “fully developed section” of water jet, and has almost no effect on the “core section” of water jet. The jet velocity has a greater effect on the water jet “core section”, and the length of the “core section” increases with the increase of jet velocity. With the increase of the deformation ratio of borehole, the pressure at the center of contact surface decreases gradually, but the range of water jet’s action on the center of contact surface expands continuously, and the range of water jet’s action on the contact surface expands by 2.3 times when the deformation ratio is increased to 2.5. The increase of the M changes the way of jet’s influence on the surface of borehole, and the reflection of water jets through the surface of borehole creates vortices, which transforms the impact compressive stress on the wall surface to tensile stress. The destruction of coal rock by flooded water jets in the borehole is the result of a combination of shear and principal stress effects, cavitation, and vortexing in the borehole.

Keywords: borehole for permeability; submerged jet; impact characteristics; deformation ratio

煤炭是我国的主体能源,在一次能源消费中约占60%^[1]。随着煤炭开采深度不断增加,煤层赋存更加复杂,微孔隙、低渗透、强吸附、高应力的状况愈发凸显,矿井瓦斯灾害的发生频率和强度不断加大^[2]。瓦斯抽采是目前防治煤矿瓦斯灾害和实现瓦斯资源利用的有效措施,但受限于煤层的低透气性,许多矿井瓦斯抽采效果不佳,需要配合卸压增透措施,提高瓦斯抽采效率。

水射流技术因其清洁、高效、低热、安全等特点,逐渐成为低渗煤层卸压增透、强化瓦斯抽采的主要方法^[3,4],近年来形成了水力冲孔、水力掏槽、水力割缝等一系列技术途径。大量实践表明,利用水射流在钻孔内部对煤体进行切割、冲蚀,可以促进煤体裂隙发育扩展、增加煤层透气性、提高煤层气开采效率^[5]。任仲久^[6]通过结合理论分析、实验研究和工业验证的方法,研究水射流技术在余吾矿主采煤层中的增透作用,表明水射流技术能够有效地强化煤层卸压增透效果,提高瓦斯抽采效率;孙四清等^[7]针对井下高压水射流切割煤层增透技术,对不同煤体结构、切割深度等因素的卸压增透效果进行了模拟分析;张永将等^[8]通过理论研究和现场试验的方法证明高压水射流切割煤层形成环形缝槽,能有效改善钻孔煤体应力状态;向鑫等^[9]对钻孔环境下水射流的破煤岩特性和机制进行分析,探讨了接触面形状对钻孔水射流的影响规律,并提出水射流多层级冲击破煤岩机制;Han等^[10]对水射流冲击不同曲率接触面的流场及煤层损伤特性进行研究,结果表明接触面曲率会对中心破坏深度造成影响。

众多学者针对圆形钻孔内水射流的冲击特性与破煤岩增透机制进行了研究探讨,相关结果对水射流增透技术的推广和应用起到一定的促进作用。

然而,瓦斯抽采钻孔作为水射流增透技术的应用场所和作用对象,受煤层赋存与应力扰动等影响,易发生变形^[11],使其形状更接近于椭圆形;同时由于钻孔内较小的空间体积,水射流在短时间冲击后即可达到淹没状态。因而水射流的增透过程多为发生在变形钻孔内的淹没射流。为准确描述水射流增透技术的作用特点和机制,本文采用数值模拟方法,构建不同变形比的钻孔模型,研究孔内淹没射流的冲击特性与影响规律,以期对水射流增透技术的优化改进与科学应用提供理论支撑。

1 数值模拟

1.1 模型建立

利用Comsol Multiphysics建立水射流冲击钻孔模型,如图1所示。为了研究钻孔内射流冲击特性,设置模型大小为 $300 \text{ mm}\times 250 \text{ mm}$,模型中心位置为射流冲击钻孔,且射流喷嘴为直径 2 mm 的圆形喷嘴。钻孔内部为水域,模型右侧采用辊支撑,上部 and 下部采用固定约束,左侧采用对称约束。

为了研究变形钻孔内淹没射流的冲击特性,将沿喷嘴方向喷嘴到壁面的距离定义为 a ,垂直于喷嘴方向喷嘴到侧壁的距离定义为 b ,且把 a 与 b 之比定义为钻孔变形比 M ,即 $M=a/b$,其中 b 为固定值 40 mm ,通过改变 a 的值($a=20, 40, 60, 80, 100 \text{ mm}$)来调整钻孔变形比。

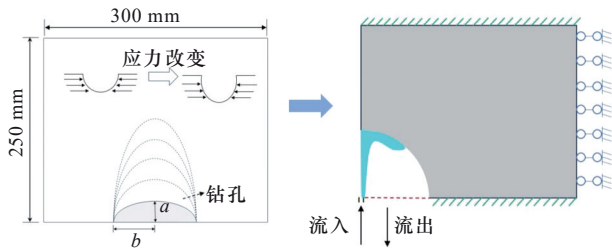


图1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model

模拟采用控制变量法,控制变量法用于保证一个变量变化时,单因素对射流冲击钻孔的影响,淹没射流冲击钻孔的变量包括钻孔变形比以及射流速度,通过改变钻孔变形比 M ($M=0.5、1.0、1.5、2.0、2.5$) 以及射流速度 v ($v=120、140、160、180、200、220 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 以此来研究淹没射流冲击钻孔的特性。模型中参考煤样的相关材料参数见表1。

表1 模拟煤体参数表

Table 1 Coal body simulation parameters

材料参数	参数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 183
弹性模量/GPa	1.663
泊松比	0.280
抗压强度/GPa	2.697
抗拉强度/GPa	0.637

1.2 控制方程

水射流在从喷嘴流出后,处于高湍流状态,所以文本采用标准 $K-\epsilon$ 模型^[12]。标准 $K-\epsilon$ 模型与湍流黏性、湍流动能以及耗散率有关,其方程如下式所述:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k. \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon. \quad (2)$$

其中:

$$\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}. \quad (3)$$

$$G_k = \mu_i \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j}. \quad (4)$$

式中, μ_i 为湍流黏度; G_k 、 G_b 分别表示由平均速度和浮力引起的 k 的产生项; ρ 为流体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; Y_M 为可压缩湍流中脉动扩张项; μ_i 、 μ_j 为速度分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 、 C_μ 为经验常数; 湍动能 k 和耗散率 ϵ 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\epsilon=1.3$; S_k 、 S_ϵ 为自定义原项。

2 结果与讨论

2.1 圆形钻孔淹没射流冲击特性

前人已经对钻孔内水射流的行为进行了广泛研究,但多为非淹没射流,没有考虑钻孔内淹没状态,而淹没会改变射流的速度、方向和能量传递,影响水射流在孔内冲击的准确性和效果。淹没状态对钻孔内水射流的冲击流态影响如图2所示,水射流宽度先随射流发展不断扩张,在接近冲击点位置受反射流影响开始缩小,最终集中于冲击点中心^[13]。淹没状态时水射流冲击流态具有相似性,沿着射流方向,可以分为三个区域:“初始段”“充分发展段”和“壁面回流段”。初始段:位于喷嘴附近,射流速度保持与初始速度相等;充分发展段:位于初始段之后,环境流体被卷吸进射流中,射流速度不断衰减,且波动特征加剧;壁面回流段:位于钻孔壁面上,射流沿着接触面流动,此时流速大幅降低。随着射流速度的增加,淹没状态下水射流初始段增长、扩散角增大,与非淹没状态相比,淹没状态下水射流流速更慢,初始段更短、充分发展段更窄、扩散角更小更聚焦。

两组状态下轴线和接触面的射流速度分布如图3所示,对比图3(a)、3(c)可知,淹没状态时水射

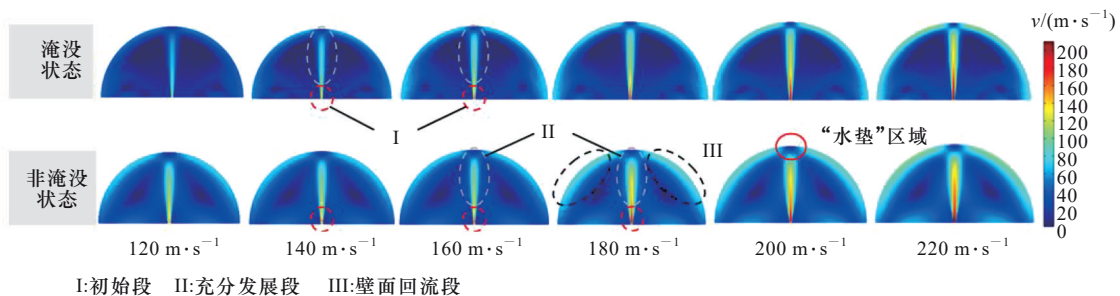


图2 水射流冲击圆形钻孔流态对比

Fig. 2 Comparison of flow regimes of water jet impinging on circular boreholes

流“核心段”长度较非淹没状态更短且“充分发展段”水射流流速衰减更迅速,也就是说淹没状态时水射流在喷嘴附近动量损失更快且中心速度沿射流发展方向急剧衰减,这是由于非淹没状态时水射流仅受孔内空气扰动,而淹没状态水射流受到环境介质的影响,更多的动能用来克服环境阻力。淹没状态时水射流“核心段”长度随着射流速度增大而

增大,说明同一变形比下环境介质对水射流速度影响有限。对比图 3(b)、3(d)可知,非淹没状态时接触面上的水射流速度分布曲线呈“M”状,中间速度为 0,两侧呈先升高后降低的趋势,而淹没状态时水射流会出现涡旋扰动导致在壁面两侧出现新的速度峰值。

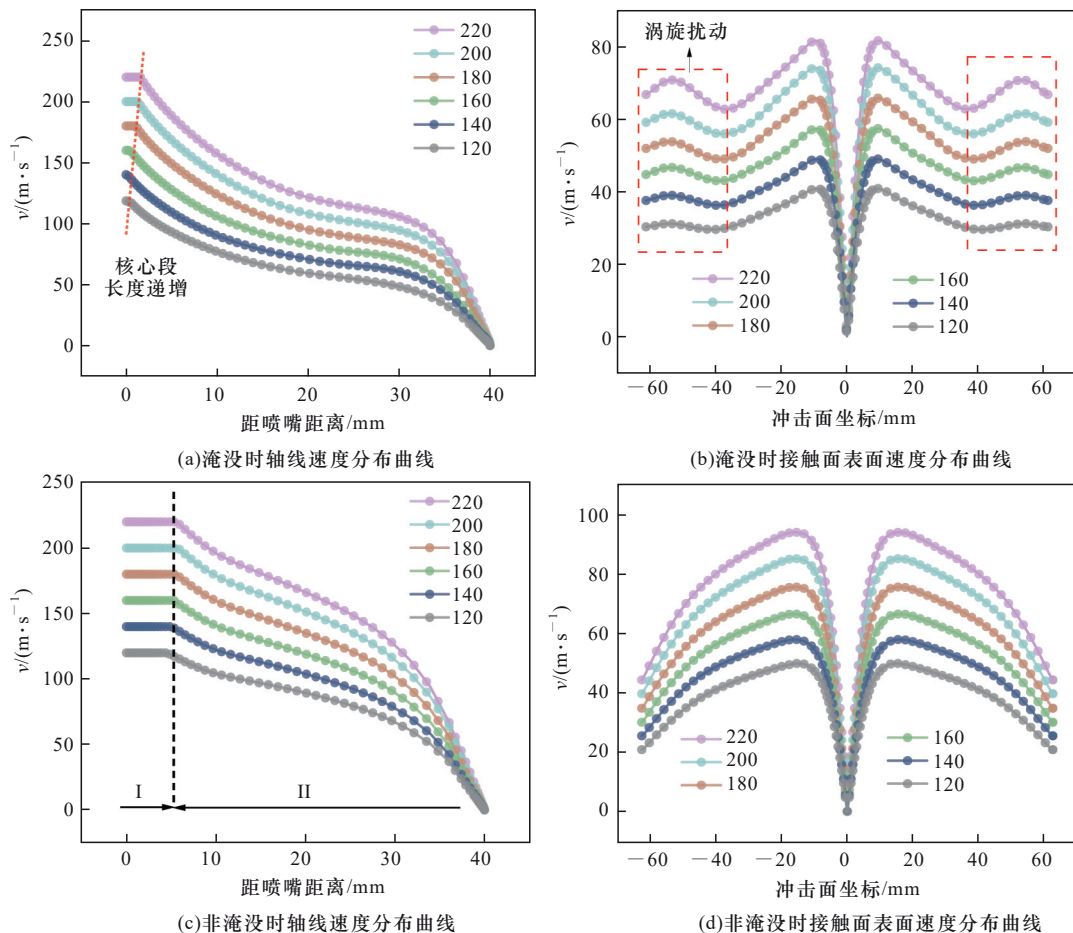


图 3 水射流冲击圆形钻孔流速对比

Fig. 3 Comparison of flow velocities of water jet impingement circular boreholes

对比淹没、非淹没时不同射流速度条件下水射流冲击圆形钻孔的壁面速度峰值数据,如图 4 所示,不同射流速度下水射流冲击圆形钻孔其壁面速度峰值呈线性增大。非淹没时壁面速度峰值约为射流速度的 42%,说明不同压力水射流冲击至接触面的过程中,有大量动能在冲击过程中损耗,其中大量动能作用于接触面中心区域,转化为煤岩体的内能,剩余能量与空气、接触面摩擦损失。且淹没壁面速度峰值约为射流速度的 36%,圆形钻孔内淹没射流大约有 6% 的动能损耗在克服环境阻力,与非淹没射流相比破岩效果大大降低。

由于高速水射流具有巨大的动能,使得在冲击

点附近冲击压力增大^[14]。如图 5 所示,淹没射流在冲击钻孔过程中会形成负压区域,根据钻孔内压力分布可以将淹没射流冲击钻孔的过程分为两个区域:“压力集中区”、“负压区”。随着水射流出口速度不断增加,冲击点的压力集中更加明显,当射流速度为 220 m/s 时,在冲击面中心点产生的压力为 5 MPa,可见射流大量动能损耗在克服环境介质阻力的过程中,使得少量动能在冲击点处转换为压能,压力在水射流中心处出现峰值,距射流中心越远,冲击压力越小,射流速度越大,在钻孔中心产生的压力越大^[15]。

压力集中区表现为射流对煤岩的压应力,负压

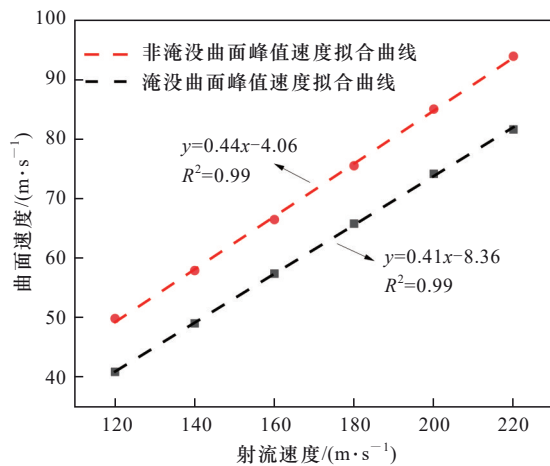


图4 壁面速度峰值对比

Fig. 4 Comparison of peak wall velocities

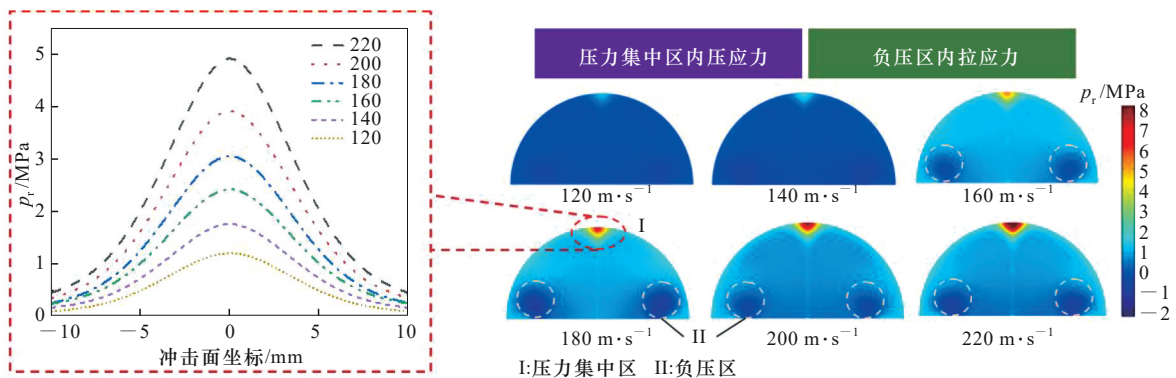


图5 圆形钻孔水射流压力云图

Fig. 5 Circular borehole water jet pressure contours

2.2 钻孔变形比对淹没射流的影响

现场施工瓦斯抽采钻孔后,会使煤体的原始应力平衡状态发生变化,导致其发生变形、位移甚至破坏^[16]。钻孔变形破坏特征影响着水射流冲击破煤岩的效果,本文选取不同钻孔变形比为研究对象,研究钻孔变形对淹没射流的影响。图6为射流速度为180 m/s时不同变形比下水射流流态云图,在喷嘴出口处,水射流的速度是均匀的,射流向前发展过程中会卷吸周围的水,使射流边界变宽,速度保持为初始速度不变的区域也不断变小。当水射流进入完全发展段,水射流的紊动特性充分地表现出来,中心线上的速度沿X方向继续减小,直至为零,射流完全淹没在周围环境介质中变为静止的流体^[17]。

随着变形比的增加,靶距增加,水射流受到环境介质明显影响。水射流冲击变形比 M 较小的接触面时,“壁面回流段”速度分布特征较明显,说明对接触面的冲击作用较强,变形比 M 越大,“壁面回流段”速度分布特征越弱,对壁面冲击作用越小。

区内表现为对煤岩拉应力。负压区内和应力集中区中速度和压力以相同频率各自围绕固定值波动,同时它们之间具有良好的负相关关系,即当流速达到峰值时,压力处于最低点,当压力达到峰值时,流速又跌入最低点。上述情况符合伯努利原理,在不可压缩流体中,伯努利方程可以表示为:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = C. \quad (5)$$

式中: P 为流体静压,Pa; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; v 是流体速度, m/s ; g 为高度, m ; C 为常数。

忽略重力影响,上式可以表示为:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} v^2 = C(\alpha). \quad (6)$$

当 $M \geq 2.0$ 时,射流“充分发展段”在水介质的影响下射流速度分布模糊,射流能量衰减较大,流体少量动能作用于接触面中心,当 $M < 2.0$ 时,流体的能量分布较为明显,射流大量动能作用于接触面中心。不同变形比下“核心段”长度几乎没有明显变化,说明变形比不会对射流“核心段”产生明显影响。可见,淹没状态下改变钻孔变形比对水射流“壁面回流段”“充分发展段”影响显著,对水射流“核心段”几乎没有影响。

射流携带的动能是射流冲蚀钻孔表面的重要因素,射流动能的大小由射流速度决定,不同变形比下水射流中心以及接触面的速度分布直观反映水射流对钻孔表面的影响。图7(a)为不同变形比下水射流中心流速曲线,可见,淹没状态下水射流中心流速衰减速度由快变慢。随着变形比增加到2.5,射流在环境介质的影响下能量大幅度衰减,射流在接触到冲击曲面之前,射流速度已经接近0,射流动能大部分用来克服环境阻力^[18]。所以变形比越小水射流冲击力越大,水射流有更多的动能转化

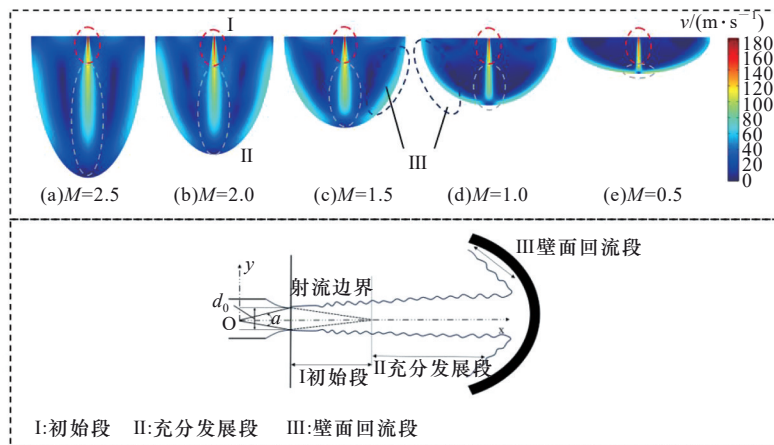


图 6 不同变形比下水射流流态云图

Fig. 6 Cloud views of water jet flow regimes under different deformation ratios

为对钻孔中心点的压能。

图 7(b)为不同变形比下接触面的流速,由图中曲线可知,随着变形比的增大,接触面上速度最大值点逐渐向远离冲击中心点的方向偏移,不同变形比下接触面最大流速 $v_{\max}$ 为 92.4、65.8、59.4、54.0、45.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,可知,随着变形比增大,钻孔壁面上的

最大流速不断减小,且在 $M\leq 1.0$ 时下降梯度最大。当钻孔变形比为 0.5 时,峰值速度呈线性向两侧衰减,此时水射流对接触面产生冲刷作用,随着钻孔变形比增大,峰值速度向两侧衰减变为非线性,射流对钻孔中心区域产生影响减小,但对钻孔曲面产生涡旋冲蚀。可见,钻孔变形比的改变对射流影响显著。

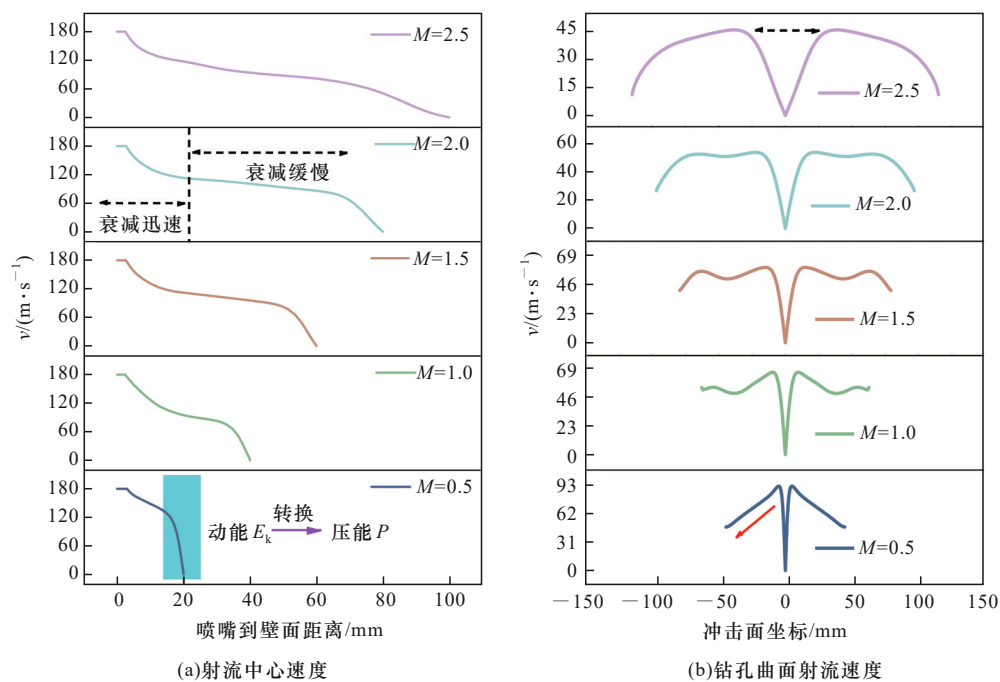


图 7 不同变形比下水射流流速分布

Fig. 7 Distributions of water jet flow velocities at different deformation ratios

图 8 为不同变形下接触面受到的压强分布。可以看出,在不同工况下接触面所受的压强呈正态分布趋势,接触面中心位置的压强最大,随着径向距离的增大,接触面受到的压强逐渐减小。当钻孔变形比为 0.5 时,接触面中心压强最大,达到 7.50 MPa,随着钻孔变形比增大,接触面中心压强逐渐减小,但水射流对接触面中心的作用范围不断扩大,当变

形比增大到 2.5 时,接触面中心压强减小到 1.10 MPa,水射流的作用范围扩大 2.3 倍。

若规定射流对接触面的冲击力为正,当钻孔变形比为大于 1.0 时,接触面上受到的压强出现负值,由图 5 可知,淹没射流在冲击钻孔过程中会形成负压区域,导致水射流钻孔侧壁上的压力由压应力转化为拉应力。由此可知随着变形比增大会改变钻

孔侧壁上的压力形式。

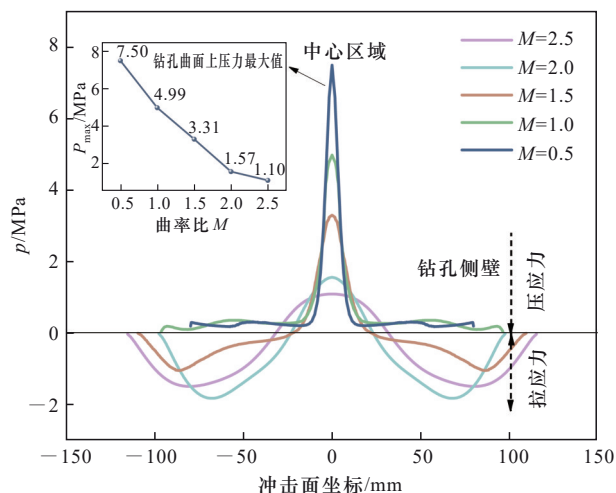


图8 不同变形比下接触面上压强
Fig. 8 Pressures on the contact surface for different deformation ratios

2.3 射流速度对淹没射流的影响

射流出口速度决定射流能量的大小,是影响射流破岩效果的重要因素。对比分析6种射流速度下水射流流态云图,如图9所示,不同速度下水射流依然存在“初始段”“充分发展段”“壁面回流段”这三个区域,不同出口速度水射流冲击不同曲率接触面速度分布特征相似。射流速度的改变,会影响接触面的速度大小及分布范围,随着水射流速度的增大,水射流流场特征越来越明显,说明射流速度对水射流冲击接触面的流场特征强弱有显著影响,射流速度越大,接触面流场特征越强,反之,接触面流场特征越弱。可见,速度不会改变淹没射流的射流结构,且射流速度越高,射流能量也越高,射流的形状越来越明显。

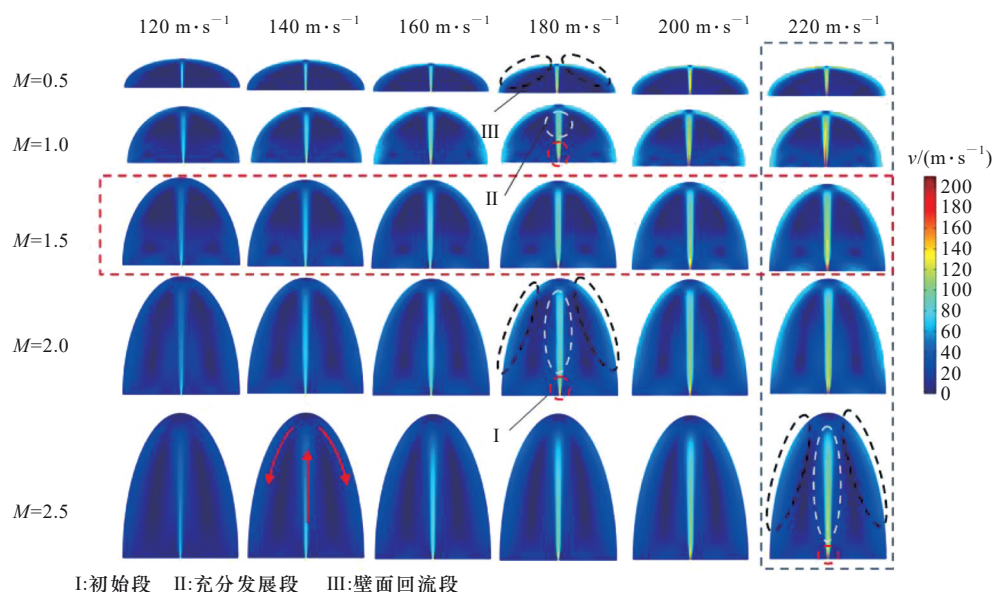


图9 不同速度下淹没射流流态云图
Fig. 9 Cloud views of the flow regimes of submerged jet at different velocities

图10为变形比 M 为1.5时不同速度下淹没射流速度分布曲线,从图10(a)中可以清晰地看出淹没射流的中心轴线速度变化规律,淹没射流受环境介质的影响下,在“充分发展段”中射流速度衰减由快变慢,且不同速度下淹没射流轴线速度衰减曲线大致相同,且淹没状态时水射流“核心段”长度随着射流速度增大而增大。从图10(b)中可知,钻孔曲面上流体速度变化并不平稳,在冲击面两侧速度发生了波动,这是由于在射流发展过程中,射流与周围水体间存在较大的速度梯度引起环境介质波动而产生大量尺度不一的涡旋,射流的发展过程会促进这些涡旋不断卷吸、分裂、合并,这些涡旋的运动充满了随机性,这些随机运动会对射流产生影响。

2.4 钻孔变形淹没射流破煤岩机制

为了探究钻孔变形比对射流冲击的影响,选择三组不同变形比进行对比,可见,淹没射流产生空化气泡,对钻孔曲面形成空蚀作用。如图11所示当 $M=0.5$ 时,反射流紧贴着钻孔曲面进行流动;当 $M=1.0$ 时,水介质中出现形成涡旋的趋势;当 $M=1.5$ 时,反射流沿着钻孔曲面流动一段距离后在水中形成涡旋。这些涡旋的形成位置、大小、稳定性等受到变形比的影响,变形比会影响涡旋的演化,在变形比较大时,流体受到的离心力较大,这可能导致涡旋的加速旋转且形成的涡旋越靠近冲击点,相反,在变形比较小时,离心力较小,涡旋可能减弱或消失^[19]。

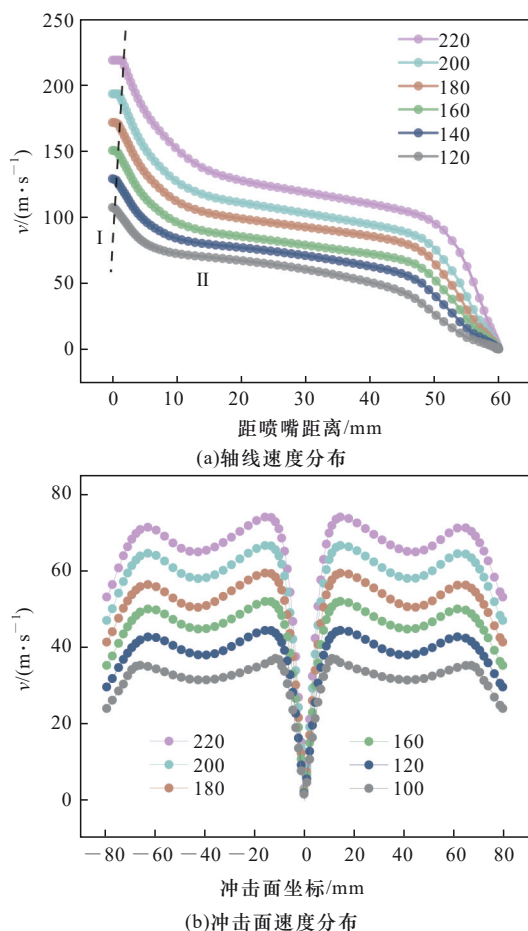


图 10 不同速度下淹没射流速度分布

Fig. 10 Velocity distributions of submerged jet at different velocities

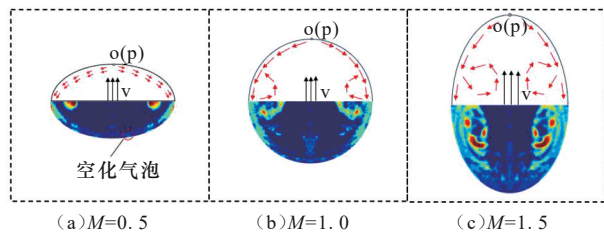


图 11 变形比对水射流冲击的影响

Fig. 11 Effect of deformation ratio on water jet impact

在上述模拟以及前人研究的基础上,得出淹没射流冲击钻孔的破煤岩机理^[20]如图 12 所示,射流冲击钻孔的机理可以分为以下 3 个过程:

1) 直接冲击: 高速流动的水射流冲击钻孔,能够在瞬间对煤岩产生强烈的冲击效应。这种高速冲击能够瞬间破碎和剥离煤岩表面的颗粒,形成破碎的煤岩颗粒。且射流的高速喷射会引起周围水介质的波动,形成水压力波。这些压力波在传播过程中可以对钻孔周围的煤岩施加额外的冲击力,促使岩石破碎,在此过程中形成冲击坑。

2) 反复冲刷: 射流在冲击钻孔后,受壁面影响会产生反射流,反射流的高速流动对煤岩表面产生的剥离效应,这种水力剥离有助于将煤岩颗粒从整

体岩体中剥离,提高破碎效率。反射流的高速流动会对钻孔侧壁进行反复冲刷,从而扩大冲击坑。

3) 卷吸作用: 随着水射流的直接冲击以及反射流对钻孔侧壁的不断冲刷,钻孔深度将会不断增大,导致钻孔变形比增大,流体受到的离心力较大,在钻孔侧壁位置处形成涡旋。形成的涡流会对壁面造成不断冲刷作用,进一步扩大冲击坑。

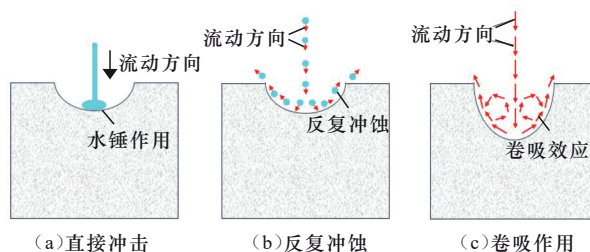


图 12 淹没状态下水射流冲击作用机理

Fig. 12 Mechanism of water jet impact in submerged state

水射流的作用只能使岩体中强度较弱的单元受到的拉应力或者剪应力超过其极限而直接破坏,而强度较高的单元则是由于裂隙连通发展,以剥离的形式脱离岩体^[21]。孔内淹没水射流破坏煤岩是由剪应力和主应力共同作用、空蚀作用以孔内涡旋共同作用的结果。如图 13 所示,破坏过程可以分为 3 个阶段:弹性变形阶段、损伤累积阶段和塑性破坏阶段。射流冲击钻孔,对钻孔中心形成压(主)应力,高主应力超过煤岩体抗压极限,快速破碎煤体强度较弱的结构。孔内涡旋的切削作用使得孔内壁上煤岩体产生不同方向的应变,这些应变共同作用不断形成新的破坏核。淹没射流破坏煤岩体一大主要特点就是产生空化气泡,形成空蚀作用,气泡的溃灭,使得钻孔壁面遭到反复冲击,引起钻孔壁面疲劳破坏,可以促进裂隙发展,剥离强度较高的煤岩体单元。

3 结论

1) 淹没射流冲击钻孔的整个形态可以分为三个区域:“初始段”“充分发展段”“壁面回流段”,淹没状态时水射流受到环境介质的影响,水射流大量动能用来克服环境阻力,其能量损失主要集中在喷嘴处,造成射流中心速度沿射流发展方向衰减速度由快变慢。

2) 淹没状态下改变钻孔变形比对水射流“壁面回流段”“充分发展段”影响显著,对水射流“核心段”几乎没有影响。随着钻孔变形比增大,接触面中心压强逐渐减小,但水射流对接触面中心的作用范围不断扩大,当变形比增大到 2.5 时,水射流对接触面作用范围扩大了 2.3 倍。且变形比增大可改变

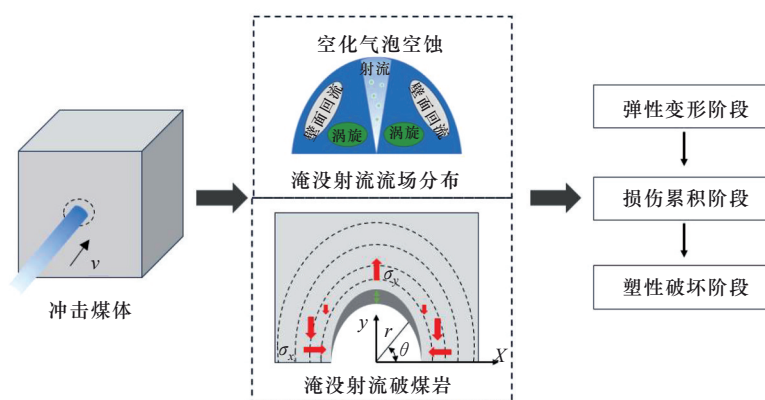


图13 孔内淹没水射流破岩机制示意图

Fig. 13 Schematic diagram of rock-breaking mechanism of in-hole submerged water jets

射流对钻孔曲面的影响方式,变形比增大射流经钻孔表面反射会形成涡旋,射流对壁面的压应力会转变为拉应力,对钻孔中心两侧壁面的冲刷效果也会转化为涡旋的冲蚀作用。

3)淹没状态下射流速度对水射流“核心段”影响较大,“核心段”长度随着射流速度增大而增大。射流速度越高,射流在环境介质中的形状越来越明显,可以提高射流的破岩效率,但同时也加剧了射流对水介质的扰动,对水射流冲击钻孔的过程造成影响。

4)不同变形比下射流的冲击作用机理分为:直接冲击、反复充蚀、卷吸作用三个过程。孔内淹没水射流破坏煤岩是由剪应力和主应力共同作用、空蚀作用与孔内涡旋共同作用的结果。

本文通过数值模拟的方式,研究了抽采钻孔变形对孔内淹没射流冲击特性的影响。缺少了现场实践的证明,具有一定的局限性,但是部分结果与国内外大量试验结果相符合,得到的部分结论可以方便地应用于实践中。

参考文献:

- [1] 王双明,申艳军,宋世杰,等.“双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J].煤炭学报,2023,48(7):2599-2612.
- [2] 徐凤银,侯伟,熊先钺,等.中国煤层气产业现状与发展战略[J].石油勘探与开发,2023,50(4):669-682.
- [3] 李向上,郑俊杰,宋彦琦,等.高瓦斯低透气性煤层聚能爆破增透机制[J].爆炸与冲击,2023,43(5):156-168.
- [4] 卢义玉,黄杉,葛兆龙,等.我国煤矿水射流卸压增透技术进展与战略思考[J].煤炭学报,2022,47(9):3189-3211.
- [5] 张金良,杨凤威,曹智国,等.大线速度下超高压水射流破岩试验研究[J].岩土力学,2023,44(3):615-623.
- [6] 任仲久.水力冲孔技术在低透气性突出煤层瓦斯抽采中的应用[J].煤炭工程,2019,51(3):65-70.
- [7] 孙四清,郑凯歌.井下高压水射流切割煤层增透效果数值模拟[J].煤田地质与勘探,2017,45(2):45-49.
- [8] 张永将,黄振飞,李成成.高压水射流环切割缝自卸压机制与应用[J].煤炭学报,2018,43(11):3016-3022.
- [9] 高亚斌,向鑫,郭晓亚,等.钻孔水射流冲击破煤岩特性及机制研究[J].振动与冲击,2022,41(23):51-59.
- [10] Han P Z, Gao Y B, Wang F, et al. Study on the influence of contact surface curvature on water jet impingement flow field and initial damage of coal seam[J]. Energy Science & Engineering, 2022, 10(9): 3331-3343.
- [11] 廖华林,李根生,李敬彬,等.径向水平钻孔直旋混合射流喷嘴流场特性分析[J].煤炭学报,2012,37(11):1895-1900.
- [12] 李德顺,马国林,郭涛,等.基于k-ε模型的剪切流中湍流动能衰减规律研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(9):83-87.
- [13] 高亚斌,郭晓亚,向鑫,等.圆形喷嘴水射流流场及形态结构特征分析[J].中国安全科学学报,2021,31(10):82-88.
- [14] 张春财,杜宇,赵润达.浅俯淹没射流水力特性[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):78-82.
- [15] 张贡赫,陈加琦,史鸿博,等.垂直淹没射流对泥沙冲刷效果影响的试验研究[J].水运工程,2022(12):17-24.
- [16] 徐超,秦亮亮,王凯,等.非均匀应力场瓦斯抽采钻孔扰动煤体变形破坏特征[J].煤炭学报,2023,48(4):1538-1550.
- [17] 宫伟力,赵海燕,安里千.高压水射流结构的红外热像特征[J].实验流体力学,2008,22(3):31-35.
- [18] 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.
- [19] 张欣玮,卢义玉,周哲,等.淹没磨料射流涡旋特性大涡模拟及研究[J].振动与冲击,2016,35(19):1-6.
- [20] Hong C Y, Yang R Y, Huang Z W, et al. Experimental investigation on coal-breakage performances by abrasive nitrogen-gas jet with a conical nozzle[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 142: 104781.
- [21] 常宗旭,邵保平,赵阳升,等.煤岩体水射流破碎机理[J].煤炭学报,2008,33(9):983-987.